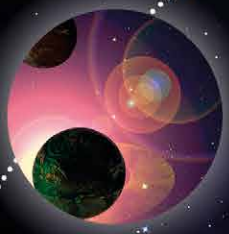
Deutsches
Patent- und Markenamt

ERF IND EN



Die Suche nach
extraterrestrischem Leben



Seltene Erden bei
Supermagneten ersetzen



Blitz und Donner –
dem Gewitter auf der Spur



Autonome Shuttles für
die Mobilitätswende



Finnen und Flossen als Teile
der Natur im Fahrzeugbau



Organische Leuchtdioden
setzen sich durch



Specklemuster in Head-up-Displays reduzieren –
für bessere Bilder und mehr Sicherheit

Liebe Leserinnen und Leser,

ob für die Weiten des Weltalls oder für die Mobilität in der Innenstadt: Die Suche nach neuen Lösungen beginnt häufig vor dem weißen Blatt Papier – im wörtlichen oder im übertragenen Sinn. Darauf können wir zeichnen, schreiben, wir können das Blatt aber auch erst einmal falten. Und dann noch einmal. Und noch einmal. Bis irgendwann aus Vorstellungskraft, konzeptionellem Denken und praktischem Geschick etwas Neues entsteht: Die Kunst des Origami lässt sich in diesem Sinn als Analogie zum Prozess des Erfindens verstehen und begleitet Sie illustrativ auf den folgenden Seiten.

Was spielerisch leicht, was genial wirkt, ist oft das Produkt langer Arbeit. So ist es meist auch, wenn Erfinderinnen und Erfinder technische Lösungen für die Herausforderungen unserer Zeit entwickeln. Und damit laden wir Sie ein in unsere Publikation „erfinden", die Sie bislang unter dem Titel „Erfinderaktivitäten" kannten. Unsere Patentprüferinnen und Patentprüfer haben aus Erfindungen, die ihnen in ihrer täglichen Arbeit begegnen, spannenden Lesestoff für Sie zusammengestellt. Basis für die Beiträge sind Anmeldungen bei Patentämtern in aller Welt. Existiert extraterrestrisches Leben? Wie können autonome Shuttles für unsere Städte aussehen? Wie lässt sich die Vorhersage von Gewittern weiter verbessern? Unsere Publikation spannt ein weites thematisches Feld auf. Auch um Supermagneten für die Energiewende geht es auf den folgenden Seiten. Und gleich zwei Beiträge setzen sich mit moderner Display-Technologie auseinander.

Unser Heft haben wir neu gestaltet – mit Fotos, Illustrationen und Erklärungen. So wollen wir das, was kluge Menschen erdachten und was dann zum Patent angemeldet wurde, für Sie noch anschaulicher machen. Welche Aha-Momente Eva Schewior, Präsidentin des Deutschen Patent- und Markenamts, bei der Lektüre der Beiträge hatte, das erfahren Sie im Interview ab Seite 78. Hoffentlich ist auch für Sie etwas Interessantes dabei.

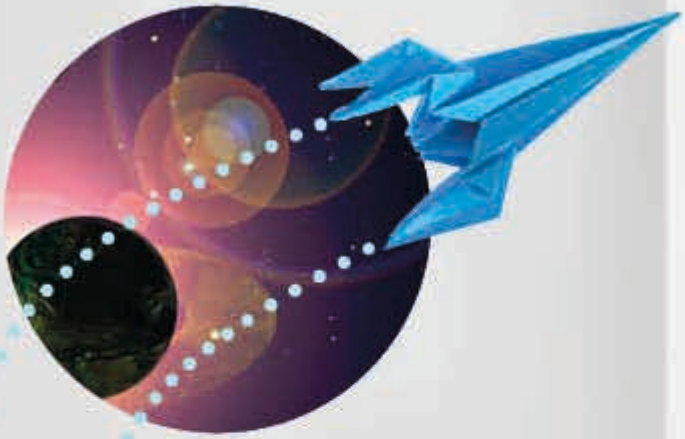
Wir wünschen Ihnen viel Freude und Inspiration beim Lesen!



Mark Haslinger
Hauptabteilung Patente



Martina Kellermeier
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit



Die Suche nach extraterrestrischem Leben

Dr. Wilfried Domainko 6

Neodym-Magnete: Kommen die Supermagnete ohne Gewürze aus?

Dr. Jana Becherer,
Dr. Michael Krispin 24





Blitz und Donner – dem Gewitter auf der Spur

Dr. Florian Stark 40



Autonome Shuttles für die Mobilitätswende

Dr. Nina Tetzlaff 64





„Ein Heft für Lösungen von morgen“ Interview mit Eva Schewior 78



Finnen und Flossen als Teile der Natur im Fahrzeugbau

Dr. Andreas Monokroussos 80



Specklemuster in Head-up-Displays reduzieren – für bessere Bilder und mehr Sicherheit

Dr. Christian Langer 110





Organische Leuchtdioden setzen sich durch

Dr. Werner Hofmann 94





Literaturverzeichnis 126


ASM_VMX_VMREAD_RDX_RAX
".byte
unsigned long
asm
return

Direkt aus dem Patentwesen

Die Publikation *erfinden* ist ein Informationsangebot des Deutschen Patent- und Markenamtes im Rahmen des gesetzlichen Auftrags aus § 26a Patentgesetz (PatG). Die Publikation dient dazu, die breite Öffentlichkeit über Schutzrechte zu informieren, insbesondere über aktuelle Entwicklungen im Patentwesen.

Zitierte Patentschriften

Für die Beiträge haben die Autorinnen und Autoren Patentliteratur aus der ganzen Welt genutzt. Patentanmeldungen werden 18 Monate nach der Erstanmeldung veröffentlicht. Erfindungen, die ab dem Jahr 2023 erstmals angemeldet wurden, sind daher noch nicht berücksichtigt.

Die Patent- und Offenlegungsschriften sind in den Beiträgen mit den jeweiligen Patentnummern zitiert. Die beiden Buchstaben am Anfang der Patentnummer sind der Ländercode, der jeweils auf das spezifische Patentamt verweist.

register.dpma.de/DPMAregister/uebersicht

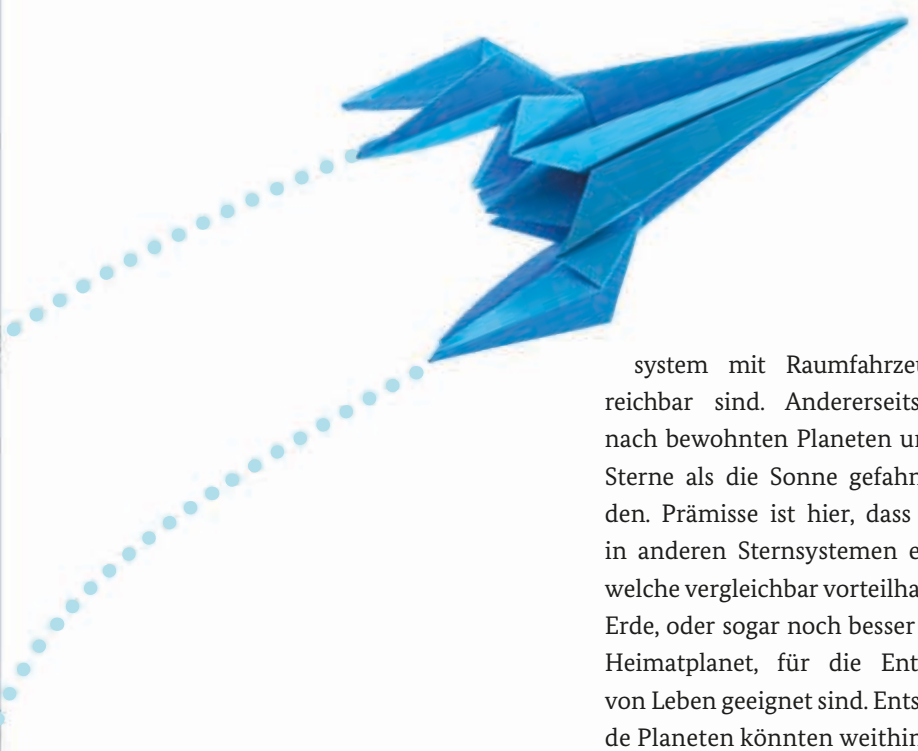
Ausführliche Informationen zu den zitierten Anmeldungen und Patenten finden Sie im DPMAregister. Dort können Sie mit Hilfe der genannten Aktenzeichen direkt recherchieren.



Die Suche nach extraterrestrischem Leben

Dr. Wilfried Domainko

Wie Leben auf der Erde entstand, verstehen wir kaum. Die Entdeckung von extraterrestrischem Leben könnte weitere Einblicke bieten, sogar noch alternative Lebensgrundlagen aufzeigen. Prinzipiell ist es denkbar, dass auf bestimmten Himmelskörpern in unserem Sonnensystem eine extraterrestrische Biologie existiert. Zum Erkunden werden autonome Rover, selbstfliegende Drohnen oder eigenständig navigierende Unterwasserfahrzeuge eingesetzt. Außerirdisches Leben könnte alternativ auch auf Planeten in anderen Sternsystemen gefunden werden. Diese Objekte werden mittels großflächiger Weltraumteleskope erforscht. Eine Reise durch die Patentliteratur.



Fahndung im Sonnensystem – und darüber hinaus

Eines der spannendsten Forschungsgebiete der modernen Astronomie ist derzeit die Frage, ob wir alleine sind im Universum [1]. Momentan ist die Erde der einzige bekannte Himmelskörper, wo Leben nachgewiesen werden konnte. Die Entdeckung von Leben, welches unabhängig von bekanntem, irdischen Leben entstanden ist, würde unser Verständnis vom Entstehen der belebten Natur revolutionieren. Sie würde zeigen, dass es verschiedene Wege zum Leben gibt und würde es wahrscheinlich erscheinen lassen, dass unsere Milchstraße von einer Vielzahl an bewohnten Himmelskörpern bevölkert ist.

Derzeit gibt es verschiedene Optionen, um vorteilhaft nach extraterrestrischem Leben zu fahnden. Einerseits könnte diese Suche auf bestimmten Himmelskörpern in unserem Sonnensystem durchgeführt werden. Es ist denkbar, dass sich in besonders geschützten Habitaten einfache Formen von Leben entwickelt haben. Diese Suchstrategie hätte den Vorteil, dass Himmelskörper in unserem Sonnensystem mit Raumfahrzeugen erreichbar sind. Andererseits könnte nach bewohnten Planeten um andere Sterne als die Sonne gefahndet werden. Prämisse ist hier, dass Planeten in anderen Sternsystemen existieren, welche vergleichbar vorteilhaft wie die Erde, oder sogar noch besser als unser Heimatplanet, für die Entwicklung von Leben geeignet sind. Entsprechende Planeten könnten weithin sichtbare biologische Signaturen aufweisen, welche noch von der Erde aus mit entsprechenden Instrumenten entdeckt werden könnten. In der Patentliteratur gibt es eine Vielzahl an Vorschlägen für Vorrichtungen zur Suche nach extraterrestrischen Lebensspuren. Zum Erforschen von Himmelskörpern in unserem Sonnensystem würden demnach autonome Forschungsroboter zum Einsatz kommen, wohingegen eine Untersuchung von Exoplaneten generell mit Teleskopen erfolgt. Im Folgenden werden Vorrichtungen zur Lebenssuche für unterschiedliche Suchstrategien vorgestellt.

Lebenssuche in der Hochatmosphäre: Venus

Unser entfernungsmäßig nächstliegender Nachbarplanet ist die Venus. Auf den ersten Blick scheint sich unsere Nachbarin jedoch nicht besonders gut für eine Lebenssuche zu eignen. Auf ihrer Oberfläche herrschen mit Temperaturen von über 450 Grad Celsius und einem Atmosphärendruck wie jener in einer Wassertiefe von etwa 1000 Metern nicht gerade einladende Bedingungen. Allerdings könnte die Venus vor einigen Milliarden Jahren deutlich lebensfreundlicher gewesen sein [2]. Denkbar wäre demnach, dass damals auf diesem Planeten tatsächlich Leben entstanden ist und dass dieses Leben bis heute in besonderen Habitaten überlebt hat. Die Umweltbedingungen auf der Venusoberfläche mögen höllisch sein, allerdings nehmen mit zu-

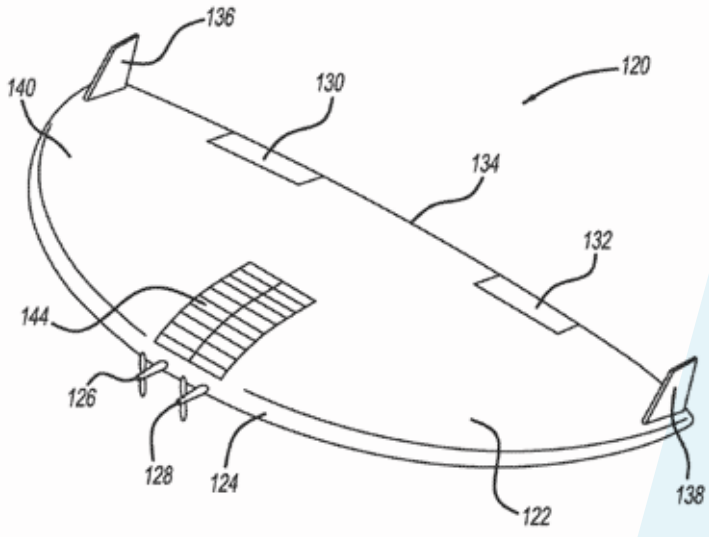


Abbildung 1: Nurflügler zur Erforschung der Venusatmosphäre aus der ***US 2015 / 0 210 407 A1****.*

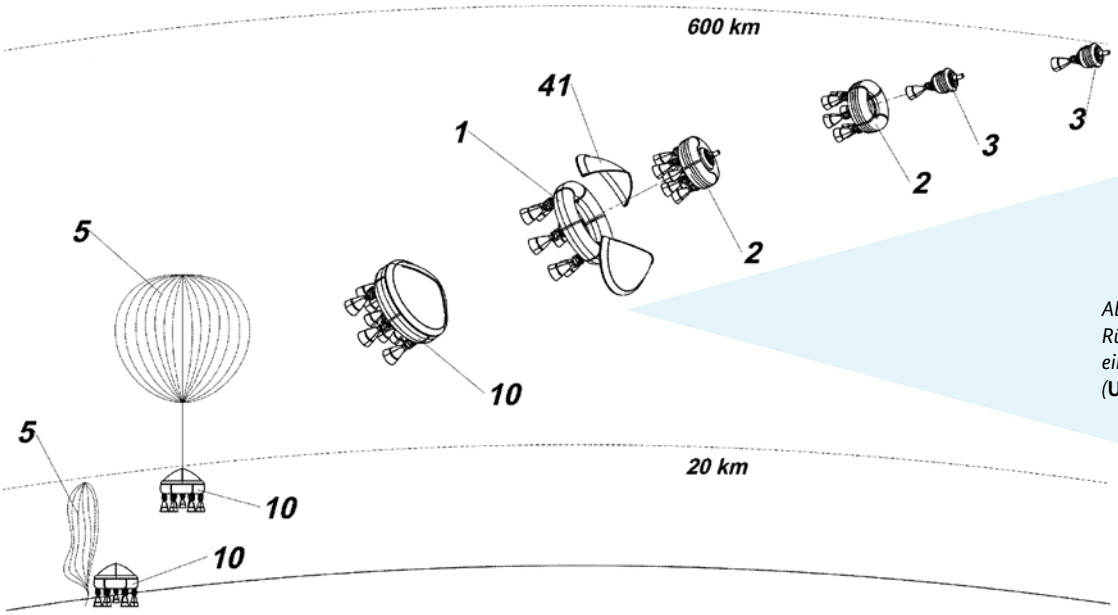
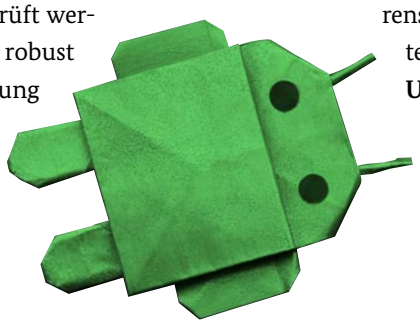


*Abbildung 2: Start einer Rückführungskapsel von einem Ballon aus (**US 2018 / 0 290 767 A1**).*

nehmender Höhe in der Venusatmosphäre Temperatur und Dichte ab. In einer Höhe von etwa 50 Kilometern über der Venusoberfläche herrschen dabei Temperatur- und Dichtebedingungen, wie sie etwa den Werten auf der Erde auf Meeresniveau entsprechen. Falls jemals Leben auf der Venus entstanden sein sollte, könnte sich dieses Leben in diese Atmosphärenschichten zurückgezogen haben. Tatsächlich gibt es sogar Beobachtungssignaturen, die sich prinzipiell als Lebensspuren deuten lassen. Beispielsweise absorbiert die Venusatmosphäre aus bisher unverstandenen Gründen einen Teil des ultravioletten Lichts [2]. Im Zusammenhang mit potentiellem Venusleben wäre eine Erklärungsmöglichkeit: die Aktivitäten von Photosynthese-betreibenden Organismen. Zusätzlich wurde möglicherweise das Spurengas Phosphin, welches typischerweise von Leben erzeugt wird, in der Venusatmosphäre gefunden, wobei noch überprüft werden muss, wie robust diese Entdeckung ist [3]. Kurz zusammengefasst: Die Suche nach Leben auf der Venus könnte sich lohnen und müsste in vorteilhafter Weise in deren Atmosphäre erfolgen [4].

Für eine Erforschung der Venusatmosphäre schlägt beispielsweise die **US 2015 / 0 210 407 A1** vor, ein aufblasbares, flügelartiges Luftfahrzeug in einem Satelliten gefaltet zur Venus zu transportieren und es nach Ankunft in deren Atmosphäre derart zu expandieren, dass es in einer passenden Atmosphärenschicht schwebt (siehe Abbildung 1). Dieses oder ähnliche autonome Luftfahrzeuge könnten entweder durch Propeller bewegt werden oder wären alternativ antreibbar durch ein in der **US 2020 / 0 263 674 A1** gezeigtes Plasmatriebwerk, welches das Umgebungsgas der Venusatmosphäre als Rückstoßmedium nutzt. Für eine umfassende Erforschung der Venusatmosphäre wäre ein Luftfahrzeug wünschenswert, welches unterschiedliche Atmosphärenschichten besuchen könnte. Hierzu beschreibt die **US 2017 / 0 129 579 A1** einen aus mehreren Kammern bestehenden Ballon, dessen Volumen und damit dessen Auftrieb und Flughöhe mittels Seilzug regulierbar ist. Eine Lebenssuche in der Venusatmosphäre wäre vermutlich sehr langwierig. Um die Flugdauer eines Ballons dort zu verlängern, offenbart die **US 2022 / 0 371 718 A1** die Erzeugung von Gasen leichter als die umgebende Atmosphärengasmischung in der Gondel eines Venusballons. Genutzt wird insbesondere der sehr leichte Wasserstoff, welcher durch die chemische Aufspaltung von Ammoniak entsteht. Diese Gase werden während des Flugs der Ballonfüllung hinzugegeben, um den Auftrieb zu gewährleisten.

Wie lässt sich bei einer Mission in die Venusatmosphäre das Luftfahrzeug nach dem Raumflug in die passenden Atmosphärenschichten bringen? Hierzu schlägt die **US 2003 / 0 052 223 A1** vor, einen mit verflüssigtem Gas gefüllten Ballon in die Venusatmosphäre fallen zu lassen, wobei dieses Gas bei Ankunft in tiefen Atmosphärenschichten durch die dort herrschenden hohen



Temperaturen verdampft. Dadurch bläht es den Ballon auf und er steigt in die gewünschten Atmosphärenschichten. Alternativ offenbart die **US 2015 / 0 344 139 A1** eine aufblasbare Vorrichtung, welche eine Sonde beim Eindringen in die Venusatmosphäre abbremst.

Wenn das Luftfahrzeug schließlich in der zu untersuchenden Atmosphärenschicht angekommen ist, kann es dort nach Lebensspuren fahnden. Aus Platzgründen müssten hierzu sehr kompakte Analyseeinheiten genutzt werden. Beispielsweise wird in der Patentliteratur ein Halbleiterbasierter Miniatursensor zur Detektion von Spurengasen (**US 2005 / 0 263 790 A1**) vorgeschlagen. Alternativ könnte gemäß der **US 2012 / 0 261 578 A1** ein Hohlraum, gefüllt mit dem zu untersuchenden Venusatmosphärengasgemisch, zum Einsatz kommen. Die Gase in diesem Hohlraum werden von einem Laserstrahl mittels Reflexionen an den Seitenwänden mehrfach durchstrahlt, und ein Spektrometer analysiert die Molekülabsorptionslinien der Gase. Eine umfassende Analyse der Proben der Venusatmosphäre kann allerdings nur in einem Labor hier auf der Erde durchgeführt werden. Dafür wäre ein Transport der gewonnenen Proben zurück zur Erde notwendig. Die **DE 199 50 828 A1** und die **US 2018 / 0 290 767 A1** offenbaren bereits Vorschläge für Raketenstarts von einer Ballongondel aus (siehe Abbildung 2). Ähnliche Vorgehensweisen wären prinzipiell für eine Rückführung von Proben aus der Venusatmosphäre zur Erde geeignet. Eine Ballon-basierte Mission in die Venusatmosphäre inklusive Rücktransport von Venusproben zur Erde ist derzeit tatsächlich in Planung [4].

Fahndung nach Leben auf einem Wüstenplaneten: Mars

Der äußere Nachbar der Erde im Sonnensystem ist der Mars. Der Mars ist mit einem Atmosphärendruck von etwa einem Promille des irdischen Atmosphärendrucks auf Meereshöhe und einer Oberflächentemperatur von durchschnittlich etwa minus 60 Grad Celsius ein trockener und kalter Wüstenplanet. Analog zur Venus war der Mars vermutlich vor einigen Milliarden Jahren deutlich lebensfreundlicher. Geologische Spuren auf seiner Oberfläche zeigen, dass es dort zeitweilig flüssiges Wasser gegeben haben muss [5]. Es wäre denkbar, dass in den zeitweilig existierenden Marsgewässern Leben entstanden ist. Potentielles Marsleben könnte an geschützten Orten sogar bis heute überlebt haben. Auch auf dem Mars gibt es Messergebnisse, die sich prinzipiell als Lebenssignaturen deuten lassen. Ein möglicher Indikator: innerhalb von Monaten zeitlich variable Konzentration des Spurengases Methan in der Marsatmosphäre [6]. In einem Szenario, welches Leben auf dem Mars beinhaltet, wäre dieses Methan ein mögliches Stoffwechselprodukt von Marsorganismen. Generell gilt der Mars als vielversprechendes Ziel für eine Suche nach extraterrestrischem Leben im Sonnensystem. Entsprechend wurden schon mehrere Missionen zur Oberfläche des Mars entsandt, um nach Leben zu fahnden.

Bei Missionen zum Mars werden idealerweise mehrere Orte auf der Marsoberfläche auf Lebensspuren hin untersucht. Dabei kommen typischerweise mobile Rover zum Einsatz. Die Patentliteratur zeigt Ausführungsformen von Mars-Rovern, wie sie bereits auf dem Mars betrieben wurden (**US 488 093 S, US 487 715 S**) oder gerade auf dem Mars betrieben werden (**US 673 482 S**; siehe Abbildung 3). Um voll funktionstüchtig auf der Marsoberfläche anzukommen, müssen diese Mars-Rover weich landen. Die **US 679 646 S** beschreibt hierzu ein Landungsmodul,

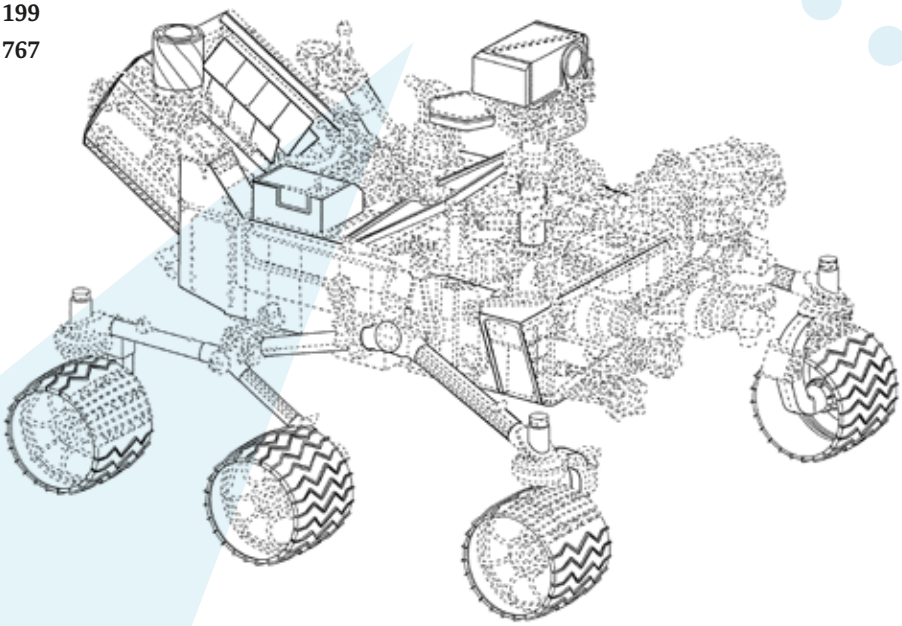


*Abbildung 3: Mars-Rover aus der **US 673 482 S**. Das Design ähnelt jenem des Mars-Rovers Perseverance der NASA.*

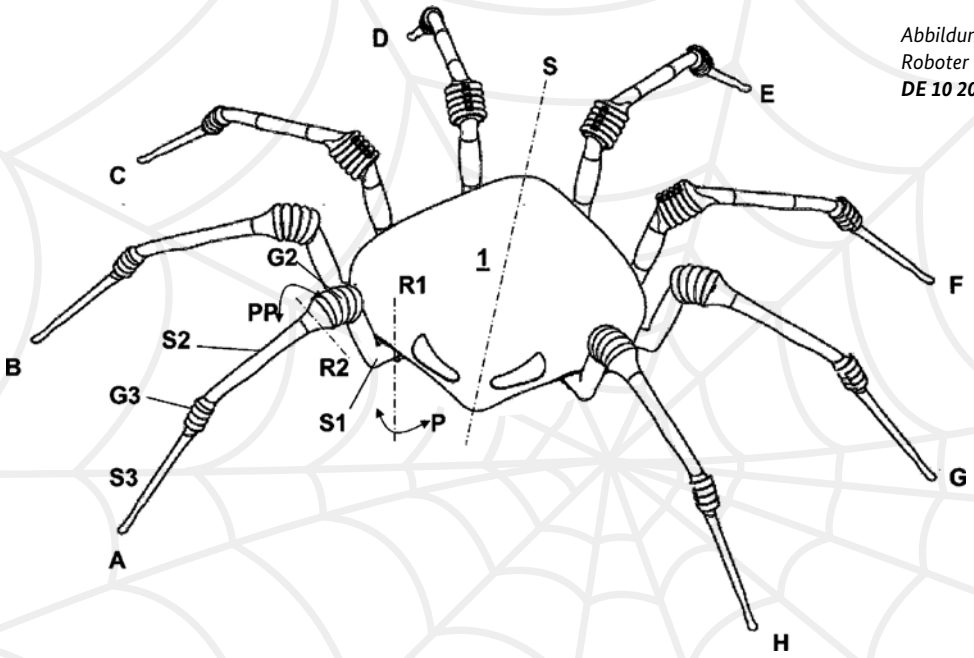


Abbildung 4: Spinnenartiger Roboter aus der ***DE 10 2011 102 960 A1****.*

welches den Abstieg zur Planetenoberfläche durch Gegenschub von Raketentriebwerken abbremst.

Der Betrieb von Rovern auf dem Mars erfordert eine gewisse Autonomie dieser Fahrzeuge, da es bei einer Fernsteuerung von der Erde zu einer Laufzeitverzögerung von vielen Minuten kommen würde. Hierzu beschreibt die **US 2017 / 0 254 657 A1** eine Bodenbeschaffenheitserkennung eines vorausliegenden Geländes mit mehreren Kameras und das Bestimmen einer optimalen Route basierend auf der erkannten Bodenbeschaffenheit. Die **DE 10 2019 105 280 A1** wiederum schlägt eine selbstlernende Steuerung für einen Mars-Rover vor. Dabei wird beispielsweise von einem ersten Neuronalen Netzwerk eine mögliche Ausgabe zur Steuerung des Rovers an ein zweites Neuronales Netzwerk übergeben. Das erste Neuronale Netzwerk lernt aus der Reaktion des zweiten Neuronalen Netzwerks auf diese Ausgabe und verbessert mit Hilfe dieses Trainings die Steuerung des Rovers. Neben der Kontrolle über seine Bewegung muss ein Mars-Rover zusätzlich noch eine Suche nach Leben in den Umgebungsmaterialien durchführen. Zum Erkennen von organischen Stoffen wird gemäß der **US 11 467 090 B1** eine Marsprobe mit einem Laser bestrahlt. Aus der gemessenen Reflexion und mittels einem, durch den Laser ausgelösten Selbstleuchten (Lumineszenz) der Probe, wird dabei die Zusammensetzung des Materials bestimmt.

Da die Oberflächenbedingungen auf dem Mars sehr unwirtlich sind, könnte sich potentielles Marsleben in geschützte Bereiche unter der Marsoberfläche, wie beispielsweise Höhlen [7], zurückgezogen haben. Zum Erforschen dieser besonders geschützten Orte müssen mobile Roboter außergewöhnliche Geländegängigkeit aufweisen. In der Patentliteratur gibt es hierzu einige Konstruktionsvorschläge. Beispielsweise zeigen die **US 2021 / 0 061 381 A1,** die **US 2017 / 0 088 205 A1** und die **JP 2021 – 49 795 A** flexibel kon-

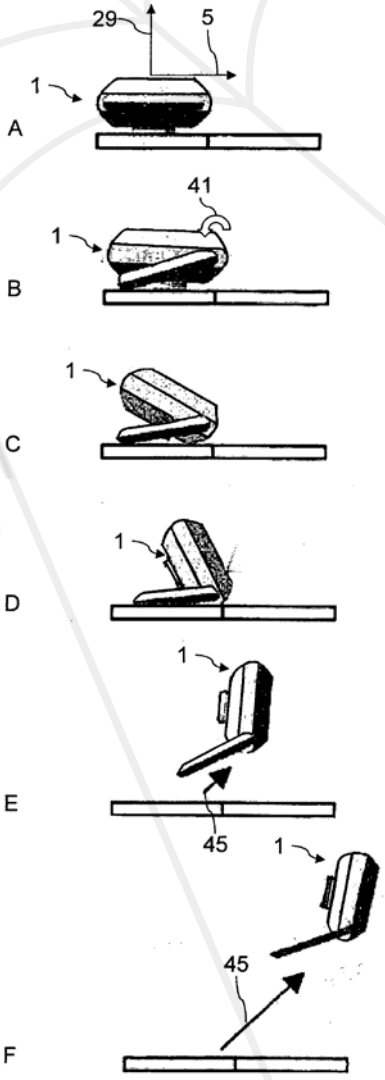


Abbildung 5: Springroboter aus der ***DE 10 2010 018 756 A1****.*

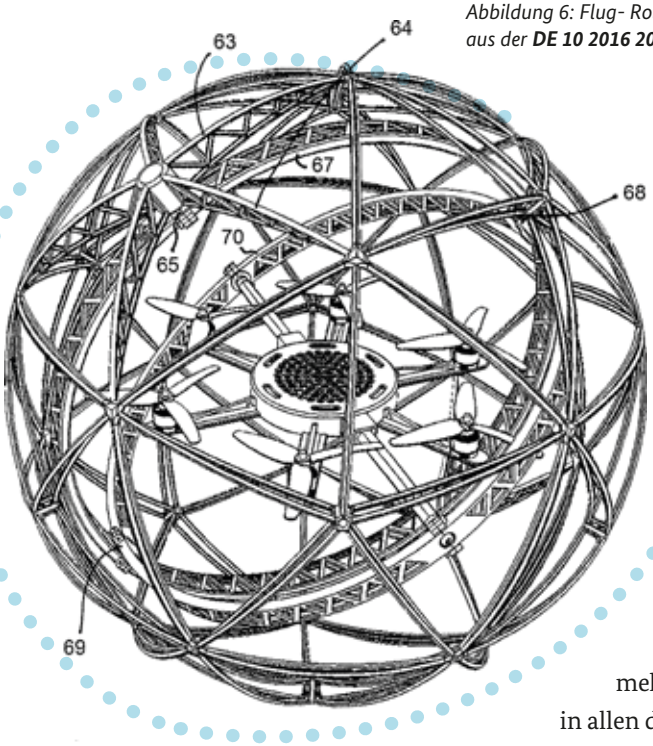


*Abbildung 6: Flug- Rolldrohne aus der **DE 10 2016 201 820 A1**.*

figurierbare Radfahrzeuge. Die **US 2008 / 0 277 172 A1** wiederum offenbart ein entsprechend geländegängiges Kettenfahrzeug. Alternativ schlagen die **DE 10 2011 102 960 A1** (siehe Abbildung 4) und die **US 6 068 073 A** insektenartige Roboter für die Erkundung von schwer zugänglichen Orten vor. Für noch mehr Bewegungsfreiheiten in allen drei Raumrichtungen beschreibt die **WO 2006 / 073 548 A2** eine Fortbewegung mittels sternförmig angeordneter Federelemente und die **DE 10 2010 018 756 A1** (siehe Abbildung 5) zeigt einen Roboter, der springen kann. Geeignet für eine potentielle Erkundung von Marshöhlen wäre zudem eine Drohne, die mit Hilfe von Propellern fliegen und unter Einsatz eines kugelförmigen Außenskeletts zusätzlich rollen kann, wie sie die **DE 10 2016 201 820 A1** zeigt (siehe Abbildung 6).

Zur Erforschung von tieferen Bodenschichten geht die **US 10 718 750 B1** einen alternativen Weg. Es wird vorgeschlagen, den Marsboden mit einer, mit hoher Geschwindigkeit auf die Marsoberfläche geschleuderten Vorrichtung zu durchdringen und eine Lebenssuche in den dabei entstandenen Einschlagkrater durchzuführen (Abbildung 7). Die Bestimmung eines vorteilhaften Ortes für die Entnahme von Marsproben ist eingeschränkt durch die begrenzte Einsehbarkeit des Geländes vom Marsboden aus. Um hier abzuhelfen, schlägt die **CN 2 11 253 082 U** den Einsatz eines Luftschiffes vor, wohingegen die **US 2021 / 0 107 645 A1** den Betrieb einer Drohne vorsieht. Mit Hilfe von Luftaufnahmen könnten vielversprechende Einsatzorte für Vor-

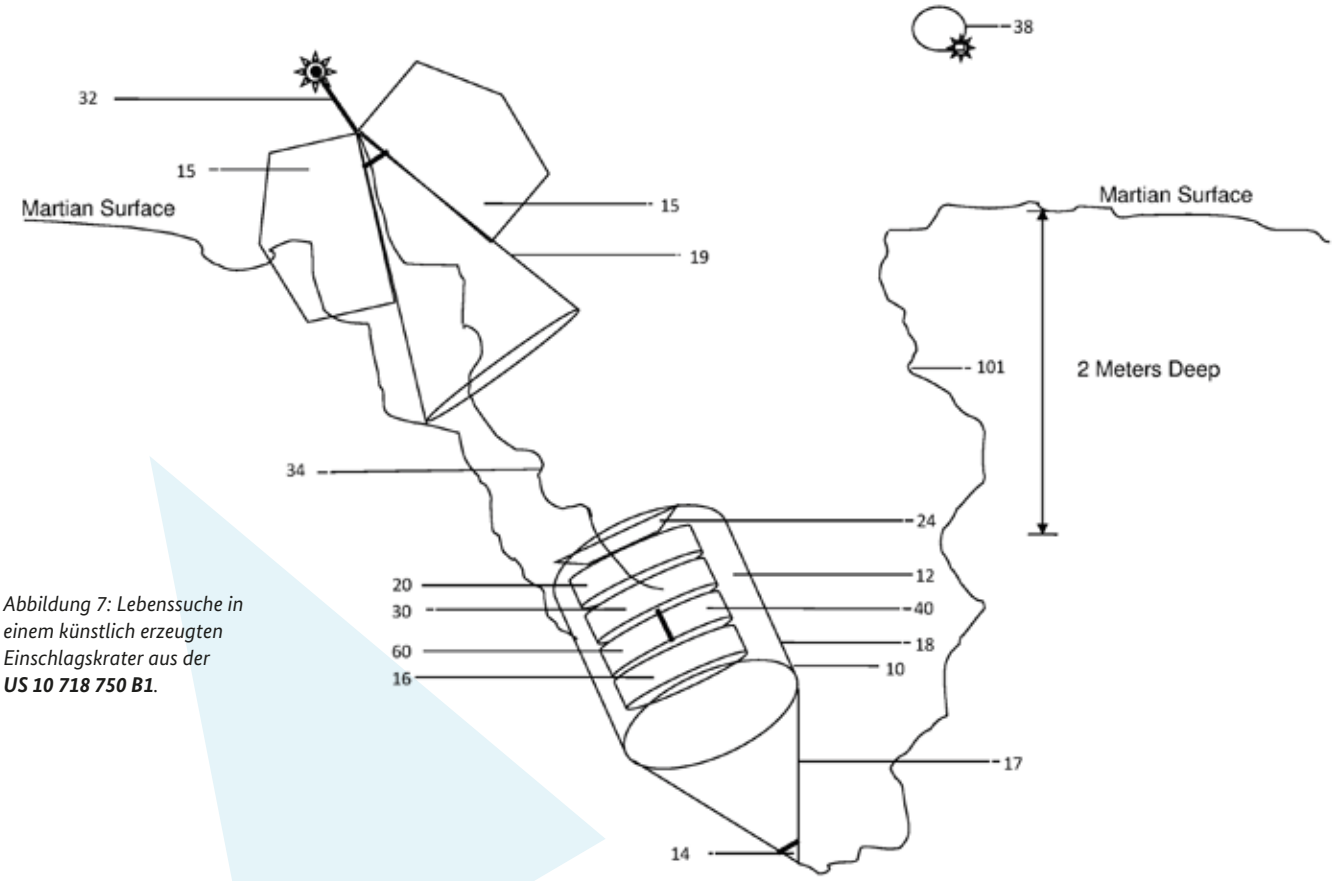


*Abbildung 7: Lebenssuche in einem künstlich erzeugten Einschlagskrater aus der **US 10 718 750 B1**.*

richtungen zur Lebenssuche erkannt werden (**US 2023 / 0 245 444 A1**). Eine Drohne ist tatsächlich schon in der Marsatmosphäre geflogen [8] und eine entsprechende Technologie könnte bei der zukünftigen Erforschung des Mars weiterhin zum Einsatz kommen.

Eiswelten: Europa und Enceladus

Einige Monde der großen Planeten im äußeren Sonnensystem bieten ebenfalls interessante Optionen für die mögliche Entstehung von Leben. Bei manchen dieser Objekte handelt es sich um sehr wasserreiche Himmelskörper. Europa, ein Mond des Jupiters, und Enceladus, ein Mond des Saturns, zeichnen sich durch helle, glatte Oberflächen aus. Es wird für diese beiden Monde angenommen, dass sich unter ihrer eisgepanzerten Oberfläche ein Ozean aus flüssigem Wasser befindet [9], [10], [11]. Ein flüssiger Wasserozean wiederum könnte potentiell die Entwicklung von Leben erlauben. Die Eiskruste, welche die Ozeane bedeckt, ist allerdings vermutlich mehrere Kilometer dick. Eine Lebenssuche auf diesen beiden Himmelskörpern wird daher vor große Herausforderungen gestellt. Um zu den Ozeanen zu gelangen, muss diese kilometerdicke Eiskruste erst durchdrungen werden [12].

Möglicherweise existiert noch eine alternative Art der Informationsbeschaffung für diese subglazialen Ozeane. Insbesondere auf Enceladus gibt es aktive Geysire, die Material mit einem Ursprung unter der Eiskruste bis in große Höhen über der Oberfläche auswerfen [13]. Die Zusammensetzung dieser Fontänen kann mittels Durchflügen von Raumflugkörpern analysiert werden. Diese Methode wurde bereits von der Cassini-Sonde erfolgreich angewendet. Als Erweiterung dieses Programms schlägt die **US 2022 / 0 363 415 A1** vor, entsprechende Eismonde durch einen Schwarm von Raumflugkörpern umkreisen zu lassen. Diese Vielzahl an kleinen Raumsonden kann die Wasserfontäne an unterschiedlichen Stellen durchfliegen und auf diese Weise eine umfassende Analyse des gesamten Auswurfmaterials durchführen. Äußerst anspruchs-

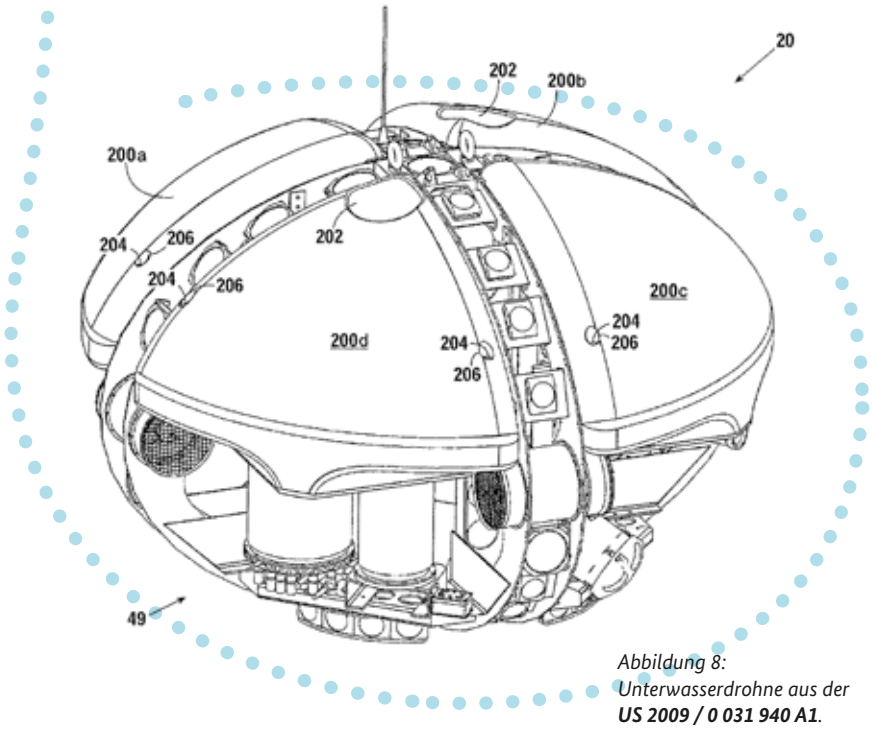


*Abbildung 8: Unterwasserdrohne aus der **US 2009 / 0 031 940 A1**.*

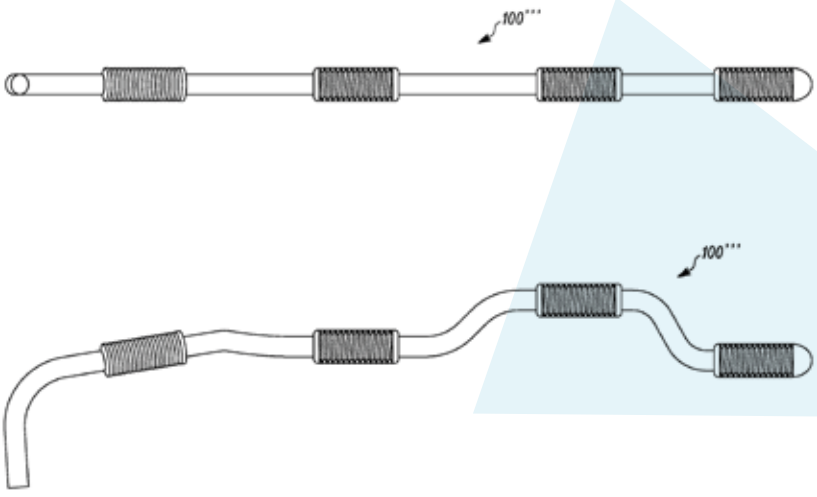


*Abbildung 9: Endoskop zur Erforschung von Spalten im Eis aus der **WO 2018 / 191 658 A1**.*

voll: das Fontänen-Material möglichst zerstörungsfrei einfangen, um es zu analysieren. Raumflugkörper bewegen sich typischerweise mit sehr hohen Relativgeschwindigkeiten und der Einschlag von Eispartikeln auf einem Detektor dort würde diese zerstören. Um diese Zerstörung zu vermeiden, offenbart die **US 2022 / 0 018 741 A1** den Betrieb einer Einfangvorrichtung, welche mit einem weichen Medium bestückt ist, um die einzufangenden Partikel abzubremsen.

Für eine Suche nach potentiell lebendigen Organismen in den subglazialen Gewässern muss allerdings die Eiskruste durchdrungen werden. Hierzu finden sich in der Patentliteratur verschiedene Schmelzsonden. Die **US 9 090 315 B1** und die **US 9 850 711 B2** beschreiben Vorrichtungen, die Eis an ihrer Vorderseite schmelzen und durch ihr Gewicht von der Eisoberfläche aus in Schwerkraftrichtung in das Eis eindringen (siehe **US 9 090 315 B1**). Als Schmelzmechanismus wäre ein Laser (siehe **US 2017 / 0 370 154 A1**) oder eine elektrische Heizung denkbar (**US 2018 / 0 087 804 A1**). Wenn schließlich der Eispanzer durchbohrt wäre, könnte in dem darunterliegenden Ozean eine autonome U-Boot Drohne zum Einsatz kommen. Hierzu beschreibt die **US 2009 / 0 031 940 A1** (siehe Abbildung 8) ein Sonar-gesteuertes Unterwasserfahrzeug. Die **US 2010 / 0 274 488 A1** wiederum zeigt eine autonome Drohne zur Kartierung von Wasserhöhlen.

Künstliche Neuronale Netzwerke

Neuronale Netzwerke sind ein Konzept aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz. Eine Grundidee besteht darin, eine komplexe mathematische Aufgabe auf viele einzelne einfache Rechenschritte zurückzuführen.

Die Gesamtaufgabe des Neuronalen Netzwerks wird durch eine geeignete zeitliche Abfolge der Einzelrechenoperationen gelöst. Diese einfachen Rechenoperationen werden in bestimmten Einheiten des Netzwerks, den sogenannten Neuronen, durchgeführt. Diese Neuronen sind typischerweise in aufeinanderfolgenden Schichten angeordnet und untereinander vernetzt. Entsprechend erhält in der Regel ein bestimmtes Neuron die Rechenergebnisse verschiedener benachbarter Neuronen aus einer vorgelagerten Schicht als Eingangswerte für die eigene Rechenoperation. Nach erfolgter eigener Berechnung übergibt dieses bestimmte Neuron seine eigenen Rechenergebnisse wiederum an Neuronen einer nachfolgenden Schicht zur Weiterverarbeitung. Wichtige Eigenschaft eines Neuronalen Netzwerks: Es lässt sich trainieren. In einem Trainingsschritt werden einem Neuronales Netzwerk Eingangsdaten zugeführt, die zu einem bekannten Ergebnis führen. Während des Trainings wird das Neuronale Netzwerk dahingehend optimiert, dass es als Gesamtergebnis die bereits bekannte Lösung reproduziert. Dies geschieht beispielsweise durch eine geeignete Anpassung der Verbindungsstärken zwischen den einzelnen Neuronen.

Ein entsprechend optimiertes Neuronales Netzwerk kann in weiterer Folge zum Abarbeiten von neuen Eingangsdaten mit unbekanntem Ergebnis verwendet werden. Ein Neuronales Netzwerk ist somit in der Lage, komplexe Probleme zu lösen, für deren Berechnung kein explizit bekanntes Regelwerk existiert. Beispiele: Gesichts- oder Spracherkennung.

Konzeptionell ist ein künstliche Neuronales Netzwerk damit dem menschlichen Gehirn ähnlich, wobei in diesem Fall die einzelnen Nervenzellen die Aufgaben der künstlichen Neuronen übernehmen.

Zum Erforschen von Bereichen unter der Oberfläche von eisbedeckten Himmelskörpern geht die **WO 2018 / 191 658 A1** einen Weg, der einer Endoskopie von Körperhöhlen bei Menschen oder Tieren nachempfunden ist. In dieser Schrift wird vorgeschlagen, mit Hilfe eines flexibel verformbaren Beobachtungsschlauchs (siehe Abbildung 9) Spalten und Risse in der Oberfläche dieser Himmelskörper zu erkunden. Diese Vorrichtung kann zur Suche nach mikrobiologischen Lebensformen vorteilhaft ein Mikroskop (**US 2017 / 0 219 999 A1**) an ihrer Spitze aufweisen. Eine Anwendung zum Erkunden von Eismonden wäre noch für Vorrichtungen denkbar, die für bestimmte irdische Aufgaben entwickelt werden. Beispielsweise zeigt die **EP 3 018 501 B1** eine Erdölsuche unter Tage mittels insektenartiger Roboter. Die **US 2010 / 0 102 986 A1** wiederum offenbart eine Kommunikation zwischen Erdoberfläche und unterirdisch operierender Nanomaschinen mittels elektromagnetischer Wellen. Verwandte Vorrichtungen wären potentiell auch unter der Oberfläche von extraterrestrischen Himmelskörpern einsetzbar.

Die derzeitige Planung der NASA und der ESA zum Erforschen des Jupiter-Mondes Europa sieht allerdings zu-

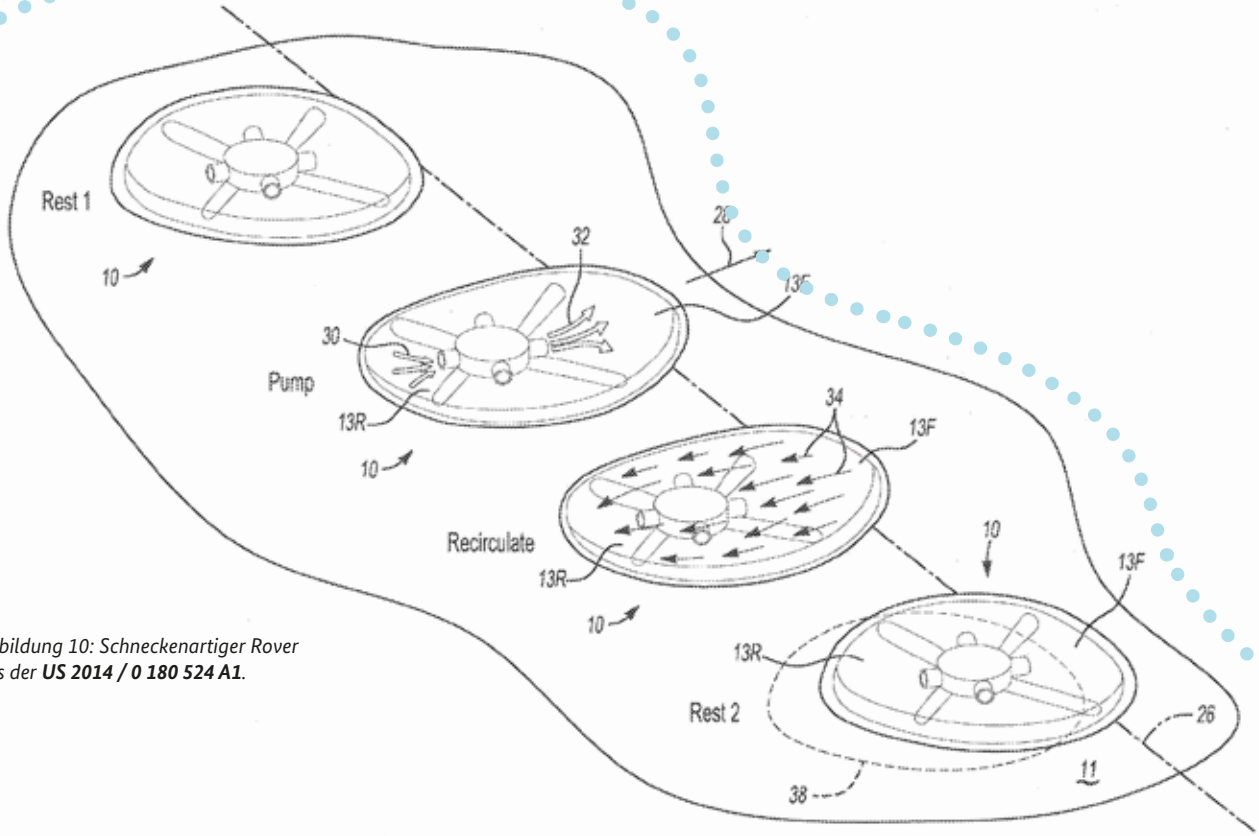


*Abbildung 10: Schneckenartiger Rover aus der **US 2014 / 0 180 524 A1**.*

erst lediglich eine Kartographierung der Oberfläche dieses Mondes vor. Erst nachdem dort erfolgsversprechende Orte zur Lebenssuche identifiziert wurden, wird eine Landung auf der Oberfläche anvisiert.

Leben in Kohlenwasserstoffgewässern? – Titan

Ein besonderes Objekt im Sonnensystem ist der größte Saturnmond Titan. Dieser Himmelskörper weist als einziger Mond im Sonnensystem eine dichte Atmosphäre auf und besitzt auf seiner Oberfläche eine Vielzahl an Gewässern. Bei einer Oberflächentemperatur von minus 180 Grad Celsius handelt es sich allerdings bei diesen Gewässern nicht um flüssiges Wasser, sondern um Seen und Meere aus bestimmten, einfachen Kohlenwasserstoffen [14]. Es wäre theoretisch denkbar, dass der Titan eine fremdartige Biologie beherbergt, die im Unterschied zum irdischen Leben nicht Wasser, sondern Kohlenwasserstoff als Lösungsmittel nutzt [15].

Zum Erforschen der Kohlewasserstoff-Gewässer auf Titan beschreibt die **US 2015 / 0 344 109 A1** eine schwimmende Drohne. Diese Drohne kann eigenständig Analysen ihrer Umgebung durchführen und über ein Kabel zusätzlich noch Daten von einer Unterwasser-Drohne erhalten. Die **US 8 912 892 B2** wiederum zeigt den Einsatz von Sensornetzwerken bestehend aus mehreren schwimmfähigen Einheiten zur Erkundung einer extremen Umwelt. Eine flugbasierte Alternative zu autonomen U-Booten zur Untersuchung eines Gewässergrunds wird von der **US 2016 / 0 247 011 A1** vorgeschlagen. Objekte unter der Oberfläche von Gewässern werden aus der Analyse von Reflexionen von elektromagnetischer Strahlung mit unterschiedlicher Eindringtiefe erkannt.



Neben den Kohlenwasserstoffgewässern selbst könnten auch deren Uferbereiche astrobiologisch interessant sein. Zur Fortbewegung auf matschigem Terrain offenbart die **US 2007 / 0 079 997 A1** einen schlangenförmigen Roboter. Alternativ dazu beschreibt die **US 2014 / 0 180 524 A1** (siehe Abbildung 10) eine schneckenartige Bewegung einer mobilen Einheit. Insbesondere schlangenartige Roboter könnten in Zukunft tatsächlich zum Einsatz kommen, wie das Erproben entsprechender Konzepte durch die NASA zeigt [16]. Besonders vorteilhaft für eine umfassende Erkundung der Titanoberfläche wäre eine Flugdrohne, die an einer Vielzahl von Orten landen kann, um dort nach Leben zu suchen. Die **US 2021 / 0 107 645 A1** schlägt hierzu eine Drohne vor, welche in aerodynamischer Form in die Titanatmosphäre eindringen

kann, um sich dort zu entfalten. Eine Flugdrohnen-basierte Erforschung des Titans, allerdings mit einem etwas abweichenden Quadrokopter-Design, welches auf einem Antrieb durch vier Propeller beruht, ist mittlerweile in der Tat in Vorbereitung. Starttermin: gegen Ende dieses Jahrzehnts [17].

Interstellare Raumfahrt: Alpha Centauri b

Die bisher vorgestellten Himmelskörper befinden sich in unserem Sonnensystem und sind mit der derzeit verfügbaren Antriebstechnik prinzipiell durch Raumfahrtmissionen erreichbar. Reisen zu anderen Sternen hingegen würden das Zurücklegen von sehr viel größeren Distanzen erfordern und wären daher, wenn überhaupt, nur mit neuartigen Beschleunigungsmechanismen für die entsprechenden Raumsonden denkbar. Zum Vergleich: Die Entfernung von der Erde zu unserem nächsten bekannten Stern, Proxima Centauri, beträgt mehr als das 100 000-fache der Entfernung von der Erde zur Sonne. Proxima Centauri wäre für eine Suche nach extraterrestrischem Leben allerdings ein bevorzugtes Ziel, denn dieser Stern wird von einem potentiell bewohnbaren Planeten umkreist. Die Oberflächentemperaturen auf diesem Planeten, Proxima Centauri b, könnten das Vorhandensein von flüssigem Wasser erlauben [18]. Eine Möglichkeit, diesen Planeten mit vertretbarem Aufwand mit einer Raumfahrtmission zu erreichen, wäre ein Antrieb mittels Lichtsegel [19]. Bei diesem Konzept würde eine wenige Quadratmeter große reflektierende Folie von einem oder einer Vielzahl von externen Lasern mit sehr hoher Lichtintensität bestrahlt. So würde dieses Raumfahrzeug beschleunigt werden. Die gesamte Sonde müsste hierzu sehr leicht sein und beispielsweise lediglich eine Gesamtmasse von etwa einem Gramm aufweisen. Als Nutzlast könnte diese Sonde daher nur ein Instrumenten- und Kommunikationspaket mit Briefmarkenausmaßen mitführen. Einen eigenen Antrieb würde die Sonde nicht besitzen. Durch den Lichtdruck der Laserstrahlung könnte ein entsprechend leichtes Lichtsegel-Raumschiff auf mehrere Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Proxima Centauri b würde damit in wenigen Jahrzehnten erreicht werden.

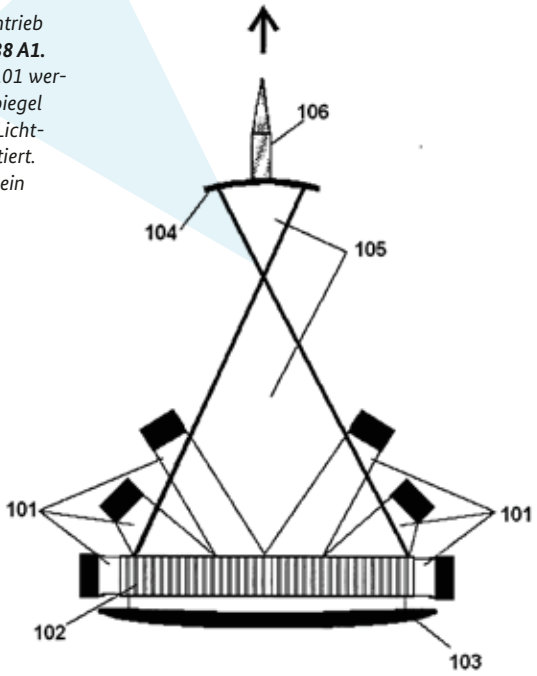


*Abbildung 12: Lichtsegelantrieb aus der **US 2008 / 0 197 238 A1.** Laserlicht aus den Lasern 101 werden auf einen ortsfesten Spiegel 103 eingestrahlt und zum Lichtsegelraumschiff 104 reflektiert. Das Licht tritt dabei durch ein Lasermedium 102.*

Lichtsegelantriebe sind aus der Patentliteratur bekannt. Beispielsweise beschreibt die **US 4 614 319 A** hierzu ein generelles Konzept eines Lichtsegels. Die **WO 90 / 06 259 A1** (siehe Abbildung 11), die **AT 388 148 B**, die **US 2003 / 0 010 869 A1** und die **US 2003 / 0 010 870 A1** zeigen mögliche weitere Ausführungsbeispiele für Lichtsegel-angetriebene Raumschiffe. Die **US 2008 / 0 197 238 A1** (siehe Abbildung 12) geht noch weiter und schlägt eine wiederholte Reflexion der Laserstrahlung zwischen

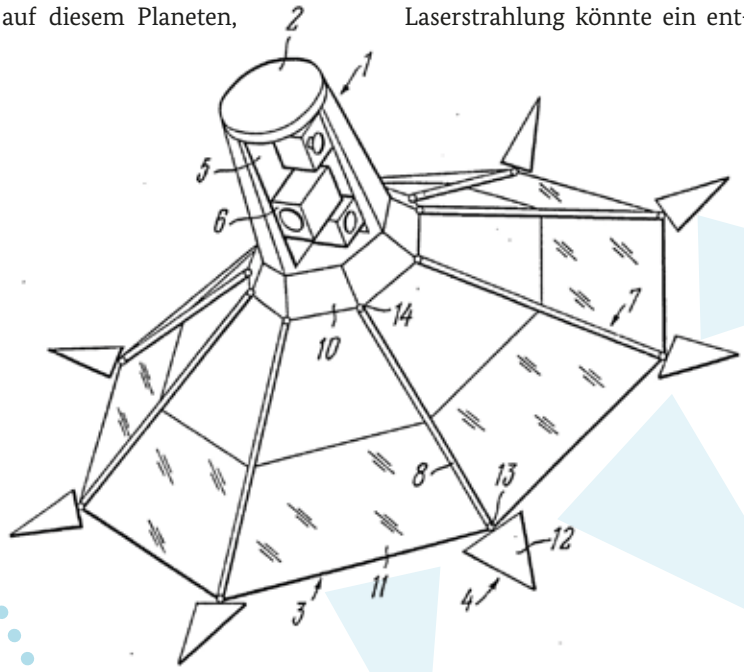


*Abbildung 11: Lichtsegelraumschiff aus der **WO 90 / 06 259 A1.***

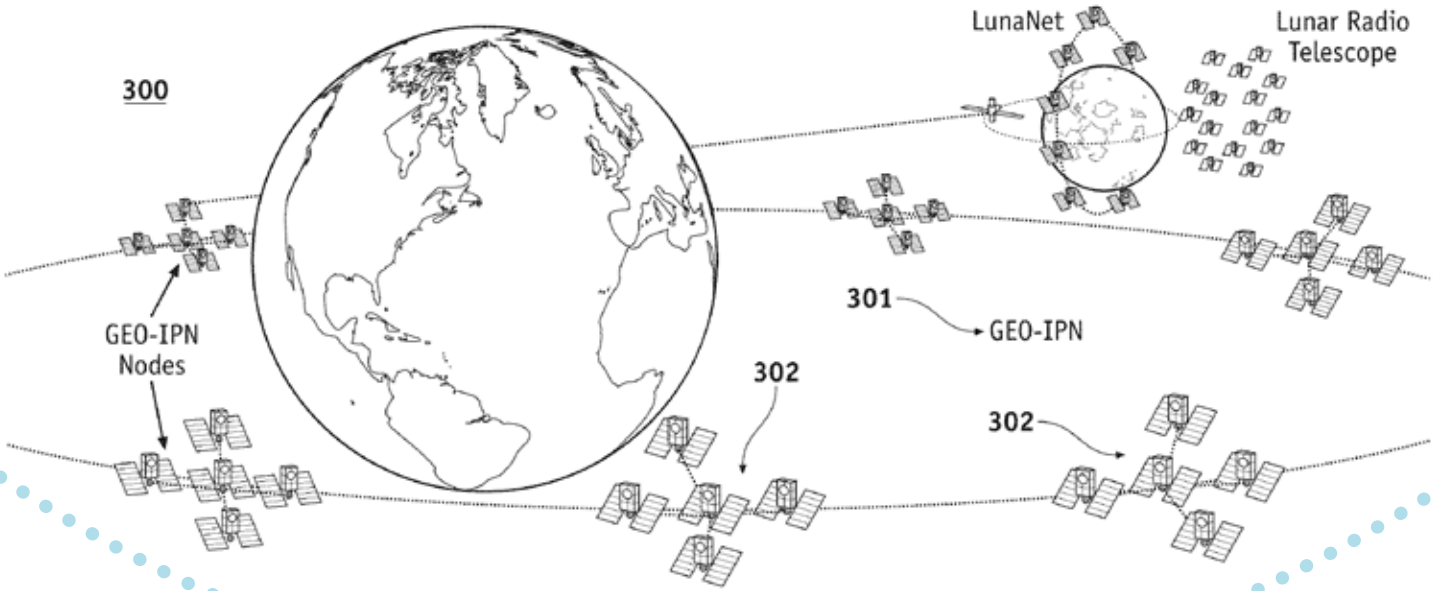


Abbildung 13: Interplanetares Kommunikationssystem aus der ***US 2022 / 302 999 A1****.*

dem Lichtsegel-Raumflugkörper und einem nicht mitbewegten Spiegel vor, wobei sich ein Lasermedium zwischen den beiden Spiegeln befindet. Damit entsteht ein optischer Resonator, worin die durchlaufenden Laserstrahlen verstärkt werden. Mit dieser Vorrichtung kann ein besonders effizienter Antrieb der Raumsonde erreicht werden. Die **US 2019 / 0 144 141 A1** wiederum offenbart ein Lichtsegel bestehend aus mehreren verkippbaren Einzelsegeln. Dadurch kann die Wirkung des Lichtdrucks verändert werden, womit eine gewisse Richtungssteuerbarkeit des Segels erreicht wird.

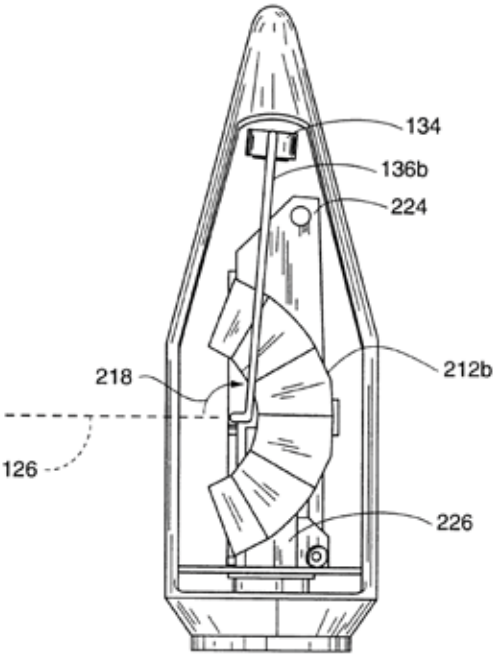
Eine Reise zu einem weit entfernten Ziel erfordert eine präzise Navigation. Für weitreichende Fahrten in den Weltraum werden hierfür typischerweise Beobachtungen von bestimmten Himmelsobjekten genutzt. Ein System gemäß der **US 9 382 020 B1** fertigt entsprechend Himmelsaufnahmen von einem Vordergrundobjekt an, wobei hierzu beispielsweise Himmelskörper innerhalb unseres Sonnensystems abgebildet werden. Durch Auswerten der Lage des Vordergrundobjekts auf den Himmelaufnahmen lässt sich die Position des Raumflugkörpers bestimmen. Die **US 2005 / 0 192 719 A1** wiederum nutzt bestimmte Arten von natürlichen, astrophysikalischen, gepulsten Radioquellen zur Navigation. Bei diesen Radioquellen handelt es sich um rotierende Neutronensterne, den ultrakompakten Überresten von explodierten Sternen. Diese Himmelsobjekte strahlen analog zu Leuchttürmen gebündelte Radiostrahlung ab, welche entsprechend der Rotation des Neutronensterns den Raumflugkörper periodisch überstreicht. Aus der Veränderung der Ankunftszeiten dieser Radiopulse an der Sonde kann deren Position bestimmt werden. Die **US 2022 / 302 999 A1** hingegen geht einen alternativen Weg. Schwärme von Satelliten, verteilt im Sonnensystem, sollen eine Navigation und Kommunikation mit interstellaren Raumsonden ermöglichen (siehe Abbildung 13).

Für einen interstellaren Raumflug muss das Segelmaterial eine außergewöhnlich geringe Dichte besitzen, um die Raumsonde so leicht wie möglich zu gestalten. Hierzu schlägt die **US 2019 / 0 070 824 A1** die Nutzung eines Metamaterials vor, das aus einer räumlich wiederkehrenden Struktur wabenartig umwandeter Hohlräume besteht. Als Alternative dazu beschreibt die **US 2019 / 0 002 283 A1** den Aufbau eines Lichtsegels aus Kohlenstoff-Nanofasern. Ein Material mit besonders geringer Dichte bestehend aus Kohlenstoffwandstrukturen, welche offene oder geschlossene Hohlräume umschließen, wird in der **DE 20 2012 011 892 U1** offenbart. Das letztgenannte Material wurde tatsächlich schon für einen Einsatz in einem interstellaren Raumfahrzeug vorgeschlagen [20].

Exoplaneten mit Biosphäre

Mittlerweile sind mehrere Tausend Planeten in anderen Sternsystemen bekannt. Manche dieser Himmelskörper umkreisen ihre Zentralsterne in einem Temperaturbereich, der flüssiges Wasser zulässt. Daher wäre denkbar, dass sich auf einigen Planeten auch Leben entwickelt hat. Im Unterschied zu Proxima Centauri b sind diese Planeten in der Regel jedoch so weit entfernt, dass sie selbst mit sehr schnellen Raumflugkörpern mit praktikablen Reisedauern nicht erreichbar wären. Eine Erforschung dieser Himmelskörper erfolgt daher bevorzugt von der Erde aus mittels geeigneter Teleskope. Allerdings sind nur sehr prominente Lebenssignaturen über diese großen Entfernungen beobachtbar. Hierzu muss, analog zur Erde, das Leben den Heimatplaneten jedoch grundlegend verändert haben. Beispielsweise hat der Stoffwechsel von Pflanzen auf der Erde zum Vorhandensein von Sauerstoff in der Atmosphäre geführt oder Pflanzen mit ihrem grünen Blattfarbstoff bedecken weite Bereiche der Oberfläche unseres Heimatplaneten. Eine vielversprechende Methode zur Lebensidentifikation auf Exoplaneten besteht tatsächlich darin, nach Atmosphärengasen mit biologischem Ursprung zu suchen [21]. In der Regel wird dabei, wenn der entsprechende Planet die Sichtlinie zwischen seinem Heimatstern und der Erde kreuzt, das durch die Atmosphäre des Planeten durchstehlende Sternenlicht analysiert. In entsprechenden Spektren könnten dann biogene Fingerabdrücke der Planetenatmosphäre identifiziert werden. Derzeit ist das James-Webb-Weltraumteleskop mit einem Durchmesser von 6,5 Metern eines der bevorzugten Instrumente für eine entsprechende Analyse. Mit diesem Teleskop konnte möglicherweise schon ein Kandidat für ein biogenes Gas in einer Exoplaneten-Atmosphäre gefunden werden. In der Gashülle des Exoplaneten mit dem Namen K2-18b wurde möglicherweise Dimethylsulfid (C_2H_6S) entdeckt [22]. Diese schwefelhaltige organische Verbindung wird auf der Erde durch pflanzliches Plankton (Phytoplankton) gebildet und ist teilweise für den typischen Meeresgeruch verantwortlich. Für den Fall von K2-18b muss das Vorhandensein von Dimethylsulfid erst mit zukünftigen Beobachtungen bestätigt werden. Sollte sich die Indizien-

*Abbildung 14: Transport eines gefalteten Teleskops in den Weltraum aus der **US 5 898 529 A**. Das James-Webb-Weltraumteleskop wurde beispielsweise auf ähnliche Art und Weise zu seinem Einsatzort gebracht.*



James-Webb-Weltraumteleskop

Das James-Webb-Weltraumteleskop ist ein besonders leistungsstarkes Beobachtungsinstrument für die astrophysikalische Forschung im langwelligen sichtbaren Licht und im Bereich der Wärmestrahlung (Infrarot). Es wurde nach einer langjährigen Entwicklungsphase am 25. Dezember 2021 gestartet und befindet sich für seine Beobachtungsarbeiten in einem Abstand zur Erde von 1,5 Millionen Kilometern. Dies entspricht etwa dem Vierfachen der Entfernung von der Erde zum Mond.

Dieser abgelegene Standort minimiert mögliche Störeinflüsse von unserem Planeten. Für eine Beobachtung im Infrarotbereich muss das James-Webb-Weltraumteleskop zusätzlich noch von der Wärmestrahlung der Sonne abgeschirmt werden. Dies erfolgt durch ein etwa 21 x 14 Meter großes Sonnenschild.

Der Primärspiegel des James-Webb-Teleskop besitzt einen Durchmesser von 6,5 Metern und weist damit fast den dreifachen Durchmesser des Hubble Weltraumteleskops auf. Sowohl der Sonnenschild als auch der Primärspiegel waren zu groß, um mit verfügbaren Raketen ins All geschickt zu werden. Daher wurden diese Strukturen gefaltet in den Weltraum transportiert. Dort wurden sie in einem sehr komplexen Manöver entpackt und in ihre Betriebskonfiguration gebracht.

Das James-Webb-Weltraumteleskop ist derzeit das bevorzugte Instrument in der Kosmologie zur Erforschung von besonders weit entfernten Objekten und ist eines der vielversprechendsten Beobachtungsgeräte in der Astrobiologie zur Suche nach Leben auf extrasolaren Planeten.

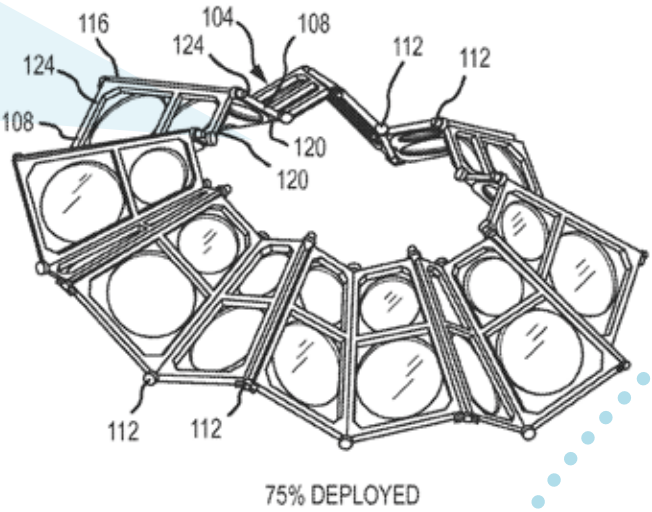


*Abbildung 15: Entfaltung eines Spiegels eines Weltraumteleskops aus der **US 9 709 793 B1**.*

lage zu diesem Gas auf diesem Planeten erhärten, muss zusätzlich geklärt werden, ob es sich dabei tatsächlich um das Werk von Lebewesen handelt.

Exoplaneten sind in der Regel sehr leuchtschwache Himmelsobjekte. Das Erforschen ihrer Atmosphären erfordert daher typischerweise Teleskope mit sehr großer Lichtsammelfläche. Die Herstellung von entsprechenden Primärspiegeln wird jedoch mit zunehmender Größe immer komplexer und teurer. Um hier Abhilfe zu schaffen, schlägt die **DE 10 2004 046 531 A1** und die **US 2006 / 0 238 859 A1** vor, einen großen Primarspiegel aus einer Vielzahl von kleineren Spiegeleinheiten zusammenzusetzen. Verwandte Methoden werden tatsächlich bei der nächsten Generation von bodengebundenen Großteleskopen mit Durchmessern von um oder über 30 Metern eingesetzt [23]. Von besonderer Bedeutung für das Studium von Exoplaneten sind allerdings weltraumgebundene Instrumente, da dort eine Beobachtung ohne die störende Erdatmosphäre durchgeführt werden kann. Deren Größe wird allerdings durch die Ladekapazitäten des Transportfahrzeugs in den Weltraum begrenzt. Größere Instrumente müssen daher zusammengefaltet transportiert werden, wie die **US 5 898 529 A** (vgl. Abbildung 14) zeigt. Für den Transport des James-Webb-Teleskops in den Weltraum wurde eine ähnliche Vorgehensweise gewählt. Im Einsatzgebiet eines Weltraumteleskops kann dann der Primärspiegel entfaltet werden, wie es beispielsweise die **US 9 709 793 B1** (siehe Abbildung 15) beschreibt. Die vielen Kanten der einzelnen Spiegelsegmente können allerdings Abbildungsfehler hervorrufen, wobei die **US 2022 / 0 091 409 A1** ein Verfahren zur Korrektur dieser Abbildungsfehler offenbart. Mit den vorgestellten Teleskopen können beispielsweise auch Spektren erstellt werden, um mit einem geeigneten Spektrometer (**US 2023 / 0 184 587 A1**) Lebenssignaturen nachzuweisen.

Die Zentralsterne von Exoplaneten-Systemen überstrahlen in der Regel ihre Trabanten und erschweren damit deren direktes Studium. Abhilfe könnten hier Vorrichtungen schaffen, die gezielt das Sternenlicht abschatten, wohingegen das Licht der Exoplaneten in das Beobachtungsinstrument gelangt. Die **US 5 249 080 A** beschreibt für eine entsprechende direkte Beobachtung eines Exoplaneten eine geeignete Blende, welche in den Strahlengang eines Teleskops eingesetzt wird und das Sternenlicht blockiert. Bei Weltraumteleskopen besteht alternativ die Möglichkeit, eine Abschattungsvorrichtung in großem Abstand vor die

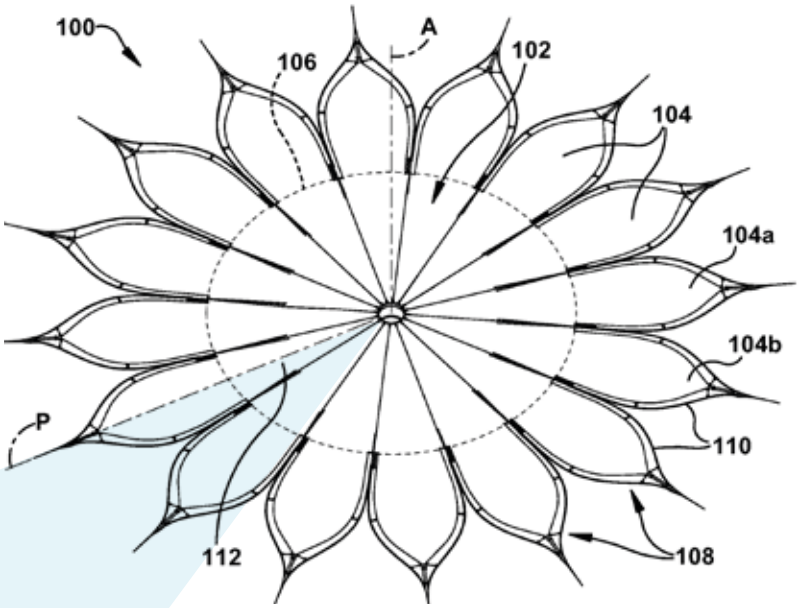


*Abbildung 16: Blende zur Abschattung von Sternenlicht aus der **US 2011 / 0 242 663 A1**.*



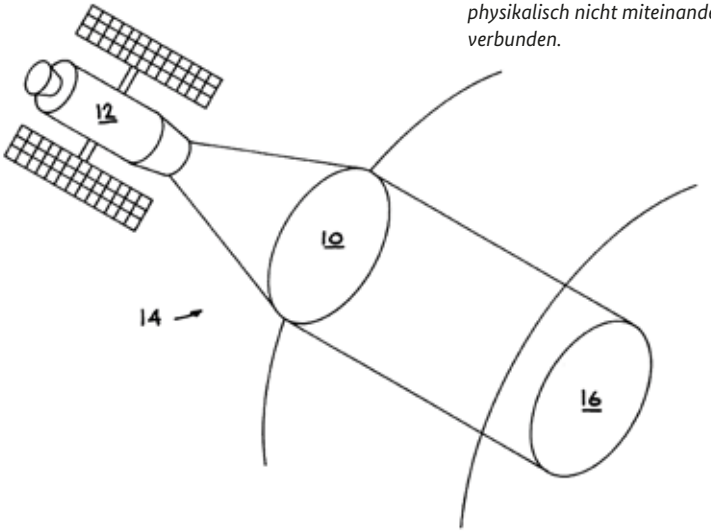


*Abbildung 17: Formationsflug eines Weltraumteleskops 12 mit optischen Elementen 10 aus der **US 6 219 185 B1**. Das Teleskop und die Linsen sind physikalisch nicht miteinander verbunden.*

Öffnung des Teleskops zu setzen, wie die **US 2007 / 0 278 351 A1** zeigt. Hierzu offenbart die **US 2011 / 0 242 663 A1** (siehe Abbildung 16) eine optimierte Blendenform und die **US 2017 / 0 254 929 A1** offenbart das Ausbringen einer entsprechenden Vorrichtung am Einsatzort.

Weltraumteleskope mit deutlich größerer Lichtsammelfläche als das James-Webb-Teleskop würden vermutlich alternative Konstruktionsformen erfordern. Beispielsweise könnte eine Linse mit sehr großer Brennweite in einem Formationsflug gemeinsam mit einem Instrumentenraumschiff betrieben werden, wie es in der **US 6 219 185 B1** (siehe Abbildung 17) gezeigt wird. Dabei werden die beiden Raumfahrzeuge koordiniert ausgerichtet, sind jedoch physikalisch nicht miteinander verbunden. Als Linse könnte dabei eine Fresnel-Linse dienen, wie es die **FR 2 840 416 A1**, die **US 2021 / 0 318 550 A1** oder die **US 2023 / 0 020396 A1** beschreiben. Bei einer Fresnel-Linse handelt es sich um eine stufenförmige Bauform einer Linse, wodurch ihre Masse reduziert wird. Die Abbildungsqualität einer Fresnel-Linse wird allerdings durch ihre besondere Form verschlechtert. Daher offenbart die **US 2016 / 0 370 599 A1** eine Methode zur Verbesserung der Fokussierung von entsprechenden Linsen. Die **US 10 338 371 B1** wiederum zeigt eine Anordnung einer Vielzahl von reflektierenden Elementen, welche eine Fresnel-Linse imitieren.

Optische Elemente zum Einsatz im Weltraum, mit der Größe von beispielsweise einem Tennisplatz oder einem Fußballfeld, müssen geeignet gefaltet, transportiert und gegebenenfalls auch betrieben werden. Hierzu schlägt die **US 2018 / 0 278 200 A1** (siehe Abbildung 18) oder die **DE 10 2017 101 180 A1** den Einsatz der japanischen Falttechnik Origami vor. Die **US 2007 / 0 045 474 A1** (siehe Abbildung 19) wiederum beschreibt die Aufspannung einer Weltraumoptik durch Lichtdruck, hervorgerufen durch den Austausch von Laserstrahlung zwischen Raumflugkörpern, die sich an den Ecken des entsprechenden optischen Elements befinden.

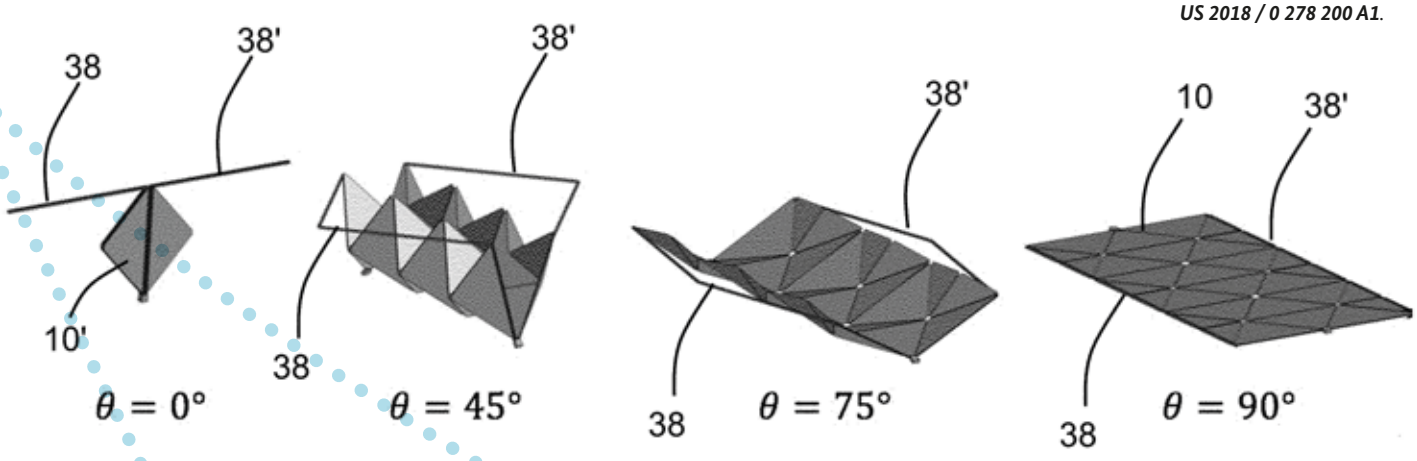


*Abbildung 18: Faltung einer Weltraumstruktur mit der Origami-Technik aus der **US 2018 / 0 278 200 A1**.*

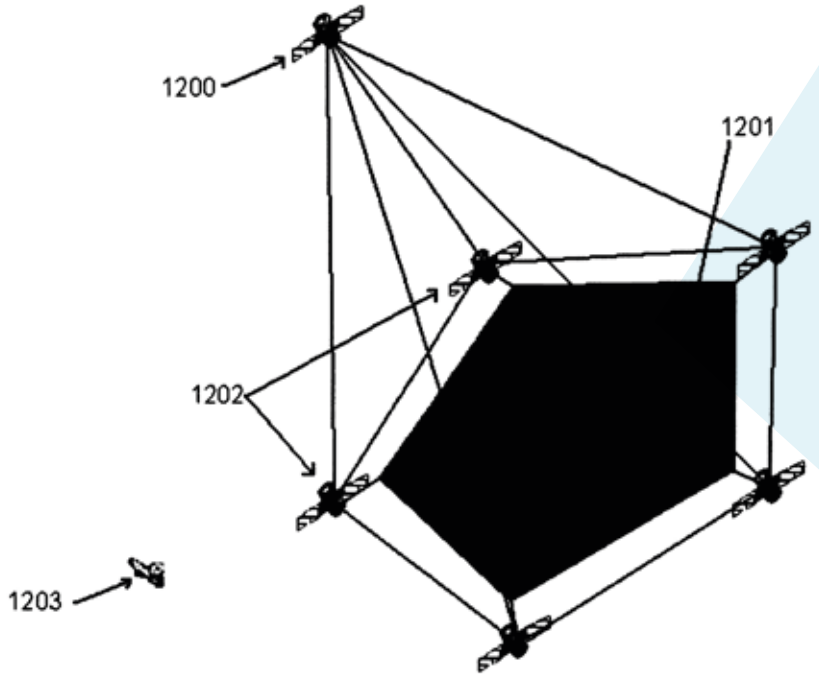


*Abbildung 19: Aufspannen eines optischen Elements für eine Weltraumteleskop aus der **US 2007 / 0 045 474 A1**. Zum Vergleich wird mit Bezugszeichen 1203 ein Weltraumteleskop mit herkömmlicher Größe, wie beispielsweise das James-Webb-Teleskop, dargestellt.*

Die Suche nach extraterrestrischer Intelligenz

Bisher wurde hier die Suche nach Biosignaturen von einfachem Leben besprochen. Es wäre jedoch prinzipiell vorstellbar, dass sich unter besonders vorteilhaften Voraussetzungen sogar intelligente Wesen auf Exoplaneten entwickelt haben könnten. Von einer extraterrestrischen Zivilisation bewohnte Planeten, so es sie überhaupt gibt, sind vermutlich deutlich seltener anzutreffen als Planeten mit einer einfacheren Biologie. Extraterrestrische Intelligenzen wären allerdings in der Lage, viel prominentere Signaturen zu erzeugen als mikrobiologisches Leben. Daher wäre extraterrestrische Zivilisation potentiell aus vergleichsweise viel größerer Entfernung entdeckbar. Insgesamt könnte eine vielversprechende Suchstrategie nach extraterrestrischem Leben darin bestehen, nach Signalen oder Nachrichten von einer entsprechenden Intelligenz zu fahnden [24]. Eine entsprechende Suche würde auf künstlich erzeugte, elektromagnetische Wellen aus dem Weltall abzielen, da vermutlich der Versuch eines interstellaren Informationsaustauschs bevorzugt über diesen Kanal erfolgen würde.

*Abbildung 20: Radioteleskop in einer Geländemulde aus der **US 3 273 156 A**.*

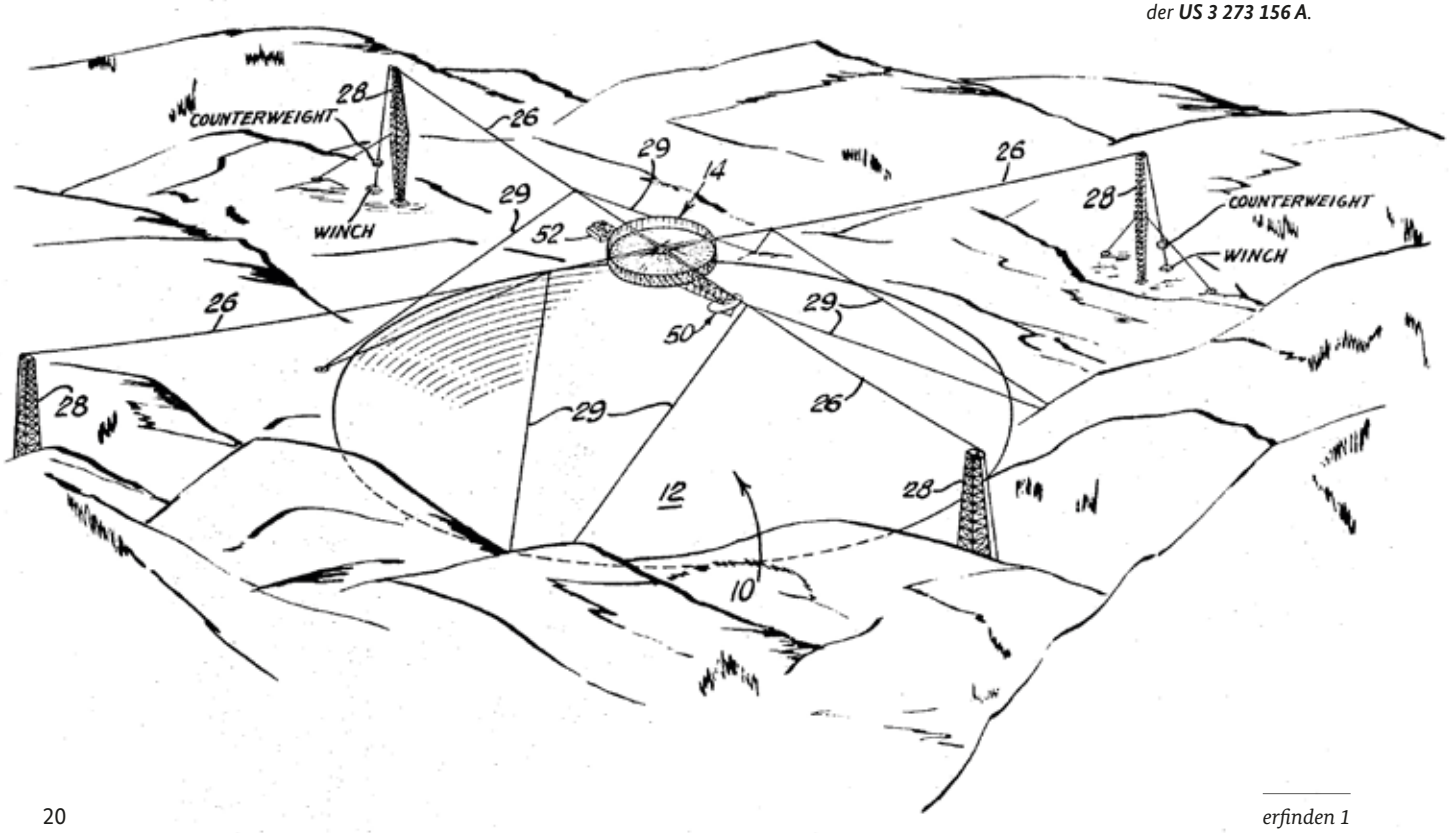
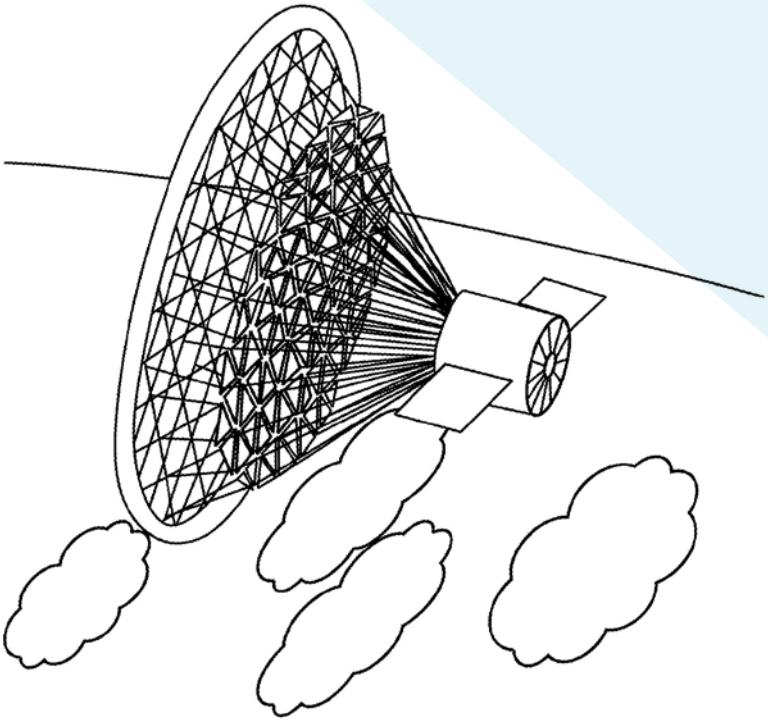


Abbildung 21: Weltraum-Radioteleskop aus der ***US 11 870 128 B2****.*



Radiowellen wären beispielsweise ein geeignetes Kommunikationsmedium für interstellare Nachrichten. Die **US 3 273 156 A** beschreibt ein Radioteleskop bestehend aus einer riesigen Empfangsschüssel, die sich in einer natürlichen Geländemulde befindet (siehe Abbildung 20). Alternativ können auch eine Vielzahl an Einzelantennen (**US 2002 / 0 063 657 A1**;) kooperativ betrieben werden, um gemeinsam ein einzelnes, leistungsstarkes Instrument zu bilden. Als Konstruktionsform für die Einzelteleskope in einem solchen Antennenfeld schlägt die **US 2017 / 0 194 714 A1** einen Parabolempfänger mit einem sekundären Reflektor vor. Die hier genannten Konzepte für Radioteleskope wurden mittlerweile in unterschiedlichen Ausführungsformen realisiert und mit diesen Instrumenten wurde schon nach künstlichen, extraterrestrischen Signalen gefahndet. Die Beobachtungen mit Radioteleskopen auf der Erde werden jedoch durch menschengemachte Störsignale beeinträchtigt. Der Betrieb eines entsprechenden Instruments im Weltraum könnte mit deutlich weniger Hintergrundstörungen erfolgen. Radioteleskope sind in der Regel allerdings recht ausgedehnte Vorrichtungen. Um ein entsprechendes Teleskop mit einer Rakete transportieren zu können, offenbart die **US 2022 / 0 209 390 A1** hierfür eine im Weltraum entfaltbare Konstruktion (siehe Abbildung 21). Weltraum-basierte Radioteleskope können durch ihre Abgeschiedenheit von irdischen künstlichen Signalen in Zukunft wichtige Instrumente bei der Suche nach extraterrestrischen Zivilisationen darstellen.

Neben dem Radiobereich wären vielversprechende Fahndungen nach künstlichen, extraterrestrischen Signalen im sichtbaren Licht denkbar. Insbesondere könnten fremde Zivilisationen gigantische Laser zum Versenden von Nachrichten nutzen. Zur irdischen Detektion von extraterrestrischen Laserpulsen werden in der Regel optische Geräte mit sehr großen Lichtsammelflächen benötigt. Außergewöhnlich große Lichtsammelflächen werden beispielsweise bei



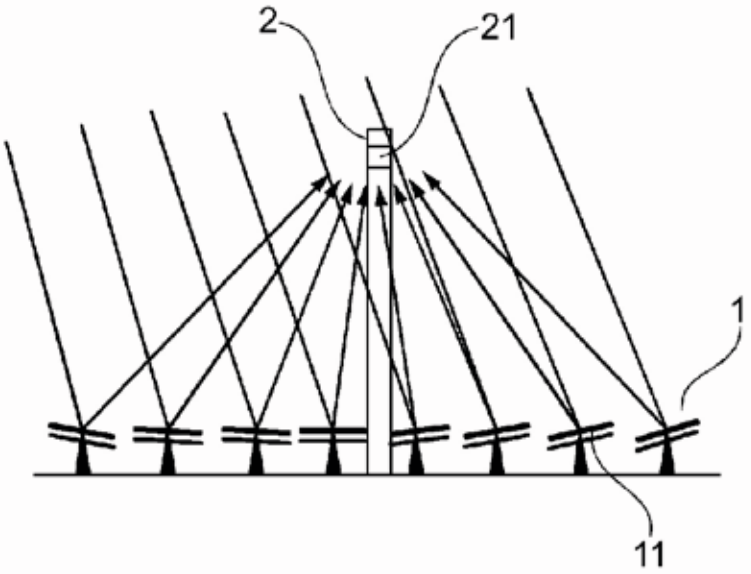


*Abbildung 22: Sonnenwärmekraftwerk aus der **EP 2 728 275 A1**. Die große, reflektierende Fläche kann ebenfalls zur Suche nach extraterrestrischen Laserpulsen genutzt werden.*

Sonnenwärmekraftwerken eingesetzt, wo Sonnenlicht durch eine Vielzahl an Reflektoren auf einen kleinen Bereich gebündelt werden, um dort ein Medium zu erhitzen (**EP 2 728 275 A1**, siehe Abbildung 22; **DE 20 2019 102 712 U1**). Die **DE 44 23 527 A1** schlägt in diesem Zusammenhang vor, in der Nacht die Lichtsammelfläche eines Sonnenwärmekraftwerks zur Suche nach extraterrestrischen Laserpulsen zu nutzen. Die **US 2017 / 0 299 441 A1** wiederum offenbart eine optische Vorrichtung, welche in den Fokus eines Teleskops eingesetzt werden kann, um kurze Lichtpulse zu identifizieren. Suchen nach künstlichen Signalen aus dem Weltall werden zusätzlich zu Fahndungen im Radiobereich tatsächlich auch im sichtbaren Licht durchgeführt, wobei dabei teilweise auch Sonnenwärmekraftwerke genutzt wurden [25]. Bisher konnte allerdings weder im sichtbaren Licht noch im Radiobereich ein überzeugendes Signal einer extraterrestrischen Zivilisation gefunden werden.



Ausblick – eine Vielzahl von Wegen

Trotz intensiver Suchen konnte bisher noch keine Signatur von extraterrestrischem Leben zweifelsfrei identifiziert werden. Es existieren allerdings eine Vielzahl an Möglichkeiten, um nach einer außerirdischen Biologie zu suchen. Aktuell ist es unklar, mit welcher Strategie am wahrscheinlichsten eine entsprechende Entdeckung erzielbar wäre. Daher wäre es vorteilhaft, auch in Zukunft verschiedene Projekte zur Lebenssuche zu verfolgen. In der Patentliteratur finden sich hierzu viele Anregungen und Vorschläge.





Dr. Wilfried Domainko

promovierte an der Universität Innsbruck in Astrophysik. Danach war er mehrere Jahre am Max-Planck-Institut für Kernphysik tätig, im Bereich der bodengebundenen Gammastrahlenastronomie.

Im DPMA prüft Dr. Domainko Patentanmeldungen, unter anderem in den Bereichen Mensch-Maschine-Interaktionen sowie Antriebsstrangsteuerungen im Zusammenhang mit autonomem Fahren und Fahrerassistenzsystemen.



Neodym-Magnete:
Kommen die Supermagnete ohne Gewürze aus?

Dr. Jana Becherer, Dr. Michael Krispin

#Ressourcen

#Klimawandel

#Nachhaltigkeit

#Energiewende

#Supermagnete

#SelteneErden

#Windenergie

#E-Mobilität

Ob in Motoren von Elektroautos oder in Turbinen von Windkraftanlagen: Kraftvolle Permanentmagnete spielen bei Lösungen für die Energiewende eine wichtige Rolle. Diese Magnete enthalten meist schwere Seltene Erden. Wie lässt sich der Einsatz der kritischen Rohstoffe für Supermagnete reduzieren oder ganz vermeiden? Dafür gibt es eine Reihe von Ansätzen.

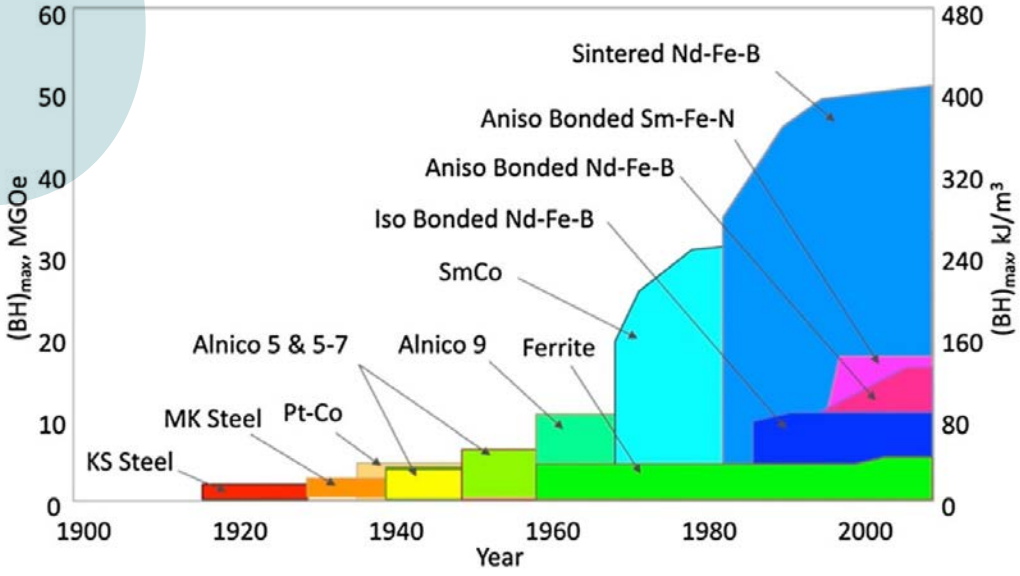


Und es hat „Pleng“ gemacht

Wir schreiben das Jahr 1972. Es gibt bereits eine Vielzahl unterschiedlichster Permanentmagnete wie Cobalt-Magnete (AlNiCo-Magnete, SmCo-Magnete) und Magnete aus Eisenoxiden (Ferrite)(siehe Abbildung 2). In einem japanischen Labor arbeitet der junge Materialwissenschaftler Masato Sagawa an Samarium-Cobalt-Magneten. Dabei kommt ihm eine wichtige Frage in den Sinn: „Warum müssen es Seltene Erden und Cobalt sein, und nicht Seltene Erden und Eisen?“ Der Gedanke, Seltene Erden-Eisen-Magnete (R-Fe-Magnete) zu realisieren, lässt ihn nicht mehr los. Nach der Arbeit, am Wochenende, immerzu denkt er über die Realisierung eines solchen Magneten nach. Während eines Vortrags lernt er, dass in Verbindungen aus Seltenen Erden und Eisen (R2Fe17) der ferromagnetische Zustand nicht stabil ist, da der Abstand der Eisenatome zu klein ist. Ihm kommt die Idee, den Abstand zu erhöhen, indem er kleine Atome wie Kohlenstoff (C) oder Bor (B) dazugibt. Jahrelang schmilzt er nach Feierabend R-Fe-X-Legierungen (X = B, C), misst ihre magnetischen Eigenschaften und analysiert ihre Kristallstruktur. Im Jahre 1982 hört er das charakteristische „Pleng“ eines Magneten, der an eine Stahlplatte springt. Er hat gerade den Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB-Magneten) erfunden [1].

Wie sich herausstellte, brachen die NdFeB-Magnete alle Rekorde. Wie Abbildung 2 zeigt, ist ihr maximales Energieprodukt beinahe doppelt so hoch wie das der SmCo-Magnete. Das Energieprodukt ist ein Maß für die magnetischen Kräfte, die von einem Magneten ausgehen.

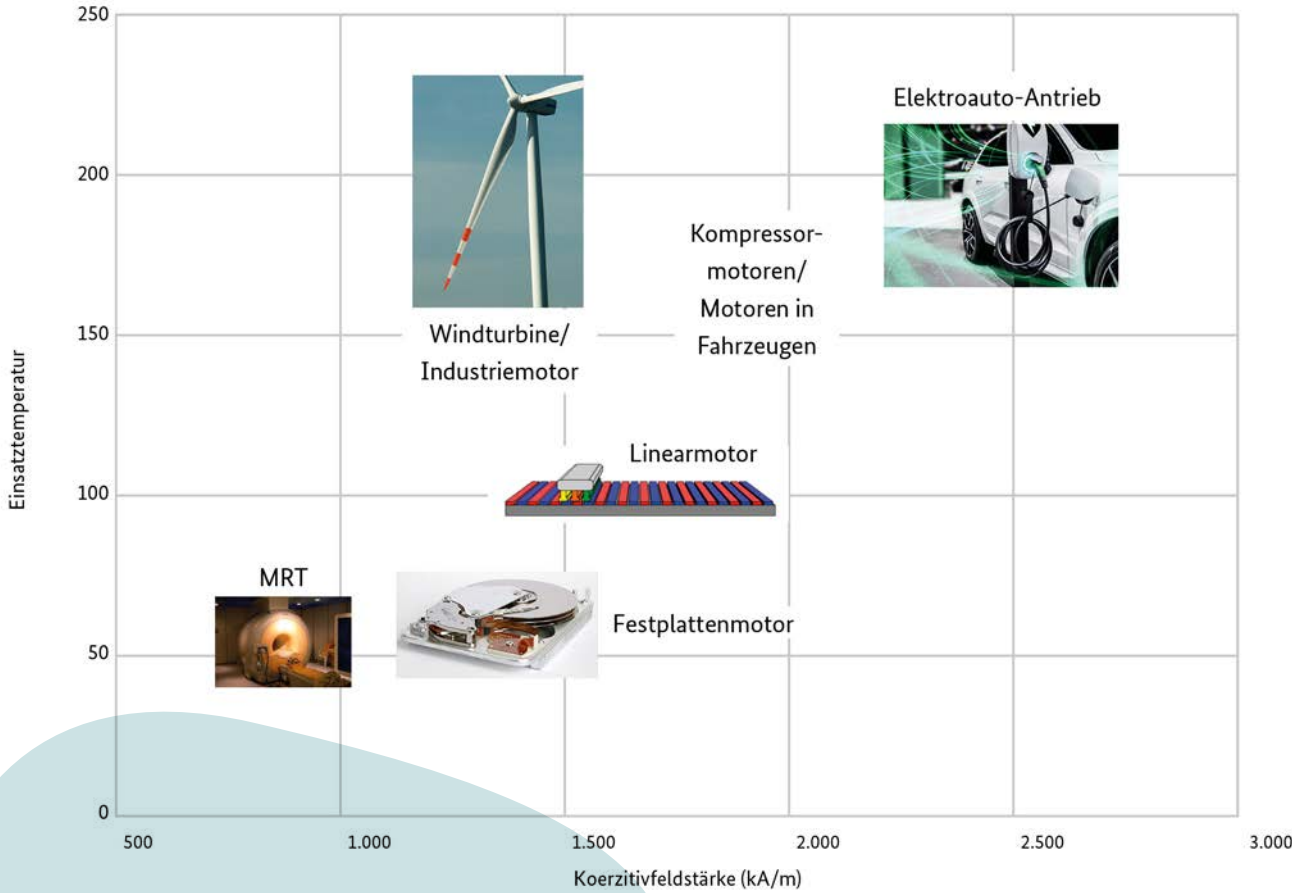
Abbildung 2: Fig.3 aus [6]: Entwicklung des maximalen Energieprodukts kommerzieller Permanentmagnete über die Jahre.



Doch die neuen Supermagnete hatten ein Problem. Sie vertrugen keine Wärme. Ihre Koerzitivfeldstärke, ihre Widerstandsfähigkeit gegen Ummagnetisierung, sank rapide bei höheren Temperaturen. Je höher die Koerzitivfeldstärke, umso besser behält ein Magnet seine Magnetisierung, wenn er einem Gegenfeld ausgesetzt ist. Eine essenzielle Eigenschaft für den Einsatz in Elektromotoren.

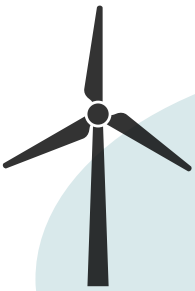
In nur drei Monaten fand Sagawa, der mittlerweile ein Team aus mehr als zehn Leuten beschäftigte, eine Lösung für das Problem. Eine Lösung, die uns noch heute beschäftigt. Wenn man einen Teil des Neodyms mit schweren Seltenen Erden wie Dysprosium (Dy) oder Terbium (Tb) ersetzt, erhöht sich die Koerzitivfeldstärke auch bei Temperaturen über Raumtemperatur und ermöglicht den praktischen Einsatz von gesinterten NdFeB-Magneten.

Und ihr Siegeszug hält an. In 3 Megawatt-Windturbinen werden ca. 1,8 t NdFeB-Magnete benötigt, in Motoren für Elektroautos 2 kg, die etwa 600 g Seltene Erden und 160 g schwere Seltene Erden enthalten [4].



Die Eigenschaften der Supermagnete

Energieprodukt BH_{max}: Die Energie, die im Magneten steckt.
Koerzitivfeldstärke H_c: Die Widerstandsfähigkeit gegen Ummagnetisierung in einem magnetischen Gegenfeld.
Remanenz B_r: Die Anziehungskraft des Magneten.
Die Auswahl der Magnete hängt auch maßgeblich von deren Einsatztemperatur ab [3].







Seltene Erden – ohne geht es heute nicht mehr

Egal ob in Smartphones, Elektroautos oder Windturbinen. Überall sind kleinere oder größere Mengen der Seltenen Erden heute unabdingbar.

Unter dem Sammelbegriff Seltene Erden werden 17 chemische Elemente zusammengefasst, die in zwei Gruppen unterteilt sind:

Leichte Seltene Erden: Scandium (Sc), Lanthan (La), Cer (Ce), Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Prometium (Pm), Samarium (Sm), Europium (Eu)



Schwere Seltene Erden: Yttrium (Y), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb), Lutetium (Lu)



Die leichten Seltenen Erden kommen in den meisten Lagerstätten deutlich häufiger vor als die schweren Seltenen Erden. Dabei ist der Begriff „selten“ irreführend, da die Elemente an sich nicht sehr selten sind. Jedoch ist die Konzentration im Boden so gering, dass es weltweit nur wenige Orte gibt, an denen der Abbau wirtschaftlich erfolgen kann.

Doch der Abbau Seltener Erden ist ein schmutziges Geschäft. Etwa 80 % der Weltproduktion stammt aus China. In der Nähe der größten Mine Bayan Obo gelangten toxische und radioaktive Stoffe, wie radioaktives Thorium und Flusssäure, in Flüsse, Grundwasser, Boden und Luft. Die Sterblichkeitsrate durch Lungenkrebs ist in der Bevölkerung deutlich erhöht. Die nahegelegene Stadt Baotou gehört zu den 50 sogenannten Opferzonen der Welt, österreichische Reporter bezeichnen die Stadt als „schlimmsten Ort der Erde“.

Der gesamte Förderprozess von Seltenen Erden benötigt extrem viel Wasser und Energie [5]. Daher arbeitet die Erfinderbranche mit Hochdruck daran, den Einsatz von Seltenen Erden zu reduzieren.

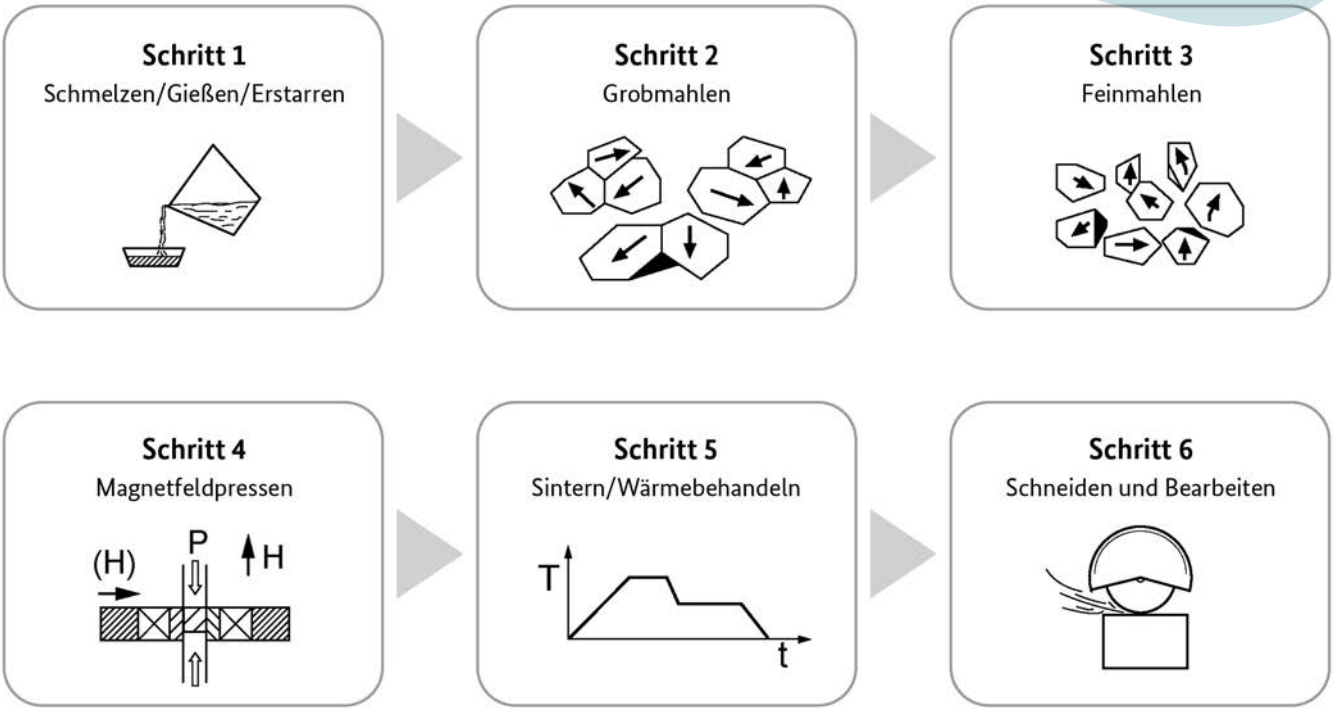
Und alle stellen sich die Frage: Kann man die Koerzitivfeldstärke auf anderem Wege erhöhen?

Das Sinterverfahren: So bäckt man Supermagnete

Schauen wir uns dafür erst einmal an, wie man gesinterte NdFeB-Magnete herstellt. Abbildung 3 zeigt den Ablauf des Sinterverfahrens. Im ersten Schritt werden die Rohmaterialien im Vakuum oder in einer Atmosphäre aus Edelgas geschmolzen und dann gegossen, meist zu einem dünnen Band in einem Bandgießverfahren (Schritt 1). Anschließend wird die Legierung pulverisiert. In einem Grobpulverisierungsschritt wie der Wasserstoffspeicherungspulverisierung (Schritt 2) werden Partikelgrößen von mehreren Hundert Mikrometern erreicht und in einem Feinpulverisierungsschritt werden Partikelgrößen von mehreren Mikrometern erreicht, beispielsweise mit einer Strahlmühle, die Edelgase bei hohem Druck aus einer schmalen Düse schießt (Schritt 3). Das Pulver wird in einem Magnetfeld gepresst (Schritt 4), um einen verdichteten sogenannten Grünkörper zu erhalten. Beim Sintern selbst wird der Grünkörper bei Temperaturen von über 1000 °C eine Stunde oder länger gebrannt und anschließend wärmebehandelt (Schritt 5). Die Magnete werden dann in die gewünschte Form geschnitten (Schritt 6) und einer Oberflächenbehandlung unterzogen, also beispielsweise beschichtet. Die finale Magnetisierung erfolgt meist erst vom Endnutzer, zum Beispiel bei Motoren erst nach dem Einbau.

In solch einem mehrschrittigen Herstellungsverfahren ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten zur Optimierung. Das nächste Kapitel zeigt, warum die erzeugte Partikelgröße entscheidend sein kann.

*Abbildung 3: Der Ablauf des Sinterverfahrens angelehnt an **DE 10 2013 213 494 A1.***



Erfindungen für zukunftsfähige Supermagnete

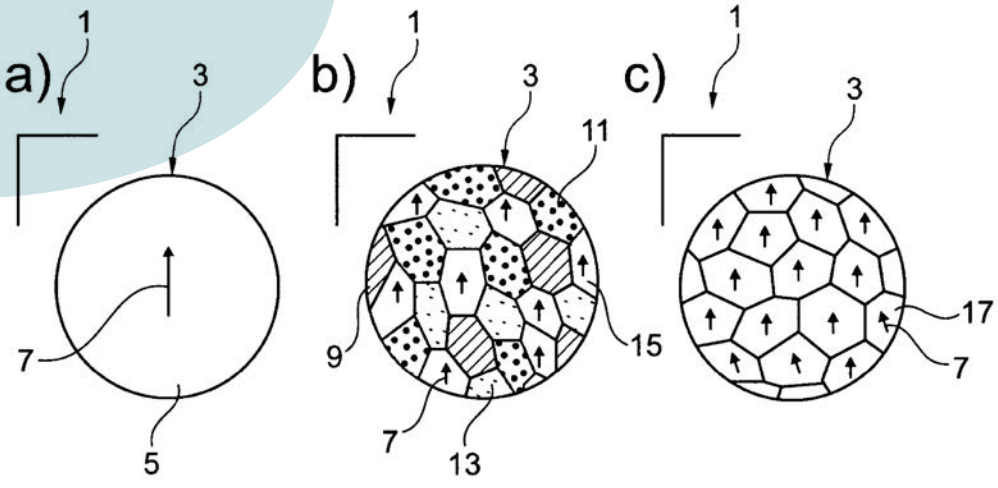
Das Sinterverfahren optimieren: Ohne grobe Körner bitte

Zu den Schritten 2 bis 4: Ein Ferromagnet besteht aus mehreren Bereichen gleicher Magnetisierung, sogenannten Domänen. Schafft man es, die Partikelgröße des Pulvers soweit zu verringern, dass die Partikel nur aus einer Domäne bestehen, ist die Koerzitivfeldstärke maximal. Bei NdFeB liegt die theoretisch optimale Partikelgröße bei 107 bis 300 nm. Man kann also die Koerzitivfeldstärke erhöhen, indem man die Korngröße verfeinert. Im industriellen Maßstab werden derzeit Partikelgrößen im Pulver von etwa 3 µm verwendet. Die Partikelgröße kann man verfeinern, indem man länger oder mit anderen Verfahren arbeitet, wie beispielsweise Strahlmühlen mit Helium. Allerdings oxidiert ein solch feines Pulver sehr leicht und lässt sich nur schwer im Magnetfeld ausrichten. Warum also nicht die Körner erst an der im Magnetfeld ausgerichteten Rohform direkt vor dem Sintern verfeinern?

Die **DE 10 2020 214 335 A1** beschäftigt sich mit einer Kornfeinung an der Rohform direkt vor dem Sintern. Abbildung 4a zeigt ein einziges großes NdFeB-Korn 5 einer Rohform. Darin wird Wasserstoff eingelagert, sodass sich das große Korn, wie in Abbildung 4b gezeigt, in mehrere kleinere NdHx-Körner 9, Fe-Körner 11, Fe2B-Körner 13 und Nd2Fe14B Körner 15 aufspaltet. Durch Entziehen des Wasserstoffs lagern sich die kleineren Körner zusammen und bilden, wie in Abbildung 4c dargestellt, eine Mehrzahl von kleinen Nd2Fe14B-Körnern 17, während die magnetische Richtung 7 erhalten bleibt. Die **US 2020 / 0 406 361 A1** erreicht mit dieser Methode Kristallkorngrößen von 200 bis 300 nm und Koerzitivfeldstärken von 18,5 kOe (1472 kA/m) [siehe Seite 26].

Eine weitere Hürde bei der Herstellung feiner Pulver ist die schnelle Degradation. Denn kleinere Teilchen oxidieren sehr schnell und verlieren dadurch ihre hohe Koerzitivfeldstärke. Die **WO 2023 / 093 495 A1** benetzt daher das Pulver mit einem Antioxidans aus vier Komponenten, um die Oxidation zu verhindern.

*Abbildung 4: Fig.2 aus **DE 10 2020 214 335 A1**: Zeigt das Verfahren der Kornfeinung an der Rohform; a) einziges großes Nd2Fe14B Korn 5, b) nach dem Wasserstoffeinlagerungsschritt Aufspaltung in eine Mehrzahl von Körnern, c) nach der Rekombination Nd2Fe14B Körner 17 jeweils kleiner als Initialkorn 5.*



Auch der Schritt des Brennens (Schritt 5) wird verbessert, um die Dichte und Homogenität der Kristallstruktur zu erhöhen. Die **WO 2022 / 209 466 A1** optimiert den Prozess des Sinterns, um einen Abfall der Koerzitivfeldstärke bei Veränderungen der Zusammensetzungs- und Herstellungsbedingungen zu unterdrücken. In einem mehrstufigen Brennprozess wird, wie in Abbildung 5 gezeigt, eine erste Sinterphase S10 mit einer Sintertemperatur T1 für eine Zeit t1 verwendet, gefolgt von einer Abkühlphase S20 und einer zweiten längeren Sinterphase S30. Für die Proben 1-5 wurde eine erste Sintertemperatur T1 von 1050 °C für eine Dauer t1 von 30 min, eine Abkühltemperatur T0 von 700 °C und eine zweite Sintertemperatur von T2 1040 °C für eine Dauer t2 von 4h verwendet und damit eine Koerzitivfeldstärke von 1654 kA/m erreicht [siehe Seite 26 und 28].

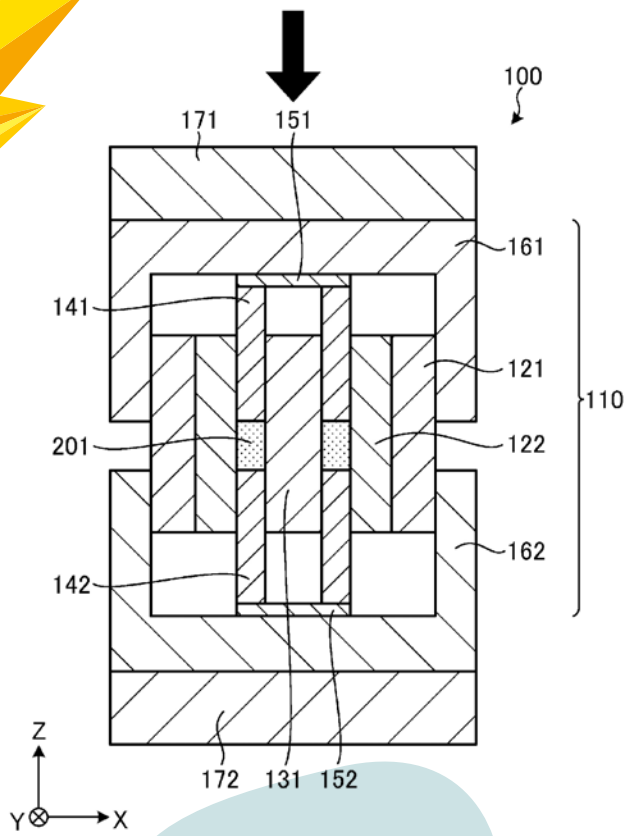
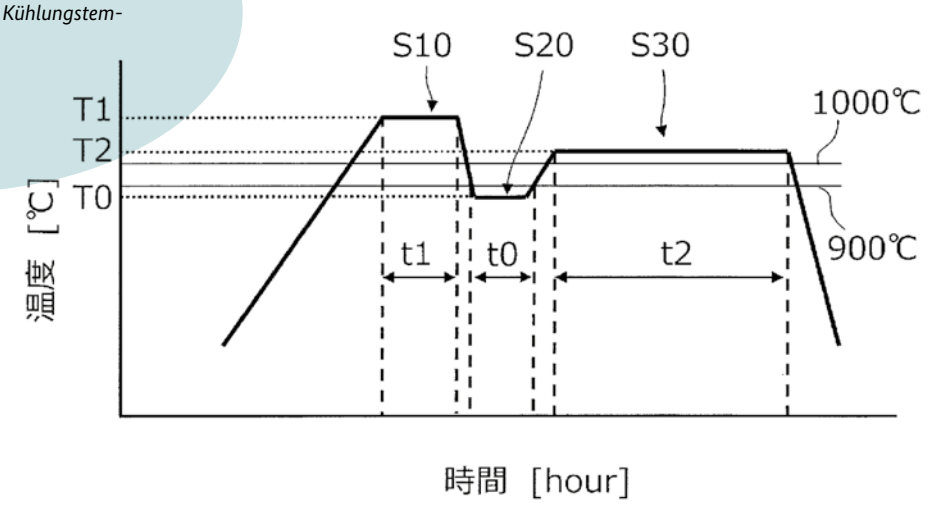


*Abbildung 6: Fig. 4 aus **WO 2023 106 008 A1**: Zeigt die Sintervorrichtung 100 wobei 201 das Magnetpulver ist, 141, 142 die Stempel sind und 171, 172 die Elektroden sind.*

Klassischerweise erfolgt das Brennen in einem Ofen. Es gibt aber auch Ansätze, stattdessen spezielle Plasmasinterapparate zu verwenden, die einen Gleichstrom durch das Pulver leiten, um es sehr schnell aufzuheizen. Bei NdFeB-Magneten bilden sich dabei allerdings durch Schweißprozesse grobe Partikel zwischen dem Pulver, die wiederrum die magnetischen Eigenschaften verschlechtern. In **WO 2023 / 106 008 A1** wird das NdFeB-Pulver in eine in Abbildung 6 dargestellte Ringform 131, 121, 122 gefüllt und in den Sinterapparat 100 gesetzt. Der Sinterapparat besteht aus zwei Elektroden 171, 172 zwischen denen eine Spannung angelegt wird, um das Magnetpulver zu erhitzen, während es gleichzeitig durch den Stempel 171, 172 gepresst wird. Dabei besteht die Form aus einer inneren nichtleitfähigen 122 und einer äußeren leitfähigen Matrize 121, sodass kein Strom durch das Magnetpulver fließt, sondern es nur durch Wärme erhitzt wird und nicht plasmagesintert wird. Dadurch wird die Bildung von groben Partikeln verhindert, was die magnetischen Eigenschaften verbessert.

*Abbildung 5: Fig. 2 von **WO 2022 209 466 A1**: Zeigt die Temperatur über die Zeit, wobei T1 die erste Sintertemperatur ist, T2 die zweite Sintertemperatur und T0 die Kühlungstemperatur ist.*



Im Schritt 6 in Abbildung 3 im Ablauf des Sinterverfahrens wird die Probe geschnitten, zum Beispiel werden mit einer Drahtsäge dünne Magnete aus einem Block geschnitten. Dabei geht viel Material verloren. Um den Verbrauch schwerer Seltener Erden zu reduzieren, produziert man idealerweise gar keinen Abfall beim Schneiden.

In **WO 2022 / 163 407 A1** wird in einem pressfreien Prozess wie in Abbildung 7 dargestellt eine Pulverform mit mehreren Trennplatten 3 in Partitionen 5 aufgeteilt. Das in die Teilbereiche 5 eingefüllte Legierungspulver wird in einem gepulsten Magnetfeld parallel zur Hauptoberfläche magnetisiert und gesintert. Ohne zu schneiden, entstehen dünne NdFeB-Magnetplatten. Mehrere der Dünnplatten werden zusammenlaminiert, mithilfe eines Klebers oder eines Heißpressverfahrens. Es entsteht ein laminierter gesinterter Magnet mit hochresistiven Zwischenschichten. Zusätzlich kann an den Platten ein im nächsten Abschnitt erläutertes Korngrenzdiffusionsverfahren angewendet werden.

Benötigt man noch mehr Freiheit in der Form der Magnete, bietet sich eine additive Fertigungsmethode an, auch als 3D-Drucken bezeichnet. Die **DE 10 2022 130 939 A1** fertigt additiv Magnetschichten verschiedener zweckangepasster Form und Größe. Dabei können mithilfe von Laserschmelzmethoden beliebige Magnetmuster hergestellt werden, zum Beispiel mit Isolierbereichen, um Wirbelstromverluste zu verringern. Dazu wird eine Pulverschicht auf ein Substrat aufgetragen. Das Pulver wird mit einem Laser an ausgewählten Stellen gesintert. Schicht für Schicht bildet sich so eine NdFeB-Magnetschicht in gewünschter Dicke und Form.

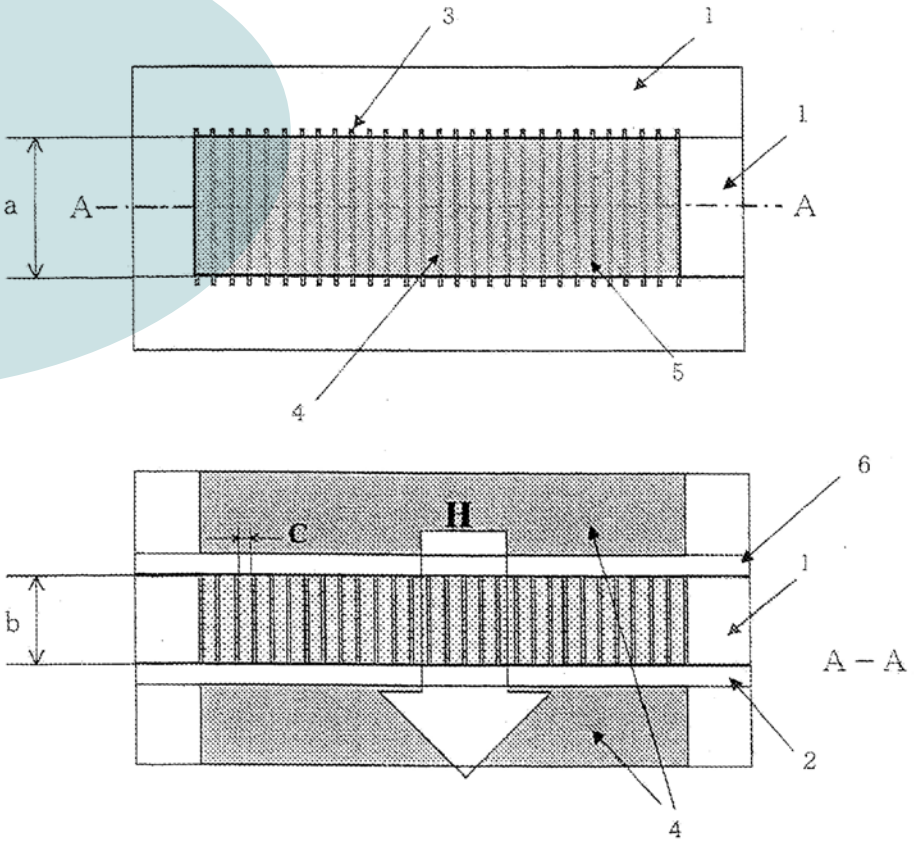


*Abbildung 7: Fig. 2 aus **WO 2022 163 407 A**: Zeigt die Pulverform 1, die mithilfe mehrerer Trennplatten 3 in Partitionen 5 aufgeteilt wird.*

Effizienter Einsatz kostbarer Rohstoffe – Weniger ist mehr

Schwere Seltene Erden – Gewürze für die Supermagneten

★★★

Für Anwendungen, beispielsweise in Motoren und Generatoren, besteht ein großer Bedarf an Magneten mit einem hohen magnetischen Energieprodukt (BH)max gepaart mit einer großen Koerzitivfeldstärke Hc. Dafür bedarf es dem wohldosierten Einsatz der schweren Seltenen Erden, wie edle Gewürze in der Sterneküche. Dabei gilt es, diese Kostbarkeiten gezielt einzusetzen.

Bereits Masato Sagawa hat herausgefunden, dass zur Erhöhung der Koerzitivfeldstärke die Zugabe von schweren Seltenen Erden wie Dysprosium (Dy) und Terbium (Tb) geeignet ist. Diese erhöhen insgesamt die Koerzitivfeldstärke des Permanentmagneten derart, dass dieser auch für Anwendung bei hohen Temperaturen einen ausreichenden Schutz gegen eine Entmagnetisierung aufweist. Mit dem Einsatz schwerer Seltener Erden gehen jedoch auch zwei Nachteile einher:

Zum einen nimmt die Remanenz (Anziehungskraft) des Supermagneten ab, zum anderen zählen schwere Seltene Erden zu den kritischen und somit auch teuren Rohstoffen.

Um diesen Nachteilen entgegenzutreten, werden verschiedene Wege beschritten, mit dem Ziel den Einsatz der schweren Seltenen Erden auf ein Minimum zu reduzieren. Besonders relevant für die Anwendung hat sich dabei die Technik der sogenannten Korngrenzdiffusion (englisch: Grain Boundary Diffusion) herausgestellt, die auch industriell bereits zum Einsatz kommt [2].

Dabei werden die schweren Seltenen Erden nicht homogen in der Verbindung verteilt, sondern befinden sich nur im Grenzbereich der Hauptphasenkörner und in der Korngrenzphase. Dazu werden schwere Seltene Erden auf die Oberfläche aufgebracht und dann einer Wärmebehandlung unterzogen, die eine Diffusion der schweren Seltenen Erden in den Magneten bewirkt. Global betrachtet führen die

Wie sind Supermagnete aufgebaut – Ein Blick durch das Mikroskop



Der Supermagnet besteht aus vielen einzelnen Körnern 12. Diese weisen die chemische Struktur Nd2Fe14B auf. Sie wird auch als Hauptphase bezeichnet. Die Körner werden von einer seltenerdreichen Phase, der sogenannten Korngrenzphase 14 umgeben. Die Korngrenzphase führt zu einer magnetischen Entkopplung der Hauptphasenkörner wodurch benachbarte Partikel sich magnetisch nicht wahrnehmen, sozusagen „blind“ sind und somit eine hohe Koerzitivfeldstärke erreicht wird.

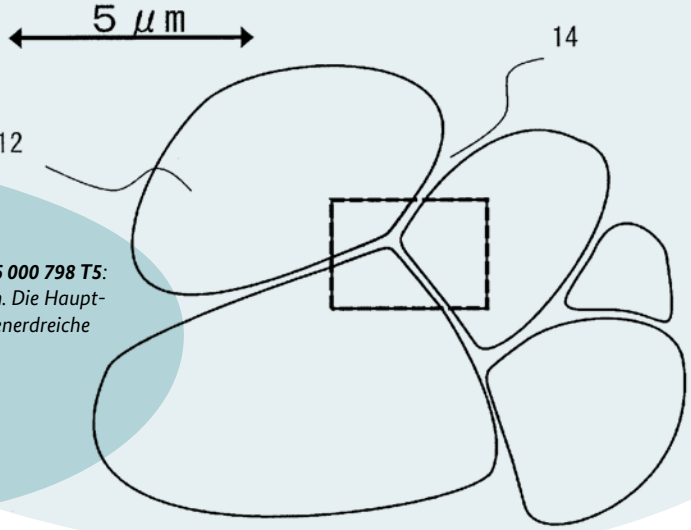


*Abbildung 1: Fig. 1A aus **DE 11 2016 000 798 T5**: Mikrostruktur eine NdFeB Magneten. Die Hauptphasenkörner 12 sind durch die seltenerdreiche Korngrenzphase 14 getrennt.*

Herstellverfahren zudem zu einer Anreicherung der schweren Seltenen Erden lediglich in den Randbereichen des Magneten, wodurch insgesamt die Menge an schweren Seltenen Erden reduziert werden kann.

Grundlegende Verfahren hierzu sind bereits seit längerem bekannt (beispielsweise **EP 1 643 513 A1** aus dem Jahr 2004). Die Verfahren verbessern sich jedoch stetig, was sich auch in aktuellen Erfindertätigkeiten widerspiegelt.

Dicke Magnete erfordern besondere Maßnahmen

Bei üblichen Verfahren zur Korngrenzdiffusion dringt das schwere Seltenerdmaterial nur in oberflächennahe Bereiche ein, weshalb die Verfahren nur für dünne Magnete geeignet sind (vgl. z.B. **CN 1 12 712 990 B** Absatz [0003]). Ein Aspekt befasst sich daher mit der Steigerung der Effizienz der Korngrenzdiffusion, wodurch auch die Dicke der Magnete gesteigert werden kann.

Ein Beispiel hierfür ist das Patent **CN 1 12 712 990 B**. Die Idee liegt darin, als Diffusionsmaterial ein Verbundmaterial aus einer schweren Seltenen Erde wie Dysprosium oder Terbium und einem Metall oder einer Legierung mit einer relativ niedrigen Schmelztemperatur zu verwenden. Beispiele für die Metalle sind Aluminium, Kupfer, Magnesium oder Zinn. Zur weiteren Verringerung des Schmelzpunkts werden auch Legierungen aus diesen Metallen in Kombination mit leichten Seltenen Erden wie Neodym oder Praseodym verwendet. Das Verbundmaterial weist dabei eine Kern-Schale-Struktur auf. Das bedeutet, dass der Kern beispielsweise aus einer der schweren Seltenen Erden gebildet ist und von einer Schale aus dem Metall umgeben ist oder eben auch umgekehrt, der Kern aus dem Metall und die Schale aus einer schweren Seltenen Erde gebildet wird.

Im nächsten Schritt wird das Verbundmaterial auf den Magneten aufgebracht, wie es in Abbildung 8 gezeigt ist, und erwärmt. Da das Metall bereits bei niedrigeren Temperaturen als die schwere Seltene Erde schmilzt und ebenso die Korngrenzphase bereits bei niedrigeren Temperaturen erweicht, kann die schwere Seltene Erde leichter und schneller in die Korngrenzphase und somit auch tiefer in den Magneten diffundieren. Wird anstelle eines Metalls eine eutektische Legierung mit besonders niedriger Schmelztemperatur aus einem Metall und einer leichten Seltenen Erde verwendet, kann der Diffusionsprozess weiter verbessert werden und zusätzlich die Mikrostruktur optimiert werden. In einem Beispiel zeigen die Erfinderinnen und Erfinder durch das Verfahren eine Verdopplung der Koerzitivfeldstärke auf knapp 2000 kA/m. Insgesamt ermöglicht die im Patent gezeigte Erfindung also die Erhöhung der Koerzitivfeldstärke auch für dickere Magnete bei reduziertem Einsatz an kritischen schweren Seltenen Erden.

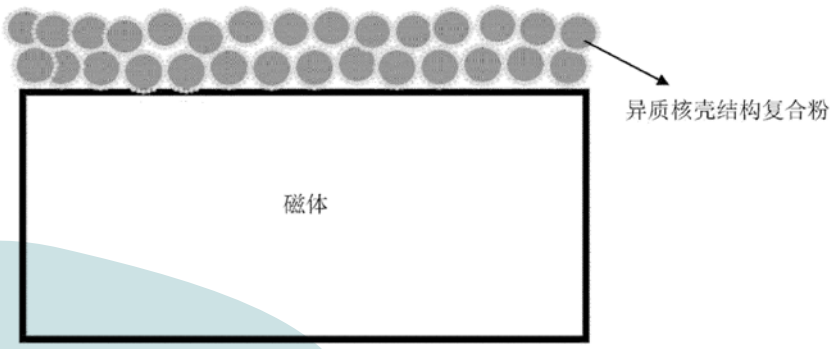


*Abbildung 8: Fig. 2 aus **CN 1 12 712 990 B**: Verbundpartikel mit einer Kern-Schale-Struktur (oben) aus einer schweren Seltenen Erde und einem Metall oder einer Legierung mit einem relativ niedrigen Schmelzpunkt auf einen Magneten (unten) aufgebracht.*

Zusätzlicher Druck auf den Magnetkörper

Ein weiterer Ansatz zur Anwendung der Korngrenzdiffusion auch für dickere Magnete ist in dem Patent **US 11 830 645 B2** gezeigt. In den gängigen Verfahren wird die schwere Seltene Erde auf die Außenflächen des gesinterten Neodym-Eisen-Bor-Magneten aufgebracht. Eine Diffusion der schweren Seltenen Erden bis in die Mitte eines dicken Magneten ist so nicht möglich. Das Patent verfolgt daher einen anderen Weg. Dabei werden bereits im Herstellungsprozess vor dem Sintern des Magneten an mehreren Stellen konzentrierte Bereiche mit schweren Seltenen Erden eingebracht. Hierzu wird das in Schritt 3 erhaltene feine Magnetpulver abwechselnd mit einem Pulver mit schweren Seltenen Erden in eine Form gefüllt und verpresst, wie in Schritt 4 zur Herstellung der Magneten beschrieben, wodurch sich eine Schichtstruktur ergibt, wie sie in Abbildung 9 oben gezeigt ist.

Diese Aufteilung in Bereiche ist auch nach dem Sinterprozess vorhanden. Dabei dienen die Bereiche mit einem hohen Gehalt an schweren Seltenen Erden im Anschluss als Quelle für die Korngrenzdiffusion. Hier ist es entscheidend, die Diffusion während des Sinterns bei Temperaturen um 1000 °C zwischen den Bereichen möglichst gering zu halten. Daher werden im Patent Sinterverfahren verwendet, die zusätzlich einen Druck auf den Magnetkörper ausüben, wodurch der Sinterprozess von einigen Stunden auf etwa fünf bis zehn Minuten verkürzt wird und somit auch die Diffusion zwischen den Bereichen unterbunden wird. Im Anschluss an das Sintern findet die Korngrenzdiffusion im Rahmen einer Wärmebehandlung statt. Diese wird bei Temperaturen unterhalb von 1000 °C für mehrere Stunden durchgeführt. Im Ergebnis lässt sich somit ein dickerer Magnet mit verbesserter Koerzitivfeldstärke bei einer geringen Zugabe von schweren Seltenen Erden von weniger als 0,5 Gewichtsprozent herstellen.

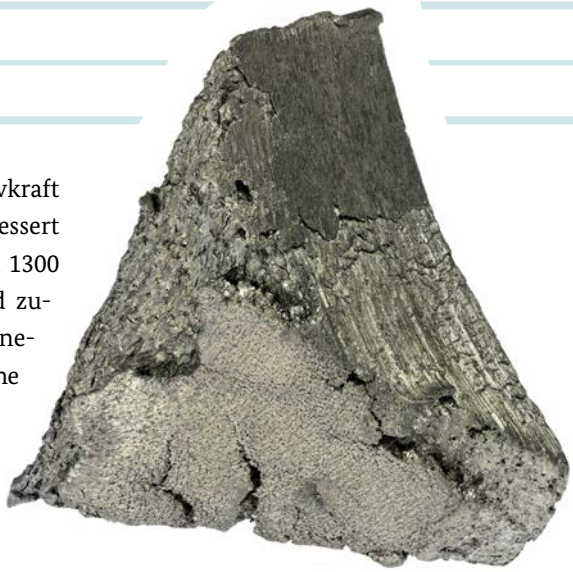
Die Struktur optimieren –
Kleine Dinge zeigen große Wirkung

Ein weiterer Ansatz zur Effizienzsteigerung der Korngrenzdiffusion ist in Patent **US 11 657 960 B2** gezeigt. Dieses beschreibt, dass die Diffusion effektiver wird, wenn die Dicke der Korngrenzphase an den Durchmesser der Hauptphasenkörner angepasst wird. Dabei wird ein Verhältnis von etwa 0,01 als günstig für die Diffusion bezeichnet. Für Hauptphasenkörner mit einem typischen Durchmesser von beispielsweise 6 µm bedeutet dies eine Dicke der Korngrenzphase von etwa 60 nm.

Zusätzlich zu der Dicke der Korngrenzphase ist auch deren Zusammensetzung von Bedeutung. Die Korngrenzphase besteht dabei nicht nur aus einer einzelnen chemischen Verbindung, sondern stellt eine Mischung aus verschiedenen Verbindungen dar. Deren Menge und Art hängt dabei



*Abbildung 9: Fig.2 und 3 aus **US 11 830 645 B2**: Magnete (1) zeigen Bereiche aus Neodym-Eisen-Bor Magnetmaterial (2) und Bereiche mit einer hohen Konzentration an schweren Seltenen Erden (3).*



wesentlich von der Zusammensetzung des Magneten ab. Dabei werden dem Magneten eine Vielzahl von Elementen zur Verbesserung der magnetischen Eigenschaften und zur Verbesserung der Prozessierbarkeit im Herstellungsprozess zugegeben. Hierbei handelt es sich häufig um die Elemente Aluminium, Kupfer, Cobalt, Gallium und Zirkon. Auch wenn diese nur in geringen Mengen enthalten sind, haben sie einen großen Einfluss auf die Verbindungen, die in der Korngrenzphase gebildet werden. Das obige Patent beschreibt dabei Mengen der einzelnen Elemente und Verhältnisse von Elementen zueinander im Magneten, die die Zusammensetzung der Korngrenzphase derart beeinflussen, dass die Diffusion von schweren Seltenen Erden effizient durchgeführt werden kann. Durch die derart verbesserte Mikrostruktur und Zusammensetzung des Magneten kann bereits durch das Aufbringen und Diffundieren von weniger als 1 Gewichtsprozent an schweren Seltenen Erden die Koerzitivkraft des Magneten signifikant verbessert werden, beispielsweise von etwa 1300 kA/m auf über 2100 kA/m, und zugleich eine hohe remanente Magnetisierung erreicht werden [siehe Seite 26].

Schwere Seltene Erden nur da, wo es darauf ankommt

Die Koerzitivkraft ist ein Maß für den Widerstand des Magneten gegen eine Ummagnetisierung durch ein äußeres entgegengesetztes Magnetfeld. Abhängig von der Anwendung ist nicht der gesamte Magnet solch einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, sondern nur bestimmte Bereiche. Daher betrifft ein weiterer Aspekt lediglich die lokale Erhöhung der Koerzitivfeldstärke des Magneten, wie es in **CN 1 13 808 839 B** gezeigt ist. Ein besonderes Augenmerk wird hier auf die Kanten des Magnets gelegt, da der Prozess der Ummagnetisierung von dort startet.

Die Idee des Patents liegt darin, die Korngrenzdiffusion mit schweren Seltenen Erden selektiv in den Kantenbereichen durchzuführen und im Zentrum der Magnetoberflächen das kritische Material auszusparen, wie in Abbildung 10 gezeigt ist. Dadurch wird die Koerzitivfeldstärke im Bereich der Kanten stark erhöht. Zugleich wird der Bedarf an schweren Seltenen Erden weiter reduziert, da die Beschichtung nicht homogen über den gesamten Magneten erfolgt, sondern nur dort wo die „magnetische Härtung“ notwendig und sinnvoll ist. So beschreiben die Erfinderinnen und Erfinder eine Steigerung der Koerzitivfeldstärke mit dem Verfahren um etwa 50 % von 1182 kA/m auf 1778 kA/m.

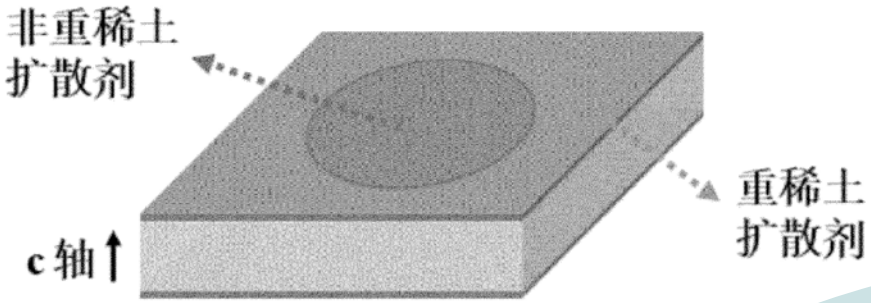


*Abbildung 10: Fig.1 aus **CN 1 13 808 839 B**: Der Magnet (hellgrau) wird selektiv im Bereich der Kanten mit einem schwere Seltene Erden enthaltenden Diffusionsmaterial bedeckt (mittelgrau), das im zentralen Bereich (dunkelgrau) ausgespart ist.*

Am besten ganz auf schwere Seltene Erden verzichten

Einen Schritt weiter geht **DE 10 2020 128 949 B4** das auf den vollständigen Verzicht von schweren Seltenen Erden abzielt. Dabei werden die kritischen schweren Seltenen Erden Dy und Tb durch die kostengünstigeren und unkritischeren leichten Seltenen Erden Cer (Ce) und Lanthan (La) ersetzt. Die Idee dabei liegt darin, dass durch den Austausch der Materialien das Diffusionsverfahren bei niedrigeren Temperaturen ablaufen kann, wodurch ein Kornwachstum der Hauptphasenkörner unterbunden wird. Dabei wirken sich kleine Hauptphasenkörner vorteilhaft auf die Koerzitivfeldstärke aus, wie oben bereits beschrieben. Zudem dringt bei den geringeren Temperaturen das Diffusionsmaterial nicht in die Hauptphasenkörner ein und beeinflusst somit die magnetischen Eigenschaften der Hauptphasenkörner nicht negativ. Vielmehr erfolgt eine Optimierung der Korngrenzphase, was in Summe zu einer Verbesserung der magnetischen Eigenschaften führt.

Konkret beschreibt das Patent das Herstellen eines Magnetpulvers auf der Basis von Neodym, Eisen und Bor mit eingelagertem Wasserstoff und eines Diffusionspulvers auf der Basis von Neodym oder Praseodym, Cer oder Lanthan und Eisen mit eingelagertem Wasserstoff. Die beiden Pulver werden gemischt und einer Diffusionsbehandlung bei 400 °C bis 700 °C unterzogen und anschließend wird der eingelagerte Wasserstoff entfernt. Das Verfahren ermöglicht die Steigerung der Koerzitivfeldstärke um etwa 40 % von 1000 kA/m auf etwa 1400 kA/m [siehe Seite 26]. Das mit diesem Verfahren erhaltene Magnetpulver mit verbesserten Eigenschaften kann in weiteren Verfahren zu einem Magneten verarbeitet werden.

Ein weiterer Ansatz zum Ersetzen von kritischen Rohstoffen in den Supermagneten wird in der **DE 10 2019 129 812 A1** gezeigt. Hierbei wird zusätzlich zu den schweren Seltenen Erden Dy und Tb auch auf Gallium (Ga) verzichtet. Dabei ist das ebenfalls kritische und teure





Gallium ein Element, das sich in der Korngrenzphase (siehe Abbildung 1 zum Aufbau von Supermagneten in der Grafik) anreichert und zusammen mit den vorhandenen leichten Seltenen Erden und Eisen eine Verbindung eingeht. Diese bewirkt eine Entkopplung der Hauptphasenkörner. Das bedeutet, dass sich die magnetischen Felder benachbarter Hauptphasenkörner nicht gegenseitig beeinflussen, wodurch die Koerzitivfeldstärke des Magneten insgesamt steigt. Die Idee der Anmeldung liegt darin, die Korngrenzphase zu modifizieren, indem teures und kritisches Gallium durch kostengünstigeres Aluminium ersetzt wird. Dabei kommt es auf die Dosierung an. Wird Aluminium in der geeigneten Menge zugegeben, erfüllt es die gleiche Funktion wie Gallium. Es bildet zusammen mit leichten Seltenen Erden und Eisen ebenso eine Verbindung, die eine magnetische Kopplung zwischen den Hauptphasenkörnern unterdrückt. Auch ohne schwere Seltene Erden lassen sich mit diesem Verfahren Magnete mit einer Koerzitivfeldstärke von mehr als 1700 kA/m herstellen [siehe Seite 26].



Zusammenfassung: Schwere Seltene Erden wie ein edles Gewürz einsetzen

Permanentmagnete auf Basis der Seltenen Erden sind wahre Supermagnete, denen in der Energieerzeugung und Mobilität im Zuge der Energiewende eine große Bedeutung zukommt. Dabei werden kritische und knappe Ressourcen wie schwere Seltene Erden für die Herstellung der Magnete benötigt. Die aufgeführten Beispiele zeigen vielfältige Ansätze, den Einsatz kritischer Rohstoffe effizient zu gestalten und dabei die magnetischen Eigenschaften weiter zu verbessern. Hierzu werden einerseits schwere Seltene Erden möglichst gezielt eingesetzt und andererseits die Struktur und Zusammensetzung der Korngrenzphase optimiert. Die Erfinderinnen und Erfinder agieren dabei wie Spitzenköche, die die Seltenen Erden als edles Gewürz einsetzen und dabei auf einen ausgewogenen Geschmack achten. Für eine weitere Verbesserung der magnetischen Eigenschaften werden diese Strategien auch kombiniert und führen zusammen mit den Verbesserungen in der Verfahrenstechnik und den neuen Möglichkeiten zur Formgebung, beispielsweise mittels additiver Herstellungsverfahren, zu einem kontinuierlichen Fortschritt auf dem Gebiet der Supermagnete.

Was kommt noch?

Mit dem steigenden Bedarf an Supermagneten, beispielsweise für die E-Mobilität und Windkraftanlagen, gewinnen Recyclingstrategien an Bedeutung, um die teuren und knappen Seltenen Erden nach dem Ende des Produktzyklus nicht zu verlieren. Die Aktivitäten hierzu sind vielfältig und verfolgen unterschiedliche Strategien. Beispielsweise befasst sich die **DE 10 2018 221 845 A1** mit der Separation der Magnete aus den Anwendungen. Hierzu werden die elektrischen Komponenten fein zerkleinert und anschließend hartmagnetische Anteile separiert, die wieder als Rohstoffe dem Magnetherstellungsverfahren zugeführt werden können.

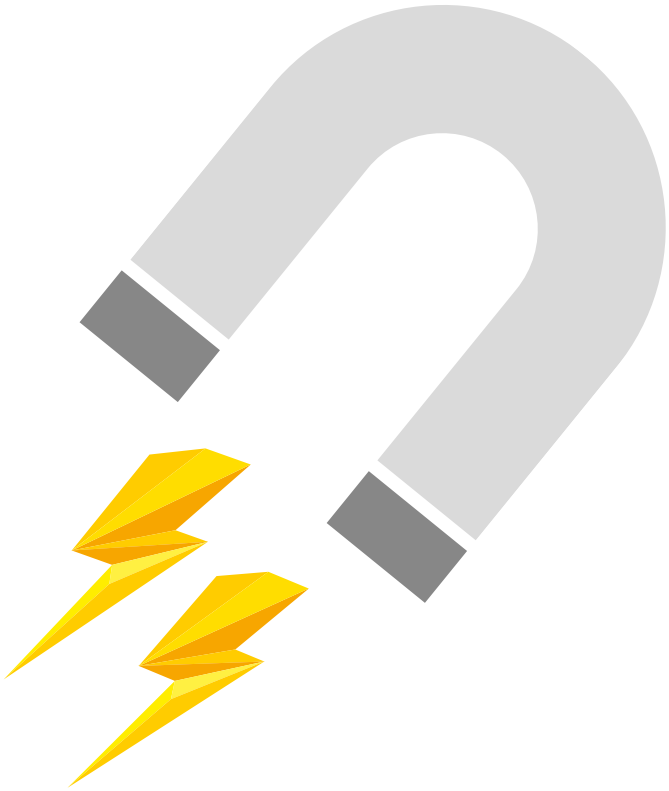
Einen Schritt weiter geht die **WO 2018 037 241 A1**, die neben der Gewinnung der Sekundären Rohstoffe auch die Weiterverarbeitung zu einem Recycling-Magneten zeigt. Den Einsatz von Ressourcen reduzieren und zudem das Recycling voranbringen – es gibt vielfältige Ansätze.



Dr. Jana Becherer

studierte Physik an der Technischen Universität Dresden und promovierte am Institut für Angewandte Photophysik IAPP. Sie arbeitete mehrere Jahre bei der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA in Noordwijk. Seit 2016 prüft Dr. Becherer im DPMA Patentanmeldungen zu Magneten und magnetischen Bauelementen.







Dr. Michael Krispin

studierte Physik an der Universität Augsburg. Nach der Promotion arbeitete er in der industriellen Forschung an der Substitution und dem Recycling von kritischen Materialien unter anderem in seltenerdbasierten Permanentmagneten. Seit Ende 2019 prüft Dr. Krispin im DPMA Patentanmeldungen im Bereich Magnetmaterialien und elektrische Bauelemente.

Blitz und Donner –

Dr. Florian Stark

Mit der Familie schnell vom Freibad nach Hause. Montage- und Bauarbeiten unterbrechen. Das entscheidende Fußballbundesligaspiel verschieben. Wenn ein Gewitter droht, gilt es Menschen zu schützen. Doch Blitz und Donner vorherzusagen, ist mittels Wettermodellen sehr schwierig. Die meisten Warnsysteme setzen auf das Messen von elektrostatischen und/oder elektromagnetischen Feldern in der Atmosphäre. Auch eine Gewitterdetektion mittels Satelliten ist mittlerweile möglich. Der Trend geht zur Kombination von mehreren Systemen. Das Ziel: präzisere Vorhersagen. Eine wichtige Rolle können dabei Windparks als Datensammler spielen.

#Gewitter
#Blitz
#Schutz
#Gewitterwarnung
#Meteorologie
#Wetter
#Gewitterdetektion
#ElektrischeFelder
#Satelliten
#Windkraft
#Windpark
#ErneuerbareEnergien

dem Gewitter auf der Spur



Zusammenfassung

Gewitterzellen können relativ schnell und lokal begrenzt entstehen, weshalb eine Vorhersage mittels Wettermodellen oft sehr schwierig ist. Die meisten Gewitterwarnsysteme setzten deshalb vor allem auf das Messen elektrostatischer und elektromagnetischer Felder in der Atmosphäre. Je nach Bedarf können Einzeldetektoren, die stationär oder mobil verwendet werden, oder ganze Netzwerke aus Sensoren eingesetzt werden, um rechtzeitig vor einer Gewittergefahr zu warnen beziehungsweise zu entwarnen. Obwohl auch eine Gewitterdetektion mittels Satelliten inzwischen möglich ist, bleibt insbesondere die lokale Auflösung immer noch ein limitierender Faktor. Der Trend geht zur Kombination von mehreren Systemen, um die individuellen Schwächen der jeweiligen Systeme auszuhebeln, womit präzisere Vorhersagen und Warnungen möglich sind.

Und nun zur Gewitterneigung . . .

Die Erforschung und Detektion von Gewittern und deren Blitzentladungen sind faszinierende und wichtige Bereiche der Wetterbeobachtung. Neben den potenziell gefährlichen Auswirkungen von Starkregen, Hagel und Wind, die oft mit einem Gewitter einhergehen, bergen vor allem Blitzentladungen, die zwischen Gewitterwolke und Boden auftreten, ein großes Schadenspotential, das sich allein in Deutschland auf jährlich mehrere hundert Millionen Euro beziffert [1]. Dabei können sie unter anderem Wald- und Hausbrände auslösen, elektronische Komponenten und Geräte beschädigen oder Kommunikationssysteme durch elektromagnetische Störungen beeinträchtigen. Auch werden immer wieder Menschen und Tiere durch Blitzschläge schwer verletzt oder sogar getötet, weshalb bei drohender Gewittergefahr beispielsweise Sportveranstaltungen, der Freibadbesuch, Montage- und Bauarbeiten zumindest für einen gewissen Zeitraum unterbrochen werden müssen. Eine rechtzeitige Warnung vor einer Blitzgefahr ist deshalb enorm wichtig. Meteorologen können grundsätzlich zwar beobachten, wie sich in einem Gebiet instabile Bedingungen entwickeln, die die Entstehung eines Gewitters begünstigen, eine genaue Vorhersage von Ort und Zeitpunkt eines Gewitters bleibt schwierig und unzuverlässig. Da sie von vielen verschiedenen Faktoren, wie etwa der Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit abhängen, die sich schnell ändern können und auch nicht überall gleich gut bestimmbar sind. Deshalb sprechen Wetterdienste oft auch von einer Gewitterneigung.

Um insbesondere die lokale Gewittergefahr für ein Gebiet besser abschätzen zu können und um Blitze genauer zu orten, wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Verfahren und Vorrichtungen entwickelt, wobei bekannte Systeme verbessert oder auch neue Wege eingeschlagen wurden.

Die Gewitterwolken – Wolken unter Spannung

Um die Funktionsweise der später beschriebenen Systeme besser verstehen zu können, wird hier kurz auf die Entstehung und die elektrischen Eigenschaften von Gewitterwolken eingegangen.

Blitze entstehen durch geladene Wolken – die Gewitterwolken. Gewitterwolken sind meist hoch auftürmende, ambossförmige Wolken, die zur Gattung der Cumulus-Nimbus-Wolken gehören und deren Oberseite immer unter dem Gefrierpunkt liegt. Grundsätzlich kann man **drei Gewitterarten**

unterscheiden. Das **Luftmassengewitter**, das man auch als typisches Sommer- oder Wärmegewitter kennt, entsteht durch eine erdnahe, warmfeuchte Luftschicht in Kombination mit einer starken Sonneneinstrahlung, wobei eine ausgeprägte Konvektion der Luftmassen einsetzt.

Gewitter können auch entstehen, wenn sich die Luftmassen einer Kaltfront wie ein Keil unter die Luftmassen einer Warmfront schieben und diese warmfeuchte Luft dadurch anheben. Solche Gewitter nennt man **Frontgewitter** und sie erstrecken sich oft in große Höhen, weshalb sich hier die Blitze meist innerhalb der Wolke (IC-Blitze) oder von Wolke zu Wolke (CC-Blitze) erstrecken und sich selten zwischen Wolke und Boden (CG-Blitze) entladen. Auf ähnliche Weise entstehen die sogenannten **orografischen Gewitter**. Dabei treffen die Luftmassen auf ein geographisches Hindernis, wie zum Beispiel eine Gebirgskette, und werden dadurch in die Höhe befördert, wo sich unter bestimmten Umständen ebenfalls ein Gewitter einstellen kann, das oft von heftigen Regenschauern begleitet wird [2]. In allen drei Fällen kühlen die aufsteigenden Luftpakete ab, bis der Taupunkt erreicht ist. Durch die Kondensation der Luftfeuchtigkeit entstehen zum einen die Wolken und zum anderen wird sogenannte latente Wärme frei, die für einen weiteren Auftrieb der Luftpakete sorgt. Wie nun eine Wolke ihre Ladung enthält, ist noch nicht gänzlich geklärt. Vermutlich ist eine Kombination aus Reibungselektrizität, die durch das ständige Aneinanderstoßen von Eispartikeln und Regentropfen untereinander und das schlagartige Gefrieren von unterkühlten Wassertröpfchen im Bereich zwischen -15°C und -20°C zu Graupel oder Eiskristallen führt, entscheidend für die notwendige Ladungstrennung [2].

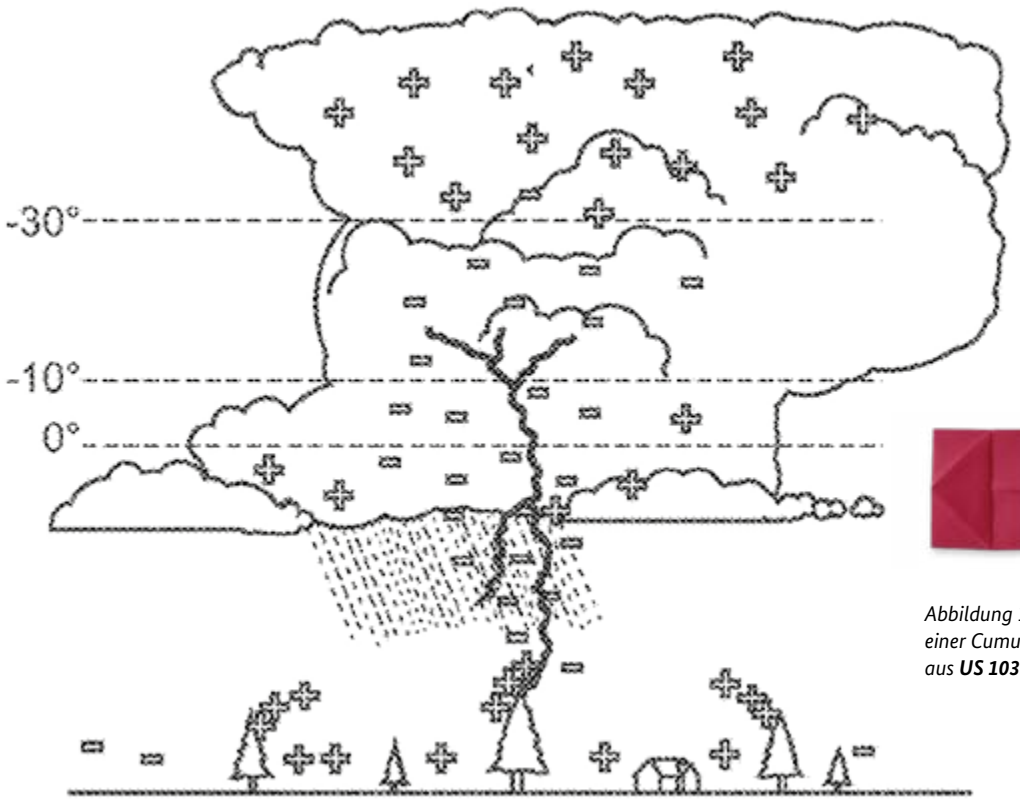


*Abbildung 1: Typische Ladungsverteilung in einer Cumulus-Nimbus-Wolke, entnommen aus **US 10302815 B1**.*



Wie in Abbildung 1 dargestellt, verteilt sich die Ladung in einer Gewitterwolke im Wesentlichen derart, dass im unteren Bereich der Wolke ein Überschuss an negativen Ladungen und im oberen Bereich der Wolke ein Überschuss an positiven Ladungen anzutreffen ist. Das liegt daran, dass die positiv geladenen Eispartikel leichter sind und deshalb bevorzugt durch die starken Aufwinde in einer Gewitterwolke nach oben transportiert werden.

Zwischen dem unteren negativ geladenen Bereich der Wolke und der Erdoberfläche wird ein elektrisches Feld aufgebaut, das messbar ist und am Boden mit Abstand zum Gewitterzentrum schwächer wird. Die Ladungen können durch Blitze teilweise ausgeglichen werden, wobei die meisten Blitze innerhalb der Gewitterwolke (IC-Blitze) auftreten. Die Blitze, die für uns am gefährlichsten sind, werden durch Entladungen zwischen Wolke und Boden verursacht – sogenannten Wolke-Erde-Blitze (CG-Blitze). Grundsätzlich ist auch eine Entladung zwischen dem oberen, positiven Teil der Wolke und dem Boden möglich, wenn sich durch Höhenwinde die obere Wolkenschicht horizontal zur negativen Schicht verschiebt.



Arbeit mit Einzelsystemen



Gewitterdetektionssysteme können sowohl aus einem einzelnen Messgerät oder auch aus einem Netzwerk von mehreren Messgeräten bestehen. Im Folgenden werden die Funktionsweisen von Messgeräten und Gewitterwarnsystemen näher beleuchtet, die insbesondere als Einzelsystem ausgelegt sind. Um rechtzeitig vor einem Gewitter zu warnen oder auch die Blitzaktivität in der Atmosphäre zu überwachen, werden verschiedene physikalische Effekte ausgenutzt, die mit einem Gewitter zusammenhängen.

Messen von elektrostatischen Feldern

Wie oben beschrieben, führt die Ladungsverteilung in Gewitterwolken zu einem signifikant stärkeren elektrostatischen Feld auf der Erdoberfläche, als es bei einem normalen Wetter der Fall wäre. Jedoch kommt es bereits in der Entstehungsphase von Gewittern zu messbaren Veränderungen des elektrischen Feldes in der Umgebung.





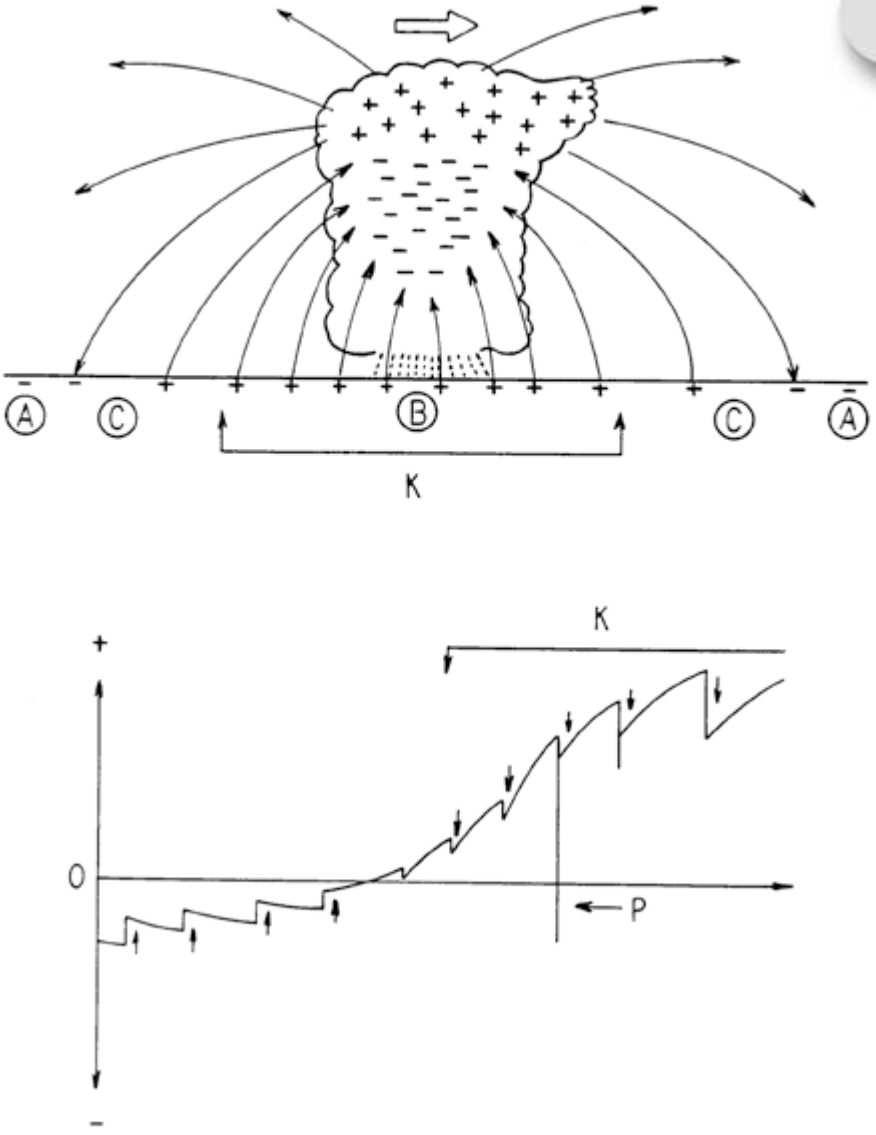


Abbildung 2: Die obere Abbildung stellt ein vereinfachtes Modell einer Gewitterwolke und dem zugehörigen elektrischen Feld dar, das sich zwischen Boden und Wolke aufbaut. Die untere Abbildung zeigt die zeitliche Änderung der Polarität und der Stärke des elektrischen Oberflächenfeldes, aufgezeichnet an der Stelle A aus der oberen Abbildung, wenn sich die Gewitterwolke in der durch den Pfeil dargestellten Richtung bewegt. Die Pfeile kennzeichnen Blitzentladungen, wobei P eine sehr starke Entladung markiert ***(DE 4 113 935 A1)****.*

Das elektrische Feld in der Nähe der Erdoberfläche beträgt bei Abwesenheit eines Gewitters typischerweise um die 100 V/m. Zieht eine Gewitterfront heran oder bildet sich in der Umgebung eine elektrisch geladene Cumulus-Nimbus-Wolke, dann steigt die Feldstärke auf Werte von über 1000 V/m und kann direkt unter einer Gewitterzelle sogar Werte von bis zu ±30.000 V/m erreichen. Oftmals wechselt das elektrische Feld bei der Entstehung seine Polarität und zeigt dabei in die entgegengesetzte Richtung. Die Parameter der Feldstärke und Polarität werden dann herangezogen, um beim Überschreiten eines Grenzwerts eine Gewitterwarnung auszulösen, bevor überhaupt ein erster Blitzschlag auftritt [3].

In der **DE 4 113 935 A1** (siehe Abbildung 2) wird gezeigt, wie sich ein elektrisches Oberflächenfeld mit der Entfernung zu einer Gewitterwolke ändert. In der oberen Abbildung wird ein vereinfachtes Modell einer Gewitterwolke mit dem dazugehörigen elektrischen Oberflächenfeld gezeigt, wobei angenommen wird, dass der obere Teil einer Gewitterwolke überwiegend positiv und der untere Teil überwiegend negativ geladen ist. Während die Orte A jeweils ein Gebiet mit noch beziehungsweise wieder normalem Wetter beschreiben, liegt der Ort B direkt unter einer Gewitterwolke, wo das elektrische Oberflächenfeld nach oben gerichtet ist. An der Stelle C ändert das elektrische Oberflächenfeld seine Rich-

tung. Im unteren Teil der Abbildung 2 wird eine zeitliche Aufzeichnung des elektrischen Oberflächenfeldes dargestellt. Sie beginnt links am Ort A, bei gutem Wetter, und zeigt die Zunahme der elektrischen Feldstärke mit dem Herannahen einer Gewitterfront, die als Bereich K markiert ist. Die schwarzen Pfeile zeigen Störungen des kontinuierlichen Verlaufs des elektrischen Oberflächenfeldes. Es vermindert seinen Absolutwert immer dann, wenn Blitzentladungen (IC-Blitze und GC-Blitze) stattfinden. Eine besonders starke Entladung fand an der Stelle P statt, wo sich sogar kurzfristig durch die elektromagnetische Wirkung des Blitzschlages die Polarität des elektrischen Feldes an dieser Stelle änderte.

Diese lokalen elektrischen Felder und deren zeitliche Veränderungen werden oft mittels sogenannter elektrischer Feldmühlen (EFM) beziehungsweise Elektrofeldmeter bestimmt, die dann als Gewitterwarner fungieren. Die **US 2020/ 0 336 090 A1** (siehe Abbildung 3) zeigt den Aufbau einer elektrischen Feldmühle zur Messung und Bestimmung der elektrischen Feldstärke und deren Polarität in der umgebenden Atmosphäre. Die dort beschriebene Feldmühle zeigt eine geerdete Rotorabschirmplatte 1, die über die Elektrodenmessplatten 2 rotiert, wobei die Messplatten abwechselnd dem elektrischen Feld ausgesetzt und dann wiederum abgeschirmt werden. Dabei werden die Elektrodenmessplatten aufgrund der Influenz des anliegenden elektrischen Feldes abwechselnd aufgeladen beziehungsweise entladen. Dieser Wechsel erfolgt kontinuierlich mit Hilfe eines geerdeten Drehmotors 5. Das abgegriffene Signal der Sensorplatten 2 läuft über einen Verstärker 6 an einen Synchrongleichrichter 7, der an den Drehgeber 4 angeschlossen ist. Der Demodulator 8 extrahiert das Amplitudensignal und liefert die Messung des elektrischen Feldes an eine Anzeigevorrichtung 9. Dadurch kann die Richtung des elektrischen Feldes, also die Polarität der Spannung und die Stärke des elektrischen Feldes, bestimmt werden.

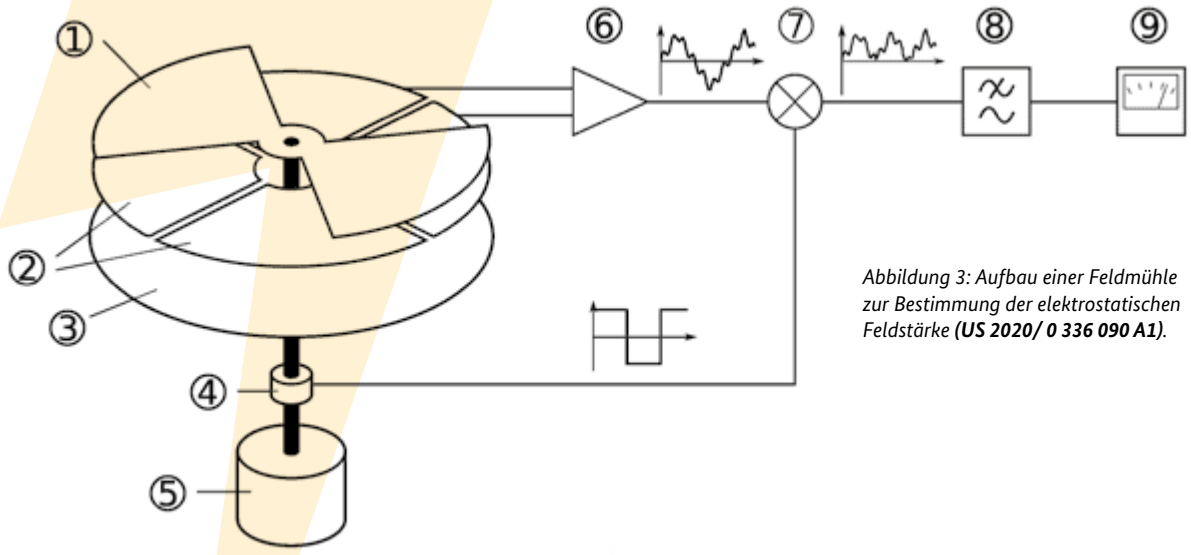


Abbildung 3: Aufbau einer Feldmühle zur Bestimmung der elektrostatischen Feldstärke ***(US 2020/ 0 336 090 A1)****.*

Feldmühlen werden häufig in der Nähe von Flughäfen, Funkübertragungsanlagen, Golfplätzen oder in bestimmten stationären Wetterstationen, die zur Warnung vor Gewittern ausgelegt sind, eingesetzt. Manchmal werden sie auch in Verbindung mit anderen Blitzmesssystemen verwendet, um beispielsweise die Ladungsverteilung und -bewegung in Gewitterwolken besser zu verstehen.

Feldmühlen, wie oben beschrieben, sind relativ groß und nicht für den mobilen Einsatz gedacht. Es gibt jedoch auch Anwendungsfälle, in denen ein portables System gewünscht ist, insbesondere dort, wo man keine ausreichende Mobilfunkabdeckung hat. Eine rechtzeitige Gewitterwarnung bei Outdooraktivitäten wie zum Beispiel Wandern, Fahrradfahren, Bergsteigen, Baden, Golfen oder Segeln benötigt kleine, tragbare Systeme, die in der Lage sind, bereits vor dem ersten Blitzschlag vor einem Gewitter und dessen Begleiterscheinungen wie Starkregen, Hagel und Sturm zu warnen, damit man sich rechtzeitig in Sicherheit bringen kann.

In der **DE 10 2012 222 973 A1** wird ein mikroelektromechanischer (MEMS) Sensor verwendet, um eine Blitzgefahr durch Messen des erdnahen atmosphärischen elektrischen Feldes abzuschätzen. Es ist gedacht, dass dieser kleine und sehr leichte Sensor in Gegenstände wie Armbanduhren, Mobiltelefone, Regenschirme oder Golfschläger integriert wird.

Der MEMS Sensor ist dabei so aufgebaut (siehe Abbildung 4), dass auf einem langestreckten Substrat eine erste Elektrode 10 und eine zweite Elektrode 20 übereinander positioniert sind. Die Elektroden sind kammartig ausgestaltet und bestehen jeweils aus mehreren Stegen 11, 21. Die Stege der Elektroden 10 und 20 können sich durch eine Antriebsanordnung 30 derart relativ zueinander bewegen, so dass es eine Stellung gibt, wo sich beide Elektroden überlappen. Bei der Überlappstellung weisen die Stege der zweiten Elektrode 20 ein definiertes Potential auf, um die Stege der ersten Elektroden gegenüber dem äußeren elektrischen Feld abzuschirmen.

Befinden sich die erste und zweite Elektrode nicht in der Überlappstellung, dann influenziert das elektrische Feld der Atmosphäre in der ersten Elektrode elektrische Ladungen, die von der Feldstärke und Polarität des gegenwärtigen elektrischen Feldes abhängen. Mit einer Antriebseinheit werden beide Elektroden mit einer bestimmten Frequenz derart zueinander bewegt, dass in Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz und der präsenten Stärke und Polarität des elektrischen Feldes ein entsprechendes Spannungssignal erzeugt wird. Der MEMS Sensor muss dabei selbstverständlich mit einem Material, wie zum Beispiel Glas oder niedrig dotiertes Silizium oder Polymer, eingehaust sein, damit statische elektrische Felder nicht abgeschirmt werden.

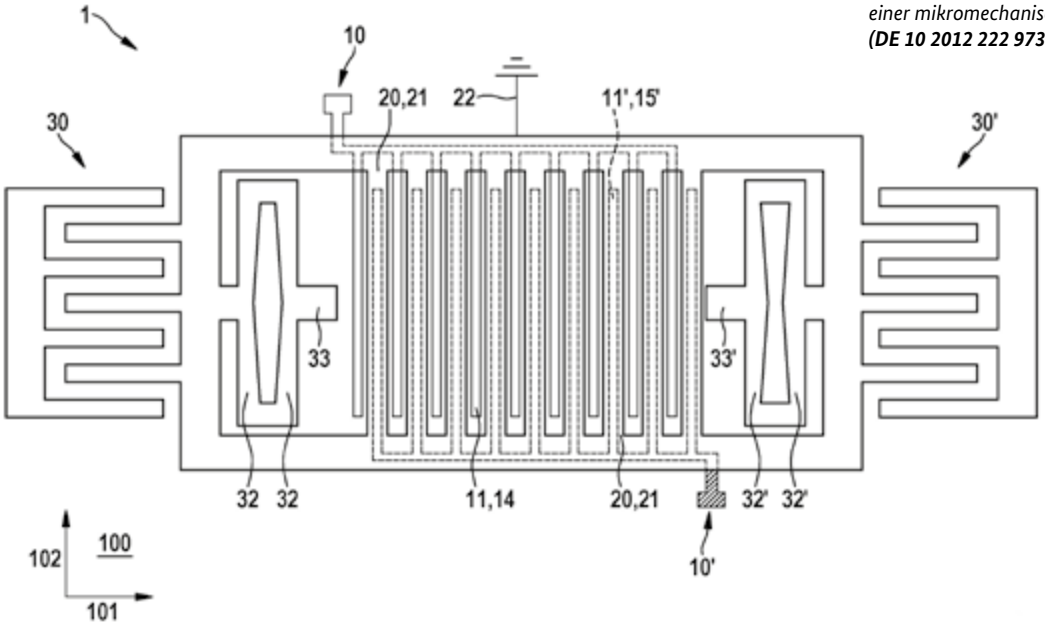


Abbildung 4: Schematische Draufsicht einer mikromechanischen Feldmühle ***(DE 10 2012 222 973 A1)****.*

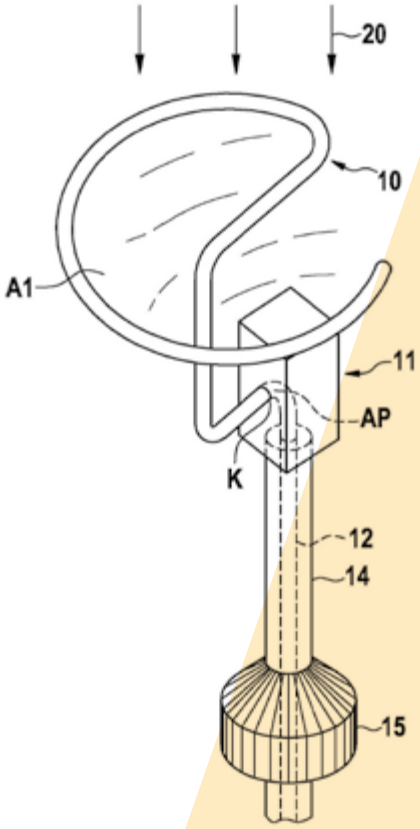
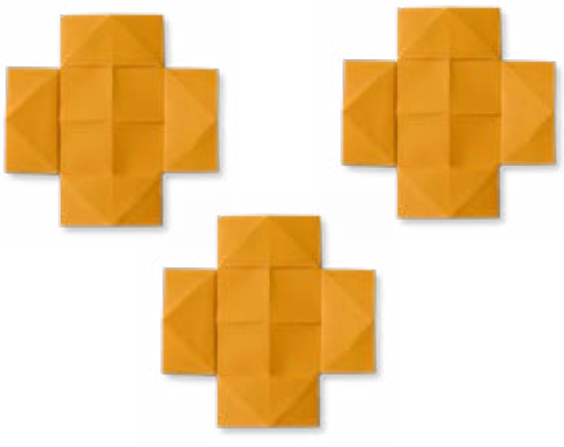


Abbildung 5: Vorrichtung zum Erfassen elektrostatischer Aufladungen in der Atmosphäre, wobei die kapazitive Sensorelektrode eine linienförmige Leitereinrichtung 10 umfasst, die eine ebene Fläche A1 aufspannt ***(DE 20 2023 100 459 U1).***



Eine weitere Möglichkeit, elektrostatische Aufladungen in der Atmosphäre zu erfassen, wird in der **DE 20 2023 100 459 U1** genannt. Statt das Prinzip einer Feldmühle zu verwenden, setzt das Gebrauchsmuster hier auf eine Vorrichtung mit einer kapazitiven Sensorelektrode, die einen linienförmigen Leiter aufweist (siehe Abbildung 5). Die linienförmige Leitereinrichtung (10) bildet dabei eine offene Fläche (A1), die im Wesentlichen senkrecht zum gegenwärtigen elektrischen Feld (20) der Atmosphäre aufgespannt ist. Dadurch bilden sich im elektrischen Feld Influenzladungen aus, die über eine Auswerteeinrichtung, die über eine elektrische Verbindungseinrichtung (12) verbunden ist, analysiert werden. Im Vergleich zu den üblichen elektrischen Feld- und Rotationsmühlen ist der Aufbau einfacher, ohne dass die Empfindlichkeit darunter leidet. Die Vorrichtung ist darüber hinaus wartungsfreundlicher, da weniger bewegliche Teile vorhanden sind, die verschleißen können. Außerdem minimiert die offene Fläche im Vergleich zu einer geschlossenen Sensorelektrodenplatte den Feuchtigkeitseinfluss durch Niederschlag (Regen, Nebel oder Schnee), weil die Fläche, die einen Niederschlag aufsammeln kann, wesentlich kleiner ist als bei geschlossenen Sensorelektrodenplatten. Dadurch gibt es trotz größerer aufgespannter Fläche weniger störende Einflüsse durch zum Beispiel negativ geladene Regentropfen, die an der Sensoroberfläche anhaften. Die hier beschriebene Technik funktioniert vor allem dann gut, wenn der Abstand der aufgespannten offenen Fläche zum Erdboden größer ist als der Radius der offenen Fläche.

Messen von elektromagnetischen Feldern

Während elektrostatische Felder insbesondere in lokal begrenzten Gebieten zur Bestimmung einer Gewitterneigung ausgenutzt werden, eignet sich vor allem die durch Blitzereignisse generierte elektromagnetische Strahlung zur Ortung von Gewittern. Die elektromagnetischen Emissionen werden dabei durch die enormen Stromstärken von mehreren 10.000 Ampere bis über 100.000 Ampere und wechselnde Stromrichtungen im Blitzkanal erzeugt. So kann ein Blitzschlag quasi als ein leistungsstarker Hochfrequenzsender aufgefasst werden. Diese Funkemissionen eines Blitzes haben ihre Energiespitzen im Bereich von 5 bis 6 kHz, wobei das Gesamtspektrum von einigen Hertz bis mehrere hundert MHz reicht. Blitzemissionen können manchmal auch in Empfangsgeräten wie einem Radio als kurze knackende Störgeräusche wahrgenommen werden.

Magnetische Richtungspeilung

Eine der ersten Anwendungen, die die elektromagnetischen Emissionen von Blitzen zur Ortung von Gewittern nutzt, ist die Magnetische Richtungspeilung (MDF – englisch magnetic direction finder) [4]. Dabei wird die elektromagnetische „Funk"-Strahlung von Blitzen mittels Antennen empfangen und mit diesen ein Gewitter angepeilt. Normalerweise wird ein Frequenzbereich um die 10 kHz (VLF – englisch very low frequency) verwendet, da diese Frequenzen einer geringeren Dämpfung unterliegen und sich über größere Entfernungen ausbreiten. Aufgrund der Einschränkungen, die durch die sehr große Wellenlänge bei solchen Frequenzen entstehen, sind die einzigen praktischen Peilantennen, die verwendet werden können, vertikale Schleifen, die normalerweise eine Fläche von einem Quadratmeter oder mehr haben. Üblicherweise werden zwei solcher Schleifen verwendet, die orthogonal angeordnet sind, sodass die horizontale Magnetfeldkomponente einer vertikal polarisierten Feldwelle unterschiedliche Spannungen erzeugt, die proportional zum Kosinus des Winkels der Wellenrichtung in Bezug auf die Ebene jeder Schleife sind. Die Division einer Spannung durch die andere ergibt dann den Tangens des Wellenrichtungswinkels in Bezug auf die Ebene einer der Schleifen.

In der Abbildung 6 der **DE 10 2004 000 025 B4** wird ein Antennenkörper gezeigt, der für die Messung niederfrequenter magnetischer Felder ausgelegt ist. Dieser weist dabei sogar drei orthogonal zueinander ausgerichtete kreisförmige Schleifenantennen in Form von Spulen auf, um sämtliche Raumkomponenten einer ankommenden Magnetfeldkomponente zu detektieren, wobei neben der Bestimmung des Azimutwinkels eines Blitzereignisses durch die dritte Antennenschleife auch dessen Elevationswinkel bestimmbar ist.

Eine einzelne Antenne, ob mit zwei oder drei Schleifenantennen, kann lediglich die Richtung, jedoch nicht die Entfernung beziehungsweise den genauen Ort eines Gewitters lokalisieren. Zur genauen Lokalisation eines Gewitters werden daher mindestens zwei solcher Antennenkörper beziehungsweise ein ganzes Netzwerk benötigt.

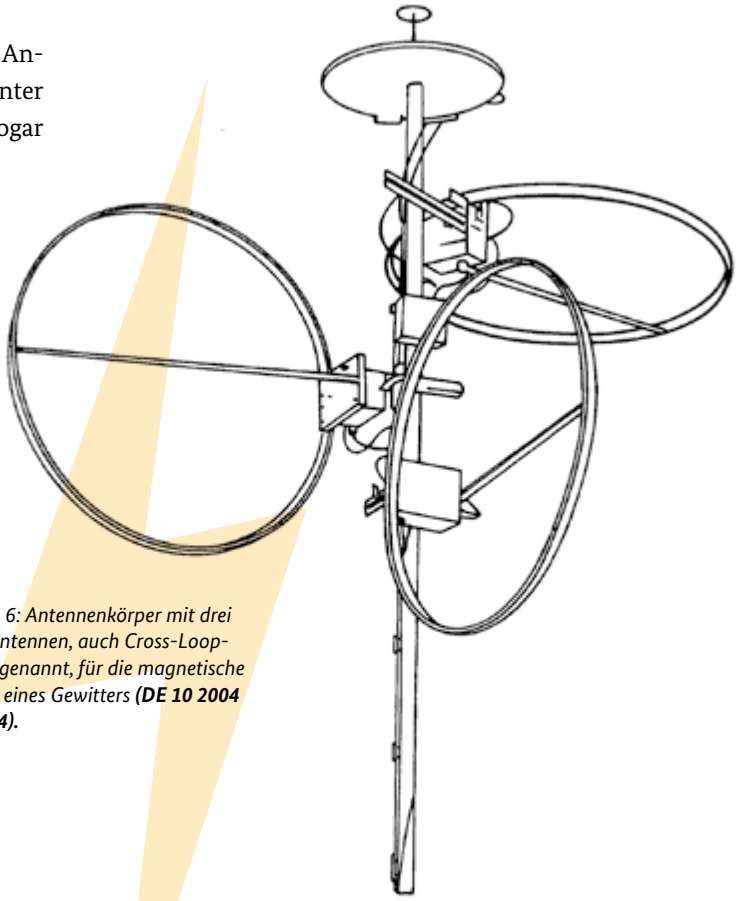


Abbildung 6: Antennenkörper mit drei Schleifenantennen, auch Cross-Loop-Antennen genannt, für die magnetische Anpeilung eines Gewitters ***(DE 10 2004 000 025 B4).***

Interferometrische Blitzdetektion

Ein mittlerweile weitverbreitetes Verfahren zur Blitzdetektion beruht auf der Interferometrie. Dabei handelt es sich um ein Messverfahren, bei dem die Phasendifferenz einer kohärenten elektromagnetischen Welle (das sind Wellen, die einen gemeinsamen Verlauf folgen und normalerweise den gleichen Ursprung haben, wobei deren Phasenverschiebung über die ganze Zeit konstant bleibt) genutzt wird. Die Phase wird dann von mindestens zwei Detektoren (Antennenmodule) an zwei unterschiedlichen Punkten gemessen. Durch die Bestimmung der Phasendifferenz zwischen den beiden Antennenmodulen kann dann der Einfallswinkel der elektromagnetischen Strahlung berechnet werden. Der Einsatz der Interferometrie erweist sich als besonders vorteilhaft, da auf Interferometrie basierende Detektionssysteme keine bestimmte Signalform erfordern und relativ problemlos mit verrauschten Signalen arbeiten [5].

Die **WO 2019/122763 A1** (siehe Abbildung 7) zeigt ein interferometrisches Detektionssystem 1, das aus einer Anordnung von fünf leitfähigen Elementen in Form von fünf Dipolen 2 besteht. Dieses Detektionssystem arbeitet bei sehr hohen Frequenzen, insbesondere zwischen 111 und 117 MHz. Der Abstand zwischen den Dipolen 2 ist jeweils gleich und wird so gewählt, dass er kleiner ist als eine halbe Wellenlänge der zu empfangenen Frequenzen, was für das hier beschriebene System einen Abstand von weniger als 1,3 Meter bedeutet. Dabei werden die Dipolantennen 2 von einem zentralen Teil 4, das sich auf einem Masten 3 befindet, in ihrer Position gehalten. Als Dipol wird hier ein dipolares Antennenmodul verstanden, das ein Empfangselement 2 beschreibt, das aus zwei Metallstäben besteht, die im Bereich 2m, wo die beiden Metallstäbe zusammentreffen, mit Strom versorgt wird. Im zentralen Teil 4 kann noch ein weiterer Sensor untergebracht sein, der niederfrequente elektromagnetische Blitzimpulse empfangen kann.

Auch werden solche Systeme mit einem GPS (englisch: Global Positioning System) ausgestaltet, wenn sie sich mit anderen, baugleichen Detektionssystemen im Rahmen eines Netzwerks synchronisieren und kalibrieren. Mit einer solchen Antenne kann jedoch nur die Richtung bestimmt werden, in der sich das Gewitter befindet. Für eine genaue Gewitterortung werden mehrere solcher Anlagen benötigt.

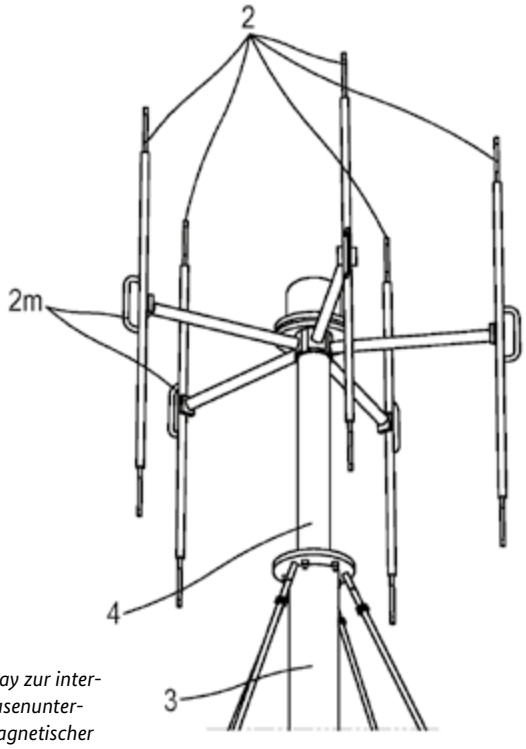


Abbildung 7: Dipol-Antennen-Array zur interferometrischen Detektion von Phasenunterschieden ankommender elektromagnetischer Wellen ***(WO 2019/122763 A1).***

Licht- und Schallemissionen eines Gewitters bodengestützt erfassen

Zur Vorhersage und Detektion von Gewittern werden in der Regel bei bodenbasierten Systemen die elektrischen und/oder magnetischen Eigenschaften der Atmosphäre ausgenutzt. Es gibt jedoch noch weitere physikalische Parameter, die man zur Gewitterdetektion heranziehen kann. In diesem Abschnitt werden insbesondere Systeme beschrieben, die optische und/oder akustische Sensoren verwenden.

Blitze erzeugen krachende und grollende Geräusche, die dadurch entstehen, dass im Blitzkanal durch den Stromfluss von bis zu 100.000 Ampere die Luft schlagartig auf über 30.000 °C erhitzt wird. Dabei dehnt sich der Blitzkanal mit Überschallgeschwindigkeit aus. So entsteht eine Schockwelle, die einen Überschallknall erzeugt, welchen wir, abhängig von der Entfernung zum Blitz als krachend, wenn der Blitz relativ nahe ist, oder eher als grollend, wenn das Gewitter weiter entfernt ist, wahr nehmen [2].

Die **US 2003/ 0 147 192 A1** nutzt die Erkennung eines Geräusches eines herannahenden Gewitters dazu, elektronische Gerätschaften mittels eines Mehrfachschalters vom Betriebszustand in einen geschützten Zustand zu schalten, um diese vor einer Überspannung zu schützen. Die Idee dahinter ist, dass man charakteristische Klangmuster eines Donners identifiziert, solange die Blitze noch in sicherer Entfernung einschlagen. Das Gewitterdetektionsgerät umfasst außerdem Mittel zum Erkennen von Geräuschen in der Umgebung und zum Vergleichen dieser mit einem oder mehreren Geräuschmustern von Donnergeräuschen, die aufgezeichnet oder künstlich erzeugt und in einer Speichereinheit gespeichert wurden. Wenn das erkannte Tonmuster mit einem oder mehreren der gespeicherten Muster übereinstimmt und somit auf ein Donnerereignis und einen potenziell bedrohlichen Zustand hinweist, wechseln die Mehrfachschalter vom Betriebszustand in den geschützten Zustand. Das Gewitterdetektionsgerät kann auch über ein oder mehrere Zeitmessgeräte verfügen, die bei Bestätigung eines Gewitterereignisses einen Zeitmesszyklus starten. Wenn das Gerät nach Ablauf einer festgelegten Zeit keine Folgeereignisse mehr erkennt, versetzt es das Mehrfachschaltgerät wieder in den normalen Betriebszustand.

F

Die **JP 2001- 066 378 A** offenbart ein Gewitterortungssystem, das sich beispielsweise auf einem Dach eines Hauses befinden kann, bestehend aus einer Kombination aus Donner- und Blitzlichterfassung. Das System (siehe Abbildung 8) verwendet dafür ein Mikrofon, dass den Donner registriert und mehrere Lichtdetektoren, in diesem Fall acht Stück (A bis H), die gleichmäßig an den Seitenflächen kreisförmig um einen zylindrischen Körper angebracht sind. Kommt es zu einem Blitzschlag, werden die Lichtsignale der Detektoren ausgewertet und eine Richtung wird durch Vergleichen der Signale der Lichtdetektoren A bis H berechnet, in welcher sich das Gewitter befindet.

G

E

In Abbildung 8 liegen sämtliche Blitzschläge 1 bis 4 im Sektor E'. Die Entfernung (r1 bis r4) der Blitzschläge wird über die Laufzeiten berechnet, die zwischen den Blitzschlägen und den jeweils verzögert ankommenden Donnergeräuschen gemessen werden. Da sich bei circa 20° Lufttemperatur der Schall mit etwa 343 Meter pro Sekunde ausbreitet, ergäbe sich beispielsweise bei einer Laufzeit zwischen Blitzschlag und registriertem Donner von drei Sekunden eine Entfernung von gut einem Kilometer. Werden mehrere Blitzschläge und Donnergeräusche detektiert, kann man damit das Gebiet und auch die Bewegungsrichtung des Gewitters abschätzen. Diese Informationen werden in diesem Fall genutzt, Maßnahmen zu ergreifen, die vor Überspannungsschäden schützen, falls sich das Gewitter auf das Haus mit dem Gewitterdetektor zubewegt und die Entfernung der Blitze einen vorbestimmten Grenzwert unterschreiten.

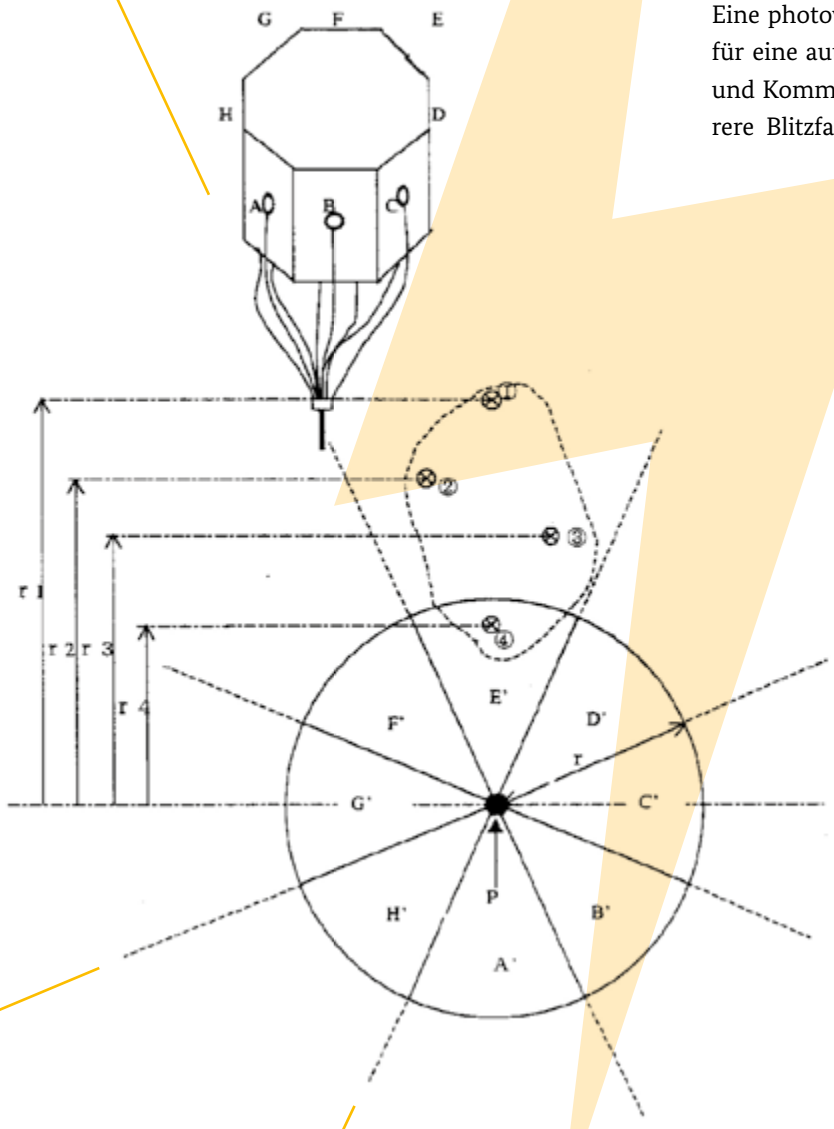


*Abbildung 8: Beispiel einer Blitzortungsvorrichtung in Form eines achteckigen Zylinders. Darunter wird die Umgebung um diese Vorrichtung entsprechend der acht Seiten des Zylinders in acht Sektoren eingeteilt, wobei in Sektor E' eine Gewitterwolke mit vier Blitzschlagereignissen dargestellt wird **(JP 2001- 066 378 A)**.*

Blitzfangsysteme

Wie der Name schon sagt, zielen Blitzfangsysteme darauf ab, vom Blitz getroffen zu werden, wobei die Energie und Dauer eines Blitzschlages ausgewertet werden – im Prinzip handelt es sich dabei um einen Blitzableiter mit Analysefunktion. Solche Blitzfangstangen und deren Betrieb werden in der **DE 10 2016 000 930 A1** und **DE 10 2017 100 785 B4** beschrieben. Dabei ist die Vorrichtung zur Blitz- oder Gewitterwarnung an oder in der Nähe einer Blitzfangstange, das heißt einem Bestandteil des äußeren Blitzschutzes, angeordnet. Mit Hilfe der Vorrichtung wird der bei einer Blitzentladung über die Blitzfangstange fließende Strom mittels des sich um die Blitzfangstange temporär ausbildenden elektromagnetischen Feldes detektiert, dessen Kenngrößen ermittelt und zur Datenauswertung weitergeleitet. Eine photovoltaische Stromversorgungseinheit kann dabei für eine autarke, netzfreie Stromversorgung der Auswerte- und Kommunikationseinrichtung sorgen. Es können mehrere Blitzfangstangen, die sich auf unterschiedlichen Gebäuden oder Windrädern befinden, miteinander kommunizieren und ein Netzwerk ausbilden, um dadurch über einen größeren geographischen Abschnitt die Erfassung blitzschutzrelevanter Parameter zu erlauben.

D

C

H

B

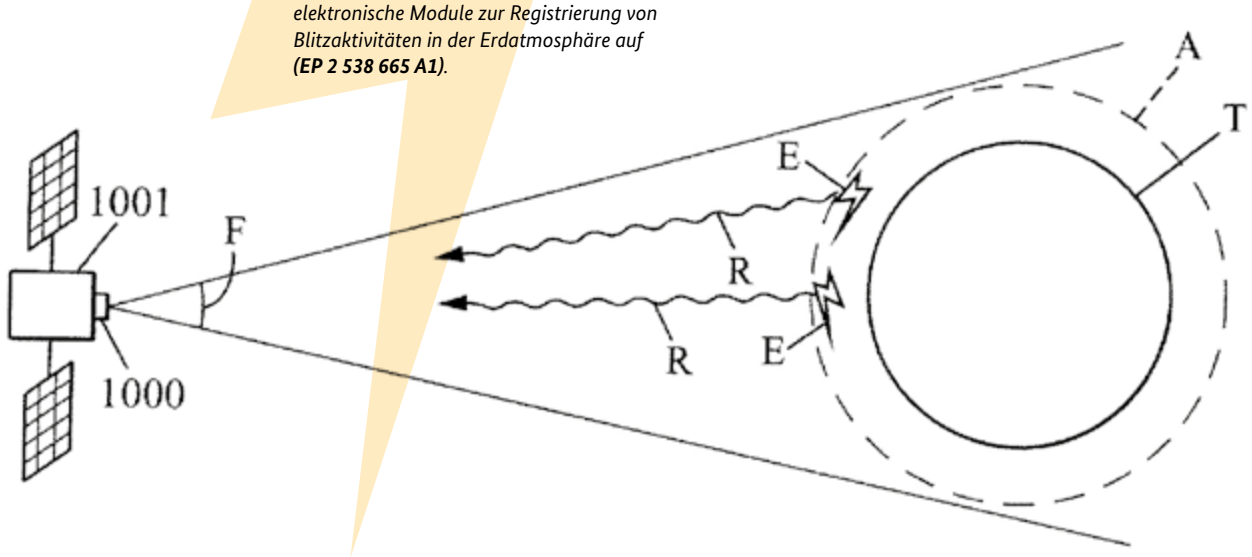
A

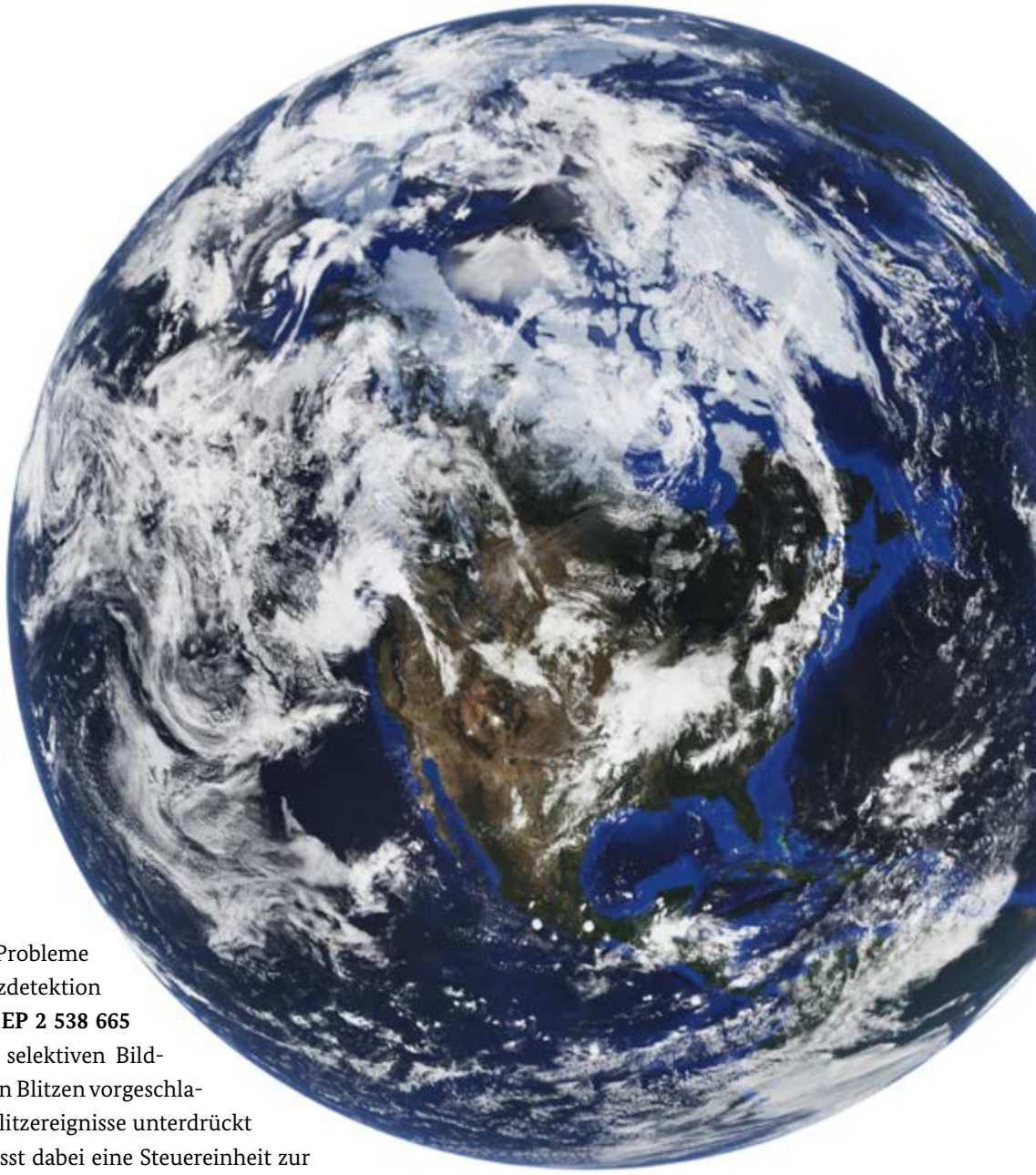
Weltallgestützte Blitzdetektion

Neben den bodenbasierenden Systemen werden seit den 1970-er Jahren auch weltraumgestützte Systeme zur Blitzdetektion eingesetzt. Im Allgemeinen messen satellitengestützte Blitzortungssysteme das vom Blitz ausgesandte Licht mit kameraähnlichen Sensoren, um den Blitz zu orten (siehe Abbildung 9).

Solche weltraumgestützte Blitzdetektionssensoren, wie zum Beispiel der „Geostationäre Lightning Mapper – GLM“ oder der „Lightning Imager – LI“ des Meteosat-Satelliten der dritten Generation (MTG), der 2023 ins All gebracht wurde, weisen eine spezielle Optik, Sensorik und ein entsprechendes ausgefeiltes Bildverarbeitungsverfahren auf. Geostationäre Wettersatelliten beobachten permanent das Wettergeschehen eines gleichbleibenden Bereichs der Erde aus einer Entfernung von etwa 36.000 km. Die Blitzdetektionssysteme müssen dabei in der Lage sein, mehrere sehr kurzzeitige Lichtimpulse mit einer Dauer von wenigen Millisekunden von anderen Leuchterscheinungen zu unterscheiden. Direkte Sonneneinstrahlung oder auch Streulicht kann dazu führen, dass die schwach leuchtenden Blitze nicht erkannt werden, während Reflektionen des Sonnenlichts auf beispielsweise ruhende Gewässerflächen, Packeis aber auch an Wolken dazu führen können, dass fälschlicherweise Blitze detektiert werden, wo keine sind.

*Abbildung 9: Neue geostationäre Wettersatelliten weisen mittlerweile auch optoelektronische Module zur Registrierung von Blitzaktivitäten in der Erdatmosphäre auf **(EP 2 538 665 A1)**.*





Um die oben genannten Probleme der extraterrestrischen Blitzdetektion zu adressieren, wird in der **EP 2 538 665 A1** ein Detektor mit einer selektiven Bilderfassung zur Erkennung von Blitzen vorgeschlagen, wobei falsch positive Blitzereignisse unterdrückt werden. Der Detektor umfasst dabei eine Steuereinheit zur Steuerung des Betriebes des Bildsensors, wobei der Sensor eine Matrix von mindestens 1.000 Zeilen und mindestens 1.000 Spalten von Bildpunkterkennungselementen umfasst, die zeilenweise und kontinuierlich nacheinander mit mindestens 2 kHz abgetastet werden. Die Ergebnisdaten werden anschließend in einer Echtzeitverarbeitungseinheit anhand von mehreren Merkmalen gefiltert und ausgewertet.

Störendes Streulicht kann durch so genannte „Baffles“, rohrförmige Ablenkstrukturen, die vor eine Linse positioniert werden, abgeschirmt werden. Dabei werden in der Optik selbst Interferenzfilter eingebaut, die nur ein sehr schmalbandiges Spektrum von 744 nm mit einer Bandbreite von 34 nm durchlässt (siehe [6]).

Gewitterortung mit einem Sensornetzwerk

Mit den bereits genannten Detektoren ist es zwar möglich, auf einfache Weise ein Gewitter zu erfassen, eine genaue Lokalisierung eines Gewitters ist jedoch damit oft schwierig bis unmöglich. Durch das Vernetzen einer Vielzahl der beschriebenen Sensoren ist es möglich, ein Gewitter räumlich und zeitlich aufzulösen und seine Bewegungsrichtungen zu ermitteln. Im Folgenden werden verschiedene Verfahren vorgestellt, die auf unterschiedliche Weisen mehrere Messmethoden miteinander verknüpfen, um Gewitter und insbesondere Blitzeinschläge genau zu orten, zu kartieren und gegebenenfalls auch verfolgen können.

Time-of-Arrival Methode der Ankunftszeit

Bereits in den 1950-er Jahren entwickelte man die Methode der Ankunftszeit – im Englischen auch als „Time-of-Arrival" (TOA) bekannt –, um Blitze zu lokalisieren. Bei der TOA setzt man mehrere beabstandete Messempfänger ein, die die vom Blitz erzeugte elektromagnetische Emission in elektrische Signale umwandeln. Da jedes Blitzereignis eine charakteristische elektromagnetische Emission erzeugt – vergleichbar mit einem Fingerabdruck – können die an den jeweili-

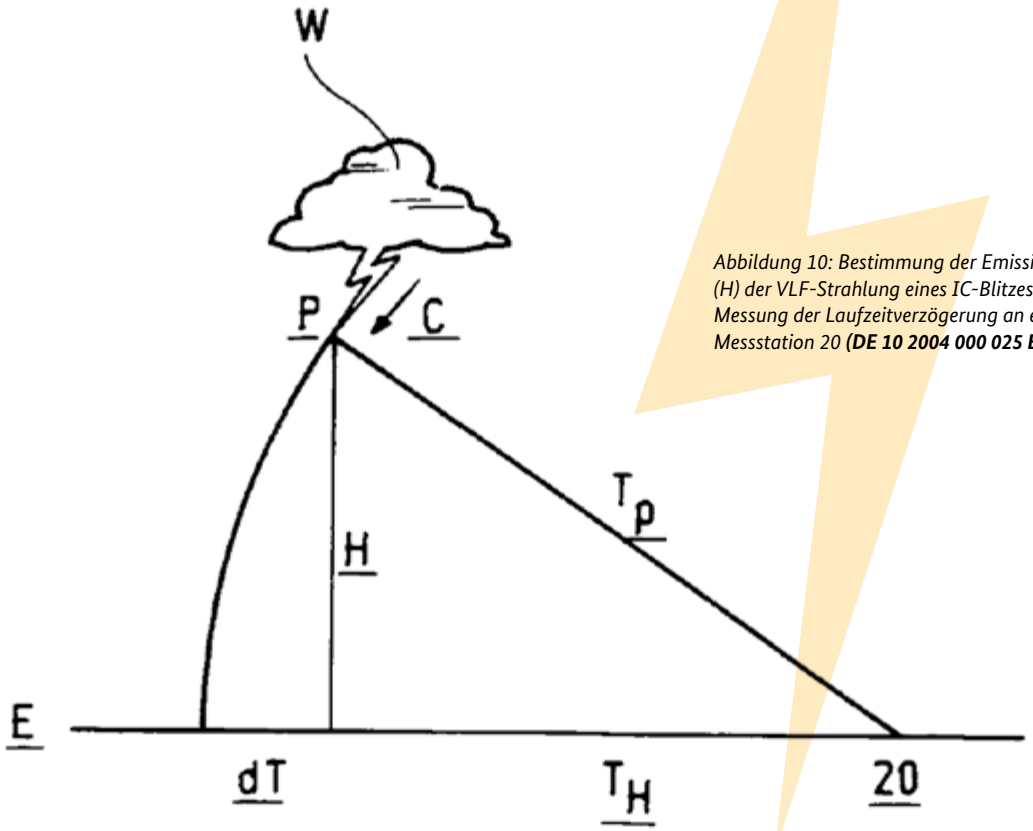


Abbildung 10: Bestimmung der Emissionshöhe (H) der VLF-Strahlung eines IC-Blitzes mittels Messung der Laufzeitverzögerung an einer Messstation 20 ***(DE 10 2004 000 025 B4)****.*

Messempfänger. Aus den Messungen der Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen der niederfrequenten Signale, die von zwei am Boden positionierten Sensoren gesammelt werden, lässt sich ein Ort der in den Boden einschlagenden Blitze auf einer Hyperbelkurve zwischen den Sensoren berechnen, die allen Positionen eines Blitzes entspricht, die eine gleiche Differenz in der Ankunftszeit aufweisen. Im Allgemeinen definieren N Sensoren N-1 Hyperbeln. Da in manchen Fällen sich zwei Hyperbeln in zwei Punkten schneiden können, sind für ein genaueres Ergebnis in der Regel mindestens drei Hyperbeln, also vier Sensoren erforderlich, die in ausreichender Nähe zu einem Blitzschlag positioniert sind [7].

Die TOA-Methode kann mit unterschiedlichen Frequenzen durchgeführt werden, je nachdem, welches Gebiet abgedeckt werden soll. So wird insbesondere für lokale Bereiche im Umkreis von einigen Kilometern das HF-Spektrum ausgewertet, während für Bereiche von 100 km oder sogar mehrere 1.000 km auf Grund der geringeren Dämpfung VLF/LF-Spektren empfangen werden [5].

Beim TOA-Blitzortungsverfahren treten jedoch wegen der oft sehr kurzen Zeitlaufdifferenzen Messungenauigkeiten auf, weshalb die TOA-Methode immer öfter nur noch in Kombination mit anderen Verfahren zur Ortung von Blitzereignissen verwendet wird.

Mit der TOA-Methode werden normalerweise CG-Blitze, die nahe am Boden eine Hauptstrahlung im VLF-Bereich emittieren, detektiert. Dabei lassen sich die Blitzeinschläge zweidimensional kartieren. Der Großteil der Blitzereignisse findet jedoch innerhalb einer Gewitterwolke statt. Um diese zu erfassen, wird in der **DE 10 2004 000 025 B4** ein Blitzortungsnetzwerk offenbart, das in der Lage ist, nicht nur CG-Blitze mittels TOA zu orten, sondern auch Wolkenblitze in großen Höhen zu identifizieren. Dabei nutzt das Sensornetzwerk die Laufzeitverzögerung der Signal-Ankunftszeiten aus, die sich zwischen den blitznächsten und blitzfernsten Sensorstationen einstellen, wenn sich ein Blitz in großer Höhe ereignet, anstatt auf der Erde einzuschlagen. Wie in Abbildung 10 gezeigt, kommt es bei den Emissionen von Intrawolkenblitzen zu einer gewissen Laufzeitverzögerung dT = TP - TH, die sich aus dem längeren Laufweg zur Messstation 20 ergibt.

Die Messung der Laufzeitverzögerung erfordert eine sehr genaue Zeitmarkierung der an den einzelnen Sensoren eintreffenden Signale. Durch Muster- und Formerkennungsalgorithmen wird dann sichergestellt, dass die jeweiligen Detektoren auch das identische Impulssignal eines Blitzes auswerten. Aufgrund dieser genauen Zeitmarkierung kann aus den Markierungszeiten ermittelt werden, ob an einem blitznahen Sensor relativ zu

den anderen blitzfernen Sensoren eine verzögerte Signalzeit gemessen wird. Falls eine derartige Verzögerung der Signalzeit vorliegt, weist dies auf eine verlängerte Laufstrecke und damit auf eine Herkunft aus großer Höhe hin. Diese Laufzeitverzögerung dT wird durch den Vergleich der Ankunftszeiten der blitznahen mit den blitzfernen Stationen ermittelt. Durch eine einfache Berechnung ist es dann möglich, die Emissionshöhe des Blitzereignisses P in der Wolke W zu bestimmen, womit eine dreidimensionale Blitzortung möglich wird. Dieses Sensornetzwerk hat dabei den Vorteil, dass durch die blitzfernen Detektoren, die sich mehrere hundert Kilometer entfernt vom Blitzereignis befinden, weiterhin nur im VLF-Bereich gearbeitet werden muss und für die Lokalisierung von IC-Blitzen keine zusätzlichen HF-Empfänger benötigt werden.

Kombinierte Verfahren zur Gewitterortung

Um die Gewitterortung zu optimieren, werden oftmals die Verfahren Magnetische Richtungspeilung (MDF), Time-of-Arrival (TOA) und/oder Interferometrische Blitzdetektion (ITF) miteinander kombiniert, um dabei die Schwächen der einzelnen Verfahren zu eliminieren. Im Folgenden wird beispielhaft eine Kombination aus TOA und ITF beschrieben.

Mittels TOA werden normalerweise CG-Blitze lokalisiert, wobei deren Signale im LF/VLF Bereich liegen, da hier eine größere Reichweite und eine geringere Störanfälligkeit des Signals gegeben ist. Blitzemissionen im Hochfrequenz (HF)-Bereich werden deshalb bei der TOA-Methode kaum registriert. Bei der IFT-Methode, die HF-Signale verwendet, wird der Messfehler umso größer, je kürzer die Impulsdauer des Blitzes ist.

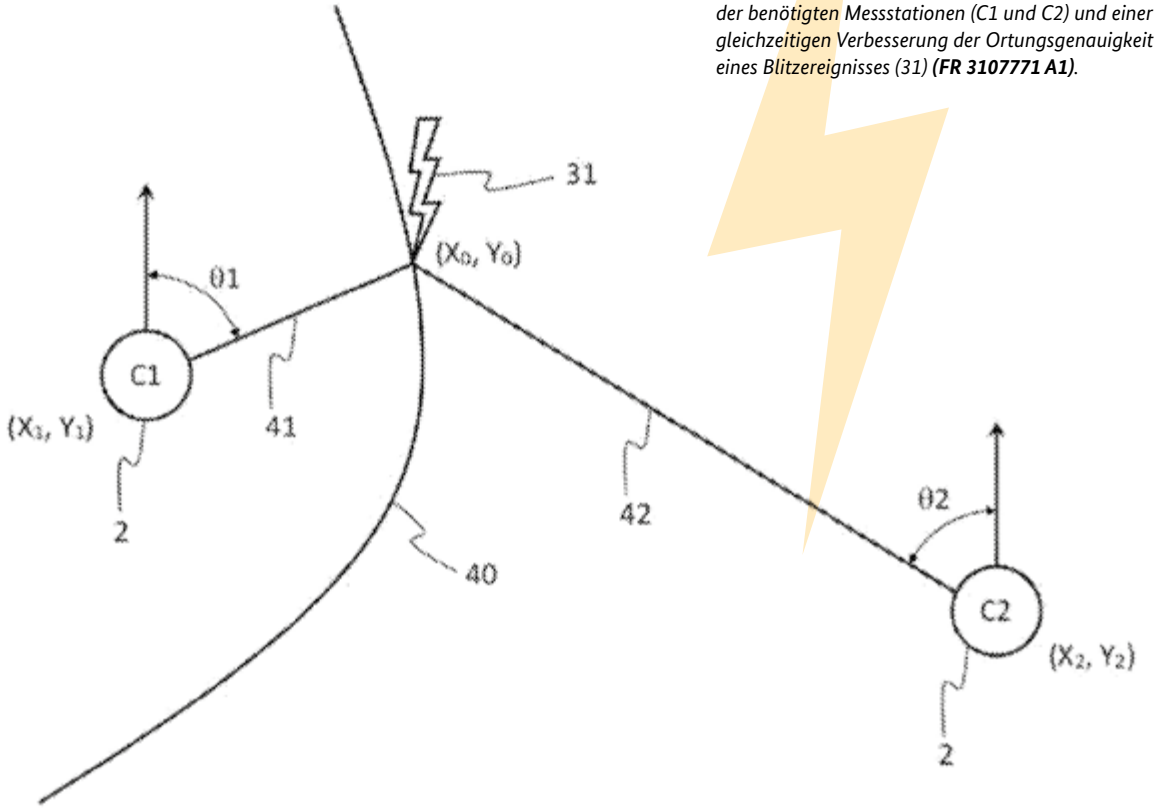


Abbildung 11: Die Kombination aus der Ankunftszeit- und Interferenzmethode führt zu einer Reduktion der benötigten Messstationen (C1 und C2) und einer gleichzeitigen Verbesserung der Ortungsgenauigkeit eines Blitzereignisses (31) ***(FR 3107771 A1)****.*

Sowohl die TOA als auch die ITF Methode haben dazu den gemeinsamen Nachteil, dass sie eine Mindestanzahl von Sensoren beziehungsweise Antennen erfordern, die bei der Interferometrie mindestens drei und bei der Ankunftszeitmessung mindestens vier beträgt. Die Vielzahl an Sensoren oder Antennen erhöht die Anzahl der Datenverarbeitungen, wodurch das zentralisierte Verarbeitungssystem komplexer wird.

Um eine möglichst genaue Ortung von Blitzsignalen zu erzielen, wobei aus Kostengründen so wenige Detektoren wie möglich eingesetzt werden sollen, wird in der **FR 3107771 A1** deshalb vorgeschlagen, die TOA und ITF-Techniken gemeinsam zu verwenden. Wobei die ITF eine schnelle Lokalisierung von CC-Blitzen ermöglicht und die TOA eine schnelle Lokalisierung von CG-Blitzen ermöglicht. Die Ankunftszeit eines Blitzereignisses wird mittels der gleichen Sensoranordnung registriert, mit der auch die Phasenverschiebung des ankommenden Signals für die ITF bestimmt wird, was die Anzahl der benötigten Antennen reduziert. Zur Messung der Ankunftszeit verwendet der Detektor eine Uhrenschaltung, die über einen hochpräzisen Oszillator verfügt, dessen Abweichung weniger als eine Mikrosekunde pro Tag beträgt. Die Taktschaltungen aller Sensoren, die im selben System arbeiten, sind dabei synchronisiert. Um die Abweichungen der verschiedenen Taktzeiten zu kompensieren, kann eine Fernsynchronisierung der Taktschaltkreise durch die Mikroprozessoren bei Empfang einer Synchronisierungsnachricht durchgeführt werden.

Wie in Abbildung 11 gezeigt, ist es mit dem in der **FR 3107771 A1** gezeigten System möglich, mit nur zwei voneinander beabstandeten Messstationen (C1, C2) einen Blitz (31) zu lokalisieren. Bevorzugt wird eine Messentfernung zwischen zehn und hundert Kilometern.

Das Prinzip besteht darin, die Messung der Azimutwinkel θ1 und θ2 sowie der Elevationswinkel φ1 und φ2 (nicht gezeigt) in drei Dimensionen mit der Lokalisierung durch Messung der Ankunftszeit zu kombinieren. Mit nur zwei Sensoren C1 und C2 ermöglicht die Messung der Differenz der

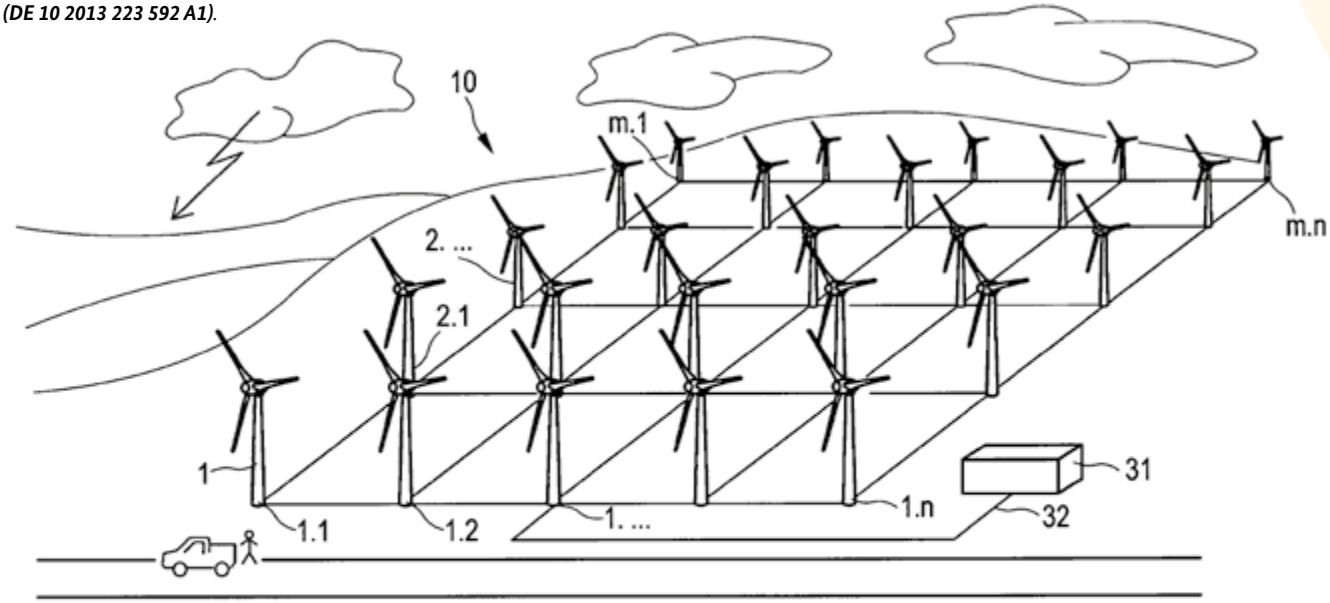
Ankunftszeit des elektromagnetischen Impulses an diesen beiden Sensoren C1 und C2 die Lokalisierung des Blitzes (31) auf einer Hyperbel (40) beziehungsweise auf einer dreidimensionalen Hyperboloidoberfläche. Die Azimutwinkel θ1 und θ2 ermöglichen die Bestimmung der Richtungsgeraden 41 und 42, die jeweils von der Position der Sensoren C1 und C2 ausgehen, die Addition der Elevationswinkel φ1 und φ2 ermöglicht die dreidimensionale Verortung dieser Geraden 41 und 42. Der Schnittpunkt einer dieser Richtungsgeraden 41 oder 42 mit der Hyperbel 40 beziehungsweise der Hyperboloidfläche reicht aus, um einen Blitz zu lokalisieren.

Abhängig von der Größe und Beschaffenheit des zu überwachenden Gebiets und auch von der gewünschten Genauigkeit können mehrere verteilte Messstationen zum Einsatz kommen. Somit können auch mehrere Richtungslinien bestimmt werden, die sich theoretisch alle im gleichen Punkt schneiden müssten. In der Praxis kommt es jedoch zu Ortungsfehlern, die bei der Interferometrie von der Länge des elektromagnetischen Impulses abhängt. Auch bei der Laufzeitmessung treten Fehler auf, weshalb sich normalerweise die berechneten Hyperbeln nicht alle in einem Punkt schneiden. Je mehr Sensoren man hat, umso genauer kann man auch hier mitteln.

Windparks als lokale Gewitterwarnsysteme

Im Folgenden wird anhand der **DE 10 2013 223 592 A1** gezeigt, wie ein Gewitterwarnsystem für blitzschlaggefährdete Windparks umgesetzt werden kann. Die Windenergie spielt eine immer größere Rolle bei der weltweiten Stromproduktion und nimmt daher einen wichtigen Stellenwert ein. Mit der steigenden Anzahl von Windrädern und Windparks steigen auch die Wartungsaufwände und Wartungszeiten. Ein hoher Wartungsaufwand ist mit hohen Kosten und einem hohen logistischen Planungsaufwand für Personal und Arbeiten verbunden. Bei der

Abbildung 12: Ausgestaltungsform für einen Windpark zur Gewitter- bzw. Blitzwarnung mit einer Mehrzahl von Windenergieanlagen ***(DE 10 2013 223 592 A1)****.*





Planung von Wartungsarbeiten gilt es, unnötige Ausfallzeiten bei witterungsbedingten Unterbrechungen zu vermeiden. Aufgrund ihrer exponierten Lage und Höhe sind Windkrafträder oft Ziel von Blitzeinschlägen.

Für eine Blitz- und/oder Gewitterwarnung werden in der Regel öffentliche Wettervorhersagen herangezogen, die lokal, insbesondere im Hinblick auf den genauen Standort eines Windrads sehr ungenau sind und eine zuverlässige Gewittervorhersage nicht zulassen.

Allerdings muss die Vorhersage eines möglichen Blitzeinschlags in einer Windkraftanlage, insbesondere während der Dauer von Wartungsarbeiten, äußerst präzise sein, um das Wartungspersonal vor potenziell tödlichen Blitzentladungen zu schützen. Andererseits sollten Wartungsarbeiten nur dann unterbrochen werden, wenn eine ausreichende Blitzeinschlagwahrscheinlichkeit vorliegt, um die Wartungsarbeiten nicht unnötig zu verzögern.

Jedes Windrad ein Datensammler

In der **DE 10 2013 223 592 A1** wird vorgeschlagen, dass ein Windpark (siehe Abbildung 12) derart betrieben werden soll, dass deren jeweilige Windenergieanlagen quasi als Wettermessstationen verwendet werden. Windenergieanlagen haben bereits den Vorteil, über mehrere Umweltsensoren wie Windmesser, Thermometer, Barometer und Luftfeuchtigkeitssensoren zu verfügen, wobei diese sich in einer Höhe von bis zu 200 Metern befinden, so dass Bodeneffekte die Messdaten nicht verfälschen können.

Allein in Deutschland gibt es über 30.000 Windenergieanlagen [8], wobei grundsätzlich jede davon als mögliche Wetterstation fungieren könnte. Dadurch könnten Umweltparameter mit einem engmaschigen Netz aus Messstationen erfasst werden und so vor allem die Präzision von lokalen Gewittervorhersagen verbessern. Entscheidend ist jedoch, dass die Windenergieanlagen zusätzlich zu den übrigen Sensoren beispielsweise mit einem Elektrofeldmeter, wie in Abbildung 3 gezeigt, der die Feldstärke in der Umgebung der WEA erfassen kann, ausgestattet sind. Sollte die elektrische Feldstärke einen vorbestimmten kritischen Wert für einen drohenden Blitzschlag überschreiten, wird eine Gewitterwarnung ausgegeben, wobei die Wahrscheinlichkeit für einen Blitzschlag in einer bestimmten Windenergieanalage durch das Auswerten der zusätzlichen Umweltparameter wie Luftdruck und Temperatur zusätzlich präzisieren lässt. Durch das Vernetzen der Windparks untereinander lässt sich so ein System für eine Gewitter- bzw. Blitzwarnung bereitstellen. Die Sensoren können praktischerweise auf dem Dach einer Gondel der WEA montiert sein.

Zur Verbesserung der Gewittervorhersage werden die Umweltparameter über einen längeren Zeitraum erfasst und immer wieder mit den Vorhersagen, insbesondere den vorhergesagten Umweltparametern, verglichen und bei Bedarf korrigiert. Aus der zeitlichen Entwicklung der Umweltparameter, also der Historie der erfassten Umweltparameter, einschließlich den Werten des elektrischen Feldes, lässt sich dann eine Vorhersage für die zukünftige Entwicklung des erfassten Umweltparameters ermitteln. Die erfassten Werte können zusätzlich mit Referenzwerten aus der Wetterforschung, die auf das Auftreten eines Blitzschlages hindeuten, verglichen werden. Beispielsweise kann beim Vorliegen eines bestimmten Luftdrucks, einer bestimmten Luftfeuchtigkeit und einer bestimmten Feldstärke des elektrischen Feldes auf eine Gewitterlage, insbesondere auf einen möglichen Blitzeinschlag, geschlossen werden. Für eine Analyse der Gewittergefahr werden die Umweltparameter von den jeweiligen WEA eines Windparks in einem Server verarbeitet und standortabhängig kartiert. In Abbildung 13 ist eine rechteckige Fläche eines Windparks abgebildet, wobei die Vielzahl von Quadraten (m.n) jeweils Standorte von Windenergieanlagen darstellen. Die gestrichelte Linie 71 zeigt eine Windfront mit erhöhten Windgeschwindigkeiten an. Je dunkler die Quadrate, umso stärker der Wind. Im Bereich 62 wird eine hohe Wahrscheinlichkeit für einen Blitzschlag angegeben, da hier die das elektrische Feld einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Zum einen kann mit so einer Karte eine aktuelle Blitzwarnung für bestimmte Windenergieanlagen im Windpark ausgegeben werden, zum anderen ist es durch die bekannten Windparameter möglich, eine zukünftige Blitzgefahr für weitere Windenergieanlagen vorherzusagen.

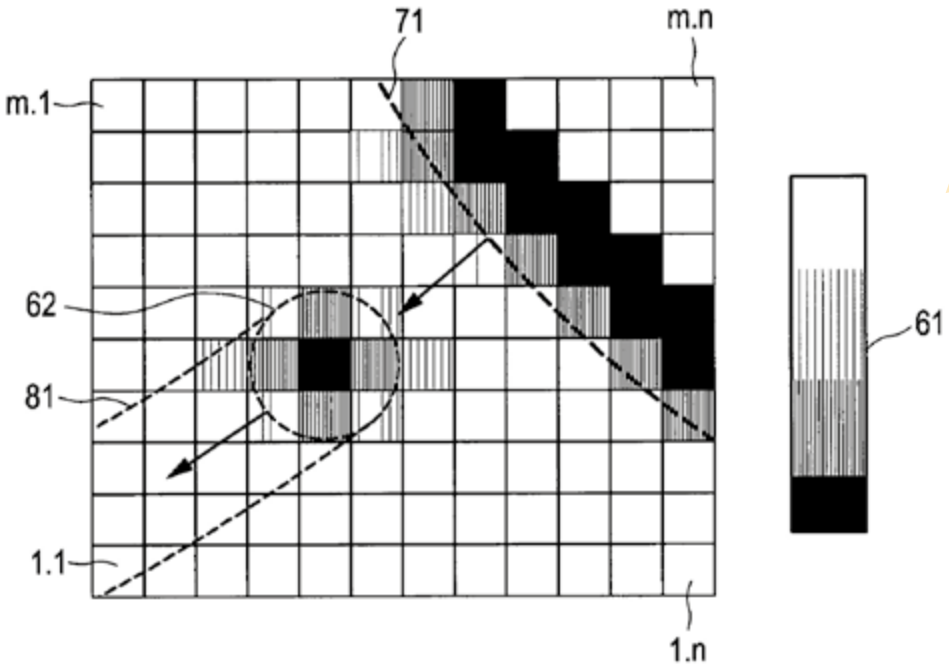


Abbildung 13: Blitzwarnkarte für die Standorte von Windenergieanlagen in einem Windpark, wobei insbesondere Bereiche erhöhter elektromagnetischer Feldstärke (62) sowie Richtung und Stärke des Windes (71) erfasst werden ***(DE 10 2013 223 592 A1)****.*

Die Daten solcher Windparks können in ein System zur Wettervorhersage, insbesondere zur Blitzwarnung, einfließen. Wobei viele verschiedene Windparkanlagen, unter anderem auch Offshore-Windparks, oder auch einzelne Windenergieanlagen miteinander vernetzt werden und mit einem zentralen Server verbunden sind (siehe Abbildung 14). Mit den jeweiligen Windparks oder auch einzelnen Windenergieanlagen können somit über einen großen Bereich Umweltparameter erfasst werden, die anschließend für die Gewitter- und Blitzwarnung ausgewertet werden.

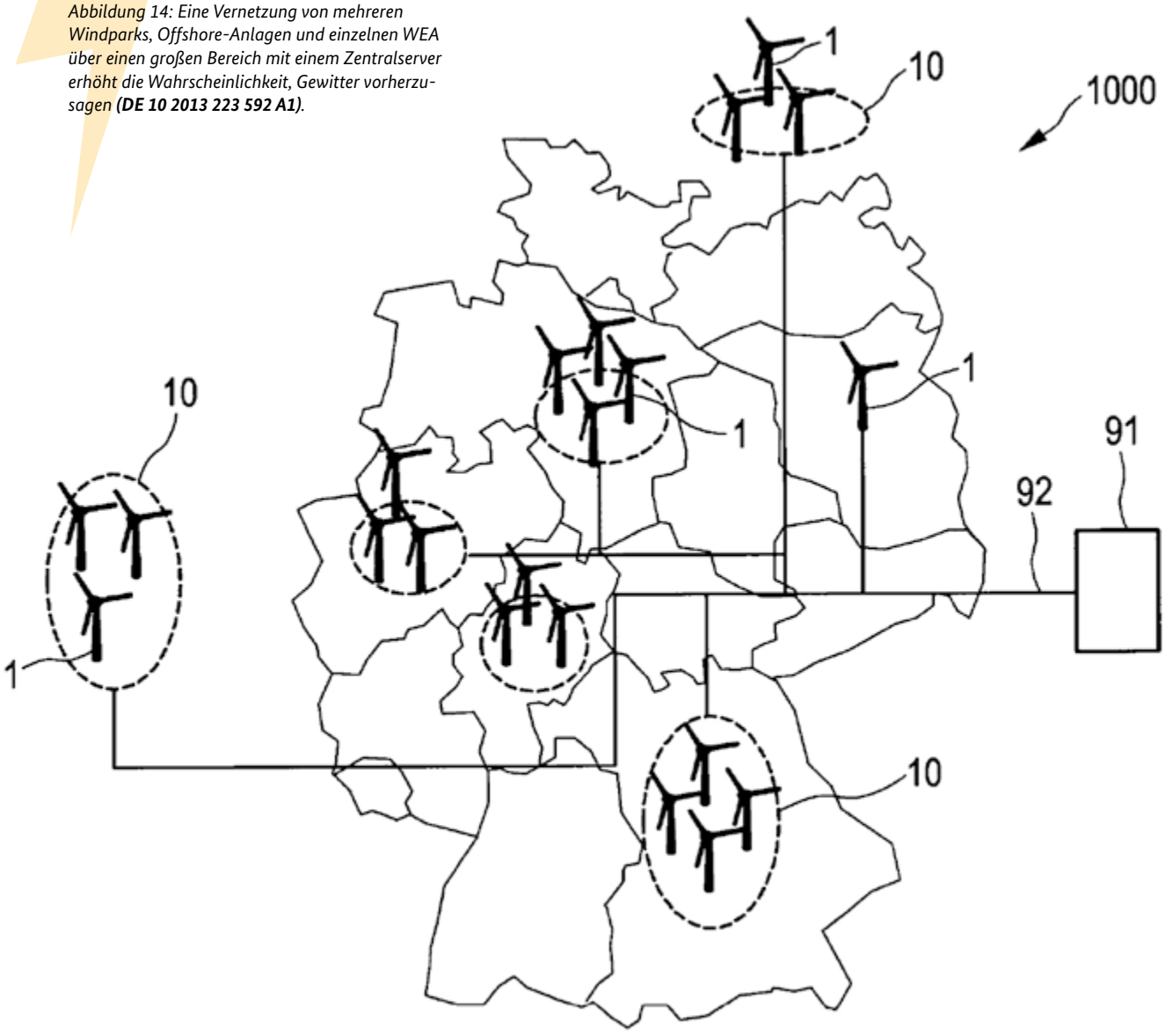


Abbildung 14: Eine Vernetzung von mehreren Windparks, Offshore-Anlagen und einzelnen WEA über einen großen Bereich mit einem Zentralserver erhöht die Wahrscheinlichkeit, Gewitter vorherzusagen ***(DE 10 2013 223 592 A1)****.*

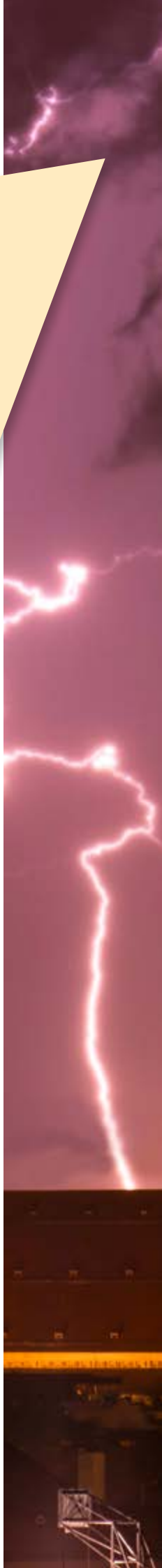
Fazit

Die Gewitterdetektion ist und bleibt ein komplexes und vielschichtiges Thema, das durch verschiedene Verfahren, wie die Analyse von atmosphärischen Bedingungen, die Blitzortung und die Nutzung von Satellitenbeobachtungen, vorangetrieben wird. Durch die Kombination dieser Methoden können Wetterdienste immer präzisere Vorhersagen treffen und die Bevölkerung frühzeitig vor drohenden Gewittern warnen. Um unsere Sicherheit und unser Wohlergehen zu gewährleisten, wird insbesondere hinsichtlich des Klimawandels die kontinuierliche Weiterentwicklung und Verbesserung der Gewitterdetektionstechnologien weiterhin ein Thema sein. Wie präzise die zukünftigen Gewitterwarnsysteme auch sein sollten: Wo genau der nächste Blitz einschlägt, wird aufgrund der Komplexität dieses Naturphänomens weiterhin nicht vorhersagbar sein.



Dr. Florian Stark

studierte an der Ludwig-Maximilians-Universität München und an der University of Liverpool Geophysik, Physik, Geologie und Meteorologie und war unter anderem auf dem Forschungsschiff Polarstern sowie auf den deutschen Forschungsstationen Neumayer 2 und Gondwana in der Antarktis tätig. Anschließend arbeitete er als Gruppenleiter an der Ingenieursfakultät Bau Geo Umwelt an der TU München. Seit 2016 leitet Dr. Stark beim DPMA als Patentprüfer die Prüfungsstellen für Meteorologie und Temperaturmessungen. In seiner Freizeit ist Dr. Stark weiterhin regelmäßig in den Polargebieten unterwegs.





Autonome Shuttles:

Dr. Nina Tetzlaff

Mobilitätswende: Die Anzahl der autofreien Orte und Innenstädte steigt. Zudem hält in Kommunen, in denen an Verbote von Kraftfahrzeugen nicht zu denken ist, die Verkehrswende in Form von autonomen Shuttle-Services Einzug. Meist sind die Shuttles elektrisch betrieben. Hier sind auch Impulse für den Gütertransport in dicht besiedelten Bereichen zu erwarten. Dieser Artikel stellt anhand von Patentliteratur verschiedene Aspekte autonomer Shuttle-Services vor.

#Mobilitätswende
#Verkehrswende
#AutonomesFahren
#Verkehrssicherheit
#Komfort
#LetzteMeile

Die Mobilitätswende in Schwung bringen

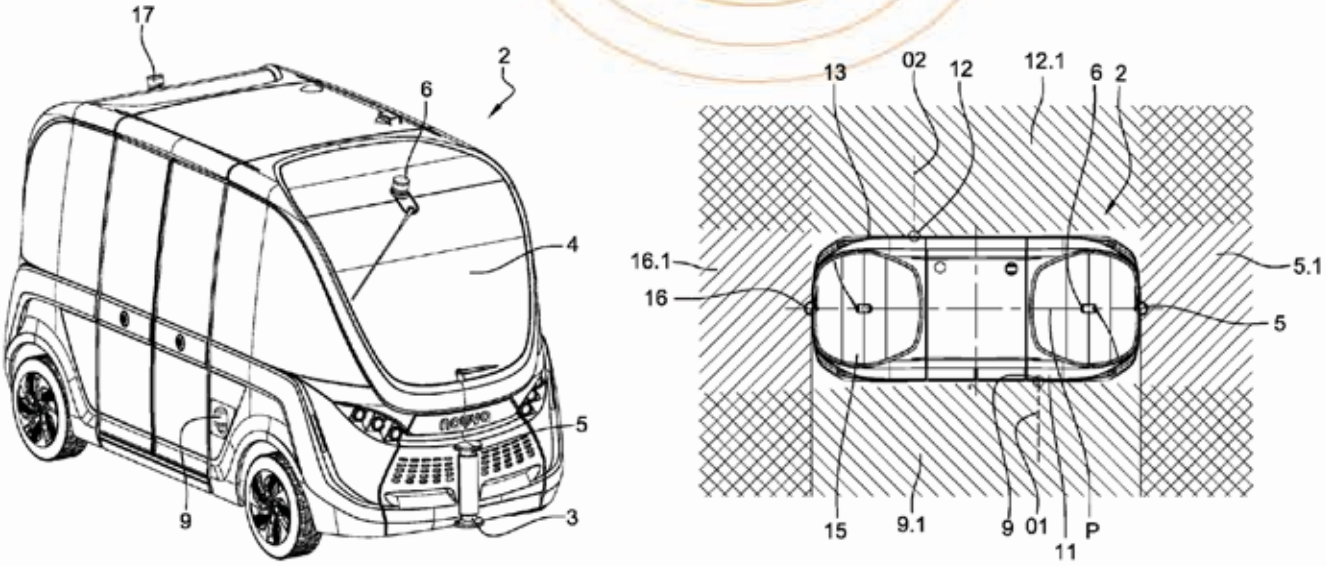


Abbildung 1: Autonomer Shuttle-Bus (links) sowie dessen Sensorsichtfeld (rechts), entnommen aus ***US 2018 / 0 095 473 A1.***

Sicher unterwegs in Interaktion

Das Phänomen der Umwelt- und Energiekrise beschäftigt uns seit den 1970-er Jahren, nicht zuletzt ausgelöst durch die erste Ölkrise. Die Anfänge der modernen Energieforschung liegen ein halbes Jahrhundert zurück. Ein wichtiger Aspekt für die Energiewende ist die Verkehrs- oder Mobilitätswende, da im Verkehrssektor ein wesentlicher Anteil Energie verbraucht wird. In großen Städten und Metropolregionen, in denen der Straßenverkehr besonders ausgeprägt ist, ist die Belastung durch Luftverschmutzung und Lärm besonders groß.

Bereits 1975 kritisierte der österreichische Verkehrsplaner Hermann Knoflacher mit seinem sogenannten „Gehzeug“ den Platzbedarf von Kraftfahrzeugen [1, 2, 3]. Ein wesentlicher Aspekt der Verkehrswende ist, den privaten Autoverkehr, insbesondere in Großstädten und Metropolregionen, durch alternative Verkehrsmittel zu ersetzen [4]. Das Spektrum reicht vom Ausbau von Fahrradwegen und Fußgängerzonen über das Bereitstellen von elektrifizierten Kleinstfahrzeugen wie E-Tretrollern bis zum Angebot von Mobilitätsdienstleistungen als Flatrate; Stichwort „Mobility as a Service“. Neben der bereits gegenwärtig sichtbaren Verfügbarkeit von E-Tretrollern oder Leihfahrrädern an Bahnhöfen und öffentlichen Plätzen existieren in vielen deutschen Städten bereits Projekte zu autonomen Shuttle-Services [5, 6].

Diese sollen insbesondere das sogenannte Problem der ersten beziehungsweise letzten Meile lösen, welches den letzten Abschnitt zwischen einem Verteilerpunkt und der Haustür des Einzelnen betrifft. Im Personenverkehr bedeutet die Größe der ersten beziehungsweise letzten Meile die Beförderung zwischen dem Start- oder Zielort einer Person und der nächstgelegenen Haltestelle des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) [7]. Pendler, die nicht in Laufreichweite des ÖPNV wohnen, fahren häufig mit dem privaten Pkw. Shuttle-Fahrzeuge, welche die Entfernung zum nächstgelegenen Verteilerpunkt überbrücken, könnten diese Menschen für öffentliche Verkehrsmittel begeistern.

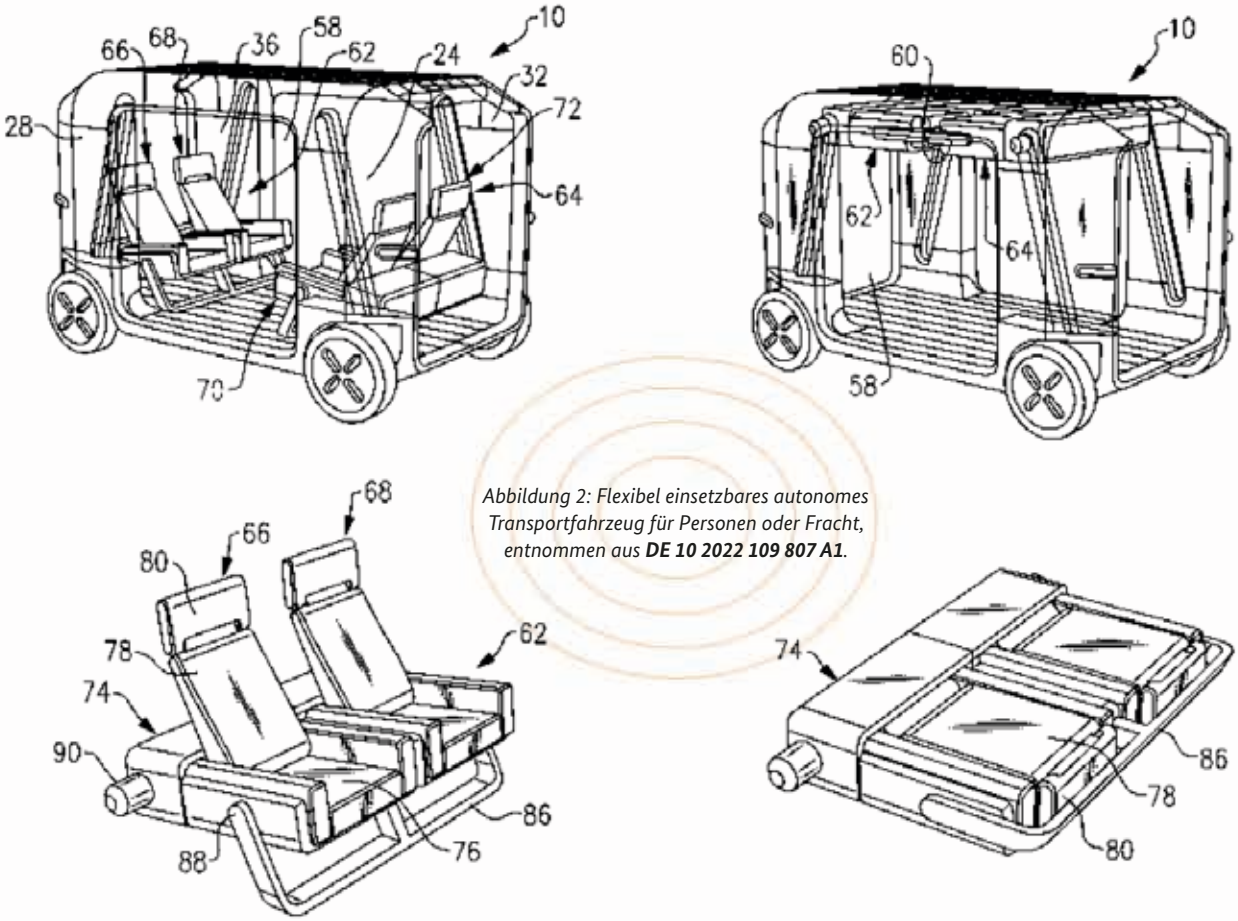


*Abbildung 2: Flexibel einsetzbares autonomes Transportfahrzeug für Personen oder Fracht, entnommen aus **DE 10 2022 109 807 A1**.*

Besondere Herausforderungen für autonome Shuttles sind die Umgebungserfassung, die Interaktion mit den Passagieren und die Verkehrssicherheit. In diesem Artikel sollen insbesondere Lösungen zu diesen Aspekten aus Patentsicht vorgestellt werden.

Technische Ausstattung und Sensorik

Gegenwärtig werden in Deutschland bereits in vielen Städten autonome Shuttle-Fahrzeuge betrieben [5], wobei die beiden Hersteller EasyMile und Navya, die auch weltweit in diesem Sektor führend sind, dominieren [9].

Die angegebenen Geschwindigkeiten der autonomen Shuttle-Busse liegen zwischen 10 und 50 km/h, in den meisten Fällen bei circa 15 km/h. Die gefahrenen Streckenlängen betragen einige hundert Meter bis zu wenigen Kilometern [5, 6]. Die Fahrzeuge sind etwa so groß wie ein Mittelklassewagen [10].

Die **US 2018 / 0 095 473 A1** zeigt einen autonomen Shuttle-Bus sowie dessen Sensorsichtfeld (Abbildung 1). Auf die Ausstattung mit Sensoren autonomer Shuttle-Fahrzeuge soll nachfolgend noch eingegangen werden.

Ein Vorteil autonomer Fahrzeuge ist die Flexibilität, sowohl Personen als auch Güter transportieren zu können, denn es wird kein Fahrzeugführer mit entsprechenden Zulassungen benötigt. So zeigt die **DE 10 2022 109 807 A1** ein Fahrzeug, welches entsprechend seiner Transportaufgabe in einfacher Weise umgebaut werden kann (Abbildung 2).

Autonome Fahrzeuge, die sich im Straßenverkehr fortbewegen, müssen ihre Umgebung vollständig erfassen können. Objekte, insbesondere Hindernisse, müssen korrekt erkannt und klassifiziert werden, um die Verkehrssicherheit zu gewährleisten.

Die **EP 2 766 237 B1** beschreibt ein System von Umfeldsensoren mit unterschiedlichen Erfassungsbereichen (Abbildung 3). Die Umfeldüberwachung erfolgt hierbei einerseits durch eine Vielzahl von Kameras, welche eine Rundumerfassung der Umgebung bis zu einer Entfernung von etwa einhundert Metern ermöglichen (Erfassungsbereiche 1 in Abbildung 3). Ergänzend dazu erfassen Ultraschall- und Radarsensoren Objekte sowie deren Abstand und Relativbewegung zum Fahrzeug. Außerdem wird mittels eines Fernbereichsradars die Umgebung in Fahrtrichtung des Fahrzeugs bis zu mehrere Hundert Meter detektiert (Erfassungsbereich 2 in Abbildung 3). Solche Radarsensoren finden beispielsweise im Rahmen eines Abstandsregeltempomats Verwendung bei der automa-

tischen Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Abstands zu einem vorausfahrenden Fahrzeug. Zusätzlich werden Lidar- oder Stereokamerasysteme (Erfassungsbereich 3 in Abbildung 3) in Fahrtrichtung eingesetzt, um Objekte im Bereich mittlerer Entfernungen zu detektieren. Weitere Radarsensoren überwachen im Nahbereich den toten Winkel des Fahrzeugs (Erfassungsbereiche 4 in Abbildung 3). Unmittelbar vor und hinter dem Fahrzeug liegende Bereiche werden durch Ultraschallsensoren, welche beispielsweise Teil eines Einparkassistenten sind, überwacht (Erfassungsbereiche 5 in Abbildung 3).

Ein solches Sensorsystem gemäß **EP 2 766 237 B1** ermöglicht eine autonome Fahrzeugsteuerung sowohl bei niedrigen als auch bei höheren Geschwindigkeiten, da zum einen der Nahbereich um das Fahrzeug vollständig überwacht wird und zum anderen entfernte Objekte erkannt werden.

Eine Sensoranordnung für eine 360°-Umfelderfassung, welche jedoch nur Sensoren eines Typs verwendet, die über die Fahrzeugaußenseite verteilt angeordnet sind, schlägt die **DE 10 2016 220 075 A1** vor (Abbildung 4). In Echtzeit kann ein dreidimensionales Abbild der Fahrzeugumgebung mittels Sensordatenfusion, das heißt einer Zusammenführung der durch die verschiedenen Sensoren aufgenommenen Informationen, zur Verfügung gestellt werden.

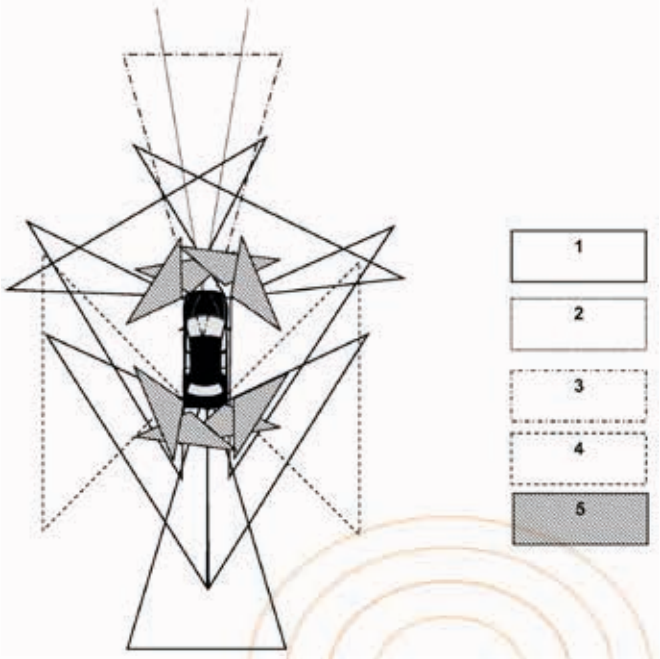


*Abbildung 3: Umfeldüberwachung mittels einer Vielzahl von Sensoren für den Fern- und Nahbereich, entnommen aus **EP 2 766 237 B1**.*

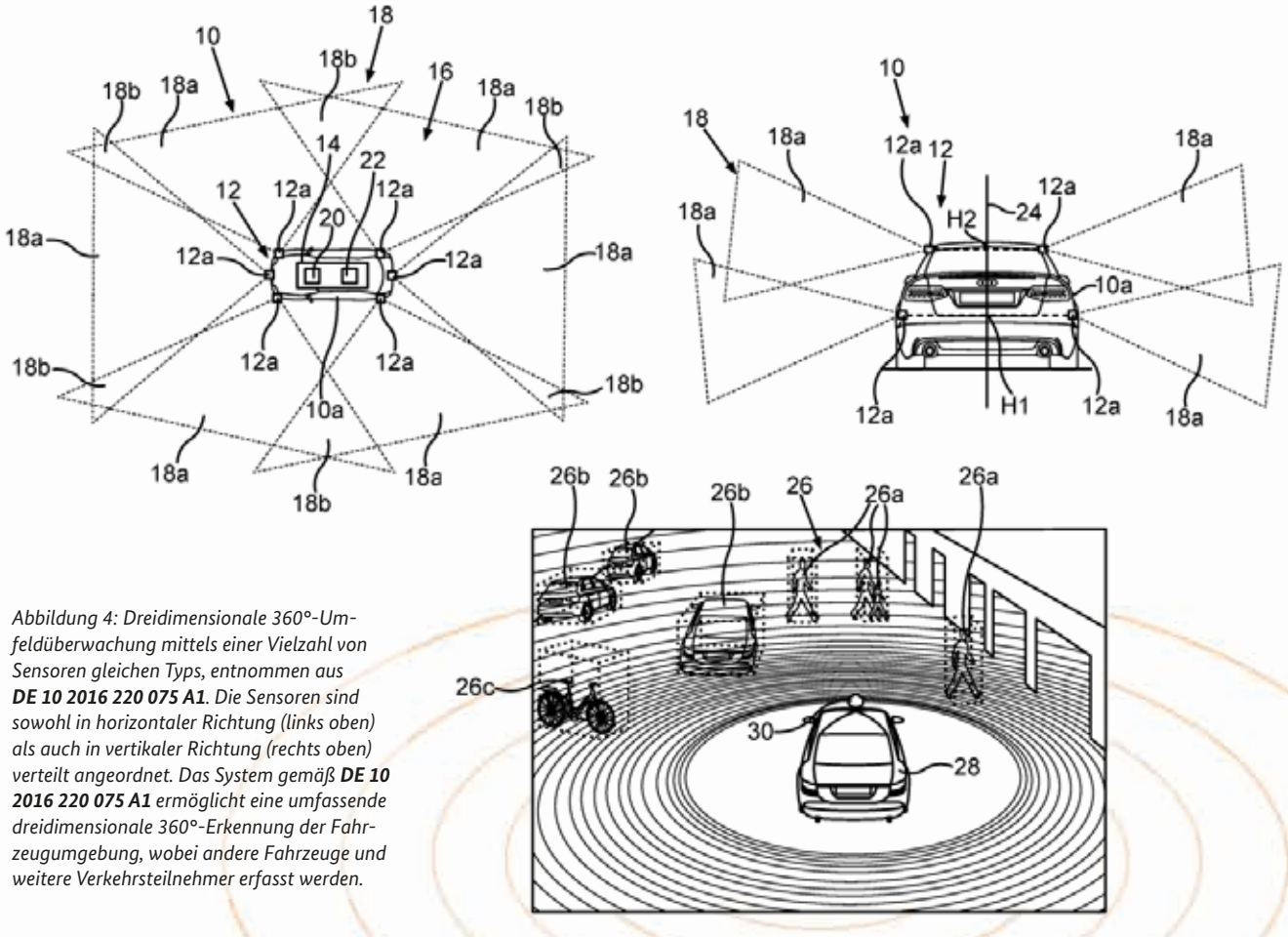


*Abbildung 4: Dreidimensionale 360°-Umfeldüberwachung mittels einer Vielzahl von Sensoren gleichen Typs, entnommen aus **DE 10 2016 220 075 A1**. Die Sensoren sind sowohl in horizontaler Richtung (links oben) als auch in vertikaler Richtung (rechts oben) verteilt angeordnet. Das System gemäß **DE 10 2016 220 075 A1** ermöglicht eine umfassende dreidimensionale 360°-Erkennung der Fahrzeugumgebung, wobei andere Fahrzeuge und weitere Verkehrsteilnehmer erfasst werden.*

Die bereits zuvor genannte **US 2018 / 0 095 473 A1** schlägt ein Sensorsystem vor, das verschiedene Sensortypen, beispielsweise Kameras, Laser- und Lidar-Sensoren, in unterschiedlichen Höhen an einem autonomen Shuttle-Bus aufweist (Abbildung 5). Hierdurch soll ebenfalls eine umfassende Umfelderfassung erzielt werden.



Zudem besitzt das Fahrzeug gemäß **US 2018 / 0 095 473 A1** Sensoren, welche die Fahrzeugposition überwachen, wie zum Beispiel ein satellitenbasiertes Positionsbestimmungssystem oder Radsensoren.

Eine genaue Positionsbestimmung ist insbesondere für autonome Fahrzeuge im Straßenverkehr essenziell. In der Regel erfolgt diese mittels eines globalen Positionsbestimmungssystems, zum Beispiel dem Global Positioning System (GPS). Die Genauigkeit des GPS ist jedoch auf wenige Meter beschränkt. In urbanen Gebieten mit hohen Gebäuden verschlechtert sich diese zusätzlich. Für den Betrieb eines autonomen Straßenfahrzeugs ist sie somit nicht ausreichend. Ebenfalls birgt diese Art der Positionsbestimmung die Gefahr der Unterbrechung des Signalempfangs, beispielsweise in einem Tunnel.

Für eine präzise Ortsbestimmung eines Fahrzeugs schlägt die **DE 10 2014 112 351 A1** vor, anhand der mittels GPS bestimmten Fahrzeugposition das Fahrzeug auf einer digitalen Karte zu lokalisieren. Bestandteil dieser Karte sind auch Objekte am Straßenrand, welche das Fahrzeug zusätzlich sensorisch erfasst. Anhand der in der Karte verzeichneten Positionen der Objekte sowie der GPS-Position des Fahrzeugs ist eine präzise Bestimmung der Fahrzeugposition möglich. Zusätzlich können auch Sendevorrichtungen, zum Beispiel Wi-Fi-Router oder RFID-Marker (RFID = radio frequency identification; Funkfrequenz-Identifikation; ein Sender-Empfänger-System), von denen das Fahrzeug Signale empfängt, die Genauigkeit der ermittelten Fahrzeugposition erhöhen, da ihre Orte ebenfalls festgelegt sind (Abbildung 6).

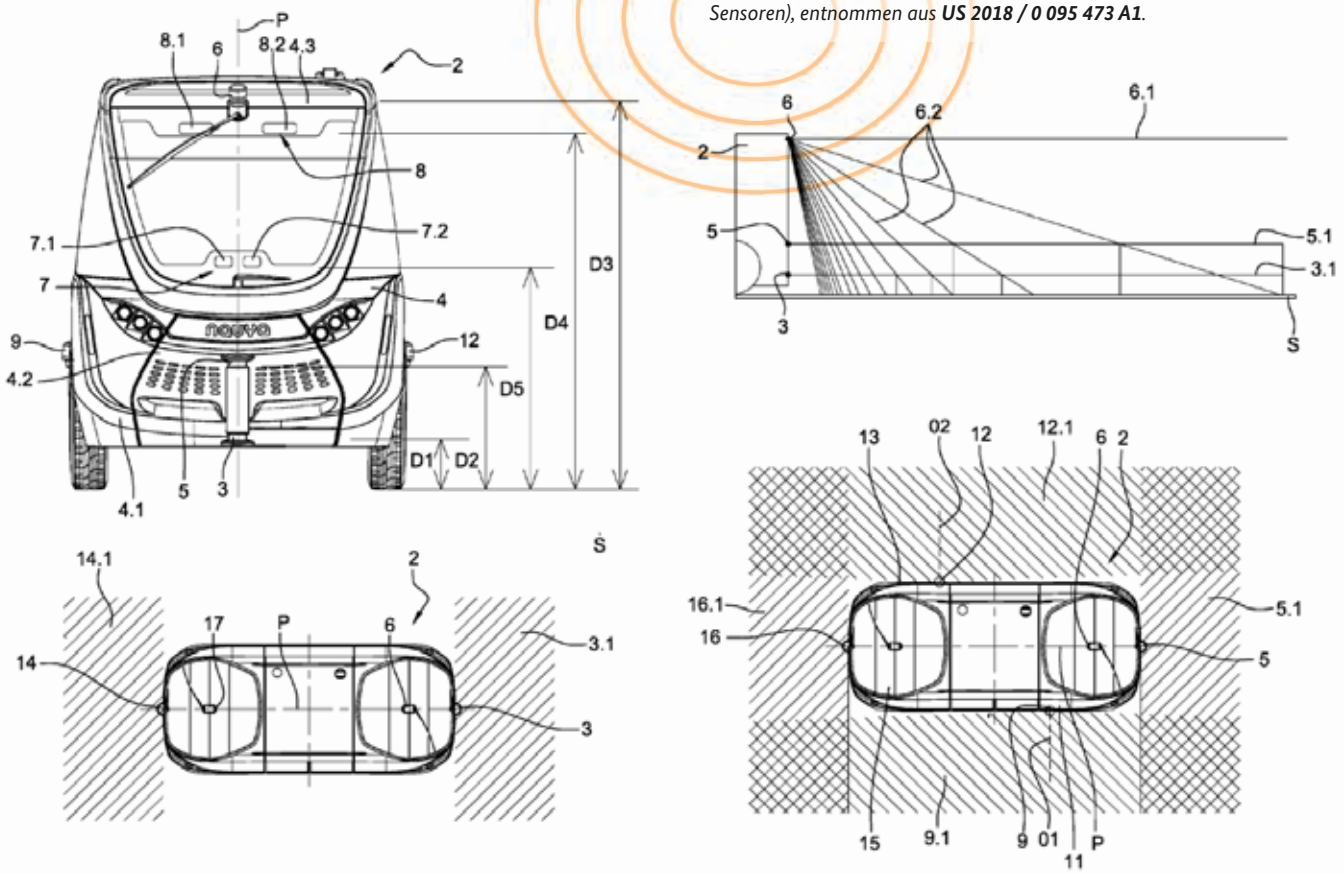


*Abbildung 5: Frontansicht eines autonomen Shuttle-Busses und Positionierung verschiedener Sensoren auf der Außenseite des Fahrzeugs (links oben) sowie Erfassungsbereiche der in unterschiedlichen Höhen am Fahrzeug angebrachten Sensoren (rechts oben: oben am Fahrzeug angebrachter Sensor, links unten: im unteren Bereich des Fahrzeugs angebrachte Sensoren, rechts unten: im mittleren Bereich des Fahrzeugs angebrachte Sensoren), entnommen aus **US 2018 / 0 095 473 A1**.*

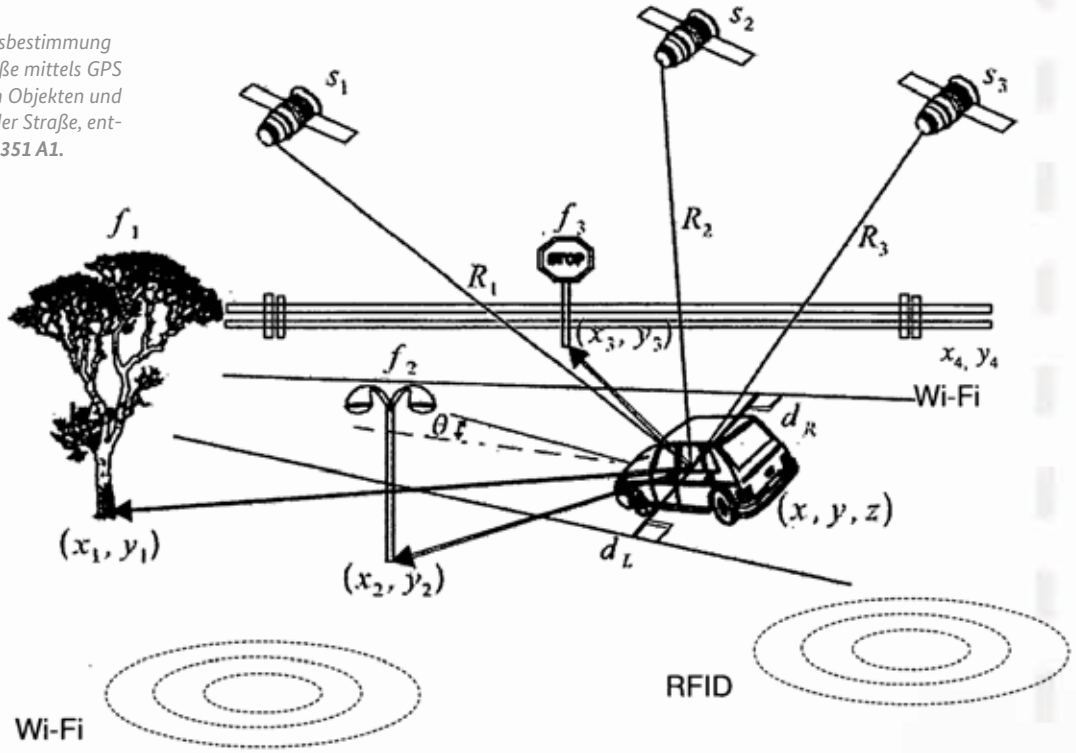


*Abbildung 6: Genaue Positionsbestimmung eines Fahrzeugs auf einer Straße mittels GPS und bekannten Positionen von Objekten und Sendevorrichtungen entlang der Straße, entnommen aus **DE 10 2014 112 351 A1.***

Eine andere Art der Positionsbestimmung schlägt die **DE 10 2014 210 770 A1** vor. Anhand eines Vergleichs von Bodenmerkmalen, die ein Fahrzeug mittels geeigneter Sensoren detektiert, und einer Merkmalskarte, in der diese Merkmale und ihre Position verzeichnet sind, kann der genaue Ort des Fahrzeugs bestimmt werden.

Ebenfalls eine sehr genaue Positionsbestimmung ermöglicht ein System, welches durch die **DE 10 2018 217 734 A1** vorgeschlagen wird. Künstlich angebrachte Landmarken, welche eine eindeutige Kodierung beinhalten,

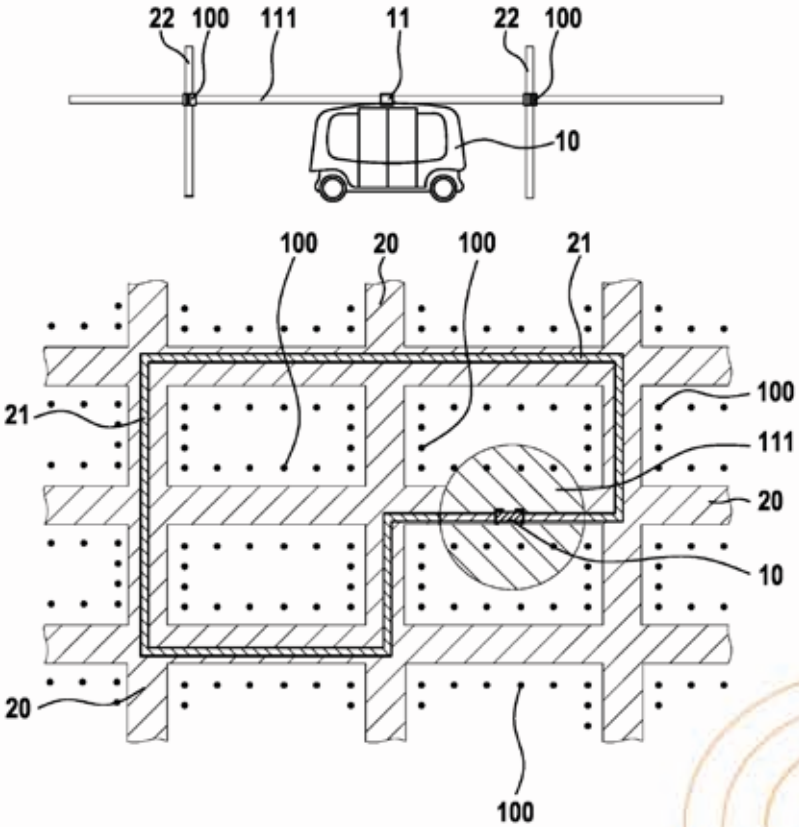


*Abbildung 7: Positionsbestimmung eines Fahrzeugs anhand von mit einer Kodierung versehenen künstlichen Landmarken an einer Straße, entnommen aus **DE 10 2018 217 734 A1**.*



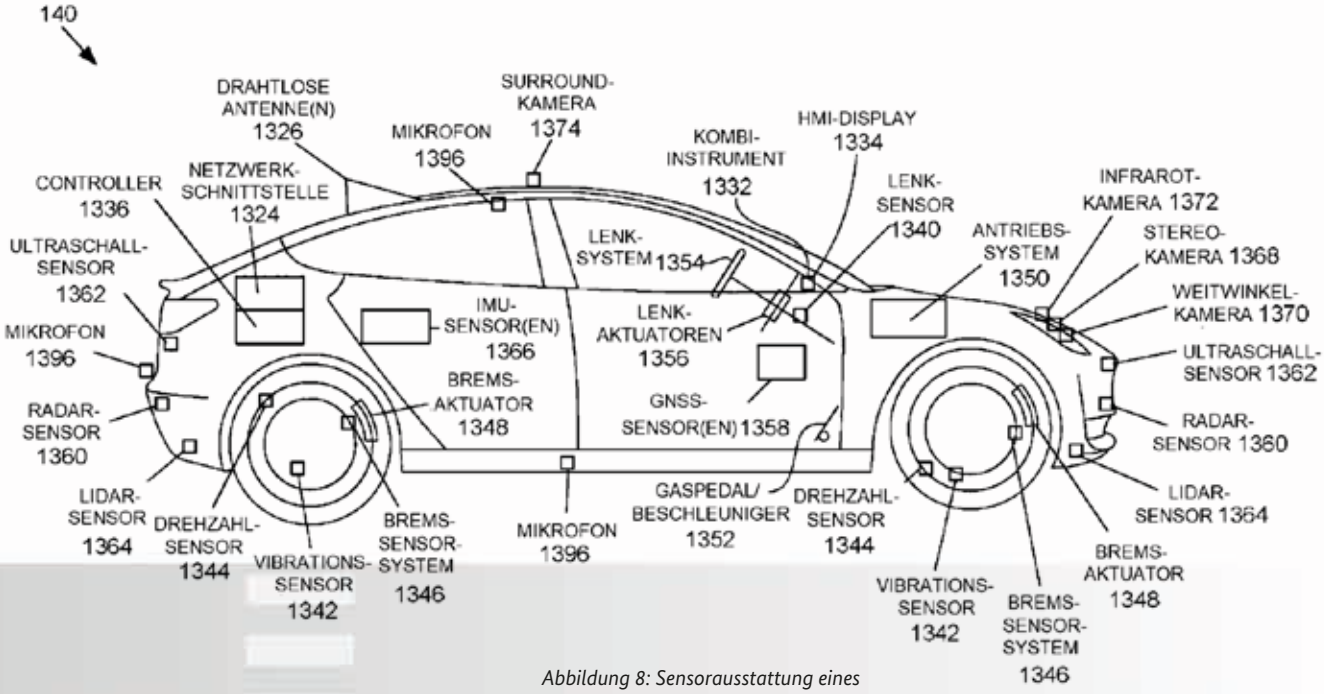


*Abbildung 8: Sensorausstattung eines autonomen Fahrzeugs, entnommen aus **DE 10 2022 112 748 A1**.*

Um eine fahrdynamische Regelung eines autonomen Fahrzeugs zu erreichen, ist eine Überwachung mechanischer Komponenten wie dem Lenkwinkel, der Raddrehzahl oder der Antriebskraft notwendig.

Die **DE 10 2017 213 460 A1** beschreibt neben einer Innenraumsensorik, welche in Kapitel 3.2 vorgestellt wird, eine Umfeldsensorik zur Erfassung der Umgebung sowie Sensoren zum Erfassen von Betriebsparametern des Fahrzeugs, zum Beispiel der Geschwindigkeit, des Lenkwinkels, einer Batteriespannung und dem Motorstrom. Das Fahrzeug agiert unter einer Fahrverhaltensvorgabe, welche so gewählt wird, dass für die Insassen ein möglichst hoher Komfort besteht. Dies wird erreicht durch die Steuerung von Fahrparametern wie der Höchstgeschwindigkeit oder der Reaktionszeit bei Lenk- und Bremseingriffen.

Eine Planung von Bewegungstrajektorien autonomer Fahrzeuge wird durch die **DE 10 2022 112 748 A1** vorgestellt. Hierfür werden verschiedenste Sensoren für Fahrzeugzustände eingesetzt (Abbildung 8). Es wird eine Steuerungsstrategie für das Fahrzeug festgelegt sowie verschiedene alternative Strategien, um im Falle eines unvorhergesehenen Ereignisses eine sichere Fahrt des Fahrzeugs zu gewährleisten.

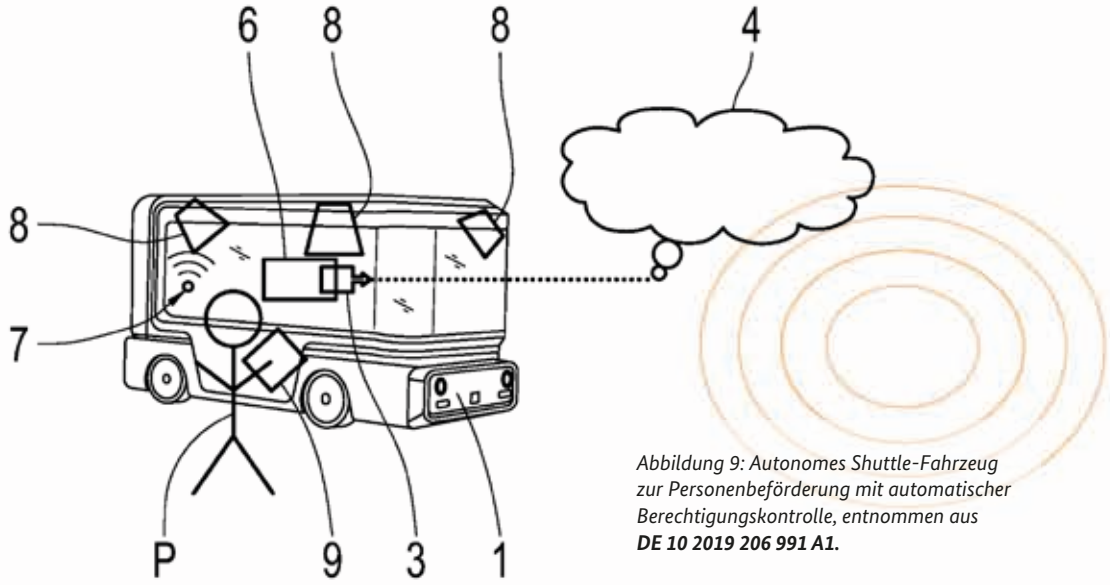


*Abbildung 9: Autonomes Shuttle-Fahrzeug zur Personenbeförderung mit automatischer Berechtigungskontrolle, entnommen aus **DE 10 2019 206 991 A1.***

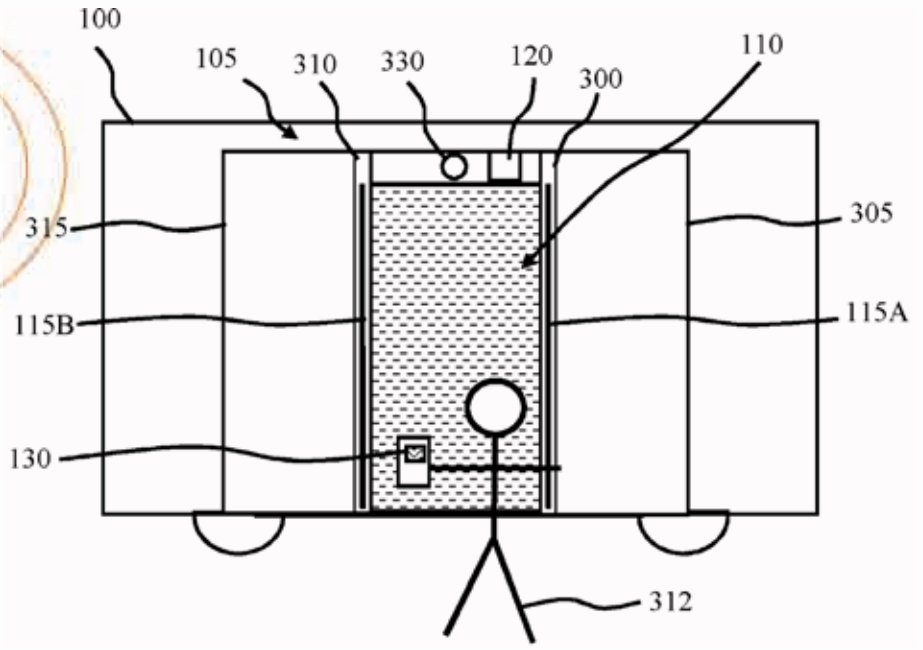


*Abbildung 10: Automatisches Zugangsberechtigungssystem unter Verwendung eines Transponders im Fahrschein, entnommen aus **DE 10 2022 118 140 A1**.*

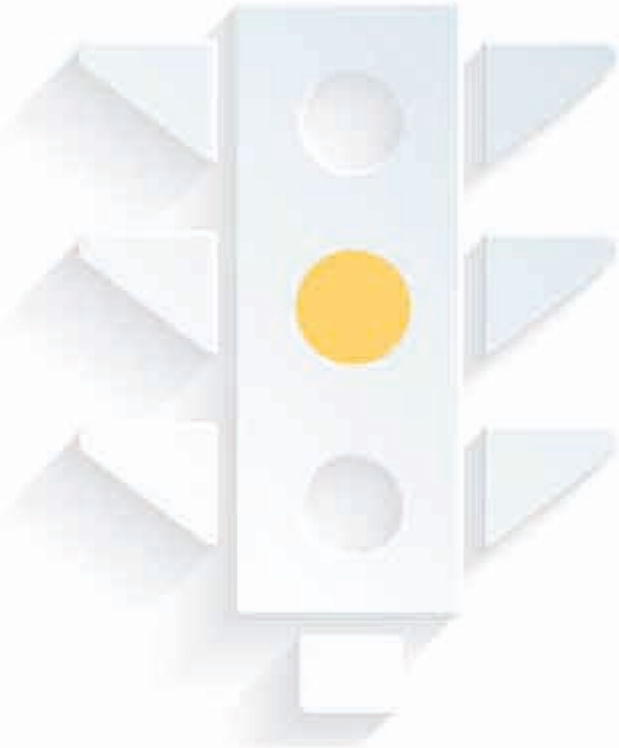
Anforderungen an autonome Shuttle-Services

Trotz der stetigen Weiterentwicklung gibt es einige Herausforderungen, die bei der Umsetzung autonomer Shuttle-Services, insbesondere im städtischen ÖPNV, noch zu bewältigen sind. Hierzu gehören neben den Anforderungen, die durch die Gesetzeslage für den Betrieb autonomer Fahrzeuge vorgegeben werden, sowie der Förderung und Finanzierung von Projekten auch die Ausstattung der Fahrzeuge selbst. Insbesondere müssen autonome Fahrzeuge, welche Passagiere befördern, neben Sicherheitskriterien auch Komfortanforderungen erfüllen, um die Akzeptanz solcher Transportmittel zu gewährleisten. Zudem muss sichergestellt sein, dass die mittels eines fahrerlosen Transportshuttles zu befördernden Fahrgäste berechtigt sind, das Shuttle zu nutzen.

Zugangsberechtigung

Gemäß **DE 10 2019 206 991 A1** (Abbildung 9) kann zur Gewährleistung der Nutzungsberechtigung einer Person eine Datenbank verwendet werden, wobei sich der Fahrgast vor Fahrtantritt autorisieren muss. Dies geschieht durch das Einlesen eines beispielsweise auf einem Smartphone vorhandenen Codes, der bei Erwerb der Fahrkarte erzeugt wird. Zudem wird der Innenraum des Fahrzeugs durch Kameras überwacht, um die Personenanzahl mit der Anzahl der registrierten berechtigten Fahrgäste zu vergleichen.

Die **DE 10 2022 118 140 A1** zeigt eine Einrichtung zur automatischen Kontrolle der Fahrtberechtigung eines Fahrgastes beim Einsteigen, wobei in eine Tür des Shuttle-Fahrzeugs ein Antennenmodul integriert ist, welches ein elektromagnetisches Feld im Eingangsbereich erzeugt. Mittels eines auf dem Fahrschein angebrachten Transponders wird dann die Gültigkeit des Fahrscheins ermittelt und eine Anzeige, zum Beispiel eine rote oder grüne Lampe, angesteuert (Abbildung 10), die dem Fahrgast seine Berechtigung signalisiert, in das Fahrzeug einzusteigen.



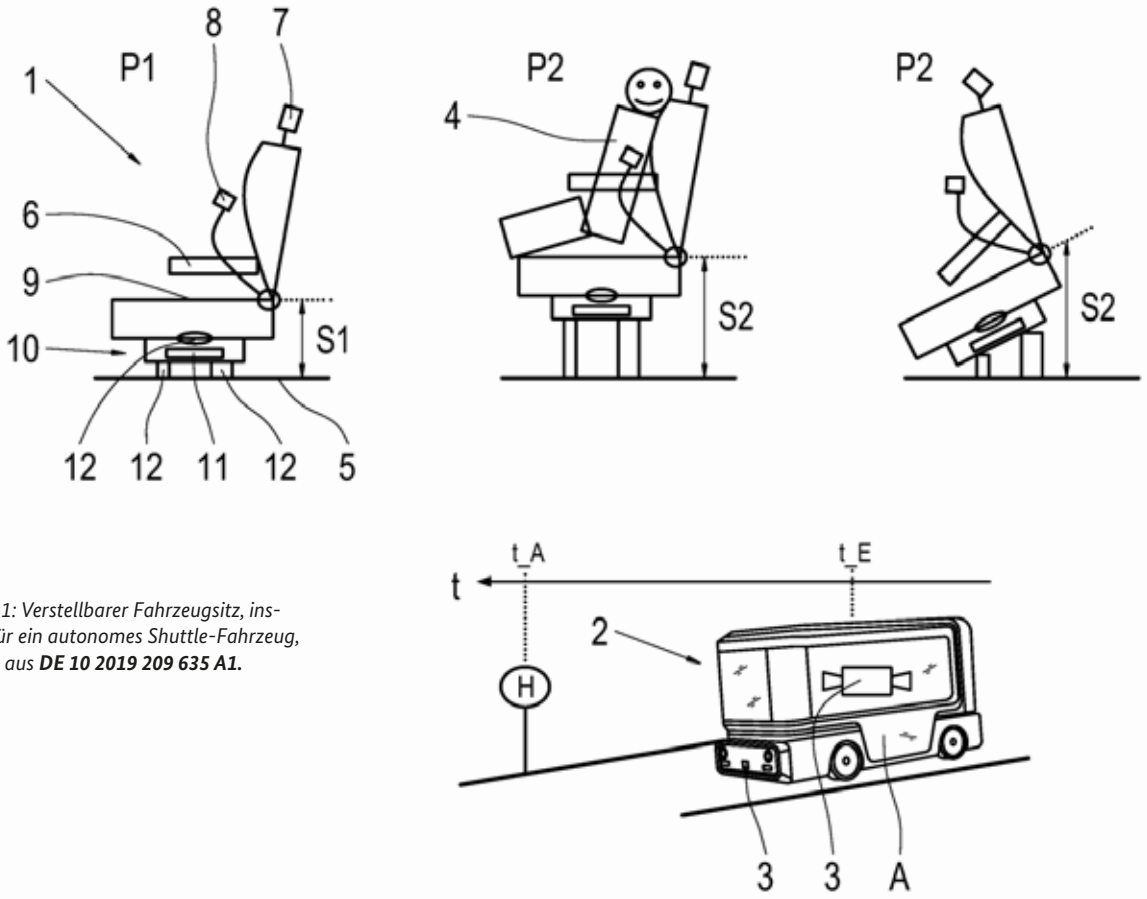


*Abbildung 11: Verstellbarer Fahrzeugsitz, insbesondere für ein autonomes Shuttle-Fahrzeug, entnommen aus **DE 10 2019 209 635 A1.***

Komfort und Fahrgastfreundlichkeit

Autonome Shuttle-Taxis, die im ÖPNV eingesetzt werden, müssen geeignet sein, ein breites Spektrum an Fahrgästen komfortabel zu befördern. Hierzu zählen auch körperlich beeinträchtigte Fahrgäste und Kinder.

Um körperlich beeinträchtigten Fahrgästen die Fahrt mit einem autonomen Shuttle zu ermöglichen, schlägt die **DE 10 2019 209 635 A1** vor, einen Sitz zu gestalten, welcher abhängig von einer Einstiegs- oder Ausstiegssituation in Höhe und Neigung angepasst wird, um beispielsweise das Aufstehen zu erleichtern (Abbildung 11).

Um den Einstieg in einen autonomen Shuttle-Bus zu erleichtern, schlägt die **WO 2023 / 031 281 A1** vor, eine automatisch ausfahrende Einstiegshilfe in Form einer Rampe bereitzustellen, welche unter Berücksichtigung weiterer In-

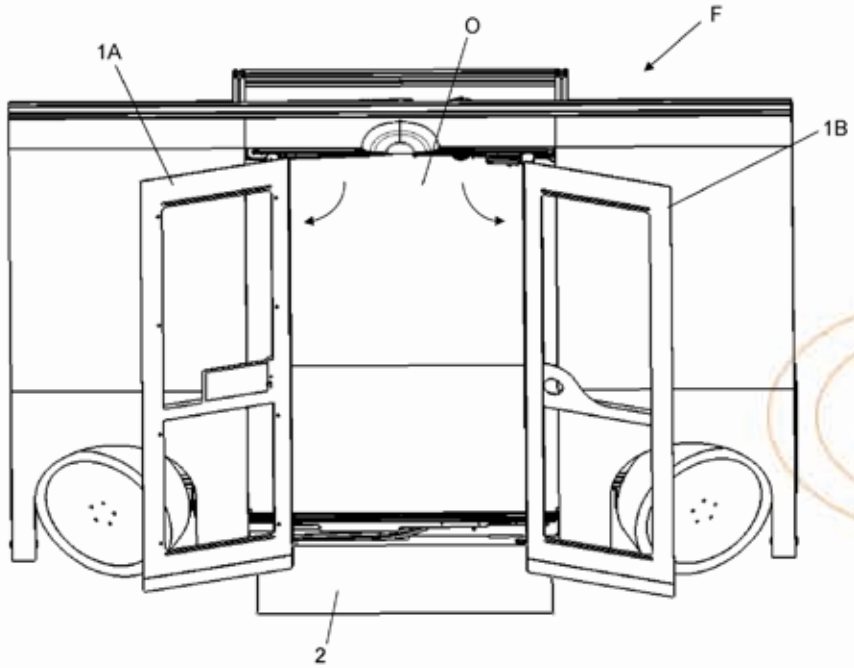


*Abbildung 12: Automatische Einstiegshilfe für ein autonomes Shuttle-Fahrzeug, entnommen aus **WO 2023 / 031 281 A1.***



formationen, die zum Beispiel auf einem Ticket gespeichert sind oder bei denen es sich um eine Positionsinformation des Fahrzeugs handelt, automatisch ausfährt und sich entsprechend ausrichtet (Abbildung 12).

Auch die Berücksichtigung der Gesundheit der Fahrgäste trägt zu einem erhöhten Fahrkomfort bei. So zeigt die **DE 10 2019 210 929 A1** eine Vorrichtung, welche mittels maschinellen Lernens Anzeichen von Husten und Niesen anhand von Geräuschen oder charakteristischen Gesten und Mimiken der Fahrgäste klassifiziert. Werden entsprechende Geräusche oder Gesten erkannt, kann ein Reinigungsroboter entsandt werden, um das Fahrzeug zu reinigen und somit eine Ansteckungsgefahr zu vermindern.

Die **DE 10 2018 114 609 A1** beschreibt ein System zur Erkennung von Verschmutzungen auf dem Äußeren eines Fahrzeugs, welches ein autonomes Shuttle-Fahrzeug sein kann. Nachdem ein Fahrgast an seinem Zielort abgesetzt wurde, erkennt das System Verunreinigungen, sodass das Fahrzeug gereinigt werden kann, bevor es den nächsten Fahrgast abholt.

Die **DE 10 2019 001 991 A1** schlägt zudem vor, jeden Fahrgast hinsichtlich seines Verhaltens während einer Fahrt zu bewerten. Bewertungssysteme gibt es in vielen Bereichen des alltäglichen Lebens. Betreffend den Personentransport werden Fahrgastbewertungen gegenwärtig häufig durch die Fahrer eines Transportangebotes vorgenommen. Aber auch bei autonom betriebenen Transportmitteln ist es sinnvoll, Fahrgäste zu beurteilen, um beispielsweise den Reinigungsaufwand oder das Verhalten gegenüber anderen Fahrgästen einschätzen zu können. In Abhängigkeit von der Fahrgastbewertung wird im System gemäß **DE 10 2019 001 991 A1**

Die erste/letzte Meile

Das Problem der ersten und letzten Meile hat seinen Ursprung in der Telekommunikation und betraf zunächst verkabelte Telefonanschlüsse. Heute findet der Ausdruck in vielen Bereichen Anwendung, beispielsweise auch in den Bereichen Lieferverkehr oder Logistik.

Im Kontext der Mobilität beinhaltet die erste Meile die Strecke vom Startort, meistens von der Wohnung, bis zur ersten Haltestelle des ÖPNV. Die letzte Meile betrifft den Weg von der letzten Ausstiegshaltestelle bis zum Zielort. Diese beiden Wege müssen in der Regel zu Fuß zurückgelegt werden, was bei längeren Fußwegen oder bei eingeschränkter Mobilität problematisch sein kann.

Um dennoch Menschen dazu zu bewegen, öffentliche Verkehrsmittel zu nutzen, werden alternative Mobilitätsdienste eingesetzt. Hierzu zählen Carsharing, Bikesharing oder Ruftaxis, mit denen man von der Haustür bis zur Haltestelle auf schnellem und bequemem Weg gelangt [7, 8].

Eine Lösung des Problems der letzten Meile schlug Ford mit einem sogenannten „Einrad mit Eigenantrieb“ vor, wofür 2015 ein US-Patent erteilt wurde (US 9 211 932 B1, DE 10 2015 108 297 A1). Hierbei kann ein entsprechend ausgerüstetes Rad eines Pkw, das einen eigenen Antrieb aufweist, abgebaut und zu einem Einradfahrzeug mit wenigen Handgriffen umgebaut werden. Ein Pendler kann somit seinen Pkw auf einem Parkplatz außerhalb der Innenstadt abstellen, wobei das einrädrige Fahrzeug zum Bewältigen der Strecke zwischen Fahrzeug und Büro oder einem anderen Zielort dient.

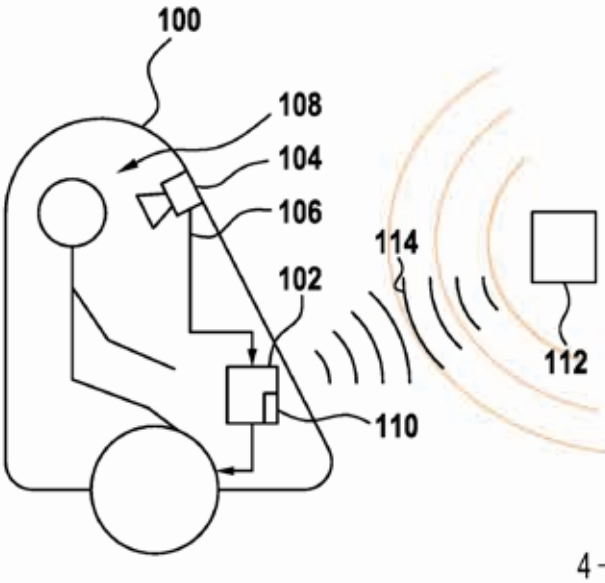
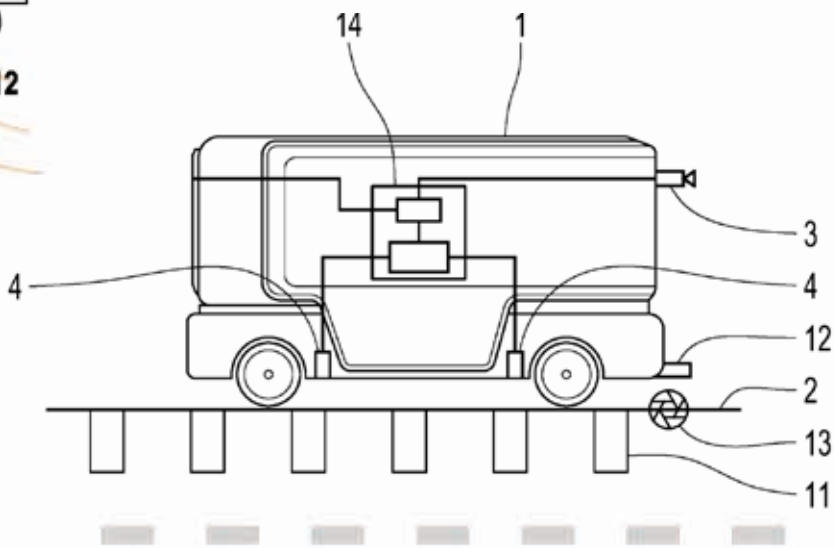


*Abbildung 13: Innenraumsensorik eines autonomen Shuttles zur Anpassung des Fahrverhaltens in Abhängigkeit der Aufmerksamkeit der Passagiere, entnommen aus **DE 10 2017 213 460 A1**.*

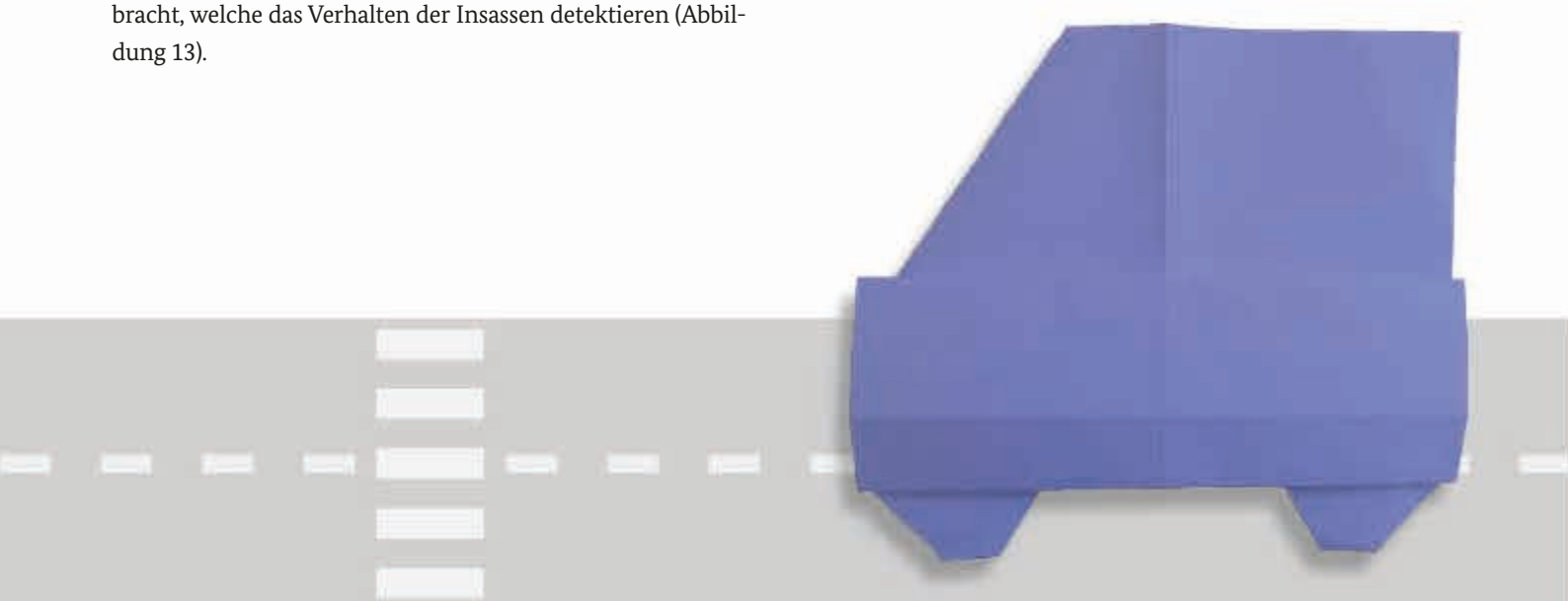
*Abbildung 14: Erkennung eines Straßenschadens durch ein autonomes Shuttle-Fahrzeug, entnommen aus **DE 10 2022 204 831 A1**.*



eine Fahrtroute für das autonome Shuttle geplant, wobei gegebenenfalls eine Mitnahme eines unangenehmen Fahrgastes verweigert wird oder der Preis angepasst wird, wenn mit einem erhöhten Reinigungsaufwand zu rechnen ist.

Für einen höheren Fahrkomfort schlägt die **DE 10 2017 213 460 A1** vor, das Fahrverhalten abhängig von einem Aufmerksamkeitsgrad der Passagiere gegenüber dem Verkehrsgeschehen zu gestalten. So kann ein eher defensives Fahrverhalten gewählt werden, wenn ein Insasse das Verkehrsgeschehen aufmerksam beobachtet, weil er noch nicht ausreichend Vertrauen in das autonome Fahrzeug hat. Oder es kann ein verkehrsflussoptimiertes Fahrverhalten gewählt werden, wenn die Fahrgäste das Verkehrsgeschehen nicht beobachten. Hierfür sind im Innern des autonomen Shuttles Sensoren angebracht, welche das Verhalten der Insassen detektieren (Abbildung 13).

Die **DE 10 2022 204 831 A1** schlägt ein System zur Erkennung von Straßenschäden vor. Diese werden beim Überfahren erkannt und gespeichert, sodass bei einem erneuten Befahren derselben Strecke die Überfahrt des Straßenschadens vermieden werden kann (Abbildung 14). Auch dies steigert den Fahrkomfort.



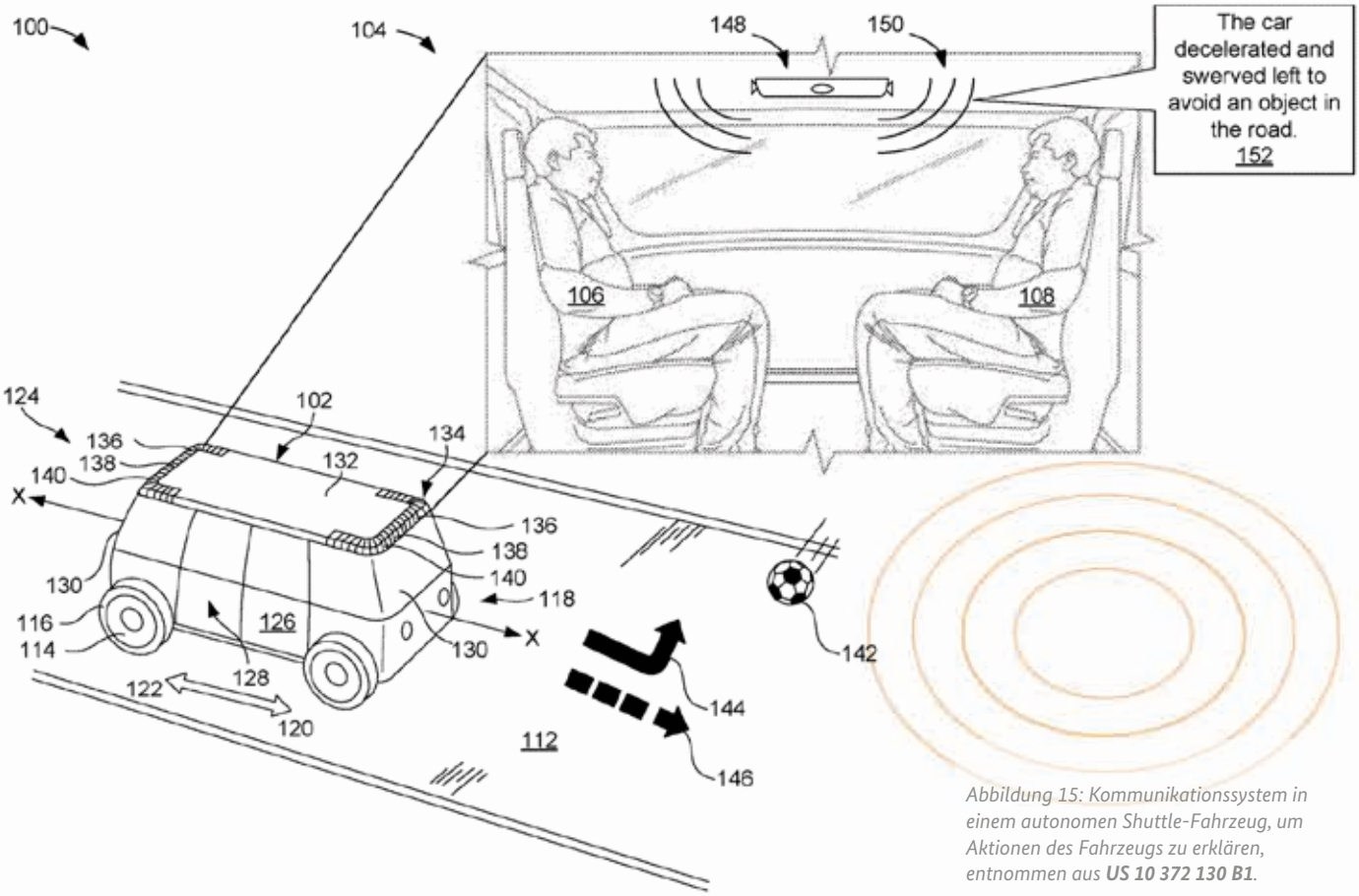


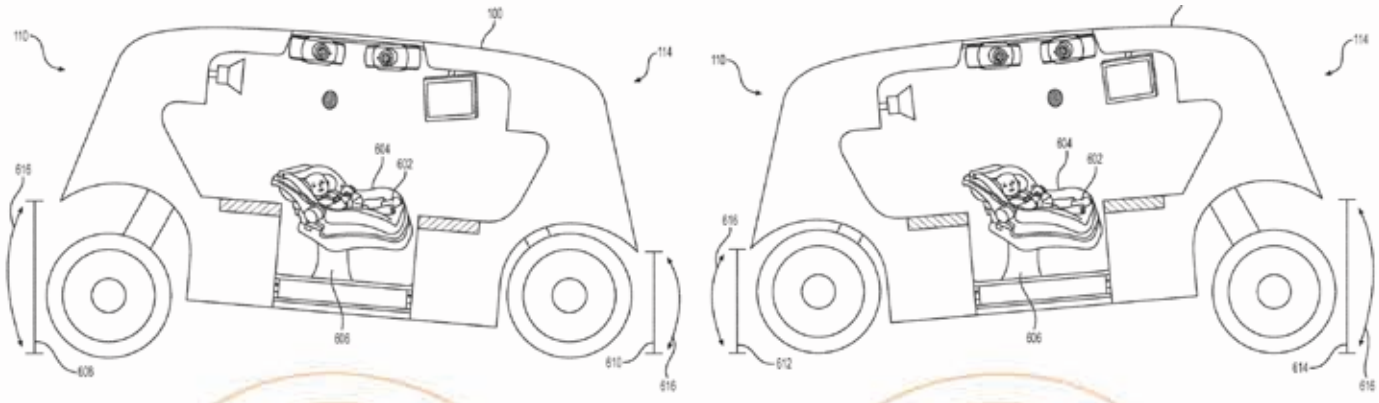
*Abbildung 15: Kommunikationssystem in einem autonomen Shuttle-Fahrzeug, um Aktionen des Fahrzeugs zu erklären, entnommen aus **US 10 372 130 B1**.*

Um das Verständnis und das Vertrauen der Fahrgäste bezüglich einer Fahrt mit einem fahrerlosen Taxi zu erhöhen, schlägt die **US 10 372 130 B1** ein System vor, welches mit den Insassen eines autonomen Shuttles kommuniziert, um Aktionen des Fahrzeuges zu erklären (Abbildung 15).

Ein weiteres System zur Erhöhung des Insassenkomforts beschreibt die **US 11 393 238 B1**. Ein Fahrzeug, das Babys in einem Baby-Kindersitz transportiert, soll die Bedürfnisse der kleinen Fahrgäste erfüllen. Zum Beispiel simuliert das Fahrzeug eine Wiege (Abbildung 16).

Ein weiteres System, welches einen erhöhten Passagierkomfort bietet, zeigt die **US 2023 / 0 332 910 A1**. Hier plant das Navigationssystem des autonomen Shuttles eine Route in der Weise, dass die Passagiere eine Aktivität, die sie gerade ausüben, beenden können. Die Fahrgäste können hierdurch während der Fahrt arbeiten, einen Film schauen oder auch schlafen.

*Abbildung 16: Autonomes Shuttle-Fahrzeug für den Transport von Babys mit einer Wiegefunktion, entnommen aus **US 11 393 238 B1**.*



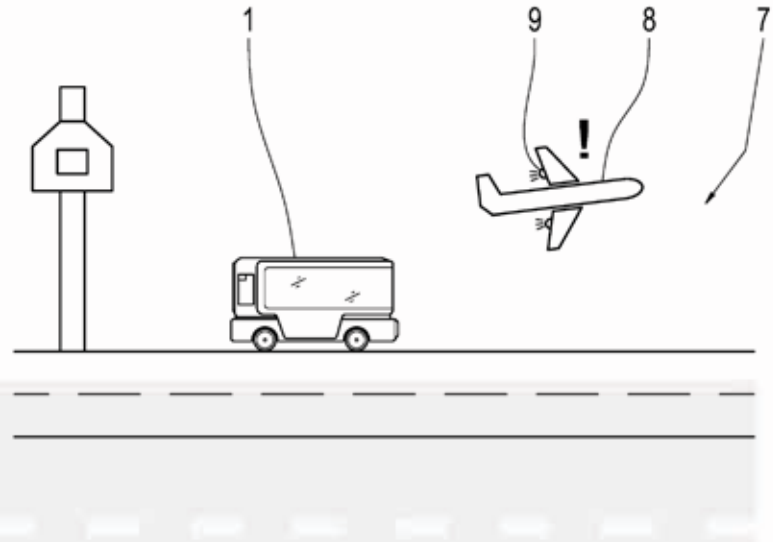


*Abbildung 17: Autonomes Personentransportfahrzeug mit einem Erkennungssystem für laute Geräusche, insbesondere für den Einsatz auf einem Flughafengelände, entnommen aus **DE 10 2019 210 943 A1**.*

Um die Insassen vor lauten Geräuschen zu schützen, zeigt die **DE 10 2019 210 943 A1** ein Fahrzeug, welches Geräusche in seiner Umgebung erkennt. Wird eine bestimmte Lautstärke überschritten, schließen sich automatisch die Türen beziehungsweise werden geschlossen gehalten. Das beschriebene Fahrzeug kann insbesondere als Personentransportfahrzeug auf einem Flughafengelände eingesetzt werden (Abbildung 17).

Verkehrssicherheit

Ein wichtiger Aspekt für autonome Fahrzeuge – im Allgemeinen und insbesondere im Personentransport – ist die Verkehrssicherheit. In einem Notfall muss das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführt werden.

Hierzu wird beispielsweise gemäß der **DE 10 2019 125 401 A1** vorgeschlagen, neben einer geplanten Solltrajektorie auch immer eine Notbahn zu berechnen, die im Ernstfall zum sicheren Stillstand des autonomen Fahrzeugs führt. Zur Absicherung wird eine Umfelderfassung durchgeführt, um potenzielle Kollisionsobjekte zu erkennen.

Die **WO 2023 / 175 280 A1** offenbart ein System zur überwachung einer Flotte von autonom betrie Fahrzeugen, die auch zum Transport von Personen eignet sind (Abbildung 18). Die Fahrzeuge sind in d Lage, Hindernisse zu erkennen und entsprechend die Fahrt anzuhalten. In einem solchen Fall wird eine Kommunikationsverbindung mit dem Fernüberwachungssystem aufgebaut. Nach Überprüfung der Sensordaten bezüglich sicherheitsrelevanter Aspekte wird dann ein Signal zum Neustart übermittelt oder dieser verhindert.

Sollte sich ein autonomes Fahrzeug in einer Blockadesituation befinden, das heißt aus einer Situation nicht mehr selbstständig herausfinden, schlägt die **DE 10 2019 119 524 B3** vor, das Fahrzeug durch einen Teleoperator fernzusteuern.

Essenziell für eine sichere Fahrt im Straßenverkehr ist auch die Zuverlässigkeit der Umgebungserfassung sowie der Erfassung der Fahrsituation. Hierfür sind die Sensoren im Fahrzeug in der Regel redundant verbaut.

Zusätzlich wird beispielsweise gemäß der **DE 10 2016 214 123 A1** die Funktionsfähigkeit der Sensoren und weiterer Fahrzeugkomponenten überwacht. Die genannte Schrift zeigt ein System, welches die Leistungsfähigkeit der Sensoren im Fahrzeug bestimmt. Diese kann zum Beispiel durch Witterungsbedingungen beeinflusst werden. Wird in einer Fahrsituation eine größere Reichweite oder eine höhere räumliche oder zeitliche Auflösung der Erfassung benötigt, kann eine Anpassung beziehungsweise eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit des entsprechenden Sensors erfolgen, indem beispielsweise ein Ausklappen desselben aus seinem Gehäuse oder der Einsatz eines weiteren Sensors erfolgt.

Autonome Fahrsysteme sehen sich im realen Straßenverkehr einer Vielzahl von Verkehrsszenarien gegenüber, insbesondere im Mischbetrieb mit anderen Verkehrsteilnehmern.

Die **DE 10 2021 208 422 A1** beschreibt hierzu ein System, welches eine Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und anderen Verkehrsteilnehmern ermöglicht, um Konfliktsituationen zu lösen und eine kooperative Interaktion zu ermöglichen. Hierzu detektiert das Fahrzeug seine Umgebung und analysiert basierend auf der Erkennung von Objekten und Verkehrsteilnehmern verschiedene Verkehrsszenarien. Anschließend wird eine Gefahrenbewertung vorgenommen. Abhängig von dieser gibt das Fahrzeug Signale aus, unter anderem in Form von Lichtprojektionen, Bild- oder Videoanzeigen, Geräuschen oder Sprachausgaben.

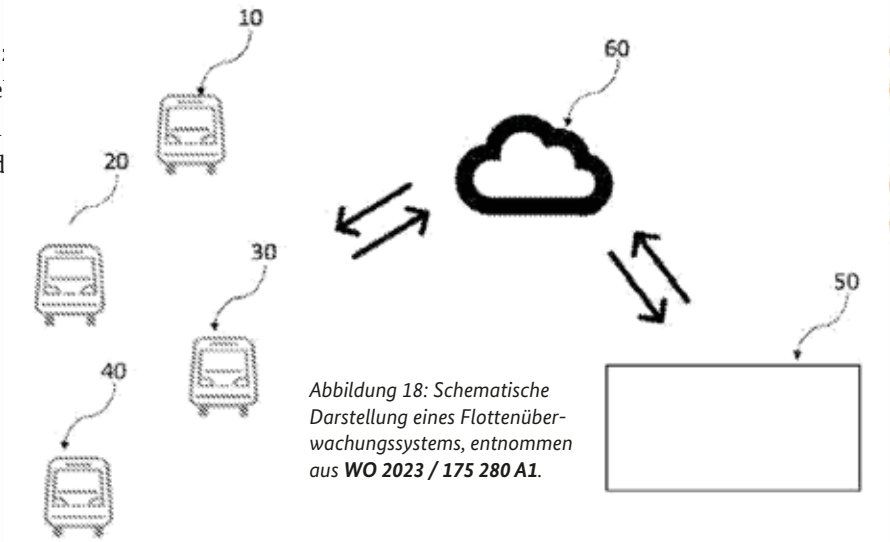


*Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Flottenüberwachungssystems, entnommen aus **WO 2023 / 175 280 A1**.*

Ausblick



Angesichts der Vielzahl an Projekten zur Förderung und Erprobung autonomer Shuttle-Fahrzeuge im ÖPNV [5, 6] und der Vielzahl an Patentanmeldungen zu autonomen Fahrzeugen im Allgemeinen und autonomen Shuttles im Speziellen steht es außer Frage, dass autonome Shuttle-Services in Zukunft zumindest einen Teil des ÖPNV ausmachen werden. Das Problem der ersten beziehungsweise letzten Meile könnte durch flexible Fahrtangebote zumindest verkleinert und die Anzahl privater Pkw auf den Straßen verringert werden. Das Potenzial des Beitrags zum Klima- und Umweltschutz, welches der Einsatz autonomer Shuttle-Taxis im ÖPNV bietet, ist groß. Die Fahrzeuge könnten zudem Impulse für den Warenverkehr in innerstädtischen Bereichen liefern.

Dennoch gibt es noch Herausforderungen zu überwinden. Die derzeitige Gesetzgebung ermöglicht es nicht, dass sich autonome Fahrzeuge im Straßenverkehr ohne einen Fahrzeugführer bewegen dürfen. Auch die Sensorik muss in einer Weise vorliegen, dass Ausfälle entweder vollständig vermieden oder durch redundante gleichwertige Erfassungseinheiten kompensiert werden. Die heutigen Erprobungen im Realbetrieb [5, 6] liefern wichtige Erkenntnisse für ein Voranschreiten der autonomen Mobilität im ÖPNV.

Viele Ideen zur Erhöhung des Komforts der Fahrgäste bergen ein Potenzial für eine erhöhte Selbstständigkeit für Personen, die bisher auf Unterstützung beim Zurücklegen von Strecken angewiesen sind. Dies betrifft insbesondere Personen mit körperlichen Beeinträchtigungen oder auch Kinder.



Dr. Nina Tetzlaff



studierte an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und an der University of Liverpool Physik und Astrophysik. Während ihrer Diplomarbeit und Promotion arbeitete sie im Rahmen des Sonderforschungsbereichs/Transregio 7 „Gravitationswellen“. 2014 trat Dr. Tetzlaff als Patentprüferin ins DPMA ein und leitet gegenwärtig die Prüfungsstelle für Verkehrs-Regelung oder -Überwachung für Straßenfahrzeuge.

Verständlich, gehaltvoll, inspirierend: DPMA-Präsidentin Eva Schewior erklärt, warum wir die Informationsbroschüre „Erfinderaktivitäten“ zur Publikation „erfinden“ weiterentwickeln – und warum die Lektüre sich längst nicht nur für Fachleute lohnt.

„Ein Heft für Lösungen von morgen“



Aus den Erfinderaktivitäten ist erfinden geworden. Das Heft hat eine deutlich andere Aufmachung. Was steckt dahinter?

Mit den Beiträgen, die Patentprüferinnen und Patentprüfer recherchieren und verfassen, geben wir Einblick in das Spektrum an Erfindungen, mit denen wir uns beim Deutschen Patent- und Markenamt befassen. Von autonomen Shuttlefahrzeugen bis zu Supermagneten für die Energiewende. Damit wollen wir Fachleute aus den jeweiligen Branchen und Bereichen ebenso erreichen und begeistern wie breit interessierte Laien. Verständlich, gehaltvoll, inspirierend: Diese Kriterien haben Redaktions- und Grafik-Team beim Neuausrichten der Publikation geleitet. Der Titel *erfinden* steht dafür. Und zudem für die Dynamik im Innovationsgeschehen. Eine Dynamik, die enorme Kraft entfalten und so helfen kann, gesellschaftliche Herausforderungen zu lösen.

Das Themenspektrum dieser Ausgabe reicht von Hochleistungs-Displays bis hin zur Suche nach extraterrestrischem Leben. Wie wählt das Amt die Themen aus?

Mit unseren rund 1.000 Kolleginnen und Kollegen in der Patentprüfung haben wir hochqualifizierte Experten auf allen Gebieten der Technik. Sie haben einen sehr guten Überblick und tiefes Wissen über Innovationen in ihrem jeweiligen Fachgebiet. Sie sind die Impulsgeber. Wenn sie ein Thema erkannt haben, das wirtschaftlich und gesellschaftlich höchst relevant erscheint oder einfach technisch sehr interessant ist, schlagen sie es für die Publikation vor. Teils sind das Themen, die öffentlich noch gar nicht so bekannt sind – es aber noch werden. Denn aus den Patentanmeldungen von heute werden in der Regel die Produkte von morgen.

Warum können wir die technische Entwicklung an Patentanmeldungen so gut ablesen?

Um mit einer Erfindung wirtschaftlich erfolgreich zu sein, sind gewerbliche Schutzrechte und vor allem Patente unerlässlich. Sie schaffen ein Verwertungsrecht auf Zeit und bieten so einen enormen Anreiz für Innovationen. Das ist das Wunderbare an unserem Schutzrechtssystem: Es sorgt für einen fairen Ausgleich zwischen dem Interesse der Allgemeinheit an gesellschaftlichem Fortschritt und dem notwendigen Gewinnstreben von Unternehmen. Dass wir Patente für technische Erfindungen erteilen, lässt sich also auch als



Gesellschaftsvertrag betrachten. Mit den Beiträgen im Heft *erfinden* wollen wir den Menschen auch deutlich machen, welche kreative Kraft dieser Gesellschaftsvertrag entfaltet.

Das Heft zeigt nur ausgewählte Innovationen. Patentierte Erfindungen gibt es viel mehr …

Wenn es uns gelingt, mit der Lektüre einzelne Schlaglichter zu setzen, das Interesse anzuregen und für die Recherche in unseren Datenbanken zu begeistern, dann haben wir viel erreicht. In unseren Datenbanken liegt die ganze Fülle an Informationen zum Stand der Technik. Dokumente, die unsere Patentprüferinnen und Patentprüfer bei ihrer Arbeit nutzen, sind hier für alle zugänglich. Über alle Branchen hinweg findet sich jede Menge Inspiration für die Innovationen von morgen.

Was haben Sie bei der Lektüre der Beiträge gelernt?

Oh, da muss ich mich auf Beispiele beschränken. Überrascht hat mich, dass Windkraftanlagen auch als Datensammler für die Gewittervorhersage in einer Region fungieren können. Die Detektionsmöglichkeiten für Blitz und Donner weiter zu verbessern, ist wiederum wichtig, um Menschen zu schützen, die in der Wartung von Windkraftanlagen arbeiten. Ein zweites Beispiel, ebenfalls sehr wichtig in Sachen Sicherheit: Wie lassen sich optische Irritationen bei Head-up-Displays von Fahrzeugen vermeiden? Es geht darum, bei der Anzeige von Daten auf Windschutzscheiben sogenannte Laserspeckles, die fürs Auge störend wirken, in den Griff zu bekommen. Ein drittes Beispiel: Viel erfahren habe ich über das Design von Autos seit den 50-er Jahren, speziell über Finnen und Flossen, die zur Aerodynamik beitrugen. Also ein Phänomen der Bionik, die technische Lösungen aus Beobachtungen der Tier- und Pflanzenwelt ableitet. Ich kannte zwar das Design, hätte vor der Lektüre des Beitrags allerdings nicht das Vokabular dafür gehabt, die auffälligen Gestaltungselemente zu benennen.



Was dürfen wir in Zukunft von der Publikation erfinden erwarten?

Den Kern bilden die Beiträge unserer Prüferinnen und Prüfer aus allen Technikgebieten. Hier erfahren Sie, wie kreative Menschen an technische Herausforderungen herangehen – und wie Lösungen von morgen aussehen könnten. Wir werden darüber hinaus das Innovationssystem aus verschiedenen Perspektiven beleuchten. Die Publikation *erfinden* wollen wir über Mittler wie zum Beispiel Gründerzentren, Industrie- und Handelskammern, Hochschulen und Bibliotheken breit für unsere Nutzergruppen und für alle Interessierten verfügbar machen – gedruckt und digital. Wir wollen für die immense Bedeutung geistigen Eigentums werben. Dafür sind konkrete Erfindungen das beste Mittel!



Finnen und Flossen als Teile der Natur im Fahrzeugbau

Dr. Andreas Monokroussos

#Bionik
#Fische
#Fahrzeugbau
#Fahrzeugdesign
#Autoindustrie
#Aerodynamik
#Strömungstechnik
#Stilelemente

Die Geschichte der Finnen und Flossen im Automobilbau ist einzigartig [2]. Sind diese besonderen Fahrzeugmerkmale nur als prägendes Stilmittel einer kurzen Epoche zu sehen oder haben sie auch wichtige technische Einflüsse auf das Fahrzeug?

Mit diesem Artikel soll zunächst ein kurzer historischer Überblick gegeben werden, wie charakteristische Merkmale aus der Tierwelt, die Flosse und die Finne, Fahrzeuge einer ganzen Epoche prägten. In Europa und in den Vereinigten Staaten. Es werden einige Lösungen präsentiert, wie diese Gestaltungselemente bei Automobilen wieder aufgegriffen werden. Beispiel Cabriolet-Fahrzeuge. Der Artikel wird mit einem Ausblick auf das mögliche weitere Verwenden von Finnen und Flossen in der künftigen Mobilität, insbesondere im Fahrzeugbau, schließen.

Avantgardistisch und visionär

Eine der ikonischen Modeerscheinungen im Automobildesign, die weltweit den größten Einfluss hatten, waren die Heckflossen. Sie erreichten in den 1950er Jahren ihre größte Popularität, hielten sich allerdings nicht lange [2].

In der Welt des Automobildesigns gab es im Laufe der Jahre verschiedene Elemente, die zu charakteristischen Merkmalen wurden und sogar eine Epoche zu definieren vermochten, wie zum Beispiel die einziehbaren oder klappbaren Scheinwerfer, auch „Schlafaugen“ genannt. Eine der ausgefallensten Modeerscheinungen waren Elemente, mit denen Fahrzeugdesigner die Form der tierischen Schwanzflossen aufgriffen. Inspiration kam in den 1950-er Jahren zusätzlich von Flugzeugen und Raketen [2].

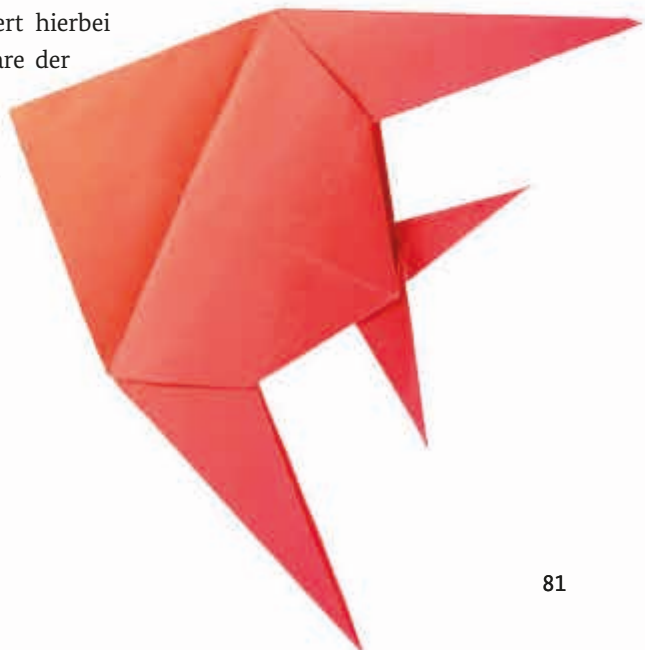
Finnen und Flossen: Sie waren ein Sinnbild der Avantgarde und eine Vision für die Zukunft in einem sich ständig weiterentwickelnden Sektor wie der Automobilindustrie. Der ästhetische Trend wurde vor allem in den Vereinigten Staaten populär, kam dann nach Europa. Bemerkenswert hierbei ist, dass die ersten Exemplare der sogenannten Flossen- und Finnenautos zunächst aus Europa kamen und nicht aus den Vereinigten Staaten [2].

Der Ursprung von Flossen und Finnen

Besondere Körperteile von Fischen, die Fächern oder Segeln ähneln und dem Fisch zur Bewegungsteuerung im Wasser dienen, sind Flossen. Es gibt Brust-, Rücken- und Schwanzflosse. Rückenflossen, insbesondere die von Haien oder Walen, werden als Finne oder manchmal auch als Dorsalflosse bezeichnet [3], [4].

Eine Flosse oder Finne stabilisiert mit ihrer typischen dreieckigen Form den Körper des Fisches beim Bewegen durchs Wasser. Die Rückenflosse hilft dem Meeresfisch, in seiner Schwimmlage zu bleiben und nicht ins Rollen zu geraten. Sie dient dem Fisch damit vor allem zur Lagekontrolle – ähnlich einem Schiffskiel [4].

Darüber hinaus dient die Flosse als wesentliches Identifikationsmerkmal, um einzelne Fische nach ihrer Art zu unterscheiden [3].





Die Anfänge in Europa

Bereits in den 1920-er Jahren wurde bei Autos mit der Implementierung von aerodynamischen Bauteilen, wie der Heckflosse, experimentiert. Eines der ersten Unternehmen, das dieses Konzept testete, war Auto Union mit einem Prototyp im Jahr 1923. Aufwind kam auch aus der Luftfahrt. Die Entwicklung der legendären Zeppeline Graf Hindenburgs inspirierten die Form von Heckflossen für Fahrzeuge. Angestrebt: bessere Fahrzeugstabilität und bessere aerodynamische Reaktion auf der Straße [2].

Einige Zeit später, im Jahr 1934, begann der tschechoslowakische Automobilhersteller Tatra, der Pionier in der Aerodynamik war, erste Exemplare von Fahrzeugen mit Heckflosse, wie den Tatra T77, serienmäßig herzustellen. Andere europäische Marken verwendeten ebenfalls solch ein aerodynamisches Element, wie beispielsweise Bugatti in einigen Coupé-Karosserien des Typs 51 sowie Peugeot mit dem Prototyp 402 Andreau – nicht zu vergessen der Prototyp von Mercedes-Benz T80 mit zwei Heckflossen und zwei kurzen Flügeln [2].

In den späten 1950-er Jahren wurden von Fahrzeugdesignern Flossen, Flügel oder Finnen als neue „Speedsymbole" des beginnenden Jet- und Raketenzeitalters für ausdrucksstarke Fahrzeugmerkmale entdeckt. Sie waren stylische Insignien einer allerdings kurzlebigen Strömung. Sie durften an keinem Sportcoupé dieser Zeit fehlen. Bis heute unvergessener Vertreter: der Volvo P1800 als Volvos quasi erstes sportliches Hauptmodell. Der Volvo P1800 faszinierte mit robuster Technik und neuen Sicherheitsmerkmalen [5].

Das Oberklasse-Automobil schlechthin im Deutschland der 1960-er Jahre war das von Mercedes Benz gebaute Modell „große Flosse", auch bekannt unter der Baureihenbezeichnung W111. Eingeführt im Jahr 1959, löste dieses neue Modell die bis dahin gebauten großen Ponton-Modelle ab. Die namensgebenden Heckflossen an den hinteren Kotflügeln des W111 sahen schnittig und elegant aus – und sollten aus Sicht der Konstrukteure das Einparken erleichtern. Daher auch die Bezeichnung „Peilstege". Zahlreiche Chromapplikationen im Außen- wie auch im Innenraum, schmucke, mit einer dezenten Chromkante verzierte Heckflossen steigerten den Wert des Fahrzeugs: In den 1960er-Jahren war es bedeutungsvoll, so ein Auto zu fahren. [1].

Derweil hatten immer weitere Marken wie Peugeot, Simca, Packard, Vauxhall, Opel, Alfa Romeo und Fiat in Europa dieses besondere Element an ihren Fahrzeugmodellen übernommen [2]. Auch in jüngerer Zeit wird dieses bezeichnende Merkmal immer wieder von Herstellern aufgegriffen, wie beispielsweise in dem von der Firma Lancia zwischen 1997 und 2000 gefertigten Modell Kappa Coupé, das Heckflossen mit Ursprung in der Regenrinne am Fahrzeugdach aufzeigte.

Die Vereinigten Staaten als Beschleuniger

Das erste Paar Flossen am Heck eines Serienautos wurde der Öffentlichkeit 1948 in den Vereinigten Staaten von der damals neu vorgestellten Cadillac-Reihe präsentiert. Die sogenannten „Protofinnen“ bei den Fleetwoods Modellen von 1937, deren Rücklichter in kleinen Ausstülpungen untergebracht waren, konnten bis dahin zunächst schon als erste kleine Heckflossen angesehen werden [2].

Globale Konflikte der damaligen Zeit hatten in den Vereinigten Staaten zu großen Fortschritten in der Luftfahrt. Eines der bekanntesten amerikanischen Flugzeuge der damaligen Zeit war die Lockheed P-38 Lightning mit ihren beiden großen hinteren Schwanzflossen [2]. Mit Blick auf das Flugzeug der Firma Lockheed sollte von nun an auch das Heck der neuen Serienmodelle der Firma Cadillac von 1948 mit zwei Schwanzflossen als markantes Fahrzeugelement gebildet werden [2].

Obwohl die ersten erschienenen Modellkonzepte umstritten waren, tauchten in den 1950-er Jahren bei allen großen Fahrzeugherstellern in den Vereinigten Staaten bei ihren neuen Serienfahrzeugen schnell Heckflossen auf [2]. Zunächst wurden die Heckflossen mit Luxus und Exklusivität verbunden. Ab dem Jahr 1952 wurden sie dann an allen neuen Fahrzeugen eingesetzt und einer breiten Käuferschicht zugänglich gemacht. Im Weiteren begann sogar ein Wettbewerb insbesondere zwischen den großen Herstellern, wer die radikalsten Fahrzeugdesigns präsentieren konnte. Dabei spielten die Heckflossen eine ganz zentrale Rolle, wodurch ihre äußere Gestaltung immer komplexer wurde und sie sehr schnell zum wichtigsten äußeren Teil eines Autos wurden, was auch einen enormen Einfluss auf die Fahrzeugästhetik hatte [2].

Die Fahrzeugdesigns wurden im Weiteren mit jedem Jahr und jedem neuen Modell immer kunstvoller. Ende der 1950-er Jahre, insbesondere im Jahr 1957, war eines der bekanntesten und auffälligsten Modelle mit viel Chrom und hohen Heckflossen das zu der Zeit von der Firma Chevrolet entwickelte Cabriolet Bel Air Convertible. Konstruktive Übertreibungen, wie bei den Modellen der Firma Cadillac, gab es bei dieser Karosserie trotzdem nicht. Im Jahr 1959 kam es zum Wendepunkt, als die neuen Modelle der Firma Cadillac, insbesondere das Modell Eldorado, den Höhenrekord für Heckflossen brachen, wobei ihre jeweiligen Spitzen am Heck des Fahrzeugs mehr als einen Meter über dem Boden reichten. Diese Marke wurde von keinem anderen Serienauto der damaligen Zeit überschritten. Von da an verringerte sich im Laufe der kommenden Jahre über die ganze Branche hinweg und bei allen kommenden Modellen die Höhe dieser Heckelemente drastisch [2].

Von 1938 bis 1997, also 59 Jahre laufend in der Produktion: Damit ist der Chrysler New Yorker das wohl am längsten ohne Unterbrechung hergestellte Auto-Modell in den Vereinigten Staaten. Noch im Jahr 1961 erreichte der Chrysler New Yorker einen weiteren Rekord: die längsten Heckflossen an einem Serienauto. Die Flossen setzten bereits bei den vorderen Dreiecksfenstern an und wuchsen keilförmig nach hinten an. Im gleichen Jahr präsentierte die Firma Lincoln ihr neues Modell Continental. Der Beginn einer neuen Fahrzeug-Generation, die sich – geprägt durch gerade und klare Formen – völlig von den stilistischen Ausschweifungen der Vergangenheit löste. Die Ära der Heckflossen war auf einmal vorbei [6].



Finnen und Flossen in der Fahrzeug-aerodynamik

Wenn wir mit ausgebreiteten Armen gegen den Wind laufen, müssen wir viel Kraft aufwenden. Es fällt uns leichter, wenn wir die Arme anlegen und uns ducken. Wir Menschen können durch unsere Körperhaltung in wenigen Augenblicken unsere Aerodynamik ändern und verbessern. Bei Autos ist das deutlich aufwendiger, aber es lohnt sich. „Es gibt heute keine Maßnahme, die so viel Verbrauch reduziert zu so niedrigen Kosten [wie die Aerodynamik]“, sagt Dr. Teddy Woll, Leiter Aerodynamik und Windkanäle von der Firma Mercedes-Benz. Ein aerodynamisches Fahrzeugdesign ist die logische Konsequenz [7].

Dabei kommen Flossen und Finnen zur Wirbelglättung ins Spiel. Diese leiten die Luft an einem sich bewegenden Körper, wie zum Beispiel einem Fahrzeug, außen entlang und verbessern die Luftverteilung am Heck. Insbesondere bei schneller Fahrt oder Kurvenfahrt kann die Finne oder Flosse als aerodynamisches Bauteil helfen, das Fahrzeug zu stabilisieren, den Luftwiderstand zu reduzieren und den Abtrieb zu verbessern.

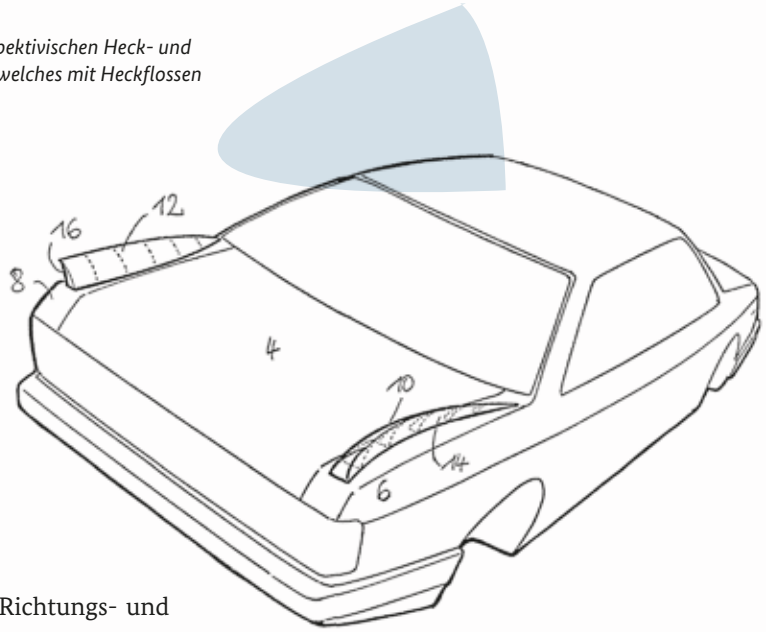
Finnen und Flossen als markante Merkmale bei Fahrzeugen

Wie aufgezeigt, werden Flossen und Finnen vorwiegend als aerodynamische und/oder stilistische Elemente am Fahrzeug verwendet.

In den 1950-er und 1960-er Jahren hatten Flossen und Finnen in erster Linie eine stilistische Funktion. Als diese Modeerscheinung Vergangenheit war, sind sie schnell verschwunden, bis auf kleine Anlehnungen an wenigen Fahrzeugmodellen. Später wurden sie an Rennautos, vornehmlich in der Formel 1 und bei Fahrzeugen, insbesondere bei Cabriolets, zur Verbesserung der Aerodynamik eingesetzt. Hierbei wurden die Finnen vor allem als seitliche Ausläufer im Heckbereich des Verdecks eingesetzt. Zudem entwickelten sich auch Lösungen, sie als Kappen, Kuppeln, Hutzen (Öffnungen, die den Einlass von Luft durch den Fahrtwind ermöglichen) oder Hüllen an Heckklappen auszuformen. Das Ziel: entstehende Verwirbelungen hinter den Verdeckabschlusskanten, bei Heckscheiben oder Überrollbügeln vermeiden oder mildern.

Heute kommen Finnen bei Cabriolets bevorzugt auf den oberen Seiten der hinteren Kotflügel, der Verdeckabdeckungen und/oder der Heckklappen vor. Sie können auch direkt als Erhebungen des Heckdeckels ausgeformt sein und sind dann integraler Bestandteil der Verdeckabdeckung und/oder der Heckklappe. Sie sind fest eingeformt und können dann nicht separat abgenommen oder bewegt werden.

*Abbildung 1: Darstellung einer perspektivischen Heck- und Seitenansicht eines Kraftfahrzeugs, welches mit Heckflossen versehen ist (**DE 292 83 42 A1**).*



Die Finnen und die Verdeckabdeckung und/oder die Heckklappe sind in solchen Fällen einstückig aus demselben Material gefertigt. Besonders vorteilhaft könnten ein oder zwei Überrollbügel, die normalerweise die elegante Erscheinung eines Cabriolets stören würden, wie beispielsweise „aufgesetzte Henkel“, in die sogenannten Heckfinnen integriert sein.

Ein wesentlicher Vorteil von Finnenverdecken liegt darin, dass der Verlauf des Cabriolet-Verdecks im oberen Bereich der Finnen endet und nicht schon vorher abnimmt. Dies führt zu einer Kopffreiheit im Bereich der hinteren Sitzreihe fast wie bei einer Limousine. Mehr Komfort für die Menschen!

Im Folgenden werden einige markante Beispiele für den Einsatz von Heckflossen und Heckfinnen gezeigt, die heute relevant sind.

Flossen bei Schrägheckfahrzeugen

Während einer schnellen Fahrt von Autos mit Stufen- oder Schrägheck entstehen hinten am Heck zwei gegenläufige Wirbel, deren Achse etwa parallel zur Fahrzeuglängsrichtung ausgerichtet ist. Die Luft strömt in der Längsmittelebene des Fahrzeugs abwärts. Dort verstärken sich die Wirbel gegenseitig und strömen seitlich hinter dem Fahrzeug dann wieder aufwärts. Die gegenläufigen Wirbel haben ein verhältnismäßig großes Volumen und verzehren somit viel Energie in Form eines erhöhten Luftwiderstandes während der Fahrt.

Um die Richtungs- und Fahrstabilität bei schneller Fahrt zu erhöhen, kann an jeder Seite am Heck eine nach oben stehende, etwa parallel zur Fahrzeuglängsrichtung verlaufende Flosse angebracht sein. Damit soll der am Fahrzeug vorbeiziehende Luftstrom beeinflusst werden.

Die hinter dem Heck des Fahrzeugs entstandenen großvolumigen und gegenläufig drehenden Wirbel werden mittels Flossen gestört und somit verkleinert. Der durch die Wirbelbildung entstehende erhöhte Luftwiderstand des Fahrzeugs und der dadurch bedingte Energieverlust während der Fahrt wird entsprechend vermindert. Vorteilhaft: Die Flossen selbst als aerodynamische Teile haben kaum einen Einfluss auf die Wirbelbildung hinter dem Fahrzeug.

Wie in Abbildung 1 gezeigt, weist ein mit einem Stufenheck ausgebildetes Fahrzeug auf den beiden seitlich neben einer Kofferraumklappe 4 ausgebildeten Kotflügeln 6, 8 je eine Flosse 10, 12 auf. Die Aufstandsflächen der Flossen 10, 12 auf der Fahrzeugkarosserie sind dabei derart gekrümmt, dass sie sich, von hinten und in Fahrzeuglängsrichtung gesehen, zunächst der Fahrzeugmittelebene nähern und sich dann von ihr entfernen. Dadurch werden die Außenflächen 14, 16 der Flossen 10, 12 bezogen auf die Fahrzeuglängsrichtung konkav gekrümmt. Nach oben sind die Flossen dabei auswärts geneigt, wobei die Außenflächen 14, 16, bezogen auf die Senkrechte, ebenfalls konkav gekrümmt sind. Nach vorne in Fahrzeuglängsrichtung laufen die Flossen spitz aus.

Aufgrund dieser Flossengestaltung wird erreicht, dass ein Teil der außen am Fahrzeug entlang und hinter der Heckscheibe einwärts strömenden Luft von den Außenflächen 14, 16 der Flossen erfasst und außen am Fahrzeug entlang und hinter dem Fahrzeug nach unten geleitet wird. Mit Hilfe dieser Luftströmung wird die Bildung von großvolumigen, gegenläufigen Wirbeln hinter dem Fahrzeug gestört.



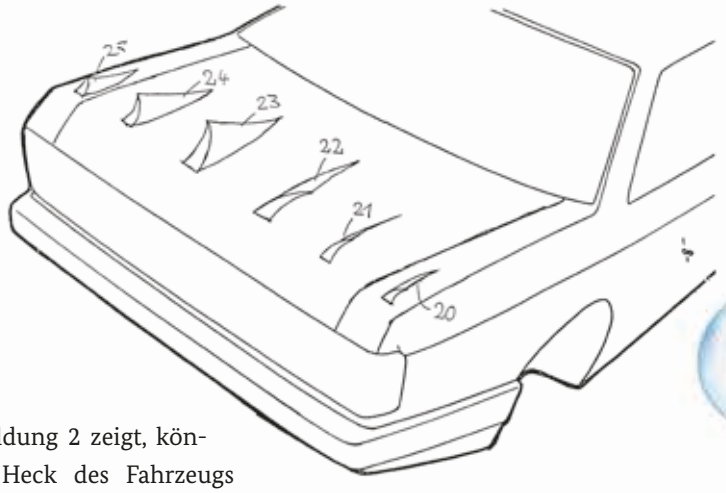


*Abbildung 2: Darstellung einer perspektivischen Fahrzeugheckansicht mit einer Formation von mehreren parallel und mit zur Fahrzeugmittelebene hin ansteigenden Größe angebrachten Flossen (**DE 292 83 42 A1**).*

Wie Abbildung 2 zeigt, können am Heck des Fahrzeugs auch mehrere kleine Flossen 20 bis 25 angebracht sein, deren Außenkonturen ähnlich denen in Abbildung 1 beschriebenen Außenflächen 14, 16 gestaltet sind. Zudem weist jede der Flossen 20 bis 22 und 25 bis 23 mit zunehmender Nähe zur Fahrzeugmittellängsebene eine ansteigende Größe auf.

Indem die kleinen Flossen zusätzlich in ihrer Orientierung leicht angewinkelt angebracht sein können, entstünde eine strömungsgünstigere Gesamtausrichtung in einer Kombination der Strömungswirkungen der einzelnen Flossen. Die zu erzielende Wirkung dabei ist, die zunächst parallel zur Fahrzeuglängsrichtung strömende Luft stärker nach außen abzuleiten.

Finnen als Abdeckelemente

Bei zweisitzigen Sportwagen, wie dem Roadster oder dem Speedster, soll mittels eines Windschotts oder einer integrierten Heckscheibe in Form einer Schutzwand bei der Fahrt mit offenem Verdeck das Eindringen von Luftströmung verhindert werden. Weniger Zugluft und mehr Komfort für die Insassinnen und Insassen. Da der Stauraum bei diesen sportlichen Fahrzeugtypen entsprechend klein ausfällt, wird solch eine Schutzwand zusätzlich als der rückwärtige Abschnitt des Verdecks genutzt. Damit bilden Dachteil und Schutzwand zusammen das Verdeck oder den ganzen Dachaufbau. Folglich wird bei dieser Art von Dachaufbau ein nur geringer Stauraum für das Dachteil benötigt. Die Schutzwand kann aufgrund ihrer Doppelnutzung stehen bleiben. Solche funktionalen Schutzwände bestehen in der Regel aus durchsichtigen Kunststoffmaterialien und werden als Heckscheiben genutzt.

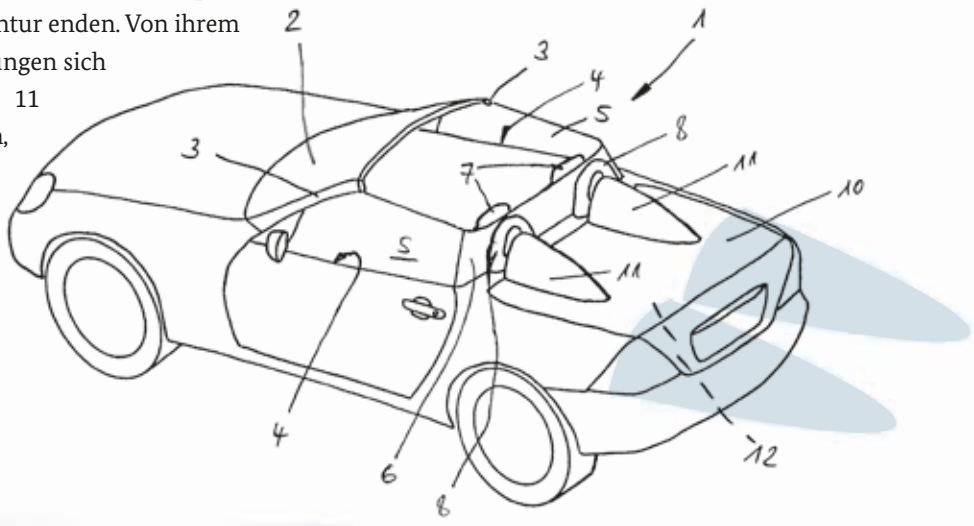
Um die Bedienung beim Öffnen des Daches oder des Verdecks zu vereinfachen, wird das Dachteil durch ein Führungsgestänge bewegungsgesteuert. Bei geschlossenem Verdeck ist es weitgehend von dem dann ebenfalls geschlossenen Heckdeckel verdeckt. Um eine fast vollständig verborgene Verlegung des Führungsgestängepaares des Dachteils zu ermöglichen, werden entsprechend zugeordnete Erhebungen oder Ausbuchtungen am Heckdeckel vorgenommen.

In Abbildung 3 ist ein Sportwagen als Speedster 1 ausgebildet. Die Frontscheibe 2 wird seitlich von den beiden A-Säulen 3 begrenzt, die entlang dem oberen und unteren Rand der Frontscheibe 2 zu einem Rahmen miteinander verbunden sind. Hinter dem Rahmen der Frontscheibe 2 ist der Innenraum des Speedsters 1 oberhalb der Bordwandoberkanten 4 entlang seinem Umfang durch ein transparentes Glasband umschlossen. Dieses Glasband besteht aus den rahmenlosen Seitenfenstern 5 der Seitentüren, die bei den A-Säulen 3 beginnen und die sich zum vollständigen Offenfahren im zugehörigen Seitentürkörper versenken lassen, und einer aus Mineralglas oder Kunststoff bestehenden Schutzwand 6, die sich an die hinteren Randseiten der Seitenfenster 5 anschließt. Während die Schutzwand 6 in ihrem Mittelbereich fast eine plane Scheibe ist, sind ihre seitlichen Randstreifen von oben gesehen leicht schräg nach vorn gekrümmt, wodurch die seitlichen Schmalseiten der Schutzwand 6 bei geschlossenen Seitenfenstern 5 unmittelbar hinter der hinteren Randseite des zugeordneten Seitenfensters 5 liegen.

Das sportliche Erscheinungsbild eines Speedsters 1 wird insbesondere dadurch verstärkt, dass auf dem Heckdeckel 10 des Fahrzeugs zwei erhabene Nachlaufkörper 11 angeordnet sind. Diese haben die Form einer Lufthutze und reichen bis zur Vorderkante des Heckdeckels 10, wo sie jeweils hinter einem zugeordneten Überrollbügel 8 mit einer an dessen Rundquerschnitt angepassten Querschnittskontur enden. Von ihrem vorderen Abschluss ausgehend verjüngen sich kontinuierlich die Nachlaufkörper 11 als Stromlinienkörper nach hinten, wobei sie sich bis in den hinteren Längenbereich des Heckdeckels 10 erstrecken können. Die Nachlaufkörper 11 bestehen dabei aus der entsprechend hochgewölbten Beplankung des Heckdeckels 10 selber. Da die Lenkerpaare als Führungsgestänge jeweils im Bereich eines der beiden zugeordneten Nachlaufkörper 11 aus dem Heckstauraum herausgeführt werden, um das Dachteil zu bewegen, werden sie, wie in Abbildung 3 gezeigt wird, bei geschlossenem Heckdeckel 10 vom zugeordneten Nachlaufkörper 11 abgedeckt und können nicht gesehen werden.

Solche Nachlaufkörper in ihrer Stromlinienform sind den Finnen nachempfunden und haben in dieser Ausführungsart nicht nur eine aerodynamische, sondern auch eine schützende, abdeckende Funktion. Derartige stromlinienförmige Abdeckungen im Heckbereich lassen sich in gleicher Weise auch bei Roadstern und in entsprechend angepasster Form auch bei größeren Cabriolet-Fahrzeugen mit ihren größeren Faltverdecken bewerkstelligen.

*Abbildung 3: Sportwagen in Form eines offenen Speedsters mit zwei stromlinienförmigen Nachlaufkörpern, ausgebildet auf dem Kofferraumdeckel (**DE 198 25 651 A1**).*



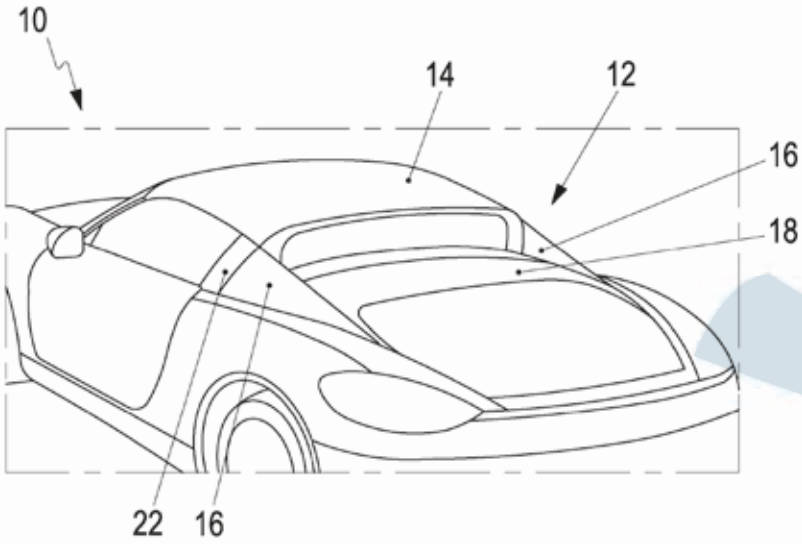


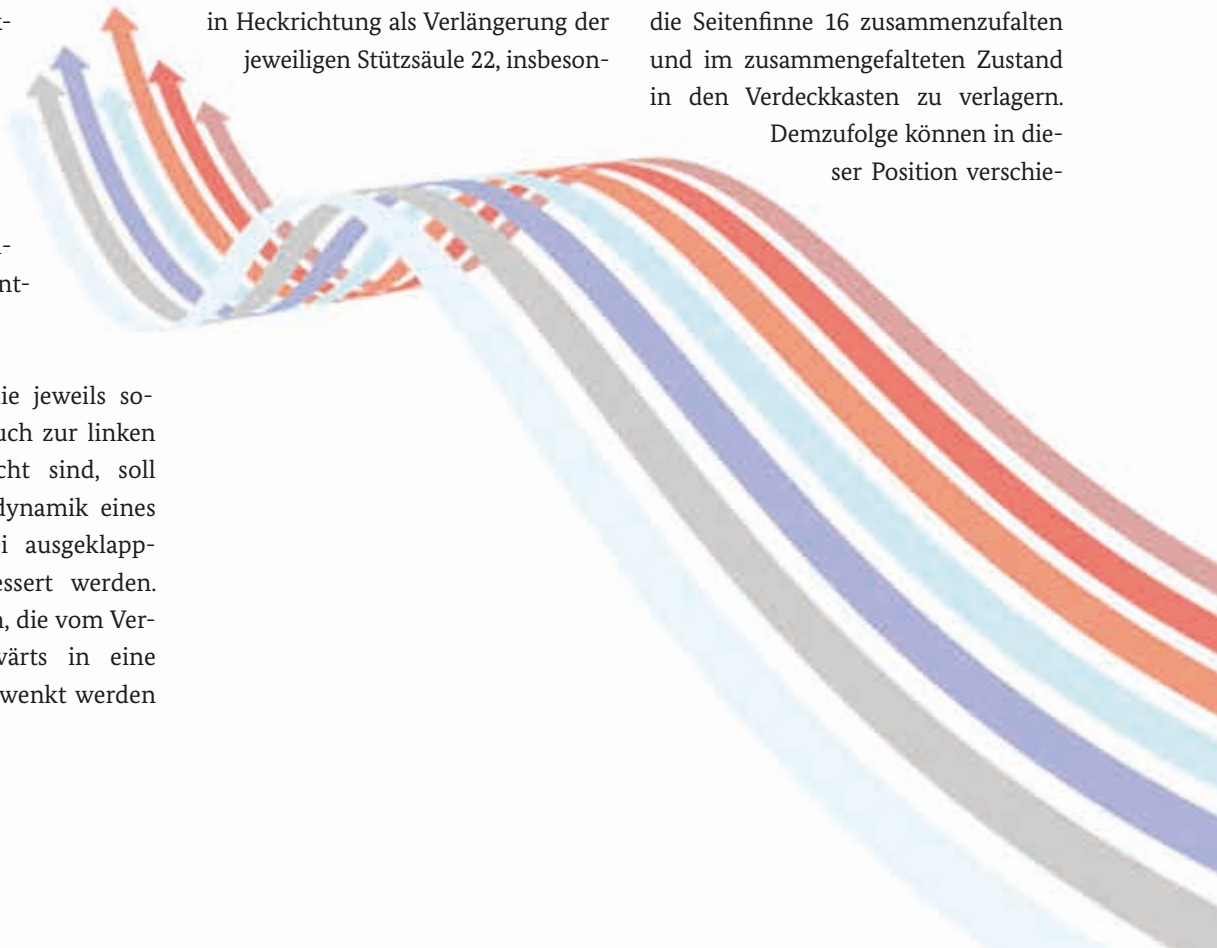
*Abbildung 4: Seitliche Heckansicht eines Fahrzeugs mit geschlossenem Verdeck, Stützsäulen, Seitenfinnen und Kofferraumdeckel (**DE 10 2014 118 337 A1**).*

Finnen als bewegliche aerodynamische Bauteile

Bei Cabriolet-Fahrzeugen, bei denen Verdecke entweder aus einem großen oder mehreren flächig und fest ausgeformten Elementen bestehen und die geklappt oder gefaltet werden, den sogenannten Hartschalen- oder Klappverdecken („Retractable Hardtops (RHT)“), kommt es zunächst auf ein raumsparendes Ablagesystem an, um nicht viel Nutzraum im Kofferraum mit dem Ablegen des Verdecks zu belegen, einer möglichst guten Aerodynamik und natürlich des Erhalts eines attraktiven optischen Gesamteindrucks des Fahrzeugs an sich. Um das zu erreichen, werden verschiedenste konstruktive Maßnahmen an der Karosserie entwickelt.

Mittels Seitenfinnen, die jeweils sowohl zur rechten als auch zur linken Fahrzeugseite angebracht sind, soll insbesondere die Aerodynamik eines Cabriolet-Fahrzeugs bei ausgeklapptem Faltverdeck verbessert werden. Bewegbare Seitenfinnen, die vom Verdeckkastendeckel auswärts in eine Abklappposition verschwenkt werden können, lassen einen Verlauf näher zur Mittellängsachse des Cabriolet-Fahrzeugs zu. Auf diese Weise wird der optische Eindruck nicht durch eine in der Karosserieseitenwand sonst vorzuhaltenden Fuge gestört.

Ein variabel verstaubares Dachsystem 12 für ein Cabriolet-Fahrzeug 10, wie es in Abbildung 4 gezeigt wird, besteht aus einem beweglichen Verdeck 14, einem Verdeckkastendeckel 18 zum Abdecken des Verdecks 14, wenn es in den Kofferraum (Verdeckkasten) abgelegt wurde und jeweils einer Seitenfinne 16 auf jeder Heckseite. Die Seitenfinnen dienen in Heckrichtung als Verlängerung der jeweiligen Stützsäule 22, insbesondere der B-Säule oder der C-Säule. Dabei sind die Seitenfinnen 16 nicht starr an der Karosserie oder am Verdeckkastendeckel 18 angeformt, sondern sind bewegbar je nachdem, wie sich das Verdeck 14 bewegt. Hierbei spricht man von einer Nutzposition, wenn das Verdeck 14 ausgeklappt ist und die Seitenfinne 16 als Verlängerung der jeweiligen Stützsäule 22 sichtbar wird oder von einer Abklappposition, in welcher die Seitenfinne 16 zunächst von dem Verdeckkastendeckel 18 um eine Schwenkachse weg geschwenkt wird, um dann in eine Einklappposition gebracht zu werden, in welcher sie in vertikaler Richtung unterhalb des Verdeckkastendeckels 18 verstaut wird. Im Falle einer Finnenausführung mit Stoffbezug ist es möglich, die Seitenfinne 16 zusammenzufalten und im zusammengefalteten Zustand in den Verdeckkasten zu verlagern. Demzufolge können in dieser Position verschie-



dene Teile der jeweiligen Seitenfinne übereinander und/oder nebeneinander angeordnet werden, was eine kompakte und einfachere Unterbringung im begrenzten Ablageraum des Verdeckkastens ermöglicht.

In der Darstellung der Abbildung 4 handelt es sich um die Nutzposition der Seitenfinnen 16, die jeweils an einer Stützsäule 22 anliegen. Damit der Verdeckkastendeckel 18 dann geöffnet und das Verdeck 14 an den Seitenfinnen 16 vorbei bewegt werden kann, müssen die Seitenfinnen 16 von der Fahrzeugmittellängsachse weg in die in Abbildung 5 dargestellte Abklappposition geschwenkt werden.

Je nachdem, wie viel Bauraum für den Verdeckkasten zur Verfügung steht, können beide Seitenfinnen in vertikaler Richtung in den Verdeckkasten versetzt und/oder verschwenkt werden, so dass sie sich in der eingeklappten Stellung des Verdecks in einer horizontalen Lage neben dem Verdeck oder in einer vertikalen Lage oberhalb oder unterhalb des verstauten Verdecks befinden. Dadurch kann wichtiger Nutzraum für den Verdeckkasten eingespart werden.

Außerdem können die Seitenfinnen als Gestaltungselement in das Design der Stützsäule eingepasst werden. Die Stützsäule kann zudem von einem flexiblen Stoffmaterial der Seitenfinne ganz oder teilweise überspannt sein. Als steife Elemente können die Seitenfinnen den aeroakustischen Komfort bei Fahrtwind am Fahrzeug verbessern und als Stylingelemente können sie sich beispielsweise mit einer besonderen farblichen Akzentuierung zum Verdeck absetzen.

Die Finne als Element einer verwandelbaren Karosserie

Cabriolet-Fahrzeuge werden aufgrund von ganz bestimmten typischen Teilen, wie einem bewegbaren Faltverdeck, das sowohl aus festen Dachteilen als auch aus Spriegeln (quer zur Fahrzeuglängsachse aufgestellte Metallstreben) mit einem Bezugstoff bestehen kann, charakterisiert. Wenn sich Bauteile wie das Verdeck oder die Fahrzeugklappen bewegen können, spricht man auch von einer verwandelbaren Karosserie. Diese besteht aus einem bis zur Gürtellinie des Fahrzeugs reichenden Grundkörper, hinzu kommt mindestens ein versenkbares Dachteil oder Faltverdeck, einer Heckscheibe sowie den Gestängeklappen und einer Heckklappe. Hierbei können durch ineinander verwandelbare Karosserieformen folgende Fahrzeugtypen entstehen: Coupé (ganz geschlossen), Roadster (oben und hinten offen), Landaulet (oben zu, hinten offen) oder Targa (oben offen, hinten zu). Der Targa ist ein von der Firma Porsche entwickeltes Fahrzeugmodell. Die Kontur aller dieser Karosserietypen soll – von der Seite betrachtet – der eines Fließhecks entsprechen. Die das Fließheck seitlich begrenzenden Teile werden mitunter als Finnen bezeichnet.

Bildet die Heckklappe mit ihrem Heckfenster das Fließheck am Fahrzeug, ist es ein sportliches Coupé. Ist die Heckscheibe in der Horizontalen verschwenkbar, bilden die Seitenteile der Heckklappe die Finnen. Je nachdem, ob die Dachteile oder das Stoffverdeck geschlossen sind oder unter der Heckklappe verstaut sind, ist das Fahrzeug mit abwärts geschwenkter Heckscheibe dann entweder als ein Roadster oder als ein Landaulet anzusehen, wobei im Heckbereich des Verdecks eine über die gesamte Breite zwischen den Seitenteilen (Finnen) reichende Öffnung frei bleibt. Ist bei verstautem Dach oder Verdeck die Heckscheibe in einer aus-

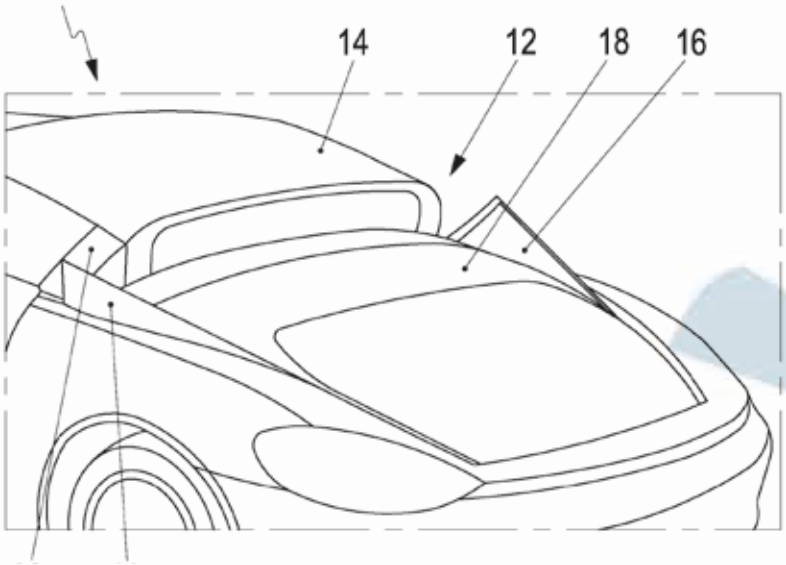


*Abbildung 5: Perspektivische Heckansicht mit sich nach außen und abwärts abklappenden Seitenfinnen (**DE 10 2014 118 337 A1**).*

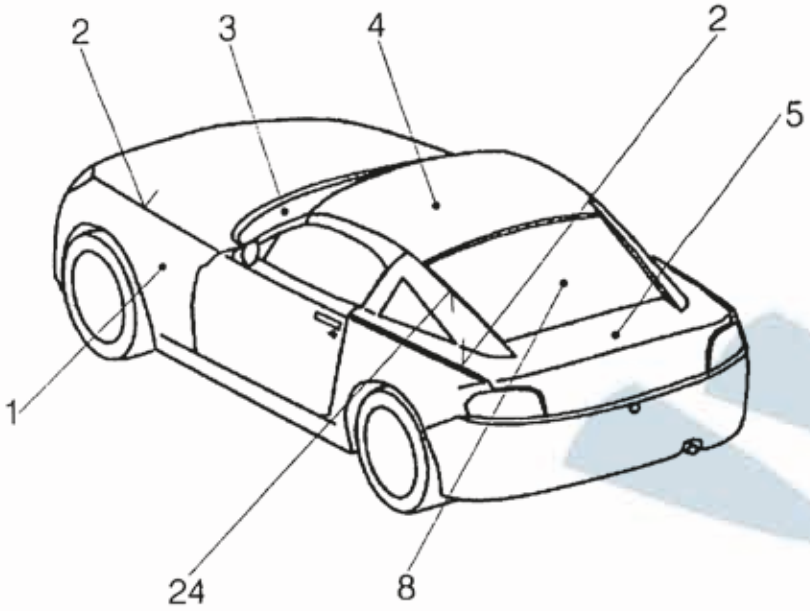


*Abbildung 6: Perspektivische Sicht einer wandelbaren Karosserie als Coupé (**AT 009 695 U1**).*

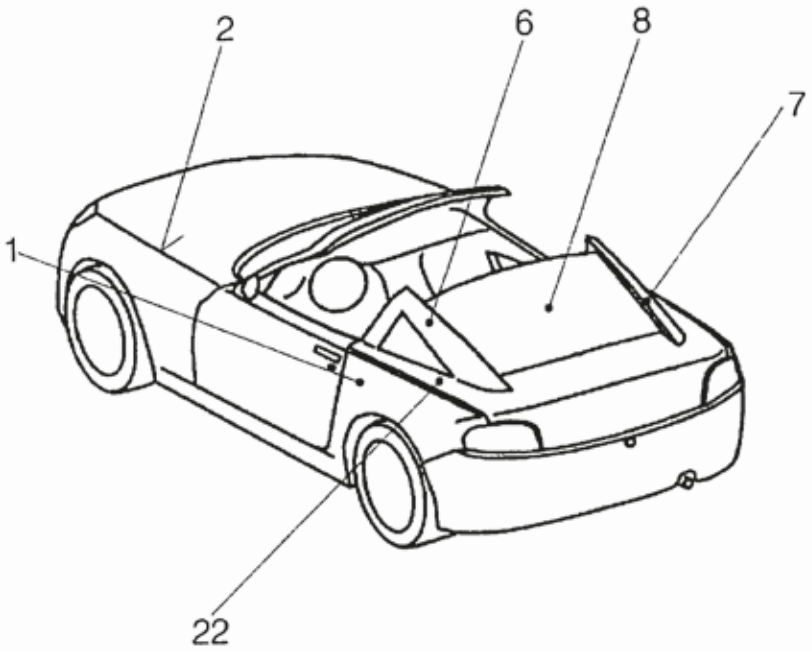


*Abbildung 7: Perspektivische Sicht einer wandelbaren Karosserie als Roadster (**AT 009 695 U1**).*

gefahrenen, oberen Position, entsteht erst ein echtes Targa-Fahrzeug. Der obere Rand der Heckscheibe schließt bündig mit dem vorderen Rand der jeweils rechts und links angebrachten Seitenteile ab.

Im Folgenden werden beispielhaft zwei von vier Fahrzeugtypen vorgestellt, die entstehen, wenn aufgrund von Kombinationen bewegbarer Aufbauteile eine Verwandlung der Karosserie entsteht.

In Abbildung 6 wird ein fester, nicht veränderbarer Grundkörper 1 eines Fahrzeugs, der von der Fahrzeugunterseite bis hinauf zu einer Gürtellinie 2 reicht, dargestellt. Eine Windschutzscheibe 3 ist fest daran befestigt. Die von außen erkennbaren zur Umwandlung des Karosserietyps beweglichen Teile werden durch ein Dachteil 4, welches aus einem oder mehreren festen Dachelementen bestehen kann, einer Heckklappe 5, die beiderseits von je einem Seitenteil 6, 7 als Finnenteile flankiert wird und einer dazwischen angebrachten Heckscheibe 8, die um eine horizontale Achse schwenkbar ist, gekennzeichnet. Die Heckklappe 5 reicht bis zur Gürtellinie 2 und ist anhebbar, um das Dachteil 4 darunter verstauen zu können.

Damit entsteht die Gestalt eines Coupés, siehe Abbildung 6. Das Dachteil 4 ist geschlossen und die Heckscheibe 8 verbindet den oberen Konturabschnitt 24 der beiden Seitenteile 6, 7, sodass sie insgesamt ein Fließheck erzeugen. Die nach hinten schräg langsam abfallenden oberen Kanten der Seitenteile 6, 7 bilden die Kontur 24 eines Fließhecks, welches als typisches Merkmal für ein Coupé gilt oder mit separat gekennzeichneten Finnen als Merkmal eines Roadsters dient. Der untere Rand der Heckscheibe 8 ist hierbei mit der Heckklappe 5 schwenkbar verbunden.

In Abbildung 7 wird dagegen der Fahrzeugtyp eines Roadsters gezeigt. Diese Karosserieform wird erzeugt, indem das Dachteil 4, zum Beispiel als Dachschale oder gefaltetes Verdeck unter der Heckklappe 5 in einen Ablageraum verstaut wird.

Einzelne gestalterische Besonderheiten bei dieser Karosserievariante könnten an den Finnen zusätzlich durchgeführt werden, beispielsweise diese mit kleinen Fenstern zu versehen oder diese ganz aus einem durchsichtigen Werkstoff zu fertigen, was die Rundumsicht für den Fahrer oder die Fahrerin verbessern würde.

Schwenkbare Finnen

Ein Faltverdeck, das mit Heckfinnen ausgeführt ist, weist heckwärts seitlich laufende und dreiecksförmig sich erstreckende Abschnitte auf. Diese können aus festen undurchsichtigen oder durchsichtigen Verkleidungen bestehen oder gänzlich aus Stoffabschnitten gefertigt sein. Sind sie als Kappen oder Hutzen seitlich des Kofferraums ausgeformt, kann die Bewegungsmechanik des Verdeckgestänges innerhalb dieser Finnen nach außen optisch kaschiert werden. Mit nach hinten zum Heck abfallenden Finnen ergibt sich insgesamt eine sportliche und dynamische Seitenlinie des Verdecks. Zwischen den Heckfinnen befindet sich fast immer eine Heckscheibe, welche schwenkbar und/oder versenkbar sein kann.

Wie in der Darstellung der Abbildung 8 ersichtlich, sind die Finnen 5 zum Verdeckkastendeckel 7 so drehbar zugeordnet, dass sie in geöffneter Stellung des Verdeckkastendeckels 7 abwärtsbeweglich um eine Achse 16 verschwenkt werden. Die Achse 16 verläuft dabei quer zur Erstreckungsrichtung der jeweiligen Finne 5.

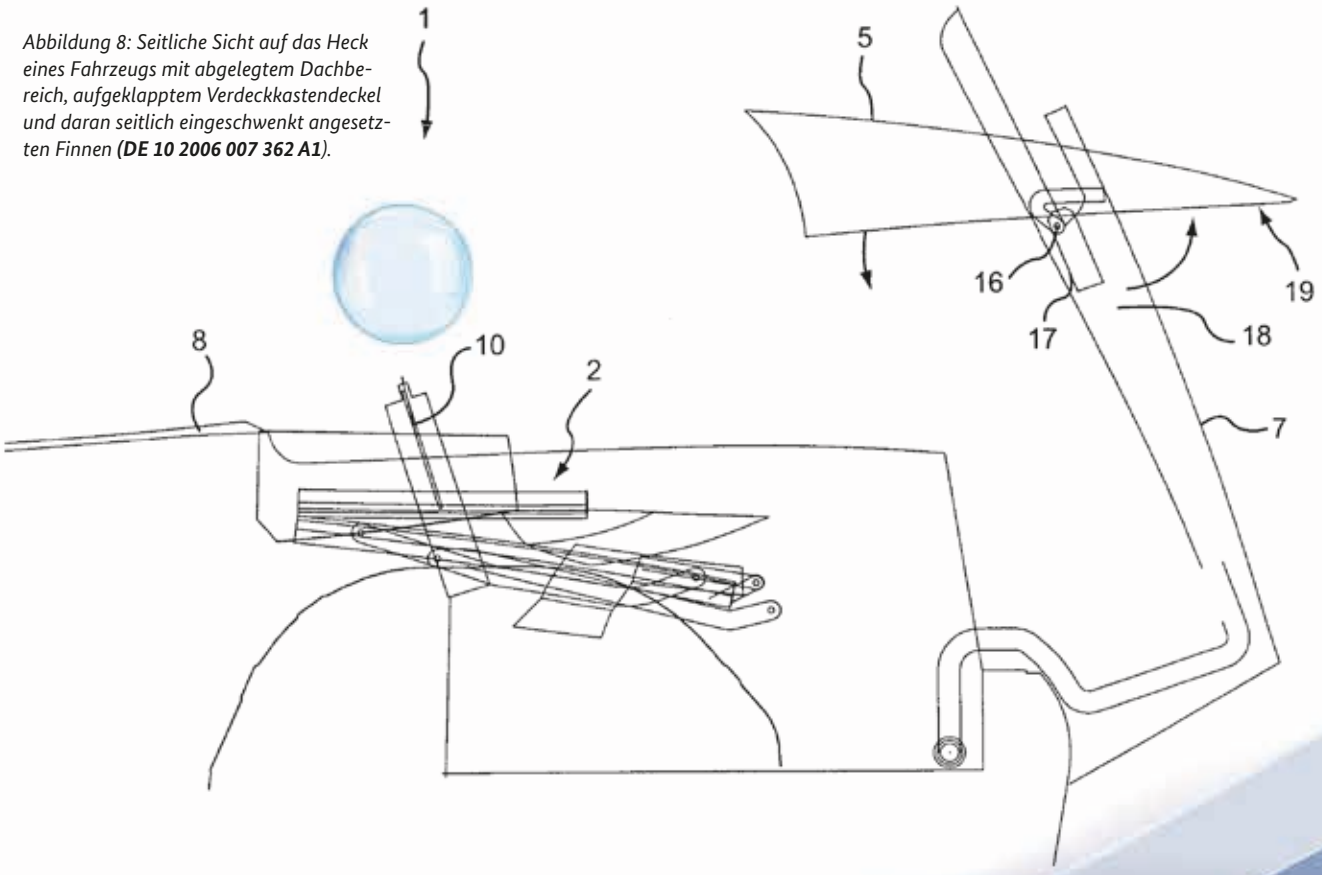


Abbildung 8: Seitliche Sicht auf das Heck eines Fahrzeugs mit abgelegtem Dachbereich, aufgeklapptem Verdeckkastendeckel und daran seitlich eingeschwenkt angesetzten Finnen ***(DE 10 2006 007 362 A1)***.

Beim weiteren Öffnungsvorgang des Verdecks, wie in Abbildung 9 dargestellt, werden der Verdeckkastendeckel 7 und die Finnen 5 über dem abgelegten Dach oder Verdeck 2 zunächst angehoben, wobei die Finnen 5 jeweils um eine Achse 16, die zur Fahrzeugquerrichtung abgewinkelt steht, nach unten geschwenkt werden. Das Einschwenken geschieht über einen Antrieb 17, der bevorzugt elektromotorisch sein kann. Beim Einschwenken hebt sich der hintere Teil der Finne 5 von dem ihn abstützenden Bereich 18 des Verdeckkastendeckels 7 ab, so dass die dreieckig zum Heck zulaufende Unterseite der Finne 5 sichtbar wird. Somit verdreht sich die Finne 5 bei ihrer Absenkung gegenüber dem Verdeckkastendeckel 7 aus einer aufrecht stehenden Normalstellung, wenn das Verdeck geschlossen ist, in eine horizontal eingeklappte Lagerstellung unter dem Verdeckkastendeckel 7. Das geschieht gleichzeitig mit jeder Finne 5 auf beiden Seiten des Verdeckkastendeckels 7.

Je nach Karosserieform können die Finnen aber auch seitlich neben dem beweglichen Verdeckkastendeckel 7 direkt an der Karosserie angeordnet sein.

Fazit und Ausblick

Mit der vorgestellten Auswahl an Fahrzeuglösungen konnte nur eine kleine Übersicht über die Einsatzmöglichkeiten von Flossen und Finnen gegeben werden. Eine wichtige Funktion haben diese Bauteile insbesondere bei Aerodynamik, Sicherheit und Ästhetik.

Die besondere Rolle der Flossen in den 1950-er und 1960-er Jahren kann rückwirkend vor allem als Modeerscheinung angesehen werden. Technisch war ihre spritsparende Wirkung bei den damaligen Fahrzeugen eher fraglich. Es blieb eigentlich nur noch die Frage des Geschmacks übrig. Das Element der Flossen wurde ab dem Jahr 1964 nur noch bei wenigen neuen Fahrzeugmodellen aufgegriffen und dann nur noch in einer sehr zurückhaltenden Art [2].

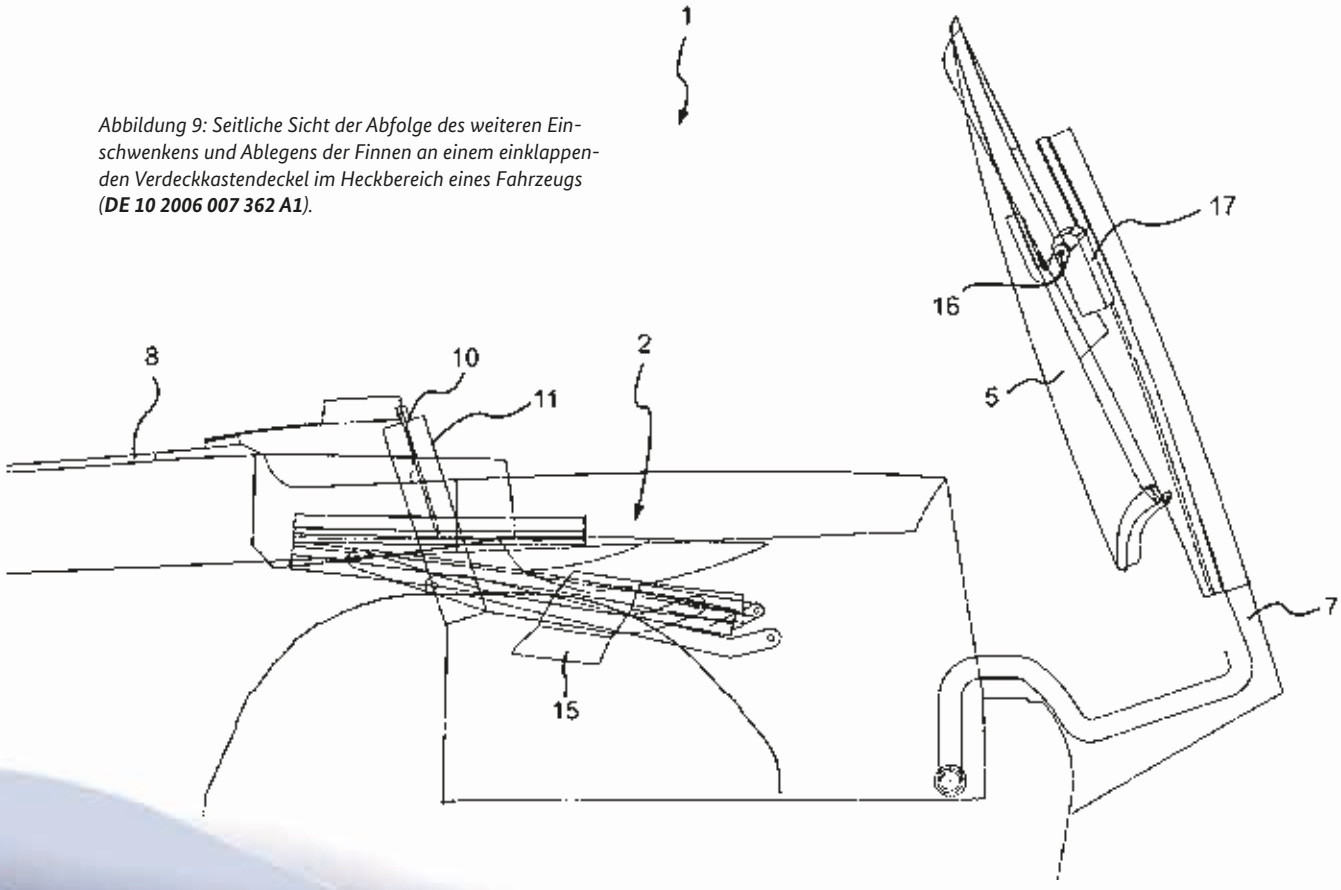


*Abbildung 9: Seitliche Sicht der Abfolge des weiteren Einschwenkens und Ablegens der Finnen an einem einklappenden Verdeckkastendeckel im Heckbereich eines Fahrzeugs (**DE 10 2006 007 362 A1**).*

Elektrifizierung – neue Rollen für Finnen und Flossen

Heute werden nur sehr vereinzelt Fahrzeuge mit Flossen, insbesondere Heckflossen, entwickelt, wie das erste elektrisch angetriebene Modell Polestar 1 der Volvo-Premiumtochter Polestar, das an das Sportcoupé P1800 und 1800 ES mit Heckflossen aus den 1950-ern erinnert [5].

Je mehr sich elektrifizierte Fahrzeuge ausbreiten, desto stärker werden sich aerodynamische und stilistische Konzepte an diese Antriebsart anpassen. Elektrische Langstrecken-Fahrzeuge, die mit hoher Geschwindigkeit auf der Autobahn fahren, werden in den kommenden Jahren flacher, länger und stromlinienförmiger. Da werden Aspekte der Aerodynamik auf das ganze Fahrzeug umgesetzt und Verkleidungen werden für eine günstige Luftstromverteilung sorgen. Damit treten Finnen und Flossen mit ihrem Einsatzspektrum wieder in den Vordergrund. Je besser die Luft um die gesamte Karosserie herumströmen kann, desto weniger Verwirbelungen gibt es.

Elektroautos, die sich vorrangig in der Stadt oder auf der Landstraße bewegen werden, könnten sich aerodynamischen Maßnahmen entziehen, denn je niedriger die Geschwindigkeit, desto unwichtiger wird die Aerodynamik. Mit Blick auf den sparsamen Einsatz von Material und Energie ist aerodynamisches Design freilich auch bei E-Autos gefragt. Dafür wird man unweigerlich auf bewährte Elemente zurückgreifen – wie Finnen und Flossen [7].

Finnen und Flossen wieder im großen Stil? Oder eher als Randerscheinung? Es bleibt abzuwarten!



Dr. Andreas Monokroussos

Jahrgang 1967, studierte Verkehrswesen, spezialisiert auf Luft- und Raumfahrttechnik, an der Technischen Universität Berlin. 1992 ging er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter ans Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in Braunschweig. Dort war er zudem Leiter der Geschäftsstelle des Forschungsbereichs Flugmechanik/ Flugführung.

Im Jahr 1994 folgten Auslandsaufenthalte als Research Associate an der University of Oklahoma und als Doctoral Researcher am Massachusetts Institute of Technology.

Nach der Promotion folgten ab 1997 mehrere Jahre mit Projekten in der Vorentwicklung von Nutzfahrzeugen bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Seit dem Jahr 2008 ist Dr. Andreas Monokroussos als Patentprüfer beim Deutschen Patent- und Markenamt tätig. Seine Prüfgebiete umfassen unter anderem bewegbare und faltbare Verdecke und ihre Aufbewahrungsfächer im Fahrzeug sowie Halterungen und Lager für Rohre und Leitungen. Ende 2020 wechselte Dr. Monokroussos in die Funktion des Gruppenleiters.

#Leuchtdioden

#OLED

#Bildschirme

#Displays

#Mobilität

#Komfort

#Halbleiterphysik

#Kommunikationstechnologie

#Patentrecht

Ob Mobiltelefon, Fernsehgerät oder Tachoanzeige: OLED-Bildschirme sorgen für brillante Farben bei geringem Energieverbrauch. Warum der Siegeszug der organischen Leuchtdioden immer wieder stockte, welche Wendungen es jüngst gab – und was die organischen Leuchtdioden im Innersten zusammenhält …

Organische Leuchtdioden setzen sich durch

Dr. Werner Hofmann

Wirtschaftliches Interesse

Einspruchsverhandlung am Deutschen Patent- und Markenamt in München. Fünf Parteien mit über fünfzehn Anwälten erscheinen zur Einspruchsverhandlung. Auch am Ende des Tages kann die Verhandlung nicht abgeschlossen werden. Ein weiterer Termin wird vereinbart. Schließlich geht der Fall in die nächste Instanz ans Bundespatentgericht.

Was war passiert?

Ein Patent auf dem Gebiet der organischen Leuchtdioden (englisch: Organic Light Emitting Diode; OLED) wurde juristisch angegriffen.

Nun ist es zunächst nichts Ungewöhnliches, dass Patente angegriffen werden. Das deutsche Patentrecht sieht hierzu extra eine Einspruchsfrist nach der Veröffentlichung der Patentschrift vor. Die Vielzahl der einsprechenden Parteien sowie der personelle und wirtschaftliche Aufwand war in diesem Fall jedoch außergewöhnlich.

Dies zeigt anschaulich, dass Grundlagenpatente auf dem Gebiet der OLED einen erheblichen materiellen Wert aufweisen können. Insbesondere ist dies offensichtlich bei dem angegriffenen Patent der Fall.

OLED – kurz gefasst

Bei organischen Leuchtdioden (englisch: Organic Light Emitting Diode; OLED) handelt es sich um Emitter von Licht in brillanten Farben. Elektrische Energie wird direkt in Lichtwellen der gewünschten Wellenlänge umgewandelt. Sie bestehen aus organischen halbleitenden Materialien, chemisch mit Kunststoffen verwandt. Die Herstellung ist – sehr kosteneffektiv – im Siebdruck oder Tintenstrahldruck möglich.

Technische Herausforderungen sind die Effizienz und die Lebensdauer.

OLED auf dem Siegeszug

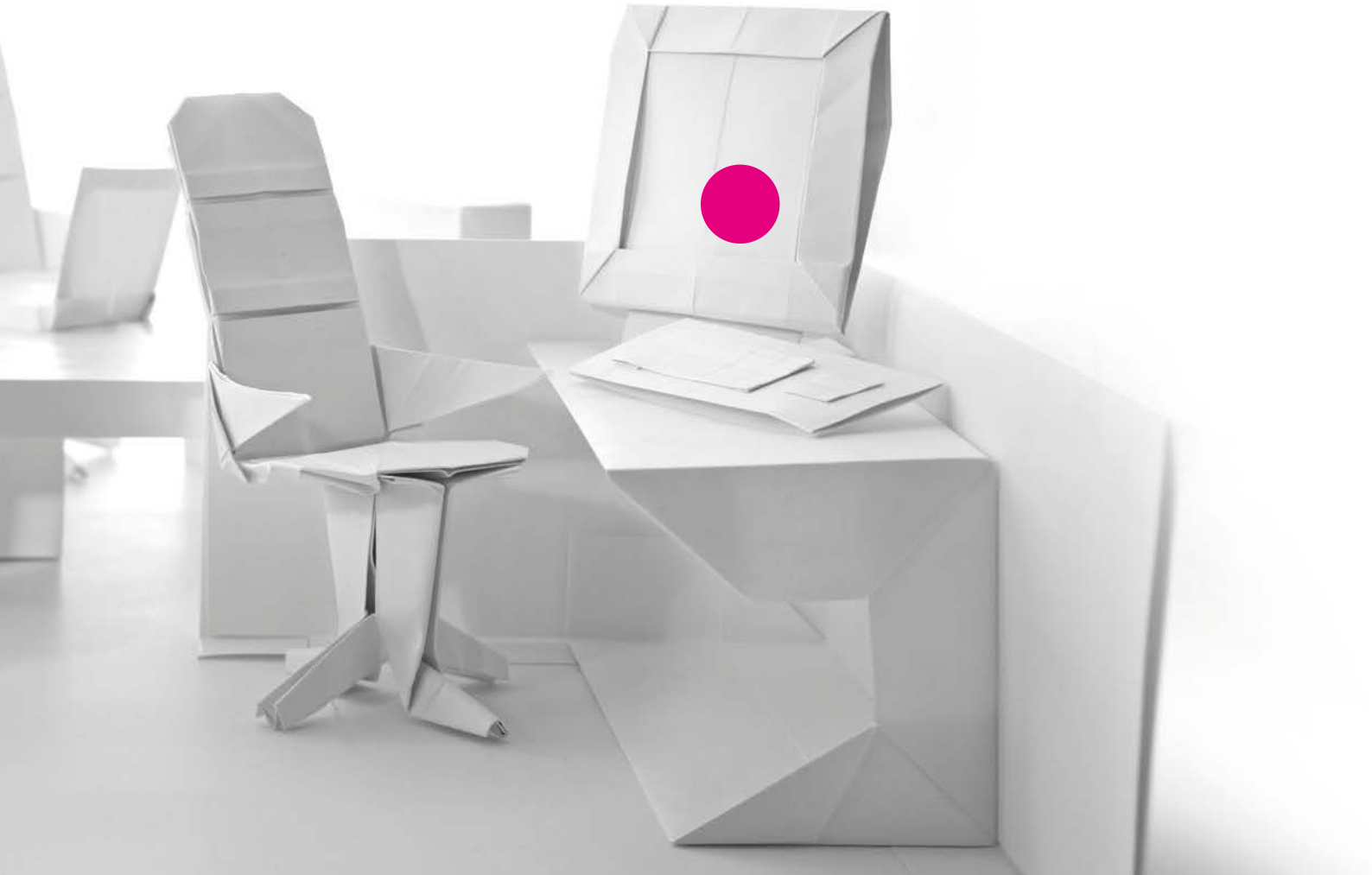
Aktuell kann der technisch interessierte Beobachter den Siegeszug der OLED-Technologie im Alltag verfolgen.

Mobiltelefone, Computer und Tablets werden nun mit OLED-Bildschirmen ausgeliefert, die durch ihren geringeren Stromverbrauch die Akkulaufzeit dieser Geräte signifikant erhöhen. Neuen Fernsehgeräten verleihen OLED noch nie da gewesene Kontrastwerte und Farb-Brillanz. Faltbare und gebogene Displays kommen auf den Markt. In Foto-Kameras wird der Sucher durch super helle OLED mit extremer Pixeldichte realisiert. Selbst in den neuesten Premium-Automobilen mit langer Nutzungsdauer unter stark wechselnden Umweltbedingungen wird das sicherheitsrelevante, zentrale Tacho-Anzeige-Element als OLED-Bildschirm ausgeführt. Weitere Beispiele ließen sich anführen.

Dieses Potenzial wurde den organischen Leuchtdioden jedoch schon vor 20 Jahren vorhergesagt. Durchgesetzt haben sich die OLED am Markt allerdings erst kürzlich. Dies ist einer Vielzahl von kritischen Innovationen zu verdanken, von denen wir an dieser Stelle eine exemplarisch genauer beleuchten wollen. Die Auswahl der Materie hat in diesem Falle indirekt der Markt entschieden. Ein technisches Thema, für das es sich lohnt, juristisch mit allen Mitteln zu kämpfen, kann nicht unwichtig sein.



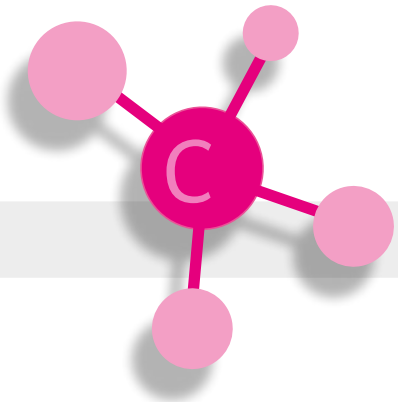
Flexibles OLED-Touch-Display.



Großes Anwendungspotenzial und historische Probleme

Den sogenannten organischen Leuchtdioden wurde schon lange ein Siegeszug prophezeit. Die Herstellung sollte so günstig und einfach sein wie der Druck einer illustrierten Tageszeitung oder eines Werbeplakates für die Litfaßsäule. Einwegverpackungen mit großen, animierten Bildschirmen wurden für die Zukunft angekündigt.

Darüber hinaus sollten höchste Leuchtkraft, beste Farben, höchster Kontrast und Schärfe bei geringstem Energieverbrauch möglich werden. Beleuchtung im Haus durch weiß abstrahlende Tapeten wurden vorhergesagt.

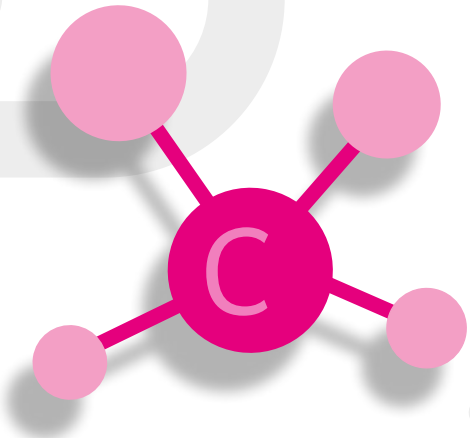


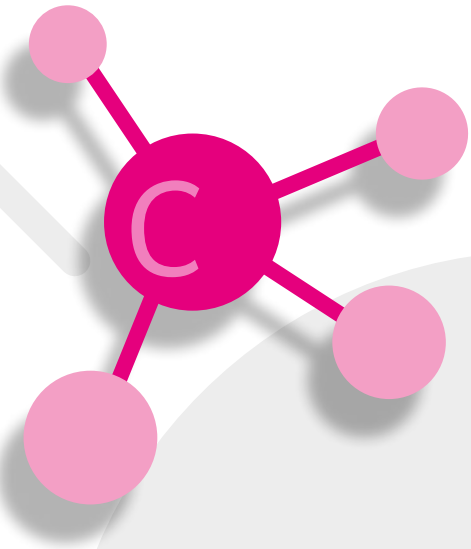
Schließlich kamen nach jahrzehntelangen Entwicklungsanstrengungen zunächst kleine und teure Displays für Nischenanwendungen auf den Markt.

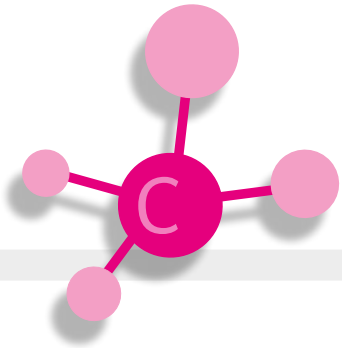
Den technischen Grund für diese große Diskrepanz kann man wie folgt zusammenfassen: Es handelt sich um organische Verbindungen, die diesen Leuchtmitteln die Strahlkraft verleihen.

In der Chemie gelten Moleküle als organisch, wenn sie ein Kohlenstoffgerüst aufweisen. Prominentes Beispiel für organische Verbindungen im Alltag sind handelsübliche Kunststoffe, wie sie etwa in verschiedensten Einwegverpackungen weltweit zum Einsatz kommen. So lange eine Plastiktüte kühl und dunkel in der Wohnung gelagert auch halten mag, so schnell zerfällt diese, wenn sie als Witterungsschutz im Garten Sonne, Wind und Wetter ausgesetzt ist. Noch offensichtlicher ist die Empfindlichkeit organischer Verbindungen gegen Hitze. Wer schon einmal versucht hat, eine PET-Einweg-Flasche durch Überbrühen mit kochendem Wasser für einen weiteren Einsatz zu desinfizieren, dem ist das Problem bekannt.

Zusätzlich sei erwähnt, dass Feuchtigkeit beziehungsweise Wasser-Moleküle sehr reaktiv sind und insbesondere den organischen Molekülen für OLED stark zusetzen. Wer hier entgegnen mag, dass doch, wie mit der PET-Wasserflasche gezeigt, Kunststoff wasserdicht sei und dies ein geringes Problem darstellt, der irrt. Wasserdampf kann sehr wohl handelsübliches Kunststoff-Material durchdringen. Wird Gefriergut nicht in dicke Gefrierbeutel, sondern nur in dünne Frischhaltefolie verpackt, trocknet das Gefrorene aus. Es entsteht sogenannter Gefrierbrand.







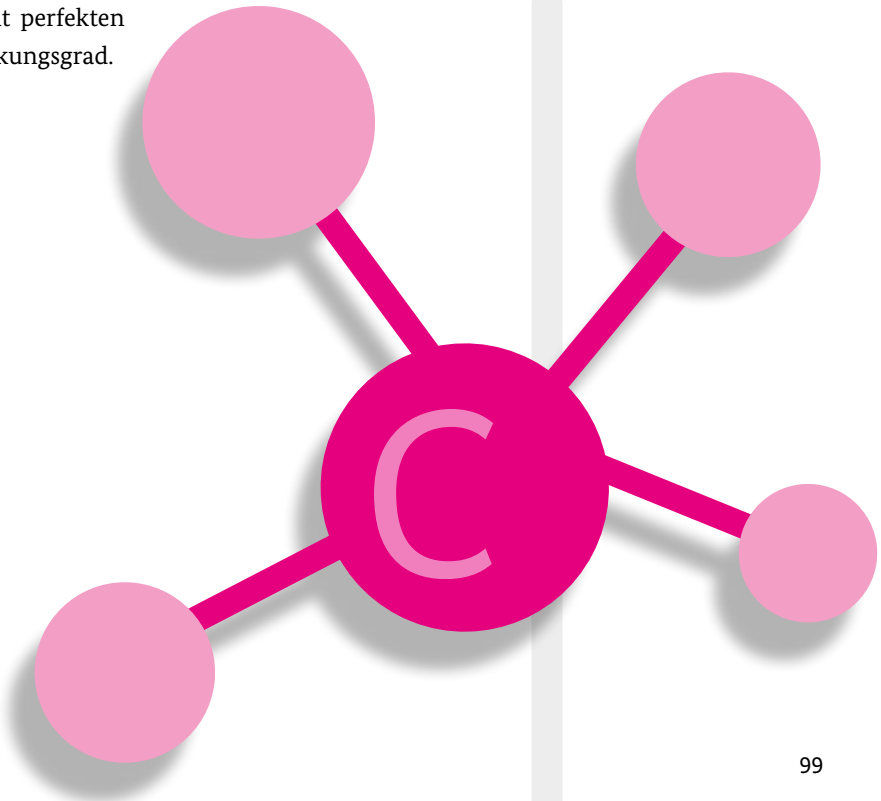
Die Einzel-Verpackung der knusprigen Kekse ist immer noch zusätzlich metallbeschichtet, damit das Gebäck nicht Feuchtigkeit aus der Luft aufnimmt und frisch bleibt. Das gleiche gilt für die sogenannten Blister, die Medikamente in Tablettenform vor dem Verfall schützen. Dort kommen spezielle, oft auch beschichtete Kunststoffe (beispielsweise Nylon oder PVC) und Metallfolien (zum Beispiel aus Aluminium) zum Einsatz.

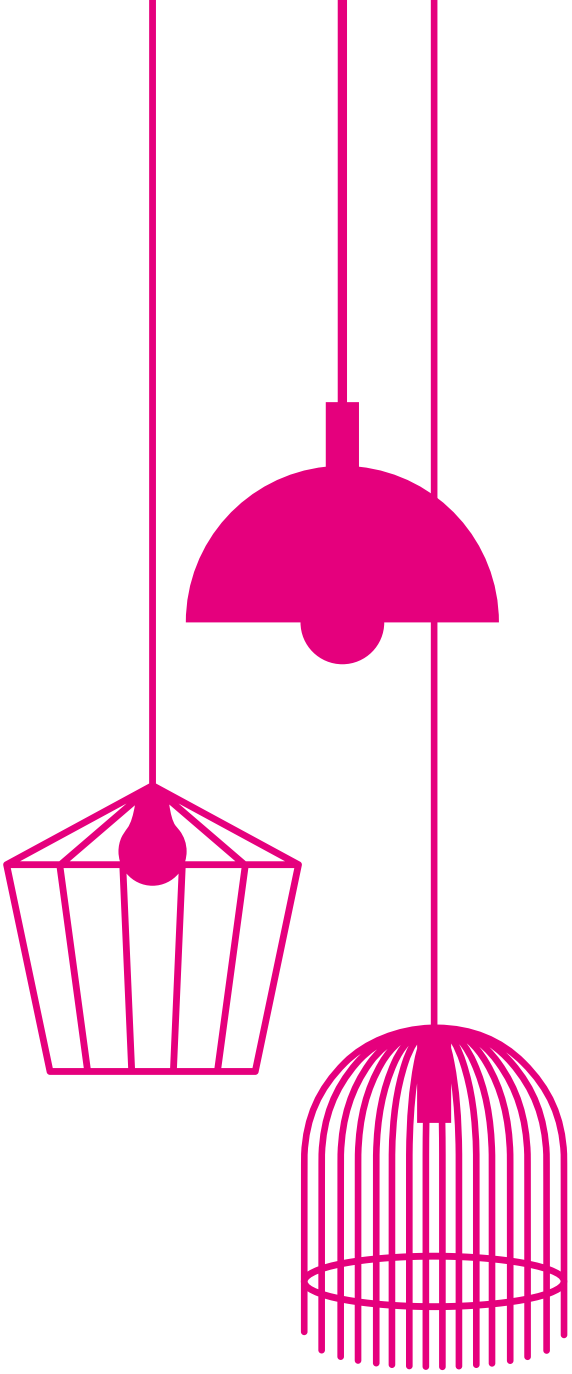
Zusammenfassend müssen die Leuchtstoffe der OLED also vor Umwelteinflüssen wie Hitze, Strahlung oder Feuchtigkeit geschützt werden. Ansonsten ist die Zersetzung programmiert.

Zusätzlich sei auf einen weiteren sehr wichtigen Aspekt hingewiesen. Bei OLED handelt es sich um sogenannte aktive Bauelemente. Es wird elektrische Energie mit einem gewissen Wirkungsgrad in Licht umgewandelt. Je geringer der Wirkungsgrad, desto höher die Verluste, die in Wärme umgesetzt werden. Dies führt zu einer Erhitzung des Bauelements, die, unabhängig wie erfolgreich die Abwärme mit gegebenenfalls großem technischen Aufwand abgeführt wird, an ihrem Entstehungspunkt am größten ausfällt. Also leiden die empfindlichen organischen Leuchtstoffe immer unter einer Selbstaufheizung durch ihren nicht perfekten Wirkungsgrad.

Hitze führt jedoch zur Degradation dieser lichterzeugenden Moleküle. Das senkt wiederum die Effizienz, was zu noch größerer Abwärme führt. Um die Helligkeit über die Lebensdauer konstant zu halten, müsste der Betriebsstrom sukzessive erhöht werden, was sich wiederum negativ auf Wirkungsgrad und Lebensdauer auswirkt. Ein Teufelskreis.

Dies zeigt, dass zwischen großem technischen Potenzial und realer Umsetzung viele technische Probleme stehen können, die alle für sich gelöst werden müssen. Jede dieser einzelnen Lösungen kann eine Erfindung darstellen und gegebenenfalls beim Deutschen Patent- und Markenamt zum Patent angemeldet werden.



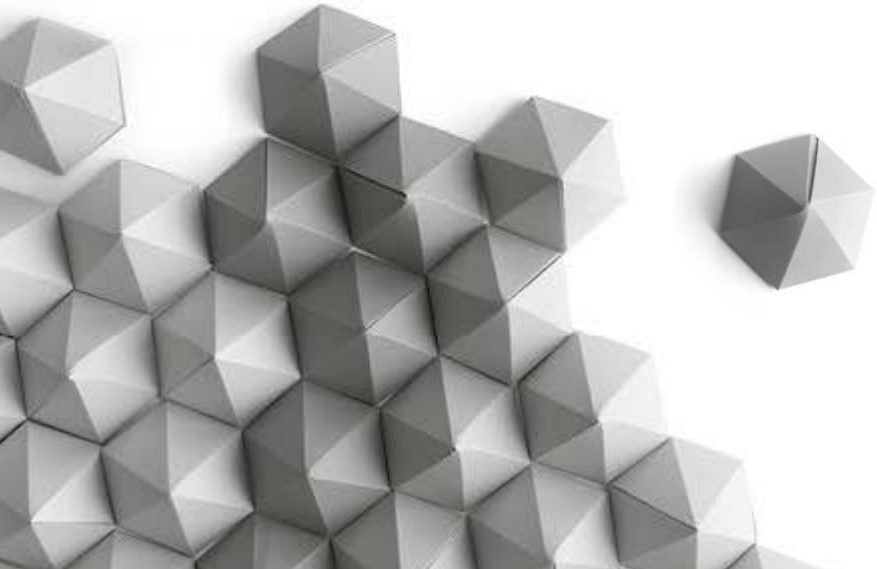


Was ist eine OLED?

Bevor wir einen technischen Aspekt der OLED-Technologie genauer beleuchten wollen, soll zunächst dieses Bauelement grundsätzlich vorgestellt werden.

Vorerst eine kurze Abgrenzung zur etablierten Leuchtdiode (LED), die wir in diesem Zusammenhang auch als anorganische Leuchtdiode bezeichnen können. Eine LED besteht aus einem Schichtenstapel von Halbleiter-Einkristallen mit elektrischen Kontakten und einer Dotierung mit Fremdatomen wie bei einer Diode. Eine Eigenschaft der Halbleiterkristalle einer LED ist die große Variation der Leitfähigkeit in Abhängigkeit von Komposition und Dotierung. In der Halbleiter-Physik werden weitere verschiedenste Eigenschaften des Halbleiterbauelements im sogenannten Bändermodell, einem Diagramm im Energie-Impuls-Raum, charakterisiert. Für Design und Entwicklung solcher Bauelemente sind dies unentbehrliche Werkzeuge.

Der Hauptunterschied der LED zu einer elektrischen Diode, beispielsweise aus Silizium, besteht darin, dass sie aus sogenannten „direkten Halbleitern“ (zum Beispiel GaN, GaAs, InP) hergestellt werden muss. Diese direkten Halbleiter können elektrischen Strom direkt in Licht mit einem theoretischen Wirkungsgrad bis zu 100 Prozent umwandeln. Dabei rekombinieren je ein Elektron aus dem Leitungsband mit einem sogenannten Loch aus dem Valenzband des Bändermodells zu einem Photon. Bei indirekten Halbleitern verbietet das physikalische Prinzip der Impulserhaltung eine effiziente Emission von Licht. Da alle diese Halbleiterkristalle einerseits sehr stabil sind, vergleichbar mit Edelsteinbesatz auf einem Schmuckstück, und andererseits auch über eine gute Wärmeleitfähigkeit verfügen, sind hier hohe Leistungsdichte und lange Lebensdauer vergleichsweise einfach zu realisieren. Darüber hinaus kann man hier schon erahnen, dass LED, hergestellt aus synthetischen Einkristallen, die teilweise auch in der Schmuckindustrie eingesetzt werden, nicht zum Nulltarif herzustellen sind.



Dem gegenüber besteht die OLED aus organischen Molekülen, die wie Lackschichten übereinander aufgetragen werden können. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen OLED, bei dem sich zumindest eine organische Schicht zwischen einer Anode und einer Kathode befindet, von denen eine (semi-)transparent ausgebildet sein muss, um Lichtemission des Bauelements zu ermöglichen. Als Vertreter einer transparenten Elektrode sei Indium-Zinn-Oxid (ITO) genannt, aus dem die Anode typischer OLED besteht.

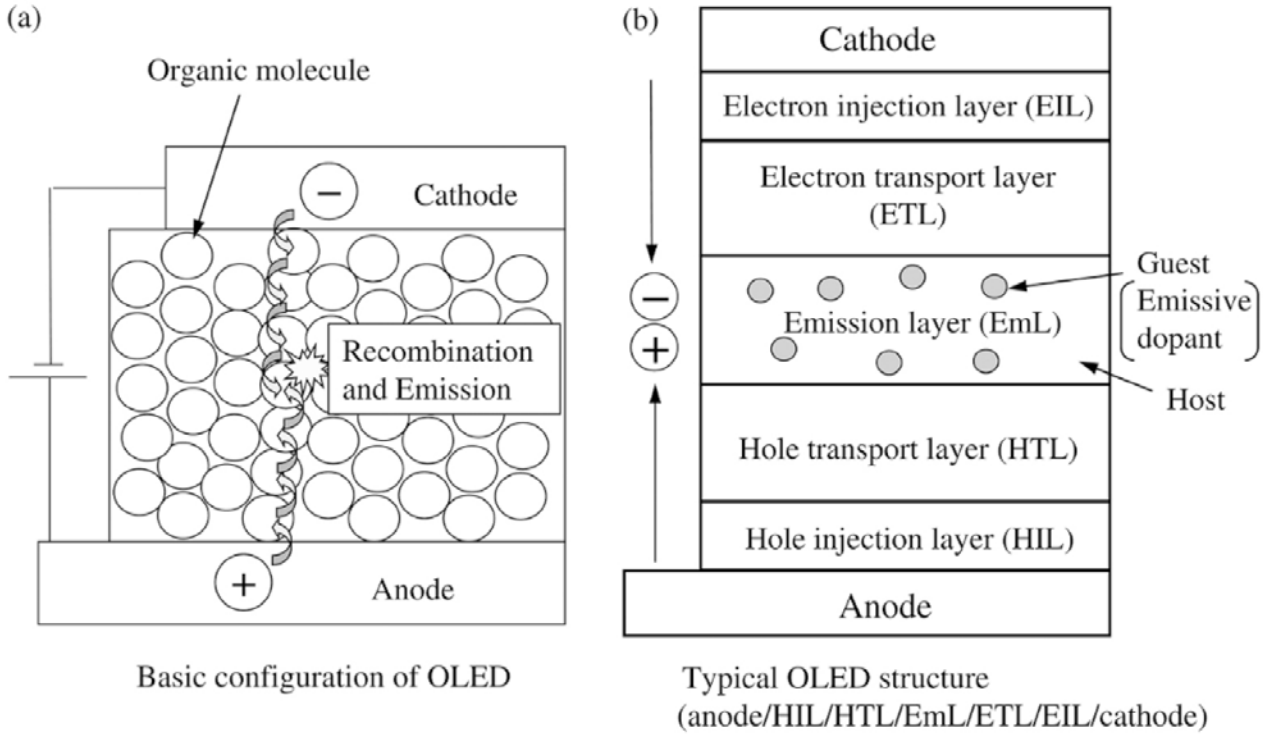
Die Schichten werden aus Molekülen gebildet, die reich an chemisch reaktiven Doppelbindungen sind. Kommen in einer Molekülkette (beispielsweise alternierend) mehrere Doppelbindungen vor, so kann die Position der Doppelbindung im Molekül wechseln (chemischer Fachbegriff: Wechsel der Konjugation). Dadurch sind die Elektronen der Doppelbindungen nicht fest in der Molekülstruktur verankert und somit beweglich. Es stellt sich also eine mehr oder weniger große elektrische Leitfähigkeit dieser Moleküle ein. Diese werden somit als organische Halbleiter bezeichnet.

Organische Halbleiter sind also per Definition reich an ungesättigten Doppelbindungen und daher chemisch reaktiv. Dieses Phänomen erklärt die im vorigen Abschnitt erwähnte Empfindlichkeit gegenüber Hitze und Feuchte.

Vereinfacht ausgedrückt ist ein organischer Halbleiter also eine Art elektrisch leitfähiger Kunststoff. Die Leitfähigkeit kommt aber nicht von eingelagerten leitfähigen Partikeln, sondern von der Molekülstruktur selbst. Diese Eigenschaft geht jedoch mit einer geringen chemischen Stabilität einher.

Zudem bilden sich gegebenenfalls diskrete Energieniveaus heraus, ähnlich zum Bändermodell von anorganischen Halbleitern. Der Unterschied der Energieniveaus der sogenannten Grenzorbitale entspricht in diesem Falle der sogenannten Bandlücke eines anorganischen Halbleiters. Das niedrigste unbesetzte Orbital eines Moleküls (LUMO) entspricht dabei dem Leitungsband und das höchste besetzte Orbital eines Moleküls (HOMO) dem Valenzband als Analoga.

Abbildung 1: OLED-Strukturen (aus [1]).



Solche diskreten Energieniveaus sind eine typische Eigenschaft der Nano-Welt. Sobald wir den Maßstab auf atomare Maßstäbe verkleinern, sieht man keinen homogenen Stoff mehr, sondern einzelne Atome beziehungsweise Moleküle. Damit befindet sich ein Elektron nicht irgendwo im Material, sondern ist entweder an das eine oder andere Atom gebunden. Ein Wechsel der Konfiguration entspricht einem Energieübergang, der abhängig von der Konfiguration des Gesamtverbundes bestimmte Werte annehmen kann. Bei periodischen Strukturen wie Kristallgitter oder Molekülketten sind nur wenige Energie-Werte möglich. Diese praktisch vorkommenden Werte werden vom Physiker als „diskrete Energieniveaus“ bezeichnet.

Zusätzlich sind diese Energieniveaus im Allgemeinen nicht gleichverteilt. So wie beispielsweise das zulässige Gesamtgewicht eines Kraftfahrzeuges auf einer öffentlichen Straße. Es wird viele Autos unter 2,8 Tonnen geben und die „40-Tonner“ auf der anderen Seite. Dazwischen kann eine Lücke beobachtet werden. Treten solche statistische Ungleichverteilungen in physikalischen Zusammenhängen in Hinblick auf mögliche Impuls-Energie-Zustände auf, wird dies gerne anschaulich in einem sogenannten Bändermodell dargestellt.

Anders als im Kristallgitter einer anorganischen Leuchtdiode können die injizierten Elektronen und Löcher sich nicht beliebig bewegen, sondern sind an die Molekülstränge gebunden. Treffen gebundene negativ geladene Elektronen und positiv geladene Löcher im organischen Halbleiter aufeinander, so entsteht nicht ein Photon durch Rekombination wie im kristallinen Halbleiter, sondern es entsteht durch die elektrostatische Anziehung beider zunächst ein gebundenes Elektron-Loch-Paar, ein sogenanntes Exziton.

Nun ist vielleicht noch aus dem Physik- oder Chemieunterricht bekannt, dass Elektronen zwei mögliche „Spin-Zustände“ (Drehimpuls-Zustände) haben können oder sich anschaulich im oder gegen den Uhrzeigersinn drehen können. Diese zwei Richtungen des Spins sind zunächst einmal energetisch gleichwertig. Daher teilten sich im Chemieunterricht immer zwei Elektronen ein Energieniveau oder eine „Schale“.

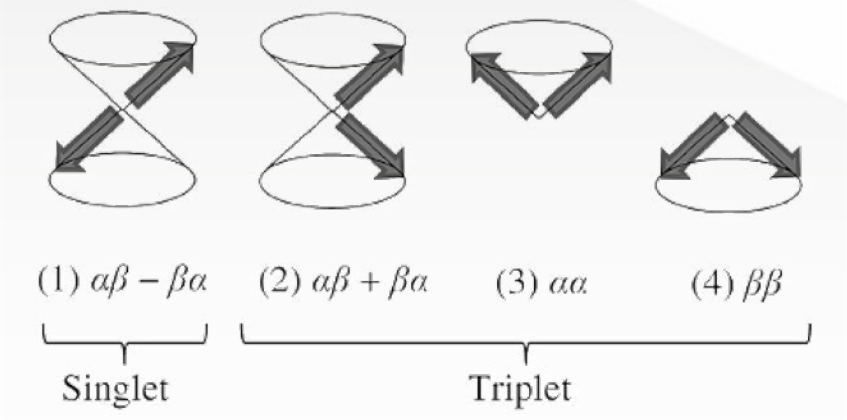


Abbildung 2: Die vier Exziton-Zustände (aus [1]).

Nun haben wir im organischen Halbleiter ein gebundenes Elektron-Loch-Paar, also ein Elektron und ein „fehlendes Elektron“, von dem jedes wieder für sich zwei mögliche Spin-Zustände hat. Daraus ergeben sich durch statistische Permutation vier verschiedene Möglichkeiten der Ausbildung solcher sogenannter Exzitonen. In Abbildung 2 sind alle vier möglichen Zustände abgebildet.

Diese Zustände lassen sich in einen sogenannten Singulett-Zustand und in drei Triplett-Zustände aufteilen, die sich statistisch mit der gleichen Wahrscheinlichkeit ausbilden. Daher kommen auf ein Singulett-Exziton drei Triplett-Exzitonen.

Schließlich rekombinieren die Exzitonen zu Photonen und Lichtemission entsteht. Es ist jedoch zu beachten, dass die Singulett-Exzitonen einem „direkten Halbleiter“ entsprechen und schnell und effizient rekombinieren können. Diese Art der Rekombination wird als „fluoreszente Rekombination“ bezeichnet. Fluoreszenz kennen wir als das helle Aufleuchten eines weißen Baumwoll-T-Shirts unter Schwarzlicht.

Dreiviertel der erzeugten Exzitonen (die Triplett-Zustände) rekombinieren erstmal nicht. Sie entsprechen einem „indirekten Halbleiter“, der nicht für die Licht-Generation geeignet ist. Früher oder später rekombinieren diese Exzitonen dann doch. Dieser Effekt ist als Nachleuchten der Leuchtziffern einer Armband-Taucheruhr bekannt und heißt Phosphoreszenz.

Somit können wir festhalten, dass der theoretisch maximal erreichbare Wirkungsgrad einer klassischen OLED nur 25 Prozent beträgt im Gegensatz zu den 100 Prozent einer anorganischen Leuchtdiode.

Darüber hinaus sind die OLED empfindlicher gegenüber zu hohen Temperaturen. Daher ist gerade bei OLED ein extrem hoher Wirkungsgrad notwendig, um dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Teufelskreis zu entkommen.



Innovation und ExTET-Prinzip

Bei OLED zeigt sich, wie essenziell kritische Innovationen für ein Hightech-Produkt sind. Eine Kostenreduktion durch Massenproduktion würden dem Produkt wohl nicht zum Durchbruch verhelfen. Was hier gefragt ist, ist Erfindergeist.

Selten bringt eine Erfindung alleine den Durchbruch. Oft ist ein Bündel an Geistesblitzen erforderlich, um eine neue Technologie hervorzubringen. Hier tritt das Patentrecht als Katalysator in Funktion. Es schützt die einzelne Erfindung, verlangt aber auch diese im Detail preiszugeben und gegebenenfalls gegen Lizenzgebühren mit anderen zu teilen. Damit werden die Entwicklungsabteilungen konkurrierender Unternehmen quasi miteinander vernetzt, und der Gesellschaft neue, innovative Technologien zur Verfügung gestellt. Ebenso wird der Status-Quo nicht zementiert, da die Laufzeit von Patenten in der Regel auf maximal 20 Jahre begrenzt ist. Danach ist die Erfindung frei nutzbar.



Die anorganischen Leuchtdioden standen vor einiger Zeit vor derselben Herausforderung wie aktuell die OLED. Der Wirkungsgrad war so niedrig, dass diese nur für Kontroll-Lämpchen taugten. Selbst eine klassische Glühbirne mit kurzer Lebensdauer und geringstem Wirkungsgrad war der LED-Technologie haushoch überlegen. Die zugrunde liegenden technischen Probleme waren ebenfalls vielseitig. Der Betriebsstrom heizte hauptsächlich das Bauelement auf, was den Wirkungsgrad noch zusätzlich senkte.

An dieser Stelle brachte eine kritische Erfindung den Durchbruch. Das sogenannte „Doppel-Heterostruktur"-Prinzip. Hier werden die Ladungsträger, die zur Lichterzeugung benötigt werden, „doppelt" eingefangen. Zunächst werden sie in ein Reservoir „gepfercht", von dem dann eine Nano-Struktur aus mehreren Potenzialtöpfen gespeist wird, die hoch effizient emittiert.

Dies ermöglichte nicht nur die hoch effizienten LED, die heutzutage die Lichterzeugung dominieren, sondern auch Halbleiter-Laser, die bei Raumtemperatur betrieben werden können. Dafür wurde im Jahr 2000 der Nobelpreis für Physik verliehen [2].

Von diesem Ausblick auf eine verwandte Technologie können wir lernen, dass möglichst alle Ladungsträger für die Lichterzeugung genutzt werden müssen, soll ein optoelektronisches Bauelement effizient und zuverlässig betrieben werden. Zusätzlich muss auch ein Augenmerk auf die Ladungsträger selbst gerichtet werden. Kommen diese auf Umwegen ins Ziel oder gibt es alternvative Pfade, steigen die Ohmschen Verluste. Ohmsche Verluste sind die technische Beschreibung von elektrischen Verlusten durch Umsetzung in Wärme wie bei einem elektrischen Wasserkocher.

Diese heizen die Zentrale der Lichterzeugung, den sogenannten „aktiven Bereich", auf. Das bewirkt wiederum eine verminderte Effizienz und eine reduzierte Lebensdauer.

Nun zurück zu den organischen Leuchtdioden. Hier wurden in den letzten Jahren verschiedenste Ansätze zur Effizienzsteigerung ausgetestet. Insbesondere die Triplett-Exzitonen an der Lichterzeugung zu beteiligen, war ein Ziel von Bedeutung.

Auch wurde die Instabilität der organischen Halbleiter angegangen. Wir erinnern uns, dass die Moleküle, die organische Halbleiter darstellen, viele „brüchige" Doppelbindungen brauchen, um die gewünschten elektrischen Eigenschaften zu erreichen. Es stellte sich heraus, dass der Einbau von schweren Isotopen, insbesondere von schwerem Wasserstoff, die Moleküle stabilisiert. Ein Wasserstoff-Atom mit einem zusätzlichen Neutron im Atomkern, das sogenannte Deuterium, hat die identischen chemischen Eigenschaften wie Wasserstoff, besitzt jedoch eine doppelt so große Masse. Nun kann man sich vorstellen, dass die „beschwerten" organischen Halbleiter-Moleküle bei gleicher thermischer Belastung weniger stark „schwingen" und damit weniger leicht aufbrechen. Experimentelle Daten bestätigen diese Vermutung [3].

Die Einbeziehung von den drei Vierteln der Ladungsträger, die sich in den sogenannten Triplett-Zuständen befinden, machte auch große Fortschritte. Zunächst fand man heraus, dass organische Moleküle, die gewisse Schwermetalle

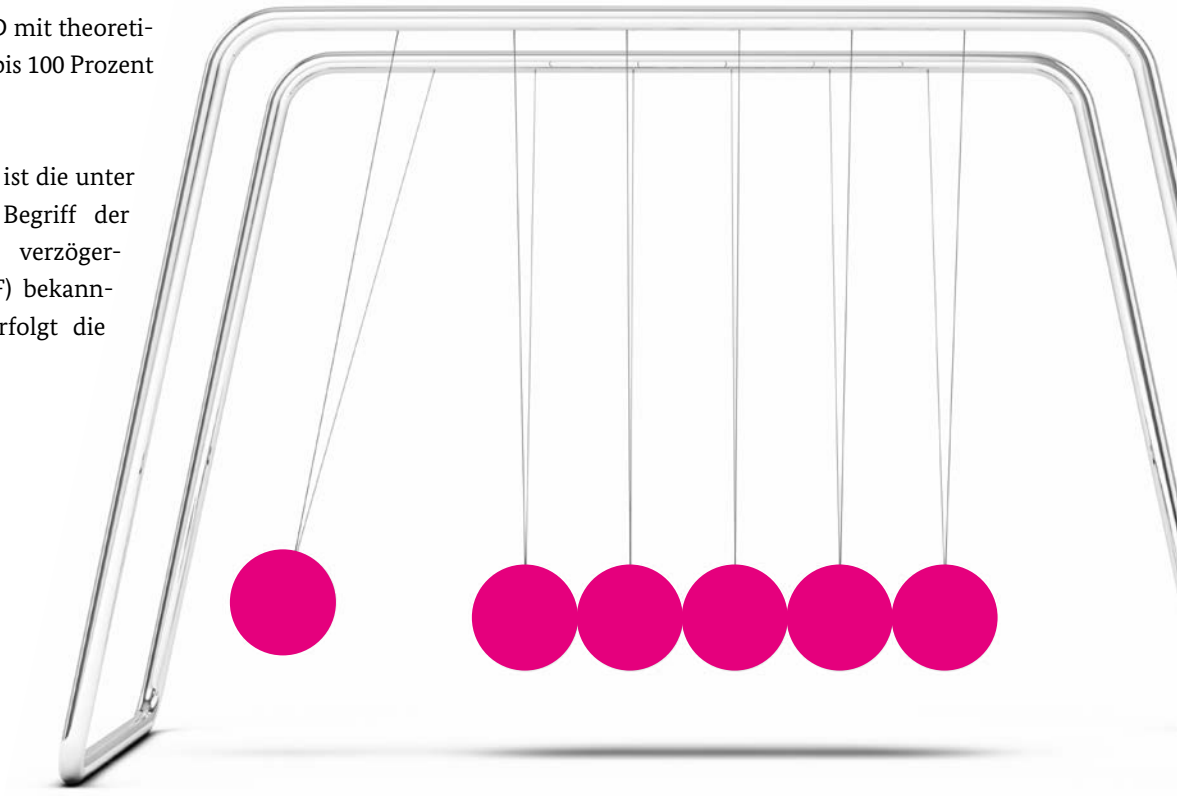
wie Platin oder Iridium enthalten, sehr effizient phosphoreszent emittieren [4]. Diese werden als Phosphoreszenz-Farbstoff oder Phosphoreszenz-Emitter bezeichnet. Wie kann man sich deren Funktion vorstellen? Wir hatten uns doch gemerkt, dass die Triplett-Zustände eher den indirekten Halbleitern entsprechen, und dass das Gesetz der Impulserhaltung eine effiziente Emission verbietet. Hierfür verantwortlich ist wohl die große Masse dieser Schwermetall-Atome, die signifikante Impulsmengen absorbieren und abgeben kann und damit der Physik genüge tut. Allerdings ist die Masse dieser Atome auch nicht unendlich, und dadurch der praktische Wirkungsgrad auch nicht beliebig hoch. Ferner würde beim Wechsel von Fluoreszenz-Farbstoffen auf Phosphoreszenz-Emitter die fluoreszente Emission der Singulett-Exzitonen nicht genutzt. Dies kann jedoch durch spezielle Phosphoreszenz-Farbstoffe angegangen werden, die die Singulett-Exzitonen durch den Effekt der sogenannten Interkombination (ISC) in phosphoreszent emittierende Triplett-Zustände umwandeln können. Ergo sind OLED mit theoretischen Wirkungsgraden bis 100 Prozent denkbar.

Eine alternative Lösung ist die unter dem etwas sperrigen Begriff der „thermisch aktivierten verzögerten Fluoreszenz“ (TADF) bekannte Methode. Hierbei erfolgt die Emission mittels Fluoreszenz-Emitter. Allerdings werden hier auch die Triplett-Exzitonen genutzt! Beim TADF werden die Triplett-Exzitonen in fluoreszent emittierende Singulett-Exzitonen konvertiert. Der zugehörige Prozess heißt reverse Interkombination (RISC). So sind auch bei fluoreszenten OLED Wirkungsgrade bis 100 Prozent im Bereich des Möglichen.

Bezüglich all dieser Methoden zur Wirkungsgradsteigerung sei vereinfachend Folgendes angemerkt: Die Physik basiert auf den grundlegenden Prinzipien der Impuls- und Energieerhaltung. Das Prinzip der Energieerhaltung ist allgemein geläufig. Schon die alten Römer wussten: „Von nichts kommt nichts.“ Die Impulserhaltung scheint jedoch weniger verstanden zu sein.

Zum Verständnis hilft die Betrachtung des als Physik-Spielzeug bekannten Kugelstoß-Pendels, auch Kugelpendel, Newtonpendel oder Newton-Wiege genannt. Hier sind typischerweise vier Stahlkugeln in einer Reihe aufgehängt. Wird eine Kugel links ausgelenkt und losgelassen, so stößt diese auf die Dreierreihe der stehenden Kugeln. Dies bewirkt, dass auf der rechten Seite eine Kugel ausgelenkt wird, um wieder zurück zu pendeln, und das Spiel beginnt von vorne.

Wenn nun der Wirkungsgrad dieses Pendels so definiert würde, wie viele Kugeln letztendlich in Schwingung versetzt werden, hilft weder eine stärkere Auslenkung der Kugel auf der linken Seite, noch ein Stoß „mit Schwung“. Dies verbietet das physikalische Wirkprinzip der Impulserhaltung. Dies bedeutet wiederum nicht, dass eine Auslenkung zweier Kugeln nicht möglich ist. Beim Kugelpendel müssen hier auch ursprünglich zwei Kugeln ausgelenkt werden. Für eine „Dreier-Schwingung“ bedarf es einer „Dreier-Auslenkung“. Bei den organischen Leuchtdioden sind die Methoden anders. Die Physik bleibt jedoch die gleiche.



Beide oben genannten Methoden der Erhöhung des Wirkungsgrades basieren auf Umwandlung oder Interkombination von gebundenen Elektron-Loch-Paaren unterschiedlicher Spin-Konfiguration. Diese Prozesse benötigen gewisse Zeit und es kann zu Sättigungs-Effekten kommen, wenn beispielsweise Exzitonen schneller verbraucht als „nachproduziert“ werden. Leider wirken sich insbesondere die in Abbildung 1b gezeigten Schichten, welche die Ohmschen Verluste senken, negativ auf die Konversions-Effizienzen durch Interkombination aus [4]. Daher wurde eine weitere Methode der Effizienzsteigerung vorgeschlagen, die sogenannte „Exciplex-Triplett Energie Transfer“-Technologie, kurz das ExTET-Prinzip.

Diese Konfiguration ist der weiter vorne beschriebenen, einfachen OLED sehr ähnlich, unterscheidet sich jedoch in einigen wichtigen Details.

Vorerst muss der Begriff „Exciplex“ erklärt werden. Die Kurzform „Exciplex“, nicht zu verwechseln mit dem bereits besprochenen „Exziton“, steht für einen „angeregten Komplex“. Es handelt sich um ein bimolekulares Aggregat (Doppelmolekül) mit Ladungsaustausch, also quasi zwei leitend verbundene Moleküle.

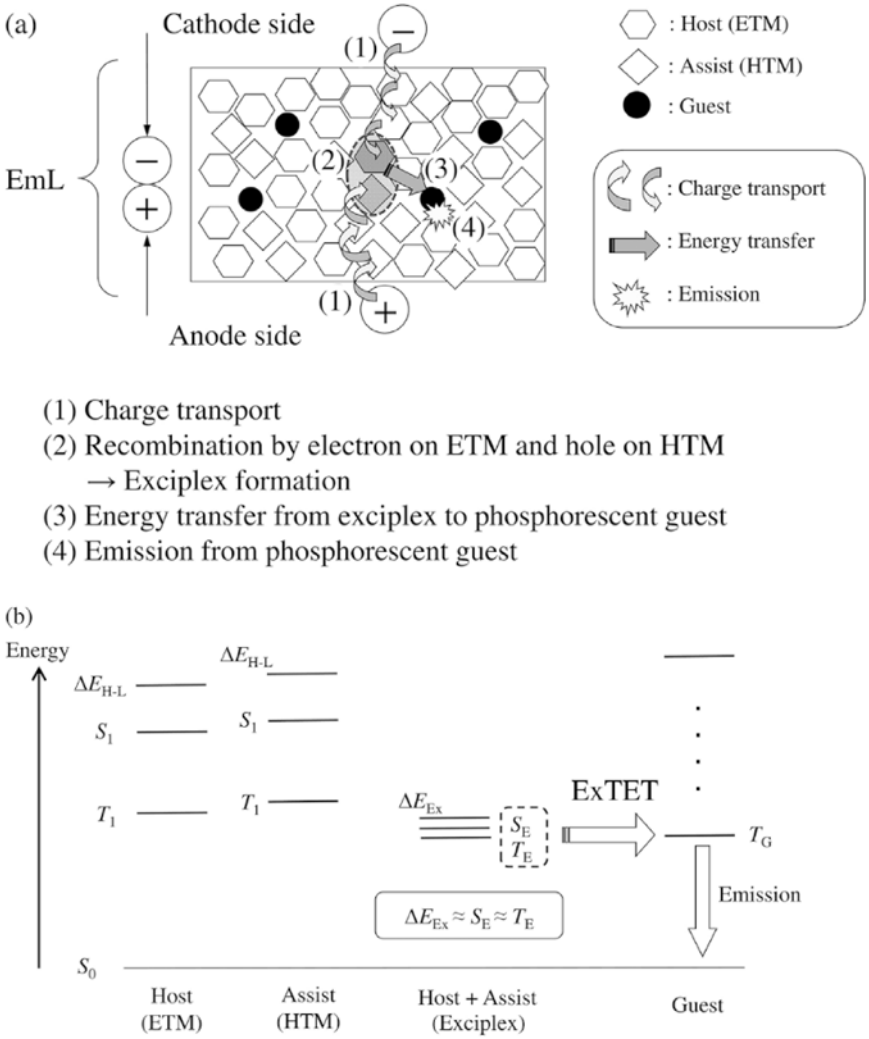


Abbildung 3: Das ExTET-Prinzip (aus [1]).

Zum besseren Verständnis hilft vielleicht eine Analogie aus der anorganischen Halbleiterkunde. Klassische Halbleiter wie Silizium bestehen aus Einkristallen aus Silizium-Atomen im Kohlenstoffgitter (Diamantstruktur) mit je vier Bindungen pro Atom, einem riesigen Stapel von Tetraedern. Es gibt jedoch auch sogenannte Verbindungs-Halbleiter wie zum Beispiel Gallium-Arsenid (GaAs), die im Prinzip dieselbe Gitterstruktur (Zinkblende-Gitter) wie ein Siliziumkristall ausbilden. Jedoch offenbart ein Blick ins Periodensystem der Elemente, wenn nicht noch aus dem Chemie-Unterricht bekannt, dass Gallium dreiwertig und Arsen fünfwertig ist. Wie kann sich also eine Tetraeder-Konfiguration ausbilden? GaAs weist im Schnitt auch vier Bindungen pro Atom auf und hat letztendlich fast dieselbe Gitterstruktur wie Silizium. (Das Zinkblende-Gitter entspricht dem Diamant-Gitter mit dem Unterschied, dass die beiden kristallographischen Lagen der Zinkblende mit verschiedenen Ionen besetzt sind.)

Die ExTET-OLED verwendet analog hierzu auch zwei verschiedene organische Halbleiter, die im aktiven Bereich vermischt werden und chemisch binden. Die zwei Ausgangsmaterialien, die den „organischen Verbindungshalbleiter“ bilden, werden in Abbildung 3 als Wirts- und Hilfs-Material bezeichnet. Der Verbindungshalbleiter selbst wird als Exciplex benannt.

Zurück zum anorganischen Analogon. Interessanter Weise ist GaAs, wie in den vorigen Kapiteln erwähnt, ein direkter Halbleiter und damit besonders gut für lichtemittierende Bauelemente geeignet. So auch hier. Der Exciplex-Molekülverband zeichnet sich dadurch aus, dass die Energie-Niveaus von Singulett- und Triplett-Exzitonen sehr nahe beisammen liegen. Dies ist für die Realisierung einer OLED von Vorteil. Man könnte, wenn man denn so will, von einem „direkten organischen Verbindungshalbleiter“ sprechen. Ganz richtig wäre dies jedoch nicht. Denn obwohl die Energieniveaus der gebundenen Elektron-Loch-Paare (Exzitonen) im organischen Verbindungshalbleiter (Exciplex) nahezu gleich sind, (in der Physik spricht man hier auch von „Entartung“ der Energie-Niveaus) handelt es sich immer noch um 25 Prozent Singulett- und 75 Prozent Triplett-Zustände.

Was nun? Wir besinnen uns einfach auf eine Erfindung, die bereits gemacht wurde! Der nächste Schritt ist die Beimengung (Dotierung) von einem Phosphoreszenz-Farbstoff („Gastmaterial“ der Abbildung 3). Diese enthalten wie gesagt Schwermetalle (zum Beispiel Iridium), die durch Aufnahme von Impuls eine effiziente, phosphoreszente Emission ermöglichen.

Nun gilt es noch, die Singulett-Exzitonen effizient durch Interkombination zu verwerten. Dies geschieht bei der ExTET-OLED, wie in Abbildung 3 (b) gezeigt, durch die Nähe des Energieniveaus der Exzitonen des Exciplexes und des emittierenden Energie-Niveaus des Phosphoreszenz-Emitters (TG).

Fassen wir nochmal zusammen:

- Statt eines homogenen organischen Halbleiters im aktiven Bereich der OLED setzt man bei der ExTET-OLED einen organischen Verbindungs-Halbleiter (Exciplex) ein.
- Die Emission erfolgt wie bei der Phosphoreszenz-OLED indirekt mittels eines eindotierten Leuchtstoffes auf Schwermetall-Basis.
- Die energetische Anordnung ist so gewählt, dass das Energieniveau der Exciplex-Exzitonen mit dem niedrigsten, direkt emittierenden Triplett-Energieniveau des verwendeten Phosphoreszenz-Farbstoffes überlappt.

Dies ermöglicht wieder eine Nutzung von bis zu 100 Prozent der Ladungsträger. Des Weiteren ergeben sich aufgrund der geschickten Anordnung der Energie-Niveaus sehr geringe Spannungsabfälle im Bauelement und damit sehr geringe Ohmsche Verluste.

Geringe Verluste wirken sich wiederum positiv auf die Lebensdauer des Bauelements aus.

Funktioniert dieses Prinzip auch in der Praxis? Kann man den Laborwerten für verbesserte Wirkungsgrade glauben? Lassen sich so langlebigere Bauelemente realisieren? Wird diese Technologie in realen Produkten angewendet?

Zur Beantwortung dieser Fragen möchte ich auf den Anfang dieses Artikels hinweisen.

Selten wurde am Deutschen Patent- und Markenamt und am Bundespatentgericht über den Patentschutz einer OLED-Technologie so vehement gestritten wie in diesem Fall. Die realen Gründe für den Rechtsstreit sind bestimmt vielfältig und dem Autor unbekannt, jedoch ist eines sicher: Kein wirtschaftlich denkendes Unternehmen investiert große Summen in ein juristisches Verfahren über eine wertlose Technologie.

Darüber hinaus sei noch Folgendes angemerkt: Viele Innovationen der Halbleiterbauelemente, und insbesondere der organischen Halbleiterbauelemente, sind material- oder stoffgetrieben. Man kann Bauelemente eben nur aus Materialien zusammenstellen, die verfügbar sind. Dies schlägt sich auch in der Forschung nieder. Sobald beispielsweise neue Farbstoffe verfügbar sind, wird intensiv an deren Anwendung geforscht. Dies führt allenthalben zu Erfolgen, obwohl noch nicht alle Wirkmechanismen verstanden sind.

Oft findet technologische Innovation in einem fünfstufigen Prozess statt. Erst werden neue Materialien entwickelt (1. Stufe). Dann zeigt eine gewisse Kombination mit den neuen Materialien erstaunliche experimentelle Erfolge (2. Stufe). Weiterführend wird am Verständnis dieser Erfolge gearbeitet (3. Stufe). Dies führt schließlich zur Beherrschung einer neuen Technologie (4. Stufe), die dann final zur Anwendungsreife gebracht werden kann.

Warum erzähle ich das? Weil dies Fallstricke bei der (auch patentrechtlichen) Bewertung einer Erfindung legt. Wem gehört die Reputation? Wem gehört die Erfindung? Dem „Erst-Finder“ oder dem „Erst-Versteher“ oder dem finalen Entwickler? Und was ist mit komplexen und auf Bekanntem aufbauenden Prinzipien? Darüber lässt sich trefflich streiten.

Klar ist auch: Die meisten Menschen erfreuen sich einfach an den schönen, neuen OLED-Displays mit den brillanten Farben. Gerne auch faltbar, wie in Abbildung 1 gezeigt.

Ich hoffe, im Rahmen dieses Artikels viele Fragen bezüglich der aktuellen Entwicklungen in der OLED Technologie beantwortet zu haben. Der Artikel erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es ging bewusst um die exemplarische Beleuchtung einer ausgewählten Technologie.



Trotz der fokussierten Betrachtungsweise bleiben wohl noch offen:

Bleiben die angegriffenen Patente bestehen?

Welche Technologie wird sich durchsetzen?

Gibt es bald einen Physik-Nobelpreis für grundlegende OLED-Innovationen?

Wir dürfen gespannt sein.



Dr. Werner Hofmann

Studium der Elektrotechnik und Promotion an der TU München. Dr. Hofmann forschte in den Jahren 2009/2010 als Postdoc an der UC Berkeley und hatte von 2013 bis 2019 eine Professur für Nano-photonische Bauelemente an der TU Berlin inne. Seit Ende 2019 prüft Dr. Hofmann Patentanmeldungen im Bereich der LED, OLED, Photonik und Halbleitertechnologie.



Specklemuster in Head-up-Displays reduzieren – für bessere Bilder und mehr Sicherheit

Dr. Christian Langer

#Informationsdarstellung
#Laser
#Lasertechnik
#optischePhänomene
#Beleuchtungsmuster
#Speckles
#Granulation
#Interferenz

Wenn Sie unerwünschte Fleckenmuster auf der Windschutzscheibe Ihres Autos entdecken, greifen Sie normalerweise zu Putzlappen und Reinigungsmittel. Was aber, wenn diese Flecken gar keine Schmutzablagerungen sind, sondern ein optisches Phänomen aus der Lasertechnik, das sich nicht wegwischen lässt? Hier kann der Zauberkasten der Physik helfen und durch geeignete Anpassung der Laserbeleuchtung das Fleckenmuster für das menschliche Auge verschwinden lassen. Die paradoxe Zauberformel lautet dabei: „Mehr Homogenität durch Ungleichmäßigkeit." Denn wie sich gezeigt hat, kann durch zielgerichtetes Einbringen von räumlichen und zeitlichen Unterschieden in den Laserstrahl erstaunlicherweise die Homogenität des daraus resultierenden Beleuchtungsmusters und die Qualität der damit erzeugten Bilder insgesamt verbessert werden.

Das Speckle-Problem in der Lasertechnik

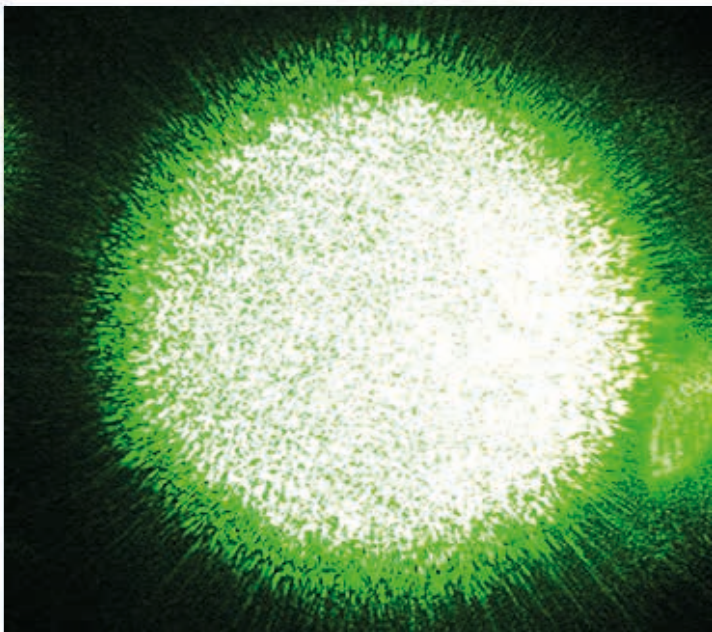
Laser werden seit Jahrzehnten als Lichtquellen und Werkzeuge in einer Vielzahl verschiedenster Anwendungen eingesetzt, zum Beispiel in der Fertigungstechnik, Messtechnik, Medizin, optischen Datenspeicherung (CD, DVD) oder in Laserdruckern. Auch auf dem Gebiet der Bildprojektion sowie in Anzeigevorrichtungen finden sie zunehmend Verwendung. In Automobilen kommen mittlerweile serienmäßig Head-up-Displays (HUD) zum Einsatz, bei denen Fahrzeugdaten (beispielsweise Geschwindigkeit) und Verkehrsinformationen als virtuelle Bilder auf die Windschutzscheibe projiziert werden, sodass die Fahrerinnen und Fahrer den Blick nicht mehr auf einen separaten Bildschirm oder ein Armaturenbrett mit klassischen Fahrzeuginstrumenten richten und vom Verkehr abwenden müssen. Diese Technologie, die historisch zunächst für Kampfflugzeuge entwickelt wurde, erhöht die Fahrsicherheit und trägt zum Verhindern von Verkehrsunfällen bei.

Für derartige Head-up-Displays werden inzwischen neben herkömmlichen Lichtquellen wie LED auch hochauflösende Laser-Scanning-Projektoren verwendet, die beispielsweise gegenüber LCD-Projektoren ein helleres, schärferes, farb- und kontrastreicheres Bild ermöglichen [1]. Es wurden auch bereits holografische Projektoren entwickelt, welche die Anzeige dreidimensional erscheinender Informationen über die gesamte Windschutzscheibe ermöglichen [2]. Für die Holografie sind Laser als Lichtquellen unverzichtbar, da nur sie die erforderliche Kohärenz aufweisen [3].

Kohärenz (lateinisch cohaerere „zusammenhängen“) bezeichnet in der Optik die Eigenschaft von Lichtwellen, eine zeitlich und räumlich konstante Phasenbeziehung zueinander aufzuweisen.

Veranschaulichen lässt sich dies mit dem Bild einer im Gleichschritt voranschreitenden Marschkapelle bei einer Parade (wie zum Beispiel beim jedes Jahr in der Nähe des DPMA Hauptgebäudes in München vorbeiführenden Trachten- und Schützenumzug auf dem Weg zum Oktoberfest): Maximale Kohärenz liegt vor, wenn alle einzelnen Glieder (hier: Wellenzüge) zur gleichen Zeit exakt die gleichen Bewegungen im Raum ausführen und im Takt spielen. Dies trifft auf Laserlicht im Wesentlichen zu, während das Licht einer Glühlampe eine Überlagerung einer Vielzahl verschiedener Wellenbewegungen mit unterschiedlichen Wellenlängen darstellt, welche nicht „im Gleichschritt gehen“ und somit keine Kohärenz aufweisen (im oben genannten Oktoberfest-Beispiel würde dieses unter anderem der relativ ungeordneten Bewegung vieler Wiesn-Gäste auf dem späteren Heimweg entsprechen ...).

Abbildung 1: Speckle-Muster eines Lasers von einer diffusen Oberfläche. Das abgebildete kreisförmige Laserstrahlprofil weist keine homogene Helligkeit auf, sondern ist von einem zufällig verteilten körnigen Muster aus hellen und dunklen Bereichen (Speckles) durchzogen (Granulation). Aus: Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Speckle



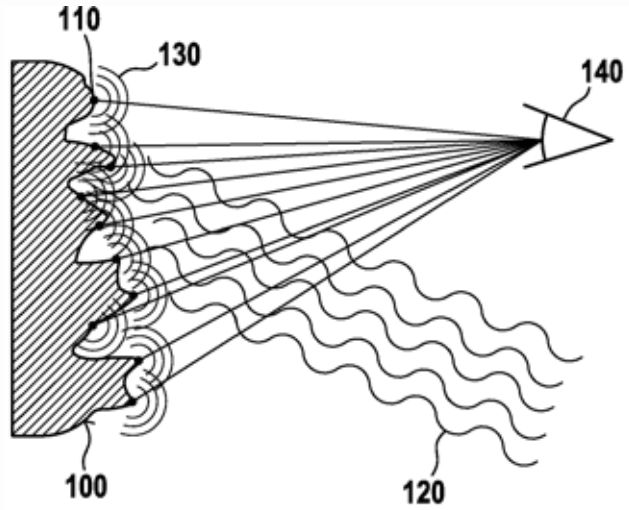


Abbildung 2: Entstehung von Speckle-Mustern an einer Projektionsfläche: Aufgrund ihrer mikroskopisch kleinen Unebenheiten weist die Oberfläche der Projektionsfläche 100 eine Vielzahl punktförmiger Streuzentren 110 auf. Wird nun diese Oberfläche mit kohärentem Licht 120 (beispielsweise von einem Laser) beleuchtet, so wird dieses von den Streuzentren 110 in Form konzentrischer Kugelwellen 130 reflektiert. Eine gegenseitige Interferenz benachbarter Kugelwellen 130 hat zur Folge, dass ein Auge 140 eines Betrachters kleine Bereiche mit unterschiedlichen Lichtstärken (Speckles) wahrnimmt.
Aus: ***DE 10 2013 218 061 A1***

Bei der Beleuchtung mit Laserlicht kommt es jedoch zu unerwünschten Störungen durch ein physikalisches Phänomen, welches als „Speckle“ oder „Granulation“ bekannt ist [4]: Laserstrahlen, die an unregelmäßigen Oberflächen oder Staubteilchen gestreut werden, überlagern sich aufgrund ihrer räumlichen und zeitlichen Kohärenz zu einem ungeordneten, aber zeitlich konstanten Interferenz-Muster aus hellen und dunklen Flecken (englisch: speckle).

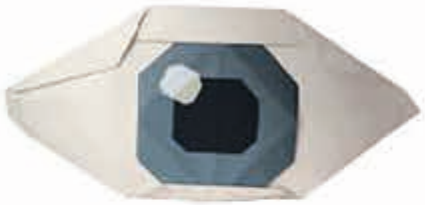
Mit Interferenz wird in der Physik das Ergebnis der Überlagerung von zwei oder mehr an einem Ort aufeinandertreffender Wellen bezeichnet. Durch Addition der Auslenkungen der verschiedenen Wellen können diese sich entweder gegenseitig verstärken (wenn sie am gleichen Ort zur gleichen Zeit in die gleiche Richtung schwingen = konstruktive Interferenz) oder auslöschen (wenn sie in entgegengesetzte Richtungen schwingen = destruktive Interferenz). Bei der

Speckle-Entstehung, Beobachtung, Geschichte

Wenn Laserlicht auf unregelmäßige Oberflächen oder Staubteilchen trifft, wird es mehrfach gestreut. Die verschieden gestreuten Anteile des Laserstrahls interferieren anschließend miteinander und bilden aufgrund ihrer Phasenverschiebungen makroskopisch sichtbare, räumlich unregelmäßige Interferenzmuster, die wegen ihres fleckenartigen Aussehens als „Speckle“ oder in der älteren deutschsprachigen Fachliteratur auch als „Granulation“ bezeichnet werden. Die Granulation lässt sich allerdings auch bei weniger idealen Lichtquellen beobachten und gehört laut Martienssen und Spiller (1965) sogar „zu den ersten physikalischen Beobachtungen im Kindesalter: Bei der Betrachtung einer fernen Lichtquelle durch eine behauchten Glasscheibe bemerkt man eine strahlige Struktur“ [11]. Die Erscheinung tritt nur auf, wenn der Öffnungswinkel des beleuchtenden Lichtbündels hinreichend klein ist, sodass die räumliche Kohärenzbedingung erfüllt ist.

Die Granulation war schon 1877 von Exner [12] ausführlich theroretisch beschrieben worden, geriet im 20. Jahrhundert jedoch zunächst in Vergessenheit und wurde zu Beginn der 1960-er Jahre laut [11] neu entdeckt und dann im Zusammenhang mit der zeitgleichen Entwicklung des Lasers auch praktisch relevant. Bei einer Lichtquelle, die ein Farbspektrum von Lichtwellen mit nicht konstanten Phasenbeziehungen emittiert, insbesondere bei einer Glühlampe, werden in der Regel keine Speckle beobachtet, weil keine hinreichende Kohärenz für die Ausbildung stationärer Interferenzmuster vorhanden ist. Bei Laserlichtquellen führt die Kohärenz des Lichtes hingegen zu makroskopisch sichtbaren Speckle-Mustern, welche das Beleuchtungsmuster beeinträchtigen und wie ein Verschmutzungseffekt wirken. Dieser entsteht somit paradoxerweise aus den besonders hochgeordneten, qualitativ herausragenden Eigenschaften des Laserlichts, welche den Laser ansonsten zu einer idealen Lichtquelle machen, jedoch durch Wechselwirkung der kohärenten Lichtwellen mit unregelmäßig geformten Strukturen in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts zu unerwünschten Störungen führt.

Überlagerung von kohärenten Lichtwellen mit zeitlich konstanter Phasenbeziehung kann somit ein auch makroskopisch sichtbares Hell-Dunkel-Muster entstehen.



Speckle-Muster können grundsätzlich bei jeder Laserlichtquelle beobachtet werden, mit der eine hinreichend rauhe Oberfläche beleuchtet wird. Derartige Oberflächen sind in optischen Systemen regelmäßig vorhanden, zum Beispiel in Form von durchstrahlten Glasscheiben, Filtern, Linsen oder Spiegeln, die auf einer mikroskopischen Skala in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes nicht beliebig glatt sind, sondern Unebenheiten oder Ablagerungen aufweisen.

Die Größe der Speckles hängt dabei von der Feinheit der Oberflächenrauhheit oder der Dichte von Streuzentren ab: Bei grobstrukturierten Oberflächen entstehen kleine Speckles, bei feinstrukturierten Flächen große Speckles (vgl. **DE 197 04 741 A1**)[1]. Praktisch besteht somit in allen mit Laserlicht arbeitenden optischen Systemen ein Bedarf an Maßnahmen, mit denen die sichtbaren Speckle-Muster beseitigt oder zumindest reduziert werden können. Zwar ist eine vollständige Unterdrückung des Speckle-Effektes physikalisch nicht möglich (siehe **US 4 155 630 A**), er lässt sich jedoch auf ein für die praktische Anwendung in der Bildtechnik ausreichendes Maß reduzieren.

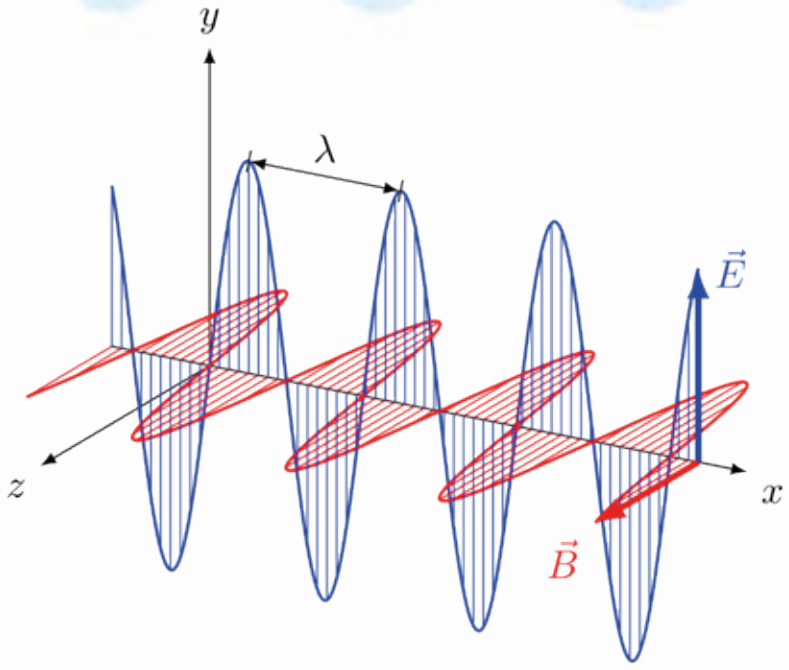


Abbildung 3: Linear polarisierte elektromagnetische Welle (z.B. Licht) im Vakuum (d.h. ohne Wechselwirkung mit Materie). Die Welle mit Wellenlänge λ (räumliche Periode) breitet sich in x-Richtung aus, die Wellenberge werden durch die räumlich und zeitlich periodische Variation der in y-Richtung orientierten elektrische Feldstärke E (in blau) und der in z-Richtung orientierten magnetische Flussdichte B (in rot) gebildet, welche zueinander und zur Ausbreitungsrichtung im 90°- Winkel stehen. Die Richtung der elektrischen Feldstärke E wird als Polarisation bezeichnet. Wenn wie im vorliegenden Fall die Feldstärke E immer die gleiche Richtung im Raum (hier y-Richtung) aufweist, handelt es sich um lineare Polarisation. Bei einer zirkular polarisierten Welle (nicht dargestellt) beschreiben die Richtungen des E- und B-Feldes zusätzlich eine Kreisbewegung in der y-z-Ebene. Bei einer schnellen und ungeordneten Änderung der Feldrichtungen würde hingegen eine unpolarisierte Welle entstehen. Das Licht von thermischen Strahlungsquellen wie Glühlampen sowie Sonnenlicht ist zunächst unpolarisiert, wird jedoch durch Reflexion an spiegelnden Flächen, sowie durch Streuung in der Atmosphäre (Luft) teilweise polarisiert.
Aus: Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle

Eigenschaften von Licht als elektromagnetische Welle

Licht kann als elektromagnetische Welle beschrieben werden, deren Eigenschaften sich in Analogie zur mechanischen Welle veranschaulichen lassen. Eine mechanische Welle wie etwa eine Wasserwelle ist eine orts- und zeitabhängige räumlich periodische Auslenkung eines Körpers aus seiner Ruhelage. Während bei einer Wasserwelle jedoch bekanntlich die Meereshöhe einer Auf-und-ab-Schwingung unterworfen ist, sind es bei einer elektromagnetischen Welle die Stärken des lokalen elektrischen und magnetischen Feldes, die eine periodische Schwingung um den Nullpunkt ausführen, siehe Abbildung 3. Am momentanen Ort eines Wellenberges bzw. Wellentales erreicht dabei die Feldstärke jeweils ihren maximalen Betrag. Elektromagnetische Wellen werden durch folgende Parameter charakterisiert:

- Wellenlänge λ (Abstand zwischen den Wellenbergen, entspricht bei sichtbarem Licht einer vom Auge wahrgenommenen Farbe).
- Frequenz f (Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit), ist mit der Wellenlänge und der Lichtgeschwindigkeit c durch die Formel $c = \lambda \cdot f$ verknüpft.
- Amplitude (Betrag der maximalen Auslenkung aus der Nulllage = Höhe der Wellenberge bzw. Tiefe der Wellentäler), das Quadrat der Amplitude ist ein Maß für die Intensität bzw. Helligkeit des Lichtes.
- Phase (Auslenkungszustand an einem bestimmten Punkt zu einer bestimmten Zeit, z.B. Nulllage oder Schwingungsmaximum).
- Ausbreitungsrichtung der Welle.
- Polarisation (Schwingungsrichtung, d.h. die Richtung des elektrischen und magnetischen Feldes im Raum).

Für das menschliche Auge sichtbares Licht ist eine elektromagnetische Welle mit einer Wellenlänge im Bereich zwischen ca. 350 Nanometer (violettes Licht) bis 800 Nanometer (rotes Licht) [13]. Reale ausgedehnte Lichtquellen emittieren Wellenzüge mit verschiedener Frequenz und Richtung.

Grundlegende Methoden und frühe Patentanmeldungen zur Speckle-Reduzierung

Maßnahmen zur Verringerung des Speckle-Effekts können entweder an den Ursachen oder der Wirkung des Problems ansetzen. Da die physikalische Ursache der Speckle-Muster vor allem in der hohen Kohärenz des Laserlichts (d. h. die über relativ große Entfernungen und Zeiträume mit fester Phasenbeziehung schwingende und voranschreitende, „im Gleichschritt marschierende“ Lichtwelle) besteht, bietet es sich an, durch räumliche und zeitliche Variation der Lichtwellenform graduelle Einschränkungen der Kohärenz vorzunehmen. Dieses kann entweder direkt an der Lichtquelle selbst erfolgen oder innerhalb des vom Laserlicht durchlaufenden Strahlenganges, in welchem die Speckle-Muster entstehen. Ein weiterer Ansatzpunkt besteht in dem begrenzten räumlichen und zeitlichen Auflösungsvermögen des menschlichen Auges, welches bei hochfrequenten Intensitätsschwankungen lediglich einen konstanten Helligkeitsmittelwert wahrnimmt. Bei digital aufgezeichneten Bildsignalen können die Speckle-Muster zudem durch geeignete Bilddatenverarbeitung nachträglich aus dem Gesamtbild herausgefiltert werden.

Die verschiedenen Ansätze zur Speckle-Reduzierung lassen sich nach [5] und **DE 100 83 900 T5** in fünf Kategorien einteilen:

1. Steuern oder Verringern der räumlichen Kohärenz der Lichtquelle
2. Steuern oder Verringern der zeitlichen Kohärenz der Lichtquelle
3. Strahlteilung und räumliche Überlagerung einer Vielzahl verschiedener Teilstrahlen („spatial sampling“)
4. Räumliche und zeitliche Mittelwertbildung über mehrere Speckle-Bilder innerhalb einer Detektorfläche
5. Digitale Bildbearbeitung

Die digitale Bildkorrektur gemäß Kategorie 5 hat für Echtzeit-Bildanzeigen wie Laser-TV, Projektionsbildschirme und Head-up-Displays weniger Bedeutung und wird daher im Folgenden nicht weiter betrachtet. Zudem verbessert eine lediglich nachbearbeitende Bildkorrektur auch nicht die Qualität des Originalbildes, sondern ist ggf. mit Verlusten in der Bildauflösung verbunden.

Iwai und Asakura [5] gaben in ihrem, den damaligen Stand der Forschung zusammenfassenden, Artikel von 1996 eine umfangreiche Literaturübersicht über die bekannten fünf Methoden zur Speckle-Reduzierung. Als Beispiel für die Einschränkung der räumlichen Kohärenz wird dort insbesondere eine kontrollierte Bewegung der Laserlichtquelle oder der den Laserstrahl formenden Optik genannt, z.B. eine rotierende Streuscheibe [6], eine durch Rotation oder Vibration deformierte Lichtleitfaser [7], oder eine bewegliche Lochblende [8], wodurch die Richtung, die Amplitude und Phase der von ihr ausgehenden Lichtwellen eine gewisse lokale Variation erhalten, d.h. „ein wenig aus dem Gleichschritt gebracht werden". Eine Verminderung der zeitlichen Kohärenz (Kategorie 2) kann nach [5] hingegen vor allem durch zeitliche Variation der Wellenlänge des Lichts oder Mischung von Licht verschiedener Wellenlängen erreicht werden. Eine solche Steuerung der Wellenlänge ist allerdings nicht für jeden Lasertyp ohne Weiteres möglich. Zudem ist eine Verbreiterung des Wellenlängenbereiches in der Regel auch mit zu hohen Einbußen in der räumlichen Kohärenz verbunden.[2]

Die **DE 100 83 900 T5** nennt explizit die in [5] definierten fünf Kategorien zur Speckle-Reduzierung und schlägt als Weiterentwicklung eine effektive Kombination mehrerer Methoden zur Verringerung der räumlichen und zeitlichen Kohärenz vor. Dabei wird der Laserstrahl durch einen Strahlteiler in mehrere Teilstrahlen gleicher Querschnittsfläche aufgeteilt, die dann durch unterschiedlich lange Verzögerungsleitungen geführt werden und somit zeitlich beabstandet sind, und denen außerdem noch unterschiedliche Wellenfrontformen aufgeprägt werden. Durch die anschließende Wiedervereinigung der Teilstrahlen summieren sich deren unterschiedliche Speckle-Muster zu einem zeitlich und räumlich gemittelten Speckle-Muster mit reduziertem Hell-Dunkel-Kontrast.

Ein aktueller Artikel [9] gibt einen ausführlichen Überblick über neuere Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Speckle-Reduzierung nach dem Jahr 2000 und zeigt vergleichende Beispiele für Bildaufnahmen mit und ohne Speckle-Reduzierung. Die Autorinnen und Autoren benennen dabei explizit den Kerngedanken der meisten Methoden zur Speckle-Reduzierung: Das Einbringen von räumlicher und zeitlicher Diversität („spatial, angular, temporal and wavelength diversity") in den Laserstrahlengang.

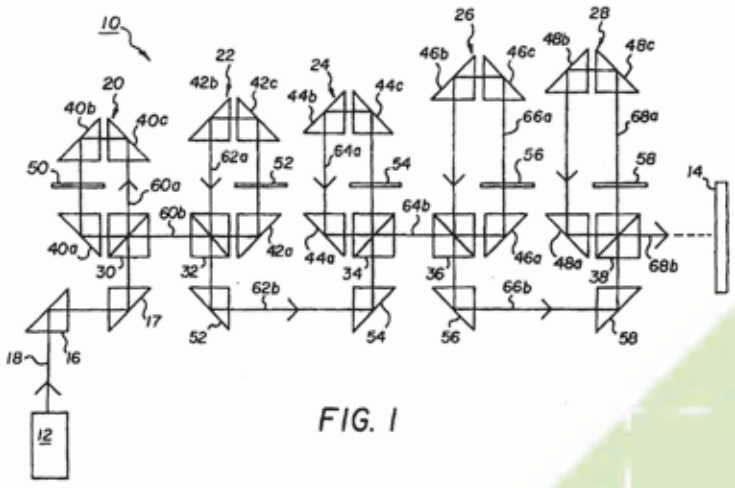


FIG. 1

Abbildung 4:
*Speckle-Reduktionssystem aus **DE 100 83 900 T5**: Licht von einem Laser 12 wird durch mehrere halbdurchlässige Strahlteiler 30, 32, 34, 36, 38 aufgeteilt, wobei jeweils ein Teil des Lichtes reflektiert und der andere Teil durchgelassen wird. Die verschiedenen Anteile des Lichtes werden dann durch eine Serie von Verzögerungsleitungen in eine Folge von Teilimpulsen umgewandelt, die aufgrund der unterschiedlich langen Lichtwege (siehe Pfeilrichtung) zeitlich voneinander beabstandet und außerdem durch Wellenfrontformer 50, 52, 54, 56, 58 räumlich verschieden geformt sind und sich am Detektor 14 zu einem gemittelten Speckle-Muster mit verringertem Kontrast summieren.*



Erfinderische Aktivitäten auf dem Gebiet der Speckle-Reduzierung

Viele Patentanmeldungen, die sich mit der Speckle-Problematik im Bereich der Bildtechnik, Holografie und Mikroskopie befassen, verwenden eine Kombination verschiedener bekannter Ansätze zur Speckle-Reduzierung. So kombinierte bereits die erstmals 1989 in den USA angemeldete Erfindung gemäß der **EP 0 635 986 A1** (Deutsche Veröffentlichung: **DE 690 335 42 T2**) folgende Maßnahmen:

- Aufteilung des Laserstrahls in eine Vielzahl von Strahlen mit geringfügig unterschiedlichen optischen Weglängen und unterschiedlichen Winkeln (Reduzierung der räumlichen Kohärenz),
- Aufbringen mechanischer Schwingungen auf den Projektionsschirm durch akustische Oberflächenwellen (SAW),
- Zeitliche Variation der Laserwellenlänge (Steuerung der zeitlichen Kohärenz),
- Verwendung von Fluoreszenzmaterial im Projektionsschirm.

Die Verringerung der räumlichen Kohärenz durch Strahlteilung und Variation der optischen Weglänge mit Verzögerungsleitungen (siehe Abbildung 4 sowie auch **US 3 633 999 A, JP S63-073221 A**) oder Spiegelanordnungen (**DE 41 24 311 A1**) wird bereits in älteren Anmeldungen häufig kombiniert mit der Verwendung orthogonaler Lichtpolarisationen (z.B. lineare Polarisationen mit senkrecht zueinander stehenden Polarisationsebenen) in den Teilstrahlen (**US 4 511 220 A, US 5 153 773 A, US 5 233 460 A**). Unter der Polarisation wird in der Wellenoptik die Richtung der schwingenden elektrischen Feldstärke verstanden (siehe Abbildung 3). In unserem eingangs genannten „Marschkapellen-Modell“ würde dieses in der mechanischen Analogie etwa der Richtung des Schwenkens einer Fahne oder einer periodischen Armbewegung quer zur Marschrichtung. (z.B. Winken von links nach rechts, oder von oben nach unten und zurück) entsprechen. Auch die aus Fußballstadien bekannte „La Ola“- Wellenbewegung kann dementsprechend als einfaches Beispiel einer vertikal polarisierten Welle angesehen werden. Genauso wie sich in der klassischen Mechanik senkrecht zueinander orientierte Kräfte und Bewegungen nicht gegenseitig beeinflussen[3], können sich auch senkrecht zueinander polarisierte

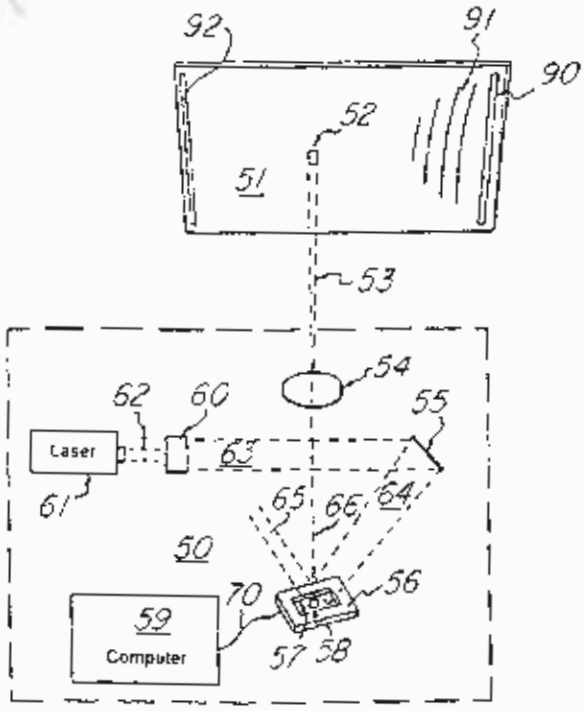


Abbildung 5:
*Kombination mehrerer Maßnahmen zur Speckle-Reduzierung (**DE 690 335 42 T2**):*
Ein gesteuerter Laserstrahl 62 wird auf einen reflektierenden Lichtmodulator (SLM) 56 gerichtet, wobei der SLM 56 ein Bild erzeugt und über eine Vergrößerungslinse 54 auf den Anzeigeschirm 51 lenkt, wo die Lichtstrahlen unter geringfügig unterschiedlichen Winkeln auftreffen.
Dem Anzeigeschirm 51 aus einem fluoreszierendem Material werden durch einen Wandler 90 akustische Oberflächenwellen aufgeprägt, wodurch das menschliche Auge insgesamt durch zeitliche Mittelung über verschiedene Speckle-Muster einen reduzierten Kontrast wahrnimmt.

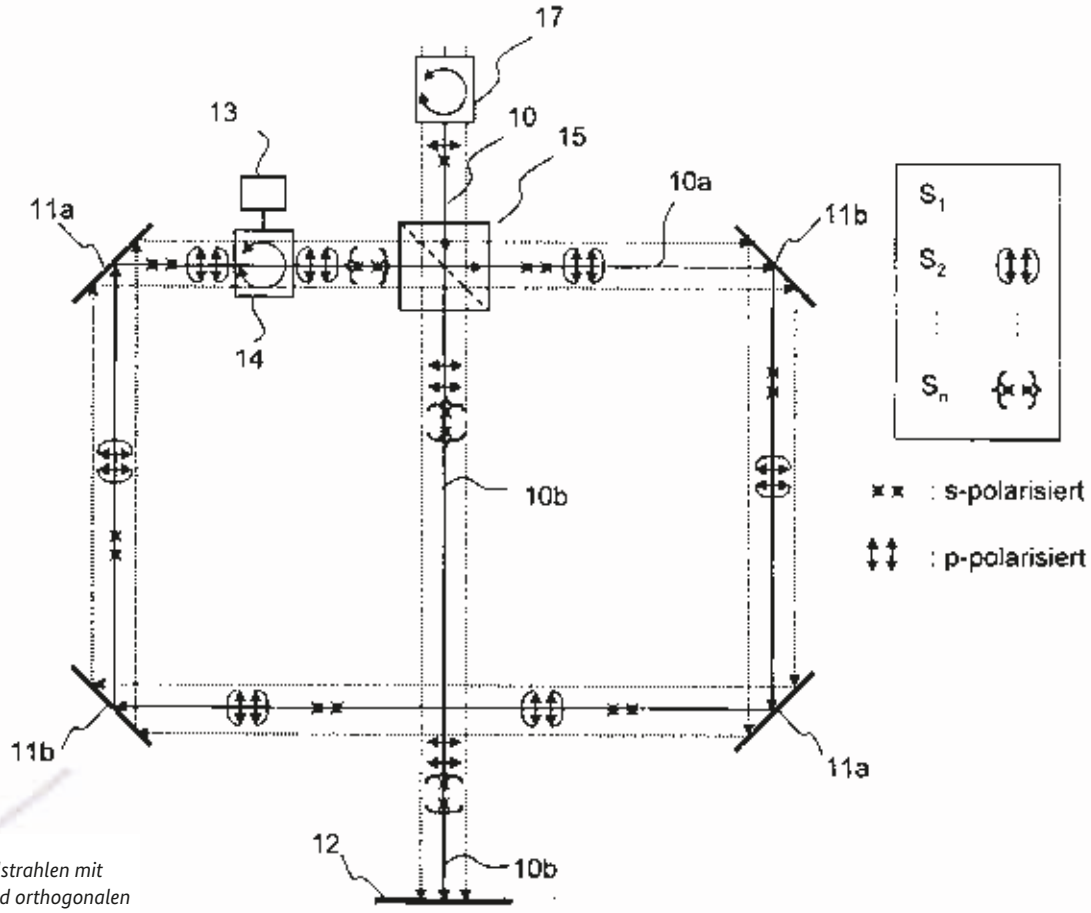


Abbildung 6:
*Erzeugung einer Vielzahl von Teilstrahlen mit unterschiedlichen Weglängen und orthogonalen Polarisationen (s- und p-Polarisation) aus einem Eingangsstrahlenbündel 10 eines Pulslasers. Mittels des strahlteilenden und polarisierenden Prismenwürfels 15 und den strahlumlenkenden Spiegel 11a-b wird eine Umlaufstrecke gebildet, auf der die Polarisation der Teilstrahlen in jedem Umlauf durch den Polarisationsrotator 14 variiert werden kann. Die Summe 10b der nach den Umläufen durch den Prismenwürfel 15 wiedervereinigten Teilstrahlen weist dadurch eine verringerte Kohärenz auf, was zur Speckle-reduzierung führt (**DE 10 2009 047 098 A1**).*

Lichtwellen bei ihrer Überlagerung nicht verstärken oder auslöschen, d.h. nicht miteinander interferieren und deshalb auch keine Speckle-Muster bilden. Somit kann durch die Einstellung unterschiedlicher (und insbesondere senkrecht zueinander orientierter) Lichtpolarisationen in den Teilstrahlen die räumliche Kohärenz des daraus anschließend durch Strahlvereinigung zusammengesetzten Laserlichts und die Entstehung von Speckle-Interferenzmustern weiter verringert werden (**DE 195 08 754 C2**). **DE 10 2009 047 098 A1** entwickelt diese Kombination von Strahlteilung, Umlaufleitungen und Polarisatoren zur Kohärenzminderung speziell für gepulste Laserlichtquellen weiter (siehe Abbildung 6).

Während derartige optische Anordnungen zumeist sehr präzise Konstruktionen und Justierungen erfordern, kann bei der Verringerung der Kohärenz mittels beweglicher optischer Komponenten auch das Zufallsprinzip hilfreich sein:

So schlägt **US 4 155 630 A** zur Speckle-Eliminierung ein abbildendes optisches System vor, bei dem der Laserstrahl eine Streuscheibe durchläuft und anschließend an einem Scan-Spiegel reflektiert wird, der eine schnelle und zufällige dreidimensionale Schwingungsbewegung ausführt. Dadurch wird die Richtung und Phase des Lichts über den Querschnitt des Laserstrahls räumlich moduliert, d.h. die „Gleichschrittsformation" der Welle lokalen Schwankungen unterworfen, ähnlich wie bei der vorstehend beschriebenen rotierenden Streuscheibe [6].

In gleicher Weise wird in **DE 100 84 527 T5** ein Laser-Projektionsspiegel in eine für das menschliche Auge nicht sichtbare hochfrequente Schwingungsbewegung versetzt, die eine vorgegebene Zufälligkeitskomponente enthalten kann. Durch die Schwingung kann neben dem Speckle-Effekt auch der sichtbare Effekt der Pixelierung (d.h. der Aufbau des durch die Projektion vergrößerten Bildes aus einzelnen Bildpixeln) durch „Verschmierung" der Pixelränder beseitigt werden.



und **DE 10 2004 011 468 A1** beschreiben jeweils Kohärenzminderer mit räumlich unterschiedlicher Phasenverschiebung, welche durch eine Vielzahl von räumlich zueinander versetzten, rasterförmig angeordnete Spiegelteilflächen realisiert wird (siehe Abbildung 7). In **DE 10 2004 011 468 A1** wird zudem jeder so erzeugte Teilstrahl noch in zwei Teilstrahlen aufgeteilt, die senkrecht zueinander polarisiert sind. Die **DE 10 2006 035 068 A1** verwendet zur Phasenvariation statt der Spiegelanordnung eine Kombination aus Beugungsgitter und Mikrolinsen. **DE 102 01 315 A1** und **DE 103 45 784 A1** kombinieren die Variation der Phase und Polarisation zusätzlich noch damit, dass die räumlich zueinander versetzten Strahlenbündel sich in (geringfügig) unterschiedliche Richtungen ausbreiten.

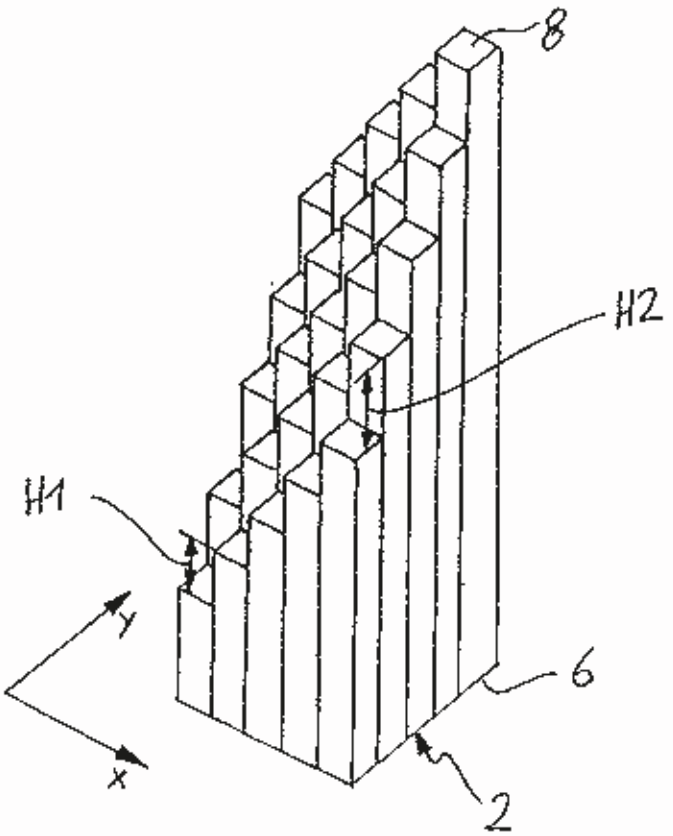


Abbildung 7:
*Kohärenzminderer aus **DE 103 38 244 A1**: Mit einem Stufenspiegel 2 werden einem Laserstrahl über dessen Querschnitt ortsanhängige Phasenverschiebungen aufgeprägt. Der Stufenspiegel besteht aus einer Vielzahl von Stäben 6 mit verspiegelten Endflächen 8. Durch die Reflexion an den verschieden hohen Stufen entstehen Teilstrahlenbündel, die Gangunterschiede und somit unterschiedliche Phasen aufweisen. Die Stufenhöhen H1 und H2 werden so gewählt, dass die von ihnen erzeugten Teilstrahlenbündel möglichst nicht mehr interferenzfähig sind (z.B. H2 > H1 = 50 µm) und deshalb keine Speckle-Muster erzeugen.*

Ganz ähnlich wird auch in **DE 197 04 741 A1** durch eine schnelle Bewegung des Projektionsschirms, des Projektionsstrahls oder dessen Teilstrahlen eine Reduzierung der sichtbaren Speckle-Muster erreicht, da das menschliche Auge aufgrund seiner Trägheit und begrenzten Auflösung schnelle und kleinräumige Helligkeitsvariationen nur als einheitlichen Grauwert wahrnimmt.

Die **DE 197 03 730 A1** schlägt hingegen vor, den Projektionsstrahl durch ein zeitlich variables Phasenhologramm aufzuspalten und die Teilstrahlen auf dem Bildschirm so zu überlagern, dass sich die Speckle-Muster für das betrachtende Auge zeitlich und/oder örtlich ausmitteln.

Eine Reihe von deutschen Patentanmeldungen befasst sich vor allem mit der Reduzierung der räumlichen Kohärenz durch räumliche oder zeitliche Variation der lokalen Phase der Lichtwelle über einen Strahlquerschnitt. Dieses erfolgt in **DE 195 01 525 C1** mittels einer im Strahlengang bewegbaren Phasenplatte (durchsichtige Platte mit Erhebungen von weniger als 3 µm, die eine Phasenverschiebung benachbarter Lichtbündel bewirken). Die **DE 196 45 978 C2** untersucht generell, welche Größe derartige Phasenverschiebungen relativ zur Kohärenzlänge aufweisen und wie sie statistisch verteilt sein müssen, um eine allgemein wirksame Speckle-Reduktion zu bewirken. **DE 101 48 167 A1**, **DE 103 38 244 A1**

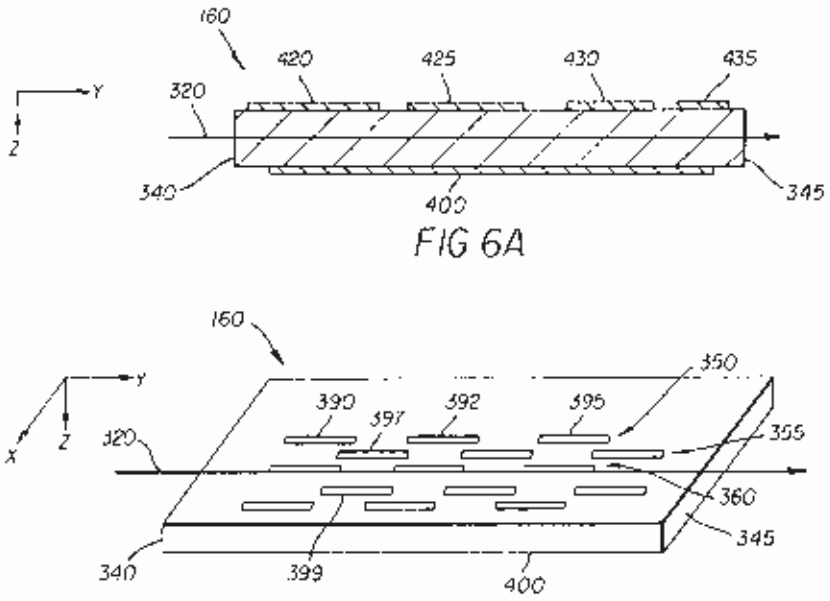


Abbildung 8:
*Die Abbildung 6A und 6B aus der **DE 603 00 824 T2** zeigen einen in einer Laserprojektionsanzeige verwendbaren elektrooptischen Despeckling-Modulator, wobei durch Ansteuerung der als Streifen dargestellten Elektroden (420 bis 435; 390 bis 399) lokale Wellenverzögerungen realisiert werden können, wie sie bei den Anordnungen aus Abbildung 4 oder 7 durch die geometrische Struktur von fest eingebauten optischen Elementen (Spiegel, Wellenfrontformer, Strahlteiler, Verzögerungsleitungen) erzeugt wurden.*

Ein relativ einfacher Ansatz zur Speckle-Reduzierung für einige Anwendungen besteht in der Variation der Brennweite bzw. Brechkraft von einstellbaren optischen Linsen, wie er in **DE 10 2006 047 531 A1** und **US 2012/0200832 A1** gezeigt wird: Eine zeitliche Variation der Brennweite mit einer Frequenz von mindestens 60 Hz kann eine leichte Defokussierung des Strahlbildes und entsprechende periodische Änderung des Speckle-Musters bewirken, was aufgrund des begrenzten Integrationsvermögens des menschlichen Auges wiederum eine wahrnehmbare Reduktion des Speckle-Kontrastes bewirkt.

Allen diesen Ansätzen ist offensichtlich gemeinsam, dass sie die Parameter des Lichtfeldes, die den Zustand und die Form der Lichtwelle charakterisieren (insbesondere Phase, Amplitude, Polarisation, Ausbreitungsrichtung, siehe Abbildung 3), lokal und zeitlich in begrenztem Umfang variieren, sodass die Strahlform und sichtbare Bildinformation als Ganzes weitgehend erhalten bleiben und lediglich die Speckle-Interferenzmuster gezielt reduziert werden.

Jedoch kann auch eine besondere Ausgestaltung des Projektionsschirms zur Speckle-Reduzierung beitragen, wie **DE 196 45 978 C2** und **DE 196 45 976 C1** (körniger Teflon-Schirm) oder **DE 196 23 179 A1** (Suspension von beweglichen Mikro-Partikeln in einer Flüssigkeit) zeigen.

Die vorstehend beschriebenen Methoden erfordern allerdings in der Regel ein speziell auf die jeweiligen Anwendungen, Lichtquellen und das gewünschte Maß der Speckle-Reduktion abgestimmtes Design der verwendeten optischen Elemente und ggf. mechanische Antriebsmittel, was mit apparativem Aufwand verbunden ist. Wünschenswert wären daher grundsätzlich für eine Automatisierung geeignete, elektronisch einfach steuerbare optische Vorrichtungen, mit denen die verschiedenen Parameter der Lichtwellen flexibel variiert und an veränderliche Anforderungen angepasst werden können.

Zu diesem Zwecke wurde schon frühzeitig die Verwendung elektrooptischer Lichtmodulatoren z. B. auf der Basis von Flüssigkristallen vorgeschlagen, mit denen sich sowohl eine räumliche als auch zeitliche Variation des Lichtfeldes über den Querschnitt des Laserstrahls realisieren lässt, die zur Speckle-Unterdrückung geeignet ist, siehe **DE 198 52 890 A1, DE 199 24 519 A1**, **DE 603 00 824 T2**.

Im Gegensatz zu Letzteren kann ein elektrooptischer Lichtmodulator die Eigenschaften der Lichtwelle (Phase, Polarisation, Ausbreitungsrichtung etc.) ortsabhängig durch elektrische Spannungssignale gezielt verändern bzw. einstellen und somit herkömmliche Strahlformungsoptiken ersetzen.

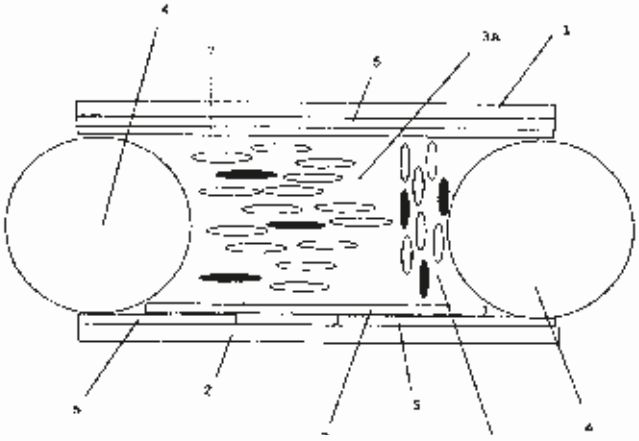


Abbildung 9:
*Die Darstellung aus **DE 60 2005 003 829 T2** zeigt den Aufbau einer Flüssigkristallzelle, die durch parallele Zellwände 1, 2 und Abstandshalterkugeln 4 begrenzt ist. Jede Zellwand 1, 2 weist auf ihrer Innenoberfläche eine Elektrode 5 auf, auf deren Innenoberfläche eine planare Ausrichtschicht 7 gebildet ist, um zu bewirken, dass benachbarte Flüssigkristallmoleküle 3A und dispergierte anisotrope Pigmente (dunkel ausgefüllte Ellipsen) mit ihren Längsachsen bevorzugt parallel zur Zellwand liegen. Falls an die Elektroden 5 ein geeignetes elektrisches Feld angelegt wird, werden die Flüssigkristallmoleküle zu einem vertikal ausgerichteten Zustand geschaltet (in Region 3B veranschaulicht). Dadurch lässt sich die Transmission (d.h. der Anteil des durch die Zelle hindurchgehenden Lichtes) lokal variieren.*



Flüssigkristallmaterialien weisen aufgrund ihrer anisotropen (d.h. richtungsabhängigen) Struktur aus z.B. stab- oder scheibenförmigen organischen Molekülen einen richtungsabhängigen optischen Brechungsindex (Doppelbrechung) auf [9], welcher durch von außen angelegte elektrische Felder beeinflussbar ist, sodass durch Gleich- oder Wechselspannungssignale eine räumlich inhomogene und ggf. auch zeitlich variable Brechungsindexverteilung in der Flüssigkristallzelle erzeugt werden kann, wodurch insbesondere die Phase und Polarisation der Lichtwellen lokal variiert werden (siehe z.B. **DE 198 52 890 A1**, **DE 60 2005 003 829 T2**)[4].

Mit dem technologischen Fortschritt auf dem Gebiet der Flüssigkristallanzeigen (LCD) in der Bildschirmtechnik nach dem Jahr 2000 erfuhr die Verwendung von Flüssigkristallmaterialien zur Lichtmodulation auch auf dem Gebiet der Projektionsanzeigen weitere Aufmerksamkeit (siehe unter anderem die **US 2010/0232005 A1**) und zählt heute zum etablierten Stand der Technik.

Speckle-Reduzierung in Head-up-Displays

Im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts beginnt auch die serienmäßige Verwendung von Head-up-Displays (HUD) in der Automobiltechnik. Zunächst in Oberklasse-Fahrzeugen und als Extra-Austattung, später allerdings auch als Standard.

Der Bedarf an effizienten und hellen Lichtquellen und der daraus resultierende zunehmende Einsatz von Lasern für derartige Projektionsanzeigen stimuliert seitdem erneut die Aktivitäten von Erfinderinnen und Erfindern auf dem Gebiet der Speckle-Reduzierung. Obwohl die grundlegenden Konzepte dafür bereits vorhanden sind, erfordert deren Anwendung im Fahrzeugbau und die Anpassung an die besonderen Anforderungen von Head-up-Displays Weiterentwicklungen, insbesondere an der Spiegeloptik, dem Bildschirm und den Projektionsflächen des HUD.

Die **DE 10 2012 107 066 A1** diskutiert die z.B. aus der **US 2010/0014054 A1** bekannte Methode, das Speckle-Rauschen durch Überlagerung von Laserstrahlen orthogonaler Polarisation zu verringern. Wenn diese Technik auf eine Head-up-Display-Einrichtung eines Fahrzeugs angewandt wird, die ein auf einem Display angezeigtes Bild auf die Frontscheibe des Fahrzeugs projiziert, kann sich die Speckle-Reduzierung aufgrund der vom Einfallswinkel abhängigen Polarisation möglicherweise stark verschlechtern. Zur Lösung dieses Problems wird vorgeschlagen, die Polarisationsvorrichtung in Kombination mit einem streuenden und reflektierenden Bildschirm zu verwenden.

Auch die beiden Parallelanmeldungen **DE 10 2007 048 850 A1** und **DE 10 2007 048 851 A1** zitieren einschlägigen Stand der Technik zur Speckle-Reduzierung aus älteren Patentanmeldungen, beanspruchen dann aber im Hinblick auf HUD-

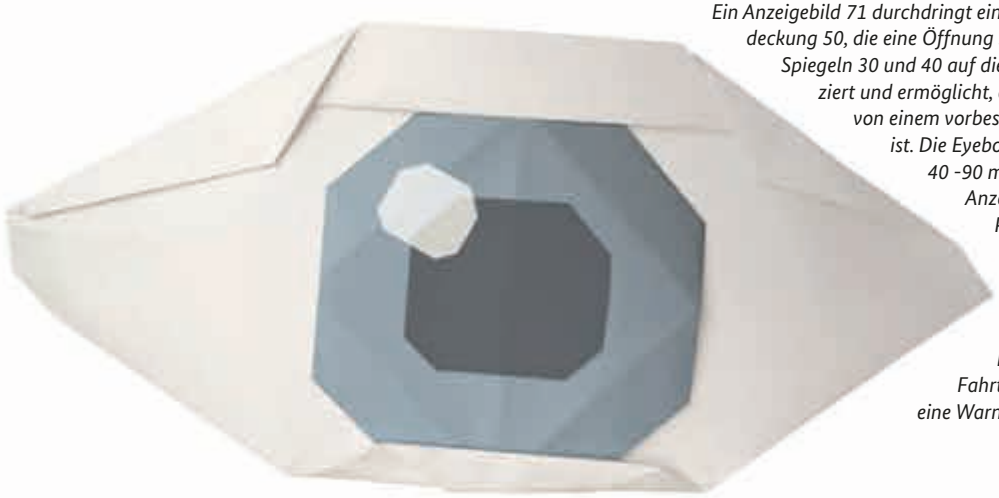
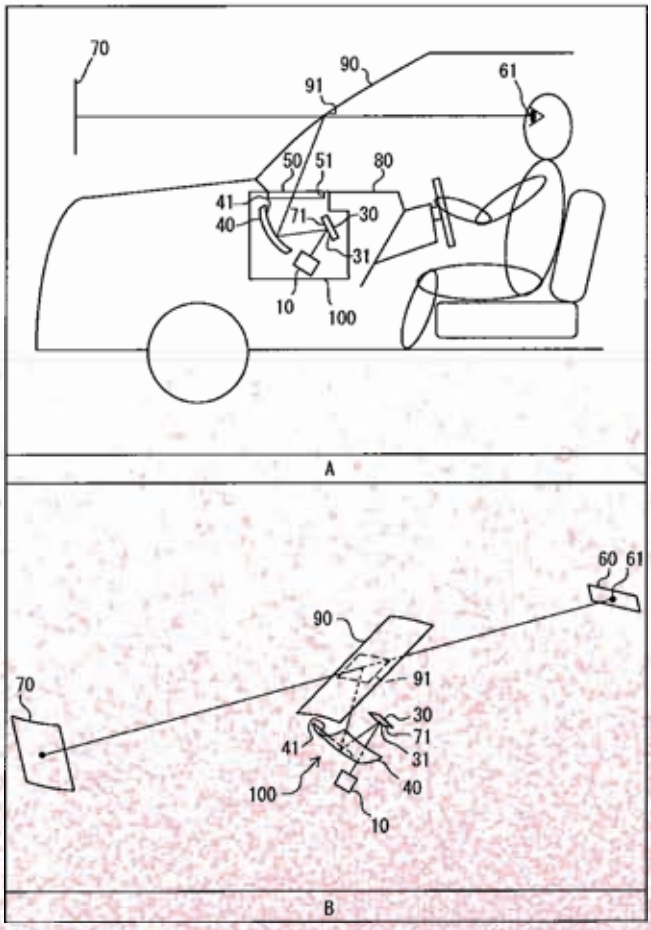


Abbildung 10:
*Zeichnungen A und B aus **DE 11 2013 002 801 T5** zeigen schematisch den Aufbau eines Head-up -Displays aus verschiedenen Perspektiven. Die Anzeigevorrichtung 100 ist z.B. in einer Instrumententafel 80 eines Fahrzeugs eingebaut. Ein Anzeigebild 71 durchdringt eine lichtdurchlässige Staubverhinderungsabdeckung 50, die eine Öffnung 51 bedeckt. Das Anzeigebild 71 wird mittels Spiegeln 30 und 40 auf die Windschutzscheibe 90 des Fahrzeugs projiziert und ermöglicht, dass ein virtuelles Bild 70 des Anzeigebilds 71 von einem vorbestimmten Augenbereich (Eyebox) 60 sichtbar ist. Die Eyebox 60 ist z.B. 100-200 mm horizontal und 40 -90 mm vertikal dimensioniert. Das Licht des Anzeigebilds 71 wird auf die konkav gekrümmte Projektionsebene 91 projiziert, die dann das Licht zur Eyebox 60 reflektiert. Das Licht erreicht einen Augenpunkt 61 eines Betrachters. Das Anzeigebild 1 enthält beispielsweise eine Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs, eine Anweisung über die Fahrtrichtung von einem Navigationssystem und eine Warnung.*

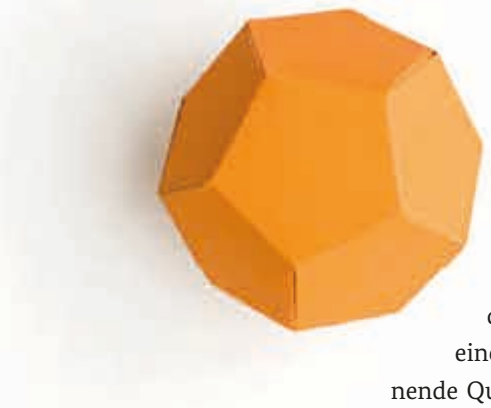


Anzeigen spezielle Ausgestaltungen von mikroskopisch kleinen Bereichen von Reflexionsflächen (die entweder konkav oder konvex gekrümmt oder gegeneinander geneigt und/ oder verschoben sind) innerhalb der Abbildungsoptik als erfinderische Ideen zur Speckle-Reduzierung. Gemäß der **DE 10 2012 212 088 A1** soll durch den Einsatz einer Projektionsfläche mit einer Vielzahl von Mikrohohlspiegeln das Auftreten eines störenden Specklemusters in einem virtuellen Bild eines HUD vermindert werden.

Andere Anmeldungen greifen hingegen die aus dem Stand der Technik bekannten Ansätze auf, durch Bewegung von Komponenten des optischen Systems eine Reduzierung der räumlichen und zeitlichen Kohärenz oder eine Mittelung über verschiedene Speckle-Muster herbeizuführen: Die **DE 10 2011 088 278 A1** lehrt, zur Reduzierung von Speckle-Mustern unter anderem. in Head-up-Displays eine von einem Laser beleuchtete Anzeigeeinheit zu verwenden, die zumindest abschnittsweise aus einem elektroaktivem Polymer gebildet ist und durch Anlegen einer elektrischen Spannung in Vibrationen in zumindest eine Richtung versetzbar ist.

Gemäß **DE 10 2011 084 530 A1** und **DE 10 2013 218 061 A1** soll der Speckle-Effekt durch Schwingungsbewegungen des Projektionsschirms und/oder des Umlenkspiegels in zumindest einer Richtung reduziert werden.

Auch die **DE 10 2012 201 311 A1** verwendet ein Verfahren, bei dem der Projektionsschirm bewegt wird, und zwar in zumindest zwei Richtungen mit einer geregelten Frequenz, die sich von der Bildwiederholfrequenz des HUD unterscheidet. Eine solche Möglichkeit zur Speckle-Reduktion bietet sich insbesondere für Systeme an, bei denen ein Bild zeilenweise aufgebaut wird. U**S 2017/0199382 A1** beschreibt eine HUD-Vorrichtung an einem Fahrzeug, bei der die Brennweite des optischen Projektionssystems durch eine Änderung der Krümmung eines Projektionsspiegels oder elektrisch steuerbare Linse zeitlich variiert und Speckle-Muster durch zeitliche Mittelung reduziert werden.



In **US 2010/0141898 A1** ist die im Projektionsstrahl eines HUD angeordnete Laser-Speckle-Unterdrückungs-Vorrichtung eine als Streuscheibe dienende Quarzplatte, auf die zufällige piezoelektrische Vibrationen aufgebracht werden. In ähnlicher Weise schlägt **DE 10 2015 215 097 A1** vor, den bilderzeugenden Lichtstrahl mittels einer hochfrequenten Variation der mechanischen Spannung an einer elektrisch auslenkbaren Membran in einen bestimmten Winkelbereich zu streuen. In **US 2020/0183177 A1** und **US 2023/0161084 A1** werden speziell zur Speckle-Reduzierung in holografischen Head-up-Displays geeignete Vorrichtungen beschrieben, welche eine Mattglasscheibe aufweisen, die durch einen elektromagnetischen Aktuator in eine Schwingungsbewegung versetzt wird, wodurch die räumliche Kohärenz der Laserstrahlung verringert wird.

In **DE 10 2018 130 148 A1** werden eine Vielzahl separat verstellbare, in einer Gitterstruktur angeordnete Spiegelelemente zur Reduzierung von Speckle-Mustern zumindest teilweise mit schneller Geschwindigkeit bewegt.

Weitere neuere Anmeldungen auf dem Gebiet der Head-up-Displays befassen sich auch mit dem Konzept der Verminderung der zeitlichen Kohärenz des Laserlichtes zwecks Speckle-Reduzierung: In **DE 10 2015 122 440 A1** wird zu diesem Zweck das Licht von mehreren farbigen Laserdioden aus verschiedenen Spektralbereichen in einer Kombinationsoptik zusammengeführt. In **US 2017/0293156 A1** wird hingegen ein polarisierender Strahlteiler in Kombination mit einer Prismenanordnung verwendet, um Teilstrahlen mit unterschiedlicher optischer Weglänge und orthogonalen Polarisationen zu erzeugen, wodurch dann die zeitliche Kohärenz bei der Rekombination der Teilstrahlen vermindert wird. Alternativ dazu beschreibt die Parallelanmeldung **US 2017/0293155 A1** Vorrichtungen für Head-up-Displays, die doppelbrechende Kristalle verwenden, welche das Laserlicht in zwei separate Lichtstrahlen winkelmäßig aufteilen und rekombinieren. Die Winkeltrennung der Lichtstrahlen erzeugt eine zeitliche Verzögerung zwischen den zwei Lichtstrahlen und reduziert somit ebenfalls die zeitliche Kohärenz.

Insgesamt verwenden somit auch viele der bekannten Despeckling-Methoden, die in Head-up-Displays zum Einsatz kommen, entweder mechanisch bewegte Teile und elektrische Antriebe oder erfordern zusätzliche fest eingebaute Optiken.

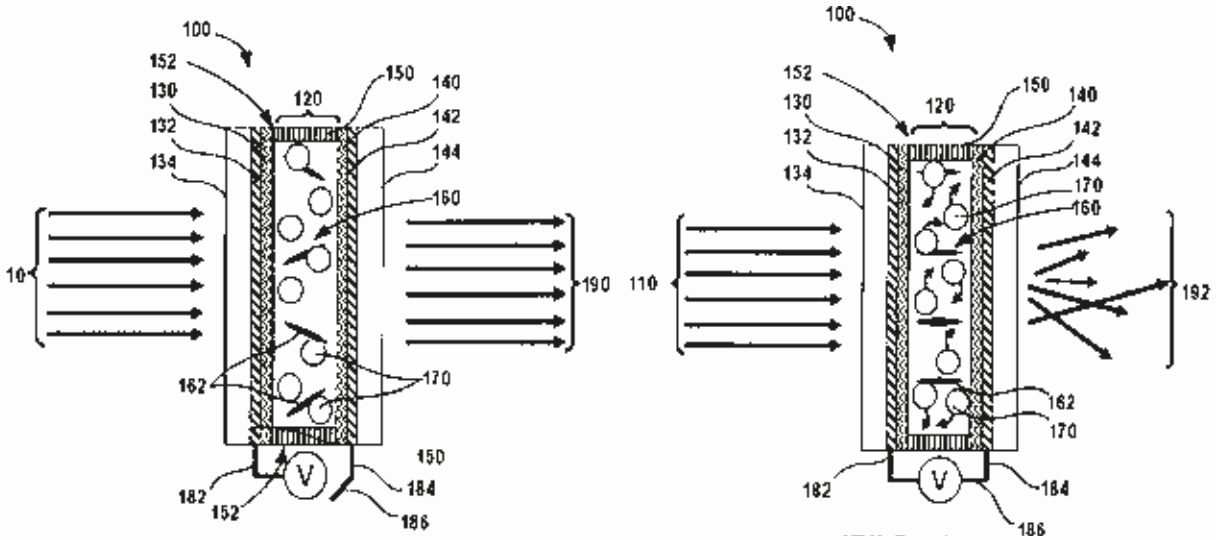


Abbildung 11:
Speckle-Reduzierung durch elektrohydrodynamische Konvektion in Flüssigkristallzellen. Wenn an der Zelle keine elektrische Spannung anliegt (siehe Abbildung links), findet keine gerichtete Bewegung von Molekülen, Partikeln oder Elektronen statt. Bei einer angelegten elektrischen Spannung V entsteht hingegen ein Stromfluss, der im Zusammenspiel mit der Anisotropie der Flüssigkristalle oberhalb eines kritischen Werts der Spannung V aufgrund einer Instabilität zu einer makroskopisch sichtbaren selbstorganisierten Fließbewegung der Flüssigkristallmoleküle und beigemischten Partikel in Form von regelmäßigen Konvektionszellen führt (siehe Abbildung rechts), welche eine erhöhte Streuung und Kohärenzminderung des hindurchtretenden Lichts bewirkt. Aus: ***DE 10 2020 126 897 A1***

Als Alternative bieten sich auch hier wiederum räumliche Lichtmodulatoren auf Flüssigkristallbasis an, welche die optischen Eigenschaften des Laserstrahls allein durch elektronische bzw. softwaretechnische Ansteuerung in gewünschter Weise einstellen können, ggf. sogar für jeden einzelnen Pixel (**US 2024/0029208 A1**).

Einsatz von dynamischen elektrooptischen Effekten in Flüssigkristallen zur Speckle-Reduzierung in Head-up-Displays

Bereits in der **DE 10 2013 008 372 A1** wird vorgeschlagen, einen Flüssigkristall-Lichtmodulator zu verwenden, der in rascher zeitlicher Abfolge nacheinander identische Bilder des Objekts auf der Projektionsfläche erzeugt, deren Positionen geringfügig variiert werden, sodass vom Auge durch Mittelwertbildung ein specklereduziertes Bild auf der Projektionsfläche wahrgenommen wird.

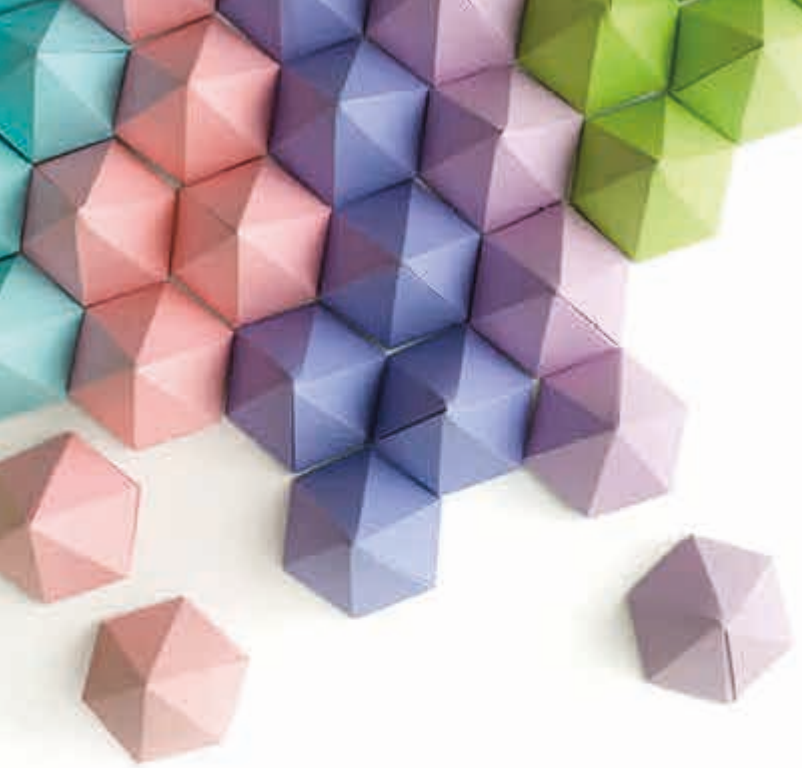
Die **GB 2 526 275 A** beschreibt ein Verfahren zur Speckle-Reduzierung durch schnelles Umschalten zwischen verschiedenen Lichtstreuungszuständen einer Flüssigkristallschicht.

DE 10 2021 110 493 A1 zeigt einen holografischen Netzhautdirektprojektor zur Verwendung unter anderem in einem HUD, bei dem Speckle ebenfalls durch die Verwendung eines schnell (d. h. mit einer für das Auge nicht wahrnehmbaren Frequenz größer als 60 Hz) schaltendenden Flüssigkristallmodulators reduziert wird.

In einer Reihe neuerer Patentanmeldungen (**DE 10 2020 126 897 A1**, **DE 10 2020 131 139 A1** und **DE 10 2021 101 724 A1**) von der Kooperation der GM Global Technology Operations LLC, Detroit, US und Kent State University, Ohio, US, wird ein weiterer innovativer Ansatz zur Speckle-Reduzierung vorgeschlagen, der allein auf dem Betrieb von Flüssigkristallzellen beruht, die zusätzlich Mikro- oder Nanopartikel enthalten. Durch Anlegen einer Spannung wird in der Flüssigkristallzelle ein elektrisches Feld erzeugt, welches oberhalb einer kritischen Feldstärke eine elektrohydrodynamische Instabilität verursacht und zu einer selbstorganisierten Strömung in Gestalt von rollenförmigen Konvektionszellen führt (ähnlich wie bei thermischer Konvektion in einem von unten erhitzten Wassertopf auf einer Herdplatte). Diese besonderen Effekte in Flüssigkristallen sind seit langem bekannt, siehe z.B. [9] - [11]. Ihre technische Anwendung war bisher jedoch beschränkt – bei Flüssigkristallbildschirmen sind solche Fließbewegungen in den Zellen grundsätzlich unerwünscht. Im Zusammenspiel mit den der Flüssigkristallzelle zugesetzten Partikeln kann die elektrohydrodynamische Konvektion jedoch wirksam zur Speckle-Reduzierung beitragen.

In **DE 10 2020 126 897 A1** dienen Mikropartikel mit einem mittleren Durchmesser kleiner oder gleich 20 µm zur Verstärkung der Lichtstreuung des durch die Flüssigkristallzelle hindurchtretenden Lichtes. Die angelegten elektrischen Felder verursachen elektrohydrodynamische Konvektion und bewegen dadurch auch die Mikropartikel mit, wodurch die Lichtstreuung erhöht wird (siehe Abbildung 11). Der Betrag der Specklekontrast-Minderung kann durch den Wert der eingestellten Spannung geregelt werden, wobei eine höhere Spannung dazu neigt, eine stärkere Bewegung der Mikropartikel und eine stärkere Minderung des Speckle-Kontrasts durch Lichtstreuung bereitzustellen.





In **DE 10 2020 131 139 A1** werden den Flüssigkristallen statt Mikropartikeln noch kleinere Nanopartikel (mittlerer Durchmesser kleiner gleich 450 Nanometer) zugemischt, deren Brechungsindex von dem der Flüssigkristalle signifikant abweicht, wodurch eine stärkere Vorwärtsstreuung und damit eine höhere Intensität des durch die Zelle hindurchgehenden Lichtes bewirkt wird. Durch die Verwendung der Nanopartikel kann eine im Vergleich zu den Mikropartikeln noch effektivere, gleichmäßige Reduzierung des Speckle-Kontrastes bereits bei vergleichsweise geringen Spannungen erreicht werden. Die **DE 10 2021 101 724 A1** entwickelt die Ideen der beiden vorstehend genannten Vorgänger-Anmeldungen apparativ weiter, indem mehrere mit Mikro- und Nanopartikeln versehene Flüssigkristallzellen separat hintereinandergeschaltet werden, an die unterschiedliche Spannungssignale angelegt werden, sodass es zu einer Überlagerung verschiedener Speckle-Muster kommt, die zudem innerhalb der Integrationszeit des menschlichen Auges (8 Millisekunden) variieren, sodass zusätzlich eine räumliche und zeitliche Mittelung der Speckle-Muster stattfindet.

Auch die **US 2019/0196216 A1** (Oxford University) lehrt eine Reduzierung des Speckle-Kontrastes durch die Verwendung von Flüssigkristallzellen, wobei durch Anlegen geeigneter elektrischer Spannungen eine zeitlich variierende Lichtstreuung durch turbulente Strömung erzeugt wird und ebenfalls Mikro- oder Nanopartikel zur Verstärkung der Lichtstreuung verwendet werden.

In allen genannten Fällen ersetzen die Flüssigkristallzellen dabei unter anderen die bei vielen herkömmlichen Vorrichtungen zu Speckle-Reduzierung verwendeten beweglichen Streuscheiben und benötigen keine motorischen Antriebe, sondern lediglich elektrische Schaltungen mit Spannungsquellen im Bereich von wenigen Volt.

Aus der Grundlagenforschung in die Industrie

Die vorstehend genannten Patentanmeldungen sind auch deshalb besonders interessant, weil hier schon länger bekannte Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung von Universitäten (Flüssigkristallphysik, elektrohydrodynamische Instabilitäten, Nanoteilchen) zielgerichtet in aktuelle technologische Anwendungen im Bereich der Automobilindustrie einfließen. Die Verwendung der dort beschriebenen Vorrichtungen zur Speckle-Reduktion ist jedoch nicht auf Head-up-Displays in Fahrzeugen beschränkt, sondern grundsätzlich auch in anderen lasergestützen Bildanzeigen, Projektoren und Mikroskopen sowie in der Holografie verwendbar (vgl. **US 2019/0196216 A1**, Absatz [0131]). Weitere Beispiele für moderne Anwendungen der Speckle-Reduktion in der digitalen Holografie sowie der hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie werden in dem bereits genannten Übersichtsartikel [9] ausführlich beschrieben.



Fazit

Die vorliegende Übersicht über die Entwicklung der Erfinderaktivitäten zur Reduzierung des Speckle-Effekts zeigt, dass auch zu seit langem bekannten technischen Problemen aus dem Bereich der physikalischen Grundlagen immer wieder neue Lösungen entwickelt werden. Grundsätzlich bewährte Lösungsmethoden führen dabei nicht zu einem Stillstand in der technischen Entwicklung, sondern treiben die erfinderische Verbesserungen und Neuentwicklungen an, solange ein hoher Bedarf an Vorrichtungen besteht, welche die betreffenden Erfindungen verwenden. Die Automobilindustrie ist dabei aufgrund ihrer Größe und Ausrichtung an den Massenmärkten ein wichtiger Treiber technologischer Innovationen, die nicht nur die herkömmliche Antriebstechnik, sondern in der heutigen Zeit auch die Bedienung, Fahrsicherheit und Informationsdarstellung betreffen und Erfindungen aus unterschiedlichsten Gebieten der Technik vereinen.



Dr. Christian Langer

studierte Physik an der Universität Osnabrück und der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg und war ab 1996 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Universität Leipzig tätig. Er promovierte auf dem Gebiet der experimentellen Untersuchung dynamischer Instabilitäten in Flüssigkristallen. Anschließend arbeitete er in der Entwicklung von akustischen Oberflächenwellenfiltern (SAW) bei der EPCOS AG in München. Seit 2002 ist Dr. Langer Patentprüfer beim DPMA, insbesondere für Anmeldungen aus dem Bereich optische Systeme und Geräte.

Literaturverzeichnis

Die Suche nach extraterrestrischem Leben

[1] Chyba, Ch. F.& Hand, K. P.; ASTROBIOLOGY: The Study of the Living Universe; Annual Review of Astronomy & Astrophysics, vol. 43, Issue 1, pp.31-74 (2005)

[2] Limaye, S. S., et al.; Venus' Spectral Signatures and the Potential for Life in the Clouds; Astrobiology, Volume 18, Issue 9, pp.1181-1198 (2018)

[3] https://www.nature.com/articles/d41586-020-03258-5 [abgerufen am 12.01.2024]

[4] Seager, S., et al.; Venus Life Finder Mission Study; eprint arXiv:2112.05153 (2021)

[5] Fairén, A. G., et al.; Astrobiology through the Ages of Mars: The Study of Terrestrial Analogues to Understand the Habitability of Mars; Astrobiology, vol. 10, issue 8, pp. 821-843 (2010)

[6] https://www.nature.com/articles/d41586-018-07177-4 [abgerufen am 12.01.2024]

[7] Léveillé, R. J. & Datta, S.; Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: A review; Planetary and Space Science, Volume 58, Issue 4, p. 592-598 (2010)

[8] https://mars.nasa.gov/technology/helicopter/ [abgerufen am 12.01.2024]

[9] Hand, K. P., et al.; On the Habitability and Future Exploration of Ocean Worlds; Space Science Reviews, Volume 216, Issue 5, article id.95 (2020)

[10] Irwin, L. N. & Schluze-Makuch, D.; Strategy for Modeling Putative Multilevel Ecosystems on Europa; Astrobiology, Volume 3, Issue 4, pp. 813-821 (2003)

[11] Porco, C. C., et al.; Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus; Science, Volume 311, Issue 5766, pp. 1393-1401 (2006)

[12] Dachwald, B., et al.; Key Technologies and Instrumentation for Subsurface Exploration of Ocean Worlds; Space Science Reviews, Volume 216, Issue 5, article id.83

[13] Waite, J. H., et al.; Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: Evidence for hydrothermal processes; Science, Volume 356, Issue 6334, pp. 155-159 (2017)

[14] Stofan, E. R., et al.; The lakes of Titan; Nature, Volume 445, Issue 7123, pp. 61-64 (2007)

[15] McKay, C. P. & Smith, H. D.; Possibilities for methanogenic life in liquid methane on the surface of Titan; Icarus, Volume 178, Issue 1, p. 274-276 (2005)

[16] https://www-robotics.jpl.nasa.gov/how-we-do-it/systems/exobiology-extant-life-surveyor-eels/ [abgerufen am 12.01.2024]

[17] Barnes, J., W., et al.; Science Goals and Objectives for the Dragonfly Titan Rotorcraft Relocatable Lander; The Planetary Science Journal, Volume 2, Issue 4, id.130, 18 pp (2021)

[18] Anglada-Escudé G. et al.; A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri; Nature 536, 437-440 (2016)

[19] Lubin, P.; A Roadmap to Interstellar Flight; Journal of the British Interplanetary Society, vol. 69, p. 40-72 (2016)

[20] Heller, R., et al.; Low-cost precursor of an interstellar mission; Astronomy & Astrophysics, Volume 641, id.A45, 12 pp (2020)

[21] Kaltenegger, L.; How to Characterize Habitable Worlds and Signs of Life; Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, 55, 433-485 (2017)

[22] Madhusudhan, N., et al.; Carbon-bearing Molecules in a Possible Hycean Atmosphere; The Astrophysical Journal Letters, Volume 956, Issue 1, id.L13, 16 pp. (2023)

[23] Padovani, P. & Cirasuolo, M.; The Extremely Large Telescope; Contemporary Physics, Vol. 64, Issue 1, pg. 47 - 64 (2023)

[24] Tarter, J.; The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI); Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 39, p. 511-548 (2001)

[25] Hanna, D. S., et al.; OSETI with STACEE: A Search for Nanosecond Optical Transients from Nearby Stars; Astrobiology, Volume 9, Issue 4, pp. 345-357 (2009)

Neodym-Magnete: Kommen die Supermagnete ohne Gewürze aus?

[1] Masato Sagawa, Yasuhiro Une: Chapter 5 - The status of sintered NdFeB magnets, Editor(s): John Croat, John Ormerod, In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Modern Permanent Magnets,Woodhead Publishing, 2022, Pages 135-168, ISBN 978032388658, https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88658-1.00010-8. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323886581000108)

[2] TDK, HAL (High-Anisotropy Field Layer) Production Process (TDK Tech Journal, 2011) https://product.tdk.com/sys tem/files/dam/doc/content/archive/en/tdk_tj_hal_e_0420_2.pdf. [abgerufen am 20.02.2024]

[3] Wikipedia – Festplattenlaufwerk (https://de.wikipedia.org/wiki/Festplattenlaufwerk)

Wikipedia – Magnetresonanztomographie (https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetresonanztomographie)

Wikipedia – Linearmotor (https://de.wikipedia.org/wiki/Linearmotor)

Wikipedia – Windkraftanlage (https://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage)

[4] Manuel Berkel: MIT Technology Review 4/2013, Abschied von den Seltenen Erden,

MIT Technology Review, 4, 2013, Seite 10-11

[5] Lukas Rüttinger et al. (2014): Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Gewinnung Seltener Erden in Bayan Obo, China. Berlin: adelphi, Umweltbundesamt.

[6] Cui, J., Ormerod, J., Parker, D. et al.: Manufacturing Processes for Permanent Magnets: Part I—Sintering and Casting. JOM (The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)), Springer Nature, 74,, 1279–1295 (2022). https://doi.org/10.1007/s11837-022-05156-9

Blitz und Donner – dem Gewitter auf der Spur

[1] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, „Blitzbilanz 2021: Anzahl und Höhe der Schäden steigen," 07 2022. [Online]. Available: https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/blitzbilanz-2021-anzahl-und-hoehe-der-schaeden-steigen--85642.

[2] H. Häckel, Meteorologie, UTB, 2021.

[3] Norm DIN EN IEC 62793 2022-10-00. Gewitterwarnsysteme - Blitzschutz.

[4] P. E. Krider, C. R. Noggle und M. A. Uman, A gated, wideband magnetic direction finder for lightning return strokes, 1976, pp. 301-306.

[5] A. Alammari, A. Alkahtani, M. Ahmad, F. Noman, R. M. M. Esa, Z. Kawasaki und S. K. Tiong, „Lightning Mapping: Techiques, Challenges and Opportunities," IEEE Access, Bd. 8. Jg., pp. 190064-190082, 2020.

[6] L. Tommasi, G. Basile, A. Romoli und M. Stagi, „Design and performance of the lightning imager for the meteosat third generation," in Sixth International Conference on Space Optics, Proceedings of ESA/CNES ICSO 2006, held 27-30 June 2006 at ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. Edited by A. Wilson. ESA SP-621. European Space Agency, 2006. Published on CDROM, id. 60. Vol. 621. 2006., 2006.

[7] K. L. Cummins und M. J. Murphy, „CUMMINS, Kenneth L.; MURPHY, Martin J. An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the US NLDN," IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, pp. 499-518, 2009.

[8] BWE-Service GmbH, „Windenergieanlagen in Deutschland 2023 (Übersichtskarte)," Bundesverband WindEnergie, 2023. [Online]. Available: https://www.windindustrie-in-deutschland.de/publikationen/aktuell/windenergieanlagen-in-deutschland-2023-uebersichtskarte.

[9] M. A. Cooper und R. L. Holle, Reducing lightning injuries worldwide, Springer International Publishing, 2019.

[10] B. A. Zajac und J. F. Weaver, „Lightning meteorology I: An introductory course on forecasting with lightning data.," Orlando, FL, 2002.

[11] J. Eichmeier und H. Baumer, Atmospherics und das Wetter, Bde. %1 von %2Band 77, Nr. 4, 1990, pp. 164 - 169.

[12] „Geostationary Lightning Mapper (GLM)," NASA, [Online]. Available: https://ghrc.nsstc.nasa.gov/lightning/overview_glm.html.

[13] EUMETSAT, „Meteosat Third Generation," 2022.

[14] S. G. Jennings und J. Latham, „The charging of water drops falling and colliding in an electric field.," Arch. Met. Geoph. Biokl. A. 21, pp. 299-306., 1972.

Autonome Shuttles: Die Mobilitätswende in Schwung bringen

[1] Matthias G. Bernold: Vom „Gehzeug" zum „Fahrzeug", 15. Oktober 2014, URL: https://www.tagblatt-wienerzeitung.at/meinung/blogs/freitritt/672654_Vom-Gehzeug-zum-Fahrzeug.html [URL abgerufen am 23.02.2024]

[2] Timo Völker: Das Auto bestimmt in seiner Eigendynamik die Welt, Die Presse am Sonntag, 03. Dezember 2023, URL: https://www.tuwien.at/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=194671&token=b4bbacd28885180fc6b9338f7166ddde4eaa374a [URL abgerufen am 23.02.2024]

[3] Umwelt-Wiki: Gehzeug, https://green.fandom.com/de/wiki/Gehzeug [URL abgerufen am 18.06.2024]

[4] Katharina Manderscheid: Antriebs-, Verkehrs- oder Mobilitätswende? Zur Elektrifizierung des Automobilitätsdispositivs, URL: https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783839451656-003/pdf [URL abgerufen am 23.02.2024]

[5] VDV Die Verkehrsunternehmen: Autonome Shuttle-Bus-Projekte in Deutschland, URL: https://www.vdv.de/liste-autonome-shuttle-bus-projekte.aspx [URL abgerufen am 23.02.2024]

[6] Hansjörg Arnold: Autonome Busse im ÖPNV, 31. Juli 2020, URL: https://www.pwc.de/de/im-fokus/autonome-busse-im-oepnv.pdf, [URL abgerufen am 16.04.2024]

[7] Wikipedia: Last mile (transportation), URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Last_mile_(transportation) [URL abgerufen am 16.04.2024]

[8] Ioki: Was ist eigentlich... die sogenannte erste und letzte Meile?, https://ioki.com/was-ist-eigentlichdie-sogenannte-erste-und-letzte-meile/ [URL abgerufen am 18.06.2024]

[9] rms-consult: Automatisierte Shuttles: Ein Markt-Überblick, 17. März 2021, URL: https://www.rms-consult.de/news/automatisierte-shuttles-ein-markt-ueberblick/ [URL abgerufen am 16.04.2024]

[10] Fahrzeugmanagement Region Frankfurt RheinMain GmbH: Technische Daten zum autonomen Fahren, URL: https://www.fahma-rheinmain.de/projekte/autonomes-fahren/technische-daten [URL abgerufen am 16.04.2024]

Finnen und Flossen als Teile der Natur im Fahrzeugbau

[1] Grosse Flosse
URL: https://www.autozeitung.de/mercedes-220-se-heckflosse-kaufberatung-bilder-technische-daten-72222.html [recherchiert am 11.03.2024]

[2] Geschichte der Heckflossen an Autos: Sie prägten eine Ära und verschwanden
URL: https://de.escuderia.com/Die-Geschichte-der-Heckflossen-an-Autos-pr%C3%A4gte-eine-%C3%84ra-und-verschwand/ [recherchiert am 06.03.2024]

[3] Finne (Flosse)
URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Finne_(Flosse) [recherchiert am 04.03.2024]

[4] Wozu dient die Finne (die Rückenflosse) eines Delfins?
URL: https://www.allesdelphine.de/wozu-dient-die-finne-die-rueckenflosse-eines-delfines/ [recherchiert am 05.03.2024]

[5] Tradition: 60 Jahre Volvo P1800
URL: https://www.welt.de/motor/news/article197659831/Schwedens-schnellste-Finnen-Tradition-60-Jahre-Volvo-P1800.html [recherchiert am 05.03.2024]

[6] Die längste Heckflosse der Welt
URL: https://www.auto-motor-und-sport.de/oldtimer/chrysler-new-yorker-die-laengste-heckflosse-der-welt/ [recherchiert am 06.03.2024]

[7] Aerodynamik: So verändert der E-Antrieb das Auto-Design
URL: https://www.gq-magazin.de/artikel/auto-design-aerodynamik [recherchiert am 22.03.2024]

Organische Leuchtdioden setzen sich durch

[1] YAMAZAKI, Shunpei; TSUTSUI, Tetsuo (Hg.). Physics and technology of crystalline oxide semiconductor CAAC-IGZO: application to displays. John Wiley & Sons, 2017, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/9781119247395.ch4.

[2] HOFMANN, Werner. Evolution of high-speed long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers. Semiconductor science and technology, 2010, 26. Jg., Nr. 1, S. 014011.

[3] JUNG, Sinyeong, et al. Enhancing operational stability of OLEDs based on subatomic modified thermally activated delayed fluorescence compounds. Nature communications, 2023, 14. Jg., Nr. 1, S. 6481.

[4] TAKAHASHI, Tatsuyoshi, et al. Emission mechanism in phosphorescent and fluorescent OLED utilizing energy transfer from exciplex to emitter. Journal of the Society for Information Display, 2016, 24. Jg., Nr. 6, S. 360-370.

Specklemuster in Head-up-Displays reduzieren – für bessere Bilder und mehr Sicherheit

[1] J. Yee, „Full-HD auf der Frontscheibe," 2016. [Online]. Available: https://www.all-electronics.de/automotive-transportation/lasertechnik-verbessert-head-up-displays-huds-auch-fuer-augmented-reality.html.

[2] H. Schmidt, „Das Head-up-Display wächst auf Windschutzscheibengrösse," NZZ, 23 5 2020.

[3] „Laser - Wikipedia," 31 5 2024. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Laser.

[4] „Speckle - Lexikon der Optik," 31 5 2024. [Online]. Available: https://www.spektrum.de/lexikon/optik/speckle/3110.

[5] T. Iwai und T. Asakura, „Speckle reduction in coherent information processing," Proceedings of the IEEE, Bd. 84, Nr. 5, S. 765-781, 5 1996.

[6] W. Martienssen und S. Spiller, „Holographic reconstruction without granulation," Physics Letters A, Bd. 24, Nr. 2, S. 126-128, 1967.

[7] H. Ambar, Y. Aoki, N. Takai und T. Asakura, „Mechanism of speckle reduction in laser-microscope images using a rotating optical fiber," Appl. Phys. B, Bd. 38, S. 71-78, 1985.

[8] J. Dainty und W. Welford, „Reduction of speckle in image plane hologram reconstruction by moving pupils," Optics Communications, Bd. 3, Nr. 5, S. 289-294, 1971.

[9] V. Kumar, A. K. Dubey, M. Gupta, V. Singh, A. Butola und D. S. Mehta, „Speckle noise reduction strategies in laser-based projection imaging, fluorescence microscopy, and digital holography with uniform illumination, improved image sharpness, and resolution," Optics & Laser Technology, Bd. 141, S. 107079, 2021.

[10] S. Chandrasekhar, Liquid Crystals, Second Edition Hrsg., Cambridge University Press, 1992.

[11] P. G. de Gennes und J. Prost, The Physics of Liquid Crystals., Oxford: Clarendon Press, 1993.

[12] W. Helfrich, „Conduction-Induced Alignment of Nematic Liquid Crystals: Basic Model and Stability Considerations," The Journal of Chemical Physics, S. 4092-4105, 1969.

[13] W. Martienssen und E. Spiller, „Bemerkungen zu der Erscheinung der Granulation," Naturwissenschaften, Bd. 52, S. 53-54, 1965.

[14] K. Exner, Sitzber. Wiener Akad., Bd. 76, S. 522, 1877.

[15] „Bundesamt für Strahlenschutz: Sichtbares Licht," 31 5 2024. [Online]. Available: https://www.bfs.de/DE/themen/opt/sichtbares-licht/einfuehrung/einfuehrung.html.

Fußnoten:

1] Bei spiegelnden Flächen mit Rauhigkeiten weit unter der Wellenlänge des Lichtes sind die Speckles so groß, dass sie nicht mehr als solche vom Auge aufgelöst werden.

2] Eine Ausnahme stellt hier US 5 274 494 A dar, wo der Wellenlängenbereich des Laserstrahls durch unelastische Streuung an Gasmolekülen („Raman-Streuung") verbreitert wird, wodurch die räumliche Kohärenz

3] Beispiele: Der Seitenwind bremst nicht die Geschwindigkeit des Fahrzeugs in Vorwärtsrichtung, sondern bewirkt lediglich eine ablenkende Kraft nach links oder rechts. Und ein in vertikaler Richtung schwingendes Trampolin befördert uns zwar schnell nach oben, hilft aber nicht beim „nach rechts, nach links". Beim horizontalen Wurf eines Steins sind dessen Geschwindigkeit in horizontaler Richtung und die gravitationsbedingte Fallgeschwindigkeit in vertikaler Richtung unabhängig voneinander.

4] Brechungsindexunterschiede führen bekanntlich zu Änderungen der Lichtausbreitungsrichtung, siehe z.B. die aus der Schulphysik und dem Alltag allgemein bekannte Lichtbrechung und teilweise Polarisation an der Luft-Wasser-Grenzfläche.

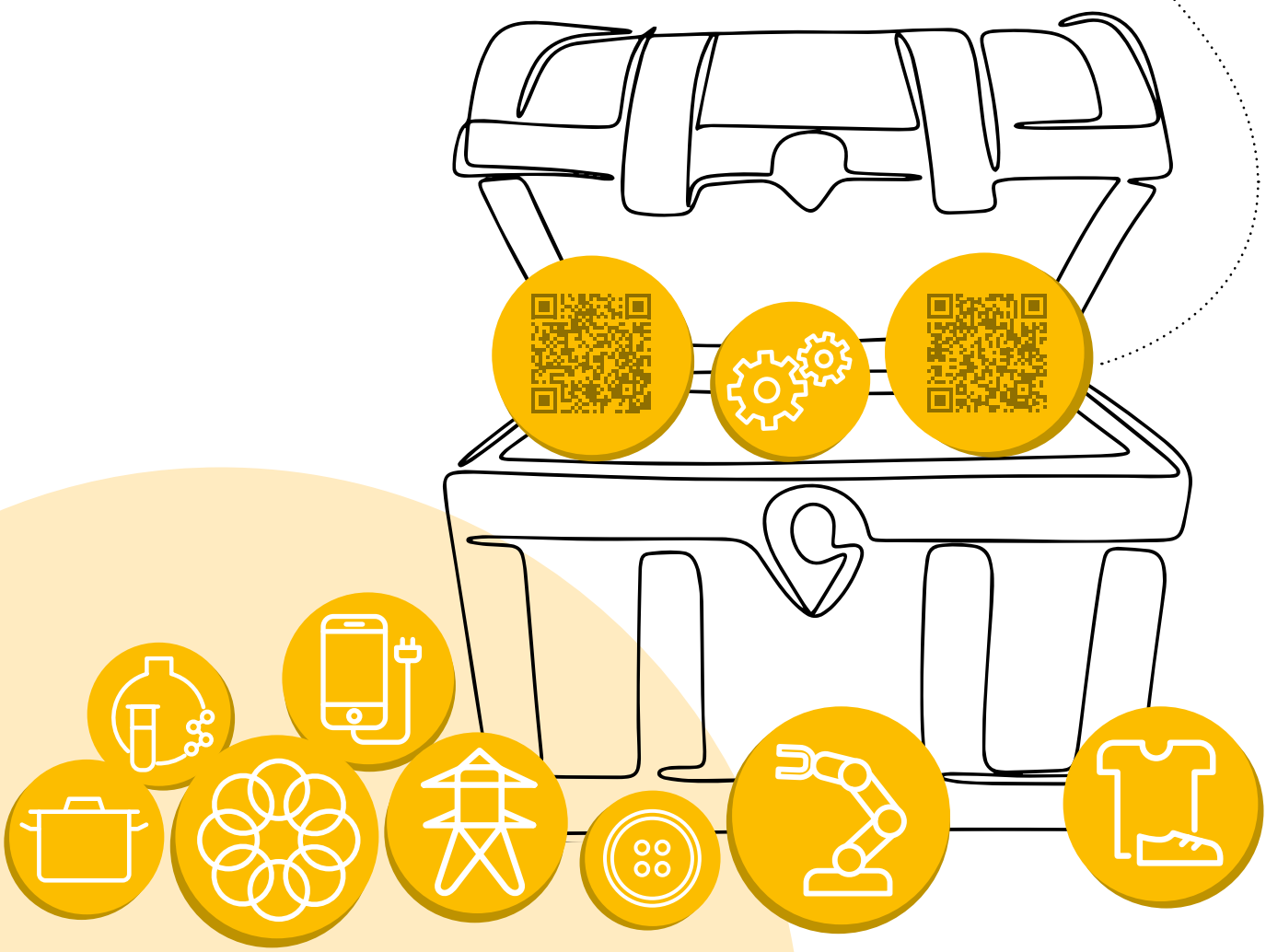


Weiterer Blick in den Wissensschatz

Nachschlagen, recherchieren, inspirieren: In unseren Online-Datenbanken **DPMAregister** und **DEPATISnet** können Sie zu den Themen aus *erfinden* weiterlesen – oder sich ganz neue Felder erschließen. Hier können Sie den Stand der Technik erkunden und sich Inspiration holen für Lösungen von morgen.

Patente, Gebrauchsmuster, Marken und Designs: Die Datenbank **DPMAregister** dient quasi als „Grundbuch" der gewerblichen Schutzrechte in Deutschland. Wer ist Anmelder oder Inhaber? Ist das Schutzrecht noch in Kraft? Rund 20.000-mal pro Tag suchen Menschen Antworten in der Datenbank, die auch elektronische Akteneinsicht in Patent- und Gebrauchsmusterverfahren ermöglicht. Die Informationen stehen allen offen!

In der Datenbank **DEPATISnet** können Sie auf das Dokumentenarchiv des DPMA zugreifen, das auch unsere Patentprüferinnen und Patentprüfer nutzen. Rund 160 Millionen Patentveröffentlichungen aus aller Welt sind enthalten!



Bildnachweis
Titel: iStock.com/RomoloTavani, iStock.com/BravissimoS, iStock.com/robybret, iStock.com/Brejeq, iStock.com/wWeiss Lichtspiele, iStock.com/gremlin, iStock.com/Scharvik, iStock.com/JADEZMITH, iStock.com/XH4D
U 2: iStock.com/tomograf
Seite 1: iStock.com/BravissimoS
Seite 2/3: iStock.com/He2
Seite 2: iStock.com/robybret, iStock.com/BravissimoS, iStock.com/Passatic, iStock.com/Fobosvobos, iStock.com/Brejeq, iStock.com/wWeiss Lichtspiele, iStock.com/gremlin
Seite 3: Laura Thiesbrummel, iStock.com/Mandrixta, iStock.com/Scharvik, iStock.com/JADEZMITH, iStock.com/Charlie_Edward, iStock.com/XH4D
Seite 4/5: iStock.com/MrArtHit, iStock.com/peshkov
Seite 6, 23: iStock.com/robybret
Seite 7, 11, 14, 19, 23: iStock.com/BravissimoS
Seite 8, 21: iStock.com/vaitekune
Seite 10: iStock.com/nicolecioe
Seite 22: iStock.com/Vadim Sazhniev
Seite 24, 26, 39: iStock.com/Brejeq
Seite 25, 29, 37, 38, 39: iStock.com/Passatic, iStock.com/Fobosvobos
Seite 25: Cui, J., Ormerod, J., Parker, D. et al. Manufacturing Processes for Permanent Magnets: Part I—Sintering and Casting. JOM (The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)), Springer Nature, 74, 1279–1295 (2022). Creative Commons: https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-022-05156-9/figures/3
Seite 26: iStock.com/SANALRENK, iStock.com/Blue Planet Studio, https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetresonanztomographie
KasugaHuang via Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Modern_3T_MRI.JPG, https://de.wikipedia.org/wiki/Linearmotor
Via Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linearmotorprinzip.png,
https://de.wikipedia.org/wiki/Festplattenlaufwerk
Eric Gaba via Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Seagate_ST33232A_hard_disk_inner_view.jpg,
Seite 27: iStock.com/Ville Heikkinen, iStock.com/chocolat, iStock.com/Herba Mykhailo, iStock.com/Bjoern Wylezich, iStock.com/RHJ, iStock.com/Skarin
Seite 30: iStock.com/Fobosvobos
Seite 32: iStock.com/bubaone
Seite 33: iStock.com/Passatic
Seite 35, 36: iStock.com/Bjoern Wylezich
Seite 38: iStock.com/Inna Kharlamova,
Seite 40, 63: iStock.com/wWeiss Lichtspiele
Seite 41, 44/45, 48, 49, 54, 55: iStock.com/Tolga TEZCAN
Seite 53: iStock.com/Viktoria Ruban
Seite 59: iStock.com/allanswart
Seite 64, 77: iStock.com/gremlin
Seite 68, 71, 73, 77: iStock.com/Valerii Minhirov
Seite 78, 79: iStock.com/pixelliebe, Laura Thiesbrummel, iStock.com/BravissimoS
Seite 80, 93: iStock.com/Scharvik
Seite 81, 85, 86, 87, 90, 91, 92, 93: iStock.com/Alesya Maleeva
Seite 81, 85, 86, 91, 92, 93: iStock.com/Mandrixta
Seite 82/83: iStock.com/Tolga TEZCAN
Seite 82: iStock.com/luismmolina
Seite 84, 88/89: iStock.com/liuzishan
Seite 86/87, 91, 92: iStock.com/thanaphiphat
Seite 94, 109: iStock.com/JADEZMITH
Seite 95: iStock.com/petekarici
Seite 96/97, 103, 108: iStock.com/Charlie_Edward
Seite 97: iStock.com/kasezo
Seite 98: iStock.com/-VICTOR-
Seite 100: iStock.com/Mary Desy, iStock.com/Dan Comaniciu
Seite 101: iStock.com/kyoshino
Seite 101, 102, 106: YAMAZAKI, Shunpei; TSUTSUI, Tetsuo (Hg.). Physics and technology of crystalline oxide semiconductor CAAC-IGZO: application to displays. John Wiley & Sons, 2017; https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/9781119247395.ch4
Seite 104, 105: iStock.com/spawns
Seite 110, 125: iStock.com/XH4D
Seite 111: https://de.wikipedia.org/wiki/Speckle
Deglr6328 via Wikimedia Commons https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/archive/b/bf/20070406093152%21Laser_speckle.jpg
Seite 112, 121: iStock.com/enjoynz
Seite 113: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle via Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM-Wave_noGIF.svg#/media/File:EM-Wave_noGIF.svg
Seite 116, 117, 122, 123; 124, 125: iStock.com/Dan Comaniciu
Seite 118, 119: iStock.com/Tatyana Larina
Seite 127: iStock.com/Mandrixta, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/9781119247395.ch4
Seite 128: iStock.com/Zyma Natalia, iStock.com/BravissimoS
Für alle anderen Bilder und Grafiken: DPMA

Impressum

Herausgeber
Deutsches Patent- und Markenamt
Zweibrückenstraße 12
80331 München

Telefon +49 89 2195-1000
www.dpma.de

Stand
September 2025

Gestalterische Konzeption und Layout
DPMA: Claudia Beckh, Lydia Geißler

Wir schützen
nicht nur
Innovationen.

dpma.de

ISSN 3053-3384