Fraunhofer-Institute der Fraunhofer-Verbünde »Light & Surfaces«, »Materials« und »Ressourcentechnologien und Bioökonomie«

Fraunhofer

Positionspapier

Licht- und Plasmainduzierte Katalyse

Innovative Lösungen für die Branchen Energie, Chemie und Pharmazeutische Industrie

Zusammenfassung

Durchbrüche bei katalytischen Prozessen können Deutschland in die Lage versetzen, Produktionsketten zu modernisieren und für Wohlstand, Nachhaltigkeit und Sicherheit zu sorgen. Aufgebautes Grundlagenwissen, gepaart mit Exzellenz in Ingenieurwesen, Fertigung und Technologie, macht das möglich.

Der Begriff »Katalyse« stammt aus dem Altgriechischen und steht für das »Auflösen« von Widerständen, um aus einer Ausgangsubstanz das gewünschte Produkt zu erhalten. Dazu werden katalytische Oberflächen oder Reagenzien eingesetzt, unbelebte als auch Mikroorganismen. Schon heute spielt die Katalyse in der Industrie eine herausragende Rolle, bisher aber in der Regel in energieintensiven und fossil befeuerten Verfahren. Die Umstellung auf Konzepte, die regenerative Energie als »Treibstoffe« nutzen, verspricht einen disruptiven Paradigmenwechsel, und Deutschland ist wie kaum ein anderes Land bestens darauf vorbereitet, diese Revolution anzuführen.

Licht und Plasmen können katalytisch wirken oder katalytische Umsetzungen massiv verstärken. Chemische Prozesse werden dadurch bei niedrigeren Temperaturen und Drücken möglich, mit massiver Energieeinsparung. Bei geeigneten Licht- und Plasmaquellen ist Deutschland beispiellos gut aufgestellt. Dabei lassen sich diese Technologien grundsätzlich rasch auf industrielle Maßstäbe skalieren, und das durch den Einsatz regenerativ erzeugten Stroms vorbehaltlos nachhaltig. Simulationskompetenz, Digitalisierung, Materialwissenschaften und künstliche Intelligenz sorgen für einen Booster bei dieser Entwicklung Made in Germany.

Das gesellschaftliche Potential ist enorm: Signifikante Energieeinsparungen, rückstandsfreies Recycling, saubere Luft, sauberes Wasser und reine Lebensmittel, gesicherte Hygiene und hocheffiziente Medikamente, das alles ermöglicht durch eine nachhaltige Industrie von Weltruf, die wesentlich zum Erhalt des Wohlstandes in Deutschland beiträgt. – All das ist in Reichweite!

Konkrete erste Erfolge belegen die immense Dimension dieser Chance: Sonnenlicht spaltet Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff, Mikroorganismen erzeugen angetrieben mit Licht den Rohstoff für nachhaltigen Beton, Medikamente und Pestizide werden mittels Licht und Plasmen aus Abwässern entfernt. – Projekte als Vorboten einer kommenden Revolution.

Schaffen wir als Republik hier den Wandel? Gibt es endlich wieder innovative Durchbrüche aus Deutschland? – Mit einer strategischen Förderpolitik kann das gelingen! Diese sollte durch die interdisziplinäre Vernetzung vorhandenen Wissens und vorhandener Ausstattung, durch risikoreiche Pilotvorhaben, durch Upscaling, durch Kompetenzzentren, durch Nachwuchsgruppen als auch durch eine nationale Datenplattform für den Durchbruch sorgen – für Erfolge, die zeitnah bei vielen Menschen im täglichen Leben ankommen.

Durchbruch steht bevor

»Herbeiführung, Beschleunigung oder Verlangsamung einer Stoffumsetzung durch einen Katalysator«: Was der DUDEN damit für das Wort »Katalyse« abstrakt auf den Punkt bringt, ist der Schlüssel zu Wohlstand, Unabhängigkeit, Nachhaltigkeit und Gesundheit. Mittels Katalyse werden Synthesen wirtschaftlich oder überhaupt erst beherrschbar, aus wertlosen Substanzen können Materialien von hohem Wert generiert werden. Mittels Katalyse lassen sich chemische Kraftstoffe und Rohstoffe gewinnen, Materialien recyceln, Schadstoffe vernichten und Medikamente herstellen. Für chemische Katalysatoren werden jährlich mehr als 40 Mrd. $ ausgegeben.[1] Der damit in Tausenden von Anwendungen realisierte Umsatz beträgt ein Vielfaches davon.

Mehr als 10 Nobelpreise wurden für Durchbrüche auf diesem Gebiet vergeben. Herausragend: Das Haber-Bosch-Verfahren zur Düngemittelherstellung ernährt die Welt.

Klassische thermisch-katalytische Prozesse benötigen oft viel Energie, da sie auf hohe Temperaturen oder hohe Drücke angewiesen sind. In der Regel werden dafür fossile Brennstoffe eingesetzt, so dass hier im Kontext der Energiewende große Transformationsbedarfe als auch große Chancen entstehen.

Licht und Plasmen als Treibstoffe für katalytische Reaktionen!

Ein technischer Paradigmenwechsel wäre der breite Ersatz fossiler Energie durch die Nutzung alternativer Quellen, die chemische Reaktionen gezielt auslösen, anstelle von Hochtemperatur- und Hochdruckprozessen. Dies würde den Energieverbrauch senken und die Prozesseffizienz steigern. Durch Wechselwirkungen zwischen Licht oder einem Plasma mit den Molekülen können Reaktionen ermöglicht und beschleunigt werden. Beispielsweise die Erzeugung von Wasserstoff direkt mit Sonnenlicht mittels einer katalytischen Oberfläche.

Dass die licht- und plasmainduzierte Katalyse vor Durchbrüchen steht, leitet sich aus der Summe folgender Trends und Fakten ab:

- **Energieeffizienz:** Chemische Reaktionen können dank Licht oder Plasmen bei niedrigeren Temperaturen und Drücken aktiviert werden.[2]
- **Quellenverfügbarkeit:** Deutschland ist technologisch führend bei Licht- und Plasmaquellen. Ein Vorsprung, der genutzt werden kann und den es zu halten gilt.
- **Skalierbarkeit:** Licht- und Plasmaquellen können bis zum Fabrikmaßstab skaliert werden. Produktionsverfahren für anspruchsvolle katalytische Oberflächen werden zunehmend für Massenanwendungen verfügbar.
- **Nachhaltigkeit und Energieautonomie:** Licht- und Plasmaquellen lassen sich mit Strom aus erneuerbaren Energien betreiben.
- **Digitalisierung:** Künstliche Intelligenz in den Materialwissenschaften ermöglicht die rapide und effiziente Entwicklung neuer katalytischer Oberflächen.[3]

Jetzt ist der richtige Zeitpunkt, um in die licht- und plasmainduzierte Katalyse zu investieren, aufbauend auf erarbeitetem, exzellentem Grundlagenwissen in Deutschland. Jetzt besteht die Chance, Vorreiter zu sein, um nicht später mühselig und wahrscheinlich erfolglos den Anschluss im globalen Wettbewerb suchen zu müssen.

Gesellschaftliches Potential

Technologien mit licht- und plasmainduzierter Katalyse haben das Potential, die Wertschöpfungsketten in verschiedenen Marktbereichen durch effizientere chemische Umwandlungen dauerhaft und wesentlich zu verbessern:

Energiewirtschaft

Die licht- und plasmainduzierte Katalyse steigert die Effizienz sowohl bei der Erzeugung als auch bei der Speicherung, dem Transport und der Nutzung regenerativer Energien. Energie wird für die Menschen und die Wirtschaft in Deutschland wieder bezahlbarer![4]

Chemische Industrie

Für den anstehenden Umbau und die Neuausrichtung der chemischen Industrie auf nachhaltigere Technologien können Licht und Plasmen einen wichtigen Beitrag leisten. CO_2 kann aufgebrochen und umgewandelt werden: Technisch wertvolle Gase wie Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffe bis hin zu flüssigen Kraftstoffen lassen sich so synthetisieren. Beim Einsatz nachhaltiger Energie und biogenem CO_2 ist das nicht nur ein klimaneutraler, sondern sogar ein klimapositiver Prozess. Aus dem »Abfall« CO_2 wird ein wertvoller Rohstoff. Darüber hinaus können Licht und Plasmen auch andere Reagenzien in werthaltige Produkte verwandeln. Mittels einer technischen Anlage aus Licht, Luft und Wasser direkt Glukose und Sauerstoff zu erzeugen und damit die Photosynthese der Natur nachzubilden, ist ein bisher unerfüllter aber nun erreichbarer Traum der Menschheit. Die chemische Industrie kann so schneller zukunftsfähig werden und nachhaltig zum Wohlstand in unserem Land beitragen![5]

Recyclingbranche und Umweltwirtschaft

Die licht- und plasmainduzierte Katalyse eignet sich auch für den Aufschluss und die Sortierung auf molekularer Ebene, für ein Recycling ohne Restfraktionen. Licht- und plasmainduzierte Prozesse erlauben zudem die Eliminierung schwer abbaubarer Schadstoffe wie fluorhaltige Kunststoffe oder Arzneimittel in Abwässern, genauso wie die Entfernung flüchtiger organischer Verbindungen aus der Luft. Photokatalytisch aktive Baustoffe können zur Verbesserung der Luftqualität in Städten führen. Recycling wird verlustfrei, Sicherheit vor Kontaminationen und eine Erhöhung der Lebensqualität lassen sich erreichen![6]

Pharmazeutische Industrie

Neben der einfachen und sicheren Desinfektion von Oberflächen zur Vermeidung von Infektionen, insbesondere in Krankenhäusern, und neben der Förderung der Wundheilung durch Plasmen kann die licht- und plasmainduzierte Erzeugung personalisierter Medikamente neue Therapien ermöglichen – technisch als auch ökonomisch. Auf mehr Schutz vor Infektionen und einen leichteren Zugang zu personalisierten, hocheffektiven Medikamenten bei schweren Erkrankungen dürfen unsere Bürgerinnen und Bürger sich freuen.

Good-Practice-Beispiele bei Fraunhofer

Einige Highlights, welche die Relevanz aber auch die Chancen des Themas veranschaulichen:

Wasserstofferzeugung direkt mit Licht! Im Projekt Neo-PEC wird die Wasserspaltung in einer sogenannten photovoltaischen Tandemzelle neu konzipiert und optimiert, so dass die Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff hochrein als Energieträger bzw. als medizinisches Versorgungsgas entstehen.[7] Im Projekt »Roll2Sol« wird eine Prozesskette zur kostengünstigen Rolle-zu-Rolle-Herstellung von Photokatalysator- und Anti-Verschmutzungs-Folien entwickelt, um die Effizienz weiter zu steigern.[8]

Herstellung von Methanol aus CO_2: Die gezielte Kopplung der Photokatalyse mit der Biokatalyse wird eingehend für die Produktion von Methanol z. B. aus CO_2 untersucht. Das EU-Projekt SUNGATE setzt dabei auf nachhaltige Katalysatoren für die Wasserspaltung und optimierte Proteine und Enzyme in skalierbaren Durchflussreaktoren für die Umwandlung von CO_2.[9]

Produktion des Energieträgers Ammoniak mittels Plasmen: Ammoniak wird als Energieträger der Zukunft gesehen, der verschifft und dann verstromt oder sogar direkt in Motoren verbrannt werden kann. Ein Niederdruck-Haber-Bosch-Verfahren und die plasmagestützte Ammoniaksynthese sind dazu im Fraunhofer-Leitprojekt AmmonVektor in der Entwicklung.[10]

Grüner Beton: Im Projekt BioCarboBeton wird die biogene Herstellung klimapositiven Kalksteins mithilfe phototropher Mikroorganismen unter CO_2-Verbrauch vorangetrieben, damit das noch sehr klimaschädliche Material Beton klimaneutral wird. Die Erzeugung von Kalkstein durch Mikroorganismen scheint durch die Beaufschlagung mit Plasmen drastisch besser zu werden.[11]

Günstige Herstellung des High-Tech-Materials »Graphen«: Im Rahmen des Vorhabens NewSkin wird die Erzeugung von Graphen untersucht, katalytisch ermöglicht durch Plasmatechnologie bei niedrigen Temperaturen und gleichzeitig höheren Durchsätzen, für bessere Elektronik und Batterien.[12]

Reinigung von Abwässern in Klärwerken: Im Projekt CatMemReac wird die Photokatalyse untersucht, um Spuren von Medikamenten oder Pestiziden zu entfernen.[13]

Reinigung der Abgase von Schiffen: In der ARIES-Kooperation wurde Plasma für die vollständige Eliminierung von Schadstoffen aus Schiffsabgasen demonstriert.[14]

Reduktion schädlicher Stickoxide in urbanen Ballungsräumen: Im Verbundvorhaben PureBau wurden hocheffiziente Baustoffe zur photokatalytischen Luftreinigung entwickelt.[15]

Entkeimung von Alltagsgegenständen: Im Projekt CAmPUS UV-C wurde ein Kompetenzzentrum für die Beurteilung von Produkten zur Ultraviolett-Sterilisation etabliert[16]. Mittels des Lichts lassen sich Oberflächen bei richtigem Einsatz großflächig, schnell und sicher entkeimen, ohne Erhitzung oder Chemikalien.

Herstellung hochaktiver pharmazeutischer Produkte: Die photochemisch-assistierte Biokatalyse, d. h. die Kombination von Licht und Enzymen, kann eine nachhaltige Produktion von Wirkstoffen und derer Vorstufen ermöglichen[17]. Im Fokus des Projekts ILLUMINATE steht die Synthese isomer-reiner Moleküle, welche essentiell für die Herstellung von Medikamenten ohne fatale Nebenwirkungen ist.

Aktionsplan

Um auf das exzellente Grundlagenwissen in Deutschland aufzubauen und das Innovationspotential der Licht- und plasmainduzierten Katalyse für industrielle Anwendungen zu entfalten, sind gezielte Fördermaßnahmen erforderlich.

Interdisziplinäre Forschungsprogramme: Chemie, Physik, Werkstoffwissenschaften, Maschinenbau und Informatik sind gemeinsam gefordert, um grundlegende Erkenntnisse in das Design neuer innovativer katalytischer Oberflächen und Reagenzien umzusetzen!

Pilotprojekte: Wissenschaftliche Vorprojekte zur Erprobung neuer Ansätze und Ideen sind ideal für die effiziente Prüfung unkonventioneller Ideen.

Verbundforschungsprojekte: Zur Erhöhung des »Technology Readiness Levels« und der Skalierung der Verfahren vom Labor bis zum Technikum sind gemeinsame Forschungsvorhaben von Universitäten und Forschungseinrichtungen mit Unternehmen erforderlich.

Etablierung langfristig angelegter Kompetenz-Zentren: Viele innovative Ansätze in der Katalyse benötigen eine langfristige Forschung und Entwicklung. Kompetenzen sollen konzentriert und deren Erhalt und Ausbau soll langfristig finanziert werden, um bahnbrechende Erfolge zu ermöglichen.

Nachwuchsgruppen: Exzellente Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sollten gewonnen und gefördert werden, um hochqualifizierten Nachwuchs auf dem Gebiet zu generieren und einem möglichen Fachkräftemangel vorzubeugen.

Aufbau einer nationalen Datenplattform: Systematische Sammlung und Bereitstellung relevanter Daten für partizipierende Forscherinnen und Forscher als auch Unternehmen werden benötigt, so dass der Stand der Wissenschaft stets unmittelbar abrufbar und Materialdaten für Neuentwicklungen verfügbar sind.

Netzwerkbildung: Veranstaltungen zur Vernetzung der Stakeholder sollten in die o. g. Förderprogramme eingebunden werden.

»Die licht- und plasmainduzierte Katalyse made in Germany verspricht große Chancen für die Chemische Industrie in unserem Land: Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit!«

André Olveira-Lenz,
Hauptgeschäftsführer des Verbands der Chemischen Industrie Baden-Württemberg

Quellen

1 Markt für chemische Katalysatoren – Globale Branchenbewertung und Prognose. Vantage Market Research, 2025. https://www.vantagemarketresearch.com/de/industry-report/chemical-catalyst-market-0295

2 Alptekin, F.M. et al: »Chapter 10 – Plasma conjugated with renewable energy for environmental protection«. Yasin, G. et al. (eds.): Energy From Plasma, Woodhead Publishing, 2025, 271-322. DOI: 10.1016/B978-0-443-26584-6.00010-5

3 »Rates against the machine«, Nature Catalysis 6, 103-104 (2023). DOI: 10.1038/s41929-023-00933-4

4 Bogaerts, A.; Neyts, E.C.: »Plasma Technology: An Emerging Technology for Energy Storage«. ACS Energy Letters 3, 1013-1027 (2018). DOI: 10.1021/acsenergylett.8b00184

5 Chang, Y. et al.: »Recent Advances in Plasma Catalysis«. The Journal of Physical Chemistry C 126, 9611-9614 (2022). DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c03062

6 Arima, Y. et al.: »Multiphoton-Driven Photocatalytic Defluorination of Persistent Perfluoroalkyl Substances and Polymers by Visible Light«. Angew. Chem. Int. Ed. 63, e202408687 (2024). DOI: 10.1002/anie.202408687

7 Projekt »Neo-PEC – Neuartige, großflächige Tandem-PEC-Module mit doppeltem Schottky-Übergang zur Wasserstoffgewinnung«. Fraunhofer-interne Forschungsförderung PREPARE, 2020-2023. Beteiligte Fraunhofer-Institute: IKTS, IST und IMWS. https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/elektronik_mikrosystem_biomedizintechnik/hybride_mikrosysteme/funktionswerkstoffe_hybride_mikrosysteme/neo-pec_innovative_wasserstoff-technologie.html

8 Projekt »Roll2Sol – Maskenlose nanoskalige Plasmaätzstrukturierung von Druckwalzen für die Rolle-zu-Rolle-Fertigung funktionaler Folien mittels UV-Nanoimprintlithographie für Solar- und Wasserstofftechnologien«. EFRE/JTF-Programm NRW 2021–2027, 2024-2027. Beteiligtes Fraunhofer-Institut: ILT. https://www.efre.nrw/einfach-machen/foerderung-finden/innovationswettbewerb-industrieinnrw

9 EU-gefördertes Projekt »SUNGATE - Sunlight-driven next generation artificial photosynthesis bio-hybrid technology platform for highly efficient carbon neutral production of solar fuels«. 2023-2027. Beteiligte Fraunhofer-Institute: IME, IMM und ISC. https://www.sungate-eu.org

10 Projekt »AmmonVektor – Grünes Ammoniak als dezentraler, sektorenübergreifender Energievektor für die deutsche Energiewende«, Teilprojekt 1: »Dezentrale, flexible Ammoniaksynthese«. Fraunhofer Leitprojekt. Beteiligte Fraunhofer-Institute: ICT, IGB und UMSICHT. https://www.ammonvektor.fraunhofer.de/de/projekt/ammoniaksynthese.html

11 Projekt »BioCarboBeton«. Fraunhofer-interne Forschungsförderung SME, 2022-2024. Beteiligte Fraunhofer-Institute: IKTS und FEP. https://www.fep.fraunhofer.de/de/press_media/13_2024.html

12 EU-gefördertes Projekt »NewSkin« (GA no. 862100). Beteiligtes Fraunhofer-Institut: FEP. Proceedings of 65th SVC TechCon, 72-80 (2022), https://doi.org/10.14332/svc22.proc.0026

13 Ziel des deutsch-israelischen Wassertechnologie-Kooperationsprojekts CatMemReac ist den CO2-Fußabdruck in der Wasseraufbereitung zu verringern. https://www.cbp.fraunhofer.de/content/igb/de/referenzprojekte/catmemreac.html

14 EU-gefördertes Projekt »ARIES - Accelerator Research and Innovation for European Science and Society«. Beteiligtes Fraunhofer-Institut: FEP. https://aries.web.cern.ch/, https://www.rtu.lv/writable/public_files/RTU_2_1_aries_poc_final_meeting.pdf

15 BMBF-gefördertes Projekt »PureBau – Untersuchung von Werkstoffsystemen für photokatalytisch hocheffiziente Baustoffe«. 2014-2017. Beteiligtes Fraunhofer-Institut: IST.

16 Projekt »CAmPUS UV-C – Kompetenzzentrum für die Beurteilung von Produkten mit Ultraviolett-Sterilisation«. Fraunhofer-interne Forschungsförderung KMU akut, 2021. Beteiligte Fraunhofer-Institute: IGB, IPA und IBP.

17 BMBF-gefördertes Projekt »ILLUMINATE – Photochemisch-assistierte Biokatalyse: Eine Plattform für die kontinuierliche Synthese von Feinchemikalien«, 2021-2024. Beteiligte Fraunhofer-Institute: IGB, IME, IMM und ISC. https://www.kaskaden-reaktionen.de/en/publications-information/technological-advance-in-production-of-pharmaceuticals.html

Verzeichnis der Mitwirkenden

Prof. Dr. Elizabeth von Hauff
Fraunhofer FEP

Prof. Dr. Karsten Buse
Fraunhofer IPM

Dr. Elias Frei
Fraunhofer ISE

Dr. Patrick Hoyer
Fraunhofer Zentrale

Dr. Christian May
Fraunhofer FEP

Dr. Leonhard Mayrhofer
Fraunhofer IWM

Dr. Michaela Müller
Fraunhofer IGB

Dr. Tim Nitsche
Fraunhofer UMSICHT

Dr. Thomas Rehm
Fraunhofer IMM

Dr. Heinrich Stülpnagel
Fraunhofer IPM

Kontakt

Prof. Dr. Elizabeth von Hauff
Institutsleiterin
Fraunhofer FEP
Telefon +49 351 2586-100
elizabeth.von.hauff@fep.fraunhofer.de

Prof. Dr. Karsten Buse
Institutsleiter
Fraunhofer IPM
Telefon +49 761 8857-111
karsten.buse@ipm.fraunhofer.de

© Fraunhofer-Gesellschaft e. V., München 2025