

DIE BEDEUTUNG DER CHEMIEINDUSTRIE IM DEUTSCHEN INNOVATIONSSYSTEM

Studie im Auftrag des Verbandes
der Chemischen Industrie e. V.

ZEW



Fraunhofer
ISI

Mannheim und Karlsruhe, September 2024

Zur besseren Lesbarkeit wird in diesem Dokument für Personenbezeichnungen der Einfachheit halber nur die männliche Sprachform verwendet. Die weibliche Sprachform ist selbstverständlich immer mit eingeschlossen.

Autoren:

ZEW: Christian Rammer

ISI: Rainer Frietsch
Christoph Neeg
Thomas Schmalz

Kontakt und weitere Informationen:

Dr. Christian Rammer
Forschungsbereich Innovationsökonomik und
Unternehmensdynamik
ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische
Wirtschaftsforschung GmbH Mannheim
L 7,1
68161 Mannheim
Tel: +49 (0) 621 1235 184
E-Mail: rammer@zew.de

Dr. Rainer Frietsch
Competence Centers Innovations- und
Wissensökonomie
Fraunhofer-Institut für System- und
Innovationsforschung (ISI)
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Tel: +49 (0) 721 6809 197
E-Mail: Rainer.Frietsch@isi.fraunhofer.de

Die Bedeutung der Chemieindustrie im deutschen Innovationssystem

Position im Innovationssystem

- Die Chemie positioniert sich im Innovationssystem als zentrale Quelle für neue Materialien, die die stoffliche Basis für Innovationen bilden.
- Die Chemieindustrie ist in vielen Anwendungsgebieten der mit Abstand wichtigste Lieferant von Materialinnovationen, z.B. Nahrungsmittel, Pharma, Halbleiter, Messtechnik/Optik, Medizintechnik und Umwelttechnik.
- 60 % der gesamten FuE zu Materialtechnologien in der deutschen Wirtschaft erfolgt durch die Chemieindustrie.
- Der Chemie-Anteil an der gesamten Materialtechnologie-FuE ist in Deutschland doppelt so hoch wie im globalen Durchschnitt.
- Innovationen aus der Chemieindustrie unterstützen die Innovationsleistung in vielen anderen Branchen.
- Chemie-Technologien sind der wichtigste externe Impulsgeber für Innovationen im Bereich Pharma, Energie/Wasser/Entsorgung, Konsumgüter und Elektronik.
- Chemie-Unternehmen befassen sich mit technologischen Lösungen in den Anwendungsgebieten ihrer Kundenbranchen, gleichzeitig befassen sich die Kundenbranchen selbst mit Neu- und Weiterentwicklung zu Chemietechnologien.

Beitrag zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen

- Chemie-Technologien sind eine unverzichtbare Basis für neue technologische Lösungen zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele (Social Development Goals - SDG): 29 % aller Patente zu SDG-Zielen haben einen Chemie-Bezug.
- Die Chemie bei vier SDG die wichtigste Technologiequelle: "sauberes Wasser und Sanitär-Einrichtungen", "Gesundheit und Wohlergehen", "Klimaschutz" und "kein Hunger".
- Fallbeispiel Batterie: Fortschritte in der Batterietechnik führten zu erheblichen Verbesserungen in der Elektromobilität und der Speicherung erneuerbarer Energien.
- Fallbeispiel Halbleiter: Chemische Ausgangsstoffe unverzichtbar für Produktinnovationen und hochkomplexe Produktionsverfahren.
- Fallbeispiel chemisches Recycling: Thermochemische und Solvolyseverfahren Voraussetzung für eine Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen.

Innovationsleistung

- Die FuE-Intensität der deutschen Chemieindustrie ist mit 2,2 % im internationalen Vergleich überdurchschnittlich hoch.
- Die deutschen Chemiekonzerne lagen 2022 bei den FuE-Ausgaben weltweit an erster Stelle.

- Die forschungsstarke und global orientierte deutsche Chemieindustrie ist ein Standortvorteil für das deutsche Innovationssystem, da sie für einen rascher Transfer neuer Materialtechnologien in die industrielle Anwendung sorgt.
- Eine enge Vernetzung der Chemieindustrie mit der Wissenschaft sorgt für einen Transfer wissenschaftlicher Forschungsergebnisse.
- Das Verhältnis von Innovationserträgen und -ausgaben ist in der Chemie ungünstiger als in anderen Branchen. Dies liegt an langen Entwicklungszeiträumen und Produktzyklen sowie aufwendigen Entwicklungsprozessen.

Rahmenbedingungen für innovative Chemie

- Die Unternehmen der Chemieindustrie sind häufiger von Innovationshemmnissen betroffen als Unternehmen in anderen Branchen - dies spiegelt u.a. den höheren Innovationsanspruch und die risikoreicheren Innovationsvorhaben wider.
- Der Fachkräftemangel ist das Innovationshemmnis Nr. 1. Weitere häufig auftretende Hemmnisse sind hohe Kosten, hohes Risiko und gesetzliche Regelungen.
- Hohes Risiko, hohe Kosten und Wissensabflüsse zu anderen Unternehmen rechtfertigen eine staatliche Ko-Finanzierung von FuE. Der staatliche FuE-Finanzierungsanteil liegt in der deutschen Chemieindustrie aber nur bei 1,4 %.
- Viele innovative KMU in der Chemieindustrie führen ihre Innovationsvorhaben ohne staatliche Finanzierungshilfen durch.
- Das neue Förderinstrument der Forschungszulage (FZul, d.h. die steuerliche FuE-Förderung) wird zunehmend genutzt und bringt den Unternehmen eine höhere Flexibilität beim Einsatz staatlicher Finanzierungshilfen.
- In der Chemieindustrie liegt die Bewilligungsquote von Anträgen zur FZul bei 91 %, damit bietet die FZul eine hohe Planungssicherheit.

Innovationspolitische Schlussfolgerungen

- FuE-Förderung in der Chemieindustrie wegen ungünstiger Aufwand-Ertrag-Relation und engen Wissenschaftskooperationen wichtig.
- Sicherung einer innovativen Chemie als eine Säule des deutschen Innovationssystems, indem eine möglichst breite Palette an industriellen Chemie-Aktivitäten am Standort Deutschland erhalten wird.
- Chemie-Technologien als zentrale Grundlage für die Erreichung der SDG fördern.
- Abbau von Innovationshemmnissen, insbesondere im Bereich Fachkräftemangel, Regulierung und Bürokratie.
- Innovationsförderung jenseits finanzieller Hilfen, z.B. Reallabore als Experimentierräume für neue Lösungen, in denen Chemie, Wissenschaft und Anwendern zusammenarbeiten.

The Importance of the Chemical Industry for the German Innovation System

Position in the Innovation System

- Chemistry positions itself in the innovation system as a central source for new materials that form the material basis for innovations.
- The chemical industry is by far the most important supplier of material innovations in many application areas, e.g. food, pharmaceuticals, semiconductors, measurement technology/optics, medical technology and environmental technology.
- 60% of the total R&D on materials technologies in the German economy is carried out by the chemical industry.
- The chemical share of total material technology R&D in Germany is twice as high as the global average.
- Innovations from the chemical industry support innovation performance in many other industries.
- Chemical technologies are the most important external stimulus for innovations in the areas of pharmaceuticals, energy/water/disposal, consumer goods and electronics.
- Chemical companies deal with technological solutions in the application areas of their customer industries, while at the same time the customer industries themselves deal with new and further developments in chemical technologies.

Contribution to Solving Social Challenges

- Chemical technologies are an indispensable basis for new technological solutions to achieve the sustainability goals (Social Development Goals - SDGs): 29% of all patents related to SDG goals are related to chemistry.
- Chemistry is the most important source of technology in four SDGs: "clean water and sanitation", "health and well-being", "climate protection" and "no hunger".
- Battery case study: Advances in battery chemistry have led to significant improvements in electromobility and the storage of renewable energies.
- Semiconductor case study: Chemical starting materials essential for product innovations and highly complex production processes.
- Case study of chemical recycling: Thermochemical and solvolysis processes are a prerequisite for a circular economy for plastics.

Innovation Performance

- The R&D intensity of the German chemical industry (2.2%) is above the global average.
- German chemical companies ranked first in the world in R&D spending in 2022.

- The research-intensive and globally oriented German chemical industry is a location advantage for the German innovation system, as it ensures the rapid transfer of new material technologies into industrial applications.
- Close networking between the chemical industry and science ensures the transfer of scientific research results.
- The relationship between innovation income and expenditure is less favorable in chemistry than in other industries. This is due to long development periods and product cycles as well as complex development processes.

Framework Conditions for an Innovative Chemistry

- Companies in the chemical industry are more often affected by barriers to innovation than companies in other sectors - this reflects, among other things, the higher innovation standards and the riskier innovation projects.
- The shortage of skilled workers is the No. 1 obstacle to innovation. Other frequently occurring obstacles are high costs, high risk and legal regulations.
- High risk, high costs and knowledge leakage to other companies justify state co-financing of R&D. Nevertheless, state R&D funding only contributes 1.4% to total R&D financing in the German chemical industry.
- Many innovative SMEs in the chemical industry carry out their innovation projects without government financial support.
- The new funding instrument of the research allowance (FZul, i.e. tax support for R&D) is being used increasingly and gives companies greater flexibility when using state financing aid.
- In the chemical industry, the approval rate for applications for the FZul is 91%, so the FZul offers a high level of planning security.

Innovation Policy Conclusions

- Public R&D support in the chemical industry is important because of the unfavorable cost-income ratio and close collaboration with science.
- Securing innovative chemistry as a pillar of the German innovation system by maintaining the widest possible range of industrial chemistry activities in Germany.
- Promote chemical technologies as a central basis for achieving the Social Development Goals.
- Reducing barriers to innovation, especially in the areas of skills shortages, regulation and bureaucracy.
- Promoting innovation beyond financial support, e.g. real laboratories as experimental spaces for new solutions in which chemistry, science and users work together.

Inhalt

1	Einleitung	6
2	Innovationskraft der deutschen Chemieindustrie.....	8
3	Innovationsbeiträge der Chemie zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen	19
	Fallbeispiel 1: Innovationen der Batteriechemie	22
	Fallbeispiel 2: Chemie-Innovationen für Halbleitertechnologien	24
	Fallbeispiel 3: Chemisches Recycling als Beitrag zur Kreislaufwirtschaft.....	27
4	Nutzung von Chemie-Innovationen in anderen Branchen.....	30
5	Rahmenbedingungen für eine innovative Chemieindustrie in Deutschland	36

1 Einleitung

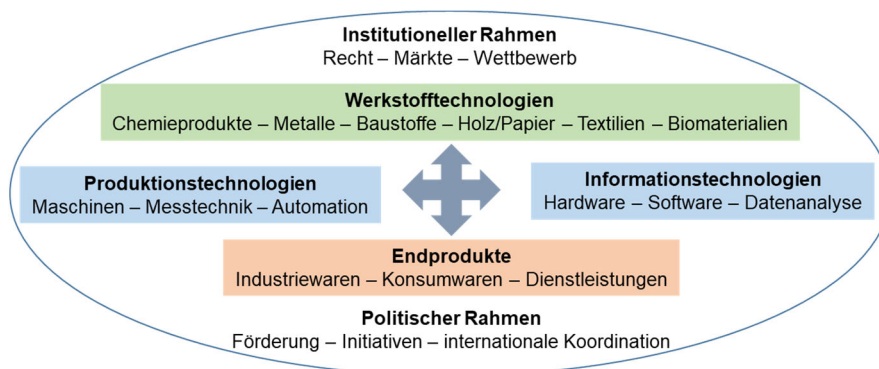
Zukunftsfähigkeit Deutschlands hängt an Innovationen

Die Studie untersucht die Bedeutung einer innovativen Chemie für die Zukunftsfähigkeit der deutschen Volkswirtschaft. Diese Zukunftsfähigkeit hängt ganz wesentlich davon ab, wie gut sich Deutschland im internationalen Innovationswettbewerb behaupten kann und inwieweit es durch neue Produkte, effiziente Prozesse und attraktive Geschäftsmodelle Wertschöpfung und Beschäftigung generiert. Um Neuerungen hervorzubringen und in volkswirtschaftliche Ergebnisse umzusetzen, ist das Zusammenspiel vieler Faktoren und Akteure notwendig. Zwei Perspektiven sind dabei zentral: eine sektoral-technologische und eine prozessorientierte.

Chemie zentrale Quelle für neue Werkstoffe

In einer **sektoral-technologischen Perspektive** geht es um das Ineinandergreifen verschiedener Branchen und Technologien, um Innovationen zu realisieren. Bei einer Innovation geht es stets darum, eine neue Lösung zu finden, die besser ist als der aktuelle Stand. In einer Welt, in der man sich schon bisher sehr bemüht hat, die technologische Entwicklung immer weiter voranzutreiben und Verbesserungspotenziale zu identifizieren und zu heben, sind weitere Verbesserungen alles andere als trivial. In der Regel ist es notwendig, Wissen und Technologien aus unterschiedlichen Bereichen klug zu kombinieren, um neue Innovationsmöglichkeiten zu erschließen. Dabei sind fast immer Inputs aus vier Quellen notwendig: Werkstoffe, Herstellungsverfahren, Informationstechnologien und die Marktanforderungen. Die Chemie positioniert sich in diesem System als zentrale Quelle für neue Werkstoffe, welche die stoffliche Basis für Innovationen darstellen. Damit das Zusammenwirken zwischen den verschiedenen sektoralen und technologischen Innovationsquellen funktioniert, ist zum einen ein geeigneter institutioneller Rahmen notwendig, der von einer zielgerichteten Rechtsetzung über funktionierende Faktor- und Gütermärkte bis zu einem fairen Wettbewerb reicht. Zum anderen ist ein politischer Rahmen notwendig, der über Fördermaßnahmen, Politikinitiativen und internationale Koordination die Innovationstätigkeit der Unternehmen unterstützt.

Innovationssystem aus einer sektoral-technologischen Perspektive



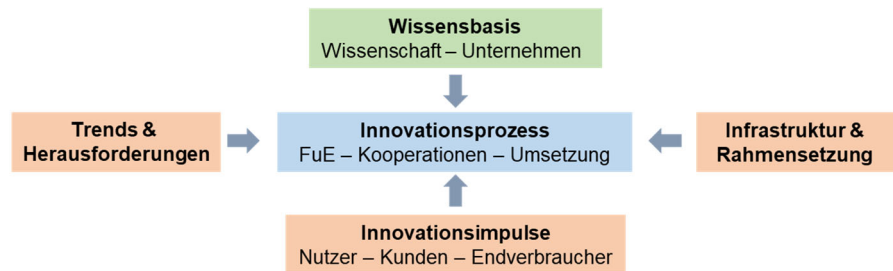
Quelle: ZEW und ISI

Chemie ist Innovator und stellt Wissen für Innovationen in anderen Branchen bereit

Aus einer **Prozessperspektive** erfordern Innovationen das Zusammenführen der vorhandenen Wissensbasis mit nutzerseitigen Innovationsimpulsen sowie wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Trends und Herausforderungen - unter Einrechnung der spezifischen Rahmenbedingungen, die sich u.a. durch die infrastrukturelle und regulative Situation ergeben. In diesem Prozess sind von den Innovationsakteuren, d.h. den Unternehmen, sowohl eigene Forschungs- und Entwicklungs- (FuE-) Aktivitäten notwendig als auch die Zusammenarbeit mit Innovationspartnern und die Umsetzung der im Innovationsprozess erarbeiteten innovativen Ansätze in marktfähige Produkte und Prozesse. Die Rolle der Chemie im Innovationsprozess ist dabei eine doppelte: Zum einen entwickelt sie selbst

vielfältige innovative Lösungen, aufbauend auf neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen und oft in enger Kooperation mit Wissenschaftseinrichtungen und Kunden. Zum anderen ist sie Innovationspartner von anderen Unternehmen und stellt eine wesentliche Wissensbasis für Innovationen in anderen Branchen, Technologiefeldern und Anwendungsgebieten bereit.

Innovationssystem aus einer Prozess-Perspektive



Quelle: ZEW und ISI

Um den Beitrag der Chemieindustrie zur Innovationsfähigkeit der deutschen Wirtschaft darzustellen, sind vier Aspekte relevant, die in dieser Studie untersucht werden:

Vier Indikatorengruppen:

Innovationskraft

Innovationsbeiträge zu gesellschaftlichen Herausforderungen

Nutzung von Chemie-Innovationen in anderen Branchen

Rahmenbedingungen für eine innovative Chemieindustrie

1. Die eigene **Innovationskraft** der deutschen Chemieindustrie ist die Grundlage dafür, dass die Chemie ihre Rolle im Innovationssystem einnehmen kann. Hier spielen die Entwicklung der FuE-Kapazitäten der Chemieindustrie, die Hervorbringung neuen technischen Wissens, die Zusammenarbeit mit der Wissenschaft sowie die internationale Position der deutschen Chemieindustrie bei FuE eine zentrale Rolle. Schließlich sind auch Chemie-Startups, also innovative Unternehmensgründungen, ein wichtiges Element im Innovationsgeschehen in der Chemieindustrie.
2. Die **Innovationsbeiträge** der Chemie zur Lösung **gesellschaftlicher Herausforderungen** zeigen an, in welchem Ausmaß und in welchen Bereichen innovative Lösungen aus der Chemie benötigt werden, um Antworten auf die drängenden wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Fragen zu geben.
3. Die **Nutzung von Chemie-Innovationen** in anderen Branchen zeigt an, in welchen Wirtschaftszweigen und Anwendungsgebieten auf Neuerungen aus der Chemie zurückgegriffen wird, um Innovationen voranzubringen.
4. Die **Rahmenbedingungen** für eine innovative Chemieindustrie in Deutschland beschreiben das Umfeld, in dem die Chemieunternehmen Innovationen hervorbringen und umsetzen. Dieses lässt sich u.a. anhand der auftretenden Innovationshemmnisse beschreiben. Eine wichtige Rahmenbedingung sind die Maßnahmen des Staates, um Innovationen zu unterstützen.

Ergänzende Fallbeispiele

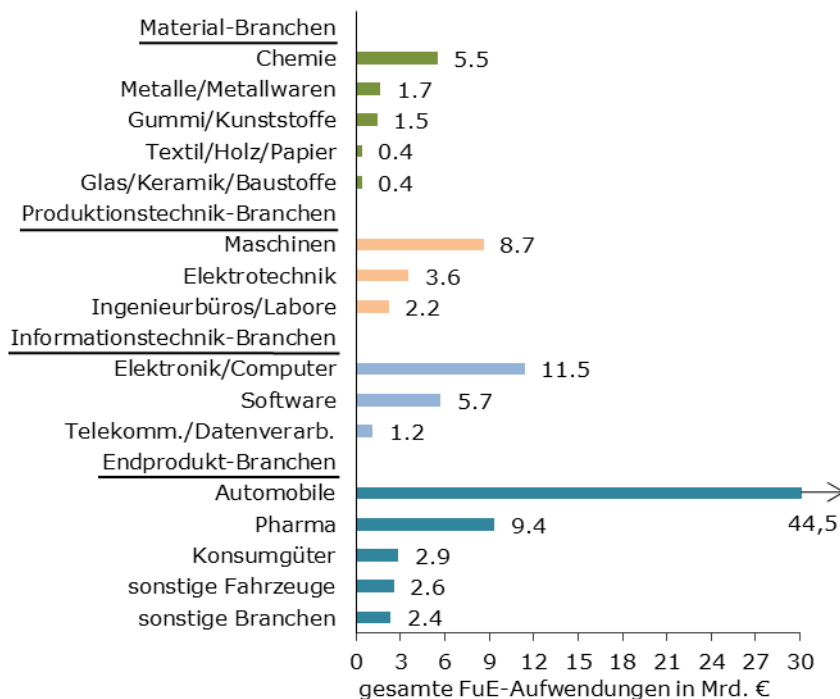
Die Studie beruht im Wesentlichen auf einem **indikatorbasierten Ansatz**. Darüber hinaus illustrieren **Fallbeispiele** die Bedeutung der Chemie für Innovationen, die gesellschaftlichen Herausforderungen adressieren und die Innovationsmöglichkeiten anderer Branchen stärken.

2 Innovationskraft der deutschen Chemieindustrie

60 % der gesamten Materialtechnologie-FuE in der Chemieindustrie

Die Chemieindustrie zählt mit FuE-Ausgaben von rund 5,5 Mrd. € im Jahr 2022 (interne + externe Ausgaben) mit großem Abstand zum **forschungsstärksten Wirtschaftszweig** innerhalb der Branchen, die den **Materialtechnologien** zuzurechnen sind. Alle anderen Material-Branchen kommen zusammen auf FuE-Ausgaben von 3,9 Mrd. €. Damit stellt die Chemieindustrie rund 60 % der gesamten FuE-Ausgaben im Bereich Materialtechnologien von insgesamt 9,4 Mrd. €. Ein Vergleich mit den FuE-Ausgaben von Branchen, die an anderen Stellen der Innovationskette positioniert sind, ist wenig aussagekräftig, da sich die Höhe der FuE-Ausgaben nach den spezifischen Innovationsmöglichkeiten und -anforderungen richtet. In den Branchen im Bereich Produktionstechnik wurden 2022 rund 14,5 Mrd. € für FuE-Aktivitäten bereitgestellt und in den informationstechnologischen Branchen 18,3 Mrd. €. Die mit Abstand höchsten FuE-Ausgaben finden in den Endprodukt-Branchen statt. Hier liegt der Automobilbau mit 44,5 Mrd. € klar voran, gefolgt von der Pharmaindustrie mit 9,4 Mrd. €.

FuE-Ausgaben von Branchen¹⁾ in Deutschland 2022 nach ihrer sektoral-technologischen Position im Innovationssystem



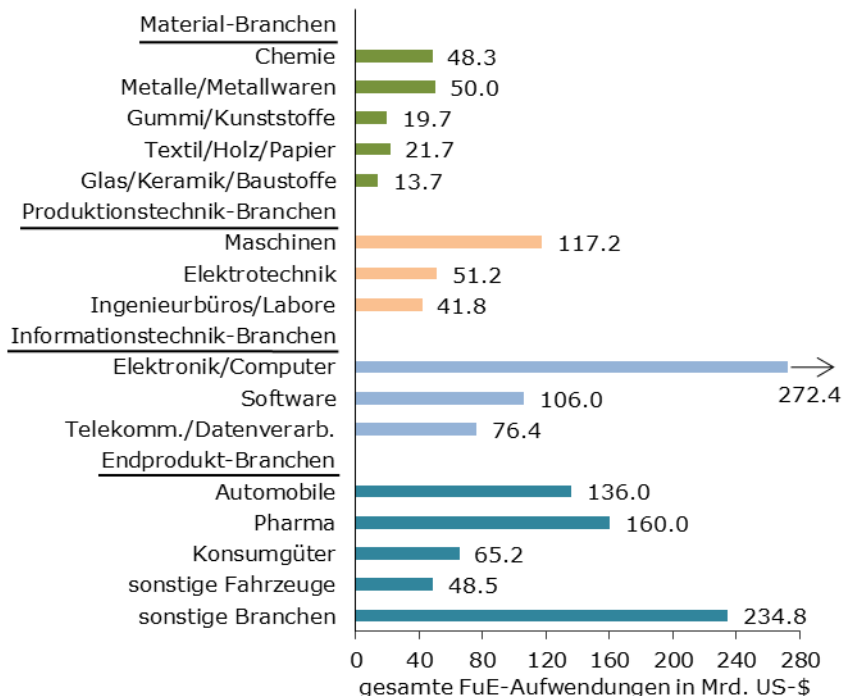
Chemie-Anteil an Materialtechnologie-FuE in Deutschland doppelt so hoch

Im **internationalen Vergleich** ist die Bedeutung der Chemie innerhalb der FuE-Ausgaben in Material-Branchen merklich geringer. Hier liegen die FuE-Ausgaben der Chemie gleichauf mit jenen der Metall-Branchen und machen nur rund 30 % der gesamten weltweiten FuE-Ausgaben von Material-Branchen aus. Dieses Ergebnis unterstreicht die **besondere Bedeutung der Chemie für das deutsche Innovationssystem**. Die hohe FuE-Leistung der deutschen Chemieindustrie bedeutet für die nachgelagerten Branchen, dass ein starker Partner für chemie-basierte Innovationen vor Ort verfügbar ist. Die umfangreichen FuE-Ergebnisse der deutschen Chemieindustrie bieten einen wichtigen "Technologie-Pool", aus dem sich andere Branchen bedienen können.

Die globale Betrachtung zeigt außerdem, dass die große **Dominanz des Automobilbaus** im Bereich der **Endprodukte-Branchen** ein spezifisch deutsches Phänomen ist. Während in Deutschland über 70 % der FuE in diesen Branchen aus dem Automobilbau stammt, sind es weltweit betrachtet nur rund

20 %. Global gesehen spielen Dienstleistungen im Bereich der Endprodukt-Branchen eine weitaus größere Rolle - ebenso wie die Elektronik- und Computer-Branche. Für die global aufgestellte deutsche Chemieindustrie bedeutet dies, sich mit ihren Innovationsbeiträgen nicht zu stark auf den Automobilbau als Abnehmerbranche zu fokussieren, da weltweit viele andere Branchen ein größeres Gewicht als Innovationspartner besitzen.

FuE-Ausgaben von Branchen¹⁾ weltweit²⁾ 2021 nach ihrer sektoral-technologischen Position im Innovationssystem



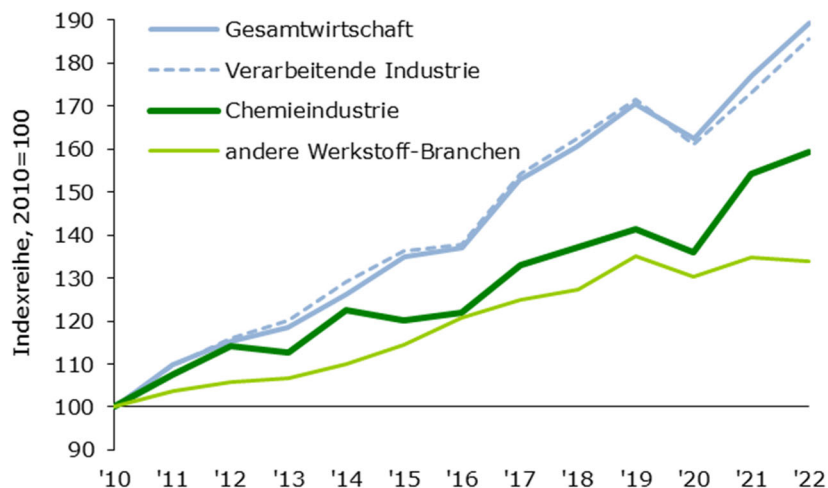
1) ohne FuE-Ausgaben in der Branchen FuE-Dienstleistungen (WZ 72). "Konsumgüter" inkl. Land- und Forstwirtschaft, "sonstige Branchen": Energie, Bergbau, Entsorgung und Baugewerbe, Handel, Transport, sonstige Dienstleistungen.
2) AT, BE, BG, CA, CH, CN, CZ DE, DK, ES, EE, FI, GB, GR, HR, HU, IE, IL, IS, IT, JP, KR, LT, LV, MX, NL, NO, PO, PT, RO, SG, SI, SK, SW, TR, TW, US

Quelle: OECD, ANBERD-Datenbank – Berechnungen des ZEW

Unterdurchschnittliche FuE-Dynamik

Die **Entwicklung der FuE-Ausgaben** in der Chemieindustrie im Zeitraum 2010-2022 blieb **hinter der FuE-Dynamik in der deutschen Wirtschaft** insgesamt zurück. Die nominellen FuE-Ausgaben lagen 2022 um knapp 60 % über dem Niveau von 2010. In der Gesamtwirtschaft lag das Ausgabenniveau um knapp 90 % über dem Ausgangswert in 2010. Treiber der höheren Dynamik in der Gesamtwirtschaft waren primär der Automobilbau und die Softwareindustrie. Im Vergleich zu anderen Branchen im Bereich der Materialtechnologien war die FuE-Ausgabendynamik in der Chemie dagegen deutlich höher. Hierfür sind insbesondere die Ausgabensteigerungen in den Jahren 2021 und 2022 verantwortlich.

Entwicklung der gesamten FuE-Ausgaben¹⁾ in der Chemieindustrie in Deutschland 2010-2022 im Vergleich



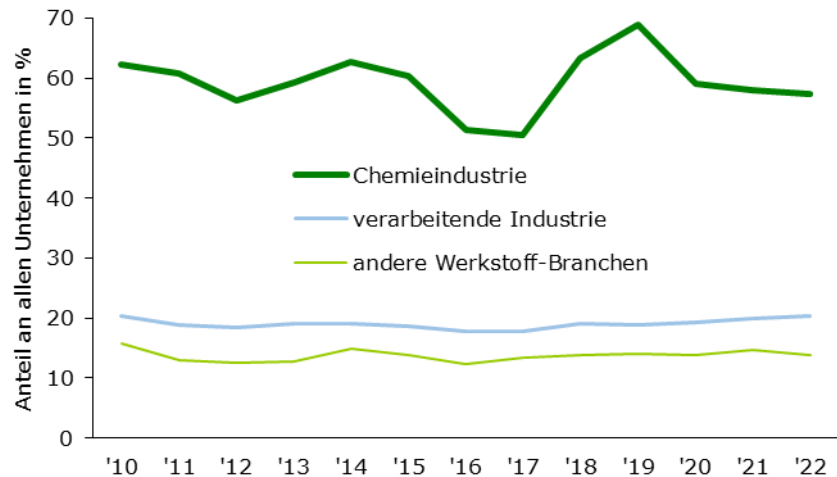
1) interne plus externe FuE-Ausgaben

Quelle: Wissenschaftsstatistik Stifterverband – Berechnungen des ZEW

Sehr hohe FuE-Orientierung auch bei kleinen Unternehmen

Ein besonderes Merkmal der Chemieindustrie ist der hohe Anteil der Unternehmen, die **kontinuierlich FuE** betreiben. Er liegt in jedem Jahr bei über 50 % und erreichte im Jahr 2022 fast 60 %. Dies ist erheblich mehr als in der Industrie insgesamt (ca. 20 %) und in den anderen Materialtechnologie-Branchen (ca. 15 %). Dies bedeutet, dass auch die kleineren Chemieunternehmen sich systematisch mit der Entwicklung neuer technischer Lösungen befassen und hierfür auch entsprechende Strukturen (FuE-Abteilungen, Labore) vorhalten.

Anteil Unternehmen mit kontinuierlicher FuE in der deutschen Chemieindustrie 2010-2022 im Vergleich

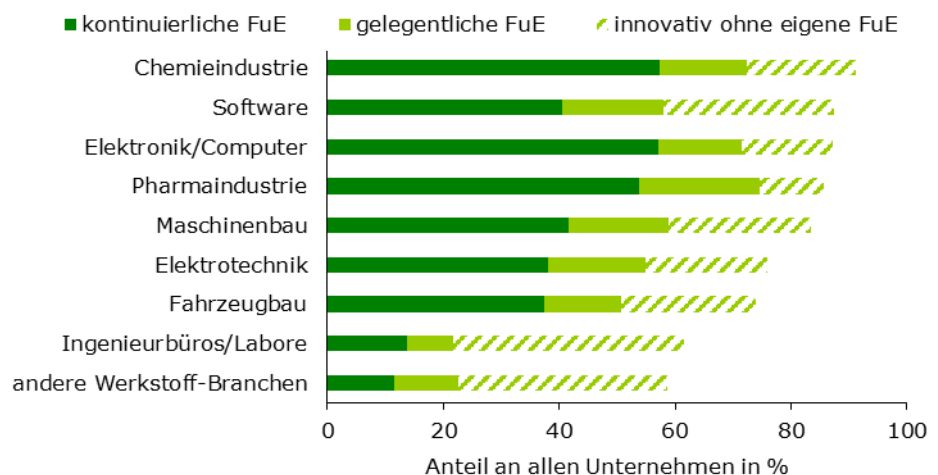


Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel

Höchster Anteil von innovativ tätigen Unternehmen

Im Branchenvergleich lag die Chemieindustrie im Jahr 2022 beim Anteil der **Unternehmen mit Innovationsaktivitäten** an erster Stelle. 91 % der Chemieunternehmen befassen sich mit der Entwicklung oder Einführung neuer Produkte oder Verfahren. 57 % verbanden dies mit kontinuierlicher FuE-Tätigkeit, 15 % mit gelegentlicher FuE-Tätigkeit, und 19 % waren innovativ tätig, ohne unternehmensintern FuE zu betreiben.

Anteil innovationsaktiver Unternehmen in Deutschland 2022 im Branchenvergleich



Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel

6,5 % der Chemie-Beschäftigten arbeiten in FuE

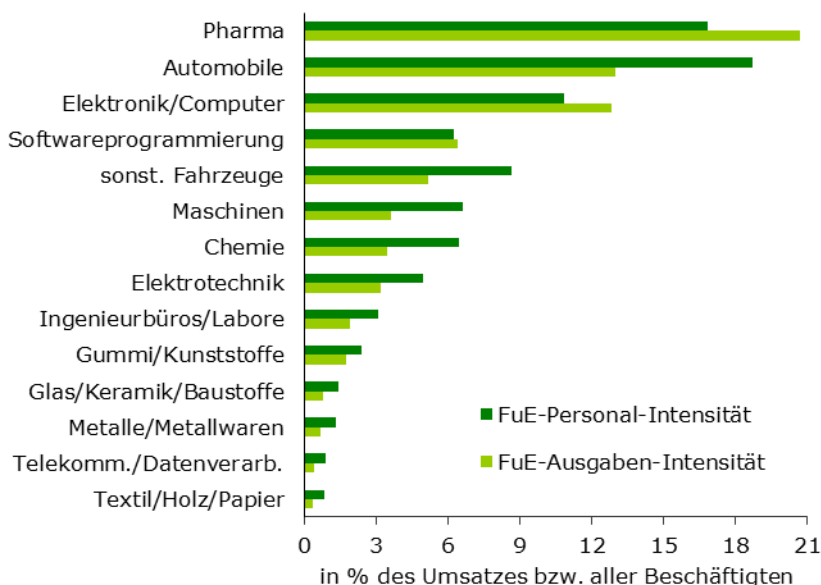
Ein weiterer Indikator für die Innovationskraft einer Branche ist die **FuE-Intensität**. Sie setzt den Umfang der FuE-Aktivitäten in Relation zu den gesamten Aktivitäten einer Branche. Misst man die gesamten FuE-Ausgaben am Branchenumsatz, so liegt die Chemieindustrie mit einer FuE-Ausgaben-Intensität von 3,5 % im Mittelfeld. Der relativ niedrige Wert liegt an dem hohen Vorleistungsanteil am Umsatz, d.h. ein großer Teil des Umsatzes der Chemie besteht aus Vorleistungen (Rohstoffe, Energie, Basismaterialien). In anderen Branchen wie z.B. Pharma, Elektronik oder Software ist dieser Vorleistungsanteil deutlich niedriger. Betrachtet man dagegen die FuE-Personal-Intensität

(Anteil des FuE-Personals an allen Beschäftigten), liegt die Chemieindustrie mit einem Wert von 6,5 % deutlich näher an anderen Technologiebranchen.

FuE-Intensität ausgewählter Branchen in Deutschland 2022

FuE-Ausgaben-Intensität: gesamte FuE-Ausgaben in % des Umsatzes aus eigenen Erzeugnissen
FuE-Personal-Intensität: FuE-Personal in % der tätigen Personen

Quelle: Wissenschaftsstatistik Stifterverband, Statistisches Bundesamt – Berechnungen des ZEW



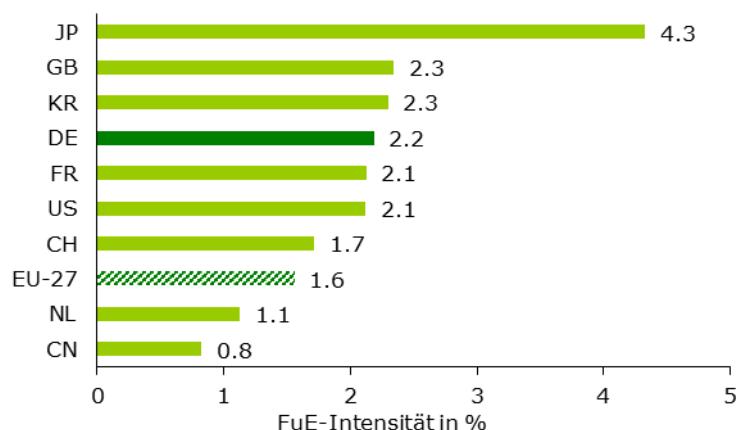
Hohe FuE-Intensität im internationalen Vergleich

Im **internationalen Vergleich** ist die FuE-Intensität der deutschen Chemieindustrie als hoch einzustufen. Im Jahr 2023 lag die FuE-Ausgaben-Intensität - berechnet auf Basis der internen FuE-Ausgaben - bei 2,2 %. Damit liegt die deutsche Chemieindustrie auf demselben Niveau wie die britische, südkoreanische, französische und US-amerikanische. Lediglich die Chemieindustrie in Japan weist deutlich höhere interne FuE-Leistungen in Relation zum Umsatz auf.

FuE-Intensität¹⁾ in der Chemieindustrie im internationalen Vergleich 2023

1) interne FuE-Ausgaben in % des Umsatzes der Branche

Quelle: Chemdata International, VCI – Darstellung des ZEW.

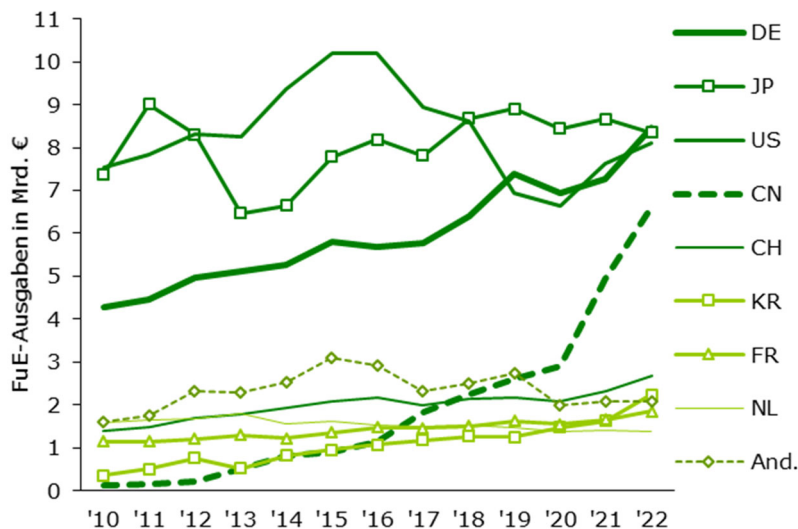


Deutsche Chemiekonzerne liegen bei den FuE-Ausgaben an erster Stelle

Die **FuE-Aktivitäten** in der Chemieindustrie sind in hohem Maße internationalisiert und werden wesentlich von **großen, global tätigen Unternehmen** geprägt. Im Jahr 2022 gaben die 159 Chemieunternehmen (ohne Pharmaunternehmen und ohne Pharmaaktivitäten von Unternehmen mit Chemie- und Pharmaaktivitäten) mit den höchsten FuE-Ausgaben 41,7 Mrd. € für FuE aus. Dies entspricht rund drei Viertel der weltweiten FuE-Ausgaben in der Chemieindustrie. Von diesen kamen 12 aus Deutschland. Auf sie entfielen 20,3 % der FuE-Ausgaben der Top-159-Chemieunternehmen. Ihr Anteil stieg in den vergangenen 12 Jahren mehr oder minder kontinuierlich an. 2022 lagen die deutschen Chemiekonzerne bei FuE erstmals sowohl vor den japanischen (37 Unternehmen, Anteil 20,0 %) als auch vor den US-amerikanischen (30 Unternehmen, Anteil 19,4 %). An vierter Stelle befinden sich bereits die chinesischen Che-

Chemieunternehmen (46 Unternehmen, Anteil 15,9 %). Die deutschen Chemiekonzerne zeichnen sich durch eine besonders hohe FuE-Intensität aus (zweit-höchste hinter den Schweizer Chemieunternehmen).

FuE-Ausgaben der weltweit größten Chemieunternehmen 2010-2022 nach Land des Unternehmenssitzes



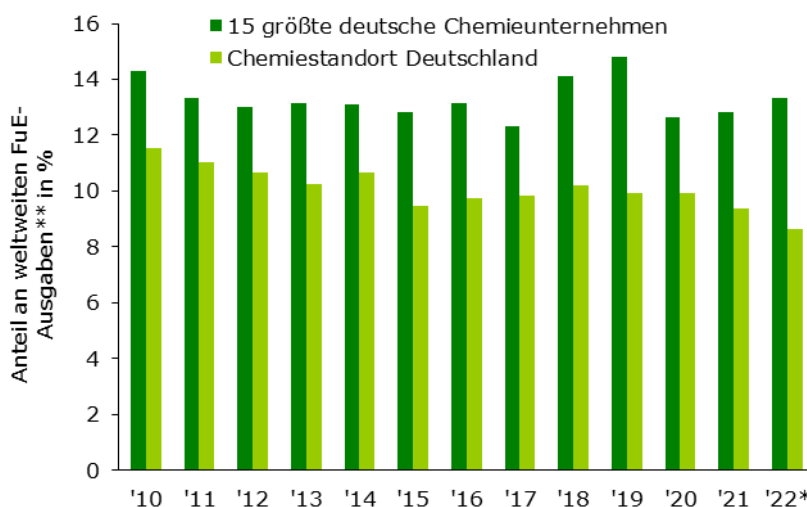
Quelle: EU-Kommission: Industrial R&D Scoreboard, Geschäftsberichte - Berechnungen des ZEW

Global aktive Chemieindustrie als Standortvorteil für das deutsche Innovationssystem

Die starke internationale Stellung der deutschen Chemieunternehmen bedeutet zum einen, dass ihre Innovationsleistung nicht nur der heimischen Wirtschaft zugutekommt, sondern **global ausstrahlt**. Zum anderen bringt sie eine Orientierung an den globalen wirtschaftlichen Trends und gesellschaftlichen Herausforderungen mit sich, und erleichtert den Unternehmen ein 'global sourcing' auch im Bereich von Innovationsideen und Forschungsergebnissen. Von diesem internationalen Transfer profitiert die deutsche Wirtschaft, da sie über eine forschungsstarke heimische Chemieindustrie an den weltweiten Entwicklungen im Bereich der Materialtechnologien partizipiert.

Die **15 deutschen Chemieunternehmen mit den höchsten FuE-Ausgaben** trugen im Jahr 2022 13,3 % zu den weltweiten internen FuE-Ausgaben der Chemieindustrie bei. Dies ist deutlich mehr als der Anteil des Standorts Deutschland (8,6 %), d.h. der in Deutschland von inländischen und ausländischen Chemieunternehmen durchgeführten FuE-Aktivitäten. Dies unterstreicht die starke internationale Stellung der großen deutschen Chemieunternehmen.

Anteil Deutschlands an den weltweiten FuE-Ausgaben¹⁾ in der Chemieindustrie: Standortprinzip und 15 größte deutsche Chemieunternehmen 2010-2022



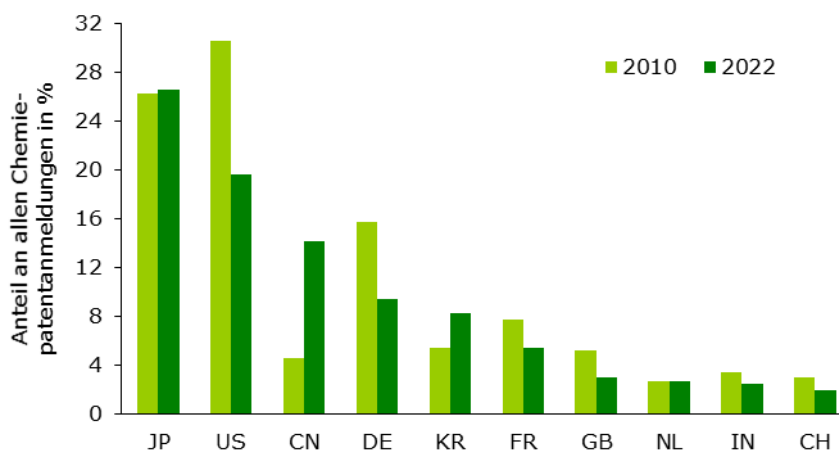
1) interne FuE-Ausgaben, 38 OECD- und EU-Länder sowie CN, SG, TW.
 * FuE-Ausgaben weltweit geschätzt
 ** Interne FuE-Ausgaben der 15 größten Chemieunternehmen ermittelt anhand des durchschnittlichen Anteils der externen an den gesamten FuE-Ausgaben in der deutschen Chemieindustrie.

Quelle: Geschäftsberichte; OECD: ANBERD - Berechnungen und Schätzungen des ZEW

Jedes 10. Chemie-Patent aus Deutschland

Forschung und Entwicklung in der Chemieindustrie mündet i.d.R. in neues technisches Wissen (Erfindungen), das über Patente geschützt werden kann. Da **Patentanmeldungen** auf die Märkte der Zukunft abzielen, sind sie ein guter Frühindikator, wo und wie viel neues Wissen entstanden ist und kommerziell verwertet werden soll. Dies gilt besonders für sogenannte transnationale Anmeldungen am Europäischen Patentamt (EPA) und bei der World Intellectual Property Organization (WIPO). Solche Anmeldungen weisen hohe Erteilungsquoten auf und betreffen aufgrund der höheren Anmeldekosten i.d.R. wirtschaftlich wertvolle Erfindungen. Im Jahr 2022 wurden in der Chemie weltweit rund 24.800 transnationale Patente angemeldet. Die größten Anmelder sind Japan (26,5 %) und die USA (19,6 %). Mit Abstand folgt China (14,1 %) vor Deutschland (9,4 %). Während China und die anderen untersuchten asiatischen Länder ihre Anteile seit 2010 steigern konnten, haben die westlichen Chemienationen Anteile verloren, so auch Deutschland (2010: 15,7 %). Bei China ist allerdings zu beachten, dass sich unter den chinesischen transnationalen Patentanmeldungen beim WIPO besonders viele finden, die nicht in eine regionale Phase überführt werden, d.h. der Patentschutz wird nicht für die internationale Vermarktung der Technologie in Anspruch genommen. Insofern sind die chinesischen Patentanmeldungen am WIPO geringer zu gewichten.

Patentanmeldungen¹⁾ im Technologiefeld Chemie 2010 und 2022



1) transnationale Anmeldungen am EPA und WIPO

Quelle: WPI (STN) – Berechnungen Fraunhofer-ISI und ZEW

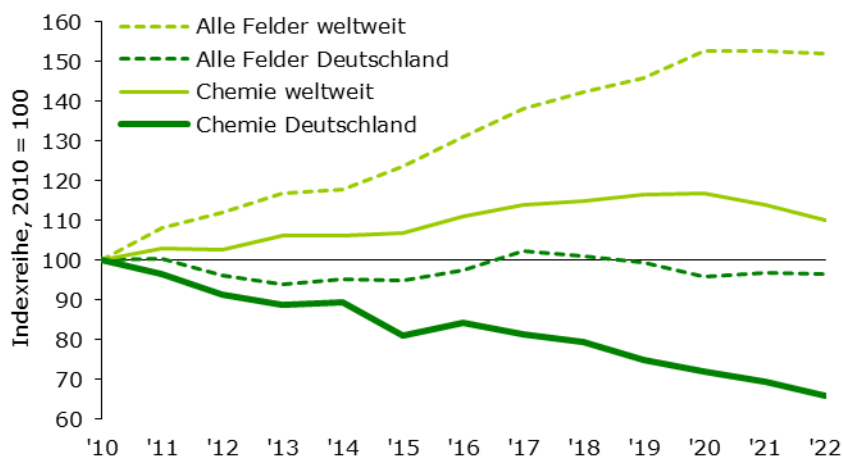
Rückläufige Patentanmeldungen in der Chemie

Sowohl weltweit als auch in Deutschland bleibt die **Patentdynamik in der Chemie** schon seit mehreren Jahren deutlich hinter der allgemeinen Patentdynamik zurück. Diese Entwicklung korrespondiert mit der FuE-Dynamik, die in der Chemie ebenfalls niedriger ist als in anderen Branchen. In Deutschland ist auch die absolute Zahl der Patentanmeldungen in der Chemie seit 2010 deutlich gesunken. Hiervon waren alle Teilsektoren betroffen; der stärkste Rückgang ist im Bereich der Chemiefasern zu beobachten. Auffallend ist, dass in fast allen Ländern trotz steigender FuE-Ausgaben die Patentanmeldungen sinken, was einen steigenden FuE-Aufwand pro Patent impliziert.

Dynamik von Patentanmeldungen¹⁾ in der Chemie 2010 bis 2022 in Deutschland und weltweit

1) transnationale Anmeldungen am EPA und WIPO

Quelle: WPI (STN) – Berechnungen Fraunhofer-ISI und ZEW



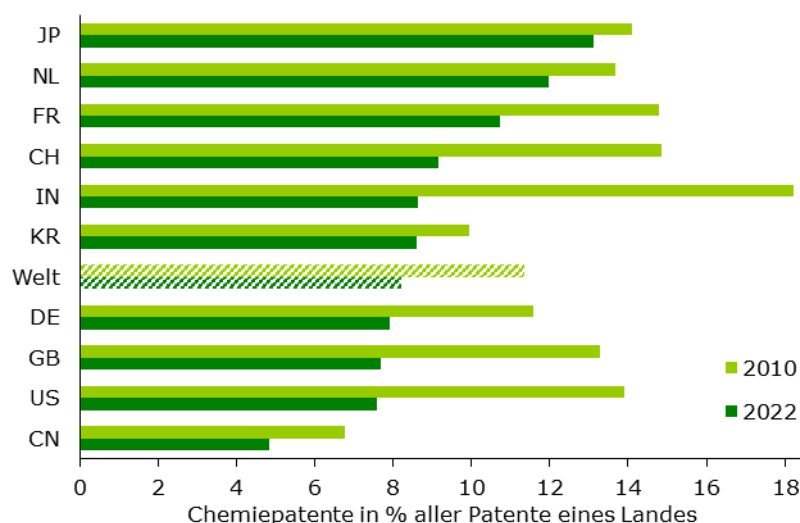
Rückläufiger Anteil der Chemie an allen Patentanmeldungen

Der Anteil der Chemiepatente an allen Patentanmeldungen ("**Patentspezialisierung**") liegt in Deutschland mit 7,9 % im Jahr 2022 annähernd im Weltdurchschnitt (8,2 %). Für Frankreich, die Niederlande und Japan sind die Strukturanteile mit 10,7 % bis 13,1 % merklich höher. Großbritannien (7,7 %) liegt leicht unter dem Weltdurchschnitt, die USA (7,6 %) spürbar darunter. Den niedrigsten Anteil von Chemiepatenten an allen Patentanmeldungen hat China mit 4,8 % in 2022. Das zeigt, dass das Chemiefeld innerhalb des chinesischen Patentportfolios trotz hoher absoluter Zuwächse eine relativ geringe Bedeutung hat, da in anderen Technologiefeldern (insbesondere IT und Mikroelektronik) die Patentaktivitäten noch viel stärker angestiegen sind.

Patentspezialisierung¹⁾ ausgewählter Länder auf das Technologiefeld Chemie 2010 und 2022

1) Anteil der Patentanmeldungen in Chemie bzw. Pharma an allen Patentanmeldungen des Landes

Quelle: WPI (STN) – Berechnungen Fraunhofer-ISI und CWS

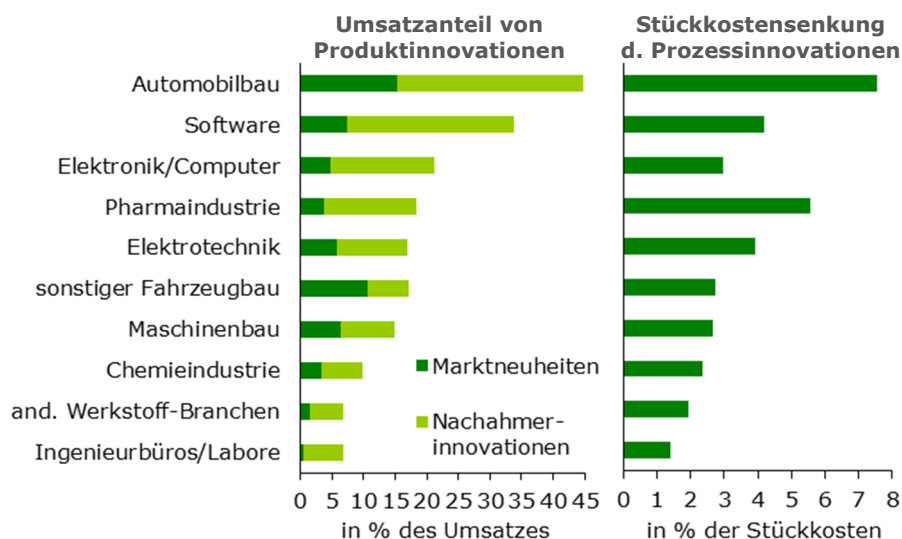


Niedrige Umsatzanteile von Produktinnovationen aufgrund langer Produktzyklen

Ein Maß für den wirtschaftlichen Erfolg der Innovationsanstrengungen ist der Umsatz, der mit Produktinnovationen erzielt wurde, sowie die Kostensenkungen, die aufgrund von Prozessinnovationen realisiert wurden. Beim **Umsatzanteil von Produktinnovationen** weist die Chemieindustrie, ebenso wie anderen Werkstoff-Branchen, einen relativ niedrigen Wert auf. 2022 gingen rund 10 % des gesamten Branchenumsatzes auf in den vorangegangenen drei Jahren neu eingeführte Angebote zurück. Andere Branchen erreichen erheblich höhere Umsatzanteile. Der Automobilbau liegt mit rund 45 % an der Spitze, gefolgt von der Softwarebranche (34 %) und der Branche Elektronik/Computer (21 %). Ein wesentlicher Grund für den niedrigen Wert in der Chemie sind die langen Produktzyklen sowie der oft große Aufwand auf Seiten der Anwender und Nutzer, auf eine neue Werkstoffbasis umzusteigen. Im Bereich der **Kostensenkungen durch Prozessinnovationen** liegt die Chemieindustrie ebenfalls im unteren Bereich der Vergleichsbranchen. 2022 wurde eine Stückkostensenkung von 2,4 %

erreicht. Im Automobilbau waren es dagegen 7,6 %. Hier spielen die längeren Anlagenlaufzeiten sowie die bereits sehr hohe Effizienz der Anlagentechnik in der Chemie eine bremsende Rolle für höhere Innovationserträge.

Innovationserträge in Deutschland 2022 für ausgewählte Branchen

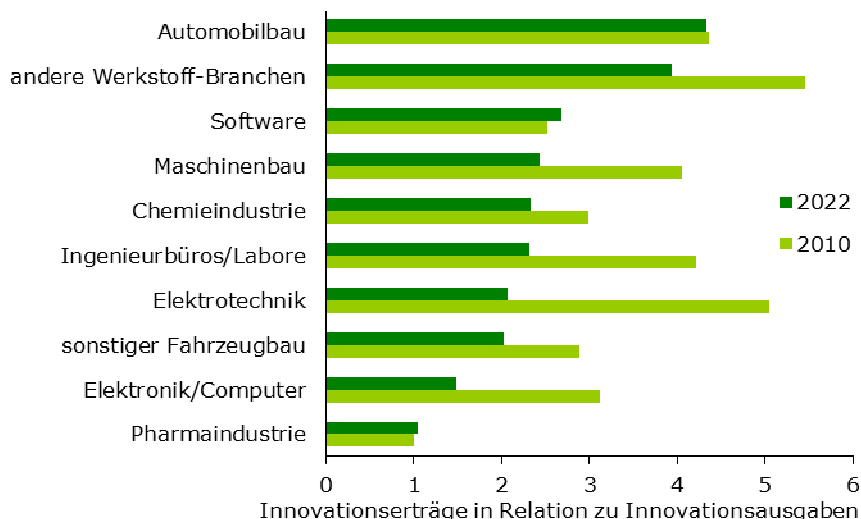


Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel

Geringeres Ertrags-Aufwand-Verhältnis erfordert längere Marktpräsenz von Innovationen

Eine Konsequenz der relativ niedrigen Innovationserträge der Chemieindustrie ist, dass das **Verhältnis zwischen Innovationserträgen und Innovationsausgaben** weniger günstig ist als in anderen Branchen. Hierin spiegeln sich neben dem niedrigeren Ertragspotenzial von Innovationen aufgrund langer Produktzyklen und geringer Kostensenkungsspielräume auch die relativ langen Entwicklungszeiträume und die aufwendigen Entwicklungsprozesse wider, um Erfindungen hervorzubringen und in marktfähige Innovationen umzusetzen. Ein günstigeres Ertrags-Aufwand-Verhältnis weisen u.a. der Automobilbau, die Softwarebranchen sowie die anderen Werkstoff-Branchen auf. Aus Sicht der Chemie bedeutet dies, dass Innovationen länger im Markt bleiben und entsprechende Renditen generieren müssen, um die angefallenen Innovationskosten zu refinanzieren. Hierfür sind u.a. ausreichend lange Patentschutzzeiten eine wesentliche Voraussetzung.

Innovationserträge in Relation zu den Innovationsausgaben in Deutschland 2010 und 2022 für ausgewählte Branchen



Innovationserträge: Umsatz mit Marktneuheiten plus 50 % des Umsatzes mit Nachahmerinnovationen plus Kosteneinsparungen durch Prozessinnovationen

Innovationsausgaben: Ausgaben für interne und externe FuE sowie für sonstige Innovationsaktivitäten

Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel

Verschärfter Innovationswettbewerb und abnehmende Grenzerträge von FuE

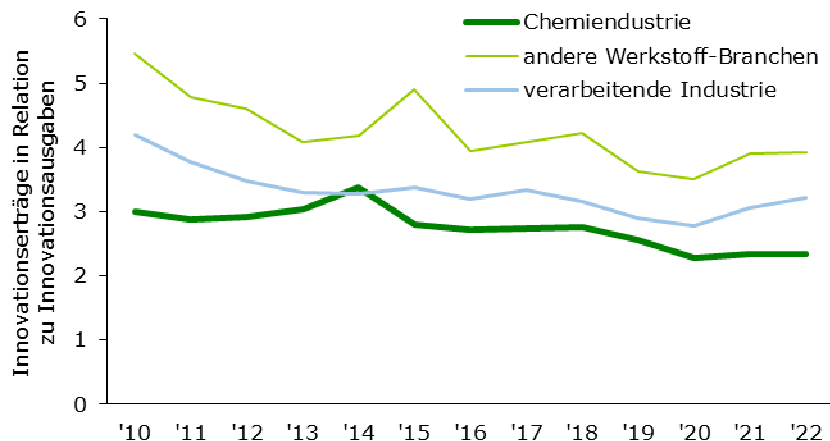
Im Zeitverlauf ist das **Ertrags-Aufwand-Verhältnis** von Innovationen in der Chemieindustrie **rückläufig** – so wie auch in den meisten anderen Branchen. Dies deutet darauf hin, dass das Innovationsgeschäft generell aufwendiger und der Wettbewerb um die Erzielung von Innovationserträgen intensiver wird. Hinter diesem Phänomen steht zum einen der tendenziell abnehmende Grenzertrag von FuE, so lange nicht durch technologische Durchbrüche völlig neue Innovationsmöglichkeiten erschlossen werden. Zum anderen führen die Globalisierung und der wirtschaftliche Aufholprozess in vielen Schwellenländern dazu, dass immer mehr Akteure in den Innovationswettbewerb eintreten, was die Ertragsmöglichkeiten für ein einzelnes Unternehmen tendenziell verringert.

Innovationserträge in Relation zu den Innovationsausgaben in der deutschen Chemieindustrie 2010 bis 2022 im Vergleich

Innovationserträge: Umsatz mit Marktneuheiten plus 50 % des Umsatzes mit Nachahmerinnovationen plus Kosteneinsparungen durch Prozessinnovationen

Innovationsausgaben: Ausgaben für interne und externe FuE sowie für sonstige Innovationsaktivitäten

Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel



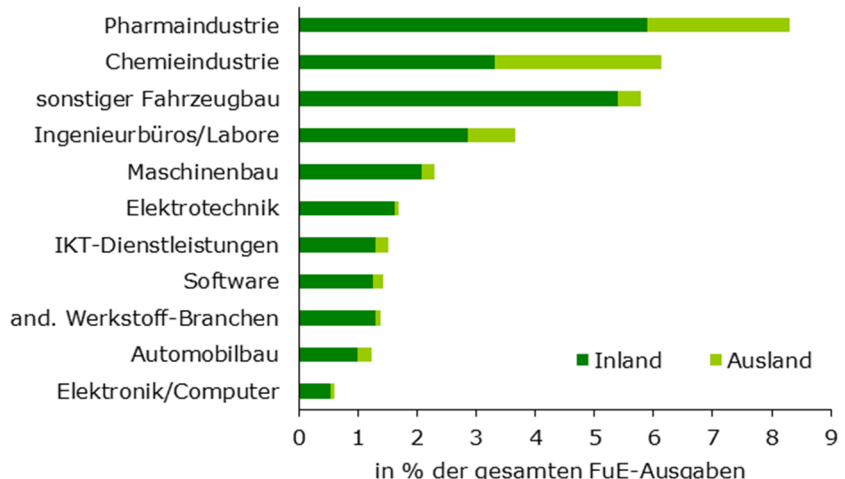
Hohes Volumen an FuE-Aufträgen an die Wissenschaft

Ein Weg, um Innovationskosten zu senken, Innovationsideen rascher umzusetzen und auf wichtiges externes Wissen zugreifen zu können, ist die **Zusammenarbeit mit Wissenschaftseinrichtungen** in FuE- und Innovationsprojekten. Die Chemieindustrie ist dabei – ebenso wie die Pharmaindustrie – besonders aktiv. Im Jahr 2021 gingen im Rahmen von externen FuE-Aufträgen von Chemieunternehmen in Deutschland rund 350 Mio. € an Wissenschaftseinrichtungen im In- oder Ausland. Dies entspricht rund 6 % der gesamten FuE-Ausgaben der Branche.

FuE-Aufträge von Unternehmen an Wissenschaftseinrichtungen 2021 nach ausgewählten Branchen

Wissenschaftseinrichtungen: Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen (inkl. Institute für Gemeinschaftsforschung und gemeinnützige Einrichtungen)

Quelle: Stifterverband: FuE-Erhebung - Berechnungen des ZEW.



Viele FuE-Aufträge an ausländische Einrichtungen

Hochschulen und öffentliche Forschungseinrichtungen in Deutschland erhielten rund 55 % der Auftragssumme, ausländische Einrichtungen 45 %. Keine andere Branche greift bei FuE so stark auf **Wissenschaftseinrichtungen im Ausland** zurück. Dies unterstreicht die globale Ausrichtung der FuE- und Innovationsprozesse in der Chemieindustrie. Es zeigt gleichzeitig die große Bedeutung neuer

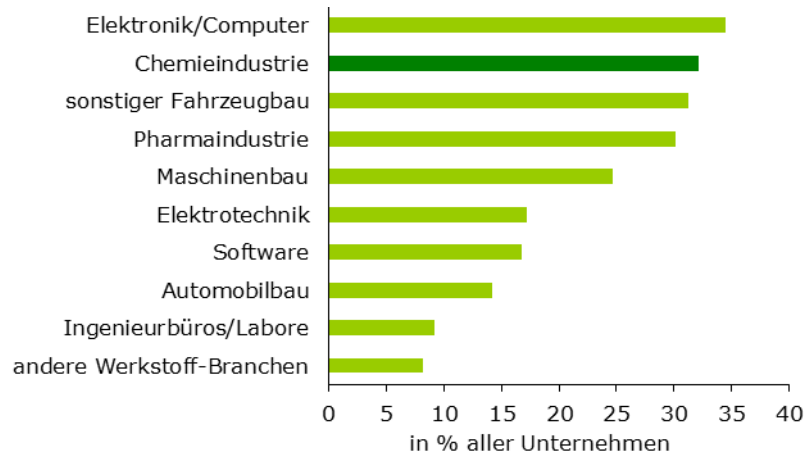
Forschungsergebnisse und wie wichtig die wissenschaftliche Basis für Innovationen in der Chemie ist.

Neben der Beauftragung von Wissenschaftseinrichtungen mit der Durchführung von FuE-Arbeiten sind Kooperationsvereinbarungen und die gemeinsame Bearbeitung von FuE- und Innovationsprojekten eine weitere Form, wie Wissenschaftseinrichtungen in Innovationsprozesse der Unternehmen eingebunden werden. Viele **FuE- und Innovationskooperationen** finden im Rahmen von öffentlich geförderten Projekten statt (z.B. im Rahmen der Fachprogramme des Bundes, des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand, des Programms Industrielle Gemeinschaftsforschung oder des EU-Forschungsprogramms).

In der Chemieindustrie wies im Durchschnitt der Jahre 2016 bis 2022 fast jedes dritte Unternehmen (32 %) Innovationskooperationen mit Wissenschaftseinrichtungen auf. Nur die Elektronik/Computer-Branche weist einen höheren Wert auf (35 %). Der große Unterschied zwischen der Chemie und anderen Werkstoff-Branchen bei der wissenschaftlichen Verankerung von Innovationen wird bei diesem Indikator besonders deutlich. Denn in den anderen Werkstoff-Branchen weisen nur 8 % der Unternehmen Wissenschaftskooperationen zu FuE- oder Innovationsvorhaben auf.

Innovationskooperationen mit Wissenschaftseinrichtungen ist wichtiger Transferweg

Unternehmen mit Innovationskooperationen (Durchschnitt 2016-2022) nach ausgewählten Branchen



Quelle: ZEW, Mannheimer Innovationspanel.

Die Chemieindustrie ist mit Abstand die wichtigste Branche, wenn es um die Entwicklung und Bereitstellung neuer Materialtechnologien geht. Andere Branchen im deutschen Innovationssystem profitieren in mehrfacher Weise von einer **forschungsstarken Chemie am Standort Deutschland**:

Fazit: Chemie zentrale Säule im deutschen Innovationssystem

- Erstens versorgt die Chemieindustrie durch ihre intensiven FuE-Aktivitäten andere Branchen laufend mit Innovationen im Bereich der Material- und Werkstofftechnologien.
- Zweitens ist die FuE-Tätigkeit der deutschen Chemieindustrie stark internationalisiert. Dadurch kann sie internationale Technologie- und Markttrends rasch identifizieren und aufgreifen, wovon auch die international orientierten Abnehmerbranchen profitieren.
- Drittens kooperiert die Chemieindustrie intensiv mit Wissenschaftseinrichtungen und transferiert damit öffentlich geförderte Grundlagenforschung in industrielle Anwendungen, die Wertschöpfung und Arbeitsplätze schaffen.

FuE-Dynamik in Chemie durch mehrere Faktoren gebremst

FuE-Aktivitäten in der Chemieindustrie werden durch mehrere Faktoren bestimmt, wodurch die **FuE-Dynamik** im Vergleich zu anderen Branchen geringer ausfällt:

- Die FuE-Kosten, um eine Innovation hervorzubringen, sind hoch und die Entwicklungszeiten lang, da weitere Verbesserungen in der Materialtechnologie

zunehmend aufwendiger zu erreichen sind (Grenzen des technisch und thermodynamisch Machbaren).

- Der Technologiewettbewerb mit Schwellenländern nimmt zu, da für viele Schwellenländer der Aufbau eigener Kompetenzen in den Materialtechnologien für die weitere wirtschaftliche Entwicklung besonders wichtig ist. Gleichzeitig verfügen sie über komparative Vorteile im Bereich der Materialtechnologien (u.a. Rohstoffvorkommen, günstige Energie).
- Lange Produktlebenszyklen, hohe Entwicklungskosten und ein intensiver Innovationswettbewerb führen zu einem ungünstigen Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag von Innovationsaktivitäten.

Attraktive Rahmenbedingungen für FuE am Standort Deutschland sichern

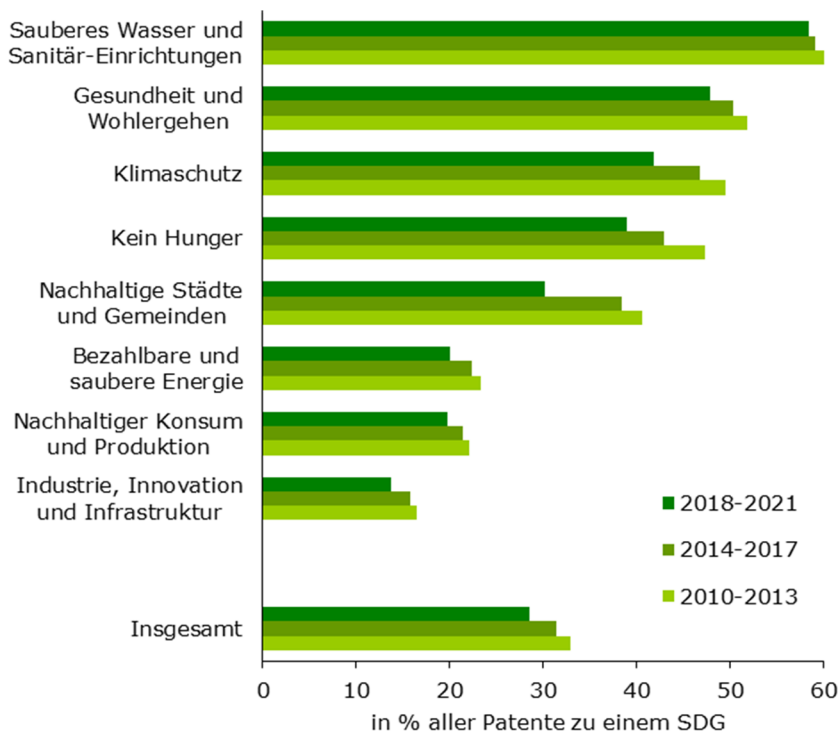
In dieser Situation ist es wichtig, dass die Chemieindustrie attraktive Rahmenbedingungen für FuE am Standort Deutschland vorfindet, um ihre Funktion im Innovationssystem wahrnehmen zu können. Dazu zählen u.a. wettbewerbsfähige Kosten für FuE. Mit der Forschungszulage wurde hier der richtige Weg eingeschlagen. Gleichzeitig ist die Zusammenarbeit mit anderen Technologiefeldern und Branchen zentral, da sich neue Innovationschancen vor allem im systemischen Bereich bieten, etwa im Verbund mit Digitalisierung oder Biotechnologie.

3 Innovationsbeiträge der Chemie zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen

Patentdaten zu Messung des Beitrags der Chemie zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen

Forschungsergebnisse und neue Technologien aus der Chemie tragen in vielfältiger Form zur **Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen** bei. Die Patentstatistik bietet eine Möglichkeit, um diesen Beitrag zu quantifizieren. Ausgangspunkt ist eine Zuordnung von transnationalen Patentanmeldungen¹ zu ausgewählten **Zielen für nachhaltige Entwicklung** (Social Development Goals - SDGs), die von den Vereinten Nationen im Jahr 2016 verabschiedet wurden. Für jeden Zielbereich wird untersucht, wie viele Patentanmeldungen einen technologischen Bezug zur Chemie i.w.S. haben (inkl. Pharma- und Materialtechnologien sowie chemiebezogene Verfahrenstechnik). Der Anteil der Chemie-Patente² an allen Patentanmeldungen zu einem SDG-Ziel zeigt an, wie groß der **Beitrag der Chemie zur Entwicklung von technologischen Lösungen** im jeweiligen Zielbereich ist. Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, dass die gesellschaftlichen Herausforderungen, die hinter den SDG-Zielen stehen, nicht nur über neue Technologien angegangen werden können. Gleichwohl stellen technologische Lösungen einen zentralen Baustein für die Erreichung der SDG-Ziele dar.

Anteil von Chemie-Patenten an allen Patenten mit Bezug zu ausgewählten Zielen für nachhaltige Entwicklung (Social Development Goals - SDG) in Deutschland 2010-2021



Chemie-Patente: Patentanmeldungen in chemie-nahen Technologiefeldern

Quelle: Scopus. Berechnungen des Fraunhofer-ISI.

29 % aller Patenten zu SDG-Zielen mit Chemie-Bezug

Betrachtet man die Patentanmeldungen aus Deutschland mit Bezug zu SDG-Zielen im Bereich der großen gesellschaftlichen Herausforderungen, so kamen im Zeitraum 2018-2021 knapp 29 % aus dem Technologiefeld Chemie (ohne Pharma und Biotechnologie). Am höchsten ist der Beitrag der Chemie zum Ziel **"sauberes Wasser und Sanitär-Einrichtungen"** mit 59 %. Bei den Zielen

¹ Transnationale Patentanmeldungen sind Patentfamilien mit mindestens einer Anmeldung am Europäischen Patentamt (EPA) oder über das sogenannte PCT-Verfahren (Patente Cooperation Treaty) bei der World Intellectual Property Organization (WIPO) in Genf (Frietsch und Schmoch 2010).

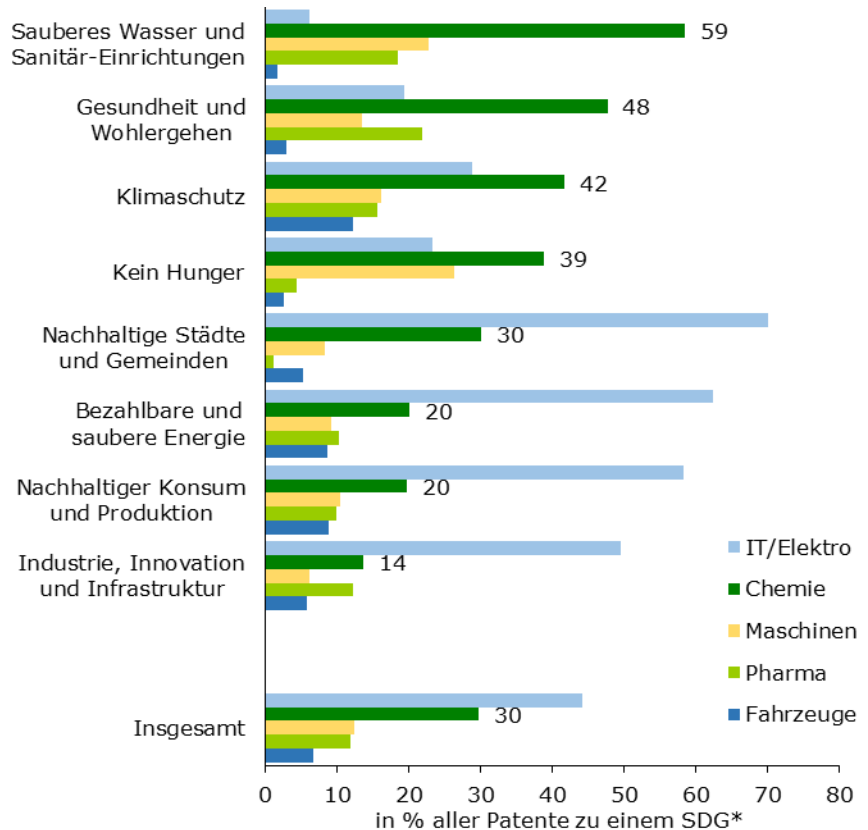
² Chemie-Patente sind hier technologisch abgegrenzt, unabhängig davon, aus welcher Industrie der Anmelder stammt. Zu Chemie-patenten zählen Patentanmeldungen in den folgenden Technologiefeldern: organische Feinchemie, Biotechnologie, Pharmazie, Kunststoffe/makromolekulare Chemie, Nahrungsmittelchemie, Grundstoffchemie, Materialtechnologien/Metallurgie, Oberflächen/Beschichtungen, Mikrostrukturen/Nanotechnologie, chemische Verfahrenstechnik, Umwelttechnik.

"Gesundheit und Wohlergehen" und "Klimaschutz" ist fast jede zweite Patentanmeldung den chemischen Technologien zuzuordnen (48 bzw. 42 %). Aber auch für andere zentrale SDG wie "kein Hunger", "Nachhaltige Städte und Gemeinden", "bezahlbare und saubere Energie" und "nachhaltiger Konsum und Produktion" machen Chemie-Patente zwischen 20 und 39 % der Patentanmeldungen aus. Diese Zahlen unterstreichen eindrucksvoll, wie zentral chemisches Wissen ist, um neue technologische Lösungen zu den großen gesellschaftlichen Herausforderungen zu entwickeln. Im Zeitverlauf nimmt der Anteil der Chemie-Patente an allen Patentanmeldungen zu SDG-Zielen ab. Dahinter steht in erster Linie die zunehmende Bedeutung von digitalen Technologien.

Vergleicht man den **Beitrag der Chemie zu allen Patenten**, die für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen relevant sind, so nimmt die Chemie in vier SDGs klar den **ersten Platz als Technologielieferantin** ein. Dies sind die Ziele "sauberes Wasser und Sanitär-Einrichtungen", "Gesundheit und Wohlergehen", "Klimaschutz" und "kein Hunger". Für die anderen vier Nachhaltigkeitsziele spielen jeweils Patente aus dem Bereich der Informationstechnik und Elektrotechnik die größte Rolle. Gleichwohl ist auch für diese Ziele der Input aus der Chemie von großer Bedeutung. Oft ist es das Zusammenspiel aus Materialtechnologie und neuen Werkstoffen auf der einen Seite und digitalen sowie energietechnischen Lösungen auf der anderen Seite, mit dem ein höheres Maß an Nachhaltigkeit erreicht werden kann.

Chemie bei vier SDGs die wichtigste Technologiequelle

Anteil von Technologiefeldern an allen Patenten mit Bezug zu ausgewählten Zielen für nachhaltige Entwicklung 2018-2021 in Deutschland



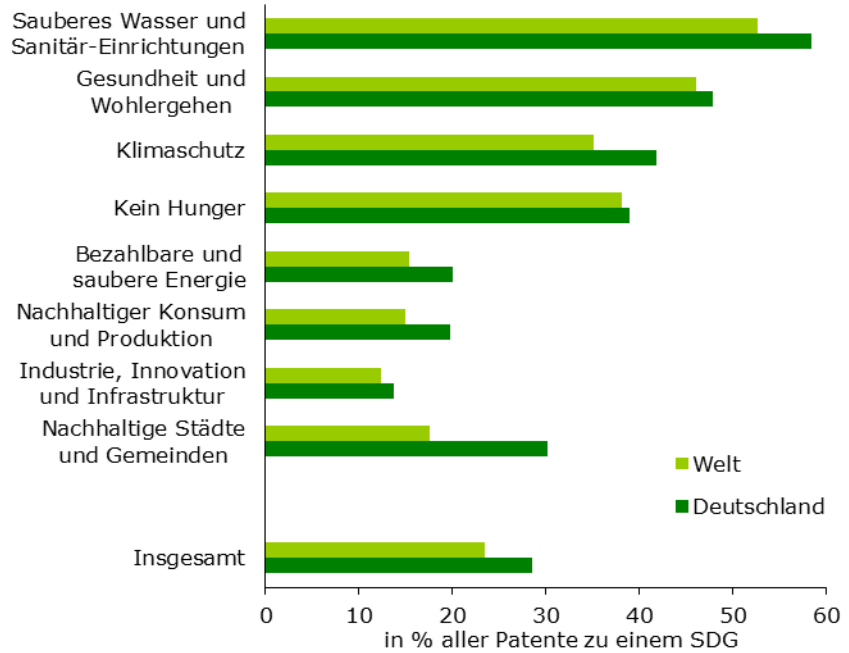
* Ein Patent kann mehr als einem Technologiefeld zugeordnet sein, dadurch kann die Summe der Technologiefeldanteile 100 % übersteigen.

Quelle: EPA - PATSTAT. Berechnungen des Fraunhofer-ISI.

Chemie hat in Deutschland als SDG-Enabler größere Bedeutung als weltweit

Vergleicht man den Chemie-Anteil an SDG-Patentanmeldungen in Deutschland mit dem entsprechenden Anteil für die Welt, so zeigt sich für Deutschland bei allen acht Nachhaltigkeitszielen ein höherer Wert, d.h. die Bedeutung der Chemie für neue Technologien zu SDG-Zielen ist **in Deutschland höher als im globalen Durchschnitt**. Dies liegt insbesondere an den Zielen im Bereich Klimaschutz, Energie sowie Nachhaltigkeit im Bereich von Konsum, Produktion und Städten.

Anteil von Chemie-Patenten an allen Patenten mit Bezug zu ausgewählten Zielen für nachhaltige Entwicklung 2018-2021: Deutschland und weltweit im Vergleich



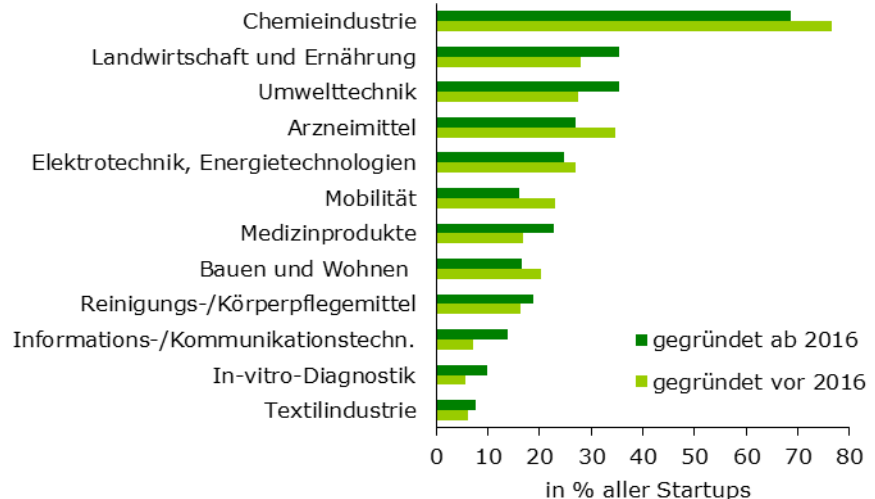
Chemie-Patente: Patentanmeldungen in chemie-nahen Technologiefeldern

Quelle: EPA - PATSTAT. Berechnungen des Fraunhofer-ISI

Chemie-Startups leisten in vielen Anwendungsgebieten Innovationsbeiträge

Ein zweiter Indikator, der die Bedeutung der Chemie als Lieferantin von Lösungen zu gesellschaftlichen Herausforderungen illustriert, bezieht sich auf Chemie-Startups. **Chemie-Startups** sind junge Unternehmen, die auf Basis von chemischem Wissen oder chemischen Technologien innovative Produkte und Dienstleistungen anbieten. Viele dieser Startups zielen mit ihren Angeboten auf Marktbedürfnisse, die mit gesellschaftlichen Herausforderungen einhergehen und adressieren dabei sehr unterschiedliche Zielmärkte und Anwendungsgebiete. So sind Chemie-Startups, die ab 2016 gegründet wurden, häufiger zu den Themen Umwelttechnik, Landwirtschaft & Ernährung und Medizin & Gesundheit tätig.

Zielmärkte von Chemie-Startups in Deutschland nach Gründungszeitpunkt des Startups



Datengrundlage: 389 im Forum Startup Chemie erfasste Chemie-Startups

Quelle: Forum Startup Chemie. Berechnungen des ZEW.

Chemie unverzichtbar für Erreichung der Nachhaltigkeitsziele

Zusammenfassend zeigt sich, dass chemisches Wissen zentral ist, um neue technologische Lösungen für die großen gesellschaftlichen Herausforderungen zu entwickeln. Bei den Themen sauberes Wasser, Gesundheit, Klimaschutz und Ernährung bietet kein anderes Technologiefeld eine solche Breite von Lösungsansätzen. Neben den großen Chemieunternehmen und der wissenschaftlichen Forschung adressieren auch viele Startups mit ihren Produkten Nachhaltigkeitsziele.

Fallbeispiel 1: Innovationen der Batteriechemie

In den letzten Jahrzehnten haben zahlreiche Fortschritte in der Batterietechnologie zu beeindruckenden Innovationen geführt, die sich disruptiv auf verschiedene Industrien ausgewirkt haben. Dabei gab es nicht die eine, entscheidende Batterieinnovation, welche z.B. zum Durchbruch der Elektromobilität geführt hat. Vielmehr werden und wurden alle Komponenten der Batterie kontinuierlich optimiert, sodass von einer evolutionären Verbesserung der Technik, z.B. der Lithium Ionen Batterie (LIB), gesprochen werden kann. Als besonders wichtig können Innovationen auf Ebene der Batteriechemie angesehen werden, so z.B. die Erhöhung der Energiedichte durch nickelreiche Kathodenmaterialien, die Verlängerung der Lebensdauer durch neue Elektrolytadditive oder die Verbesserung der Sicherheit durch anorganische Separatorbeschichtungen. Jede dieser exemplarischen Innovationen und viele mehr haben weitreichende Auswirkungen auf die praktische Anwendung von Batterien, insbesondere in der Elektromobilität und der Speicherung von erneuerbaren Energien.

Erhöhung der Energiedichte durch nickelreiche Materialien

Ein wesentlicher Fortschritt in der Batteriechemie ist die Erhöhung der Energiedichte durch den Einsatz nickelreicher Kathodenmaterialien in Lithium-Ionen Batterien. Materialien wie NCM (Lithium-Nickel-Cobalt-Mangan-Oxid) und NCA (Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid) bieten eine hohe Kapazität und ermöglichen es, mehr Energie in LIB zu speichern, ohne deren Volumen zu vergrößern. Für den Einsatz dieser Materialien waren insbesondere Prozessinnovationen bei der Herstellung als auch Anpassungen der Chemie, wie die genaue Einstellung der Dotierung oder eine stabilisierende Partikelbeschichtung, nötig.

Die erhöhte Energiedichte der nickelreichen Batterien ist besonders für die Elektromobilität wichtig. Elektrofahrzeuge (EV) benötigen Batterien, die leicht sind und gleichzeitig eine hohe Reichweite bieten. Dank nickelreicher Materialien können moderne EV Reichweiten von über 500 Kilometern pro Ladung erreichen, was sie für Verbraucher attraktiver macht und die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen fördert. Darüber hinaus ermöglichen diese Batterien eine schnellere Ladegeschwindigkeit, was die Benutzerfreundlichkeit weiter verbessert.

Verlängerung der Lebensdauer durch neue Elektrolytadditive

Neben der Energiedichte ist die Lebensdauer von Batterien ein kritischer Faktor. Hier haben neue Salze und Elektrolytadditive eine entscheidende Rolle gespielt. Traditionelle Elektrolyte neigen dazu, während des Lade- und Entladezyklus Nebenreaktionen zu verursachen, die die Lebensdauer der Batterie verkürzen. Neue Additive, wie Flammenschutzmittel und Stabilisatoren, reduzieren diese Nebenreaktionen und verbessern die Gesamtstabilität des Elektrolyten.

Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz von Lithiumbis(fluorosulfonyl)imid (LiFSI) als Elektrolytadditiv. LiFSI verbessert nicht nur die Lebensdauer der Batterie, sondern auch deren Leistung bei niedrigen Temperaturen. Diese Innovation hat Anwendungen in Bereichen ermöglicht, in denen stabile und langlebige Batterien erforderlich sind, wie etwa in stationären Energiespeichersystemen und industriellen Anwendungen. Durch die verlängerte Lebensdauer wird die wirtschaftliche Rentabilität der Speicherung von z.B. Solarenergie verbessert, da die Batterien seltener ausgetauscht werden müssen.

Erhöhung der Sicherheit durch anorganische Separatorbeschichtungen

Ein weiterer exemplarischer Fortschritt in der Batteriechemie ist die Verbesserung der Sicherheit durch den Einsatz anorganischer Materialien als Separatorbeschichtungen. Separatoren sind eine kritische Komponente in Batterien, da sie die Anode und Kathode trennen und Kurzschlüsse verhindern. Traditionelle Separatoren aus Polymermaterialien können bei hohen Temperaturen oder mechanischen Belastungen versagen, was zu gefährlichen Situationen wie Bränden oder Explosionen führen kann.

Anorganische Beschichtungen, wie Boehmit (AlOOH), Alumina (Al₂O₃) oder Silica (SiO₂), bieten eine höhere thermische Stabilität und mechanische Festigkeit. Die Beschichtungen verhindern zudem das Durchdringen von Dendriten (nadelförmige Lithiumablagerungen), die Kurzschlüsse verursachen können. Dies erhöht die Sicherheit

Innovationen in der Batteriechemie zentral für verbesserte Batterie-Technik

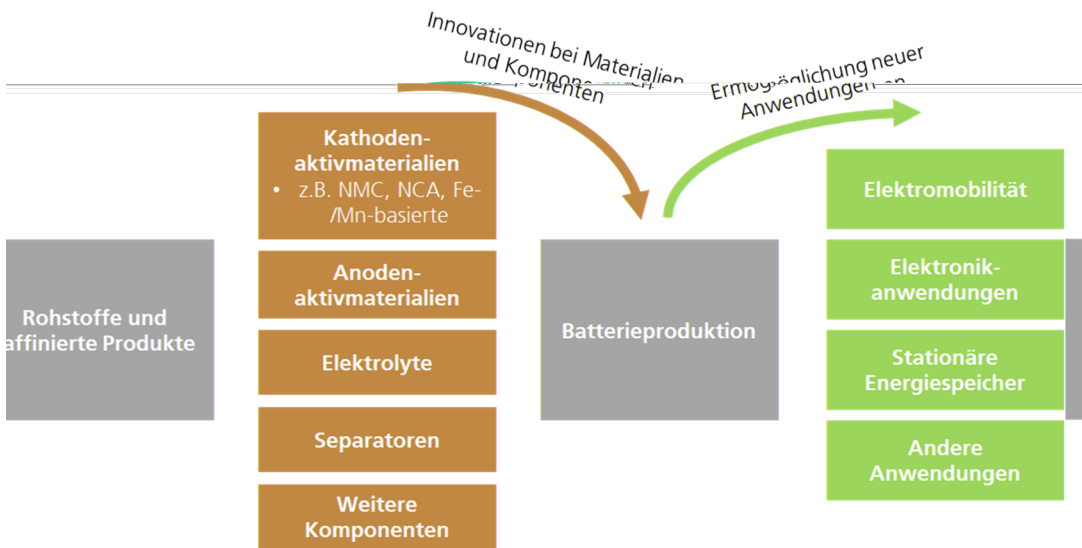
Höhere Energiedichte durch neue Kathodenmaterialien

Neue Elektrolyt-Materialien für längere Lebensdauern

Anorganische Beschichtungen für höhere Sicherheit

der Batterien erheblich und macht sie zuverlässiger für den Einsatz in sicherheitskritischen Anwendungen wie Elektrofahrzeugen und tragbaren Elektronikgeräten.

Wertschöpfungskette Batterie und Fluss neuer Innovationen bis zur Anwendung



Quelle: Fraunhofer-ISI

Vernetzung entlang der Wertschöpfungskette

Die Entwicklung und Umsetzung dieser Innovationen in der Batteriechemie erfordert eine enge Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von großen Chemieunternehmen über Batteriezellhersteller bis hin zu z.B. Automobilherstellern. Einige der führenden Batteriehersteller sind so stark vertikal integriert, dass sie diesen Innovationsprozess im eigenen Konzern abbilden können und sowohl die Rohstoff- und Materialherstellung bis hin zur Fahrzeugherstellung abdecken. In vielen Fällen entstehen die Innovationen jedoch in der Zusammenarbeit klassisch eigenständiger Branchen wie der Rohstoff- und Chemieindustrie und der Automobil- und Zulieferindustrie. So betreiben alle führenden Automobilhersteller mittlerweile eigene Entwicklungszentren für Batterien, in denen teilweise Forschungsaktivitäten bis zur Grundlagenebene (z.B. neue, nicht-Li basierte Chemie) vorangetrieben werden. Die exemplarischen Materialinnovationen sind aus der Zusammenarbeit zwischen Zuliefernden Chemie- und Batterieunternehmen und deren Kunden in der Automobilbranche entstanden.

Die enge Vernetzung und Zusammenarbeit ermöglichen es, Innovationen schnell vom Labor in die Praxis zu übertragen, wobei gerade in der Beforschung neuer Materialien häufig auch nicht-industrielle Forschungseinrichtungen und Universitäten eingebunden sind. Auch bei der Skalierung neuer Technologien besteht entlang der Batterie-wertschöpfungskette ein hohes Maß an Zusammenarbeit, was sich z.B. in den vielfältigen Joint-Ventures zwischen Automobil-, Batterie- und Materialherstellern zeigt.

Von der Chemieinnovation zu Innovationen in der Anwendung

Die Fortschritte in der Batteriechemie haben zu erheblichen Verbesserungen in der Elektromobilität und der Speicherung fluktuierender erneuerbarer Energien geführt. Elektrofahrzeuge profitieren von der erhöhten Energiedichte, der verlängerten Lebensdauer und der verbesserten Sicherheit der Batterien und sind zu einer realistischen und attraktiven Alternative zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor geworden. Auch bei der Integration erneuerbarer Energieerzeugung in die Stromnetze spielen Batteriespeicher eine wichtige Rolle und die technologischen Innovationen bei der Batterie haben in den letzten Jahren zu günstigeren Speicherkosten und der Reduktion des Platzbedarfs für Speicher geführt.

Auch in Zukunft wird die kontinuierliche Forschung und Entwicklung an der Batteriechemie und anderen Batteriekomponenten eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Zukunft spielen.

Forschung zu Batteriechemie auch durch Anwender-Bran-chen

Rascher Transfer von Forschung in Anwendung

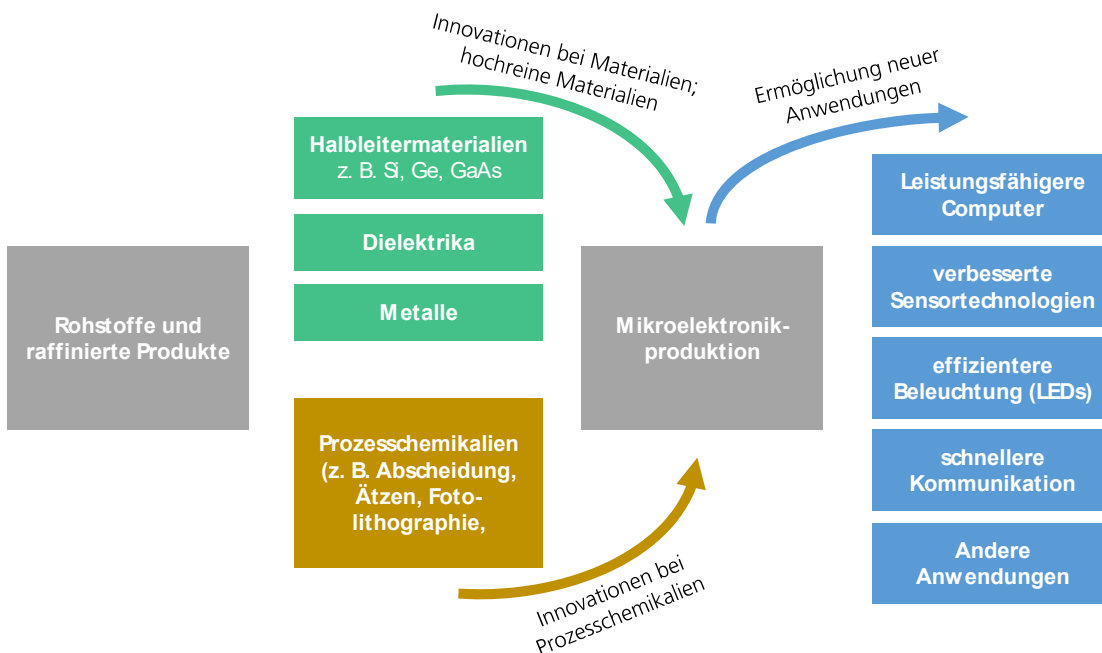
Batteriechemie mit vielen An-wendungsfeldern auch außerhalb der Elektromobi-lität

Fallbeispiel 2: Chemie-Innovationen für Halbleitertechnologien

In den letzten Jahrzehnten hat die Mikroelektronik immense Fortschritte gemacht. Diese wiederum führten dazu, dass die Leistung von Computern zunehmend verbessert werden konnte, Sensorik schneller und genauer wurde, optische Bauteile an Effizienz zugenommen haben und insgesamt die Kosten für mikroelektronische Bauteile in Bezug auf deren Performance deutlich gesenkt werden konnte. Zwei der Haupttreiber für Innovationen im Bereich der Mikroelektronik sind Material- und Prozessinnovation. Für beide Bereiche sind chemische Ausgangsstoffe von zentraler Bedeutung. Im Folgenden werden die wichtigsten Bereiche diskutiert, in denen chemische Produkte einen Einfluss auf die Mikroelektronik und Chipproduktion haben.

Material- und Prozessinnovationen als Treiber

Einfluss chemischer Verbindungen in die Mikroelektronikproduktion und daraus resultierende Anwendungen



Quelle: Fraunhofer-ISI

Materialien für die Mikroelektronik

Für die moderne Mikroelektronik werden zahlreiche verschiedene Materialien benötigt, Halbleiter (z. B. Si, Ge, GaAs, etc.), Dielektrika (z. B. SiO₂, Al₂O₃, Si₃N₄, etc.) und Metalle (z. B. Cu, Ag, Al, etc.). All diese Materialien müssen in hochreiner Form in die elektronischen Schaltkreise eingebaut werden, um ungewünschte Effekte oder Dotierungen zu vermeiden.

Chemie-Materialien als Basis

Hochreine Chemikalien und Gase

Ein Großteil der heutigen Mikroelektronik basiert auf Silizium als Halbleitermaterial. Das Rohsilizium muss dazu zunächst zu Reinst-Silizium aufgereinigt werden, und wird dazu in einem chemischen Prozess in Trichlorsilan überführt. Dieses wird wiederum durch Destillation gereinigt und anschließend wieder in Reinst-Silizium überführt. Nach anschließendem gezielten Wachstum von großen Einkristallen, werden dünnen Scheiben, sogenannte Wafer, aus den Einkristallen geschnitten. Nach aufwändiger Politur und Reinigung - hierfür werden hochreine Prozesschemikalien benötigt (siehe Abschnitt unten) - werden diese Wafer als Ausgangspunkt für die Mikroelektronikproduktion verwendet.

Hochreine Chemikalien für die Waferherstellung

Auch andere Halbleitermaterialien werden in hochreiner Form in ähnlicher Weise zu Wafern verarbeitet, z. B. Siliziumcarbid, Germanium.

Dotierstoffe

Um die elektronischen Eigenschaften der Halbleitermaterialien je nach Anwendungsfall genau einzustellen, werden in die Materialien gezielt Fremdstoffe eingebracht, sogenannte Dotierstoffe. Diese müssen, genauso wie die Halbleitermaterialien selbst, sehr rein sein, um genau die erwünschten Eigenschaften zu erzielen. Für Silizium sind klassisch verwendete Dotierstoffe Bor, Aluminium, Phosphor und Arsen. Diese werden zum Beispiel über gezielte Diffusion in die Wafer eingebracht - hierfür sind wiederum hochreine Gase, in denen die Dotierstoffatome enthalten sind, nötig.

Dotierstoffe zur Steuerung der elektrischen Eigenschaften

Weitere Halbleitermaterialien

Neben der Herstellung von Wafern aus hochreinen Halbleitermaterialien, ist auch das nachträgliche Aufwachsen (in der Regel Epitaxie) von Halbleitermaterialien von hoher Relevanz für die Mikroelektronik. Dies ist insbesondere der Fall für Materialien, die sich schlecht zu großen Einkristallen wachsen lassen, wie z. B. GaN, InAs, und InN. Diese werden häufig auf Wafern anderer Materialien (z. B. Si, oder Saphir) aus der Gasphase aufgewachsen. Auch hierfür werden hochreine Ausgangschemikalien verwendet, häufig metallorganische Verbindungen (z. B. Trimethylgallium und Arsin für das Wachstum von GaAs). In Zukunft könnten hier auch vermehrt neue Materialien, wie z.B. 2D-Materialien (Graphen, WS₂, WSe₂, etc.), Kohlenstoffnanoröhrchen, oder andere Nanomaterialien zum Einsatz kommen. Auch hier sind die Ausgangschemikalien und die Prozessbedingungen von großer Bedeutung.

Neue Materialien gewinnen an Bedeutung

Dielektrika

Für das Funktionieren von vielen elektronischen Bauteilen werden neben Halbleitermaterialien auch isolierende Materialien, sogenannte Dielektrika benötigt. Ein klassisches Beispiel sind Gateoxide in Feldeffekttransistoren. Hierfür werden zunehmend Materialien mit hoher Dielektrizitätskonstante verwendet. Auch diese Dielektrika werden in der Regel mittels Gasphasenabscheidungsverfahren in das Bauteil eingebracht, wozu wiederum hochreine Chemikalien gebraucht werden (z. B. Trimethylaluminium und O₂ für Al₂O₃-Wachstum).

Isolierende Materialien

Metalle

Für die Kontaktierung der elektronischen Bauteile auf den Chips, werden aufgrund ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit häufig Metalle eingesetzt. Auch für diese werden in der Regel Gasphasenabscheidungsverfahren verwendet, z.T. auch solche, die hochreine metallorganische Verbindungen benötigen (z. B. Trimethylaluminium für die Al-Abscheidung).

Metallchemie für Kontaktierung

Bei all diesen Materialien können Innovationen bei der Reinheit der chemischen Verbindungen, oder neuen chemischen Verbindungen zu Verbesserungen der elektronischen Bauteile beitragen.

Prozesschemikalien

Neben den Materialien selbst, die in elektronischen Bauteilen benötigt werden, sind insbesondere die Herstellungsverfahren von entscheidender Bedeutung für deren Leistungsfähigkeit. Halbleiterbauteile werden in aller Regel unter genau kontrollierten Bedingungen prozessiert, in der Regel in Reinräumen, um Verunreinigungen gering zu halten. Im Folgenden sind einige der wichtigsten Prozessschritte in der Halbleiterchipfertigung aufgelistet und der Einsatz von chemischen Verbindungen beschrieben.

Chemikalien für Herstellungsverfahren

Aufwachsen

Die kontrollierte Abscheidung von Materialien (Halbleiter, Dielektrika, Metalle) ist von großer Bedeutung für die Chipherstellung. Häufig muss dabei eine konforme Abscheidung mit exakter Schichtdickenkontrolle im Nanometerbereich realisiert werden, oder die Materialien mit der gleichen Kristallstruktur des Substrates aufgewachsen werden (Epitaxie). Für diese teils komplexen Verfahren ist eine genaue Kontrolle der Prozessparameter, sowie hochreine chemische Ausgangsstoffe nötig, die sehr kontrolliert chemisch reagieren.

Abscheidung von Materialien

Ätzen

Neben der Abscheidung ist auch das gezielte Entfernen von Materialschichten ein wichtiger Prozess. Hier kann zwischen Nass- und Trockenätzen unterschieden werden. Beim Nassätzen werden z. B. flüssige Säuren und Basen verwendet, die je nach Zusammensetzung, bestimmte Materialien auf den Chips entfernen. Beim Trockenätzen werden häufig reaktive Gase verwendet, die bestimmte Schichten auf dem Substrat entfernen können (ggf. unter Verwendung eines Plasmas). Auch bei diesen Prozessen ist die chemische Zusammensetzung der Ätzmittel von entscheidender Bedeutung für die Prozesse.

Abtragen von Materialien

Fotolithographie

Um elektronische Bauteile herzustellen, müssen die Materialien strukturiert werden, sprich, sie dürfen nur in bestimmten Bereichen auf dem Chip sein. Diese Strukturierung wird in der Regel durch Fotolithographie realisiert. Dazu wird ein fotosensitiver Polymerfilm (Lack) auf dem Substrat aufgebracht und durch eine Fotomaske belichtet. In den belichteten Stellen (oder, je nach verwendetem Lack, den nichtbelichteten Stellen) kann der Lack anschließend durch einen Entwickler abgelöst werden. In den anschließend freiliegenden Bereichen kann ein Abscheidungs- oder Ätzschritt folgen, um eine der Maske entsprechenden Struktur auf dem Chip zu realisieren. Der Rest des Lacks wird anschließend wieder entfernt. Die chemische Zusammensetzung des Fotolacks und des Entwicklers ist dabei von entscheidender Bedeutung für eine genaue Übertragung des Musters der Fotomaske auf den Chip. Ohne diese chemischen Erzeugnisse könnten keine Mikrochips mit kleiner Strukturgröße realisiert werden.

Lacktechnologie für Materialstrukturierung

Reinigungsschritte

Da in der Mikroelektronik die Reinheit der Materialien und die Sauberkeit der Chips von entscheidender Bedeutung für das Funktionieren der Bauteile ist, werden zwischen Prozessschritten häufig Reinigungsschritte durchgeführt. Hierzu werden in der Regel sehr reine Lösungsmittel verwendet, z.T. aber auch Seifenlösungen und spezielle Chemikalien.

Chemikalien für Reinigung

Abgas-/Abwasserreinigung, Sicherheit

Die Halbleiterprozessierung ist sehr aufwendig. In einigen Prozessschritten fallen teils sehr gefährliche und giftige Abgase und Abfallstoffe an (insb. beim Ätzen). Diese werden, soweit dies möglich ist, direkt im Reinraum neutralisiert, oder in weniger gefährliche Stoffe umgewandelt. Hierfür sind wiederum spezielle Chemikalien notwendig.

Fazit

Chemische Ausgangsstoffe haben einen großen Einfluss auf die Mikroelektronikproduktion. Zum einen werden hochreine Verbindungen benötigt, um Halbleiter, Dielektrika und Metalle in den elektronischen Bauteilen herzustellen. Zum anderen werden für die, teils hochkomplexen, Produktionsverfahren, sehr spezifische Prozesschemikalien benötigt. Innovationen in den chemischen Verbindungen können hier zu Verbesserungen in der Mikroelektronik beitragen.

Chemie-Innovationen als Basis für Fortschritte in der Mikroelektronik

Fallbeispiel 3: Chemisches Recycling als Beitrag zur Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft hat zum Ziel, den Verbrauch an Rohstoffen und Energie zu verringern und Produktion und Konsum nachhaltiger zu gestalten. Das Recycling von Altprodukten und Abfällen spielt dabei eine große Rolle. Durch die stoffliche Wiederverwertung kann die Inanspruchnahme von Primärressourcen erheblich reduziert werden, gleichzeitig muss weniger Abfall deponiert oder energetisch verwertet werden.

Recycling zentraler Baustein der Kreislaufwirtschaft

Kunststoffe drittwichtigstes Basismaterial

Dem Recycling von Kunststoffen kommt in einer Kreislaufwirtschaft eine wesentliche Rolle zu. Mit einer weltweiten Produktion von mehr als 400 Mio. Tonnen pro Jahr sind Kunststoffe die drittwichtigste materielle Grundlage der Produktion von Waren und Infrastruktur, hinter Zement (>4 Mrd. t) und Stahl (>2 Mrd. t) und deutlich vor Glas (>130 Mio. t) und Aluminium (>70 Mio. t). Durch ihre Eigenschaften wie geringes Gewicht, gute Formbarkeit, hohe Bruchfestigkeit, Härte und Elastizität sowie Temperatur- und chemische Beständigkeit sind Kunststoffe vielen anderen Materialien wie Metallen, Glas oder Keramik überlegen. Mit Hilfe von Kunststoffen kann die Leistungsfähigkeit von vielen Produkten deutlich erhöht werden. Dies verbessert nicht nur deren Einsatzmöglichkeiten, sondern hat oft auch positive Umweltwirkungen. So trägt eine leichtere Bauweise von Produkten zu einem geringeren Energiebedarf beim Transport der Produkte oder bei deren Nutzung bei (z.B. bei Kraftfahrzeugen) bei.

Kunststoffe mit vielen vorteilhaften Eigenschaften

Kunststoffe zeichnen sich - anders als die meisten anderen Materialien - durch eine sehr unterschiedliche chemische Zusammensetzung aus, die deutlich größere Herausforderungen an das Recycling stellt. Aus diesem Grund wird derzeit der größte Teil der anfallenden Kunststoffabfälle energetisch verwertet, d.h. zur Produktion von Elektrizität oder Wärme genutzt, oder deponiert. Zur Realisierung einer Kreislaufwirtschaft ist es jedoch notwendig, einen möglichst hohen Anteil von Kunststoffabfällen zu weiter- oder wiederzuverwenden. Die EU hat mit der Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle für 2025 ein Recyclingziel von 50 % für Kunststoffe gesetzt.

Recycling von Kunststoffen anspruchsvoll

Kreislaufwirtschafts-Ansätze für Kunststoffe

Für eine umfassende Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen können drei Ansätze kombiniert werden:

- **Abfallvermeidung:** Durch eine Erhöhung der technischen Lebenszeit von Kunststoffen sowie durch einen Einsatz von Kunststoffen in Produkten, die eine möglichst lange Haltbarkeit gewährleisten (z.B. durch ein Produktdesign, das eine zu starke Beanspruchung der Kunststoff-Komponenten vermeidet) können einmal eingesetzte Kunststoffe möglichst lange in der wirtschaftlichen Verwendung bleiben. Durch Reinigung, Reparatur oder Instandsetzung können Kunststoffprodukte einer Wiederverwendung zugeführt werden und verringern den Anfall von Kunststoffabfällen.
- **Recycling:** Kunststoffe können entweder durch **mechanisches Recycling** (z.B. Sortieren, Säubern, Umschmelzen) oder durch **chemisches Recycling** (d.h. Umwandeln der Kunststoffabfälle in neue Chemierohstoffe (Ölphasen, Synthesegas, Mono-/Oligomere) für einen neuen Einsatz genutzt werden und bleiben somit im Stoffkreislauf.
- **Sonstige Verwertung:** Jene Kunststoffe, die nach Ende der Nutzung nicht recycelt werden können, können mit Hilfe von chemischen Verfahren für die Gewinnung von Kraft- oder Brennstoffen genutzt werden. Beim Einsatz von Altkunststoffen für die Energieerzeugung (Elektrizität, Wärme) kann durch Abscheidetechnologien CO₂ als neuer Rohstoff gewonnen und im Rahmen eines Carbon Managements weiter verwendet werden, ohne dass klimaschädliche Emissionen entstehen.

Stufen der Kreislaufwirtschaft: Abfallvermeidung, Recycling, sonstige Verwertung

Ein mechanisches Recycling setzt vorwiegend sortenreine und saubere Kunststoffabfälle voraus. Diese fallen meist nur im Bereich der industriellen Produktion an oder bei speziellen Rücknahme- und Verwertungssystemen einzelner Branchen oder bei

Chemisches Recycling, wenn me-

der Aufbereitung von Abfällen zu definierten Stoffströmen. Für andere Kunststoffabfälle, insbesondere aus dem Haushaltsbereich werden derzeit neue physikalische Verfahren entwickelt und großtechnische praktiziert, um eine sortenreine Trennung zu erreichen. Außerdem wird versucht, Informationen zur chemischen Zusammensetzung in die Kunststoffe einzubauen, was eine effizientere Trennung unterschiedlicher Kunststoffabfälle erleichtern würde. Diese Entwicklung steht technologisch aber noch am Anfang.

mechanisches Recycling nicht realisierbar

Ansätze für eine Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen

Ansatz	Kreislaufwirtschaftsziel	Technologie	
Abfallvermeidung	Weiterverwendung	Längere technische Lebenszeit, längere haltbares Produktdesign	
	Wiederverwendung	Reinigung, Reparatur	Mechanische Verfahren
Recycling	Rohstoff als Substitut für Neumaterial	Sortieren, Säubern, Umschmelzen, Lösung und Fällung	
	Ausgangsstoff für Neumaterial	Solvolyse, Verölung, Pyrolyse, Gasifizierung	Chemische Verfahren
	Reduktionsmittel, Kohle-Substitut	Hochofenprozess	
Sonstige Verwertung	Gewinnung von Kraft-/Brennstoff	Verölung, Pyrolyse, Vergasung	Thermische Verfahren
	Energiegewinnung und CO ₂ als Rohstoff	Verbrennung, CO ₂ -Abscheidung, Carbon Management	

Quelle: VCI. Darstellung ZEW.

Verfahren des chemischen Recyclings

Für Kunststoffabfälle, für die mechanische Recycling-Verfahren derzeit nicht möglich sind, ist das chemische Recycling aus Kreislaufwirtschaftssicht die beste Alternative. Dabei werden Kunststoffabfälle aufbereitet und chemisch zu sekundären Chemierohstoffen umgewandelt, die in der Chemieproduktion (z.B. Kunststoffherstellung) genutzt werden können. Man unterscheidet zwischen thermochemischen Verfahren (Pyrolyse, Gasifizierung, Verölung) und Solvolyseverfahren. Thermochemische Verfahren lassen sich grundsätzlich auf Kunststoffsorten, Verbundmaterialien und gemischte Abfälle anwenden. Aus diesen werden bei höheren Temperaturen kleinere Moleküle in Form von Öl- und Gasmischungen erzeugt, die wieder in chemischen Synthesen eingesetzt werden, zum Beispiel zur Herstellung von neuen Polymeren über Zwischenprodukte. Solvolyseverfahren (z.B. Glykolyse) dagegen lassen sich nur auf bestimmte Kunststoffe, die Kondensationspolymere, anwenden. Bei der Solvolyse gewinnt man aus dem Polymer seine Bausteine, die Monomere, zurück, aus denen wieder neues Polymer hergestellt werden kann. Die Qualität der aus chemisch rezyklierten Rohstoffen hergestellten Kunststoffe entspricht der von Neuware.

Thermochemische und Solvolyseverfahren

Die Herausforderung ist, Verfahren zu entwickeln, die Sekundärrohstoffe zu einem wirtschaftlich wettbewerbsfähigen Preis herstellen können. In den vergangenen Jahren hat die Chemieindustrie in die technologische Entwicklung solcher Verfahren investiert. Anfang 2024 waren **15 Projekte in der Umsetzungsphase** und weitere 15 Projekte in der Planungsphase. Deutschland weist mit 4 realisierten und 3 geplanten Projekten die meisten Aktivitäten auf, gefolgt von Frankreich und den Niederlanden. Diese Projekte repräsentieren jedoch nur einen kleinen Teil des tatsächlich möglichen Potenzials. Um dieses Potenzial zu heben, sind an vielen Stellen verbesserte Rahmenbedingungen notwendig.

Bereits 15 Industrieprojekte realisiert

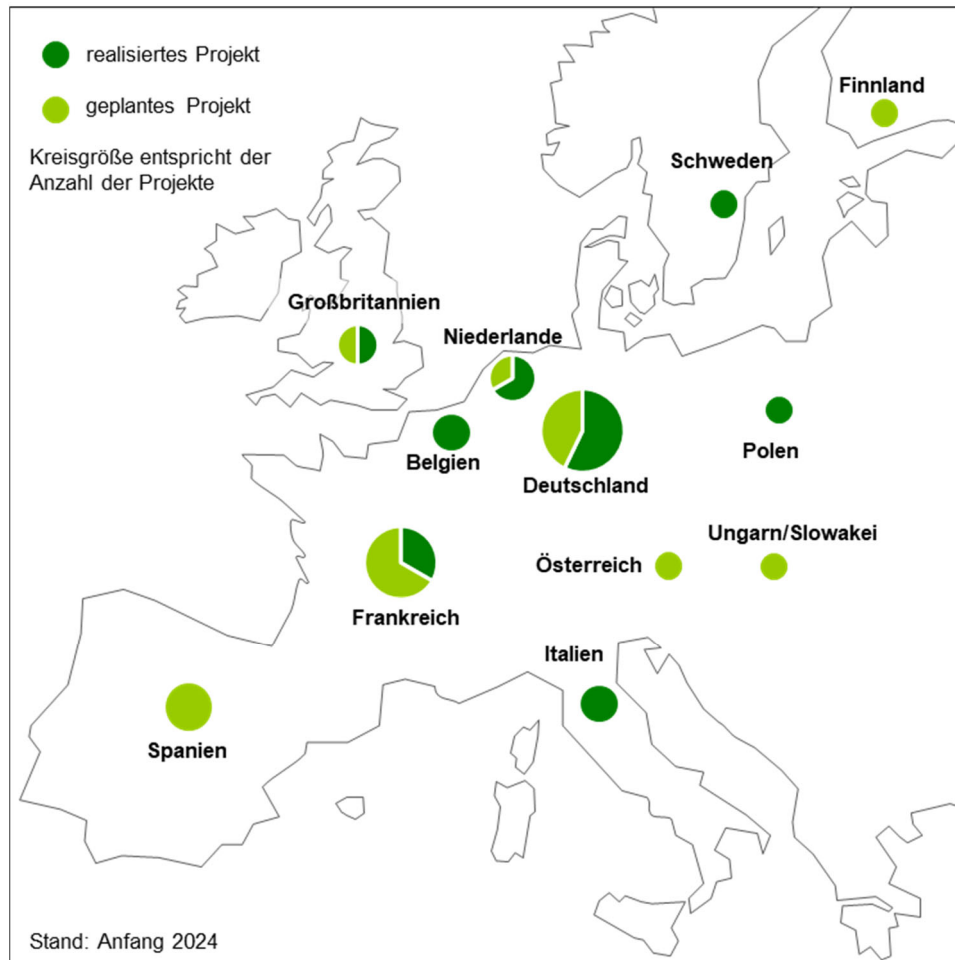
Hindernisse für das chemische Recycling

Um chemisches Recycling im industriellen Maßstab zu nutzen und damit einen quantitativ merklichen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen zu leisten, sind verschiedene Hindernisse zu überwinden. Diese liegen oft im Bereich der **rechtlichen und organisatorischen Rahmenbedingungen**. Aus Sicht der Chemieindustrie geht es u.a. darum, den Begriff "Abfallende" klar festzulegen (d.h. ab wann ein wiederverwerteter Kunststoff nicht mehr als Abfall gilt). Weitere Punkte sind die Berücksichtigung von rezyklierten Kunststoffen in Massenbilanzierungen sowie um die rechtliche Einordnung von Recyclingquoten für Kunststoffe (z.B. im Verpackungsgesetz).

Hindernisse vor allem im regulativen Bereich

Außerdem sind Anreizsysteme für die Sortierung von Kunststoffen aus Gewerbe- und Hausmüll sowie für die Datenerfassung zur Nachverfolgung der Kunststoffabfälle und ihrer stofflichen Verwertung notwendig. Hilfreich könnte die Etablierung einer einheitlichen und unabhängigen Stelle zur Erfassung von Daten zu Abfällen und Recyclingverfahren und zur Vergabe von Zertifikaten sein.

Realisierte und geplante Projekte zu chemischem Recycling in Europa



Quelle: CEFIC. Darstellung ZEW.

Insgesamt braucht es **mehr Forschung** und bessere Rahmenbedingungen für Innovationen, um die Ziele einer Kreislaufwirtschaft im Bereich von Kunststoffen zu erreichen. Die Bedeutung von Recyclingtechnologien wird zwar oft in politischen Strategiepapieren angeführt, allerdings gibt es kaum konkrete Programme zur Entwicklung und Erprobung dieser Technologien

Mehr Forschung notwendig

Durch die Einrichtung von **Reallaboren** können wissenschaftlich-technische, wirtschaftliche und rechtliche Fragestellungen beim Einsatz von chemischen Recycling untersucht und praxistaugliche Lösungsansätze entwickelt werden, wie z.B.

- Umgang mit heterogenen und verschmutzten Abfallströmen und kunststoffarmen Mischungen,
- Erreichung der erforderlichen Qualität mit realen Abfällen auf großtechnischer Basis,
- gesamtökologische Bewertung der eingesetzten Technologien über den gesamten Lebenszyklus,
- Wirtschaftlichkeit des Rezyklateinsatzes,
- Verfügbarkeit von ausreichenden Abfallströmen.

Reallabore zur Lösung offener Fragen

4 Nutzung von Chemie-Innovationen in anderen Branchen

Patentstatistik zeigt Beitrag der Chemie zu Innovationen in anderen Branchen

Innovationen aus der Chemieindustrie spielen für viele andere Branchen eine große Rolle. Um die Nutzung von Chemie-Innovationen durch andere Branchen zu untersuchen, wird die **Patentstatistik** herangezogen. Diese erlaubt es, ein Patent sowohl Technologien als auch Branchen zuzuordnen:

- Die **technologische Zuordnung** beruht auf den Klassen der Internationalen Patentklassifikation (IPC). Für diese Studie wird auf eine Einteilung der WIPO in 35 Technologiefelder zurückgegriffen.
- Die **Branchenzuordnung** beruht auf dem Wirtschaftszweig des Unternehmens, das ein Patent anmeldet. Dabei wird die Branche der wirtschaftlichen Hauptaktivitäten herangezogen.

Durch die **Verknüpfung von Technologie- und Brancheninformation** kann eine Matrix erstellt werden, die angibt, wie viele der Patentanmeldungen aus einer Branche auf bestimmte Technologiefelder entfallen, bzw. wie sich die Patentanmeldungen in einem Technologiefeld auf unterschiedliche Branchen verteilen. Aus dieser Matrix können mehrere Indikatoren zur Relevanz von Chemietechnologien für andere Branchen gewonnen werden:

Unterschiedliche Indikatoren zum Innovationsbeitrag der Chemie

1. Die Verteilung der **Patentanmeldungen der Chemieindustrie nach Technologiefeldern** zeigt an, in welchem Umfang sich die Chemieindustrie mit "chemiefremden" Technologien befasst und damit Innovationsthemen anderer Branchen aufgreift.
2. Der **Anteil der Chemieindustrie** an allen Patentanmeldungen in einem Technologiefeld ist ein Indikator für den Beitrag der Chemieindustrie zur Innovationstätigkeit in diesem Technologiefeld.
3. Betrachtet man für jedes Technologiefeld nur die Patentanmeldungen, die aus **Material-Branchen** stammen, so zeigt der Anteilswert für die Chemieindustrie die **relative Bedeutung der Chemieindustrie** als Materialbasis für Innovationen in anderen Technologiefeldern.
4. Betrachtet man für einzelne **Abnehmer-Branchen** der Chemieindustrie nur jene Patentanmeldungen, die branchenfremde Technologiefelder betreffen, dann ist der Anteil der Chemie-Patente an allen branchenfremden Patenten ein Indikator für die Bedeutung von Chemie-Wissen für die Innovationstätigkeit in dieser Branche.

Die Chemie-Branche leistet technologische Beiträge auch außerhalb der Chemie

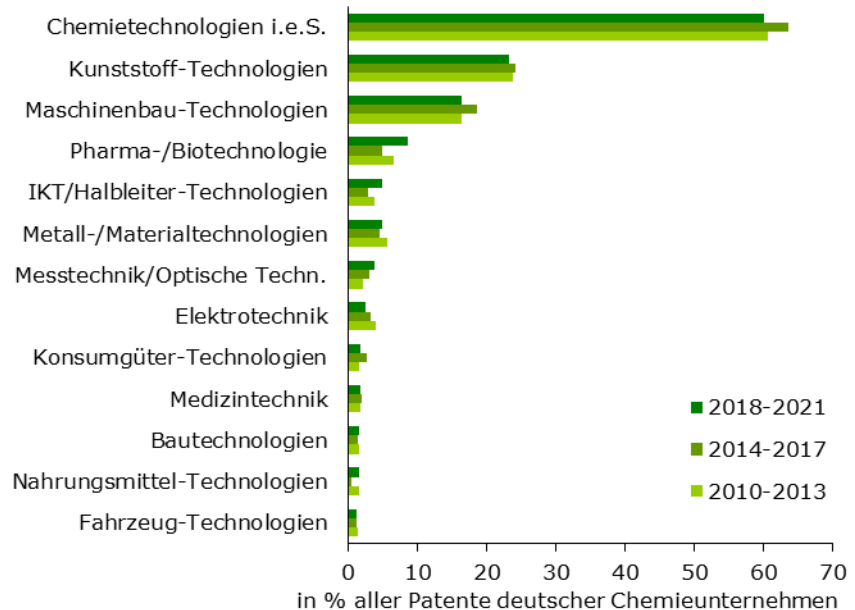
Der größte Teil der **Patentanmeldungen von Chemieunternehmen aus Deutschland** entfällt auf Chemie-Technologien im engeren Sinn. Diese sind über die Bereiche organische Feinchemie, Grundstoffchemie, Oberflächen/Beschichtungen, Mikrostrukturen/Nanotechnologie und chemische Verfahrenstechnik abgegrenzt. Im Zeitraum 2018-2021 hatte dieses Technologiefeld einen Anteil von 64 % an allen Patenten deutscher Chemieunternehmen. Der Bereich Kunststofftechnologien, der industriell in erster Linie für die kunststoffverarbeitende Industrie die Basistechnologie darstellt, macht 23 % der Patentanmeldungen von Chemieunternehmen aus Deutschland aus. An dritter Stelle folgen Maschinenbau-Technologien mit 16 %. Dieser hohe Anteil unterstreicht, dass FuE und Technologieentwicklung in der Chemie oft mit der Entwicklung von Herstellungsprozessen und der dafür notwendigen Technik einhergeht. Diese auf prozesstechnologisches Knowhow abzielenden Patentaktivitäten würden noch höher ausfallen und bei 23 % liegen, wenn auch der Bereich der chemischen Verfahrenstechnik mitbezogen würde (der hier Teil der Chemie-Technologien i.e.S. ist).

Verteilung der Patentanmeldungen von Chemieunternehmen aus Deutschland¹⁾ nach Technologiefeldern

1) Unternehmen des Wirtschaftszweigs 20 (Herstellung von chemischen Erzeugnissen) mit Hauptsitz in Deutschland

Chemietechnologien i.e.S.: organische Feinchemie, Grundstoffchemie, Oberflächen/Beschichtungen, Mikrostrukturen/Nanotechnologie, chemische Verfahrenstechnik

Quelle: EPA - PATSTAT. Berechnungen des Fraunhofer-ISI.



Breites technologisches Spektrum der Chemieunternehmen

Das Technologiefeld Pharma/Biotechnologie repräsentiert 9 % der Patentanmeldungen von Chemieunternehmen, gefolgt von den Feldern IKT/Halbleiter und Metalltechnologien mit jeweils 5 %. Chemieunternehmen sind aber auch in vielen weiteren Technologiefeldern aktiv, darunter Messtechnik/Optik, Elektrotechnik, Medizintechnik, Bautechnologien und Nahrungsmitteltechnologien. Im Zeitverlauf hat sich seit 2010 an der technologischen Ausrichtung der Patentaktivitäten von Chemieunternehmen aus Deutschland nur wenig geändert.

Chemieindustrie Innovationstreiber für Kunststoffverarbeitung, Nahrungsmittel, Pharma, Metalle und andere Materialien

Betrachtet man den **Anteil der Chemieindustrie an allen Patentanmeldungen in den einzelnen Technologiefeldern**, so zeichnet die Chemie-Branche für den überwiegenden Teil der Patentanmeldungen zu Kunststofftechnologien verantwortlich (2018-2021: 64 %). Hohe Anteilswerte an allen Patentanmeldungen weisen Chemieunternehmen außerdem im Bereich Nahrungsmitteltechnologien (16 %), Pharma/Biotechnologie (13 %) und Metall- und andere Materialtechnologien (13 %) auf. Dies bedeutet, dass die Chemieindustrie für diese Technologiefelder wesentliche Inputs liefert. Nennenswerte Beiträge sind darüber hinaus für die Technologiefelder Maschinenbau, Konsumgüter, Bau, Medizintechnik und IKT/Halbleiter zu verzeichnen. Am geringsten ist der Beitrag zu Fahrzeugtechnologien. Dies liegt zum einen daran, dass hier die Unternehmen der Fahrzeugindustrie selbst sehr umfangreiche Patentaktivitäten aufweisen. Zum anderen erfolgt der Beitrag der Chemie zur technologischen Entwicklung in der Fahrzeugindustrie nicht direkt über entsprechende Technologien im Bereich Antrieb und Fahrzeugtechnik, sondern über die Bereitstellung leistungsfähiger Materialien (z.B. Kunststoffe, Metalle) sowie chemischer Spezialtechnologien (z.B. Beschichtung, Klebtechnik).

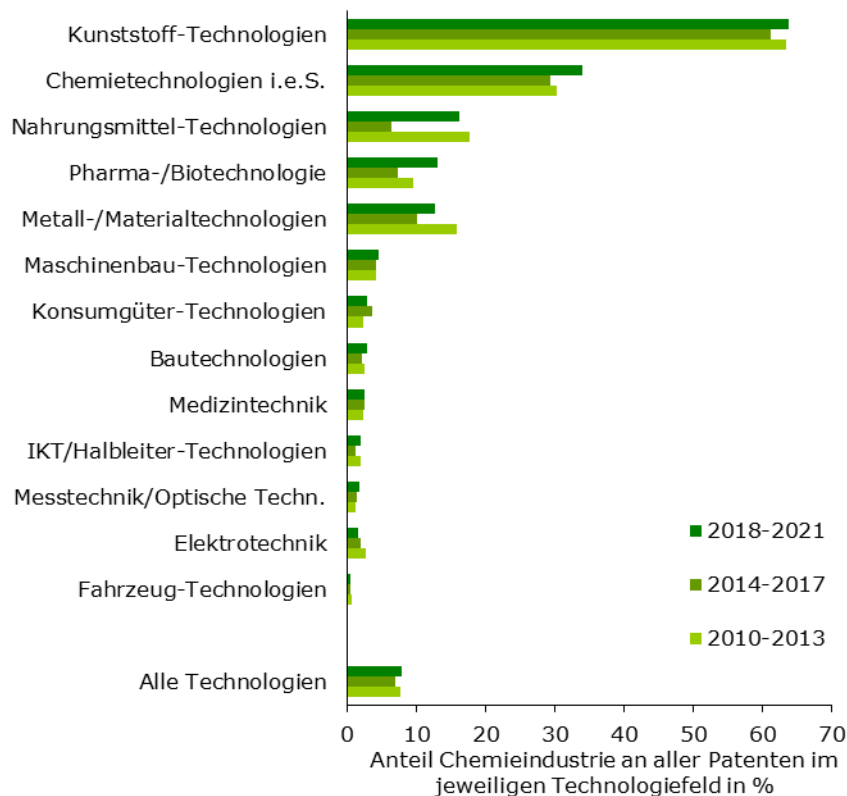
Im **Zeitverlauf** zeigt sich nur eine geringe Veränderung des Anteils von Patentanmeldungen durch die Chemieindustrie an allen Patentanmeldungen. 2018-2021 lag dieser Anteilswert bei 7,9 %. Ein Anstieg ist im Bereich Pharma/Biotechnologie sowie - in geringem Umfang - im Bereich Maschinenbau zu beobachten. Eine deutliche Zunahme zeigt sich für Anmeldungen im Bereich der Chemietechnologien i.e.S.

Anteil der Chemieindustrie¹⁾ an allen Patentanmeldungen in Deutschland nach Technologiefeldern

1) Unternehmen des Wirtschaftszweigs 20 (Herstellung von chemischen Erzeugnissen) mit Sitz in Deutschland

Chemietechnologien i.e.S.: organische Feinchemie, Grundstoffchemie, Oberflächen/Beschichtungen, Mikrostrukturen/Nanotechnologie, chemische Verfahrenstechnik

Quelle: EPA - PATSTAT. Berechnungen des Fraunhofer-ISI.



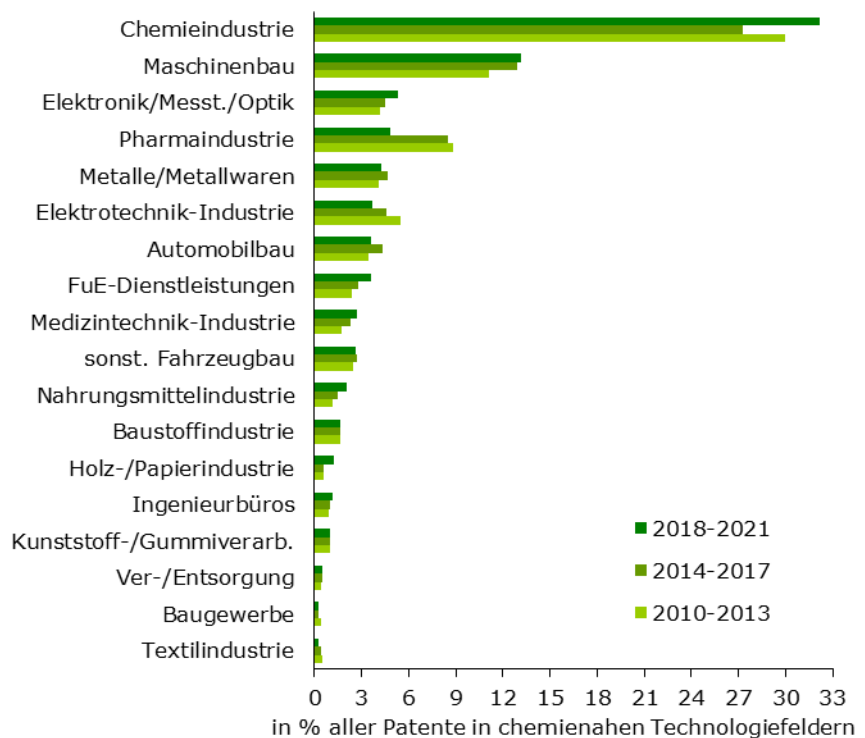
Von allen **Patenten im Bereich der Chemietechnologien i.w.S.** (d.h. inkl. Kunststoffe/makromolekulare Chemie, Nahrungsmittelchemie, Materialtechnologien/Metallurgie) wurden 2018-2021 37 % von Unternehmen der Chemie- und Pharmaindustrie angemeldet. Wichtige weitere Anmeldebranchen von Chemietechnologie-Patenten sind der Maschinenbau (13 %), die Elektronik/Computerindustrie (5 %), die Metallindustrie (4 %) sowie die Elektrotechnik und der Automobilbau (jeweils knapp 4 %). Die restlichen Chemie-Patentanmeldungen verteilen sich auf viele andere Branchen, darunter FuE-Dienstleistungen, andere technische Dienstleistungen und andere Materialbranchen, aber auch auf die Wissenschaft und Einzelerfinder.

Chemietechnologie auch Gegenstand der Forschung in vielen anderen Branchen

Dies bedeutet, dass Unternehmen aus anderen Branchen sich ebenfalls intensiv mit der Entwicklung von chemischen Technologien befassen. Dies liegt daran, dass chemische Technologien für die Innovationstätigkeit in vielen Branchen eine zentrale Bedeutung haben, weshalb auch dort ein Technologie-Knowhow im Bereich Chemie vorgehalten wird. Aus Sicht der Chemieindustrie gibt es somit auch in vielen Kundenbranchen Kompetenzen zu Chemie-Technologien. Diese sind, im Verein mit den eigenen Kompetenzen der Chemieindustrie in anderen Technologiefeldern, eine sehr gute Basis für technologische Kooperationen und eine effektive Interaktion zwischen Chemie und anderen Branchen entlang der gesamten Innovationskette.

Im Zeitverlauf zeigt sich eine Zunahme des Anteils der Chemieindustrie an allen Patentanmeldungen zu Chemietechnologien, während der Anteil der Pharmaindustrie zurückging. Dahinter stehen primär Reorganisationen von Unternehmensgruppen (insbesondere Ausgliederungen von Unternehmensteilen), die in beiden Branchen aktiv sind. Steigende Beiträge zu Patentanmeldungen im Bereich Chemietechnologien sind für den Maschinenbau und die Elektronik-, Messtechnik- und Optikindustrie zu beobachten.

Verteilung der Patentanmeldungen aus Deutschland im Technologiefeld Chemie¹⁾ nach Branche des Anmelders



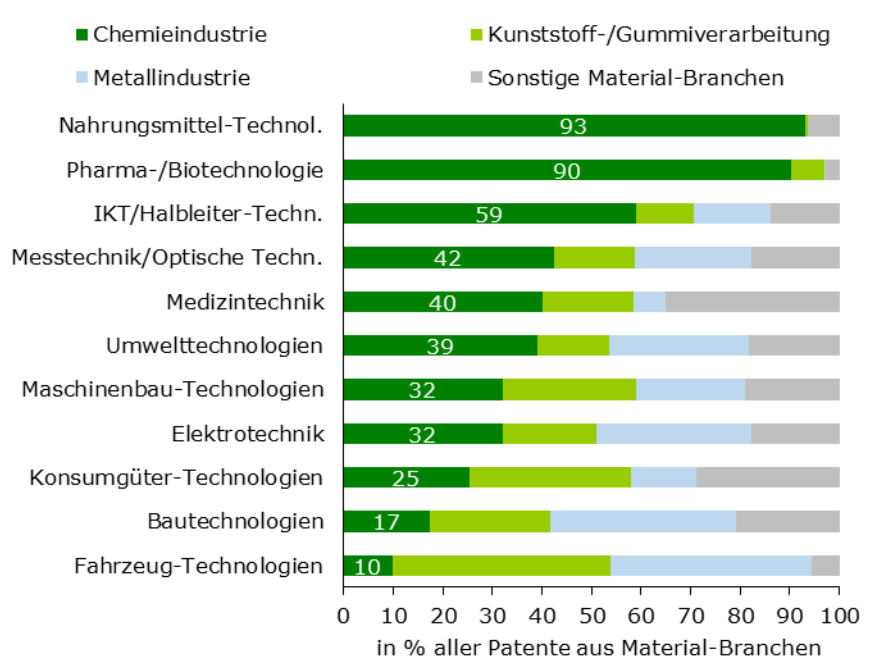
1) organische Feinchemie, Kunststoffe/makromolekulare Chemie, Nahrungsmittelchemie, Grundstoffchemie, Materialtechnologien/Metallurgie, Oberflächen/Beschichtungen, Mikrostrukturen/Nanotechnologie, chemische Verfahrenstechnik

Quelle: EPA - PATSTAT. Berechnungen des Fraunhofer-ISI.

Chemieindustrie in vielen Anwendungsfeldern wichtigster Lieferant von Materialinnovationen

Um die Bedeutung der Chemieindustrie in ihrer Funktion als Innovationsmotor im Bereich Materialtechnologie herauszuarbeiten, wird ihr Beitrag zu den Patentanmeldungen in verschiedenen Anwendungsfeldern mit den Beiträgen anderer Material-Branchen (Kunststoff-/Gummiverarbeitung, Metallindustrie, Textil-/Holz-/Papier-/Baustoffindustrie) verglichen. Der Anteilswert für die Chemieindustrie zeigt an, in welchen Ausmaß **Materialinnovationen aus der Chemie die materielle Grundlage** für die Innovationstätigkeit in verschiedenen **Anwendungsfeldern** darstellen. Klar an erster Stelle unter den Material-Branchen steht die Chemieindustrie als Lieferant von Materialinnovationen im Bereich der Nahrungsmittel, Pharma/Biotechnologie, IKT/Halbleiter, Messtechnik/Optik, Medizintechnik und Umwelttechnologien. Ebenfalls von großer Bedeutung ist die Chemieindustrie im Bereich Maschinenbau und Elektrotechnik.

Verteilung der Patentanmeldungen aus Material-Branchen,¹⁾ nach ausgewählten Technologiefeldern



1) Chemieindustrie: WZ 20, Kunststoff-/Gummiverarbeitung: WZ 22, Metallindustrie: WZ 24 plus 1/3 von WZ 25; sonstige Material-Branchen: WZ 13, 16, 17, 23 (Textil-, Holz-, Papier-, Baustoffindustrie).

Quelle: EPA - PATSTAT. Berechnungen Fraunhofer-ISI und ZEW

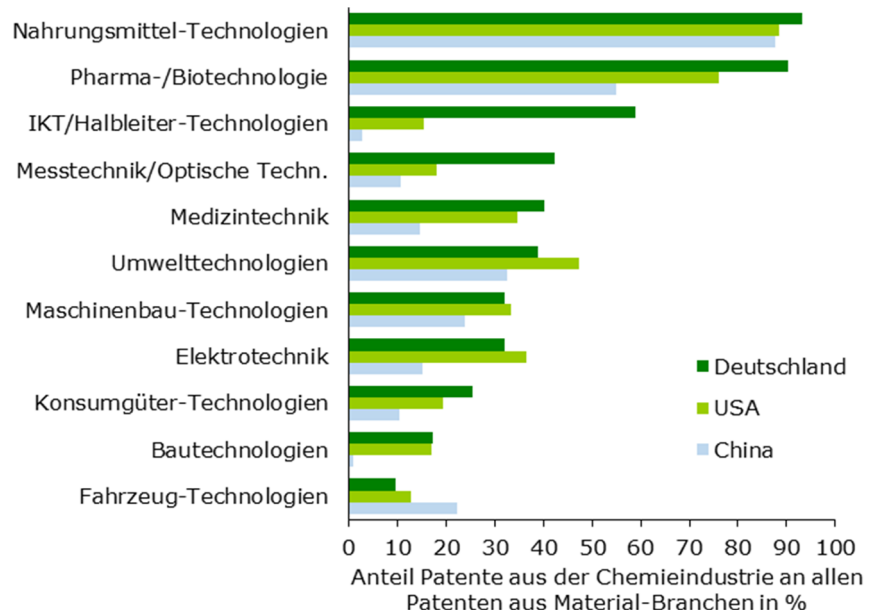
Fahrzeugbau: geringer direkter, aber großer indirekter Beitrag der Chemie

Einzig in den Bereichen Konsumgüter, Bau und Fahrzeuge ist der Beitrag der Chemieindustrie deutlich niedriger als der von anderen Material-Branchen. Bei Konsumgütern kommt der Kunststoffverarbeitung und der Baustoffindustrie (inkl. Glas, Keramik) eine größere Bedeutung zu. Im Baubereich liegt die Metallindustrie an erster Stelle. Im Bereich **Fahrzeugbau** spielen die Kunststoff- und Gummiverarbeitung sowie die Metallindustrie eine deutlich größere Rolle als Lieferanten von Materialinnovationen. Dabei ist zu beachten, dass sehr viele der Innovationen im Bereich der Kunststoff- und Gummiverarbeitung auf Innovationen aus der Chemieindustrie beruhen (ca. zwei Drittel), und auch im Bereich der Metalltechnologien die Chemieindustrie ein wesentlicher Innovationsgeber (ca. ein Fünftel). Somit trägt die Chemieindustrie auf indirektem Weg, d.h. über andere Material-Branchen, die Innovationen aus der Chemieindustrie nutzen, zur Innovationstätigkeit im Bereich von Endprodukte-Branchen bei.

Deutschland: höhere Anteil der Chemieindustrie an allen Material-Patenten

Im **internationalen Vergleich** ist in Deutschland der Anteil der Chemieindustrie an allen Patentanmeldungen aus Material-Branchen in den meisten Anwendungsfeldern höher als in den USA und China. In den USA leistet die Chemieindustrie etwas höhere Beiträge im Bereich Umwelttechnik und Elektrotechnik. In China ist der Beitrag der Chemieindustrie in den meisten Anwendungsfeldern sehr gering. Eine Ausnahme stellt der Fahrzeugbau dar. Hier sind die direkten Innovationsbeiträge der chinesischen Chemieunternehmen höher als in den USA und Deutschland.

Anteil der Patente aus der Chemieindustrie an allen Patenten aus Material-Branchen, nach ausgewählten Technologiefeldern



Quelle: EPA - PATSTAT. Berechnungen Fraunhofer-ISI und ZEW

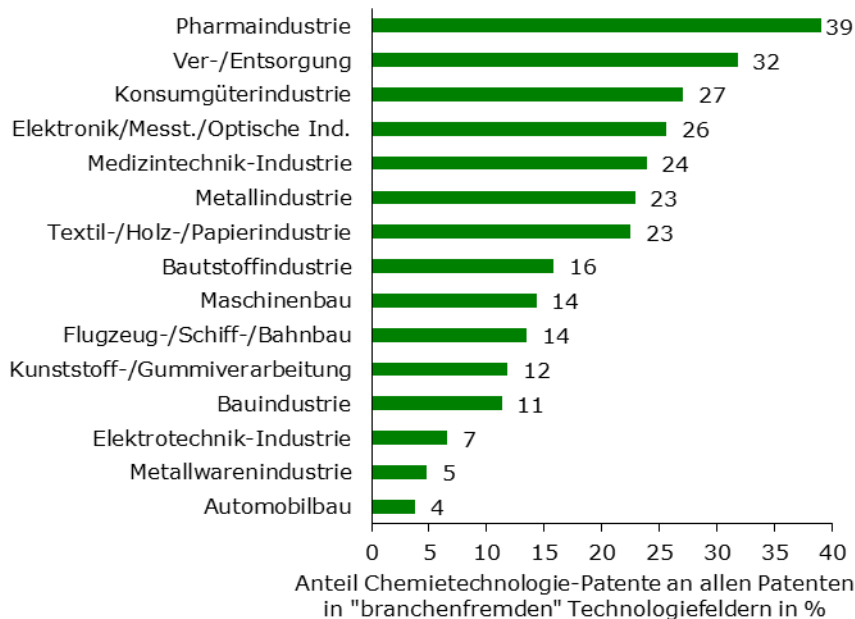
Chemie-Technologien wichtiger externen Impulsgeber für Pharma, Ver- und Entsorgung, Konsumgüter und Elektronik

Ein Indikator für die Bedeutung von **Chemie-Wissen als externer Impulsgeber für Innovationen** in einzelnen Branchen ist der Anteil von Chemietechnologien an allen Patentanmeldungen einer Branche, die außerhalb des Kern-Technologiefelds einer Branche liegen. Externe Impulse umfassen dabei nicht nur den Bereich der Materialtechnologien, sondern auch Produktionstechnologien, Informationstechnologien und andere "branchenfremde" Technologien. Für diesen Indikator zeigt sich eine besonders große Bedeutung von Chemie-Wissen für die Pharmaindustrie, die Ver- und Entsorgungsbranche (u.a. Energieversorgung, Recycling), die Konsumgüterindustrien (u.a. Nahrungsmittel), die Elektronik/Messtechnik/Optik-Branche, die Medizintechnik-Industrie, die Metallindustrie sowie die Textil-, Holz- und Papierindustrie. In all diesen Branchen stellt Chemie-Wissen eine der zentralen externen Wissens-Grundlagen für die Innovationstätigkeit dar.

Anteil von Chemietechnologien¹⁾ an allen Patenten in branchenfremden Technologiefeldern,²⁾ nach ausgewählten Branchen

1) organische Feinchemie, Kunststoffe/makromolekulare Chemie, Nahrungsmittelchemie, Grundstoffchemie, Materialtechnologien/Metallurgie, Oberflächen/Beschichtungen, Mikrostrukturen/Nanotechnologie, chemische Verfahrenstechnik.
2) Alle Technologiefelder abzüglich Felder mit einem direkten Technologiebezug zur Branche, wie z.B. Pharma- und Biotechnologie im Fall der Pharmaindustrie.

Quelle: EPA - PATSTAT. Berechnungen Fraunhofer-ISI und ZEW



Die Patentanalysen haben gezeigt, dass Innovationen aus der Chemieindustrie die Innovationstätigkeit in vielen anderen Branchen und Anwendungsfeldern unterstützen. Dies lässt sich an folgenden Befunden festmachen:

- Chemie-Unternehmen befassen sich häufig mit den Technologien ihrer Kundenbranchen sowie der Anwendungsgebiete, in denen neue Chemie-Lösungen eingesetzt werden.
- Die Kundenbranchen der Chemie sind gleichzeitig selbst in der Neu- und Weiterentwicklung von Chemietechnologien tätig. Dies unterstreicht die zentrale Bedeutung der Chemie für Innovationen in den Anwenderbranchen. Diese gegenseitige Wissensbasis ist gleichzeitig eine wesentliche Voraussetzung für erfolgreiche Kooperationen zwischen der Chemie als innovativer Materiallieferantin und ihren Abnehmerbranchen.
- Die Chemieindustrie ist in vielen Anwendungsgebieten der mit Abstand wichtigste Lieferant von Materialinnovationen, wie z.B. Nahrungsmittel, Pharma, Halbleiter, Messtechnik/Optik, Medizintechnik und Umwelttechnik.
- Chemie-Technologien sind ein wichtiger externer Impulsgeber für viele andere Branchen. Für die Pharmaindustrie, die Ver- und Entsorgungsbranche (Energie, Wasser, Entsorgung), die Konsumgüterindustrie und die Elektronik stehen Chemietechnologien an erster Stelle der externen technologischen Impulse für Innovationen.

Patentanalyse zeigt zentrale Bedeutung der Chemie

5 Rahmenbedingungen für eine innovative Chemieindustrie in Deutschland

Viele unterschiedliche Faktoren können Innovationsaktivitäten beeinträchtigen

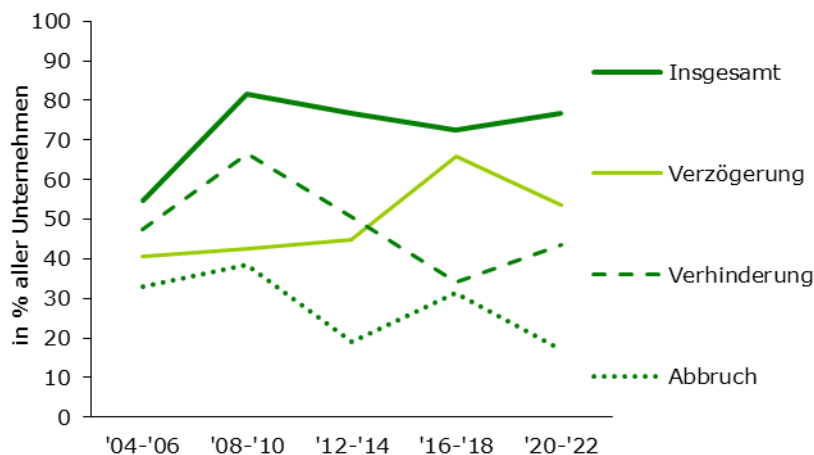
Für die Nutzung der gesamtwirtschaftlichen Innovationspotenziale der Chemie müssen die Chemieunternehmen in der Lage sein, ihre Innovationsideen über eigene FuE-Aktivitäten und die Zusammenarbeit mit Dritten umzusetzen und in neue Technologien, Produktangebote und Investitionen zu überführen. Hierfür muss eine **breite Palette an Rahmenbedingungen** stimmen: von der Finanzierung über das Fachkräfteangebot, die Verfügbarkeit von Kooperationspartnern, eine innovationsoffene Nachfrage, innovationsfreundliche rechtliche Bestimmungen und Verwaltungsregeln, ein effektiver Schutz für geistiges Eigentum bis hin zu einer effizienten unternehmensinternen Organisation von Innovations- und Verwertungsprozessen. Stimmen diese Rahmenbedingungen nicht, kann es zu Schwierigkeiten bei der Umsetzung von Innovationsvorhaben kommen. Dies schwächt nicht nur die betroffenen Unternehmen selbst. Verringert sich dadurch auch der Innovationsoutput, gehen von der Chemieindustrie weniger Innovationsbeiträge für andere Branchen und zur Lösung der anstehenden Herausforderungen aus.

Die meisten Unternehmen in der deutschen Chemieindustrie sehen sich solchen **Innovationshemmnissen** gegenüber. Im Zeitraum 2020-2022 berichteten 77 % der Unternehmen, dass aufgrund von Hemmnissen Innovationsaktivitäten verzögert, abgebrochen oder nicht begonnen wurden. Am häufigsten kam es zu Verzögerungen (53 %), während 44 % Innovationsprojekte aufgrund von Hemmnissen nicht in Angriff genommen haben und 17 % bereits begonnenen Projekte vorzeitig einstellen mussten.

Verbreitung von Innovationshemmnissen in der deutschen Chemieindustrie 2006 bis 2022 nach der Auswirkung auf Innovationsaktivitäten

Anteil der Unternehmen, bei denen es innerhalb eines Dreijahreszeitraums aufgrund von Hemmnisfaktoren zu Verzögerungen, zum Abbruch oder zum Nicht-Beginn von Innovationsaktivitäten gekommen ist.

Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel.



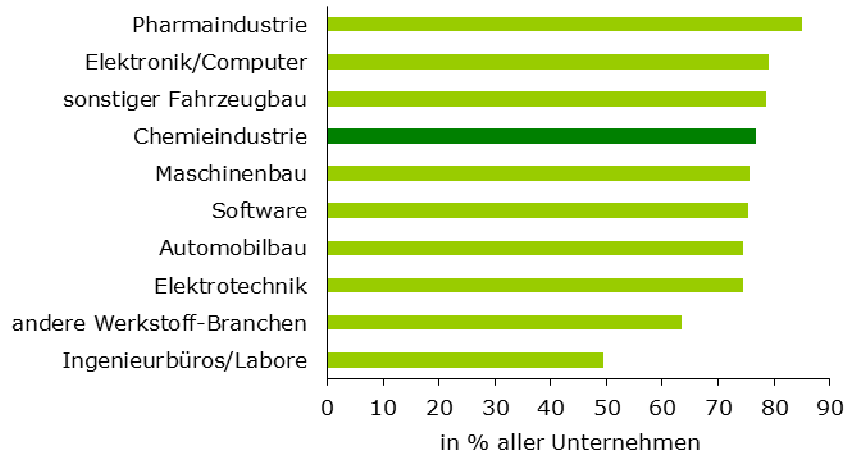
Innovative Branchen häufiger von Hemmnissen betroffen

Die Chemieindustrie steht mit der großen Verbreitung von Innovationshemmnissen jedoch nicht alleine da. Auch in den meisten anderen innovationsorientierten Branchen sehen sich drei Viertel oder mehr der Unternehmen bei ihren Innovationsanstrengungen behindert. Dabei ist zu beachten, dass Hemmnisse besonders dann auftreten, wenn Unternehmen neues "Innovationsterrain" betreten, d.h. sich mit neuen Fragestellungen befassen oder mit Hilfe neuer technologischer Ansätze Lösungen entwickeln. Daher sind die innovativen Branchen häufiger von Hemmnissen betroffen als weniger innovative Branchen.

Verbreitung von Innovationshemmnissen in Deutschland 2022 nach ausgewählten Branchen

Anteil der Unternehmen, bei denen es innerhalb eines Dreijahreszeitraums aufgrund von Hemmnisfaktoren zu Verzögerungen, zum Abbruch oder zum Nicht-Beginn von Innovationsaktivitäten gekommen ist.

Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel.



Fachkräftemangel Innovations- hemmnis Nr. 1

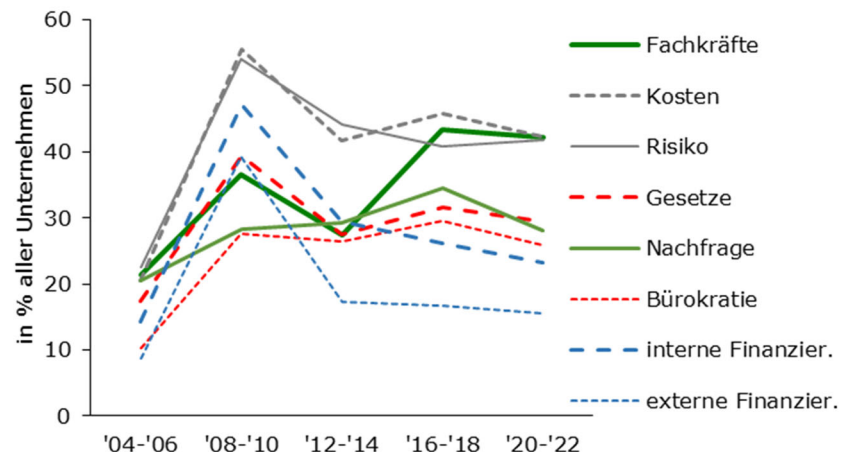
Im Zeitraum 2020-2022 standen in der Chemieindustrie drei Hemmnisse an der Spitze: der **Fachkräftemangel**, die **hohen Kosten** sowie das hohe (technologische) **Risiko**. Die große Bedeutung des Faktors Risiko unterstreicht in erster Linie das hohe Innovationsniveau, d.h. dass viele Unternehmen mit ihren Innovationsprojekten grundsätzlich neue technologische Ansätze verfolgen, die mit einem hohen Risiko der technischen Umsetzbarkeit einhergehen. Die große Bedeutung des Kostenfaktors zeigt an, dass Innovationsvorhaben in der Chemie häufig aufwendig sind und umfangreiche Mittel benötigen. Der Fachkräftemangel hat als Hemmnis in den vergangenen 15 Jahren deutlich zugenommen. Er tritt nicht nur in Bezug auf akademische Qualifikationen auf, sondern zunehmend auch im Bereich beruflicher Ausbildung.

Gesetzliche Regelungen waren für rund 30 % der Chemieunternehmen in Zeitraum 2020-2022 ein Innovationshemmnis. Dieser Anteilswert war 2008-2010 noch höher, als u.a. die Einführung von REACH die Realisierung von Innovationsvorhaben erschwert hat. Im Zeitraum 2008-2010, d.h. während der Finanzkrise, war auch das Thema Finanzierung ein Faktor, der in vielen Unternehmen Innovationsaktivitäten beeinträchtigt hat. Seither hat die Bedeutung von Finanzierungshemmnissen abgenommen.

Verbreitung unterschiedlicher Innovationshemmnisse in der deutschen Chemieindustrie 2006 bis 2022

Anteil der Unternehmen, bei denen es innerhalb eines Dreijahreszeitraums aufgrund des angeführten Hemmnisses zu Verzögerungen, zum Abbruch oder zum Nicht-Beginn von Innovationsaktivitäten gekommen ist.

Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel.



Angesichts des hohen Risikos und der hohen Kosten von Innovationsaktivitäten stellt die **Finanzierung von Innovationsvorhaben** stets eine Herausforderung für Unternehmen dar. Hinzu kommt, dass Unternehmen oftmals nur ein Teil des Nutzens ihrer Innovationen als eigene Erträge zurückerhalten, z.B. wenn ihre innovativen Ideen von anderen Unternehmen übernommen werden oder wenn ein intensiver Innovationswettbewerb dazu führt, dass Innovationen nur kurz am Markt verwertet werden können. Um trotz dieser Herausforderungen ein hohes

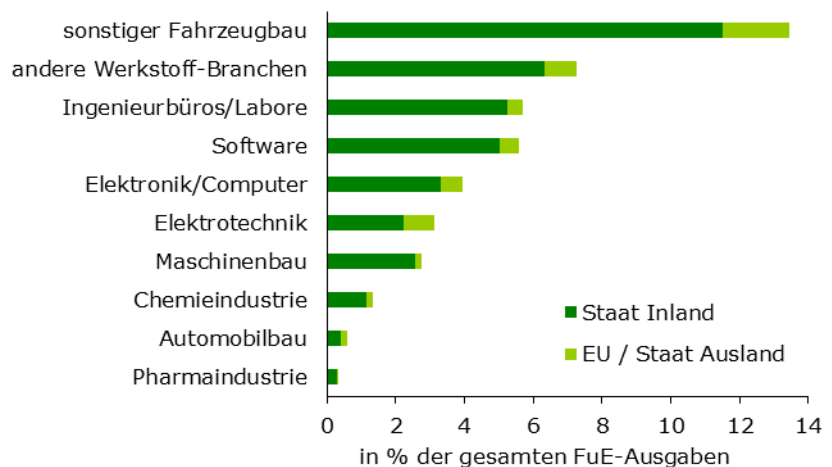
Risiko, Kosten und Wissensabflüsse rechtfertigen staatliche Ko-Finanzierung von FuE

Niveau der Innovationstätigkeit zu sichern, beteiligt sich die öffentliche Hand immer wieder am finanziellen Risiko von Innovationsaktivitäten. Der Fokus liegt dabei auf der **Förderung von FuE**, da hier Kosten, Risiko und der Abfluss von Wissen an Dritte besonders hoch sind. In Deutschland stehen den Unternehmen unterschiedliche Möglichkeiten der staatlichen Ko-Finanzierung von FuE-Aktivitäten zur Verfügung, die insbesondere Zuschüsse für einzelne FuE-Projekte sowie staatliche Aufträge zur Durchführung von FuE umfassen. 2020 wurde außerdem eine steuerliche FuE-Förderung (Forschungszulage) eingeführt, die allerdings erst ab dem Jahr 2022 tatsächlich zahlungswirksam wurde.

Nur 1,4 % der FuE in der Chemieindustrie stammen aus staatlicher Finanzierung

Im Jahr 2021 erhielten die Unternehmen der deutschen Chemieindustrie insgesamt rund **70 Mio. € an staatlichen Mitteln** zur Finanzierung ihrer FuE-Aktivitäten. Gemessen an den gesamten FuE-Ausgaben sind dies lediglich 1,4 %. Andere Branchen erhalten zum Teil deutlich höhere öffentliche Finanzierungsbeiträge, allen voran der sonstige Fahrzeugbau (13,4 %) und andere Werkstoff-Branchen (7,3 %). Während der hohe Wert für den sonstigen Fahrzeugbau stark auf staatliche Aufträge für die Entwicklung von militärischen Ausrüstungen zurückgeht, profitieren die anderen Werkstoff-Branchen von ihrer kleinbetrieblichen Struktur im Bereich FuE, d.h. **kleine und mittlere Unternehmen (KMU)** machen dort einen bedeutenden Teil der gesamten FuE-Ausgaben aus. Denn der größte Teil der Zuschussförderung für FuE ist auf KMU ausgerichtet. Die Chemieindustrie mit ihrer großbetrieblichen FuE-Struktur weist - ebenso wie der Automobilbau und die Pharmaindustrie - deshalb sehr niedrige staatliche FuE-Finanzierungsanteile auf. Aus einer Innovationssystem-Perspektive sollte sich die FuE-Förderung aber nicht nur an der Unternehmensgröße orientieren, sondern auch FuE-Aktivitäten entlang von Innovationsketten stimulieren, insbesondere an den Schnittstellen verschiedener Technologien und Anwendungsfelder sowie zu branchenübergreifenden Themen und disruptiven Technologien.

Beitrag der öffentlichen Hand zur Finanzierung von FuE in Unternehmen in Deutschland 2021 nach ausgewählten Branchen

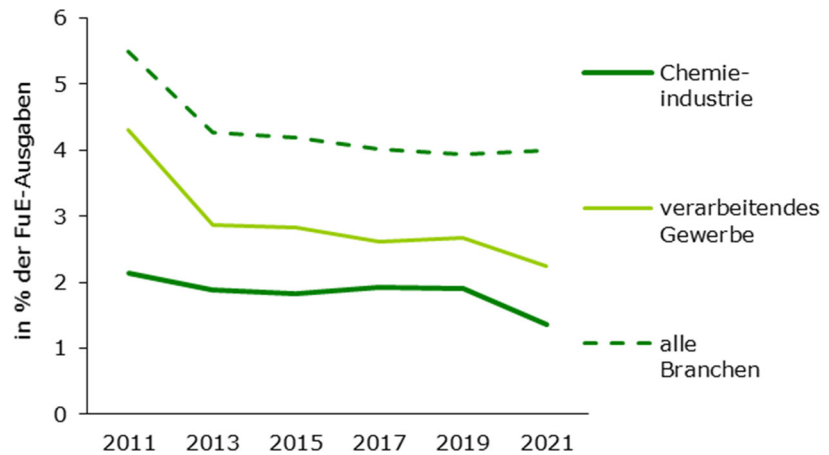


Quelle: Stifterverband: FuE-Erhebung. Berechnungen des ZEW.

Staatlicher FuE-Finanzierungsbeitrag stabil

Der Anteil staatlicher FuE-Finanzierung in der Chemieindustrie ging 2021 im Vergleich zu den Jahren 2017 und 2019 merklich zurück und folgt damit dem Trend für das verarbeitende Gewerbe insgesamt. Für alle Branchen liegt der staatliche FuE-Finanzierungsanteil mit 4,0 % merklich höher und blieb in den vergangenen acht Jahren weitgehend stabil. Hinter dieser Stabilität steht allerdings eine gewisse Verschiebung in Richtung des Dienstleistungssektors (insbesondere IKT- und FuE-Dienstleistungen).

Beitrag der öffentlichen Hand zur Finanzierung von FuE in der deutschen Chemieindustrie 2011 bis 2021 im Vergleich

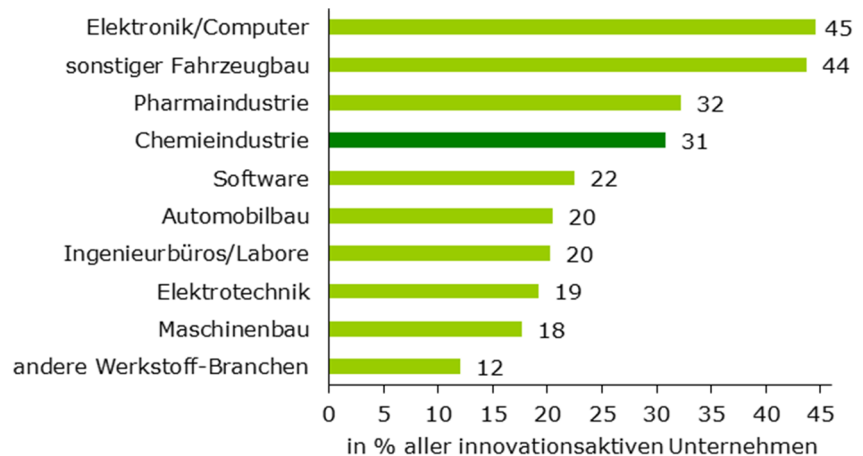


Quelle: Stifterverband: FuE-Erhebung. Berechnungen des ZEW.

Viele innovative KMU ohne staatliche Finanzierungshilfen

Während die Höhe des staatlichen FuE-Finanzierungsanteils im Wesentlichen von den großen Unternehmen bestimmt wird, da auf diese der größte Teil der gesamten FuE-Ausgaben entfällt, zeigt sich beim Anteil der Unternehmen, die eine öffentliche finanzielle Förderung für FuE- oder andere Innovationsaktivitäten erhalten haben, ein etwas anderes Bild. Die Höhe dieses Anteilswerts wird vor allem von den KMU bestimmt. In der Chemieindustrie hat im Dreijahreszeitraum 2020-2022 knapp **ein Drittel aller innovationsaktiven Unternehmen** solche Förderungen erhalten. Diese Quote liegt unter dem Wert der Elektronik- und Computerbranche sowie des sonstigen Fahrzeugbaus, aber deutlich über dem Wert der anderen Werkstoff-Branchen (12 %). Dies bedeutet zum einen, dass relativ viele KMU in der Chemieindustrie sich erfolgreich um finanzielle staatliche Unterstützung bemüht haben. Zum anderen führt die große Mehrheit der KMU in der Chemieindustrie FuE- und Innovationsprojekte ohne finanzielle Unterstützung durch den Staat durch.

Innovationsaktive Unternehmen in Deutschland, die 2020-2022 Innovationsförderung erhalten haben, nach ausgewählten Branchen



Innovationsförderung: finanzielle Förderung durch eine öffentliche Stelle (Bund, Land, Gemeinde, EU, ausländische Regierungen), ohne Aufträge von öffentlichen Stellen.

Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel

Anstieg von Unternehmen mit Innovationsförderung bis Mitte der 2010er Jahre

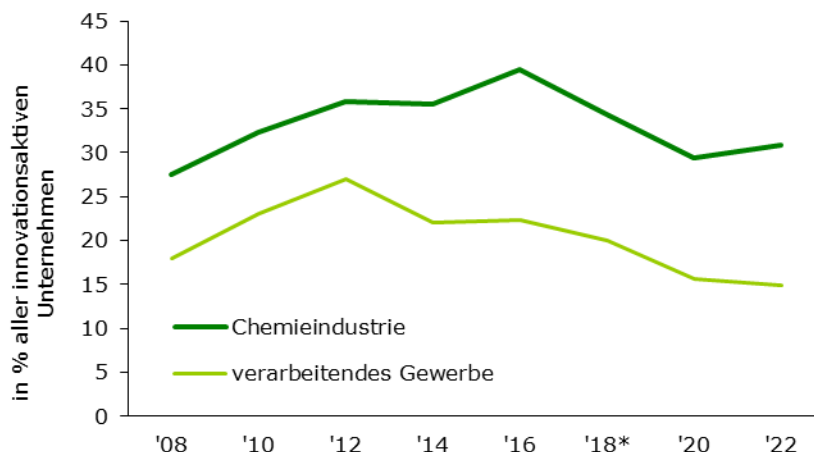
Der Anteil der innovationsaktiven Unternehmen mit öffentlicher Innovationsförderung in der deutschen Chemieindustrie nahm bis Mitte der 2010er Jahre auf knapp 40 % zu. Der Rückgang bis zum Jahr 2020 ist teilweise methodischen Änderungen geschuldet, da ab 2018 auch Unternehmen mit organisatorischen oder Marketing-Innovationen als "innovationsaktiv" einbezogen werden, die jedoch nur ausnahmsweise für diese Innovationsaktivitäten öffentliche Förderungen in Anspruch nehmen. Im Jahr 2020 kam ein Sondereffekt durch die Corona-Pandemie hinzu, als viele kleine Unternehmen in eine umfassendere Digitalisierung investierten, dafür jedoch i.d.R. keine Innovationsförderung genutzt haben.

Innovationsförderung von Unternehmen der deutschen Chemieindustrie 2008 bis 2022 im Vergleich

Innovationsförderung: finanzielle Förderung durch eine öffentliche Stelle (Bund, Land, Gemeinde, EU, ausländische Regierungen), ohne Aufträge von öffentlichen Stellen.

* Bruch in der Zeitreihe aufgrund der Ausweitung der Definition von "innovationsaktiven Unternehmen" auf Unternehmen mit organisatorischen oder Marketing-Innovationen (für die i.d.R. selten eine Innovationsförderung in Anspruch genommen werden kann).

Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel



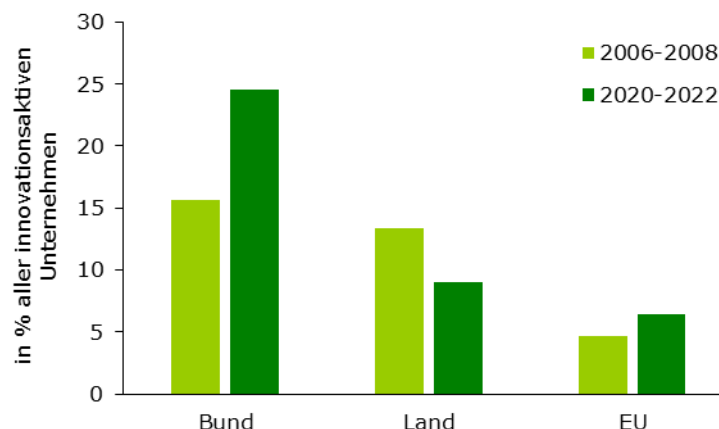
Bundesförderungen haben an Bedeutung gewonnen

Die wichtigsten **Förderprogramme**, die Unternehmen zur öffentlichen Ko-Finanzierung von FuE- und anderen Innovationsaktivitäten nutzen, sind das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM), die Fachprogramme des Bundes, das EU-Forschungsrahmenprogramm Horizont sowie verschiedene Programme der Länder. Im längerfristigen Vergleich haben in der Chemieindustrie Bundesförderungen an Bedeutung gewonnen, während der Anteil der Unternehmen mit Förderungen durch Programme der Bundesländer abgenommen hat.

Innovationsförderung von Unternehmen der deutschen Chemieindustrie 2006-2008 und 2020-2022 nach Fördermittelgeber

Innovationsförderung: finanzielle Förderung durch eine öffentliche Stelle (Bund, Land, Gemeinde, EU, ausländische Regierungen), ohne Aufträge von öffentlichen Stellen.

Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel



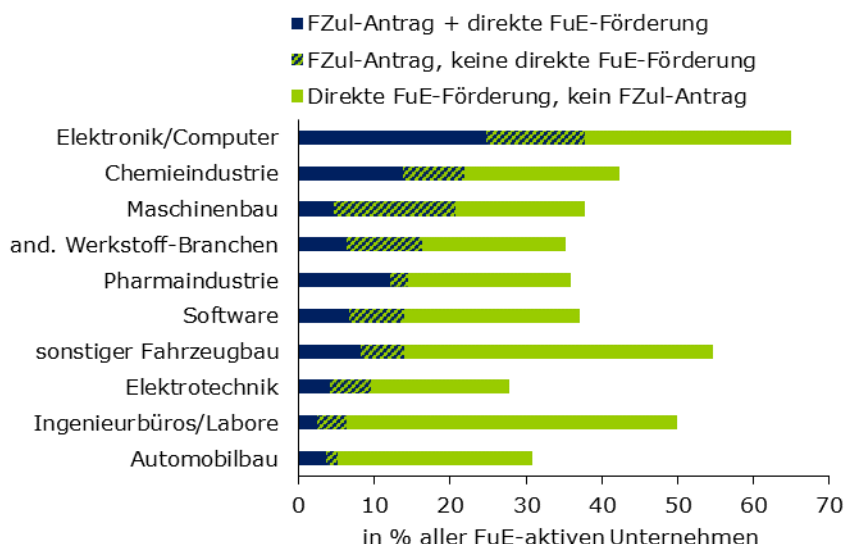
Forschungszulage mit höherer Flexibilität für Unternehmen

Seit 2020 hat sich die Situation für die Nutzung öffentlicher finanzieller Mittel zur Ko-Finanzierung von FuE in Deutschland durch die Einführung der **Forschungszulage** verändert. Mit dem neuen Instrument können die Unternehmen grundsätzlich alle förderfähigen FuE-Ausgaben geltend machen, sofern sie nicht mehr als 4 Mio. € (ab 2024: 10 Mio. €) übersteigen. Dies ist insbesondere für Unternehmen attraktiv, deren FuE-Aktivitäten nicht zu den Vorgaben von FuE-Förderprogrammen passen (z.B. was die thematische Ausrichtung, die Erfordernis einer Kooperation mit Dritten oder den Projektumfang betrifft).

Viele Unternehmen ohne direkte FuE-Förderung nutzen die Forschungszulage

Bis Ende 2022 hatten 22 % der FuE-aktiven Unternehmen in der deutschen Chemieindustrie einen Antrag zur steuerlichen FuE-Förderung über die Forschungszulage (FZul) gestellt. Von diesen hatten im Zeitraum 2020-2022 knapp zwei Drittel (14 % aller FuE-aktiven Unternehmen) direkte öffentliche Förderungen (Zuschüsse) für FuE-Vorhaben erhalten. Gut ein Drittel der Unternehmen mit FZul-Antrag wies 2020-2022 keine direkte FuE-Förderung auf. Weitere 20 % der FuE-aktiven Unternehmen in der deutschen Chemieindustrie haben 2020-2022 eine direkte FuE-Förderung erhalten, jedoch (noch) keinen FZul-Antrag gestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Unternehmen nach Steuerrecht vier Jahre Zeit haben, förderfähige FuE-Ausgaben eines Wirtschaftsjahres geltend zu machen.

Anteil der FuE-aktiven Unternehmen in Deutschland, die bis Ende 2022 einen Antrag zur Forschungszulage gestellt haben, nach ausgewählten Branchen



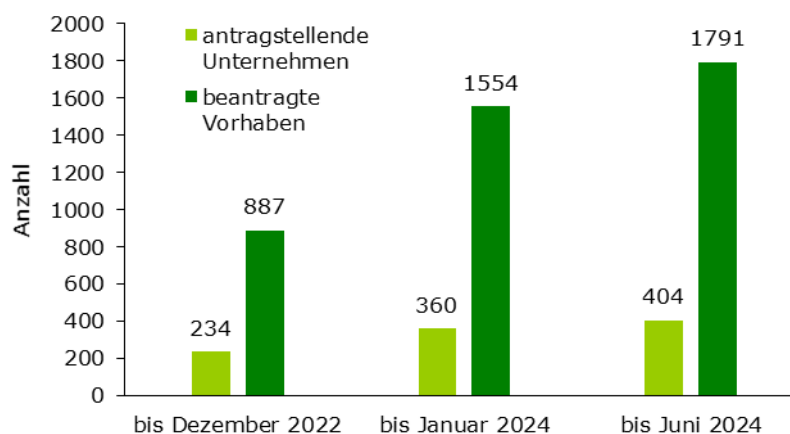
Hinweis: Unternehmen mit 5 oder mehr Beschäftigten mit internen oder externen FuE-Aktivitäten

Quelle: ZEW: Mannheimer Innovationspanel

Chemie: 91 % (teil-)positiv beschiedene Anträge

Die Nutzung des neuen FuE-Förderinstruments hat sich seit Beginn der Möglichkeit zu Antragstellungen im Frühjahr 2021 sehr **dynamisch entwickelt**. Dies gilt auch für die Chemieindustrie. Die Anzahl der Chemie-Unternehmen mit FZul-Anträgen stieg von 234 (Dezember 2022) auf 404 (Juni 2024). Bis Juni 2024 wurden aus der Chemieindustrie 1.791 FuE-Vorhaben zur Bescheinigung bei der "Bescheinigungsstelle Forschungszulage" beantragt. Von den bereits bearbeiteten Anträgen wurden 76 % vollumfänglich und 15 % teilweise positiv beschieden. Nur 9 % der Anträge aus der Chemie erhielten einen negativen Bescheid.

Nutzung der Forschungszulage durch Unternehmen der deutschen Chemieindustrie



Quelle: Bescheinigungsstelle Forschungszulage. Berechnungen des ZEW.

KMU stellen ein Drittel der beantragten FZul-Mittel

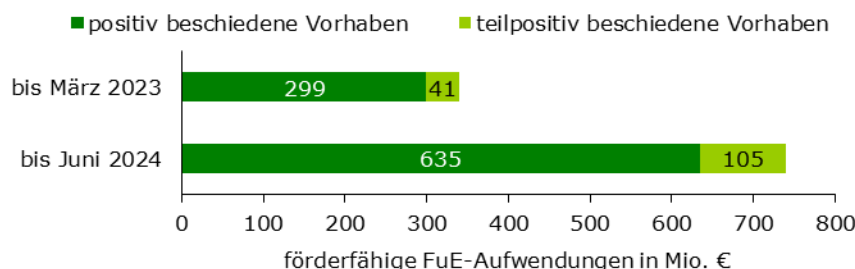
Das Mittelvolumen der bei der FZul beantragten und positiv oder teilpositiv beschiedenen Vorhaben beläuft sich in der Chemieindustrie mit Stand Ende Juni 2024 auf ca. 740 Mio. €. 32 % der (teil-)positiv beschiedenen förderfähigen FuE-Ausgaben entfallen auf **KMU** mit weniger als 250 Beschäftigten. Dieser Anteilswert ist um ein Vielfaches höher als der Anteil der KMU an den gesamten internen FuE-Ausgaben der deutschen Chemieindustrie (2021: 5,5 %) und zeigt die starke KMU-Orientierung der steuerlichen FuE-Förderung in Deutschland.

FZul-Mittel deutlich höher als direkte FuE-Förderung

Die Höhe der Fzul-Mittel übersteigt in der Chemieindustrie den Umfang der direkten staatlichen FuE-Förderung beträchtlich. Im Jahr 2021 erhielten Unternehmen der deutschen Chemieindustrie rund 70 Mio. € an FuE-Fördermitteln aus der FuE-Projektförderung. Selbst wenn sich die beantragten und (teil-)positiv beschiedenen Fzul-Mittel von 740 Mio. € auf vier Wirtschaftsjahre (2020-2023) aufteilen sollten, lägen sie um mehr als das Doppelte über der direkten FuE-Förderung. Da

viele Anträge sich auf einen kürzeren Zeitraum beziehen, dürfte die Relation noch deutlich stärker zugunsten der FZul ausfallen.

Höhe der positiv/teilpositiv
beschiedenen Vorhaben zur
Forschungszulage in der
deutschen Chemieindustrie



Aus den beschriebenen Rahmenbedingungen für eine innovative Chemieindustrie in Deutschland können mehrere innovationspolitische Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

1. Abbau von Innovationshemmnissen

Damit die Unternehmen der Chemieindustrie ihre Innovationsideen umsetzen und damit andere Branchen mit innovativen Werkstoffen und Materiallösungen versorgen, sollten die zentralen Innovationshemmnisse abgebaut werden. Dies sind aktuell der Fachkräftemangel und die hohe Belastung durch Regulierung und Bürokratie. Um das Fachkräfteangebot angesichts der demografischen Entwicklung auszuweiten, sind zum einen mehr Anstrengungen im schulischen Bereich nötig, damit möglichst alle jungen Menschen die Voraussetzungen für eine berufliche Ausbildung mitbringen. Zum anderen braucht es unkomplizierte Regelungen für die Einwanderung von Fachkräften, sodass dringend benötigtes Personal aus dem Ausland rasch eine Beschäftigungsmöglichkeit in Deutschland erhält. Im Bereich Regulierung und Bürokratie gilt es, Regulierungen regelmäßig auf ihren Bedarf zu prüfen und die Umsetzung so aufwandsarm ein einfach wie möglich zu gestalten.

**Fachkräfteangebot
ausbauen und Bürokratie
abbauen**

2. Innovationsförderung jenseits finanzieller Hilfen

Die staatliche Unterstützung von FuE und Innovationen betrifft nicht nur die Beteiligung am finanziellen Innovationsrisiko durch das Angebot von Fördermitteln. Für die Umsetzung von innovativen Ideen ist es auch notwendig, Experimentierräumen für neue Lösungen zu ermöglichen, in denen die Chemieindustrie und Anwendungsbranchen bzw. Nutzer zusammenarbeiten können. Solche Reallabore bieten gleichzeitig die Möglichkeit, einen effektiven und bürokratiearmen regulativen Rahmen zu erproben.

**Experimentier-
räume für Inno-
vationen**

3. Sicherung einer innovativen Chemie als eine Säule des deutschen Innovationssystems

Damit die Chemie ihre wichtige Rolle im deutschen Innovationssystem als Lieferantin innovativer Werkstoffe und neuer Materiallösungen wahrnehmen kann, ist eine wirtschaftlich und innovativ starke Chemieindustrie notwendig. Eine Voraussetzung hierfür ist es, dass eine möglichst breite Palette an industriellen Chemie-Aktivitäten am Standort Deutschland erhalten wird, wofür wiederum entsprechende Rahmenbedingungen z.B. bei Energiekosten und Infrastruktur notwendig sind. Gleichzeitig sollte die Zusammenarbeit zwischen Chemieindustrie, Anwenderbranchen und Nutzer von Chemie-Innovationen unterstützt werden, z.B. durch die konsequente Einbeziehung von Chemie-Kompetenzen bei der Entwicklung neuer Technologien und industrieller Kapazitäten. Dies illustrieren die in der Studie vorgestellten Beispiele zu Batterien, Halbleiter und Recycling von Kunststoffen für eine Kreislaufwirtschaft.

**Breit aufgestellte
Chemieindustrie
als Standortvorteil
für des deutschen
Innovationssys-
tems**

4. Chemie-Technologien als zentrale Grundlage für Nachhaltige Entwicklung

Um die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen zu erreichen (Social Development Goals - SDGs), sind vielfältige neue technologische Lösungen notwendig. Von allen Patenten, die Beiträge zu den SDGs leisten, stammt der größte Teil aus dem Technologiefeld Chemie. Dies gilt insbesondere für zentrale Ziele wie sauberes Wasser, Gesundheit und Klimaschutz, aber auch für den Kampf gegen Hunger, bezahlbare und saubere Energie und die Nachhaltigkeit von Wohnen, Verkehr, Konsum und Produktion. Eine innovationsstarke Chemieindustrie und eine enge Zusammenarbeit zwischen Industrie und Wissenschaft sind wichtige Voraussetzungen, um neue technologische Lösungen für die gesellschaftlichen Herausforderungen zu entwickeln. Die Innovationspolitik kann durch transferfreundliche Rahmenbedingungen ebenso wie durch die Förderung von Verbundforschung und Innovationsnetzwerken hierzu wichtige Beiträge leisten.