



# Forschungslandschaft Schweiz

## Ein technologisches Panorama

Christian Holzner, Claudia Schärer, Stefan Scheidegger, Daniel Schmuki

Quelle Titelbild: Michael Dzedzic auf Unsplash

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>1</b>	Graphen-Transistoren .....	46	<b>Human Enhancement und neue Mensch-Maschinen-Schnittstellen</b> .....	<b>94</b>
<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>	Neuromorphe Elektronik .....	48	Bionics .....	96
<b>Methodik</b> .....	<b>4</b>	Quantencomputer .....	50	Brain-Machine-Interfaces .....	98
<b>Technologiegruppen und Forschungsgebiete</b> ....	<b>8</b>	Quanten- und Postquantenkryptographie ....	52	Chatbots – Konversationsagenten .....	100
<b>Autonome Systeme</b> .....	<b>10</b>	<b>Energie</b> .....	<b>54</b>	Mixed Reality .....	102
Autonome Fahrzeuge .....	12	Automatisierung der Stromnetze .....	58	Tragbare medizinische Geräte.....	104
Drohnen .....	14	Energy Harvesting.....	60	<b>Photonik</b> .....	<b>106</b>
Mobile Roboter .....	16	Fliegende Windenergieanlagen .....	62	Biophotonik .....	108
Softrobotik .....	18	Künstliche Photosynthese .....	64	Einzelphotonen-Technologien.....	110
<b>Bioinformatik und Biotechnologie</b> .....	<b>20</b>	Langzeitspeicherung von Energie .....	66	Photonisch integrierte Schaltungen.....	112
Bioelektronik .....	22	Mikrostrukturierte Fenster .....	68	<b>Soziale Innovationen</b> .....	<b>114</b>
Bioinformatik.....	24	Neue Batterietechnologien.....	70	Digitale Währungen .....	118
Molekulare Erkennung und Lab-on-a-Chip ..	26	Supergrids .....	72	Hochschullehre.....	120
<b>Biomedizin</b> .....	<b>28</b>	Thermoelektrische Farben .....	74	Lokale Lebensmittelkreise .....	122
3D-Biodruck.....	30	Wasserstoff.....	76	Mobilitätskonzepte .....	124
Genom-Editierung .....	32	<b>Fertigungsverfahren und Materialien</b> .....	<b>78</b>	Owning and Sharing Data .....	126
Mikrobiom.....	34	2D-Materialien.....	80	<b>Allgemeine Begriffserklärungen</b> .....	<b>128</b>
Regenerative Medizin .....	36	3D-Druck von grossen Gebäudeteilen.....	82	<b>Schlusswort</b> .....	<b>130</b>
<b>Datenverarbeitung und -übertragung</b> .....	<b>38</b>	4D-Druck .....	84	<b>Impressum</b> .....	<b>131</b>
5G .....	40	Abbaubare Sensoren .....	86		
Big Data und Maschinelles Lernen.....	42	Bioplastik.....	88		
Digitale Landwirtschaft.....	44	Metamaterialien .....	90		
		Selbstheilende Materialien .....	92		

---

## Einleitung

Veränderungen im Umfeld frühzeitig zu erkennen und sich vorausschauend darauf einzustellen, ist in einem zunehmend dynamischen und komplexen Umfeld ein zentraler Wettbewerbsfaktor. Daher bedürfen Entscheidungen über die künftige Ausrichtung der Forschung und die Verwendung der verfügbaren Mittel einer sorgfältigen Abklärung. Zukunftsanalysen auf technischer Ebene spielen dabei eine wichtige Rolle.

Für diese sogenannten Früherkennungsberichte werden verschiedene Ansätze verwendet, die mehrheitlich auf dem Prinzip des Horizon Scanning aufbauen. Ziel ist, die zukünftige Entwicklung von Wissenschaft und Wirtschaft zu erkennen, die Stärken und Schwächen der nationalen Forschung und Innovation zu bewerten und gegebenenfalls auf dieser Grundlage ein nationales Forschungs- und Innovationssystem zu definieren.

Der vorliegende Früherkennungsbericht versucht, diesem Informationsbedarf gerecht zu werden. In einem ersten Kapitel wird die allgemeine Methodik des SBFI für die Früherkennung und die Methodik der SATW für die Informationsgewinnung zu den einzelnen Technologiegruppen und Technologien beschrieben. Ein kurzes Zwischenkapitel assoziiert die neun beschriebenen Technologiegruppen mit 20 gängigen Schlagwörtern wie Datenmanagement, Ethik,

personalisierter Medizin, Treibhausgasemissionen und Energieeffizienz oder Umweltschutz. Die folgenden Kapitel sind identisch aufgebaut und beschreiben die neun Gruppen und die darin aufgeführten Technologien jeweils in alphabetischer Reihenfolge. Sie zeichnen ein Bild der Chancen und Risiken, aber auch der Forschungs- und Förderlandschaft sowie der Vernetzung in der Schweiz und assoziieren die einzelnen Technologien mit den bereits erwähnten Schlagwörtern. Ein Schlusskapitel fasst allgemeingültige Beobachtungen und Erkenntnisse zusammen, die im Laufe der Informationsbeschaffung gewonnen wurden.

Unser Dank geht an die rund 60 Expert:innen, ohne deren Fachwissen, Geduld und Engagement dieser Früherkennungsbericht nicht entstanden wäre.



# Methodik

## Identifikation der Technologiegruppen und Technologien

Früherkennung auf der Ebene einzelner Technologien ist riskant, da man selten wissen kann, ob eine Technologie erfolgreich sein wird oder nicht. Auf der anderen Seite ist eine Vorausschau auf nur drei oder vier vielversprechende Bereiche zu allgemein, um bei der Entscheidungsfindung hilfreich zu sein.

Es wurde deshalb eine Früherkennungsanalyse auf der Basis ausgewählter Einzeltechnologien und grosser Themen durchgeführt. Dazu wurden ähnliche Technologien sowohl einzeln beschrieben als auch zu Technologiegruppen zusammengefasst. Ein solches Vorgehen ermöglicht es, eine detaillierte Analyse der einzelnen Technologien durchzuführen und zugleich die Verbindung zwischen den einzelnen Technologien aufzuzeigen.

Die Liste der beschriebenen Technologien basiert primär auf dem SRIP-Report der EU (Science, Research and Innovation Performance of the EU 2020) und den Arbeiten der OECD (Science and Technology Outlook 2016). Relevante Früherkennungsberichte aus Deutschland (Technologisch souverän die Zukunft gestalten – BMBF-Impulspapier zur technologischen Souveränität), Finnland (100 opportunities for Finland and the world

– Radical Technology Inquirer (RTI) for anticipation/evaluation of technological breakthroughs) und von der SATW (Technology Outlook 2021) wurden ebenfalls berücksichtigt.

Der SRIP-Report der Europäischen Kommission schlägt neun Technologiegruppen vor. Diese wurden von der SATW aufgrund der eigenen Expertise und in Zusammenarbeit mit dem Expertennetzwerk angepasst und folgendermassen festgelegt: (1) Autonome Systeme, (2) Bioinformatik und Biotechnologie, (3) Biomedizin, (4) Datenverarbeitung und -übertragung, (5) Energie, (6) Fertigungsverfahren und Materialien, (7) Human Enhancement und neue Mensch-Maschine-Schnittstellen, (8) Photonik und (9) Soziale Innovationen.

## Methodisches Vorgehen

Informationen zu jeder Technologie wurden von der SATW nach folgendem Muster in Gesprächen mit oder in schriftlichen Beiträgen von Expert:innen eingeholt:

### Stand der Dinge/Definition

- Worum geht es in dieser Technologie? Was kann diese Technologie, was verspricht 'man' sich davon? Was ist das technologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Potenzial?

- Handelt es sich um *eine* definierte Technologie oder ist es ein Sammelbegriff für mehrere? Wenn ja, für welche?
- Relevanz für die Schweiz (in der Entwicklung und / oder in der Anwendung)?
- Relevanz für die Technologiegruppe?

### Hochschulen und Unternehmen in der Schweiz

- Welche Schweizer Hochschulen, Forschungsinstitutionen und Unternehmen sind in diesem Gebiet aktiv?
- Sind diese Akteure untereinander gut vernetzt und in nationale Netzwerke und Plattformen eingebunden?
- Sind diese Akteure international vernetzt und kompetitiv?
- Wer ist international führend? Wo sind die Hotspots?

### Förderung

- Wird diese Technologie bereits von der öffentlichen Hand unterstützt (SNF, Innosuisse, EU, kantonale Fördermittel)? Wenn ja, von welcher Organisation?
- Gibt es grosse, private Förderinitiativen?
- Ist die Förderung ausreichend?
- Wie kann der Bund die Technologie fördern? Braucht es andere Anreizinstrumente?

### Chancen

- Welche Möglichkeiten für Forschung, Wirtschaft und Gesellschaft ergeben sich durch die Technologie für die Schweiz?
- Schätzen Sie ein, wie realistisch es ist, dass die aufgelisteten Möglichkeiten eine Chance darstellen.

### Risiken

- Welches sind in der Schweiz die technologischen, regulatorischen und gesellschaftlichen Risiken / Hindernisse für die Entwicklung der Technologie, inkl. Kommerzialisierung?
- Schätzen Sie ein, wie realistisch es ist, dass die aufgelisteten Hindernisse eine Gefahr darstellen.

Die resultierenden Erkenntnisse wurden für jede Technologie in einem Fliesstext und einer kurzen Übersicht zur Forschungslandschaft und zur Vernetzung in der Schweiz zusammengefasst. Die Schlüsselaussagen zu allen Technologien aus einer Technologiegruppe, mit einem Fokus auf Chancen, Risiken und Förderung, bilden eine Einleitung zu jeder der neun Technologiegruppe und geben einen Überblick über die entsprechende Thematik.

---

### Assoziation der Technologiegruppen und Technologien mit Labels

Zusätzlich wird jede Technologiegruppe inhaltlich über Schlagwörter (sog. Labels) erschlossen. Dabei werden auf Stufe der einzelnen Technologien die jeweils passenden Labels zugeteilt, wobei deren 20 aus den Forschungsbereichen Digitale Welt, Energie und Umwelt, Fertigungsverfahren und Materialien, Life Sciences sowie Technik und Gesellschaft zur Auswahl stehen. Über alle Technologien einer Gruppe hinweg lässt sich dann feststellen, auf welche Art und Weise eine Technologiegruppe schwerpunktmässig die Zukunft zu gestalten vermag. Auch dies ist als Beitrag an die Früherkennung zu werten.

Labels		
	Automatisierung	AUTOMATISIERUNG umfasst die Themengebiete Robotik und autonome Systeme, die mittels künstlicher Intelligenz gesteuert werden. Solche Technologien werden vornehmlich, aber nicht ausschliesslich, zur Optimierung von Prozessen eingesetzt.
	Datenmanagement	DATENMANAGEMENT umfasst die Erhebung, Verwaltung und Speicherung von Daten sowie die Verarbeitung dieser Daten zur Gewinnung von handlungsleitenden Informationen.
	Internet of Things	Technologien mit Schlagwort INTERNET OF THINGS ermöglichen neue Dienstleistungen und Produkte dank der Vernetzung von (meist vormals nichtdigitalen) Geräten. Solcherart vernetzte Geräte erheben Daten und tauschen diese untereinander aus.
	Mikro- und Nanotechnologie	MIKRO- UND NANOTECHNOLOGIE bezeichnet Technologien zur Herstellung oder zum Einsatz von kleinstskaligen Materialien. Dazu gehören sowohl die Mikroelektronik als auch Materialien, die im Nanometerbereich angesiedelt sind (2D-Materialien).
	Sensortechnik	Das Label zeichnet Technologien aus, die SENSORTECHNIK als integralen Bestandteil nutzen oder zur Entwicklung neuartiger Sensoren beitragen.
	Energieerzeugung	Das Feld der ENERGIEERZEUGUNG umfasst Technologien zur Gewinnung von Energie, um sie in eine für die Anwendung nutzbare Form zu bringen (elektrischer Strom, Wärme, Bewegungsenergie, Brenn- oder Treibstoffe).

	Energiespeicherung und -übertragung	ENERGIESPEICHERUNG UND -ÜBERTRAGUNG beinhaltet Technologien, um Energie (insbesondere Strom und Wärme) für eine spätere Nutzung zu speichern und zu transportieren.
	Erneuerbare Energien	ERNEUERBARE ENERGIEN sind ein Teilbereich der Energieerzeugung. Sie umfassen die Nutzung von Energie aus der Umwelt (Wasserkraft, Wind, Solar und Geothermie) sowie aus nachwachsenden Rohstoffen im Gegensatz zu den nichterneuerbaren Energien (fossile Brennstoffe, Uran).
	Katastropheneinsatz	Technologien, die bei einem allfälligen Einsatz zur Bewältigung der Folgen von (Natur-)Katastrophen verwendet werden.
	Ressourcen und Kreislaufwirtschaft	Ressourcenschonende Technologien sind bei der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft von zentraler Bedeutung. Dazu bedarf es entsprechender Prinzipien im Produktdesign, Recycling auf Ebene der Bauelemente oder Rohstoffe sowie im Vermeiden von Abfällen.
	Treibhausgasemissionen und Energieeffizienz	TREIBHAUSGASEMISSIONEN UND ENERGIEEFFIZIENZ umfassen Technologien, die zur Senkung von Treibhausgasemissionen oder zur Verbesserung der Energieeffizienz beitragen.
	Umweltschutz	UMWELTSCHUTZ beinhaltet Technologien mit positiven oder verminderten negativen Auswirkungen auf Umwelt (insbes. Naturschutz und Biodiversität). Entwicklungen, die eine ressourcenschonendere Kreislaufwirtschaft sowie die Reduktion von Treibhausgasen begünstigen, sind zentral für nachhaltiges Wirtschaften und werden mit separaten Labels versehen.
	Neue Fertigungsverfahren	Additive und biotechnologische Fertigungsverfahren werden als NEUE FERTIGUNGSVERFAHREN bezeichnet.



### Gesundheitsversorgung

Diese Technologien haben einen positiven Einfluss auf die GESUNDHEITSVERSORGUNG. Dazu zählt die Gesundheitsprävention, Konzepte wie mHealth oder die Nutzbarmachung des Mikrobioms für personalisierte Nahrungsmittel. Die enger gefasste Medizintechnik wird mit einem eigenen Label versehen.



### Medizintechnik

MEDIZINTECHNIK meint Technologien oder künstlich erzeugtes biologisches Material zur Diagnose oder zur Behandlung von Krankheiten.



### Personalisierte Medizin

Das Paradigma der PERSONALISIERTEN MEDIZIN umfasst diagnostische, präventive und therapeutische Massnahmen, die auf ein Individuum zugeschnitten sind.



### Digitale Integrität

DIGITALE INTEGRITÄT betrifft den Schutz persönlicher Integrität unter der Prämisse einer digitalen Welt. Dazu zählen technologische Entwicklungen mit dem Ziel, die Sicherheit von Informationen und Daten herzustellen (Cybersecurity und Verschlüsselungsverfahren) sowie rechtliche, gesellschaftliche und wissenschaftsethische Fragen zum Persönlichkeits- und Datenschutz.



### Ethik

Im Zusammenhang mit der Erforschung, Entwicklung und Anwendung der jeweiligen Technologie ergeben sich relevante Fragen zur ETHIK, die der Klärung bedürfen. Etwa dadurch, dass die Forschung Tierversuche involviert, neuartige Eingriffe in den Körper oder die persönliche Unversehrtheit erfordert oder dadurch, dass durch den Einsatz von Bioinformatik Erkenntnisse über genetisch verwandte Personen anfallen.



### Innovation

Die INNOVATIONSKRAFT der Schweiz wird gestärkt durch das Ermöglichen neuer Geschäftsmodelle oder dadurch, dass sich durch die Entwicklung oder den Einsatz der Technologie Chancen auch für kleine Unternehmen und/oder Start-ups ergeben könnten.



### Wirtschaftsstandort Schweiz

Der WIRTSCHAFTSSTANDORT SCHWEIZ profitiert von Technologien, bei denen ein Grossteil der Wertschöpfungskette und damit auch die Arbeitsplätze in der Schweiz sind oder bei denen die Schweiz weltweit führend ist. Ebenfalls haben Technologien das Label Wirtschaftsstandort Schweiz, die gut zur DNA der Schweizer Industrie passen. Meist handelt es sich um interdisziplinäre High-tech-Anwendungen.

---

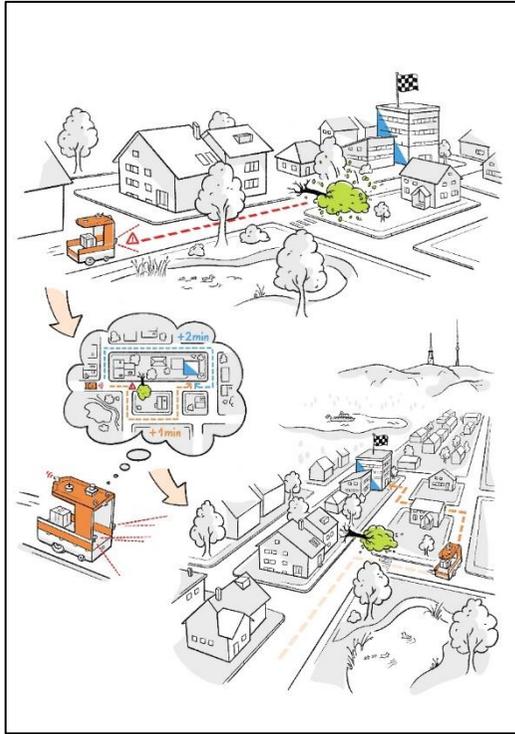
## Technologiegruppen und Forschungsgebiete

Um aufzuzeigen, auf welche Art und Weise eine Technologiegruppe schwerpunktmässig die Zukunft zu gestalten vermag, wird eine Verbindung mit 20 Schlagwörtern (sog. Labels) hergestellt. Diese decken die Forschungsbereiche Digitale Welt, Energie und Umwelt, Fertigungsverfahren und Materialien, Life Sciences sowie Technik und Gesellschaft ab.

Fast alle Technologiegruppen haben einen Bezug zur digitalen Welt. Auch fördern sie neuartige Anwendungen in den Life Sciences und haben Auswirkungen auf die Gesellschaft und den Wirtschaftsstandort Schweiz. Der Forschungsbereich Energie und Umwelt profitiert stark von Entwicklungen in der Technologiegruppe Energie sowie von Fertigungsverfahren und Materialien.

	Digitale Welt				Energie und Umwelt							Fertigung	Life Sciences			Technik und Gesellschaft					
Autonome Systeme	●	●	●		●					●		●		●						●	●
Bioinformatik und Biotechnologie		●		●	●						●		●		●	●	●	●	●		
Biomedizin													●	●	●	●	●	●	●	●	
Datenverarbeitung und Datenübertragung	●	●	●	●	●							●	●				●	●			●
Energie	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●				●	●
Fertigungsverfahren und Materialien	●		●	●	●			●	●	●	●	●	●			●	●			●	●
Human Enhancement und Mensch-Maschine-Schnittstellen	●	●	●		●								●	●	●	●	●	●	●	●	
Photonik		●		●	●			●				●				●		●		●	
Soziale Innovationen	●	●	●								●	●	●					●		●	●

**Tabelle 1** zeigt den Zusammenhang zwischen den neun Technologiegruppen und den 20 Labels. Jeder Punkt markiert einen unmittelbaren Bezug, eine konkrete Anwendung oder eine zu erwartende Auswirkung; ist kein Punkt vorhanden, besteht kein Bezug. Die drei Grössen der Punkte sind ein Mass dafür, wie viele der Technologien aus der entsprechenden Technologiegruppe in Zusammenhang mit einem Label stehen. Für einen kleinen Punkt sind es 1–33% der Technologien aus einer Gruppe, für einen Punkt mittlerer Grösse 34–66% und für einen grossen Punkt 67–100%.



Quelle: SATW

## Autonome Systeme

Autonome Systeme können ohne menschliche Steuerung ein vorgegebenes Ziel erreichen. Sie müssen in der Lage sein, in Echtzeit die Umgebung wahrzunehmen, Entscheidungen selbständig zu treffen und diese in Bewegung umzusetzen. Der Begriff umfasst autonome Fahrzeuge, autonome mobile Roboter und Drohnen: Sie alle sind auf Sensoren zur Wahrnehmung der Umwelt und auf leistungsfähige Prozessoren zur KI-gestützten Informationsverarbeitung angewiesen.

Nomen est omen: Im Gegensatz zu herkömmlichen Robotern können sich **MOBILE ROBOTER** (autonom) im Raum fortbewegen (→ S. 16). Sie versprechen vielfältige Anwendungen im Gesundheitswesen, in der Logistik und bei Katastropheneinsätzen. Dank Mobilisierung und Automatisierung können Industrieroboter in der Produktion von kleinen Losgrößen eingesetzt werden.

**SOFTROBOTER** (→ S. 18) sind im Grunde stationäre oder mobile Roboter mit Weichteilen. Dank dieser Eigenschaft haben sie die Fähigkeit, empfindliche Objekte zu greifen und gefahrlos mit Menschen zu interagieren. Das prädestiniert sie für medizinische Anwendungen, für alle Arten der **MENSCH-MASCHINE-INTERAKTION** (→ S. 94) und für Aufgaben, die mit herkömmlichen starren Robotern schwierig auszuführen sind. Das Gebiet wird

kaum von Grossfirmen bearbeitet und bietet für Start-ups interessante Chancen.

**DROHNEN** (→ S. 14) sind de facto fliegende Roboter. Sie finden Anwendung in der Inspektion von kritischen Infrastrukturen, in der Logistik, bei Katastropheneinsätzen und in der nachhaltigen Bewirtschaftung von Ackerland. Ein Grossteil der für Drohnen relevanten Technologien kann auch in der Entwicklung von anderen autonomen Systemen eingesetzt werden. Die Schweiz ist in der Entwicklung und Herstellung von professionellen Drohnen führend.

Werden **AUTONOME FAHRZEUGE** (→ S. 12) in der Schweiz kontrolliert ausgerollt und mit dem öffentlichen Verkehr verknüpft, bieten sie Chancen für eine bessere Nutzung der Verkehrsinfrastruktur, für neue Geschäftsmodelle und für die Inklusion von Personen ohne Führerausweis. Zugleich bleiben aber die Auswirkungen auf die Gesamtmobilität und Umwelt ungeklärt.

Autonome Systeme versprechen einiges an Chancen, offenbaren aber auch Probleme:

- Autonome Systeme können in Zukunft für Katastropheneinsätze und zur Inspektion von kritischen Infrastrukturen wie Brücken und Energieanlagen verwendet werden. Dies erhöht die Sicherheit der involvierten Personen und verhindert Unfälle.
- Die Bevölkerung steht Katastropheneinsätzen und Anwendungen in der Inspektion aufgeschlossen gegenüber, die Bedenken der Bürger:innen bei der Nutzung des Luftraums sollten aber unbedingt berücksichtigt

werden. Auch beim Einsatz im Gesundheitswesen ist es sinnvoll, dass die Bevölkerung vom Nutzen der Technologie überzeugt wird. Zudem sind zielführende Normen notwendig, um die Sicherheit der Systeme zu garantieren.

- Autonome Roboter sind komplex und setzen eine stark interdisziplinäre Denkweise voraus. Sie passen somit gut zur DNA der Schweiz, welche die Notwendigkeit der interdisziplinären Ausbildung früh erkannt hat und entsprechende Studiengänge anbietet.
- Autonome Systeme bergen viele Chancen für innovative Start-ups und KMU. Sie sind ein aufstrebendes Forschungsfeld mit attraktiven Fragestellungen und einem erfolgreichen Umfeld an Schweizer Hochschulen. Sie schaffen spannende Arbeitsplätze und haben eine hohe Wertschöpfung.

	Digitale Welt					Energie und Umwelt					Fertigung	Life Sciences			Technik und Gesellschaft						
Autonome Fahrzeuge	●	●	●		●						●									●	
Drohnen	●				●				●			●									●
Mobile Roboter	●				●				●				●								
Softrobotik	●				●								●								●

**Tabelle 2** zeigt den Zusammenhang zwischen den Technologien aus der Technologiegruppe autonome Systeme und den 20 Labels. Jeder Punkt markiert einen unmittelbaren Bezug, eine konkrete Anwendung oder eine zu erwartende Auswirkung.



## Autonome Fahrzeuge

Carolin Holland (SBB und SAAM),  
Martin Neubauer (PostAuto und SAAM)

Autonome Fahrzeuge können, sofern sie mit dem öffentlichen Verkehr verknüpft werden, auch in der Schweiz zu einem Game Changer in der Mobilität werden. Es müssen allerdings regulatorische Bevölkerung überwunden werden. Zudem sind die Auswirkungen auf die Gesamtmobilität und Umwelt noch nicht geklärt.

### Definition

Ein autonomes oder selbstfahrendes Fahrzeug kann in allen Situationen die Fahraufgabe komplett übernehmen (SAE Level 5), ein Fahrzeuglenker ist nicht mehr notwendig. Die Technologie stammt erstaunlicherweise nicht von Assistenzsystemen ab (auch wenn diese eingesetzt werden), sondern von der Forschung im Bereich der autonomen Roboter: Um ein klassisches in ein autonomes Auto – eigentlich nichts anderes als ein grosser autonomer Roboter – zu verwandeln, muss es «nur» mit genügend Computern, Datenanalysemethoden, Navigationshilfen und Sensorik ausgestattet werden. Initianten und Treiber sind vor allem Softwarehersteller, weniger die bekannten Automobilhersteller. Autonomes Fahren basiert auf künstlicher Intelligenz (→ **BIG DATA UND MASCHINELLES LERNEN**, S. 42), Robotik und

Sensorik, wobei das Zusammenspiel der genannten Faktoren relevant ist.

### Chancen

Autonomes Fahren gilt als Paradigmenwechsel, ist jedoch ein evolutionärer Prozess: Es gibt verschiedene Abstufungen im Grad der Autonomie, die technisch aufeinander aufbauen und teilweise sequenziell durchlaufen werden. Die Einführung der Technologie wird also nicht plötzlich erfolgen und sie wird zu Mischverkehr von Fahrzeugen unterschiedlichen Automatisierungsgrads führen. In amerikanischen Städten gibt es bereits autonome Fahrzeuge im kommerziellen Einsatz, Tendenz steigend. Auf Schweizer Strassen ist autonomes Fahren wegen der Rechtslage noch kein Thema. Es gab und gibt aber einige Pilotprojekte mit Buslinien. Die bevorstehende Revision des Strassenverkehrsgesetzes zeigt die Notwendigkeit, mit der das Thema behandelt werden muss.

Die langfristigen Auswirkungen sind noch ungewiss, bieten aber zahlreiche Chancen. Autonomes Fahren führt bei kollektiver Nutzung zu einem Effizienz- und Flächengewinn beim Parkraum, zu Kapazitätsgewinnen auf der Strasse und zu neuen Möglichkeiten für die Verkehrssteuerung. Dank autonomer Fahrzeuge nimmt die Zahl der Verkehrsunfälle ab, die damit verbundenen sozialen Kosten sinken und wegen tieferer

Betriebskosten können Dienste günstiger angeboten werden. Zudem steht die Nutzung autonomer Fahrzeuge auch Personen ohne Führerausweis offen, womit sich die Mobilitätsmöglichkeiten für die ganz jungen und alten Bevölkerungsgruppen und für Personen mit körperlicher Einschränkung deutlich ändern. Werden der öffentliche Verkehr und autonome Fahrzeuge nach dem Prinzip des Mobility-as-a-Service (→ **MOBILITÄTSKONZEPTE**, S. 124) verknüpft, kann die Mobilität kundenfreundlicher und nachfrageorientierter gestaltet werden. Im besten Fall werden Städte und Vorstädte dank autonomen Fahrzeugen grüner, integrativer und sicherer.

### Risiken

Als Herausforderung erweisen dürften sich das Bereitstellen der notwendigen digitalen Infrastruktur, die Organisation des Strassenraums (Stichwort: Mischverkehr) und notwendige rechtliche Anpassungen. Es ist momentan unklar, wie sich autonomes Fahren auf die Gesamtmobilität auswirken wird. Denkbar ist wegen der Vorteile der selbstfahrenden Autos eine erhöhte Fahrleistung mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Umwelt.

In der Umsetzung muss durch einen redundanten Aufbau sichergestellt sein, dass die Systeme innerhalb eines Fahrzeugs, aber auch diejenigen unterschiedlicher Fahrzeuge zuverlässig

miteinander kommunizieren. Die digitale Vernetzung macht die Fahrzeuge verwundbar für Hackerangriffe und ein kleiner Softwarefehler kann zu gravierenden Unfällen führen.

Aus gesellschaftlicher Sicht stellt vor allem die Akzeptanz der selbstfahrenden Autos im öffentlichen Raum ein Risiko dar. Verbraucher akzeptieren allerdings Innovationen, wenn ein Mehrwert auf den ersten Blick erkennbar ist und das Preis-Leistungs-Verhältnis überzeugt. Die in der Schweiz durchgeführten Umfragen zeigen jedoch, dass die Bevölkerung – auch dank zahlreicher Pilotprojekte – dem autonomen Fahren eher aufgeschlossen gegenübersteht.

---

## Förderung

Auch wenn es in der Schweiz Fördermittel gibt, bewegen sich diese im Vergleich zu Deutschland und dem restlichen Europa auf tiefem Niveau und sind nur für Grundlagenforschung, nicht aber für Pilotprojekte ausreichend. Schweizer Organisationen profitieren momentan noch von den zahlreichen EU-Fördermitteln.

Neben zusätzlicher finanzieller Förderung braucht es vor allem Klarheit in der Regulierung bezüglich der Bedingungen, welche erfüllt sein müssen, damit die Technologie kontrolliert in der Schweiz ausgerollt werden kann. Wünschenswert ist eine verstärkte Zusammenarbeit der

Kantone und Pilotprojekte, um die Gesellschaft auf den Wandel vorzubereiten.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universität Genf, BFH, HES-SO Fribourg und Valais-Wallis

*Firmen:* Embotech, Loxo, Siemens

*Organisationen und Verkehrsbetriebe:* ACS, Amag, auto-schweiz, Mobility, TCS, Bernmobil, PostAuto, SBB, Transports Publics Fribourgeois, Transport Public Genevois

*Vernetzung:* Die Akteure sind national und international vernetzt, im Verein Swiss Association for Autonomous Mobility organisiert und in internationalen Normungsgremien vertreten.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland (Volkswagen), Israel (Mobileye)

Weltweit: China (Baidu), USA (Cruise, Tesla, Waymo)



## Drohnen

Roland Siegwart (ETH Zürich)

**Die Schweiz ist in der Entwicklung und Herstellung professioneller Drohnen führend. Die Thematik passt wegen ihrer Interdisziplinarität gut zur Schweiz, schafft spannende Arbeitsplätze und generiert eine hohe Wertschöpfung. Kontinuität der bestehenden Fördermittel und die Ausbildung von kompetitivem Nachwuchs bleiben der Schlüssel zum Erfolg.**

### Definition

Eine Drohne ist ein unbemanntes Luftfahrzeug, das entweder von Menschen oder einem integrierten oder ausgelagerten Computer (fern-)gesteuert wird. Drohnen sind als Einzelobjekte oder als koordinierter Schwarm unterwegs. Sie können, wie in der Landwirtschaft, Teil eines komplexen Systems sein, wo die Drohne mit einem Mähdrescher kommuniziert. Die Technologie ist ein in sich geschlossener Begriff, beschreibt aber ein ganzes System, welches Aktorik, Autonomie / Navigation, künstliche Intelligenz, Sensorik und Systemdesign umfasst.

### Chancen

Es muss zwischen «Consumer-Drohnen», einem von China dominierten Markt, und professionellen Drohnen für den B2B-Einsatz unterscheiden werden. Zweitere sind in der Kartografie sowie in der Vermessung aus der Luft stark verbreitet. Dazu gehören in der Landwirtschaft die Überwachung der Felder (→ DIGITALE LANDWIRTSCHAFT, S. 44) zur präzisen Steuerung der Bewässerung und Pestizidverteilung sowie des Erntezeitpunkts, aber auch Katastropheneinsätze und die Inspektion von (kritischen) Infrastrukturen. Dies betrifft vor allem Brücken, Energieanlagen und Windturbinen, wo Drohnen in Zukunft in direktem Kontakt mit der Bausubstanz Vermessungen von Rost- und schützenden Farbschichten durchführen werden. Auch könnten grosse Drohnen langfristig Transporthelikopter und Kranen in räumlich anspruchsvollen Situationen ersetzen. Weitere Einsatzmöglichkeiten für spezialisierte Drohnen bieten sich bei FLIEGENDEN WINDENERGIEANLAGEN (→ S. 62).

Für die Schweiz bieten Drohnen zahlreiche Chancen. Es handelt sich um ein aufstrebendes Forschungsfeld mit attraktiven Fragestellungen und einem erfolgreichen Umfeld an Schweizer Hochschulen. Die Schweiz wird global auch weiterhin eine wichtige Rolle in der Herstellung von professionellen Drohnen hoher Qualität spielen. Diese Herstellung passt wegen ihrer Komplexität und Interdisziplinarität gut zur Schweiz, schafft

spannende Arbeitsplätze und hat eine hohe Wertschöpfung. Der Einsatz professioneller Drohnen in der Landwirtschaft erlaubt eine nachhaltige Bewirtschaftung der Felder und in der Überwachung von Infrastrukturen eine umfassende Datenerfassung und somit erhöhte Sicherheit. Zudem kann ein Grossteil der für Drohnen relevanten Technologien auch in der Entwicklung von autonomen (Lauf-)robotern (→ MOBILE ROBOTER, S. 16) und selbstfahrenden Fahrzeugen (→ AUTONOME FAHRZEUGE, S. 12) eingesetzt werden.

### Risiken

Aus technologischer Sicht bestehen keine Hindernisse, die zum Showstopper werden könnten. Jedoch ist der weltweite Marktzugang für Schweizer Firmen essenziell. Dazu gehören Fragen der Regulierung und Zulassung, welche die Schweiz in Abstimmung mit der EU lösen muss – ein Prozess, der ins Stocken geraten ist. Drohnenanwendungen für Katastropheneinsätze, in der Inspektion von Infrastrukturen und in der Landwirtschaft sind gesellschaftlich gut akzeptiert. Diese Akzeptanz hört bei Transportdrohnen auf. Der Einsatz dieser leistungsfähigen Drohnen muss hinterfragt, räumlich gut überlegt und reguliert werden, um gesellschaftsfähig zu sein. Allgemein stellt sich die Frage um die Nutzung des Luftraums und der Vermeidung von Konflikten.

---

## Förderung

Der SNF und Innosuisse haben einzelne Projekte in der Drohnen- und Roboterforschung unterstützt und die Vernetzung der akademischen und industriellen Akteure mit den NCCRs Robotics und Digital Fabrication sowie dem anlaufenden NTN Robotics gefördert. Das Wyss Zurich ist als relevante private Förderinitiative zu nennen. Auch ist das Interesse der Venture Kapitalgeber gewachsen. Die Forschung in der Schweiz hat in den vergangenen 15 Jahren stark von EU-Programmen profitiert. Insgesamt ist die Förderung ausreichend, wobei Kontinuität für die weitere Entwicklung unabdingbar ist.

Auf politischer Ebene wäre es hilfreich, wenn Gemeinden, Kantone und auch der Bund vermehrt als Kunden von jungen Unternehmen im Drohnenbereich auftreten würden. Dies würde die herausfordernde Skalierung von Start-ups erleichtern.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universität Zürich

*Firmen:* Aurora, Auterion, Daedalean AG, Dronistics, Dufour Aerospace, Flyability, Flybotix, Fotokite, Sensefly, Suind, Tinamu Labs, Verity, Voliro, Wingtra

*Vernetzung:* Die Akteure in der Schweiz kennen sich und sind gut vernetzt. Folgende Initiativen fördern die Vernetzung: NTN Robotics, Cybathlon, Drone Industry Association DIAS, RobotX, Swiss Autonomous Valley. International sind die Akteure vor allem über die Forschung gut vernetzt und kompetitiv. Zudem ist gut ausgebildeter, zahlreicher und international kompetitiver Nachwuchs vorhanden.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Schweiz

Weltweit: USA (MIT, Stanford und University of Pennsylvania)

Bei den kommerziellen Drohnen sind China und die USA führend.



## Mobile Roboter

Agathe Koller (OST)

Das Gebiet der mobilen Robotik befasst sich mit Robotern, die sich in einem dynamischen Umfeld fortbewegen können. In der Industrie könnte dies zu flexibel einsetzbaren Robotern führen, die nicht nur für eine Aufgabe vorgesehen sind. Dadurch könnte auch die Produktion von kleineren Stückzahlen kosteneffizient automatisiert werden. Auch für andere Aufgaben, etwa bei Katastropheneinsätzen, könnten mobile Roboter ihre Vorteile ausspielen.

### Definition

Heutige Industrieroboter sind werden oft stationär eingesetzt. Ein klassisches Beispiel sind Gelenkarmroboter in der Automobilindustrie. Mobile Roboter sind dagegen Roboter, die sich im Gegensatz zu herkömmlichen, stationären Robotern bewegen können. Dazu kann der Roboter auf einer mobilen Plattform montiert sein, über Räder verfügen oder mit Beinen ausgestattet sein. Fliegende mobile Roboter werden **DROHNEN** (→ S. 14) genannt, schwimmende mobile Roboter Unterwasserdrohnen oder Unterwasserroboter. Mobile Roboter können weiche Komponenten haben (→ **SOFTROBOTIK**, S. 18). Derzeit zeichnet sich ab, dass weiche Komponenten diese

auch leichter machen und sie dadurch agiler werden.

Mobile Roboter, die sich in strukturierten oder unstrukturierten Umgebungen autonom bewegen und eigenständig Aufgaben übernehmen können, werden autonome mobile Roboter genannt und sind Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Autonome mobile Roboter sollen sich dereinst auch flexibel einsetzen lassen. Am Einsatz von autonomen mobilen Robotern, die sich selbstständig in für sie unbekanntem Bereichen zurechtfinden, wird intensiv geforscht. Dazu bedarf es der Entwicklung einer semantischen Intelligenz (→ **BIG DATA UND MASCHINELLES LERNEN**, S. 42), die dergestalt aufgebaut ist, dass der Roboter seine Umgebung interpretieren kann und aus wenigen Umgebungsdaten die richtigen Schlüsse zieht. Ein weiteres Forschungsgebiet im Bereich der mobilen Robotik ist die Navigation. Dazu muss der Roboter mittels Sensoren seine Umgebung korrekt wahrnehmen und sich entsprechend bewegen.

Gerade autonome mobile Roboter versprechen einen vielfältigen Einsatz in den Industrie- und Dienstleistungssektoren. Derzeit wird an Anwendungen in der Logistik, etwa zur Lagerbewirtschaftung, oder in der Landwirtschaft gearbeitet (→ **DIGITALE LANDWIRTSCHAFT**, S. 44). Solche Roboter können sich ohne Anweisung von einer Aufsichtsperson bewegen und selbstständig Aufgaben übernehmen. Ein weiteres Einsatzgebiet, das

sich abzeichnet, sind Inspektions- oder Katastropheneinsätze. Im Gesundheitswesen, wo sie das medizinische Personal unterstützen sollen, bei der Medikamentenausgabe, bei Pflegeaufgaben oder zur Ferndiagnose von infektiösen Patienten wird ebenfalls am Einsatz von mobilen Robotern geforscht. Allerdings ist fraglich, wie es um die Akzeptanz von solchen Robotern steht.

### Chancen

In der industriellen Fertigung werden schon heute an vielen Orten Roboter eingesetzt. Allerdings handelt es sich dabei meist um stationäre Roboter mit einer vordefinierten Aufgabe, wie z.B. die einleitend erwähnten Greifarmroboter. Es gibt Anzeichen dafür, dass die Mobilisierung und Autonomisierung der Robotik die nächsten Schritte in der Industrie sein werden. Dadurch würden die Roboter flexibler und liessen sich auch für die Low-Volume-High-Mix-Fertigung einsetzen, was gerade für Schweizer KMU interessant sein wird.

Auch im privaten Bereich haben mobile Roboter grosses Potenzial. Solche Service Roboter können zum Beispiel ältere Menschen bei alltäglichen Tätigkeiten unterstützen und damit zu ihrer erhöhten Autonomie und Sicherheit beitragen.

Roboter sind generell eine teure Investition. Bei mobilen Robotern ist denkbar, dass die Roboter

flexibler und bedarfsgerechter eingesetzt werden können. Durch neue Geschäftsmodelle, etwa Miete statt Kauf, könnten Kosten und Leerlaufzeiten reduziert werden. Ausserdem ermöglicht eine Flexibilisierung der Kapazitäten dynamischere Produktionsprozesse, gerade auch für KMU.

---

### Risiken

Die derzeit existierenden Normen wie zum Beispiel ISO 13482 («Personal Care Roboter») betreffen nicht-industrielle Anwendungen. Für den Einsatz von mobilen Robotern in der Industrie gibt es derzeit weder spezifische Normen in Europa noch verbreitete Standards. Solche Normen würden Sicherheit schaffen und das Vertrauen in die Technologie stärken. Der Sicherheitsnachweis ist sehr aufwendig und bremst den Einsatz von mobilen Robotern in der Interaktion mit Menschen. Insbesondere im Bereich des Gesundheitswesens ist es beinahe unmöglich, Prototypen bei End-Usern frühzeitig zu testen. Schaffung und Flexibilisierung der rechtlichen Voraussetzungen würden der Forschung und Entwicklung einen Schub geben.

Während Industrieroboter schon lange etabliert sind, hat sich bei den mobilen Robotern am Boden noch kein Geschäftsmodell durchsetzen können. Wenn weitere Produkte aus dem Bereich marktreif sind, wird sich zeigen, ob und wie sie sich finanzieren lassen. Und ob auch flexiblere – auf Miete basierende – Modelle funktionieren.

---

### Förderung

Die Schweiz ist in der Forschung und Entwicklung von mobilen Robotern sehr gut positioniert. Das spricht auch dafür, dass die Forschungsförderung gut und bedarfsgerecht funktioniert. Da das Gros an Forschung im Bereich der mobilen Robotik noch Grundlagenforschung ist und es derzeit kaum Industrieprojekte im Bereich gibt, sind die Fachhochschulen noch nicht sehr aktiv auf dem Feld. Die Situation wird sich aber in den nächsten Jahren ändern, weil das Interesse der Industrie für diese Technologie stark zunimmt.

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, IDSIA, Universität Zürich, HSLU, OST, CSEM

*Firmen:* Anybotics, Bluebotics, FP Robotics, Sevensense Robotics, Voliro, Wingtra

*Vernetzung:* na

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR, Fraunhofer-Gesellschaft, TU München)

Weltweit: USA (Boston Dynamics)




---

## Softrobotik

Max Erick Busse-Grawitz (maxon),  
Robert Katzschmann (ETH Zürich)

Das Feld der Softrobotik ist ein Untergebiet der Robotik und beschäftigt sich mit der Frage, wie Roboter aus weichen Materialien hergestellt werden können. Das Gebiet wird derzeit kaum von Grossunternehmen bearbeitet und bietet so ein vielfältiges Feld für KMU und Start-ups, die allerdings förderliche Rahmenbedingungen und Zugang zu Risikokapital benötigen, um im Feld bestehen zu können.

---

### Definition

Softroboter sind Roboter, die komplett oder zum Teil aus weichen Materialien gebaut werden. Das Spektrum der Softrobotik reicht von gänzlich weichen Strukturen, die einem Oktopus nachempfunden sind, bis hin zu einer Mischung aus harten Materialien, deren Bewegungen über künstliche Muskeln und von weichen Verbindungen angetrieben werden. Die beiden Beispiele zeigen deutlich, dass die Softrobotik einen wesentlichen Teil ihrer Inspiration aus der Natur bezieht und diese versucht zu imitieren (→ BIONICS, S. 96).

Gegenüber klassischen Robotern haben so ausgelegte Roboter einige Vorteile. Sie können beispielsweise empfindliche Objekte wie Erdbeeren greifen oder können sich flexibel an ihre Umgebung anpassen. Ein weiterer Vorteil ist, dass sie in der Interaktion mit Menschen ungefährlich sind.

---

### Chancen

Viele der Basistechnologien für die Softrobotik sind bereits gut erprobt, für Anwendungen gibt es erste kommerzielle Prototypen. Obschon viele Anwendungen derzeit noch auf der Seite der Grundlagenforschung sind, macht das Feld der Softrobotik schnell Fortschritte und beginnt abzuheben. Die zentrale Herausforderung im Bau solcher Softrobotern besteht darin, Konvergenzen von Technologie und Nutzen herzustellen.

Das Feld der Softrobotik hat viele Zulieferer, die in der Schweiz präsent sind. Entsprechend dürfte die Entwicklung des Feldes einen positiven Einfluss auf weitere Industriezweige wie die Kunststoffindustrie und Hersteller von Pumpen und Sensoren haben.

Grossfirmen und etablierte Unternehmen sind derzeit im Feld der Softrobotik noch wenig aktiv. So bietet dieses Thema Platz für Start-ups, die von förderlichen Rahmenbedingungen und entsprechender Förderung profitieren würden.

---

### Risiken

Der Bereich der Softrobotik läuft derzeit unter dem breiteren Feld der Robotik. Die wichtigsten Akteure im Feld der Softrobotik haben zwar auch am zu Ende gehenden NCCR Robotics teilgenommen, allerdings fehlt es an einem Austausch im engeren Feld der Softrobotik.

Ein grosses Hindernis für den Einsatz und in der Entwicklung von Industrierobotern liegt im Sicherheitsnachweis. Hersteller sind verpflichtet, aufwändige, die Anwendungen stark verteuernde Prozedere durchzuführen, sodass sich deren Einsatz nicht mehr lohnt.

Ein weiteres Hindernis für eine vitale Start-up-Szeneliegt darin, dass das entsprechende Venture-Kapital in der Schweiz fehlt. Hightech Start-ups sind darauf angewiesen, schnell zu wachsen; fehlt das Kapital, hindert das deren Wachstumschancen stark oder führt dazu, dass solche Unternehmen abwandern oder aufgrund fehlender Aussichten gar nicht erst gegründet werden.

---

### Förderung

Kooperationen zwischen der akademischen Forschung und der Industrie würden das Feld stark voranbringen und wären für beide Seiten eine Bereicherung. Die Industrie könnte vom Know-how der Forschung profitieren und sich neue Kompetenzen aneignen, während die Forschung

von Fertigungsverfahren und dem Zugriff auf gefertigte Bestandteile profitieren würde. Da die Fertigung von Bestandteilen sehr komplex sein kann, ist es für die Forschung oft eine Herausforderung, an entsprechende Komponenten heranzukommen.

Gerade für Softroboter aus biologischen Materialien wie Stammzellen wären Plattformen sinnvoll, mit denen der Wissenstransfer zwischen den verschiedenen beteiligten Disziplinen sichergestellt werden kann.

---

### **Akteure in F&E**

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, ZHAW

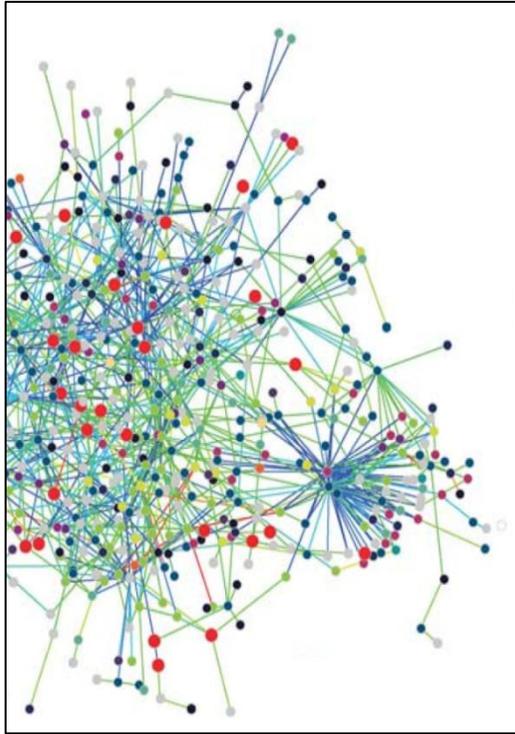
*Firmen:* Aeon Scientific, Anybotics, Femtotools, MagnetobotiX, Omnigrasp

*Vernetzung:* na

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland (TU Berlin), Grossbritannien (University of Cambridge), Niederlande (TU Delft)

Weltweit: Korea (Seoul National University), USA (Harvard, MIT, Stanford)



Quelle: Wikipedia

## Bioinformatik und Biotechnologie

Der Forschungsbereich umfasst mit **Bioelektronik, Bioinformatik und molekularer Erkennung** Technologien, die sowohl **Werkzeug als auch Werkbank** sind. Dank dieser **doppelten Eigenschaften** schaffen sie nicht nur für den **Forschungsplatz Schweiz weitreichende Möglichkeiten**, sondern **ermöglichen zahlreiche Anwendungen mit hohem Potenzial**.

Wie auch der Forschungsbereich **BIOMEDIZIN** (→ S. 27) sind diese Technologien starke Treiberinnen der **PERSONALISIERTEN MEDIZIN** (→ S. 128). Der Datengewinn aus bioelektronischen Anwendungen (→ **BIOELEKTRONIK**, S. 22) wie Sensoren und aus der **BIOINFORMATIK** (→ S. 24) auf der Ebene der einzelnen Patient:innen, aber auch die analytischen und diagnostischen Möglichkeiten der molekularen Erkennung tragen massgeblich zu einer auf das Individuum zugeschnittenen Behandlung bei. In der Kombination beschleunigen diese Technologien zudem die Wirkstoffentwicklung und -personalisierung und erhöhen die Spezifität der Behandlungen. Vielversprechende Chancen für Nachhaltigkeit und «grüne» Chemie bietet die **MOLEKULARE ERKENNUNG** (→ S. 26), wenn sie als Vorbild für eine bioinspirierte Kreislaufwirtschaft dient.

Die Technologien generieren grosse Mengen an Daten und die Gesellschaft profitiert von deren Nutzung. Ist dies in ökologischen Fragen unproblematisch, stellt sich bei personenbezogenen, sensiblen Daten die Frage, wer über sie verfügen darf und wozu sie über ihre ursprüngliche Bestimmung hinaus noch verwendet werden dürfen (→ **OWNING AND SHARING DATA: GESELLSCHAFTLICHE ASPEKTE**, S. 126). Die Thematik des Datenschutzes gewinnt an Bedeutung, was auch die Haltung in der Bevölkerung beeinflusst. Erkenntnisse über die genetische Prädisposition einer Einzelperson können zudem Auswirkungen auf genetisch verwandte Personen haben und zu ethischen Konflikten führen. Damit die Daten in der Forschung optimal genutzt werden können, sollten sie die **FAIR-Kriterien** (FAIR für «Findable, Accessible, Interoperable und Reusable») erfüllen. Daraus leitet sich auch eine grosse Chance ab, da alle Forschenden von frei verfügbaren Daten hoher Qualität profitieren.

Die Schweiz ist in den Bereichen der Life Sciences, Medizintechnik, pharmazeutischen Industrie und Sensorik traditionell stark – sowohl in der Forschung als auch in der Anwendung. Die Entwicklungen und Produkte passen dank interdisziplinären Fragestellungen, der komplexen Fertigung und den hohen Qualitätsansprüchen gut zur DNA der Schweizer Industrie. Dazu kommt, dass die Schweiz früh die Notwendigkeit der interdisziplinären Ausbildung erkannt hat und sowohl auf der Ebene der technischen Hochschulen als auch der

Fachhochschulen entsprechende Studiengänge anbietet. Mit Firmen wie Novartis und Roche, aber auch mit dem Swiss Institute of Bioinformatics ist die Schweiz an vorderster Front dabei.

Die neuen europäischen Regulatorien zu Medizinprodukten («Medical Device Regulation») und die politische Diskussion, einige der Anwendungen aus der molekularen Erkennung dem Gentechnikmoratorium zu unterstellen, sind ernstzunehmende Hindernisse. Die Regulatorien verlängern die europaweiten Zulassungsprozesse und das Gentechnikmoratorium birgt die Gefahr, dass das betroffene Teilgebiet der molekularen Erkennung an Attraktivität verliert und der Forschungsstandort Schweiz sowohl im privaten als auch öffentlichen Bereich geschwächt wird.

Der Forschungsbereich lebt von der Interdisziplinarität. Um diese zu fördern, wäre eine themenübergreifende Flagship Initiative der Innosuisse sinnvoll. Auch könnte der Bund die Schaffung von offenen Lern- und Umgebungsbedingungen prüfen, die – basierend auf dem bereits vorhandenen theoretischen und praktischen Wissen – iterativ neue Prozesse und Produkte entwickelt.

	Digitale Welt					Energie und Umwelt						Fertigung	Life Sciences		Technik und Gesellschaft					
Bioelektronik	●		●	●										●	●	●				
Bioinformatik	●														●	●	●			
Molekulare Erkennung und Lab-on-a-Chip										●		●	●		●					

**Tabelle 3** zeigt den Zusammenhang zwischen den Technologien aus der Technologiegruppe Bioinformatik und Biotechnologie und den 20 Labels. Jeder Punkt markiert einen unmittelbaren Bezug, eine konkrete Anwendung oder eine zu erwartende Auswirkung.



## Bioelektronik

Robert Grass (ETH Zürich),  
Simone Schürle-Fink (ETH Zürich)

Die Bioelektronik ist eine äusserst interdisziplinäre Technologie hoher Komplexität, die sich unter anderem mit der Entwicklung von Biosensoren befasst. Zukünftige Anwendungen finden sich vor allem in der personalisierten Medizin. Die Technologie ist für den Standort Schweiz, der für hohe Qualität in der Fertigung steht, eine grosse Chance.

### Definition

Die Bioelektronik kombiniert biologische und elektronische Bauelemente und macht sie technisch nutzbar. Dies ist nur möglich, da die Informationsübermittlung sowohl in biologischen als auch in elektronischen Systemen mittels elektrischer Impulse geschieht. Im Zentrum der bioelektronischen Forschung stehen unter anderem Biosensoren, biologisch gesteuerte Implantate und Prothesen (→ BIONICS, S. 96) und DNA-Computer, wobei sich letztere im Anfangsstadium der Entwicklung befinden. Bekannte Beispiele, die bereits erfolgreich eingesetzt werden, sind Herzschrittmacher und Insulinpumpen. Bioelektronik ist ein Sammelbegriff, der Sensorik, Analytik und im weitesten Sinn auch BIOINFORMATIK (→ S.20) umfasst.

### Chancen

Die Bioelektronik beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie biologische Information in elektronische Signale umgewandelt werden kann und wie mit elektronischer Information biologische Systeme beeinflusst werden können. Klassisches Beispiel für die Umwandlung biologischer Signale in elektrische sind die Biosensoren: Diese „spüren“ wie im Fall der Insulinpumpe den Zustand des biologischen Systems und reagieren darauf beispielsweise mit Wirkstofffreisetzung. Die heutige Medizin verfügt noch über wenig elektronischen „Input“. Werden Biosensoren – wozu auch medizinische Wearables (→ TRAGBARE MEDIZINISCHE GERÄTE, S. SEITE 104) gehören – vermehrt eingesetzt, führt dies zu einem Datengewinn, also einem Output auf individueller Ebene, der Basis für die personalisierte Medizin ist. In Kombination mit der BIOINFORMATIK (→ S. 20) können die Daten von mehreren Individuen aggregiert werden, was beispielsweise die Echtzeitüberwachung von ansteckenden Krankheiten ermöglicht. Cochlea-Implantate und Hirnschrittmacher sind Beispiele für die Beeinflussung biologischer Systeme mit elektronischen Signalen (→ BRAIN-MACHINE-INTERFACES, S. 98). Sie finden momentan auf makroskopischer Ebene statt. Gelingt es, die Signalübertragung auf Gebiete im Mikro- oder Nanometerbereich zu beschränken, bieten sich Chancen für Behandlungen mit erhöhter Spezifität. Eine zweifache Signalumwandlung, von biologisch zu elektronisch und wieder zurück, ist für die Entwicklung

biologisch gesteuerter Prothesen eine unabdingbare Voraussetzung. Ein weiterer Trend der Bioelektronik geht dahin, biologische Bauteile ausserhalb der biologischen Umgebung als Werkzeug zu nutzen. DNA-Computer basieren auf diesem Ansatz und nutzen die Eigenheiten der Erbsubstanz zur Datenspeicherung und -verarbeitung. Man erhofft sich davon Computer mit hoher Rechenleistung.

In der Schweiz ist sowohl die Medizintechnik als auch die Sensorik (→ ABBAUBARE SENSOREN, S. 86; → THERMOELEKTRISCHE FARBEN, S. 74) industriell gut verankert. Die Produkte passen dank interdisziplinären Fragestellungen, der komplexen Fertigung und dank hoher Qualitätsansprüche gut in die Schweizer Tradition. Somit ist die Bioelektronik für die Schweiz sehr relevant. Dazu kommt, dass die Schweiz die Notwendigkeit der interdisziplinären Ausbildung in den Ingenieurwissenschaften früh erkannt hat und interdisziplinäre Studiengänge anbietet.

### Risiken

Ein Hindernis stellen die neuen Regulatorien zu Medizinprodukten dar, da sie eine deutlich umfassendere und demnach aufwändigere technische Dokumentation als bis anhin verlangen. Sie sind aber ein wichtiger Schritt, um eine hohe Produktqualität zu sichern. Der verstärkte Einsatz von Bioelektronik führt zu einer Erhöhung der

Anzahl Messungen. Die Gefahr, sich zu sehr auf Daten zu verlassen, und die Gefahr von fehlerhaften Messungen steigen. Auch sind momentan in der Gesellschaft die Ängste vor der Technologie grösser als die Wahrnehmung des Nutzens.

Die Präzision, mit der elektronische Signale platziert werden können, muss für weitere Anwendungen der Bioelektronik an die Dimensionen der Biologie im Nanometerbereich angepasst werden. Auch wird noch viel Forschung notwendig sein, um die benötigten Grenzflächen zwischen der Elektronik und dem Körper zu bauen.

---

## Förderung

Die Fördermittel stammen mehrheitlich von den technischen Hochschulen, aus der Industrie und von der Gebert RUF Stiftung. Förderung im Rahmen von EU-Projekten war bis anhin ebenfalls möglich. Erfolgreiche Bewerbungen beim SNF sind hingegen schwierig. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass Gesuche zu wenig von interdisziplinären Gruppen beurteilt werden.

Die finanzielle Förderung ist ausreichend und die technischen Hochschulen verfügen über genügend Mittel und Weitsicht, die für Bioelektronik wichtigen interdisziplinären Projekte zu fördern. Was fehlt, ist ein nationales Netzwerk. Ein solches könnte vermutlich durch eine angepasste Förderpolitik forciert werden, indem auf Förderung von Einzelforschenden verzichtet wird.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, CSEM

*Firmen:* Biotronic, Roche Diagnostics, Zurich Instruments; am Rand Hamilton und Tecan

*Vernetzung:* Die Akteure sind innerhalb der Schweiz schlecht vernetzt, aber international ausgerichtet und kompetitiv.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Israel

Weltweit: USA (Harvard, MIT, Stanford, University of Washington)



## Bioinformatik

Robert Ivanek (Universität Basel)

**Bioinformatik ist aus der biowissenschaftlichen Forschung für die Planung, Optimierung und Auswertung von Experimenten nicht mehr wegzudenken. Sie ist für die Schweiz mit ihren ausgeprägten Stärken in den Life Sciences eine grosse Chance zur Stärkung des Forschungs- und Arbeitsplatzes. Mit dem Swiss Institute of Bioinformatics verfügt sie zudem über eine einzigartige Forschungs- und Lehrinstitution mit internationaler Definition**

Bioinformatik bezeichnete ursprünglich die Sequenzanalyse der Erbinformation verschiedener Organismen und der Körpereweisse wie Enzyme. Unterdessen ist daraus eine interdisziplinäre Wissenschaft geworden, die Probleme aus den Life Sciences mit computergestützten, theoretischen Methoden löst. Wesentliche Bausteine der Bioinformatik sind Erhebung, Analyse, Integration und Verwaltung biologischer Daten. Bioinformatik ist ein multidisziplinäres Forschungsfeld, das sowohl Informatiker und Mathematiker, aber auch Statistiker, Biologen und Physiker anzieht.

### Chancen

Bioinformatik ist wie **GENOM-EDITIERUNG** (→ S. 32) Werkzeug und Forschungsgebiet zugleich.

Forschende in der biologisch-medizinischen und der chemischen Forschung nutzen Bioinformatik für die Planung und Optimierung ihrer Experimente sowie für die Analyse der generierten Daten. Forschende profitieren dabei von der freien Verfügbarkeit und vom hohen Qualitätsstandard der bioinformatischen Daten und Werkzeuge, welche mehrheitlich die FAIR-Kriterien «Findable» (Auffindbar), «Accessible» (Zugänglich), «Interoperable» (Interoperabel) und «Reusable» (Wiederverwendbar) erfüllen. Verfahren wie das High-Throughput-Screening, also das Durchführen zehntausender biologischer, chemischer, genetischer oder pharmakologischer Tests pro Experiment und die damit verbundene Analyse von grossen Mengen an Daten (→ **BIG DATA UND MASCHINELLES LERNEN**, S. 42), wurde nur dank Bioinformatik möglich. Solche Screenings umfassen unter anderem die Sequenzanalyse der Erbinformation von Populationen oder Individuen oder die Analyse der Genaktivität. Letztere erlaubt es, das zeitliche, örtliche und allenfalls krankheitsbedingte Muster zu beschreiben, mit dem Gene und ihre Produkte im Körper aktiv sind. Bioinformatik als Werkzeug beschleunigt somit die Wirkstoffentwicklung und öffnet den Weg zur **PERSONALISIERTEN MEDIZIN** (→ S. 128). Grosse Hoffnung ruht auf der Kombination von bioinformatischer Forschung und künstlicher Intelligenz (→ **BIG DATA UND MASCHINELLES LERNEN**, S. 42), um z.B. die räumliche Struktur von Eiweissen basierend allein auf der Gensequenz und ohne aufwändige

und zeitintensive Experimente wie die Röntgenkristallographie vorherzusagen. Wirkstoffe könnten so designt werden, dass sie optimal an Enzyme binden **MOLEKULARE ERKENNUNG** (→ S. 26) und maximale Aktivität entwickeln.

Die Schweiz verfügt über ausgeprägte Stärken in den Life Sciences und der pharmazeutischen Industrie. Entsprechend ist die Bioinformatik eine grosse Chance zur Stärkung des Forschungs- und Arbeitsplatzes. Mit dem Swiss Institute of Bioinformatics verfügt sie zudem über eine einzigartige Forschungs- und Lehrinstitution mit internationaler Ausstrahlung, welche die besten Forschenden anzieht und eine Plattform für verschiedene international genutzte Datenbanken ist.

### Risiken

Bioinformatik beruht auf und generiert Daten. Es muss sichergestellt sein, dass Datenerhebung und -verwaltung den FAIR-Prinzipien folgen, um Integration, Standardisierung und Reproduzierbarkeit sicherzustellen. In der akademischen Forschung ist dies in der Schweiz üblich. Wegen des Föderalismus ist dies bei den Spitälern allerdings nicht sichergestellt.

Bioinformatik generiert unter anderem sensible Daten von Individuen. Es stellt sich die Frage, wer über die Daten verfügen darf und wozu sie über ihre ursprüngliche Bestimmung hinaus noch

verwendet werden dürfen oder ob gar Lösungsansprüche geltend gemacht werden dürfen (→ OWNING AND SHARING DATA: GESELLSCHAFTLICHE ASPEKTE, S. 126). Datenlecks müssen vermieden werden. Zudem haben Erkenntnisse über genetische Daten einer Einzelperson möglicherweise auch Auswirkungen auf genetisch verwandte Personen dieses Individuums. Dies kann zu ethischen Konflikten führen.

---

### Förderung

Forschung und Anwendung werden vom SBFI (Swiss Personalized Health Network), dem SNF und der Innosuisse gefördert, Infrastrukturen wie das Swiss Institute of Bioinformatics zu grossen Teilen vom SBFI. Im privaten Bereich treten pharmazeutische Firmen wie Novartis und Roche, aber auch Stiftungen wie die Krebsliga als Sponsoren auf.

Im europäischen Raum bestehen Fördermöglichkeiten im Rahmen vom European Research Council. ELIXIR ist eine zwischenstaatliche Organisation, die biowissenschaftliche Ressourcen in ganz Europa koordiniert, damit Forschende leichter Daten finden, analysieren und gemeinsam nutzen können. Die Schweiz ist mit dem Swiss Institute of Bioinformatics vertreten und profitiert so ebenfalls von ELIXIR.

Die Forschungskompetenzen in der Schweiz werden im Swiss Institute of Bioinformatics gebündelt. Somit ist dessen Weiterbestehen mit einem ausreichenden finanziellen Budget der Schlüssel zum Erfolg für die schweizerische Bioinformatikforschung.

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* alle Schweizer Hochschulen, Swiss Institute of Bioinformatics

*Firmen:* GeneData, Google, IBM Research Zurich, Novartis, Roche, Skylight

*Vernetzung:* Die Schweizer Forschenden sind im Swiss Institute of Bioinformatics vernetzt, welches international ein hohes Ansehen genießt und die internationale Vernetzung fördert.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland (Max-Planck-Institut Berlin), Grossbritannien (European Bioinformatics Institute und Welcome Trust), Schweiz

Weltweit: China (Peking), Japan, USA



## Molekulare Erkennung und Lab-on-a-Chip

Daniel Gygax (SATW)

**Die molekulare Erkennung ist eine Basistechnologie, die in Kombination mit anderen Technologien das Potenzial hat, Wertschöpfungsketten in Gesundheit und Ökologie zu transformieren. Neuartige Entwicklungen können Ausgangspunkt für eine von biologischen Systemen inspirierte Kreislaufwirtschaft sein.**

### Definition

Molekulare Erkennung («molecular recognition») bezeichnet die schwache Wechselwirkung zwischen Molekülen, die zur Bildung eines Molekülkomplexes führt. Die Erkennung erfolgt nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip und ist eines der wichtigsten chemischen Ereignisse in natürlichen biologischen Systemen. Die Bindungen sind unterschiedlich stark und spezifisch. Diese Eigenschaft macht die molekulare Erkennung zur Basistechnologie, die durch Verknüpfung mit anderen Technologien zu vielen Anwendungen in den Gebieten der Gesundheit und Ökologie führt.

### Chancen

In der pharmazeutischen Wertschöpfungskette wird die molekulare Erkennung eingesetzt, um Therapeutika wie Antikörper, chemische Wirkstoffe, Impfungen, Proteine und Naturstoffe effektiv und sicher herzustellen, in ihrer Wirkung zu verbessern oder für eine gezielte Freisetzung des Wirkstoffs in spezifische Zelltypen zu transportieren.

(Bio-)Analytik und Diagnostik beruhen ebenfalls auf den Prinzipien der spezifischen molekularen Wechselwirkung. Sie erlaubt bei Lebensmitteln die Messung von Qualitätsindikatoren und kann in Umweltproben potenziell gefährliche Substanzen nachweisen. In der Medizin können dank der molekularen Erkennung spezifische krankheitsrelevante Marker bestimmt und nachgewiesen werden, ein Vorgehen, das sowohl präventiv als auch diagnostisch eingesetzt wird. Labs-on-a-Chip sind Mikroanalysegeräte, die auf den Prinzipien der spezifischen Interaktion von Molekülen basieren und die gleichzeitige Durchführung von mehreren Laboranalysen im Kreditkartenformat erlauben. Sie spielen z. Bsp. bei Corona-Schnelltests und Schwangerschaftstest, aber auch bei der Blutzuckermessung für Diabetiker eine Rolle. Solche Testsysteme sind kosteneffizient und einfach in der Handhabung und sind ein wesentliches Element der Point-of-Care-Diagnostik, also der dezentralen Diagnostik nahe am Ort der Nachfrage. Heimanwender können die

Ergebnisse via Smartphone an den zuständigen Arzt, die Apotheke oder das Spital übermitteln – sie werden zu Akteuren im mHealth-Ökosystem (→ S. 128) (→ TRAGBARE MEDIZINISCHE GERÄTE, S. 104). Die neue Generation dieser Analysegeräte kombiniert Technik und Analyse von Big Data (→ BIG DATA UND MASCHINELLES LERNEN, S. 42) und versucht, die Relevanz der in vitro gewonnenen Daten für den ganzen Körper abzuleiten.

Molekulare Erkennung ist spezifisch und reversibel. Diese Eigenschaften könnten in Zukunft auch für nachhaltige Stoffkreisläufe eine wichtige Rolle spielen. Entwurf, Herstellung und Optimierung chemisch aktiver Moleküle ermöglichen hochselektive Rückgewinnungs- und Fertigungstechnologien für verschiedene Komponenten selbst aus sehr komplexen Ausgangsmaterialien. Neuartige chemische Prozesse, die auf molekularer Erkennung basierende Enzyme und chemische Katalysatoren setzen, können einen wesentlichen Beitrag zur „grünen“ oder nachhaltigen Chemie leisten.

Die molekulare Erkennung ist bereits in vielen Anwendungen realisiert, wobei die grösste Wertschöpfung mit pharmazeutischen Wirkstoffen wie den therapeutischen Antikörpern erwirtschaftet wird. Die Schweiz ist mit Novartis und Roche an vorderster Front dabei und die Wertschöpfung mit den Antikörpern ist so hoch, dass sie signifikant für den nationalen Wohlstand ist.

Für die Schweiz sind aber auch Anwendungen in der Diagnostik von Bedeutung. Themen wie biologischen Systemen nachempfundene Kreislaufwirtschaft werden an Bedeutung gewinnen.

---

## Risiken

Risiken für Produkte und Prozesse, die auf molekularer Erkennung basieren, liegen in deren bedingter Stabilität und Spezifität. Was im Kontext der ursprünglichen biologischen Systeme vorteilhaft ist, erweist sich im Kontext eines technischen Systems als Herausforderung.

Technologien zur **GENOM-EDITIERUNG** (→ S. 32) wie CRISPR / Cas9 basieren ebenfalls auf molekularer Erkennung. Noch ist unklar, ob diese auch dem Gentechnikmoratorium unterstellt werden. Falls dies der Fall sein sollte, verliert dieses Teilgebiet an Attraktivität und der Forschungsstandort Schweiz wird sowohl im privaten als auch im öffentlichen Sektor geschwächt.

Diese Basistechnologie steht in Konkurrenz mit anderen Technologien. Oft sind es kurzzeitige ökologische Überlegungen, die sie nicht konkurrenzfähig erscheinen lassen und Veränderungen in den Abläufen von Wertschöpfungsketten verhindern. Gesellschaftlich stellt vor allem die kritische Haltung bezüglich der Einführung neuer (Gesundheits-)Technologien ein Risiko dar. Die Debatten sollten nicht zu Verboten führen,

sondern zu Lösungen, die die Gesellschaft zeitnah weiterbringen.

---

## Förderung

Molekulare Erkennung spielt bei einigen NCCRs (AntiResist, Suchcat, Bio-Inspired Stimuli-Responsive Materials, RNA & Disease) und NFPs (Covid-19, Antimikrobielle Resistenz, Stammzellen und Regenerative Medizin, Intelligente Materialien) eine Rolle. Innosuisse und EU-Projekte unterstützen Umsetzungsprojekte in den Life Sciences. Private Finanzierung erfolgt unter anderem durch die Fondation Botnar, die Gebert Rüt Stiftung, die Novartis und das Wellcome Trust Funding.

Die Schweiz gehört bei den OECD-Staaten in die Spitzengruppe, was die Unterstützung von Forschungsvorhaben betrifft. Da die wirtschaftliche Bedeutung von Biotechnologie, Life Sciences und Medizintechnik für die Schweiz sehr hoch ist, kann man davon ausgehen, dass diese Sektoren ihre Forschung ausreichend finanzieren.

Um die Interdisziplinarität der Technologie zu fördern, wäre eine Flagship Initiative der Innosuisse denkbar. Auch könnte der Bund die Schaffung von offenen Lern- und Umsetzungswerkstätten prüfen, die – basierend auf dem bereits vorhandenen theoretischen und praktischen Wissen über die molekulare Erkennung – iterativ neue Prozesse und Produkte entwickeln.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* Wird an allen Schweizer Hochschulen mit Instituten in den Life Sciences als Werkzeug eingesetzt. Schwerpunkte: EPFL, ETH Zürich in Basel, Universität Basel mit Schweizerischem Tropen- und Public Health-Institut, Swiss Nanoscience Institute und Universitätsspital Basel, Universität Genf, CSEM, Empa, Wyss Center Geneva

*Firmen:* alle Firmen im Bereich der Life Sciences, inkl. der grossen Pharmaunternehmen

*Vernetzung:* Die Vernetzung innerhalb der nationalen Netzwerke und Plattformen ist gut. An verschiedenen Hochschulen sind interdisziplinär aufgestellte Kompetenzzentren entstanden. Die Schweizer Akteure sind an internationalen Kollaborationen beteiligt.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Dänemark, Deutschland, Grossbritannien, Niederlande, Schweden

Weltweit: China, Japan (University of Tokyo), Südkorea, USA (unter anderem mit dem Wyss Institute Boston)



Quelle: Wyss Zurich

## Biomedizin

Die Biomedizin ist ein junges Forschungsgebiet, das im Grenzbereich von Humanmedizin und Biologie fungiert. Es handelt sich dabei, wie der Name vermuten lässt, um ein interdisziplinäres Fachgebiet, das ein Wegbereiter für die personalisierte Medizin ist. Werden die ethischen und juristischen Fragen im Sinne der Patient:innen geklärt und wird das Unternehmertum gestärkt, bietet die Biomedizin für die Schweizer Gesellschaft und Wirtschaft grosse Chancen.

Die biomedizinische Forschung ist eine starke Treiberin der **PERSONALISIERTEN MEDIZIN** (→ S. 128). Darunter versteht man eine auf das Individuum zugeschnittene Behandlung, welche auch Erkenntnisse aus den individuellen Charakteristika des Erbguts einbezieht. Sie beschränkt sich nicht nur auf den angepassten Einsatz von klassischen Therapeutika, sondern setzt auch auf Therapien mit patienteneigenen, modifizierten Zellen, mit ganzen Geweben oder im Fall der **MIKROBIOM**therapie auf die Darmflora (→ S. 34). Technologien wie die **REGENERATIVE MEDIZIN** (→ S. 36) versprechen nicht nur eine Behandlung der typischen Volkskrankheiten wie Alzheimer, Diabetes und Krebs, sondern auch deren Heilung. Die Schweiz ist in den pharmazeutischen Wissenschaften und in der Biotechnologie, aber auch in den relevanten Ingenieurwissenschaften traditionell stark und international kompetitiv. Zudem ist, im

Gegensatz zu zahlreichen anderen Ländern, das Ökosystem vorhanden, um Forschungsergebnisse zu kommerzialisieren und die Arbeitsplätze im Land zu halten. Personalisierte Medizin lebt von patientenspezifischen Daten und generiert eine grosse Menge an persönlichen Gesundheitsdaten. Das wirft Fragen zum Schutz der Privatsphäre und zur Kontrolle über diese sensiblen Daten auf (→ **OWNING AND SHARING DATA: GESELLSCHAFTLICHE ASPEKTE**, S. 126)

Der breite Einsatz der Technologien steht erst am Anfang. Somit bietet sich die Chance, sich frühzeitig proaktiv mit den ethischen und juristischen Fragen rund um Datenschutz und Dateneigentum zu befassen, anstatt auf Streitfragen zu warten und dann zu reagieren.

Anwendungen in der Biomedizin leben vom Einsatz und der Veränderung von menschlichen Zellen, um Krankheiten besser zu verstehen und zu behandeln. Aus ethischer Perspektive sind daher Chancen und Risiken zu thematisieren. Dank Technologien wie **3D-BIODRUCK** (→ S. 30) und **GENOM-EDITIERUNG** (→ S. 32) können kleine Modelle von menschlichen Geweben und Organen im Labor gezüchtet und für die pharmakologische und toxikologische Forschung verwendet werden. Dadurch kann die Anzahl Tierversuche deutlich reduziert werden, sofern solche Modelle auf regulatorischer Ebene als vollwertiger Ersatz für Tiere eingestuft werden. Es stellt sich einerseits die Frage nach der Akzeptanz in der Gesellschaft,

wobei sich die Schweizer Bevölkerung in biomedizinischen Fragen tendenziell innovationsfreundlich zeigt und diese Haltung durch verbesserte Kommunikation von Seiten der Wissenschaft noch verstärkt werden könnte. Andererseits stellt sich auch die Frage nach der ethischen Grenze, die in der Schweiz und in der EU durch die Gesetzgebung klar geregelt ist mit dem Ziel, die Würde des Menschen zu wahren. Ein nicht zu unterschätzendes Risiko stellt allerdings die Forschung in China dar: Sollte diese gewisse ethische Grenzen sprengen, kann dies global negative Auswirkungen auf die biomedizinische Forschung haben.

Momentan werden Fortschritte in der Umsetzung von biomedizinischen Erkenntnissen in Anwendungen in der Schweiz, aber auch in der ganzen EU, von den hohen regulatorischen Anforderungen und der neuen «Medical Device Regulation» (MDR) gebremst. Die Regulatorien belasten Gesuchsteller:innen und Behörden gleichermaßen und stellen ein ernstzunehmendes

des Risiko dar, dass die EU im Vergleich zu den USA, wo die verantwortliche Behörde Food and Drug Administration FDA erstaunlich agil auf neue Entwicklungen reagiert, einen Standortnachteil hat.

In der Schweiz widerspricht die Kommerzialisierung von Forschungsergebnissen der Auffassung vor allem von älteren Forschenden. Erschwerend kommt hinzu, dass eine gescheiterte Firmengründung im Gegensatz zu den USA eine Karriere negativ beeinflusst und deshalb eine ausgeprägte Risikoaversion vorhanden ist, nicht nur bei den Forschenden, sondern auch bei den Risikokapitalgebern. Es braucht einen Mentalitätswandel in der Forschung und bei den Geldgebern, aber auch vermehrt ergänzende Studiengänge in Entrepreneurship auf Masterstufe in den Life Sciences. Da könnte der Bund unterstützend wirken und entsprechende Angebote entwickeln. Initiativen wie das Wyss Zurich bieten in der kritischen Phase der Umwandlung von Forschungsergebnissen in Produkte Ruhe und

Sicherheit, um die Innovation unter dem akademischen Hut fertig zu entwickeln, ohne dem finanziellen Druck der Kommerzialisierung ausgesetzt zu sein. Diese Art der Förderung ist weltweit einmalig und zieht Top-Wissenschaftler:innen aus der ganzen Welt an. Momentan beschränken sich die Aktivitäten des Wyss Zurich auf die regenerative Medizin, die Robotik und die Kombination der beiden Forschungsgebiete in der Bionik. Es dürfte sich lohnen, die Aktivitäten thematisch auszubauen und zu intensivieren, um die zahlreichen und grossen Chancen, welche die Biomedizin für die Gesellschaft und die Schweiz bietet, optimal zu nutzen.

	Digitale Welt					Energie und Umwelt					Fertigung	Life Sciences		Technik und Gesellschaft				
3D-Biodruck												●		●	●		●	
Genom-Editierung												●			●		●	
Mikrobiom													●		●	●		●
Regenerative Medizin														●	●			●

**Tabelle 4** zeigt den Zusammenhang zwischen den Technologien aus der Technologieguppe Biomedizin und den 20 Labels. Jeder Punkt markiert einen unmittelbaren Bezug, eine konkrete Anwendung oder eine zu erwartende Auswirkung.



## 3D-Biodruck

Ursula Graf-Hausner (ZHAW, graf3dcellculture)

Mit der Herstellung von komplexem Gewebe kann 3D-Biodruck die regenerative Medizin revolutionieren und massgeblich zur personalisierten Medizin beitragen. Für die Schweiz ist die Technologie eine grosse Chance, da international kompetitive Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette im Inland angesiedelt sind.

### Definition

3D-Biodruck ist eine spezifische Anwendung im breiten Feld der ADDITIVEN FERTIGUNG (→ S. 128). Dabei werden lebendige menschliche Zellen räumlich in einer Matrix positioniert. Somit können kleine Modelle verschiedener Gewebe und als langfristiges Ziel implantierbare Organe für die personalisierte, regenerative Medizin „gedruckt“ werden. Die optimale Ausgestaltung der Matrix mit Proteinen und Wachstumsfaktoren trägt dazu bei, dass sich die lebenden Zellen wie gewünscht entwickeln.

3D-Biodruck kommt nicht als Einzeltechnologie zum Einsatz und ist Teil des umfassenderen Bereichs des Biomanufacturing. Dieser deckt die gesamte Wertschöpfungskette ab und berücksichtigt neben dem Druckprozess auch die vorgelagerte Produktion von Hardware, die optimale

Versorgung der Gewebe und den nachgelagerten Einsatz von analytischen Methoden.

### Chancen

Bislang gab es erst wenige Versuche, Organe oder Gewebe hoher Komplexität zu drucken. Die Zellen überleben zwar den Druck, sterben aber danach wegen fehlender Durchblutung. Diese geschieht heute durch Diffusion, was für grössere Strukturen nicht ausreichend ist. Die Idee, ganze, funktionale Organe zu drucken, wird wohl erst in mindestens 20 Jahre Wirklichkeit werden.

Versorgung durch Diffusion reicht aus, um 3D-gedruckte Gewebemodelle am Leben zu halten. Solche Miniorganen aus menschlichen Zellen werden in der Wirkstoffentwicklung sowie für Wirkstofftests und toxikologische Studien eingesetzt. Da mit menschlichem Gewebe gearbeitet wird, ist die Aussagekraft solcher Studien hoch. Zudem kann die Anzahl Tierversuche reduziert werden, was gesellschaftspolitisch und ethisch wichtig ist. Dank 3D-Biodruck können personalisierte Studien mit krankem Gewebe durchgeführt werden; die Technologie wird somit zu einem Wegbereiter für die personalisierte Medizin. Der aus der Studie von Miniorganen resultierende Wissensgewinn beschleunigt die Grundlagen- und die angewandte Forschung.

Wird 3D-Biodruck wie beschrieben in die gesamte Wertschöpfungskette eingebunden, bieten sich der Schweiz grosse Chancen. International kompetitive Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette sind in der Schweiz angesiedelt, wozu auch die pharmazeutischen Grossunternehmen gehören. Zudem ist der Forschungsstandort Schweiz auf dem Gebiet stark.

### Risiken

Die Technologie ist vielversprechend, wird aber von regulatorischen Anforderungen gebremst. Nicht nur in der Schweiz ist der vollständige Ersatz von Tierversuchen mit 3D-gedruckten Modellen eine Herausforderung; in anderen Ländern wie den USA werden die Regulierungsbehörden aber bereits in der Entwicklungsphase einbezogen. Es ist zu erwarten, dass die langfristige Vision, der Druck von implantierbaren Organen, bei der Gesellschaft auf Akzeptanzprobleme stossen wird.

Aus rein wissenschaftlicher Sicht zeichnen sich keine unlösbaren Probleme ab. Die Forschenden sind zuversichtlich, dass das Problem der Versorgung grösserer Strukturen lösbar sein wird.

---

## Förderung

Sowohl der SNF als auch die Innosuisse fördern einzelne Projekte. Vernetzung und Unterstützung in der Forschung findet statt, z.B. im Rahmen des Kompetenzzentrums TEDD (Tissue Engineering for Drug Development), des NCCR Bioinspired Materials und des Swiss 3R Competence Centers. Private Gelder sind am ehesten von Risikokapitalgebern zu erwarten.

Trotz der bestehenden Fördermittel braucht es eine Koordination durch den Bund: Die Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette sollten beispielsweise in einem NTN Innovation Booster oder NFP zusammengebracht werden. Dies würde der Forschung einen grossen Schub verleihen, die internationale Wettbewerbsfähigkeit stärken und verhindern, dass die Schweiz zu einem Mitläufer wird. Wie in anderen Ländern sollten die Regulierungsbehörden bereits früh in der Entwicklung einbezogen werden, um 3D-gedruckte Modelle als Ersatz für Tierversuche zuzulassen.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, Universitäten Basel, Genf und Universität Zürich, Universitätsspitaler Basel, HUG, CHUV und USZ, FHNW, HES-SO Valais, ZHAW, CSEM

*Firmen (gesamte Wertschöpfungskette):* DSM Nutritional Products, Givaudan, Hamilton, Indorsia, Insphero, Mibelle AG, MimiX Biotherapeutics, Nestlé, Novartis, Philip Morris International, RegenHu, Roche, Tecan

*Vernetzung:* Rund 100 akademische und industrielle Akteure sind im Competence Center TEDD vernetzt, welches auf eine private Initiative zurückgeht, ursprünglich von der Gebert RUF Stiftung finanziert wurde und heute durch Mitgliederbeiträge und die ZHAW getragen ist. Die Thematik ist nicht Teil der Netzwerke zu additiver Fertigung. Auch wenn die Schweizer Akteure innerhalb von Europa kompetitiv sind, ist die Vernetzung in Europa eher punktuell. Im Rahmen der Sino Suisse Initiative des EDA kam es zu einer Vernetzung mit China. Die Vernetzung mit den USA ist weniger ausgeprägt.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland, Niederlande, Schweiz, Skandinavien (ohne Dänemark)

Weltweit: USA, vereinzelte Akteure in Asien



## Genom-Editierung

Martin Jinek (Universität Zürich)

**Die Genom-Editierung mit CRISPR / Cas9 stellt in der Medizin eine Revolution und einen Paradigmenwechsel dar, da sie Gentherapien bei Erbkrankheiten und personalisierte Behandlung von Krankheiten wie Krebs ermöglicht. Für die Schweiz bieten auch die biotechnologischen Anwendungen grosse Chancen.**

### Definition

Genom-Editierung bezeichnet molekularbiologische Techniken zur zielgerichteten Veränderung der Erbsubstanz DNA, also des Genoms. Dabei kann die DNA mittels verschiedener Enzymkomplexe, genannt Nukleasen, gezielt aufgeschnitten und künstlich hergestellte DNA mit beliebigen Sequenzen kann eingefügt werden. Somit können Abschnitte in der Erbsubstanz ersetzt, geändert oder gelöscht werden. Genom-Editierung ist ein Sammelbegriff für verschiedene Nukleasen, wobei die bekannteste CRISPR / Cas9 ist, für welche die Entdeckerinnen 2020 den Nobelpreis erhielten.

### Chancen

CRISPR hat die Welt der Genom-Editierung revolutioniert. Obwohl das System ursprünglich aus Bakterien stammt, funktioniert es in allen Organismen. Heute hat sich CRISPR zu einem Standardwerkzeug entwickelt und wird fast in jedem Labor im Bereich der Life Sciences eingesetzt. CRISPR wird Anwendungen in der Biotechnologie, Landwirtschaft und Medizin einen Schub verleihen. Von Gentherapien verspricht man sich die Heilung genetischer Krankheiten. Genom-Editierung erlaubt die in vitro Herstellung von modifizierten Zellen für die Behandlung von Krankheiten wie Krebs, aber auch die Produktion von personalisierten Zellen für Anwendungen in der **REGENERATIVEN MEDIZIN** (→ S.36). Die ethisch umstrittenen Eingriffe in die menschliche Keimbahn sind in der Schweiz nicht erlaubt und die Erzeugung von sogenannten Designer-Babys somit nicht möglich. In der Biotechnologie erlaubt CRISPR eine einfache Veränderung und Optimierung der bereits heute in den Prozessen eingesetzten Mikroorganismen, sodass diese beispielsweise die gewünschten Wirkstoffe produzieren. Mit CRISPR können Pflanzen genetisch einfach verändert werden, um sie besser an die Umweltbedingungen zu adaptieren oder resistent gegen gewisse Krankheiten zu machen. Da CRISPR-modifizierte Pflanzen als GMOs (genetically modified organisms) gelten, sind diese landwirtschaftlichen Anwendungen in der Schweiz und ganz Europa verboten.

Für die Schweiz ist aus regulatorischen Gründen vor allem die Nutzung von CRISPR in der Grundlagenforschung und für medizinische und biotechnologische Anwendungen relevant, auch wenn sich die grossen Pharmaunternehmen bis anhin nicht als Schlüsselakteure positioniert haben.

### Risiken

Die ethischen Bedenken in Bezug auf die Anwendung der Technologie im menschlichen Erbgut sind sehr gross. Da solche in der Schweiz verboten sind, stellen sie nur indirekt eine Bedrohung dar. Die genetische Modifikation von Labortieren mit CRISPR wird durch Regularien gebremst; alternativ kann CRISPR genutzt werden, um spezifische Krankheitsmodelle mit gedruckten Miniorganen nachzubauen (→ 3D-BIODRUCK, S. 30). Auch diese Anwendung untersteht strikten Regularien, da gedruckte Gewebemodelle nicht als vollwertiger Ersatz für Tierversuche angesehen werden. Für Anwendungen in der Landwirtschaft fehlt in der Schweiz die gesetzliche Grundlage.

Aus technologischer Sicht sind die sogenannten «Off-Target-Effekte» problematisch: Die Nuklease aus dem CRISPR / Cas9-Komplex schneidet die DNA nicht an der vorgesehen Zielsequenz, sondern irgendwo im Erbgut. Dies führt zu unerwünschten Veränderungen mit unbekannter Auswirkung.

---

## Förderung

Die Technologie wird durch den SNF und im Rahmen europäischer Projekte durch den European Research Council ERC gefördert; Innosuisse-Projekte sind wegen der limitierten Anzahl Firmen kaum umsetzbar. Das URPP Human Reproduction Reloaded an der Universität Zürich profitiert von kantonaler Unterstützung. Die Thematik wird auch durch das Wyss Zurich und beschränkt durch Risikokapitalgeber wie Versant Ventures in Basel gefördert.

Auch wenn die Förderung auf dem Niveau der einzelnen Forschungsgruppen ausreichend ist, könnte es sich für den Bund lohnen, die Netzwerkbildung zum Beispiel im Rahmen eines NCCRs zu fördern. Allerdings schlug ein erster Versuch fehl. Das Swiss Personalized Health Network des SBFI könnte die Thematik der genetischen Therapie für die verbleibende Laufzeit aufnehmen.

---

## Akteure in F&E

Die Auflistung ist auf diejenigen Institutionen und Firmen beschränkt, die an der Weiterentwicklung der Technologie und deren Anwendungen forschen.

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universität Zürich, Universitätsspital USZ

*Firmen:* CRISPR Therapeutics, Novartis, Roche

*Vernetzung:* Auch wenn kein offizielles Netzwerk besteht, sind die wenigen Forschungsgruppen in der Schweiz vernetzt. Sie sind international kompetitiv und kollaborieren stark mit Forschungspartnern und Firmen vor allem in den USA, da die Gruppenleitenden ihre akademische Karriere bis zur Berufung an eine Schweizer Hochschule grösstenteils in den USA absolviert haben. Zusammenarbeiten mit Firmen in der Schweiz fehlen mehrheitlich.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland (Max-Planck-Institut Berlin), Grossbritannien (University of Cambridge), Niederlande (Universität Wageningen, TU Delft)

Weltweit: China, Korea, USA (Harvard, MIT, Stanford, UC Berkeley, UC San Francisco)



## Mikrobiom

Tomas de Wouters (PharmaBiome)

Das Mikrobiom spielt eine Rolle bei einer Vielzahl von chronischen Erkrankungen und wird somit zu einem vielversprechenden Ziel für Therapie und Prävention. Die Nutzung des Mikrobioms betrifft die Lebensmittel- und Pharmaindustrie, die beide in der Schweiz traditionell stark verankert sind. Der Schulterschluss zwischen den Industrieklassen bietet die Chance für neue Geschäftsmodelle.

### Definition

Das Mikrobiom beschreibt die Gesamtheit aller Mikroorganismen, die eine spezifische Umgebung besiedeln. Das menschliche Mikrobiom besiedelt Organe, die der Umwelt ausgesetzt sind, also die Haut, die Lungen, den Mund und den Verdauungstrakt. Der Dickdarm weist die höchste Dichte an Mikroorganismen im menschlichen Körper auf und ist zunehmend Ziel von Forschungsaktivitäten. Das Mikrobiom ist nicht eine Technologie, sondern Ziel verschiedener präventiver und therapeutischer Ansätze, die von Life-Style- bis zu Gesundheitsmassnahmen reichen.

### Chancen

In den letzten zehn Jahren wurde erkannt, dass das Mikrobiom bei chronischen Entzündungen und Stoffwechselkrankheiten, aber auch bei einer Vielzahl von Erkrankungen des Immun- und Nervensystems eine zentrale Rolle spielt. Es wird somit zu einem vielversprechenden Ziel für die Behandlung solcher Krankheiten, bietet sich aber auch für präventive Massnahmen an.

Mikroorganismen als Arzneimittel («Bugs as Drugs») haben eine lange Tradition im Bereich der Nahrungsergänzung, wo probiotische Bakterien präventiv eingesetzt werden. Der wichtigste Umbruch war die Ausweitung dieses Ansatzes auf medizinische Anwendungen, also die Nutzung der Vielfalt des Mikrobioms zur Erweiterung der personalisierten Therapiemöglichkeiten (→ **PERSONALISIERTE MEDIZIN, S. 128**). Dazu gehören Bakterienmischungen unterschiedlicher Komplexität, aber auch die Transplantation eines gesamten Mikrobioms unter Verwendung von Fäkalien (fäkale Mikrobiom-Therapie). Das hat zu einem Revival der existierenden probiotischen Industrie und zum Entstehen der neuen Branche biotherapeutischer Produkte geführt. Die neuartigen Produkte verlangen eine Anpassung der regulatorischen Prozesse und fördern die Entstehung von innovativen Produktionstechnologien. Rund um das Mikrobiom zeichnen sich zwei weitere Trends ab: «Drugs for Bugs» – also die Entwicklung von Wirkstoffen, die das menschliche Mikrobiom

fördern. Und «Drugs from Bugs» – der Erkenntnisgewinn aus der Mikrobiomforschung, der für die Isolation von Wirkstoffen aus dem Mikrobiom und deren Verwendung als Arzneimittel genutzt wird.

Die präventive und therapeutische Nutzung des Mikrobioms baut auf die Lebensmittel- und Pharmaindustrie, die beide in der Schweiz traditionell stark verankert sind. Vor allem erstere zeigt grosses Interesse an der Mikrobiomforschung und geht entsprechende Kollaborationen ein. Der Schulterschluss zwischen den Industrieklassen bietet die Chance für neue Geschäftsmodelle.

### Risiken

Auf regulatorischer Ebene kann es für die Schweiz, aber auch für die ganze EU, zu einem Nachteil werden, dass die FDA in den USA deutlich agiler reagiert als die europäischen Zulassungsbehörden und die Anforderungen an neue Produkte aktiv mitgestaltet. In der Schweiz fehlen zudem koordinierte Anstrengungen, die Entwicklungen in der Mikrobiomforschung breit in der Industrie abzustützen und ihr so zu wirtschaftlicher Relevanz zu verhelfen.

Informationen über das persönliche Mikrobiom stehen auf derselben Stufe wie andere Gesundheitsdaten (→ **OWNING AND SHARING DATA: GESELLSCHAFTLICHE ASPEKTE, S. 118**). Es lässt Rückschlüsse

zu, wo der «Inhaber» war und wie er sich – zumindest in Bezug auf seine Ernährung – verhält. Das wirft Fragen zum Schutz der Privatsphäre und zur Kontrolle dieser sensiblen Daten auf. Der Einsatz von Technologien, die das Wissen über das menschliche Mikrobiom nutzen, steht erst am Anfang und ist noch nicht weit verbreitet. Das bietet die Chance, sich frühzeitig mit den ethischen Fragen zu befassen, anstatt auf Streitfälle zu warten und dann zu versuchen, kurzfristig zu reagieren.

---

### Förderung

Der SNF fördert die Mikrobiomforschung nicht spezifisch auf der Ebene von Einzelprojekten, sondern im Rahmen von verwandten Gebieten. Mit dem NCCR Microbiomes unterstützt er jedoch einen ganzheitlichen Ansatz, der Grundlagenforschung mit klinischen Anwendungen kombiniert. Sowohl die Gebert RUF Stiftung als auch die Botnar und Seerave Foundations zählen zu den privaten Organisationen, welche die Mikrobiomforschung bereits in einer frühen Phase unterstützt haben. Die finanzielle Förderung beschränkt sich allerdings auf die Forschung und unterstützt nicht die Überführung in Anwendungen. Zudem fehlt eine strategische Ausrichtung der Aktivitäten, wie sie andere Länder (Belgien, Frankreich, Irland, Israel, Kanada und die USA) kennen.

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universitäten Bern, Lausanne und Zürich, Universitätsspital CHUV

*Firmen:* Bacthera (Joint Venture zwischen Lonza und der dänischen Chr. Hansen), Ferring SA, Nestlé, Seres Therapeutics (US-Kollaborationspartner von Bacthera)

*Vernetzung:* Die Akteure sind national im NCCR Microbiomes vernetzt, international kompetitiv und an internationalen Kollaborationen beteiligt.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Frankreich, Grossbritannien, Irland, Niederlande

Weltweit: USA



## Regenerative Medizin

Simon Hoerstrup (Universität Zürich)

Die regenerative Medizin ist ein junges Forschungsfeld, welches das Ziel verfolgt, die ursprüngliche Funktion von geschädigten Geweben oder ganzen Organen wiederherzustellen. Für die Schweiz mit ihren Stärken in der Biotechnologie, Medizintechnik und in der pharmazeutischen Forschung bieten sich grosse Chancen, die in Kombination mit der Förderung der unternehmerischen Fähigkeiten von Jungforschenden optimal ausgereizt werden können.

### Definition

Die regenerative Medizin ist ein junger biomedizinischer Forschungsbereich, der sich auf die Heilung oder den Ersatz von durch Krankheit, Geburtsgebrechen oder Traumata geschädigten Zellen, Geweben, Knochen oder ganzen Organen konzentriert. Im Unterschied zur reparativen Medizin steht dabei die Heilung – also das Wiederherstellen der ursprünglichen Funktion – und nicht die symptomatische Behandlung im Vordergrund. Regenerative Medizin ist ein Überbegriff, der biomedizinische Technologien wie die Gentherapie, TISSUE ENGINEERING (→ S. 128) und Zelltherapie, aber auch die zur Umsetzung notwendigen Disziplinen aus den Ingenieurwissenschaften umfasst.

### Chancen

Regenerative Medizin verspricht dank ihrer Technologievielfalt und Interdisziplinarität effizientere Therapien: Insbesondere Systemerkrankungen werden in der Zukunft spezifischer und personalisierter (→ PERSONALISIERTE MEDIZIN, S. 128) behandelbar. In ihrer Langfristvision stellt die regenerative Medizin eine bahnbrechende Innovation dar, mit der Volkskrankheiten wie Krebs und Alzheimer nicht nur erfolgreich behandelt, sondern potenziell geheilt werden können, auch wenn Erfolge heute erst in der Behandlung erzielt werden. Die ethische Debatte um Xenotransplantation hat wegen des kürzlich transplantierten, genetisch veränderten Schweineherzens eine neue Aktualität bekommen. Organe, die im Labor mit den Mitteln der regenerativen Medizin aus eigenen oder Spenderzellen gezüchtet werden, könnten eine gesellschaftlich akzeptierte Alternative zu Xenotransplantationen darstellen. Das Forschungsgebiet bietet einige spektakuläre Fragestellungen wie das Herz aus dem Reagenzglas. Solche Themen können kommunikativ intelligent genutzt werden, um Vorurteile abzubauen.

Dank ihrer Stärke in den pharmazeutischen Wissenschaften und in der Biotechnologie ist die Schweiz hervorragend aufgestellt, um eine führende Rolle spielen zu können. Im Gegensatz zu Ländern wie Israel ist das Ökosystem vorhanden, um Innovationen zu kommerzialisieren und die Arbeitsplätze im Land zu halten und auszubauen.

Dazu trägt auch die weltweit einmalige Förderung durch Wyss Zurich bei. Die Schweizer Bevölkerung zeigt sich in biomedizinischen Fragen tendenziell innovationsfreundlich, wie das klare Abstimmungsergebnis zur Tierversuchinitiative gezeigt hat.

### Risiken

Die Kommerzialisierung von Forschungsergebnissen ist in akademischen Kreisen teilweise umstritten. Dazu kommt, dass in der Schweiz – wie auch im übrigen Europa – eine gescheiterte Firmengründung im Gegensatz zu den USA eine Karriere negativ prägt und eine ausgeprägte Risikoaversion vorhanden ist. Um die Innovation nicht auszubremsen, braucht es einen Mentalitätswandel bei den Forschenden, aber auch vermehrt Studiengänge auf Masterstufe in Entrepreneurship. Auch muss die Kommunikation mit der Gesellschaft intensiviert und zielgruppengerecht geführt werden, um Akzeptanzprobleme zu überkommen oder zu verhindern.

Die immer aufwändigeren Zulassungsverfahren und die Umsetzung der neuen medizintechnischen Regulierung MDR belasten Gesuchsteller und Behörden gleichermaßen. Zudem stellen sie ein Risiko dar, dass die EU im Vergleich zu den USA, wo die FDA zunehmend agil auf neue Entwicklungen reagiert, einen ernsthaften Standortnachteil hat. Ein nicht zu unterschätzendes Risiko

stellen die Forschungsaktivitäten in China dar: Sollten diese gewisse ethische Grenzen sprengen, kann dies auch global stark negative Auswirkungen auf die Thematik haben.

---

## Förderung

Die finanzielle und infrastrukturelle Förderung für die Grundlagenforschung ist in der Schweiz dank SNF und Innosuisse, aber auch dank privater Förderinitiativen wie der Gebert Rüt Stiftung, der Hertie Foundation und dem Wyss Zurich sehr gut. Dieses bietet in der kritischen Phase der Umsetzung von Forschungsergebnissen in Produkte Ruhe und Sicherheit, um die Innovation unter einem akademischen Dach fertig zu entwickeln, ohne frühzeitig an Kommerzialisierung denken zu müssen. Die Firmengründung kann später und mit einem ausgereiften Produkt erfolgen, was die Überlebenschancen erhöht.

In der EU gab und gibt es zahlreiche Förderprogramme, teilweise auch mit Schweizer Hochschulen als Leading House. Die Schweizer Beteiligung bei europäischen Projekten ist aufgrund der Einstufung der Schweiz als Drittstaat gefährdet.

Der Bund sollte die Förderung der unternehmerischen Fähigkeiten von vielversprechenden Jungforschenden vermehrt unterstützen. Auf kantonaler Ebene könnten Spin-offs und Start-ups mit geeigneten Räumlichkeiten, Pionierpreisen und

guten Steuerlösungen besser gefördert werden als mit direkter finanzieller Forschungsförderung.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* Basel (Biozentrum und ETH Zürich), Bern (Inselspital und Universität Bern), Lausanne (CHUV und EPFL), Zürich (ETH Zürich und Universität Zürich), Wyss Zurich

*Firmen:* Geistlich Pharma, Insphero, Lonza, Molecular Partners, Neurimmune AG, Novartis, Roche

*Vernetzung:* Die Akteure sind national und international gut vernetzt und kompetitiv. Für gemeinsame Projekte spielt allerdings die regionale Verankerung die bedeutendste Rolle, weshalb die Akteure unter Hochschulen nach Regionen aufgeführt sind.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Grossbritannien, Israel, Schweden (Karolinska Institutet), Schweiz

Weltweit: USA (Harvard, MIT)



Quelle: Agroscope

## Datenverarbeitung und -übertragung

Die weltweit gespeicherte Datenmenge wächst rasant und soll sich alle zwei Jahre verdoppeln. Entsprechend zentral für die weitere Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft sind die Fragen, wie grosse Datenmengen verarbeitet und übertragen werden können.

Für die weitere Digitalisierung ist der Ausbau und weitere Aufbau neuer Mobilfunknetzinfrastruktur von zentraler Bedeutung. Die Europäische Union fördert mit rund 400 Milliarden Euro den Aufbau eines europäischen 5G-Netzes (→ S. 40). Dies entspricht dem gegenwärtigen BIP von Österreich.

Im Zusammenhang mit der Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft wird immer wieder von künstlicher Intelligenz gesprochen. Künstliche Intelligenz bezeichnet Algorithmen zur Datenverarbeitung. Solche Systeme können Muster erkennen und basierend auf diesen Mustern Zusammenhänge feststellen oder Entscheidungen treffen. Meist nutzen solche Systeme die Analyse von grossen Datenmengen. Im Gegensatz zu klassischen Algorithmen können künstlich intelligente Systeme so auch mit für sie neuartigen Daten oder Situationen umgehen (→ BIG DATA UND MASCHINELLES LERNEN, S. 42). Dadurch wird es diesen Systemen möglich, Tätigkeiten auszuführen,

die bislang als dem Menschen vorbehalten galten: etwa Zusammenhänge erschliessen, komplexe Brettspiele spielen, Texte übersetzen, Objekte auf Bildern erkennen oder Bilder generieren, die die typischen Merkmale eines Gemäldes von Rembrandt aufweisen. Heute sind viele ausgereifte Anwendungen verfügbar, die von Gesichtserkennung bis hin zu Wirkstoffentdeckung und medizinischer Bildanalyse reichen. Die meisten dieser Durchbrüche basieren auf den Prinzipien des Deep Learnings. Solche Softwaresysteme imitieren Nervenzellen des menschlichen Gehirns. Auch biologisch inspirierte Hardware zu bauen, ist Gegenstand des Forschungsfeldes der NEUROMORPHEN ELEKTRONIK (→ S. 48). Solche Hardware soll leistungsfähiger und zugleich energiesparender sein.

Klassische Transistoren werden aus Silizium gebaut. Die Erfolge in der Materialforschung haben Graphen als möglichen Nachfolger von Silizium ins Gespräch gebracht. Allerdings wird die Nutzung von Graphen im Bau von Transistoren skeptisch beurteilt (→ GRAPHEN-TRANSISTOREN, S. 46). Langfristig vielversprechender ist etwa das Feld der QUANTENCOMPUTER (→ S. 50), auch wenn es beim Bau solcher Rechner noch viele offene Fragen und ungelöste Probleme gibt. Die Möglichkeiten des Quantencomputers sind eine Herausforderung für heutige Verschlüsselungsverfahren bei der Datenübertragung, sodass schon heute an Verfahren geforscht wird, die auch von einem leistungsfähigeren Quantencomputer nur schwer

geknackt werden können (→ QUANTEN- UND POST-QUANTENKRYPTOGRAPHIE, S. 52).

Wie auch viele andere Branchen und Sektoren profitiert auch die Landwirtschaft von Entwicklungen im Feld der Datenverarbeitung und -übertragung (→ DIGITALE LANDWIRTSCHAFT, S. 44). Dort gibt es viel Potenzial für Optimierungen. So könnten Dünge- und Pflanzenschutzmittel einzel-pflanzenspezifisch eingesetzt werden. Damit wird nicht nur die Effizienz gesteigert, sondern auch die Ökobilanz der Landwirtschaft verbessert.

Die Technologien aus dem Themenfeld Datenverarbeitung und -übertragung bieten grosse Chancen, auch wenn die Schweiz im internationalen Vergleich ein kleiner Player ist und bleibt. Um international wettbewerbsfähig zu bleiben, ist es für die Schweiz von eminenter Bedeutung, dass die Gesetzeslage wissenschaftsfreundlicher wird, administrative Hürden zum Einsatz von Technologie abgebaut werden und die hiesige Forschungslandschaft trotz des Ausschlusses vom Rahmenprogramm «Horizon Europe» an internationalen Projekten mitwirken kann.

	Digitale Welt					Energie und Umwelt					Ferti-gung	Life Sciences	Technik und Gesellschaft							
5G	●		●																	
Big Data und maschinelles Lernen	●																			
Digitale Landwirtschaft	●	●	●	●							●									
Graphentransistoren																				
Neuromorphe Elektronik	●	●	●	●						●				●						
Quantencomputer	●																			
Quanten- und Postquantenkryptographie	●																●			

**Tabelle 5** zeigt den Zusammenhang zwischen den Technologien aus der Technologiegruppe Datenverarbeitung und -übertragung und den 20 Labels. Jeder Punkt markiert einen unmittelbaren Bezug, eine konkrete Anwendung oder eine zu erwartende Auswirkung. Die grauen Balken weisen darauf hin, dass die entsprechend markierte Technologie ein sogenannter Enabler ist und auf fast alle Industrieklassen eine Auswirkung haben wird.



## 5G

Christian Grasser (asut),  
Jürg Eberhard (FSM Forschungsstiftung Strom  
und Mobilfunk)

**5G bietet im Vergleich zu den Vorgängergenerationen bedeutende Vorteile. Den beträchtlichen Chancen steht der schleppende Ausbau und eine grosse Desinformation entgegen. Wenn die Stimmung gegenüber dieser Basistechnologien kippt, könnte die weitere Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft stark ins Stocken geraten.**

### Definition

5G ist die fünfte Generation des Mobilfunks und damit die – in der Schweiz und den meisten anderen Ländern – aktuelle Generation des zellulären Mobilfunks. Gegenüber der Vorgängerversionen 3G und 4G hat 5G bedeutende Vorteile: 5G erlaubt 10-mal höhere Datendurchsatzraten als 4G und damit einen Durchsatz von bis zu 10 Gigabit je Sekunde. Zudem bietet 5G einen energie-sparenden Modus für IoT-Geräte und Sensoren, die nur sehr geringe Datenmengen austauschen. Gleichzeitig bietet 5G die Möglichkeit, virtuelle Netzwerke anzulegen. Blaublichtorganisationen können zum Beispiel ein eigenes Netz auskoppeln, das geschützt vor Angriffen ist. So können sie sicher, schnell und geschützt vor Überlastung miteinander kommunizieren und Daten

austauschen. Zudem erlaubt 5G auch den Aufbau von Unternehmensnetzwerken, mit denen Daten zwischen mobilen Geräten mit hohem Durchsatz ausgetauscht werden. Somit können auch lokale Drahtlosnetzwerke realisiert werden, die wesentlich höhere Bandbreiten haben als WIFI oder Bluetooth.

### Chancen

Die EU investiert über 400 Mrd. Euro bis 2025 in den Ausbau der 5G-Infrastruktur. So hat sie die Mobilfunktechnologie zu einer Basisinfrastruktur eines grünen, nachhaltigen und digitalen Europas erklärt. Damit gibt sie dem Ausbau der 5G-Infrastruktur eine strategische Bedeutung. Auch für die Schweizer Wirtschaft ist 5G eine grosse Chance. Eine Studie der ASUT kommt zum Schluss, dass 5G-Technologien bis 2030 einen zusätzlichen Produktionswert von 40 Mrd. Schweizer Franken generieren, wobei knapp 90% auf die Anwendungsbranchen entfällt. Dies zeigt, wie wichtig Konnektivität und damit auch 5G für Wirtschaft und Gesellschaft ist. Für grosse Digitalisierungsprojekte wie Smart City und innovative **MOBILITÄTSKONZEPTE** (→ S. 124) ist 5G eine unverzichtbare Technologie. Es ist wahrscheinlich, dass solche Projekte von lokalen Unternehmen umgesetzt werden, was gut zur DNA der Schweizer KMU passt: Diese sind traditionell gut darin, spezialisierte Produkte für begrenzte Märkte zu

entwickeln. Zudem macht 5G branchenspezifische Plattformen möglich. Die Grundlagentechnologie ist bereits gut entwickelt und es stellen sich in vielen Branchen und Anwendungen eher Fragen im Zusammenhang mit Datenübertragung und Vernetzung als mit der grundsätzlichen Funktionalität. Da die Technologie schon Produktreife erreicht hat, betreffen die Fragestellungen in Forschung und Industrie zumeist nicht die Basistechnologie, sondern vor- und nachgelagerte Probleme.

### Risiken

Die aktuelle Bewilligungspraxis von Mobilfunkantennen steht in starkem Kontrast zur immer rasanter verlaufenden Technologieentwicklung. Derzeit sind gesamtschweizerisch über 3000 Baugesuche allein für Mobilfunkantennen hängig, Tendenz steigend. Der gegenwärtige Ausbau des 5G-Netzes hinkt gegenüber den ursprünglichen Plänen stark hinterher. Dies ist mitunter durch den Föderalismus begründet, der Bewilligungsverfahren teuer und aufwändig macht. Die Stimmungsmache gegen 5G ist deshalb gefährlich, weil sie eine unentbehrliche Basistechnologie fundamental infrage stellt und so bis in die Mitte der Gesellschaft für Verunsicherung sorgt. Wenn die Stimmung gegenüber solchen Basistechnologien kippt, könnte die weitere Digitalisierung von

Wirtschaft und Gesellschaft stark ins Stocken geraten.

Die Digitalisierung aller Wirtschaftszweige schreitet zügig voran. Verzögert sich der Ausbau der Mobilfunkinfrastruktur, kommt es zu einer Unterversorgung und Datenstaus, was die hiesige Wirtschaft teuer zu stehen käme.

---

### **Förderung**

Die Basistechnologie 5G ist entwickelt und wird an vielen Orten eingesetzt, wo es darum geht, Daten zu übertragen. In der Grundlagenforschung wird bereits an Nachfolgetechnologien geforscht. Anwendungsseitig bedarf 5G eher einer ideellen Förderung, damit die Akzeptanz von 5G gefördert wird. Zu den ideellen Förderinstitutionen gehören die ASUT, die Dialogplattform Chance5G und die Industriplattform 2025 von SwissMem. Zudem zeigen verschiedenste Verbände die Vorteile von 5G auf und versuchen so die Akzeptanz zu fördern.

---

### **Akteure in F&E**

5G kommt an vielen Orten zum Einsatz, entsprechend beschäftigen sich viele Unternehmen und Forschungsgruppen mit Problemstellungen der Datenübertragung. 5G ist hierbei aber eher Mittel zum Zweck als eigenständiger Gegenstand der Forschung und Entwicklung.



## Big Data und Maschinelles Lernen

Karl Aberer (EPFL)

Obwohl es unterdessen interessante Anwendungsbeispiele von maschinellem Lernen auf der Basis von kleinen Datenmengen gibt, werden die beiden Themenfelder je länger desto stärker zusammenwachsen und sich gegenseitig befruchten. Deshalb und weil beide ähnliche Chancen für die Schweiz bieten und ihre Entwicklung mit ähnlichen Risiken verbunden ist, werden die beiden Technologiefelder in der Folge gemeinsam behandelt. Beide Gebiete sind Schlüsseltechnologien für die digitale Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft. Anwendungen in den Bereichen Big Data und Maschinelles Lernen bieten grosse Chancen, müssen aber auch gezielt gefördert werden. Gerade KMU verfügen oft über zu wenig Daten, um Big-Data-Anwendungen sinnvoll einzusetzen.

### Definition

Sowohl Big Data als auch die Ansätze des maschinellen Lernens sind kein temporärer Trend. Vielmehr werden sie die Art und Weise, wie wir Informationstechnologie verstehen, grundsätzlich ändern. Beide Technologiebereiche hängen darüber hinaus eng damit zusammen, was unter dem Stichwort Digitalisierung verstanden wird.

Big Data ist ein Sammelbegriff für Technologien und Werkzeuge, die zum Auswerten grosser Datenmengen (Big Data) genutzt werden. Gross bezieht sich jedoch nicht allein auf das Datenvolumen, sondern auch auf andere Faktoren, die Einfluss auf die Komplexität der Auswertung haben: Die *Geschwindigkeit* der Veränderung der Daten und die *Unterschiedlichkeit* der zu analysierenden Daten (Sind die Daten maschinenlesbar oder müssen erst Bilder, Video, Audio ausgewertet werden?). Immer stärker geraten auch Fragen zu Wert und Wahrhaftigkeit von Daten ins Visier. Damit Big Data Anwendungen sinnvoll eingesetzt werden können, müssen die Daten von ausreichend hoher Qualität sein.

Verfahren des maschinellen Lernens sind Ansätze aus dem – weit breiter gefassten – Gebiet der künstlichen Intelligenz. Maschinelles Lernen bezeichnet unterschiedliche Ansätze, die es entsprechend erstellten Computerprogrammen erlauben – aufgrund einer Analyse von (meist grossen Mengen an) Daten –, Muster zu erkennen und diese Muster dann auf noch unbekannte, ähnliche Daten anzuwenden.

### Chancen

Die Schweiz ist ein bedeutender Denk- und Werkplatz für die Finanz-, Maschinenbau- und Pharmaindustrie. Sowohl maschinelles Lernen als auch Big Data bieten vielerlei Möglichkeiten, aber

auch Risiken für die drei – und womöglich die meisten anderen – Industriezweige. Um international konkurrenzfähig zu bleiben, muss die Digitalisierung in allen Branchen und Sektoren vorangetrieben und nachvollzogen werden.

Die Digitalisierung wird derzeit insbesondere auch von Ländern vorangetrieben, die autoritärere Kulturen haben als die Schweiz und bei denen vermehrt Top-down-Entscheidungsketten gelten. Hier könnte die Schweiz mit ihrer demokratischen und föderalistischen Tradition einen Gegenentwurf bieten.

Als neutrales Land mit sehr hoher Stabilität hat die Schweiz gute Bedingungen, um datenbezogene Dienstleistungen anzubieten, die ein hohes Mass an Vertrauen benötigen.

### Risiken

Gerade für KMU sind Anwendungen aus den Bereichen Big Data und maschinelles Lernen oftmals nicht praktikabel. Dies weil Daten fehlen oder solche Anwendungen unerschwinglich sind.

Die wachsende Technologiefeindlichkeit in Teilen der Bevölkerung ist ein Problem. Einerseits weil diese sich auf die Politik auswirkt, andererseits, weil das Thema Digitalisierung die gesamte Bevölkerung betrifft und so Menschen von der technischen Entwicklung abgehängt werden. Die daraus resultierenden Gefahren sind, dass die Politik

Rahmenbedingungen setzt, die technologiefeindlich sind und die es den Unternehmen schwierig macht, die Digitalisierung voranzutreiben. Gleichzeitig werden Unternehmen abgeschreckt, in die Schweiz zu kommen.

Der Fachkräftemangel bremst viele Unternehmen aus. Diesen Mangel bekommen Start-ups und KMU besonders zu spüren, weil sie nicht so attraktive Bedingungen bieten können wie die Grossunternehmen aus der IT- und Finanzindustrie.

Von dem Venture-Kapital, das in der Schweiz verfügbar ist, fliesst nur ein kleiner Teil in IT-Start-ups. Will man international konkurrenzfähige IT-Start-ups aus den hiesigen Hochschulen, braucht es deutlich mehr Risikokapital.

---

## Förderung

Für akademische Projekte gibt es in aller Regel genug Fördermittel. Gleichzeitig wird weltweit derart viel Geld in die Erforschung und Entwicklung von Big Data und maschinelles Lernen gesteckt, dass die Förderung hierzulande nicht ausreicht, um langfristig weltweit eine wesentliche Rolle zu spielen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Anzahl an Professuren und Mitarbeitern im Vergleich zu den stark anwachsenden Studierendenzahlen nur sehr langsam wächst. Dies hat zur Folge, dass die Belastung durch die Lehre stark

angestiegen ist, was sich negativ auf Forschung und Lehre auswirkt (→HOCHSCHULLEHRE («REINVENTING EDUCATION»), S. 120)

Wenn Big Data und maschinelles Lernen als strategische Schwerpunktthemen gesetzt würden, müssten deutlich mehr Mittel in Forschung und Entwicklung gesteckt werden, sowohl forschungsseitig als auch bei Start-ups.

Vielleicht müsste sich die Schweiz auf einzelne Anwendungen spezialisieren. Eine effektive Förderung von IT-Start-ups ist noch nicht etabliert, obwohl gerade in diesem Bereich junge Unternehmen einen hohen Kapitalbedarf haben, um zu wachsen.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universität Zürich, FHNW, Idiap Research Institute

*Firmen:* Viele international tätige IT-Konzerne haben einen Sitz in der Schweiz und betreiben hier Forschung und Entwicklung. Dazu gehören u.a. Google, IBM, Meta und Oracle. Auch die Finanzindustrie ist aktiv.

*Vernetzung:* Die Forschungslandschaft in den Bereichen maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz ist aufgrund der vielen Anwendungsmöglichkeiten sehr breit. Eine allumfassende Vernetzungsplattform ist derzeit noch nicht etabliert.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* China, Israel, USA, Südkorea, Vereinigtes Königreich



## Digitale Landwirtschaft

Thomas Anken (Agroscope)

Die digitale Landwirtschaft umfasst Technologien, die zur Digitalisierung der landwirtschaftlichen Produktion eingesetzt werden. Zum einen ist dies Software zur Feld- und Hofbewirtschaftung, zum anderen handelt es sich um Anwendungen des **INTERNET OF THINGS** (→ S. 128), also mit Sensorik ausgestattete Geräte sowie intelligente Systeme zur gezielten Anwendung von Dünger und Pflanzenschutzmitteln oder zum Monitoring des Tierverhaltens und technischer Anlagen. Die grössten Vorteile erhofft man sich von effizienteren und ressourcenschonenderen Produktionsprozessen.

### Definition

Die digitale Landwirtschaft bezeichnet jenes Bündel an Technologien, das dazu eingesetzt wird, die Landwirtschaft zu digitalisieren. Das reicht von Feld- und Hofbewirtschaftungssoftware bis hin zu IoT-Anwendungen. Für den Aufbau digitalisierter Landwirtschaftsbetriebe sind so gesehen eine Reihe von Einzeltechnologien nötig. Dazu gehören Sensoren, die Umgebungsdaten (etwa der Zustand von Böden und Pflanzen) messen, aber auch Methoden und Systeme zur Datenverarbeitung (etwa künstliche Intelligenz zur Bestimmung der Bodenbeschaffenheit oder zur

Diagnostik von Pflanzenkrankheiten). Auch Regelungssysteme gehören in das Feld der digitalen Landwirtschaft, wenn es darum geht, einzelpflanzenspezifische Behandlungen auszuführen, Dünger ortsspezifisch auszubringen oder Tiere bedarfsgerecht zu füttern.

Die Relevanz der digitalen Landwirtschaft entsteht einerseits dadurch, dass die Schweizer Agrarwirtschaft unter hohem Druck von verschiedenen Seiten steht (Nährstoffüberschüsse, Pflanzenschutzmittlrückstände, internationaler Wettbewerb und damit verbundener Preisdruck, Klimawandel, etc.).

### Chancen

Die Versorgung der wachsenden Bevölkerung mit gesunden Nahrungsmitteln, bei gleichzeitiger Schonung der Ressourcen und unter Einbezug des Klimawandels stellt hohe Anforderungen an die Landwirtschaft. Deshalb werden in den kommenden Jahren vermehrt ressourcenschonende Technologien benötigt.

Neue digitale Technologien in diesem Bereich haben ein grosses Potenzial, einen Beitrag zu einer ökologischeren und effizienteren Landwirtschaft zu leisten, etwa indem Pflanzenschutzmittel nur noch gezielt und nicht mehr flächendeckend zum Einsatz kommen.

Die Schweiz ist im Bereich von IoT-Anwendungen gut aufgestellt. Gelingt es, die entsprechenden Verbindungen zur Landwirtschaft herzustellen, bestehen gute Chancen, dass neue Produkte entstehen und damit neue Märkte erschlossen werden können. Denkbar sind Innovationen in der Fruchtfolgenplanung, auf der Produktionsseite (auf dem Feld, im Gewächshaus und im Stall) sowie Verkaufsseitig (automatisierte Hofläden oder andere neue Vertriebskanäle (→ **LOKALE LEBENSMITTELKREISE** («LOCAL FOOD SYSTEMS»), S. 122).

### Risiken

Das grösste Risiko für die Digitalisierung der Landwirtschaft sind Forschungsgesetze (ähnlich dem Gentechnormatorium), die den Einsatz bestimmter Technologien oder besser angepasster Pflanzen verbieten und so der Landwirtschaft eine Bürde auferlegen.

Gleichzeitig sind viele Schweizer Landwirtschaftsbetriebe zu klein, um hohe Investitionen in die Digitalisierung ihrer Betriebe stecken zu können. Das hat einen nachteiligen Effekt auch auf den Heimmarkt entsprechender Start-ups, der erfahrungsgemäss gerade in den ersten Jahren von zentraler Bedeutung ist.

---

## Förderung

Die Digitalisierung der Landwirtschaft wird bereits von der öffentlichen Hand unterstützt. So sind dank der Unterstützung von BLW, BAFU, Innosuisse und EU bereits etliche Projekte realisiert worden. Bei den privaten Stiftungen ist es insbesondere Gebert Rütli, die entsprechende Projekte finanziert hat. Insgesamt sind die entsprechenden Fördermittel in Anbetracht der anstehenden Herausforderungen sehr gering.

Neben der Projektförderung könnten auch Verbote von Pflanzenschutzmitteln und Insektiziden eine technologiefördernde Wirkung haben. Dünger, Pflanzenschutzmittel und Insektizide sind sehr günstig im Einsatz. Eine Verknappung derselben könnte zu einem verstärkten Einsatz von Technologie führen, da die Effekte dieser Mittel durch gesteigerte Effizienz kompensiert werden müssen.

---

## Akteure in F&E

Da es sich bei der digitalen Landwirtschaft, um ein ganzes Bündel an Technologien handelt, sind sehr unterschiedliche Akteure im Feld tätig, die sich je nach Zweig auch stark unterscheiden.

*Hochschulen und Institutionen:* ETH Zürich, BFH (HAFL), Agroscope

*Firmen:* barto AG, fenaco, Ecorobotix, Sensorscope, Tesenso

*Vernetzung:* na

*Internationale Forschungs-Hotspots:* in Europa Deutschland (Fraunhofer-Gesellschaft, Universität Hohenheim) und die Niederlande (Universität Wageningen)

---

## Graphen-Transistoren

Christian Schönenberger (Universität Basel)

**Der Werkstoff Graphen bietet zwar einige interessante und vielversprechende Anwendungen, jedoch sind diese noch sehr unausgereift (Sensorik) oder die Kosten sind in Anbetracht geringer Verbesserungen zu hoch (Transistoren). Deshalb empfehlen wir, das Thema Graphen-Transistoren in der aktuellen BFI-Botschaft wegzulassen.**

---

### Definition und Empfehlung

Bei Graphen-Transistoren handelt es sich um den Versuch, Transistoren basierend auf Graphen zu entwickeln. Transistoren sind Bauteile mit steuerbarem Widerstand. Damit sind Transistoren eines der wichtigsten Elemente der Mikroelektronik. Traditionell werden Transistoren aus dem Halbleitermaterial Silizium hergestellt. Graphen ist ein Material, das aus einer einzigen Schicht von Kohlenstoffatomen besteht. Manchmal wird in diesem Zusammenhang auch von **2D-MATERIALIEN** (→ S. 80) gesprochen. Dadurch, dass Graphen aus einer einzigen Schicht aus Kohlenstoffatomen besteht, kam nach der erstmaligen Anwendung von Graphen als Transistor von Kostya Novoselov und Andre Geim und ihrem Nobelpreis im Jahr 2010 die Hoffnung auf, dass Graphen Silizium ablösen könnte und so eine nennenswerte Verkleinerung der Mikroelektronik

ermöglichen würde. Da Graphen aber kein Halbleitermaterial wie Silizium ist, lässt sich dieser Transistor nicht wirklich ausschalten, was zu grossen Verlusten führen würde. Diese eine Problem, verbunden mit der grossen Herausforderung einen skalierbaren Chip mit Graphen zu ermöglichen ist es nach der Einschätzung von Herrn Christian Schönenberger schwierig gegen die hochentwickelte Siliziumtechnologie bestehen zu können.

Allerdings ist Graphen überall dort interessant, wo Effekte zum Tragen kommen, die mit Oberflächen oder dem Verhältnis von Oberfläche und Volumen zusammenhängen. Etwa für die Speicherung elektrischer Energie in Batterien oder für Brennstoffzellen. Diese Anwendungen sind allerdings sehr spezifisch und werden zum Teil bereits durch Energieforschungsprojekte des BFE abgedeckt.





## Neuromorphe Elektronik

Tobi Delbruck (ETH Zürich)

**Forschungsfeld der neuromorphen Elektronik nutzt Erkenntnisse aus der Biologie im Allgemeinen und aus den Neurowissenschaften im spezifischen und versucht diese für das Design von Computerchips nutzbar zu machen. Da biologische Nervensysteme – im Vergleich zur Elektronik – sehr energieeffizient sind und dennoch grosse Datenmengen verarbeiten, wird das Forschungsfeld von der Aussicht angetrieben, eines Tages energieeffizientere und leistungsfähigere Chips als die heute verfügbaren bauen zu können.**

### Definition

Bio- oder Neuromorphe Elektronik ist ein Sammelbegriff für verschiedene Ansätze zum grundlegenden Design von Mikrochips. Diesen Ansätzen ist gemein, dass sie sich am Nervensystem orientieren und versuchen, Erkenntnisse aus den Neurowissenschaften für das Chipdesign nutzbar zu machen. Durch die Nachahmung natürlicher Vorbilder (Biomimikry) erhofft man sich leistungsfähigere und energieeffizientere Mikrochips für Anwendungen im Bereich der künstlichen Intelligenz (→ BIONICS, S. 96).

### Chancen

Künstliche Intelligenz wird alle Bereiche von Wirtschaft und Gesellschaft durchdringen. Bei künstlich intelligenten Systemen handelt es sich in der Regel um Softwareanwendungen. Solche Systeme werden meist auf sehr leistungsfähigen Computern betrieben, deren Hardware nicht speziell für eine bestimmte Anwendung ausgelegt ist. Biomorphe Chips gehen dagegen oft mit dem Versuch einher, eine anwendungsspezifische Hardware zu entwickeln, die auf das darauf laufende System zugeschnitten ist.

Wenn es gelingt, die Prinzipien des Nervensystems auf Computerchips zu übertragen, werden die Chips leistungsfähiger und energieeffizienter. Damit sind diese Chips besonders relevant für IoT- (→ S. 128) und medizinische Wearables (→ TRAGBARE MEDIZINISCHE GERÄTE S. 104) oder implantierte Geräte (→ BIONICS, S. 96), die mit wenig Energie auskommen und Umweltdaten verarbeiten müssen. Durch den geringeren Energieverbrauch sind biomorphe Mikrochips ein vielversprechender Kandidat für den Aufbau autonomer Systeme, die sich implantieren lassen. Als bionische Anwendung im Körper könnten solche Chips die Funktion geschädigter peripherer neuronaler Systeme übernehmen.

### Risiken

Gegenwärtig liegt die Entwicklung neuromorpher Elektronik stark in den Händen Chinas und der Vereinigten Staaten. Wenn auch andere Länder/Regionen eine weltweit wichtige Rolle bei diesen Entwicklungen spielen wollen, muss dies mit einer strategischen Finanzierung und der Schaffung gross angelegter Forschungsprogramme einhergehen.

Gerade bei neuen Technologien wie den biomorphen Chips gibt es viele potenzielle Hindernisse. Ausreichend hohe Investitionen in verschiedene Ansätze über einen längeren Zeitraum und neue Ideen sind die bisher bewährteste Methode zur Förderung neuer Technologien.

### Förderung

Die Entwicklung biomorpher Elektronik wird bereits von der öffentlichen Hand gefördert, zumindest auf Projektebene.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* ETH Zürich, Universität Zürich (Institut für Neuroinformatik). Viele Gruppen beschäftigen sich implizit mit dem Thema und experimentieren mit Ansätzen aus den Bereichen Computer Vision, Hirnimplantate, Hörgeräte und Robotik.

*Firmen:* IBM Research Zurich (Phasenwechsel-Speicher), Inivation AG (neuromorphe Sehsensoren), Sony (neuromorphe Bildsensoren), Synthara (energieeffiziente Deep-Network-Inferenzbeschleuniger, die gehirnähnliches Sparse Computing nutzen), SynSense AG (ehemals aiCTX AG – energiesparende Mixed-Signal-Sensorik und – Verarbeitung

*Vernetzung:* Es gibt keine grossen Cluster, Forschungsverbände oder Förderinitiativen. Auch fehlt es an der Anbindung an andere Initiativen zur künstlichen Intelligenz, wie z.B. an das ETH AI Center.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* China, USA



## Quantencomputer

Andreas Fuhrer (IBM Research Zurich)

Es zeichnet sich ab, dass Quantenrechner in Zukunft Probleme lösen können, die auch mit den besten herkömmlichen Computersystemen nicht lösbar sein werden. Zudem werden Quantenrechner im Zusammenspiel mit heutigen Computern viele Algorithmen und Rechenaufgaben signifikant beschleunigen. Dazu müssen allerdings die Fehlerquellen reduziert und die Anzahl Qubits skaliert werden. Für die Schweiz bieten sich dank ihrer Spitzenforschung und exzellenter Infrastruktur gute Chancen, international Akzente zu setzen.

### Definition

Quantencomputer sind Rechner, die im Gegensatz zu klassischen Computern die Gesetze der Quantenmechanik nutzen, um mit kontrollierbaren Quantenzuständen, beispielsweise den Energieniveaus einzelner Atome, zu rechnen. Während klassische Computer mit Bits rechnen und speichern, nutzen Quantencomputer sogenannte Qubits. Ein Bit hat zwei Zustände, die mit Eins und Null bezeichnet werden und ähnlich einem Schalter die Zustände «Strom ein» und «Strom aus» repräsentieren. Qubits können dagegen in mehreren Zuständen gleichzeitig sein und somit viele Rechnungen parallel ausführen.

Ein Quantenrechner benötigt demnach auch viel weniger Qubits als ein klassischer Rechner Bits. Da Qubits jedoch meist durch mikroskopisch kleine Objekte und minimale Energieunterschiede realisiert werden, sind sie störungsanfälliger als klassische Bits. Deshalb müssen Quantensysteme, die zum Rechnen verwendet werden, hermetisch vor Umwelteinflüssen abgeschirmt und meist auch bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt betrieben werden. Zum Rechnen mit Qubits braucht es auch entsprechend hohe Präzision bei den Kontrollgeräten (Laser oder Mikrowellenquellen). Zudem benötigen Quantencomputer gänzlich neue Systemarchitekturen (Hardware, Algorithmen, Software und auch ein enges Zusammenspiel mit herkömmlichen Prozessoren)

Gegenwärtige Anwendungen von Quantenrechnern werden in Forschungslaboratorien oder in Rechenzentren über die Cloud durchgeführt. Auch wenn diese Systeme in der Wirtschaft im Moment noch keine klassischen Rechner ersetzen, so nutzen doch viele Firmen die existierende Hardware, um für sie zukünftige Anwendungsbeispiele abzuklären.

### Chancen

Schon heute gelten Quantencomputer als sehr vielseitig einsetzbar. Dadurch dass Quantenrechner gewisse Probleme viel schneller lösen können

als herkömmliche Computer, zeichnen sich erste Anwendungen bspw. in der Chemie, der Materialforschung, der Medizin und zum Lösen von komplexen Optimierungsproblemen (Verkehr, Logistik) sowie in der Finanzbranche ab.

Quantencomputer sind derart komplex, dass kein einzelnes Unternehmen und kein einzelnes Land Konstruktion und Bau von Quantencomputern im Alleingang schaffen wird. Vielmehr erfordert die Entwicklung die Zusammenarbeit von Wissenschaft, Technologie und Industrie und ein grosses Ökosystem von Technologiezulieferern. Die Schweiz hat die Quantentechnologien schon sehr früh gefördert und hat mit ihrer Spitzenforschung, ihrer exzellenten Infrastruktur und vielen innovativen KMU sehr gute Chancen, auch weiterhin einen signifikanten Beitrag zu leisten.

### Risiken

Andere Länder haben unterdessen aufgeschlossen und investieren zum Teil viel mehr Mittel in F&E-Aktivitäten im Feld der Quantencomputer als die Schweiz. Deutschland, Frankreich oder die Niederlande investieren jährlich gar 0.01% von ihrem BIP in die Förderung von Quantencomputern.

Durch den Wegfall von Horizon hat der Forschungsstandort Schweiz stark an Attraktivität verloren. Für hiesige Forschende wurde es

schwieriger, an internationalen Projekten teilzunehmen. Der Aufbau von Knowhow dauert viele Jahre und erfordert die Einbindung in internationale Netzwerke. Allein durch starke Partnerschaften, durch internationalen Austausch von Forschern und Experten im Rahmen von internationalen Kollaborationen zwischen Universitäten und Industrie ist es der Schweiz auch in Zukunft möglich, auf diesem Gebiet kompetitiv zu sein. Erschwerend kommen die restriktiven Einreise- und Arbeitsbewilligungen hinzu, um internationale Top-Wissenschaftler und Ingenieure hier anzusiedeln.

In der Schweiz gibt es vergleichsweise wenig Venture-Kapital, und im Ausland gibt es zum Teil attraktivere Fördermöglichkeiten für Start-ups. Dies könnte dazu führen, dass forschungslastige Spin-offs, Start-ups und im Hightech-Bereich ins Ausland abwandern, wo sie entsprechende Finanzierung und Förderungen erhalten.

---

## Förderung

Die Schweiz hat davon profitiert, dass sie das Potenzial der Quantentechnologien früh erkannt und gefördert hat. Der NCCR QSIT hat von Anfang an die industrielle Forschung eingebunden und so diversen Start-ups im Bereich zum Durchbruch verholfen. Jedoch wird das Programm QSIT 2022 enden. Der NCCR SPIN, der ebenfalls im Bereich Quantencomputer angesiedelt ist, ist deutlich

fokussierter. Solche Projekte sind zwar wichtig, im internationalen Vergleich aber indessen recht klein. Die Schweiz kann nur dann weiterhin Akzente setzen, wenn sie dem Forschungsbereich weiterhin strategische Priorität einräumt und Bedingungen schafft, die für Forschung und Industrie förderlich sind.

Um den Standortvorteil zu sichern, wäre es wichtig, dass auch industrielle Forschung (in Start-ups, KMU und grösseren Unternehmen) auf diesem Gebiet staatlich gefördert wird. Ein lokaler Zugang zu entsprechender Hardware würde es Unternehmen, die Anwendungen, die z.B. entsprechende Programmierumgebungen entwickeln, ermöglichen ihre Applikationen und Algorithmen zu testen.

Quantencomputer haben das Potenzial, heute gängige Verschlüsselungsverfahren obsolet zu machen. Deshalb ist es auch von zentraler Bedeutung, verwandte Bereiche wie die **POST-QUANTEN-KRYPTOGRAPHIE** (→ S. 52) zu fördern. Dazu müssen Bund, Armee und private Firmen (etwa Finanzdienstleister) schon jetzt abklären, was das Vorhandensein solcher Systeme in Zukunft bedeuten wird. Entsprechende Massnahmen sollten jetzt eingeleitet werden.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universitäten Basel und Genf

*Firmen:* Basel Precision Instruments, IBM Research Zurich, idQuantique, Microsoft, Miraex, ProjectQ, Qnami, QZabre, Silq, Synergy Quantum, Zurich Instruments (Hersteller und Zulieferer)

*Vernetzung:* Durch die beiden NCCR QSIT und SPIN ist die Vernetzung bis in die Industrie gut.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* Europa: Quantum Flagship, Deutschland (Fraunhofer-Gesellschaft, Leibniz-Gemeinschaft, Lower Saxony Quantum Valley, Max-Planck-Gesellschaft, Quantum Valley München, Quantum Village Ehningen), Finnland (VTT Helsinki), Frankreich (Atos, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives CEA), Grossbritannien (Raum London, National QC Center (NQCC), Oxford University), Niederlande (TU Delft, TU Eindhoven, Universität Amsterdam, Universität Leiden, Universität Twente; Quantum Delta), Österreich (AQT Innsbruck), Schweden (Chalmers University of Technology, Wallenberg Stiftung) Weltweit: Australien, China, Kanada / USA (Harvard, MIT, Princeton University, UC Berkeley, University of Chicago, Yale University; DWave, Google, Honeywell, IBM, IonQ, PsiQuantum, Rigetti). Eine Übersicht findet sich unter <https://quantumcomputingreport.com/players/>.



## Quanten- und Postquantenkryptographie

Bernhard Tellenbach (ZHAW)

Die Quantenkryptographie beruht auf den Gesetzmässigkeiten der Quantenmechanik und nutzt den Zustand von Lichtteilchen (Quanten). Diese Technologie ermöglicht den Schutz sensibler Informationen und Datenkanäle. Zugleich ermöglicht sie leistungsstarken Computern aber auch, diese gängigen Verschlüsselungsverfahren anzugreifen. Ihre Bedeutung für die Schweiz ist eher gering. Eine weit höhere Relevanz erzielen die Verfahren der Post-Quanten-Kryptographie, die auch mit Hilfe eines leistungsfähigen Quantencomputers nicht effizient angegriffen werden können. Sie entschärfen deshalb den potenziell disruptiven Charakter des Quantencomputers in Bezug auf diverse heute breit eingesetzte kryptografische Verfahren.

### Definition

Bei der Quantenkryptographie werden quantenmechanische Effekte als Bestandteil kryptografischer Verfahren genutzt. Solche Bestandteile sind Verschlüsselungsalgorithmen, Signaturalgorithmen oder kryptografische Hashfunktionen. Dabei ist der Quantenschlüsselaustausch (Quantum Key Distribution; QKD) die bekannteste Anwendung der Quantenkryptographie: Zwei

Parteien einigen sich auf einen gemeinsamen geheimen Schlüssel, ohne dass eine dritte Partei Informationen über den Schlüssel erhält, selbst wenn sie den Kommunikationskanal abhört. Andererseits ermöglicht die Quantenkryptographie auch die Entwicklung von Verfahren, mit denen Quantencomputer einige der heute sehr verbreiteten kryptografischen Standards viel effektiver angreifen können als klassische Computer. Unter dem Begriff der Post-Quanten-Kryptographie wurden als Gegenreaktion kryptografische Verfahren entwickelt, deren Sicherheit auf mathematischen Problemen beruht, die Quantencomputer nicht signifikant schneller lösen können als herkömmliche Computer.

### Chancen

Die Quantenkryptographie und ihre Weiterentwicklung werden mit hoher Wahrscheinlichkeit positive Auswirkungen auf die Sicherheit von elektronischen Daten haben. Damit werden kritische Infrastrukturen wie Energieinfrastrukturen, Finanz- oder E-Voting-Systeme sowie Telekommunikationsnetzwerke besser vor Angriffen geschützt werden können. Zugleich bietet die Quantenkryptographie Möglichkeiten für die Forschung. Durch die Umstellung auf die Post-Quanten-Kryptographie soll der Schutz der digitalen Wirtschaft und Gesellschaft vor Attacken mit Hochleistungsrechnern wie Quantencomputer

weiter erhöht werden. Für viele Firmen ergibt sich dadurch die Gelegenheit, in diesem Technologiebereich Dienstleistungen anzubieten, auch wenn noch nicht alle einzusetzenden kryptografischen Bausteine international standardisiert sind. In Zukunft werden die Unternehmen diese Umstellung angehen müssen, weshalb ein grosses MarktPotenzial nahezu garantiert ist.

### Risiken

Der Nutzen der Post-Quanten-Kryptographie liegt darin, dass sie Schutz vor dem Einsatz eines leistungsfähigen, universellen Quantencomputers zu bieten vermag. Mangelt es an der Entwicklung und Realisierbarkeit eines solchen Computers, so erweisen sich sämtliche Investitionen – finanzieller und nicht-finanzieller Art – in diese Technologie nahezu als unnötig. Somit besteht das ökonomische Risiko einer Fehlallokation von Ressourcen. Da letztlich jegliche Investition dieses Risiko in sich birgt, gilt es dieses, dem erwarteten Nutzen respektive dem Potenzial einer solchen Investition gegenüberzustellen. Andererseits kann die Gefahr gerade darin bestehen, dass Quantencomputer eingesetzt werden, ohne dass ein hinreichender Schutz durch post-quantenkryptografische Verfahren existiert. Die Gesellschaft wäre disruptiv betroffen, da eine Systemumstellung rund zehn Jahre in Anspruch nehmen könnte. Praktikabel ist daher eine

Umstellung im Rahmen des laufenden Erneuerungsprozesses beim Ersatz von Einzelsystemen und Lösungen.

---

## Förderung

Die existierenden Förderinstrumente von staatlicher Seite sind aus realpolitischer Sicht ausreichend. Es bestehen Möglichkeiten, die jedoch nicht spezifisch auf die Quanten-Kryptographie ausgerichtet sind, so z. B. seitens SNF (Practice-to-Science-Stipendium) und seitens ETH (Post-Quantum Kryptographie System CRYSTALS). Private Förderinitiativen sind nicht bekannt und nicht entsprechend ausbaubar, da in der Schweiz keine ausgeprägte Risikokapitalgeber-Kultur vorliegt.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universitäten Basel und Genf, USI, OST, Empa, PSI

*Firmen:* IBM Research Zurich, ID Quantique, Securosys SA, Terra Quantum, WISEKey International Holding AG

*Vernetzung:* National Centre of Competence in Research (NCCR) in Quantum Science, SwissQuantum. Im Bereich QKD liegt eine gute internationale Vernetzung vor.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* u.a. Schweiz



Quelle: Robert Linder auf Unsplash

## Energie

Eine ausreichende, sichere, wirtschaftliche und nicht zuletzt umweltverträgliche Versorgung mit Energie ist für die moderne Gesellschaft und Wirtschaft unabdingbar. Die Zielsetzungen des Klimaschutzes erfordern eine rasche und umfassende Transformation des Energiesystems, wobei technologische Innovationen eine wichtige Rolle spielen. Die zukünftige Energieversorgung wird von Digitalisierung, dezentralen Systemen sowie einem grossen Anteil klimaneutraler und erneuerbarer Stromproduktion geprägt sein.

Die Energiestrategie 2050 sieht einen starken Ausbau der Erzeugung erneuerbarer Energien vor, welcher insbesondere im Bereich Windenergie stockt. FLIEGENDE WINDENERGIEANLAGEN (→ S. 62) sind eine interessante Alternative zu klassischen Windturbinen, für welche es in der Schweiz schwierig ist, geeignete und akzeptierte Standorte zu finden. Die fliegenden Anlagen sind aber noch nicht marktreif und eignen sich aufgrund der Konkurrenz zum Flugverkehr im Luftraum nur für sehr abgelegene Gebiete. Weiter wird die KÜNSTLICHE PHOTOSYNTHE (→ S. 64) vorgestellt, mit welcher der Energieträger WASSERSTOFF (→ S. 76) klimaneutral und effizienter produziert werden kann als im zweistufigen Verfahren via Photovoltaik und Elektrolyse. Die künstliche Photosynthese kann auch weitere Wertstoffe für die Produktion von anderen synthetischen Brenn-

oder Treibstoffen sowie für die chemische Industrie liefern.

Wasserstoff wird als zukunftsfähiger Energieträger angesehen, sofern er klimaneutral erzeugt wird. Er dürfte vor allem als Treibstoff im Schwer- und Langstreckenverkehr oder als Brennstoff sowie zur längerfristigen Energiespeicherung zum Einsatz kommen. Die LANGZEITSPEICHERUNG VON ENERGIE (→ S. 66) – in chemischen Verbindungen oder auch in Wärmespeichern – gewinnt grundsätzlich an Bedeutung, wenn der Anteil erneuerbarer Energien im System zunimmt. Dies weil die Produktion von erneuerbaren Energien saisonal variiert sowie im Tagesverlauf aufgrund der Witterung schwankt und deshalb oft nicht mit der aktuellen Energienachfrage synchronisiert ist. NEUE BATTERIETECHNOLOGIEN (→ S. 70) sind bedeutend für den kurz- bis mittelfristigen Ausgleich von Stromproduktion und -nachfrage und den erfolgreichen Ausbau der Elektromobilität. Wichtig im Batteriebereich sind neue Systeme, welche weniger seltene und problematische Elemente enthalten, und eine Kreislaufwirtschaft zur Wiederverwendung der Ressourcen.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien und der Speicher schafft auch neue Herausforderungen für die Systeme zur Stromübertragung, welche mit einer stärkeren AUTOMATISIERUNG DER STROMNETZE (→ S. 56) bewältigt werden können. Die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung in SUPERGRIDS (→ S. 72) könnte den internationalen

Handel mit und den Ausgleich von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen zwischen weit entfernten Weltregionen ermöglichen. Supergrid-Technologien machen aber nur Sinn, wenn sie koordiniert über einen grösseren geografischen Raum wie den gesamten europäischen Kontinenten aufgebaut werden.

Zukünftig spielt auch die Reduktion des Energieverbrauchs durch effiziente Technologien eine wichtige Rolle. ENERGY HARVESTING (→ S. 60) macht es möglich, geringe Energiemengen aus der Umgebung nutzbar zu machen, beispielsweise für die Stromversorgung kleiner, mobiler Geräte des INTERNET OF THINGS (→ S. 128). Im Gebäudebereich können MIKROSTRUKTURIERTE FENSTER (→ S. 68) die Tageslichtnutzung verbessern und die Innenraumerwärmung reduzieren, was zu Energieeinsparungen führt. THERMOELEKTRISCHE FARBEN (→ S. 74) stellen eine Energiewandlungstechnologie dar, die (Ab-)Wärme in Elektrizität umwandeln kann und so eine effizientere Energienutzung ermöglicht. Diese Technologie scheint aber nur für sehr spezifische Anwendungen geeignet zu sein und eine zeitnahe Umsetzung in marktfähige Produkte ist nicht absehbar.

Die politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen haben einen bedeutenden Einfluss auf die Entwicklung der Energietechnologien. Hier ist insbesondere die Einbindung der Schweiz in das europäische Energiesystem zu erwähnen, d.h. ob energiepolitisch eine enge Kooperation oder Selbstversorgung angestrebt wird. In letzterem Fall wäre beispielsweise der Anschluss der Schweiz an ein europäisches Supergrid unwahrscheinlich und Langzeitspeicher in der Schweiz müssten anders konzipiert werden. Auch die Möglichkeiten der Schweizer Energieforschung zur Zusammenarbeit mit europäischen Partnern wären im zweiten Fall eingeschränkt. Der Wirtschaftsstandort Schweiz verfügt über bedeutende Hersteller für etablierte Energietechnologien, welche stark exportorientiert sind, sowie über innovative Startups. Diese würden davon profitieren, wenn im Rahmen einer entschiedenen Umsetzung der Energiestrategie und des Klimaschutzes vermehrt Projekte zu neuen Energietechnologien in der Schweiz realisiert würden.

	Digitale Welt					Energie und Umwelt						Fertigung	Life Sciences			Technik und Gesellschaft				
Automatisierung der Stromnetze	●	●			●		●	●				●								●
Energy Harvesting			●	●	●	●								●						
Fliegende Windenergieanlagen	●					●		●	●											●
Künstliche Photosynthese						●		●				●								●
Langzeitspeicherung von Energie						●	●	●				●								●
Mikrostrukturierte Fenster				●								●								
Neue Batterietechnologien			●				●	●		●										●
Supergrids						●	●	●				●								●
Thermoelektrische Farben					●	●						●								
Wasserstoff							●	●				●								●

**Tabelle 6** zeigt den Zusammenhang zwischen den Technologien aus der Technologiegruppe Energie und den 20 Labels. Jeder Punkt markiert einen unmittelbaren Bezug, eine konkrete Anwendung oder eine zu erwartende Auswirkung.





## Automatisierung der Stromnetze

Gabriela Hug (ETH Zürich),  
Benjamin Sawicki (ETH Zürich)

Die Automatisierung der Stromnetze umfasst diverse digitale Technologien zur Überwachung und Steuerung der Netzinfrastruktur. Sie birgt grosse Chancen, um die Effizienz des Stromsystems zu steigern und Kosten im Bau und Betrieb zu senken. Die benötigten Technologien sind weit entwickelt. Für eine erfolgreiche Umsetzung müssen aber Hürden abgebaut werden: in der Regulierung des Strommarktes und für die Digitalisierung allgemein.

### Definition

Die Überwachung und Steuerung von Stromnetzen lässt sich mit dem Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie sowie intelligenten Algorithmen automatisieren. Die so automatisierten Netze werden auch als «Smart Grids» bezeichnet. Ziel der Automatisierung ist es, bestehende und neue Infrastruktur möglichst effizient zu betreiben (d.h. diese gut auszulasten, ohne sie zu überlasten), um Betriebs- und Investitionskosten zu reduzieren und verfügbare Ressourcen optimal zu nutzen. Dabei werden Prozesse und Entscheidungen vom Menschen auf künstliche Systeme überführt, um das Stromnetz

noch schneller, effizienter und zuverlässiger zu planen und zu betreiben.

Die Automatisierung der Stromnetze umfasst diverse, sehr unterschiedliche Technologien. Bereits heute erfolgen viele Prozesse vollautomatisch, so etwa die Frequenzhaltung oder die Umschaltung von Tag und Nachttarif. Der Trend geht hin zu einer Digitalisierung aller relevanten Komponenten (Aktoren und Sensoren, Messstellen und Überwachungssysteme sowie die Schnittstellen zwischen diesen Systemkomponenten) und einer dynamischen Steuerung der Systeme. Dazu gehört auch die Bearbeitung der anfallenden Daten mit Big Data und mit maschinellem Lernen (→ BIG DATA UND MASCHINELLES LERNEN, S. 42).

### Chancen

Die Automatisierung der Stromnetze leistet einen wichtigen Beitrag zur Netzintegration bzw. Steuerung von Speichertechnologien und dezentraler, stochastischer Produktion (insbesondere von erneuerbaren Energien). Ausserdem unterstützt eine Automatisierung zusätzliche Anwendungen, z.B. das (bidirektionale) Laden von Elektrofahrzeugen.

Die Schweiz liegt im Zentrum des europäischen Stromnetzes und ist ein wichtiges Energietransitland. Automatisierung und Überwachung der

grenzüberschreitenden Stromflüsse dürften deshalb auch an Bedeutung gewinnen. Gewisse Optimierungen des Netzbetriebs und Strommarktes – beispielsweise beim kurzfristigen Ausgleich von Produktion und Verbrauch – wären ohne Automatisierung gar nicht oder nicht wirtschaftlich machbar. Die digitalen Technologien ermöglichen eine effizientere Nutzung der Netzkapazitäten. Deshalb kann damit der Netzausbaubedarf beschränkt werden. Insgesamt wird die Automatisierung dazu beitragen, das Energiesystem zukunftssicher zu dekarbonisieren und gleichzeitig die Kosten zu senken.

Technologien zur Automatisierung des Stromnetzes sind bedeutend für die Schweizer Wirtschaft und wichtige Exportprodukte, sowohl in den Bereichen Hard- und Software. Erfolgreiche Schweizer Start-ups im Energiebereich entwickeln Automatisierungslösungen und können den Innovationsstandort weiter voranbringen.

### Risiken

Die Digitalisierung, welche die Grundlage aller Automatisierung ist, verläuft in der Schweiz grundsätzlich eher langsam. Teilweise verhindern bestehenden Regulierungen innovative Konzepte (z.B. neue Tarifmodelle für lokalen Stromhandel), weil diese nicht in die vorgegebenen Rahmenbedingungen passen. Dazu kommt in der Schweiz wegen hohen Ansprüchen an den Schutz der

Privatsphäre und personenbezogener Daten sowie Zweifeln zur Zuverlässigkeit und Nachvollziehbarkeit der automatisierten Prozesse auch eine generell zurückhaltende Einstellung gegenüber Automatisierung.

Das Netz könnte auch ohne zusätzliche Automatisierung weiterentwickelt werden, was aber den Ausbau der erneuerbaren Energien, Ladestationen usw. verlangsamen und insgesamt grössere Netzkapazitäten erfordern dürfte. Damit würden auch die Kosten für den Netzausbau und -betrieb ansteigen.

---

## Förderung

Forschung zur Automatisierung der Stromnetze wird vom SNF im Rahmen des NFP Zuverlässige, Allgegenwärtige Automatisierung mit einem Hauptfokus auf der Anwendung im elektrischen Netz (NCCR Automation) gefördert. Weiter unterstützt das Bundesamt für Energie Projekte mit Bezug zur Thematik im Rahmen der Swiss Competence Center for Energy Research SCCER und nun mit dem Nachfolgeprogramm SWiss Energy Research for the Energy Transition SWEET.

Private Förderung ist hauptsächlich auf Investitionen im Start-up Sektor ausgerichtet. Die Schweizer Netzbetreiber haben durch die Monopolstellung keine Anreize und durch die damit

einhergehende starke Regulierung wenig Spielraum für Innovationen. Die Fragmentierung und nicht vollständige Liberalisierung des elektrischen Energiemarktes reduzieren ausserdem die Attraktivität für private Investoren.

Angesichts der Bedeutung der Automatisierung für die zukünftige Stromversorgung scheinen zusätzliche Mittel für die Entwicklung und Umsetzung notwendig. Gerade die kleineren und mittleren der über 600 Verteilnetzbetreiber haben nicht die Kompetenzen und Ressourcen, um diesen Wandel voranzutreiben. Weil die Revision der relevanten Rechtsgrundlagen eher langsam und in kleinen Schritten vorangeht, sollten Forschungsplattformen zur Erprobung neuer Technologien und Konzepte unter realen Bedingungen geschaffen werden.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL (Distributed Electrical Systems Laboratory, Energy Center), ETH Zürich (Energy Science Center, Automatic Control Lab, Power Systems Lab), diverse Fachhochschulen

*Firmen:* ABB, Schneider Electric, Siemens, Swissgrid, diverse EVUs und Start-ups (z.B.: Adaptricity, DepSys, Exnaton, Hive Energy, tiko Energy Solutions)

*Vernetzung:* Durch die Programme SCCER, SWEET und NCCR Automation besteht ein gutes Netzwerk unter den Schweizer Akteuren und über die technischen Hochschulen und internationalen Konzerne bestehen auch Kontakte ins Ausland. Die Zusammenarbeit mit Europa ist aber erschwert ohne Stromabkommen.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland, Skandinavien

Weltweit: Singapur, USA (C3.ai Digital Transformation Institute)



## Energy Harvesting

Lothar Thiele (ETH Zürich)

Während einzelne Anwendungen von Energy Harvesting etabliert sind, sind für die Nutzung des Potenzials in diversen anderen Bereichen zusätzliche Forschung und Entwicklung nötig. Die Technologie steht in der Schweiz aktuell nicht im Fokus, würde aber gut zu Kompetenzen in der Automatisierung, Medizintechnik und Uhrenindustrie passen.

### Definition

Energy Harvesting bezeichnet die Gewinnung von geringen Mengen an elektrischer Energie aus der Umgebung. Quellen sind Bewegungsenergie, chemische Verbindungen, Sonnenlicht oder Wärme. Energy Harvesting dient der Stromversorgung kleiner, oft mobiler Geräte oder Systeme (Mikrotechnologie) mit geringer Leistung. Die Nutzung von Energie aus der Umgebung macht solche Geräte unabhängig von einer kabelgebundenen oder batteriebasierten Versorgung oder verlängert zumindest die Batterielebensdauer.

Die Nutzung der Technologie hängt von vier Aspekten ab: Erstens muss die Energiegewinnung aus der Umgebung, welche auf Technologien wie mikroelektromechanischen Systemen (MEMS), Peltier-Elementen, Photovoltaik und Piezo-

Elementen beruht, ermöglicht und optimiert werden. Zweitens muss die oft nicht kontinuierlich anfallende Energie mittels sehr kleinen und effizienten Energiewandlern und Speichern sowie gutem Energiemanagement für eine Anwendung nutzbar gemacht werden. Drittens müssen Soft- und Hardware auf die nicht immer vorliegende Energieversorgung angepasst werden – man spricht von «transient computing». Viertens müssen die bisher genannten Elemente für eine konkrete Anwendung in geeignete Systeme integriert werden.

### Chancen

Mit Energy Harvesting werden elektronische Geräte möglich, die räumlich und zeitlich praktisch unbeschränkt betrieben werden können und minimale oder keine Wartung wie Batteriewechsel benötigen. Solche Geräte können an Orten eingesetzt werden, die schwer zugänglich sind und bei denen deshalb die Energieversorgung von aussen unmöglich oder teuer wäre. Schliesslich reduziert die Vermeidung von Batterien auch die Umweltauswirkungen.

Energy Harvesting ist in spezifischen Anwendungen wie RFID (radio-frequency identification)-Transpondern bereits etabliert und hat grosse Bedeutung. Die Technologie kann im stark wachsenden Bereich der INTERNET-OF-THINGS-Anwendungen (→ S. 128) autonome und

energieeffiziente Lösungen ermöglichen. Konkrete Anwendungsgebiete sind beispielsweise drahtlose Sensornetzwerke in der Umwelt oder in der industriellen Produktion, in medizinischen Implantaten, in der Heimautomatisierung, in Smartwatches und bei anderen Wearables (→ TRAGBARE MEDIZINISCHE GERÄTE, S. 104). Aufgrund der grossen Anzahl möglicher Anwendungen könnten durch Energy Harvesting insgesamt relevante Mengen an Ressourcen und Energie eingespart werden.

### Risiken

Energy Harvesting ist ein langjähriges Thema in der Forschung und Entwicklung, konnte sich aber nur in wenigen Anwendungen gegenüber konventionellen Technologien der Energieversorgung (insbesondere Batterien) durchsetzen. Für den Forschungsstandort und die Industrie in der Schweiz steht die Technologie heute nicht im Fokus. Sie ist aber Schlüsseltechnologie für wichtige wirtschaftliche Anwendungen der Schweiz, so in der Automatisierung, der Medizintechnik, der Uhrenindustrie und bei grünen Technologien allgemein. Wenn das schweizerische Engagement in Forschung und Entwicklung nicht verstärkt wird, müssen entsprechende Lösungen zukünftig allenfalls aus dem Ausland eingekauft werden.

---

## Förderung

Es gibt Innosuisse-Projekte mit Industriekooperationen zum Thema, beispielsweise für Anwendungen in der Uhrenindustrie. Für die technologischen Grundlagen wie neue chemische oder physikalische Prozesse zur Energiegewinnung aus der Umgebung gibt es zahlreiche Fördermöglichkeiten, aber es fehlen Instrumente für die anwendungsorientierte Forschung zur Kombination der verschiedenen Aspekte in Systeme und zur Vernetzung der Akteure aus den verschiedenen Teilbereichen. Das Förderprogramm Bridge erscheint als guter Ansatz, um die Systemintegration und Anwendung in den Ingenieurwissenschaften zu stärken, und sollte weiter ausgebaut werden, um Technologien wie Energy Harvesting in der Schweiz voranzubringen.

Die EU fördert Energy Harvesting mit spezifischen Programmen, zum Beispiel «Energy Harvesting and Storage Technologies», und unterstützt viele Einzelprojekte (innerhalb Horizon 2021–2027).

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, FHNW, OST, ZHAW, CSEM

*Firmen:* keine Schweizer Firmen mit Spezialisierung Energy Harvesting, allenfalls Teilaspekt in Produkten; z.B. Siemens Building Technologies (Entwicklung zu Heimautomation in der Schweiz)

*Vernetzung:* National und International wenig Vernetzung auf Systemsicht, aber die Akteure zu Einzelthemen sind eng vernetzt.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: einige Forschungsgruppen in Italien

Weltweit: Lead in den USA (Caltech, Georgia Tech, Michigan State University)



## Fliegende Windenergieanlagen

Sarah Barber (OST)

Der Bereich der fliegenden Windenergie ist noch in einer Phase der Richtungsfindung und Entwicklung: Es gibt vielfältige Forschung und Prototypanlagen, aber noch kaum kommerzielle Lösungen und ein klarer internationaler Leader hat sich noch nicht herauskristallisiert. Das bietet eine Chance für den innovativen Technologiestandort Schweiz, sofern der Bund die Koordination und Förderung stärkt.

### Definition

Fliegende Windenergieanlagen sind Flugdrachen (vergleichbar mit Kitesurfing-Segeln) oder Fluggeräte mit starren Flügeln (vergleichbar mit Modellflugzeugen oder **DROHNEN** (→ S. 14)), die mit Seilen oder Kabeln mit einer Bodenstation verbunden sind und die Windkraft in höheren Luftschichten zur Stromerzeugung nutzen können. Mit Steuerungssystemen kann an den Seilen oder auf den Flügeln die Flugbahn angepasst werden, um den Wind immer dort einzufangen, wo er am stärksten weht. Bei beiden gängigen Konstruktionsstypen (Drache oder starre Flügel) wird entweder Strom erzeugt, indem das Fluggerät in der Windströmung aufsteigt und beim Ausrollen des Seiles einen fixierten Generator am Boden antreibt (wobei das Fluggerät anschliessend mit

geringerem Energieaufwand wieder nach unten gesteuert und das Seil aufgerollt wird) oder indem es durch Zug am Seil eine bewegliche Bodenstation bewegt und dadurch einen Generator antreibt. In einer dritten Variante wird ein Fluggerät in eine geeignete Luftschicht gesteuert, wo es mit Propellern und Generatoren Strom erzeugt, welcher via Verbindungskabel zur Bodenstation geleitet wird. Aktuell scheinen sich Systeme der ersten Variante mit stationärem Generator am Boden und der Konstruktionstyp mit starren Flügeln gegenüber Flugdrachen durchzusetzen.

### Chancen

Tiefere Energiekosten sind die Hauptmotivation für fliegende Windenergieanlagen. Dazu trägt einerseits der geringe Materialaufwand der Anlagen bei, weil im Gegensatz zu konventionellen Windenergieanlagen keine grossen Masten und Betonfundamente benötigt werden. Andererseits versprechen fliegende Windenergiesysteme eine bessere Energieausbeute als Anlagen am Boden oder auf dem Meer, weil in der Höhe stärkere und konstantere Winde genutzt werden können.

Fliegende Windenergieanlagen können als transportable Module konstruiert werden. Diese können an abgelegenen Orten oder in von Naturkatastrophen heimgesuchten Gebieten eingesetzt

werden, um eine dezentrale Energieversorgung zu ermöglichen.

Die schweizerische Energiestrategie 2050 strebt u.a. einen starken Ausbau der Windenergie an, der bisher schleppend vorankommt. Hier könnten fliegende Windenergieanlagen unterstützend wirken, weil sie einen weniger sichtbaren Eingriff in die Landschaft darstellen und allenfalls von der Bevölkerung besser akzeptiert werden als konventionelle Windenergieanlagen. Grundsätzlich kommen für fliegende Windenergieanlagen zahlreiche Standorte in Frage, weil sie präferentiell an schlecht erreichbaren und schwierig zu erschliessenden Orten installiert werden können.

### Risiken

Von fliegenden Windenergieanlagen existieren erst Prototypen und viele Herausforderungen könnten eine kommerzielle Umsetzung verunmöglichen. Auf technischer Seite sind neben der Frage, welches Konstruktionsprinzip sich durchsetzen wird, auch die Stabilität und Langlebigkeit verschiedener Bauteile zu klären sowie Leichtbauweise und Aerodynamik zu optimieren. Auch die Software zur Steuerung der fliegenden Systeme ist anspruchsvoll, nicht nur bezüglich des Starts und der Landung, sondern auch um im wechselnden Wind stets so zu fliegen, dass die

grösstmögliche Leistung abgeschöpft werden kann.

Letztlich müssen für die Kommerzialisierung von fliegenden Windenergieanlagen auch verschiedene Fragen zur Sicherheit und Regulierung geklärt werden. Dazu gehören der Schutz von Menschen und Infrastrukturen am Boden, Interferenzen mit Radaranlagen und die Abstimmung mit der Flugsicherung. Diese Probleme sprechen eher dafür, fliegende Windenergieanlagen nur in sehr abgelegenen Gebieten oder auf dem Meer einzusetzen.

---

## Förderung

Der Windenergiemarkt in der Schweiz ist heute klein und es werden in den Forschungsprogrammen des Bundes auch nur wenig Fördermittel für Windenergie und insbesondere fliegende Windenergieanlagen bereitgestellt.

Bisherige Hochschulprojekte wurden vom SNF und der Innosuisse unterstützt. Für grössere und risikobehaftete Innovationsprojekte wie die umfassende Entwicklung fliegender Windenergieanlagen bis zur Marktreife sind Fördergelder schwer zugänglich oder nicht ausreichend. Schweizer Windenergie-Start-ups werden teilweise durch Start-up-Programme der Hochschulen oder auch direkt von privaten Investoren finanziert.

Auf EU-Ebene gibt es keine spezifischen Förderprogramme zur fliegenden Windenergie, aber technologieoffene Ausschreibungen zur Förderung erneuerbarer Energien allgemein. Die beiden ETHs beteiligen sich im Konsortium des Doktorandenausbildungsnetzwerks AWESCO (Airborne Wind Energy System Modelling, Control and Optimisation).

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, OST, Forschungsnetzwerk Swiss Wind Energy R+D Network

*Firmen:* Twingtec, Skypull

*Vernetzung:* Die Akteure sind innerhalb der Schweiz kaum vernetzt; sie orientieren und vernetzen sich eher Richtung EU, weil dort Vermarktungspotenzial besteht.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Belgien, Deutschland, Niederlande

Weltweit: in geringerem Ausmass Kanada und USA



## Künstliche Photosynthese

Greta R. Patzke (Universität Zürich)

Die künstliche Photosynthese ermöglicht es, aus Sonnenlicht direkt synthetische Energieträger oder andere Wertstoffe herzustellen. Für die Anwendung dieser Technologie in grossem Masstab sind andere Weltregionen besser geeignet, aber die Schweiz kann relevante Beiträge zur Forschung und Entwicklung leisten.

### Definition

Verfahren, die Sonnenlicht nutzen, um Kohlenwasserstoffe herzustellen oder Wasser zu spalten, werden als künstliche Photosynthese bezeichnet. Mit diesen Verfahren soll u.a. Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Atmosphäre entfernt und synthetische Energieträger oder andere Chemikalien erzeugt werden. Diese Verfahren imitieren die natürliche Photosynthese, also den Prozess, mit dem Pflanzen Biomasse aus Wasser und CO<sub>2</sub> produzieren. In der künstlichen Photosynthese wird Wasser (H<sub>2</sub>O) in WASSERSTOFF (H<sub>2</sub>) (→ S. 76) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) oder CO<sub>2</sub> in Treibstoffe wie Methanol und andere Wertstoffe überführt.

Die Forschung und Entwicklung zur künstlichen Photosynthese mit Wasser als Ausgangsstoff verfolgen hauptsächlich zwei Richtungen. Einerseits wird die direkte Nutzung von solarer Energie zur

Wasserspaltung (solare Wasserstoffherzeugung) in einem Schritt vorangetrieben. Diese Technologie befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium mit einzelnen Prototypen. Andererseits werden die bestehenden Techniken der Photovoltaik und Elektrolyse kombiniert und optimiert, um in zwei Schritten Wasserstoff aus Sonnenlicht und Wasser zu gewinnen. Diese Technologie ist bereits reif für die Anwendung, aber es gibt Raum für Forschung und Verbesserung, insbesondere bei Prozessen und Materialien (z.B. günstigere Katalysatoren, Blasenbildung bei der Elektrolyse, Lebensdauer von Elektroden und Effizienzsteigerung).

### Chancen

Mit erneuerbaren Energien produzierter Wasserstoff kann im Zusammenspiel mit verschiedenen anderen Technologien einen wichtigen Beitrag leisten zu einer nachhaltigen Energieversorgung, sei dies als Treibstoff in der Mobilität, in der chemischen Industrie – besonders bei der Düngemittelproduktion –, in Wärmenetzen oder als langfristiger Energiespeicher. Dank der Erzeugung von Wasserstoff oder anderen chemischen Verbindungen mittels künstlicher Photosynthese können auch Zielkonflikte mit der Nahrungsmittelproduktion vermieden werden, weil keine Biomasse als Ausgangsstoff benötigt wird. Schliesslich wird in der Entwicklung der direkten

künstlichen Photosynthese zukünftig auch eine höhere Effizienz angestrebt als in den gängigen zweistufigen Verfahren.

Während die Anwendung der künstlichen Photosynthese in grosstechnischer Masse wohl hauptsächlich für Länder mit stärkerer Sonneneinstrahlung Sinn machen wird, könnte die Schweiz aber lokale Anwendungen betreiben und vor allem wichtige Beiträge zur Grundlagenforschung und Weiterentwicklung der Technologien und Materialien leisten. Sie kann dazu auf bestehende gute Forschungskompetenzen und Netzwerke aufbauen. Weiterentwicklungen der künstlichen Photosynthese haben auch Potenzial, weil grüner Wasserstoff als dekarbonisiertes Molekül ein wichtiger Schritt ist, um langfristig Erdöl in der grosstechnischen Synthese von Grundchemikalien zu ersetzen oder weil Zusatznutzen (z.B. Wasserreinigung) generiert werden können.

### Risiken

Die Energieeffizienz der zweistufigen Verfahren aus Photovoltaik und Elektrolyse ist weiter optimierbar und im Vergleich ist diejenige der direkten künstlichen Photosynthese aktuell noch gering. Weiter sind die benötigten Materialien (u.a. Edelmetalle) für Elektroden und Katalysatoren teuer und die Betriebsdauer einiger Komponenten wie Membranen ist zu verbessern. Für eine kommerzielle Anwendung und Konkurrenzfähig-

keit gegenüber anderen Technologien müssen diese Faktoren optimiert werden.

Bei der direkten, katalytischen künstlichen Photosynthese in einem Schritt entstehen Wasserstoff und Sauerstoff, welche zusammen explosives Knallgas bilden. Um die Sicherheit zu gewährleisten, werden in den bestehenden Prototypen die beiden Halbreaktionen entweder wie bei der Elektrolyse räumlich getrennt betrieben oder es muss eine nachträgliche Gastrennung vorgenommen werden.

---

### Förderung

Grundlagenforschung zur Wasserstoffherzeugung wird im Rahmen des SNF und auch einem Forschungsprogramm des Bundesamtes für Energie BFE gefördert. Ob die Förderung der Technologie gesamthaft ausreicht, ist schwierig zu beurteilen und hängt auch davon ab, welches Gewicht Wasserstoff in den schweizerischen Energiestrategien beigemessen wird. Der Forschungsschwerpunkt der Universität Zürich Von Sonnenlicht zu Chemischer Energie (URPP LightChEC) wird aber beispielsweise sehr gut gefördert, läuft allerdings 2024 aus.

Die Anwendung von Wasserstoff wird von privaten Initiativen wie dem Förderverein H2 Mobilität Schweiz vorangetrieben. Verbesserungsbedarf besteht bei der Verknüpfung von Grundlagenforschung zu Anwendungs-Initiativen; Innosuisse könnte ein Gefäss für solche Projekte sein.

Im Rahmen von EU-Horizon werden die Forschung und Entwicklung von Prototypen gefördert, u.a. mit den Konsortien SUNERGY und SOLAR2CHEM. Weiter hat der Europäische Innovationsrat EIC einen Preis von 5 Mio Euro für Demonstrationsprojekte zur künstlichen Photosynthese ausgeschrieben. In den USA werden mit dem ersten Energy Earthshot und in China im Rahmen des Fünfjahresplanes 2021–25 die Forschung und Entwicklung zu Wasserstoff gefördert.

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* Neben Aktivitäten an der EPFL, ETH Zürich (NCCR Catalysis und u.a. Fokus auf alternativer Technologie: Solarthermie), Universität Zürich (URPP LightChEC), Empa und PSI sind Teams und Vernetzungen zur Künstlichen Photosynthese prinzipiell an allen Schweizer Universitäten und Forschungsinstitutionen zu finden.

*Firmen:* Hydros spider AG, Hyundai Hydrogen Mobility AG, H2 Energy AG, Alpiq, Linde GmbH

*Vernetzung:* Die Forschung innerhalb der Schweiz tauscht sich über Initiativen wie URPP LightChEC oder NCCR Catalysis aus und ist international exzellent vernetzt; erfolgreiche Firmenkooperationen beispielsweise im Förderverein H2 Mobilität Schweiz.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* China, Japan, USA



## Langzeitspeicherung von Energie

Jörg Roth (PSI)

Langzeitspeicher für den saisonalen Ausgleich im Energiesystem sind zentral für die zukünftige Energieversorgung. Sie können in gewissem Mass Energieimporte ersetzen, falls dies energiepolitisch angestrebt wird. Für gewisse Technologien zur Langzeitspeicherung sind noch Grundgearbeiten nötig, für weiter entwickelte Lösungen müssen Langzeiterfahrungen gesammelt und der Markt entwickelt werden.

### Definition

Langzeitspeicher ermöglichen die Speicherung von Strom, beispielsweise aus unregelmässig anfallenden erneuerbaren Energien, oder auch von (Ab-)Wärme aus Gebäuden oder der Industrie. Sie ermöglichen, Schwankungen in der Energieproduktion und dem Verbrauch saisonal auszugleichen, die Abhängigkeit von Energieimporten zu reduzieren oder Wärme effizienter zu nutzen. Die Langzeitspeicher lassen sich in zwei Gruppen einteilen: die reinen Wärmespeicher und die chemischen Speicher (Umwandlung und Speicherung von Strom in flüssige oder gasförmige Brenn- oder Treibstoffe, «Power-to-X», siehe auch WASSERSTOFF (→ S. 76) und KÜNSTLICHE PHOTOSYNTHESE (→ S. 64)). Pumpspeicherkraftwerke als etablierte Technologie zur Langzeitspeicherung

von Strom und Druckluftspeicher, welche sich eher für mittlere Zeiträume (Tage-Wochen) eignen, werden hier nicht behandelt. NEUE BATTERIE-TECHNOLOGIEN (→ S. 70) für die kurzfristige Stromspeicherung werden in einem eigenen Kapitel behandelt.

Für die Langzeitspeicherung müssen zwei Aspekte betrachtet werden: einerseits die Herstellung des zu speichernden chemischen Energieträgers aus Strom oder die Quelle der zu speichernden Wärme und andererseits die eigentliche Energiespeicherung. Bei der chemischen Speicherung sind die Umwandlungsverluste bei der Erzeugung eine Herausforderung und bestimmen die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit des gesamten Prozesses. Gas- und Flüssigspeicher für Brennstoffe sind dagegen seit langem Stand der Technik. Die Schweiz ist beispielsweise wirtschaftlich an einem unterirdischen Erdgasspeicher in Frankreich beteiligt und im Wallis wird ein Erdgasspeicher in einer Felskaverne geplant. Allerdings kann die Grösse der erforderlichen Speicher auch eine Herausforderung darstellen. Sobald chemische Energieträger in geologischen Formationen gespeichert werden sollen, sind umfangreiche Erkundungen und ggf. zusätzliche Forschung notwendig. Bei den Wärmespeichern stellt die Speicherung an sich und nicht die Umwandlung bzw. Wärmeerzeugung die Herausforderung dar.

### Chancen

Zukunftsweisende Energiesysteme benötigen aus heutiger Sicht Langzeitspeicher, um Ungleichgewichte zwischen Energieproduktion und -verbrauch zu bewältigen sowie um Schwankungen der Energiepreise zu dämpfen. Mit einem steigenden Anteil erneuerbarer Produktion fällt die Energie zunehmend zeitlich unregelmässig an, während ein grosser Teil der Endenergie in der Schweiz für die Raumwärmeerzeugung – vorwiegend im Winter – benötigt wird. Auch der Stromverbrauch ist in der kalten und dunkleren Jahreszeit deutlich höher.

Technologien zur Langzeitspeicherung bieten für die Schweiz Chancen, sowohl in der Forschung und Entwicklung als auch in der Anwendung. Der exportorientierte Technologiestandort Schweiz könnte seine Stärken in der Grundlagenforschung sowie bei der Entwicklung marktfähiger Lösungen durch Fachhochschulen und Wirtschaft ausspielen. Der Markt für Langzeitspeichersysteme entwickelt sich gerade und es besteht Raum für Schweizer Unternehmen, sich dort zu positionieren. Für die Anwendung von Langzeitspeichern in der Schweiz ist entscheidend, wie sich die energiepolitischen Prioritäten und auch die energiewirtschaftlichen Möglichkeiten für Energieimporte in Zukunft entwickeln. Grundsätzlich böten Speicher die Chance, Abhängigkeiten von den Energielieferketten zu reduzieren und mehr Wertschöpfung im Inland zu

generieren, insbesondere wenn die Speichertechnologie auch in der Schweiz entwickelt und hergestellt würde.

---

## Risiken

Entwicklung und Betrieb von Langzeitspeichern sind mit Investitionsrisiken verbunden. Einerseits liegt noch kaum Langzeiterfahrung mit Anlagen in technisch relevanten Dimensionen vor und es ist nicht auszuschliessen, dass unerwartete Schwierigkeiten auftreten, welche Zusatzaufwand verursachen und die Projekte verzögern können. Andererseits hängt der Erfolg von Langzeitspeichern (wie bereits erwähnt) auch von politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab, welche eine Speicherung im Inland favorisieren und die verursachergerechte Verteilung der Kosten ermöglichen. Es ist unklar, ob die entsprechenden Richtungsentscheide im Rahmen der Umsetzung der Energiestrategie 2050 rasch getroffen werden.

Die Speicherung grosser Energiemengen ist ausserdem mit bekannten Unfall- und Störfallrisiken wie Brand, Explosion von Brennstoffen oder Stromschlägen verbunden und es müssen entsprechende Vorkehrungen getroffen werden.

---

## Förderung

Die aktuellen Ausschreibungen der Förderprogramme von Innosuisse (Flagship) und des BFE (SWEET) berücksichtigen Technologien zur Langzeitspeicherung. Darüber hinaus können auch die allgemeinen Förderinstrumente SNF, BFE und Innosuisse in Anspruch genommen werden. Private Fördergelder kommen von ETH-Rat (SynFuels-Projekt zur Erforschung von Power-to-X Technologien), der Energy Web Stiftung und der European Industrial Insulation Foundation.

Für Speichertechnologien mit tiefer technologischer Reife insbesondere im Bereich der chemischen Speicherung ist Förderung notwendig, um das jeweilige Potenzial auszuloten. Bei weiter entwickelten Technologien sollte die Förderung primär darauf zielen, Implementierungspartner zu bewegen, ihre Geschäftsfelder hinsichtlich Langzeitspeichern zu erweitern. Auf Stufe Bund sollte klar Stellung bezogen werden, ob in der zukünftigen Energieversorgung Speicher oder Importe bevorzugt werden sollen.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:*

Wärmespeicher: HSLU, OST, SUPSI, Empa

Chemische Speicher: EPFL, ETH Zürich, BFH, OST, ZHAW, Empa, PSI

*Firmen:* Wärmespeicher: Cowa Thermal Solutions, Fafco, Jenni Energietechnik AG, MAN, Sunamp Ltd., swisspor AG  
Chemische Speicher: AirLiquide, BASF SE, Clariant, Nordur Power Grid Association, Optisizer, Shell, Swiss Hydrogen, Umicore

*Vernetzung:* Die Akteure der jeweiligen Technologiegruppen kennen sich, haben regelmässige Treffen und pflegen internationale Kontakte, z.B. innerhalb von EU-Projekten.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Dänemark, Deutschland, Grossbritannien

Weltweit: USA



## Mikrostrukturierte Fenster

André Kostro (selbständiger Berater)

Mikrostrukturierte Fenster sind eine energiesparende Verglasungstechnologie und grenzen sich über die Funktion der Lichtverteilung von anderen Smart Windows ab. Sie verbessern die Tageslichtnutzung im Raum, womit öfters auf den Einsatz von Kunstlicht verzichtet und Energie eingespart werden kann. Auch reduzieren oder verhindern sie die Innenraumerwärmung und bieten daher Nutzern eines Gebäudes zusätzlichen Komfort. Mikrostrukturierte Fenster werden durch den verdichteten Städtebau an Relevanz gewinnen und architektonische Bauteile von Smart Cities werden.

### Definition

Bei mikrostrukturierten Fenstern stehen hohe Anforderungen an die Energieeffizienz sowie an den thermischen und visuellen Wohn- und Arbeitskomfort im Zentrum. Die Herausforderung liegt im Umgang mit solarer Einstrahlung und in der Kontrolle der Lichtlenkung und -reflexion einer Verglasung. Mikrostrukturierte Fenster bieten somit über eine angepasste Lichtverteilung eine optimale Tageslichtnutzung, indem bei gesteigerter Lichtdurchflutung im Rauminnern zugleich Blendeffekte reduziert werden.

Andere Smart Windows wirken nicht auf die Lichtverteilung, sondern kontrollieren vielmehr die Menge an Licht und somit an Energie, die in Innenräume gelangt. Ein bekannter Ansatz der Smart Windows sind Flüssigkristallsysteme, d. h. thermotrope Verglasungen, die durch verschiedene Substanzen zu Isolierglas werden können. Weitere Ansätze sind einerseits gaschrome Verglasungen, deren Scheibenzwischenraum sich durch Zuführung von Wasserstoffgas blau einfärbt, wobei die Durchsicht erhalten bleibt. Andererseits gibt es ebenfalls elektrochrome Fenster, wo eine elektrische Spannung für die Ein- bzw. Entfärbung des Fensterglases sorgt.

### Chancen

Im verdichteten Städtebau bieten mikrostrukturierte Fenster eine Möglichkeit, Sonnenlicht tief in Gebäuderäume zu lenken und die Verwendung von Kunstlicht zu reduzieren und Energie einzusparen. Damit verbessert sich ebenfalls die Wohn- oder Arbeitsqualität der Nutzer. Mikrostrukturierte Fenster werden in Zeiten des Klimawandels von zunehmender Relevanz sein.

Der globale Markt für Fensterglas beträgt rund 1.3 Milliarden m<sup>2</sup> Glas, das jährlich eingebaut wird. Damit bietet sich ein grosses Nachfragepotenzial, auch wenn mikrostrukturierte Fenster keine Standardprodukte darstellen. Die regulatorische Entwicklung ist dem Einsatz der

Technologie ebenfalls förderlich. So gibt es immer mehr, strengere und (teilweise) verbindliche Richtlinien resp. Standards und Zertifizierungen, die sich für die Nutzung von Tageslicht aussprechen (z. B. BREEAM in Grossbritannien oder LEED in den USA). In der Schweiz findet das Label Minergie-ECO Anwendung, das u. a. Anforderungen in den Bereichen Tageslicht und Innenraumklima definiert. In eine ähnliche Richtung geht die europäische Vorschrift EU-Tageslicht-Norm DIN EN 17037. Chancen bieten sich durch mikrostrukturierte Fenster insbesondere bei Bürogebäuden, da sie bei grösseren Glasfassaden wirksamer sind als z. B. bei Einfamilienhäusern. Damit bietet die Technologie mehr Lebensqualität im Innenraum. Auch können mikrostrukturierte Fenster zwecks zusätzlicher Kontrolle der Lichtmenge mit elektrochromen Fenstern kombiniert werden.

### Risiken

Die Integration der Lichtlenkelemente in Fensterglas und deren Lebensdauer wurden noch nicht eingehend geprüft. Es besteht daher die Gefahr, dass sich die Technologie in ihrem Gebrauch als (noch) nicht ausgereift erweist (z. B. bei regelmässigen Witterungswechseln). Der Technologie mangelt es derzeit an einem marktfähigen Preis, womit sich die Energieeinsparung aktuell nicht rechnet. Der Einsatz mikrostrukturierter Fenster rentiert erst nach 20–30 Jahren, wenn man nur

die Energieeinsparung berücksichtigt. Der Hebel auf die Mietpreise durch attraktivere Büroflächen wäre hingegen deutlich höher, er ist aber schwierig zu quantifizieren. Bis anhin konnte sich daher kein Unternehmen am Markt langfristig etablieren. Der Markt stellt damit das grösste Hindernis für die erfolgreiche Anwendung dieser Verglasungstechnologie dar.

---

## Förderung

Die Forschungsmöglichkeiten sind sehr gut. National liegt eine starke und sehr enge Vernetzung vor. Die Forschungsförderung erfolgt durch nationale Kompetenzzentren und durch das BFE. In der EU wurden Projekte sowohl im Gebiet der mikrostrukturierten Fenster als auch der Smart Windows durch Horizon 2020 gefördert. Auf privater Ebene ist die VELUX-Stiftung aktiv. Insgesamt darf die Förderung als ausreichend betrachtet werden. Zielführender als die Förderung der Grundlagenforschung ist jedoch eine Verbesserung der Umsetzung und Anwendung auf industrieller Ebene. Die Gründung eines eigenen, nationalen Technologiezentrums erscheint hierzu aber weniger notwendig, weil es entsprechende Bestrebungen in anverwandten Gebieten gibt (z. B. Sustainable Environment, Smart Cities). Instrumente der Förderung sind somit zahlreich vorhanden, Knappheit zeigt sich eher bei den finanziellen Mitteln.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, Empa

*Firmen:* Aepli Metallbau AG, BASF (Basel/Dübendorf), Glas Trösch Gruppe, SageGlass (Flamatt), VELUX Schweiz AG,

*Vernetzung:* Besonders über die beiden nationalen Kompetenzzentren SCCER-FEEBD und SCCER-SoE, ebenso über die Empa NEST-Unit Step2. International über das Förderprogramm Horizon 2020 und International Energy Agency (IEA Tasks 21, 50 & 61).

*Internationale Forschungs-Hotspots:* Dänemark (Microschade), Deutschland (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE; 3M, Okalux, Serralux), Österreich (Bartenbach, stark vernetzt mit Universitäten, v.a. zum Thema «Tageslicht»)



## Neue Batterietechnologien

Jörg Roth (PSI)

Batterien sind ein zentrales Element der zukünftigen Energiesysteme, insbesondere für die Elektromobilität und kurz- bis mittelfristige Speicherung der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien. Die etablierten Batterietechnologien werden primär im Ausland entwickelt und gefertigt. Für die Schweiz bestehen aber Chancen, sich bei neuen Materialien und Systemen sowie bei der Kreislaufwirtschaft für Batterien einzubringen.

### Definition

Eine Batterie ist ein Speicher für elektrische Energie auf elektrochemischer Basis. Im Folgenden werden nur wiederaufladbare Batterien behandelt, Einwegbatterien erscheinen, abgesehen von sehr spezifischen Anwendungen, aus Ressourcensicht nicht sinnvoll. Batterien speichern elektrische Energie sehr effizient über Zeiträume von mehreren Stunden bis zu Tagen und sind heute in verschiedenen Grössenskalen unabdingbar für zahlreiche Anwendungen. Batterien versorgen sehr viele Geräte des alltäglichen Gebrauchs mit Energie und sind ein zentrales Element der Elektromobilität. Grosse Batteriespeicher können effizient Flexibilität in Stromnetzen bereitstellen und ermöglichen so die Integration von erneuerbaren

Energiequellen. Für saisonale Speicherung sind Batteriesysteme wegen der hohen Investitionskosten (siehe Risiken) nicht wirtschaftlich.

Verschiedene Batterietechnologien werden heute bereits routinemässig genutzt oder befinden sich noch in frühen Stadien der Entwicklung. Kurz- und mittelfristig stehen Lithium-Ionen Systeme im Vordergrund. Diese sind Stand der Technik und werden inkrementell verbessert. Hauptsächlich soll dabei die Zyklenstabilität (Anzahl Be- und Entladezyklen, die in der Lebensdauer einer Batterie möglich sind) und Energiedichte bei gleichzeitiger Reduktion von problematischen Bestandteilen wie Kobalt erhöht werden. Mittel- bis langfristig können Feststoffelektrolyt-Systeme (welche schnellere Ladezeiten, höhere Energiedichte und mehr Leistung bei verbesserter Sicherheit versprechen), oder Redox-Flow Batterien (welche einen hohen Wirkungsgrad und geringe Selbstentladung bieten, aber sich als Flüssigbatterien nur für stationäre Anwendungen eignen), eine Rolle spielen.

### Chancen

Die elektrochemische Speicherung ist ein zentrales Element des zukünftigen Energiesystems und zur Erreichung der Klimaziele bis 2050 unabdingbar. Batterietechnologie ermöglicht den Verzicht auf fossile Energieträger im Mobilitätssektor und durch Batterien ist es vielen Haushalten möglich,

den selbstproduzierten Solarstrom im Eigenverbrauch zu nutzen, was auch die Stromnetze entlastet. Mit smarten Technologien (→ AUTOMATISIERUNG DER STROMNETZE, S. 58) und neuen Marktmodellen können auch parkierte Elektromobile als flexible Energiespeicher zur Netzstabilität beitragen.

Die Schweizer Forschung und Wirtschaft kann von der Entwicklung von fortschrittlichen Batterien profitieren, ausgehend von der langjährigen Tradition des Schweizer Maschinenbaus und der chemischen Industrie. Die Fertigung von Batteriezellen ist ein mechanisch komplexer Vorgang, der in den letzten Jahren mehr und mehr automatisiert wurde, aber in gewissen Prozessschritten, wie z.B. dem Stapeln der Zellen, noch optimiert werden muss. Ganz entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit im Batteriesektor ist das Wissen um die chemischen Prozesse und die materialwissenschaftlichen Grundlagen. Auch hier hat die Schweiz gute Voraussetzungen, im zukünftigen Wettbewerb zu bestehen.

### Risiken

Batterien sind hocheffiziente Energiespeicher, sind derzeit aber noch mit hohen Investitionskosten verbunden. Sie können am wirtschaftlichsten in Bereichen eingesetzt werden, die häufiges Laden und Entladen über Stunden bis Tage erfordern. Für Anwendungen wie den Ausgleich von

Schwankungen im Stromnetz oder bidirektionales Laden von Fahrzeugen muss aber noch der gesetzlichen Rahmen geschaffen werden, damit die Investitionssicherheit gewährleistet ist.

Die Herstellung von Batterien verursacht schädliche Emissionen und benötigt viele (teilweise seltene) Ressourcen, die oft importiert werden müssen. Um diese Problematik zu reduzieren, werden verschiedene Lösungen wie neue Materialien für die Batterieherstellung und Ansätze der Kreislaufwirtschaft wie verbessertes Batterierecycling oder die Zweitnutzung von Fahrzeugbatterien in stationären Speichern verfolgt. Dabei gibt es auch innovative Ansätze von Schweizer Firmen.

Mit vermehrter Nutzung von Batterietechnologien wird sich die Importabhängigkeit der Industrienationen weg von fossilen Energieträgern hin zu Rohstoffen verlagern, die in Batteriesystemen zum Einsatz kommen – entweder in Form von fertigen Systemen, die im Ausland produziert werden, oder in Form von Rohstoffen, die im Land zu Batterien verarbeitet werden. Wird der zweite Ansatz verfolgt, hat die Schweiz gute Voraussetzungen, im eigenen Land den Wert zu schöpfen.

---

## Förderung

Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich Batterien werden aktuell durch die regulären Instrumente der Innosuisse, des BFE und des SNF gefördert, aber es gibt keine spezifischen Förderprogramme für Batterietechnologien. Die privaten Initiativen Adolphe Merkle Stiftung, Energy Web Stiftung und European Industrial Insulation Foundation vergeben auch Förderung in diesem Bereich.

Im weltweit wachsenden Batteriemarkt ist die Materialbereitstellung und Fertigung für die etablierten Lithium-Ionen Systeme heute stark auf Asien ausgerichtet. Ein Förderprogramm zu Fragen des Batterierecyclings und der Entwicklung neuer elektrochemischer Systeme könnte helfen, die Schweiz in Zukunft stärker zu positionieren.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL (Redox Flow Battery), ETH Zürich, Universität Fribourg, BFH, Empa, PSI

*Firmen:* Asulab, Belenos Clean Power Holding Ltd., FZsonic, Kyburz, Leclanché, Renata, Wifag-Polytype

*Vernetzung:* Eine intensive Vernetzung der Schweizer Akteure hat durch die SCCER stattgefunden. Es bestehen zahlreiche internationale Verknüpfungen, sowohl ins akademische Umfeld als auch in die Wirtschaft.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland, Grossbritannien

Weltweit: China, USA



## Supergrids

Christian Franck (ETH Zürich)

**Supergrids könnten den internationalen Handel mit und den Ausgleich von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen ermöglichen. Sie bieten grosse Chancen für die Energieversorgung und Technologiefirmen der Schweiz. Für die Realisierung sind technologische Entwicklungen und eine enge internationale – aus Schweizer Sicht vor allem europaweite – Kooperation notwendig. Die entsprechenden politischen Rahmenbedingungen sind entscheidend, damit sich die Technologie in der Schweiz entwickeln kann.**

### Definition

Ein Supergrid ist ein weiträumiges Übertragungsnetz, in der Regel transkontinental oder multinational, das den Transport grosser Strommengen über lange Distanzen ermöglicht. Im Gegensatz zu den etablierten Wechselstrom-Übertragungsnetzen werden für Supergrids typischerweise Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssysteme (HGÜ) vorgeschlagen. HGÜ-Leitungen weisen geringere Verluste als Wechselstromnetze auf und ermöglichen damit eine effizientere Übertragung sowie die Verbindung von Offshore-Windanlagen mit dem Festland, welche mit Wechselstrom nicht machbar oder wirtschaftlich wären. Sie sind als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen

zwischen Netzen oder Produktionsanlagen bereits in Betrieb, grosse vermaschte HGÜ-Netze existieren dagegen noch nicht als vollständige Lösung. Zur Umsetzung solcher Netze müssen insbesondere Wechselstrom-Gleichstrom-Konverter und Schalter für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung weiterentwickelt werden. Supergrids würden keine Konkurrenz zu den bestehenden Übertragungsnetzen darstellen, sondern wären diesen überlagert und könnten sie über grössere Distanzen bis interkontinental verbinden.

### Chancen

Supergrids können die Transition zu erneuerbaren Energien und Dekarbonisierung unterstützen, indem sie lokale Schwankungen aus Wind- und Solarenergie durch Produktion oder Verbrauch in anderen, weit entfernten Regionen kompensieren und allgemein die überregionale Einbindung von erneuerbaren Energien in die Stromversorgung ermöglichen. Solche weiträumigen Netze können somit dezentrale Erzeugung und saisonale Speicher (→ LANGZEITSPEICHERUNG VON ENERGIE S. 66) ergänzen oder ersetzen, um den Lastausgleich und die Winterstromversorgung zu verbessern. Weiter könnten Schweizer Pumpspeicherkraftwerke und allenfalls die WASSERSTOFFPRODUKTION (→ S. 76) oder andere stromintensive Anwendungen durch die effiziente

Übertragung in einem Supergrid Strom aus anderen Regionen speichern oder nutzen und so von einem breiteren Angebot profitieren. Dies bedingt aber den politisch-gesellschaftlichen Willen zur internationalen Kooperation im Energiebereich.

Im Rahmen des NFP 70 Energiewende wurde auch untersucht, ob sich HGÜ-Leitungen ins bestehende Schweizer Stromübertragungsnetz einbinden liessen. Solche Umrüstungen zu hybriden Gleichstrom-Wechselstrom-Netzen wären technisch machbar und dürften bei der Bevölkerung auf grössere Akzeptanz stossen als der Neubau von Leitungen.

Der Aufbau eines Supergrids in Europa würde sehr grosse Investitionen erfordern und die Finanzierbarkeit ist schwierig abzuschätzen. Demgegenüber könnte in einem solchen effizienteren Netz Energie günstiger transportiert werden. Vom Aufbau eines Supergrids könnten spezialisierte Schweizer Firmen profitieren und es ergäben sich starke Impulse für Forschung und Entwicklung zur Technologie.

### Risiken

Ein Supergrid müsste sehr grossräumig umgesetzt werden, um seine Vorteile ausspielen zu können. Nur für die Schweiz macht es keinen Sinn, europaweit aber sehr wohl. Damit sich die

Schweiz (Forschung, Entwicklung und Umsetzung) an einem solchen Projekt beteiligen könnte, müssten die geeigneten regulatorischen Rahmenbedingungen wie Strom- und Rahmenabkommen mit Europa geschaffen werden. Würde Europa hingegen ein Supergrid ohne die Schweiz realisieren, wären negative Folgen für die schweizerische Versorgungssicherheit und den Stromhandel zu erwarten.

In Europa werden einzelne HGÜ-Leitungen über grosse Distanzen gebaut; die Umsetzung von vermaschten HGÜ-Netzen (Supergrids) wird primär in China vorangetrieben, gefördert von der staatlichen Netzgesellschaft und verbunden mit reger Forschung und Entwicklung. Grosse Vorhaben in Europa (Desertec, Nordsee-Erschliessung) kamen bisher nicht voran. Das Forschungsinteresse an HGÜ-Netzen ist damit im europäischen Raum etwas eingeschlafen. Ein grosses Projekt von Horizon 2020 zu HGÜ war PROMOTioN, die Schweizer Forschung konnte sich aber aufgrund ihrer Neuestufung als Drittland nicht beteiligen.

---

## Förderung

Möglichkeiten wären mit SNF und Innosuisse vorhanden, aber es braucht konkrete Demonstrationsprojekte, um Forschung und Entwicklung zu Supergrids in der Schweiz (wieder) Schub zu verleihen. Erfahrungen mit der Umsetzung von grossen Projekten in Europa haben gezeigt, dass

dabei auch zusätzliche (private) Förderung von Forschung und Entwicklung ausgelöst werden kann. Eventuell könnten mit dem Green Deal der EU neue Projekte zu HGÜ bzw. Supergrids initiiert werden.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich

*Firmen:* General Electric, Hitachi Powergrids (ehemals ABB), Swissgrid; verschiedene spezialisierte KMU entwickeln spezifische Verfahren und Komponenten, z.B. CONDIS, PFIFFNER Messwandler

*Vernetzung:* Die Akteure sind innerhalb der Schweiz lose vernetzt, z.B. über SCCER-FURIES. Einige Firmen und Forschungsgruppen sind international vernetzt und kompetitiv, aber nicht alle.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* China



## Thermoelektrische Farben

Corsin Battaglia (Empa)

Thermoelektrische Farben stellen eine Energiewandlungstechnologie dar, die (Ab-)Wärme in Elektrizität umwandeln kann und so eine effizientere Energienutzung ermöglicht. Die Stromerzeugung erfolgt mit Hilfe des Seebeck-Effekts, der umso stärker ist, je grösser das zur Verfügung stehende Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und -senke ist. Die effektive Anwendbarkeit von thermoelektrischen Farben in kommerziellen Produkten konnte bisher nicht nachgewiesen werden und das Potenzial der Technologie scheint deshalb beschränkt.

### Definition

Thermoelektrische Farben können als Lackierungen oder Beschichtungen eingesetzt werden. Diese bieten den Vorteil, dass sie an vielfältige Formen eines Objekts angepasst werden können und nicht auf plane Flächen beschränkt sind. Basis für die Technologie sind Halbleitermaterialien mit grossem Seebeck-Koeffizienten und tiefer Wärmeleitfähigkeit, z. B. Bismuttellurid. Durch Verdichtung der thermoelektrischen Farben und Härtung der Lackierung bei hoher Temperatur kann die Materialeigenschaft, Wärmeflüsse in Elektrizität umzuwandeln, verbessert werden. Für die direkte Umwandlung der Wärmeflüsse in

elektrischen Strom werden – wie bei jedem thermoelektrischen Prozess – ein Wärme- und Kältereservoir benötigt. Je grösser die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Reservoiren ist, umso effizienter ist die Stromerzeugung. Die thermoelektrische Farbschicht wird zwischen zwei Metallelektroden aufgetragen, um den Strom abzuführen. Diese Elektroden können als Metallfarben im Siebdruckverfahren auf die Oberfläche aufgebracht werden.

### Chancen

Die Schweiz bietet grosses Potenzial im Bereich der industriellen Abwärme. Die Nutzung für die produzierende Industrie im Niedertemperaturbereich unter 100 °C ist aktuell aber mit herkömmlichen Technologien meist unwirtschaftlich. Bei höheren Temperaturen kommen Wasserdampf und Organic Rankine Cycle Dampfturbinen zum Einsatz (z. B. bei Kehrichtverbrennungsanlagen). Der Einsatz thermoelektrischer Farben zur Stromproduktion könnte in verschiedenen Bereichen erfolgen: grossflächig, z. B. als letzte Stufe der Energierückgewinnung bei Kehrichtverbrennungsanlagen oder bei Daten- und Rechenzentren, die Wärme abstrahlen und deren Potenzial bei stärkerer Erwärmung gar weiter ausgeschöpft werden könnte. Kleinflächig bieten sog. «WEARABLE TECHNOLOGIES» (→ S. 104) ein ansprechendes Anwendungsgebiet: Ein Textilstoff

kann tragbare Elektronik, z. B. eine Smartwatch, mittels Körperwärme energetisch versorgen (→ ENERGY HARVESTING, S. 60). Auch hier kommt das Prinzip zu tragen, dass allein durch das Gefälle zwischen der warmen Körpertemperatur und der zumeist kühleren Umgebungstemperatur thermoelektrische Materialien elektrische Energie erzeugen können. Bei sportlicher Aktivität funktioniert dieser Vorgang am effizientesten im Winter aufgrund des deutlichen Temperaturunterschieds zwischen dem menschlichen Körper und seiner Umgebung. Andererseits kann diese Technologie auch als Wärmeflussensor eingesetzt werden. Im Gebäudebereich wird sich diese Technologie kaum gegen Infrarotkameras durchsetzen, könnte aber als «WEARABLE TECHNOLOGY» zum Monitoring der Körpertemperatur an Arbeitsplätzen, die hohen Temperaturen ausgesetzt sind, Verwendung finden (→ S. 104).

### Risiken

Mit thermoelektrischen Farben wird verteilt über die beschichteten Oberflächen Strom erzeugt, der nur in sehr spezifischen Anwendungen effizient genutzt werden kann. Daher ist der Transfer dieser Technologie in konkrete Produkte herausfordernd und es gibt bisher kaum realisierte Anwendungen. Mehrere Entwicklungsprojekte von Schweizer Firmen wurden inzwischen abge-

schlossen, sodass diese Firmen Thermoelektrik in ihr Produkteportfolio überführen konnten.

Für Firmen bieten sich Marktnischen. So hat das Zürcher Startup greenTEG erfolgreich einen thermoelektrischen Sensor zur Bestimmung der Leistung von Infrarotlasern auf den Markt gebracht. Zugleich besteht in diesem Technologiegebiet die Gefahr, dass die Thermoelektrik wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig zu alternativen Technologien ist. So kann sich ein technisch hochentwickeltes Produkt, das z. B. der Messung der Körpertemperatur dient, nur in Nischenanwendungen gegen bestehende, bewährte und kostengünstige Lösungen wie ein Thermometer durchsetzen.

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Empa

*Firmen:* Autoneum, Georg Fischer AG, greenTEG (ETH-Spinoff), Hexis AG

*Vernetzung:* International Thermoelectric Society

*Internationale Forschungs-Hotspots:* China (Shanghai Institute of Ceramics, Beihang University, Wuhan University of Technology), Korea (UNIST, Korea Institute of Science and Technology KIST, Korea Electrotechnology Research Institute), USA (MIT, Northwestern University, University of South Florida)

---

### Förderung

Der SNF und das Bundesamt für Energie (BFE) unterstützen die Erforschung im Gebiet der thermoelektrischen Materialien. Insgesamt bestehen ausreichend Möglichkeiten, gute Ideen zu finanzieren. Für die Etablierung eines NCCR fehlt es hingegen an der kritischen Masse.



## Wasserstoff

Tom Kober (PSI)

**Wasserstoff ist im Rahmen der Dekarbonisierung des Energiesystems ein vielversprechender Energieträger, wenn er mit klimafreundlichen Energietechnologien erzeugt wird. Für den Durchbruch sind aber Weiterentwicklungen der Wasserstofftechnologien sowie geeignete politische, wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen Voraussetzung.**

### Definition

Wasserstoff kann nicht an sich als Technologie bezeichnet werden, ist in seiner molekularen Form ( $H_2$ ) jedoch ein vielversprechender Energieträger, der als bedeutend für eine klimaneutrale Zukunft angesehen wird. Wasserstoff soll als Treib- oder Brennstoff im Mobilitäts- und Wärmesektor sowie zur längerfristigen Energiespeicherung zum Einsatz kommen. In der Mobilität geht es um Anwendungen, für welche batterieelektrische Fahrzeuge nicht geeignet sind, wie im Schwer- und Langstreckenverkehr. Neben der Dekarbonisierung der Energienachfrage bietet Wasserstoff die Möglichkeit einer verbesserten Integration erneuerbarer Energien, indem er die Speicherung von Strom aus unregelmässig anfallenden erneuerbaren Quellen (mittels

Elektrolyse) ermöglicht (→ LANGZEITSPEICHERUNG VON ENERGIE, S. 66).

Wasserstoff hat in Bezug auf Speicherung und Transport besondere Eigenschaften. Einerseits verfügt er in Relation zu seinem Gewicht über eine sehr hohe Energiedichte, andererseits ist Wasserstoff unter Normalbedingungen gasförmig und hat bezogen auf das Volumen eine geringe Energiedichte. Die Forschung und Entwicklung verfolgen deshalb seit Jahrzehnten das Ziel, die Wasserstoffmoleküle möglichst dicht in einen Speicher zu packen, um damit den Vorteil des geringen Gewichts nutzen zu können. Neben der Flüssigspeicherung oder der Hochdruckspeicherung – beides heute Stand der Technik – werden chemische Verbindungen gesucht, die sich leicht unter Wasserstoffaufnahme bilden sowie gleichzeitig leicht und kontrolliert unter Wasserstofffreisetzung zerlegt werden können. Dabei muss der Prozess vollständig reversibel sein. Metalllegierungen bringen diese Eigenschaft mit, allerdings zum Preis eines hohen Eigengewichts und hoher Kosten. Die Forschung untersucht aktuell weitere vielversprechende Ansätze, wie Kohlenstoffstrukturen und Nanomaterialien.

Weitere Felder der Forschung und Entwicklung sind die klimaneutrale Wasserstoffherzeugung (z.B. durch → KÜNSTLICHE PHOTOSYNTHESE, S. 64) und die effiziente Nutzung in Brennstoffzellen und Verbrennungsanlagen sowie die Integration

dieser Technologien in Fahrzeugen, thermischen Anwendungen und zur Stromerzeugung.

### Chancen

Wasserstofftechnologien können eine kosteneffiziente Dekarbonisierung der Energiebereitstellung in Bereichen wie dem Schwerlastverkehr und den Hochtemperaturanwendungen in der Industrie ermöglichen, wo eine direkte Elektrifizierung kaum bzw. nur zu sehr hohen Kosten möglich ist. Ausserdem könnte mittels grossskaliger Wasserstoffspeicherung die Problematik der saisonalen Diskrepanz von grösserer erneuerbarer Energieerzeugung im Sommer und erhöhtem Verbrauch im Winter reduziert werden. Wasserstoff wird auch für verschiedene chemische Produktionsprozesse sowie als Industriegas verwendet und in der Schweiz hergestellt – gegenwärtig grösstenteils aus fossilen Energien. Diese Anwendungen können ebenfalls mit neuen Produktionsprozessen dekarbonisiert werden. Für die Schweiz steht voraussichtlich die Anwendung von mit erneuerbaren Energien produziertem Wasserstoff im Vordergrund, wobei Länder mit einem grösseren Potenzial an klimafreundlich erzeugtem Strom bessere Voraussetzungen für die Wasserstoffproduktion haben.

Die Herstellung von Materialien, Komponenten wie Elektrolyseure und Brennstoffzellen oder ganzen Anlagen wie wasserstoffbetriebene

Gasturbinen für Wasserstofftechnologien kann ein zukünftiges Marktsegment für die hoch spezialisierte und exportorientierte Schweizer Industrie darstellen.

Der Erfolg von Wasserstofftechnologien ist auch von einer positiven politischen Wahrnehmung und Unterstützung abhängig, wie dies in vielen europäischen Ländern (inklusive EU-Kommission) der Fall ist.

---

### Risiken

Die energetische Nutzung von Wasserstoff erfolgt praktisch emissionsfrei. Die Herstellung von Wasserstoff ist jedoch energie- und kostenintensiv und die Umweltbilanz dieses Prozesses ist abhängig von den genutzten Energiequellen, welche allenfalls hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen. Bei der Speicherung von Strom in der Form von Wasserstoff und späteren Wieder-Verstromung ist auch der geringe Gesamtwirkungsgrad zu beachten, welcher diesen Prozess vor allem für kurzfristige Anwendungen ineffizient macht.

Wasserstoff bildet zusammen mit Luftsauerstoff explosives Knallgas, weshalb bei Herstellung, Transport und Nutzung geeignete Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden müssen. Heute sind unterschiedliche kantonale Regelungen (z.B. Feuerversicherungen, Gasverordnungen) ein Hindernis zur Realisierung von Wasserstoffinfrastruktur;

stattdessen sollten schweizweite Normen etabliert werden. Auch sollte der Beitrag von Wasserstoffanlagen zur Stabilisierung des Stromsystems bei der zukünftigen Festlegung von Netzentgelten berücksichtigt werden.

---

### Förderung

Es gibt keine direkt auf Wasserstofftechnologien ausgerichtete Förderung in der Schweiz, so dass Forschung über die regulären Fördermassnahmen das BFE oder die Innosuisse erfolgen muss. In der EU bestehen Förderprogramme wie das Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking.

Ein Anreizinstrument für Wasserstoff in der Schweiz gibt es im Verkehrssektor, wo wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-LKW von der LSVA ausgenommen sind. Solche Instrumente sind wichtig, um die durch hohe Investitionskosten geprägten Wasserstofftechnologien zu fördern.

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft stellt eine systemische Herausforderung dar, was für einen breiteren Forschungsansatz und Anreizinstrumente spricht. Hierfür wäre eine gezielte Förderung im Rahmen des SWEET Programms eine Option, um Wasserstofftechnologien im sozio-techno-ökonomischen Umfeld zu evaluieren.

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL (Laboratory of Materials for Renewable Energy), Empa, PSI (ESI Plattform, Labor für Elektrochemie und Labor für Energiesystemanalysen), Förderverein H2 Mobilität Schweiz

*Firmen:* H2 Energy AG, Hydrospider AG, Hyundai Hydrogen Mobility AG, Swiss Hydrogen

*Vernetzung:* Im Rahmen der SCCER (2014-2020) hat eine intensive Vernetzung der Akteure stattgefunden mit zahlreichen gemeinsamen Forschungsaktivitäten; es besteht eine begrenzte internationale Vernetzung durch die Mitwirkung in gemeinsamen Forschungsprojekten der EU und IEA.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland (Wasserstoff-Erzeugung durch Elektrolyse)

Weltweit: Japan (Technologieentwicklung mobiler Anwendungen), USA (v.a. kleinere Technologie-Start-ups)



Quelle: ETH Zürich

## Fertigungsverfahren und Materialien

Das Kapitel umfasst einerseits die beiden Fertigungsverfahren 3D-Druck von grossen Gebäudeteilen und 4D-Druck sowie andererseits die Materialthemen 2D-Materialien, abbaubare Sensoren, Bioplastik, Metamaterialien und selbstheilende Materialien. Die Technologien bergen mit Hightech- und Nischenanwendungen grosses Potenzial für die Schweiz und könnten zu einem Game Changer werden. Für die meisten Materialthemen ist die Zeit für die industrielle Umsetzung allerdings noch nicht reif und das Marktpotenzial noch nicht klar absehbar.

Beide Fertigungsverfahren sind spezifische Anwendungen des 3D-DRUCKS (→ S.128), also der schichtweisen – additiven – Fertigung. Sie ermöglichen die Herstellung von Strukturen mit komplexer Geometrie in Leichtbauweise. Dies können grosse Gebäudeteile, ganze Brücken oder Schalungsformen (z. B. für Betonbarrieren) sein (→ 3D-DRUCK VON GROSSEN GEBÄUDETEILEN, S. 82). Werden aktive Materialien additiv verarbeitet, entstehen Teile, die erst nach der Fertigung unter dem Einfluss externer Faktoren ihre endgültige Form annehmen – deshalb die Bezeichnung 4D-DRUCK (→ S. 84). 3D-BIODRUCK (→ S. 30) ist eine weitere Ausprägung der additiven Fertigung, die mit lebendem Biomaterial wie Zellen

arbeitet und deshalb im Kapitel Biomedizin bearbeitet wird.

Der Druck ganzer Gebäudeteile bietet zahlreiche Chancen, die von reduziertem Materialverbrauch über die On-site-Fertigung bis zur dezentralen Anwendung in Katastrophengebieten und in Schwellenländern reichen. 4D-Druck kann in zahlreichen Industriebereichen wie dem Bauwesen, dem Energiesektor sowie der Luft- und Raumfahrt zur Anwendung kommen, steht aber erst bei den biomedizinischen Anwendungen vor der Produktreife. Beide Technologien bergen grosses Potenzial für die Schweiz und könnten zu einem Game Changer werden, zumal die heimische Industrie gut aufgestellt ist und im Fall des 3D-Drucks von Bauteilen im internationalen Wettbewerb dominiert. Um das Potenzial voll auszuschöpfen, wäre für den 3D-Druck von grossen Bauteilen die Bildung eines Konsortiums und für den 4D-Druck spezifische Förderung ausserhalb derjenigen für additive Fertigung hilfreich. Fehlende Langzeitstudien und die Unsicherheit in Bezug auf Wartung und Unterhalt von 3D-gedruckten Strukturen könnten allenfalls hemmend wirken.

Bioabbaubar, elektrisch oder optisch leitend oder halbleitend, isolierend, magnetisch und selbstheilend sind nur einige der zahlreichen Attribute der vorgestellten Materialien. Die Eigenschaften sind entweder intrinsisch oder menschengemacht, die Materialien teilweise das Resultat

eines wissenschaftlichen Baukastens. So vielfältig die Eigenschaften der verschiedenen Materialklassen sind, so zahlreich sind die möglichen Anwendungen, die sich in fast alle Industrieklassen erstrecken. Die im Kapitel beschriebenen Materialien werden im Körper gut vertragen und bieten grosse Chancen für die Medizintechnik und die **PERSONALISIERTE MEDIZIN** (→ S. 128). Dank **2D-MATERIALIEN** (→ S. 80) könnte Silizium in Transistoren ersetzt und damit das Reshoring in der Elektronikindustrie initiiert werden. Im Körper und in der Umwelt **ABBAUBARE SENSOREN** (→ S. 86) und **BIOPLASTIK** (→ S. 88) können einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten, da die unzähligen Sensoren in IoT-Systemen (→ S.128) unschädlich abbaubar sein werden und der Food Waste dank smarten Lebensmittelverpackungen reduziert wird.

2D-Materialien und **METAMATERIALIEN** (→ S. 90) könnten die Photovoltaik revolutionieren, da sie effiziente Absorption und Energieumwandlung mit einer minimalen Materialmenge ermöglichen. Selbstheilende Materialien hingegen versprechen eine verlängerte Lebensdauer der Infrastruktur, geringere Unterhaltskosten und eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fussabdrucks im Bauwesen.

Die Materialien befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium und profitieren von Fortschritten in anderen Gebieten wie der additiven Fertigung oder dem 4D-Druck. Die Möglichkeiten sind gross und zahlreich, auch wenn die Zeit für die industrielle Umsetzung in den

meisten Fällen noch nicht reif und das Marktpotenzial noch nicht klar absehbar ist. Für die Schweiz werden sich vor allem in Hightech- und Nischenanwendungen Chancen bieten, da die Komplexität gross und die Qualitätsansprüche hoch sind. Den Chancen steht in der Schweiz die fehlende Vernetzung der Akteur:innen gegenüber und wie in anderen Ländern fehlende Langzeitstudien und hohe Zulassungshürden für neuartige Materialien – nicht nur für Anwendungen in der Medizin. Die Förderung der interdisziplinären Vernetzung mit grossen Programmen könnte sich auszahlen und dafür sorgen, dass aus den Möglichkeiten echte Chancen für die Schweiz werden.

	Digitale Welt					Energie und Umwelt					Fertigung	Life Sciences		Technik und Gesellschaft					
2D-Materialien	●					●					●	●	●	●					
3D-Druck von grossen Gebäudeteilen								●	●		●								●
4D-Druck							●			●	●		●	●					●
Abbaubare Sensoren		●		●						●	●			●	●				
Bioplastik										●	●	●		●	●				●
Metamaterialien	●					●					●	●	●	●					
Selbstheilende Materialien										●	●	●							●

**Tabelle 7** zeigt den Zusammenhang zwischen den Technologiegruppe Fertigungsverfahren und Materialien und den 20 Labels. Jeder Punkt markiert einen unmittelbaren Bezug, eine konkrete Anwendung oder eine zu erwartende Auswirkung. Die grauen Balken weisen darauf hin, dass die entsprechend markierte Technologie ein sogenannter Enabler ist und auf fast alle Industrieklassen eine Auswirkung haben wird.



## 2D-Materialien

Bruno Schuler (Empa)

**Dank ihrer aussergewöhnlichen Eigenschaften können 2D-Materialien ein Enabler für eine Vielzahl von Hightech-Anwendungen und somit Grundlage für die Schweizer Industrie werden. Trotz bahnbrechender wissenschaftlicher Erkenntnisse ist der technologische Reifegrad allerdings noch tief und das Marktpotenzial somit noch nicht absehbar.**

### Definition

Als zweidimensionale (2D) Materialien bezeichnet man eine Klasse von Festkörpern, die nur aus einer oder wenigen atomaren Lagen bestehen. Grundlage sind geschichtete Mineralien, deren atomare Lagen nur durch schwache Wechselwirkungen zusammengehalten werden, was die Isolation von Einzellagen ermöglicht. 2D-Materialien weisen einzigartige elektrische, mechanische und optische Eigenschaften auf. Bekanntestes Beispiel ist Graphen, eine 0.3 nm dicke Einzelschicht von Kohlenstoffatomen, die durch Aufblättern von Graphit extrahiert wird. Es ist der dünnste bekannte Stoff, zugleich aber der mechanisch stärkste, transparent und trotzdem äusserst leitfähig. Graphen ist nur eines von über 6000 Materialien, die stabil in zweidimensionaler Form auftreten.

### Chancen

2D-Materialien existieren in unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und können aus einem, aber auch mehreren chemischen Elementen bestehen. Sie decken das ganze Spektrum an physikalischen Zuständen von halbleitend und isolierend über magnetisch und metallisch bis zu supraleitend ab. 2D-Materialien reagieren stark auf ihre Umgebung und sind leicht manipulierbar. Dies ist nicht nur von enormem Interesse für die Grundlagenforschung, sondern ermöglicht zahlreiche Anwendungen. Darüber hinaus können verschiedene 2D-Materialien wie «atomares Lego» zu Heterostrukturen gestapelt werden. Der resultierende Stapel bildet ein künstliches Material mit neuen Eigenschaften und neuen Einsatzmöglichkeiten. In der Halbleiterindustrie könnten 2D-Materialien beispielsweise Silizium als Trägermaterial für TRANSISTOREN ablösen (→ S. 46). Man verspricht sich davon nicht nur die ultimative Miniaturisierung von Transistoren, sondern eine signifikante Effizienzsteigerung durch eine neue Transistorarchitektur. Optisch aktive Heterostrukturen könnten die Photovoltaik revolutionieren, da sie effiziente Absorption und Energieumwandlung mit einer minimalen Menge an Material ermöglichen. Diese Eigenschaft macht sie auch interessant für optoelektronische Schaltkreise.

Die Biokompatibilität von Graphen und graphenverwandten Materialien ermöglicht Anwendung-

en in der BIOMEDIZIN (→ S.27) wie die Konstruktion neuronaler Implantate in Kombination mit einer lokalen Verabreichung von Medikamenten. Im Automobilssektor und in der Luftfahrt wird Graphen bereits zur Beschichtung oder als Additiv in Kunststoffen eingesetzt, was sie zu leichten und zugleich belastbaren Materialien macht. Obwohl 2D-Materialien ein Enabler für eine Vielzahl von Technologien und Anwendungen sind, sind sie erst selten in Produkten anzutreffen. Ihr Marktpotenzial ist noch kaum abschätzbar.

### Risiken

Trotz vieler Fortschritte bei der Synthese, Charakterisierung und Prozessierung von 2D-Materialien steht der Sprung vom Labor in die Produktion mehrheitlich noch aus. Ein Grund liegt bei der Skalierung der Prozesse: Obwohl 2D-Materialien im Labormassstab mit dem Klebband gewonnen werden können, ist die Herstellung auf grossen Flächen eine Herausforderung. Um dieses Hindernis zu überwinden, braucht es nebst Materialforschung an den Hochschulen auch den Technologietransfer in die Industrie. Es ist zu erwarten, dass die industrielle Adaption wegen des aussergewöhnlichen Potenzials der Materialien schnell vorangetrieben werden wird.

In der Halbleiterindustrie sind 2D-Materialien bereits integraler Bestandteil der Roadmap. Aus strategischen Überlegungen ist das

Wiedererlangen zumindest von Kernkompetenzen und einer Teilautonomie in der Halbleiterproduktion für Europa eine Priorität, wofür die EU-Kommission mit dem «European Chips Act» die Grundlage schafft. Die Schweiz muss sich bemühen, Teil des entstehenden Ökosystems zu werden, um den Anschluss nicht zu verlieren.

---

## Förderung

Grundlagenforschung wird vom SNF und der EU unterstützt. Wegen des grossen Potenzials der Technologie und der erfahrungsgemäss hohen Hürden bei der anwendungsorientierten Finanzierung von Materialforschung könnte sich eine konzentrierte staatliche Förderung lohnen.

Obwohl in der Schweiz zu 2D-Materialien punktuell Forschung auf Weltklasseniveau betrieben wird, ist die geringe Vernetzung der Akteure ein Innovationshemmnis. Ein NCCR, das die Disziplinen Materialwissenschaften, Physik, Elektrotechnik, Chemie und Quanteninformationswissenschaften umfasst, könnte die Kompetenzen bündeln und die strategischen Interessen der Schweiz wahren. Komplementär wäre ein Technologietransferzentrum denkbar, um den Dialog zwischen Industrie und Forschung zu fördern, Lösungsansätze für die lokale Industrie aufzuzeigen und die Kommerzialisierung voranzutreiben.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* vor allem EPFL und ETH Zürich, aber Aktivitäten an fast allen Hochschulen, CSEM, Empa, PSI

*Firmen:* na

*Vernetzung:* Die Forschenden sind national kaum vernetzt, wohl auch bedingt durch den interdisziplinären Charakter des Forschungsgebiets.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: EU Graphene Flagship, Deutschland (RWTH Aachen), Grossbritannien (University of Manchester)

Weltweit: Singapur (National University of Singapore), USA (Columbia University, Harvard, MIT, Pennsylvania State University, Stanford, UC Berkeley)



## 3D-Druck von grossen Gebäudeteilen

Philippe Block (ETH Zürich),  
Benjamin Dillenburger (ETH Zürich)

**3D-Druck von grossen Bauteilen kann im Bauwesen die überfällige Disruption bringen und die Art und Weise revolutionieren, wie in Zukunft nachhaltig gebaut wird. Dank der fortschrittlichen Rahmenbedingungen, international kompetitiven Forschungsgruppen und Marktführern im Bereich der Materialentwicklung kann die Schweiz eine Vorreiterrolle übernehmen.**

### Definition

**3D-DRUCK** (→ S. 128) ist nicht mehr auf kleine Teile beschränkt, zunehmend werden auch grosse Bauteile additiv gefertigt und miteinander verbunden. Die Materialien umfassen vor allem Beton, Kunststoff und Metalle. Die Technologie wurde bereits für die Fertigung von Flugzeugmotoren und Windturbinen, aber auch von ganzen Gebäuden und Brücken erfolgreich eingesetzt. Neuerdings werden vermehrt grosse, komplexe Schalungsformen aus Kunststoff additiv gefertigt. Firmen, die sich auf die Herstellung dieser Formen spezialisiert haben, zeigen Interesse und tätigen hohe Investitionen. 3D-Druck von grossen Bauteilen umfasst verschiedene Verfahren, in denen Materialien extrudiert oder in einem

Pulverbett schichtweise aufgetragen werden. Je nach Material können diese Schichten durch chemische oder thermische Prozesse verbunden werden.

### Chancen

Additive Verfahren bieten für die Fertigung von grossen Bauteilen im Vergleich zu klassischen Verfahren verschiedene Vorteile. Bei komplexen oder nichttragenden Strukturen wird Material nur dort „verbaut“, wo es auch effektiv benötigt wird, da Hohlräume einfacher herzustellen sind. Somit werden der Materialverbrauch und die graue Energie reduziert. Entwicklungen im Baubereich ermöglichen seit kurzem den Einsatz von recyceltem statt emissionsintensivem, hochfestem Beton, was sich positiv auf die Nachhaltigkeit von Gebäuden auswirkt. Momentan ist dies allerdings nur für kleine Wände und gewölbte Strukturen möglich, die ohne Armierungseisen auskommen. Additiv gefertigte Bauteile können zudem dort hergestellt werden, wo sie eingesetzt werden. Dadurch werden Transportwege gespart und die Logistik reduziert, was die Nachhaltigkeit verbessert. Der 3D-Druck von grossen Bauteilen ist billig und relativ einfach: Er kann also weltweit und dezentral stattfinden und stellt für schnell realisierbare Bauprojekte in Entwicklungsländern eine grosse Chance dar.

Wegen ihrer progressiven und innovationsfreundlichen Bauordnung ist die Schweiz optimal aufgestellt, im Baubereich international eine Führungsrolle einzunehmen. Chancen bieten sich sowohl für die akademische Forschung als auch für die Industrie. Das NCCR Digital Fabrication stellt eine langfristige Priorisierung der Thematik sicher, die über die akademische Forschung hinausgeht. Zudem sind mit SIKA und Holcim zwei Unternehmen in der Schweiz angesiedelt, welche die Entwicklung auf der Materialseite im internationalen Wettbewerb dominieren.

### Risiken

Auf der technologischen Seite finden sich einige Herausforderungen. Es müssen nachhaltige Materialien entwickelt und Armierungseisen ersetzt werden. Zudem sind die verwendeten Baumaterialien und die Verfahren neuartig und es fehlen Langzeitstudien, welche für eine Kommerzialisierung im Grossmassstab notwendig sind. Zugleich steht der schichtweise Aufbau, der aus dem Druck resultiert, im Widerspruch zur benötigten Kontinuität in derselben Dimension, was die Frage nach der Erdbbensicherheit in den Raum stellt. Auch die Thematik Unterhalt und Reparatur von additiv gefertigten Bauteilen muss angegangen werden.

Auf gesellschaftlicher Seite stehen den Vorteilen der Technologie Bedenken in Bezug auf einen

Stellenabbau auf der Baustelle gegenüber. Es ist allerdings zu erwarten, dass neue, spannendere Arbeitsplätze geschaffen werden. Auch muss das Verhältnis der Akteure im Bauwesen neu definiert werden, was ohne einen Gesinnungswandel nicht möglich ist.

---

## Förderung

Förderung findet im Rahmen von SNF- und Innosuisse-Projekten statt. Da das Thema hochaktuell ist, besteht eine hohe Erfolgsquote bei den Bewerbungen. Das NCCR Digital Fabrication bietet nicht nur Fördergelder, sondern stärkt auch eine über die akademische Forschung hinausgehende Vernetzung. Es ist relativ einfach, Drittmittelfinanzierung aus der Industrie zu gewinnen.

Auch wenn die Förderung ausreichend ist, könnte es sich für den Staat lohnen, die Gründung eines grossen Konsortiums zu unterstützen, das akademische Forschung, Industriepartner und Akteure / Verbände aus dem Bauwesen vereint. Eine solche Initiative könnte den notwendigen Schub generieren, um die neuesten Erkenntnisse in das Bauwesen zu bringen.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* Hauptakteur ETH Zürich (mit NCCR Digital Fabrication und Kompetenzzentrum additive Fertigung); weitere Aktivitäten EPFL, BFH, HSLU, OST, Empa

*Firmen:* Holcim, PERI AG, SIKA

*Vernetzung:* Die Akteure sind schweizweit im NCCR Digital Fabrication vernetzt. Es fehlt allerdings die Vernetzung zu branchenrelevanten Verbänden wie der SIA. International findet die Vernetzung über Fachtagungen wie Digital Concrete statt, die auf eine Schweizer Initiative zurückgeht. Die Forschungsgruppen in der Schweiz sind international kompetitiv und gründen quasi «Ableger» im Ausland.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Dänemark, Deutschland, Grossbritannien, Niederlande, Schweiz

Weltweit: China, USA



## 4D-Druck

Christian Leinenbach (Empa),  
Kristina Shea (ETH Zürich),  
Marius Wagner (ETH Zürich)

**4D-Druck ist eine Technologie, die für viele Bereiche ein Game Changer werden könnte, aktuell aber noch in den Kinderschuhen steckt. Da die industrielle Umsetzung noch in ferner Zukunft liegt, ist unklar, wie gross das Potenzial für die Wirtschaft sein wird.**

### Definition

Der 4D-Druck ist ein Teilgebiet der **ADDITIVEN FERTIGUNG** (→ S. 128). Wie in der additiven Fertigung werden so erstellte Objekte ebenfalls Schicht für Schicht aufgebaut, verändern aber nach dem Druck im Laufe der Zeit ihre Form. Ermöglicht wird dies durch aktive Materialien, die sich gezielt und gewünscht verformen, wenn sie einem magnetischen oder elektrischen Feld oder einem Stimulus wie Wärme, Licht oder Wasser ausgesetzt werden.

Damit ist 4D-Druck ein Sammelbegriff für Materialien mit spezifischen Eigenschaften in Verbindung mit additiver Fertigung. Allerdings wäre es präziser, anstelle von 4D-Druck den Begriff «additive Fertigung mit aktiven Materialien» zu verwenden. 4D-Druck umfasst zahlreiche

Disziplinen, welche von Chemie und Materialwissenschaften über die klassischen Ingenieurdisziplinen bis hin zu Architektur und Design reichen.

### Chancen

Die Kombination von aktiven Materialien und additiver Fertigung erlaubt die Herstellung von bahnbrechend neuen Strukturen, da genau definiert werden kann, wo welches Material mit welcher Eigenschaft eingesetzt wird. Davon profitieren auch Entwicklungen im Bereich der **METAMATERIALIEN** (→ S. 89). Dank vielfältigen Geometrien und Materialien kann 4D-Druck in unterschiedlichen Bereichen zu einem Game Changer werden. So können additiv gefertigte, aktive Strukturen im Bauwesen als Fassadenelemente verwendet werden, die sich der Witterung anpassen. Im Energiesektor erlaubt 4D-Druck die Fertigung von Gelenken für Solarzellen, die sich optimal nach der Sonneneinstrahlung ausrichten. In der Luft- und Raumfahrt ergeben sich Anwendungen wie witterungsbedingte Leistungsoptimierung dank 4D-gedruckter Flügel. Denkbar sind auch zusammengeklappte Strukturen, die sich erst im Weltall entfalten. 4D-gedruckte Stents können dank der additiven Fertigung an den Patienten angepasst und in einer komprimierten Form in Gefässe eingeführt werden, wo sie sich zu ihrer Endform entfalten.

Das Potenzial des 4D-Drucks ist gross. Allerdings stehen erst biomedizinische Anwendungen vor der Produktreife. In der Industrie besteht Interesse und Investitionsbereitschaft, allerdings ist der Zeitpunkt noch nicht reif für industrielle Umsetzungen. Momentan ist auch nicht klar, wie gross das Potenzial für die Schweizer Wirtschaft sein wird. Die Schweiz ist auf dem Gebiet der Material- und Prozessentwicklung sowie bei den biomedizinischen Anwendungen gut aufgestellt, um aus den Möglichkeiten echte Chancen zu machen.

### Risiken

Risiken finden sich vor allem bei der Materialentwicklung. Heutige Studien umfassen erst Konzepte, Aspekte der Skalierbarkeit und Zuverlässigkeit der Materialien fehlen noch weitgehend. Die Zertifizierungsanforderungen für die neuartigen Materialien stellen ein regulatorisches Hemmnis dar, das vor allem Anwendungen in Biomedizin und Luftfahrt betrifft. Gesellschaftliche Hindernisse wie Akzeptanzprobleme sind nicht zu erwarten.

### Förderung

Förderung findet punktuell im Rahmen von SNF-Projekten statt. Zudem lancieren einzelne

Hochschulen Initiativen wie die Strategic Focus Area Additive Manufacturing der ETH Zürich, die auch Projekte im Bereich des 4D-Drucks unterstützen. Allgemein fehlt eine gezielte Förderung der Thematik. Diese wäre im Rahmen der schweizweiten Programme und Initiativen zu Advanced Manufacturing wünschenswert. Es sind keine privaten Initiativen bekannt.

Bei Horizon Europe wird 4D-Druck explizit in der Rubrik «Key Enabling Technologies – Advanced Manufacturing» erwähnt; Projektaufrufe und -einreichungen sind zu erwarten. Wegen der Einstufung der Schweiz als Drittstaat werden diese Fördermöglichkeiten für Schweizer Forschende unrealistisch.

---

#### **Akteure in F&E**

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, HES-SO Valais, Empa, PSI

*Firmen:* ABB, Orbitare

*Vernetzung:* Keine spezifischen Netzwerke in der Schweiz. Netzwerke bestehen nur für additive Fertigung und Advanced Manufacturing. Experten arbeiten meist mit 1-2 Materialien und 1-2 additiven Verfahren, weshalb die Vernetzung nicht ausgeprägt ist.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* USA (Harvard, MIT, University of Colorado Denver)



## Abbaubare Sensoren

Giovanni Salvatore (Università Ca' Foscari, Venedig)

**Abbaubare Sensoren stellen für die Nachhaltigkeit dieser elektronischen Bauteile eine grosse Chance dar. Ihr Einsatz ist allerdings nur sinnvoll, wenn auch das Material, in das sie eingebettet sind und welches sie smart machen, abbaubar ist. Die Entwicklung von abbaubaren Sensoren ist somit von den Fortschritten auf dem Gebiet des Bioplastiks abhängig.**

### Definition

Sensoren sind technische Bauteile, die bestimmte physikalische oder chemische Eigenschaften ihrer Umgebung erfassen und in ein elektrisches Signal umwandeln. Abbaubare Sensoren haben eine begrenzte Lebensdauer, da sie sich mittels chemischer oder biologischer Prozesse auflösen. Sie werden deshalb als temporäre medizinische Implantate eingesetzt, um Messungen im Körper vorzunehmen oder dem Körper Wirkstoffe zuzuführen, oder sie werden dazu verwendet, Verpackungen «intelligent» und nachverfolgbar zu machen. Auch können sie für temporäre Umweltmessungen eingesetzt werden. Abbaubare Sensoren sind ein Sammelbegriff, der wegen unterschiedlicher Anforderungen verschiedene Materialien und Prozesse umfasst.

### Chancen

Zahlreiche Anwendungen bieten Chancen für Entwicklung und Kommerzialisierung. In der Medizin spielen vor allem smarte Implantate eine Rolle, die auf den Zustand des Körpers reagieren und beispielsweise gezielt und zeitlich beschränkt Wirkstoffe abgeben. Dazu gehören auch smarte Stents; Abbaubarkeit sowohl der Stents als auch der Sensorik machen eine zweite Operation unnötig und senken das Risiko von Komplikationen. Sensoren in Lebensmittelverpackungen erhöhen die Funktionalität: Sie zeigen an, ob ein Produkt verdorben ist oder nicht, und tragen zur Verringerung von Food Waste bei. In einer Smart-City-Umgebung hingegen spielen Abfallsäcke mit Sensoren eine bedeutende Rolle, um die Abflüsse zu verfolgen und ökologisch zu gestalten. Im Rahmen des **INTERNET OF THINGS** (→ S. 128) sind Millionen von Sensoren im Einsatz, die dem Recycling zugeführt werden müssen – Tendenz stark steigend. Abbaubare Sensoren könnten hier sinnvolle Abhilfe schaffen.

Chemische oder biologische Abbaubarkeit verbessert die Ökobilanz von Sensoren, die millionenfach verbaut werden. Es stellt sich aber die Frage, ob Intelligenz bei allen aufgeführten Anwendungen überhaupt sinnvoll ist und einen Mehrwert bringt. Zudem muss sichergestellt sein, dass nicht nur der Sensor abbaubar ist, sondern auch das Material, das durch den Einbau eines Sensors smart wird. Abbaubare Sensoren

machen also nur Sinn, wenn die Entwicklungen auf dem Gebiet des Bioplastiks erfolgreich vorangetrieben werden und **BIOPLASTIK** (→ S. 88) trotz seines Preises auch für kommerzielle Massenanwendungen wie Verpackungen zum Einsatz kommt.

Für die Schweiz sind wegen ihrer Expertise in der chemischen Industrie, aber auch wegen der hohen Qualitätsanforderungen und der Marge vor allem die medizinischen Anwendungen relevant, die auch als Treiber der Entwicklung gesehen werden. Für die international kompetitiven Sensorik-Unternehmen bietet auch die Entwicklung von abbaubaren Sensoren für das IoT eine Chance.

### Risiken

Momentan findet die Entwicklung fast ausschliesslich in der akademischen Forschung statt, industrielle Partner sind kaum vorhanden. Es fehlt die Killerapplikation. Zudem liegen noch keine Langzeitstudien zur Verträglichkeit der Abbauprodukte für den Körper und die Umwelt vor. Diese wären aber für die Akzeptanz in der Gesellschaft wichtig. Auf wirtschaftlicher Ebene verhindern die im Vergleich zu klassischen Sensoren hohen Kosten einen breiten Einsatz. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Elektronikindustrie mit Änderungen schwertut, da der Status quo bestens funktioniert. Die mehrheitlich

asiatischen Elektronikhersteller haben ausserdem eine eher geringe Sensibilisierung in Bezug auf die Umweltproblematik. Wie bereits erwähnt, hängt die Entwicklung von abbaubaren Sensoren ebenfalls massgeblich von den Fortschritten auf dem Gebiet des Bioplastiks ab.

---

## Förderung

Die Forschung auf dem Gebiet der abbaubaren Sensoren wird in der Schweiz nur vereinzelt vom SNF unterstützt. Wegen fehlender Industriepartnern ist Förderung im Rahmen von Innosuisse-Projekten ausgeschlossen. Private Finanzierung findet nicht statt. In der Schweiz ist die Förderung nicht ausreichend; für Schweizer Forschende gibt es im Rahmen des Horizon-Calls «Functional electronics for green and circular economy» Fördermöglichkeiten.

Das Thema ist technologisch noch nicht weit genug fortgeschritten, um für die Grossindustrie interessant zu sein. Es wäre deshalb wichtig, die Start-ups zu vernetzen und mit Risikokapital zu fördern.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, CSEM

*Firmen:* BASF, Medtronic, Sensirion

*Vernetzung:* Die Akteure sind innerhalb der Schweiz kaum vernetzt. International sind nur die wenigen Schweizer Firmen, aber nicht die Hochschulen vernetzt.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Belgien, Deutschland (Fraunhofer-Gesellschaft), Grossbritannien, Niederlande

Weltweit: Südkorea, USA



## Bioplastik

Roger Marti (HES-SO Fribourg),  
Manfred Zinn (HES-SO Valais-Wallis)

**Der Einsatz von Bioplastik stellt für die Nachhaltigkeit von Kunststoffprodukten eine grosse Chance dar. Die breite Anwendung wird aktuell von Regulatorien und den hohen Kosten gebremst. Für die Schweiz hat die Entwicklung von Hightech- und Nischenprodukten grosses Potenzial, das mit zielgerichteter Förderung ausgereizt werden könnte.**

### Definition

Biokunststoffe, auch Bioplastik genannt, nutzen erneuerbare natürliche Ausgangsstoffe und fossile Rohstoffe in unterschiedlichen Anteilen als Kohlenstoffquelle. Zu den erneuerbaren Ausgangsstoffen gehören u.a. Mais, Kartoffeln, Weizenfasern, Holzzellulose, Rückstände aus der Zuckerproduktion und neu auch CO<sub>2</sub>. Biokunststoffe sind entweder biobasiert oder biologisch abbaubar oder beides. Es gibt somit auch biobasierte Kunststoffe, die nicht biologisch abbaubar sind. Bioplastik wird im Automobilbau, in der Chemie, in der Elektronik, in der Landwirtschaft, für Verpackungen, in der Medizintechnik und bei Textilien eingesetzt.

Bioplastik ist ein Sammelbegriff, der verschiedene Ausgangsstoffe und chemische Verfahren umfasst. Diese reichen von der Rohstoffgewinnung und der Herstellung des Bioplastiks über die Verarbeitung des Produkts bis hin zum Recycling.

### Chancen

Der Hauptvorteil von Bioplastik ist, dass der Einsatz von fossilen Rohstoffen reduziert oder vermieden wird. Bioplastik senkt den Ressourcenverbrauch, hinterlässt einen kleineren Energie-Fussabdruck und verursacht weniger Emissionen als herkömmlicher Plastik. Bei bioabbaubaren Kunststoffen kann ausserdem die Umweltbelastung durch Mikro- und Nanopartikel massgeblich reduziert werden. Doch auch bei Bioplastik stellt sich die Frage, ob er als zukünftiges Einwegmaterial taugt. Aktuell geht der Trend dahin, dass bioabbaubare Kunststoffe im Sinn der durchgängigen Kreislaufwirtschaft zusätzlich rezyklierbar sein sollten – ganz nach dem Cradle-to-Cradle-Prinzip. Anhand von Bioplastik könnte die Gesellschaft zudem ein besseres Verständnis für Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft entwickeln.

Die Forschung zu und die Kommerzialisierung von Bioplastik steckt in der Schweiz noch in den Kinderschuhen und bietet sowohl Hochschulen als auch Firmen gute Chancen für Forschungsprojekte, Patente und neue Geschäftsmodelle. Grosse Hoffnung ruht wegen der Abbaubarkeit

und der guten Verträglichkeit im Körper auf der Verwendung von Bioplastik für Medizinalprodukte wie Stents und Herzklappen. Für Firmen ergeben sich rund um das Thema Nachhaltigkeit interessante Möglichkeiten. Die Verwendung von Bioplastik dürfte für die CO<sub>2</sub>-Bilanz von produzierenden Betrieben relevant werden. Banken können die Thematik in Anlagefonds aus dem Bereich der Nachhaltigkeit abbilden.

Die Massenkunststoffproduktion hat für die Schweiz keine Relevanz; bei Hightech- und Nischenprodukten bieten sich aber sowohl in Entwicklung als auch Anwendung gute Chancen.

### Risiken

Auf wirtschaftlicher Ebene verhindern die aktuell hohen Kosten für Bioplastik einen breiten Einsatz. Die Belastung für das Portemonnaie wird eine zentrale Rolle spielen. Zudem haben sich nur sehr wenige Erdöl- und Recyclingfirmen die Thematik auf die Fahne geschrieben. Regulatorien führen sowohl in der Schweiz als auch international dazu, dass die Auflagen für die Zulassung von Bioplastik höher sind als bei erdölbasierten Produkten.

Aus wissenschaftlicher Sicht stellt vor allem die Skalierung der Syntheseprozesse eine Herausforderung dar.

---

## Förderung

Forschungsgelder können in der Schweiz über die gängigen Förderstellen, aber auch über regionale Programme wie Fribourg NPR Seco und Interreg beantragt werden. Die Förderung ist aber nicht ausreichend, da sie nicht spezifisch für die Thematik des Bioplastiks vorgesehen ist. Forschende hängen sich an einer thematisch verwandten Initiative an, sind also Trittbrettfahrer. Dazu kommt, dass die Forschenden innerhalb der Schweiz kaum vernetzt sind und dass an den Hochschulen die entsprechenden Studiengänge fehlen.

Im EU-Raum bestehen im Rahmen des Bio-based Industries Consortiums (BBI) und des COST-Netzwerks FUR4Sustain Förder- und Netzwerkmöglichkeiten.

Eine gezielte Förderung im Rahmen eines Schwerpunktprogramms, eines themenspezifischen NTNs oder eines Flagship-Programms wäre wichtig, um den Schweizer Forschungsstandort in Bezug auf Bioplastik auszubilden. Es könnte sich lohnen, in anderen Ländern die Bedingungen zu studieren, die zu hoher Forschungsaktivität geführt haben. Dazu gehören Ressourcenmangel, die Zusammenarbeit mit Olivenölproduzenten sowie die Abfallverwertung aus der Zuckerproduktion.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universitäten Bern und Zürich, FHNW, HES-SO, OST, Supsi, ZHAW, Empa

*Firmen:* AVA Biochem, BioApply, Bloom Biorenewables, Clariant, Debiopharm, DePoly, Ems Chemie, Firmenich, Fluidsolids Biocomposites, Natureisse (Pacovis-Gruppe), Nestlé, Semadeni, Swiss Bioplastics, Sulzer

*Vernetzung:* Die Akteure sind innerhalb der Schweiz kaum vernetzt; es existiert eine begrenzte Vernetzung mit europäischen Forschungsgruppen im Rahmen von EU-Projekten

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Belgien, Deutschland, Luxemburg, Norwegen, Österreich, Polen, Spanien

Weltweit: Brasilien, China, Japan, Südkorea, USA



## Metamaterialien

Dennis Kochmann (ETH Zürich)

Hervorstechende Merkmale von Metamaterialien sind ihre sehr geringe Dichte und ihre menschgemachte Struktur über Skalen hinweg. Sie finden daher in zahlreichen Bereichen Anwendung. Dazu gehören die Automobilindustrie, die Luft- und Raumfahrt, die Medizintechnik, aber auch die Sensor- und Tontechnik und die Robotik. Für die Schweiz sind Metamaterialien von hoher Relevanz, weil die Schweizer Forschung über exzellente Experten verfügt und viele bedeutende Industriesektoren hier beheimatet sind.

### Definition

Metamaterialien sind künstlich hergestellte Werkstoffe, deren "Einheitszellen" quasi eine periodische (oder nicht-periodische) Struktur auf kleinen Skalen sind. Die Materialeigenschaften werden dadurch weniger durch die atomare Zusammensetzung bestimmt, sondern vielmehr von Hand designt. Zu den gewünschten Eigenschaften zählen das mechanische Verhalten sowie biologisch-chemische, elektronische und optische Besonderheiten, welche beispielsweise die Biokompatibilität, Dämpfungsfähigkeit, Lichtbrechung oder Steifigkeit beeinflussen. Durch Materialdesign und Mikroarchitektur verfügen

Metamaterialien über eine extrem niedrige Masendichte und sind teilweise komplett neuartige Materialien.

### Chancen

Metamaterialien befinden sich noch in der Entwicklungsphase und gelangen erst langsam in die technologische und kommerzielle Anwendung. Der breite Einsatz dieser Materialien wird aktuell durch eine zeit- und kostenintensive Herstellung beschränkt. Wird diese jedoch durch die Fortschritte im Bereich der **ADDITIVEN FERTIGUNG** (→ S. 128) überwunden, so können Metamaterialien in fast jedem Industriesektor eingesetzt werden. Im klassischen Maschinenbau, wozu auch die Luft- und Raumfahrt gehören, sind steife und feste, aber dennoch leichte Materialien von Bedeutung. In der Medizintechnik ermöglichen Metamaterialien Prothesen, welche exakt und patientenspezifisch die Eigenschaften des natürlichen Knochens imitieren. In der Sensortechnik sowie in der Telekommunikation bieten sie Chancen für Weiterentwicklungen bei Antennen und Photovoltaikzellen. In den Bereichen der Akustik, Tontechnik und Lärmeindämmung ermöglichen Metamaterialien beispielsweise die gezielte Manipulation von Vibrationen von Maschinenkomponenten und Hochgeschwindigkeitszügen. In der Robotik können Metamaterialien von der künstlichen Hand bis hin zu «intelligenten Materialien»

eingesetzt werden. Ebenso bieten sie präzise Strukturen über viele Längenskalen weg, womit sie für den Einsatz in miniaturisierten, elektronischen Schaltungen besonders geeignet sind. Und letztlich bieten sich Metamaterialien exzellent für Katalysatoren und Wärmetauscher in der chemischen Industrie an.

### Risiken

Mögliche Risiken sind beschränkt vorhanden. Zumeist gründen sie auf Unsicherheiten im aktuellen Herstellungsprozess. Nebst technologischer können die Risiken auch regulatorischer Art sein, d. h. bei der Zertifizierung. So sind die Eigenschaften von additiv hergestellten Komponenten wesentlich weniger reproduzierbar und weniger exakt vorhersehbar als die von Komponenten aus klassischen Herstellungsverfahren. Die Kommerzialisierung von Metamaterialien ist daher eng mit dem Fortschritt in additiven und anderen Fertigungsverfahren verbunden.

### Förderung

Grosse, private Förderinitiativen in der Schweiz sind nicht bekannt. Die Förderung aus der öffentlichen Hand findet aktuell unkoordiniert und individuell statt. Der SNF und der Europäische Forschungsrat fördern eher Initiativen einzelner

Forschender als grössere Projekte. Die Technologie der Metamaterialien lebt hingegen von der interdisziplinären Forschung, die über die klassischen Disziplingrenzen hinausgeht. Um wirklich führend zu werden und Leuchtturmprojekte voranzutreiben, bedarf es der gezielten Förderung von Konsortien, die verschiedene Fachdisziplinen vereinen und in der Summe mehr bewirken können als die Summe kleiner Einzelprojekte.

---

### **Akteure in F&E**

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Empa, PSI

*Firmen:* ABB, Bosch

*Vernetzung:* Eine gute nationale Vernetzung ist aktuell schwer zu erkennen, wäre aber wünschenswert. Die primären Akteure sind in der Regel international sehr gut vernetzt, aber die Unsicherheiten auf dem europäischen Forschungsparkett sind nachteilig. Eine begrenzte Vernetzung findet im Rahmen der Strategic Focus Area Advanced Manufacturing der ETH Zürich statt, allerdings mit Fokus auf Fertigungsverfahren.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland, Grossbritannien, Niederlande, Schweiz

Weltweit: China, Kanada, USA




---

## Selbstheilende Materialien

Manfred Heuberger (Empa)

**Selbstheilende Materialien sind kein Hotspot der Forschung, können aber in absehbarer Zeit einen wesentlichen Beitrag zu einem nachhaltigeren und ressourcenschonenderen Umgang mit Materialien beitragen. In der Schweiz betrifft dies vor allem den lokalen Beton- und Asphaltmarkt.**

---

### Definition

Selbstheilende Materialien werden auf der Mikro- oder Nanometerskala so strukturiert, dass sie strukturelle Schäden, die unter hoher Belastung entstanden, diagnostizieren und ohne menschliches Eingreifen – also smart – zumindest teilweise reparieren oder kompensieren können. Die Technologie ist ein Sammelbegriff, da zahlreiche unterschiedliche Materialklassen wie Kunststoffe, Composite, Beton und Strassenbeläge, aber auch Metalllegierungen und Keramik Objekt der Forschung sind.

---

### Chancen

Laborstudien zeigen, dass der Einsatz selbstheilender Materialien den Lebenszyklus von Produkten um einen Faktor zwei bis zehn verlängern kann. Selbstheilende Materialien zeichnen sich

durch hohe Entwicklungskosten und komplexe Rückbaueigenschaften aus. Sie können ihre Eigenschaften am besten in Anwendungsbereichen entfalten, in denen Reparatur oder Ersatz aufwändig oder teuer ist. So könnten selbstheilende Composite im Flugzeugbau oder in der Raumfahrt bei fest eingebauten, stark beanspruchten Teilen zur Wartungsreduktion verwendet werden und bei militärischen Produkten einen erhöhten ballistischen Schutz bieten. Selbstheilender Beton ist eine interessante Alternative, um den hohen CO<sub>2</sub>-Fussbadruck im Bau zu reduzieren, vorausgesetzt die Strukturen sind auf eine deutlich längere Lebensdauer als heute ausgelegt. Selbstheilender Asphalt wiederum könnte die Lebensdauer von Strassenbelägen bei gleichzeitiger Minderung der Unterhaltskosten erhöhen.

Bis eine breitere Anwendung Realität sein wird, gilt es, grundlegende Fragen mit hochstehender Grundlagenforschung zu beantworten. Daraus leitet sich für die Schweizer Wirtschaft mit ihren hochspezialisierten KMU eine Chance ab: Selbstheilende Materialien für (Nischen-)Anwendungen mit hoher Wertschöpfung haben Potenzial in dieser spezifischen Schweizer Umgebung. Der wirtschaftliche und ökologische Nutzen für die Schweiz wäre bei Beton und Asphalt am grössten, da diese Materialien vorwiegend mit lokalen Ressourcen hergestellt werden. Da international (noch) wenig Wert auf langlebige, aber teure Strukturen gelegt wird, könnte die Schweiz in

diesem Bereich in 10 – 15 Jahren eine führende Rolle einnehmen.

---

### Risiken

Selbstheilende Materialien werden länger als klassische im Einsatz sein. Dementsprechend ist es aufwändig und teuer, das Langzeitverhalten zu messen und den Langzeitnutzen messbar darzustellen. Dies dürfte für die schnelle Markteinführung in der Schweiz ein grosses Hindernis sein.

International wird zurzeit auf langlebige Strukturen weniger Wert gelegt als in der Schweiz. Das könnte den erfolgreichen Export von Schweizer Erfindungen verzögern oder verhindern. Davon betroffen sind vor allem Composite, lokale Beton- und Asphaltmärkte weniger.

---

## Förderung

SNF und Innosuisse bieten beide die Möglichkeit, Projekte bottom-up vorzuschlagen, wovon auch die Forschung zu selbstheilenden Materialien profitieren kann; private Förderinitiativen existieren keine. Obwohl genügend Fördergelder vorhanden sind, könnten die für die Schweiz relevantesten Themenfelder wie Beton und Asphalt stärker und spezifischer gefördert werden.

Auf politischer Ebene wären Bestimmungen hilfreich, welche die minimale Lebensdauer von Materialien für spezifische Anwendungen vorschreiben.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* nur punktuelle Spezialisierung auf selbstheilende Materialien im Rahmen der allgemeinen Materialforschung an Hochschulen und der Empa

*Firmen:* einzig bekannte Firma: CompPair

*Vernetzung:* kein Netzwerk in der Schweiz

*Internationale Forschungs-Hotspots:* Selbstheilende Materialien sind kein Schwerpunkt der internationalen Forschung. Nach einem Mini-Hype in den USA und in Europa vor 12 Jahren sind in der Patentierung momentan China und Korea führend, wenn auch auf einem bescheidenen Niveau.



Quelle CSEM

## Human Enhancement und neue Mensch-Maschinen-Schnittstellen

Human Enhancement und neue Mensch-Maschinen-Schnittstellen schaffen neue Interaktionen zwischen Mensch und Technologie. So umfasst das Kapitel eine Reihe von sehr verschiedenen Technologien, denen aber allen gemein ist, dass sie auf neuartige Weise mit dem Menschen interagieren oder am Körper getragen werden.

Das Unterkapitel **CHATBOTS – KONVERSATIONSAGENTEN** (→ S. 100) umfasst technologisch simple Chatbots, aber auch auf künstlicher Intelligenz basierende Assistenten, die es ermöglichen, Geräte mit mündlicher, natürlicher Sprache zu bedienen. Damit lassen sich Geräte auch ohne Bildschirm im Sichtfeld bedienen. Prominenteste Beispiele sind Alexa, Google Assistant und Siri.

Auch **MIXED REALITY**-Anwendungen schaffen neue Schnittstellen zwischen Menschen und Maschinen (→ S. 102). Auf der einen Seite des Mixed-Reality-Kontinuums finden sich Geräte, welche die reale Welt mittels digitaler Informationen ergänzen (Augmented Reality). Auf der anderen Seite sind Geräte angesiedelt, die die Nutzer:innen in eine virtuelle Welt eintauchen lassen (Virtual Reality) oder gar ihre Bewegungen über Sensoren erfassen und diese wiederum in die virtuelle Welt übertragen.

**TRAGBARE MEDIZINISCHE GERÄTE** (→ S. 104) sind am Körper getragene und mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattete Geräte, die Vitaldaten ihrer Träger:innen aufzeichnen. Diese Daten können am Computer ausgewertet oder an einen Gesundheitsdienstleister zur Verarbeitung weitergeleitet werden (→ **MHEALTH**, S. 128).

**BRAIN-MACHINE-INTERFACES** sind Geräte, die Hirnströme invasiv oder nichtinvasiv messen (→ S. 98). Diese so ermittelten Daten werden genutzt, um das Gehirn zu erforschen, die Informationen zur Steuerung von Geräten zu nutzen oder über Impulse andere Nerven zu stimulieren. Brain-Machine-Interfaces sind noch am Anfang der Entwicklung, allerdings zeichnen sich erste medizinischen Anwendungen ab.

Das damit verwandte Forschungsfeld **BIONICS** (→ S. 96) versucht, mittels technologischer und elektronischer Bauteile (→ **BIOELEKTRONIK**, S. 22), bestimmte Körperfunktionen oder ganze Körperteile wieder herzustellen oder zu ersetzen. Bereits etablierte Beispiele sind Cochlea-Implantate und Herzschrittmacher.

Eine Gesamtschau über die Chancen und Risiken der in diesem Kapitel beschriebenen Technologien macht deutlich:

- Das Feld der Mixed-Reality-Anwendungen und das Feld der Konversationsagenten wird von grossen IT-Unternehmen dominiert, von denen zwar einige Niederlassungen in der Schweiz haben (Apple, Google, Meta, Microsoft), bei denen aber unklar ist, wie viele der dafür benötigten Technologien sie tatsächlich auch hier entwickeln. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Grundlagentechnologie für Mixed-Reality-Anwendungen und Konversationsagenten im Consumer-Bereich nicht zu den

Stärken der Schweiz gehören. Allerdings werden für Konversationsagenten als auch für Mixed-Reality-Umgebungen hier Anwendungen und Inhalte entwickelt.

- Die Bedingungen für technologisch anspruchsvolle Forschungsfelder wie Brain-Machine-Interfaces und Bionics sind in der Schweiz gut. In den sehr komplexen Feldern der Life Sciences, der Medizinaltechnik und der Mikrotechnologie ist die Schweiz ebenfalls gut aufgestellt. Die zügige Entwicklung des Gebietes wird allerdings gebremst durch den Ausschluss der Schweiz vom Rahmenprogramm «Horizon Europe» und der damit verbundenen Schwierigkeit, sich an internationalen Forschungsprojekten zu beteiligen.
- Auch im Bereich der tragbaren medizinischen Geräte ist die Schweiz gut aufgestellt und es gibt eine vitale Start-up-Szene.

	Digitale Welt					Energie und Umwelt						Fertigung	Life Sciences			Technik und Gesellschaft							
Bionics					●											●	●			●			
Brain-Machine-Interfaces					●											●	●			●			
Konversationsagenten	●	●																					
Mixed Reality		●			●								●										
Tragbare medizinische Geräte			●		●										●	●	●	●			●		

**Tabelle 8** den Zusammenhang zwischen den Technologien aus der Technologiegruppe Human Enhancement und neue Mensch-Maschinen-Schnittstellen und den 20 Labels. Jeder Punkt markiert einen unmittelbaren Bezug, eine konkrete Anwendung oder eine zu erwartende Auswirkung.



## Bionics

Stanisa Raspopovic (ETH Zürich)

**Bionics umfasst ein interdisziplinäres Forschungs- und Technologiefeld, welches das Ziel verfolgt, Organe und Gliedmassen des Körpers durch technische Bausteine zu ersetzen oder zu verbessern. Die Schweiz hat gute Voraussetzungen, um im Feld einen wesentlichen Beitrag zu leisten. Den guten Bedingungen stehen administrative Hürden gegenüber.**

### Definition

Der Begriff Bionics bezeichnet zwei unterschiedliche Ansätze, zwischen denen es allerdings Schnittmengen gibt. Einerseits meint er die technische Imitation biologischer Systeme und Prozesse, also beispielsweise den Versuch, Tierbewegungen auf Robotersysteme zu übertragen. Andererseits steht Bionics auch für Ansätze, Organe und Gliedmassen des Körpers durch technische Bausteine zu ersetzen oder zu verbessern. Beispiele sind Herzschrittmacher, Cochlea-Implantate und Hirnimplantate für Parkinsonkranke. Obschon im Deutschen eher die erste Gebrauchsweise vorherrschend ist, wird im Folgenden auf die zweite, engere Bedeutung eingegangen. Bionics ist ein interdisziplinäres Forschungsfeld, das verschiedene Technologien und Ansätze aus den Bereichen **BIOELEKTRONIK (→ S. 22)**,

**KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ (→ S. 42)** und Sensorik kombiniert.

### Chancen

Die so verstandene Bionics umreisst ein Forschungsfeld, das weltweit im Entstehen begriffen ist, jährliche Wachstumsraten von 5 bis 6 Prozent ausweist und das schon heute in der und für die Schweiz von Bedeutung ist. Die Anwendungen basieren zu einem Grossteil auf bioelektronischen Komponenten und Sensoren, die Nervensignale aufgreifen, verarbeiten und als Folge etwa Medikamente freigeben, Nerven stimulieren (**→ BRAIN-MACHINE-INTERFACES, S. 98**) oder Prothesen steuern. Gemessen am denkbaren Potenzial bionischer Anwendungen, gibt es erst wenige Anwendungen, die erfolgreich zertifiziert und im Einsatz sind. Das öffentlichkeitswirksame Projekt NeuroLink von Elon Musk gehört genauso in das Forschungsfeld wie medizinische Anwendungen, wie sie beispielsweise das EPFL-Spin-off Onward entwickelt. Dieses arbeitet an Therapien für Menschen mit Rückenmarkverletzungen. Durch entsprechende Stimulation der Nervenbahnen im Rückenmark sollen Menschen nach Verletzungen wieder gehen können. Beim letztjährigen IPO realisierte Onward 93 Millionen Schweizer Franken und schaffte damit den grössten IPO im Bereich Medizinaltechnik der letzten Jahre.

Die Schweiz hat etwa zehn Professuren, die sich im engeren Sinn mit Bionics beschäftigen. So gesehen ist die Schweiz gut aufgestellt, da auch in den USA nur etwa hundert Professuren daran arbeiten. Der für das Feld eher grosse Börsengang von Onward zeigt, dass die Bedingungen in der Schweiz gut sind und entsprechende Start-ups und Spin-offs gute Möglichkeiten haben.

### Risiken

Die Regulatorien in der EU sind sehr strikt und machen es schwierig und teuer, entsprechende Zulassungen für Medizinaltechnik zu erhalten. Gegen entsprechende Vorlagen werden provisorische Bewilligungen ausgestellt, die zumindest die nächsten Forschungsschritte ermöglichen und Planungssicherheit herstellen. Die langwierigen und bürokratischen Bewilligungsverfahren stellen in der Schweiz und der EU vor allem für hiesige, junge Unternehmen und Start-ups ein deutlicher Wettbewerbsnachteil dar.

Auch macht es der Wegfall von Horizon Europe den Forschenden in der Schweiz schwierig, an entsprechenden EU-Projekten teilzuhaben. Während früher die Chancen gut waren, bei einer Eingabe auch an entsprechenden Projekten mitwirken zu können, ist es heute Glückssache und keineswegs sicher.

---

## Förderung

Gerade für Nachwuchsforschende ist die Förderlandschaft schwierig, denn der Mittelbedarf ist hoch und das Verfassen von interdisziplinären Anträgen schwierig. Die beiden privaten Stiftungen Wyss Zurich und Gebert RUF sind im Feld aktiv.

Eine Möglichkeit, das Technologiefeld besser zu fördern, wäre das Schaffen von geteilter Infrastruktur wie Reinräumen und von Austauschplattformen mittels entsprechender Netzwerke.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universitäten Fribourg, Genf, Lausanne und Zürich

*Firmen:* Comphya, FES-ability, MindMaze, Onward, SesArs

*Vernetzung:* Die Vernetzung zwischen den verschiedenen Akteuren in der Schweiz ist gut, allerdings nicht sehr zielorientiert. Die Forschenden im Feld der Bionics sind zum Teil im NCCR Robotics beteiligt. Eine spezifischere Plattform für das Feld Bionics gibt es noch nicht. Die Vernetzung mit dem Ausland läuft auf Projektbasis, wurde aber durch den Wegfall von Horizon schwieriger.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland

Weltweit: China, USA (Boston mit Harvard und MIT, Cleveland State University, Michigan State University, Minnesota University, University of Pittsburgh, UC Los Angeles, UC San Diego)



## Brain-Machine-Interfaces

Mehmet Fatih Yanik (ETH Zürich)

**Brain-Machine-Interfaces sind Schnittstellen zwischen dem menschlichen Hirn und Computern. Dabei werden Impulse im menschlichen Hirn in für Computer verarbeitbare elektronische Signale umgewandelt. Die Forschung verspricht sich dadurch ein verbessertes Verständnis des menschlichen Gehirns und Möglichkeiten zur spezifischen (pharmakologischen) Behandlung einzelner Hirnareale.**

### Definition

Brain-Machine-Interfaces sind Schnittstellen zwischen dem menschlichen Gehirn und Computern, um Hirnströme auszulesen oder bestimmte Hirnregionen durch Impulse zu steuern. Diese Schnittstellen kommen sowohl zu Forschungszwecken als auch in der Therapie bestimmter Krankheiten zum Einsatz. Die Messung kann nichtinvasiv oder invasiv durch bioelektronische Bauteile (→ S. 22) erfolgen. Letztere ermöglichen es, die Hirnaktivität von verschiedenen Regionen mit einer Auflösung von einzelnen Neuronen zu messen. Die gemessenen Daten dienen der Hirnforschung, werden im Zusammenhang mit Krankheiten analysiert oder werden genutzt, um Geräte beispielsweise zur gezielten Wirkstoffabgabe im Gehirn zu kontrollieren. Die Entwicklung

solcher Brain-Machine-Interfaces erfordert die Zusammenarbeit verschiedenster Disziplinen, darunter vor allem Bioinformatik, Informatik und Neurowissenschaften.

### Chancen

Die zukünftigen Möglichkeiten für Brain-Machine-Interfaces sind gross. Sie reichen von biomedizinischen Anwendungen, etwa zur Therapie neurologischer Krankheiten, bis hin zur Steuerung von Robotern. Auch für **NEUROMORPHE ELEKTRONIK** (→ S. 48) verspricht das Feld – durch die Verschränkung von Neurowissenschaften und Informatik – zahlreiche Erkenntnisse.

Bei vielen neurologischen Krankheiten wie Epilepsie und bestimmten Zwangsstörungen wird angenommen, dass eine Fehlfunktion bestimmter Hirnregion Ursache ist. Brain-Machine-Interfaces verheissen, dass die Manipulation direkt im Hirn erfolgen kann. Somit kann die Abgabe von Medikamenten räumlich viel gezielter erfolgen, was Nebenwirkungen verringert und die Effektivität der Therapien steigert.

Es entstehen erste Start-ups auf dem Gebiet der Brain-Machine-Interfaces, darunter auch solche aus der Schweiz.

### Risiken

Trotz der vielversprechenden Möglichkeiten, die das Feld der Brain-Machine-Interfaces eröffnet, ist in der Öffentlichkeit nur wenig über aktuelle Forschung, Anwendungen und Chancen bekannt. Dies widerspiegelt sich denn auch darin, dass es in der Schweiz relativ wenig Student:innen im Bereich gibt.

Die bürokratischen Hürden, um an Forschungsgelder zu gelangen, sind im Vergleich mit anderen Standorten sehr hoch. Insbesondere dann, wenn Tierversuche involviert sind. Während es in den USA rund einen Monat dauert, um eine entsprechende Versuchsbewilligung zu erhalten, dauert es in der Schweiz sechs und mehr Monate. Dies führt mithin dazu, dass Tierversuche im Ausland durchgeführt werden, was eine Reihe von Problemen nach sich zieht. Talente wandern ab, die Versuche werden in Ländern mit tieferen Standards durchgeführt und es stellen sich Fragen nach der Reproduzierbarkeit.

Für Start-ups und Spin-offs ist es schwierig, genügend Risikokapital zu erhalten. Wenn medizinische Studien erforderlich sind, braucht es im Minimum 10 Mio. CHF. In der Schweiz ist es eher selten, dass solch hohe Beträge an Risikokapital investiert werden. Andererseits zeigt dieser Umstand, dass Start-ups oft zu früh gegründet werden. Eine Möglichkeit, diese Gefahr zu begrenzen, bestünde darin, junge Forscher:innen, die das Ziel verfolgen, dereinst ein Unternehmen zu

gründen, besser zu begleiten und Strukturen (wie das Wyss Zurich) zu schaffen, die eine zu frühe Gründung abfangen.

---

## Förderung

Sowohl SNF, Innosuisse und das Wyss Zurich sind in der Förderung von entsprechenden Projekten engagiert. Derzeit laufen auch noch EU-Projekte mit Schweizer Beteiligung. Obschon die Förderung aus finanzieller Perspektive ausreichend ist, sind die bürokratischen Hürden für Forschungsmittel und Versuchsbewilligungen eher hoch. Eine Vereinfachung der Prozesse würde nicht nur Geld sparen, sondern ermöglichte den Wissenschaftler:innen, mehr Zeit auf den Projekten zu verbringen.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universitäten Fribourg und Zürich, Wyss Zurich

*Firmen:* Aleva SA, iduntechnologies, Mindmaze AG, Sensars

*Vernetzung:* Die Schweizer Forschungslandschaft ist national und international gut vernetzt. Die Schweizer Hochschulen spielen im Feld eine wesentliche Rolle.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* Das Feld befindet sich noch am Anfang und deshalb ist es schwierig, derzeit einen internationalen Leader auszumachen. Wo sich die nächsten Durchbrüche abzeichnen, lässt sich derzeit noch nicht sagen.



## Chatbots – Konversationsagenten

Alexandre de Spindler (ZHAW)

**Konversationsagenten umfassen ein breites Feld von digitalen Assistenzsystemen, das von simplen Chatbots bis hin zu Anwendungen reicht, die auf künstlicher Intelligenz basieren und mit natürlicher Sprache gesteuert werden können. In ihrer Breite bieten die Konversationsagenten zahlreiche Chancen in der Verwaltung, für KMU sowie im Bildungs- und Gesundheitswesen.**

### Definition

Der Oberbegriff Konversationsagent umfasst eine Reihe sehr unterschiedlicher Ansätze. Diesen ist gemein, dass sie die Interaktion zwischen Menschen und Maschinen analog zu einem Gespräch gestalten wollen. Unter den Begriff Konversationsagent fallen demnach einfache Chatbots, die mittels Eingabemasken Anliegen von Kund:innen strukturiert abfragen und bis komplexen digitalen Assistenten, die auch mündliche Sätze verstehen. Dazu gehören Alexa, Siri und Google Assistant.

### Chancen

Einfache Chatbots sind unterdessen so weit entwickelt, dass sie ohne Programmierkenntnisse

erstellt und in Webseiten oder Messengerdienste eingebunden werden können. Somit haben bereits technologisch simple Chatbots das Potenzial, Abläufe zu vereinfachen, Prozesse zu optimieren und Leistungen zu verbessern. Zugleich ermöglichen sie neue Produkte und Dienstleistungen: Werden sie in ein umfassendes E-Government-Konzept eingebettet, können sie auf verschiedene Anliegen reagieren und eine bürgernahe Verwaltung schaffen. Projekte in Zusammenarbeit mit Hochschulen könnten viel bewirken, um entsprechende Lösungen zu entwickeln. Einfache Assistenzsysteme geben gerade auch KMU die Möglichkeit, niederschwellig neue Anwendungen umzusetzen und neue Technologien zu erproben.

Die Entwicklung auf dem Gebiet der Verarbeitung natürlichsprachlicher und mündlicher Inputs schreitet stetig voran. Heutige Assistenten basieren auf **KÜNSTLICHER INTELLIGENZ (→ S. 42)** und sind in der Lage, Information semantisch zu verstehen. So können sie Anweisungen von Fragen unterscheiden, nach Informationen suchen oder Apps, IoT-Geräte und Programme steuern. Solche Assistenzsysteme, die mit Sprache statt am Bildschirm bedient werden, ermöglichen neue Anwendungen. Sie können auch dort eingesetzt werden, wo andere User Interfaces nur schwer realisierbar sind oder deutliche Nachteile haben, zum Beispiel im Auto oder wenn klobige Handschuhe getragen werden. Auf künstlicher Intelligenz basierende digitale Assistenzsysteme

können aufgrund von Lernerfahrungen, die sie mit Nutzerprofilen machen, leicht individualisiert werden. Forschungsseitig gibt es Versuche, solche Assistenten im Gesundheits- oder Bildungswesen einzusetzen, wo sie Menschen in Therapie oder im Unterricht gezielt unterstützen sollen.

### Risiken

Bei komplexeren digitalen Assistenten geben die grossen Softwarekonzerne den Takt an. Diese zu konkurrieren, ist selbst für hiesige Universitäten schwierig. Dennoch sind es Technologien, deren Prinzipien auch hier gelehrt werden müssen.

Technische Machbarkeit allein schafft noch keine ausgereiften Produkte. Immer einfacher zu erstellende Assistenzsysteme verleiten dazu, diese nicht nach einem allfälligen Nutzen auszurichten. Das birgt eine gewisse Verzettelungsgefahr und führt womöglich zu unnötigen Kosten bei unklarem Nutzen.

Die immer tiefere Durchdringung unseres Alltags mit digitalen Assistenzsystemen begünstigt die Bildung von Filter-Bubbles, weil ähnliche Nutzerprofile mit ähnlichen Inhalten bedient werden, da die Empfehlungen auf schon bestehenden Präferenzen basieren.

---

## Förderung

Chatbots und ähnliche Fragestellungen werden wie andere IT-Forschungsprojekte z.B. von SNF, Innosuisse und der Hasler Stiftung gefördert. Gleichzeitig gibt es immer wieder Calls wie Fair AI, bei denen spezifische Fragestellungen im Zentrum stehen.

Seit dem Wegfall von Horizon ist es schwieriger geworden, an EU-Projekten teilzunehmen.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* Die Basistechnologien werden an verschiedenen Hochschulen und in unterschiedlichen Fakultäten erforscht, auch auf der Seite der Linguistik. Wesentliche Impulse kommen aus der Informatik.

*Firmen:* Google, IBM Research Zurich, Meta, Microsoft, Paixon

*Vernetzung:* na

*Internationale Forschungs-Hotspots:* na




---

## Mixed Reality

Andreas Kunz (ETH Zürich)

**Nutzer erhalten mittels digitaler Hilfsmittel zusätzliche digitale Informationen angezeigt (Augmented Reality) oder werden in eine digitale Welt versetzt (Virtual Reality). Auf dem gesamten Spektrum des Mixed-Reality-Kontinuums gibt es schon Anwendungen. Mixed-Reality-Anwendungen bieten Chancen für die Bildung und ermöglichen Unternehmen neue Service-Leistungen, etwa für die Fernwartung von technischen Systemen.**

---

### Definition

Extended Reality bezeichnet Technologien, welche die reale Umgebung mit digitalen Inhalten ergänzen (Augmented Reality), bis zu Brillen reichen, die Nutzer:innen in gänzlich virtuelle Umgebungen setzen (Virtual Reality). Heutige Virtual-Reality-Technologien ermöglichen zunehmend mehr und mehr Interaktion, zum Beispiel durch das Anbringen von verschiedenen Sensoren am Körper.

Vornehmlich durch die Entwicklung der Computerspiel-Industrie wurden solche Geräte (Brillen und entsprechende Steuerungsgeräte) in den letzten Jahren auch für Endanwender erschwinglich, was sich seinerseits positiv auf Forschung

und Entwicklung von Virtual-Reality-Anwendungen ausgewirkt hat. Heutige Systeme sind in der Lage, nicht nur Informationen anzuzeigen oder Filme abzuspielen, sondern können auch mit entsprechender Ausstattung Bewegungen der Hände oder das Gehen im Raum ermöglichen.

Da es sich um ein sehr breit einsetzbares Technologiefeld handelt, gibt es viele Anwendungen, die sowohl von Privaten wie kleinen und grossen Firmen eingesetzt werden können. Das Potenzial dieser Technologien ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft, etwa in der Bildung.

Nachfrageseitig sind in der Schweiz viele Unternehmen auf dem Gebiet aktiv, entsprechend entwickeln auch immer mehr Unternehmen, darunter auch Agenturen, Inhalte und Anwendungen für Extended-Reality. Vielversprechende Anwendungen sind in der Mitarbeiterschulung, in der Architektur, wo sich Verbindungen zu digitalisierten Gebäudemodellen, sog. Building Information Modells, auf tun, inkl. der Gestaltung von Fabriken und Läden, aber auch im Unterhalt von Infrastruktur und in der Virtualisierung von Tatorten.

---

### Chancen

Durch den Preisrückgang, der Virtual-Reality-Anwendungen für Privatpersonen und KMU erschwinglich machte, sind sie heute in vielen Branchen für vielfältige Einsatzbereiche angekommen. Damit können einfach und relativ kostengünstig neue Produkte im Bereich der Mixed-Reality-Anwendungen entwickelt werden. KMU können ihre bestehenden Angebote durch Zusatzdienstleistungen, etwa die Fernwartung von Maschinen, ergänzen.

---

### Risiken

Das grösste Risiko in der universitären Forschung und Entwicklung von Mixed-Reality-Anwendungen besteht in der Aufkündigung von Horizon. Dadurch wird es für Forschende in der Schweiz zwar nicht unmöglich, an europäischen Projekten teilzunehmen.

Ein zunehmendes Hindernis für Forschung und Ausbildung im Bereich Mixed Reality sind die gleichbleibenden finanziellen Mittel für Forschung und Lehre bei ansteigenden Studierendenzahlen. Dies führt dazu, dass die Betreuung der Studierenden schlechter wird. Das Entwickeln einer entsprechenden leistungs- und bedarfsrelevanten Kennzahl würde Abhilfe schaffen und die Qualität der HOCHSCHULLEHRE verbessern (→ S. 120).

---

## Förderung

Durch den Wegfall von Horizon wird es für Forscher:innen in der Schweiz schwieriger, an internationalen Projekten teilzunehmen. Zudem sind potenzielle Projektpartner aus der EU nicht genau über den Status der Schweiz informiert und schrecken oft zurück, einen Schweizer Projektpartner aufzunehmen.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* ETH Zürich (Andreas Kunz, Mirko Meboldt, Marc Pollefeys, Robert Riener, Roger Gassert), Universität Basel (Philippe Catin), FHNW (Doris Agotai), HSLU (Jürg Stettler), OST (Carlo Bach, Roman Hänggi, Ramon Hofer), ZHAW (Daniel Schmid), ZHDK (Niklaus Heeb)

*Firmen:* Aleina, Farner Lab, foldaway

*Vernetzung:* na

*Internationale Forschungs-Hotspots:* na



## Tragbare medizinische Geräte

Jens Krauss (CSEM)

**Tragbare medizinische Geräte sind am Körper getragene Geräte zur Erhebung von Vitaldaten. Diese Gesundheitsdaten ermöglichen eine persönliche oder professionelle Überwachung des Gesundheitszustandes. Tragbare medizinische Geräte haben das Potenzial, die Digitalisierung des Gesundheitswesens voranzutreiben. Nutzt die Schweiz ihr Potenzial im Bereich Forschung und Entwicklung von solchen Geräten, könnte sie eine führende Rolle einnehmen, auch da die Schweizer Industrie gut aufgestellt ist.**

### Definition

Tragbare medizinische Geräte sind am Körper getragene Geräte. Sie erfassen Gesundheitsdaten und übermitteln diese an das Smartphone oder an den Computer. Dort können diese Daten an Gesundheitsdienstleister weitergeleitet werden. Damit erlauben medizinische Wearables eine kontinuierliche Überwachung des Gesundheitszustandes und ermöglichen dem Benutzer den Zugang zu personalisierten medizinischen Dienstleistungen (→ MHEALTH, S. 128).

Tragbare medizinische Geräte sind ein Treiber der digitalen Transformation des Gesundheitswesens und finden Einsatz in der Gesundheits-

vorsorge und -promotion, in der Tele- und Sportmedizin, der Rehabilitation, der Prävention, aber auch der Beobachtung von Krankheitsverläufen und Interventionen, insbesondere bei chronischen Erkrankungen (etwa Bluthochdruck, Diabetes, Herz-Kreislauf).

Tragbare medizinische Geräte beruhen auf einer Vielzahl an Technologien. Sie verbinden verschiedene Gebiete, etwa die Datenanalyse und -verarbeitung, die Medizintechnik sowie die Mikrotechnologie und Sensoren und Aktorik. Somit sind sie eine klassische IoT-Anwendung.

### Chancen

Das heutige Gesundheitssystem steht mitten in der digitalen Transformation. Gleichzeitig stossen traditionelle Ansätze in Bezug auf Wirksamkeit, Kosten und Effizienz an ihre Grenzen. Die Annäherung von Biotechnologie, Informatik, Medizin und Mikroelektronik (→ BIOELEKTRONIK, S. 22) könnte einen Beitrag leisten, um diese Herausforderungen zu meistern. Tragbare medizinische Geräte haben grosses Potenzial in der Gesundheitsvorsorge sowie im Überwachen von Patienten und besonders krankheitsgefährdeten Gruppen. Damit werden letztlich Vorsorge und Pflege entlastet.

In allen genannten Gebieten, die zur Entwicklung und Herstellung tragbarer medizinischer Geräte

nötig sind, ist die Schweiz gut aufgestellt. Nutzt sie ihre Chancen, besteht das Potenzial, dass die Schweiz eine weltweit führende Rolle im Feld der tragbaren medizinischen Geräte spielt. So ist die Schweiz Heimat der Nahrungsmittelhersteller Nestlé und Givaudan, sie verfügt über Standorte der IT-Riesen Google, IBM und Meta, und die Region Basel gilt nach Boston als der zweitstärkste Pharmacluster weltweit. Dazu kommen Hochschulen, Forschungsinstitutionen und Universitätsspitaler, die über einen ausgezeichneten Ruf verfügen. Heute sind rund 300 Start-ups in den für tragbare medizinische Geräte relevanten Bereichen aktiv.

Gerade in dieser sensiblen Domäne steht das Label «Swiss Made» für Qualität, Verlässlichkeit und Präzision (→ BIG DATA UND MASCHINELLES LERNEN, S. 42). Dies ist in Bereichen wie der Medizintechnik und Datensicherheit von grösster Bedeutung.

Um die Chancen effektiv zu nutzen, ist es von zentraler Bedeutung, dass die Aktivitäten in dem Feld gezielt gefördert und die Aktivitäten gebündelt werden.

### Risiken

Damit Forschung und Entwicklung weiterhin möglich bleiben, muss es einfacher werden, medizinische Geräte zu zertifizieren. Zudem darf die

Forschungsfreiheit nicht weiter eingeschränkt werden. Auch muss der Zugang zu internationalen Forschungspartnerschaften, insbesondere im EU-Raum, gewährleistet werden.

Bezüglich der von den Geräten erfassten Daten liegen die Herausforderungen in der Verbesserung der Datenintegrität und im Datenschutz. So muss sichergestellt werden, dass Daten transparent, aber sicher geteilt werden können. Dies ist nicht nur aus technischen Gründen eine Herausforderung, sondern ist auch ein wichtiges Argument, dass solche Geräte überhaupt genutzt werden (→ OWNING AND SHARING DATA: GESELLSCHAFTLICHE ASPEKTE, S. 118).

Damit medizinische Wearables ihr gesundheitsförderndes Potenzial entfalten können, müssen sie in klinische Arbeitsabläufe integriert werden.

Soll sich die lokale Industrie erhalten, muss zumindest ein Teil der Produktion in der Schweiz geschehen. Nur so können Business Cases entwickelt werden, und nur so kann sich die Forschung und Entwicklung solcher Geräte hier langfristig etablieren.

---

## Förderung

Im Gegensatz zur EU gibt es hierzulande keine spezifische Förderung für Projekte im Bereich der tragbaren medizinischen Geräte. Angesichts der sich in diesem Feld ergebenden Chancen für die

Schweiz ist die Förderung – verglichen mit den USA, Japan und China – eher gering. Entsprechend könnte es sinnvoll sein, ein Förderprogramm zu etablieren, das die Zusammenarbeit von Datenanalyse, ICT, Medizin und Mikrotechnologie und -elektronik über einen längeren Zeitraum von ca. 5 Jahren fördert.

---

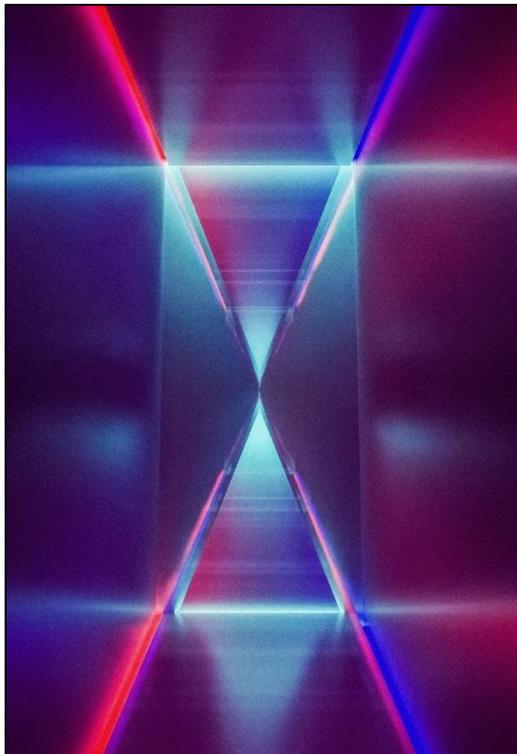
## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universitäten Bern (ArtOrg) und Zürich (Cluster Biomedical Photonics), Universitätsspital Basel, CHUV, Inselspital und USZ, BFH, FHNW, HES-SO, CSEM

*Firmen:* Biotronik, Sonova, Swisscom (Medgate), Ypsomed, Versicherer. Insgesamt gibt es eine recht vitale Start-up-Szene im Bereich mit rund 300 Firmen

*Vernetzung:* Die Akteure sind zwar vernetzt, eine übergeordnete Koordination der Anstrengungen könnte aber Synergien schaffen und den Bereich vorantreiben. Bislang sind Initiativen wie das SPHN (Swiss Personalized Health Network) zwar eine gute Idee, sie sind aber noch zu wenig transversal aktiv und die Aktivitäten bleiben heterogen.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* Führend sind die Akteure in den USA sowie die Technologielieferanten aus Asien.



Quelle: Rahul Pugazhendi auf Unsplash

## Photonik

**Photonik ist die Lehre der Lichtteilchen, den Photonen. Diese gelten als Elektronen des 21. Jahrhunderts. Photonik und Elektronik spielen zusammen, ergänzen sich und bilden ein Zwillingpaar, wobei die Elektronik in der Datenspeicherung und die Photonik in der Datenübertragung ihre Stärken ausspielen. Photonische Technologien sind Schlüsseltechnologien für die kommenden Jahrzehnte und finden Anwendung in zahlreichen industriellen Produkten und Prozessen.**

Besonders zukunftssträftig für Wissenschaft und Gesellschaft sind die **PHOTONISCH INTEGRIERTEN SCHALTKREISE («PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS» ODER PICs)** (→ S. 112). Diese Technologie birgt ein grosses Potenzial und findet Anwendung in einer Vielzahl an Branchen und Gesellschaftsbereichen. Gegenüber herkömmlich integrierten Schaltkreisen weist sie etliche Vorteile wie eine höhere Übertragungsgeschwindigkeit, mehr Bandbreite und eine bessere Energieeffizienz auf. PICs gilt – auch mit Blick auf den Klimawandel – als «Key Game Changer» für die kommenden Jahre und als Hoffnungsträger für massive Energieeinsparungen im IT-Bereich, der bis 2030 voraussichtlich 20 Prozent der globalen Energie konsumieren wird.

Für die Schweiz bieten sich Chancen: Als hochentwickelte und hochpreisige Volkswirtschaft kann sie die zunehmende Komplexität der

photonischen Systeme und die daraus resultierenden hohen Anforderungen an die Interdisziplinarität zu ihren eigenen Gunsten nutzen. Dabei sollte nicht nur der F&E-Platz, sondern gleichzeitig auch der Werkplatz Schweiz durch vermehrten Informationsaustausch zwischen Industrie und Grundlagenforschung, aber auch innerhalb der Industrie gestärkt werden. Mit Blick auf den Industriepartner sind sowohl bereits etablierte Unternehmen als auch Start-ups angesprochen. Die Kleinheit des heimischen Absatzmarktes erfordert eine Ergänzung mit ausländischen Verkaufskanälen. Dadurch lassen sich Skalenerträge durch höhere Losgrößen erzielen, womit die Produktionskosten in der Schweiz gesenkt und die Verkaufspreise reduziert werden können. Alternativ ist ebenfalls die Verlagerung der Produktion in das günstigere (europäische) Ausland denkbar, auch wenn dies mit einem Verlust an nationaler Wertschöpfung einhergeht. Eine preislich attraktive Herstellung kann auch durch Public-private-Partnerships gefördert werden. Eine entscheidende Rolle nehmen Investor:innen wahr, wobei es wichtig ist, dass bei Projekten angewandte Forschungsthemen nicht vergessen werden. Lokale Produktion mindert die Abhängigkeit von internationalen Lieferketten, die sich gerade in Krisenzeiten immer wieder als fragil erweisen. Als Wertschöpfer («enabler») dient besonders die Mikromontage, also die Integration von Teilen unterschiedlicher photonischer Herkunft zu einem einzigen System. Auch wenn die Produktion

der Einzelteile nicht in der Schweiz erfolgt, baut deren Integration auf die typischen Fähigkeiten der Schweiz – Präzision und Qualität. Sie setzt entsprechend ausgebildete Mitarbeitende voraus, welche die Technologie verstehen und auch weitere, innovative Anwendungen identifizieren können.

Eine erfolgreiche photonische Industrie setzt entsprechendes Humankapital am Standort Schweiz voraus. Obwohl eine Ausbildung im Fachgebiet der Photonik bereits möglich ist, ist die Anzahl der Photonik-Studierenden vergleichsweise tief. Wichtig ist, dass für die Technologie Begeisterung geweckt wird: Photonik sollte in spielerischer Form Teil der Lehrpläne sein und gegen aussen als attraktiv sichtbar gemacht werden. Mit der ETH Zürich und der

EPFL verfügt die Schweiz über zwei führende Forschungsanstalten auf akademischem Niveau. Damit besteht eine hervorragende Ausgangsbasis für den Technologietransfer in die Wirtschaft. Die OST ergänzt dieses Angebot im anwendungsorientierten Bereich, der besonders für die Industrie attraktiv ist. Diese sollte Praktikumsstellen anbieten und/oder Lehr- und Studienabgänger:innen übernehmen. Damit wird eine hohe Konzentration an Know-how am Standort Schweiz sichergestellt.

Im Folgenden werden nebst der Technologie der integrierten Schaltkreise ebenfalls der Einsatz der EINZELPHOTONEN-TECHNOLOGIE (→ S. 110) dargestellt. Diese findet z. B. bei 3D-Kameras Verwendung, die mittels hochsensibler Sensoren teiltransparente oder reflektierende Oberflächen erfassen können. Auch wird mit der BIOPHOTONIK (→ S. 108) ein zentrales Anwendungsgebiet der Photonik mit Potenzial im Bereich der (BIO-)MEDIZIN (→ 28) und in den Energiewissenschaften (z. B. Biophotovoltaik) dargestellt.

	Digitale Welt					Energie und Umwelt					Fertigung	Life Sciences			Technik und Gesellschaft			
Biophotonik																		
Einzelphotonen-Technologien		●			●												●	
Photonisch integrierte Schaltungen	●																	

**Tabelle 9** zeigt den Zusammenhang zwischen den Technologien aus der Technologiegruppe Photonik und den 20 Labels. Jeder Punkt markiert einen unmittelbaren Bezug, eine konkrete Anwendung oder eine zu erwartende Auswirkung. Die grauen Balken weisen darauf hin, dass die entsprechend markierte Technologie ein sogenannter Enabler ist und auf fast alle Industrieklassen eine Auswirkung haben wird.



## Biophotonik

Ardemis Boghossian (EPFL)

Die Biophotonik umfasst unterschiedliche Anwendungen optischer Technologien und weist sowohl in der (Bio-)Medizin als auch in den Energiewissenschaften grosses Potenzial auf. Im Gebiet der Biophotovoltaik bietet sie spezifische ökonomische und ökologische Vorteile.

### Definition

Biophotonik bezeichnet eine Kombination aus Biologie und Photonik. Hierzu zählen Anwendungen optischer respektive laserbasierter Verfahren zur Untersuchung biologischer Moleküle, Zellen und Gewebe. Dabei steht der Einsatz von Licht bei verschiedenen technologischen Nutzungen im Vordergrund: Es finden sich Anwendungsgebiete in den Biowissenschaften (Aufklärung biologischer Prozesse und Krankheitsursachen), der Medizin (Krankheitsbekämpfung) sowie der Energie- (biologische Photovoltaik) (→ KÜNSTLICHE PHOTOSYNTHESE, S. 64) und Umweltwissenschaften (Schadstoffüberwachung und Wasseraufbereitung).

### Chancen

Die Biophotonik profitiert von photonisch integrierten Schaltkreisen (→ PHOTONISCH INTEGRIERTE SCHALTUNGEN («PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS»), S. 112), die als zukunftssträchtige Wegbereiter für Wissenschaft und Gesellschaft gelten. Dadurch bieten sich Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Medizintechnik, die genauere Krankheitsbestimmungen und zuverlässigere Therapien als die bestehenden zulassen. Damit sind frühzeitigere Diagnosen, Verzicht auf invasive Eingriffe und effektivere Heilungsprozesse verbunden. Biophotonik spielt auch eine wichtige Rolle bei der Qualitätsanalytik im TISSUE ENGINEERING (→ S. 128) und beim 3D-BIODRUCK (→ S. 30). In Kombination mit der EINZELPHOTONEN-TECHNOLOGIEN (→ S. 110) lassen sich zudem die Arbeitsversionen der DNA, die einzelsträngigen RNA-Moleküle, in Echtzeit und auf dem Niveau der Einzelmoleküle analysieren. Das erlaubt Rückschlüsse auf die räumlichen und zeitlichen Stoffwechselfvorgänge in verschiedenen Zelltypen und allfällige krankheitsbedingte Abweichungen.

Das Anwendungsgebiet der biologischen Photovoltaik eröffnet durch photomikrobielle Brennstoffzellen («lebende Solarzellen») die Möglichkeit, mit Hilfe von Bakterien Lichtenergie zu gewinnen und elektrischen Strom zu erzeugen. Die Verwendung eines lebenden Organismus birgt Potenzial als kostengünstigere Alternative zur Photovoltaik auf Siliziumbasis. Dadurch ergeben

sich auch Chancen für ärmere Länder, indem sich ihr Zugang zum weltweiten Energieangebot verbessert. Zugleich verringert die biologische Photovoltaik den CO<sub>2</sub>-Ausstoss: Einerseits durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Einlagerung, womit weniger CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre verbleibt, Und andererseits ergeben sich auch CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei der Produktion. Die Schweiz ist führend als Energie-Hub, wodurch sich die Anwendung der Biophotonik als zusätzlich attraktiv erweist.

### Risiken

Neue Technologien wie die Biophotonik konkurrieren stets gegen bestehende und etablierte technologische Lösungen. Es kann die Gefahr bestehen, dass weiterhin ältere Technologien gefördert werden, obwohl bessere technische Mittel vorhanden wären. Dies kann aus Unwissen über die Vorteile oder ebenso aus Kostengründen geschehen. Gerade bei Technologien, die wie im Energiebereich ganze Infrastrukturen benötigen, kann ein technologischer Fortschritt sehr kostenintensiv sein.

### Förderung

Biophotonik bietet gute Möglichkeiten für Grundlagen- und angewandte Forschung. Insgesamt wird die Förderung dieser Technologie als

ausreichend betrachtet, auch wenn punktuelle Defizite bestehen (z. B. die Vermarktung von Bioenergie, d. h. der Schritt vom Prototypen zur Anwendung). Der SNF hat als erste Institution Biophotonik in der Schweiz gefördert. Dabei hat er sich mehreren Anwendungsgebieten in der Sondierungsphase zugewandt u. a. auch im Bereich der Medizintechnik oder der Energie. Innosuisse hat Projekte unterstützt, die zum Zeitpunkt der Geldvergabe hohe Risiken enthielten. Auf kantonaler Ebene sind keine Förderinstitutionen bekannt. Als private Förderagenturen ist die Gebert-Rüf-Stiftung zu nennen, wobei sie sich nicht direkt im Gebiet der Biophotonik engagiert. Sie fördert mikrobielle Technologien (Lichtforschung mit Cyanobakterien).

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universitäten Genf und Zürich, CSEM

*Firmen:* 1 Drop Diagnostics, BiotroniX, Creoptix, Lino Biotech, Lumex, Roche Diagnostics

*Vernetzung:* gute, informelle Zusammenarbeit, jährliche Konferenz zu Photonik (inkl. Biophotonik)

*Internationale Forschungs-Hotspots:* Es gibt nur wenige, dafür umso stärkere Forschungseinrichtungen. Dadurch gestaltet sich die Zusammenarbeit als effizient. Der Austausch in Europa ist fruchtbar, in den USA ist er hingegen weniger greifbar und eher selbstbezogen. Weil das Gebiet der Biophotonik sehr breit ist, kann keine bestimmte technologische Führerschaft ausgemacht werden.



## Einzelphotonen-Technologien

Dominik Bisang (ETH Zürich),

Jürg Leuthold (ETH Zürich)

**Einzelphotonen-Technologien finden eine breite Anwendung, sie dies im Bereich der Sensorik, der Kommunikation, der aufkommenden Quantentechnologien oder der Kryptologie. Für die Schweiz bietet sich eine Chance, auf einem neuen, hochspezialisierten Technologiegebiet führend zu sein und dieses mit ihren High-Tech KMU industriell mitzugestalten.**

### Definition

Photonen sind fundamentale Quantenteilchen des Lichts. Bei den Einzelphotonen-Technologien («Single-Photon Technologien») geht es um die Erzeugung, Lenkung und Sicherstellung von einzelnen Photonen. Das Gebiet der Einzelphotonen-Technologien behandelt Teilaspekte der Photonik und/oder der Quantentechnologien. Bereits heute gibt es kommerziell erhältliche Quellen für Einzelphotonen und entsprechende Detektoren. Die Verbesserung der Quellen und Detektoren (höhere Effizienz, schnellere Erzeugungs- oder Detektionsrate) sowie der Einsatz der Technologien sind Leitthemen der Forschung.

### Chancen

Die Schweiz könnte sich mit ihren vielen kleinen, spezialisierten High-Tech Firmen zu einem idealen Standort für Einzelphotonen-Technologien entwickeln. Unterstützend gibt es an den Universitäten und ETHs hochqualifizierte Forschende und zahlreiche Projekte auf diesem Gebiet. In der Industrie finden Einzelphotonen-Technologien in verschiedenen Bereichen Anwendung und bergen Potenzial: So können in der Kryptologie verschlüsselte Verbindungen zwischen zwei Akteuren erstellt werden – aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Photonen kann gemessen werden, ob jemand beim Aufbau der Verbindung den geheimen Schlüssel mitliest oder nicht (vgl. auch [→ QUANTEN- UND POSTQUANTENKRYPTOGRAPHIE, S. 52](#)). Bei der optischen Kommunikation (Datenübertragung mit Licht) können sehr schwache Signale über grosse Distanzen empfangen werden, die nur noch aus wenigen Photonen bestehen (z. B. bei Satelliten). In der Biologie und Chemie können Photonen zur Charakterisierung von Molekülen dienen und in der Sensorik gibt es ein grosses Potenzial im Bereich von Messgeräten und Apparaturen zur Detektion sehr schwacher Signale. Letztlich gibt es auch Ansätze für Quantencomputer basierend auf der Interaktion einiger weniger Photonen (Boson Sampling, KLM Protocol).

### Risiken

Zur Fabrikation der meisten Einzelphotonen-Quellen und -Detektoren wird ein Reinraum benötigt. Gerade für Start-ups und kleine Firmen ist es jedoch finanziell nicht möglich, einen solchen Raum zu betreiben. Eine mangelnde Initiative für einen nationalen Reinraum und/oder eine zu geringe Förderung seitens des Staates stellen Risiken dar. Auch eine fehlerhaft koordinierte staatliche Förderung von Industriekooperationen und Zusammenarbeiten kann sich als Hindernis erweisen.

Für kleine Firmen ist der Zugang zu einem Reinraum ein nennenswertes Problem. Jedoch gäbe es in der Schweiz aufgrund der kleinen geographischen Distanzen gute Möglichkeiten zur Kooperation über verschiedenste Institutionen hinweg.

Einzelphotonen-Technologien arbeiten naturgemäss mit sehr niedrigen Lichtintensitäten (einzelne Photonen) und stellen daher keine nennenswerte Gefahr für Menschen dar.

### Förderung

Die Forschungsförderung findet besonders im Gebiet der Quantentechnologien statt. SNF, Innosuisse und die EU unterstützen diese Forschung sehr breit. Auch grosse Firmen wie Google, IBM, Microsoft oder Sony forschen aktiv

im Bereich der Quantentechnologien. Ein spezifischer Fokus auf die Förderung von Einzelphotonen-Technologien ist bis anhin jedoch nicht gelegt. Der Bund kann jedoch durch seinen Einsatz für photonische Technologien oder Quantentechnologien gezielt Einzelphotonen-Technologien unterstützen, wobei bestehende Instrumente hierfür geeignet erscheinen. Ebenso schiene es attraktiv, dass der Bund kleinen Firmen einen finanziell tragbaren Zugang zu einem Reinraum ermöglicht.

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universitäten Basel und Universität Genf, CERN

*Firmen:* Dectris, ID Quantique, Qnami, Qzabre

*Vernetzung:* Es gibt keine Plattform für Einzelphotonen-Technologien. Das Beispiel der ETH Zürich zeigt, dass der Austausch vor allem über Plattformen zu den übergeordneten Themen wie Photonik, Optik oder im Rahmen der Quantentechnologieforschung stattfindet.

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa (Einzelphotonen-Detektoren): Deutschland (Westfälische Wilhelms-Universität Münster); Schweden (Königliche Technische Hochschule Stockholm); Finnland (VTT Helsinki); Russland

Weltweit: USA (Einzelphotonen-Detektoren) (Jet Propulsion Laboratory der NASA, MIT, National Institute of Standards and Technology NIST)



## Photonisch integrierte Schaltungen («photonic integrated circuits»)

Tobias J. Kippenberg (EPFL),  
Demetri Psaltis (EPFL)

Die integrierte Photonik und insbesondere photonisch integrierte Schaltkreise («photonic integrated circuits; PICs») erlauben, optische Signale direkt auf einem Silizium-Chip zu erzeugen, detektieren und zu manipulieren. Solche Schaltungen erlauben eine chipbasierte Miniaturisierung von komplexer Lasertechnologie und Apparatur. Diese Technologie gilt als bahnbrechend und ist ein zukunftssträchtiger Wegbereiter für Wissenschaft und Gesellschaft gleichermaßen.

### Definition

Laserlicht ist das Kern-Übertragungsmedium unserer Informationsgesellschaft und Wegbereiter des Internets. Licht wird dabei primär in optischen Glasfasern transportiert. Neuartige Anwendungen von Laserlicht bieten sich durch photonische Schaltkreise. Herkömmliche integrierte Schaltkreise, bekannt als Chips, nutzen Elektrizität zur Signalübertragung und bestehen aus einer Anordnung von elektronischen Bauteilen wie Transistoren, Verstärkern und Widerständen auf einer Halbleiterschibe. Bei photonisch

integrierten Schaltkreisen (PICs) werden die elektronischen durch photonische Bauteile wie Filter, Laserdioden und Wellenleiter ersetzt und Licht wird zur Signalübertragung genutzt. PICs weisen eine höhere Übertragungsgeschwindigkeit, mehr Bandbreite und einen geringeren Energieverlust aus.

### Chancen

Die integrierte Photonik erlebt derzeit eine zweite Revolution. Bislang ist nur die integrierte Photonik auf der Basis von Silizium eine ausgereifte, kommerzielle Technologie. Die Verwendung neuartiger Materialien, wie Galliumphosphid, Lithiumniobat oder Siliziumnitrid, ermöglicht den Zugang zu neuen physikalischen Prinzipien und Effekten zur Erzeugung und Modulation von Laserlicht sowie zu neuen Wellenlängenbereichen, wie beispielsweise der sichtbare Bereich – relevant beispielsweise für medizinische Anwendungen. Mit solch neuartigen photonischen Chips können optische Frequenzkämme erzeugt werden, die wie ein Laserlineal für Licht wirken und zur Vermessung von optischen Frequenzen verwendet werden. Anwendung finden diese photonisch integrierten Frequenzkämme in der Hochgeschwindigkeitstechnologie in Datenzentren (→ QUANTENCOMPUTER, S. 50), Medizinprodukten, in der Metrologie, Raumfahrt, Abstandsmessungen für autonomes Fahren,

Telekommunikation und Militärtechnik. Gleichzeitig können diese Chips auch in der Grundlagenforschung eingesetzt werden, beispielsweise zur Kalibration von astrophysikalischen Spektrometern zur Detektion von Exo-Planeten.

Mit Blick auf die Wirtschaft ergeben sich grosse Chancen für neue Unternehmen und damit auch für Arbeitsplätze. Im Gegensatz zur Elektronik ist die integrierte Photonik ein stark fragmentierter Markt, womit sich Spezialisierungen in Nischen anbieten, in denen auch neue Akteure einen bedeutenden Anteil am Weltmarkt erlangen können – wie bereits bestehende Unternehmen in der integrierten Photonik aus der Schweiz dies gezeigt haben. Angesichts der grossen Zahl hochspezialisierter benötigter Materialien, ihres Zusammenbaus sowie kundenspezifischer Anwendungen und Dienstleistungen bieten sich zukünftige Marktchancen für Dutzende bis gar Hunderte von Unternehmen. Dabei ist der Lasermarkt selbst trotz seiner Fragmentierung erheblich.

Insgesamt kann sich die Schweiz als bedeutender Ort für die Entwicklung der nächsten Generation integrierter Photonik etablieren und sie besitzt bereits bedeutende Akteure. Insbesondere die EPFL verfügt über fachliche Expertise auf höchstem Niveau und verfügt über grosse Reinraumanlagen, die sowohl von der Akademie als auch von Start-ups genutzt werden können. Reinräume

ohne Partikel in der Luft werden für die Fertigung der empfindlichen Schaltkreise benötigt.

---

## Risiken

Das Haupthindernis für Projekte im Gebiet der integrierten Photonik ist die umfangreiche Finanzierung. Dieses äussert sich insbesondere bei Investitionen in Reinräume und der Projekt-Finanzierung. Integrierte Photonik-Start-ups können aufgrund der enormen Kosten keinen eigenen Reinraum betreiben oder unterhalten. Erfolgreiche US-amerikanische Standorte, an denen Start-ups florieren (Stanford, Twente Photon Delta, UC Santa Barbara), nutzen den Universitätsreinraum für Start-ups. Dies erfordert jedoch einen Reinraum mit rigider Prozesskontrolle, um externen Nutzern Zugang gewähren zu können. Für zuverlässige und reproduzierbare Verarbeitung muss die Reinrauminfrastruktur so angepasst werden, dass es zu keiner Vermischung von Prozessen kommt.

---

## Förderung

Die Vernetzung der relevanten Akteure ist unzureichend. So mangelt es an einem NCCR oder einem fokussierten Programm zur «Entwicklung der nächsten Generation integrierter Photonik». Entwicklungen in diesem Gebiet erfordern hohe Investitionen, da neben Personal insbesondere die sehr kostenintensive Reinraumtechnik notwendig ist. Die herkömmliche Forschungsfinanzierung in der Schweiz sieht nicht genügend Projektmittel vor.

Im Gegensatz dazu bietet die Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA, USA) eine Möglichkeit der finanziellen Förderung von technisch sehr anspruchsvollen und kostenintensiven Projekten – und hat auch massgeblich in der Schweiz Projekte finanziert. Eine Finanzierung mit nationalen als auch mit EU-Mitteln ist schwierig. Derzeit bietet nur das Future and Emerging Technologies (FET) Open-Projekt der EU Aussicht auf eine Finanzierung. Auf Schweizer Ebene leistet lediglich das Programm BRIDGE hohe Beiträge. Eine Finanzierung im privaten Sektor ermöglicht die Werner-Siemens-Stiftung, die technische Projekte anschiebt, um daraus resultierende Innovationen industriell zu nutzen. Die Finanzierung ist insgesamt als nicht ausreichend zu betrachten, gerade weil erhebliche Mittel für die Reinraumgebühren erforderlich sind.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich

*Firmen:* IBM Research Zurich, LIGENDEC SA, Lumiphase, Polariton

*Vernetzung:* unzureichend

*Internationale Forschungs-Hotspots:* USA (Caltech, Columbia University, Harvard, UC Santa Barbara, Stanford (in geringerem Ausmass))



Quelle: Ryoji Iwata auf Unsplash

## Soziale Innovationen

Soziale Innovationen versuchen, einen Wandel individueller Verhaltensmuster und somit gesellschaftlicher Praktiken herbeizuführen. Dadurch erweitern sie das vorherrschende, technologiebasierte Innovationsverständnis, indem sie neue gesellschaftliche Ziele verfolgen. Soziale Innovationen erfordern gesellschaftliche Akzeptanz und können durch neuartige Lösungen Gesellschaftssysteme verändern, wobei unter Umständen auch ein ökonomischer Mehrwert generiert wird. Der Begriff bleibt schwer greifbar, wird sehr unterschiedlich verwendet und verbindet aber zugleich, indem er als Sammelbegriff für Aktivitäten zahlreicher Organisationen und wissenschaftlicher Initiativen herhält.

Soziale Innovationen können in sehr unterschiedlichen Bereichen der Gesellschaft entstehen und ihren Lauf nehmen. Einen gemeinsamen Bogen spannt dabei die Digitalisierung der Lebenswelt, der mit sozialen Innovationen begegnet wird. Sie wirft vorab die Frage nach dem Besitz von und der Kontrolle über Daten auf (→ OWNING AND SHARING DATA: GESELLSCHAFTLICHE ASPEKTE, S. 118).

Die Schweizer Volkswirtschaft zählt zu den weltweit führenden Anbieterinnen von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen. Zugleich ist sie aufgrund ihrer Kleinräumigkeit stark mit dem Ausland verflochten, was sich im Ausmass ihrer international gehandelten Güterströme

manifestiert. DIGITALE WÄHRUNGEN (→S. 118) versprechen schnelleres, sichereres und kostengünstigeres Bezahlen der gehandelten Ware. Sie bieten also vielfältige Möglichkeiten und einen grossen wirtschaftlichen Nutzen, wie z. B. die Programmierbarkeit von Geldflüssen durch Smart Contracts, Zahlungsabwicklungen zwischen Maschinen ohne menschliches Zutun sowie die Vereinfachung grenz- und währungsüberschreitender Zahlungen. Offensichtlich kann diese soziale Innovation transformative Auswirkungen auf das heutige Finanzsystem, Geschäftsmodelle von Finanzintermediären, aber zugleich auch auf das Verhalten realwirtschaftlicher Akteur:innen haben. Der Schweiz bieten sich einige bedeutsame Anknüpfungspunkte an das Thema, woraus auch Chancen erwachsen.

Die Versorgung mit Lebensmitteln ist stark durch grosse Verteiler geprägt, die eine Strategie der Zentralisierung und Skalierung verfolgen. Daneben entwickeln sich aber vermehrt LOKALE LEBENSMITTELKREISE (→S. 122), welche als innovative Form der Versorgung die Produzent:innen und Kund:innen näher zusammenbringen und eine nachhaltige Landwirtschaft fördern. Neue digitale Lösungen und Plattformen sind ein wichtiges Element für diese Geschäftsmodelle. Die Kunden erhalten mehr Transparenz über die Herkunft und Produktion der konsumierten Lebensmittel und «Food-Waste» kann reduziert werden. Die Schweiz ist gut dafür positioniert: Als reiche Volkswirtschaft vermag sie es, sich den Themen der Nachhaltigkeit und des Umweltschutzes

gebührend anzunehmen. Zugleich besteht ein hohes ökologisches Bewusstsein in der Bevölkerung, wobei die Zahlungsbereitschaft für regional hergestellte Produkte, die entsprechend auch teurer sind, nur teilweise gegeben ist.

Die Vernetzung von Akteur:innen findet ebenfalls im Verkehrsbereich statt. **MOBILITÄTSKONZEPTE** (→ S. 124) verbinden verschiedene Verkehrsmittel und bieten den Kund:innen bessere und nachhaltigere Angebote. Dem Einsatz von automatisierten und gemeinsam genutzten Fahrzeugen («Car-sharing») kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Auch eine umfassende Digitalisierung mit einem offenen Datenaustausch, geeigneten digitalen Plattformen und fortschrittlicher **DATENVERARBEITUNG** (→ S. 38) (allenfalls mit künstlicher Intelligenz) sind von Bedeutung.

Mobilitätskonzepte erfordern somit das Zusammenspiel von technologischen Innovationen, wirtschaftlichen Lösungen und der Akzeptanz durch die Gesellschaft. Eine in der Schweiz gute Voraussetzung, aber zugleich auch ein Hindernis zur Etablierung von Mobilitätskonzepten ist der auf hohem Niveau ausgebaute öffentliche Verkehr und damit das bereits bestehende breite Angebot an Mobilitätsdienstleistungen.

Voraussetzung für eine gute Umsetzung einer sozialen Innovation ist letztlich auch der Bildungsstand und die Lernfähigkeit der Bevölkerung. Damit kommen mitunter auch das Hochschulwesen und die **HOCHSCHULLEHRE** (→ S. 120) ins Spiel, die den Lernenden Wissen, Kompetenzen, Werte und – im Idealfall – auch die Fähigkeit zur kritischen Distanzierung vermitteln sollen. Damit das Bildungswesen in der Lage ist, dies zu tun, bedarf es eines steten Abgleichs mit aktuellen wissenschaftlichen, gesellschaftlichen, technologischen und wirtschaftlichen Entwicklungen, womit selbstsprechend auch die fortschreitende Digitalisierung angesprochen ist.

Soziale Innovationen sind mitunter Ergebnis und Ausprägung einer Pfadabhängigkeit. Diese wirkt auf Entwicklungen, denn erst durch Kenntnisse der Vergangenheit lässt sich Zukünftiges realistisch gestalten. Dabei gilt es, aufmerksam zu sein, dass (vermeintliche) Innovationen nicht nur Bestehendes oder gar Altes aufnehmen und leicht variieren, sondern dass effektiv in neuen Dimensionen gedacht (disruptive Innovationen) sowie Potenzial erkannt und genutzt wird. Soziale Innovationen können nicht auf morgen bestellt und hergestellt werden, ihre lang andauernden Wirkungen für zukünftige Generationen sind daher klar zu thematisieren. Dabei soll auch stets und wiederkehrend über die Frage reflektiert werden: Welche besseren gesellschaftlichen Alternativen gibt es im Vergleich zu den bestehenden sozialen Gegebenheiten?

	Digitale Welt				Energie und Umwelt							Fertigung	Life Sciences			Technik und Gesellschaft					
Digitale Währungen		●																●		●	●
Hochschullehre																					●
Lokale Lebensmittelkreise		●									●		●								●
Mobilitätskonzepte	●	●	●									●								●	
Owning and Sharing Data		●	●															●			

**Tabelle 10** zeigt den Zusammenhang zwischen den Technologien aus der Technologiegruppe Soziale Innovationen und den 20 Labels. Jeder Punkt markiert einen unmittelbaren Bezug, eine konkrete Anwendung oder eine zu erwartende Auswirkung.





## Digitale Währungen

Benjamin Müller (SNB)

Traditionelle Geldformen werden neuerlich durch sogenannte digitale Währungen oder «Tokengeld» ergänzt. Die zugrundeliegende Technologie für die Aufbewahrung und den Austausch von Tokengeld ist häufig die Distributed Ledger Technology (DLT) oder Blockchain. Tokengeld verspricht schnelleres, sichereres und kostengünstigeres Bezahlen. Diese neuen Geldformen könnten weitreichende Auswirkungen auf das heutige Finanzsystem, Geschäftsmodelle von Banken und auch von Zentralbanken haben.

### Definition

Im heutigen Geldsystem unterscheidet man zwischen Bargeld (Banknoten und/oder Münzen) und Buchgeld, wobei zwischen privatem (Bank-einlagen) und staatlichem Buchgeld (Sichtguthaben bei der Zentralbank) unterschieden wird. Ergänzt werden diese Geldformen neuerlich durch sogenanntes Tokengeld. Beispiele sind Bitcoin, sog. Stablecoins oder auch digitales Zentralbankgeld (central bank digital currency, CBDC).

Tokengeld kann privat (Bitcoin, Stablecoins) oder staatlich (CBDC) emittiert werden. Weiter kann Tokengeld eine eigene Währung mit einem entsprechenden Wechselkurs gegenüber dem

Franken darstellen (bspw. Bitcoin, Stablecoins wie Libra 1.0) oder in einer offiziellen Währung denominated sein (bspw. Franken CBDC, wertstabiler Stablecoin gegenüber dem Franken). Der Token-Begriff nimmt Bezug auf die Eigenschaft, dass Tokens direkt zwischen Parteien «peer-to-peer» übertragen werden können, ohne dass ein Intermediär involviert sein muss. Die zugrundeliegende Technologie, welche die Aufbewahrung und den Übertrag von Tokens ermöglicht, ist oftmals die Distributed Ledger Technology (DLT) oder Blockchain. Nachfolgend sollen die Begriffe «digitale Währungen» oder «digitales Geld» als Synonym zum Begriff «Tokengeld» verstanden werden.

Auch Zentralbanken untersuchen die Vor- und Nachteile von staatlichem Tokengeld (CBDC). Dabei muss zwischen «retail CBDC» und «wholesale CBDC» unterschieden werden. Eine Retail CBDC, die tokenbasiert aber auch als kontobasiertes Buchgeld ausgegeben werden könnte, stünde der breiten Bevölkerung zur Verfügung. Wholesale CBDC stünde – vergleichbar zu heutigen kontobasierten Sichtguthaben bei der Zentralbank – primär Banken und weiteren Finanzmarktakteuren zur Verfügung und wäre ausschliesslich tokenbasiert. Die Schweizerische Nationalbank (SNB) experimentiert im Kontext des Schweizer Zentrums beim Innovation Hub der Bank für Internationalen Zahlungsausgleich (BIZ) mit wholesale CBDC und hat Ende 2021, respektive

Anfang 2022 die beiden Projekte «Jura» und «Helvetia Phase II» abgeschlossen.

### Chancen

Je nach Anwendung und Ausgestaltung versprechen digitale Währungen heutige Zahlungen schneller, sicherer und kostengünstiger zu machen. Die Abhängigkeit von Intermediären bei Finanztransaktionen könnte reduziert werden und effiziente Zahlungsmöglichkeiten könnten einem weiteren Kreis von Personen zugänglich gemacht werden (Stichwort: finanzielle Inklusion). Digitale Währungen können neue DLT-basierte Anwendungen unterstützen und durch die Programmierbarkeit von Geld erhofft man sich Effizienzgewinne durch eine erhöhte Automatisierung.

Mittels einer retail CBDC könnten in einer zunehmend digitalisierten und bargeldlosen Welt die Eigenschaften von Bargeld und deren Funktionen erhalten werden. Je nach Ausgestaltung und Kontext könnte sie den Wirkungsgrad der Geldpolitik (Transmission) verbessern und die Stabilität des Finanzsystems erhöhen.

### Risiken

Mit der Verbreitung von Tokengeld könnten weitreichende Auswirkungen auf das heutige Finanzsystem, die Geschäftsmodelle der Banken

und auch von Zentralbanken einhergehen. Davon wären die gesamte Wirtschaft und Gesellschaft betroffen.

Bei privat emittiertem Tokengeld stellen sich Fragen zu Verhinderung von Geldwäscherei, der Steuerhinterziehung oder der Terrorismusfinanzierung. Weiter stellen sich Fragen zur Regulierung, zum Daten- und Konsumentenschutz. Schliesslich wird der Energieverbrauch als mögliche Gefahr bei gewissen Formen von Tokengeld angeführt.

Die Wirksamkeit der Geldpolitik könnte potenziell eingeschränkt werden, falls sich digitale Währungen in eigenen Recheneinheiten (Bitcoin) oder offiziellen Fremdwährungen (Stablecoins angebunden an eine Fremdwährung) lokal durchsetzen und zur Festsetzung von Preisen, Löhnen und Krediten verwendet würden.

Eine retail CBDC könnte unerwünschte Nebenwirkungen auf die Finanzstabilität und die Wirksamkeit der Geldpolitik haben. Überdies würde die Ausgabe einer retail CBDC komplexe technologische Fragen aufwerfen. Eine Umsetzung hätte weitreichende Folgen nicht nur für die Banken, sondern für das gesamte Finanzsystem.

---

## Förderung

Die Schweiz zählt mitunter zu den führenden Finanz- und Technologiezentren, die im Bereich von digitalen Währungen und DLT aktiv sind. Als Beispiel kann hier das sogenannten «Crypto Valley» im Raum Zug genannt werden, das eine Vielzahl von Firmen beheimatet, die in der Anwendung von digitalen Währungen und der Weiterentwicklung der zugrundeliegenden DLT arbeiten. Weiter sind Schweizer Hochschulen und Universitäten führend im Bereich der Forschung zu digitalen Währungen und DLT. Schliesslich wird im Schweizer Zentrum des BIZ Innovation Hub mit CBDC experimentiert und die SNB beteiligt sich aktiv an der Forschung zu CBDC beispielsweise in Arbeitsgruppen bei der BIZ.

Das Center for Innovative Finance, das durch die Credit Suisse gesponsert wird, ist eine der grossen privaten Förderinitiativen, ebenso der Hub Trust Square in Zürich. Von staatlicher Seite können Unternehmen im Bereich der alternativen Währungen v. a. über passende Rahmenbedingungen gefördert werden. Dabei ist besonders an einen passenden regulatorischen Rahmen zu denken, der sich aktuell als sehr attraktiv erweist (z. B. DLT-Gesetzgebung). Über den universitären Kanal können Jungunternehmen unterstützt werden, die zukunftssträchtige Arbeitsplätze schaffen.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universitäten Basel und Zürich, BIS Innovation Hub (Swiss Centre), Swiss Finance Institute,

*Firmen:* Ethereum Foundation, IBM Research Zurich

*Vernetzung:* ausreichend

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Deutschland (Frankfurt), England (London), Frankreich (Paris), «Nordics» (Dänemark, Island, Norwegen und Schweden), Schweiz (Basel und Zürich)

Weltweit: China (Hongkong), Singapur, USA (New York)



## Hochschullehre («Reinventing Education»)

Gerd Folkers (ETH Zürich)

**Die Hochschullehre unterliegt aktuell der fortschreitenden Digitalisierung. Zugleich verstärkt sich das Bedürfnis nach kleinen Unterrichtsgruppen, in denen der persönliche Austausch gepflegt werden kann – hierbei sind jedoch Universitäten mit zahlreich immatrikulierten Studierenden ein limitierender Faktor.**

### Definition

Die Hochschullehre vermittelt den Lernenden Wissen, Kompetenzen, Werte und – im Idealfall – auch die Fähigkeit zur kritischen Distanzierung. Damit das Bildungswesen in der Lage ist, dies zu tun, bedarf es eines steten Abgleichs mit aktuellen wissenschaftlichen, gesellschaftlichen, technologischen und wirtschaftlichen Entwicklungen. Entsprechend soll sich die Lehre sowohl an den neusten Forschungsergebnissen der einzelnen Disziplinen wie auch den Erkenntnissen auf dem Gebiet der Hochschuldidaktik orientieren. Nicht erst seit der COVID-Pandemie wird diese von der Digitalisierung eingeholt. Zugleich prägen zwei gegenläufige Phänomene die Hochschuldidaktik: Universitäten mit einer hohen Anzahl Studierender und das Verlangen nach Kleingruppen respektive einem persönlichen Austausch.

### Chancen

Vorteile der digitalen Lehre ergeben sich u. a. durch die Möglichkeit der Asynchronität von Produktion und Konsum von Lehr- und Lerninhalten. Online-Unterricht in Kombination mit Präsenzlernen – auch als Blended Learning bezeichnet – wird zwar häufig, aber noch wenig ausgereift praktiziert. Zudem ermöglichen Technologien wie MIXED REALITY (→ S. 102) neue Lernumgebungen, etwa eine digitale Simulation eines biologischen Labors, wo Student:innen üben können, Geräte zu bedienen oder über Gefahren unterrichtet werden. Ein Beispiel für eine neuere Entwicklung in der Lehre, die digital unterstützt sein kann, aber nicht muss, ist etwa die Selbstorganisation von Studierenden. In solchen Ansätzen kommen die Student:innen erst nach dem Eigenstudium zu einer Fragerunde zwecks Anwendung des erlernten Stoffes zusammen (sog. Flipped/Inverted Classroom, d. h. umgedrehter Unterricht). Diese Unterrichtsmethode – wenn auch nur eine unter vielen – ist grundsätzlich wirkungsvoll, ihr Erfolg hängt aber mithin von der jeweiligen Disziplin ab. Als wertvoll könnten sich Hochschulräume erweisen, deren Nutzungszweck offen bleibt, die aber mit einer guten Infrastruktur ausgestattet sind. Erwiesenermassen regen solche Umgebungen das kreativ-konstruktivistische Lernen an.

Mit Blick auf die Akteure kann eine intensivere Zusammenarbeit des öffentlichen und privaten

Sektors (sog. Private-Public-Partnerships) als Opportunität gewertet werden, sofern das gemeinsame Wirken konstruktiv gestaltet wird. Dabei sind auch internationale, in der Schweiz ansässige Konzerne einzubeziehen, die eine starke interne Aus- und Weiterbildung betreiben, was für junge Hochschulabsolventen sehr attraktiv ist. So kann sich die von privaten Akteuren organisierte Lehre schneller an gesellschaftliche Veränderungen anpassen, weil sich Firmen nicht im gleichen Masse äusseren Einflüssen fügen müssen, wie es öffentliche Bildungsstätten tun. Dies mag bessere und effizientere Lerninhalte hervorbringen, wobei aber auch zu bedenken ist, dass die Gefahr einer einseitigen Ausbildung besteht.

### Risiken

Die Schweiz ist eine kleine, rohstoffarme Volkswirtschaft. Umso wichtiger ist der Produktionsfaktor Bildung. Dieser trägt essenziell zur Innovationskraft, zur Lebensqualität und zum Wohlstand bei. Entsprechend benötigen die Schweizer Wirtschaft und Gesellschaft Bildungsplätze, die nicht nur Fachkräfte ausbilden, sondern diese auch bilden. Bildung – im Unterschied zur Ausbildung – soll Menschen, insbesondere junge, zur Selbständigkeit befähigen und persönlichkeitsbildend wirken. Falls dies nicht oder nicht mehr gelingt, besteht die Gefahr, dass die Schweiz an Innovationskraft einbüsst und/oder Menschen

aufgrund einer zu starken Spezialisierung in ihrer Ausbildung eine Verengung des Horizonts erfahren.

Auch laufen Hochschulen Gefahr, dass ihnen der Nachwuchs abhandenkommt, weil junge Forschende bei privaten Unternehmen attraktivere Konditionen vorfinden. Dabei besteht zugleich das gesellschaftliche Risiko, dass durch ein verstärktes Bildungsengagement von Unternehmen und privaten Organisationen die Bildungsinhalte keiner demokratischen Kontrolle unterliegen. Zugleich kann eine firmenspezifische Aus- und Weiterbildung die Mobilität auf dem Arbeitsmarkt hemmen. Wird seitens eines Hochschulabsolventen dennoch eine akademische Laufbahn eingeschlagen, so mindern zeitlich knapp befristete Anstellungen für Postdoktorand:innen deren Einsatz für die Lehre. Auch können sich etablierte Forscher:innen durch das Einholen von Drittmitteln von Lehraufgaben befreien. Konkurrenzdruck und hohe Arbeitsbelastung von Forschenden machen es schwierig, dass sich die Hochschullehre fortentwickelt und das nötige Ansehen erhält, das sie gesellschaftlich verdient hätte.

---

### Förderung

Finanzielle Mittel sind vorhanden, aber es mangelt an einer zielführenden Umsetzung von Ideen und Projekten. Solange die Lehre in ihrem Wert der Forschung nachgelagert ist, spielen solche Versäumnisse nur eine Nebenrolle. Zwischen Industrie und Hochschule empfehlen sich Plattformen für den Erfahrungsaustausch. Auch hochschulübergreifende Formate sind denkbar, sei es in der Lehre oder in der Forschung.

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universität Zürich (Digital Societies)

*Firmen:* na

*Vernetzung:* Die Schweiz ist sehr gut in internationale Netzwerke eingebunden, erfolgreiche Modelle im Ausland können aber nicht unreflektiert und in ihrer Gesamtheit auf die Schweiz übertragen werden. Der Wegfall von Erasmus wiegt auf jeden Fall schwer. So haben fast alle Hochschulen ihre Gastprofessuren für Schweizer Staatsangehörige gestrichen, damit fällt auch der wichtige internationale Austausch weg.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* USA (Harvard)



## Lokale Lebensmittelkreise («Local Food Systems»)

Tamara Brunner (GRUNDSTOCK)

**Lokale Lebensmittelkreise ermöglichen einen nachhaltigeren Lebensmittelkonsum. Die bestehenden Lösungen bieten aber für die Kunden in der Regel kein Angebot, das mit den Preisen und mit der Bequemlichkeit der Grossverteiler konkurrenzieren kann. Damit sich lokale Lebensmittelkreise durchsetzen können, müssen sich sowohl gesellschaftliche Einstellungen zum Konsum als auch politische Rahmenbedingungen verändern.**

### Definition

Lokale Lebensmittelkreise sind ein neuer Ansatz, um Agrar- und Lebensmittelsysteme zu konzipieren und zu organisieren. In der Lebensmittelversorgung dominiert heute eine Strategie der Zentralisierung und Skalierung, geprägt durch wenige Grossverteiler. Mit lokalen Lebensmittelkreisen wird dagegen die Vision verfolgt, lokale Ketten der Lebensmittelproduktion, des -handels und des -konsums zu schaffen, um den Kontakt und Austausch zwischen den vielen daran beteiligten Menschen zu fördern. Damit soll die Transparenz bezüglich Herkunft der Produkte erhöht, der Konsum von sicheren, regional angebauten Lebensmitteln und eine nachhaltige Landwirtschaft im

Allgemeinen gefördert sowie lokale Landwirtschaftsbetriebe und ländliche Gebiete erhalten werden. Gewisse Initiativen haben auch einen Fokus auf der Erprobung alternativer Wirtschaftsmodelle oder der Entwicklung neuer Versorgungsprozesse und IT-Plattformen für den lokalen Handel. Die Vielfalt der Angebote im Bereich lokale Lebensmittelkreise umfasst u.a. Selbstversorgung in Betrieben der solidarischen Landwirtschaft, regionale Vertragslandwirtschaft (z.B. Abos für Gemüsekörbe), Direktverkauf in Hofläden oder auf anderen Plattformen, Mitglieder- oder Unverpackt-Läden, Webshops mit Lieferservices bis zu Angeboten von regionalen Produkten bei Grossverteilern.

### Chancen

Lokale Lebensmittelkreise tragen zum nachhaltigen Konsum bei und können den fairen Handel fördern. Die Kunden können die Herkunft und Produktionsbedingungen der Lebensmittel besser nachvollziehen. Die kurzen Versorgungsketten können auch helfen, Food-Waste zu vermeiden, und erfordern weniger aufwändige Verpackungen.

Lokale Plattformen und Lieferservices können Kunden ein attraktives Angebot bieten, indem sie Produkte verschiedener lokaler Produzenten bündeln. Dies bietet auch für die Anbieter Vorteile, weil durch das Zusammenfassen einer

grösseren Kundengruppe die Nachfrage geglättet und besser prognostizierbar wird. Dazu werden innovative IT-Plattformen entwickelt, die solche Angebote erst möglich machen.

Lokale Lebensmittelkreise bieten Chancen für Mehrwegverpackungen, die bei den Grossverteilern immer mehr aus dem Sortiment verschwinden. Dies bedingt aber eine Koordination der verschiedenen lokalen Anbieter und ggf. den Aufbau einer gemeinsamen Rücknahme- und Reinigungsinfrastruktur.

Der Bau von vielen grösseren genossenschaftlichen Wohnsiedlungen, die aktuell in vielen Schweizer Städten stattfindet, lässt sich mit lokaler Lebensmittelversorgung verbinden, beispielsweise in Form von Abholstellen für Direktvermarktung von Landwirtschaftsbetrieben oder durch von Genossenschaften betriebenen Verkaufsstellen.

### Risiken

Lokale Lebensmittelkreise bieten in der Regel ein eingeschränkteres und stärker wechselndes Sortiment als Grossverteiler. Die Produkte sind auch oft weniger stark verarbeitet und weichen teilweise vom gewohnten Geschmackserlebnis ab. Das heisst, die von den stark verarbeiteten Produkten der Lebensmittelindustrie gewohnten Standards bezüglich Qualität und Bequemlichkeit

lassen sich nicht direkt auf die Produkte der lokalen Lebensmittelkreise übertragen. Dies bedeutet weniger Komfort für die Kunden und fordert eine andere Einstellung bzw. ein Umdenken der Konsumenten.

Die Produkte in lokalen Lebensmittelkreisen sind aufgrund der höheren Kosten der regionalen und ökologischen Produktion und kleinskaligen Vertriebslogistik tendenziell teurer. Allerdings sind die Produzent:innen stärker am Verkaufserlös beteiligt, als wenn sie die Grossverteiler beliefern.

---

### Förderung

Bei den lokalen Lebensmittelkreisen steht die Entwicklung und Umsetzung von Prozessen und Geschäftsmodellen in Gesellschaft und Wirtschaft im Vordergrund. Die Entwicklung von Technologien und entsprechenden Anwendungen können solche Entwicklungen in Teilen unterstützen. Entsprechend ist auch der Bezug zur Förderung von Technologieforschung bedingt gegeben.

Die Wissenschaft könnte zu einer besseren Übersicht und einer Vernetzung zwischen den vielen Unternehmen und Akteuren beitragen. Und so dabei helfen, den Wissenstransfer zwischen verschiedenen Initiativen sicherzustellen. Zudem könnte sie auch die Wirkung von Massnahmen wie etwa der Berner Bio-Offensive beurteilen oder sie mit anderen Initiativen vergleichen.

Um lokale Lebensmittelkreise grundsätzlich voranzubringen, wären Anpassungen der Rahmenbedingungen in der Agrar- und Umweltpolitik, wie beispielsweise eine CO<sub>2</sub>-Abgabe, wichtig. Auch Vorgaben, dass öffentliche Einrichtungen wie Spitäler und Schulen beim Einkauf, wenn möglich, regionale und biologische Produkte bevorzugen sollen würden die Bedingungen für die lokale Lebensversorgung stark verbessern.

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* BFH (HAFL), FIBL, ZHAW

*Firmen:* Buur on Tour, Crowd-Container, Die Frischlinge, Farmy, Gebana, GRUNDSTOCK, Gueter.be, Lokal Feldberg, Marktschwärmerei, Mein Bauernhof, POT, Rüedu

*Vernetzung:* Ernährungsforum Basel, Ernährungsforum Bern, Ernährungsforum Zürich, Ernährungsrat Luzern DACH-Übergreifend: Netzwerk der Ernährungsräte

*Internationale Forschungs-Hotspots:*

Europa: Belgien (Leuven Food Hub), Grossbritannien (From Field to Fork “The value of Englands local food”)



---

## Mobilitätskonzepte

Francesco Corman (ETH Zürich),  
Thomas Küchler (Schweizerische Südostbahn  
SOB)

**Mobilitätskonzepte bieten durch Vernetzung verschiedener Verkehrsmittel für die Kunden bessere und nachhaltigere Angebote. Ausgehend vom gut ausgebauten öffentlichen Verkehr und der hochstehenden Infrastruktur der Schweiz könnten beispielhafte Umsetzungsprojekte das Thema voranbringen und international ausstrahlen.**

---

### Definition

Mit Mobilitätskonzepten sollen unterschiedliche Mobilitätsformen und Verkehrsmittel vernetzt werden, um den Nutzerinnen und Nutzern eine einfache und komplette Dienstleistung zu bieten («Mobility-as-a-Service») sowie die Nachhaltigkeit in der Mobilität zu verbessern. Dem Einsatz von automatisierten und gemeinsam genutzten Fahrzeugen («Carsharing») kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Die Vernetzung der Mobilität muss in verschiedenen Dimensionen erfolgen: sowohl organisatorisch mit umfassenden Angeboten und Kundeninformationen, abgestimmten Fahrplänen, On-Demand-Services und Verfügbarkeiten, als auch mit angepassten Verkehrsinfrastrukturen und breiter geografischer Abdec-

kung. Weitere wichtige Aspekte sind eine umfassende Digitalisierung mit einem offenen Datenaustausch, geeigneten digitalen Plattformen und fortschrittlicher Datenverarbeitung (allenfalls mit künstlicher Intelligenz) sowie die Entwicklung tragfähiger, auf die regionalen Bedürfnisse abgestimmter Geschäftsmodelle. Mobilitätskonzepte erfordern somit das Zusammenspiel von technologischen Innovationen, wirtschaftlichen Lösungen sowie – und insbesondere – der Akzeptanz durch die Gesellschaft.

---

### Chancen

Mobilitätskonzepte zielen auf eine effizientere Nutzung von Verkehrsinfrastrukturen und sollen Reduktionen beim Energie- und Ressourcenverbrauch wie auch bei den verkehrsbedingten Emissionen ermöglichen. Sie sind auch bedeutend, weil das prognostizierte Bevölkerungswachstum und der damit einhergehende Anstieg in der Mobilitätsnachfrage mit den bestehenden Angeboten nicht effizient gedeckt werden können und neue Lösungen erforderlich machen. Im Vergleich zur reinen Elektrifizierung des Verkehrs ermöglichen Kollektivverkehrslösungen die bessere Auslastung der Fahrzeuge sowie der Infrastrukturen. Daraus resultiert eine zusätzliche Verminderung der negativen Umweltauswirkungen. Es wird aber flankierende Massnahmen zur Einschränkung des motorisierten Individualverkehrs

(MIV) brauchen, damit vernetzte Mobilität ihr Potenzial zur Verkehrsverlagerung ausspielen kann. Weiter muss verhindert werden, dass neue Mobilitätskonzepte durch den Komfortgewinn zusätzlichen Verkehr induzieren.

Digitalisierungsprojekte wie die vom Bund vorgeschlagene Nationale Datenvernetzungsinfrastruktur Mobilität (NADIM) können eine wichtige Grundlage für vernetzte Mobilität sein. Sie stellen den reibungslosen Informationsaustausch und die Koordination zwischen den involvierten Akteuren sicher und ermöglichen integrierte Dienstleistungen in der Mobilität, allenfalls zusammen mit weiteren touristischen Angeboten.

Durch eine Vernetzung des bereits sehr guten öffentlichen Verkehrs (öV) mit weiteren Mobilitätsangeboten könnte die Schweiz international beispielhaft werden in Bezug auf nachhaltige Mobilität. Vernetzte Mobilität hat Potenzial als Ergänzung zum öV für die «letzte Meile» in schlecht erschlossenen ländlichen Gebieten und zu Randzeiten. Im Ausland wird eher ein Verbund von MIV mit anderen Mobilitätsformen vorangetrieben.

---

### Risiken

Der gut ausgebaute Schweizer öV und die Verkehrsinfrastruktur sind aber auch ein Hindernis für neue Mobilitätskonzepte, weil die Sensibilisierung und Zahlungsbereitschaft für verbesserte

Lösungen fehlen. Die bestehenden regulatorischen und marktspezifischen Eintrittshürden erschweren oder verhindern eine diskriminierungsfreie Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Leistungsanbietern. Dadurch besteht die Gefahr, dass zu spät auf neue Entwicklungen reagiert wird und die Abhängigkeit von bestehenden Lösungen erhalten bleibt. Auch hat das Auto weiterhin Bedeutung als persönliches Statussymbol und für Massnahmen zu mehr Nachhaltigkeit im motorisierten Individualverkehr fehlt oft die öffentliche Akzeptanz, was Sharing und vernetzte Mobilität erschwert.

Ein zu eng gefasster Datenschutz würde vernetzte Mobilität verunmöglichen; es braucht eine geeignete Balance zwischen notwendigem Datenaustausch und Datensouveränität der Kunden, sowie einen guten Schutz vor Cyberrisiken.

---

## Förderung

Innosuisse ist eine Möglichkeit, um Mobilitätsprojekte zu fördern, ausserdem haben verschiedene Bundesämter Forschungsprogramme, die aber thematisch fokussiert sind (z.B. Bahn, Strasse, Energie) und hohe administrative Hürden aufweisen. Das Bundesamt für Energie unterstützt gewisse Forschungsvorhaben zur vernetzten Mobilität. Forschung zu Mobilitätskonzepten wird im Rahmen der Mobilitätsinitiative der ETH Zürich und dem SSB Forschungsfonds

unterstützt. Die Kantone sind ein wesentlicher Treiber, ihre Förderung ist allerdings primär auf den klassischen öV ausgerichtet. Die Neue Regionalpolitik (NRP) wäre weiter eine gute Möglichkeit, um Mobilitätsprojekte zu unterstützen. Weil die vernetzte Mobilität in ländlichen Regionen kaum gewinnbringend erbracht werden kann, braucht es zusätzliche Förderung durch Gemeinden oder Städte im Sinne des Service Public. Teilweise fördern auch lokale Tourismusunternehmen (z.B. Andermatt Swiss Alps) oder private Innovationsinitiativen (z.B. Migros-Pionierfonds/mybuxi) vernetzte, nachhaltige Mobilitätslösungen.

Es sind grundsätzlich ausreichende Fördermöglichkeiten vorhanden, diese sollten aber für themenübergreifende und anwendungsorientierte Innovationsprojekte einfach zugänglich sein. Eine gemeinsame Agenda oder Strategie zur vernetzen Mobilität auf Stufe Bund wäre wünschenswert, um die Förderung zu koordinieren, den Wissens- und Erfahrungsaustausch sicherzustellen, Lücken aufzuzeigen, gezielt Projekte anzustossen, um schliesslich für die Reisenden schweizweit vergleichbare und durchgängige Verkehrsangebote zu ermöglichen.

---

## Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* EPFL, ETH Zürich, Universität St. Gallen, FH Graubünden, FHNW, OST, ZHAW

*Firmen:* Mobility, mybuxi, PostAuto, Publibike, SBB (Green Class), SOB, Whim, versch. Anbieter von E-Scooter-Sharing

*Weitere wichtige Akteure:* Verbände und Genossenschaften (asut, ITS-CH, LITRA, TCS openmobility.ch, VCS, VöV,), regionale Initiativen (Energietal Toggenburg, Smart Höfe), Städte und Gemeinden (z.B. Genf, Lausanne, Nesslau, Schaffhausen, Sion, Zug)

*Vernetzung:* Auf nationaler Ebene ist abgesehen von wiederkehrenden Anlässen (Asut, UVEK, Swiss Transport Research Conference STRC) keine themenspezifische, systematische Vernetzung erkennbar. Die Firmen sind über die Fachverbände und diese untereinander gut vernetzt. Hochschulen und Wirtschaft sind auf der Basis von Projekten und Forschungsarbeiten in Kontakt. International besteht themenspezifische Vernetzung über gewisse Verbände und Organisationen sowie über international tätige Firmen.

*Internationale Forschungs-Hotspots:* Europa: Niederlande (Amsterdam), nordische Länder (Helsinki), Österreich. Weltweit: Singapur führend, gewisse Aktivitäten an der US-Westküste



## Owning and Sharing Data: Gesellschaftliche Aspekte

Sebastian Höhn (BFH),

Christian Laux (Laux Lawyers AG, Swiss Data Alliance)

**Die Digitalisierung macht es notwendig, dass Daten einfach und sicher geteilt werden können. Zugleich werden die Themenkomplexe Datenschutz und Kontrolle über Daten virulent. Die erfolgreiche Bearbeitung dieser beiden Felder braucht nicht nur technische und infrastrukturelle Massnahmen, sondern auch juristische Grundlagen.**

### Definition

Die zunehmende Digitalisierung aller Lebensbereiche wirft nicht nur Fragen nach der Kontrolle über Daten auf, sondern auch, welche Daten mit wem geteilt werden sollen und wie das sicher geschehen kann. Da immer mehr Maschinen und Geräte datenverarbeitend sind (➔ INTERNET OF THINGS, S. 128), entscheiden sich an der Frage zur rechtlichen Ausgestaltung der Datenkontrolle und der Möglichkeit ihrer Teilung auch grundlegende ökonomische Zusammenhänge. Die beiden Aspekte «Owning» und «Sharing» gehören zwar zusammen, müssen aber analytisch unterschieden werden. Deshalb werden die beiden Aspekte zunächst getrennt behandelt.

### Zum Aspekt «Owning»

Die Digitalisierung wirft grundrechtliche Fragen auf, die das Recht auf Selbstbestimmung/Freiheit tangieren. Bei Sachgütern werden diese Fragen meist mit dem Konzept Eigentum reguliert. Da es sich bei Daten aber nicht um Sachgüter im strikten Sinne des Wortes handelt, greift die Kategorie Eigentum nicht, um die grundrechtlichen Fragen im Zusammenhang mit Daten zu lösen. Vier Gesichtspunkte schaffen Eigentumsähnlichkeit. Kontrolle des Zugangs (wer darf wann, was einsehen?), Kontrolle über Verwertung (wer darf was, wie und wann mit den Informationen machen?), Kontrolle der Fixierung und Integrität (wer darf wann und unter welchen Umständen einen Löschanpruch geltend machen? Bzw. wer muss diesem unter welchen Umständen nachkommen?) sowie Fragen nach der Compliance mit Rechtsnormen, die befolgt werden müssen. Mit Beantwortung dieser Fragen kann die Datenkontrolle so reguliert werden, dass Daten physischen Gütern ähnlich werden. Wo über die genannten vier Kontrollaspekte Eigentumsähnlichkeit hergestellt wurde, kann man von MyData sprechen.

### Zum Aspekt «Sharing»

Werden Informationen geteilt, haben sie mehr Wert. Deshalb ist es wichtig, nicht nur die Kontrolle über Daten zu regulieren, sondern auch Bedingungen und Möglichkeiten zu schaffen, die es erlauben und ermöglichen, dass Daten einfach und sicher geteilt werden können. Zusätzlich

müssen Datenräume geschaffen werden (wie sie von der Swiss Data Alliance gefordert werden) mit dem Ziel, das einfache, sicherere und effektive Teilen sowie das Verknüpfen von Informationen zu ermöglichen. Um das sichere Teilen von Informationen und Daten zu fördern, müssen Open Data, Open Content und Open Source gefördert werden. Damit das Teilen von Daten in koordinierter und kontrollierter Weise erfolgen kann, kommen dieselben rechtlichen Konzepte zum Tragen, wie sie bereits vorn zum «Owning» diskutiert wurden (Zugang/Zugriff, Verwertung, Fixierung, Integrität und Compliance).

### Chancen

Da geteilte Daten vielerorts zu Effizienzsteigerungen führen können, ist es wünschenswert, dass Daten geteilt werden. Fragestellungen rund um «Owning & Sharing Data» sind grundlegend für eine fortschrittliche Digitalpolitik und für e-Government von zentraler Bedeutung. Welche Daten derart reguliert werden sollen, unterliegt einem gesellschaftlichen und politischen Aushandlungsprozess. Insbesondere bedarf es einer Klärung, welche Daten als besonders schützenswerte gelten und welche Daten wie aggregiert werden dürfen. Weiter braucht es Infrastrukturen und Rahmenbedingungen, wie z.B. Data-Governance-Konzepte, um einen regelkonform-

en und verantwortungsbewussten Umgang mit Daten erzwingen zu können.

Das Immaterialgüterrecht dient dem Schutz geistiger Arbeit. Der soziotechnische Wandel stellt dessen Tauglichkeit allerdings infrage, weswegen eine konsequente Digitalpolitik auch die Möglichkeit bietet, grundsätzlich und ausgehend von der digitalen Welt über Fragen nach geistigem Eigentum nachzudenken.

Damit Daten sicher sind, bedarf es auch technologischer Grundlagen. Entsprechende Technologien bieten Möglichkeiten für Forschung und Wirtschaft. Dazu zählen zunächst Entwicklungen im Bereich Cybersecurity, aber auch noch weniger entwickelte Ansätze wie etwa die **QUANTEN- UND POSTQUANTENKRYPTOGRAPHIE** (→ S. 52).

Auch für entferntere Problemfelder, etwa zum Erreichen der Sustainable Development Goals, ist es wichtig, dass Daten geteilt werden. So müssen gerade Daten aus dem Umweltbereich besser zugänglich gemacht werden, damit die komplexen Zusammenhänge und Effekte nachgezeichnet werden können.

---

### Risiken

Die zunehmende Verfügbarkeit von Daten führt nicht nur zu mehr Wissen, sondern auch zu mehr Misstrauen. Diesem Misstrauen halten Unternehmen, zivilgesellschaftliche Organisationen

und politische Parteien mit Markenbildung entgegen. Ihre Produkte und Dienstleistungen werden immer stärker auf ihre Zielgruppen ausgerichtet, sodass ein gemeinsam geteilter Wissenshorizont zunehmend ins Wanken gerät. Deshalb birgt die Datenfrage mithin demokratiepolitisches Sprengpotenzial.

Die stark zunehmende Digitalisierung führt zu immer höheren Risiken durch Cyber-Attacken, die nur mit grossem Aufwand zu mitigieren sind.

---

### Förderung

Das Thema könnte gezielter auf die Agenda gesetzt werden, indem Projekte wie der Swiss Data Space oder branchenspezifische Datenräume aktiv vorangetrieben werden. Ebenso benötigt eine konsequente Digitalpolitik die Umsetzung eines Once-Only-Prinzips. Das heisst, dass staatliche Akteure Daten von Personen nur einmal erfassen und zentral speichern. Andere staatliche Akteure, die diese Daten ebenfalls benötigen, greifen dann auf die zentral gespeicherten Daten zu, statt sie selbst zu erheben.

Das Once-Only-Prinzip ebenso wie Datenräume profitieren von Standardisierungen auf der Code-Ebene (Schnittstellen, Datenformate etc.), die ähnlich wie der Immaterialgüterrechtsschutz über DRM-Systeme (DRM = Digital Rights Management) verbessert wurde. Umgekehrt haben

DRM-Systeme das Problem, dass sie zu Ungunsten der Konsumenten funktionieren, indem sie den Gebrauch der Inhalte stark reglementieren.

Digitalisierung verlangt, rechtliche Konzepte stets im benötigten technischen Kontext zu würdigen, da andernfalls Chancen verpasst werden. Standardisierungen auf der Code-Ebene sind somit ein wichtiges Aktionsfeld von Forschung und Politik. Die Forderung, den technischen Kontext zu berücksichtigen, widerspricht auf den ersten Blick dem Postulat, dass neue Regulierungen grundsätzlich technologieneutral zu gestalten sind. Technologieneutrale Regeln sind nachhaltiger, benötigen aber mehr Zeit, bis sie erlassen werden – bei rasch voranschreitender Digitalisierung droht man mit solchen Ansätzen den Anschluss zu verpassen.

---

### Akteure in F&E

*Hochschulen und Institutionen:* ETH Zürich (Institut für Informationssicherheit), BFH (Digitale Nachhaltigkeit)

*Firmen:* na

*Weitere Akteure:* MIData.coop, Swiss Data Space Alliance, Verein Opendata.ch

*Vernetzung:* na

*Internationale Forschungs-Hotspots:* na

---

## Allgemeine Begriffserklärungen

---

### Additive Fertigung oder 3D-Druck

Additive Fertigung (Additive Manufacturing), auch 3D-Druck genannt, ist ein Sammelbegriff für eine Gruppe von Technologien, bei denen Werkstücke in einzelnen Elementen oder Schichten aufgebaut werden. Objekte und Geometrien werden also nicht durch Drehen, Giessen oder Schleifen geformt, sondern durch einen Druckprozess, bei dem Material gezielt an bestimmten Orten abgelagert wird.

Der schichtweise Aufbau erfolgt computergesteuert aus einem oder mehreren flüssigen oder festen Werkstoffen nach vorgegebenen Formen. Beim Aufbau finden physikalische oder chemische Härtungs- oder Schmelzprozesse statt. Typische Werkstoffe für das 3D-Drucken sind Kunststoffe, Kunstharze, Keramiken und speziell aufbereitete Metalle. Inzwischen wurden auch Carbon- und Graphitmaterialien für den 3D-Druck entwickelt. Obwohl es sich oft um formende Verfahren handelt, sind für ein konkretes Erzeugnis keine Gussformen notwendig.

Dank additiver Fertigung lassen sich neue Ideen und Design einfacher als mit klassischen Methoden umsetzen und komplexe geometrische

Strukturen können gefertigt werden. Dies erlaubt die Herstellung von individualisierten und funktionsoptimierten Produkten, was beispielsweise für die Anfertigung von medizinischen Implantaten von Interesse ist. Der differenzierte Materialeinsatz führt zu Einsparungen oder Substitution von knappen Ressourcen wie etwa seltenen Erden führen. Damit können Produkte effizienter oder auch nachhaltiger hergestellt werden. Additive Fertigung führt zu einer Verkürzung der Lieferkette, da dezentrale Produktion möglich ist.

Additive Fertigung macht nicht in jedem Fall Sinn, sondern vor allem dort, wo geometrisch komplexe Bauteile in kleinen Stückzahlen zu realisieren sind.

---

### Internet of Things

Das Internet der Dinge (engl. Internet of Things) steht für die Vision, dass potenziell jeder physische Gegenstand mit dem Internet verbunden ist und mit einem Netzwerk aus Computern, Fahrzeugen, Gebäuden, Geräten, und anderen Gegenständen Daten austauscht. So besehen fokussiert das Internet der Dinge nicht auf eine spezifische Technologie, sondern steht für die allgegenwärtige Vernetzung von physischen Gegenständen. Die Digitalisierung der Landwirtschaft, Medical Wearables, aber auch das Smart Home und das Smart Manufacturing sind Beispiele für IoT-Anwendungsfelder.

---

### Personalisierte Medizin

Die personalisierte Medizin (auch Präzisionsmedizin oder individualisierte Medizin genannt) umfasst diagnostische, präventive und therapeutische Massnahmen, die auf ein Individuum optimal zugeschnitten sind. Dazu werden Informationen (Daten) über die biologische Veranlagung einer Person, insbesondere auch genetische Daten, in den Entscheidungsprozess für Therapie- und Präventionsmassnahmen für diese Person einbezogen. Von solch datenbasierten, massgeschneiderten Behandlungen erhofft man sich wirksamere Therapien und weniger Nebenwirkungen.

---

### mHealth

mHealth beschreibt die technischen Voraussetzungen, gesundheitsrelevante Daten von mobilen medizinischen Geräten und von sogenannten «Wearables» (z.B. Fitnessarmbändern) zu nutzen. mHealth entwickelte sich in den letzten Jahren aus dem Begriff e-Health. Während sich eHealth allgemein auf die Anwendung elektronischer Geräte in der medizinischen Versorgung bezieht, stellt mHealth dabei elektronische Lösungen auf mobilen Geräten in den Vordergrund. Darunter fallen beispielsweise die Ermittlung von Vitalwerten wie Blutzucker oder Körpertemperatur, aber auch Kommunikations- oder Motivationsanwendungen, die an die Einnahme von Medikamenten erinnern sollen. Die Verwendung

von Apps spielt dabei eine große Rolle, denn über die in den Smartphones installierten Sensoren können eine grosse Menge an gesundheitsbezogenen Daten erfasst und verarbeitet werden. mHealth gewinnt durch die steigenden Kosten im Gesundheitswesen mehr an Bedeutung. Eine Verbindung zwischen Patient und Arzt wird ermöglicht, ohne dass sich beide am selben Ort aufhalten müssen.

---

### **Tissue Engineering**

Tissue Engineering oder Gewebezücht ist der Überbegriff für die künstliche Herstellung biologischer Gewebe durch die gerichtete Kultivierung von Zellen, um damit kranke Gewebe bei einem Patienten zu ersetzen oder zu regenerieren. Beim Tissue Engineering werden dem Organismus eines Spenders Zellen entnommen und im Labor *in vitro* vermehrt. Je nach Zellart können diese als Zellrasen zweidimensional oder mittels bestimmter Zellgerüste dreidimensional kultiviert werden. Anschliessend können sie dem Empfänger (re-)transplantiert werden und so eine Gewebefunktion erhalten oder wiederherstellen. Tissue Engineering ist ein Anwendungsbeispiel für die regenerative und personalisierte Medizin

## Schlusswort

Technik bewegt. Sie gestaltet unsere Gesellschaft und leistet einen wichtigen Beitrag an eine dynamische und kräftige Wirtschaft. Umso wichtiger ist es zu wissen, in welche Richtung und wie schnell sich die technische Forschung und ihre Anwendungen entwickeln. Dadurch lassen sich Wege zur zukünftigen DNA der Schweiz finden. Wir bieten der Geschäftsleitung des SBFI eine Karte, um sich in der Techniklandschaft am Standort Schweiz zu orientieren und sich zugleich ein lebendiges Bild der Zukunft zu machen. Dabei haben wir auf einzelne Themenbereiche fokussiert und ihre jeweils wichtigsten Einzeltechnologien genauer beleuchtet: Woran wird geforscht, und welche zukünftigen Chancen und Risiken ergeben sich daraus? Welche nutzbaren Produkte kommen auf den Markt? Und wer spielt mit?

Neue Technologien verdienen einen besonderen Zuspruch, wenn sie eine bessere Alternative zu Bestehendem bieten. So werden auch der Mensch und seine Bedürfnisse in den Mittelpunkt gerückt: mehr Sicherheit, höhere Effizienz, wirksamerer Umweltschutz oder ein zusätzlicher Beitrag an die Gesundheit. Damit zeigt sich ein Muster in den untersuchten Technologien und ihrem Verständnis: Sie setzen ein interdisziplinäres Denken voraus, weil sie in der Regel mehrere Lebensbereiche betreffen, woraus sich ebenfalls die Notwendigkeit der Interdisziplinarität

zwischen und innerhalb von Forschungsorganisationen ableitet. Gleiches gilt für die Bildungsinstitutionen, deren Lehrpläne idealerweise einem «wissenschaftlichen Baukasten» entsprechen, der einen spielerischen Umgang mit unterschiedlichen Disziplinen zulässt.

In der industriellen Anwendung kommt den Schlüssel- respektive Querschnittstechnologien – den Enablern – ein besonderes Augenmerk zu. Sie werden sich über die kommenden Jahre und Jahrzehnte in ihrer Anwendung in zahlreichen industriellen Produkten und Prozessen bemerkbar machen. Diese Verbindung zwischen Forschung und Industrie gelingt besonders dann, wenn der Austausch zwischen dem Denk- und dem Werkplatz Schweiz regelmässig praktiziert wird. Entsprechend haben angewandte Forschungsthemen einen wichtigen Stellenwert für den Erfolg neuer Technologien.

Auch der Staat mit seinen politischen Behörden kann über eine wissenschaftsfreundliche Gesetzeslage Einfluss nehmen auf den Durchbruch neuer Technologien. Er kann unnötige regulatorische Hemmnisse präventiv vermeiden, kurativ senken oder gar abbauen (z. B. administrative Zulassungshürden). Dies ist zumeist zielführender als die zusätzliche Alimentierung der Forschung mit finanziellen Mitteln. Eine weitere Herausforderung liegt in der ausreichenden (internationalen) Vernetzung der Forschenden und Wirtschaftsvertretern, sei es untereinander oder sei

es miteinander. Entwicklungen auf der politischen Ebene können diesbezüglich förderlich, aber auch hemmend wirken.

Grosses Potenzial für den Wirtschaftsstandort Schweiz bieten Hightech- und Nischenanwendungen. Diese können durch etablierte Firmen, aber auch durch Start-ups entwickelt werden, um aufstrebende und technologisch anspruchsvolle Forschungsfelder zu bestellen. Dadurch werden Arbeitsplätze und Wertschöpfung generiert und ein volkswirtschaftlich reichhaltiger Beitrag an die Gesellschaft geleistet.

Technik ist daher weder Perpetuum mobile, noch Selbstzweck. Technik gestaltet die Zukunft. Technik bewegt. Uns alle.

## Impressum

### Projektleitung

Claudia Schärer

### Autor:innen

Christian Holzner, Claudia Schärer, Stefan Scheidegger, Daniel Schmuki

### Expert:innen

Karl Aberer, Thomas Anken, Sarah Barber, Corsin Battaglia, Dominik Bisang, Philippe Block, Ardemis Boghossian, Tamara Brunner, Franceso Corman, Max Erick Busse-Grawitz, Tobi Delbruck, Benjamin Dillenburger, Jürg Eberhard, Gerd Folkers, Christian Franck, Andreas Fuhrer, Ursula Graf-Hausner, Robert Grass, Christian Grasser, Daniel Gygax, Manfred Heuberger, Simon Hoerstrup, Sebastian Höhn, Carolin Holland, Gabriela Hug, Robert Ivanek, Martin Jinek, Robert Katzschmann, Tobias J. Kippenberg, Tom Kober, Dennis Kochmann, Agathe Koller, André Kostro, Jens Krauss, Thomas Küchler, Andreas Kunz, Christian Laux, Christian Leinenbach, Jürg Leuthold, Roger Marti, Benjamin Müller, Martin Neubauer, Greta R. Patzke, Demetri Psaltis, Stanisa Raspopovic, Jörg Roth, Giovanni Salvatore, Benjamin Sawicki, Christian Schönenberger, Bruno Schuler, Simone Schürle-Fink, Kristina Shea, Roland Siegwart, Alexandre de Spindler, Bernhard Tellenbach, Lothar Thiele, Marius Wagner, Tomas de Wouters, Mehmet Fatih Yanik, Manfred Zinn

### Lektorat

Esther Lombardini

### Auftraggeber

Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF, Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation SBFI, Forschung und Innovation

### DOI

10.5281/zenodo.6802257

April 2022



Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften SATW  
St. Annagasse 18 | 8001 Zürich | 044 226 50 11 | [info@satw.ch](mailto:info@satw.ch) | [www.satw.ch](http://www.satw.ch)