

ZUKUNFTSTHEMEN FÜR DIE ANGEWANDTE FORSCHUNG

FORESIGHT FRAUNHOFER

**70 JAHRE
ZUKUNFT**
#WHATSNEXT



Die Fraunhofer-Gesellschaft ist die führende Organisation für angewandte Forschung in Europa. Unter ihrem Dach arbeiten 72 Institute und Forschungseinrichtungen an Standorten in ganz Deutschland. Mehr als 26 600 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter erzielen das jährliche Forschungsvolumen von 2,6 Milliarden Euro. Davon fallen 2,2 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

INHALT

Vorwort	4
1 Executive Summary	6
2 Die Ergebnisse im Überblick	8
3 Ganzheitliche Relevanzbewertung der Spotlights	17
3.1 Relevanz für die angewandte Forschung heute und 2030	19
3.2 Relevanz für Gesellschaft und Umwelt	22
4 Einfluss auf Forschungsbereiche und Wirtschaftssektoren	25
5 Review durch internationale Expertinnen und Experten	30
6 Projekthintergrund und konzeptioneller Ansatz	33
Anhang	36

VORWORT

Sehr geehrte Damen und Herren,

der schwedische Wissenschaftler Hans Rosling hat sich jahrelang intensiv mit Fakten beschäftigt. In seinem im vergangenen Jahr posthum veröffentlichten Buch »Factfulness« beschreibt er eindrücklich, dass die Menschen die Welt weitaus negativer wahrnehmen, als sie tatsächlich ist. Rosling ging es darum, ein realistisches Weltbild zu vermitteln, eines, das sich auf Fakten stützt und den tatsächlich positiven Fortschritt beschreibt, zum Beispiel bei der Bekämpfung von Krankheiten oder der sinkenden Kindersterblichkeit.

In allen Arbeits- und Lebensbereichen – ob Kommunikation, Produktion, Gesundheit oder Mobilität – sind in den vergangenen Jahrzehnten technologische Fortschritte erzielt worden, die den Alltag erleichtern oder verbessern. Der Blick in die Zukunft bietet daher keinen Grund für Schwarzmalerei, viel mehr eine Chance, sich mit gewisser Zuversicht auf die wesentlichen Herausforderungen wie den Klimawandel oder die Ernährungssicherheit zu konzentrieren, um zu einer lebenswerten Zukunft beizutragen.

Ein Beispiel: Wie wird die Energieversorgung der Zukunft aussehen? Fraunhofer forscht in verschiedene Richtungen mit Technologieoffenheit als grundlegenden Faktor, um der Wirtschaft ein starker Partner zu bleiben. Die Bedeutung der frühen strategischen Positionierung unserer Vorlaufforschung bei aufkommenden Trends wird am breiten Kompetenzportfolio der Energieforschung deutlich: Energie- und Speichertechnologien, Materialforschung, Stromnetze, Elektromobilität und Informations- und Kommunikationstechnologien sind bei Fraunhofer eng verzahnt mit Systemanalysen und Innovationsforschung, sodass wir die Energiewende in Systemzusammenhängen begreifen und in konkrete Roadmaps oder Szenarien übersetzen können.

Wir erfinden Zukunft! Diese Devise der Fraunhofer-Gesellschaft gilt nach 70 Jahren mehr denn je. Für das 70-jährige Jubiläum haben wir ein Foresight Projekt angestoßen, das auf die Kompetenzen der Fraunhofer-Zukunftsforscherinnen und -forscher ebenso zugreift wie auf die breitgefächerte fachliche Expertise unserer Institute. Zukunftsforschung wird mitunter kontrovers diskutiert; gerade wenn es um das Einschätzen von Trends in einem komplexen, dynamischen System geht, sind Selektions- und Interpretationsleistungen zu erbringen. Die Rolle der Wissen-



schaft ist ambivalent: Von ihr gehen entscheidende Impulse aus, sie wird wiederum mit ihrer Expertise beteiligt, um Einschätzungen abzugeben, gleichzeitig kann auch die Wissenschaft durch Fehleinschätzungen zu Fehlentwicklungen beitragen.

Die Ergebnisse des Fraunhofer-Foresight-Prozesses sind daher zunächst valide Rohergebnisse und bieten eine erstaunliche Breite von Zukunftsthemen. Sie zeigen uns auch, dass Fraunhofer strukturell wie thematisch gut aufgestellt ist. Die im Foresight-Prozess erkannte inhaltliche Verschmelzung der Themen verlangt zunehmende Interdisziplinarität und synergistisches Zusammenwirken in der Organisation sowie in der Forschungs- und Innovationslandschaft. Die Agenda Fraunhofer 2022 zielt darauf ab, Kooperation und kollaboratives Arbeiten auf ein neues Niveau der Qualität und Agilität zu heben. Schlüsseltechnologien mit Relevanz für alle Wirtschaftssektoren wie die Mikro- und Nanoelektronik oder die Künstliche Intelligenz (KI) müssen wir ebenso kompetent vorantreiben wie wir neue Forschungsfelder aus der Quantentechnologie bereits jetzt aufgreifen, auch wenn sie vom Markt noch wenig nachgefragt werden. Die Informations- und Kommunikationstechnik (IuK) und Technologien der Lebenswissenschaften verlangen nach einer umfassenden Begleitung der staatlichen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Akteure im Rahmen von Governance-Prozessen, um rechtliche oder ethische Fragestellungen nicht zum Innovationshemmnis werden zu lassen. Die Fraunhofer-Gesellschaft ist in all diesen Feldern nicht nur wissenschaftlich aktiv, sondern auch strukturell gestaltend – als Initiator oder Treiber und verlässlicher Kooperationspartner.

Der Fraunhofer-Foresight-Prozess zeigt Zukunftsthemen, die eine entscheidend positive Auswirkungen auf wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklungen haben könnten. Daraus möchten wir im Dialog mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft Visionen einer lebenswerten, guten Zukunft entwickeln und – ganz im Sinne der nunmehr 70-jährigen Fraunhofer-Diktion – zu der Verwirklichung dieser Visionen durch exzellente ergebnisorientierte Forschung und Entwicklung beitragen.

Ihr

Reimund Neugebauer
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft

1 EXECUTIVE SUMMARY

Die Anforderungen an das strategische Management von Organisationen sind durch die gesellschaftliche und gesamtwirtschaftliche Entwicklungsdynamik stark gestiegen. Vorausschauendes Handeln, um die richtige Weichenstellung zur gegebenen Zeit zu setzen, basiert auf fundierten Zukunftsvorstellungen und ist eine der größten Herausforderungen, der sich Organisationen stellen müssen.

Die Fraunhofer-Gesellschaft hat im Rahmen eines Foresight-Prozesses einen systematischen Blick in die Zukunft geworfen, um aus potenziellen Technologien sowie gesellschaftlichen Herausforderungen strategisches Orientierungswissen abzuleiten und gleichzeitig eine Weiterentwicklung der Foresight-Methoden zu fördern. Eine Besonderheit an diesem Projekt ist neben dem systematischen, sehr breiten Scanning von Zukunftsthemen die umfassende Nutzung der Fraunhofer-Expertise über alle 72 Forschungsinstitute hinweg. Damit ist sie deutlich umfangreicher als bei vorausgegangenen Foresight-Prozessen.

Es wurden 51 Themen mit großer Relevanz für die angewandte Forschung im Jahr 2030 identifiziert.

- Diese 51 Themen wurden zunächst durch eine umfangreiche Recherche von internationalen Foresight-Studien ausgewählt und analysiert.
- Anschließend haben sie knapp 400 Fraunhofer-Expertinnen und -Experten hinsichtlich ihrer Relevanz für die Zukunft von Forschung, Wirtschaft und Gesellschaft bewertet.
- Die Ergebnisse haben 20 nationale und internationale Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie in einem Review-Prozess durch Interviews bestätigt.

Ausgehend von den Befragungsergebnissen wurden Themen identifiziert, die **grundlegende Veränderungen** mit sich bringen werden und daher besondere Aufmerksamkeit erfordern. Zu diesen Themen zählen beispielsweise **Deep Learning – AI, Re-Economy** und die Nutzung und Erhaltung von **Biodiversität**. Darüber hinaus wurden Themen erkannt, von denen eine besonders **hohe Innovationsdynamik** ausgeht. Einige dieser Themen, wie etwa **Biohybrid, Water Harvesting Membrans** und **pHealth**, sind schon heute für die angewandte Forschung sehr relevant, während andere bislang eher Nischenthemen sind, die sich aber dynamisch entwickeln und daher bald auf ein breiteres Interesse stoßen könnten. Viele Themen aus dieser Gruppe haben einen Bezug zur Mikroelektronik, wie **Neuromorphic Chip** oder **Quantum**

Communication. Außerdem identifizierte die Studie eine weitere Themengruppe mit besonderer **gesellschaftlicher Relevanz**. Zu diesen zum Teil sehr kontrovers diskutierten Themen gehören etwa **Geoengineering, Civic Technologies** und **Reprogramming of Human Cells**.

Weitere Erkenntnisse hinsichtlich der perspektivischen Entwicklung der ausgewählten 51 Themen lassen sich auf Basis der Befragungsergebnisse wie folgt ableiten:

- Zahlreiche Themen mit sehr breiter Auswirkung auf ganz unterschiedliche Forschungs- und Wirtschaftsbereiche könnten sich zu Schlüsseltechnologien entwickeln.
- Themen mit konvergierenden Technologien könnten die Grenzen zwischen den Forschungsbereichen auflösen und damit die immer noch vorwiegend disziplinäre Prägung der Wissenschaften entscheidend verändern.
- Themen mit weitreichenden, teilweise kontrovers diskutierten Auswirkungen auf Gesellschaft und Umwelt könnten den Bedarf nach Governance-Prozessen und gesellschaftlicher Einbindung bei der Entwicklung und Einführung neuer Technologien deutlich erhöhen.

Der Foresight-Prozess wurde als breiter Blick in die Zukunft angelegt, der insbesondere emergente Technologien betrachtet, aber auch gesellschaftliche Entwicklungen und die Verbindungen zwischen den fachlichen Gegenstandsbereichen (Technik, Wirtschaft und Gesellschaft) aufzeigt. Die Ergebnisse bilden eine fundierte Wissensbasis für eine Zukunftsorientierung und zahlreiche Anknüpfungspunkte für weitere Projekte mit spezifischen Fragestellungen mit den Kooperationspartnern aus Wirtschaft, Politik und öffentlicher Hand.

2 DIE ERGEBNISSE IM ÜBERBLICK

Das Projekt »Foresight-Fraunhofer« hatte das Ziel, auf Basis eines breit aufgestellten Suchradars sowie einer Potenzialanalyse Zukunftsthemen mit Relevanz für die anwendungsorientierte Forschung zu identifizieren. Von Interesse sind Zukunftsthemen, die in den kommenden 10 bis 15 Jahren einen entscheidenden Einfluss auf die Forschungsaktivitäten, die wirtschaftliche Entwicklung sowie Gesellschaft und Umwelt haben könnten.

Ausgangspunkt des Foresight-Prozesses waren rund 300 überwiegend technologische Themen, die internationale Foresight-Projekte als Zukunftsthemen identifiziert haben. Aus diesen Themen wurden in einem mehrstufigen, systematischen Prozess anhand von Publikations-, Patent- und Social-Media-Analysen 51 sogenannte Spotlights ausgewählt, die zukünftig im »Rampenlicht« der angewandten Forschung stehen könnten. Die 51 Spotlights decken sehr unterschiedliche Bereiche ab; sie umfassen sowohl spezifische technologische Themen als auch gesellschaftliche Veränderungen. Sie wurden den Clustern **Data, Materials, Society, Algorithmus & Hybrid Architecture, Human** sowie **Planet** zugeordnet.

In einer Online-Befragung bewerteten knapp 400 ausgewählte Expertinnen und Experten der Fraunhofer-Gesellschaft die 51 Spotlights hinsichtlich ihrer zukünftigen Relevanz für die angewandte Forschung. Die Teilnehmenden kamen aus allen Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft, so dass das gesamte Spektrum der Fraunhofer-Expertise genutzt wurde. Wir haben Führungskräfte, zukünftige Entscheidungsträgerinnen und -träger sowie exzellente wissenschaftliche Nachwuchskräfte gefragt, welche Spotlights die strategische Ausrichtung der Institute in den nächsten 10 bis 15 Jahren beeinflussen werden. Die Befragung erfolgte in englischer Sprache, da uns ein Review durch internationale Experten wichtig war. Für eine bessere Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse wurden die englischsprachigen Bezeichnungen und Beschreibungen der Spotlights in diesem Bericht beibehalten.

Bei der Analyse der Ergebnisse wurde nicht nur die erwartete Relevanz im Jahr 2030 berücksichtigt, sondern auch die heutige Bedeutung sowie die möglichen Auswirkungen auf Forschungsbereiche und Wirtschaftssektoren. Die Themen wurden zudem auch hinsichtlich ihrer möglichen Einflüsse auf Gesellschaft und Umwelt analysiert.

Die Spotlights wurden aufgrund ihrer zeitlichen Positionierung und ihrer zukünftigen Wirkungen typologisiert. Abbildung 1 stellt die vier Gruppen mit den zugeordneten Spotlights im Überblick dar.

»Langläufer« mit sehr hoher Bedeutung

Sieben Spotlights wurden als sogenannte **Langläufer** zusammengefasst. Sie haben bereits heute eine große Relevanz und könnten in Zukunft noch weiter an Bedeutung gewinnen. Am höchsten bewertet wurde **Deep Learning - AI**. Langläufer-Themen wie **Re-Economy: Reduce, Reuse, Recycle** und **Exploitation of Biodiversity** werden einen sehr grundlegenden, umfassenden Einfluss auf die wirtschaftliche Entwicklung, aber auch auf die Umwelt haben. Zu dieser Gruppe zählen auch etwas spezifischere Themen wie **Optoelectronics** oder **Liquid Biopsy**.

Optoelectronics: Photonic-based chips, which are currently used mostly in highend military equipment, might be extensively employed in data centers within a few years.

»Durchstarter« mit dynamischem Entwicklungspotenzial

Für eine zweite Gruppe der Spotlights, die sogenannten **Durchstarter**, wird eine besonders dynamische Entwicklung und eine ebenfalls sehr hohe Relevanz im Jahr 2030 erwartet. Hier finden sich Themen wie **pHealth**, **Global Protein Supply** und **Biohybrid** wieder. Als Nischenthemen teilweise bereits bekannt, könnten sie für die angewandte Forschung in Zukunft deutlich an Relevanz gewinnen.

Biohybrid technologies could replicate tissues or organs that could help us to better understand human physiology or to design new drugs or drug delivery methods.

»Zukunftsoptionen« mit hohem Veränderungspotenzial

Eine ähnliche hohe Innovationsdynamik verspricht auch die dritte Gruppe von Themen, die in der anwendungsorientierten Forschung aktuell eine deutlich geringere Rolle spielen und bei denen die Relevanz für das Jahr 2030 etwas geringer eingeschätzt wird als bei den **Langläufern** und **Durchstartern**. Diese Themen könnten Forschung und Innovation länger prägen. Sie wurden in der Gruppe **Zukunftsoptionen** zusammengefasst. Dominiert wird die Gruppe der Zukunftsoptionen durch Entwicklungen im Zusammenhang mit der Mikroelektronik; so enthält sie beispielsweise die Spotlights **Neuromorphic Chip**, **Artificial Brain** und **Quantum Communication**.

The learning flexibility and low-power trait of artificial brain could make it suitable for any kind of AI devices.

Bei diesen drei Gruppen wird ein großer Einfluss auf die wirtschaftliche Entwicklung erwartet, ebenso wird ein Potenzial für umfangreiche gesellschaftliche Veränderungen antizipiert. Eine sehr hohe Korrelation zeigt sich bei den Spotlights zwischen dem Potenzial für Sprunginnovationen und ihrer Relevanz für die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland sowie ihrer erwarteten Innovationsdynamik. Die Einschätzung des Veränderungs- oder Disruptionspotenzials von technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen ist eng verbunden mit der Einschätzung der zukünftigen Relevanz für den Wirtschaftsstandort Deutschland: Ob ein Thema also zukünf-

tig für die angewandte Forschung von großer Bedeutung sein wird, hängt insbesondere von dem vermuteten Potenzial ab, in kurzer Zeit einen neuen dynamischen Markt zu schaffen bzw. in bestehenden Märkten signifikante Marktanteile zu erreichen.

Reprogramming of Human Cells:
Researchers might create human induced pluripotent stem cells (iPSC) from a patient's blood or skin cells and use these patient-specific cells to study.

Smart contracts can be used in almost all areas of B2B markets.

The elimination of an intermediate entity between the contracting parties greatly increases the efficiency of cooperation.

»Gesellschaftsgestalter« mit Auswirkungen auf Gesellschaft und Umwelt

Ergänzend zu den 21 Spotlights aus den drei beschriebenen Gruppen wurden zusätzlich neun Spotlights identifiziert, bei denen die Relevanz für Forschung und Wirtschaft noch offen oder eher indirekt gegeben ist, die aber einen großen Einfluss auf gesellschaftliche Entwicklungen und Umweltaspekte haben könnten. Spotlights aus dieser Gruppe wurden unter dem Begriff der »Gesellschaftsgestalter« zusammengefasst. Einige Themen in dieser Gruppe werden besonders kontrovers diskutiert, wie etwa **Geoengineering** und **Reprogramming of Human Cells**. Bei den Auswirkungen auf die gesellschaftliche Entwicklung zeigt sich eine Verbindung zu mehreren Digitalisierungsthemen wie zu **Smart Contracts** und **Civic Technology**.

Themen, bei denen die zukünftige Relevanz für die angewandte Forschung weniger unmittelbar gesehen wird als bei den Langläufern, Durchstartern und Zukunftsoptionen, könnten zunächst geringere Beachtung erfahren. Durch ihre stärkere Auswirkung auf Gesellschaft und Umwelt und die zum Teil dadurch absehbaren kontroversen Diskussionen könnten diese Themen zukünftig eine Werteorientierung erfordern. Soweit eine klare und ethisch vertretbare Positionierung gelingt, könnten sich die Themen dynamisch entwickeln und auch strategisch eine relevante Rolle spielen.

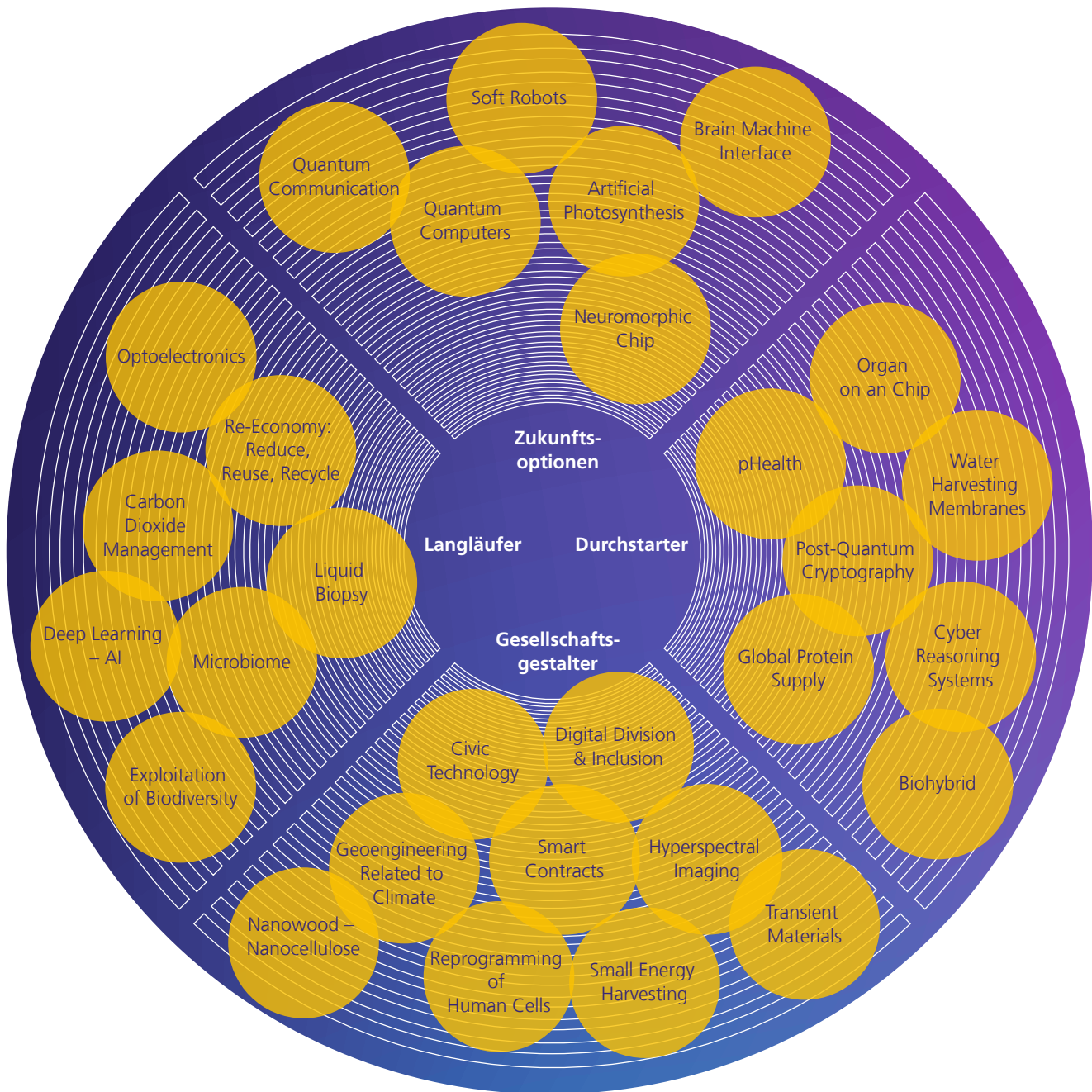


Abbildung 1: Übersicht der 30 Themen mit besonderer Zukunftsrelevanz.

Einfluss der Spotlights auf die Entwicklung der Forschungsbereiche

Um die Relevanz der Spotlights für aktuelle wissenschaftliche Fachgebiete einzuordnen, wurden in Anlehnung an die Fachsystematik der Deutschen Forschungsgemeinschaft zehn Forschungsbereiche betrachtet. Die Befragungsergebnisse zeigen, dass die Spotlights besonders starken Einfluss auf die **Medizin-, Informations- und Materialwissenschaften** haben könnten und nicht nur einzelne Forschungsbereiche betreffen werden. Die Spotlights sind kein repräsentativer Indikator für die Innovationsdynamik der Forschungsbereiche und Wirtschaftssektoren (Abb. 2), dennoch geben sie deutliche Hinweise auf eine sehr hohe Innovationsdynamik in der Informationstechnik, -wissenschaft und den Medizin- und Materialwissenschaften in den nächsten 10 bis 15 Jahren.

Im Umkehrschluss ist eine stark zunehmende Interdisziplinarität vieler Forschungsfelder für die nächsten 10 bis 15 Jahre erkennbar. Die Innovationsdynamik in den Forschungsfeldern Medizin-, Material- und Informationswissenschaft, aber auch im **Maschinenbau sowie in der Verfahren- und Elektrotechnik** wird nicht singulär von einer bestimmten Technologie, sondern vielfältig durch verschiedenste technologische Entwicklungen inspiriert und gefördert werden. Dies könnte eine zunehmende Aufweichung der etablierten Grenzen zwischen den Forschungsbereichen begünstigen und Spill-over-Effekte fördern.

Auch die **Agrar- und Ernährungswissenschaften** könnten in Zukunft von Spotlights aus allen sechs Clustern ganz verschiedentlich geprägt werden, beispielsweise von **Swarm Robot Intelligence**, **Microbiome** und **Water Harvesting Membranes**.

Für die Spotlights aus dem Cluster **Society** wird nicht nur ein direkter Einfluss auf die **Medizin- und Informationswissenschaft**, sondern auch auf **das Bauingenieurwesen und die Umwelttechnik** gesehen. In diesen Bereichen könnte nicht nur ein interdisziplinärer, sondern auch ein transdisziplinärer Forschungsmodus unter Einbindung nicht-wissenschaftlicher Akteure aus Gesellschaft und Politik an Relevanz gewinnen.

*Metagenomics analysis of the **microbiome** will open the door to intestinal bacteria being able to directly alter the activity of our genes. This will lead to future therapeutics for mental and physical conditions such as depression or diabetes.*

Water Harvesting Membranes:
The combination of functionalized bio-inspired surfaces with condensation seems to be a promising approach for the extraction of water from the air. New precision filtration technologies could have a massive impact on the global economy by reducing costs of water filtration.

						Materials								Planet & Space								Society								
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	
Microbiome	Organ on a Chip	pHealth	Precision Neurosurgery	Reprogramming of Human Cells	2D Materials - Heterostructures	DNA Origami	Hydrogels	Metamaterials	Nanocellulose - Nanowood	Solid-State Cooling	Transient Materials	Water Harvesting Membranes	Artificial Photosynthesis	Carbon Dioxide Management	Deep Sea Mining	Exploitation of Biodiversity	Geoengineering Related to Climate	Re-Economy: Reduce, Reuse, Recycle	Small Energy Harvesting	Wireless Energy Transmission	Anthropomorphization & Creativity of Robots	Civic Technology	Digital Division & Inclusion	DIY Biology - Biohacking	Global Middle Class	Global Protein Supply	Humanoids & Non-Human Personhood	Smart Contracts	Social Credit Score	



no influence strong influence

Abbildung 2: Forschungsbereiche, die durch die Spotlights beeinflusst werden.

Einfluss der Spotlights auf die Entwicklung der Wirtschaftssektoren

Die Relevanz der Spotlights für die Wirtschaft wurde auf Basis der aktuellen Wirtschaftssektoren bewertet; es zeigen sich Parallelen zu den Analysen für die Forschungsbereiche. Eine besonders enge Verbindung der Spotlights wird zum **Gesundheitssektor** gesehen. **Chemische und pharmazeutische Industrie sowie Maschinenbau, Informationstechnik und Nahrungsmittelindustrie** sind Sektoren, die ebenfalls durch die Mehrzahl der 51 Spotlights beeinflusst werden.

Die Analysen liefern Hinweise darauf, in welche Richtung die Forschung in den nächsten 15 Jahren gehen könnte und welche Einzelthemen besondere Aufmerksamkeit verdienen. Das große Spektrum der Spotlights und ihre durchwegs hohe Relevanz zeigen, dass in den nächsten 10 bis 15 Jahren Innovationen nicht nur in einigen ausgewählten Forschungsdisziplinen oder -bereichen zu erwarten sind, sondern vielmehr mit einer großer Innovationsdiversität gerechnet werden kann. Gleichzeitig geht diese Diversität jedoch mit einer zunehmenden Konvergenz und Interdisziplinarität der Forschungsbereiche einher.

3 GANZHEITLICHE RELEVANZ- BEWERTUNG DER SPOTLIGHTS

Im Fraunhofer-Foresight-Prozess wurden nach einem systematischen Scanning von rund 300 überwiegend technologischen Zukunftstrends 51 Zukunftsthemen identifiziert (vgl. auch Kap 7 sowie Abb. 3). Kriterien für die Auswahl der Zukunftsthemen waren die dynamische Entwicklung in den nächsten Jahren, die Relevanz für die angewandte Forschung sowie das Potenzial, zu einem »Rising Star« für die Fraunhofer-Forschung zu werden. Für die Selektion haben wir Patentrecherchen durchgeführt und ergänzende Bibliometrieanalysen (Web of Science, Lexis-Nexis, Watson Social Media Analyse) erstellt, die wir gemeinsam mit den genannten Kriterien für die endgültige Themenauswahl herangezogen haben. Als Ergebnis haben wir 51 Zukunftsthemen – sogenannte Spotlights – jeweils auf einem »Onepager«¹ zusammenfassend dargestellt. Diese »Onepager« enthalten eine Kurzbeschreibung, Ausführungen zu neueren Entwicklungen, die Langzeitperspektive des Themas sowie die Ergebnisse der Patentrecherche und der Publikationsanalyse. Bei der anschließenden Online-Befragung der Fraunhofer-Expertinnen und –Experten wurden diese »Onepager« zur Verfügung gestellt. Anschließend konnten wir 30 Spotlights identifizieren, denen auf derselben Basis eine besondere Zukunftsrelevanz zugewiesen wurde.

¹ Eine Kurzbeschreibung der 30 Spotlights mit besonderer Zukunftsrelevanz findet sich im Anhang.

GANZHEITLICHE RELEVANZBEWERTUNG DER SPOTLIGHTS

Algorithms & Hybrid Architecture

- Artificial Brain
- Bio Inspired Electronics
- Biohybrid
- Cyber Reasoning Systems
- Deep Learning – AI
- Neuromorphic Chip
- Small Data Algorithms
- Soft Robots
- Swarm Robot Intelligence



Data

- 3D Displays
- DNA Memory
- Hyperspectral Imaging
- Post-Quantum Cryptography
- Quantum Communication
- Quantum Computers
- Spintronics



Human

- Brain Machine Interface
- Epigenetic Change Technologies
- Human Enhancement – Nootropics
- Liquid Biopsy
- Microbiome
- Organ on a Chip
- pHealth
- Precision Neurosurgery
- Reprogramming Human Cells



Society

- Anthropomorphization & Robot Creativity
- Civic Technology
- DIY Biology – Biohacking
- Digital Division & Inclusion
- Global Middle Class
- Global Protein Supply
- Humanoids & Non-Human Personhood
- Smart Contracts
- Social Credit Score



Materials

- 2D Materials – Heterostructures
- DNA Origami
- Hydrogels
- Metamaterials
- Nanowood – Nanocellulose
- Solid-State Cooling
- Transient Materials
- Water Harvesting Membranes



Planet & Space

- Artificial Photosynthesis
- Carbon Dioxide Management
- Deep Sea Mining
- Exploitation of Biodiversity
- Geoengineering Related to Climate
- Re-Economy: Reduce, Reuse, Recycle
- Small Energy Harvesting
- Wireless Energy Transmission



Abbildung 3: Die Spotlights mit besonderer Zukunftsrelevanz kommen aus allen Clustern.

Die wesentlichen Zukunftsthemen für die angewandte Forschung zu identifizieren, war dank der Bereitschaft der Fraunhofer-Expertinnen und Experten, an der Umfrage teilzunehmen, möglich:

- **Durchgängig hohes Interesse an allen Spotlights:** Alle Spotlights wurden bearbeitet (Bewertung von durchschnittlich 50 Personen pro Spotlight, wobei die Auswahl, welche und wie viele Spotlights bewertet wurden, den Befragten frei überlassen wurde).
- **Breit gestreute Teilnahme an der Onlinebefragung:** Alle 72 Fraunhofer-Institute haben sich an der Umfrage beteiligt.
- **Hervorragende Beteiligung:** Rund 400 Personen (überwiegend Führungskräfte) haben die Befragung abgeschlossen.

Teilnehmende waren heutige und zukünftige Entscheiderinnen und Entscheider der Fraunhofer-Gesellschaft über alle Institute und Verbünde hinweg. Zur Teilnahme eingeladen waren Personen unterschiedlicher Hierarchieebenen, von der Gruppenleitung bis zur Institutsleitung, ergänzt durch ausgewählte Gruppen, um Diversität bezüglich Alter und Geschlecht zu berücksichtigen. Viele Teilnehmenden baten um ergänzende Informationen und zeigten Interesse an den Ergebnissen der Befragung.

3.1 Relevanz für die angewandte Forschung heute und 2030

Bei der Beurteilung der zukünftigen Relevanz eines Themas haben wir nicht nur die absolute Relevanzbewertung berücksichtigt, sondern auch die Veränderung gegenüber der heutigen Relevanzbewertung und damit die erwartete Innovationsdynamik. Aufgrund der absoluten Relevanzbewertung sind einige Themen identifizierbar, die bereits heute durchschnittlich als »quite relevant« eingeschätzt werden und deren Relevanz im Jahr 2030 voraussichtlich sehr hoch sein wird. Diese Themen, bei denen eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Bedeutung über viele Jahre zu erwarten ist, wurden als **Langläufer** bezeichnet (Abb. 4):

- Re-Economy: Reduce, Reuse, Recycle
- **Deep Learning – AI**
- Optoelectronics
- Liquid Biopsy
- **Exploitation of Biodiversity**
- Microbiome
- **Carbon Dioxide Management**

Deep Learning – AI: In the future neural net architectures will be handling more abstract and integrated knowledge beyond the processing of video, audio and text data.

The potential of biodiversity is seen as the most important resource for drug development. About 60% of today's cancer drugs contain substances from nature.

Carbon Dioxide Management: Combining direct air capture with carbon storage can fulfill a dual function: as a carbon dioxide removal technology and as a form of climate engineering.

GANZHEITLICHE RELEVANZBEWERTUNG
DER SPOTLIGHTS

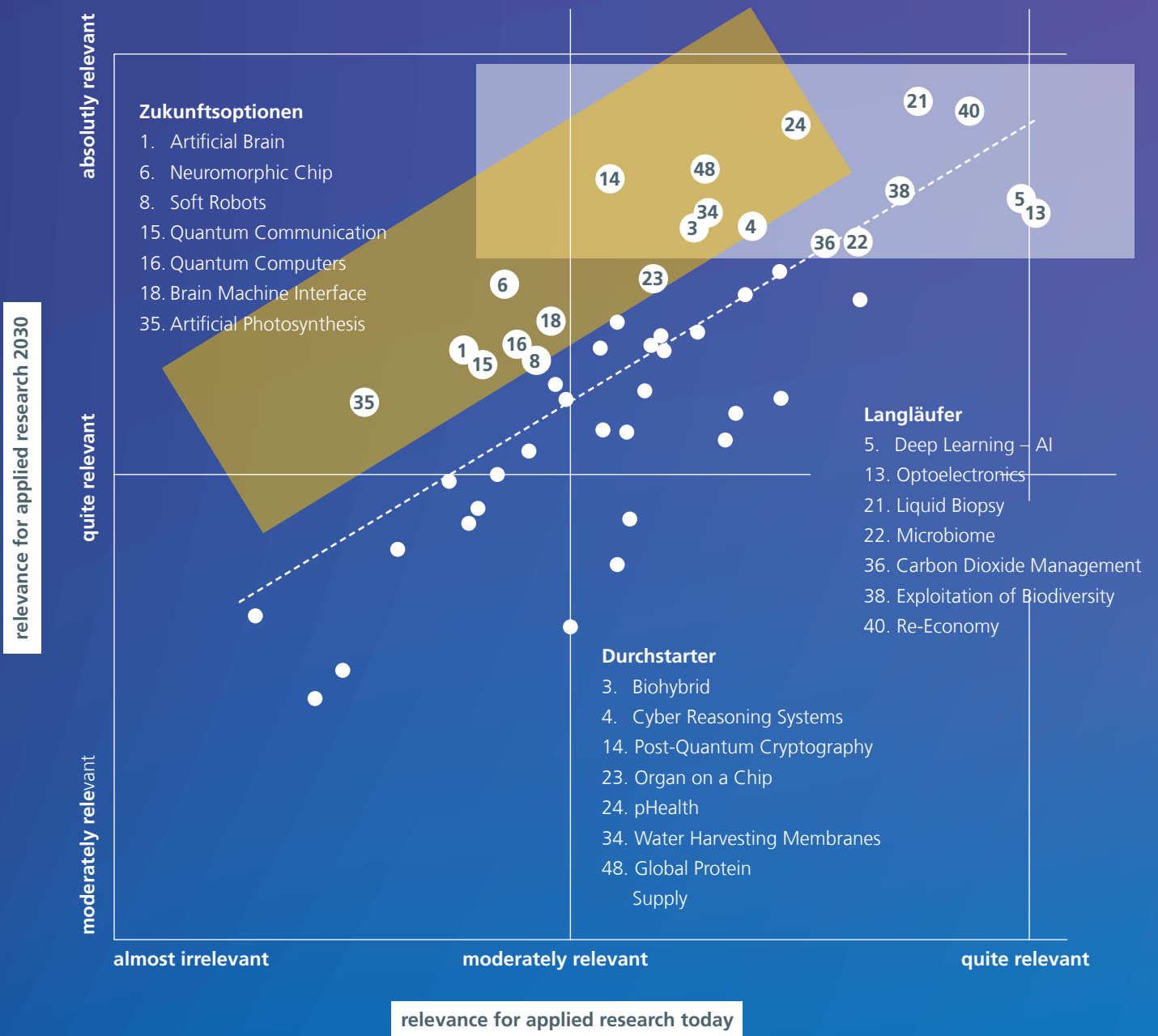


Abbildung 4: Korrelation zwischen aktueller und zukünftiger Relevanz der Spotlights

Abbildung 4 zeigt auch die charakteristische Korrelation zwischen heutiger und zukünftiger Relevanz (gestrichelte Trendlinie), wie sie in zahlreichen Foresight-Studien zu finden ist. In der Zukunftsforschung wird diese Korrelation mit dem kognitiven Mechanismus der »end of history illusion« erklärt. Dieser Mechanismus führt zu kognitiven Verzerrungen (Biases) sodass der aktuelle Zustand in seiner Bedeutung und Stabilität im Vergleich zur Veränderungsdynamik in der Vergangenheit und Zukunft überschätzt wird. Vor diesem Hintergrund ist die Zukunftsrelevanz jeweils in Abhängigkeit von der aktuellen Relevanz zu beurteilen.

Dies bedeutet, dass Themen oberhalb der Trendlinie eine überdurchschnittlich hohe relative Relevanz im Jahr 2030 haben werden, wenn man die heutige Relevanz zugrunde legt (braun hinterlegte Spotlights in Abb. 4). Innerhalb des braun markierten Bereiches werden zwei Gebiete unterschieden: Weiter links finden sich Themen, die heute noch eine eher geringe Relevanz haben (im Durchschnitt unterhalb von »moderately relevant today«), sich aber voraussichtlich sehr dynamisch entwickeln werden und daher durchschnittlich bezüglich der zukünftigen Relevanz oberhalb von »quite relevant« liegen.

Diese Themen finden heute noch wenig Beachtung in der angewandten Forschung. Sie könnten sehr schnell an Bedeutung gewinnen und sind daher unter der Bezeichnung **Zukunftsoptionen** zusammengefasst:

- **Neuromorphic Chip**
- Brain Machine Interface
- Quantum Computing
- Artificial Brain
- **Quantum Communication**
- Artificial Photosynthesis
- Soft Robots

Neuromorphic chips could be used wherever real-world data needs to be processed in real-time environments, e.g. to create smart-city infrastructures designed for autonomous vehicles.

Quantum Communication: The transmission of information encrypted into the quantum could solve the global challenge presented by the exponential growth of recorded information.

In dem Überschneidungsbereich der beiden Flächen finden sich Themen, die heute im mittleren Relevanzbereich liegen (durchschnittlich rechts von »moderately relevant«) und bei denen eine dynamische Entwicklung abzusehen ist. Diese Themen befinden sich an der Schwelle zur breiten Relevanz für die angewandte Forschung und sind unter dem Begriff der **Durchstarter** gebündelt:

- Global Protein Supply
- pHealth
- Water Harvesting Membranes
- Biohybrid
- Post Quantum Cryptography
- Cyber Reasoning Systems
- Organ on a Chip

Organ on a Chip: These models could inform a predictive response to drugs or other chemical compounds and replace most animal tests.

Insbesondere bei den **Zukunftsoptionen**, aber auch bei den **Durchstartern** finden sich Themen, die Bezug zur **Mikroelektronik** aufweisen, aber noch in einer frühen Entwicklungsphase sind. Die Durchstarter verteilen sich über alle Cluster. So finden sich hier Themen aus dem Cluster **Human**, wie **pHealth** oder **Organ on a Chip**, aber auch aus dem Cluster **Material** wie beispielsweise **Water Harvesting Membranes**.

Folgende drei Gruppen von Themen wurden demnach identifiziert, die für die Entwicklung der angewandten Forschung jeweils eine unterschiedliche Rolle spielen werden und spezifische Förderinstrumente erfordern:

Langläufer: Spotlights, die bereits heute eine sehr große Relevanz haben und deren enorme Bedeutung bis 2030 fort dauert. Die aktuellen Forschungsaktivitäten sind von beträchtlicher Wichtigkeit, da eine grundlegende Veränderung und eine sehr breite Auswirkung erwartet wird. Viele Themen haben einen direkten Bezug zu Umweltaspekten oder zum Gesundheitsbereich.

Durchstarter: Spotlights, die heute eine mittlere Relevanz haben und bis 2030 deutlich an Bedeutung hinzugewinnen. Bei diesen Themen könnte Vorlaufforschung oder eine Anschubfinanzierung erforderlich sein. Sie sind auf dem Sprung zu einer breiteren Relevanz und verteilen sich auf alle Cluster (Human, Materials etc.).

Zukunftsoptionen: Spotlights, bei denen die Relevanz heute noch gering oder mittel ist, bei denen jedoch eine besonders dynamische Entwicklung zu erwarten ist. Diese Themen werden sich voraussichtlich sehr schnell weiterentwickeln, weshalb eine frühe Positionierung wichtig sein könnte. Es handelt sich um technologische Themen, die überwiegend einen Bezug zur Mikroelektronik aufweisen, aber noch in frühen Entwicklungsphasen sind.

Um einzuschätzen, ob ein Thema das Potenzial für eine Sprunginnovation oder eine disruptive Entwicklung hat, ist die Relevanz im Jahr 2030 einzubeziehen: Bis auf eine Ausnahme zählen alle Themen mit besonderem Potenzial für Sprunginnovationen zu den Durchstartern oder Langläufern. Das höchste Disruptionspotenzial wird bei **Post Quantum Cryptography** und **pHealth** gesehen; auch bei dem Thema **Reprogramming of Human Cells** werden disruptive Entwicklungen erwartet.

*The experimental work performed in **post-quantum cryptography** could lay the groundwork for a future quantum Internet where all transactions are safeguarded.*

3.2 Relevanz für Gesellschaft und Umwelt

Den Einfluss der Spotlights auf Gesellschaft und Umwelt zu bewerten, war uns sehr wichtig, um ergänzend Themen zu identifizieren, die bei einer rein wirtschaftlichen Relevanzbeurteilung gegebenenfalls unbeachtet geblieben wären.

Zwischen den Dimensionen Umwelt und Gesellschaft zeigt sich keine Korrelation (Abb. 5). Dennoch gibt es sechs Themen, die auf beide Dimensionen einen großen Einfluss haben werden:

- Water Harvesting Membranes (Durchstarter)
- Global Protein Supply (Durchstarter)
- Carbon Dioxid Management (Langläufer)
- Exploitation of Biodiversity (Langläufer)
- Artificial Photosynthesis (Zukunftsoption)
- Geoengineering related to Climate Change

Geoengineering related to Climate Change wird im Vergleich zu den anderen Themen als weniger relevant für die heutige und zukünftige angewandte Forschung eingeschätzt. Die zukünftige Bedeutung könnte sich jedoch durch Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft ergeben. Weitere Themen von künftiger gesellschaftlicher Relevanz, bei denen sich eher indirekt eine große Bedeutung für die angewandte Forschung entwickeln könnte, sind Spotlights im Zusammenhang mit der Digitalisierung wie **Digital Division & Inclusion**, **Civic Technology** oder **Smart Contracts**. Die Ergebnisse des Foresight-Prozesses deuten darauf hin, dass insbesondere die gesellschaftliche Dimension von Digitalisierungsprozessen in den nächsten 10 bis 15 Jahren eine große Rolle spielen könnte (Abb. 5).

***Geoengineering** might become economically feasible to combat effects of climate change and require systemic research to assess the impact on complex ecosystems and biodiversity.*

***Digital Division & Inclusion:** The digitalisation of everyday life offers great opportunities to create equal conditions for all. It could trigger a displacement of global centers of power.*

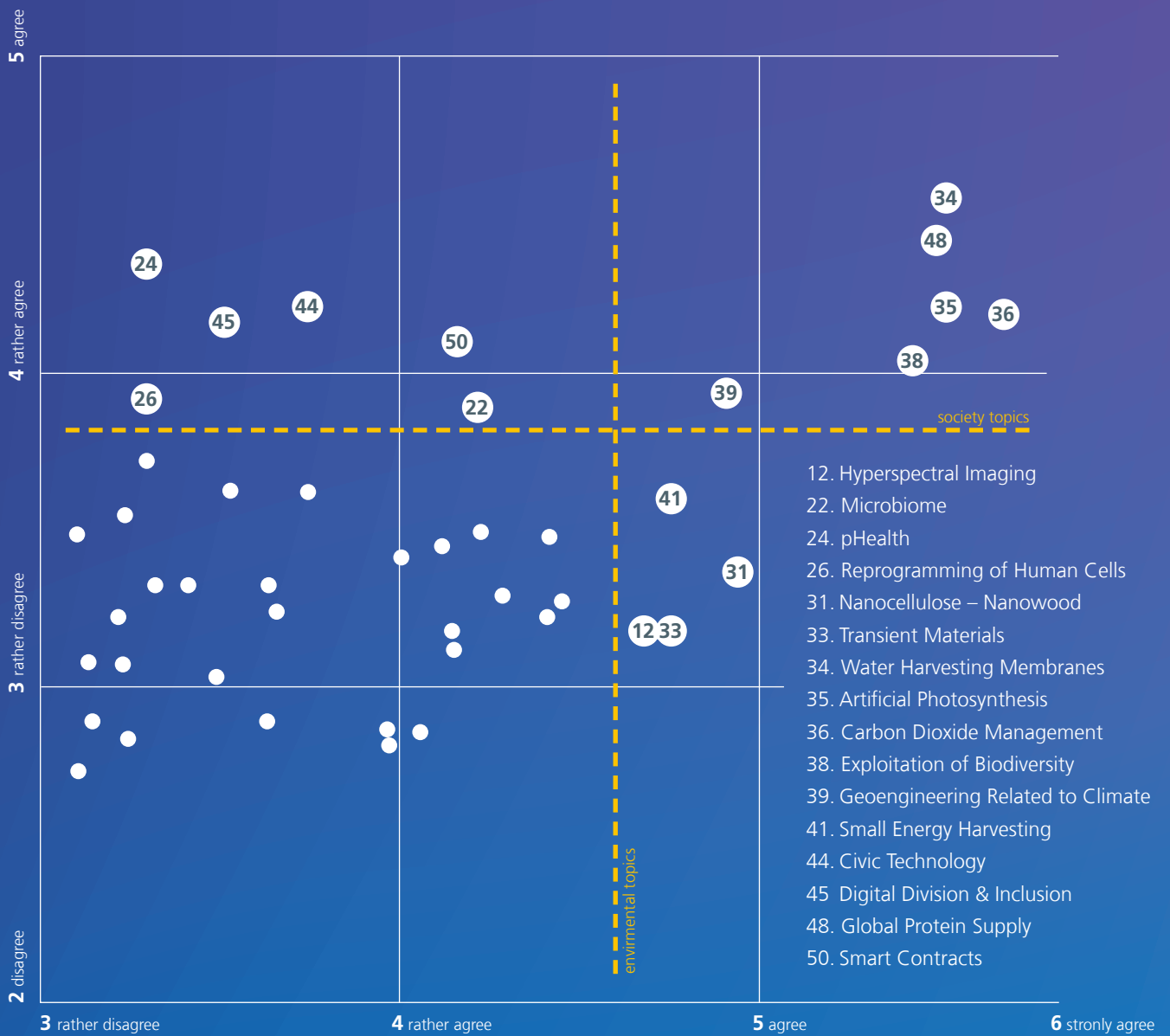
Auch Spotlights aus dem Cluster **Materials** wie **Transient Materials** oder **Nanocellulose** geraten bei einer ausschließlichen Berücksichtigung der wirtschaftlichen Relevanz nicht in den Fokus. Die genannten Themen haben jedoch eine besondere Bedeutung für Umweltaspekte und wurden daher gemeinsam mit weiteren Spotlights zur Gruppe der **Gesellschaftsgestalter** zusammengefasst (Abb. 5):

Small Energy Harvesting promises no maintenance and unlimited performance for wireless sensor networks, battery-free medical implants, install-and-forget house automation and many others.

- Geoengineering related to Climate Change
- Digital Division & Inclusion
- Civic Technology
- Smart Contracts
- Transient Materials
- Nanocellulose – Nanowood
- **Small Energy Harvesting**
- Hyperspectral Imaging
- Reprogramming of Human Cells

»**Gesellschaftsgestalter**«: Spotlights, die durch ihren Beitrag zur zukünftigen Entwicklung der Gesellschaft und der Umwelt besonders relevant werden könnten. Die Relevanz für die angewandte Forschung ergibt sich bei diesen Themen nicht unmittelbar. Die Einbindung von neuen Akteuren aus Gesellschaft und Politik in die Forschungsaktivitäten könnte zunehmend wichtig werden.

Progress in this area makes a relevant contribution to creating a society until 2030 in which many of today's social problems are solved.



Progress in this area makes a relevant contribution to environmental protection in 2030.

Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Beitrag zur Umwelt und Gesellschaft.

4 EINFLUSS AUF FORSCHUNGS- BEREICHE UND WIRTSCHAFTS- SEKTOREN

Der Einfluss der Spotlights auf die Forschung im Jahr 2030 wird weit über den jeweils heute zugeordneten Forschungsbereich hinausgehen, wie die Einflussbewertung verdeutlicht (Abb. 2). Damit bestätigt sich die breite Forschungsrelevanz der 51 Spotlights in ihrer Gesamtheit. Welche Spotlights haben eine besonders breite Wirkung, sowohl auf die Forschung als auch auf die Wirtschaft? Wir nennen sie Querschnitt-Spotlights und zählen dazu:

- Deep Learning - AI
- Small Data Algorithms
- Smart Contracts
- Digital Division & Inclusion
- Global Middle Class
- Re-Economy: Reduce, Reuse, Recycle

Cyber Reasoning Systems:
Automated cyber defense systems could support human IT security experts but may also pose a threat if used aggressively by criminals.

Die Querschnitt-Spotlights weisen alle einen engen Bezug zu globalen Veränderungen und Verschiebungen von Datenflüssen, Stoffströmen und Marktmacht auf.

Quantum Computers can solve new classes of problems (e.g. chemistry and supply chain types) that are not able to be solved by today's supercomputers.

Eine auffällig breite Relevanz für zahlreiche Wirtschaftssektoren haben zudem **Cyber Reasoning Systems**, **Quantum Computers** und **Post-Quantum Cryptography**. Ausschlaggebend für die breite Wirtschaftsrelevanz dieser Spotlights ist der Bezug zur Datensicherheit, die über alle Wirtschaftssektoren hinweg in den nächsten Jahren eine enorme Rolle spielen wird.

Medizin und Gesundheit

Für den Sektor Medizin und Gesundheit sowie die Forschungsaktivitäten in diesem Bereich sind Spotlights aus dem Cluster **Human** besonders relevant. Außerdem werden Spotlights aus den Clustern **Data** und **Society** einen Einfluss auf diesen Sektor haben. Denn sowohl in der Medizinforschung als auch im Gesundheitssektor spielen neben Informations- und Kommunikationstechnologien auch hybride Datenstrukturen und gesellschaftlicher Wandel eine entscheidende Rolle für zukünftige Innovationen. Die relevantesten Spotlights für Medizin und Gesundheit sind (siehe Abb. 2 und Abb. 6):

- Epigenetic Change Technologies
- Liquid Biopsy
- Microbiome
- Organ on a Chip
- Reprogramming of Human Cells
- Brain Machine Interface
- pHealth
- Precision Neurosurgery
- Exploitation of Biodiversity
- Hydrogels
- DNA Origami
- Soft Robots
- Anthropomorphization & Creativity of Robots
- DIY Biology
- Global Protein Supply
- Social Credit Score

Information und Kommunikation

Im Bereich Information und Kommunikation werden von allen hier relevanten Spotlights Impulse sowohl auf die Forschung als auch auf die Wirtschaft erwartet. Die hier wichtigen Spotlights verteilen sich über die Cluster **Algorithms & Hybrid Architectures, Data, Materials und Society**. Der Zusammenhang zwischen Digitalisierung und der gesellschaftlichen Entwicklung, der bei den »Gesellschaftsgestaltern« identifiziert werden konnte, zeigt sich hier in umgekehrter Richtung. So werden Informationswissenschaften, Informatik und Kommunikationswissenschaften auch durch bestimmte gesellschaftliche Entwicklungen geprägt. Folgende Spotlights weisen den größten Einfluss auf die Informationswissenschaften auf:

- Quantum Computing
- Quantum Communication
- Post-Quantum Cryptography
- Spintronics
- Brain Machine Interface
- Optoelectronics
- 3D Displays
- Anthropomorphization & Creativity of Robots
- Neuromorphic Chip
- Cyber Reasoning Systems
- Artificial Brain
- 2D Materials – Heterostructures
- Solid State Cooling
- Small Energy Harvesting
- Wireless Energy Transmission
- Social Credit Score
- Civic Tech

						Materials								Planet & Space						Society									
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
Microbiome	Organ-on-a-Chip	pHealth	Precision Neurosurgery	Reprogramming of Human Cells	2D Materials - Heterostructures	DNA Origami	Hydrogels	Metamaterials	Nanocellulose - Nanowood	Solid-State Cooling	Transient Materials	Water Harvesting Membranes	Artificial Photosynthesis	Carbon Dioxide Management	Deep Sea Mining	Exploitation of Biodiversity	Geoengineering Related to Climate	Re-Economy: Reduce, Reuse, Recycle	Small Energy Harvesting	Wireless Energy Transmission	Anthropomorphization & Creativity of Robots	Civic Technology	Digital Division & Inclusion	DIY Biology - Biohacking	Global Middle Class	Global Protein Supply	Humanoids & Non-Human Personhood	Smart Contracts	Social Credit Score



no influence  strong influence

Abbildung 6: Wirtschaftssektoren, die durch die Spotlights beeinflusst werden.

Materialien, Maschinenbau und Produktion

Die mit dem produzierenden Gewerbe eng verbundenen Forschungsbereiche Materialwissenschaften, Maschinenbau und Verfahrenstechnik zeigen eine deutliche Übereinstimmung in ihren Spotlights mit dem größten Einfluss; das Spektrum dieser Spotlights ist hier sehr breit gestreut. Einzig die Spotlights aus den Clustern **Human** und **Society** wirken sich nur in geringem Umfang auf die genannten Forschungsbereiche aus. Spotlights mit besonderer Relevanz für Materialwissenschaften, Maschinenbau und Verfahrenstechnik sind:

Coupling Hyperspectral Imaging engines with machine learning algorithms promises to enable the interpretation of spacial and spectral information.

Nanocellulose: Genetically modified wood and other plant strains might be used for the industrial production of new sustainable bio-nanomaterials to replace a range of polymers.

- Soft Robots
- Swarm Robot Intelligence
- 3D Displays
- **Hyperspectral Imaging**
- 2D Materials – Heterostructures
- Transient Materials
- Metamaterials

- **Nanocellulose – Nanowood**
- Carbon Dioxid Management
- Deep Sea Mining
- Re-Economy: Reduce, Reuse, Recycle
- Biohybrid
- Small Energy Harvesting

Chemie und Pharma

Auffällig ist die extrem breite Beeinflussung der chemischen und pharmazeutischen Industrie durch alle Spotlights (Abb. 6). Auswirkungen haben nicht nur die Spotlights aus den Clustern **Materials** und **Human**, sondern auch die Spotlights des Clusters **hybride Architekturen**. Die Chemische und Pharmazeutische Industrie könnte 2030 in besonderem Umfang dazu beitragen, die Forschungsergebnisse ganz unterschiedlicher Wissenschaftsdisziplinen zu verschmelzen.

5 REVIEW DURCH INTERNATIONALE EXPERTINNEN UND EXPERTEN

Die Ergebnisse der Fraunhofer-Relevanzbewertungen haben wir in vertiefenden Interviews der Einschätzung durch internationale Expertinnen und Experten gegenübergestellt. Dabei füllten die externen Teilnehmenden nicht nur den Online-Fragebogen aus, sondern diskutierten mit dem Projektteam in Interviews, wie Unterschiede der Spotlights zu bewerten sind. Insgesamt gab es nur geringe Abweichungen vom Fraunhofer-Durchschnitt; deutliche Unterschiede zeigten sich fokussiert bei einigen wenigen Spotlights.

Die allgemeine Zukunftsrelevanz der Spotlights haben externe Expertinnen und Experten bestätigt. Abweichende Einschätzungen gab es jedoch bei einigen Themen, die sich auf die Entwicklungsdynamik und die Verbindung zu Gesellschaft und Umwelt beziehen. Bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten und Auswirkungen in den nächsten 10 bis 15 Jahren waren die Zukunftserwartungen der Teilnehmenden von Fraunhofer in einigen Fällen deutlich optimistischer als die der externen Teilnehmenden.

Bezogen auf die »Langläufer«, d. h. Spotlights wie **Deep Learning – AI**, **Liquid Biopsy**, **Microbiome** und **Carbon Dioxide Management**, unterstreichen die externen Expertenmeinungen deren heutige Relevanz und stellen ihr großes zukünftiges Potenzial nochmal heraus. So wird es im Bereich Deep Learning in Zukunft Methodenstandards geben, die gleichzeitig eine adäquate Kontexteinbindung, Erklärbarkeit und Transparenz von Lösungen (insbesondere bei neuronalen Netzen) erfordern. Auch Liquid Biopsy wird ein großes Potenzial für die Zukunft zugeschrieben, u. a. in Bezug auf die Probengewinnung und -bearbeitung, die Technologieentwicklung, die Therapieplanung und das Therapiemonitoring. Zukünftige Forschungsbedarfe im Bereich Microbiome werden darin gesehen, Mikroorganismen zu erfassen, Daten mit KI-Technologien auszuwerten und für den Patienten individuell zu nutzen.

Liquid biopsy may become the main method of diagnosing cancer. It can also be beneficial to other diagnostic fields such as dentistry, pharmacotherapy or infectiology.

Die »**Durchstarter**« werden durchgängig als sehr relevant für das Jahr 2030 gesehen, obgleich sie in der heutigen Forschungsarena lediglich eine mittlere Relevanz haben. So ist in Bezug auf den **Global Protein Supply** trotz zukünftiger Bedeutung für eine weltweite alternative Ernährungssicherheit laut Expertenstimmen noch zu wenig passiert; Auswirkungen auf die Umwelt, aber auch auf die deutsche Wirtschaft (u. a. Änderung von Wertschöpfungsketten in der Fleisch- und Lebensmittelindustrie) werden erwartet. Ähnlich argumentieren die Expertinnen und Experten zum Spotlight **Water Harvesting Membranes**, wo sie ein großes Potenzial für die Zukunft sehen. Hingegen sind bei der Personalisierten Medizin (**pHealth**) bereits heute Fortschritte zu erkennen, die in Zukunft noch weiter an Bedeutung gewinnen werden und einen wachsenden Markt für die deutsche Wirtschaft erkennen lassen (auch unter Berücksichtigung des Einsatzes von KI). Besondere Handlungsfelder werden in der Bezahlbarkeit von personalisierter Medizin, im rechtlichen Bereich (u. a. bei ethischen Fragen, Austausch von Patientendaten), in der Information und Kommunikation sowie in der patientenzentrierten Therapieplanung gesehen. Die Expertinnen und Experten unterstreichen die sehr hohe Zukunftsrelevanz von **Cyber Reasoning Systems** im Kontext von Cybersecurity und der Resilienz kritischer Infrastrukturen und von **Organ on a Chip** für die Durchführung toxikologischer Studien.

Soft-matter machines and robots will allow for safe and biomechanically compatible interactions with humans. Miniature soft robots promise to help in drug delivery and surgery.

Brain Machine interfaces aim at creating a man-machine symbiosis for complex tasks and at interpersonal wiring for sharing of emotions, moods and states of mind.

Artificial photosynthesis could stop global warming by significantly reducing the carbon footprint of human-kind, even more efficiently than natural leaves could on their own.

Die »**Zukunftsoptionen**« umfassen Spotlights, bei denen die Relevanz heute noch gering oder mittel ist, aber eine besonders dynamische Entwicklung für die Zukunft erwartet wird. Aus externer Expertensicht trifft dies vor allem auf **Soft Robots** zu, da hier eine Schlüsseltechnologie der Zukunft gesehen wird. Auf andere Zukunftsoptionen schauen die Expertinnen und Experten etwas skeptischer. So schätzen sie das Thema **Brain Machine Interface** aufgrund der Komplexität von Gehirnfunktionen deutlich kritischer ein. Ähnlich kritisch argumentieren sie zum Thema **Artificial Photosynthesis**. Damit bestätigen die Expertinnen und Experten die These, dass es sich bei den Zukunftsoptionen um technologische Themen handelt, die sich noch in einer sehr frühen Entwicklungsphase befinden und durch große Unsicherheiten geprägt sind.

Zu den »**Gesellschaftsgestaltern**« zählen Zukunftstrends, die einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Entwicklung der Gesellschaft und der Umwelt leisten werden. Die Expertengespräche bestätigen, dass es bei diesen Themen zunehmend erforderlich ist, neue Akteure aus Gesellschaft und Politik in die Forschungsaktivitäten einzubinden. Die Expertinnen und Experten nennen etwa Anreizsysteme, um z. B. Reallabore und Citizen Science zu fördern. Im Zukunftsfeld **Civic Technology** werden technologische Entwicklungen in Zukunft nicht nur im öffentlichen Bereich, sondern z. B. auch in der Finanzwirtschaft eine große Wirkung haben. Die Spotlights **Smart Contracts, Reprogramming of Human Cells, Transient Materials** und **Nanocellulose – Nanowood** beurteilen die externen Expertinnen und Experten etwas skeptischer als die Fraunhofer-Expertinnen und -Experten. Deren optimistische Einschätzung zur Lösung zahlreicher technologische Herausforderungen teilen sie nicht vollständig.

Die Interviews mit externen Expertinnen und Experten unterstreichen die Anforderung, bei den Foresight-Aktivitäten die »Sustainable Development Goals« noch stärker ins Zentrum zu rücken und ihre Verknüpfung mit den technologischen Entwicklungen zu vertiefen.

Civic Technology increases the confidence and legitimacy of political citizen participation. Application areas are e. g. publicly accessible development plans or open data maps on air quality and noise levels.

Transient Materials: Transient electronics could make a significant contribution to sustainability and the controlled self-destruction could prevent the misuse of identity documents.

6 PROJEKTHINTERGRUND UND KONZEPTIONELLER ANSATZ

Das Projekt Foresight-Fraunhofer verfolgt im Kern zwei Ziele: Zum einen haben wir Themen identifiziert, die das Potenzial haben, in 10 oder mehr Jahren besondere Relevanz für die angewandte Forschung zu haben. Zum anderen haben wir Methoden erprobt, die zum Bestandteil eines zukünftigen, systematischen Foresight-Prozesses der Fraunhofer-Gesellschaft werden könnten. In der ersten Projektphase (2018) haben wir mögliche Zukunftsthemen identifiziert und bewertet. In der zweiten Projektphase (2019) haben wir die Foresight-Methodik weiterentwickelt.

Ausgangspunkt des Projekts war die Analyse kürzlich abgeschlossener internationaler Foresight-Prozesse, wie das durch die Europäische Union geförderte Projekt RIBRI (Radical Innovation Breakthrough Inquirer²), das 100 Chancen für radikale Innovationen der nächsten 5 bis 20 Jahre identifizierte. Aus den Ergebnissen dieser Projekte und eines zusätzlichen Screenings haben wir eine Auswahl von ca. 300 Themen zusammengestellt. Das interdisziplinäre institutsübergreifende Projektteam verdichtete diese Themen während eines systematischen Selektions- und Bewertungsprozesses auf zunächst 150, dann 100 und schließlich 51 Themen (Abb. 7).

Die Fraunhofer-Gesellschaft nutzt seit über 15 Jahren Foresight-Prozesse, um Zukunftsthemen für die strategische Weiterentwicklung des Forschungsportfolios zu identifizieren. Dabei kamen jeweils unterschiedliche Ansätze zum Einsatz. Alle Prozesse waren darauf ausgelegt, Foresight von Fraunhofer für Fraunhofer zu machen, ohne jedoch die externe Perspektive zu vernachlässigen. 2004 wurden auf der Basis von Foresight-Studien erstmalig 50 Technologien identifiziert und anschließend in einem Expertenworkshop bewertet. Vor 10 Jahren wurde eine große Befragung innerhalb von Fraunhofer genutzt, um Zukunftsthemen zu identifizieren. Wenige Jahre später waren die gesellschaftlichen Herausforderungen, die »Grand Societal Challenges«, der Ausgangspunkt für einen weiteren Fraunhofer-Foresight-Prozess.

² <https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/foresight/projekte/ribri.html>

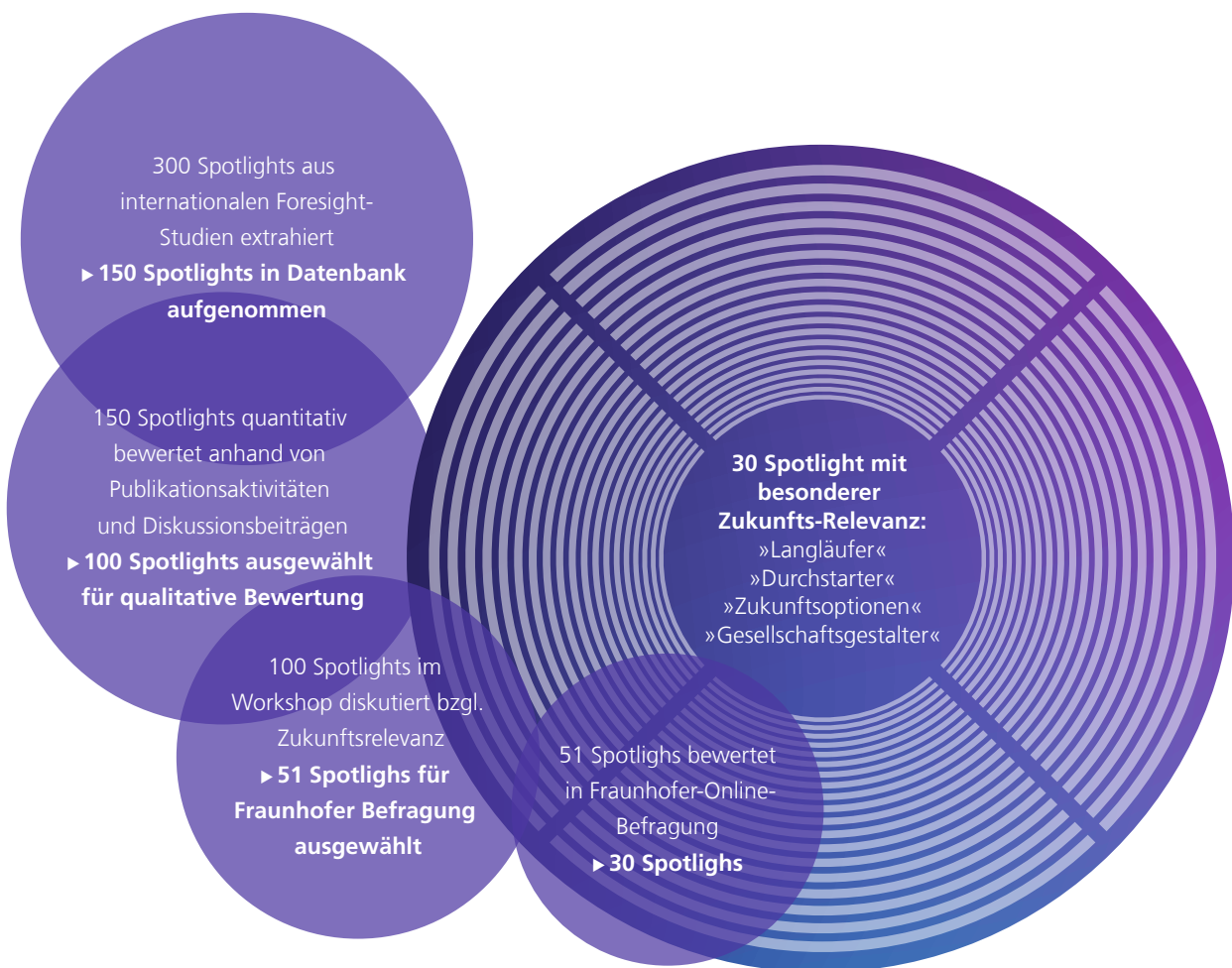


Abbildung 7: Systematischer Selektions- und Bewertungsprozess

Der aktuelle Fraunhofer-Foresight-Zyklus wirft einen systematischen Blick auf technologische und gesellschaftliche Entwicklungen im Außenraum und nutzt besonders umfangreich quantitative Ansätze, um die »Spotlights« zu identifizieren und zu bewerten. Die Einschätzung der Zukunftsrelevanz basiert auf der Breite und Vielfalt der Fraunhofer-Expertise (validiert durch Interviews mit Externen), so dass der neutrale Blick in den Außenraum und die spezifische Perspektive der angewandten Forschung kombiniert werden. Die ganzheitliche, multikriterielle Bewertung der Spotlights, unter Berücksichtigung von wissenschaftlichen Erkenntnissen bezüglich der kognitiven Verzerrungen bei Zukunftserwartungen, erlaubt eine geeignete Typologisierung der 30 identifizierten Spotlights mit spezifischer Zukunftsrelevanz.

ANHANG

Spotlights	Kurze Beschreibung
Artificial Brain	Artificial brain is a brain-like computer system build with physical components that processes and stores information like a human brain. This technology may be used to design computers that function like biological neural networks. As supercomputers reach a huge number of connections, that would allow a level of computing previously unattained and could revolutionize our lives, perhaps even more than the digital revolution.
Artificial Photosynthesis	Artificial photosynthesis is a chemical process that mimics the natural process of photosynthesis by converting sunlight, water, and carbon dioxide into carbohydrates (glucose) and oxygen. In the context of ever increasing fuel consumption and levels of CO ₂ , this field of research focuses on a “win-win” solution inspired by nature: artificial photosynthesis that both reduces CO ₂ level in atmosphere and generates power.
Biohybrid	Biohybrid is the field of science research technologies that combines biological with artificial systems. Biohybrid systems integrate living, biological parts into artificial machines. Biohybrid technologies can be applied in medicine, nanotechnology, brain-machine interface, robotics.
Brain Machine Interface	A brain machine interface (BMI), also known in some incarnations as a mind-machine interface (MMI), direct neural interface (DNI), or brain computer interface (BCI), is a direct communication pathway between the brain and an external device. A BMI can both collect information from and feed it into the brain, for example by restoring a lost sense and enabling the brain to interact with the environment.
Carbon Dioxide Management	Carbon dioxide emissions are considered to drive climate change. To avoid the loss of carbon to the atmosphere, it is captured for storage or further processing at the source of a high carbon dioxide output such as smoke stacks in various industries and carbon-based power plants. Combining direct air capture with carbon storage can fulfill a dual function: as a carbon dioxide removal technology and as a form of climate engineering if deployed at large scale.
Civic Technology	Civic Tech (not to be mixed up with civil tech) refers to applied information technologies that enable government, business, science, associations, and individual citizens to participate in an inclusive discourse. These include platforms, portals, apps, and other software enabling eDemocracy and Open Government in the future.

Spotlights	Kurze Beschreibung
Cyber Reasoning Systems	Cyber Reasoning Systems (CRS) are automated cyber defense systems. Without human support, they find security holes in software and then eliminate them. Accordingly, CRS can be considered as a form of automated cyber defense. Because of the potentially high speed of such automated processes, CRS could generally significantly improve the security of IT systems in the future.
Deep Learning - AI	Deep learning is one of the key technologies in the AI domain. It is one of the machine learning algorithms which is composed of a multi-layer (deep) neural network. Each layer of this network corresponds to different levels of abstraction. Deep neural networks have had amazing successes lately in processing multiple sources of data, including images, video, audio, and to a lesser extent, text.
Digital Division & Inclusion	The progressive digitalisation of everyday life offers great opportunities to create equal conditions for all, one should bear in mind that there could be a division. The digital access simultaneously leads to a changed group access like inclusion and division. At the same time, it could trigger a displacement of global centers of power.
Exploitation of Biodiversity	Biodiversity refers to the total richness of biological variations, including the genetic variations within populations and species, the numbers of species, and the patterns and dynamics of these over large areas. Biodiversity is a relevant source for innovations especially in pharmaceutical research. Furthermore, biodiversity continues to decline on a global scale and has proven much more fragile than initially understood.
Geoengineering Related to Climate	Climate change induced geoengineering comprises the attempts to engineer the climate itself (e. g., greenhouse gas removal and solar radiation management) and the attempts to counteract the effects of climate change by geological engineering of landscapes (e. g., geoengineering of glaciers).
Global Protein Supply	The exploration of alternative protein sources promises potential to meet the growing global demand for food and feed. The current production and the consumption of meat is associated with significant environmental, human health and ethical challenges. Nascent technologies like cellular ag-riculture can provide sustainable solutions to meet these challenges.
Hyperspectral Imaging	Hyperspectral Imaging (HSI) is one of the powerful analytical imaging tools based on the detection of both spatial and spectral information within a single data set referred to as a HSI cube. Hyperspectral imaging creates images across hundreds of wavelengths and can be used to determine materials at a distance. Hyperspectral imaging holds promise for the use in fields ranging from security and defense to environmental monitoring and agriculture.

Spotlights	Kurze Beschreibung
Liquid Biopsy	Liquid biopsy is a quick test for DNA mutation analysis of potential disease markers present in non-solid biological tissue (typically blood, but also urine, saliva, cerebrospinal fluid or other body fluids), either in the form of cell-free DNA (cfDNA) or miRNA fragments, circulating tumor or immune cells, or extracellular vesicles. Liquid biopsy may become the main method of diagnosing cancer as well as provide a fast and easy screening test for detecting diseases and determining their type plus setting a treatment course.
Microbiome	Microbes that are found on our skin and inside the human body form microbiomes that can have both beneficial and harmful effects on human health. The composition of the microbiome can be very different from one person to the next. Microbiomes play a crucial role in human health. Intestinal bacteria are being able to directly alter the activity of our genes. Future therapeutics will provide options for mental and physical conditions such as depression, pre-diabetes, and type II diabetes.
Nanocellulose - Nanowood	Materials obtained from nanocellulose fibers might replace an entire range of polymers in different industries. These materials can be applied in nanocomposites, films and foams, surface modifications, and medical devices. One especially interesting material is nanowood that is stronger than titanium alloys and at the same time lighter. It can be used for cars, airplanes, or buildings.
Neuromorphic Chip	The best AI algorithms already use brain-like programs called simulated neural networks, which rely on parallel processing to recognize patterns in data, including objects in images and words in speech. Neuromorphic chips take this idea further by etching the workings of neural networks into silicon. Neuromorphic chips could be used wherever real-world data needs to be processed in real-time environments such as smarter security cameras, real-time communication with autonomous vehicles, or glasses for the blind that use visual and auditory sensors to recognize objects and provide audio cues.
Optoelectronics	Optoelectronics is a subfield of photonics which is focused on combining electronics and light to transmit data. Further research in optoelectronics will open the way to the commercialization of 5D data storage. With a new type of transistors based on excitons, it would be possible to integrate optical transmission and electronic data-processing systems into the same device.
Organ on a Chip	An organ-on-a-chip is a multi-channel 3D microfluidic cell culture that simulates the activities, mechanics, physiological response of entire organs and organ systems. An organ-on-a-chip is a type of an artificial organ. One day, they will perhaps abolish the need for animals in drug development and toxin testing.

Spotlights	Kurze Beschreibung
pHealth	The basis of the pHealth model is the evaluation of extensive data sets ranging from everyday behavior patterns to molecular person profiles. Personalized health is not only aimed at pharmaceutical products, it covers health from research to patient care. Some approaches to pHealth are already being applied in practice, e. g., in the fields of predictive genetic diagnostics, pharmacogenetics, or oncology.
Post-Quantum Cryptography	The global encryption standards would fail in minutes after the appearance of quantum computers because all the information, encrypted using prime factorization problem, could be then cracked easily. Post-quantum cryptography assumes that the attacker has a quantum computer and strives to remain secure against post-quantum hacking. New global encryption standards are being discussed for the quantum communication Internet of the future.
Quantum Communication	Quantum communication is the transmission of the information encrypted into the quantum states of particles from one place to another. It is a field of applied quantum physics, which relies on the principle of quantum mechanics, entanglement, and superposition. The information transmitted through quantum communications is impossible to intercept or crack. Quantum communication opens a new page in the development of future global communication networks and it is a big boost to the space industry.
Quantum Computers	Quantum computers are based on the quantum mechanics principles and work instead with quantum-bits or qubits. IBM, Google, and Intel are making progress on quantum hardware. Quantum computers will be able to solve new classes of problems that are not able to be solved by today's supercomputers. The changes this will bring will be far-reaching, revolutionally, and hard to predict.
Re-Economy: Reduce, Reuse, Recycle	The aim of recycling management is to reduce the raw material consumption by using less resources for products and services and by preserving the value of products and components at the end of their useful life as optimal as possible through "Reduce, Reuse, Recycle«. Proponents of the circular economy envisage a world where production and consumption systems are waste free. Concepts like »cradle2cradle« expect that artefacts would be either endlessly reused or decomposed organically.
Reprogramming of Human Cells	Over a decade ago, scientists learned how to reprogram human adult cells into cells that behave like embryonic stem cells. These cells are called induced pluripotent stem cells (iPSCs). Researchers now create iPSCs from a patient's blood or skin cells and use these patient-specific cells to study diseases or even create new tissues that could be transplanted back into the patient as a therapy.

Spotlights	Kurze Beschreibung
Small Energy Harvesting	Energy harvesting is the capture and conversion of small amounts of readily available energy in the environment into a usable electrical energy. Energy harvesting systems could prolong the life of self-powered medical implants or battery-free wearables. They could be used in smart clothes, install-and-forget home automations, IoT devices, and many other applications requiring only small amounts of energy with zero maintenance.
Smart Contracts	A smart contract is a digital version or an algorithmic protocol of a treaty between two parties. The relatively young method is based on the blockchain concept. The codes operate depending on relevant parameters, following a set of fixed rules, and is therefore able to enforce agreed rights or sanctions automatically. Smart contracts offer great potential in particular for cooperation in B2B markets.
Soft Robots	Soft Robots are robots built from highly compliant materials, similar to those found in living organisms. In the application domains such as medical and personal co-robotics, soft robots will allow for safe and biomechanically compatible interactions with humans. Miniature soft robots promise to help in medical applications such as drug delivery and surgery.
Transient Materials	Transient materials are full-featured materials and components that terminate clean of residuals under specific conditions and in a controlled way. They differ from conventionally degrading materials primarily by their precisely determined process of self-dissolution that is controlled by a trigger. Normally, their compounds dissolve relatively easy under physical, chemical, or biological conditions and decay to physiologically and ecologically harmless breakdown products. A wide variety of implementations could be in electronics, medicine, and security technology.
Water Harvesting Membranes	Water filtration on a nanoscale for desalination, direct solar desalination and atmospheric water generation (AWG) are examples for technologies making use of new materials to contribute to the supply of fresh water in regions where it is a scarce resource. Passive systems and self-cleaning membranes will be a precondition for large-scale use.

Herausgeber

Fraunhofer-Gesellschaft

Redaktion

Elna Schirrmeister, Fraunhofer ISI
Cornelia Reimoser, Fraunhofer-Gesellschaft
Forschungskoordination

Projektteam (Autoren)

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Walter Ganz (Projektkoordination),
Sibylle Hermann (Projektkoordination),
Dr. Antonino Ardilio, Lukas Keicher,
Alexander Schletz

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Elna Schirrmeister (Projektkoordination),
Dr. Svetlana Meissner, Spomenka Maloca,
Dr. Björn Moller

Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT

Dr. Miloš Jovanović, Dr. Anna Julia Schulte,
Dr. Matthias Grüne, Dr. René Bantes

Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW

Dr. Juliane Welz, Annamaria Riemer,
Inga Döbel

Fachliche Unterstützung

Dr. Bernhard Assmus, Fraunhofer-Gesellschaft Think Tank
Dr. Lothar Behlau, Fraunhofer-Gesellschaft Agenda
Fraunhofer 2022

Interview-Partner

Wir bedanken uns bei allen Expertinnen und Experten, die an den Interviews teilgenommen haben.

Dr. Anne-Marie Brouwer, TNO | Marco Raffaele Cosenza, Ph.D., Deutsches Krebsforschungszentrum DKFZ | Dr. Tobias Erb, Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie | Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH & Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften | Prof. Dr. Armin Grunwald, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse ITAS | Prof. Dr. Dr. med. Jens K. Habermann, Universität zu Lübeck and UKSH, Interdisciplinary Center for Bio-banking-Lübeck and Section for Translational Surgical Oncology and Bio-banking, Department of Surgery | Reinhard Karger, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH DFKI | Dr. Bastian Pelka, Technische Universität Dortmund, Sozialforschungsstelle Dortmund | Prof. Dr. med. Christian Sina, Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Institut für Ernährungsmedizin | Prof. Dr. Stefan Töpfl, Hochschule Osnabrück | Prof. Dr. Kurt Wagemann, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

URN-Nummer

urn:nbn:de:0011-n-5410031

Online verfügbar als Fraunhofer-ePrint

<http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-541003.html>

Lektorat

Dr. Jacob Leidenberger, Fraunhofer ISI
Gitta Rohling, TECH TALKS

Titelbild

Markus Jürgens, Fraunhofer

Satz und Layout Abbildungen

Franz Schneider, Fraunhofer IAO

