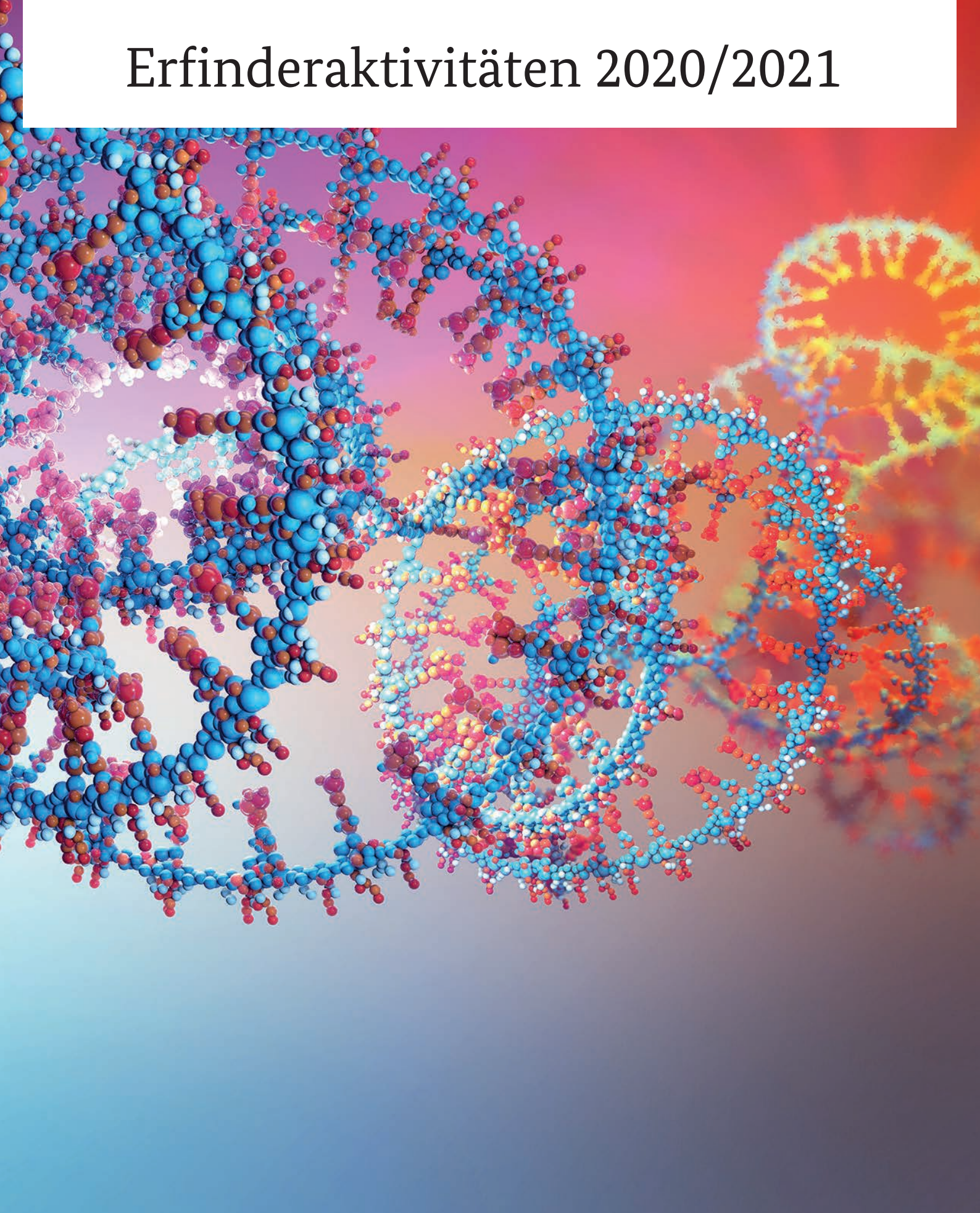




Deutsches
Patent- und Markenamt

Erfinderaktivitäten 2020/2021



Inhalt

Vorwort	3
Insulin, Antikörper, Biosimilars und mRNA-Impfstoffe – die Vielfältigkeit der Biopharmazeutika <i>Dr. Leonhard Riedel und Dr. Stefanie Vukovic</i>	4
Nanophotonik in der technischen Innovation <i>Dr. Werner Hofmann</i>	20
SRAM – ein kleiner Speicher mit viel Inhalt und von großer Bedeutung <i>Sibina Šukman-Prähofer</i>	26
Spuren der Gravitationswellenforschung in der Patentliteratur <i>Dr. Nina Tetzlaff</i>	34
Falten, Klappen, Rollen, Schieben – wie ein Verdeck bewegt wird <i>Dr. Andreas Monokroussos</i>	46
Mensch und Künstliche Intelligenz – Schnittstellen in Fahrzeugen <i>Dr. Wilfried Domainko</i>	58
Das moderne Auto – eine Wetterstation auf vier Rädern <i>Dr. Florian Stark</i>	74
Batterierecycling <i>Dr. Dirk Ochs</i>	85
Verbund für's Leben? – Mehrschichtfolien und Recycling <i>Astrid Pant</i>	98

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



Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

die Patentprüferinnen und Patentprüfer des Deutschen Patent- und Markenamts (DPMA) stellen in den nachfolgenden Artikeln ein weites Spektrum an technischen Themen vor. Basis der Artikel sind Patentanmeldungen, welche die neuesten Entwicklungen auf den jeweiligen Gebieten der Technik darlegen und erklären.

Im Rahmen der Bekämpfung der Corona-Pandemie kommen seit Ende 2020 zum ersten Mal überhaupt mRNA-Impfstoffe zum Einsatz. Ein fachlich sehr fundierter Artikel führt Sie in die Welt dieser Vakzine und anderer Biopharmazeutika.

Die Mikroelektronik, unser nicht mehr wegzudenkender Begleiter des täglichen Lebens, skaliert inzwischen im Nanometerbereich. Die Nanophotonik und SRAMs sind zwei faszinierende Anwendungsbeispiele.

Von ganz klein zu ganz groß: die Gravitationswellenforschung befasst sich mit einem sehr schwierig erfassbaren Phänomen. Unsere Autorin hat sich auf Spurensuche in der Patentliteratur begeben.

Das Auto in immer wieder neuer Gestalt:

Wie mit klassischer Mechanik ein Verdeck bewegt wird, über künstliche Intelligenz-Schnittstellen in Fahrzeugen bis zu einer Wetterstation auf vier Rädern. Hätten Sie ihm eine solche Vielseitigkeit zugetraut?

Für einen nachhaltigen Güterkreislauf ist Recycling das Schlüsselthema, beschrieben anhand von Batterien und Mehrschichtfolien in zwei lesenswerten Artikeln.

Viel Spaß beim Lesen wünscht Ihnen

Mark Haslinger

Patentprüfer und Gruppenleiter in der Patentabteilung
(Redaktion)

Insulin, Antikörper, Biosimilars und mRNA-Impfstoffe – die Vielfältigkeit der Biopharmazeutika

Dr. Leonhard Riedel und Dr. Stefanie Vukovic, Patentabteilung 1.44

Über die Autoren

Frau Dr. Stefanie Vukovic studierte Lebensmittelchemie an der Universität Würzburg, und absolvierte ihr zweites Staatsexamen am Bayerischen Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit in Oberschleißheim. Ihre Promotion erfolgte am Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München. Von 2008 bis 2019 war Frau Dr. Vukovic in verschiedenen Positionen in der Forschung und Entwicklung bei Hexal/Sandoz tätig, absolvierte nebenher die Weiterbildung zur Fachtoxikologin und verantwortete letztlich die Toxikologie im Geschäftsbereich Sandoz Biopharmaceuticals. Im September 2019 begann sie ihre Tätigkeit im DPMA in der Abteilung 1.44. Ihr Prüfgebiet umfasst unter anderem Medizinische Zubereitungen, die Peptide enthalten; Medizinische Zubereitungen, die Antigene oder Antikörper enthalten; Verfahren oder Vorrichtungen zum Desinfizieren oder Sterilisieren von Stoffen oder Gegenständen; sowie Desinfizieren, Sterilisieren oder Desodorieren von Luft.

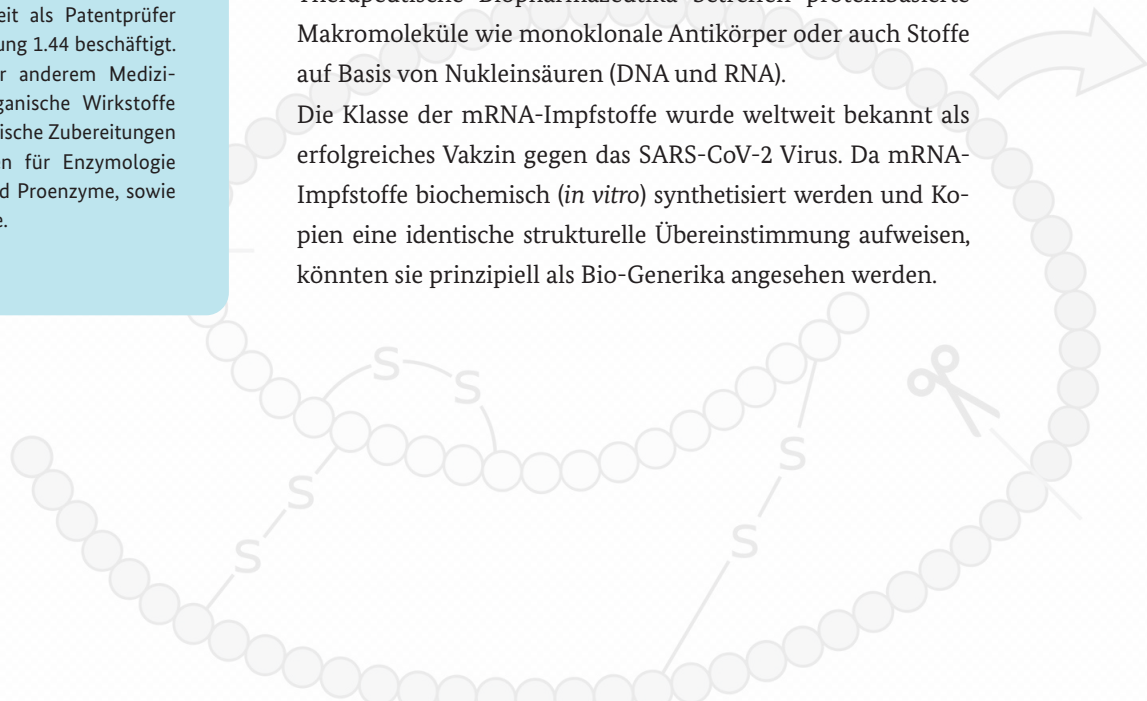
Dr. Leonhard Riedel studierte Biologie in Darmstadt, Köln, Aachen und München. Er war am Max-Planck-Institut in Köln (Pflanzenzüchtungsforschung) und München (Biochemie) beschäftigt, sowie an der Ludwig-Maximilians-Universität München (Neurologie Großhadern) tätig. Im Jahr 2001 begann Herr Dr. Riedel seine Tätigkeit im DPMA in der Chemie (Abteilung 1.41), und ist derzeit als Patentprüfer und Gruppenleiter in der Abteilung 1.44 beschäftigt. Sein Prüfgebiet umfasst unter anderem Medizinische Zubereitungen, die organische Wirkstoffe oder Peptide enthalten, Medizinische Zubereitungen zur Gentherapie, Vorrichtungen für Enzymologie oder Mikrobiologie, Enzyme und Proenzyme, sowie rekombinante DNA-Technologie.

Zusammenfassung

Biologische Wirkstoffe – Biopharmazeutika oder Biologicals – konnten in relevantem Umfang erst durch gen- und biotechnologische Verfahren für die pharmazeutische Industrie erschlossen werden. Im Gegensatz zu chemischen Stoffen weisen Biologicals eine deutlich komplexere Struktur auf. Hergestellt werden sie mittels Mikroorganismen, tierischer oder pflanzlicher Zellsysteme oder durch (bio)chemische Synthese.

Biologicals greifen direkt in den Stoffwechsel ein, als nachahmende körperähnliche Substanz oder als körperfremdes Antigen. Herstellungsbedingt sind sie niemals identisch zueinander. Dies gilt insbesondere für das Biosimilar, dem Nachahmerprodukt eines zugelassenen Referenzmoleküls. Unterschiede im Herstellungsprozess eines biologischen Wirkstoffs oder eines seiner Varianten führen, anders als bei den Generika (meist chemisch hergestellte Nachahmermedikamente mit „kleinen“ Wirkstoffmolekülen identischer Struktur), zu mehr oder weniger umfangreichen strukturellen Modifikationen. Auftretende Variationen in den Sekundär- und Tertiärstrukturen sowie Modifikationen während und nach der Herstellung (Expression) erfordern eine aufwendige Analyse und Bewertung der Ähnlichkeit im Hinblick auf Wirksamkeit und Verträglichkeit, um den Status eines Biosimilars festzustellen. Therapeutische Biopharmazeutika betreffen proteinbasierte Makromoleküle wie monoklonale Antikörper oder auch Stoffe auf Basis von Nukleinsäuren (DNA und RNA).

Die Klasse der mRNA-Impfstoffe wurde weltweit bekannt als erfolgreiches Vakzin gegen das SARS-CoV-2 Virus. Da mRNA-Impfstoffe biochemisch (*in vitro*) synthetisiert werden und Kopien eine identische strukturelle Übereinstimmung aufweisen, könnten sie prinzipiell als Bio-Generika angesehen werden.



Biologicals werden unterschiedlich definiert

„Biological“ ist ein Begriff aus der pharmazeutischen Biotechnologie. Er beschreibt ein Biopharmazeutikum (auch Biologikum oder Biologic), das im Wesentlichen unter Nutzung der Maschinerie von Zellen und Zellkulturen hergestellt wird. In der Hauptsache sind damit makromolekulare Biosyntheseprodukte auf Basis von Proteinen oder Nukleinsäuren gemeint. Die Bereitstellung eines biologischen Moleküls als Arzneimittel in einer abschätzbar kostengünstigen Reproduktion wurde erst durch die rekombinante DNA-Technologie unter Verwendung von gentechnisch veränderten Organismen (Wirtszellen) möglich. Hierzu war erforderlich, die enzymatische und zelluläre Maschinerie der Zelle zu erschließen, einschließlich der Bereitstellung geeigneter gentechnischer Werkzeuge.

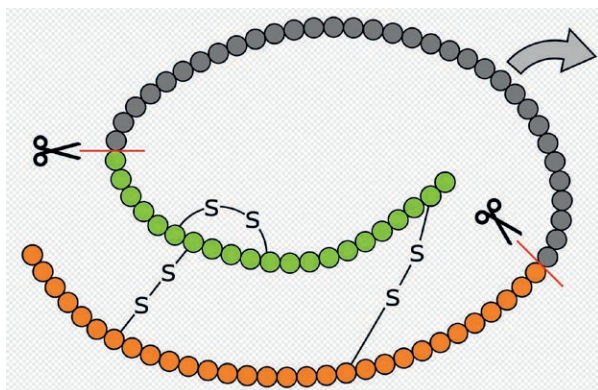
Therapeutische, biotechnologisch hergestellte Wirkstoffe werden in verschiedenen Wirkstoffgruppen eingesetzt, unter anderem als Hormon (zum Beispiel Insulin), monoklonaler (also von einer Zelllinie produzierter) Antikörper, als Stoff, der unmittelbar auf die Genexpression einwirkt oder auch als Impfstoff. Jüngste Entwicklungen von Impfstoffen auf Basis von Botenstoff-RNA (mRNA) zeigen, dass manche aktive Wirkstoffe auch mittels einer zellunabhängigen Synthese – *in vitro* – bereitgestellt werden können.

Gemäß Amtsblatt der Europäischen Union Richtlinie 2003/63/EG wird ein Biologikum definiert als „[...] ein Arzneimittel, dessen Wirkstoff ein biologischer Stoff ist. Ein biologischer Stoff ist ein Stoff, der biologischen Ursprungs ist oder aus biologischem Ursprungsmaterial erzeugt wird und zu dessen Charakterisierung und Qualitätsbestimmung physikalische, chemische und biologische Prüfungen, die Beurteilung des Produktionsprozesses und seiner Kontrolle erforderlich ist [...]“ [1]. Unter diese Definition fallen zunächst auch niedermolekulare Arzneistoffe (Small Molecule Drugs, SMD) biologischen Ursprungs, die typischerweise kleiner als 1.000 Dalton (Da) sind und komplett mit analytischen Methoden charakterisierbar sind (das Einheitenzeichen „Da“ beschreibt die atomare Masseneinheit „u“, die etwa $1,660 \times 10^{-27}$ kg entspricht).

Aus biologischen Systemen gewonnene Verbindungen wurden historisch, zunächst ohne Kenntnis über die Struktur, in der Arzneimitteltherapie verwendet, wie zum Beispiel Acetylsalicylsäure (Salicinsäure aus *Salix alba*), Morphin (aus Opium, also dem getrockneten Milchsafte des Schlafmohns) oder Penicillin (als natürlich vorkommendes sekundäres Stoffwechselprodukt aus *Penicillium*, *Aspergillus* und weiteren Schimmelpilzgattungen).

Als erster wichtiger Vertreter eines makromolekularen Biopharmazeutikums kann vermutlich das Polypeptidhormon Insulin benannt werden, welches den Blutzuckerspiegel absenkt und so den Kohlehydratstoffwechsel reguliert. Die Fachliteratur beschreibt hierzu, dass Insulin bereits vor mehr als 100 Jahren – 1921 – durch ein medizinisches Team der Universität von Toronto entdeckt wurde. Obwohl die Universität 1923 offiziell das erste Patent für Insulin erhielt (**US 1 469 994 A**), hatte vermutlich bereits zuvor am 10. April 1922 der rumänische Physiologe Nicolae Paulescu die Herstellung von Insulin als „Pankrein“ beim Ministerium für Industrie und Handel in Bukarest patentieren lassen. Andere Berichte lassen vermuten, dass Insulin schon 1922 industriell durch das kanadische Pharmaunternehmen Lilly (heute Eli Lilly) als Rinder- und Kälberinsulin mittels eines patentierten Verfahrens bereitgestellt werden konnte. In seiner bedeutenden Historie war Insulin auch Wegbereiter für mehrere Nobelpreise: 1923 Medizin (Banting/MacLeod) für die Entdeckung, 1958 Chemie (Frederick Sanger) für die Aufklärung der Struktur, und (unter Mitwirkung von Insulin) 1964 Chemie (Dorothy Hodgkin) für Röntgenstrukturanalysen des biochemischen Aufbaus von Vitamin B12 (vergleiche hierzu [2], [22], [3]).

Das Insulinmolekül weist einige strukturelle Besonderheiten auf: Es besteht aus zwei Peptidketten (der A-Kette mit 21 und der B-Kette mit 30 Aminosäuren), die durch zwei intermolekulare Quervernetzungen (sogenannte Disulfidbrücken) miteinander verbunden sind. Die A-Kette weist eine dritte, intramolekulare Disulfidbrücke auf. Die Ausbildung von Disulfidbrücken zwischen zwei Schwefelatomen der Aminosäure Cystein stabilisiert das Molekül und bestimmt auch die räumliche Struktur (siehe Figur 1; vergleiche auch Struktur I in **DE 197 26 167 B4**: Neue Insulinderivate mit schnellem Wirkungseintritt).



Figur 1: Vereinfachte Darstellung von Proinsulin

Humaninsulin konnte in den 80er Jahren als erster biotechnologischer Wirkstoff durch gentechnisch veränderte Bakterien in größerer Menge biosynthetisch hergestellt werden, ohne dass tierisches Ausgangsmaterial von Schwein oder Rind zum Einsatz kamen. Dies gelang erst, nachdem das Gen für Insulin aus menschlichen Zellen isoliert wurde (1979), mit einer Klonierung in vermehrungsfähigen Plasmidvektoren und anschließendem Gentransfer in geeignete rekombinante Wirtszellen (Bakterien und Hefen).

Mit der Entwicklung und dem Ausbau bio- und gentechnologischer Herstellungsverfahren können heute auch komplexe Biomoleküle bereitgestellt werden. Im Jahr 1982 wurde mit Humaninsulin der erste gentechnologisch hergestellte Protein-Wirkstoff zugelassen (Handelsname Humulin), der nicht aus dem Organismus isoliert wurde, in dem er natürlicherweise synthetisiert wird (entwickelt von Genentech, lizenziert an Eli Lilly).

Mit einer Größe von 5808 Da ist Insulin deutlich kleiner als später entwickelte Biologika, wie zum Beispiel das Wachstumshormon Filgrastim (der Granulozyten-koloniestimulierender Faktor G-CSF) mit knapp 19.000 Da oder monoklonale Antikörper (Immunglobuline) mit etwa 150.000 (vergleiche [22], [23], [24]).

Die gentechnische Produktion von medizinischen Protein-Wirkstoffen erfolgt in lebenden Mikroorganismen oder Zellen, insbesondere in Bakterien, Hefen und einigen

„unsterblichen“ Zelllinien aus Hamster, Maus oder Mensch in großen Bioreaktoren (Fermentern). Zur Etablierung eines neuen proteinbasierten Wirkstoffs wird dem dafür vorgesehen Zelltyp (Wirt) die kodierende Nukleinsäure (oder auch das Gen) des zu produzierenden Proteins übertragen, so dass dieser „transformierte“ Organismus das Genprodukt in ausreichenden Mengen vermehrt. In oft langjährigen Prozessen werden die Kulturbedingungen, zum Beispiel hinsichtlich Temperatur, Nährstoffe oder Rührbedingungen, optimiert und kontrolliert, da bei lebenden Zellen minimale Schwankungen zu signifikanten Veränderungen am Produkt, der Menge an Nebenprodukten oder der Ausbeute führen können (zum Beispiel EP 2 435 556 B1: Methode für ein rationales Zellkulturverfahren; EP 2 513 293 B1: Methode zur Optimierung eines biopharmazeutischen Produktionsprozesses). Ebenso wird ein effektiver Weg zur Gewinnung, Reinigung und Lagerung des Wirkstoffs entwickelt. Besondere Beachtung hat dabei der oft mehrstufige Gewinnungsprozess mit umfangreichen Reinigungsschritten, damit Verträglichkeit, Stabilität und Wirksamkeit des arzneilichen Wirkstoffs nicht beeinträchtigt werden (beispielhaft: EP 3 015 542 A1: Modulare Anlage und Verfahren zur kontinuierlichen keimreduzierten Produktion und/oder Aufbereitung eines Produktes; EP 2 155 347 B1: Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen Membransorption).

In Europa müssen alle biotechnologisch hergestellten Arzneimittel obligatorisch mit dem sogenannten zentralisierten Verfahren durch die Europäische Arzneimittel-Agentur (EMA, European Medicines Agency), die in der Europäischen Union für die Beurteilung und Überwachung von Arzneimitteln zuständig ist, zugelassen werden. Grundsätzlich werden Arzneimittel



Figur 2: Beispiele für Proteinarten in biologischen Arzneimitteln, die in der EU zugelassen sind.

nur dann zugelassen, wenn Studien über ihre pharmazeutische Qualität, Sicherheit und Wirksamkeit überzeugend belegen, dass der Nutzen des Arzneimittels die Risiken für den Patienten überwiegt („positives Nutzen-Risiko-Verhältnis“). Derzeit werden bereits über 10 Prozent aller Wirkstoffe mit gentechnisch veränderten Mikroorganismen oder Zellkulturen produziert: neben Insulinen und therapeutischen Antikörpern auch Wachstumshormone, Enzyme und Blutprodukte. Zu den Biologika zählen auch Impfstoffe, insbesondere auf Basis gentechnisch hergestellter, abgeschwächter (attenuierter) Viren oder einzelner virusspezifischer Proteine, darüber hinaus auch in Form von kodierenden Genabschnitten oder als mRNA Matrize (vergleiche Abschnitt Krebs-Impfstoffe) (vergleiche [5]).

Variabilität

Die Produktion eines Biologikums in lebenden Systemen ist vor allem immer dann sinnvoll, wenn die chemische Totalsynthese zu kostspielig ist oder ungenügende Kenntnis über die tatsächliche Struktur und/oder über die räumliche Faltung vorliegt. Für die Funktionalität von Proteinen müssen oft notwendige Änderungen an der Polypeptidkette vorgenommen werden. Solche Enzymkatalysierte Modifikationen, sogenannte posttranslationale Modifikationen (PTM), finden nach der ribosomalen Biosynthese statt [6]. Zu den rund 300 verschiedenen PTM gehört das Hinzufügen von Bindungen in Form von sich ausbildenden Quervernetzungen (zum Beispiel Disulfidbrücken) oder die Prozessierung der Polypeptidkette durch selektives Abspalten und Herausschneiden von Teilsequenzen, etwa wie von Präproinsulin und Proinsulin zu Insulin (vergleiche Figur 1; [22]).

Bei der Wahl des Produktionsorganismus ist entscheidend, was hergestellt werden soll. Ein großer Unterschied bei der Protein-Produktion in Tierzellen und in Bakterien besteht in der korrekten Faltung des Proteinprodukts. In Bakterien produzierte Produkte verklumpen häufig und müssen nach der Extraktion erst aus sogenannten Einschlusskörperchen oder Proteinaggregaten („Inclusion bodies“) neu *in vitro* gefaltet werden. Ein funktionell aktiver Protein-Wirkstoff benötigt oft eine spezifische, einzigartige PTM, die die biochemische Maschinerie der Bakterien nicht leisten kann. Bei kom-

plexeren Proteinen, bei denen PTMs sowohl für eine korrekte Faltung als auch für die Bioaktivität essentiell sind, ist daher die spezifische Enzymausstattung der eukaryotischen Zellen (Zellen, die über einen Zellkern verfügen) notwendig. Die meisten für den Menschen rekombinant hergestellten therapeutischen Proteine werden daher mittels etablierter Säugetierzelllinien produziert, wie die immortalisierte Zelllinie aus Ovarien des Chinesischen Zwerghamsters (Chinese hamster ovary, CHO) (siehe zum Beispiel **EP 2 616 541 B1**).

Bei der Kultivierung in eukaryotischen Zelltypen entscheiden bereits kleinste Veränderungen im Herstellungsverfahren über die Ausbeute an produziertem Wirkstoff, die Menge an Nebenprodukten sowie die durch PTM-hervorgerufene Änderungen an der Wirkstoffstruktur. Die feststellbaren Abweichungen werden Mikroheterogenitäten genannt. Sie treten besonders dann auf, wenn Veränderungen im Herstellungsverfahren vorgenommen werden. Demnach sind exakte Kopien eines endgültigen biologischen Arzneimittels, trotz identischer Protein-Primärstruktur, durch bestehende Inhomogenität in den lebenden Zellkultursystemen prinzipiell gar nicht möglich. Dies gilt sogar für ein wirkstoffgleiches Molekül, das den gleichen Herstellungsprozess und die gleiche Produktionsstätte durchlaufen hat. Sogar innerhalb ein und derselben Charge eines biologischen Arzneimittels kommt es zu minimalen Abweichungen (vergleiche [4], [8]).

Hierbei spielt insbesondere die Glykosylierung, also die Anlagerung von diversen Zuckerresten an bestimmte Aminosäurereste, eine wichtige Rolle. Diese kann zur korrekten Faltung beitragen, die Stabilität erhöhen, Schutz vor proteolytischem Abbau gewähren und die Bioverfügbarkeit beeinflussen (beispielhaft **DE 10 2012 105 416 A1**: Modifizierung des Glykosylierungsprofils der Glykosylierungsstelle eines Peptids). Nicht-glykosylierte Formen von Proteinen oder Enzymen können mit höherer Ausbeute mittels Bakterien produziert werden. Beispielsweise wurde humanes Insulin bereits 1982 in *Escherichia coli* produziert, da sich die posttranslationale Prozessierung (siehe oben) strukturell gut erfassen und enzymatisch effektiv durchführen lässt (vergleiche **EP 0 264 250 B1**: Verfahren für Umwandlung von menschlichem Insulin-Vorläufer in menschliches Insulin).

Jedes glykosylierte Protein (Glykoprotein) zeigt ein charakteristisches, zellspezifisches Glykosylierungs-

muster. Über 60 % der Glykoproteine, zu denen auch die Antikörper gehören, haben mindestens einen Aminosäurerest, an den eine Struktur aus mehreren gleichen oder verschiedenen, zusammenhängenden Monosacchariden (Einfachzuckern) kovalent gebunden ist. Diese Zuckerstrukturen (Glykane) werden mittels der im Organismus vorhandenen Glykosyltransferasen angeheftet. Je nach der Art der Glykosylierung wird vor allem zwischen O- und N-Glykanen unterschieden. Bei der in allen Lebewesen vorkommenden N-Glykosylierung werden die Kohlenhydrate (Glykosylgruppen) mit der $-NH_2$ Seitenkette der Aminosäure Asparagin (Asn) mit dem Protein verknüpft. Im Fall der O-Glykosylierung wird der Zucker an die Hydroxygruppen ($-OH$) der Aminosäuren Serin, Threonin, Tyrosin, Hydroxylysin oder Hydroxyprolin gebunden. Ein weiterer charakteristischer Bestandteil von Glykoproteinen sind Acylneuraminsäurereste, wie die im Menschen häufig vorkommende N-Acetylneuraminsäure. Sie sind für Zell-Zell-Interaktionen von Bedeutung und bieten dem Protein Schutz vor dem Abbau durch proteolytische Enzyme. Ebenso spielt das N-Acetyl-D-Glucosamin (GlcNAc) eine wichtige Rolle in der „Core“-Struktur der N-Glykane sowie in den „Antennen“ der N- und O-Glykane.

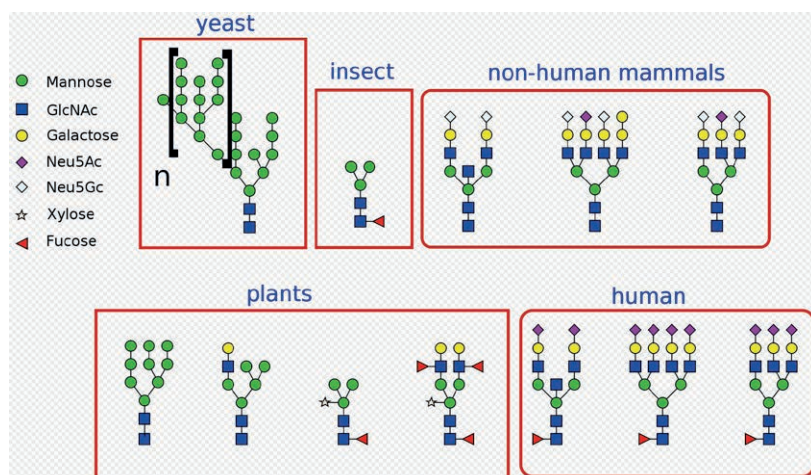
Dass Biologika mit identischer Aminosäuresequenz anhand von Mikrovariationen unterscheidbar sind, war erst durch eine genauere und detailliertere Analyse von Proteinen möglich geworden. Insbesondere durch Verbesserungen im Bereich der Massenspektrometrie (von der Zeitschrift „Nature Methods“ zur Methode des Jahres 2012 gekürt), unter anderem mittels MALDI-TOF,

der Matrix-assistierten Laser-Desorption-Ionisierung (MALDI) und Ionenflugzeitanalyse (englisch „Time Of Flight – TOF“) sowie mittels der damit koppelbaren Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (englisch „High Performance Liquidchromatography – HPLC“) (zum Beispiel **WO 2007 044 471 A2**: Methods and products related to the improved analysis of carbohydrates). Zur Durchführung eines höheren Probendurchsatzes mit kleineren Probenvolumina wurde die HPLC weiterentwickelt, auch bekannt als UHPLC (Ultra High Performance Liquid Chromatography). Darüber hinaus wird die Hochleistungs-Anionenaustausch-Chromatographie mit gepulster amperometrischer Detektion, die HPAEC-PAD, zur Bestimmung der Monosaccharid-Zusammensetzung der Glykane eingesetzt (beispielhaft **EP 2 745 903 B1**: Trennung von Glykanen mittels gemischtem Flüssigchromatographiemodus).

Biosimilar

Bei Generika handelt es sich um chemisch erzeugte und definierte niedermolekulare Wirkstoffe. Hier kann sich der pharmazeutische Unternehmer in der Regel auf die bei der Erstzulassung eingereichten klinischen Daten des Originalproduktes beziehen, sofern die Austauschbarkeit zweier wirkstoffgleicher Arzneimittel (Bioäquivalenz) und die pharmazeutische Qualität nachgewiesen wurde. Ein potientes Nachahmerprodukt eines biologischen Arzneimittels, ein sogenanntes „Biosimilar“, wird nicht als Generikum betrachtet. Die natürliche Variabilität sowie der komplexe Herstellungsprozess erlauben keine exakte Nachbildung des Wirkstoffes.

Die bei Herstellung eines Biopharmazeutikums auftretende Modifikations- und Variations-Problematik stellt besonders hohe Anforderungen an ein potientes Nachahmerprodukt. In der EU-Gesetzgebung wurde der Begriff „einem biologischen Referenzarzneimittel ähnliches biologisches Arzneimittel“ eingeführt, da das biopharmazeutische Nachahmerpräparat eine identische pharmakologische



Figur 3: N-Glykosylierungsmuster in verschiedenen Arten

Wirkung ausübt, wobei der arzneilich wirksame Bestandteil keine Strukturidentität, sondern nur strukturelle Ähnlichkeit („biosimilar“) mit einem bereits in der EU zugelassenen Biologikum aufweist. Für die Entwicklung eines Biosimilars wird Bezug auf ein zugelassenes Biologikum mit vollständiger präklinischer und klinischer Dokumentation genommen, dem Referenzprodukt (auch Innovatorprodukt, Originator oder Originalwirkstoff). Für eine Zulassung benötigt das Biosimilar eine akzeptable Ähnlichkeit zu seiner Referenz, in den klinischen Studien dürfen keine relevanten Unterschiede auftreten. Durch Bezugnahme auf das bereits zugelassene Referenz-Arzneimittel kann das Biosimilar erst nach Ablauf der Patentzeit des Referenz-erzeugnisses zugelassen werden (vergleiche [4], [8]).

Entsprechend den möglichen posttranslationalen Modifikationen und Mikroheterogenitäten resultieren die Unterschiede zwischen Biosimilar und seinem Original vor allem aus unterschiedlichen Herstellungsbedingungen. Auch aus Unkenntnis des genauen Herstellungsverfahrens des Originalwirkstoffes liegen oft unterschiedliche Bedingungen vor. Durch die Verwendung anderer Expressionssysteme sind bei gleicher Aminosäuresequenz regelmäßig Unterschiede in der Proteinkonformation und des Glykosylierungsmusters zu erwarten. Die inhärente Variabilität eines Biologikums ist für die Wirksamkeit und Sicherheit zunächst unkritisch, solange die durch den Herstellungsprozess regelhaft auftretenden Heterogenitäten das im Zulassungsprozess definierte Ausmaß nicht überschreiten. Zur Bewertung der Austauschbarkeit zweier wirkstoffgleicher Arzneimittel (Biosimilarität) werden klinische Studien mit einer vergleichenden Evaluation von pharmakokinetischen Eigenschaften sowie zur Effizienz und Sicherheit durchgeführt. Es wird also geprüft, ob die bestehende Heterogenität einen klinisch relevanten Unterschied zum Originalwirkstoff zur Folge hat.

Durch systematische Analyse unterschiedlicher Chargen des zugelassenen Biologikums wird durch Hersteller und Zulassungsbehörden kontinuierlich sichergestellt, dass neue Chargen eines biologischen Wirkstoffes, auch bei Änderungen des Produktionsprozesses, in gleichem Maße wirksam und sicher sind, wie das in den Zulassungsstudien eingesetzte Biologikum.

Im Rahmen des zentralisierten Zulassungsverfahrens für ein Biosimilar reicht ein Pharmaunternehmen einen einzigen Antrag auf Genehmigung für das Inverkehrbringen bei der EMA ein. Der Ausschuss für Humanarzneimittel (CHMP) der EMA führt eine wissenschaftliche Beurteilung des Antrags durch und gibt eine Empfehlung ab, ob das Arzneimittel in Verkehr gebracht werden sollte oder nicht. So kann die Marktzulassung eines Biosimilars in allen EU-Mitgliedsstaaten gleichzeitig erfolgen (vergleiche [25]).

Die Vergleichbarkeitsprüfung eines Biosimilar-Kandidaten mit einem Referenzprodukt erfolgt stufenweise. Der erste Schritt ist die Vergleichbarkeit der Qualität: Zusätzlich zur pharmazeutischen Qualität, welche Daten zur Reinheit, zur genauen Formulierung, zur Kontrolle des Herstellungsprozesses und zur Stabilität des Endproduktes umfasst, werden hier in einem ersten Schritt vergleichende analytische Daten erhoben [4].

Im Bereich der physikalisch-chemischen Eigenschaften werden die physikalischen Eigenschaften des Arzneimittels und die primären und übergeordneten Strukturen des Wirkstoffes unter Verwendung eines großen Spektrums modernster instrumenteller Analytik mit dem Referenzprodukt verglichen. Dies schließt die Aminosäuresequenz, die N- und C-terminalen Aminosäuresequenzen, die freien SH-Gruppen und Disulfidbrücken, die Modifikationen und Trunkierungen (Verkürzungen), das Vorhandensein und das Ausmaß post-translationaler Modifikationen und den Vergleich von Kohlenhydratstrukturen einschließlich des gesamten Glykanprofils und der Glykosylierungsmuster mit ein. Die genaue Risikoanalyse kritischer Qualitätsattribute spielt eine entscheidende Rolle. Die biologische Vergleichbarkeit des Biosimilars umfasst in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Produktes unterschiedliche Assayformate, und zwar Liganden- oder Rezeptorbindungsassays, enzymatische Assays, zellbasierte Assays oder funktionale Assays, um die Fähigkeit des Biosimilars, eine definierte biologische Wirkung zu erzielen, vergleichend beurteilen zu können (vergleiche [20]).

Im zweiten Schritt werden teilweise vergleichende nicht-klinische *in vivo* Untersuchungen (Tierstudien) durchgeführt, die aber nicht obligatorisch sind. Sie können in Erwägung gezogen werden, um potentielle *in vitro*-Unterschiede in relevanten Qualitätsattributen

oder aber die Sicherheit einer speziellen Formulierung weiter abzuklären.

Im letzten Schritt der Entwicklung ist das Ziel der klinischen Studien nicht der Nachweis der Sicherheit und Wirksamkeit am Patienten *de novo* in allen Indikationen, da diese Parameter bereits für das Referenzarzneimittel etabliert wurden. Die klinischen Studien zur vergleichenden Evaluation von pharmakokinetischen und pharmakodynamischen Eigenschaften, Effizienz und Sicherheit sind maßgeschneidert und werden in einer möglichst sensitiven Indikation durchgeführt, um die Biosimilarität zu bewerten und gegebenenfalls Fragen zu adressieren, die aus vorausgehenden analytischen, funktionalen oder präklinischen Studien noch zu klären sind (vergleiche [21]).

Wie oben dargelegt, beeinflusst der Herstellungsprozess die Eigenschaften des Endprodukts eines Biologikums maßgeblich und ist somit Teil der Produktspezifität. Daher gilt das neue Paradigma: „The product is the process“, welches im Gegensatz zur alten Betrachtung steht, demnach das Produkt ein bestimmtes Molekül ist, das auf Basis konstanter chemischer und physikalischer Charakteristika eindeutig beschrieben werden kann („the product is the molecule“). Der Grundsatz, dass das Verfahren das Produkt bestimmt, trifft für ein Biosimilar insbesondere zu, da der Herstellungsprozess in der Regel von dem des Originator-Wirkstoffes abweicht. Eine fortlaufende Übersicht über zentralisiert in der EU zugelassene Biosimilars kann den Internetseiten des Verbands Forschender Arzneimittelhersteller e.V. (vfa) entnommen werden (vergleiche [26], [9]).

In Bezug auf das seit nunmehr über 100 Jahren bekannte Insulin ist interessanterweise festzustellen, dass diverse Insulinanaloga zur Behandlung von Typ-1- oder Typ-2-Diabetes entwickelt wurden, jedoch kaum Biosimilars zugelassen wurden. Denn obwohl die Entdecker des Insulins (siehe oben) an dem Patent nicht verdienen wollten und es für nur einen (!) Dollar zur Verfügung stellten, sind nahezu alle Folgeinsuline (die Insulinanaloga) unter Patentschutz geblieben. Erste Biosimilars wurden zu Insulinanaloga als Referenzprodukte entwickelt, wie z.B. zum schnellwirkenden Insulin lispro

(Handelsnamen Humalog® und Liprolog®) oder als Insulinanalog mit langer Wirkdauer Insulin glargin (Handelsname Lantus®). In diesen Fällen betraf das Ziel der Modifikation die Änderung der Molekülstruktur durch gentechnischen Austausch von Aminosäurepositionen (vergleiche auch **EP 0 885 961 A1**: Neue Insulinderivate mit schnellem Wirkungseintritt) (vergleiche [23]).

Biobetters

Bei den gentechnisch veränderten Strukturvarianten des Humaninsulins, auch Insulin-Muteine, handelt es sich um verwandte Moleküle, die im Hinblick auf pharmakokinetische Eigenschaften des ursprünglich etablierten Proteins gezielt optimiert wurden, sogenannte „Biobetters“. Die verarbeitenden Prozesse, denen das Arzneimittel im Körper unterliegt (die Pharmakokinetik) umfassen die Aufnahme des Wirkstoffs (Resorption), deren Verteilung (Distribution) und die biochemische Umsetzung (Metabolisierung) sowie die Ausscheidung (Exkretion). Im Gegensatz zu den durch äußere Umwelteinflüsse hervorgerufenen Mikroheterogenitäten, die im Wesentlichen auf Abwandlungen der Kultivierungsbedingungen wie pH-Wert, Temperatur, Druck und Zusammensetzung des Kulturmediums basieren, ermöglichen gentechnologische Verfahren gezielte Abwandlungen, die zu den verbesserten Eigenschaften gegenüber dem Referenzprodukt oder seines Biosimilars führen. Eine Vorlage für wirksamere Abweichungen von „Biobetters“ können auch Kenntnisse über neue, natürlicherweise auftretende oder experimentell ermittelte Sequenzvariationen (Mutationen) liefern. Wie das Beispiel der Insulinanaloga zeigt, betrifft dies zum Beispiel die Optimierung der Halbwertszeit des Moleküls, mit Verbesserung der Wirksamkeit für eine bestimmte, angezeigte medizinische Behandlung (Indikation). Gezielte Änderungen der molekularen Struktur eines Referenzwirkstoffs können durch spezifische Aminosäureaustausche, Verkleinerungen in der Aminosäurekette oder der Vergrößerung des Moleküls durch Fusion mit einem anderen Protein erreicht werden. Weitere chemische Modifikationen betreffen das Anhängen speziell konzipierter Molekülgruppen sowie Änderungen im Glykolisierungsmuster. Dies betrifft regelmäßig auch therapeutische monoklonale An-

tikörper, die die größte und am vielfältigste einsetzbare Gruppe der Glykoproteine darstellen und daher auch die meisten Biopharmazeutika und Biosimilars bereitstellen (vergleiche [32]).

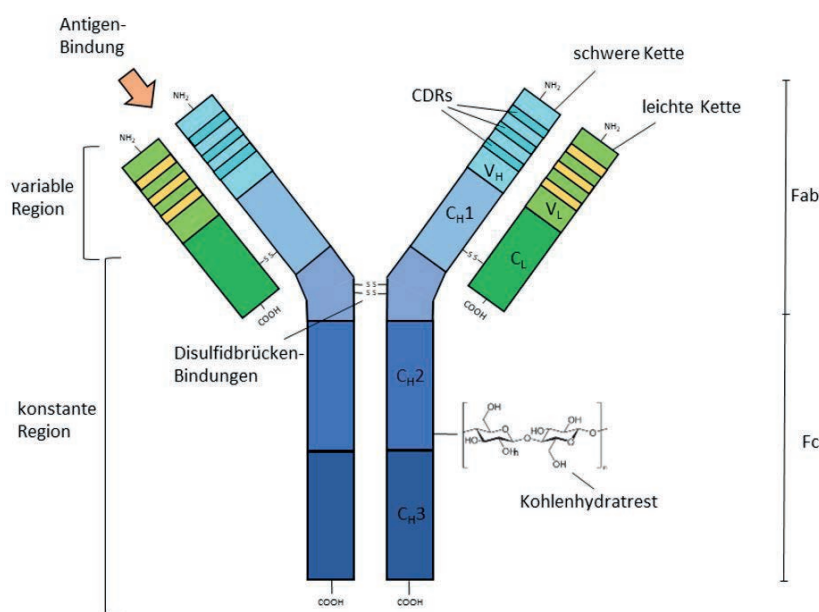
Eine therapeutische Wirkung entfalten Antikörper (auch Immunglobuline) durch Interaktionen mit Oberflächenrezeptoren und durch Bindung an Zielmoleküle. Diese Zielmoleküle, sogenannte Antigene (von *antibody-generating*, antikörpererzeugend), weisen Strukturbereiche mit exponierten Molekülabschnitten auf, die Epitope. Antigene zur protektiven Antikörperbildung gegen Krankheitserreger sind Gegenstand der Impfstoffentwicklung (siehe hierzu Abschnitt „Impfstoffe gegen Krankheitserreger“).

Antikörper vom Typ Immunglobulin-G (IgG) stellen den größten Anteil an Antikörpern im Blut dar und besitzen als Heterodimere aus jeweils zwei identischen leichten (L-) und schweren (H-) Peptidketten einen symmetrischen Y-Aufbau. Hierbei verfügt ein IgG-Antikörper über zwei antigene Bindungsstellen, wobei dieser Abschnitt auch als Fab-Fragment (Antigenbindendes Fragment) bezeichnet wird. Die sogenannte variable Region ist bei den spezifischen IgG-Antikörpern durch variable Aminosäuresequenzen gekennzeichnet. Dem gegenüber weisen die Enden der H-Ketten überwiegend konstante Sequenzbereiche auf, welche als Fc-Fragment (kristallines Fragment) bezeichnet werden (vergleiche Figur 4).

Als Glykoproteine sind die monoklonalen Antikörper auch durch Anzahl und Lage der Glykosylierungen charakterisierbar, wobei die Glykosylierung im Fc-Teil der schweren Kette in einer konservierten Region erfolgt. Eine Änderung des Glykosylierungsmusters kann mit einer deutlich verbesserten Interaktion des Antikörpers mit dem Fc-Rezeptor einer natürlichen Killerzelle (NK) einhergehen, so dass der zelluläre Abtötungsmechanismus durch natürliche Killerzellen verstärkt wird. Dieser Effekt ist auch bekannt als antikörperabhängige zellvermittelte Zytotoxizität (ADCC) (siehe zum Beispiel EP 2 409 712 A1: Anti-CD19-Antikörper mit ADCC- und CDC-Funktionen und verbessertem Glykosylierungsprofil).

Eine der Optimierungen therapeutischer Antikörper betrifft die „Humanisierung“, die Anpassung an die menschliche Zelle. Dies ist immer dann notwendig, wenn der Antikörper als Referenzmolekül zunächst in Zellen einer anderen Spezies, zum Beispiel der Maus (sogenannte murine Zellen), produziert wird. Der erste monoklonale Antikörper weltweit, der zu therapeutischen Zwecken zugelassen wurde, war 1986 Muromonab-CD3, ein monoklonaler muriner Antikörper, der gegen ein Membranprotein auf der Zelloberfläche von T-Lymphozyten (CD3-Rezeptor) gerichtet ist. Murine Antikörper haben den Nachteil, dass sie im Menschen als fremde Moleküle erkannt werden und durch die Immunantwort Allergien auslösen können. Darüber hinaus können durch murine Antikörper Anti-Maus-Antikörper induziert werden, die die therapeutische Wirkung aufheben („neutralisieren“).

Daher besteht eine der bevorzugten Optimierungsstrategien bei Antikörper-basierten Biologicals darin, murine Antikörper schrittweise über chimäre Mischformen, die aus unterschiedlichen Domänen von Maus (oder anderem Erzeuger) und Mensch zusammengesetzt sind, zu „humanisieren“. „Humanisierte Antikörper“ enthalten noch etwa 10% Maus-Proteine, wobei Domänen und Regionen, die nicht an der spezifischen Bindung beteiligt sind, durch humane Sequenzen ersetzt



Figur 4 Schematischer Aufbau eines IgG-Antikörpers

sind. In der weiteren Stufe umfassen „humane Antikörper“ nur noch menschliche Proteine (vergleiche [27]).

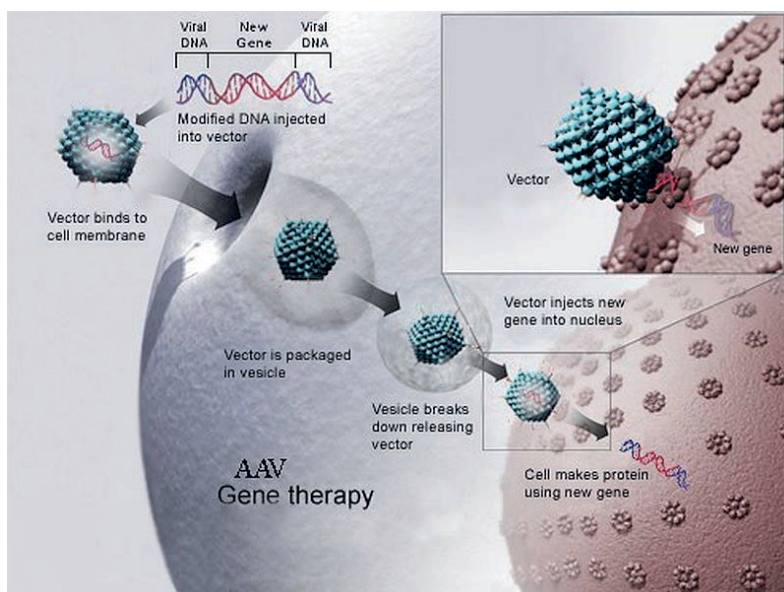
Neben dem Austausch von Proteinregionen und ganzen Domänen betrifft die Humanisierung auch die Proteinglykosylierung, zum Beispiel mit Hilfe eines Expressionssystems der Hefe *Pichia pastoris*. Hierzu werden die Gene für die Enzyme, die normalerweise Hefe-ähnliche Oligosaccharide anhängen, durch entsprechende Gene aus dem Menschen ersetzt, so dass das Glykosylierungsmuster der rekombinant hergestellten Proteine an das humane Vorbild angeglichen werden (siehe hierzu **EP 2 339 013 B1**: Expression von Klasse-2-Mannosidase und Klasse-III-Mannosidase in niederen eukaryotischen Zellen).

Gentherapeutika

Eine Klasse von Biologicals betrifft biopharmazeutische Wirkstoffe auf Basis von Nukleinsäuren, die für Gentherapien von Krebserkrankungen, seltenen Erbkrankheiten oder „seltenen Leiden“ entwickelt werden. Um die gewünschte Wirkung als gentherapeutisches Arzneimittel zu erzielen, wird hierzu meistens ein geeignetes Transportmittel benötigt, sogenannte Genfähren. Hierbei werden in der Regel „gesunde“ (fehlerfreie) Genkopien in speziellen Expressionsvektoren kloniert und in Hüllen von harmlosen Viren verpackt. In die Zielzelle eingebracht, soll das mutmaßlich an der Entstehung

einer Erkrankung beteiligte Gen mit der funktionsfähigen Genkopie ergänzt oder ausgetauscht (substituiert) werden.

Obwohl die Gentherapie als solche bereits in den 1990er Jahren konzipiert wurde, wurde sie aufgrund einiger tödlich verlaufender Immunreaktionen vorerst als zu risikobehaftet angesehen. Als Ursache konnten vor allem die irrtümlich als „harmlos“ eingestuften Virus-Genfähren identifiziert werden (vergleiche [28]). Mittlerweile konnten die gentechnischen Werkzeuge derart optimiert werden, dass mehrere Gentherapien erfolgreich in Europa zugelassen wurden. „Glybera“ mit dem Wirkstoff „Alipogentiparvovec“ war 2012 die erste Gentherapie, die die Genehmigung für das Inverkehrbringen in der EU erhielt. Eine Behandlung bezog sich auf die als seltenes Leiden eingestufte Krankheit LPLD, der „Familiären Lipoprotein-Lipase-Defizienz“, unter der weltweit nur wenige Menschen leiden (in Deutschland sind circa 40 Fälle bekannt). Die Erkrankung ist auf eine Genmutation zurückzuführen, die den Verlust der Lipoproteinlipase (LPL) verursacht. Mittels eines speziell konstruierten Vektors, der eine natürlich vorkommende humane LPL-Genvariante enthält, kann das defekte Gen eingebracht werden (vergleiche Figur 5, [10], [29]). Zur Herstellung, bei der das Genkonstrukt in eine Hülle eines Adenoassoziierten Virus Serotyp 1 (AAV1) verpackt wird, werden unter anderem Insektenzellen auf Basis einer rekombinanten Baculovirus-Technik verwendet (beschrieben zum Beispiel in **EP 0 946 741 B1**).



Figur 5: Prinzip zum Wirkmechanismus einer Gentherapie am Beispiel Alipogentiparvovec.

Da Herstellung und Zulassungsvoraussetzungen sehr aufwendig und kostenintensiv sind, wurde die Zulassung für Glybera in der EU nicht verlängert und das Mittel im Oktober 2017 wieder vom Markt genommen. Drei weitere Gentherapeutika bekamen 2018 eine EU-Zulassung. Da die Kosten für gentherapeutische Behandlungen im Bereich von mehreren 100.000 Euro-Dollar und mehr liegen, wird nach kostengünstigeren Alternativen gesucht. Möglicherweise können Gentherapeutika, die auf Basis der Nobel-

preis-gewürdigten CRISPR/Cas-Technologie entwickelt werden, zukünftig diese Anforderung erfüllen (vergleiche hierzu [11]).

Krebs-Impfstoffe

Bevor sich die messenger RNA (mRNA) (also „Boten-RNA“)-Vakzine gegen Krankheitserreger im Jahr 2020 etablieren konnten, waren therapeutische mRNA-Impfstoffe bereits 2002 bis 2003 in ersten klinischen Studien getestet worden. Bekannt auch als Neo-Antigen-Impfstoffe (für neu auftretende Antigene) sind sie gegen geänderte Strukturen auf Oberflächen von entarteten Zellen gerichtet. Dies können zum Beispiel Tumorzellen sein, die ein geändertes Expressionsmuster aufweisen und daher zu Krebs führen können (vergleiche [12]). Der Vorteil eines mRNA-Impfstoffes gegenüber einem DNA-Impfstoff besteht unter anderem darin, dass die mRNA nicht in den Zellkern eingeschleust werden muss und somit auch nicht von einer DNA-Vorlage und deren Transkription abhängig ist. Daher ist die Möglichkeit einer Integration in das Genom bei mRNA-Impfstoffen deutlich unwahrscheinlicher. Jedoch besteht die Gefahr, dass die RNA in ungeschützter Form im Zuge einer unspezifischen, angeborenen Immunantwort, durch Nukleasen (RNAsen) abgebaut wird. Ähnlich wie bei einem Impfstoff gegen Krankheitserreger geht der Entwicklung des Wirkstoffes zunächst die genaue Charakterisierung der pathogenen Zelle (Tumorzelle) voraus, um durch geeignete Antigene (Proteinstrukturen) auf die entsprechende Erbinformation schließen zu können.

Nach aufwendigen Modifikationen am Molekül wird die mRNA in einer für die Impfung des Patienten geeigneten Formulierung (als Transfektionsreagenz) bereitgestellt. Ein Vehikel ist insbesondere auch deshalb notwendig, da eine kodierende mRNA relativ groß ist (10^4 bis 10^6 Da) und die mRNA in verpackter Form einfacher durch die Lipiddoppelschicht der Zellmembran gelangt (zum Beispiel: **WO 2016 / 000 792 A1**: Stabilisierte Formulierungen von RNA; **WO 2016 118 725 A1**).

Zur Optimierung können an verschiedenen Stellen der mRNA unterschiedliche Modifikationen vorgenommen werden, die vor allem die Verträglichkeit und Dauer der Expression des kodierten Proteins beeinflussen. Für eine erhöhte Stabilität und als Schutz vor dem angebo-

renen Immunsystem wird in der *in vitro* synthetisierten (transkribierten) sogenannten Nukleosid-modifizierten mRNA häufig Uridin gegen N^1 -Methylpseudouridin (m1 Ψ), Pseudouridin und/oder 5-Methylcytidin ausgetauscht.

Darüber hinaus findet eine Proteinoptimierung durch gezielte Anpassung der Eigenschaften des Proteins (Codon-Optimierung) des Antigens statt, das in Form eines offenen Leserahmens (ORF, open reading frame) vorliegt. Weitere Modifikationen der mRNA betreffen das vordere Ende (5'Cap-Struktur) und den (3'PolyA-Bereich, sowie auch andere, nicht kodierende RNA-Abschnitte (5' und 3'-UTRs), die die biologische Halbwertszeit der mRNA erhöhen (siehe hierzu zum Beispiel **EP 1 604 688 B1**: Stabilisierte Tumorantigen-mRNA mit erhöhtem G/C-Gehalt für die Gentherapie; **WO 2018 144 082 A1**: RNA cancer vaccines). **DE 10 2005 046 490 A1**: Modifikationen von RNA, die zu einer erhöhten Transkriptstabilität und Translationseffizienz führen).

Zukünftig könnten mRNAs auch in einer „selbst-amplifizierenden“ Form (*self-amplifying mRNA* oder *samRNA*) eingesetzt werden, die eine Verlängerung der biologischen Halbwertszeit und somit eine Erhöhung der Produktion des Antigens ermöglichen. Hierzu umfasst die kodierende Sequenz einen weiteren offenen Leserahmen, der für virale Nichtstrukturproteine (nsP1–4) kodiert, die einen Replikase-Komplex bilden, so dass mehr mRNA Kopien als Vorlage für die Proteintranslation bereitgestellt werden [13].

Impfstoffe gegen Krankheitserreger

Die Begriffe „Impfstoff“ und „Vakzin“ leiten sich von *Variolae vaccinae* ab – eine Terminologie, die der englische Landarzt Edward Anthony Jenner (1798) anhand von Untersuchungen über Kuhpocken geprägt hatte. Hierbei hatte er wesentlich zur Entwicklung der modernen Schutzimpfung beigetragen, als er eine Impfung mit Kuhpocken gegen die von Pockenviren (*Orthopoxvirus variolae*) verursachte Pockenkrankheit durchführte. Nachweisbar wurde beobachtet, dass Menschen nach einer mutmaßlichen Kuhpocken-Infektion anschließend vor der Infektion mit echten Pocken geschützt waren. Damit ist die eigentliche Wirkung eines Impfstoffes im Wesentlichen beschrieben, demnach die

prophylaktische Verabreichung einer harmlosen Form eines Pathogens zur Vorbeugung oder Abschwächung der Auswirkungen einer künftigen Infektion gegen den eigentlichen Erreger erreicht werden soll.

Ohne auf die molekularen Vorgänge bei den Immunreaktionen allzu detailliert einzugehen, soll das Prinzip der erworbenen Immunantwort, auch spezifische oder adaptive Immunantwort genannt, gegen infektiöse Bakterien oder Viren (dem Pathogen) kurz erläutert werden. Demnach umfasst die primäre Abwehrreaktion eine humorale und eine zelluläre Komponente. Antigen-präsentierende Zellen spielen in der erworbenen Immunantwort eine zentrale Rolle: sie nehmen das Pathogen auf, zerlegen dieses und präsentieren antigene Strukturen (Epitope) auf ihrer Oberfläche. Im Zuge der humoralen Immunantwort sind die aus dem Knochenmark stammenden B-Zellen (abgeleitet von *bone marrow* – Knochenmark) involviert. B-Zellen werden aktiviert, nachdem ein passendes Antigen an die in der Zellmembran verankerten B-Zell-Rezeptoren (spezielle Immunglobuline) bindet. Nach Aufnahme des Antigen-Antikörper-Komplexes wird das Antigen durch Proteasen auf Oligopeptide gekürzt, von einem Proteinkomplex (MHC II) gebunden und auf der Oberfläche der Zelle präsentiert. Im Zuge der spezifischen Immunantwort verwandeln sich die B-Zellen in die Antikörper-produzierenden Plasmazellen, die die spezifischen Antikörper freisetzen. Einige dieser B-Zellen differenzieren zu Gedächtniszellen und sind in der Lage, bei erneuter Infektion durch denselben Erreger Antikörper abzugeben, die dann spezifisch an die jeweiligen Antigene binden und eine erneute Immunreaktion auslösen können.

Auf der anderen Seite sind bei der zellulären Immunantwort die zytotoxischen T-Zellen involviert. Hauptaufgabe der zytotoxischen T-Zellen besteht darin, infizierte Körperzellen anhand der Erreger-typischen Antigene zu erkennen und zu eliminieren. Obwohl fast alle Körperzellen die Fähigkeit zur Antigenpräsentation haben, können nur antigenpräsentierende Zellen des Immunsystems, wie dendritische Zellen, Makrophagen und B-Lymphozyten, eine Aktivierung von T-Lymphozyten auslösen, die noch nicht mit dem entsprechenden Antigen in Kontakt gekommen sind. Auch hier werden zunächst Oligopeptide eines spezifischen Antigens erzeugt, wobei diese, von den sogenannten MHC I -Proteinen gebunden, den zytotoxischen T-Zellen präsentiert wer-

den. Die zytotoxischen T-Zellen werden nach Erkennung der Antigenfragmente mittels T-Zell-Rezeptoren aktiviert. Die durch weitere costimulatorische Faktoren aktivierten zytotoxischen T-Zellen, die spezifisch mit ihrem Rezeptor an eine erkrankte Zelle binden, leiten als T-Killerzelle die Apoptose, also den Zelltod, ein. Auch ein Teil der zytotoxischen T-Zellen werden zu T-Gedächtniszellen, um für die erneute Zerstörung von erkrankten Körperzellen zur Verfügung zu stehen.

Darüber hinaus sind noch natürliche Killerzellen, (NK)-Zellen, aktiv, die ebenfalls geschädigte, fremde oder virusinfizierte Zellen erkennen und zum kontrollierten Zelltod führen. Während die zytotoxischen T-Zellen die Präsentation der Antigene in Verbindung mit MHC-Proteinen benötigt, reagieren NK-Zellen auf das Fehlen der MHC I. Beide Zelltypen erkennen demnach veränderte Körperzellen anhand unterschiedlicher Merkmale.

Impfstoffklassen:

Zur Aktivierung einer primären Immunantwort sollte der Impfstoff demnach mindestens ein Molekül mit einer antigenen Struktur des Pathogens enthalten. Meistens handelt es sich hierbei um ein oder mehrere Proteine oder um ein Molekül, das die kodierende Information darüber enthält. Hierbei werden auch vollständige Erreger verwendet, dann jedoch in abgeschwächter (attenuierter) Form. Bei einem solchen Ganzvirus oder Bakterium (Ganzpartikelimpfstoff) wird eine Vielzahl von antigenen Strukturen bereitgestellt. Als „abgeschwächter Lebendimpfstoff“ kann sich dieser noch vermehren und eine Immunantwort auslösen, jedoch ohne eine Erkrankung hervorzurufen. Die Attenuierung wird in der Regel durch eine Reihe von Infektionen artfremder Zellkulturen oder Labororganismen (Wirte) erreicht, demnach der Erreger solange in diesem System vermehrt wird, bis durch eine Anpassung an den Wirt eine Verringerung der Pathogenität festgestellt wird. Den größten Teil von Impfstoffen bilden sogenannte „Totimpfstoffe“ auf Basis ganzer Partikel oder Bruchstücke davon, die keine Vermehrungsfähigkeit (Replikationsfähigkeit) mehr besitzen. Ein Ganzpartikelimpfstoff wird üblicherweise mittels einer chemischen Behandlung inaktiviert, zum Beispiel unter Verwen-

dung von Formaldehyd (beispielhaft EP 2 704 740 B1: Inaktiviertes Schweinegrippe-Virus und Verfahren zu seiner Herstellung).

Nach der Inaktivierung kann noch eine Fragmentierung und Zerstörung der Ganzpartikel-Erreger mit Detergentien oder organischen Lösungsmitteln erfolgen. Durch Aufreinigung werden dann Fragmente erhalten, die die Immunreaktion auslösen, verwendet als sogenannter „Spaltimpfstoff“ oder „Untereinheiten“-Impfstoff.

Bei Viren sind es oft einzelne Proteine, die aus der Oberfläche herausragen und in der Membran des Virus verankert sind, die in der Immunantwort eine bedeutende Rolle spielen. Darüber hinaus enthalten die meisten Vakzine in der zu verabreichenden Formulierung zusätzliche Hilfsstoffe (Adjuvantien), wie zum Beispiel Aluminiumhydroxid.

Bei genauer Kenntnis über die molekulare Struktur der Oberflächenproteine können geeignete Antigene auch gentechnisch hergestellt werden, zum Beispiel als rekombinanter Protein-Impfstoff oder Peptid-Impfstoff, der darüber hinaus auch noch gentechnisch modifiziert sein kann. Ähnlich den zuvor beschriebenen Gentherapeutika werden virale Genfähren eingesetzt, die ein für den Menschen nicht pathogenes, modifiziertes, vermehrungsunfähiges Virus enthalten, so dass ein modifiziertes Protein des Pathogens in der Zelle hergestellt (exprimiert) werden kann. Solche Impfstoffe bezeichnet man als Vektor-Impfstoffe. Als weitere Impfstoff-Variante werden „virusähnliche Partikel“ (VLP) eingesetzt, die keine genetische Information des Virus enthalten, sondern nur die Hülle als Fähre, in der sich das Antigen befindet (Übersichtsartikel zu Impfstoffen gegen infektiöse Krankheiten siehe [14]).

Auch bei der Entwicklung von Impfstoffen gegen SARS-CoV-2 (siehe folgenden Abschnitt) werden verschiedene Impfstoffansätze verwendet. Im Folgenden veranschaulicht Figur 6 Impfstofftypen, die für die Entwicklung von SARS-CoV-2-Impfstoffen für den Menschen eine Rolle spielen.

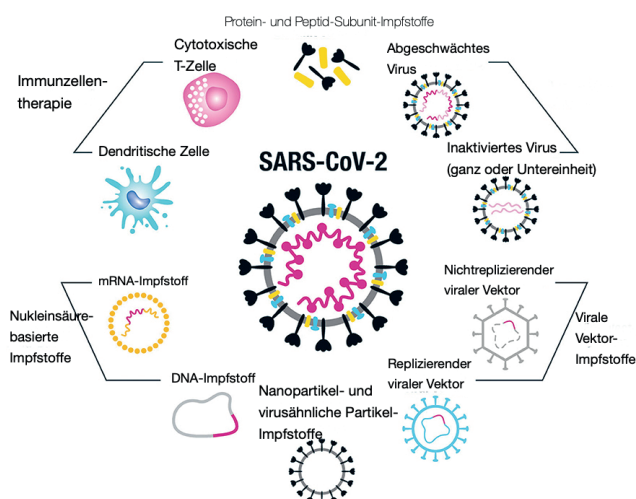
Zur Veranschaulichung der Funktionsweise eines RNA-Impfstoffes, wird beispielhaft der Aufbau und Infektionsverlauf des SARS-CoV-2 Virus kurz erläutert.

Entwicklung eines mRNA-Impfstoffes gegen SARS-CoV-2

Um einen RNA-basierten Impfstoff (oder auch ein Medikament) bereit stellen zu können, müssen zunächst geeignete Zielmoleküle, die antigenen Komponenten des Pathogens, ausfindig gemacht und anschließend charakterisiert werden. Neben der strukturellen Aufklärung des Genoms und essentieller Proteine bedarf es weiterer Kenntnisse über den „Lebenszyklus“, die Wechselwirkung mit der Wirtszelle und die Art und Weise der Aufnahme und Reproduktion.

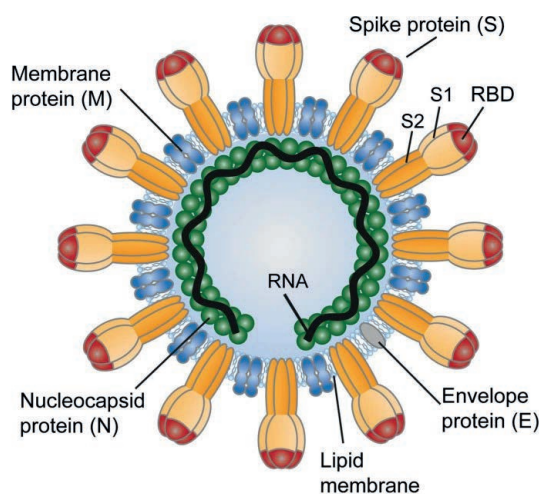
Das SARS-CoV-2 (Schweres-akutes-Atemwegssyndrom-Coronavirus Typ 2), umgangssprachlich auch Corona-Virus, ist ein humanpathogenes, einzelsträngiges, lineares RNA Virus mit positiver genomischer Orientierung (ss(+)-RNA-Virus). SARS-CoV 2 besitzt das größte bekannte Genom aller RNA-Viren. Von den Coronaviren sind sieben Gattungen humanmedizinisch bedeutend, vor allem SARS-CoV (Verursacher einer Epidemie in China 2003/2004), MERS-CoV (Erreger des „Middle East respiratory syndrome“) und SARS-CoV-2 (das Anfang 2020 als Auslöser der COVID-19 Erkrankung identifiziert wurde).

Gegen das sich weltweit verbreitende SARS-CoV-2 konnten wirksame Impfstoffe entwickelt werden, weil antigene Strukturen gefunden wurden, die stark immunogen wirken. Demnach trägt es ein aus der Virushülle nach außen ragendes Peplomer, auch „Spike“-Protein genannt, das zwei Untereinheiten mit einer Bindungsstelle für ein Zellprotein umfasst.



Figur 6: SARS-CoV-2-Impfstoffe

Im Laufe der weltweiten Untersuchungen wurde hierzu festgestellt, dass das heterotrimere Spike (S)-Protein für die Aufnahme in die Wirtszelle benötigt wird. Es umfasst zwei Untereinheiten S1 und S2, wobei die S1-Untereinheit eine Rezeptorbindungs-Domäne (Receptor binding domain; RBD) aufweist (siehe Figur 7), die an das als Rezeptor auftretende Angiotensin-konvertierende Enzym 2 (ACE2) bindet. ACE2 ist ein Transmembranprotein (Typ 1-1) mit einer extrazellulären N-terminalen Domäne. Die S2-Untereinheit des Spike-Proteins vermittelt die Fusion von Virushülle und Wirtszellmembran [15].



Figur 7: Schematischer Querschnitt des Virus SARS-CoV-2

Der Infektionsverlauf beginnt damit, dass das Virus über das Spike-Protein (auch Glykoprotein S) an das Angiotensin-Converting-Enzym 2 (ACE2) bindet, das auf der Wirtszelloberfläche als Rezeptor dient. Nach Binden des S-Proteins an den Rezeptor ACE2 findet im S-Protein eine Strukturänderung statt, so dass die sogenannte S2'-Site in der S2-Untereinheit freigelegt wird. Diese wird durch eine Protease auf der Wirtszelloberfläche, die „transmembrane Serinprotease 2“ (TMPRSS2), gespalten. Dieser Vorgang nennt sich Priming. Das Priming ist ein notwendiger Schritt zum Eindringen in die Zelle und damit besonders verantwortlich für die Virusverbreitung und die Viruspathogenität. Mit Verschmelzen von Virusmembran und Membran des Endosoms gelangt das virale einzelsträngige RNA-Genom (ssRNA(+)) in das Zytoplasma der Wirtszelle.

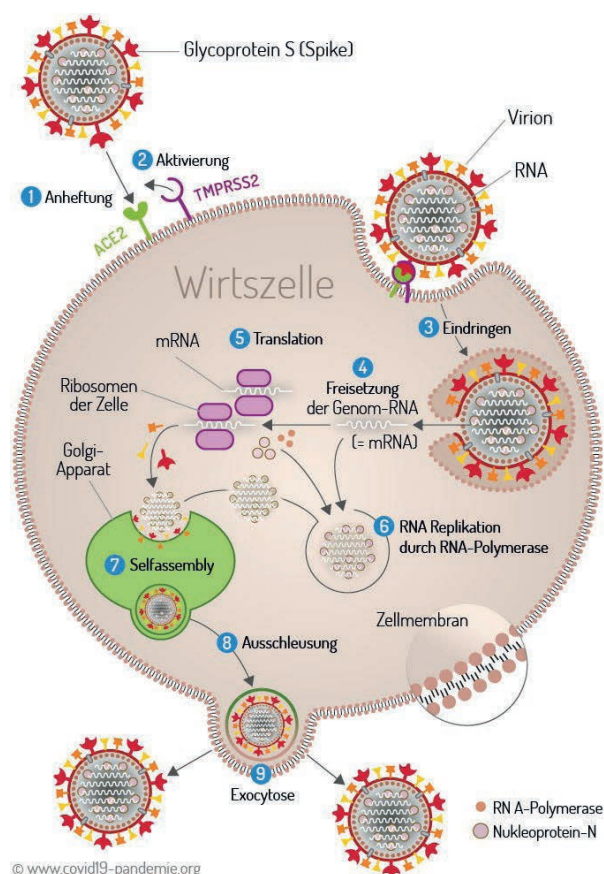
Da das RNA-Genom in einer zur Leserichtung der mRNA direkt ablesbaren Orientierung (+ Polarität) vor-

liegt, kann das RNA-Genom direkt für die Synthese virusspezifischer mRNA und der Translation der Proteine durch die Synthese-Maschinerie der Wirtszelle (insbesondere Ribosomen) verwendet werden. Hierbei werden zunächst zwei Leseraster (ORF) in zwei Polyproteine einer Replikase translatiert. Daraus werden autoproteolytisch die beiden Proteasen Mpro (Main Protease, Hauptprotease) und Plpro (Papain-like Protease) prozessiert, die die Polyproteine in funktionelle Komponenten zerlegen. Hierbei entstehen 16 sogenannte „Nicht-Struktur“-Proteine (NSPs) mit unterschiedlichen Funktionen zur Kontrolle der Wirtszelle und zum Aufbau neuer Viruspartikel. Eines davon ist eine RNA-abhängige RNA-Polymerase, die die virale RNA zunächst in einen Minusstrang repliziert, der dann wiederum als Matrize für die Replikation neuer genomischer Plus-RNAs dient. Diese lagern sich mit dem Nukleokapsid-Protein N zu neuen Nukleoprotein-Komplexen zusammen. Die übrigen 6 ORFs des SARS-CoV-2-Genoms enthalten unter anderem die Gene für die Strukturproteine S, M, E und N. Für den Zusammenbau (das Assembly) der Viruspartikel werden die translatierten Proteine S, M und E in die Membranen des Netzwerks von endoplasmatischem Retikulum und Golgi (ER-Golgi-Kompartiment) eingelagert und mit den neuen Nukleoprotein-Komplexen in das ER-Golgi Kompartiment aufgenommen. Hier werden sie zu einzelnen Virionen (Viruspartikeln) zusammengebaut. Anschließend wird das fertige Viruspartikel über den Golgi-Apparat durch eine Exozytose aus der Wirtszelle transportiert (siehe hierzu Figur 8).

Herstellung eines mRNA-Impfstoffes für COVID-19

Nachdem festgestellt wurde, dass sich das „Spike“-Protein des SARS-CoV-2-Virus besonders gut als Antigen eignet, da es die Bildung „neutralisierender“ und somit schützender (protektiver) Antikörper induziert, stand und steht es im Fokus der weltweiten Impfstoffentwicklung (Übersichtsartikel zum Beispiel [17]).

Im Rahmen der Covid-19-Pandemie konnte sich die von der WHO als neu eingestufte Impfstoffklasse der mRNA-Impfstoffe erfolgreich etablieren (hierzu beispielhaft WO 2021 / 159 985 A1, WO 2021 / 159 130 A2,



Figur 8: Vereinfachte schematische Darstellung des SARS-CoV-2 Vermehrungszyklus

WO 2021 / 188 969 A2, WO 2021 / 188 906 A1). Erstmals wurde am 2. Dezember 2020 weltweit ein mRNA-Impfstoff als Notzulassung durch eine staatliche Regulierungsbehörde zugelassen (britische Zulassungsbehörde MHRA). In der EU erfolgte am 21. Dezember 2020 eine bedingte Marktzulassung für das Erzeugnis „COVID-19-mRNA-Impfstoff (Nukleosid-modifiziert)“ unter dem Handelsnamen Comirnaty und dem Wirkstoff „BNT162b2“ der von Biontech und Pfizer entwickelt wurde, mit dem empfohlenen internationalen Freinamen (INN) „Tozinameran“. Kurze Zeit später, am 6. Januar 2021, erhielt das weitere Erzeugnis „COVID-19-mRNA-Impfstoff (Nukleosid-modifiziert)“ die EU-Zulassung, auch bekannt als „COVID-19 Vaccine Moderna“ (Moderna-Vakzine oder Spikevax) mit „mRNA-1273“ (CX-024414) als Wirkstoffkomponente (empfohlener Freiname Elasmomeran).

Beide mRNA-Impfstoffe basieren auf einer Nukleosid-modifizierten mRNAs (modRNAs) des gleichen Referenz-Genoms (Isolat Wuhan-Hu-1), die in Lipid-Nanopartikeln (LNPs) eingebettet sind. Die mRNAs be-

treffen jeweils eine einzelsträngige mRNA mit einer Kappe am 5'-Ende, eine 5'-untranslatierte Region (UTR), den offenen Leserahmen (ORF) der das virale Spike(S)-Protein von SARS-CoV-2 kodiert, eine 3'-UTR und einen 3'-Poly(A)-Schwanz. Die RNA wird mit Hilfe einer zellfreien „in-vitro“-Transkription aus einer DNA-Vorlage hergestellt, wobei das in der RNA natürlicherweise enthaltene Nukleosid „Uridin“ jeweils durch N1-Methylpseudouridin zur Unterdrückung einer unerwünschten (angeborenen) Immunantwort ersetzt wurde.

Das Spike-Oberflächen-Glykoprotein ist dabei jeweils in Form des sogenannten S-2P-Antigen kodiert, so dass es in seiner bevorzugten Konformation vor der Fusion mit der Zellmembran (Prä-Fusions-Konformation) durch zwei aufeinanderfolgende Prolin-Substitutionen an den Aminosäurepositionen 986 (K986P) und 987 (V987P) am oberen Ende der zentralen Helix in der S2-Untereinheit stabilisiert wird. Die modifizierten mRNAs zeigen eine große Ähnlichkeit untereinander (ca. 85 % Sequenzidentität), jedoch mit Unterschieden in steuernden Sequenzen als auch in der Codonverwendung im offenen Leserahmen, die mögliche Auswirkungen auf die Stabilität des Moleküls und Translationseffizienz haben (vergleiche hierzu insbesondere Kapitel 2.9 des Assessment Report, COVID-19 Vaccine Moderna, EMA/15689/2021).

Ein signifikanter Unterschied besteht tatsächlich auch in der jeweiligen Impfstoffformulierung und der Einbettung in Lipid-Nanopartikel. Demnach verwendet Tozinameran unter anderem ALC-0315 (4-Hydroxybutyl)azandiylbis(hexan-6,1-diyl)bis(2-hexyldecanoat) als kationisches, synthetisches Lipid, und Elasmomeran dagegen SM-102 (Heptadecan-9-yl-8-((2-hydroxyethyl)[6-oxo-6-(undecyloxy)hexyl]amino)-octanoat). Neutrale Lipide sowie Puffersubstanzen stabilisieren die Formulierung. (siehe [30], [31]).

Wirkungsweise

Nach der intramuskulären Injektion erfolgt mit der Transfektion die Aufnahme (*in vivo*) der positiv geladenen mRNA-Lipid-Nanopartikel über einen Rezeptorvermittelte Endocytose-Vorgang unter Bildung von membranumschlossenen Vesikeln, den sogenannten Endosomen. Danach werden die RNA-Lipid-Nanopar-

tikel ins Zytosol freigesetzt, und von der mRNA am Ribosom im Zuge der Proteinbiosynthese das antigene Protein hergestellt. Das S-Glykoprotein ist in seiner Funktion eigentlich ein transmembranes Glycoprotein, das eine Zellfusion bewirken kann (fusogenes Protein), welches dem Virus ermöglicht, nach Aufnahme in eine Zelle das Endosom zu verlassen. Hierbei kann es zwei Proteinfaltungen vor und nach der Fusion mit der Endosomenmembran einnehmen. Zur Ausbildung der Immunantwort der oben genannten SARS-CoV-2-Impfstoffe wird die Faltungsform bevorzugt, die das Virus vor der Aufnahme in eine Zelle aufweist. Deshalb wird als Antigen die 2P-Variante des S-Glykoproteins mit den zwei geänderten Prolinen verwendet, die die Proteinfaltung vor der Membranfusion stabilisieren. Das von der Zellmaschinerie hergestellte Protein wird nun durch proteinabbauende Proteasen (beziehungsweise durch das Proteasom) in kleinere Polypeptide zerlegt, die ins Endoplasmatische Retikulum transportiert werden. Dort binden sie an Proteinkomplexe (MHC) und gelangen zur Zelloberfläche. Anschließend werden die Epitope der Antigene mit MHC I oder MHC II präsentiert, so dass die humorale und zelluläre Immunantwort ihren Lauf nehmen kann (vergleiche Abschnitt Impfstoffe gegen Krankheitserreger; [18], [19]).

Nicht-Patentliteratur

- [1] RICHTLINIE 2003/63/EG DER KOMMISSION vom 25. Juni 2003 zur Änderung der Richtlinie 2001/83/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Gemeinschaftskodexes für Humanarzneimittel
- [2] DE LEIVA, A. [et al.]: The discovery of insulin: Continued controversies after ninety years. *Endocrinol Nutr.*, Vol. 58, 2011, No. 9, S. 449-456. DOI: 10.1016/j.endonu.2011.10.001
- [3] Liste der Nobelpreisträger. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 2. Januar 2022, 21:03 Uhr. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreistr%C3%A4ger [abgerufen in 01/2022]
- [4] Biosimilars in der EU – Leitfaden für medizinische Fachkräfte. Europäische Arzneimittel-Agentur (EMA) und Europäische Kommission (2019)
- [5] Das Europäische Arzneimittelregulierungssystem – Ein einheitlicher Ansatz für die Zulassung von Arzneimitteln in der Europäischen Union (2016)
- [6] PASCOVICI, D. [et al.]: Clinically Relevant Post-Translational Modification Analyses – Maturing Workflows and Bioinformatics Tools. *Int. J. Mol. Sci. Bol.*, Vol. 20, 2019, No. 16, S. 1-30. DOI: 10.3390/ijms20010016
- [7] N-Glykosylierung. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 16. September 2021, 09:05 Uhr. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/N-Glykosylierung> [abgerufen in 12/2021]
- [8] Biosimilars: Leitfaden der Arzneimittelkommission der deutschen Ärzteschaft (AkdÄ), 2. Auflage, Version 1.0, Januar 2021
- [9] vfa. Die forschenden Pharma-Unternehmen: Übersicht über zentralisiert in der EU zugelassene Biosimilars URL: <https://www.vfa.de/de/arzneimittelforschung/datenbanken-zu-arzneimitteln/biosimilars-uebersicht> [abgerufen am 26.01.2022]
- [10] Alipogene tiparvovec. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 20.7.2021, 15:33 Uhr. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Alipogene_tiparvovec [abgerufen in 12/2021]
- [11] RIEDEL, L.: Genome Editing. DPMA – Erfinderaktivitäten 2016/2017, S. 63-73
- [12] ESPRIT, A. [et al.]: Neo-Antigen mRNA Vaccines. *Vaccines*, Vol. 8, 2020, No. 4, S. 1-24. DOI: 10.3390/vaccines8040776
- [13] BLOOM, K. [et al.]: Self-amplifying RNA vaccines for infectious diseases. *Gene Ther.*, Vol. 28, 2021, No. 3-4, S. 117-129. DOI: 10.1038/s41434-020-00204-y
- [14] POLLARD, A.J., BIJCKER, E.M.: A guide to vaccinology: from basic principles to new developments. *Nat Rev Immunol*, Vol. 21, 2021, No. 2, S. 83-100. DOI: 10.1038/s41577-020-00479-7
- [15] SARS-CoV-2. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 25. Januar 2022, 23:09 Uhr. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/SARS-CoV-2> [abgerufen am 26.01.2022]
- [16] RKI: SARS-CoV-2: Virologische Basisdaten sowie Virusvarianten (Stand 01/2022). URL: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Virologische_Basisdaten.html [abgerufen am 17.01.2022]
- [17] SARS-CoV-2-Impfstoff. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 26. Januar 2022, 11:32 Uhr. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/SARS-CoV-2-Impfstoff> [abgerufen am 26.01.2022]

- [18] CHAUDHARY, N. [et al.]: mRNA vaccines for infectious diseases: principles, delivery and clinical translation. *Nature Reviews, Drug Discovery*, Vol. 20, 2021, No. 11, S. 817-838. DOI: 10.1038/s41573-021-00283-5
- [19] PARK, J. W. [et al.]: mRNA vaccines for COVID-19: what, why and how. *Int J Biol Sci*, Vol. 17, 2021, No. 6, S. 1446-1460. DOI:10.7150/ijbs.59233
- [20] Guideline on similar biological medicinal products containing biotechnology-derived proteins as active substance: quality issues (revision 1). EMA/CHMP/BWP/247713/2012. EMA, 2014
- [21] Guideline on similar biological medicinal products containing biotechnology-derived proteins as active substance: non-clinical and clinical issues. EMEA/CHMP/BMWP/42832/2005 Rev1. EMA, 2014
- [22] Insulin. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 25. Januar 2022, 08:11 Uhr. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Insulin> [abgerufen am 26.01.2022]
- [23] 100 Jahre Insulin. Lilly. URL: <https://www.lilly-pharma.de/klinische-forschung/100-Jahre-Insulin> [abgerufen am 27.1.2022]
- [24] DIEM, P.: Die Entdeckung des Insulins. *Therapeutische Umschau*, Vol. 77, 2020 No. 7, S. 289-296
- [25] Europäische Medicines Agency: Über uns. EMA/338312/2016 Rev. 3, November 2019
- [26] ZÜNDORF, I., DINGERMAN, T.: The product is the process. Was der Herstellungsprozess der Biosimilars für die Zulassung bedeutet. *DAZ* 2018, No. 43, S. 42. URL: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2018/daz-43-2018/the-product-is-the-process> [abgerufen am 27.1.2022]
- [27] Antikörper. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 25. Januar 2022, 23:33 Uhr. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Antik%C3%B6rper> [abgerufen am 27.1.2022]
- [28] Entwicklung der Gentherapie. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Stellungnahme der Senatskommission für Grundsatzfragen der Genforschung. Mitteilung 5, 2006
- [29] European Medicines Agency. Glybera. URL: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/glybera> [abgerufen am 27.1.2022]
- [30] European Medicines Agency. Spikevax (previously COVID-19 Vaccine Moderna). URL: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/spikevax> [abgerufen am 27.1.2022]
- [31] European Medicines Agency. Comirnaty. URL: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/comirnaty> [abgerufen am 27.1.2022]
- [32] DINGERMAN, T ZÜNDORF, I.: Biobetters. Kopien – besser als das Original. *Pharmazeutische Zeitung*, Vol. 6, 2015. URL: <https://www.pharmazeutische-zeitung.de/ausgabe-062015/kopien-ndash-besser-als-das-original/> [abgerufen am 27.1.2022]

Bildnachweise

Figur 1:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>

Figur 2:

[4] Biosimilars in der EU – Leitfaden für medizinische Fachkräfte. Europäische Arzneimittel-Agentur (EMA) und Europäische Kommission (2019)

<https://www.ema.europa.eu/en/human-regulatory/overview/biosimilar-medicines-overview>

Figur 3:

N-Glykosylierung; Wikipedia <https://de.wikipedia.org/wiki/N-Glykosylierung> (aufgerufen 12/2021)

Figur 4:

die Autoren, Freigabe erteilt

Figur 5:

Alipogene tiparvovec; Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Alipogene_tiparvovec

Figur 6:

SARS-CoV-2: Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/SARS-CoV-2> Referenz 17, angepasst/aktualisiert in:

[17] COVID-19-Impfstoff. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 20. Juni 2022. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/COVID-19-Impfstoff> [abgerufen am 22.06.2022]

Figur 7:

SARS-CoV-2: Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/SARS-CoV-2>

Figur 8:

SARS-CoV-2: Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/SARS-CoV-2>

Nanophotonik in der technischen Innovation

Dr. Werner Hofmann, Patentabteilung 1.33

Über den Autor

Dr. Werner Hofmann absolvierte ein Studium der Elektrotechnik und promovierte an der Technischen Universität München. Er forschte in den Jahren 2009/2010 zum Thema Elektrotechnik als Postdoc an der University of California, Berkeley und hatte von 2013 bis 2019 eine Professur für Nanophotonische Bauelemente an der Technische Universität Berlin inne.

Seit Ende 2019 prüft Dr. Hofmann im DPMA Patentanmeldungen im Bereich der Photonik und Halbleitertechnologie.

1 Nano und Photonik – Was ist das?

Die Nanotechnologie gilt seit langem als Zukunftstechnologie. Die technische Beherrschung kleinster Dimensionen verspricht Innovation und Wohlstand. Der Photonik, sprich der Anwendung von Lichtquanten in der Technik, wird eine ähnliche Bedeutung wie der Mikroelektronik vorausgesagt.

Eine Kombination dieser beiden Technologien für technische Lösungen der Zukunft eröffnet daher ein großes Anwendungspotenzial. Somit ist es nicht verwunderlich, dass auf diesem Gebiet viele Erfindungen gemacht werden, die als Patentanmeldungen beim DPMA zur Prüfung anstehen.

Nun ist nicht jede Erfindung disruptiv, im Gegenteil bauen die meisten Anmeldungen auf dem Stand der Technik auf. Die Erfindung selbst steckt oft in den pfiffigen und teils genialen Details, die aber auf den ersten Blick nicht immer ins Auge fallen.

Gerade im Bereich der Nanophotonik ist die Erfindung von den physikalischen Ausmessungen her sehr klein. Nun macht Nanotechnologie nicht nur die bloße Existenz von Strukturen im Nanometer-Bereich aus, sondern deren spezielle Funktion, die sie erst durch ihre exakte Geometrie erhalten. Hinzu kommt, dass diese Nanostrukturen nicht skalierbar sind, sprich nur in der gegebenen Größenordnung funktionieren. Bei der Nanophotonik ist dies in der Regel dem Sachverhalt geschuldet, dass die Struktur von ihrer räumlichen Ausdehnung her mit der Wellenlänge der Lichtquanten, welche mehrere hundert Nanometer beträgt, korreliert.

Bei Erfindungen auf diesem Gebiet muss daher sehr detailliert geprüft werden, ob solche nanophotonischen Effekte technisch zum Tragen kommen. Auch ist die Funktion für den Laien zunächst nicht unbedingt nachvollziehbar, da die täglichen Beobachtungen unserer Umwelt sich nicht in diesen Dimensionen abspielen. Erschwerend kommt noch hinzu, dass selbst anerkannte Lehrbücher nicht alle Effekte auflisten, da dieses Gebiet noch relativ jung ist, und viele dieser Effekte nur mit Hilfe von neuesten numerischen Methoden und leistungsfähigen Computern zugänglich sind.

Daher soll an dieser Stelle auf die sonst übliche Vielfalt von aktuellen Anmeldungen verzichtet, und stellvertretend nur auf eine Anmeldung eingegangen werden. Dafür wird versucht, exemplarisch die nanophotonischen Effekte, die den Kern der Erfindung ausmachen, allgemeinverständlich zu erklären.

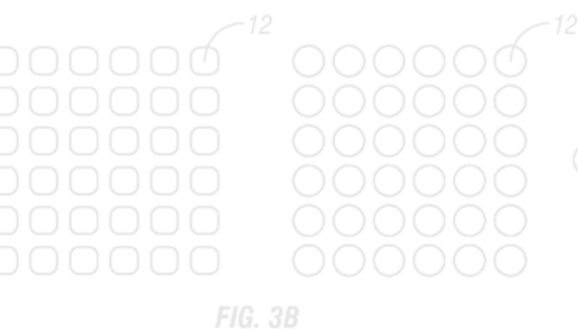


FIG. 3B



FIG. 4A

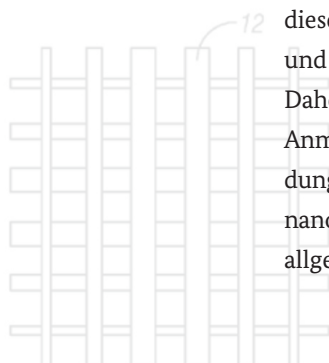


FIG. 4B

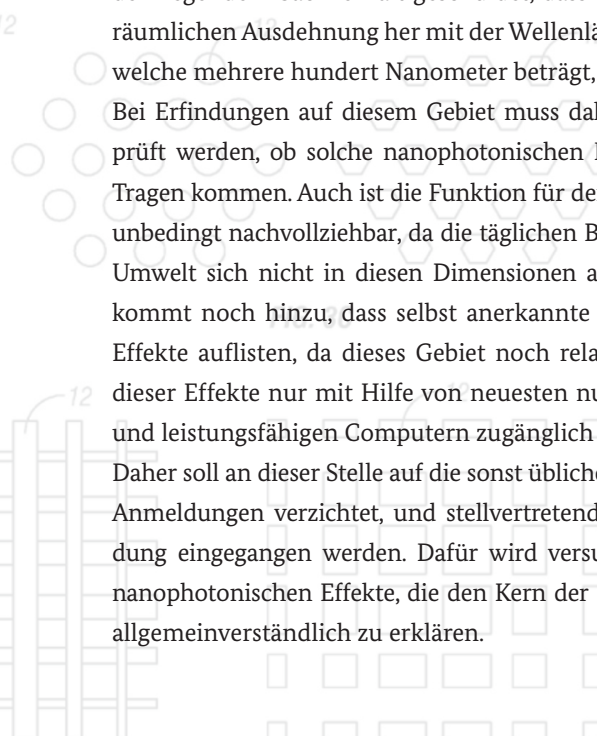


FIG. 4C

benötigt. Dies lehrt einerseits, dass für die Realisierung von effizienten Leuchtdioden hoch effiziente und diffus streuende Reflektoren benötigt werden, dies andererseits offenbar weder durch Streukörper aus Nanopartikeln alleine noch durch einen klassischen Spiegel zu bewerkstelligen ist.

Im Gegensatz dazu soll das Reflexionselement der Figur 1 eine vergleichbare Reflektivität ohne zusätzlichen metallischen Spiegel erreichen.

Auch wird für den bekannten Reflektor ein hoher Brechungsindex-Unterschied zwischen den Streupartikeln und dem umgebenden Material gefordert. Hierzu wird auch die Möglichkeit, die Brechzahl durch mit Luft gefüllte Poren mit Ausdehnungen kleiner als die Wellenlänge herabzusetzen, erwähnt.

Zusätzlich wird die Größe der Nano-Streupartikel mit 50 bis 1000 nm spezifiziert. Dies umfasst explizit auch den in Figur 1 aus der zu prüfenden Erfindung genannten Bereich von 100 nm bis 200 nm.

Zusammenfassend können wir festhalten, dass die eingangs genannte Erfindung eine Verbesserung der technischen Eigenschaften anstrebt, sich jedoch auf den ersten Blick nicht deutlich vom Stand der Technik abzuheben scheint. Vielmehr werden grobe Spezifikationen nun genauer definiert.

Die technische Lösung der Erfindung schreibt nun anstatt der Verwendung von Nano-Streupartikeln mit gutem Brechungsindexkontrast die Anwendung von Reflexions-Körpern mit Durchmessern von 100 nm bis 200 nm, und einem Brechungsindex-Unterschied größer 1, sowie kleinen Poren von 10 nm bis 30 nm vor. In einem solchen Fall muss geprüft werden, ob eine sogenannte „Auswählerfindung“ vorliegt.

Die formalen Kriterien (genaue, viel engere Spezifikation der Parameter) sind hier erfüllt. Zusätzlich muss aber die technische Innovation auch kausal von diesen engen Parametern abhängen, sprich es stellt sich die Frage ob hier nanophotonische Effekte einen technisch überlegenen Reflektor ermöglichen.

4 Nanophotonische Effekte

Um solche Effekte zu verstehen, empfiehlt sich zunächst der Blick in ein gutes Lehrbuch zu den Grund-

lagen der Optik [1]. Dort werden in Abhängigkeit von den Abmessungen der optischen Körper im Vergleich zur Wellenlänge grob drei Bereiche umrissen:

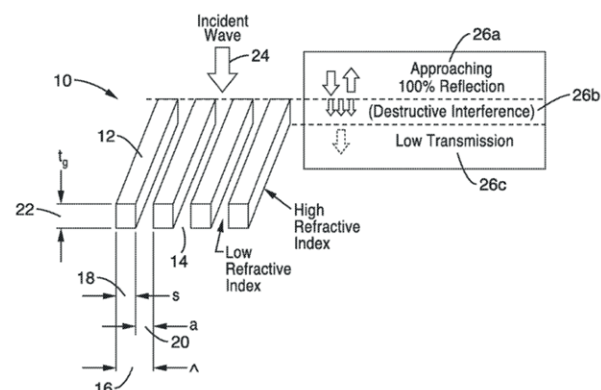
- Bei Körpern größer als die Wellenlänge des einfallenden Lichts treten klassische optische Phänomene wie Brechung, Beugung und Reflektion an den Grenzflächen auf.
- Bei Körpern kleiner als die Wellenlänge treten Streueffekte auf.
- Und bei Körpern sehr viel kleiner als die Wellenlänge, wird das Licht nicht mehr durch die Grenzflächen des Körpers beeinflusst, und verhält sich wie in einem homogenen Medium mit einem effektiven Brechungsindex, der eine Mischung aus den verschiedenen Materialeigenschaften darstellt.

Alle diese drei bekannten Effekte werden bei dem in der in Figur 2 beschriebenen Reflexionselement genutzt.

Einerseits die Reflexion an der Spiegelgrenzfläche mit relativ großer Ausdehnung, andererseits die Streuung an den Nanopartikeln, und schließlich die Herabsetzung des effektiven Brechungsindex durch eingeschlossene Luftporen.

Allerdings erschließt sich daraus noch nicht die verbesserte Funktion des Reflexionselements aus Figur 1. Hier muss man auf wissenschaftliche Publikationen der letzten Jahre [2 - 4] zurückgreifen.

Dort wird nämlich ein weiterer Bereich mit sehr interessanten Effekten beschrieben: Wenn die Strukturen in etwa der Größenordnung der Wellenlänge entsprechen, kann fundamental anderes Verhalten auftreten.



Figur 3: Gitter mit hohem Brechungsindex-Kontrast (aus WO 2010 / 138 524 A2).

Betrachten wir nun obiges Gitter mit Lichteinfall von oben. Eine elektromagnetische Welle erreicht die obere Grenzfläche des Gitters. Dieses Gitter hat jedoch kleinere Ausdehnungen als die Wellenlänge des Lichts im Medium mit niedrigem Brechungsindex. Somit kann auch der für die Gitterbeugung maßgebliche Gangunterschied niemals die Wellenlänge erreichen. Damit tritt keine Gitterbeugung auf, sprich nur Reflexion und Transmission „nullter Ordnung“ in Richtung des einfallenden Lichtes ist denkbar.

Nun werden durch das elektromagnetische Wechselfeld an der Oberfläche des Gitters elektromagnetische Schwingungen im Gitter angeregt.

Soll eine solche Welle ausbreitungsfähig sein, muss sie einer gewissen, sogenannten „Mode“ entsprechen. Dies ist vergleichbar mit dem Licht, das in optischen Glasfasern übertragen werden kann. Bei Einmoden-Glasfasern ist nur Licht einer einzigen Mode ausbreitungsfähig. Andere Moden klingen ab, oder werden gestreut. Die Anregung einer ausbreitungsfähigen Mode geschieht umso effizienter, je ähnlicher sich die Moden an der Grenzfläche sind, sprich inwieweit sich die Felder phasenrichtig überlappen.

Bei hohem Brechungsindex-Kontrast ist die Wellenlänge in den Barren des Gitters wesentlich kleiner als im umgebenden Medium. So kann sich, bei geeigneter Wahl der Geometrie, Licht sowohl in den Barren, als auch im Luftspalt dazwischen durch die Dicke des Gitters hindurch ausbreiten.

Was eine „geeignete Geometrie“ ist, lässt sich nur durch numerische Computer-Simulationen bestimmen. Eine einfache Formel, wie die Gittergleichung für größere Gitter, existiert hier nicht.

Nun breiten sich die zwei Moden aus, eine im Barren, und einer in der Luft dazwischen in Richtung des eingefallenen Lichtes [Figur 3, (24)]. Da jedoch ein großer Brechungsindex-Unterschied zwischen dem Barren und der Luft dazwischen besteht, kommt das Licht im Barren „später“ an der Rückseite an; es entsteht ein Phasenversatz.

Bei geeigneter Gitterdicke ist die Phase der beiden Wellen genau gegenläufig. Soll sich nun das Licht weiter in die gleiche Richtung ausbreiten, muss mit diesen genau phasenversetzten „Teilwellen“ wieder eine „große“ Lichtwelle im Ausgangsmedium angeregt werden. „Große“ Lichtwelle im Ausgangsmedium deshalb, weil aufgrund

des niedrigen Brechungsindex die Wellenlänge außerhalb wesentlich größer ausfällt, z.B. um den Faktor 3 bei einem Gitter aus Halbleitermaterial in Luft.

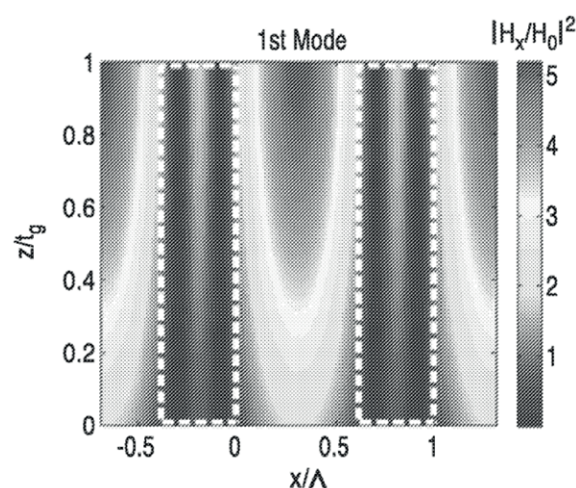
Wie oben beschrieben, erfolgt die Anregung einer ausbreitungsfähigen Mode umso effizienter, je mehr sich die Felder von anregender und angeregter Mode phasenrichtig überlappen.

Nun ist aber die anregende Mode in zwei Teilmoden „zerfallen“, die am Ende des Gitters gegenphasig schwingen. Damit ist die effektive Anregung einer ausbreitungsfähigen Mode an der Rückseite des Gitters nahezu Null. Somit erfolgt statt einer Transmission eine Reflexion der elektromagnetischen Energie.

Eine dünne, nanostrukturierte Membran aus verlustlosen Dielektrika kann also Reflexionsraten wie ein metallischer Spiegel und darüber erreichen!

Dies wäre, ausgehend vom Wissen der klassischen Lehrbücher, so nicht zu erwarten. Damit ist klar, dass nanophotonische Effekte neuartige technische Lösungen ermöglichen.

Zur Spezifikation geeigneter Geometrien für derartige Anwendungen werden numerische Verfahren verwendet.



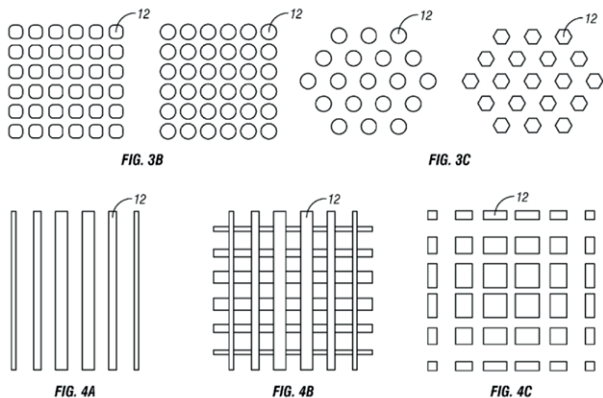
Figur 4: Feldverteilung in einem Gitter mit hohem Brechungsindex-Kontrast (aus WO 2011 / 106 551 A2).

In Figur 4 sehen wir einen Zwischenschritt einer Computer-Simulation zur Dimensionierung solcher Gitter. Die Feldverteilung im Gitter ist angegeben.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass für Gitter unendlicher Ausdehnung aus Symmetriegründen nur ein halber Barren und ein halber Bereich dazwischen berechnet werden muss [2]. Dies erspart in hohem Maße

Rechenzeit. Andererseits sind Randeffekte nicht in jedem Fall zu vernachlässigen [3].

Zusätzlich treten die eben mit der notwendigen Ausführlichkeit beschriebenen Effekte nicht nur in Gittern, sondern auch bei anderen Strukturen wie Nanopartikel [4] auf.



Figur 5: Strukturen mit hohem Brechungsindex-Kontrast (aus US 2014 / 0 353 583 A1).

Figur 5 zeigt eine Auswahl von alternativen Geometrien, die, passende Dimensionierung vorausgesetzt, ähnliche Effekte verursachen können.

Zusammenfassend können wir also feststellen:

- Im Bereich um die Wellenlänge des einfallenden Lichts lassen sich hoch funktionale nanophotonische Elemente realisieren.
- Ein hoher Brechungsindex-Kontrast, sprich ein großer Unterschied des Brechungs-indexes der funktionalen Elemente zu ihrer Umgebung, ermöglicht erst die Funktion.
- Die genauen Abmessungen der Elemente sind sehr kritisch und wellenlängenabhängig.

Insbesondere sind auch kugelförmige Körper als derartige, funktionale Elemente geeignet [4].

Nun können wir die Ausgangsfrage, ob eine sogenannte „Auswählerfindung“ vorliegt, besser beurteilen.

Die Spezifikation, dass die Streupartikel einen Durchmesser von 100 nm bis 200 nm haben sollen, deckt sich mit der Forderung an die Ausdehnung der eben diskutierten Elemente, die optische Resonanzen zeigen. So

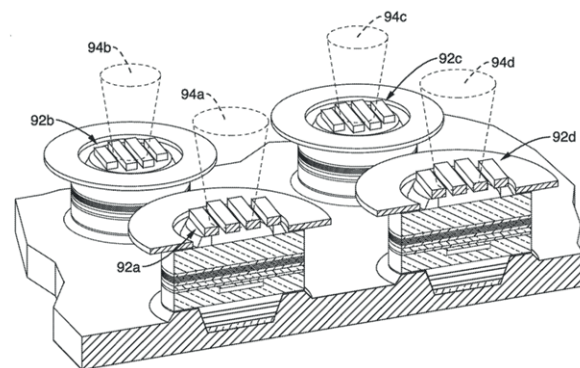
ergeben sich in einer Simulation [4] starke Resonanzen in Sphären mit einem rechnerischen Durchmesser von 196 nm bei einer Anregungswellenlänge von 532 nm, was in dem von der Erfindung genannten Bereich liegt. Somit ist davon auszugehen, dass die spezielle Auswahl der Parameter die hohen Reflektivitäten des Reflexions-elements aus Figur 1 erst ermöglicht.

Die Kriterien einer Auswählerfindung auf dem Gebiet der Nanophotonik liegen also vor.

5 Technische Innovation durch Nanophotonik

Trotz des Verzichts auf die sonst übliche Vielfalt von aktuellen Anmeldungen, sollen an dieser Stelle ein paar exemplarische Anwendungen der obig beschriebenen nanophotonischen Effekte diskutiert werden, um deren breite Anwendungsmöglichkeiten zu unterstreichen.

Ein Gitter wie in Figur 3 beschrieben, das Reflektivitäten von 99 % ermöglicht, kann beispielsweise als Spiegel in vertikal emittierenden Laserdioden (VCSEL) eingesetzt werden, die solch hohe Reflektivitäten benötigen.

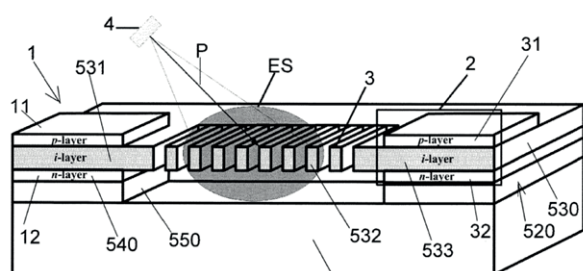


Figur 6: Gitter mit hohem Brechungsindex-Kontrast als Auskoppel-Spiegel von vertikal emittierenden Laserdioden (aus WO 2010 / 138 524 A2).

Dies hat zum einen den Vorteil, dass sehr dicke und potenziell teuer herzustellende Bragg-Reflektoren durch eine einzige dünne Membran ersetzt werden können. Andererseits werden auch komplett neue technische Lösungen, wie beispielsweise in Figur 6 gezeigt, ermöglicht. Hier wird ein Array von VCSEL-Laserdioden hergestellt. Die Schichten sind herstellungsbedingt alle gleich dick. Daher wären die Emissionswellenlängen alle gleich. Sollen in der optischen Übertragungstechnik jedoch mehrere Datenkanäle über einen Lichtwellenleiter

übertragen werden, sind verschiedene Wellenlängen von Nöten. Dieses Übertragungsverfahren wird mit „wavelength-division-multiplexing“ (WDM) bezeichnet. Da die Funktion dieser Gitter jedoch sehr stark von ihrer Geometrie abhängt, können allein durch die unterschiedliche Strukturierung der gleichen Schicht Laser mit verschiedenen Emissionswellenlängen hergestellt werden.

Die nanophotonischen Effekte beschränken sich jedoch nicht nur auf die reine Grundfunktion wie eine hohe Reflektivität. Wie bereits erwähnt, treten starke, resonanzartige Feldüberhöhungen auf. Auch ist die Funktion sehr stark vom Brechungsindex-Kontrast abhängig. Zusätzlich ist es interessant zu überprüfen, was beispielsweise bei Gittern mit endlichen Ausdehnungen passiert [3]. Dies ist zwar mathematisch aufwändiger zu prüfen, ermöglicht aber weitere Anwendungen.



Figur 7: Sensor mit nanophotonischem Gitter (aus US 2016 / 0 161 331 A1).

Als Beispiel sei hier der Sensor aus Figur 7 genannt. Das Reflexions-Gitter wird hierbei mit einem externen Laser bestrahlt. Neben der fehlenden Ausbreitungsmöglichkeit und der daher auftretenden Reflexion ergeben sich sehr starke Feldüberhöhungen in und um das Gitter. Wie eben erwähnt ist die Funktion stark vom Brechungsindex-Unterschied zwischen dem Gitter und dem umgebenden Medium abhängig. Daher kann diese Anordnung als sehr sensibler (Feldüberhöhung) Sensor (Brechungsindex-Kontrast Abhängigkeit) eingesetzt werden. Zusätzlich wird hier noch ein weiterer Effekt genutzt. Bei Gittern endlicher Ausdehnung kann, eine geeignete Geometrie vorausgesetzt, ein Teil des Lichtes auch um 90° umgelenkt und in das das Gitter umgebende Plättchen eingekoppelt werden. Beim Sensor der Figur 7 sind diese Randbereiche als Photodetektor ausgebildet. Daher wird, in starker Abhängigkeit vom eingebrachten

Stoff (ES), ein Photostrom detektiert. Somit lässt sich ein sehr kompakter und empfindlicher Sensor verwirklichen.

Nun zurück zur Anmeldung aus Figur 1. Mit diesem Reflektor sind höhere Reflektivitäten und geringere Verluste als bei Streukörpern, die nur aus weißem Titandioxid-Pulver bestehen, zu erwarten.

Nun stellt sich die Frage nach Neuheit und Erfindergeist. Ist im Hinblick auf den hier diskutierten Stand der Technik nicht irgendwie schon alles bekannt?

Dazu sei folgendes angemerkt: Die Aufgabe der Technik ist es nicht, neue Effekte zu entdecken, sondern diese gewinnbringend für die Gesellschaft zur Anwendung zu bringen.

Auch verbietet sich bei der Bewertung des Erfindergeistes eine rückschauende Betrachtung.

Da hier das Prüfungsverfahren noch nicht abgeschlossen ist, wird an dieser Stelle jedoch bewusst auf eine abschließende Bewertung verzichtet.

Nichts desto trotz hofft der Autor, dem geschätzten Leser den Sachverhalt nahegebracht zu haben.

Nicht-Patentliteratur

- [1] BORN, Max; WOLF, Emil. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light, 7th ed. Cambridge U. Press, Cambridge, UK, 1999.
- [2] CHANG-HASNAIN, Connie J.; YANG, Weijian. High-contrast gratings for integrated optoelectronics. *Advances in Optics and Photonics*, 2012, 4. Jg., Nr. 3, S. 379-440.
- [3] LIU, Anjin; HOFMANN, Werner; BIMBERG, Dieter. Two dimensional analysis of finite size high-contrast gratings for applications in VCSELs. *Optics express*, 2014, 22. Jg., Nr. 10, S. 11804-11811.
- [4] TRIBELSKY, Michael I.; MIROSHNICHENKO, Andrey E. Giant in-particle field concentration and Fano resonances at light scattering by high-refractive-index particles. *Physical Review A*, 2016, 93. Jg., Nr. 5, S. 053837.

SRAM – ein kleiner Speicher mit viel Inhalt und von großer Bedeutung

Sibina Šukman-Prähofer, Patentabteilung 1.33

Über die Autorin

Sibina Šukman-Prähofer studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität München. Von 2000 bis 2009 war sie bei Infineon Technologies und Qimonda in der DRAM Speicher Entwicklung tätig und von 2011 bis 2014 bei Intel Mobile beschäftigt.

Seit 2014 ist Frau Šukman-Prähofer Patentprüferin im DPMA mit Prüfgebieten im Bereich der SRAM Speicher, organischen LEDs und Halbleiterverfahren.

Was wäre der schnellste Intel-Core-Prozessor eines Computers ohne seinen Arbeitsspeicher?! Dabei versorgt der Arbeitsspeicher im Schreib- und Lesemodus den Prozessor mit Daten, so wie das Herz das Gehirn mit Blut versorgt. Der folgende Artikel soll die Funktionsweise aufzeigen und die Designherausforderungen, die sich in diesem Zusammenhang dabei stellen, thematisieren.

1 Einleitung

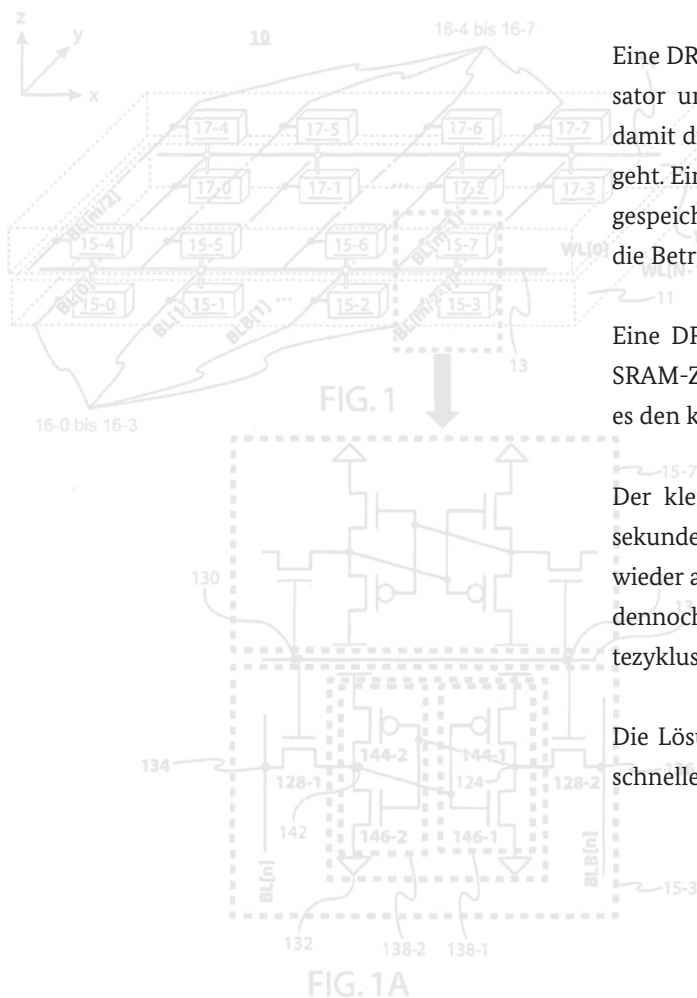
Der Arbeitsspeicher, auch RAM (englisch: „Random Access Memory“) genannt, wird in DRAM (englisch: „Dynamic Random Access Memory“) und SRAM (englisch: „Static Random Access Memory“) unterteilt. Diese zwei Speichergruppen, der DRAM und der SRAM sind flüchtige (englisch: „volatile“) Speicher, deren Informationen nach der Abschaltung der Betriebsspannung verloren gehen.

Eine DRAM-Zelle besteht aus einem Transistor und einem Kondensator und benötigt periodisches Auffrischen (englisch: „refresh“), damit die gespeicherte Information im Kondensator nicht verloren geht. Eine SRAM-Zelle dagegen besteht aus Flipflops und behält die gespeicherte Information ohne wiederholtes Auffrischen solange die Betriebsspannung angelegt ist.

Eine DRAM-Zelle ist deutlich kleiner und somit billiger als eine SRAM-Zelle. Wieso also überhaupt einen SRAM verwenden, wenn es den kleinen, billigen DRAM gibt?

Der kleine Kondensator der DRAM-Zelle benötigt einige Nanosekunden, um die Ladung in den Kondensator zu schreiben und dann wieder auszulesen. Der Prozessor, als Koordinator dieses Prozesses ist dennoch viel schneller. Für den schnellen Prozessor wurde ein Wartezyklus eingebaut mit dem er auf den langsamen Speicher wartet.

Die Lösung für den Wartezyklus erfolgt durch den Cache – einen schnellen Zwischenspeicher aus SRAM-Zellen!



Der SRAM wird im Cache, diesem kleinen schnellen Speicher eingesetzt, der als eine Art Puffer zwischen dem Arbeitsspeicher (DRAM) und dem Prozessor dient.

Wenn der Prozessor Daten braucht, die er nicht im Cache findet, werden die Daten vom Arbeitsspeicher (DRAM) angefordert und an den Prozessor übermittelt, sowie zusätzlich auch in eine freie Cacheline eingelesen. Während der Prozessor weiter arbeitet, liest eine Elektronik Daten vom Arbeitsspeicher und füllt damit die Cacheline auf. Wenn der Prozessor die nächsten Daten anfordert, überprüft die Elektronik zuerst, ob die Daten schon in einer Cacheline sind und wenn dies der Fall ist kann der Prozessor direkt auf den schnellen SRAM-Speicher zugreifen. [1]

In diesem Artikel wird die SRAM Funktionsweise im Detail beschrieben.

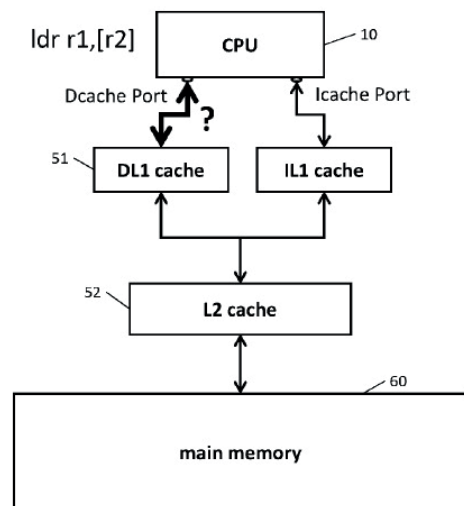
2 Cache und Funktionsweise einer SRAM-Zelle

2.1 Cache

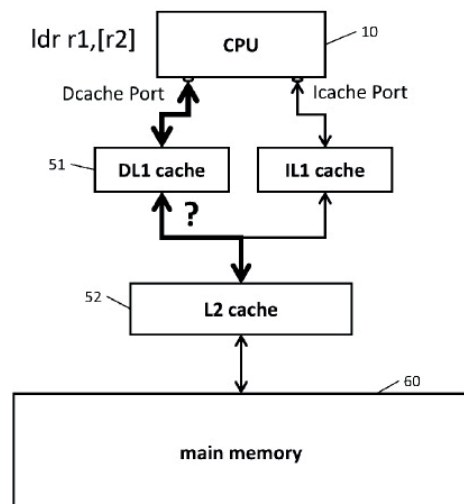
Cachebasierte Speicherstrukturen sind sehr hilfreich, um die Geschwindigkeit eines Anwendungsprogramms zu erhöhen, haben aber auch Nachteile. Cache-Speicher passen nicht immer in eingebettete Systeme, die in einem technischen Kontext eingebunden sind, da sie die Systemgröße und die Energiekosten erhöhen.

Die Cache-Speicher werden in Ebenen (englisch: „levels“) eingeteilt. Der Cache der Ebene 1 (L1) ist extrem schnell, klein und ist normalerweise in den Prozessor (CPU) eingebettet. Er umfasst einen Datenspeicher (DL1) und einen Befehlsspeicher (IL1). Der Cache der Ebene 2 (L2) ist größer als der Cache-L1 und kann sich auf dem Prozessor befinden. Der Cache der Ebene 3 (L3) ist ein spezialisierter Speicher außerhalb des Prozessors, der die Leistung von Cache-L1 und Cache-L2 verbessert. Er kann langsamer als Cache-L1 und Cache-L2 sein, arbeitet aber trotzdem mit der doppelten Geschwindigkeit eines DRAMs.

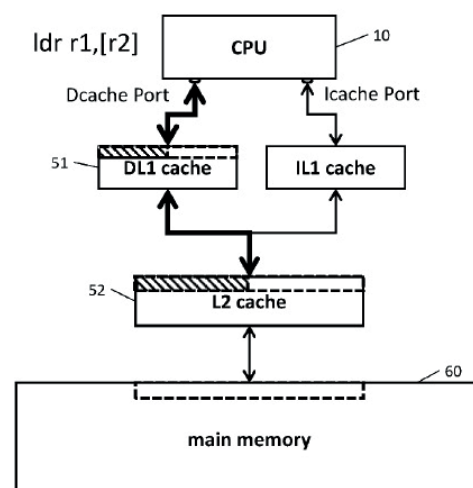
In der Offenlegungsschrift **US 2018/ 0 101 483 A1** ist die Arbeitsweise eines Cache-Speichers veranschaulicht.



Figur 1: Cache-L1 wird angesprochen (aus US 2018/ 0 101 483 A1)



Figur 2: Cache-L2 wird angesprochen (aus US 2018/ 0 101 483 A1)



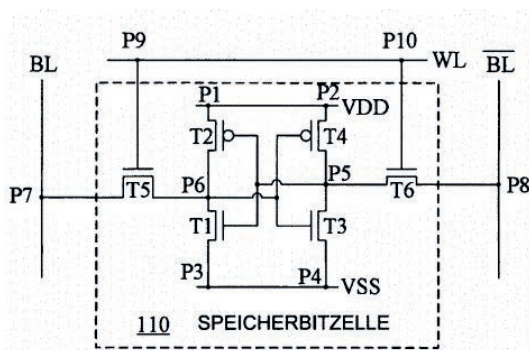
Figur 3: main memory (DRAM) wird angesprochen (aus US 2018/ 0 101 483 A1)

Bei der Suche nach einem benötigten Datenwort wird zunächst die Cache-Ebene L1 überprüft, vergleiche Figur 1. Wird das Wort nicht gefunden, liegt ein L1-Cache-Miss vor. Ein kompletter Datenblock (das heißt mehrere Wörter) wird dann aus der nächsten Cache-Ebene geholt. Figur 2 zeigt, was bei der Suche nach dem benötigten L1-Block in der zweiten Cache-Ebene geschieht. Wenn der Block nicht vorhanden ist, kommt es erneut zu einem L2-Cache-Miss. Ein kompletter L2-Block (mehrere Wörter) wird dann aus der nächsten Ebene, das heißt dem Hauptspeicher (DRAM), geholt. Figur 3 zeigt schließlich, wie zuerst der L2-Fehlschlag und dann der L1-Fehlschlag gelöst wird und wie das Wort schließlich geliefert wird.

2.2 SRAM-Zelle

Als Speicherbausteine benutzt der SRAM Flipflops. Die übliche SRAM-Zelle besteht aus sechs Transistoren und wird 6T-SRAM-Zelle genannt. In diesem Abschnitt wird kurz die Funktionsweise beim Auslesen und Beschreiben einer SRAM-Zelle geschildert.

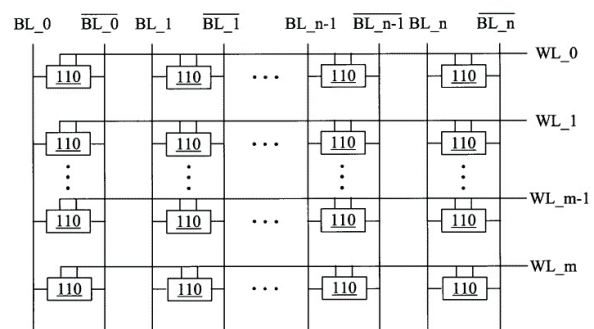
Die Offenlegungsschrift **DE 10 2016 114 714 A1** zeigt eine 6T-SRAM-Zelle, vergleiche Figur 4. Dabei umfasst die Zelle zwei sogenannte Pull-Up-Transistoren (T2, T4), die PMOS-Transistoren (p-Kanal-MOSFET) sind, zwei Pull-Down-Transistoren (T1, T3), die NMOS-Transistoren (n-Kanal-MOSFET) sind und noch zwei Pass-Gate-Transistoren (T5, T6), die ebenfalls NMOS-Transistoren sind. Der Pull-Up-Transistor bildet mit dem Pull-Down-Transistor einen Inverter, so dass die SRAM-Zelle aus zwei gegeneinander verschalteten Invertern besteht, die über die Pass-Gate-Transistoren die Information an die Wortleitung (WL) schicken.



Figur 4: SRAM-Zelle (aus DE 10 2016 114 714 A1)

Dabei werden die Daten von den Bitleitungen getragen und die Wortleitungen sind fürs Adressieren der Zelle zuständig. Über die Bitleitungen erfolgt der Lese- und Schreibzugriff auf die SRAM-Zelle.

Die Speicherzellen werden in einer zweidimensionalen Matrix als Speicherzellenfeld (SRAM-Array) aufgebaut, wie es in Figur 5 zu sehen ist. Dabei ist mit dem Bezugszeichen 110 eine SRAM-Zelle gekennzeichnet, die mit den Bitleitungen BL₀ bis BL_n und $\overline{BL}_0$ bis $\overline{BL}_n$ wie auch mit der Wortleitung WL₀ bis WL_m verbunden ist.



Figur 5: SRAM-Array (aus DE 10 2016 114 714 A1)

2.2.1 Standby, Lesen, Schreiben – drei Zustände einer SRAM-Zelle

Standby

Wenn die Wortleitung deaktiviert ist beziehungsweise ihrer Zustand einer „0“ entspricht, so sind die Pass-Gate-Transistoren (T5, T6) geöffnet und der bis dahin gespeicherte Zustand in den Transistoren T1 bis T4 bleibt erhalten. Es besteht in diesem Fall keine Verbindung zu den Bitleitungen.

Lesen

Um den Lesevorgang zu starten soll die Wortleitung WL auf LOW sein, um das Bitleitungspaar BL und $\overline{BL}$ auf den Wert der Versorgungsspannung VDD aufzuladen. Die Transistoren T5 und T6 sind dabei deaktiviert und es besteht keine Verbindung zu Bitleitung. Nehmen wir an, dass im Punkt P6 der Wert „0“ gespeichert ist.

Das Gate des Transistors T3 ist ebenfalls auf „0“ und es besteht keine Verbindung zwischen Source und Drain des Transistors T3. Auf dem Gate des Transistors T2 ist der Wert „1“ (wenn im Punkt P6 „0“ ist, dann ist auf dem Punkt P5 eine „1“ durch die zwei entgegengesetzt verschalteten Inverter). Die Wortleitung wird auf das VDD Potenzial gezogen und das Aufladen des Bitleitungspaares BL und $\overline{BL}$ beendet.

Werte von P6 und P5 werden auf die Bitleitungen übertragen, das heißt Bitleitung BL bleibt entladen über T1 und T5 und $\overline{BL}$ wird über T4 und T6 auf logisch „1“ geladen.

Wenn der Speicherzustand vorher logisch „1“ gewesen wäre (also „1“ im Punkt P6), wäre das Verhalten entsprechend entgegengesetzt, BL wird „1“ und $\overline{BL}$ wird „0“. [2].

Schreiben

Das Schreiben beginnt damit, dass der zu schreibende Wert auf die Bitleitungen gelegt wird. Um ein Bit zu speichern wird eine der Bitleitungen auf Masse und die andere auf die Versorgungsspannung VDD gelegt (zum Beispiel BL=1 und $\overline{BL}$ =0).

In diesem Beispiel hat die Bitleitung BL den Wert logisch „1“ und die Wortleitung wird aktiviert (ist auf HIGH). Dabei ist der Transistor T6 leitend und würde den Wert auf logisch „1“ durchschalten, aber durch den stärker treibenden Transistor T3 wird dieses Potential doch auf Masse gezogen (somit ist dann $\overline{BL}$ =0).

Auf der linken Seite der SRAM-Zelle treibt der Transistor T5 durch seine Dimensionierung stärker als T2, um zu verhindern, dass das Potential auf den Wert der Versorgungsspannung gezogen wird.

Das Schreiben funktioniert, weil die relativ schwachen Transistoren, die die Inverter bilden, durch die relativ starken Bitleitungen überschrieben werden können. Eine entsprechende Dimensionierung der Transistoren ist bei der Herstellung notwendig, damit das Überschreiben funktioniert. [3]

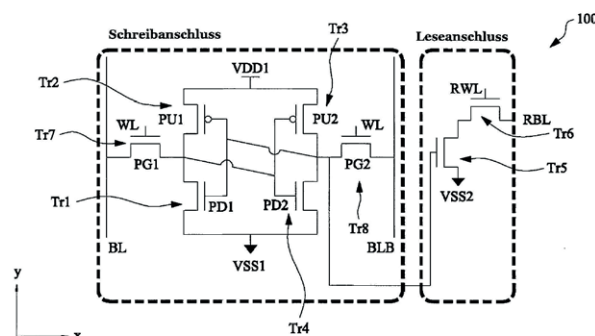
3 SRAM-Zelle in verschiedenen Technologien

Die übliche SRAM-Zelle ist mit sechs Transistoren aufgebaut und wird 6T-SRAM-Zelle genannt, siehe Figur 4.

8T-SRAM-Zelle

Im Verlauf der integrierten Schaltungen (englisch: „integrated circuits-IC“) hat sich die Funktionsdichte erhöht und die Komponenten sind dabei kleiner geworden. Der Verkleinerungsprozess bringt die Komplexität und neue Herausforderungen mit sich.

Die 6T-SRAM-Zelle leidet dabei unter Stabilitätsproblemen während Lese- und Schreibzugriffs und ist anfällig für Rauschen. Um dieses Problem zu beheben schlägt die Offenlegungsschrift DE 10 2017 117 936 A1 einen speziellen Aufbau, bestehend aus acht Transistoren, also eine 8T-SRAM-Zelle vor.



Figur 6: 8T-SRAM-Zelle (aus DE 10 2017 117 936 A1)

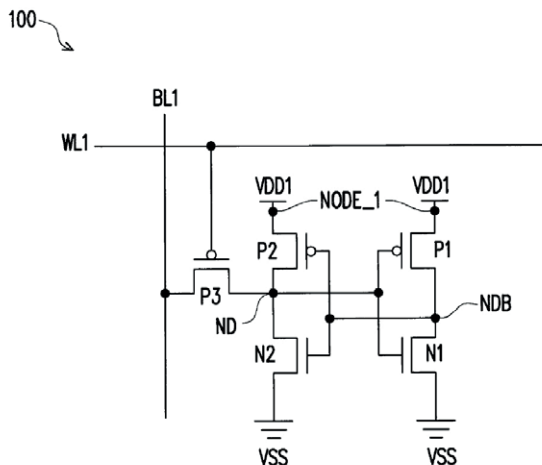
In Figur 6 umfasst der Leseanschluss zwei Transistoren Tr5 und Tr6. Dabei ist der Gate-Anschluss von Tr5 mit den Gate-Anschlüssen von PU1 und PD1 verbunden. Einer der beiden S/D-Anschlüsse von Tr5 ist mit einem niedrigen Potential VSS2 verbunden und der andere ist mit einem der beiden S/D-Anschlüsse von Tr6 verbunden. Der andere S/D-Anschluss von Tr6 ist mit der Lese-Bitleitung RBL (englisch: „read bit line“) verbunden. Der Gate-Anschluss von Tr6 ist mit der Lese-Wortleitung RWL (englisch: „read word line“) verbunden. Da der Leseanschluss von dem Schreibanschluss getrennt ist, weist die 8T-SRAM-Zelle eine bessere Rauschimmunität auf als herkömmliche 6T-SRAM-Zellen.

5T- und 4T-SRAM-Zelle

Der SRAM Speicher wird für den Cache Speicher verwendet. Im Allgemeinen ermöglicht ein größerer Cache-Speicher das Speichern von mehr zuletzt verwendeten Daten auf dem Chip, was zu einem geringeren chipexternen Speicherdatenzugriff führt. Kleinere Speicherzellen ermöglichen dichtere ICs. Daher sind Alternativen zur 6T-SRAM-Zelle wünschenswert.

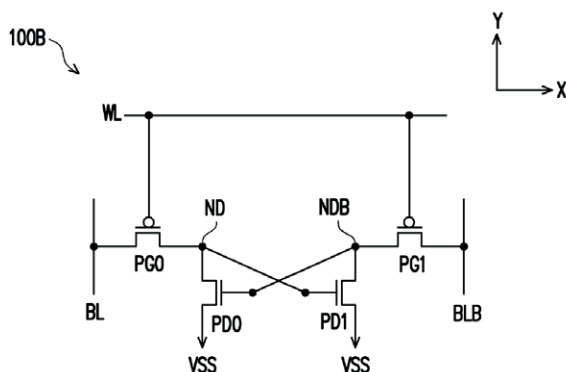
In der Offenlegungsschrift **DE 10 2018 110 356 A1** wird eine 5T-SRAM-Zelle vorgestellt.

In Figur 7 ist eine Speicherzelle eines synchronen Single-port-SRAM mit fünf Transistoren gezeigt.



Figur 7: 5T-SRAM-Zelle (aus DE 10 2018 110 356 A1)

Die 4T-SRAM Zelle ist in der Offenlegungsschrift **DE 10 2019 117 778 A1** beschrieben.



Figur 8: 4T-SRAM-Zelle (aus DE 10 2019 117 778 A1)

Dabei besteht die Speicherzelle aus zwei PMOS Transistoren als Pass-Gate-Transistoren PG0 und PG1 und zwei NMOS-Transistoren in der Funktion der Pull-Down-Transistoren PD0 und PD1. Die Wortleitung WL wird auch als Schreibsteuerleitung bezeichnet, da die PMOS-Transistoren PG0 und PG1 so konfiguriert sind, dass sie von einem Signal auf der Wortleitung WL gesteuert werden, um Daten zwischen den Bitleitungen BL, BLB und den entsprechenden Knoten ND, NDB zu übertragen. Die Bitleitungen BL und BLB wurden als Datenleitung bezeichnet, da die auf den Bitleitungen BL und BLB befindlichen Daten in die entsprechenden Knoten ND und NDB geschrieben und gelesen werden.

Besonderheiten des Layouts

Die Entwicklung integrierter Halbleiterschaltungen bringt mit jeder Generation kleinere und komplexere Schaltungen auf den Markt. Der Verkleinerungsprozess erhöht auch die Komplexität der Verarbeitung von ICs.

Es ist festzustellen, dass die innere SRAM-Zelle in einem SRAM-Zellarray anders arbeitet als eine SRAM-Zelle am Rand desselben. Um das Wannepotential im Wannengebiet zu stabilisieren sind Wannenaufnahmebereiche oder sogenannte WPUs (englisch: „well pick-up area“) realisiert worden.

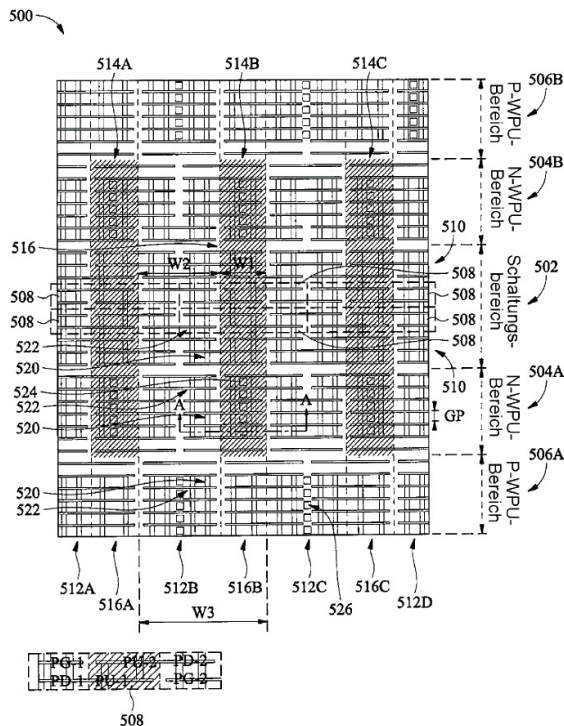
Mit den WPUs werden gleichförmige Ladungsverteilungen im SRAM-Zellarray erreicht und somit eine einheitliche Leistung unter den SRAM-Zellen.

Die n-Wannen und p-Wannen, die mit entgegengesetzten Dotierstoffen dotiert sind, werden abwechselnd in einem Speichermakro angeordnet. In den n-Wannen befinden sich die Pull-Up-Transistoren und in den p-Wannen die Pull-Down- und Pass-Gate-Transistoren.

Entgegengesetzte Dotierstoffe in den Wannen diffundieren durch die Wannenbegrenzungen und verringern somit die Wirkbreiten der entsprechenden Wannen und führen zu einem hohen Wannenwiderstand. Durch den Einsatz der n- und p-Wannen in den WPU-Bereichen

eines SRAM-Makros wird der Wannenaufnahmewiderstand verringert.

Das Beispiel der WPU-Anordnung in einem SRAM-Makro liefert die Offenlegungsschrift **DE 10 2019 130 000 A1**.

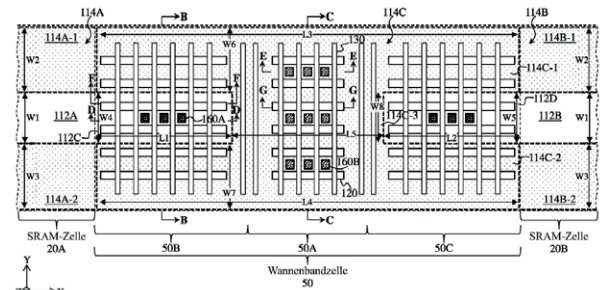


Figur 9: SRAM-Zelle-WellPickUp (aus DE 10 2019 130 000 A1)

Die SRAM-Anordnung 500 weist einen Schaltungsbereich auf. Mit einem p-Wannen-Verbindungsabschnitt erweitert sich die Breite einer p-Wanne 512 in p-WPU-Bereichen 506 von W2 auf W3 ($W3=W1+W2$). Da sämtliche p-Wannen 512 in p-WPU-Bereichen miteinander verbunden sind, können sie auch als Abschnitte einer einzigen größeren p-Wanne betrachtet werden, welche die n-Wannen 514A, 514B, 514C umgibt.

In der Offenlegungsschrift **DE 10 2019 121 626 A1** ist der Einsatz von WPUs in dem SRAM-Makro mit den FinFETs beschrieben. Speicheranordnungen enthalten oft FinFETs in den Speicherzellen, um die Leistung zu steigern. Die Finnen-basierte Wannenbandzellen wurden implementiert, um das Wannenpotential zu stabilisieren, wodurch eine gleichmäßige Ladungsverteilung und somit eine gleichmäßige Leistung zwischen Speicherzellen ermöglicht wird. Eine Verringerung der Finnenbreiten erhöht den Wannen-Pickup-Wider-

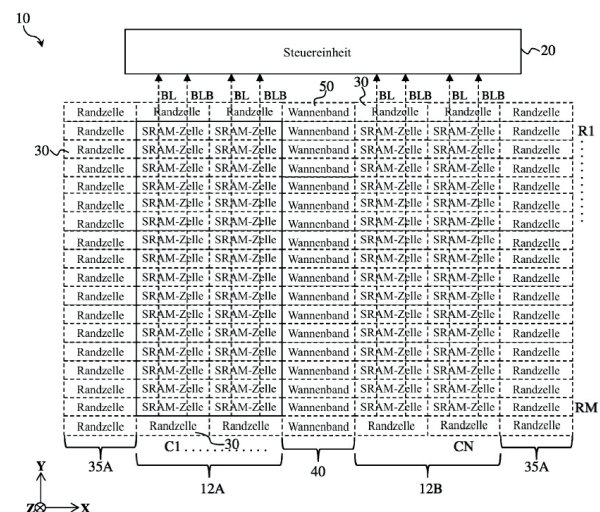
stand. Deshalb schlägt die Offenlegungsschrift **DE 10 2019 121 626 A1** Modifikationen an Finnen-basierten Wannenbandzellen vor, mit denen Verbesserungen der Leistung erzielt werden können.



Figur 10: Wannenbandzelle (aus DE 10 2019 121 626 A1)

Die p-Wannenteilregionen 114C-1, 114C-2 erstrecken sich entlang einer gesamten Länge der Wannenbandzelle 50. Die p-Wannenteilregionen 114C-1, 114C-2 überspannen somit das p-Wannenband 50A, das n-Wannenband 50B und das n-Wannenband 50C.

In Figur 11 ist als Übersicht die Position des Wannenbandzellarrays im SRAM-Zellarray gezeigt.



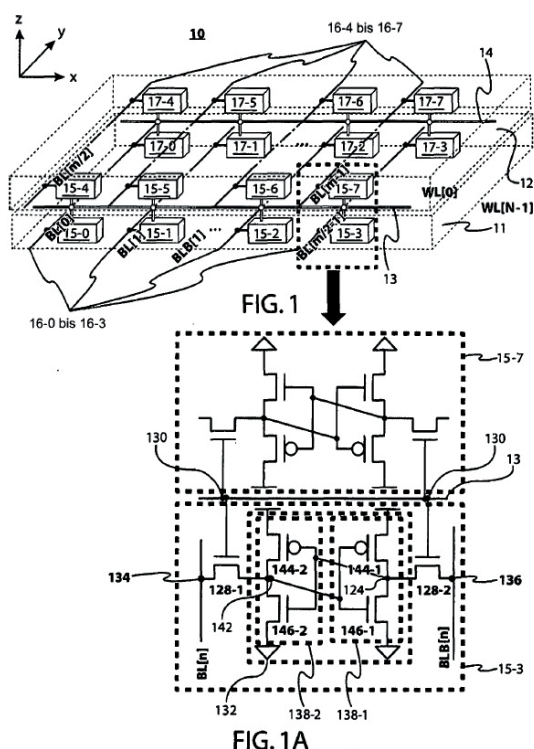
Figur 11: Einsatz der Wannenbandzelle im SRAM-Array (aus DE 10 2019 121 626 A1)

3D-Speicherzelle

Der statische Arbeitsspeicher SRAM umfasst mehrere Zellen, die in Reihen und Spalten angeordnet sind und somit ein Speicher-Array bilden. Die Speicherzellen beinhalten mehrere Transistoren, die für das Auslesen

oder Beschreiben einer Speicherzelle zuständig sind. In zweidimensionalen Speichern wird die Wortleitung länger, wenn sich die Wortbreite erhöht. Mit einer langen Wortleitung erhöht sich der Stromverbrauch und die Gesamtleistungsfähigkeit verschlechtert sich. Um dem entgegenzuwirken werden dreidimensionale Schaltungen eingesetzt.

In der Offenlegungsschrift **DE 10 2014 019 265 A1** ist ein dreidimensionales Speicherzellen-Array beschrieben, vergleiche Figur 12.

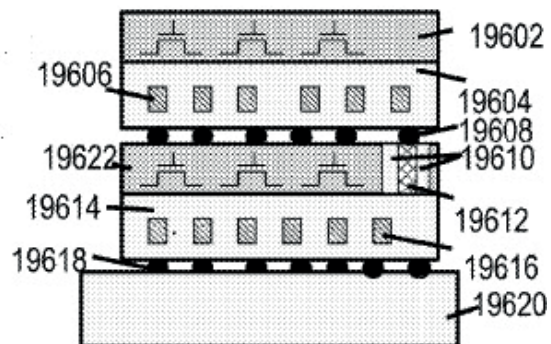


Figur 12: 3D SRAM Array (aus DE 10 2014 019 265 A1)

In Figur 12 sind zwei SRAM-Zellen spiegelsymmetrisch zueinander und haben eine gemeinsame Wortleitung.

Ein weiteres Beispiel für das Stapeln der Speicher zeigt die Offenlegungsschrift **US 2019/ 0 006 222 A1**. Der eingebettete Speicher mit dem Bezugszeichen 19602 befindet sich in einer 3D-Stapelschicht über oder unter einem Logikchip mit dem Bezugszeichen 19622 und kann mit dem Logikchip unter Verwendung der Through-Silicon-Via-Technologie (TSV) elektrisch verbunden werden. Bei der TSV-Technologie können zwei Chips oder Wafer oder Transistorschichten getrennt

voneinander aufgebaut und miteinander verbunden werden. Sowohl der eingebettete SRAM Speicher als auch der Logikchip können mit deren eigenen optimierten Technologie prozessiert werden, wodurch das System potenziell verbessert werden kann.



Figur 13: Dreidimensionaler integrierter Schaltkreis (3D IC) (aus US 2019/ 0 006 222 A1)

Es besteht ein zunehmender Bedarf, die Auswirkungen der Inter-Chip-Verbindungen zu verringern. In der Tat könnten die Verbindungen die Leistung und den Stromverbrauch der ICs dominieren. Eine Lösung zur Verkürzung der Zwischenverbindungen könnte die Verwendung eines 3D-IC sein. Derzeit besteht die einzige bekannte Möglichkeit für allgemeine logische 3D-ICs darin, fertige Bauelemente übereinander zu integrieren, indem TSVs verwendet werden.

4 Ausblick

Die Zukunft liegt in einem schnellen Cache-Speicher mit wenig Verbrauch und kleinen Dimensionen.

Ob dabei die Stapelung-Technologie basiert auf TSV zum Einsatz kommt, wird sich zeigen.

Die neueste AMD Erfindung mit dem Namen 3D V-Cache oder „3D Vertical Cache“ ermöglicht für die Gaming-Szene 15 Prozent höhere Bildwiederholraten bei PC-Spielen mit Full-HD-Auflösung und kommt Ende des Jahres 2021 zum Einsatz [4].

Nicht-Patentliteratur

- [1] <https://www.bernd-leitenberger.de/sram-dram-caches.shtml> (abgerufen am 30.07.2019)
- [2] <https://ti.tuwien.ac.at/ecs/teaching/courses/didevo-ss08/misc/mem> (abgerufen am 30.07.2019)
- [3] WIKIPEDIA:Staticrandom-accessmemory,https://de.wikipedia.org/wiki/Static_random-access_memory (abgerufen am 30.07.2021)
- [4] <https://www.heise.de/news/AMD-kuendigt-Prozessoren-mit-aufgestapeltem-Cache-Chip-an-6059151.html> (abgerufen am 02.08.2021)

Spuren der Gravitationswellenforschung in der Patentliteratur

Dr. Nina Tetzlaff, Patentabteilung 1.56

Über die Autorin

Dr. Nina Tetzlaff studierte an der Friedrich-Schiller-Universität Jena Physik und schloss 2013 mit Promotion ab. 2009 bis 2014 war sie Mitarbeiterin im Sonderforschungsbereich „Gravitationswellen“ (SFB/TR7).

Im März 2014 begann sie ihre Tätigkeit als Patentprüferin im DPMA. Ihr Prüfgebiet umfasst Anlagen zur Verkehrsregelung oder -überwachung für Straßenfahrzeuge.

Zu Beginn des Jahres 2016 wurde die erste Detektion der 100 Jahre zuvor von Albert Einstein vorhergesagten Gravitationswellen bekannt gegeben. Diese langersehnte Messung ist das Ergebnis jahrzehntelanger Forschung, welche die Entwicklung neuer Instrumente und Methoden voraussetzte.

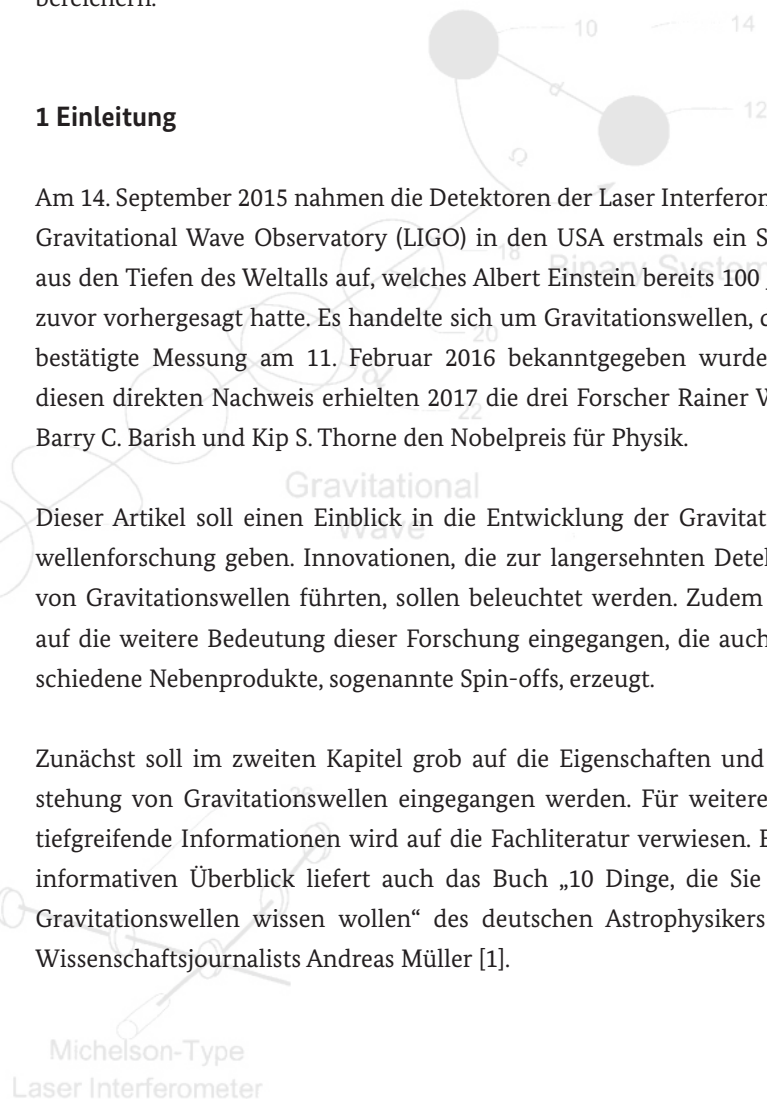
Dieser Artikel gibt einen Einblick in die Gravitationswellenforschung, wobei insbesondere ihre Spuren in der Patentliteratur aufgedeckt werden. Patentanmeldungen im Bereich Gravitationswellenforschung sind selten. Die entsprechenden Publikationen erfolgen überwiegend in wissenschaftlichen Journalen. Einige der entwickelten Geräte und Methoden führten jedoch zu Patenten. Zudem resultiert Gravitationswellenforschung in Nebenprodukten, sogenannten Spin-offs, die unser alltägliches Leben bereichern.

1 Einleitung

Am 14. September 2015 nahmen die Detektoren der Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO) in den USA erstmals ein Signal aus den Tiefen des Weltalls auf, welches Albert Einstein bereits 100 Jahre zuvor vorhergesagt hatte. Es handelte sich um Gravitationswellen, deren bestätigte Messung am 11. Februar 2016 bekanntgegeben wurde. Für diesen direkten Nachweis erhielten 2017 die drei Forscher Rainer Weiss, Barry C. Barish und Kip S. Thorne den Nobelpreis für Physik.

Dieser Artikel soll einen Einblick in die Entwicklung der Gravitationswellenforschung geben. Innovationen, die zur langersehnten Detektion von Gravitationswellen führten, sollen beleuchtet werden. Zudem wird auf die weitere Bedeutung dieser Forschung eingegangen, die auch verschiedene Nebenprodukte, sogenannte Spin-offs, erzeugt.

Zunächst soll im zweiten Kapitel grob auf die Eigenschaften und Entstehung von Gravitationswellen eingegangen werden. Für weitere und tiefgreifende Informationen wird auf die Fachliteratur verwiesen. Einen informativen Überblick liefert auch das Buch „10 Dinge, die Sie über Gravitationswellen wissen wollen“ des deutschen Astrophysikers und Wissenschaftsjournalists Andreas Müller [1].



Nachdem Instrumente zum indirekten und direkten Nachweis von Gravitationswellen in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellt wurden, beschäftigt sich Kapitel 5 mit der Rolle der Gravitationswellenforschung in der Patentliteratur. Schließlich werden in Kapitel 6 Erfindungen, die in einem engen Zusammenhang mit dem Gravitationswellendetektor LIGO stehen, beleuchtet.

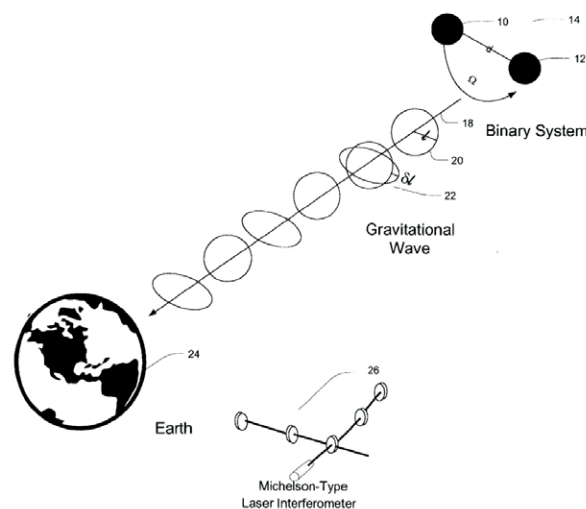
Danach erfolgt eine Vorstellung ausgewählter Spin-offs in Kapitel 7. Der Artikel endet mit einem Ausblick in Kapitel 8.

2 Eigenschaften und Entstehung von Gravitationswellen

Der französische Mathematiker und Physiker Henri Poincaré prägte den Begriff „Gravitationswelle“ bereits im Jahr 1905 [2]. Die von ihm verwendete Lorentztransformation stellt ein Fundament von Einsteins Spezieller Relativitätstheorie (SRT) aus demselben Jahr dar.

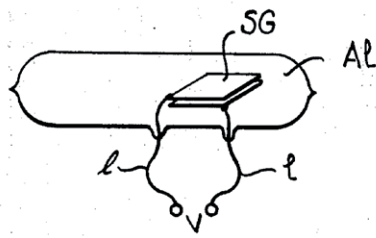
Albert Einstein bewarb sich im Dezember 1901 am Patentamt in Bern, wo er am 23. Juni 1902 zum technischen Experten dritter Klasse bestellt wurde [3]. Während seiner Zeit am Berner Patentamt setzte Einstein seine Arbeit in der theoretischen Physik fort. Im Jahr 1915 stellte er in der Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin seine Allgemeine Relativitätstheorie (ART) vor. Die „Annalen der Physik“ erschienen ein Jahr später. Die Einsteinschen Feldgleichungen bilden das Fundament der Theorie. Mit diesen Gleichungen lassen sich sämtliche Gravitationsphänomene im Universum beschreiben, sei es ein zu Boden fallender Apfel, der Kollaps eines Schwarzen Loches oder die Expansion des Universums. Die ART umfasst das Konzept einer gekrümmten Raumzeit, in der ein Ereignis in Raum und Zeit einen Punkt in der Raumzeit darstellt. Durch die Einsteinschen Feldgleichungen wird die Raumzeit in Beziehung gesetzt zu Massen und Energien. Gravitationswellen resultieren aus der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit. Diese hat zur Folge, dass Änderungen im Gravitationsfeld einer Quelle nicht instantan bei einem entfernten Detektor eintreffen, sondern erst nach einer bestimmten Zeit.

Da keine negativen Massen existieren, gibt es in der ART keine Dipolstrahlung, im Gegensatz zur Elektrodynamik, in der sowohl positive als auch negative Ladungen vorhanden sind. Gravitationswellen werden durch beschleunigte Massen erzeugt, und haben, in Analogie zur Elektrodynamik, Quadrupolcharakter [2]. Aufgrund der Zahlenwerte der Naturkonstanten G (Gravitationskonstante, $G \approx 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$) und c (Lichtgeschwindigkeit, $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) sind Gravitationswellen sehr schwach, denn ihre Strahlungsleistung ist proportional zu $\frac{G}{c^5} \cdot M^2$, wobei M die Masse eines Systems zweier Objekte repräsentiert (die sogenannte reduzierte Masse) [19]. Um den Gravitationswellen-Effekt messen zu können, müssen die beschleunigten Massen demnach enorm groß sein. Figur 1 zeigt anschaulich die Erzeugung von Gravitationswellen durch ein Doppelsystem zweier massereicher Objekte, zum Beispiel von Neutronensternen oder Schwarzen Löchern. Auf der Erde können sie mittels geeigneter Messanordnungen detektiert werden (aus **US 6 509 866 B2**).

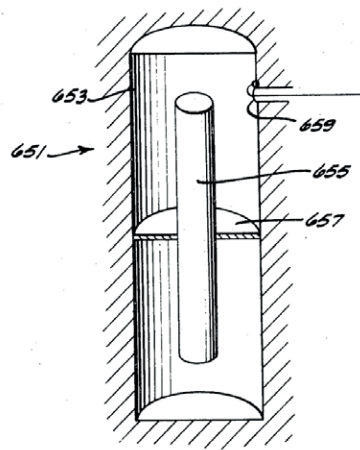


Figur 1: Prinzipskizze zur Erzeugung von Gravitationswellen (Gravitational Wave) durch ein Doppelsystem (Binary System), entnommen aus **US 6 509 866 B2**.

Die ersten Detektoren für Gravitationswellen entwickelte der US-amerikanische Physiker Joseph Weber in den 1960er Jahren. Diese sogenannten „Weber bars“ bestanden aus Aluminiumzylindern als Resonatoren (Testmassen), welche durch Gravitationswellen in Schwingung versetzt werden sollten. Webers Berichte



Figur 2: Gravitationswellendetektor von Joseph Weber aus dem Jahr 1967 gemäß US 3 554 033 A. Innerhalb des Aluminiumzylinders Al befindet sich ein piezoelektrisches Dehnungsmessgerät SG. Vibriert der Zylinder aufgrund von Gravitationswellen, wird eine elektrische Spannung erzeugt.



Figur 3: Schnittansicht eines zylindrischen Detektors zur Messung dynamischer Gravitationsfelder von Joseph Weber aus dem Jahr 1969 gemäß US 3 722 288 A. Im Innern eines supraleitenden Zylinders 653 befindet sich ein zentral mittels eines Dämpfers 657 angeordneter Leiter 655. Durch eine Koppelschleife 659 wird Energie, welche sich im Zylinder ausbreitet, in Form elektromagnetischer Wellen ausgekoppelt.

über die Detektion von Gravitationswellen konnten jedoch nicht bestätigt werden [4-6]. Sein Patent **US 3 554 033 A**, welches er im Jahr 1967 anmeldete, beinhaltet einen entsprechenden Gravitationswellendetektor (Figur 2). Weitere Patentanmeldungen folgten, zum Beispiel **US 3 722 288 A** aus dem Jahr 1969 (Figur 3).

3 Erster experimenteller Nachweis – Hulse-Taylor-Pulsar

Der erste indirekte Nachweis von Gravitationswellen gelang 1974 an der Princeton University in den USA durch Russell Hulse und Joseph Taylor. Die beiden Physiker beobachteten mit dem Arecibo-Observatorium

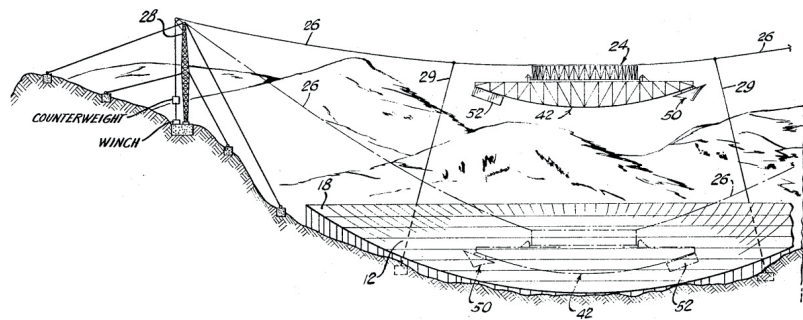
in Puerto Rico über mehrere Jahre den im Sternbild Adler befindlichen Doppelpulsar PSR 1913+16 (auch Hulse-Taylor-Pulsar) und stellten eine Abnahme der Umlaufzeit des Systems fest. Dieses Resultat stimmte hervorragend mit den Vorhersagen durch die ART überein, wodurch erstmals die Existenz von Gravitationswellen indirekt nachgewiesen werden konnte [7]. Hulse und Taylor wurden für ihre Entdeckung 1993 mit dem Nobelpreis für Physik geehrt.

Das Arecibo-Observatorium mit seinem berühmten Radioteleskop, dessen offizieller Name „William-E.-Gordon-Teleskop“ lautet, wurde zu Beginn der 1960er Jahre erbaut um die Ionosphäre der Erde zu erforschen [8]. Der durch die Brüder George und Helias Doundoulakis entwickelte Aufbau wurde 1966 patentiert (**US 3 273 156 A**, Figur 4).

Die besondere Bauart des Radioteleskops mit seiner großen Reflektorfläche, deren Durchmesser 305 Meter beträgt, ermöglichte unter anderem die Durchmusterung des Himmels nach schwachen, schmalbandigen Radioquellen wie beispielsweise Pulsaren. Bis 2016 war das Arecibo-Radioteleskop das größte Einzelteleskop der Welt. Aufgrund mehrerer Schäden stürzte das Teleskop 2020 zusammen und ist seitdem gesperrt [8].

4 Erste direkte Nachweise

Da die von Joseph Weber entwickelten Resonanzdetektoren nur in einem engen Bereich ihrer Resonanzfrequenz und nur für sehr starke Gravitationswellen empfindlich sind, wurden andere Detektorarten entwickelt [2].



Figur 4: Seitenansicht der Anordnung des Radioteleskops des Arecibo-Observatoriums in Puerto Rico (aus **US 3 273 156 A**). In einer natürlichen Doline befindet sich der Reflektor 12. Über diesen sind ausgehend von Befestigungstürmen 28 Drahtseile 26 gespannt, welche mittig oberhalb des Reflektors zusammenlaufen, wo sich die Instrumentenplattform 24 befindet.

In den 1970er Jahren entwarf der deutsche Physiker Heinz Billing Laser-Interferometer zur Messung von Gravitationswellen. Diese waren noch nicht für deren Detektion geeignet, aber bildeten die Vorreiter späterer großer Laser-Interferometer wie LIGO in den USA oder den britisch-deutschen Detektor GEO600 in Hannover. Der Vorgänger des heutigen Direktors des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) befasste sich erst seit den frühen 1970er Jahren mit der Erforschung von Gravitationswellen [9]. Bei seiner Emeritierung sagte er zu seinem Nachfolger Karsten Danzmann: „Ich bleibe so lange am Leben, bis Sie die Gravitationswellen gefunden haben“ [10]. Billing starb am 4. Januar 2017, am Tag der dritten Detektion einer Gravitationswelle durch LIGO, im Alter von 102 Jahren.

Vor seiner Arbeit in der Gravitationswellenforschung beschäftigte sich Billing mit der Entwicklung der ersten elektronischen Rechenmaschinen und erfand den Magnettrommelspeicher (DE 965 925 B).

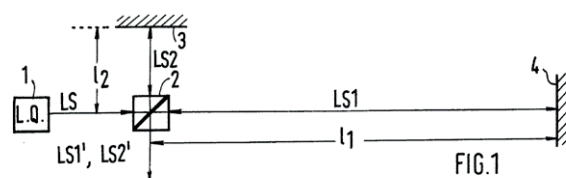
Gegenwärtig sind folgende Detektoren zur Messung von Gravitationswellen aktiv: Advanced LIGO (aLIGO) in Livingston und Hanford, USA, GEO600 in Hannover, Deutschland, (Advanced) VIRGO bei Pisa, Italien und KAGRA (Kamioka Gravitational Wave Detector) in Hida (früher Kamioka), Japan.

An dieser Stelle soll auch das Projekt LISA (Laser Interferometer Space Antenna) erwähnt werden, welches ein weltraumgestütztes Laser-Interferometer umfasst. Ursprünglich wurde es gemeinsam von ESA¹ und NASA² geplant, wobei die NASA jedoch 2011 aufgrund von Haushaltskürzungen ausschied [13]. Federführend ist hier das Albert-Einstein-Institut Hannover [14]. Das auf Basis von LISA entwickelte Projekt eLISA/NGO (evolved LISA/New Gravitational Wave Observatory) könnte im Jahr 2034 gestartet werden [13, 15]. Der LISA Pathfinder, ein Forschungssatellit zur Vorbereitung der eLISA/NGO-Mission, sammelte bereits von 2016 bis 2017 Daten [16]. An Bord befand sich unter anderem ein experimenteller Aufbau zur Messung relativistischer Effekte, welcher für

eLISA/NGO entwickelt wurde [17]. Das Herstellungsverfahren des hierfür verwendeten speziellen Quarzglas wurde in **US 6 284 085 B1** patentiert.

Die genannten Detektoren beruhen auf dem Prinzip des Michelson-Interferometers, wobei bei den erdgebundenen Anordnungen jeder Detektorarm wiederum ein Fabry-Pérot-Interferometer umfasst, um die Vorteile beider Detektorarten zu vereinen [18-21].

Die **DE 3 623 094 A1** zeigt den typischen Aufbau eines Michelson-Interferometers (Figur 5). Dabei wird ein Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen geteilt. Diese werden nach Durchlaufen einer Strecke an jeweiligen Spiegeln zurück zum Strahlteiler reflektiert, wo sie einander überlagern. Das entstehende Interferenzmuster ist abhängig vom Gangunterschied zwischen den optischen Weglängen der Wellen. Es kommt zu konstruktiver Interferenz (Addition der Amplituden) bei gleichphasigen Wellen oder destruktiver Interferenz (Auslöschung) bei gegenphasigen Wellen. Veränderungen des Gangunterschieds können somit durch Intensitätsmessungen der überlagerten Welle festgestellt werden.



Figur 5: Schematische Darstellung eines Michelson-Interferometers (entnommen aus DE 3 623 094 A1). Aus der Lichtquelle 1 trifft der Lichtstrahl LS auf einen Strahlteiler 2. Die beiden Teilstrahlen LS1 und LS2 werden an den Spiegeln 4 beziehungsweise 3 reflektiert und im Strahlteiler 2 überlagert.

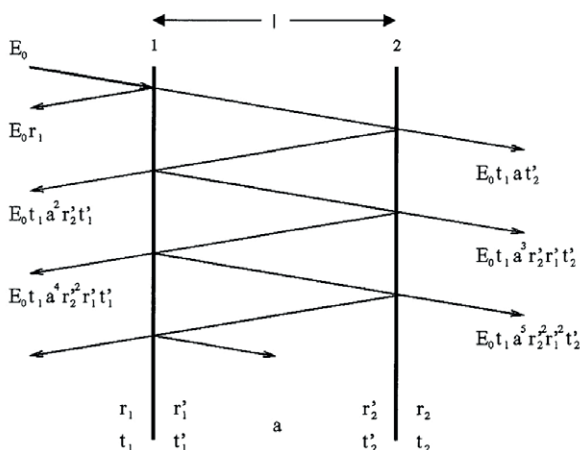
Ein Michelson-Interferometer zur Messung von Gravitationswellen ist so aufgebaut, dass die Wellen im ungestörten Zustand gegenphasig sind, das heißt sie löschen sich aus. Die vom Detektor gemessene Intensität ist idealerweise null. Trifft nun eine Gravitationswelle auf die Messanordnung, verändern sich die Längen der Interferometerarme und somit die Messstrecken, welche durch die Armlängen gegeben sind. Die Wellen sind nicht länger gegenphasig und es wird ein Signal gemessen [20, 21]. Bei den erdgebundenen Detektoren betragen

1 Die Europäische Weltraumorganisation ESA (European Space Agency) wurde 1975 gegründet und umfasst 22 Mitgliedsstaaten [11].

2 Die NASA (National Aeronautics and Space Administration – Nationale Aeronautik- und Raumfahrtbehörde) wurde 1958 gegründet und ist die zivile Bundesbehörde für Raumfahrt und Flugwissenschaft der USA [12].

die Armlängen einige Kilometer (beispielsweise vier Kilometer bei LIGO [18]). Das Weltrauminterferometer eLISA/NGO soll aus drei im Dreieck angeordneten Satelliten in einem jeweiligen Abstand von 2,5 Millionen Kilometern bestehen. Diese bilden drei Detektorarme mit jeweils dieser Länge [13].

Mit einem Michelson-Interferometer können sehr kleine Längenänderungen in den Detektorarmlängen gemessen werden. Zudem wird bei den erdgebundenen Observatorien durch die Anordnung der Detektorarme in einem 90° -Winkel die Quadrupoleigenschaft von Gravitationswellen genutzt. Letzteres ist bei einem Fabry-Pérot-Interferometer, dessen prinzipieller Aufbau in Figur 6 gezeigt ist, nicht gegeben. Jedoch ist dieses noch empfindlicher bezüglich Längenänderungen des Detektorarms. Daher vereinen die heutigen Gravitationswellendetektoren beide Prinzipien [19].



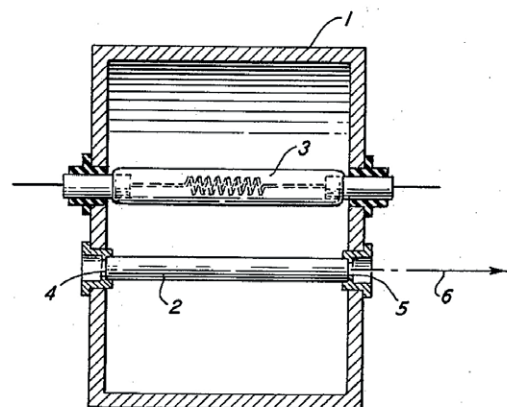
Figur 6: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Fabry-Pérot-Interferometers (entnommen aus DE 103 10 076 A1). Zwischen zwei im Abstand l parallel angeordneten halbdurchlässigen Spiegeln 1 und 2 befindet sich die Kavität. Ein Strahl E_0 fällt auf den Spiegel 1, an dessen Außenseite er mit der Reflexivität r_1 reflektiert wird. Der transmittierte Anteil wird dann an der innen liegenden Seite des Spiegels 2 mit der Reflektivität r_2' reflektiert. Außerhalb der Anordnung überlagern sich nun Strahlen, welche unterschiedlich häufig innerhalb der Kavität reflektiert wurden. Die Intensität der schließlich ausgekoppelten Strahlung ist abhängig von der Kavitätslänge l .

So simpel die Theorie der Messung klingt, die Veränderungen, die eine Gravitationswelle auf ihre Umgebung bewirkt, sind extrem gering. Irdische Gravitationswellen sind nicht messbar. Es bedarf enorm großer beschleunigter Massen, um eine messbare Gravitationswelle zu

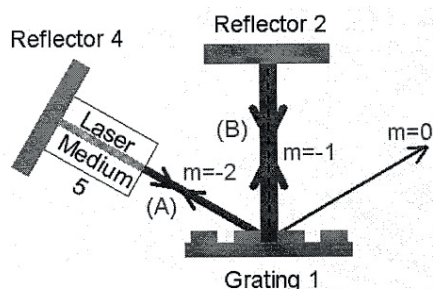
erzeugen. Solche entstehen beispielsweise, wenn zwei kompakte massereiche Objekte wie Schwarze Löcher oder Neutronensterne umeinanderkreisen (siehe Kapitel 2). Dennoch ist die relative Längenänderung, die ein Detektor auf der Erde erfährt, extrem gering. Beispielsweise würde ein System aus zwei Neutronensternen mit einer jeweiligen Masse von 1,4 Sonnenmassen, die in einem Abstand von 100 Kilometern mit einer Periode von 0,01 Sekunden umeinander rotieren und sich in einem Abstand zur Erde von 30.000 Lichtjahren befinden, eine Strahlung von ungefähr 10^{45} Watt erzeugen. Dies hätte eine relative Längenänderung auf der Erde von lediglich 10^{-18} (!) zur Folge. Daher müssen Gravitationswellendetektoren eine sehr hohe Genauigkeit aufweisen. Hierfür sind die Detektoren sehr groß und weisen extrem stabile und leistungsstarke Laseranordnungen auf [19].

In den 1990er Jahren wurden die zwei LIGO-Detektoren in Hanford und Livingston in den USA und der Detektor GEO600 in Hannover in Betrieb genommen. In Hannover wurde auch eine verbesserte Messtechnik, die gegenwärtig in den LIGO-Detektoren verwendet wird, entwickelt [22]. Daher werden die heutigen Detektoren auch „advanced LIGO“ (aLIGO) genannt. Das Lasersystem umfasst einen Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd:YAG-Laser).

Der erste Nd:YAG-Laser wurde 1964 in den USA vorgestellt und am 17. Mai 1966 patentiert (Figur 7, US 3 252 103 A, auch DE 1 210 952 A).

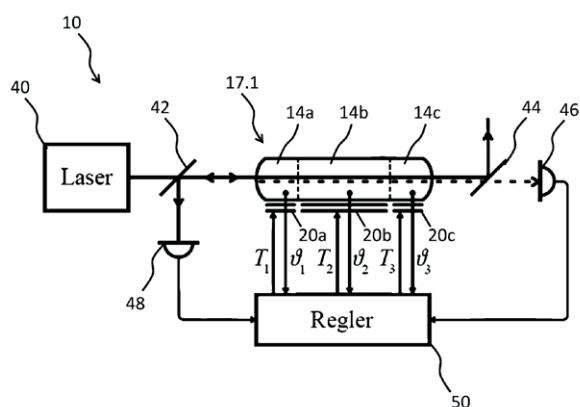


Figur 7: Schnittansicht des ersten Nd:YAG-Lasers (US 3 252 103 A). In einem elliptischen Gehäuse 1 befindet sich die Lichtquelle 3, welche das ebenfalls im Gehäuse angeordnete Medium 2 anregt. Die Strahlen werden zwischen zwei Spiegeln 4 und 5 reflektiert, wobei einer der Spiegel teilweise transparent ist, sodass die kohärente Strahlung austreten kann.



Figur 8: Laseranordnung zur Erzeugung eines extrem schmalbandigen Laserstrahls (WO 2007 / 134 642 A1). In der gezeigten Anordnung steht eine Beugungsordnung ($m = -1$) senkrecht zur Oberfläche eines Gitters (Grating 1). Durch den parallel zum Gitter angeordneten Reflektor 2 entsteht ein reflektierender Resonator B. Im Lichtweg der Beugungsordnung $m = -2$ befindet sich das Lasermedium. Mit dem Reflektor 4 und dem Gitter entsteht ein refraktiver Resonator A. Die Resonatoren A und B, welche durch Doppelpfeile gekennzeichnet sind, sind miteinander gekoppelt. Entlang der Beugungsordnung $m = 0$ wird das Licht ausgekoppelt, wenn sich die interferierenden Wellen der Resonatoren A und B nicht vollständig auslöschen.

Um die Empfindlichkeit der Detektoranordnungen weiter zu verbessern, forschen Teams unter anderem auch in Hannover und Hamburg an Lösungen. Beispielsweise beschreibt die WO 2007 / 134 642 A1 einen optischen Hochleistungsresonator, welcher einen Laser mit einer sehr engen Wellenlängenverteilung erzeugen kann (Figur 8). In der DE 10 2018 108 953 A1 ist ein System zur Verstärkung von Laserstrahlung offenbart (Figur 9).

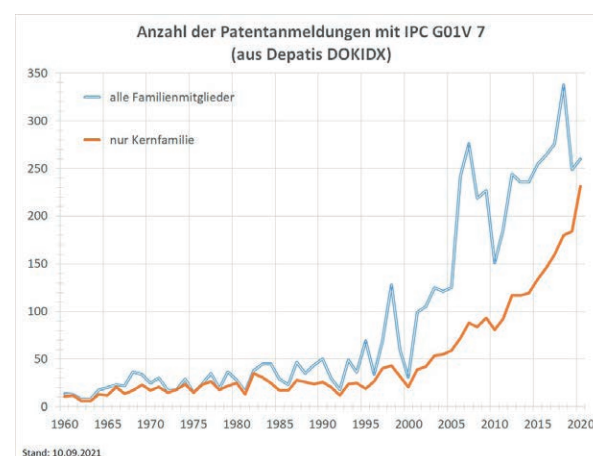


Figur 9: Anordnung zur Verstärkung von Laserstrahlung gemäß DE 10 2018 108 953 A1. Im Strahlengang befindet sich ein Resonator 17.1, der aus einem Festkörpermedium besteht. An den Enden dieses Mediums befinden sich konvex gewölbte Resonatorspiegel. Durch die konvexe Wölbung der Spiegel wird das aufgeweitete Laserlicht vollständig zurück in das Festkörpermedium reflektiert. Durch unterschiedliche Temperaturbereiche im Resonator können die Resonatorspiegel so verschoben werden, dass die Resonanzbedingung der gewünschten Wellenlänge erfüllt ist. Die Temperaturen im Resonator werden über einen Regelkreis eingestellt. An einem teildurchlässigen Spiegel 44 wird das verstärkte Laserlicht aus der Anordnung gelenkt.

In der Patentliteratur findet man jedoch nur wenige Veröffentlichungen der an der Gravitationswellenforschung beteiligten Arbeitsgruppen, da diese ihre Ergebnisse meist in wissenschaftlichen Journalen publizieren.

5 Gravitationswellenforschung und Patentliteratur

In der internationalen Patentklassifikation IPC findet man durch eine Recherche nach dem Stichwort „Gravitationswelle“ die IPC-Klassen: G01V 7 – „Messen von Gravitationsfeldern oder Gravitationswellen; Gravimetrisches Prospektieren oder Aufspüren“. Im Datenbestand von Depatis (DOKIDX) befinden sich derzeit zirka 6300 Dokumente mit einer IPC-Klassifizierung in G01V 7 (Stand: September 2021). Figur 10 zeigt die Entwicklung der Anzahl dieser Dokumente in den Jahren 1960 bis 2020. Die Trendlinien stimmen gut mit denen von [21] anhand von Daten aus Espacenet ermittelten Kurven überein.

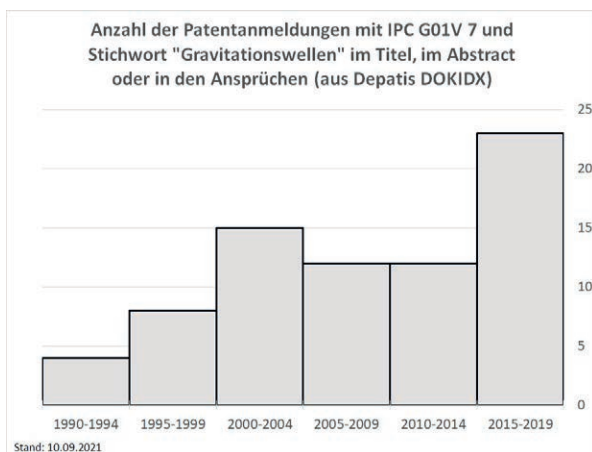


Figur 10: Anzahl der Patentanmeldungen in den IPC-Klassen G01V 7. Es wurde der Anmeldetag betrachtet.

Seit Mitte der 1990er Jahre gibt es einen starken Aufwärtstrend der Anmeldezahlen im Prüfgebiet G01V 7. Während die Anzahl der Anmeldungen im Jahr 1995 noch bei zirka 20 Anmeldungen lag, erreichten die Anmeldezahlen 2020 einen Wert von ungefähr 230 (Zahlen betreffen Kernfamilie). Dies entspricht einer Steigerung um mehr als das Zehnfache.

Allerdings befassen sich die meisten der in G01V 7 klassifizierten Anmeldungen mit dem Messen von Gravitationsfeldern auf der Erde und nur wenige mit der

Messung von Gravitationswellen. Figur 11 zeigt daher die Anzahl derjenigen Patentanmeldungen (Kernfamilie) mit einem Anmeldetag zwischen 1990 und 2019, welche zusätzlich im Titel, Abstract oder in den Ansprüchen den Suchbegriff „Gravitationswelle“ (deutsch und englisch) enthalten. Um den Trend besser zu erkennen, wurden hier die Zahlen in Blöcken von fünf Jahren zusammengefasst, da die Menge der hier betrachteten Anmeldungen mit 74 recht klein ist.



Figur 11: Anzahl der Patentanmeldungen in den IPC-Klassen G01V 7 und zusätzlich dem Stichwort „Gravitationswellen“ (deutsch und englisch) im Titel, im Abstract und/oder in den Ansprüchen. Es wurde der Anmeldetag und nur Dokumente der Kernfamilie betrachtet.

Auch aus dieser Darstellung ist ein Anstieg der Anmeldezahlen zu erkennen, der ungefähr das Sechsfache des Ausgangswerts beträgt. Jedoch ist die Grundmenge zu klein, um verlässliche Aussagen treffen zu können.

6 LIGO-Erfindungen

Abseits der IPC-Klassen G01V 7 sind die Gebiete, in denen Erfindungen, die im Zusammenhang mit Gravitationswellenforschung stehen, sehr vielfältig. Insbesondere lassen sich anhand der Internetauftritte von LIGO und aLIGO Patentanmeldungen ausfindig machen, welche mit den zugehörigen Projekten in Verbindung stehen. Zu nennen sind hier insbesondere die Gebiete Laser, Optik, Messtechnik, Chemische Bindungen sowie IT-Hardware und Software [23-25].

Auf den Internetseiten von LIGO findet man eine Rubrik mit einer Auflistung der durch die National Science Foundation (NSF)³ geförderten Projekte, welche die Entwicklung, den Aufbau sowie den weiteren Betrieb und Verbesserungen von LIGO unterstützen [24]. Des Weiteren werden auf der aLIGO-Webseite weitere Erfindungen und Patente vorgestellt [25]. Nachfolgend seien einige genannt. Auch hier zeigt sich die Vielfalt der Bereiche, in denen Patentanmeldungen, die durch das LIGO-Projekt erzielt wurden, eingereicht wurden.

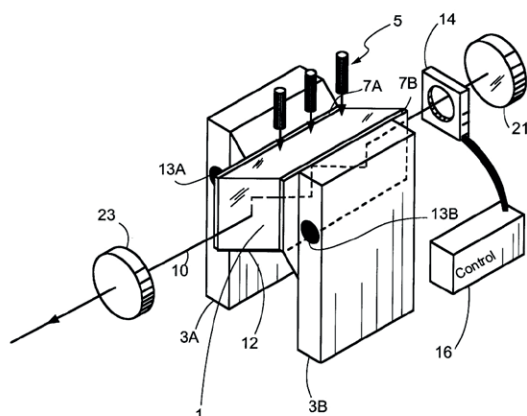
So beschreibt die **US 8 727 289 B2** beispielsweise eine Klemmvorrichtung für Kabel, welche in Hochvakuumkammern zur Anwendung kommt. Die Anmeldung befindet sich in der IPC F16L 3/08 („Lager für Rohre, Kabel oder Schutzrohre, zum Beispiel Aufhänger, Halter, Klammern, Schellen, Klemmen, Stützen – die das Rohr, Kabel oder Schutzrohr vollständig umgeben“).

Eine mechanische Blende, welche in weniger als 2 Millisekunden schließt, wurde durch die **US 10 036 885 B2** patentiert. Diese Anmeldung wurde nach G02B 7/182 („Halterungen, Fassungen, Justiereinrichtungen oder lichtdichte Verbindungen für optische Elemente – für Spiegel“) klassifiziert.

Ein Strahlungswärme kompensationsystem wird in der **US 8 480 244 B2** beschrieben und ist in der IPC G01J 5/06 („Strahlungspyrometrie – Anordnungen zum Beseitigen der Wirkungen einer Störstrahlung“) zu finden.

Ein „Zickzack“-Slab laser wurde mit **US 6 134 258 A** patentiert (Figur 12) [25]. Bei dieser Laserform liegt das aktive Medium in Form einer Platte (Slab) vor, so dass der Laserstrahl dieses zwischen schmalen Spiegeln mehrfach durchläuft („zickzack“). Dies resultiert in einer besseren Kühlung des Lasermediums [26]. Die Anmeldung wurde nach H01S 3/06 („Laser, das heißt Vorrichtungen, die stimulierte Emission elektromagnetischer Strahlung im infraroten, sichtbaren oder ultravioletten Wellenlängenbereich verwenden – Aufbau oder Form des stimulierbaren Mediums“) übernommen.

³ Die National Science Foundation ist eine unabhängige Behörde der US-Regierung mit der Aufgabe der finanziellen Unterstützung der wissenschaftlichen Forschung und Bildung außer in der Medizin [28].



Figur 12: Dreidimensionale Darstellung eines „Zickzack“-Slab-lasers gemäß US 6 134 258 A. Das aktive Medium 1 liegt in Form einer Platte zwischen Kühlkörpern 3A und 3B vor. Diese wird von mehreren Diodenlasern gepumpt (optische Pumpe 5). Der Laserstrahl 10 durchläuft das Medium zwischen reflektiven Flächen 7A und 7B in „Zickzack“-Form. Der Spiegel 21 und der halbdurchlässige Spiegel 23 bilden einen Resonator, der das Laserlicht verstärkt. Eine Blende 14 kann bei Bedarf den Lichtstrahl unterbrechen. Über den als Ausgangskoppler fungierenden halbdurchlässigen Spiegel 23 wird der Laserstrahl aus der Apparatur geführt.

Tabelle 1 stellt die Vielfalt der IPC-Klassifizierungen dar, in denen Patentanmeldungen zu finden sind, welche mit LIGO und aLIGO in Zusammenhang stehen.

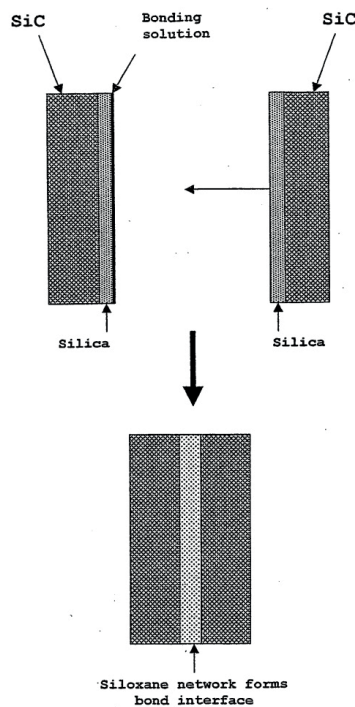
7 Spin-offs

Die Entwicklungen und Erfindungen, welche im Zusammenhang mit der Gravitationswellenforschung stehen, sind häufig auch für andere Anwendungen nutzbar [23]. Einige Beispiele seien nachfolgend aufgeführt.

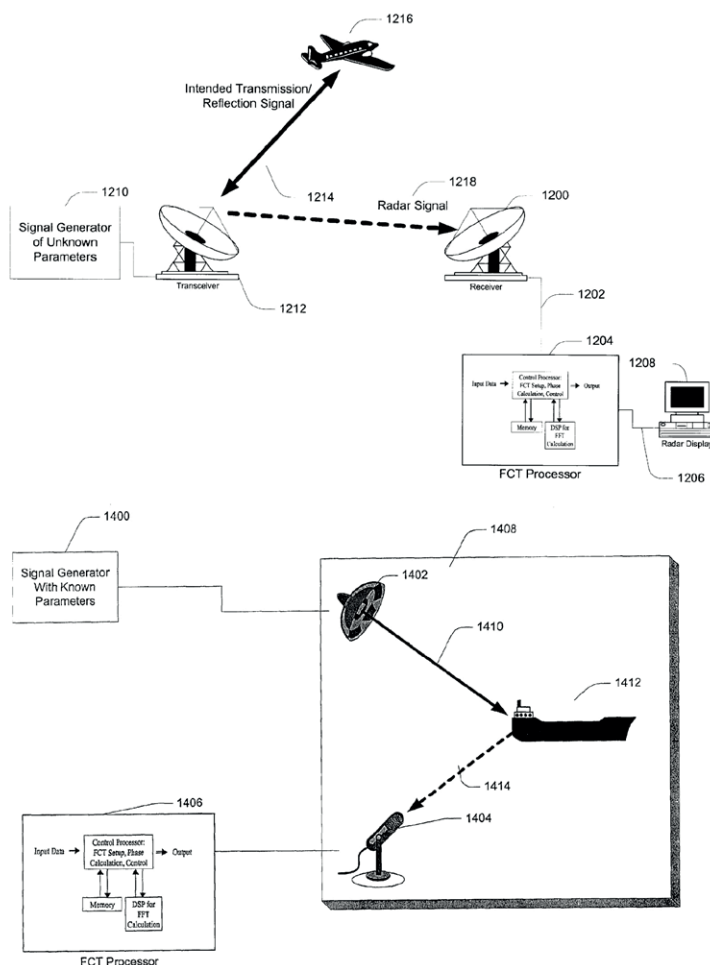
Siliziumkarbid (SiC) ist temperaturstabil und besitzt eine große Härte. Zudem weist es eine große Bandlücke auf. Daher wird SiC nicht nur in der Astronomie eingesetzt. Das Material kommt als Schleifmittel, in Heizelementen sowie in der Halbleiterindustrie zum Einsatz. In der Astronomie wird es insbesondere bei der Herstellung von Spiegeln verarbeitet. Diese sind zum einen sehr leicht, zum anderen hochpräzise und aufgrund der geringen Wärmeausdehnung für Weltraumteleskope geeignet [27]. Die **EP 1 737 802 B1** beschreibt ein Verfahren zum Verbinden von Bauteilen mit einer SiC-Oberfläche (Figur 13).

B05B 1	Düsen, Sprühköpfe oder andere Auslässe mit oder ohne Hilfseinrichtungen, wie Ventile, Heizeinrichtungen
B32B	Schichtkörper, das heißt aus Ebenen oder gewölbten Schichten, zum Beispiel mit zellförmiger oder wabenförmiger Form, aufgebaute Erzeugnisse
C04B 35	Geformte keramische Erzeugnisse, die durch ihre Zusammensetzung gekennzeichnet sind; keramische Werkstoffe (enthaltend freies Metall, gebunden an Carbide, Diamant, Oxide, Boride, Nitride, Silicide, zum Beispiel Cermets oder andere Metallverbindungen, zum Beispiel Oxinitride, Sulfide, außer als makroskopische Verstärkungsmittel); Pulver aus anorganischen Verbindungen als Ausgangsstoffe für die Herstellung keramischer Produkte
C04B 37	Verbinden gebrannter keramischer Gegenstände mit anderen gebrannten keramischen Gegenständen oder sonstigen Gegenständen durch Erhitzen
F16L 3	Lager für Rohre, Kabel oder Schutzrohre, zum Beispiel Aufhänger, Halter, Klammern, Schellen, Klemmen, Stützen
F21V 21	Trag-, Aufhänge- oder Befestigungseinrichtungen für Leuchten; Handgriffe
G01B 9	Instrumente wie in den Untergruppen aufgeführt und gekennzeichnet durch die Verwendung von optischen Messmitteln
G01B 9/02	. Interferometer
G01J 5	Strahlungspyrometrie
G01N 21	Optisches Untersuchen oder Analysieren von Stoffen, das heißt durch die Anwendung von Submillimeter-Wellen, infrarotem, sichtbarem oder ultraviolettem Licht
G02B 7	Halterungen, Fassungen, Justiereinrichtungen oder lichtdichte Verbindungen für optische Elemente
G02B 26	Optische Vorrichtungen oder Anordnungen mit beweglichen oder verformbaren optischen Elementen zum Steuern der Intensität, Farbe, Phase, Polarisation oder Richtung von Licht, zum Beispiel Schalten, Austasten oder Modulieren
G02F 1	Vorrichtungen oder Anordnungen zum Steuern der Intensität, Farbe, Phase, Polarisation oder der Richtung von Lichtstrahlen einer unabhängigen Lichtquelle, zum Beispiel Schalten, Austasten oder Modulieren; nichtlineare Optik
G03H	Holografische Verfahren oder Vorrichtungen
H02G 3	Installationen elektrischer Kabel oder Leitungen oder Schutzrohre hierfür in oder an Gebäuden, äquivalenten Bauwerken oder Fahrzeugen
H02K 41	Antriebssysteme, in denen ein starrer Körper entlang einer Bahn entsprechend dem dynamoelektrischen Zusammenwirken zwischen dem Körper und einem Magnetfeld, das der Bahn entlang wandert, bewegt wird
H01S 3	Laser, das heißt Vorrichtungen, die stimulierte Emission elektromagnetischer Strahlung im infraroten, sichtbaren oder ultravioletten Wellenlängenbereich verwenden

Tabelle 1: IPC-Klassen, in denen Patentanmeldungen klassifiziert sind, welche im Zusammenhang mit der Entwicklung von LIGO sowie dessen Verbesserungen stehen. Die Informationen wurden mit Hilfe von [23] bis [25] zusammengetragen.



Figur 13: Schnittdiagramm zur Herstellung einer Baugruppe, welche aus zwei Bauteilen mit jeweils einer SiC-Oberfläche (Silica) besteht (EP 1 737 802 B1).



Figur 14: Verwendung von FCT-Prozessoren in Radarsystemen (oben) und Sonarsystemen (unten), entnommen aus US 6 509 866 B2.

Für LIGO und andere Gravitationswellendetektoren wurden Lasersysteme und Stabilisierungstechnologien entwickelt, welche auch in der Spektroskopie, in der Messtechnik, in Kommunikationssystemen und für die optische Abtastung zum Einsatz kommen. Sie sind zudem bedeutsam für LIDAR-Systeme und Laser, welche in Herstellungsprozessen Verwendung finden, zum Beispiel beim Schweißen, in Druckprozessen oder in der Mikrobearbeitung [23].

Die zur Messung von Gravitationswellen grundlegende Interferometrie wird zur Detektion sehr kleiner Längenänderungen und Verschiebungen eingesetzt, wodurch sie auch bedeutend in der Überwachung von Erdbeben und Erdrutschen ist [23]. Die **US 2010 / 0 238 456 A1** beschreibt ein Interferometer, das im Rahmen von LIGO entwickelt wurde [23, 25].

Um Gravitationswellensignale trotz des vorhandenen Hintergrundrauschens zuverlässig zu erkennen, wurde gemäß der bereits im Kapitel 2 erwähnten Patentschrift **US 6 509 866 B2** der Algorithmus „Fast-Chip-Transformation“ (FCT) zur Signalverarbeitung entwickelt. FCT wird heute außerdem in Radar- und Sonarsystemen angewandt (Figur 14) [23, 25].

Die bereits in Kapitel 5 erwähnte Klemmvorrichtung gemäß **US 8 727 289 B2** kann überall dort eingesetzt werden, wo Prozesse in Hochvakuumkammern stattfinden, beispielsweise in der Massenfertigung von Kunststoffprodukten [23].

8 Ausblick

Gravitationswellenforschung ist ohne Frage eine bedeutende Grundlagenforschung. Die Detektion der von Einsteins ART vorhergesagten Gravitationswellen ist ein weiterer Meilenstein der Wissenschaft. Wir können gespannt sein, welche Errungenschaften uns in Zukunft erwarten.

Viele Resultate früherer Grundlagenforschung haben längst Einzug in unseren Alltag gehalten. Man denke beispielsweise an die Entdeckung der Radioaktivität und die Erforschung von Therapien zur Krebsbehandlung, an blaue Leuchtdioden, durch die das weiße LED-Licht möglich wurde oder an die GPS-Technologie, ohne die moderne Navigationssysteme nicht funktionieren würden.

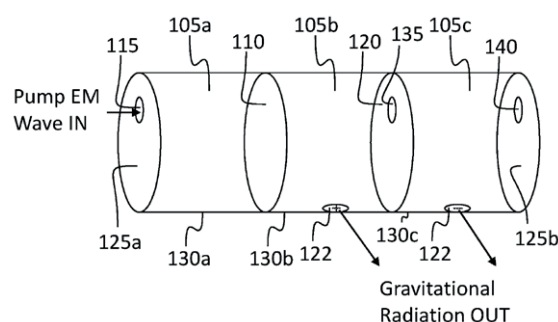
Grundlagenforschung ist ein Generator vieler Spin-offs. Ein prominentes Beispiel ist die Wi-Fi-Technologie, welche ursprünglich zur Verbesserung von Radioteleskopen für die Suche nach Schwarzen Löchern entwickelt wurde und nun Bestandteil in allen Bereichen des täglichen Lebens ist [29]. Auch die Laserphysik ist mittlerweile ein nicht mehr wegzudenkender Bestandteil vieler Anwendungsgebiete, von der Materialbearbeitung über die Messtechnik und die Medizin bis hin zu Alltagsgeräten wie den CD- oder Blu-ray-Spieler [30]. Das Ceran-Kochfeld, das heute in vielen Küchen zu finden ist, entstammt ebenfalls der Weltraumforschung und wurde von der Firma Schott für Spiegelträger von astronomischen Teleskopen entwickelt [30]. Auch der CCD-Chip, der sich in jeder modernen Kamera befindet, hat seinen Ursprung in der Astronomie. Dort werden CCD-Chips als Detektoren für Teleskope aller Wellenlängen verwendet [30]. Auch Rettungsdecken und feuerfeste Anzüge stammen aus der Weltraumforschung, wo unbrennbare Materialien für Raumanzüge entwickelt wurden [31]. Sogar die Gleitsichtbrille hat ihren Ursprung in der astronomischen Forschung. Das Verfahren zum hochpräzisen Schleifen der Gläser wurde für den deutschen Röntgensatelliten ROSAT entwickelt, um extrem glatt geschliffene Spiegel zu erhalten [31].

Kapitel 7 hat bereits einige Beispiele gezeigt, bei denen die Gravitationswellenforschung zu Fortschritten in anderen Bereichen geführt hat. Besonders hervorzuheben ist hier die Weiterentwicklung von Lasersystemen oder Verfahren zur Datenverarbeitung und -analyse.

Grundlagenforschung bedeutet jedoch nicht nur technische Errungenschaften. Das Streben nach Erkenntnis, nach dem Ursprung unserer selbst, ist ebenfalls ein Antrieb naturwissenschaftlicher Forschung. Insbesondere

die Astronomie hat hier einen besonderen Stellenwert, da sie bestrebt ist, die Frage nach dem Ursprung des Universums und allem, was darin enthalten ist, zu ergründen. Gravitationswellenforschung liefert an dieser Stelle einen wichtigen Beitrag um einer vereinheitlichten physikalischen Theorie näherzukommen.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist möglicherweise eine neue Art der Kommunikation, welche Gravitationswellen ermöglichen. Auch in der Patentliteratur werden bereits Systeme für Kommunikationssysteme, welche auf Gravitationswellen basieren, vorgeschlagen [23]. Die **WO 2016 / 138 266 A1** schlägt ein solches System vor (Figur 15). Das Projekt wurde unterstützt durch die Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), einer Behörde des US-Verteidigungsministeriums.



Figur 15: Gravitationswellensender gemäß WO 2016 / 138 266 A1. Die Anordnung besteht aus drei koaxial angeordneten gekoppelten supraleitenden Kammern 105. Zwischen der ersten Kammer 105a und der zweiten Kammer 105b befindet sich eine Membran, welche durch elektromagnetische (EM) Wellen zu Schwingungen angeregt wird. Aus den Kammern 105b und 105c treten über die Öffnungen 122 Gravitationswellen aus.

In jedem Fall ist Gravitationswellenforschung ein spannendes Forschungsgebiet sowohl für die fundamentalen Fragen des Daseins wie auch für Spin-offs, die das alltägliche Leben bereichern.

9 Danksagung

Ich danke sehr herzlich meinen Kollegen Dr. Wilfried Domainko und Dr. Ludwig Trepl für ihre Unterstützung.

Nicht-Patentliteratur

- [1] Andreas Müller: 10 Dinge, die Sie über Gravitationswellen wissen wollen, Springer-Verlag GmbH Berlin, ISBN 978-3-662-54408-2, 2017
- [2] Wikipedia: Gravitationswelle; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle> [URL abgerufen am 09.08.2021]
- [3] Hans-Josef Küpper: Albert Einstein In The World Wide Web, Einstein Biographie, 2000-2020; URL: https://www.einstein-website.de/z_biography/biographie.html [URL abgerufen am 09.08.2021]
- [4] Wikipedia: Joseph Weber (Physiker); URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Joseph_Weber_\(Physiker\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Joseph_Weber_(Physiker)) [URL abgerufen am 09.08.2021]
- [5] Wikipedia: Resonanzdetektor; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Resonanzdetektor> [URL abgerufen am 09.08.2021]
- [6] Darrell J. Gretz: Early History of Gravitational Wave Astronomy: The Weber Bar Antenna Development, 2018, Forum on the History and Philosophy of Physics, Spring 2018 Newsletter; URL: <https://engage.aps.org/fhpp/resources/newsletters/spring-2018> [URL abgerufen am 09.08.2021]
- [7] J. M. Weisberg, D. J. Nice, J. H. Taylor: Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16, 2010, Astrophysical Journal, 722, S. 1030-1034
- [8] Wikipedia: Arecibo-Observatorium; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Arecibo-Observatorium> [URL abgerufen am 09.08.2021]
- [9] Wikipedia: Heinz Billing; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Heinz_Billing [URL abgerufen am 09.08.2021]
- [10] Sebastian Kowalke: Der Klang des Universums, 2016; URL: <https://furios-campus.de/2016/11/01/der-klang-des-universums/> [URL abgerufen am 09.08.2021]
- [11] Wikipedia: Europäische Weltraumorganisation; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Europ%C3%A4ische_Weltraumorganisation [URL abgerufen am 14.10.2021]
- [12] Wikipedia: NASA; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/NASA> [URL abgerufen am 14.10.2021]
- [13] Wikipedia: Laser Interferometer Space Antenna; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Laser_Interferometer_Space_Antenna [URL abgerufen am 13.10.2021]
- [14] Karsten Danzmann: LISA Laser Interferometer Space Antenna, 2017, A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts; URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1702/1702.00786.pdf> [URL abgerufen am 13.10.2021]
- [15] Benjamin Knispel: Nach erfolgreicher Überprüfung beginnt für die LISA-Mission die nächste Entwicklungsstufe, 2018; URL: <https://www.aei.mpg.de/375284/lisa-mission-passes-review-successfully-and-begins-next-stage-of-development> [URL abgerufen am 13.10.2021]
- [16] Wikipedia: LISA Pathfinder; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/LISA_Pathfinder [URL abgerufen am 13.10.2021]
- [17] Wikipedia: Gravitationswellendetektor; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswellendetektor> [URL abgerufen am 07.09.2021]
- [18] Max Winter: Analogieversuche zur Gravitationswellendetektion – Theorie und Vorbereitung, Karlsruher Institut für Technologie, 2016, aktualisierte Fassung 2021; URL: http://www.physik.kit.edu/Studium/Lehramt/LIGO_Anleitung_Vorbereitung_SS21.pdf [URL abgerufen am 09.09.2021]
- [19] Markus Pössel: Gravitationswellen-Nachweistechnik: Michelson-Interferometer; URL: <https://scilogs.spektrum.de/relativ-einfach/gravitationswellen-nachweistechnik-michelson-interferometer/> [URL abgerufen am 09.09.2021]
- [20] Helmut Hornung: Der Kosmos bebt, 2016; URL: <https://www.mpg.de/gravitationswellen/messmethoden> [URL abgerufen am 09.09.2021]
- [21] Peter Aufmuth: Einstein online – Advanced LIGO; URL: <https://www.einstein-online.info/spotlight/aligo/> [URL abgerufen am 09.09.2021]
- [22] Matthew Trainer: Gravitational waves discovery, intellectual property and technology transfer, 2017, World Patent Information, 51, S. 1-6
- [23] LIGO Caltech: LIGO Technology Transfer Items, URL: <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-tech-transfer-items> [URL abgerufen am 13.09.2021]
- [24] Advanced LIGO: Technology Transfer Case Studies, URL: https://advancedligo.mit.edu/euclid_sensor.html [URL abgerufen am 13.09.2021]
- [25] Wikipedia: Slablasar; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Slablasar> [URL abgerufen am 13.09.2021]
- [26] Wikipedia: Siliciumcarbid; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Siliciumcarbid> [URL abgerufen am 13.09.2021]

- [27] Wikipedia: National Science Foundation; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/National_Science_Foundation [URL abgerufen am 14.10.2021]
- [28] Jude Dineley: Grundlagenforschung: Was hat die Physik eigentlich je für uns getan?, 2019; URL: <https://www.lindau-nobel.org/de/blog-grundlagenforschung-was-hat-die-physik-eigentlich-je-fur-uns-getan/> [URL abgerufen am 14.09.2021]
- [29] Andreas Müller: Brauchen wir Grundlagenforschung?, 2005; URL: https://www.spektrum.de/astrowissen/downloads/Essays/grundlagen_AMueller2007.pdf [URL abgerufen am 14.09.2021]
- [30] Rebekka Gottl: Entwicklungen aus der Raumfahrt – Überirdisch gut; URL: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/entwicklungen-aus-der-raumfahrt-ueberirdisch-gut-1.4526546> [URL abgerufen am 14.09.2021]

Falten, Klappen, Rollen, Schieben – wie ein Verdeck bewegt wird

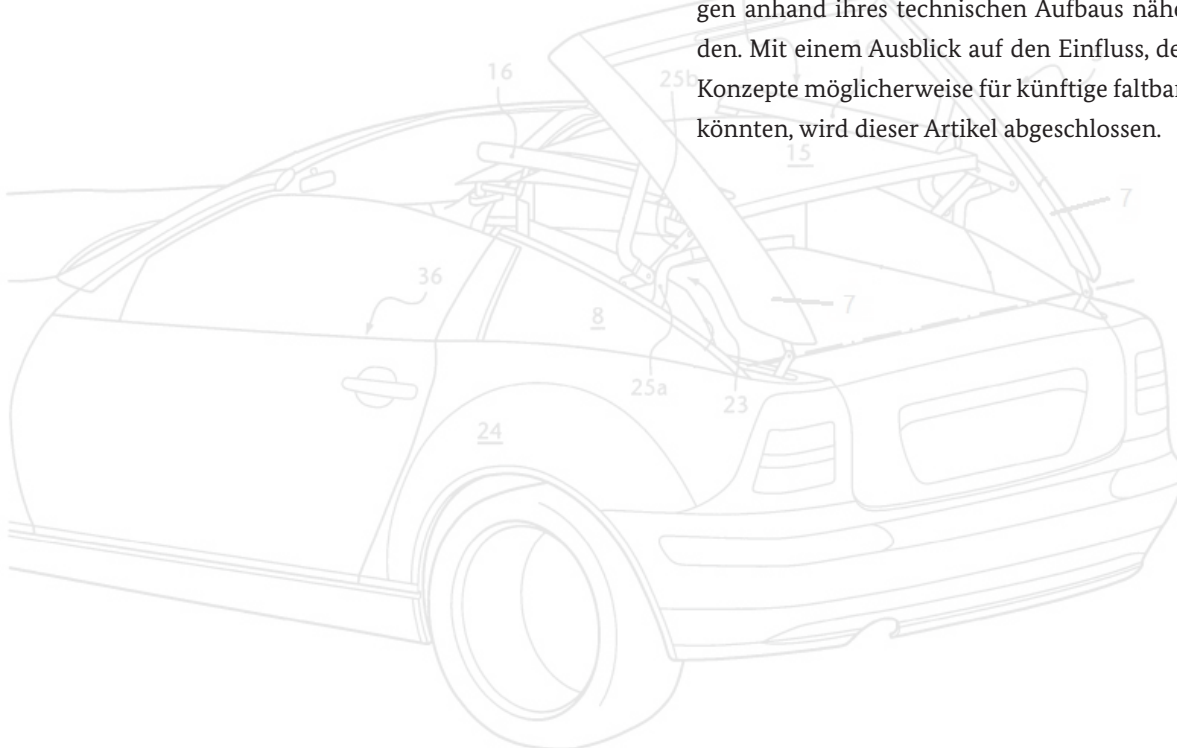
Dr. Andreas Monokroussos, Patentabteilung 1.24

Über den Autor

Andreas Monokroussos begann nach dem Studium für Luft- und Raumfahrttechnik an der Technische Universität Berlin als Wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in Braunschweig. Nach seiner Promotion und Forschungsaufenthalten an der University of Oklahoma und am Massachusetts Institute of Technology folgten mehrere Jahre mit Projekten in der Nutzfahrzeug Vorentwicklung Package- und Konzepte bei der Fa. Volkswagen AG in Wolfsburg. Im Jahr 2008 trat er als Patentprüfer in die Patentabteilung 1.24 des Deutschen Patent und Markenamts ein. Die Prüfgebiete umfassten unter anderem bewegbare und faltbare Dächer für Fahrzeuge, Aufbewahrungsfächer im Fahrzeug für Dachteile sowie Vorrichtungen zum Befestigen oder Sichern insbesondere Befestigungen mit Schraubengewinde. Seit 2020 ist Andreas Monokroussos Leiter der Gruppe 2 in der Patentabteilung 1.24.

Cabriolets sind eine besondere Fahrzeugart. Im Mittelpunkt steht dabei immer das besondere Fahrgefühl der Passagierinnen und Passagiere. Mit dem Wort „Cabriolet“ wird eine Fahrzeuggattung angesprochen, die für Fahrzeuge mit sich öffnendem Verdeck steht. Das charakteristischste Element eines Cabriolets ist immer das sich faltende Verdeck. Es verändert seinen Zustand ausgehend von einem schützenden Dachelement hin zu einem kompakten Fahrzeugteil, welches an einen bestimmten Ort im Fahrzeug untergebracht werden muss. Das gilt sowohl für Stoff- als auch für klappbare Metallverdecke.

Dieser Artikel soll anhand einer exemplarischen Zusammenstellung von ausgefeilten Lösungsansätzen die Vielfalt an Verstaumöglichkeiten von Verdecken, welche nicht alltäglich oder bekannt erscheinen, vorstellen. Solche, die sich im Alltag durchgesetzt haben, bilden nur eine kleine Auswahl an Varianten, welche, zumindest in Konzeptform, bereits angedacht wurden. Diese könnten Ansätze für künftige Lösungen bilden. Vorgestellt werden ausgesuchte Patentanmeldungen, welche musterhafte Konzepte mit ihren ganz charakteristischen Eigenheiten aufzeigen. Durch den vorgegebenen Rahmen dieses Artikels kann nur eine bestimmte Auswahl an Verdecklösungen anhand ihres technischen Aufbaus näher behandelt werden. Mit einem Ausblick auf den Einfluss, den anders geartete Konzepte möglicherweise für künftige faltbare Verdecke haben könnten, wird dieser Artikel abgeschlossen.



1 Einführung

Cabrioletfahren ist für die FahrerIn oder den Fahrer in erster Linie eine Grundeinstellung, eine Art Philosophie. Als CabrioletfahrerIn oder -fahrer erlebt man die äußere Welt direkter und intensiver. Durch das Öffnen eines Verdecks, könnte man sagen, öffnet man sich für die Welt [3].

Cabriolet fahren kann man heutzutage uneingeschränkt das ganze Jahr über. Das gilt nicht nur für solche, die mit einem festen klappbaren Verdeck (Hartschalenverdeck, englisch: „Retractable Hardtop (RHT)“), sondern auch für solche, die mit einem faltbaren weichen Stoff-, Leder- oder Kunststoffbezug (englisch: „softtop“) versehen sind [1]. Sehr gut ausgeführte Isolierungen in mehreren Schichten geben den FahrzeugpassagierInnen und -passagieren genügend Schutz vor Feuchtigkeit, Kälte, Regen, Wind oder starker Sonneneinstrahlung.

2 Als das Verdeck bewegt wurde, musste es verstaut werden

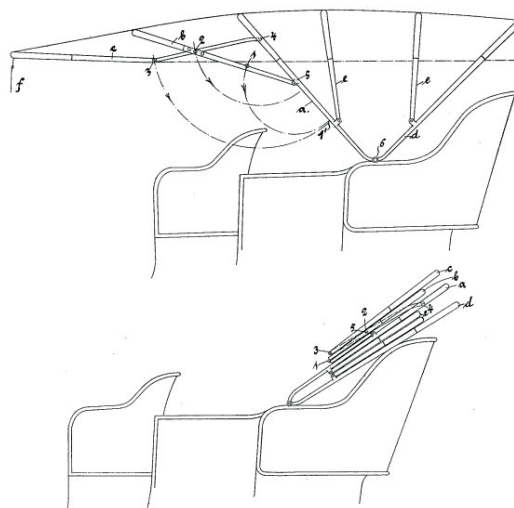
Als die ersten offenen Fahrzeuge gebaut wurden, wurde das faltverdeck noch nach Kutschenart mit dickem, imprägniertem Segeltuch oder Leder und einem zusammenlegbarem Gestell zum Aufspannen des Verdecks ausgeführt. Erste Verdecke waren sehr groß und schwer, was die Handhabung sehr umständlich machte. Ein Fahrzeugführer oder eine Fahrzeugführerin konnte allein, zum Beispiel das Verdeck eines der ersten Phaetons, wie dem Benz Phaeton von 1906, kaum öffnen und schließen. Es hatte lange Rahmenstücke, welche auf beiden Seiten des Fahrzeugs am besten gleichzeitig bewegt wurden und wobei der Verdeckstoff beim Niederlegen gleichmäßig in gefaltete Bahnen zwischen den Spriegeln (Dachbögen oder Stützstreben) gelegt werden musste. Bei mehreren seitlichen Streben empfahl es sich sogar mehr als zwei Personen dafür hinzu zu ziehen [2].

Eine neue Lösung, die die weitere Entwicklung von faltbaren Verdecken stark beeinflusste, war die im Jahre 1906 von Traugott Golde entwickelte Lösung (DE 204 393 von Karl Traugott Golde, 1845–1905, geboren in Gera. Gründer eines Wagenbaugeschäfts in

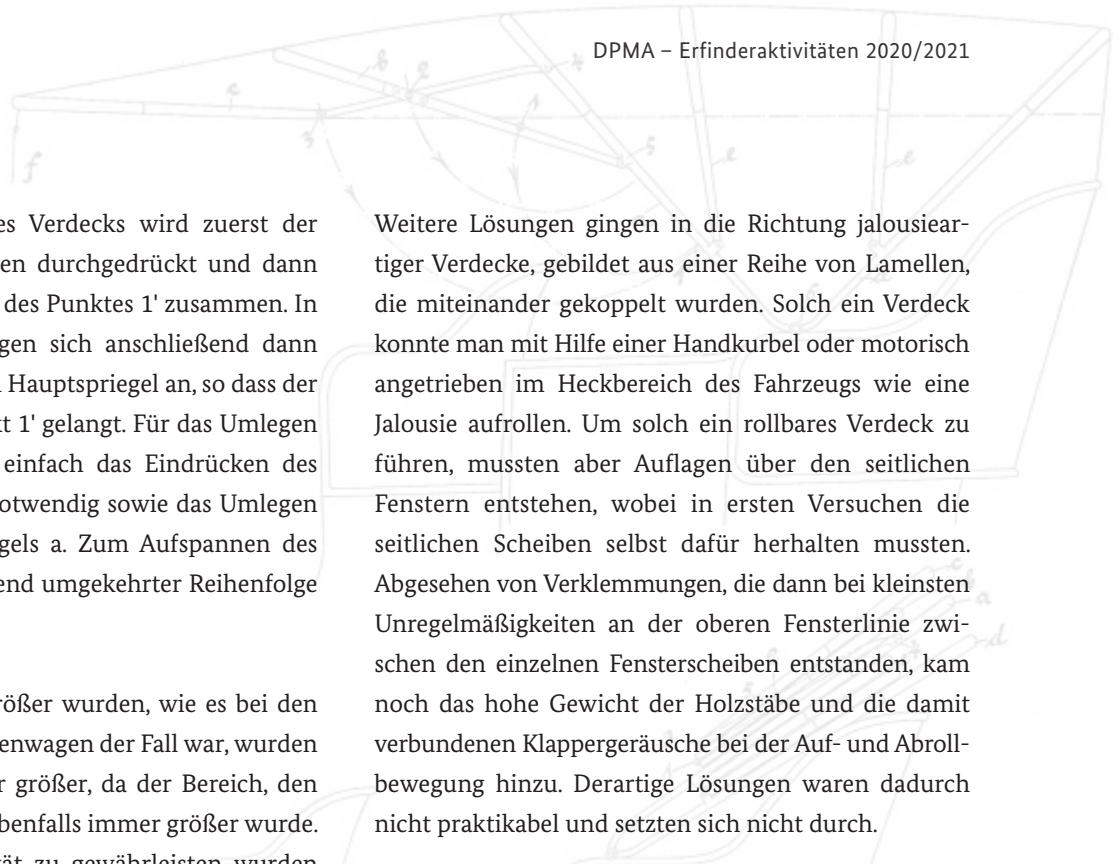
1872 und Herausgeber der Fachzeitschrift „Deutsche Fahrzeug-Technik Verlag T. Golde“. Ab 1905 Entwicklung von Fahrzeugverdecken, den sogenannten „Golde-Blitz-Verdecken“ [7]). Ganz wesentlich war hier, wie in Figur 1 gezeigt wird, dass auf jeder Fahrzeugseite ein Drehgelenk (6) oder Führungen mit beweglichen Schrauben für das ganze Verdeck verwendet wurde [2].

Das ganze Verdeck wird nun von zwei Stützstreben (Spriegel a und d) getragen, die die Basis für weitere Spriegel bilden und beim Punkt 6 hinter der Einstiegs-tür am Karosserieende befestigt sind. Der Spriegel d begrenzt die hintere Höhe des an der Karosserierückwand befestigten Leinwandbezugs. Zwei weitere Hilfs-spriegel e unterstützen die Form des Leinwandbezugs (Segeltuch) und der vordere Hauptspriegel a trägt gelenkig die Auslegerspriegel b und c. Der Spriegel b ist mittels eines Gelenkes 1, welches einen Anschlag zur Vermeidung des Durchknickens nach oben besitzt, mit der Gelenkstange beim Punkt 5 verbunden. Der obere Teil des Spriegels b wird durch eine Zapfenverbindung 2 des Hebels mit den Gelenkpunkten 3 bis 4 in ausgestreckter Lage gehalten. Am Endpunkt (Gelenkpunkt 3) dieses Hebels wird der Vorderspiegel c, der durch einen Riemen f vor dem Fahrersitz (Chauffeursitz) das gesamte Verdeck spannt und niederhält, angebracht [2].

Ferner war ein Auslegerspriegel, welcher dem Verdeck einen weiten Überhang nach vorn gab, vorgesehen. Der Vorderspiegel musste nur um seinen Drehpunkt nach oben geklappt werden und dann konnte das gesamte Verdeck zusammenklappen [2].



Figur 1: faltverdeck in aufgeklapptem und in zusammengelegtem Zustand (DE 204393 A).



Zum Zusammenlegen des Verdecks wird zuerst der Gelenkpunkt 1 nach unten durchgedrückt und dann klappt dieses in Richtung des Punktes 1' zusammen. In entsprechender Weise legen sich anschließend dann die weiteren Hebel an den Hauptsriegel an, so dass der Gelenkpunkt 3 zum Punkt 1' gelangt. Für das Umlegen des Verdeckes ist damit einfach das Eindrücken des Gelenkes beim Punkt 1 notwendig sowie das Umlegen des vorderen Hauptsriegels a. Zum Aufspannen des Verdecks ist in entsprechend umgekehrter Reihenfolge vorzugehen.

Als die Fahrzeuge aber größer wurden, wie es bei den früheren viertürigen Tourenwagen der Fall war, wurden auch die Verdecke immer größer, da der Bereich, den sie überdecken mussten ebenfalls immer größer wurde. Um eine gewisse Stabilität zu gewährleisten wurden zwangsläufig auch die Verdeckbauteile, wie Spriegel, Lenker, Hebel und Streben immer länger, größer und stärker. Eine größere Anzahl an solchen Elementen bedeutet auch einen höheren technischen Aufwand und mehr Gewicht. Bei zusammengeklappten Verdeck ragten die langen Spriegel, Hebel usw. über das Wagenheck hinaus. Manchmal musste sogar der Drehpunkt des Verdecks mit seinen Hauptstreben nach vorne verlagert werden, um den hinteren Überhang zu verkürzen. Bei kleineren Fahrzeugen, wie dem Tourer war das Verdeck kleiner, leichter und störte somit kaum, wenn es hinter den Rücksitzen abgelegt wurde. Bei manchen Modellen lag das Verdeck sogar zusammengeklappt auf der Karosserieoberkante. Diese noch nicht geschützten Verdecke mussten vor Staub und anderen äußeren Einflüssen geschützt werden, was einen extra Bezug aus Leinwand oder Leder dafür notwendig machte, um es auf der Ablage zu überdecken. Bei vielen Fahrzeugen sah dies jedoch sehr unharmonisch aus. Dem wollte Herr Oswald Viertel im Jahr 1913 Abhilfe schaffen und schlug in einem Beitrag zur Verbesserung der Verdeckunterbringung vor durch mehr Scharniere und Gelenke das Verdeck zu verschmälern, um es im zusammengeklappten Zustand kompakter in einem Hohlraum hinter den Wagensitzen zu verstauen. Damit sollten die als bisherige Lösung an Fahrzeughecks angebrachten, extra von außen zugänglichen, kastenförmigen Behälter ersetzt werden, um sowohl das klobige Aussehen als auch das Gewicht des Fahrzeugs zu reduzieren [2].

Weitere Lösungen gingen in die Richtung jalousieartiger Verdecke, gebildet aus einer Reihe von Lamellen, die miteinander gekoppelt wurden. Solch ein Verdeck konnte man mit Hilfe einer Handkurbel oder motorisch angetrieben im Heckbereich des Fahrzeugs wie eine Jalousie aufrollen. Um solch ein rollbares Verdeck zu führen, mussten aber Auflagen über den seitlichen Fenstern entstehen, wobei in ersten Versuchen die seitlichen Scheiben selbst dafür herhalten mussten. Abgesehen von Verklemmungen, die dann bei kleinsten Unregelmäßigkeiten an der oberen Fensterlinie zwischen den einzelnen Fensterscheiben entstanden, kam noch das hohe Gewicht der Holzstäbe und die damit verbundenen Klappergeräusche bei der Auf- und Abrollbewegung hinzu. Derartige Lösungen waren dadurch nicht praktikabel und setzten sich nicht durch.

Die Klapp- und Faltverdecke boten die besseren Möglichkeiten den Klappergeräuschen, aber auch den an den Kanten der rahmenlosen versenkbaren Scheiben auftretenden Luftzug- und Dichtigkeitsproblemen entgegen zu treten. Die Verbindungen sollten, durch besseres Aufsetzen an den Verdeckrändern, klapperfrei und winddicht werden. Gleichzeitig mussten sich aber Fenster und Türen einfach und mühelos öffnen lassen können. Zunächst wurden, um die Beweglichkeit des Verdecks zu unterstützen, die Längskanten (Verdeckrahmen) und das Gestänge leichter gebaut, was bei schneller Fahrt und bei windigem Wetter zu starkem Windzug im Innenraum führte. Es wurde zudem auch feucht, wenn Regenwasser eintrat. Somit wurden dann massivere Rahmen und schwerere Verdecke in noch stabilerer Konstruktion entwickelt. Dadurch wurden diese noch schwerer handhabbar und mussten mit Federmechanismen beim Öffnen und Schließen unterstützt werden. Sturmstanden (Spannbügel, die den Stoffbezug unter Spannung setzen) spannten in der Endphase das Verdeck, um damit eine Spannung auf den Bezug zu bringen und das Verdeck glatt aussehen zu lassen. Um das Federsystem bei solchen Verdecken richtig in Aktion zu bringen, war es aber zunächst immer nötig das Verdeck beim Aufrichten von Hand so weit anzuheben, bis die an den Verdeckssäulen angreifenden Federn zur Wirkung kamen. So wurden im Wagenkasten, in den das gefaltete Verdeck verstaut war, Stößel eingebaut, die entriegelt werden konnten und das Verdeck

um eine entsprechende Länge (etwa 30 Zentimeter) anheben, so dass dann die Verdeckfedern die restliche Arbeit zum Aufspannen des Verdecks übernahmen [2].

Damit zeigte sich schon von den Anfängen, welche die wichtigste Frage eines bewegbaren Verdecks war, nämlich wie es am einfachsten zu öffnen und zu schließen war. Im Vordergrund der Entwicklungen standen zunächst die Bemühungen die Kniehebel, Spriegel, Stangen und Gelenkverbindungen möglichst leichtgängig zu machen. Die Aerodynamik spielte vorerst keine große Rolle. Man war sich schon bewusst, dass durch hervorstehende Rahmenteile, Regenrinnen, alle Formen von Beschlägen und bei Übergängen Verwirbelungen am Fahrzeug auftraten. Damit war klar, dass die Fertigung solcher Verdecke besonders viel Genauigkeit und Präzision erfordert. Dazu kam noch, dass durch das wegklappende Verdeck die Verwindungssteifigkeit der Karosserie instabil wurde und die Formstabilität nachließ. Das musste mit zusätzlichen Verstärkungen innerhalb des Fahrzeugs aufgefangen werden. Damit wurden die Cabriolets deutlich teurer in ihrer Herstellung als Automobile mit den festen Dächern [2].

Eine wichtige Frage stellte sich trotzdem immer wieder und zwar wohin das zusammengelegte Verdeck zu verstauen sei, ohne dass es unangenehm störte. Bei frühen Fahrzeugen endete der Wagenkasten, also die Karosserie, bis auf wenige Ausnahmen, wie bei den Roadstern, hinter den Rückenlehnen der Fondsitze. Die großen Verdecke waren immer noch ausladend und ungeeignet innerhalb der Karosserie zu verschwinden, da sie zudem sehr groß waren. Erst als die Gestängekonstruktionen leichter und kleiner wurden und die Karosseriegestaltung nicht mehr den aufgesetzten Koffer oder Kasten im Heck besaß, wurde das Fahrzeugheck stärker herabgesenkt, um Platz für das geöffnete Verdeck zu machen, um es dann so unterzubringen, dass es mit der Oberkante des offenen Wagens abschließen konnte. Dazu wurde massiv am Verdeck gearbeitet, um die Rahmenteile und Stangen weiter zu kürzen. Ergänzend wurde auch die Reihenfolge der Spriegel von vorn nach hinten und ineinander verlegt statt, wie bisher, aufeinander. Damit wurde das Verdeck teilweise versenkbar bis vollversenkbar, so dass nur noch eine Abdeckplatte oder ein Stoffbezug reichte, um das gesamte Verdeck zu verbergen. Erste Lösungen mit Ab-

deckplatten oder Deckeln waren noch lose und mussten auch bei aufgespanntem Verdeck untergebracht werden, was zu unerfreulich losen Teilen im Fahrzeug führte. Das führte zu Verdeckabdeckungen, die als feste Deckel über Gelenke als Klappen funktionierten, die sich öffneten, wenn das Verdeck ein oder ausfuhr. Damit entstanden die Kofferraumdeckel, die bis heute die Verdeckkasten-Abschlussdeckel oder auch Kofferraumdeckel formen, welche eine konstruktiv harmonische Einheit mit dem restlichen Karosseriekörper erschaffen [2].

3 Zwei Verdeckarten, aber die gleiche Funktion

Ein Cabrioletverdeck lässt sich grundsätzlich einer von zwei Arten zuordnen: zum einen dem faltbaren Klappverdeck oder Hartschalenverdeck (RHT) gebildet aus mehreren flächig und fest ausgeformten Verdeckelementen und zum anderen dem Stoffverdeck, welches über ein Gestänge einen Verdeckstoff abstützt.

Das Stoffverdeck gilt als das klassische Cabrioletverdeck. Ein dicker, oft mehrfach in Schichten gedämmter Stoff bildet die Ober- und Außenschicht und ist mit dem tragenden Gestänge verbunden. Die Bewegung kann manuell erfolgen, wird aber heute fast immer automatisiert durchgeführt. Dann spricht man zusätzlich von einem automatisierten Verdeck.

Bei sportlicheren Cabrioletvarianten, wie Tourer oder Roadster, muss die fahrführende Person per Hand das Verdeck bedienen, was dazu führt, dass sie in der Regel aus dem Fahrzeug aussteigen muss. Das Verdeck klappt beim Öffnen zuerst nach oben und faltet sich dann, gleichsam einer Ziehharmonika, mit Hilfe eines Handgriffs nach hinten, entweder in eine Kofferraumablage oder bleibt, was bei solchen Fahrzeugen häufiger der Fall ist, auf der Karosserie liegen. Mit einer Persenning kann das zusammengefaltete Verdeck geschützt werden und sie bewirkt zusätzlich beim Cabriolet eine gefällige optische Silhouette.

Beim automatisierten Verdeck faltet dieses nach demselben Prinzip, nur, dass die fahrführende Person im Fahrzeug verbleiben kann und einen Knopf drückt, der über einen Motor das Gestänge, und damit das Verdeck, nach hinten bewegt. Das Verdeck faltet in mehrere Stoffbahnen, welche sich in einen vertieften Raum im Heck-

bereich der Karosserie übereinanderlegen und mittels einer Deckelabdeckung abgeschlossen werden. Das erfolgt bei solchen Verdecken ebenfalls über einen Motor, der den Deckel gleichzeitig anhebt und wieder absenkt.

Bei einem vollständig zusammengelegten und versenkten Verdeck und wenn die seitlichen Scheiben heruntergefahren und keine weiteren Stützrahmen beziehungsweise Überrollbügel vorhanden sind, so dass der Bereich hinter der Windschutzscheibe frei von Aufbauten oberhalb der Türen und des Heckdeckels ist, spricht man von „Vollcabriolets“. Zwischen Vollcabriolets und geschlossenen Limousinen gibt es zahlreiche Mischformen. Diese unterscheiden sich dadurch, wie das verstaute Verdeck ausgeführt ist und was noch hinter der Windschutzscheibe und oberhalb der Brüstungslinie zu sehen ist. Wenn feste Dachelemente kombiniert mit weichen Stoffabschnitten in unterschiedlichste Zusammensetzungen gebracht werden, wird nicht nur gefaltet und/oder geklappt, sondern auch gerollt und/oder geschoben. Unterschiedlichste Bewegungsmechanismen kennzeichnen das jeweilige Cabrioletverdeck.

4 Faltverdecke werden verstaut

Die Idee das Cabrioletverdeck möglichst optimal zu öffnen und zu schließen ist beiöffnungsfähigen Verdecken zwar grundsätzlich einheitlich, große Unterschiede ergeben sich aber sowohl in der Umsetzung der Funktionsweise als auch darin, wie das Verdeck im Fahrzeug untergebracht wird. Im folgenden Kapitel wird exemplarisch anhand einiger sehr spezieller Lösungen die Vielfalt, wie ein Verdeck bewegt und abgelegt werden soll, aufgezeigt. Gleichfalls wird teilweise auf die Abdeckungen zum Verstauen hingewiesen. Allerdings muss an dieser Stelle bemerkt werden, dass viele dieser ausgeklügelten und sehr interessanten Konzepte es nicht bis zur Serienreife geschafft haben.

4.1 Das Verdeck als Mischform

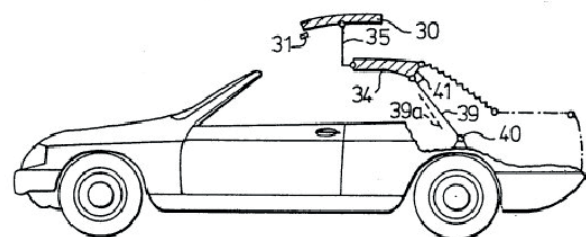
Verdecke, die die Vorteile sowohl von Stoff- als auch von Hartschalenverdecken vereinen, gehören schwer-

punktmäßig zu den Mischformverdecken. Dabei werden mindestens zwei hintereinander und mittels Gelenken miteinander verbundene starre Schalelemente angeordnet, die den Fahrgastraum über dessen Fahrzeugbreite überspannen. Die Schalelemente sind über Gelenke derart ausgebildet und angeordnet, dass die Schalelemente beim Zusammenlegen in eine Lage übereinander geklappt werden. In dieser Stellung werden sie als Paket in den Kofferraum des Kraftfahrzeugs verstaut.

Im Weiteren ist zwischen der Hinterkante des hinteren Schalelements und der vorderen Oberkante des Kofferraums ein flexibles Verdeckteil angebracht. Dieses bringt den Vorteil mit sich, dass durch die teilweise Ausbildung des Verdecks als flexibles Verdeckteil ein noch geringeres Volumen des zusammengelegten Verdecks erreicht werden kann.

Anhand dieser Kombination, vermittelt fester Verdeckelemente und einem flexiblen Teilabschnitt, können die Vorteile beider Verdeckarten genutzt werden. Somit hat diese Verdecklösung gegenüber einem reinen Hartschalenverdeck den Vorteil, dass das zusammengelegte Verdeck erheblich weniger Raum in Anspruch nimmt, so dass bei sorgfältiger Dimensionierung der Verdeckelemente nicht nur das gesamte Verdeck im Kofferraum untergebracht werden kann, sondern auch der äußeren Optik und der Aerodynamik des Kraftfahrzeugs zugutekommt. Obendrein bleibt noch ein gewisser Platz im Kofferraum für Gepäck übrig.

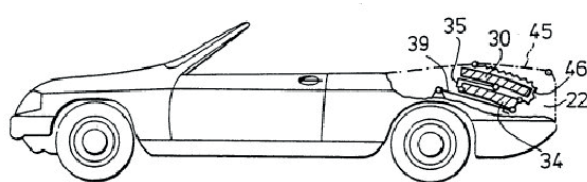
Wie in Figur 2 dargestellt, kann nach dem Lösen des Verschlussteils 31 die vordere Schale 30 mittels des ersten Gelenkteils 35 zunächst nach oben verschwenkt werden. Vornehmlich ist das zweite Gelenkteil als Gelenkviereck mit den Stangen 39, 39a sowie dem Anschlag 41 ausgebildet. Dieser Aufbau stellt sicher, dass



Figur 2: Aufklappbewegung der vorderen Verdeckschale des Faltverdecks (DE 36 35 373 A1).

die hintere Schale 34 keine weitere, nach vorne gerichtete Schwenkbewegung um den vierten Anlenkpunkt 40 ausführen kann, so dass die hintere Schale 34 in der dargestellten Stellung frei nach vorne feststeht und in dieser Stellung so lange verharrt, während die vordere Schale 30 zuerst nach oben schwenkt.

Im Weiteren wird die vordere Schale 30 auf die hintere Schale 34 aufgesetzt, so dass im aufgesetzten Zustand beide Schalen nahezu vorne und hinten miteinander fluchten.



Figur 3: Absenkung aller Verdeckteile in den Kofferraum am Ende der Öffnungsphase (DE 36 35 373 A1).

Anschließend wird wie in Figur 3 gezeigt, die Kofferraumhaube 45 um ihre Achse nach hinten hochgeschwenkt und gleichzeitig werden die Schalenelemente 30 und 34 mit dem ersten Gelenkteil 35 und mittels der Stange 39 nach hinten verschwenkt. Das flexible Verdeckteil 46 verformt sich währenddessen zieharmonikaartig und behindert die Schwenkbewegungen der Schalenelemente somit nicht.

Schließlich werden die geklappten Schalenelemente 30, 34 mit dem flexiblen Verdeckteil 46 vollständig im Kofferraum 22 untergebracht, woraufhin die Kofferraumhaube 45 wieder nach vorne geschlossen wird.

Der Kofferraum wird schließlich mittels einer Kofferraumhaube abgedeckt, die um eine Achse am Heck des Kraftfahrzeugs drehbar angeordnet ist.

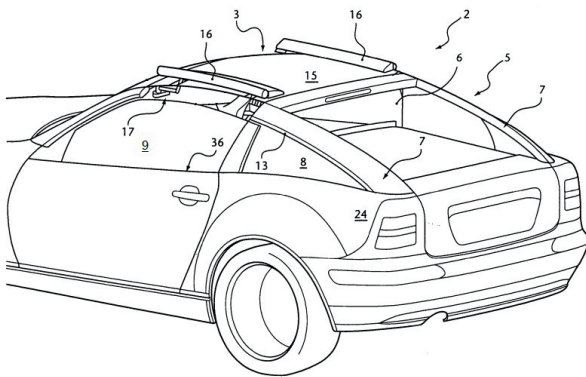
Das vorgestellte Verdeck zeigt durch die teilweise Ausbildung in Form von starren Schalenelementen eine erhöhte Wärmeisolation und bessere Aerodynamik für den überdeckenden Abschnitt. Der textile Abschnitt spart dagegen an Gewicht und Platz. Außerdem kann das Verdeck leichter bewegt werden, da weniger Verdeckteile (Spiegel, Lenker, Gelenke) erforderlich sind. Dieses Verdeckkonzept eignet sich zudem gut für den Einsatz bei viertürigen Cabriolets.

Im Besonderen eignet sich dieses Verdeck auch für einen nachträglichen Umbau von geschlossenen Fahrzeugen in Cabriolets, wenn zum Beispiel eine Limousine „aufgeschnitten“, das heißt das Festdach entfernt wird und ein zusammenlegbares Verdeck aufgesetzt wird. Hierbei unterstützen besonders die starren Verdeckelemente die fehlende Verwindungssteifigkeit des Cabriolets, was unmittelbaren Einfluss auf das Fahrverhalten hat.

4.2 Das Finnenverdeck

Ein Verdeck, welches als Finnenverdeck oder Finnen-dach ausgeführt ist, weist seitlich heckwärts laufende und sich in Fahrzeuglängsrichtung erstreckende dreiecksförmige Spitzen auf, die oft als Finnen bezeichnet werden. Diese können fest und beispielsweise außen-seitig mit seitlichen Seitenscheiben oder undurchsichtigen Verkleidungen versehen oder gänzlich aus Stoffabschnitten gefertigt sein. Im letzteren Fall bilden sie einen Verdeckabschluss als geteilter Spannbügel. Durch das Verlegen des Verdeckgestänges innerhalb der seitlichen Finnen kann die Bewegungsmechanik nach außen optisch kaschiert beziehungsweise unauffällig geführt werden. Zwischen den Finnen befindet sich fast immer eine Heckscheibe, welche schwenk- und/oder versenkbar sein kann. Mit solch einem Finnenverdeck kann das bewegliche feste Verdeckteil (Dachteil), auch wenn es in seiner Normalbreite die ganze Breite zwischen den Seitenscheiben einnimmt, mittels einer Einwärtsverlagerung seiner Seitenbereiche so verengt werden, dass es zwischen den Finnen abgelegt werden kann.

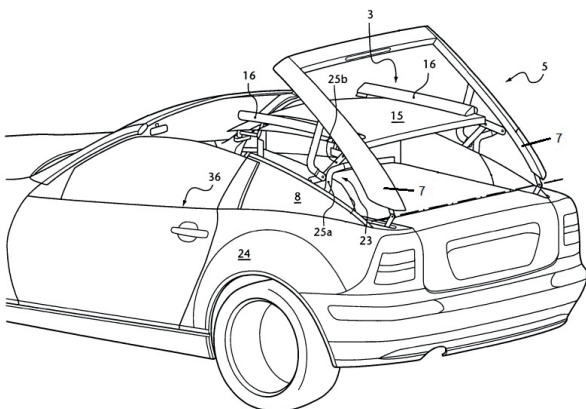
In Figur 4 wird gezeigt, wie sich ein festes zentrales Verdeckteil (Dachteil) 3 vom Windschutzscheibenrahmen bis zu einem, in Fahrzeuglängsrichtung direkt anschließenden, hinteren Verdeckteil 5 erstreckt. Das hintere Verdeckteil 5 umfasst die Heckscheibe 6. Das zentrale Verdeckteil 3 ist für ein schnelles Öffnen des Verdecks derart geteilt, dass es durch die Verlagerung der Außenbereiche zwischen einer verschmälerten und einer normalen Breite variierbar ist. Die Außenbereiche werden somit in der verschmälerten Stellung gegen den Mittelbereich einfach eingeschwenkt.



Figur 4: Perspektivische Sicht mit aufgeschwenkten Außenbereichen des festen vorderen Dachteils (DE 102 54 366 A1).

Bei geschlossenem Verdeck liegt der bewegliche Dachteil 3 im Wesentlichen horizontal, erstreckt sich über die gesamte Fahrzeugbreite und schließt an den Seiten mit den Oberkanten der versenkbaren Seitenscheiben 9 ab. Die Außenbereiche 16 sind zwischen einer zunächst normalen Stellung, in der sie fluchtend zum mittleren Bereich 15 anliegen und in der das Dachteil 3 seine volle Breite aufweist und einer gegenüber dem mittleren Bereich 15 einwärts verlagerten Position (Figur 4) bewegbar. Die Verlagerung wird durch zwei Mehrgelenke 17 (Schwenkscharniere) pro Fahrzeugseite erreicht. Beim Einschwenken liegen die Außenbereiche 16 in der verschmälerten Stellung des vorderen Dachteils 3 um 90° verschwenkt auf dem mittleren Bereich 15 auf.

In der verschmälerten Position sind die seitlichen Rahmenteile zwischen den A-Säulen und den C-Säulen 13 unterbrochen, so dass das Dachteil 3 heckwärts zwischen die Spitzen 7 des Finnenverdecks 2 geschoben werden kann (Figur 4).



Figur 5: Perspektivische Sicht des vorderen Dachteils in der rückwärtigen Öffnungsbewegung beim Einfahren in den Heckbereich des Fahrzeugs (DE 102 54 366 A1).

Der mittlere Bereich 15 des Dachteils 3 weist ein eigenständiges Gestänge 23 auf, mit dem es gegenüber der Karosserie 24 beweglich gehalten wird (Figur 5). Das Gestänge 23 ist zu den Seiten dank der Außenverkleidungen 8 der Spitzen (Finnen) 7 optisch abgedeckt. Die Lenker 25a, 25b sind in Schlitzausnehmungen, die parallel zu den Finnen 7 verlaufen, geführt. Das Gestänge 23 kann durch ein beispielsweise hydraulisches oder elektrisches Antriebsorgan bewegt werden.

Das bewegliche feste Dachteil 3 kann sowohl aus mehreren festen Plattenkörpern als auch von Rahmenkonstruktionen gebildet sein, die hauptsächlich aus optischen Aspekten von einem flexiblen Bezug überspannt sein können. Neben dem hier gezeigten Einschwenken der Außenbereiche 16 sind prinzipiell auch andere Verlagerungen denkbar, zum Beispiel ein paralleles Einfahren der Außenbereiche 16 mittels einer translatorischen Bewegung. Durch die Verwendung von Leichtbaumaterialien, insbesondere von Kunststoffen, und einer zusätzlichen Reduzierung von Masse kann das Gesamtgewicht des Fahrzeugs und das Trägheitsmoment der Rahmenteile herabgesetzt werden.

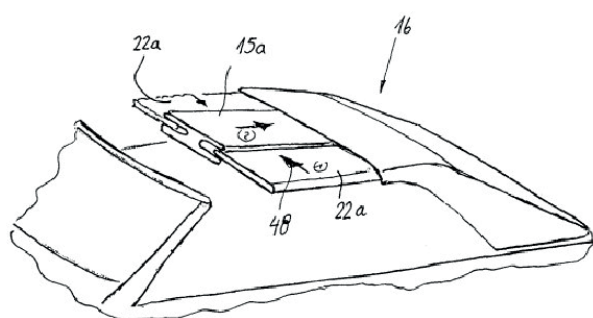
Die Verdeckkinematik wird so auszuführen sein, dass das hintere Dachteil 5 über das abgelegte vordere Dachteil 3 unterhalb der Fensterbrüstungslinie 36 abgelegt werden kann. Dann entsteht ein Voll-Cabriolet bei dem alle Aufbauten über der Fensterbrüstungslinie versenkt sind.

Zudem kann im Bereich der B-Säulen und der Heckscheibe 6 ebenfalls ein Überrollschutz vorgesehen sein. Die Durchtrittsöffnung für das bewegliche Verdeckteil 3 liegt dann oberhalb des Überrollschutzes und ist dadurch von diesem nicht eingeschränkt.

4.3 Das einziehbare Verdeck

Zu den besonderen Bauformen von Verdecken gehören solche, bei denen eine besonders leichte und robuste Bedienbarkeit erzielt werden kann und der Fondraum (Kofferraum) von dem geöffneten Verdeck nicht stark beeinträchtigt wird. Die Bauweise solch eines Verdecks besteht aus möglichst wenigen festen Teilen.

Wie in der Figur 6 beschrieben, sind an einem vorderen Dachteil 15a anstatt von Dachrahmenteilten Seitenteile 22a vorgesehen, die in Bewegungsrichtung (Pfeile 48, 1 und 2), d.h. zur Fahrzeugmitte hin, in das vordere Verdeckteil 15a eingezogen werden, so dass das gesamte Verdeckteil seine Breite reduziert. Damit wird es möglich in einer zweiten Bewegungsrichtung das vordere Verdeckteil 15a in das hintere Verdeckteil 16 einzuziehen, obwohl das vordere Verdeckteil 15a im geschlossenen Zustand die gleiche oder eine größere Breite hat als das hintere Verdeckteil 16. Zudem kann hier das vordere Verdeckteil 15a zunächst etwas abgesenkt werden, bevor es unter das hintere Verdeckteil 16 fährt. Die Seitenteile 22a übernehmen außerdem die Aufgabe von Dachrahmenteilten. Mittels Führungen, welche Schiebedachführungen ähneln, können die Seitenteile 22a motorisch angetrieben werden. Solch eine Ausführung lässt es zu, dass das Verdeck vollautomatisch geöffnet werden kann und sämtliche Verdeckteile zusammen unter das hintere Verdeckteil 16 untergebracht werden können.



Figur 6: Darstellung der translatorisch einfahrenden Seitenteile in das vordere Verdeckteil (DE 39 30 343 A1).

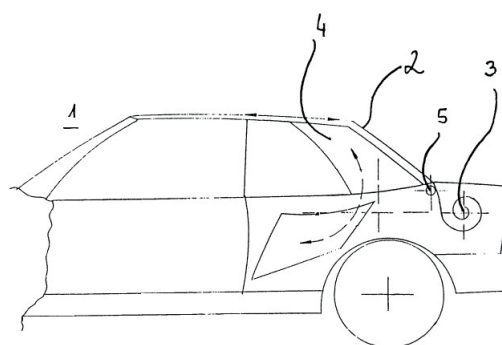
Eine automatische Betätigung unterstützt die Zugänglichkeit zum Kofferraum, da das Abheben des hinteren Dachteils 16 vom Heckbereich des Fahrzeugs ebenso automatisch auf Knopfdruck erfolgen kann. Die festen Verdeckteile (Dachteile) können, um das Gewicht zu optimieren, bei Beibehaltung einer hohen Festigkeit und einfacher Herstellbarkeit, beispielsweise aus faserverstärktem Kunststoff hergestellt werden. In dem die Belastungen im Heckbereich durch weniger Gewicht reduziert werden, wird das Fahrverhalten des Fahrzeugs verbessert.

4.4 Das aufrollbare Metallverdeck

Wie im Kapitel 2 beschrieben ist das Stoffverdeck charakteristisch für das klassische Cabriolet. Stoffverdecke erfordern allerdings einen aufwändigen Mechanismus aus Latten, Spriegeln und Gelenken für das Halten und Zusammenlegen des Verdecks. Wenn diese Verdecke ausgefahren sind, müssen sie über den Insassenraum im geschlossenen Zustand verspannt werden, um eine möglichst hohe Steifigkeit zu erreichen. Das wird in der Regel mit Hilfe eines Spannbügels erreicht.

Um eine Spannung auf das Verdeck zu erhalten, kann statt des üblichen Stoffbezugs ein festeres federndes Material (Federstahlblech) gewählt werden. Dieses charakterisiert sich dadurch, dass es zum einen eine Flexibilität zum Aufrollen und zum anderen eine federnde Eigenschaft aufweist, so dass es im neutralen Zustand immer eine bestimmte Form annehmen kann. Es entsteht ein Effekt wie der bei einer Zunge eines „Knackfrosches“. Dementsprechend kann das Verdeck einerseits eingerollt werden, was den zugehörigen Verdeckmechanismus gegenüber gebräuchlichen Stoffverdecken erheblich vereinfacht, und andererseits, wenn es abgerollt wird, von selbst wieder die Form eines geschlossenen Fahrzeugverdecks annehmen.

Für diesen Ansatz wird in Figur 7 ein Cabriolet 1 mit einem Cabriolet-Verdeck 2, welches eine Abstützeinrichtung 4 aufweist, gezeigt. Das flexible Verdeck aus federartigem Material wird über eine Umlenkrolle 5 geführt und auf eine Aufrolleinrichtung 3 aufgerollt. Der Abstützeinrichtung 4 kommt eine besondere Rolle zu. Sie stützt das flexible Verdeck im Bereich der C-Säule des Cabriolets im geschlossenen Zustand ab. Die Abstützeinrichtung 4 besteht aus einem starren Element,



Figur 7: Schematische Seitenansicht eines Verdecks mit Abstütz- und Aufrolleinrichtung (DE 41 02 067 A1).

das einer ausgedehnten C-Säule entspricht, die bei ganz geöffnetem Verdeck in einen vorgesehenen Hohlraum im Bereich der hinteren Kotflügel eingeschwenkt wird. Die Verschwenkbewegung ist auf beiden Fahrzeugseiten vorgesehen und wird in Figur 7 durch einen Pfeil angedeutet.

Solche eine Verdecklösung weist gegenüber gängigen Cabriolet-Verdecken einige bedeutende Vorteile auf. Zunächst wird durch Weglassen von Gestänge am Gewicht gespart. Auch das Federmaterial des Verdeckes selber kann leichter als der Stoffbezug von Stoffverdecken ausgewählt werden. Zudem ist die Handhabung des Verdeckes einfacher. Im ausgerollten Zustand nimmt es von sich aus die gewollte Verdeckform ein. Gesichert wird dieses Verdeck dann nur noch über geeignete Verschlüsse, die entsprechend einfacher ausgelegt sein können, da sie nicht unter Spannung verriegeln müssen. Schließlich ist die Steifigkeit des Verdeckes selber und damit die Eigenstabilität im ausgerollten Zustand höher als die eines herkömmlichen Stoffverdeckes und kommt an die Eigenschaften ähnlich eines Festverdeckes heran.

4.5 Das flexibel aufrollbare Stoffverdeck

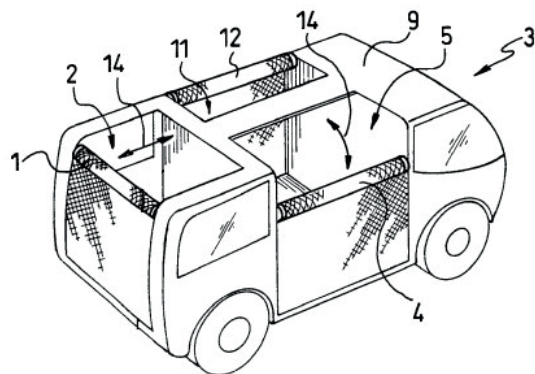
Aufgrund der Flexibilität von Stoffbezügen und ähnlichen Materialien können besonders variabel bewegbare Tür- und Dachelemente (Verdecke) kombiniert werden, welche neue Möglichkeiten zum Belüften, zum Ein- und Aussteigen als auch zum Beladen eröffnen.

Solch ein Fahrzeugdach zeichnet sich durch Teilausschnitte aus, die ein aufrollbares Türelement zum Öffnen und Schließen einer Hecköffnung als auch durch zwei weitere aufrollbare Türelemente zum Öffnen und Schließen einer jeweiligen seitlichen Öffnung eines Fahrzeugs vorsehen. Somit sind im Ganzen maximal drei verschließbare Öffnungen vorhanden. Die Türelemente sind im geschlossenen Zustand sowohl als Dachelement als auch als Türelement entwickelt worden. Die flexible Ausführung der Türelemente lässt verschiedenste Bewegungsstellungen zu.

Zum einen können die aufrollbaren Türelemente des Fahrzeugdachs im zusammengerollten Zustand an einem Randbereich an der Oberseite des Fahrzeugdachs festgesetzt werden. Dadurch sind die Türelemente platzsparend verstaut und es öffnet sich der gesamte Bereich der jeweiligen Fahrzeugöffnung zum Ein- und Aussteigen der Passagiere und zum Beladen des Kofferraums.

Zum anderen besteht aber auch die Möglichkeit die aufrollbaren Türelemente im zusammengerollten Zustand an einem Randbereich im Bodenbereich des Fahrzeugs anzubringen, zum Beispiel im Bodeneinstiegsbereich der jeweiligen Öffnung. Demzufolge ist der Dachbereich des Fahrzeugdachs frei von zusammengerollten Türelementen und es entstehen besonders weite Dachöffnungen im Dachbereich. Aufgrund dieser äußerst vielseitigen Verstaumweise können vielfältig Anforderungen an das Fahrzeug umgesetzt werden.

Figur 8 stellt ein Fahrzeug 3 sowie sein öffnungsfähiges Dach 9 dar, wobei die rollbaren Türelemente 1, 4 und 12 im teilweise auf- und abgerollten Zustand in Zwischenstellungen der Fahrzeugöffnungen dargestellt sind. In diesen Lagen können die Türelemente 1, 4 und 12 auch im teilweise geöffneten Zustand angehalten und festgesetzt werden. Damit kann das Öffnungsausmaß 14 der jeweiligen Öffnung 2, 5 und 11 variabel eingestellt und an die Bedürfnisse des Nutzers angepasst werden.



Figur 8: Auf drei Seiten eines Fahrzeugs öffnende Türelemente als Rollverdecke (DE 102 33 745 A1).

Dieses Dachkonzept mit drei Öffnungen bietet besonders vielfältige Möglichkeiten zum Ein- und Ausstieg als auch zum Be- und Entladen des Fahrzeugs.

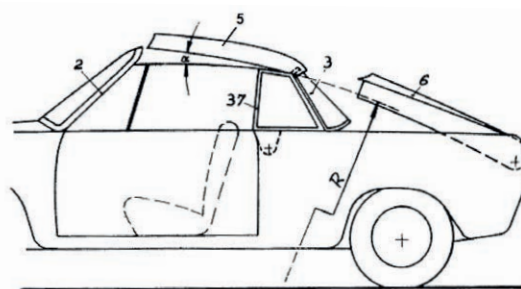
Ein besonders wohnlicher Eindruck kann durch Wahl von verschiedenen Stoffen der rollbaren Türelemente entstehen. Zur Verstärkung der Eigenstabilität können die rollbaren Türelemente feste Profile (Spiegel, Latten) aufweisen, welche wie bei herkömmlichen Verdecken mit Stoffabschnitten verbunden sind. Ebenso können stabilere Ausführungen mit Jalousien, welche steife Lamellen aufweisen, vorgesehen werden. Die Betätigung des Auf- und Abrollens kann elektrisch erfolgen, was den Komfort erhöhen würde.

4.6 Das einschiebbare Cabriolet-Verdeck

Bei üblichen Cabriolet-Fahrzeugen wird durch das in der Öffnungsstellung verstaubare faltverdeck fast immer das Kofferraumvolumen stark beeinträchtigt, wodurch seine eigentliche Nutzung als Gepäckablage kaum noch vorhanden ist. Vor allem kommt das bei Verdecklösungen vor, bei denen alle festen Verdeckabschnitte inklusive einer starren Heckscheibe verstaut werden müssen. Ein vergleichbares Stoffverdeck würde aufgrund der sperrigen starren Heckscheibe und des Gestänges ebenfalls genügend Platz im Kofferraum beanspruchen. Der klappbare Kofferraumdeckel hat normalerweise nur die Funktion einer Abdeckung des Kofferraums und des Verdecks.

Insbesondere bei festen Verdeckabschnitten, die besonders unflexibel beim Verstauen sind, bietet die Möglichkeit den festen Verdeckabschnitt in eine Kofferraumdeckelaufnahme oder Kassette einzuschieben eine sehr praktikable Lösung. Damit wird erheblich Platz im Kofferraum gespart. Wie in Figur 9 gezeigt, wird beim Öffnen des Verdecks der feste Dachabschnitt 5 mittels Führungen (Einschiebeführungsteile), die vom Frontscheibenrahmen 2 zunächst gelöst werden und die an dem hinteren Fensterrahmen 37 angelenkt sind, zum Heck des Fahrzeugs bewegt. Die Einschiebeführungsteile werden um einen Winkel über den Frontscheibenrahmen 2 angehoben, wobei sich der hintere Fensterrahmen 37 um ein Gelenk 9 nach hinten dreht. Der Kofferraumdeckel 6 wird entsprechend in die Verschiebebahn R angehoben. Durch das Anheben der Führungen um einen Winkel α , schiebt sich der Dachabschnitt 5, ähnlich einem Schiebdach, entlang der

Führungen bis dieser ganz in dem Aufnahmeraum des Kofferraumdeckels 6 eingefahren ist. In dem Aufnahmeraum des Kofferraumdeckels 6 sind zum besseren Bewegen des Dachabschnitts 5 ebenfalls Führungen (Aufnahmeführungsteile) vorgesehen. Diese müssen in der Übergabesituation des Dachabschnitts 5 mit den außenliegenden Einschiebeführungsteilen wie zwei Schienen aneinander fluchten. Ein Versatz würde die Dachbewegung unterbrechen.



Figur 9: Teilansicht des Verschiebevorgangs eines festen Dachteils in eine Kofferraumdeckelkassette nach Art eines Schiebedachs (DE 1 580 067 A).

Die vorgestellte Verdeckkonstruktion bietet den Vorteil, dass durch die Aufnahme des Dachabschnitts im Kofferraumdeckel die Zugänglichkeit zum Kofferraum relativ gebräuchlich bleibt. Der Kofferraumdeckel baut nicht zu sehr nach innen auf, so dass das Kofferraumvolumen wenig abnimmt. Um darüber hinaus Gewicht zu sparen, kann sowohl der bewegbare Dachabschnitt als auch der ganze Kofferraumdeckel aus leichteren Materialien, wie Kunststoffen, hergestellt werden.

5 Fazit und Ausblick

Die hier vorgestellten Verstaumöglichkeiten von faltbaren Verdecken können nur einen kleinen Einblick über die Vielfalt an ausgefallenen Lösungen geben. Sie können als Ideengeber für künftige neue Fahrzeugkonzepte, insbesondere bei solchen mit neuen Antriebsarten, fungieren.

Cabriolets haben, wie aufgezeigt, fast immer das Dilemma, das sich ergibt, wenn es um die Belegung des Kofferraums mit dem Verdeck geht. Solange das Verdeck geschlossen bleibt ist der Kofferraum voll nutzbar. Allerdings ist gerade beim Fahren eines Cabriolets die

Idee offen zu fahren vorherrschend. Wird das Verdeck eingefaltet und muss es im Kofferraum verstaut werden, wird fast das ganze Kofferraumvolumen benötigt. Das Gepäck kann nicht oder kaum eingepackt werden. Oft werden dann Lösungen für das Gepäck gefunden, wie das Festschrauben von Ständern auf dem Heckdeckel zum Festzurren des Gepäcks. Das solche Lösungen sehr unschön sind, weil sie die „schöne Linie“ mit niedrigerem Heckbereich stören, ist vorgegeben. Hierbei wird nicht nur die Silhouette und Aerodynamik des Fahrzeugs gestört, sondern bei Wind und plötzlich einsetzendem Regen wird auch das ganze Gepäck in Mitleidenschaft gezogen. Eine weitere Möglichkeit das Gepäck einfach auf die Rücksitze zu verstauen stellt auch keine praktikable Lösung dar, da die zweite Sitzreihe nicht als Gepäckablage gemacht worden ist.

Durch den verschiedenartigen Aufbau der Verdecke ergeben sich automatisch erhebliche Unterschiede diese zu verstauen. Das Stoffverdeck bietet den Vorteil, dass es je nach Material günstiger sein kann als die Hartschalenverdecke oder Klappdächer. Es kann durch den viel einfacher faltenden Bezugstoff platzsparender untergebracht werden. Dabei hat es weniger Gewicht, was die Handhabung durch die Insassen leichter macht und damit den Komfort steigert. Damit besteht die Option diese sogar von Hand zu öffnen und zu verstauen, was wiederum teure und schwere Antriebe erübrigt.

Bei Hartschalenverdecken verhält es sich teilweise umgekehrt. Die festen Dachteile des Verdecks sind allgemein schwerer als Stoffe, da sie meist aus Blech oder Aluminium sind. In neuerer Zeit wurden auch glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) verwendet. Sie benötigen aufwändigere Gestängemechanik und Steuerungselektronik, da sie prinzipiell automatisch über Motoren oder hydraulische Antriebe bewegt werden [3]. Dies macht solche Verdecke komfortabel, aber das bringt auch mehr Gewicht ins Fahrzeug. Cabriolets mit solchen Verdecken eignen sich sehr gut das ganze Jahr über gefahren zu werden, denn bei geschlossenem Verdeck ist der Wind- und Wetterschutz besser und wenn zum Beispiel Schnee gefallen ist, sogar mehr Stabilität gegeben [1]. Solch ein Verdeck beeinflusst aber auch direkt das Gesamtgewicht des Fahrzeugs, was sich dann durch einen erhöhten Kraftstoffverbrauch auswirkt.

Die gezeigten Verdecklösungen zeigen, dass unterschiedliche Konzepte, Techniken und Formgebungen basierend auf den Grundtypen der Stoff- und Hartschalenverdecke oft miteinander kombiniert und damit in Einzelösungen weitergedacht werden können. So entstanden neue Aufbauvarianten, welche auf spezielle Lösungen hinzielten. Den Kombinationsmöglichkeiten sind wenig Grenzen gesetzt. Neue Fahrzeugarten bringen in Zukunft auch neue Karosserielösungen mit sich, wie sie sich bei neuen Hybrid- und Elektrofahrzeugen ergeben. Auch die autonomen Fahrzeuge entsprechen in vielen Punkten nicht mehr der Urform. Überkreuzverbindungen (englisch: „crossover“) von Fahrzeugtypen zeigen sich wenn zum Beispiel Geländefähigkeit und offenes Fahren kombiniert werden sollen, wie beispielsweise beim Range Rover Evoque Cabrio. Dann werden die Vorgaben für das faltbare Verdeck von neuen Randbedingungen bestimmt, wie dem Einsatz im Gelände [5].

Es ist stark zu beobachten, dass der Trend bei Cabriolets immer weiter in Richtung größer, offener und multifunktionseller geht. Dabei wird der zukünftige Ansatz neben den mechanisch-konstruktiven Verfeinerungen in der Verdeckarchitektur, zusätzlich durch einen vermehrten Einsatz an Materialien wie Aluminium, Magnesium oder Carbon geprägt sein [4].

Der Leichtbau wird eine ganz essenzielle Rolle in künftigen Fahrzeugentwicklungen spielen. Die Konzeption von neuen Fahrzeugen und Verdecklösungen wird sich ändern: „Wir müssen anfangen, Autos nicht mehr so zu konzipieren wie in der Vergangenheit“ stellte auf dem Automobil Industrie Leichtbau-Gipfel 2021 in Würzburg Ex-Audi-Entwicklungschef Peter Mertens fest [6]. So wurde beispielsweise bei der Konzipierung des neuen Mercedes-AMG SL Cabriolets konsequent die Leichtbau-Strategie verfolgt. „Herausfordernde Vorgaben bei Package, Gewicht und Leichtbau, Steifigkeit und Festigkeit“ waren ausschlaggebend, so dass resultierend „kein einziges Bauteil vom Vorgänger-SL übernommen“ wurde. „Die Quersteifigkeit konnte um 50 Prozent im Vergleich zum AMG GT Roadster gesteigert werden und die Längssteifigkeit um 40 Prozent“, was als großer Erfolg gewertet werden kann. Das neue Verdeck wurde als Stoffverdeck entwickelt und es wurde „21 Kilogramm leichter als das vom Vorgänger und steht dem beim Komfort um nichts nach.“ [6].

Insbesondere werden sich künftige Verdeckkonzepte an zukünftige Randbedingungen anpassen müssen, wenn Cabriolets mit Elektroantrieb versehen werden und das Gewicht aufgrund von Batterien eine noch größere Rolle spielen wird. Fragen zur Verwindungssteifigkeit der Karosserie bei batteriebetriebenen Fahrzeugen mit offenem Verdeck müssen ebenso behandelt werden wie eine neue Platzknappheit im Kofferraum für das zu verstauende Verdeck, wenn größere Akkus zur Steigerung des Aktionsradius verbaut werden. Vor diesem Hintergrund können ausgefallene Lösungen, wie sie in Kapitel 3 dieses Artikels vorgestellt wurden, einen neuen Beitrag leisten.

Nicht-Patentliteratur

- [1] CabrioVerdeck – Freiheit beim Fahren mit dem Cabrio!; URL: <https://www.autoteileprofi.de/ratgeber/cabrioVerdeck-3143/> [recherchiert am 14.10.2021]
- [2] SCHRADER, H: Cabrio-Klassiker aus neun Jahrzehnten, 1. Auflage. 2000, Stuttgart, Motorbuchverlag, S. 8 bis 108. – ISBN 3-613-02029-7
- [3] Cabrio-Verdeck – die Mechanik im Detail; URL: <https://www.autoscout24.at/informieren/ratgeber/kfz-technik/cabrio-verdeck-die-mechanik-im-detail/> [recherchiert am 14.10.2021]
- [4] Innovative Dachkonzepte für neue Crossover-Cabrio-Generationen; URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03223487> [recherchiert am 17.11.2021]
- [5] Karosserievarianten – wie unterscheiden Sie sich?; URL: <https://www.pkw.de/ratgeber/autokauf/karosseriebauformen> [recherchiert am 17.11.2021]
- [6] Brauchen eine radikale Umkehr des Geschäftsmodells; URL: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/brauchen-eine-radikale-umkehr-des-geschäftsmodells-a-1076054/?cmp=nl-99&uuid=> [recherchiert am 17.11.2021]
- [7] Gera Chronik – Zu Traugott Golde und seinem Werken in Gera; URL: <http://www.chronik-gera.de/www/gerahistorie/chronik/details.htm?id=117B2B3C5CF&sf1=&sf2=&suchparam=> [recherchiert am 11.08.2022]

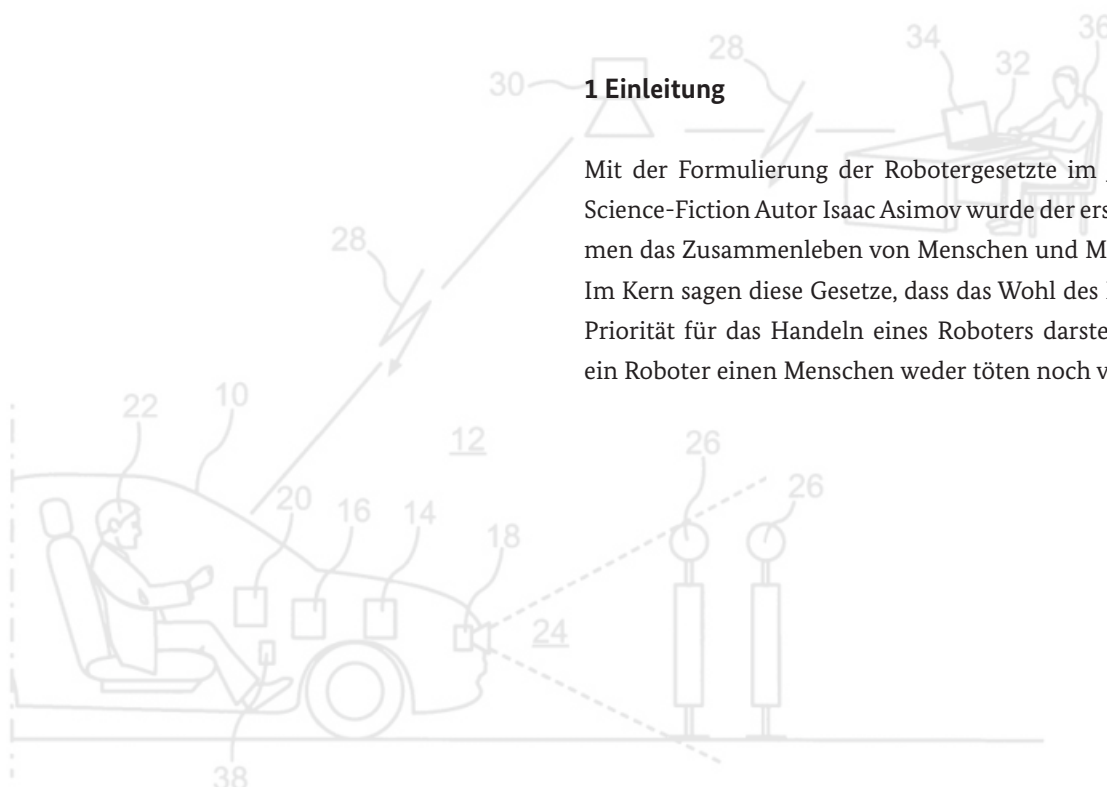
Mensch und Künstliche Intelligenz – Schnittstellen in Fahrzeugen

Dr. Wilfried Domainko, Patentabteilung 1.56

Über den Autor

Dr. Wilfried Domainko promovierte an der Universität Innsbruck in Astrophysik. Danach war er mehrere Jahre am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg im Bereich der bodengebundenen Gammastrahlenastronomie tätig. Im DPMA prüft Dr. Domainko derzeit Patentanmeldungen, unter anderem in den Bereichen Mensch-Maschine-Interaktionen sowie Antriebsstrangsteuerungen im Zusammenhang mit autonomen Fahren und Fahrerassistenzsystemen.

Das Steuern eines Fahrzeugs kann für die Fahrerinnen und Fahrer durchaus zu einer herausfordernden Tätigkeit werden. Zukünftig wird die fahrzeugführende Person dabei möglicherweise von einer Künstlichen Intelligenz (KI) unterstützt werden. Fahroperationen könnten dann zusätzlich zu Pedalerie und Lenkrad auch noch mittels einer Vielzahl von gegenständlichen oder virtuellen Eingabemöglichkeiten gesteuert werden. Entsprechende Fahrzeuge bieten auch die weitere Fähigkeit sich zusätzlich zu den Fahraufgaben auch um das Wohlbefinden ihrer Insassinnen und Insassen zu kümmern. Generell könnte damit ein deutlicher Komfortgewinn für den Menschen erzielt werden. Die Erkennung des antizipierten Fahrmanövers oder der Befindlichkeit der Insassinnen und Insassen kann im Rahmen einer solchen Mensch-Maschine-Interaktion sowohl bewusst als auch unbewusst für die beteiligten Personen erfolgen. Intelligente Fahrzeuge müssen dabei jedoch vermutlich als eigenständige Akteure verstanden werden, die ein komplexes Verhalten zeigen können. Die Interaktion zwischen menschlichen und künstlich intelligenten Akteuren, mit den jeweils entsprechend ausgebildeten komplexen Verhaltensmustern, kann zu einer gegenseitigen Beeinflussung und Manipulation führen. Zukünftig müssen daher passende Regeln für die Zusammenarbeit von Menschen und Maschinen gefunden werden.



Mit der Formulierung der Robotergesetze im Jahre 1942 durch den Science-Fiction Autor Isaac Asimov wurde der erste Versuch unternommen das Zusammenleben von Menschen und Maschinen zu regeln [1]. Im Kern sagen diese Gesetze, dass das Wohl des Menschen die höchste Priorität für das Handeln eines Roboters darstellt. Entsprechend darf ein Roboter einen Menschen weder töten noch verletzen.

Durch den zunehmenden Einsatz von KI haben Maschinen ein immer komplexeres Verhalten entwickelt [2]. Maschinen können dabei sogar typische menschliche Verhaltensweisen oder Charaktereigenschaften imitieren. Beispielsweise kann ein Roboter Rücksicht auf einen Menschen in seiner Nähe nehmen [3]. Entsprechend vielschichtig kann sich daher eine Mensch-Maschine-Interaktion gestalten. Diese Tatsache muss natürlich bei einer Regelung des Zusammenlebens von Menschen und Maschinen berücksichtigt werden. Computer sollten daher im Rahmen der Mensch-Maschine-Interaktion mehr als eigenständige Akteure und weniger als einfache technische Geräte verstanden werden.

Ein Straßenverkehr mit sowohl menschengesteuerten als auch selbstfahrenden Fahrzeugen ist ein Feld mit besonders intensiven Mensch-Maschine-Interaktionen. Durch die dabei auftretenden schnellen Bewegungsabläufe müssen auch sicherheitskritische Situationen geregelt werden [4]. In diesem Artikel werden Erfindungen aus der Patentliteratur zur Zusammenarbeit von Menschen und einer Künstlichen Intelligenz im Straßenverkehr vorgestellt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Betrachtung der Maschinen als eigenständige Akteure gelegt werden.

2 Kommunizieren

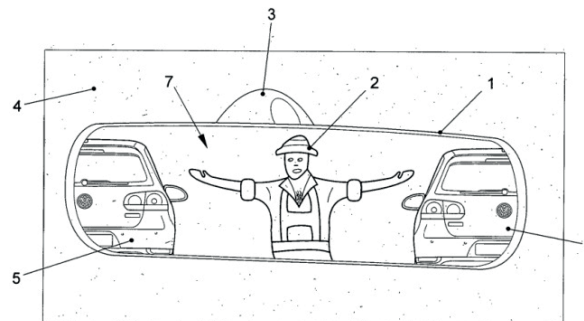
Eine einfache Form der Interaktion zwischen Menschen und Maschinen ist die Kommunikation. Die Initiative zur Informationsmitteilung kann dabei von unterschiedlichen Akteuren ausgehen.

2.1 Fahrzeug kommuniziert mit Insassinnen und Insassen

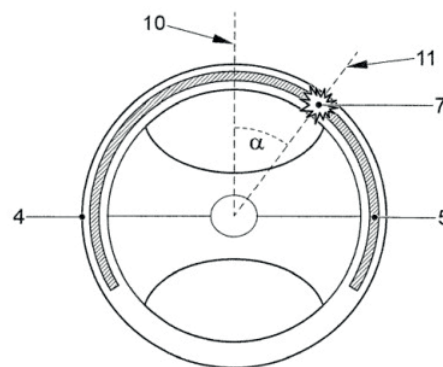
Im ersten Fall initiiert das Fahrzeug die Kommunikation. Dies kann beispielsweise zur Bereitstellung von Informationen zu zukünftigen Fahrsituationen erfolgen. Eine Fahrsituation, die typischerweise besonderes Geschick

erfordert, ist das Einparken. Entsprechend zeigt die **DE 10 2012 015 002 A1**, dass ein Fahrzeug mittels eines virtuellen Parklotsen die fahrzeugführende Person über die optimale Einparkbewegungsbahn informiert (Figur 1).

Das Fahrzeug kann die fahrzeugführende Person aber auch über bevorstehende eigene Aktionen in Kenntnis setzen. Insbesondere bei selbstfahrenden Autos ist eine frühzeitige fahrzeugseitige Ankündigung von geplanten Fahrmanövern von besonderer Bedeutung. Der Grund hierfür ist, dass die fahrzeugführende Person bei der Auswahl von zukünftigen Fahrmanövern nicht involviert ist, und daher von diesen überrascht werden könnte. Die **DE 10 2018 214 975 A1** beschreibt hierzu eine optische Anzeige einer zukünftigen Beschleunigung. Informationen zu zukünftigen Fahrmanövern können auch akustisch über Sprachnachrichten erfolgen, wie die **DE 10 2016 220 562 A1** zeigt. Im Falle von antizipierten Richtungsänderungen können diese Informationen auch mittels Leuchtsignaturen am Lenkrad bereitgestellt werden (**DE 10 2017 100 005 A1** siehe Figur 2).

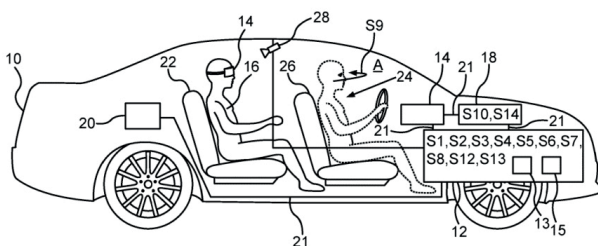


Figur 1: Virtueller Parklotse in einem Rückspiegel aus der DE 10 2012 015 002 A1.



Figur 2: Anzeigen einer geplanten Fahrtrichtungsänderung durch ein Beleuchtungssignal an einem Lenkrad in einem selbstfahrenden Fahrzeug (DE 10 2017 100 005 A1).

Die Informationsbereitstellung in Fahrzeugen kann über fortgeschrittene Anzeigensysteme erfolgen, wie beispielsweise einer visuellen [5] oder fühlbaren [6] virtuellen Realität. Analog schlägt die **DE 10 2017 221 191 A1** den Einsatz einer erweiterten Realität vor. Dabei wird im Blickbereich der fahrzeugführenden Person die reale Umwelt mit virtuellen Elementen, die sich scheinbar außerhalb des Fahrzeugs befinden, angereichert. Zur Information von Personen im Fahrzeug zeigt die **DE 10 2017 211 748 A1** wiederum ein Hologramm einer fahrzeugführenden Person, die die manuelle Ausführung eines bevorstehenden Fahrmanövers symbolisiert (Figur 3). In der **US 2018 / 0 029 610 A1** wird der fahrzeugführenden Person ein zukünftiges autonomes Fahrmanöver, das mit einem bestimmten Risiko verbunden ist, auf einer Anzeige vorgespielt. Danach kann dann die fahrzeugführende Person entscheiden, ob sie dieses Fahrmanöver zur Durchführung freigeben will oder nicht.

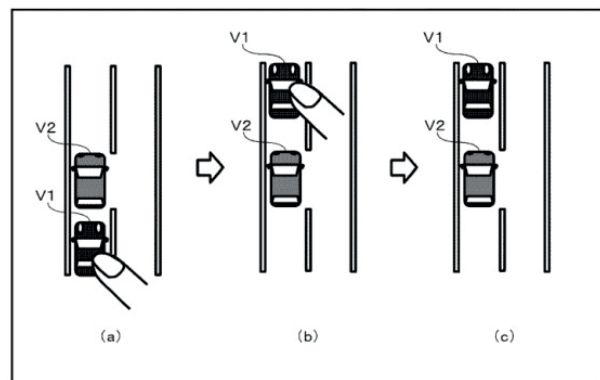


Figur 3: Anzeigen eines zukünftigen Fahrmanövers mittels einer virtuellen fahrzeugführenden Person aus der **DE 10 2017 211 748 A1**.

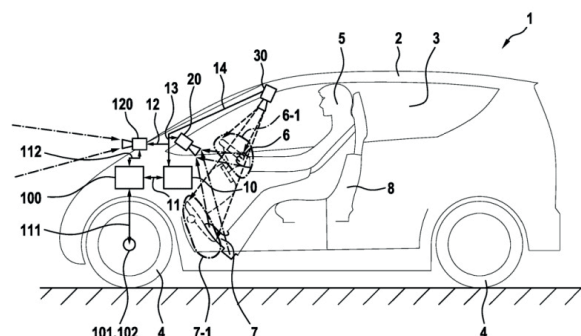
Die Kommunikation des Fahrzeugs mit dem Menschen kann auch die aktuelle Situation berücksichtigen. Beispielsweise zeigt die **WO 2016 / 202 450 A1** die Information einer fahrzeugführenden Person durch das Fahrzeug mittels eines Avatars, wobei der Avatar dabei die Stimmungslage der fahrzeugführenden Person berücksichtigt. Gemäß der **DE 10 2017 121 378 A1** kann wiederum das Fahrzeug sein Kommunikationsverhalten entsprechend einer Bedrohungslage von außen anpassen. Schließlich kann entsprechend der **DE 10 2018 203 745 A1** das Fahrzeug eigenständig die Bereitstellung einer häufig gezeigten Information auch unterdrücken um die fahrzeugführende Person nicht zu verärgern.

2.2. Mensch kommuniziert mit Fahrzeug

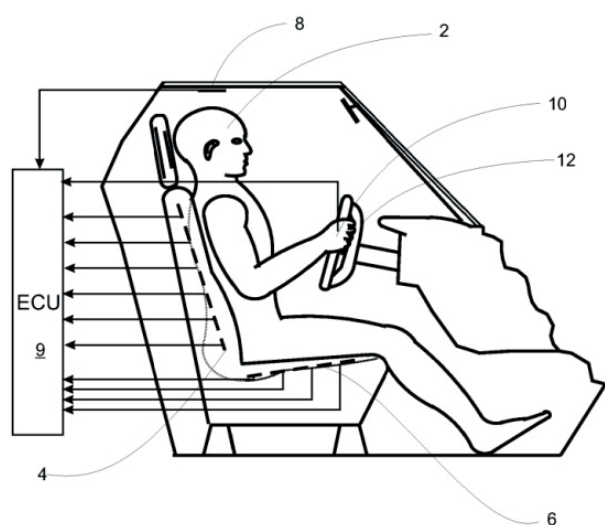
Im zweiten Fall startet die fahrzeugführende Person die Kommunikation mit einem Fahrzeug. Diese Variante wird auch bei klassischen Fahroperation durch Bedieneingaben mittels des Lenkrads oder der Pedalerie gewählt. Zusätzlich zu den erwähnten klassischen Bedienelementen gibt es noch eine Vielzahl von alternativen Möglichkeiten zur Eingabe von Fahrbefehlen. So beschreibt beispielsweise die **DE 10 2014 222 528 A1** ein in einem Sicherheitsgurt integriertes Bedienelement. Noch komfortabler ist die Auslösung einer Fahroperation mittels eines Berührbildschirms wie die **DE 10 2013 213 039 A1** und die **DE 11 2016 003 496 T5** zeigen (Figur 4). Exemplarisch kann dabei ein Überholmanöver mittels Wischen auf dem Bildschirm gestartet werden. Alternativ dazu können Fahrzeuge auch mittels der Blickrichtung der fahrzeugführenden Person (**DE 10 2007 049 710 A1**), durch Gestensteuerung, Sprachbefehle (**DE 10 2016 125 280 A1**, **DE 10 2016 219 795 A1** siehe Figur 5) oder sogar über ein virtuelles Kontrollelement (**DE 10 2017 211 521 A1**) gesteuert werden.



Figur 4: Initiieren eines autonomen Überholmanövers auf einem berührungsempfindlichen Display (**DE 11 2016 003 496 T5**).



Figur 5: Gestensteuerung aus der **DE 10 2016 219 795 A1**.

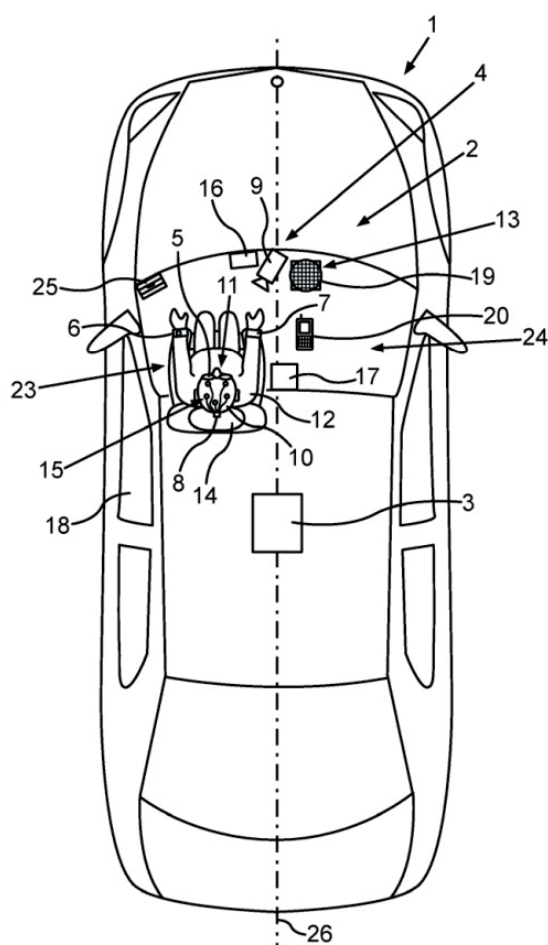


Figur 6: Sensoren in einem Fahrersitz aus der WO 2015 / 174 963 A1.

Eine Informationsbereitstellung von einer fahrzeugführenden Person an ein Fahrzeug kann aber auch unbewusst erfolgen. Beispielsweise könnte der Zustand der fahrzeugführenden Person durch Sensoren im Fahrersitz erfasst werden, wie die **WO 2015 / 174 963 A1** (Figur 6) und die **DE 11 2013 005 660 T5** zeigen. Alternativ dazu beschreibt die **US 2017 / 0 151 959 A1** eine Ermittlung von Gesundheitsdaten der fahrzeugführenden Person durch intelligente Ohrstöpsel. Die **DE 10 2015 224 836 A1** geht noch etwas weiter und schlägt die Steuerung bestimmter Fahrzeugfunktionen mittels eines medizinischen Implantats vor. Schließlich zeigen die **DE 10 2015 122 245 A1** und die **DE 10 2017 217 812 A1** einen Informationsaustausch zwischen einer fahrzeugführenden Person und einem Fahrzeug über eine Gehirn-Computer-Schnittstelle [7].

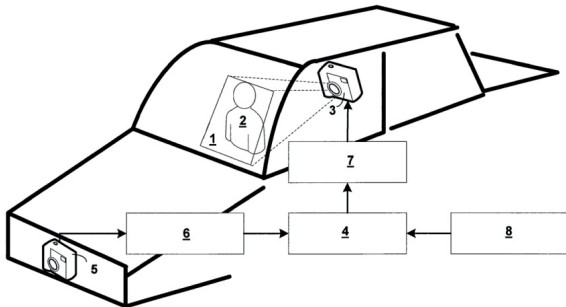
2.3 Kommunikation mit Dritten

Im Straßenverkehr kommt es auch zur Kommunikation zwischen einer fahrzeugführenden Person und verschiedenen Personen außerhalb des Fahrzeugs. Beispielsweise können durch Handzeichen oder Blickkontakte Passantinnen und Passanten die Absicht der fahrzeugführenden Person erkennen. Um diesen Informationsaustausch zu unterstützen, schlägt die **DE 10 2013 001 258 A1** vor, die Farbe der Scheinwerfer des Fahrzeugs an die Stimmungslage der fahrzeugführenden Person anzupassen. Unbesetzte autonom fahrende Fahrzeuge könnten andere am Straßenverkehr teilnehmende Personen erschrecken oder ängstigen. Als Abhilfe hierfür beschreibt die **DE 10 2014 221 821 A1** die Projektion einer virtuellen Person auf den Fahrersitz (Figur 8). Bei unbesetzten autonom fahrenden Fahrzeugen wird ein Informationsaustausch über Blickkontakte oder Handzeichen nicht durchgeführt und für andere am Straßenverkehr Teilnehmende ist es daher in der Regel schwieriger die Absicht des Fahrzeugs zu erkennen. Auch hier gibt es verschiedene Vorschläge zur Kommunikation zwischen einem selbstfahrenden Fahrzeug und Dritten [8]. Die **DE 10 2014 110 958 A1** zeigt dabei die Versendung einer Informationsnachricht auf das Mobiltelefon einer zu Fuß passierenden

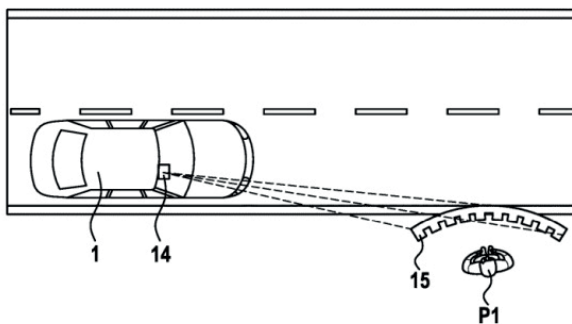


Figur 7: Gehirn-Computer-Schnittstelle aus der DE 10 2015 122 245 A1.

Person. Alternativ dazu schlagen die **DE 10 2014 226 254 A1** und die **US 9 196 164 B1** vor, eine Information für Fußgängerinnen und Fußgänger vom Fahrzeug aus auf die Straße zu projizieren (Figur 9).

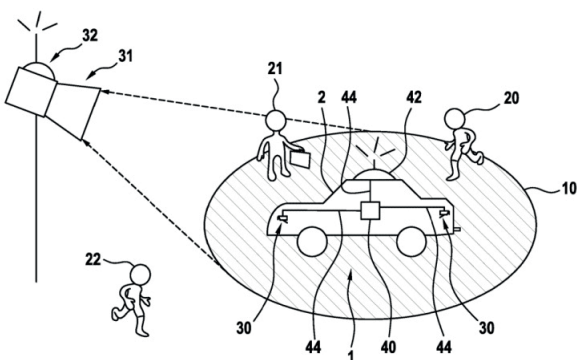


Figur 8: Projektion einer virtuellen Person auf einen Fahrersitz (DE 10 2014 221 821 A1).



Figur 9: Projektion von Informationen auf eine Straße (DE 10 2014 226 254 A1).

Autonom fahrende Fahrzeuge können auch selbsttätig Passagierinnen und Passagiere abholen oder aufnehmen. Eine Herausforderung für eine Künstliche Intelligenz dabei ist, die berechtigten Personen als solche zu erkennen. Die **US 2017 / 0 300 053 A1** zeigt hierzu die Identifikation der richtigen Person mittels einer Kombination von



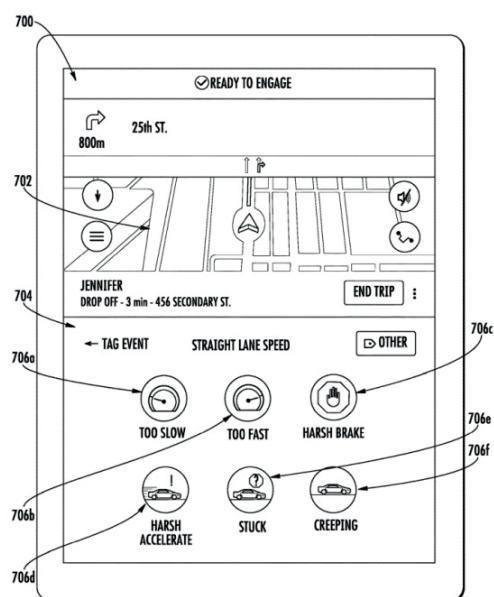
Figur 10: Erkennen der berechtigten Person anhand eines Gangprofils (DE 10 2016 210 140 A1).

Mobiltelefon- und Sensorsignalen. In der **DE 10 2016 210 140 A1** wird vorgeschlagen die berechtigte Person anhand eines Gangprofils zu erkennen (Figur 10).

3 Lehren und Lernen

3.1 Mensch lehrt das Fahrzeug

Maschinen wissen natürlich nicht von sich aus, welches erfolgversprechende Lösungen für ein bestimmtes Problem sind und können entsprechend auch getäuscht werden [9] [10]. Einem Computer müssen daher typischerweise in einem Trainingsschritt von Menschen die Grundzüge von guten Lösungen quasi erklärt werden. Menschen können also den Maschinen bewusst verschiedene Verhaltensweisen beibringen [11]. Wenn Maschinen auf gute Lösungen trainiert sind, können sie dann in ähnlichen Situationen eigenständig entsprechend reagieren. Umgelegt auf den Straßenverkehr, könnte der Mensch beispielsweise einem selbstfahrenden Auto beibringen, eine bessere „Fahrerin“ beziehungsweise ein besserer „Fahrer“ zu werden [12]. In der Patentliteratur gibt es hierzu verschiedene Vorschläge, wie durch menschliche Rückmeldungen das Fahrverhalten eines autonomen Fahrzeugs verbessert werden kann. In der **DE 10 2014 013 960 A1** und in der **DE 10 2015 210 428 A1** beurteilt eine menschliche Person die Leistung eines selbstfahrenden Autos. In ähnlicher Weise schlägt die **US 2018 / 0 365 913 A1** vor, im Falle eines Fehlers einer automatischen Steuerung ein Fehlerprotokoll aufzunehmen (Figur 11). Die betroffenen Fahrzeuge können dann basierend auf diesen Bewertungen ihre Fahrleistung verbessern. Die **DE 10 2015 103 568 A1** wiederum beschreibt ein Fahrzeug, dass sich entsprechend der Vorgabe einer Person eigenständig an örtliche Fahrtrends in einem bestimmten geographischen Bereich anpasst. Selbstfahrende Autos müssen faktisch in jeder denkbaren Situation korrekt und sicher reagieren können. Zum Testen und in weiterer Folge Verbessern deren Fahrverhaltens werden in der **DE 10 2016 220 670 A1** schließlich Arbeitsaufträge an eine weltweit verteilte Flotte an autonomen Fahrzeugen vergeben. Mit dieser Vorgehensweise können sehr unterschiedliche Fahr-situation erfasst werden.

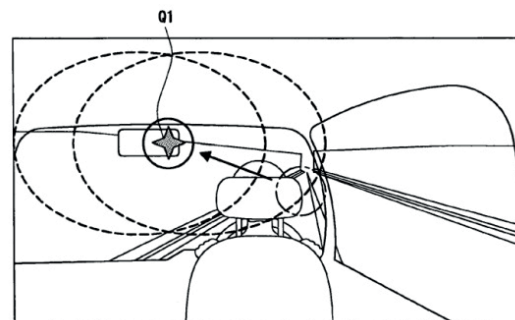


Figur 11: Aufnahme eines Fehlerprotokolls einer automatischen Fahrzeugsteuerung (US 2018 / 0 365 913 A1).

3.2 Fahrzeug lernt vom Menschen

Menschen müssen nicht notwendigerweise bewusst einem autonomen Fahrzeug bestimmte Kenntnisse beibringen. Als Alternative hierzu könnte das Fahrzeug auch den Menschen beobachten und dadurch beispielsweise das Fahrverhalten einer das Fahrzeug nutzenden Person erlernen [13]. In diesem Szenario ist die Person sich nicht bewusst, dass die Maschine gerade von ihr lernt. Als ersten Schritt kann dabei ein Fahrzeug durch bildbasierte Beobachtung der fahrenden Person deren Zustand erkennen, wie die **DE 10 2014 201 036 A1** zeigt. Entsprechend kann der Konzentrationsgrad oder der Gemütszustand der fahrenden Person mittels Blickrichtungsverfolgung (**US 7 450 016 B2** siehe Figur 12) oder Gesichtsausdruckserkennung (**US 7 301 464 B2**) bestimmt werden. Als ein weiterer Schritt können dann vom Fahrzeug die Fahrerinnen- beziehungsweise Fahrerperformance (**US 2016 / 0 362 118 A1**) oder die bevorzugten Fahrtrassen einer das Fahrzeug nutzenden Person erlernt werden (**DE 10 2013 104 855 A1**). Ein Fahrzeug, das die Vorlieben einer bestimmten Person erkannt hat, kann in einem vollautonomen Modus sein eigenes Fahrverhalten auf die Person personalisiert abstimmen (**DE 10 2017 011 027 A1**).

Eine sehr gute Kenntnis des Verhaltens eines bestimmten Menschen durch eine Maschine kann prinzipiell auch zu



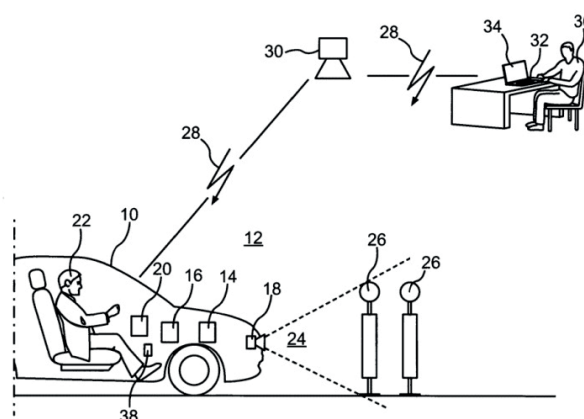
Figur 12: Blickrichtungsverfolgung (US 7 450 016 B2).

einer weitreichenden Fahrzeug- oder Verkehrssteuerung genutzt werden. So könnte das Fahrzeug beispielsweise das weitere Fahrverhalten einer Nutzerin oder eines Nutzers vorhersagen (**US 7 805 240 B2**) oder möglicherweise sogar Gesetzesbrüche erkennen (**US 2017 / 0 132 917 A1**).

4 Unterstützen

4.1 Gegenseitige Unterstützung

In einer kooperativen Fahrzeugsteuerung können sich auch Menschen und selbstfahrende Fahrzeuge gegenseitig unterstützen. Diese Unterstützung kann natürlich in beide Richtungen erfolgen. In der ersten Richtung kann beispielsweise ein autonomes Fahrzeug im Bedarfsfall von einer entfernten menschlichen, das Fahrzeug bedienenden Person Hilfe anfordern und wird dann entsprechend mittels einer Fernbedienung unterstützt (**US 2016 / 0 167 653 A1**). Dies ist besonders relevant für den Fall, wenn eine Fahrsituation von der autonomen Steuerung nicht mehr alleine bewältigt werden kann wie die **DE 10 2016 013 971 A1** zeigt (Figur 13).

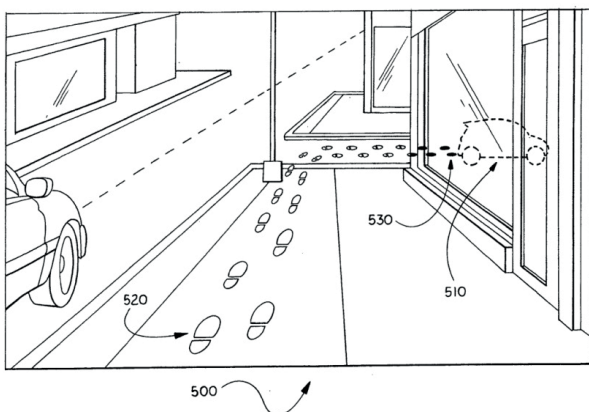


Figur 13: Fernsteuerung eines Fahrzeugs in einer Fahrsituation, die das selbstfahrende Fahrzeug nicht mehr selbst bewältigen kann (**DE 10 2016 013 971 A1**).

In der zweiten Richtung kann ein intelligentes Fahrzeug eine fahrzeugführende Person situationsabhängig und bedarfsgerecht unterstützen (US 7 386 371 B2). Beispielsweise können bestimmte Fahrfunktionen (DE 10 2009 026 833 A1) oder die Mensch-Maschine-Kommunikation (US 2016 / 0 288 708 A1), auf die Bedürfnisse der fahrzeugführenden Person abgestimmt, angepasst werden. Durch diesen personalisierten Betrieb eines Fahrzeugs kann ein deutlicher Komfortgewinn für die Fahrerin oder den Fahrer erzielt werden.

4.2 Komfort- und Sicherheitsgewinn für den Menschen

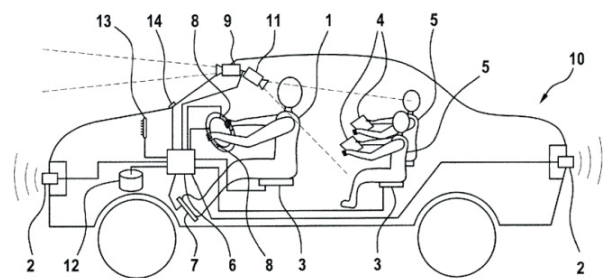
Eine Möglichkeit ein Fahrerlebnis für eine ein autonomes Fahrzeug nutzende Person zu verbessern, ist eine erweiterte Darstellung der Realität. Diese zusätzlichen Sinneseindrücke können eine das Fahrzeug nutzende Person sowohl unterhalten als auch in ihren Fahraufgaben assistieren (DE 10 2016 120 425 A1). Alternativ hierzu könnte eine fahrende Person auch mittels eines virtuellen Objekts in Form eines Hologramms erheitert und unterstützt werden (DE 10 2016 208 095 A1). Fahrzeuge können auch Personen, die sich außerhalb des Fahrzeugs befinden, eine Hilfestellung bieten. Beispielsweise kann eine Person mittels einer erweiterten Realität zu einem Abholungsort eines Fahrzeugs geleitet werden, wie die DE 10 2017 111 843 A1 zeigt (Figur 14).



Figur 14: Eine Person wird mittels einer erweiterten Realität zum Abholungsort eines Fahrzeugs geleitet (DE 10 2017 111 843 A1).

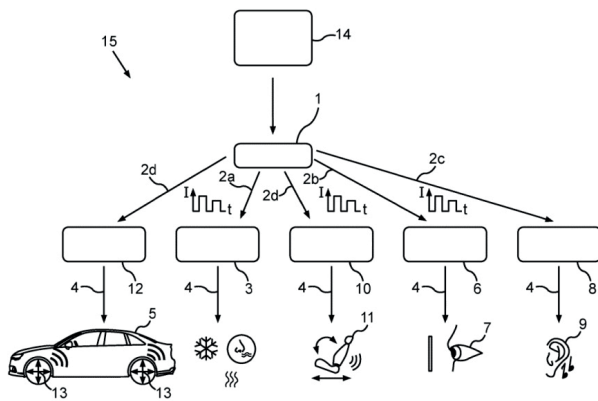
Eine Künstliche Intelligenz kann zur Verbesserung einer Fahrleistung auch unbemerkt eine Stimmung im Fahrzeug regulieren [14]. Exemplarisch zeigt die DE 10 2015

210 782 A1 eine Ermittlung einer kognitiven Belastung einer fahrzeugführenden Person (Figur 15). Als Reaktion auf eine erhöhte Belastung kann dann eine Unterstützung der Person durch ein Assistenzsystem angepasst werden. Entsprechend kann eine autonome Fahrfunktion passend zu der Stimmungslage (DE 10 2015 220 237 A1) oder der nachgegangenen Nebentätigkeit einer fahrzeugführenden Person (DE 10 2016 219 122 A1) betrieben werden. Beispielsweise könnte das Fahrzeug bei einer gestressten fahrzeugführenden Person eine defensive Fahrweise wählen oder bei einer anstrengenden Nebentätigkeit der Person, wie etwa Bildschirmarbeit, die gewählte Fahrzeugbeschleunigung niedriger ansetzen. Diese stressreduzierenden Maßnahmen müssen nicht notwendigerweise auf ein einzelnes Fahrzeug begrenzt sein. So schlägt die WO 2014 / 046 602 A1 vor eine Kolonnenfahrt nach dem Gemütszustand der beteiligten fahrzeugführenden Person zu steuern.

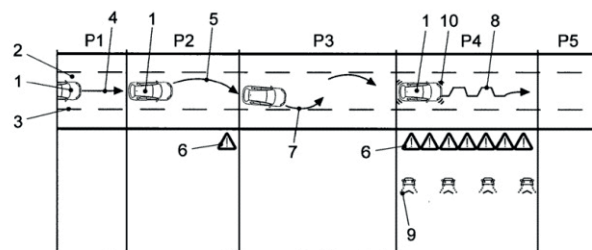


Figur 15: Bestimmung einer kognitiven Belastung in einem Fahrzeug aus der DE 10 2015 210 782 A1.

Müdigkeit einer fahrzeugführenden Person kann im Straßenverkehr immer wieder zu kritischen Situationen führen. Um dieser Gefahr entgegen zu wirken kann ein Fahrzeug das Müdigkeitslevel einer fahrzeugführenden Person bestimmen und kontrolliert beeinflussen (DE 10 2017 200 601 A1 siehe Figur. 16). Entsprechend zeigt auch die DE 10 2013 009 424 A1 das Aufwecken einer fahrzeugführenden Person mittels eigenständiger zyklischer Bewegungen eines Fahrzeugs (Figur 17). Vollständig autonome Fahrzeuge können, um die Fahrt für Passagierinnen und Passagiere so angenehm wie möglich zu gestalten, aber auch für ein bequemes Einschlafen sorgen. Die DE 10 2016 224 205 A1 beschreibt hierzu eine Schaukelbewegung eines Fahrzeugs zur Beeinflussung der Einschlafphase.



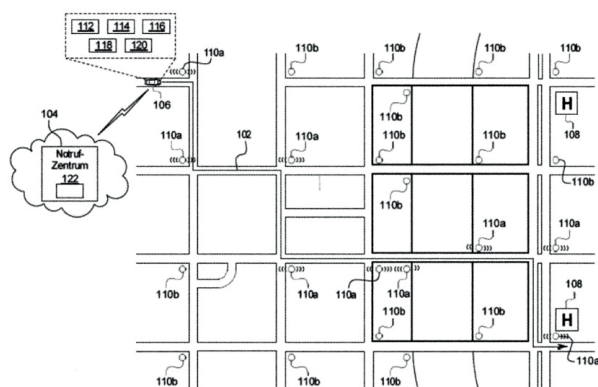
Figur 16: Kontrollieren des Müdigkeitslevels einer fahrzeugführenden Person aus der DE 10 2017 200 601 A1.



Figur 17: Aufwecken einer fahrzeugführenden Person durch zyklische Bewegungen des Fahrzeugs (DE 10 2013 009 424 A1).

4.3 Eigenständige Aktionen der Maschine

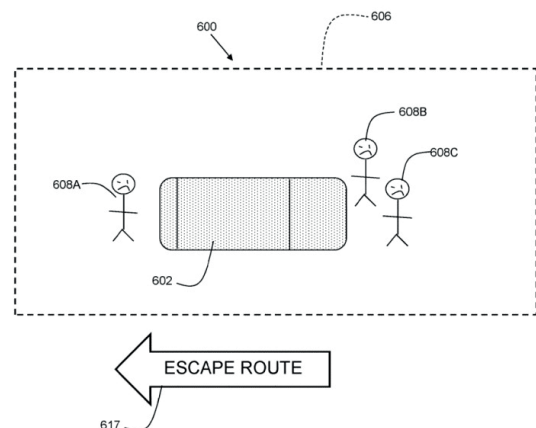
Vollautonome Fahrzeuge sind in der Lage eigene Aktionen durchzuführen, wenn die Nutzerin oder der Nutzer entweder nicht anwesend oder nicht reaktionsfähig ist. Beispielsweise könnte ein solches Fahrzeug in einem medizinischen Notfall eine in Fahrzeug befindliche Person eigenständig zu einem Krankenhaus bringen,



Figur 18: Ein autonomes Fahrzeug bringt im Falle eines Notfalls eine im Fahrzeug befindliche Person selbstständig zu einem Krankenhaus (DE 10 2017 113 129 A1).

wie die DE 10 2014 217 453 A1 und die DE 10 2017 113 129 A1 zeigen (Figur 18). Ein autonomes Fahrzeug könnte auch von sich aus die Notwendigkeit eines Umparkmanövers erkennen und dieses durchführen, wenn die Fahrerin oder der Fahrer nicht anwesend ist (DE 10 2017 203 036 A1). Die Fahrerin oder der Fahrer kann dabei über das erfolgte Fahrmanöver über ein mobiles Endgerät unterrichtet werden.

Autonome Fahrzeuge müssen jedoch auch entsprechend reagieren können, wenn sich Personen nähern oder einsteigen, die eine Gefahr darstellen könnten. So kann etwa ein autonomes Fahrzeug bei erkannter sich nähernder Bedrohung selbstständig wegfahren (DE 10 2017 114 122 A1, US 2018 / 0 143 642 A1 siehe Figur 19). Wenn sich nicht berechnete Personen oder Objekte bereits im Fahrzeug befinden, könnte ein selbstfahrendes Fahrzeug auch eigenständig zum nächsten Polizeirevier navigieren um die potentiell gefährliche Fracht von den zuständigen Behörden untersuchen zu lassen (DE 10 2016 116 910 A1).

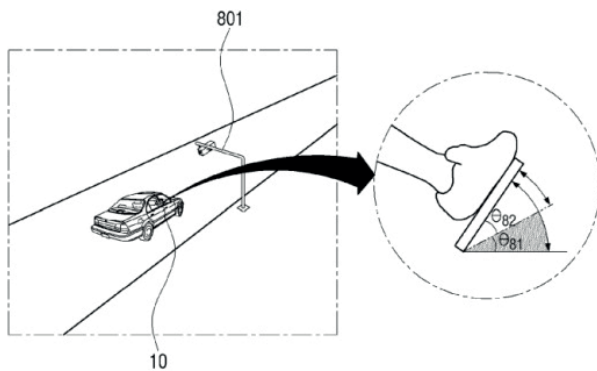


Figur 19: Fahrzeug flüchtet eigenständig von einer Bedrohung (US 2018 / 0 143 642 A1).

5 Kontrollieren

Wenn autonome Fahrzeuge als eigenständige Akteure handeln können, muss auch geklärt werden, welche Aktionen durchgeführt werden, wenn Mensch und Maschine unterschiedlich entscheiden würden. Das Ziel sollte hierbei sein eine gefährliche Nutzung eines autonomen Fahrzeugs zu verhindern. Um dem Gefühl eines Kontrollverlustes durch die fahrzeugführende Person

entgegenzuwirken, schlägt die **DE 10 2014 220 758 A1** dabei vor, während einer autonomen Fahrt ein manuelles Fahrmanöver zuzulassen, wenn die Umfeld- und Verkehrserfassung ein solches Fahrmanöver erlauben. Alternativ dazu zeigt die **US 2017 / 0 235 305 A1**, dass im Falle des Wunsches der fahrzeugführenden Person nach Kontrollrückgabe, der fahrzeugführenden Person nur begrenzte, situationstaugliche Bedienoptionen zurückgegeben werden (Figur 20). Die **DE 10 2015 120 831 A1** beschreibt ebenfalls eine Zusammenführung von Personenwunsch und selbstfahrender Steuerung, indem sowohl dem menschlichen als auch dem maschinellen Bediensignal ein individuelles Gewicht gegeben wird und die Steuerung basierend auf diesen Gewichtungen als Überlagerung der beiden Signale erfolgt.

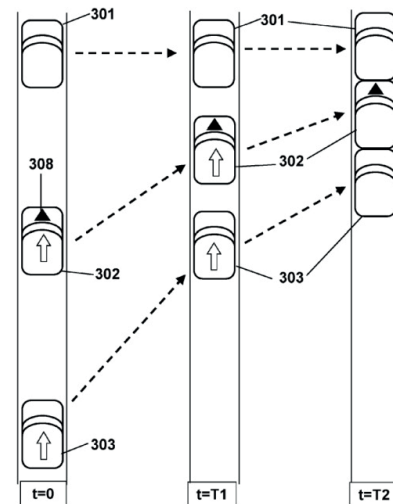


Figur 20: Rückgabe von einer begrenzten Bedienfunktionalität eines Gaspedals aus der **US 2017 / 0 235 305 A1**.

Es gibt auch einige Fälle, in denen eine Steuerung eines Fahrzeugs durch eine KI einer Steuerung durch einen Menschen vorzuziehen ist. Insbesondere bei einem Notfall oder dem Verdacht einer unautorisierten oder unangemessenen Nutzung [15] durch einen Menschen könnten vom intelligenten Fahrzeug eigenständige Fahrmanöver durchgeführt oder der fahrzeugführenden Person die Kontrolle entzogen werden.

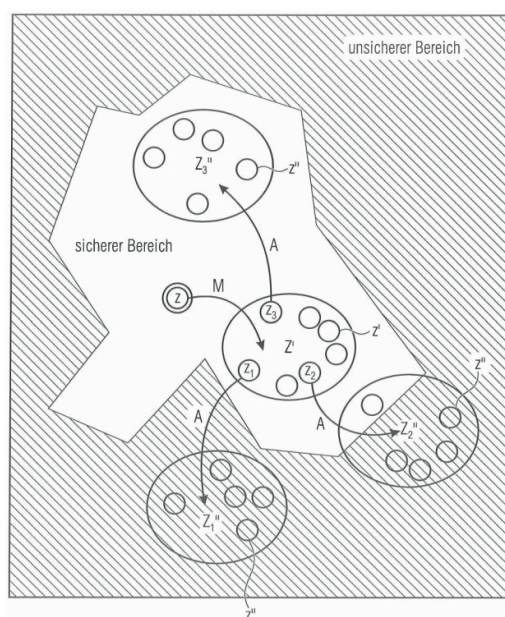
Entsprechend kann eine KI eigenständig die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen, beispielsweise, um eine drohende Kollision zu vermeiden (**DE 10 2014 201 720 A1**). Analog könnte das Fahrzeug auch in bestimmten Situationen, wie etwa bei einem medizinischen Notfall (siehe auch Abschnitt 4.3), selbsttätig dem Menschen die Kontrolle entziehen (**DE 10 2014 206 960 A1**). Um die Auswirkungen eines abrupten maschinengesteuerten

Fahrmanövers auf den umliegenden Verkehr möglichst gering zu halten, zeigt die **US 2017 / 0291 602 A1** noch die Berücksichtigung einer Gefahrenfortpflanzung auf benachbarte Fahrzeuge (Figur 21).



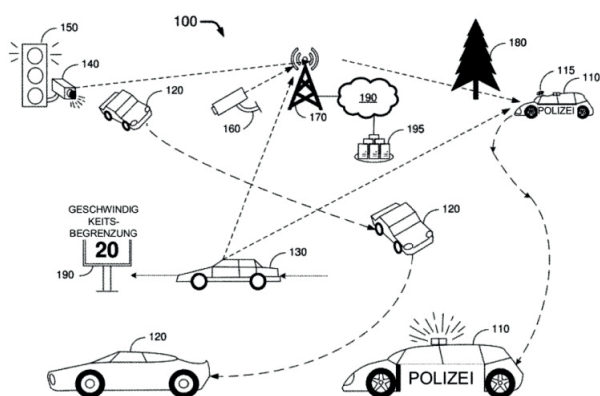
Figur 21: Berücksichtigung einer Gefahrenfortpflanzung bei der Übernahme der Fahrzeugsteuerung durch ein automatisches Steuersystem im Falle eines abrupten Bremsmanövers (**US 2017 / 0 291 602 A1**).

In selbstfahrenden Autos müssen auch dafür Vorkehrungen getroffen werden, dass unautorisierte Personen, wie beispielsweise Kinder, nicht die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen können. Beispielsweise beschreibt die **DE 10 2014 205 830 A1** eine Verhinderung einer Kontrollübernahme über ein autonomes Fahrzeug durch nichtautorisierte Personen. In besonders kritischen Fahrsituationen könnte einer fahrzeugführenden Person auch jegliche Eingriffsmöglichkeit auf das Fahr geschehen untersagt werden, wie die **DE 10 2013 013 867 A1** zeigt. Schließlich kann eine gefährliche Nutzung von Fahrzeugen durch eine fahrzeugführende Person, wie beispielsweise das Überschreiten einer Dynamikgrenze einer Kurve, von einem intelligenten Fahrzeug auch gänzlich unterbunden werden (**DE 10 2018 220 752 B3** siehe Figur 22). Um kriminelle oder terroristische Anschläge zu verhindern, schlägt die **DE 10 2017 211 026 A1** wiederum vor, dass eine Freigabe eines selbstfahrenden Fahrzeugs nur dann erfolgt, wenn sich keine gefährliche Fracht, wie beispielsweise Sprengstoffe im Fahrzeug befinden.

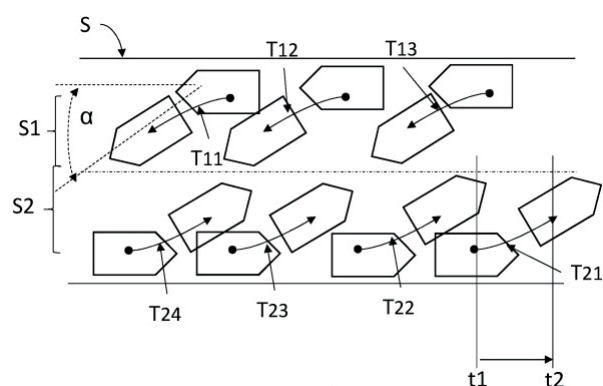


Figur 22: Definieren von sicheren und unsicheren Bereichen von Fahrparametern. Bei einem Fahrmanöver ändern sich die aktuell sicheren Fahrparameter des Fahrzeugs in diesem Diagramm. Ein Betrieb eines Fahrzeugs in einem unsicheren Bereich durch eine fahrzeugführende Person wird von der autonomen Steuerung verhindert (DE 10 2018 220 752 B3).

Zum Abschluss dieses Abschnitts sollen noch zwei Erfindungen vorgestellt werden, bei denen eine KI bestimmte Kontrollaufgaben innerhalb der Zivilgesellschaft übernimmt. Beispielsweise beschreibt die **DE 10 2017 115 309 A1** ein besatzungslos agierendes Polizeifahrzeug (Figur 23). Die **DE 10 2018 203 483 A1** wiederum zeigt die Bildung einer Straßensperre durch eine Vielzahl an autonomen Fahrzeugen (Figur 24). Damit könnte ein abzubremsendes Fahrzeug am Weiterfahren gehindert werden.



Figur 23: Autonomes Polizeifahrzeug aus der DE 10 2017 115 309 A1.



Figur 24: Bildung einer Straßensperre durch autonome Fahrzeuge. Dadurch kann die Weiterfahrt eines abzubremsenden Fahrzeugs verhindert werden (DE 10 2018 203 483 A1).

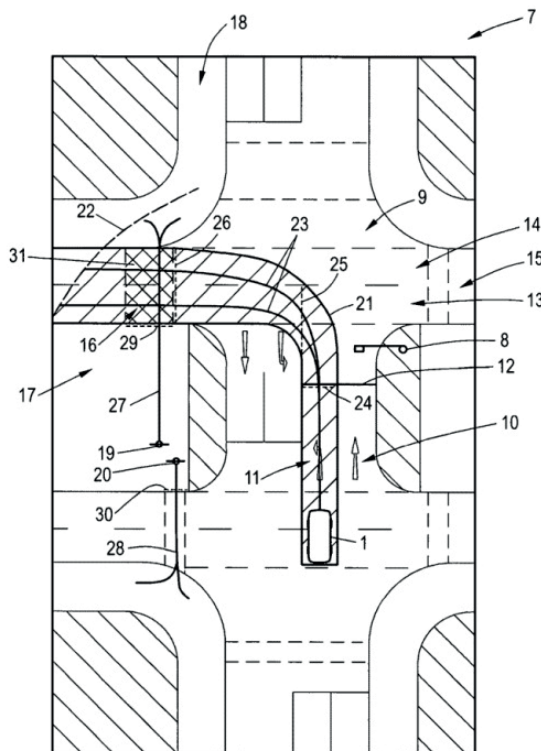
6 Konditionieren, Manipulieren

Mit einer KI ausgestattete Fahrzeuge zeigen typischerweise ein sehr komplexes Verhalten. Eine Interaktion von derartigen Fahrzeugen mit Menschen wird in vielen Fällen in einer gegenseitigen Beeinflussung resultieren [16]. In manchen Fällen kann das zu einer Reiz-Reaktions-Assoziation bei den Akteuren führen. Diese Konditionierung kann natürlich wieder in beide Richtungen erfolgen.

6.1 Mensch konditioniert Maschine

Eine Konditionierung einer Maschine durch den Menschen ist die intuitiv näherliegende Richtung dieser Mensch-Maschine-Interaktion [17]. Beispielsweise ist bei selbstlernenden Fahrzeugen eine bewusste Konditionierung der Maschine durch den Menschen mittels entsprechendem Training des Algorithmus möglich. Hier extrahiert der Computer beim Maschinellen Lernen statistische Muster aus den beispielegebenden Eingangsdaten und optimiert damit seinen Entscheidungsalgorithmus. Die **DE 10 2018 100 469 A1** und die **DE 10 2017 208 692 A1** beschreiben eine Konditionierung von selbstfahrenden Fahrzeugen durch simulierte Trainingsdaten, die die Maschine anleiten, wie sie in einer fraglichen Situation reagieren sollte.

Bei selbstlernenden Fahrzeugen besteht hier allerdings auch die Gefahr einer problematischen Beeinflussung des Verkehrsgeschehens. Zur Verdeutlichung dieses Problems stelle man sich folgende Situation vor: Ein zumindest halbautonomes Fahrzeug ist mit einem Notbremsassistenten (beispielsweise **DE 10 2010 006 214 A1**) ausgerüstet, der das Fahrzeug abbremst, wenn eine Person plötzlich auf die Straße tritt. Das Fahrzeug merkt sich dann diese Situation und fährt bei jeder Anwesenheit von Fußgängerinnen oder Fußgängern nur noch in Schrittgeschwindigkeit um im Bedarfsfall entsprechend schnell zum Stillstand kommen zu können. Zusätzlich kommuniziert das betroffene Fahrzeug diese Verkehrssituation an eine Vielzahl benachbarter Fahrzeuge, die sich dann auch analog verhalten. Als Resultat würde der gesamte betroffene Verkehr dadurch deutlich abgebremst werden. In diesem Szenario hätte eine unachtsame oder bewusst störende zu Fuß passierende Person dann den gesamten umliegenden Verkehr manipuliert oder konditioniert [2]. In der Patentliteratur gibt es verschiedene Ansätze um die Wahrscheinlichkeit einer solchen nachteiligen Beeinflussung des Verkehrs zu verringern. Beispielsweise zeigt die **DE 10 2008 027 509 A1** eine prognostische Bewertung von möglichen zukünftigen Verkehrssituationen basierend auf Realunfalldaten.



Figur 25: Situationsanalyse für eine Verkehrsumgebung aus der **DE 10 2016 007 899 A1**.

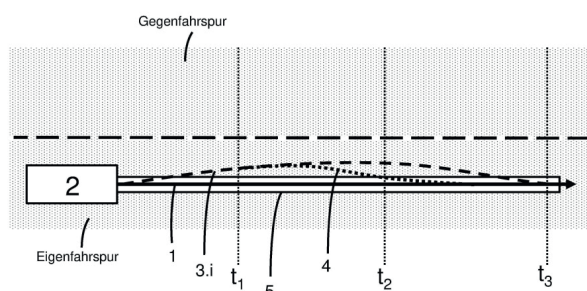
Die **DE 10 2016 007 899 A1** wiederum beschreibt eine Verkehrssituationsanalyse zur Reduzierung von unzutreffenden Kollisionswarnungen (Figur 25). Entsprechende Verkehrssituationsanalysen basieren oft auf Bewegungsvorhersagen von anderen am Straßenverkehr teilnehmenden Personen, die auf deren Bewegungshistorien beruhen. Die notwendigen Bewegungshistorien hierzu, insbesondere von Fußgängerinnen und Fußgängern, können beispielsweise mittels Radarsensoren (**DE 10 2016 213 254 B3**) oder durch Nachverfolgung von Mobilfunksignalen der entsprechenden Verkehrsteilnehmenden (**DE 10 2017 008 492 A1**) gewonnen werden.

6.2 Maschine konditioniert Menschen

Autonome Fahrzeuge können aber auch ihre Nutzerinnen und Nutzer zu bestimmten Verhaltensweisen erziehen. Beispielsweise könnten selbstfahrende Fahrzeuge ihre Fahrerinnen oder Fahrer veranlassen ihre Aufmerksamkeit trotz der autonomen Fahrt dauerhaft auf das Fahrgeschehen zu richten. Exemplarisch kann sich eine automatische Fahrzeugsteuerung unangekündigt ausschalten, um die fahrzeugführende Person immer in einem fahrübernahmebereiten Zustand zu halten (**DE 10 2012 205 675 A1**). Alternativ schlägt die **DE 10 2015 013 319 A1** vor, dass ein autonomes Fahrzeug die fahrzeugführende Person mittels eines Computerspiels auf die Übernahme von Fahraufgaben vorbereitet.

Mit einer KI ausgestattete Fahrzeuge können aber auch ihre Fahrerinnen und Fahrer in Richtung einer unfallfreieren Fahrweise beeinflussen (**US 10 222 228 B1**). Eine Verhaltensänderung der fahrzeugführenden Person kann dabei mittels Belohnungs- oder Bestrafungsmaßnahmen (**DE 11 2018 000 443 T5**) wie beispielsweise unangenehmer aber sicherheitsunkritischer Fahrmanöver initiiert werden (**DE 10 2018 213 970 A1** siehe Figur 26) oder mittels unterbewussten Reize (**DE 10 2010 048 822 A1**), wie beispielsweise Veränderung einer Innenraumtemperatur, einer Innenraumbeleuchtung einer Gurtstraffung oder mittels Geruchswahrnehmungen

erfolgen. Diese unterbewussten Reize könnten auch an die individuelle Wahrnehmungsschwelle der fahrzeugführenden Person angepasst werden (DE 10 2018 125 939 A1). Problematisch könnte hier jedoch werden, dass die fahrzeugführende Person nicht mehr in allen Situationen die Gründe ihres Handelns nachvollziehen kann.



Figur 26: Konditionieren einer fahrzeugführenden Person durch eine für die Person unangenehmes, aber unkritisches Fahrmanöver (DE 10 2018 213 970 A1).

7 Ausblick

Eine intensive Interaktion zwischen Menschen und Maschinen könnte bei den betroffenen Nutzerinnen und Nutzern unter bestimmten Voraussetzungen das Gefühl einer Beobachtung oder Bevormundung erzeugen. Da der Einsatz von KI die Sicherheit im Straßenverkehr jedoch deutlich erhöhen kann, sollte versucht werden hier eine entsprechende Akzeptanz bei den Nutzerinnen und Nutzern zu schaffen. Notwendig wäre dabei eine generelle Nachvollziehbarkeit der Aktionen der Maschinen. Hier könnte die Künstliche Intelligenz beispielsweise die Gründe für ihr Handeln den involvierten Menschen erklären [18]. Eine erhöhte Akzeptanz könnte auch durch einen erzielten Komfortgewinn für die beteiligten Menschen erreicht werden. Verschiedene rechtliche und technische Aspekte zum Umgang mit einer KI sollten dabei jedoch berücksichtigt werden.

7.1 Rechtliche Aspekte und Roboterethik

Trotz vieler offener Fragen werden KI mittlerweile in rechtlich relevanten Bereichen wie beispielsweise dem Kündigen von Arbeitsverhältnissen [19], Verhaf-

tungen [20] oder aber der Rechtsprechung [21] eingesetzt. Entsprechende Vorschläge finden sich in der Patentliteratur auch für den Straßenverkehr, wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben wurde. Wenn autonome Maschinen operativ als eigenständige Akteure behandelt werden, stellt sich natürlich die Frage nach ihren rechtlichen Status. Generell müsste noch ein Verhaltenskodex für intelligente Maschinen entsprechend einer Roboterethik sowie ein detailliertes Regelwerk zum Zusammenleben von Menschen und Maschinen geschaffen werden [22 23]. Dabei muss auch geklärt werden, wie ähnlich beziehungsweise unterschiedlich Menschen und Maschinen ihre Entscheidungen treffen und handeln [24]. Zu beachten ist, dass Maschinen durch entsprechende Trainingsdaten die Voreingenommenheit und Vorurteile von den mit ihrer Entwicklung betrauten Menschen quasi lernen und übernehmen könnten [25]. Generell muss dann auch entschieden werden, welche Organisationseinheit dafür verantwortlich ist, die Regeln für die Mensch-Maschine-Interaktion aufzustellen und zu exekutieren. Momentan scheint die Entwicklung und die Erstellung von internen Regeln von KI oft von privatfinanzierter Industrie vorangetrieben zu werden [26]. Im Unterscheid dazu werden gesetzliche Regelungen typischerweise von den Staaten selbst erstellt. Eine Klärung dieser Diskrepanz muss in Zukunft natürlich noch gefunden werden.

7.2 Technische Aspekte, Cyborgs

Zentrale Fragestellungen auf der technischen Seite bei der Behandlung von intelligenten Maschinen als eigenständige Akteure sind: Wie intelligent sind Maschinen wirklich [27] und wie leicht kann man ihr Handeln nachvollziehen [28]? Insbesondere eine Vorhersagbarkeit und eine Reproduzierbarkeit der Aktionen einer Maschine sind wichtig für ein Zusammenleben von Mensch und Maschine. Prinzipiell sollte es technisch aber möglich sein, Algorithmen so zu konstruieren, dass ein unerwünschtes Verhalten der Maschinen unterdrückt wird [29]. Jedoch kann es nicht ausgeschlossen werden, dass sich bestehende Algorithmen ungeplant weiterentwickeln. Zum einen könnte das beispielsweise passieren, wenn Maschinen von anderen Maschinen

lernen, analog dazu, wie sie auch von Menschen lernen können [30]. Zum anderen können sich Algorithmen im Rahmen von evolutionären Ansätzen selbsttätig optimieren [31]. Evolutionäre Algorithmen können in einem Mutationsschritt Bestandteile des Mutteralgorithmus zufällig verändern und damit eine Vielzahl an Tochteralgorithmen erzeugen. In einem Selektionsschritt werden dann anhand der Lösung von realen Problemen die erfolgreichsten Tochteralgorithmen daraus ausgewählt. Die solchermaßen gefundenen Tochteralgorithmen werden in weiterer Folge wieder weiteren Mutations- und Selektionsschritten unterzogen. Ein Vorteil von diesem Verfahren könnte sein, dass sich Maschinen ohne das Zutun von Menschen sehr schnell auf unterschiedliche Situationen einstellen können. Hingegen könnte es ein Nachteil sein, dass niemand mehr weiß, wie die handelnden Algorithmen gerade funktionieren und aus welchen mathematischen Bausteinen sie bestehen. Auch bei fortschrittlichen Algorithmen muss demnach eine Absicherung gegen unerwünschtes Verhalten der Maschinen erfolgen.

Um jetzt wieder den Bogen zurück zur Einleitung und zur Science-Fiction Literatur zu schlagen, sollte hier nicht unerwähnt bleiben, dass ein autonomes Fahrzeug mit weitreichenden Mensch-Maschine-Schnittstellen als ein Mischwesen aus Mensch und Künstlicher Intelligenz angesehen werden könnte und damit unter eine erweiterte Definition eines Cyborgs fallen würde. Die Science-Fiction Literatur erzählt sehr divergierende Möglichkeiten einer Interaktion von Menschen mit Cyborgs, die von einem utopischen harmonischen Miteinander bis zu einer dystopischen Kontrollübernahme durch menschlich-technische Hybridwesen reicht [32]. Entsprechend könnte die zukünftige Entwicklung der Menschheit durch die Interaktion mit intelligenten Maschinen geprägt werden.

7.3 Gemeinsame Entwicklung von Mensch und Maschine

Der Patentliteratur nach zu urteilen, könnte es in Zukunft zu einer sich gegenseitig beeinflussenden Entwicklung von menschlichem Verhalten und Maschinenverhalten kommen. Zusätzlich könnten Algorithmen durch ihre Versuche zukünftige Aktionen von Menschen

vorherzusagen auch unsere Vorstellung von der Zukunft verändern [33, 34]. Für eine erfolgreiche Kooperation von Menschen und Maschinen müssen vermutlich bestimmte Randbedingungen geschaffen werden. Beispielsweise sollte den Maschinen eine menschenkompatible Sozialkompetenz beigebracht werden [35–38]. Entscheidend für die weitere Entwicklung wird auch die generelle Philosophie hinter den Mechanismen der Mensch-Maschine-Interaktion sein. Die Europäische Union scheint hier eine vorsichtigere, robustere Regelung anzustreben als andere Akteure, wie beispielsweise die USA oder China. In diesem Sinne könnte eine auf Vertrauen und nicht Angst aufgebaute Regelung die Akzeptanz der Menschen für ein Zusammenleben mit KI erhöhen und dadurch helfen neue Anwendungsgebiete für diese zu erschließen [39].

7.4 Künstliche Intelligenz und Patente

In diesem Artikel wurden Erfindungen zu Mensch-Künstliche Intelligenz-Schnittstellen in Fahrzeugen aus der Patentliteratur vorgestellt. Zum Abschluss soll hier daher noch kurz diskutiert werden, welche Auswirkungen einerseits der Patentschutz auf eine KI und andererseits eine künstliche Intelligenz auf die erfinderische Tätigkeit haben könnte. In die erste Richtung könnten beispielsweise intelligente Maschinen den Patentschutz achten und entsprechend geschützten Stand der Technik nicht in ihre Entscheidungsfindung miteinbeziehen. Dies könnte jedoch eben diese Entscheidungsfindung einseitig beeinflussen [2]. In die andere Richtung könnte eine KI auch als Erfinder auftreten und damit die Richtung der Entwicklung des Standes der Technik mitgestalten [40]. Es ist also durchaus möglich, dass KI in Zukunft auch das Patentwesen verändern werden [41].

8 Danksagung

Der Kollegin Frau Dr. Nina Tetzlaff und dem Kollegen Herrn Dr. Felix Daume wird für ihre Hilfestellungen gedankt.

Nicht-Patentliteratur

- [1] Deng, B.; Machine ethics: The robot's dilemma; Nature 523, 25–26, 2015; URL: <https://www.nature.com/news/machine-ethics-the-robot-s-dilemma-1.17881> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [2] Rahwan, I. et al.; Machine behaviour; Nature 568, 477–486, 2019; URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1138-y> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [3] Pumhösel, A. Roboter nimmt Rücksicht auf Menschen in nächster Nähe, DerStandard online 2020; URL: <https://www.derstandard.at/story/2000118108132/roboter-nimmt-ruecksicht-auf-menschen-in-naechster-naehe> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [4] Bigman, Y. E. & Gray, K., Life and death decisions of autonomous vehicles; Nature 579, E1–E2, 2020; URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-1987-4> Awad, E. et al.; Reply to: Life and death decisions of autonomous vehicles; Nature 579, E3–E5, 2020; URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-1988-3> Tetzlaff, N., Autonome Straßenfahrzeuge, Erfinderaktivitäten 2018/2019; URL: https://www.dpma.de/docs/dpma/veroeffentlichungen/erfinderaktivitaeten/ea_2018_2019.pdf [alle URLs abgerufen am 22.04.2021]
- [5] Service, R. F., See the new Star Wars-like display that could 'revolutionize' virtual reality, Science online 2019; URL: <https://www.sciencemag.org/news/2019/11/see-new-star-wars-display-could-revolutionize-virtual-reality> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [6] Yu, X. et al., Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality; Nature 575, 473–479, 2019; URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1687-0> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [7] Czepele, R., Chip im Gehirn: Was will Elon Musk?; ORF online 2020; URL: <https://science.orf.at/stories/3201592/> Servick, K., Ultrasound reads monkey brains, opening new way to control machines with thought Science online 2021; URL: <https://www.sciencemag.org/news/2021/03/ultrasound-reads-monkey-brains-opening-new-way-control-machines-thought> [alle URLs abgerufen am 15.04.2021]
- [8] Pumhösel, A., Wenn autonome Autos Blickkontakt suchen, DerStandard online 2020; URL: <https://www.derstandard.at/story/2000120020139/wenn-autonome-autos-blickkontakt-suchen>; Heise online 2018, Autonome Autos: Uber will Fußgänger mit Lichtern, Tönen und Hinweisbildern warnen; URL: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Autonome-Autos-Uber-will-Fussgaenger-mit-Lichtern-Toenen-und-Hinweisbildern-warnen-3997890.html> [alle URL abgerufen am 22.04.2021]
- [9] Heaven, D., Why deep-learning AIs are so easy to fool, Nature online 2019, URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03013-5> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [10] Riley, P., Three pitfalls to avoid in machine learning, Nature online 2019, URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02307-y> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [11] Hutson, M. Scientists help artificial intelligence outsmart hackers, Science online 2019, URL: <https://www.sciencemag.org/news/2019/05/scientists-help-artificial-intelligence-outsmart-hackers> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [12] Hutson, M. Scientists teach computers fear – to make them better drivers, Science online 2019, URL: <https://www.sciencemag.org/news/2019/05/scientists-teach-computers-fear-make-them-better-drivers> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [13] Pumhösel, A., Wie künstliche Intelligenz lernt, Bewegungsmuster zu verstehen, DerStandard online 2020, URL: <https://www.derstandard.at/story/2000117981673/wie-kuenstliche-intelligenz-lernt-bewegungsmuster-zu-verstehen> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [14] Lau, J. Sensible KI reguliert unbemerkt die Stimmung im Raum, DerStandard online 2020, URL: <https://www.derstandard.at/story/2000120019025/sensible-ki-reguliert-unbemerkt-die-stimmung-im-raum> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [15] Hutson, M.; AI can now defend itself against malicious messages hidden in speech, Nature online 2019, URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-01510-1> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [16] Czepele, R.; Wenn Roboter Fehler zugeben, ORF online 2020, URL: <https://science.orf.at/stories/3200146/> [URL abgerufen am 15.04.2021]

- [17] Servick, K., Could robots be psychology's new lab rats?, Science online 2019, URL: <https://www.sciencemag.org/news/2019/10/could-robots-be-psychology-s-new-lab-rats> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [18] Coyle, D. & Weller, A., "Explaining" machine learning reveals policy challenges, Science 368, 1433–1434, 2020; URL: <https://science.sciencemag.org/content/368/6498/1433> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [19] Thaler, S., Überwachung am Arbeitsplatz ist in vielen Firmen Realität, DerStandard online 2019, URL: <https://www.derstandard.at/story/2000109453136/ueberwachung-am-arbeitsplatz-ist-in-vielen-firmen-realitaet> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [20] Allen-Ebrahimian, B., Exposed: China's Operating Manuals for Mass Internment and Arrest by Algorithm, ICIJ online 2019, URL: <https://www.icij.org/investigations/china-cables/exposed-chinas-operating-manuals-for-mass-internment-and-arrest-by-algorithm/> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [21] Griesser, D., Künstliche Intelligenz in der Rechtsprechung?, DerStandard online 2020, URL: <https://www.derstandard.at/story/2000117849825/kuenstliche-intelligenz-in-der-rechtssprechung> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [22] Ashrafian, H., Intelligent robots must uphold human rights, Nature, 519, 391, 2015; URL: <https://www.nature.com/news/intelligent-robots-must-uphold-human-rights-1.17167> Crawford, K., Time to regulate AI that interprets human emotions, Nature online 2021, URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-00868-5> [alle URLs abgerufen am 15.04.2021]
- [23] Nature online 2015, Robotics: Ethics of artificial intelligence, URL: <https://www.nature.com/news/robotics-ethics-of-artificial-intelligence-1.17611> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [24] Hecht, J., Managing expectations of artificial intelligence, Nature online 2018, URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07504-9> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [25] ORF online 2020, IBM stößt Gesichtserkennungsdebatte an, URL: <https://orf.at/stories/3168887/> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [26] Benkler, Y., Don't let industry write the rules for AI, Nature, 569, 161, 2019; URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-01413-1> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [27] Hutson, M., Eye-catching advances in some AI fields are not real, Science online, 2020; URL: <https://www.sciencemag.org/news/2020/05/eye-catching-advances-some-ai-fields-are-not-real> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [28] Knight, W.: The Dark Secret at the Heart of AI; MIT Technological Review; publiziert online 2017; URL: <https://www.technologyreview.com/s/604087/the-dark-secret-at-the-heart-of-ai/> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [29] Thomas, P. S., et al.; Preventing undesirable behavior of intelligent machines, Science, Vol. 366, Issue 6468, 999–1004; URL: <https://science.sciencemag.org/content/366/6468/999> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [30] The New York Times online 2020; Computers Already Learn From Us. But Can They Teach Themselves?; URL: <https://www.nytimes.com/2020/04/08/technology/ai-computers-learning-supervised-unsupervised.html> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [31] Gent, E.; Artificial intelligence is evolving all by itself, Science online 2020; URL: <https://www.sciencemag.org/news/2020/04/artificial-intelligence-evolving-all-itself> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [32] Wikipedia; Cyborg; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Cyborg> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [33] Kalluri, P.; Don't ask if artificial intelligence is good or fair, ask how it shifts power, Nature 583, 160, 2020; URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-020-02003-2> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [34] de la Riva, M.; Wie Algorithmen unsere Vorstellung von der Zukunft verändern, DerStandard online 2020, URL: <https://www.derstandard.at/story/2000112999476/wie-algorithmen-unsere-vorstellung-von-der-zukunft-veraendern> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [35] ORF online 2020, Mensch und Maschine im Tandem; URL: <https://science.orf.at/stories/3201495/> [URL abgerufen am 15.04.2021]

- [36] Illetschko, P.; Was wollen wir künstlicher Intelligenz erlauben?, DerStandard online 2020, URL: <https://www.derstandard.at/story/2000120270228/was-wollen-wir-kuenstlicher-intelligenz-erlauben> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [37] Krichmayr, K.; Kognitionsforscher: „Roboter müssen soziale Normen verstehen“, DerStandard online 2020; URL: <https://www.derstandard.at/story/2000121462686/kognitionsforscher-roboter-muessen-soziale-normen-verstehen> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [38] Pumhösel, A.; Wie vertrauenswürdig ist KI?, DerStandard online 2020; URL: <https://www.derstandard.at/story/2000122923720/wie-vertrauenswuerdig-ist-ki> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [39] Wallace, N.; Europe plans to strictly regulate high-risk AI technology, Science online 2020; URL: <https://www.sciencemag.org/news/2020/02/europe-plans-strictly-regulate-high-risk-ai-technology> [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [40] Abbott, R.; The Artificial Inventor Project, WIPO Magazine, 6, 2019; URL: https://www.wipo.int/wipo_magazine/en/2019/06/article_0002.html [URL abgerufen am 15.04.2021]
- [41] DPMA online, URL: <https://www.dpma.de/dpma/veroeffentlichungen/hintergrund/ki/kuenstliche-intelligenzschutzrechte/index.html> [URL abgerufen am 21.04.2021]

Das moderne Auto – eine Wetterstation auf vier Rädern

Dr. Florian Stark, Patentabteilung 1.52

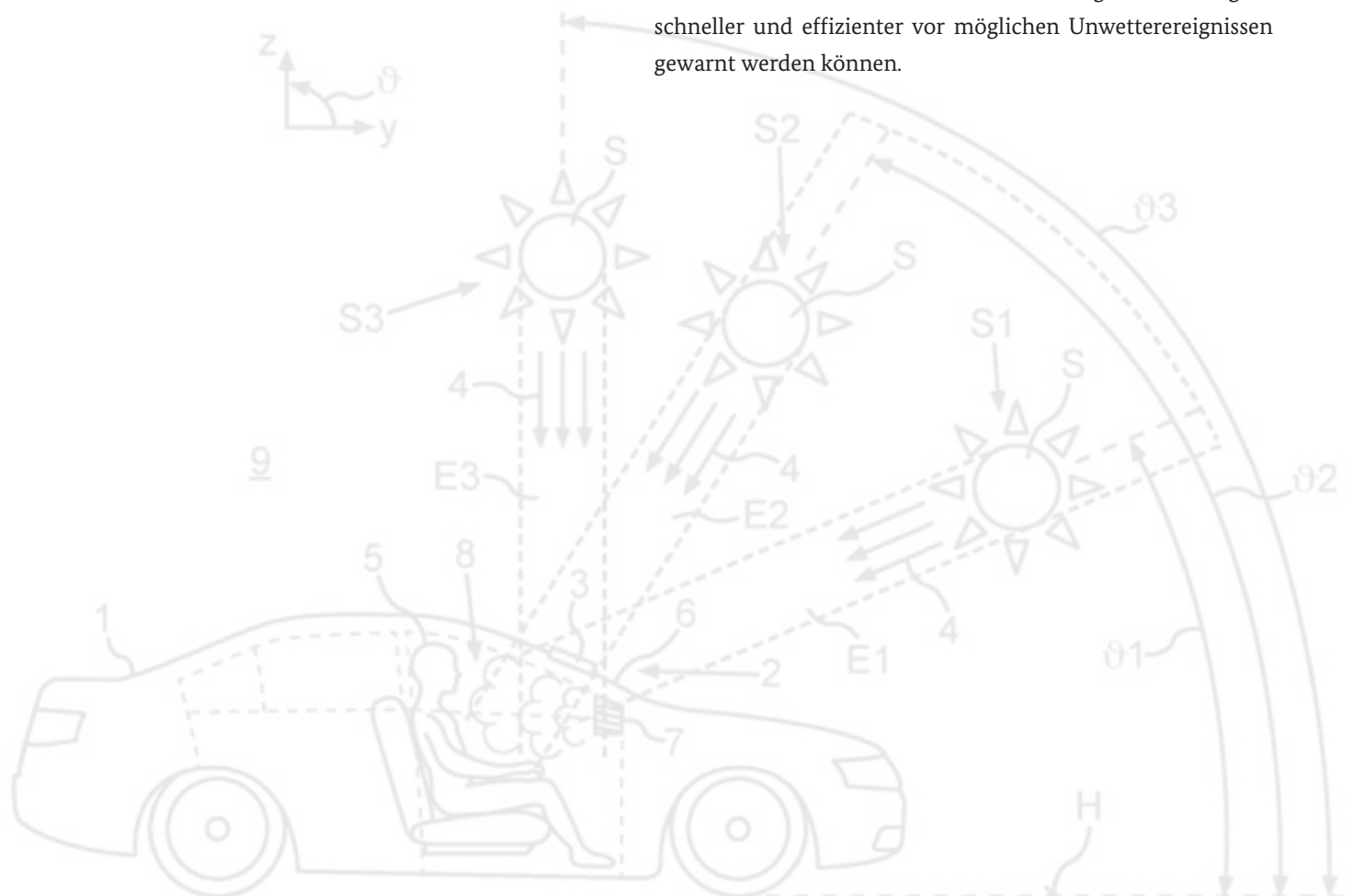
Über den Autor

Dr. Florian Stark studierte an der Ludwig-Maximilians-Universität München und an der University of Liverpool Geophysik, Physik, Geologie und Meteorologie wo er auch 2012 promovierte. Anschließend arbeitete er als Gruppenleiter an der Ingenieur Fakultät Bau Geo Umwelt an der Technischen Universität München.

Seit 2016 ist Dr. Stark im DPMA in der Abteilung 1.52 tätig und leitet dort die Prüfungsstellen für Meteorologie und Temperaturmessungen.

Zusammenfassung

Die Neu- und Weiterentwicklungen von Umweltsensoren, insbesondere von meteorologisch relevanten Sensoren, in Kraftfahrzeugen erhöhen die Fahrperformance und verbessern Sicherheit und Komfort der Insassinnen und Insassen. Auch bereits vorhandene Fahrassistenzsysteme und Aktivierungszustände von Fahrzeugkomponenten werden verwendet, um auf das Wettergeschehen in unmittelbarer Nähe des Kraftfahrzeugs zu schließen. Die vom Kraftfahrzeug gewonnenen meteorologischen Daten bergen darüber hinaus ein enormes Potential, das derzeitige Netz aus meteorologischen Messstationen zu ergänzen. Durch das Sammeln und Übermitteln der von den Kraftfahrzeugen generierten Wetterdaten ist es möglich, Wetterdaten in höherer räumlicher Auflösung bereitzustellen, wodurch im Bedarfsfall andere am Straßenverkehr teilnehmende Personen und auch die Bevölkerung in einer Region schneller und effizienter vor möglichen Unwetterereignissen gewarnt werden können.



1 Einleitung

Zahlreiche Sensoren in unseren Autos machen sie zu fahrenden Messstationen, die Daten aus der Fahrzeugumgebung sammeln und in Echtzeit auswerten. Diese Daten umfassen unter anderem auch wetterrelevante Parameter wie Lufttemperatur, Luftdruck, Wind, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und Strahlungsintensität. Damit solche Parameter möglichst genau und effizient erfasst werden, wurden über die Jahre eigens für das Kraftfahrzeug spezielle Sensoren und Messverfahren entwickelt, um damit nicht nur Klima-, Scheibenwisch- und Lichtanlagen zu steuern, sondern auch um vor Gefahren wie starkem Regenfall, Glätte oder Windböen zu warnen, welche einen erheblichen Einfluss auf das Unfallrisiko haben [1], [2]. Die Warnung durch bord-eigene Systeme kann jedoch meist nur relativ kurzfristig erfolgen, obwohl eine frühzeitigere Voraussage wünschenswert wäre. So können selbst vorausschauende Messinstrumente wie Radar- oder Lasersysteme nur die nächste Umgebung des Fahrzeugs abscannen, wobei dem oder der Fahrenden nur wenige Sekunden zum Reagieren bleiben. Während eine Aktivierung von Beleuchtungs- und Wischanlagen sowie die Verlangsamung des Fahrzeugs in dieser Zeitspanne meist noch möglich ist, ist es für eine alternative Routenwahl, die es zum Beispiel ermöglicht, ein Starkregengebiet zu umfahren, oft zu spät [3]. Externe Wetterdienstleister könnten hier zwar zu einem gewissen Grad abhelfen, indem sie der fahrzeugführenden Person einen Wetterbericht für eine Region zur Verfügung stellen, jedoch ist dieser Wetterbericht oft nicht genau genug – einerseits, weil er auf einem grobmaschigen Sensornetzwerk basiert, andererseits, weil sich die Messstationen oft weit abseits von den befahrenen Straßen befinden. Durch die Verwendung von Autos als mobile Messstationen wird das Sensornetzwerk feinmaschiger und die lokale Wettervorhersage wird entsprechend präziser [4]. Insbesondere steht hierbei die kurzfristige Wettervorhersage, das sogenannte „Nowcasting“, im Vordergrund, wobei das Nowcasting dadurch verbessert wird, dass die Wetterdaten von vielen Fahrzeugen, die sich durch ein bestimmtes Gebiet bewegen, gesammelt und ausgewertet werden. Dies ermöglicht es, andere Autofahrerinnen und Autofahrer rechtzeitig vor einem Unwetter zu warnen [5], [6].

Ziel dieses Artikels ist es zum einen, typische Sensoren und Verfahren vorzustellen, die zum Ermitteln und Sammeln von Wetterdaten im Auto eingesetzt werden und zum anderen, Ideen und Realisierungen dafür aufzuzeigen, wie durch eine Verarbeitung dieser Wetterdaten das Wetterbeobachtungsnetz verbessert werden kann, um das lokale Wettergeschehen genauer vorherzusagen beziehungsweise feststellen zu können.

2 Akquirieren von Wetterdaten

Im folgenden Kapitel werden Patentanmeldungen für typische Vorrichtungen und Verfahren vorgestellt, die in der Lage sind, wetterrelevante Größen für ein Kraftfahrzeug entweder direkt, also durch Sensoren, oder auch indirekt, beispielsweise anhand des Betriebs- oder Aktivierungszustands von Kraftfahrzeugkomponenten, zu ermitteln.

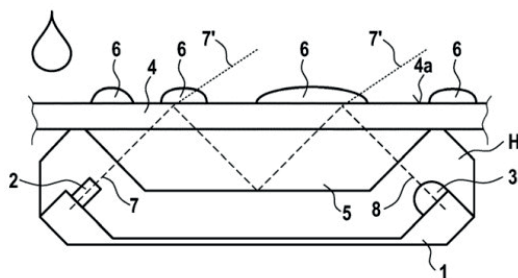
2.1 Erfassen und Klassifizieren von Hydrometeoren

In der Meteorologie werden sämtliche Formen kondensierten Wassers in der Atmosphäre als Hydrometeore bezeichnet. So umfassen diese Hydrometeore unter anderem Regentropfen Schneeflocken, Hagelkörner, Graupel. Eine Ansammlung dieser Hydrometeore wird dann je nach Zustand als Wolke, Nebel, Regen oder Schnee bezeichnet. Diese Ansammlungen beeinflussen, je nach Intensität, die Sicht und die Straßenverhältnisse. Mittlerweile gibt es zahlreiche Sensoren, die dafür eingerichtet sind, solche Ereignisse qualitativ und/oder quantitativ zu bestimmen.

Detektion von Regen und Schneefall

Wenn man an meteorologische Sensoren in Autos denkt, kommen einem vermutlich sofort die klassischen Regensensoren an der Windschutzscheibe in den Sinn. Diese Sensoren nutzen dabei unterschiedliche physikalische Wirkprinzipien. Eines der gängigsten Detektionsverfahren beruht auf einem optischen Sensor, der in der Nähe des Innenspiegels an die Windschutzscheibe montiert ist, wie beispielsweise in den Druckschriften **DE 10**

2013 226 029 A1 und **DE 10 2017 201 030 A1**. Dabei wird normalerweise Infrarotlicht – Infrarotlicht deshalb, weil es dabei zu keinen störenden Lichtreflexen kommt – in die Windschutzscheibe eingespeist. Bei einer trockenen Windschutzscheibe werden diese Lichtstrahlen in der Windschutzscheibe an der Grenze zwischen Außenluft und Scheibe totalreflektiert und in einer Lichtempfangseinheit im Sensor detektiert. Befinden sich Regentropfen oder aufschmelzende Schneeflocken im Bereich des Sensors auf der Windschutzscheibe, so führt dies dazu, dass Teile des eingespeisten Infrarotlichts ausgekoppelt werden (Figur 1), was zu einer entsprechenden Verringerung des im Empfänger detektierten Restlichts führt. Der Betrag des ausgekoppelten Lichts oder auch dessen zeitliche Änderung wird dann als Maß für eine auftreffende Niederschlagsmenge verwendet.

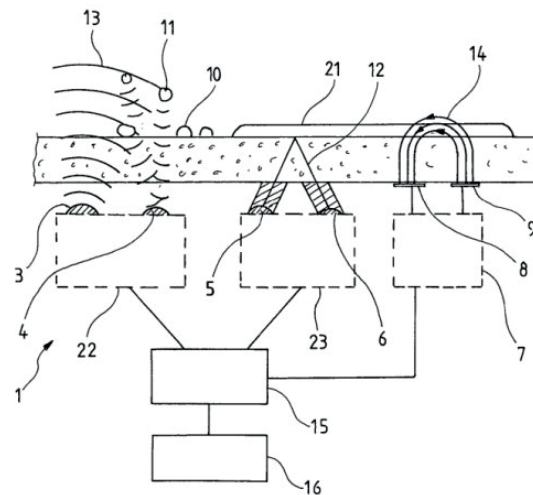


Figur 1: Strahlengang eines an einer Windschutzscheibe angekoppelten Regensensors (DE 10 2013 226 029 A1).

Ein weiteres Messprinzip beruht auf der Messung einer elektrischen Kapazität. Dabei weist ein solcher Sensor beispielsweise zwei elektrisch leitende Flächen auf, die die Flächen eines Kondensators bilden. Befinden sich Regentropfen, Schnee oder Eis auf der Scheibenoberfläche, dann wird dadurch die Kapazität des Kondensators verändert und anhand der Veränderung wird ein entsprechender Niederschlag auf der Scheibe ermittelt.

In der **DE 10 2014 004 451 A1** werden drei Messprinzipien gleichzeitig eingesetzt. Neben einem Totalreflexionssensor und einem kapazitiven Sensor wird auch noch ein Streulichtsensor verwendet (Figur 2). Hier werden elektromagnetische Wellen unter einem möglichst steilen Winkel auf die Windschutzscheibe geleitet, durchdringen die Windschutzscheibe und werden dann an Tropfen, die sich auf oder kurz vor der Scheibe befinden, an Eis oder an anderen Partikeln vor der Windschutzscheibe gestreut. Die so gestreuten elektro-

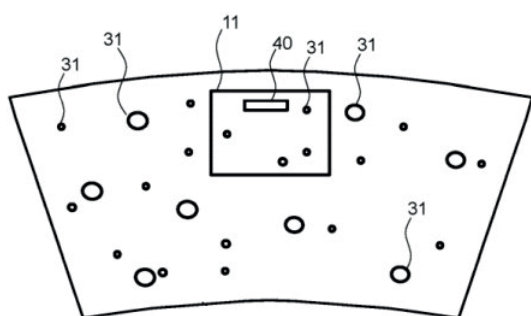
magnetischen Wellen werden dann von einem innen-seitig zur Windschutzscheibe angeordneten Empfänger erfasst. Auf Basis dieser Auswertung kann ebenfalls auf den Benetzungsgrad der Windschutzscheibe geschlossen werden. Die Messergebnisse des kapazitiven Sensors, des Streulichtsensors und des Totalreflexionssensors werden ausgewertet und zu einem Gesamtergebnis zusammengefasst.



Figur 2: In der DE 10 2014 004 451 A1 kommen drei unterschiedliche Messprinzipien – Streulichtmessung, Totalreflexionsmessung und kapazitive Messung – zur Niederschlagsbestimmung auf einer Windschutzscheibe zum Einsatz.

Zur Detektion von Niederschlägen muss im Kraftfahrzeug nicht immer ein Regensensor verbaut werden. Stattdessen werden bereits vorhandene Fahrassistenzsysteme zum Erkennen von Niederschlag ausgenutzt. In **DE 10 2014 209 197 A1** wird dabei eine bereits vorhandene Kamera verwendet, die unter anderem auch für eine Verkehrszeichenerkennung oder einen Spurwechselassistenten Anwendung findet. Der Vorteil liegt darin, dass im Gegensatz zu den an die Windschutzscheibe montierten Systemen ein größerer Bereich der Windschutzscheibe überwacht wird. Dabei wird zur Vergrößerung der Detektionsfläche das gesamte Bild einer Kamera verwendet. Das Sichtfeld der Kamera ergibt hier eine im Vergleich zu einem LED-basierten Reflexionssensor, der direkt an der Windschutzscheibe montiert ist, eine vergrößerte Detektionsfläche, so dass eine Auftrittswahrscheinlichkeit eines Tropfens im Gesamtbild deutlich höher ist, als die Auftrittswahrscheinlichkeit eines Tropfens in der durch die LEDs abgedeckten Detektionsfläche (Figur 3). Das Prinzip be-

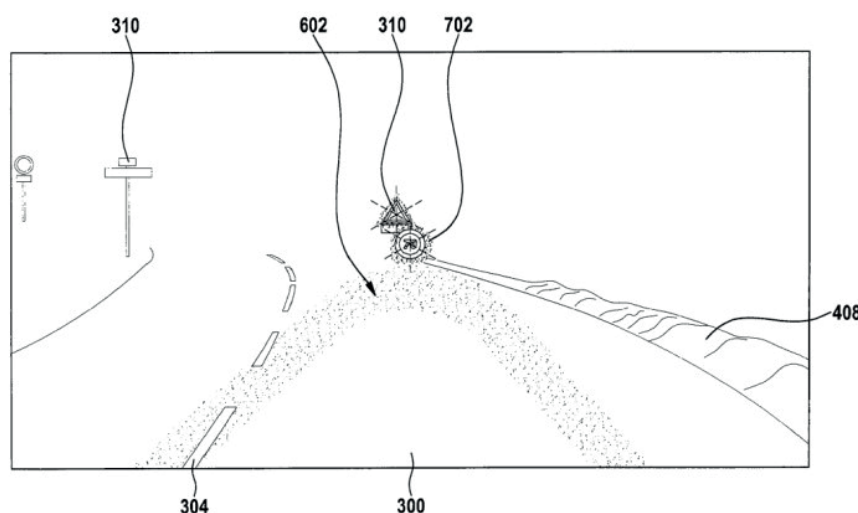
ruht dabei auf einer Vergleichsbildung zweier zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgezeichneter Einzelbilder. Trifft ein Tropfen in Folge von vorherrschendem Regen innerhalb des Zeitversatzes der zwei aufgenommenen Abbilder in den Sichtbereich der Kameraeinrichtung, so wird der Tropfen durch die beschriebene Intensitätsänderung im Differenzbild der beiden Abbilder sichtbar. Tropfen, die auf Grund des Fahrtwindes über die Scheibe wandern, werden dabei mittels Methoden der Bildverarbeitung herausgefiltert.



Figur 3: Mittels einer entfernt von der Windschutzscheibe angebrachten Kamera kann ein größeres Detektionsfeld (11) als durch einen Regensensor (40), der auf der Windschutzscheibe montiert ist, überwacht werden (DE 10 2014 209 197 A1).

Detektion von Nebel

Im Straßenverkehr auftretender Nebel und die dadurch hervorgerufene Verschlechterung der Sicht, stellen für Autofahrerinnen und Autofahrer eine Gefahr dar.



Figur 4: Frontscheinwerfer werfen Licht auf Verkehrszeichen, die das Licht reflektieren und dabei abhängig von der Nebeldichte einen entsprechenden Lichthof um das Verkehrszeichen erzeugen, der erfasst und ausgewertet wird (DE 10 2012 209 810 A1).

Da Nebelfelder in einem Gebiet häufig lokal begrenzt sind, ist eine schnelle Erkennung mit fahrzeuginternen Sensoren wünschenswert, damit rechtzeitig durch die fahrzeugführende Person oder auch automatisiert entsprechende Fahrzeugbeleuchtungen aktiviert oder deaktiviert und die Fahrweise angepasst werden [7]. Zur Detektion von Nebel und insbesondere auch zur Bestimmung der Nebeldichte beziehungsweise der Sichtweite werden unterschiedliche Ansätze verfolgt.

Einer der Ansätze ist die Auswertung von an den Nebeltröpfchen reflektierten elektromagnetischen Wellen. So offenbaren beispielsweise die **DE 10 2019 132 241 A1** und die **DE 10 2016 120 969 A1** einen Nebelsensor, der als eine Art offene Lichtschranke ausgebildet ist, die eine Sende- und Empfangseinheit für optische Signale aufweist. Während die **DE 10 2019 132 241 A1** einen Nebel mittels Laufzeitanalyse des ausgesandten und empfangenen optischen Signals detektiert, das ebenfalls an Nebeltröpfchen reflektiert wurde, wertet die **DE 10 2016 120 969 A1** diffus reflektierte optische Signale, die mindestens zwei Wellenlängenbereiche umfassen, aus. Dabei wird der Reflexionsgrad für die jeweiligen Wellenlängenbereiche ermittelt.

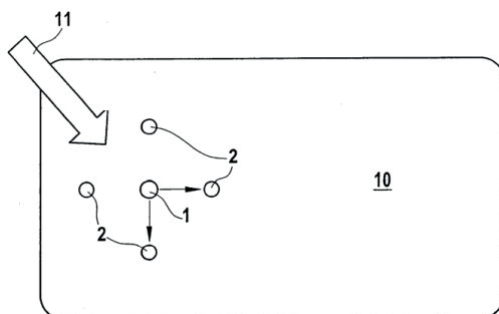
Ohne dezidierte Nebelsensoren kommen die **DE 10 2014 006 760 A1**, **DE 10 2012 209 810 A1** und die **US 2007 / 0 031 006 A1** aus. Frontscheinwerfer senden dabei einen Lichtkegel aus, dessen Licht ebenfalls reflektiert beziehungsweise gestreut wird. Die Reflexionen werden in diesen Fällen mittels einer bereits vorhandenen Kamera detektiert, wobei Helligkeitsunterschiede ausgewertet werden. Die **US 2007 / 0 031 006 A1** und **DE 10 2012 209 810 A1** analysieren dabei unter anderem das Erscheinungsbild des gestreuten Lichts, das dabei häufig in Form eines Lichthofs auftritt (Figur 4).

Alternativ zu einer optischen Nebeldetektion kann eine Nebelentwicklung auch mittels der Bestimmung des Taupunkts der Umgebungsluft ermittelt werden. Dabei wird eine Kombination der Daten von Temperatur-, Druck-, und Feuchtigkeitssensoren verwendet, die die Umgebungsluft außerhalb des Fahrzeugs analysieren und auswerten (DE 10 2016 001 210 A1).

2.2 Erfassung des Windes

Die Erfassung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung ist ein weiterer Beitrag, der dazu dienen kann, die Sicherheit beim Autofahren zu erhöhen. Ein anderer Aspekt, bei dem der Wind von Bedeutung ist, ist die Prognose des Energie- beziehungsweise Kraftstoffverbrauchs eines Fahrzeugs während einer Fahrt.

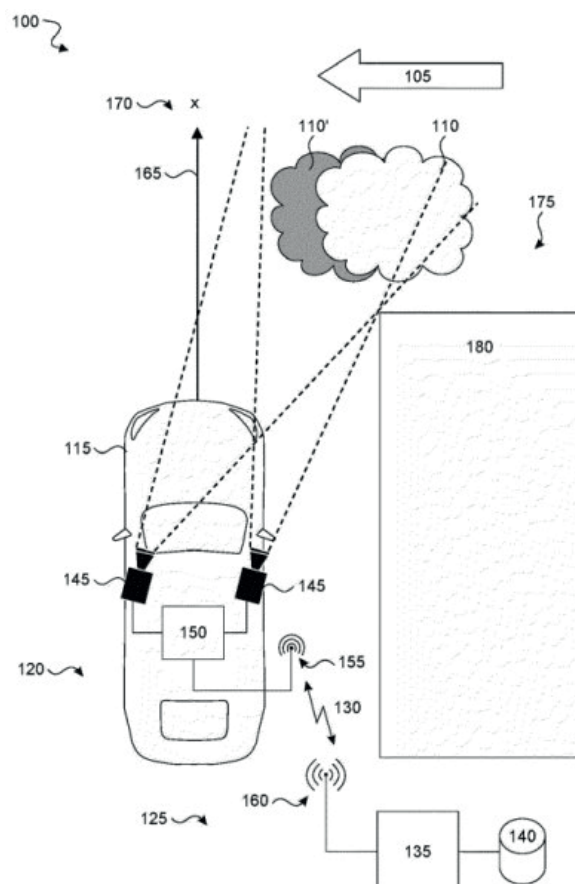
Die DE 10 2007 034 321 A1 offenbart einen thermischen Windsensor, der auf einer Fahrzeugoberfläche, insbesondere auf einem Fahrzeugdach integriert wird. Dieser besteht aus einem Heizelement und mindestens zwei Temperaturfühlern, die an unterschiedlichen Positionen in der Umgebung des Heizelements angeordnet sind (Figur 5). Beim fahrenden Kraftfahrzeug strömt ein Fahrtwind, der einer Überlagerung aus Wind- und Fahrzeuggeschwindigkeit entspricht, über das Autodach und verursacht in der Umgebung des Heizelements einen entsprechenden Wärmestrom. Aus der Temperaturdifferenz der Temperaturfühler und der bekannten Fahrzeuggeschwindigkeit können dann Windgeschwindigkeit und -richtung relativ zum bewegten Fahrzeug bestimmt werden. Dabei wird vorgeschlagen, dass bei bestimmten Windverhältnissen automatisch eine Warnung erfolgt oder Maßnahmen zur Fahrzeugstabilisierung beziehungsweise Sicherheitssysteme aktiviert werden.



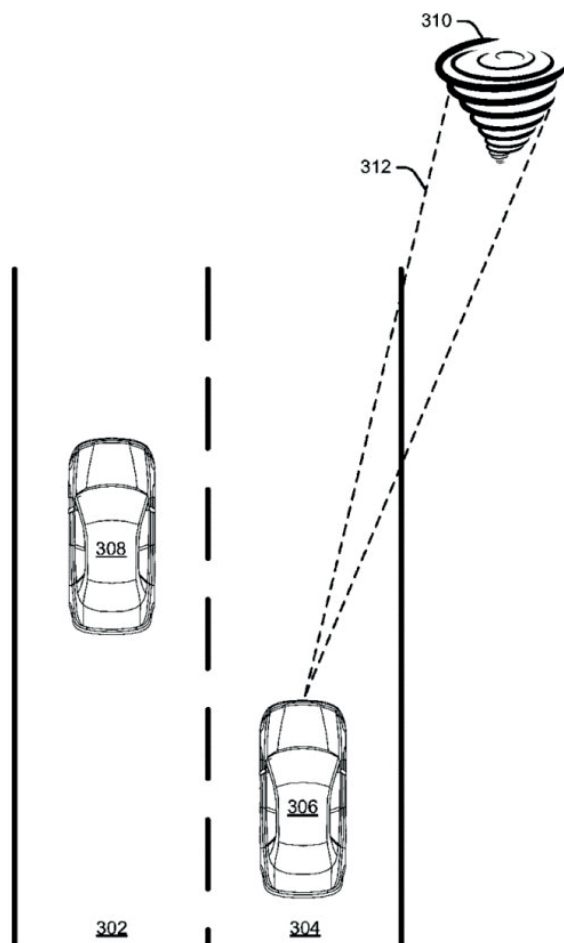
Figur 5: Auf einem Fahrzeugdach angeordneter Windsensor nach DE 10 2007 034 321 A1 bestehend aus vier Temperaturfühlern (2) und einem Heizelement (1).

Die Windgeschwindigkeit und/oder Windrichtung können auch ohne dezidierten Windsensor erfasst werden. So ermittelt die DE 10 2017 206 320 A1 eine Windgeschwindigkeit indem dem die Ist-Leistung einer Maschine des Fahrzeugs mit deren Soll-Leistung verglichen wird. Aus der Differenz wird dann eine Leistung des Windes ermittelt, aus der wiederum auf die Windgeschwindigkeit geschlossen wird, wobei bei der Berechnung weitere Faktoren wie Geschwindigkeit, Steigung und Rollwiderstand berücksichtigt werden.

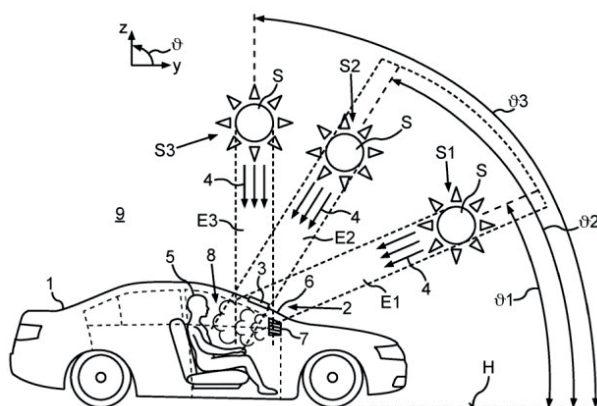
Die DE 10 2019 210 932 A1, DE 10 2017 210 390 A1 und DE 10 2018 102 537 A1 verwenden wiederum optische Mittel zur Bestimmung von Windparametern. Dabei werden Abtasteinrichtungen wie Kameras, LiDAR-Systeme oder Radarsensoren verwendet, die bereits als Teil eines Fahrerassistenzsystems an Bord des Kraftfahrzeugs vorhanden sind. Mit den oben genannten Mitteln werden in der Umgebung des Fahrzeugs Objekte abgetastet und identifiziert, wobei sich diese Objekte abhängig von der Stärke und Richtung des Windes bewegen (Figur 6). So werden zum Beispiel Windfahnen,



Figur 6: Die Reaktion eines Objekts (110), beispielsweise eines Baums, auf den Windeinfluss (105) wird mittels einer Abtasteinrichtung (145) erfasst und von einer Verarbeitungseinrichtung (135, 150) ausgewertet. Hierbei werden auch seitliche Strömungshindernisse (180) berücksichtigt (DE 10 2017 210 390 A1).



Figur 7: Das Tornadoerfassungssystem empfängt mit einem oder mehreren Sensoren, die an dem Fahrzeug (306) angebracht sind, Daten, die mit dem Tornado in Verbindung stehen.



Figur 8: Abhängig von der jeweiligen Strahlungsleistung der Sonne (S) und deren Position zum Fahrzeug wird die Klimatisierungseinrichtung (7) geregelt. Die Intensität und der Einstrahlwinkel der Sonne werden mittels einer optischen Sensorvorrichtung (3) festgestellt.

Windräder aber auch Bäume, Sträucher oder Rauch als Windanzeiger verwendet und deren Bewegungen ausgewertet. Anhand dieser Beobachtungen kann dann beispielsweise eine Warnung vor einem starken Seitenwind ausgegeben werden und eine Anzeige in einem Display könnte beispielsweise empfehlen, einen Überholvorgang abubrechen.

Eine Sonderform von Starkwindereignissen wird in der **DE 10 2018 102 537 A1** mit einem Tornadoerfassungssystem detektiert. Das System besteht aus einem Sensorfusionsmodul, das Daten mehrerer Sensoren, wie beispielsweise Kameras, Radar- und/oder LiDAR-Systeme, fusioniert und mittels eines neuronalen Netzwerks Tornados auf Grundlage von Windgeschwindigkeit, Windrichtung (zum Beispiel Kreisbewegung des Windes), Schwebstoffen und dergleichen erfasst und klassifiziert (Figur 7). Dabei werden Ort, Geschwindigkeit und Bewegungsbahn des Tornados ermittelt und eine Route für das Fahrzeug bestimmt, auf der der Tornado umfahren werden kann.

2.3 Messung der Sonnenstrahlung und Umgebungshelligkeit

Licht- und Strahlungssensoren werden aus unterschiedlichen Gründen im Kraftfahrzeug eingesetzt. Bekannt ist vor allem die Nutzung als Lichtsensor zur Steuerung des Ein- und Ausschaltens von Scheinwerfern an einem Fahrzeug, wobei diese Sensoren oft an der Windschutzscheibe montiert sind (**DE 10 2008 054 388 A1**). Strahlungssensoren werden auch gerne verwendet, um die gemessene Temperatur von Temperatursensoren zu korrigieren, die einer starken Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind. Strahlungs- beziehungsweise Sonnensensoren werden auch verwendet, um eine exaktere Steuerung einer Klimaanlage eines Kraftfahrzeugs zu verwirklichen, indem die wahre Sonnenintensität beziehungsweise deren Strahlungsleistung abhängig von dem Einfallswinkel der Sonnenstrahlung bestimmt wird (Figur 8). Solche Sonnensensoren sind beispielsweise aus der **DE 10 2016 113 940 A1** oder der **DE 10 2019 210 127 A1** bekannt. In Letzterer wird neben der Sonnenintensität mittels Zeit- und Datumsangaben sowie Ortskoordinaten ein Sonnenpositionssignal errechnet.

2.4 Erfassen von Umgebungsluftparametern

Als für die Wettererfassung relevante Umgebungsluftparameter werden hier Temperatur, Druck und Feuchtigkeit angesehen. Auf Sensoren, die die Zusammensetzung der Luft bestimmen oder auch Rauch- oder Staubpartikel detektieren, wird nicht eingegangen.

Außenlufttemperatur

Vermutlich einer der ersten aber auch einer der häufigsten im Auto verbauten Sensoren ist der Temperatursensor. Bereits in den 1910er Jahren wurde zur Überwachung der Temperatur des Kühlers ein Thermometer eingesetzt (GB 1913 / 7679 A). Später wurde auch der Außenlufttemperatur mehr Beachtung geschenkt. So ist die Kenntnis der genauen Außentemperatur nicht nur wichtig, um vor einer Glatteisgefahr zu warnen, sondern sie wird unter anderem auch dazu eingesetzt, um eine effiziente Steuerung von der Klimaanlage und des Verbrennungsmotors zu ermöglichen oder um die Genauigkeit anderer Sensoren, beispielsweise von Ultraschallsensoren, zu verbessern. Die Messung der Außenlufttemperatur ist dabei jedoch nicht trivial. So beeinflussen neben dem Einbauort des Sensors auch Fahrgeschwindigkeit, Wind beziehungsweise Fahrtwind, Sonneneinstrahlung, Abwärme von Motor und Abgasanlage den Temperatursensor. Um die Außenlufttemperatur möglichst präzise bestimmen zu können, schlägt die DE 10 2014 200 142 A1 vor, die Temperaturmessereinrichtung in einem Strömungsweg einer Luftströmung anzuordnen, wobei die Luftströmung aus der Umgebungsluft des Fahrzeugs besteht und durch Fahrtwind, Wind und einen Ventilator beziehungsweise ein Gebläse an der Temperaturmessereinrichtung vorbeigeführt wird. Die gemessene Temperatur wird anschließend zur Bestimmung einer genaueren Schallgeschwindigkeit der Luft eingesetzt, um ein ultraschallbasiertes Einparkassistentensystem zu verbessern.

Um den Einfluss der Motorabwärme zu vermeiden, wird der Außentemperaturfühler auch im Seitenspiegel eines Fahrzeugs verbaut. Eine solche exponierte Lage führt jedoch dazu, dass der Temperaturfühler aufgrund der Sonneneinstrahlung oftmals zu hohe Werte ausgibt.

Die DE 10 2017 206 724 A1 offenbart hier ein Verfahren, bei dem durch die Messung einer aktuellen Sonneneinstrahlung auf das Fahrzeug mittels eines Sonnensensors der Einfluss der Sonnenstrahlung auf den Außentemperaturfühler ermittelt wird.

Atmosphärischer Luftdruck

Der atmosphärische Luftdruck wird beispielsweise ermittelt, um eine genaue Dosierung von Luft und Kraftstoff in Verbrennungsmotoren zu ermöglichen. Der Luftdruck wird dabei mittels eines Luftdrucksensors bestimmt, der an beliebigen geeigneten Orten am Fahrzeug anbringbar ist (DE 10 2007 037 629 A1). In der DE 10 2011 083 998 A1 wird der Luftdruck mit einem Barometer kontinuierlich gemessen, um mit den Luftdruckdaten eine genauere Schallgeschwindigkeit der Luft zu bestimmen. Damit ist ähnlich wie in der oben erwähnten DE 10 2014 200 142 A1 eine präzisere Ultraschallabstandsmessung möglich. Die DE 10 2015 209 102 A1 verwendet mindestens zwei Luftdrucksensoren, um anhand charakteristischer Luftdruckverläufe die Position eines im Umfeld des Fahrzeugs parallel fahrendes Fremdfahrzeug zu erkennen. Es wird ein Warnsignal ausgegeben, falls das Fahrzeug beispielsweise nach einem Überholvorgang zu früh einscheren sollte.

Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit beschreibt den Wasserdampfanteil in der Luft – also ohne Regen- und Nebeltröpfchen beziehungsweise Schneekristalle – und ist für die Automobilindustrie ein weiterer interessanter Parameter, der für zahlreiche Funktionen, wie zum Beispiel für die Steuerung der Klimaanlage oder des Verbrennungsmotors nützlich ist. Es gibt mittlerweile zahlreiche Lösungen, um die Luftfeuchtigkeit zu messen, ohne dass ein weiterer dezidiert Sensor verbaut werden muss. So zeigt zum Beispiel die DE 10 2013 212 217 A1, wie mit einem bereits vorhandenen Sauerstoffsensor, insbesondere einer Lambdasonde, zusammen mit der genauen Temperatur der Luft anhand der gemessenen Sauerstoffkonzentration die relative Luftfeuchtigkeit in einem Frischluftansaugrohr eines Verbrennungsmotors ermittelt werden kann.

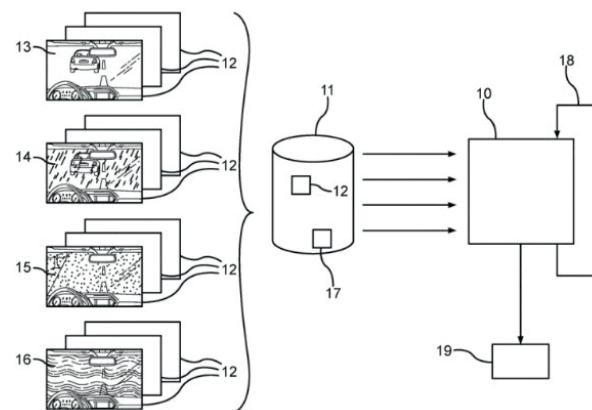
Die Luftfeuchtigkeit kann auch aus der Dämpfung des Luftschalls bestimmt werden (**DE 10 2016 105 153 A1**). Dazu senden im Fahrzeug vorhandene Ultraschallsensoren zwei Ultraschallsignale mit einer ersten und einer zweiten Frequenz aus. Diese Signale werden an einem Objekt reflektiert und die reflektierten Signale werden wiederum von den Ultraschallsensoren detektiert. Beim Durchqueren der Luft werden die zwei Signale abhängig von ihrer Frequenz und der relativen Luftfeuchtigkeit unterschiedlich stark abgeschwächt. Die jeweiligen Amplituden der zwei detektierten Ultraschallsignale werden anschließend ins Verhältnis gesetzt, um daraus ein sogenanntes Luftschalldämpfungsverhältnis zu ermitteln, aus dem wiederum auf die Luftfeuchtigkeit in der Umgebung geschlossen wird.

2.5 Allgemeine Wettererkennung

Neben Sensoren die explizit auf die Erkennung eines Wetterereignisses wie zum Beispiel Niederschlag oder Nebel ausgerichtet sind, gibt es auch Einrichtungen, welche in der Lage sind, mehrere Wetterinformationen aus der umgebenden Atmosphäre zu extrahieren.

In der **DE 10 2017 210 157 A1** und der **DE 10 2017 217 072 A1** werden dazu bordeigene Frontkameras eingesetzt, welche die atmosphärischen Bedingungen in der Umgebung eines Fahrzeugs erfassen. Um dabei Wetterinformationen zu ermitteln, werden die Bilddaten der Kameras jeweils mittels eines künstlichen neuronalen Netzwerkes ausgewertet. Diese neuronalen Netzwerke werden zuvor mit verschiedenen Wetterinformationen, die beispielsweise Aufnahmen von unterschiedlichen Niederschlagsformen, Wolkenformen, Wolkenfarben, Bewölkungsgraden, Blitzen oder eine Kombination dieser Aufnahmen umfassen, trainiert. So lernt beispielsweise das künstliche neuronale Netzwerk aus der **DE 10 2017 210 157 A1** durch mehrmaliges Wiederholen einer Informationseingabe und Informationsausgabe – in der Regel bis zu circa 10 Millionen Mal – eigenständig aus eingehenden Aufnahmen eine Wetterinformation zu ermitteln, wobei das erfolgreich trainierte künstliche neuronale Netzwerk dann nur noch einige Millisekunden für die Identifizierung eines Wettergeschehens benötigt. Die Ermittlung von Sonderwetterlagen, wie zum Beispiel

Hagel, Gewitter und Starkregen, sind mittels künstlicher Intelligenz ebenso möglich wie eine Prognose hinsichtlich einer Wetterentwicklung. So lassen beispielsweise stark verdunkelte Wolken auf eine hohe Regenwahrscheinlichkeit schließen.



Figur 9: Das künstliche neuronale Netzwerk (11) wird mittels Trainingsbildern (12), die unter anderem klares Wetter, Regen, Schneefall oder Nebel darstellen, so lange trainiert, bis das neuronale Netzwerk zu jedem Testbild ein korrektes Ergebnis erzeugt (**DE 10 2017 217 072 A1**).

3 Crowd-Sourcing zur Verbesserung der lokalen Wetterprognose

Wettervorhersagen basieren im Wesentlichen auf Modellen, die sich wiederum auf Daten stützen, die aus einem Netzwerk von Wetterstationen in einer Region gesammelt werden. In diesem Kapitel wird gezeigt, wie die Sensordaten eines oder vieler Autos dazu genutzt werden können, die Dichte eines Netzwerkes zu erhöhen und so meteorologische Modelle zu verbessern. Darüber hinaus können auch lokal auftretende extreme Wetterereignisse stärker eingegrenzt werden, um explizit für eine bestimmte Gegend eine Warnung auszugeben.

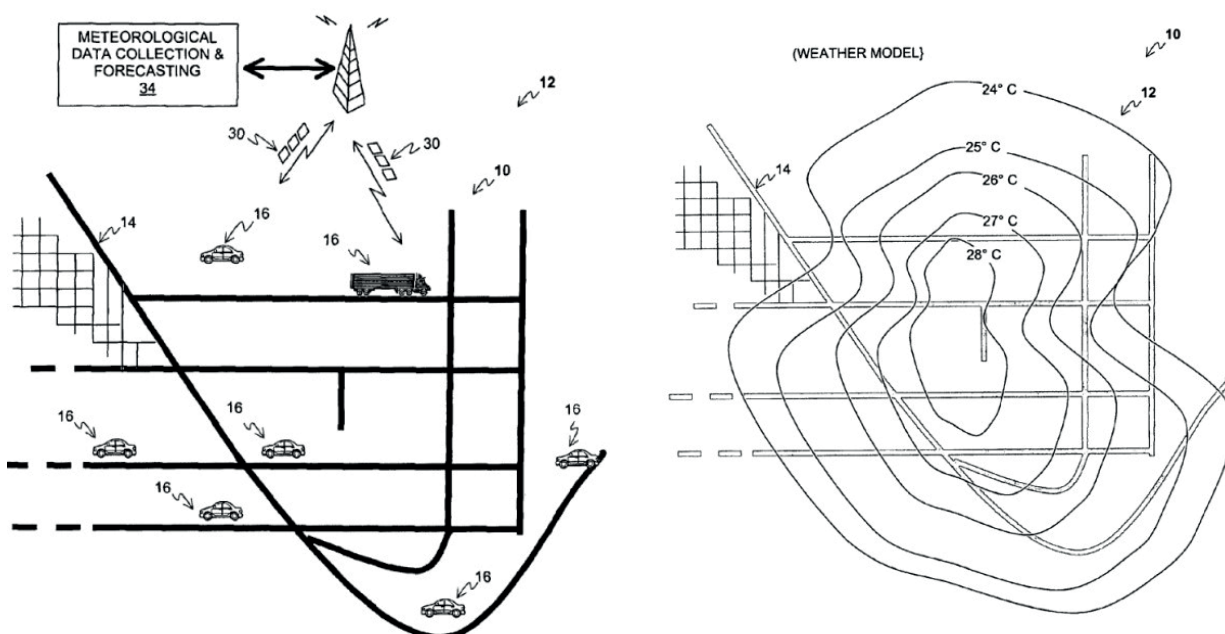
In der **US 6 919 821 B1** sammeln viele Fahrzeuge mittels Sensoren wie Thermometer, Hydrometer, Radar, Regen- und Lichtsensoren, meteorologische Daten ihrer Umgebung, während sie entlang einer Straße fahren. In Einrichtungen der Fahrzeuge werden Nachrichtepakete vorbereitet, die entsprechende Daten wie zum Beispiel die aktuelle Umgebungstemperatur Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und/oder Lichtverhältnisse zusammen mit einer zugehörigen Positions- und Zeitangabe enthalten. Dabei werden die Nachrichtepakete augen-

blicklich oder auch kumuliert über einen gewissen Zeitraum an einen meteorologischen Datenerfassungsdienst mittels Mobilfunk gesendet, der die Daten sammelt und anschließend zur Wettermodellierung oder Wettervorhersage verwendet. Die Daten können beispielsweise alle 5 Sekunden oder nach jeweils 30 gefahrenen Metern abgeschickt werden. Nachdem die Wetterdaten vom meteorologischen Datenerfassungs- und Vorhersagedienst verarbeitet wurden, können wetterbezogene Informationen an die Fahrzeuge zurückgesendet werden (Figur 10). Diese Informationen können zum Beispiel Niederschlagsdaten umfassen, die von Fahrzeugen in einem Gebiet gesammelt wurden, um andere Fahrzeuge, die in das Gebiet hineinfahren, vor nassen Fahrbedingungen oder schlechter Sicht zu warnen. Darüber hinaus können die Daten auch für verbesserte Wettermodelle verwendet werden (Figur 10).

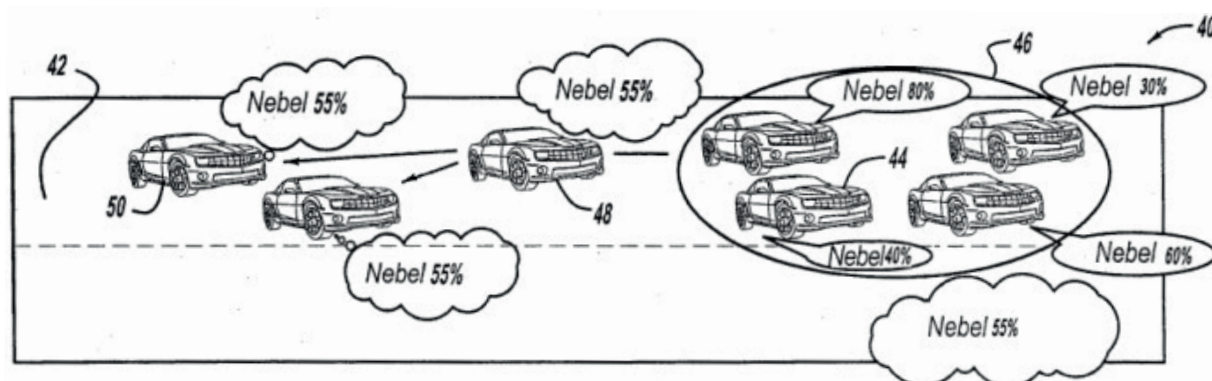
In der **DE 10 2012 004 998 A1** wird ebenfalls die Problematik von ungenauen Wetterdaten für jeweilige Orte adressiert. Vor allem wenn sich die Umgebungstemperatur dem Gefrierpunkt nähert, können sich lokal begrenzte Temperaturunterschiede, die mit dem bestehenden stationären Sensornetzwerk nicht auflösbar sind, gravierend auf die Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche auswirken. Ähnlich wie in der **US 6 919 821 B1** werden die Wetterdaten, die zumindest eine Um-

gebungstemperatur umfassen, in der Umgebung des Fahrzeugs zusammen mit der Fahrzeugposition bestimmt. Diese Daten werden an eine Zentralstelle übermittelt. Die Zentralstelle erstellt dann eine Wetterkarte, in der die Wetterdaten einer digitalen Straßenkarte zugeordnet werden, und stellt diese wiederum einem Internetdienst zur Verfügung oder übermittelt diese wiederum an ein Navigationsgerät eines Fahrzeugs, das daraufhin eine optimale Streckenführung berechnet.

Während die **DE 10 2012 004 998 A1** und **US 6 919 821 B1** ihre Daten an eine Zentralstelle übermitteln, liegt das Hauptaugenmerk in der **DE 10 2010 012 402 A1** auf einer direkten Kommunikation der Fahrzeuge untereinander. Dabei detektiert eine Anzahl von Fahrzeugen unter Verwendung ihrer individuellen Sensoren Wetterinformationen wie zum Beispiel Nebel, Regen, Schnee und Temperatur, um potenziell gefährliche Straßenzustände zu erfassen. So sind beispielsweise die Fahrzeuge einer Gruppe, die sich in einem bestimmten Gebiet aufhalten, in der Lage Nebel zu detektieren und dem Detektionsergebnis einen Vertrauensgrad zuzuordnen (Figur 11). Die Vertrauensgradwerte werden vereinigt und ein gemeinsamer Vertrauensgrad für Nebel ausgegeben. Die Fahrzeuge aus der Gruppe können daraufhin das gemeinsame Ergebnis an andere Fahrzeuge in der Umgebung übertragen, um diese vor einer bevorstehenden



Figur 10: Die Abbildung links zeigt das Erfassen und Verteilen meteorologischer Daten zwischen den Kraftfahrzeugen und einer meteorologischen Zentrale. Die Abbildung rechts zeigt eine Temperaturverteilung, die aus den übermittelten Daten modelliert und auf ein geographische Gebiet übertragen wird.



Figur 11: Eine Gruppe von Fahrzeugen ermittelt eine aktuelle Nebelwahrscheinlichkeit in einem Gebiet und geben diese Wahrscheinlichkeit an Fahrzeuge weiter, die sich auf derselben Straße befinden.

Nebelgefahr zu warnen. Abhängig von einem voreingestellten Schwellenwert für den Vertrauensgrad kann dann der gewarnte Fahrzeugbetreiber oder dessen Fahrzeug selbst geeignete Maßnahmen ergreifen.

4 Fazit

Dieser Artikel zeigt, wie ein Auto als fahrende Wetterstation fungieren kann. Dabei werden nicht nur dezidierte Sensoren wie zum Beispiel Regensensoren oder Temperatursensoren zur Bestimmung des Wettergeschehens genutzt, sondern auch bereits vorhandene Fahrassistenzsysteme wie Kameras, Ultraschallsensoren, LiDAR, Radar und/oder das Erfassen eines Betriebs- oder Aktivierungszustands von Kraftfahrzeugkomponenten verwendet, um die lokalen atmosphärischen Bedingungen zu erfassen. Neben der Entwicklung neuer Sensoren, tragen auch immer leistungsfähigere Recheneinheiten in den Steuergeräten von Kraftfahrzeugen zu einer schnelleren Verarbeitung von Daten bei. In diesem Zusammenhang öffnet vor allem die Kombination von „machine vision“ und „machine learning“ also die Analyse von Bildmaterial mittels den Methoden des maschinellen Lernens, neue Türen für eine schnelle und effiziente Auswertung von Umwelt- und Wetterdaten [8], [9].

Als weiterer Aspekt wurde gezeigt, dass durch die Fahrzeuge gesammelte Wetterdaten dazu beitragen können, die räumliche und zeitliche Auflösung des Wetterbeobachtungsnetzes zu erhöhen, indem die Wetterdaten von vielen Fahrzeugen durch sogenanntes „crowd

sourcing“ zentral gesammelt und ausgewertet werden. Solche verarbeiteten Wetterdaten können dann wiederum den Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden, um diese dann für automatisierte Fahrfunktionen, Routenplanung sowie komfort- und sicherheitssteigernde Maßnahmen zu nutzen [3], [10].

Daneben sind auch verbesserte Wettervorhersagemodelle sowie ein genaueres Verorten lokaler Unwetterereignisse möglich, wovon nicht nur die Verkehrsteilnehmer profitieren. So können diese Daten auch beispielsweise vom Zivilschutz verwendet werden, um vor Starkregenereignissen und potentieller Überflutungsgefahr zu warnen [11]. Auch sind Synergieeffekte mit anderen Wirtschaftszweigen, wie zum Beispiel Stromnetzbetreibern, die Energie mittels Solaranlagen erzeugen, möglich. Denn je präziser die Sonnenscheindauer vorhergesagt werden kann, umso besser kann abgeschätzt werden, wieviel Solarstrom zu einer bestimmten Zeit ins Stromnetz eingespeist werden kann (DE 10 2017 115 186 A1).

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt bleibt der Datenschutz und die Datensicherheit. Auch hier werden bereits Lösungen angeboten, die auf personenbezogene Daten verzichten beziehungsweise der Nutzerin oder dem Nutzer des Fahrzeugs freistellen, wann und welche Daten sie oder er freigibt, wobei das Bereitstellen der Daten an einen Dienstleister vergütet werden könnte [12], [4].

Zusammenfassend ist das Auto von heute nicht nur ein Fortbewegungsmittel, das jemanden von A nach B

fährt, sondern kann vielmehr als eine fahrende Sensorplattform angesehen werden, die wetterrelevante Daten erfasst, welche nicht nur der jeweiligen fahrzeugführenden Person dienen, sondern auch wertvoll für die Allgemeinheit sein können.

5 Danksagungen

Ein herzliches Dankeschön geht an die Kollegen Dr. Albert Baumgartner und Robert Schmid für deren Unterstützung.

Nicht-Patentliteratur

- [1] ZOU, Y. [et al.]: Exploring the impact of climate and extreme weather on fatal traffic accidents. In: Sustainability, 2021, 13. Jg., Nr. 1, S. 390.
- [2] SUNDARARAJAN, S. und ZOHDY, I.: Vehicle automation and weather: challenges and opportunities. United States. Department of Transportation. Intelligent Transportation Systems Joint Program Office, 2016.
- [3] HELLWEG, M. [et al.]: Fleet Weather Map-A Project to Integrate Floating Car Weather Data into the Field of Automated Driving. In: Transportation Association of Canada and ITS Canada 2019 Joint Conference and Exhibition. 2019.
- [4] Automotive Northwest: Das Auto als Wetterstation und Schlaglochdetektor, Juli 2018. URL: <https://www.automotive-nordwest.de/das-auto-als-wetterstation-und-schlaglochdetektor> [abgerufen am 29.07.2021]
- [5] MERCELIS, S. [et al.]: Towards detection of road weather conditions using large-scale vehicle fleets. In: 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). IEEE, 2020. S. 1-7.
- [6] ALLEGRETTI, M. und Bertoldo, S.: Cars as a diffuse network of road-environment monitoring nodes. In: Wireless Sensor Network, 2014, 6. Jg., Nr. 09, S. 184.
- [7] PAVLIĆ, M. [et al.]: Image based fog detection in vehicles. In: 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2012. S. 1132-1137.
- [8] AL MACHOT, F. [et al.]: Real-time raindrop detection based on cellular neural networks for ADAS. In: Journal of Real-Time Image Processing, 2019, 16. Jg., Nr. 4, S. 931-943.
- [9] LIU, W., YANG, Y. und LONGSHENG, W.: Weather recognition of street scene based on sparse deep neural networks. In: Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2017, 21. Jg., Nr. 3, S. 403-408.
- [10] HERE: Global Weather Corporation Offers Highly Precise Road-Level Weather Data on the HERE Marketplace, Januar 2020. https://www.here.com/sites/g/files/odxslz256/files/2020-07/20200301_GWC_FINAL_EN%282%29%281%29.pdf [abgerufen am 09.11.2021]
- [11] TREIS, A. [et al.]: Improving the short-term forecast of precipitation events using vehicle sensor data-research project mobile VIEW. In: Rainfall Monitoring, Modelling and Forecasting in Urban Environment. UrbanRain18: 11th International Workshop on Precipitation in Urban Areas. Conference Proceedings. ETH Zurich, Institute of Environmental Engineering, 2019. S. 121-126.
- [12] WELT: Volkswagen-Fahrer werden künftig automatisch Wetterwarner, April 2017. URL: <https://www.welt.de/wirtschaft/article163916670/Volkswagen-Fahrer-werden-kuenftig-automatisch-Wetterwarner.html> [abgerufen am 04.08.2021]

Batterierecycling

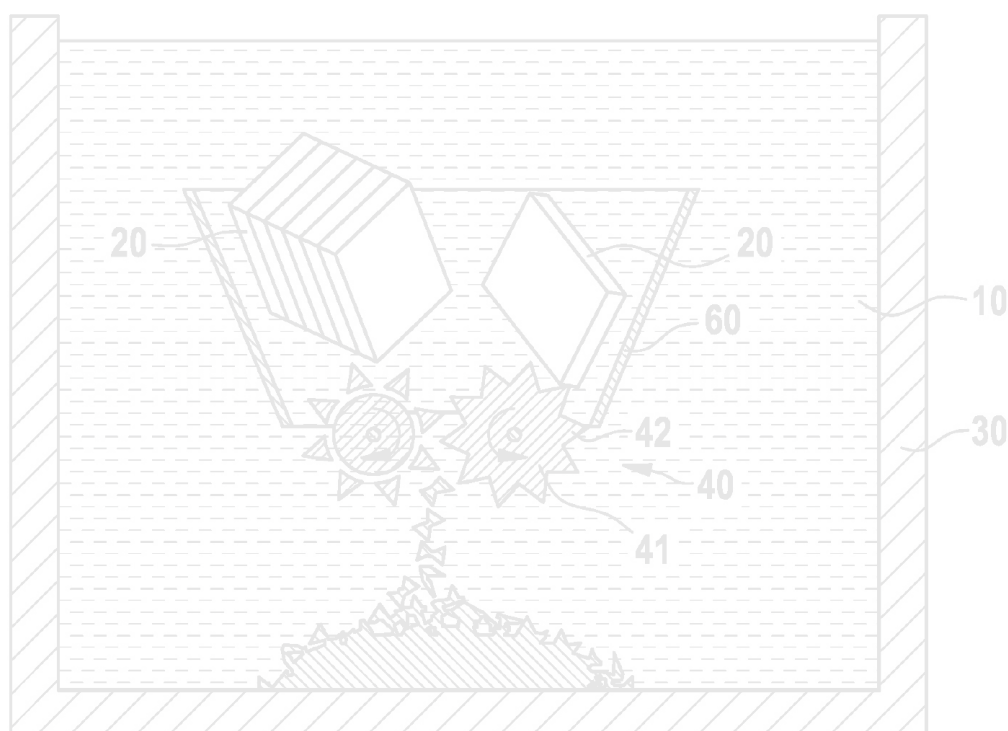
Dr. Dirk Ochs, Patentabteilung 1.42

Zusammenfassung

Das starke Wachstum der Batterieproduktion für den Bereich der Elektromobilität führt zeitversetzt zu einem starken Anstieg an Batteriemüll. Um diesen effizient und nachhaltig weiterverarbeiten zu können werden verbesserte Recyclingtechnologien benötigt. Für ein möglichst umfangreiches Batterierecycling sprechen Umweltgesichtspunkte, die teilweise menschenunwürdigen Abbaubedingungen der Rohstoffe, aber auch der finanzielle Gewinn durch das Recycling knapper und teurer Rohstoffe. Das Batterierecycling besitzt auf mehreren Gebieten deutliches Verbesserungspotential. Beispielsweise können, um die Menge an anfallendem Batteriemüll zu verringern, geeignete Messaufbauten verwendet werden, um einzelne defekte Zellen in Batteriesystemen zu identifizieren und nur diese dem Recycling zuzuführen. Auch die Optimierung des Batteriedesigns bezüglich der späteren Recyclingprozesse ist ein wichtiger Ansatz für höhere Recyclingquoten. Bei Entladung, Sortierung, Entschichtung und Zerkleinerung der Batteriekomponenten sowie bei den hydrometallurgischen und pyrolytischen Verfahren führen verschiedenste technische Verbesserungen zu einem effizienteren Recycling.

Über den Autor

Dr. Dirk Ochs studierte Physik an der Justus-Liebig Universität Gießen. Nach anschließender Promotion auf dem Gebiet der Oberflächenphysik an der Technischen Universität Clausthal folgte eine 11-jährige industrielle Tätigkeit in der Entwicklung und Prozess-inbetriebnahme von Vakuum-Beschichtungsanlagen. 2009 trat Dr. Ochs als Patentprüfer ins DPMA ein. Seit acht Jahren ist er auf dem Prüfgebiet der Batterien tätig, welches von Erfindungen bei einzelnen Komponenten von Batteriezellen, wie zum Beispiel Zellverbinder, Elektrodenbeschichtungen oder Gehäuse, bis zu Innovationen bei kompletten Batteriesystemen, wie zum Beispiel Steuerung, Temperierung oder Sicherheitsmanagement, reicht.



1 Einleitung

In den letzten Jahren ist es, insbesondere getrieben durch die steigende Nachfrage nach elektrisch angetriebenen Fahrzeugen, zu einem starken Anstieg in der Batterieproduktion gekommen. Hierdurch wächst, wenn auch zeitversetzt, ein riesiger Berg an zu entsorgendem Batteriemüll an. Die aktuell produzierten Batteriesysteme werden nach ihrem Einsatz als Traktionsbatterie in Elektrofahrzeugen und einem eventuellen anschließenden Zweiteinsatz, beispielsweise als Speicher für Strom aus Windkraft oder Photovoltaik, zu Sondermüll. Zur Sicherstellung der Nachhaltigkeit der stark wachsenden Elektromobilität ist ein möglichst vollständiges Batterierecycling unabdingbar [1].

Neben der direkten Umweltproblematik, welche durch die große Menge an Batteriemüll entsteht, sind die Beeinträchtigung der Umwelt sowie die oft menschenunwürdigen Bedingungen und die teilweise praktizierte Kinderarbeit beim Abbau der Rohstoffe gewichtige Gründe, die benötigten Materialien durch Recycling der ausgedienten Batterien zu gewinnen.

Darüber hinaus gibt es kommerzielle Gründe für ein Recycling ausgedienter Batterien. Die in den Batterien enthaltenen Materialien, insbesondere Kobalt und Nickel, sind zu knapp und somit wertvoll, um sie einfach wegzuworfen. Auch bei weniger kritischen Materialien, wie Lithium, Mangan, Kupfer, Aluminium und Graphit, lohnt sich ein Recycling [2], [3].

Eine 50 kWh Batterie beispielsweise, wie sie momentan häufig bei Mittelklasse Elektrofahrzeugen eingesetzt wird, enthält circa 6 kg Lithium, 10 kg Mangan, 11 kg Kobalt, 32 kg Nickel und 100 kg Graphit [4]. Des Weiteren fallen noch Kupfer, Aluminium und Kunststoffe in größeren Mengen als Materialien für Gehäuse und Verbindungen an.

Laut einem Marktforschungsunternehmen könnte der Wert der aus Batterien durch Recycling gewinnbaren Rohstoffe im Jahr 2025 bei einer Milliarde \$ liegen und bis 2040 auf rund 24 Milliarden \$ steigen [5].

Auch wenn das Thema Batterierecycling insbesondere in den letzten Jahren mit der rasant steigenden Menge an produzierten Batteriesystemen für die E-Mobilität, erst stark an Bedeutung gewonnen hat, gibt es in Deutschland schon mehr als 20 Jahre Forschung auf diesem Gebiet in deren Rahmen sich oftmals größere Forschungsver-

bünde zusammengeschlossen haben [6]. Eine Übersicht über bereits existierende industrielle Verfahren zum Batterierecycling findet sich in [7] und [8].

Der vorliegende Artikel gibt anhand von Patenten und Patentanmeldungen einen Überblick über die technischen Innovationen auf dem Gebiet des Batterierecyclings.

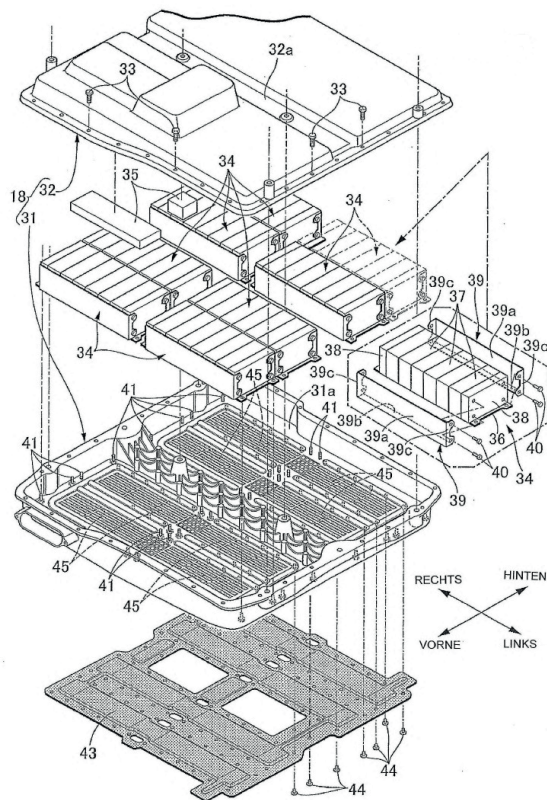
Innovationen auf dem Gebiet der für die Elektromobilität verwendeten Traktionsbatterien, auf dem Gebiet der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batteriesystemen in Kraftfahrzeugen sowie auf dem Gebiet der Nachhaltigkeitskonzepte für Batterien im Bereich Elektromobilität wurden im Rahmen der Erfinderaktivitäten bereits in separaten Artikeln behandelt [9], [10], [11].

Im Folgenden wird zunächst der Aufbau der Batteriesysteme und werden die für die Komponenten verwendeten Materialien beschrieben. Anschließend wird auf die Reduzierung des anfallenden Batteriemülls durch Weiterverwendung von noch funktionsfähigen Batteriekomponenten eingegangen. Ein weiterer wichtiger Ansatz sind vereinfachte Recyclingprozesse und deren Berücksichtigung schon bei Design und Konstruktion des Batteriesystems [12]. Einen Schwerpunkt bilden die Entladung der zu recycelnden Batteriesysteme sowie deren Sortierung. Daran schließen sich verschiedene Entschichtungs- und Zerkleinerungsprozesse an. Für den Recyclingkernprozess gibt es zwei konkurrierende Verfahren [13]. Beim pyrolytischen Recycling werden Batteriekomponenten mittels hoher Temperaturen thermisch zersetzt. Beim hydrometallurgischen Verfahren [14] werden die verschiedenen Materialien mittels geeigneter Lösungsmittel aus den Batteriekomponenten gewonnen.

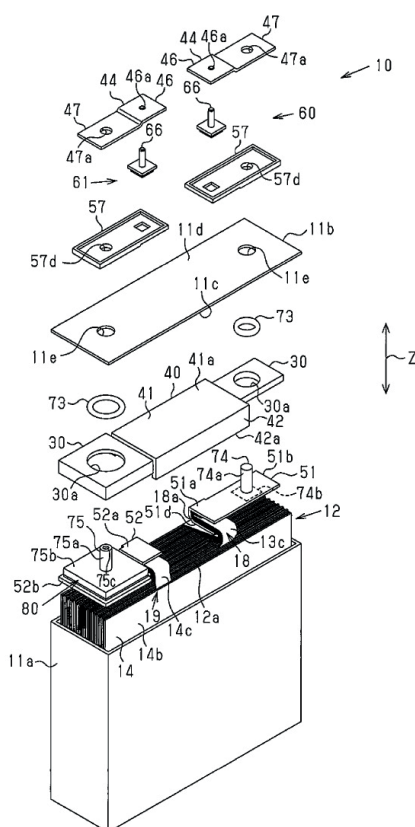
2 Aufbau der Batteriesysteme

Große Batteriesysteme, wie sie beispielsweise als Traktionsbatterien in elektrischen Kraftfahrzeugen eingesetzt werden, bestehen aus einer Vielzahl nebeneinander angeordneter Einzelzellen, die zu einem Batteriemodul zusammengeschaltet sind. Mehrere Batteriemodule sind dann ihrerseits als Batteriesystem in einem Batteriegehäuse untergebracht und zusammengeschaltet. Dieser Aufbau ist in den Figuren 1 bis 3 dargestellt.

Figur 1 zeigt ein Batteriesystem für ein elektrisches Fahrzeug. In einem Batteriegehäuse 18 aus Metall-



Figur 1: Batterie für ein elektrisches Fahrzeug (aus DE 10 2019 214 920 A1).

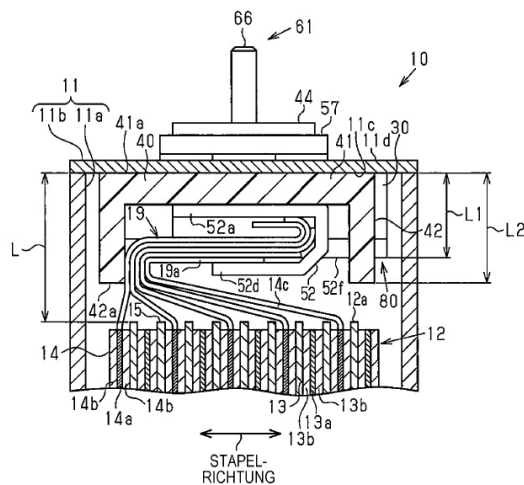


Figur 2: Prismenförmige Batteriezelle (aus DE 11 2016 001 181 T5).

druckguss, welches aus einem Gehäusehauptide 31 und einem Deckel 32 besteht, sind mehrere Batterie-module 34 angeordnet. Jedes dieser Batteriemodule ist wiederum aus mehreren trapezförmigen Batteriezellen 37 aufgebaut, die zwischen einem Paar Endplatten 38 und einem Paar Seitenplatten 39 aus Metallblech auf einer Platte 36 nebeneinander angeordnet sind. Des Weiteren ist eine elektrische Komponente 35 innerhalb des Batteriegehäuses angebracht. Dies kann beispielsweise eine Batteriesteuervorrichtung, eine Anschluss-platine oder ein Zellspannungssensor sein. Ein Beispiel für den detaillierten Aufbau der Batteriezellen ist in Figur 2 zu sehen. Eine Elektrodenbaugruppe 12, deren Aufbau weiter unten noch im Detail besprochen wird, ist in einem Gehäusekörper 11a angeordnet. Des Weiteren ist in dem Gehäuse eine elektrolytische Lösung, gewöhnlich LiPF₆ in einer organischen Lösung wie Ethylencarbonat, aufgenommen. Elektrodenanschlüsse 74 und 75 sind über ein positives Leiterelement 51 beziehungsweise ein negatives Leiterelement 52 mit einem positiven Laschenstapel 18 beziehungsweise einem negativen Laschenstapel 19 der Elektrodenbaugruppe verbunden. Oberhalb der Elektrodenanschlüsse ist ein isolierendes Element 40 angebracht, welches die elektrische Isolierung zu einem darauffolgenden Deckel 11b gewährleistet. Im Deckel und im isolierenden Element sind Aussparungen 11e beziehungsweise 30a vorgesehen, durch die die Elektrodenanschlüsse nach außen geführt werden, um dort mit einer positiven Anschlussstruktur 60 beziehungsweise negativen Anschlussstruktur 61 verbunden zu werden. Die oben schon erwähnte Elektrodenbaugruppe ist im Detail in Figur 3 dargestellt. Die Elektrodenbaugruppe 12 besteht aus rechteckigen blattartigen positiven Elektroden 13, rechteckigen blattartigen negativen Elektroden 14 und dazwischen angeordneten blattartigen Separatoren 15, welche oft aus mikroporösem Polyethylen bestehen. Die positiven Elektroden bestehen jeweils aus einer positiven Elektrodenmetallfolie 13a, beispielsweise aus Aluminium, und positiven Elektrodenaktivmaterial-schichten 13b, häufig aus Lithium-basierten Metall-oxiden enthaltend Kobalt, Nickel und/oder Mangan, die auf beide Seiten der Folie aufgebracht sind. Eine positive Lasche 13c ragt auf einer der Seiten der Metallfolie hervor. Entsprechend ist die negative Elektrode gebildet aus einer negativen Elektrodenmetallfolie 14a,

beispielsweise aus Kupfer, und negativen Elektrodenaktivmaterialschichten 14b, meistens aus Graphit, die auf beiden Seiten der Folie aufgebracht sind. Eine negative Lasche 14c ragt auf einer der Seiten der Metallfolie hervor. Die negativen Laschen sind zu dem bereits oben beschriebenen negativen Laschenstapel zusammengeführt. Entsprechend sind, wie nur in Figur 2 dargestellt, die positiven Laschen zu einem positiven Laschenstapel zusammengeführt.

Die durchschnittliche Zusammensetzung einer Lithium-Ionen-Batterie in Gewichtsprozenten ist 25 % Kathodenmaterial, 17 % Anodenmaterial, 10 % Elektrolyt, 25 % Gehäuse, 8 % Kupferelektrodenfolie, 5 % Aluminiumelektrodenfolie, 4 % Separator und 6 % Rest [15]



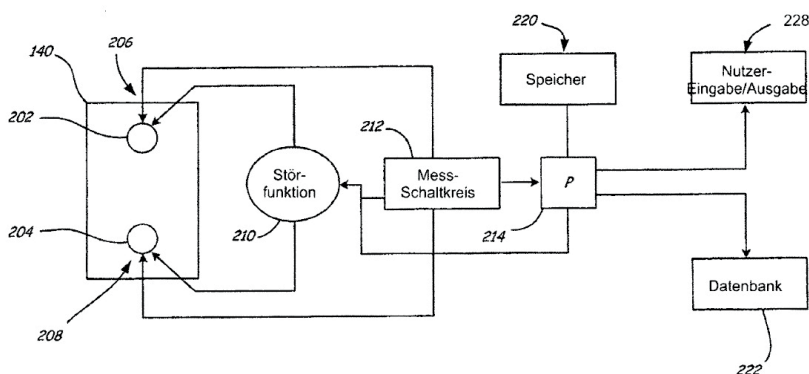
Figur 3: Teilansicht einer Batteriezelle (aus DE 11 2016 001 181 T5).

3 Müllvermeidung

Ein wichtiger Ansatz die großen anfallenden Mengen an zu recycelnden Batteriesystemen handhaben zu können, ist die Reduzierung der anfallenden Menge, indem nur wirklich nicht mehr brauchbare Batteriezellen und Batteriesysteme dem Recycling zugeführt werden. Beispielsweise können Batteriesysteme, die für einen anspruchsvollen Gebrauch, wie beispielsweise als Traktionsbatterien in Kraftfahrzeugen, nicht mehr geeignet sind, noch in weniger anspruchsvollen Bereichen, wie Batteriespeicherkraftwerken, eingesetzt werden. Diese als Second Life bezeichnete Verwendung wurde bereits in einer früheren Ausgabe der Erfinderaktivitäten [11] im Detail beschrieben.

Des Weiteren lassen sich die anfallenden Mengen an Batterierecyclingmaterial reduzieren, indem Batteriesysteme, die den Anforderungen nicht mehr genügen, nicht als Ganzes entsorgt werden, sondern repariert werden, das heißt die defekten oder zu stark gealterten Batteriezellen ausgetauscht werden und nur diese recycelt werden. Figur 4 zeigt den schematischen Aufbau einer solchen Batteriepack-Wartungsvorrichtung. Die Batteriezellen können durch Verbindungen an individuellen Punkten zwischen mehreren Batteriezellen getestet werden, während sie in dem Batteriepack verbleiben. Die jeweils zu untersuchende Batteriezelle 140 ist dabei über einen positiven Anschluss 202 und einen negativen Anschluss 204 an einen Messschaltkreis 212 angeschlossen. Des Weiteren ist die Batterie über ihre Anschlüsse mit einer Zwangsfunktion 210 gekoppelt, welche an der Batterie ein Zwangsfunktions-Signal anwendet. Dieses kann ein aktives Signal sein, welches in die Batteriezelle

eingespeist wird oder ein passives Signal, in welches ein Strom von der Batterie gezogen wird. Die Antwort der Batterie auf das angewendete Zwangsfunktions-Signal wird dann durch den Messschaltkreis gemessen und einem Mikroprozessor 214 bereitgestellt. Der Mikroprozessor kann gemäß im Speicher 220 abgelegter programmierter Anweisungen betrieben werden. Der Speicher



Figur 4: Batterie-Wartungsvorrichtung (aus DE 11 2011 103 331 B4).

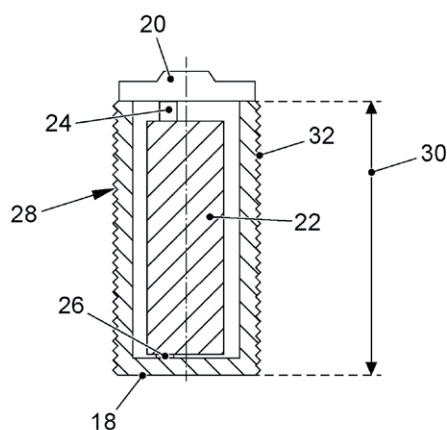
kann auch Informationen vom Mikroprozessor speichern. Der Betrieb der Vorrichtung kann durch eine Nutzer-Eingabe/Ausgabe 228 gesteuert werden. Gemessene Batterieparameter werden in einer Datenbank 222 für späteres Abrufen gespeichert. Ausgefallene, nicht funktionierende oder verschlissene Batteriezellen werden innerhalb des Batteriepacks durch Testen identifiziert, aus dem Batteriepack entfernt und durch funktionstüchtige mit passenden Eigenschaften ersetzt.

4 Recyclingoptimiertes Design

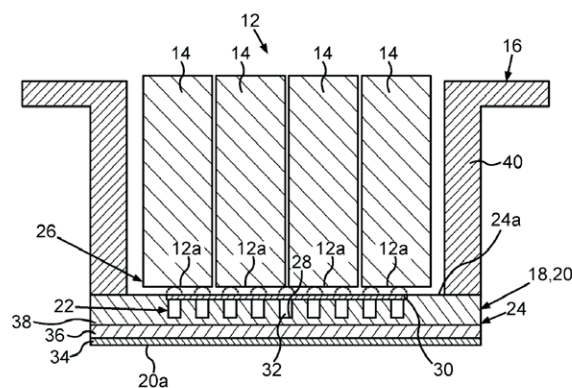
Eine wichtige Herausforderung der Bestrebungen die Recyclingquote zu erhöhen und damit verbundene Kosten zu reduzieren, ist eine Optimierung des Designs der aktuellen Batteriesysteme, so dass ein Recycling erleichtert wird. Beispielsweise sind feste, nicht lösbare Verbindungen, wie Verschweißungen oder Verklebungen zu vermeiden, um das Zerlegen der Batteriesysteme zu erleichtern. Im Folgenden sind drei Beispiele für ein verbessertes Design aufgeführt. Figur 5 zeigt eine Batteriezelle für den Einbau in einem Batteriemodul zur Verwendung in einem Kraftfahrzeug. Die Batteriezelle ist als Rundzelle ausgeführt und weist somit ein zylindrisches Zellgehäuse 18 auf, das mit einem stirnseitigen Zelldeckel 20 verschlossen ist. Innerhalb des Zellgehäuses ist der Elektrodenwickel 22 mit dem Pluspol 24 und dem Minuspol 26 angeordnet. Der Pluspol ist mit dem Zelldeckel und der Minuspol mit dem Zellgehäuse verbunden. Somit wird der Pluspol vom Zelldeckel und der Minuspol der Batteriezelle vom Gehäuse gebildet. Zelldeckel und Gehäuse sind elektrisch voneinander

isoliert. In die außenseitige Mantelfläche 28 des Zellgehäuses ist ein Gewinde 32 eingebracht, welches sich über die komplette Zellhöhe erstreckt. Über das Außengewinde des Zellgehäuses wird die Batteriezelle in ein korrespondierendes Innengewinde des Trägerkörpers des Batteriemoduls eingeschraubt. Die elektrische Verschaltung der Minuspole der Batteriezellen erfolgt somit reversibel über die Gewindeverbindung. Dies ermöglicht eine einfache Demontage sowohl einzelner Batteriezellen im Fall einer Wartung oder Reparatur des Batteriemoduls, als auch aller Batteriezellen im Fall des Recyclings des kompletten Batteriemoduls.

Ein anderer recyclingoptimierter Aufbau eines Zellmoduls für den Einsatz als Traktionsbatterie in einem Kraftfahrzeug ist in Figur 6 dargestellt. Mehrere Batteriezellen 14 sind in einem Batteriegehäuse 16 angeordnet und sollen über den Zellboden, welcher in Verbindung mit einer Kühlplatte steht, gekühlt werden. Ziel des dargestellten Designs ist es, die Recyclebarkeit zu verbessern, indem auf die sonst häufig verwendeten Klebstoffe oder Gapfiller zwischen den Batteriezellen und der Kühlplatte verzichtet werden kann. Hierzu befinden sich auf der den Batteriezellen zugewandten Seite des Batteriegehäusebodens 24a Kühlmittelnuten 28, die von einer darüber angeordneten Kunststoffolie 24 überdeckt sind, sodass ein von einem Kühlmittel durchströmbarer Kühlkanal 32 gebildet wird. Die Kunststoffolie kann dabei durch Kleben, Laminieren oder Schweißen mit der Kunststoffplatte 24 des Batteriegehäusebodens verbunden werden. Werden die Kühlkanäle von einem Kühlmittel mit einem bestimmten Kühlmitteldruck durchströmt dehnt sich die elastische Folie aus, wie in der Zeichnung gestrichelt dargestellt, und wird gegen



Figur 5: Batteriezelle mit Außengewinde (aus DE 10 2019 207 207 A1).



Figur 6: Batteriemodul mit im Boden angeordneten Kühlkanälen (aus DE 10 2019 205 422 A1).

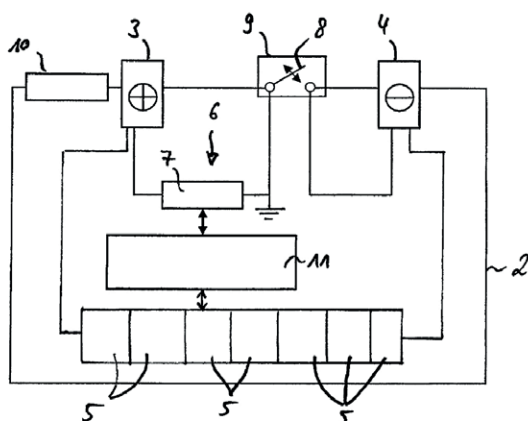
die Unterseite 12a der Batteriezellen gepresst, wodurch ein guter Wärmekontakt hergestellt wird.

Ein weiteres Beispiel, wie schon bei Design und Herstellung der Batterie das spätere Recycling vereinfacht und sicherer gestaltet werden kann, wird im Folgenden beschrieben.

Das Recycling eines Energiespeichers erfordert häufig das Öffnen des Energiespeichergehäuses und anschließende Zerlegen des Energiespeichers in Einzelteile. Bei diesen meist noch manuell durchgeführten Tätigkeiten, kann es zu Gefährdungen der Personen durch ungewollte Kurzschlüsse kommen. Des Weiteren stellen die ausgebauten Batteriezellen weiterhin ein Gefahrgut dar und müssen anschließend noch entladen werden.

Insbesondere ein eventuell notwendiger Weitertransport wird hierdurch erschwert.

Ein Energiespeicher der hinsichtlich dieser Problematik optimiert ist, ist in Figur 7 dargestellt. Der gezeigte Energiespeicher weist ein Gehäuse 2 mit einen positiven Pol 3 und einen negativen Pol 4 auf, über die Energie entzogen oder zugeführt werden kann. Im Inneren des Gehäuses befinden sich mehrere Speicherzellen 5, die elektrisch miteinander und mit den Polen verbunden sind. Des Weiteren ist in das Gehäuse eine Tiefentladeeinrichtung 6 integriert, welche einen Entladeverbraucher 7 in Form eines elektrischen Widerstandes, einer Spule oder eines Transistors umfasst, über den die beiden Pole mittels des Schalters 8 elektrisch verbindbar sind. Der Schalter kann manuell oder auch funktesteuert ausgeführt werden. Die Demontage des Energiespeichers wird durch die beschriebene Vorrichtung durch ein vorheriges Entladen der Speicherzellen vereinfacht. Eine Gefährdung der mit dem Zerlegen be-

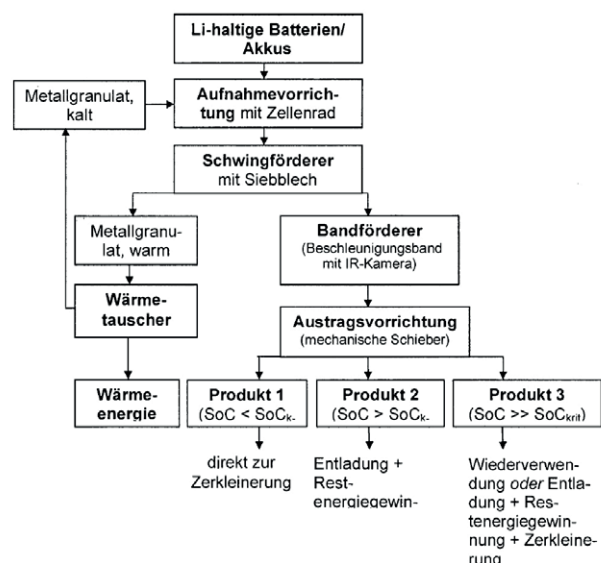


Figur 7: Energiespeicher mit integrierter Tiefentladeeinrichtung (aus DE 10 2009 050 125 A1).

trauten Personen wird vermieden und die ausgebauten Speicherzellen können problemlos weitertransportiert oder weiterbearbeitet werden.

5 Entladung und Sortierung

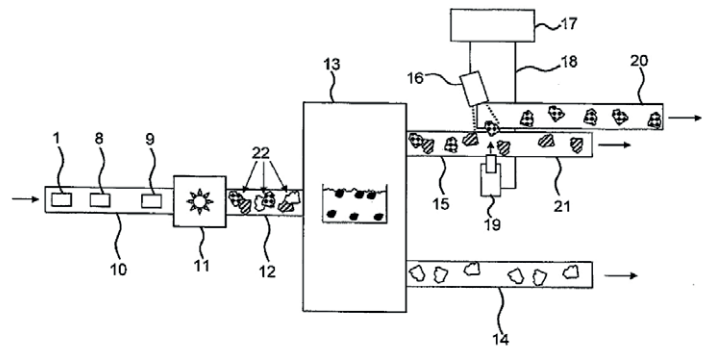
Eine große Herausforderung beim Recycling der in Batteriesammelsystemen gesammelten Batterien ist die oft große Vielfalt an unterschiedlichen Größen, Geometrien, Zusammensetzungen und Restladungen. Zur besseren Weiterverarbeitung ist eine vorherige Sortierung vorteilhaft. In Figur 8 sind die Schritte eines derartigen Verfahrens zur Sortierung von Batteriezellen mit Restladung dargestellt. Ziel ist die Aussortierung sowie anschließende separate Entladung potentiell gefährlicher, höher geladener Einzelzellen. Die Batteriezellen werden einer Aufnahmevorrichtung mit Zellenrad zugeführt, welche mehrere Kammern zur Aufnahme von Batteriezellen besitzt. Dort werden sie mit einer festgelegten, zur Einbettung ausreichenden Menge Kupfergranulat versehen. Nach Ablauf einer festen Einbettungsdauer kippt das Zellenrad seinen Inhalt auf einen Schwingförderer mit Siebblech, durch welches das Granulat abgetrennt wird. Das Granulat wird anschließend in einem Wärmetauscher abgekühlt und wiederverwertet. Die dort gewonnene Wärmeenergie kann anderweitig weiterverwendet werden. Die durch die vorherige Einbettung im leitfähigen Granulat abhängig von ihrem



Figur 8: Batteriezellensortieranlage (aus DE 10 2013 011 470 B4).

Ladezustand durch Entladung unterschiedlich erhitzten Batteriezellen werden einem Beschleunigungsband zugeführt, über dem eine IR-Kamera angebracht ist. In Abhängigkeit von der dort gemessenen Wärmeemission werden die Batteriezellen mit einem mechanischen Schieber in separate Behälter mit unterschiedlichen Sicherheitsstandards zur späteren Weiterverarbeitung befördert. Unbedenkliche Batteriezellen mit geringer Ladung (Produkt 1) können dann direkt einer Zerkleinerung zugeführt werden, die problematischen Batteriezellen mit zu hoher Restladung (Produkte 2 und 3) können auf einem Entladeband erneut mit Granulat bedeckt werden, um sie weiter zu entladen oder an einem anderen Ort weiterverarbeitet werden.

Eine weitere Sortierung kann nach der Zerkleinerung kompletter Batterien oder Batteriezellen erfolgen. Die zu unterscheidenden und trennenden Batterieteile werden hierfür bei der Herstellung mit verschiedenen Kennzeichnungsmaterialien versehen. Eine auf diesem Prinzip beruhende Sortieranlage ist in Figur 9 dargestellt. Die Akkumulatoren 1, 8, 9 werden über ein Zuförderband 10 in einem Brecher 11 in kleine Stücke 22 gebrochen und dann über ein weiteres Förderband einer Flotationsanlage 13 zugeführt, in der sie vorsepariert werden, das heißt hierüber schon zu trennende Batteriestücke aussortiert werden und über das Förderband 14 der weiteren Verwendung zugeführt werden. Die mittels Flotationsanlage nicht trennbaren Stücke werden über das Förderband 15 einer weiteren Separationseinrichtung zugeführt. Dort werden mittels einer Sensoreinheit



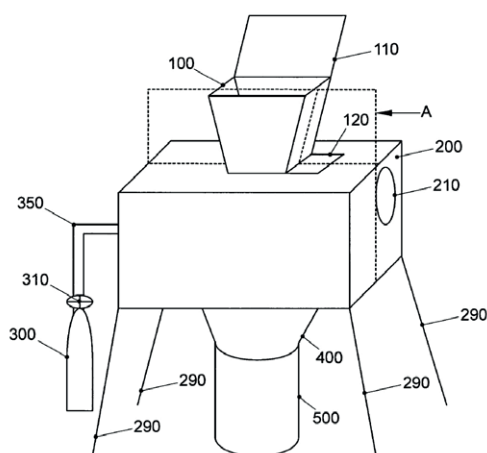
Figur 9: Sortieranlage für Batteriekomponenten (aus DE 10 2011 116 046 B4).

mit integrierter UV-Strahlungsquelle 16 die vorhandenen Stücke bestrahlt und anschließend eine mögliche Fluoreszenz, welche als beispielhaftes Kennzeichnungsmerkmal einem bestimmten, zu separierenden Material bei der Produktion zugegeben wurde, detektiert. Die so erkannten Stücke werden unter Verwendung einer Steuereinrichtung 17 mittels eines Aktuators 19 auf ein weiteres Transportband 20 verlagert. Die nicht fluoreszierenden Stücke werden auf dem Förderband 15 belassen und dort weitertransportiert. Für eine weitere, spezifischere Trennung können weitere Kennzeichnungsmaterialien verwendet werden, welche mittels einem optischen, einem magnetischen oder einem elektromagnetischen Sensor detektierbar sind. Dies können beispielsweise verschiedene farbige Pigmentstoffe, magnetische Materialien oder Mikrospulen sein.

6 Entschichtung und Zerkleinerung

Alte oder defekte Elektrolytbatteriezellen, welche einer Recyclinganlage zugeführt werden sollen, müssen als Gefahrgut transportiert werden. Dies ist aufwändig und teuer und immer mit einem Restrisiko behaftet. Um dies vermeiden zu können müssen die Batteriezellen vor dem Transport in einen unkritischen Zustand überführt werden.

Figur 10 zeigt als eine Möglichkeit hierzu eine Apparatur zur Überführung von Batteriezellen in einen transportfähigen Zustand. Die alten oder defekten Batteriezellen werden über eine trichterförmige Zuführvorrichtung 100 einer Zerkleinerungsvorrichtung 200 zugeführt. Mittels eines Deckels 110 kann die Zuführvorrichtung gasdicht von der Außenwelt getrennt werden. Zum Befüllen der Zerkleinerungseinrichtung mit einem Inertgas



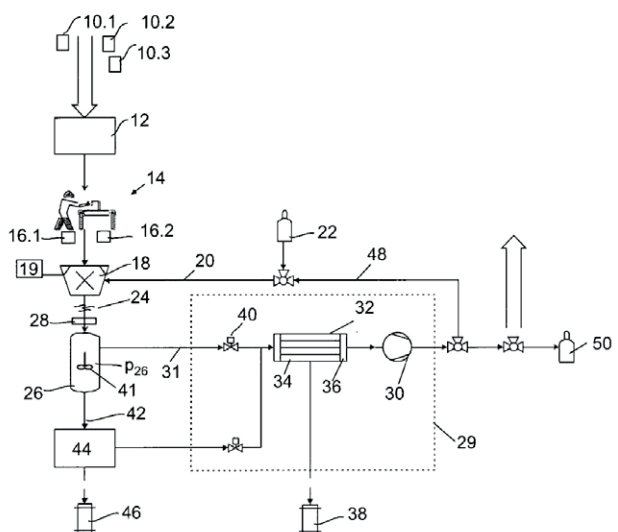
Figur 10: Behandlungsanlage für Batteriezellen vor dem Transport (aus DE 10 2012 024 876 A1).

ist diese über eine Gasleitung 350 an eine Inertgasquelle 300 angeschlossen. Die Batteriezellen werden unter Inertgasatmosphäre mittels der Schneidscheiben 230 in der Zerkleinerungseinrichtung in Zellbruchstücke zerkleinert, welche anschließend mittels der Düsen 450 in der sich anschließenden Materialaustragsvorrichtung 400 mit deaktivierendem Pulver oder Aerosol besprüht oder bestäubt werden. Anschließend werden die deaktivierten Zellbruchstücke in einem Kunststofffass 500 aufgefangen, das mittels Dichtflansch und Schnellwechselvorrichtung gasdicht gegen die Außenwelt an der Materialaustragsvorrichtung angebracht ist. In dieser Auffangvorrichtung können die Zellbruchstücke nach Abkopplung von der Materialaustragsvorrichtung zum Ort des weiteren Recyclings transportiert werden, ohne dabei spezielle Gefahrgut betreffende Sicherheitsmaßnahmen treffen zu müssen.

Eine andere Möglichkeit zum Inaktivieren der zerkleinerten Batteriestücke ist das Trocknen des Zerkleinerungsgutes. Das Trocknen kann beispielsweise durch Vakuumtrocknung, Kontakttrocknung, Konvektionstrocknung oder Strahlungstrocknung erfolgen. Das Zerkleinerungsgut wird solange getrocknet, bis der Elektrolytgehalt im Zerkleinerungsgut so klein ist, dass eine elektrochemische Reaktion nicht mehr möglich ist. Eine Vorrichtung die die Methode der Vakuumtrocknung verwendet, ist in Figur 11 dargestellt. Zuerst werden die Batteriesysteme 10.1, 10.2, 10.3 in einer Entladeeinheit 12 entladen. Anschließend werden die Batteriesysteme an der Demontagestation geöffnet und auseinandergebaut. Die Ansteuerelektronik kann entfernt werden. Die entstehenden Untereinheiten wie Module, Stacks oder Zellen 16.1 und 16.2 werden der Zerkleinerungseinheit 18 zugeführt, wo sie unter Schutzgas, welches aus der Schutzgasflasche 22 zugeführt wird, zerkleinert werden. Das entstandene Zerkleinerungsgut kommt über eine Schleuse in eine gasdicht getrennte Trockenvorrichtung 26. In der Trockenvorrichtung werden die flüchtigen Komponenten des Elektrolytes über eine Vakuumanlage 29 abgepumpt bis ein gewisser Wert unterschritten wird. Das Trocknungsgut wird mittels eines Rührwerkzeuges 41 während der Trocknung bewegt, um den Trocknungsprozess zu unterstützen. Bei der in der Vakuumanlage eingesetzten Vakuumpumpe 30 handelt es sich um einen Verdichter, der Gas aus der Trockenvorrichtung ansaugt und verdichtet. Zwischen

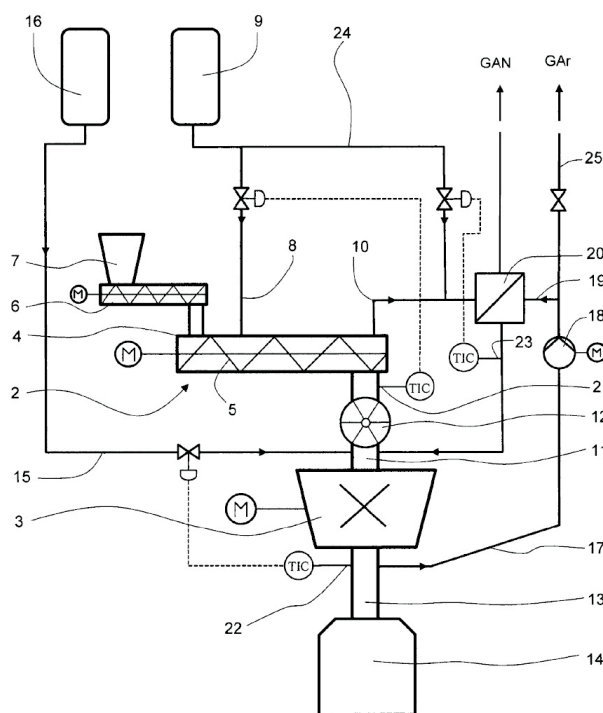
Trockenvorrichtung und Vakuumpumpe ist eine Gasreinigungsvorrichtung 32, bestehend aus einem Kondensator 34 und einem Aktivkohlefilter 36, angeordnet, mittels derer die flüchtigen Stoffe des Elektrolyts aus dem Gasstrom entfernt und einem Kondensatbehälter 38 zugeführt werden. Das gereinigte Gas kann wieder über die Leitung 48 der Zerkleinerungseinheit 18 zugeführt werden. Das getrocknete, inaktivierte Zerkleinerungsgut 42 wird unter Vakuum oder Schutzgas in einen Transportbehälter 46 abgefüllt.

Eine andere Vorrichtung für ein Verfahren zum sicheren Zerkleinern von alkalimetallhaltigen Stromspeichern als Vorbehandlung zu einem Recyclingverfahren ist in Figur 12 dargestellt. Werden Stromspeicher einem Zerkleinerungsverfahren unterzogen, kann insbesondere die Reaktion von Alkalimetallen wie Lithium mit Wasser, Luft oder Stickstoff so heftig sein, dass es zu einem Brand oder sogar einer Explosion kommt. Es ist daher notwendig die Reaktionen der Alkalimetalle so zu verlangsamen, dass die Zerkleinerung gefahrlos durchgeführt werden kann. Dies kann durch das Kühlen der Batterien auf Temperaturen zwischen -80°C und -190°C geschehen. Bei Batterien mit hohem Lithium-Anteil kommt hierfür nur flüssiges Argon als Kühlmittel in Frage. Die anschließende Zerkleinerung der Batterien findet in einer inerten, aus dem verdampften Kühlmittel bestehenden Atmosphäre statt. Dieses Verfahren ist wegen des hohen Verbrauchs an Argon aber nicht wirtschaftlich. Als Alternative ist in der Vorrichtung von Figur 12 eine zweifache Behandlung mit unterschiedlichen Gasen vorgesehen. Über einen Trichter 7 und eine Aufgabeeinheit 6 werden



Figur 11: Vorrichtung zum Zerkleinern und Inaktivieren von Batteriesystemen (aus DE 10 2015 207 843 B4).

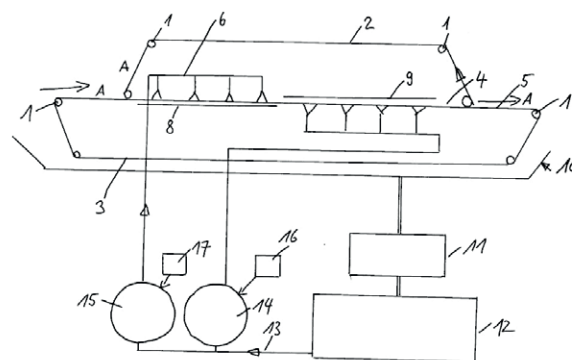
die Stromspeicher einer Kühleinrichtung 2 zugeführt. Diese besteht aus einer in einem gasdichten Gehäuse 4 aufgenommenen Förderschnecke 5. Die Kühleinrichtung ist mit einer Zuleitung 8 für flüssigen Stickstoff aus einem Tank 9 sowie mit einer Ausleitung 10 zum Abführen des verdampften Stickstoffs versehen. Während des Transports durch die Förderschnecke werden die Stromspeicher mittels des flüssigen Stickstoffs auf Temperaturen zwischen -30°C und 150°C abgekühlt. Die gekühlten Stromspeicher werden anschließend über eine Verbindungsleitung 11 der Zerkleinerungseinrichtung 3 zugeführt und dort zerkleinert. Eine Schleuse 12 zwischen der Kühleinrichtung und der Zerkleinerungseinrichtung verhindert das Eindringen von Stickstoff aus der Kühleinrichtung in die Zerkleinerungseinrichtung. Die Zerkleinerungseinrichtung ist mit einer Argon-Atmosphäre versehen. Hierzu wird gekühltes Argon aus einem Tank 16 über die Verbindungsleitungen 15 und 11 der Zerkleinerungseinrichtung zugeführt. Das erwärmte Argon wird über eine Ausleitung 17 abgeführt. Die Temperatur und die Konzentration des Argons in der Zerkleinerungseinrichtung wird an einer Messstelle 22 erfasst und dient als Regelgröße zur Steuerung der Argonzufuhr. Die Trennung von Stickstoffatmosphäre in der Kühleinrichtung und Argonatmosphäre in der Zerkleinerungseinrichtung ermöglicht eine preiswerte



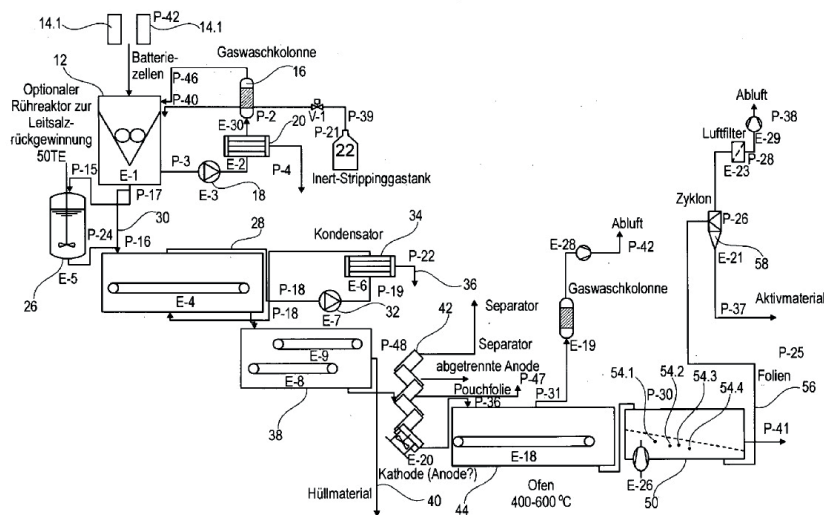
Figur 12: Vorrichtung zum Zerkleinern von alkalihaltigen Stromspeichern (aus DE 10 2019 006 386 A1).

Kühlung mittels Stickstoff und eine sichere Inertisierung mittels Argon während des Zerkleinerungsprozesses. Die zerkleinerten Fraktionen der Stromspeicher fallen über die Ausgangsleitung 13 in den Behälter 14 zur späteren weiteren Behandlung.

Die in Lithium-Akkumulatoren enthaltenen Kathoden- und Anodenfolien enthalten neben Aluminium und Kupfer als Folienmaterial in der Beschichtung seltene Metalle wie Nickel, Kobalt, Mangan und Lithium. Figur 13 zeigt eine Anlage zur zerstörungsfreien Ablösung der Beschichtungen von den Kathoden- und Anodenfolien zur Wiedergewinnung der Beschichtungen und der Folien. Die Entschichtungsanlage besteht aus zwei übereinander angeordneten, über Rollen 1 geführten Kunststofflaufbändern 2 und 3, welche jeweils mit dicht beieinanderliegenden Löchern perforiert sind. Der untere Strang 4 des oberen Kunststofflaufbandes verläuft in sehr kleinem Abstand von einigen μm parallel zum oberen Strang 5 des unteren Kunststofflaufbandes. Die Laufrichtung ist durch Pfeile A dargestellt. Oberhalb der Stränge 4 und 5 ist ein erster Bereich 6 von Hochdruckdüsen, zur Wasserstrahlentschichtung der oberen Seite der Folien durch die Perforationen im unteren Strang des oberen Kunststofflaufbandes hindurch, angeordnet. Auf der gegenüberliegenden Seite der Stränge 4 und 5 ist eine biege feste Platte angeordnet, die die Kunststofflaufbänder mit der Folie abstützt, so dass die Folien nicht durch die auftreffenden Wasserstrahlen zerstört werden. In Laufrichtung stromabwärts ist ein zweites Feld 7 mit mehreren Hochdruckdüsen und gegenüberliegender biege fester Platte 9 spiegelverkehrt zu den Strängen 4 und 5 angeordnet, um auch die zuvor nicht entschichtete Seite der Folien behandeln zu können. Zur zusätzlichen mechanischen Unterstützung



Figur 13: Anlage zum Entschichten von Elektrodenfolien (aus DE 10 2019 103 424 B4).



Figur 14: Aktivmaterial-Separationsanlage (aus DE 10 2011 110 083 B4).

der Ablösung der Beschichtung, besitzen die beiden Laufbänder eine geringfügig unterschiedliche Laufgeschwindigkeit.

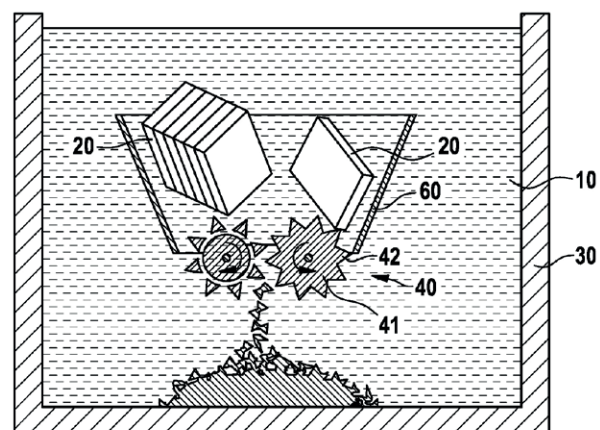
Die zu entschichtenden Folien werden am linken Endbereich auf den oberen Strang des unteren Laufbandes aufgelegt und mittels des Laufbandes nacheinander zu den beiden Bereichen mit Hochdruckdüsen befördert, bei denen nacheinander beide Seiten entschichtet werden. Die beidseitig entschichteten Folien treten aus dem Zwischenraum zwischen den Strängen der Kunststofflaufbänder aus und werden am rechten Endabschnitt des oberen Stranges des unteren Kunststofflaufbandes entnommen. Das Wasser mit der abgelösten Beschichtung fällt in eine unterhalb des unteren Kunststoffbandes angeordnete Wanne 10 und gelangt darauf in einen Filter 11 der die Beschichtung aus dem Wasser filtert. Das Wasser wird über einen Tank 12 und Hochdruckpumpen 14 und 15 wieder den Hochdruckdüsen zugeführt. Die Beschichtung wird anschließend getrocknet und weiterverarbeitet.

Eine Anlage die eine weitere Möglichkeit des Abtrennens des Aktivmaterials von der Folie, nämlich das Luftstrahlsieben, nutzt, ist in Figur 14 dargestellt. Die Batteriezellen 14.1 werden einer Zerkleinerungsvorrichtung 12 zugeführt. Die Zellenfragmente gelangen danach in einen Rührreaktor 26, welcher zum Abziehen einer Flüssigfraktion ausgebildet ist, um Leitsalz aus den Batteriezellen zurückzugewinnen. Anschließend gelangen die Zellenfragmente in den Vortrockner 28 und anschließend in den Abscheider 38, der einen

Magnetabscheider und einen Wirbelstromabscheider umfassen kann, zur Abtrennung von magnetischem Material. Im sich anschließenden Siehter 42 werden die Anoden und Zellverpackungsfolien abgetrennt. Die Kathoden gelangen in den Ofen 44, in dem bei einer Temperatur von 400 °C bis 600 °C der in der Aktivmaterialschicht der Kathodenfolie vorhandene Binder zersetzt wird. Anschließend gelangen die wärmebehandelten Kathodenfolien in ein Luftstrahlsieb 50. Dies ist so aufge-

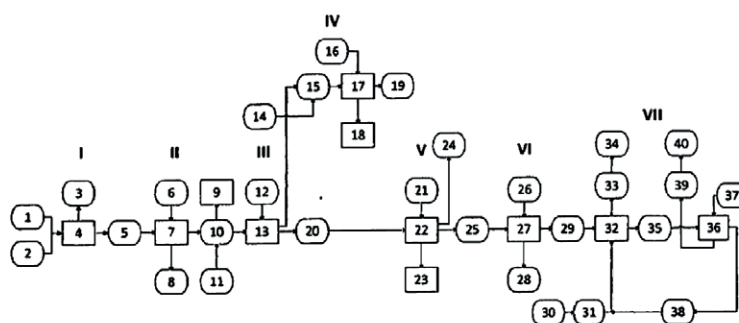
baut, dass oberhalb und unterhalb eines feinmaschigen Siebelements ein Luftstrom zugeführt wird. Dieser wird unterhalb des Siebes abgezogen. Durch die Luftströmung werden die Elektrodenfragmente aufgewirbelt und mechanisch beansprucht, was die Separation von Beschichtung und Trägerfolie unterstützt. Die Aktivmaterialpartikel werden im Luftstrom durch die Maschen gezogen und durch einen Zyklon aus dem Luftstrom abgetrennt. Die Folienreste aus Aluminium und Kupfer werden von dem Siebelement zurückgehalten und können als Metallfraktion wiederverwendet werden.

In fast allen Lithium-Ionen-Batteriezellen wird als Leitsalz des Elektrolyts Lithiumhexafluorophosphat verwendet. In Anwesenheit von Wasser entstehen die hoch toxischen Stoffe Fluorwasserstoff und Phosphoroxidtrifluorid. Um diese Stoffe chemisch abzubinden hat sich die Beigabe von Kalziumchlorid zu wässrigen



Figur 15: Zerkleinerungsvorrichtung (aus DE 10 2011 082 187 B4).

Lösungen als geeignet erwiesen. Eine Vorrichtung zum Zerkleinern von Batteriezellen in einem speziellem derartigen Umgebungsfluid ist in Figur 15 dargestellt. Ein mit einem Umgebungsfluid 10, welches aus einer wässrigen Kalziumchlorid-Lösung besteht, gefülltes Gehäuse 30 beherbergt einen Schredder 40 mit zwei Schredderwalzen 41 und eine trichterartige Zuführung für Batterien 20. Die Batterien gelangen über den Trichter in den Schredder, wo sie zerkleinert werden. Die in wässriger Umgebung entstehenden hoch toxischen Stoffe Fluorwasserstoff und Phosphoroxidtrifluorid werden durch Reaktion mit dem Kalziumchlorid neutralisiert. Die Batteriefragmente sammeln sich auf dem Boden des Gehäuses, von dem sie abgeführt werden können.



Figur 16: Hydrolyse-Recyclingverfahren (aus DE 10 2018 117 237 A1).

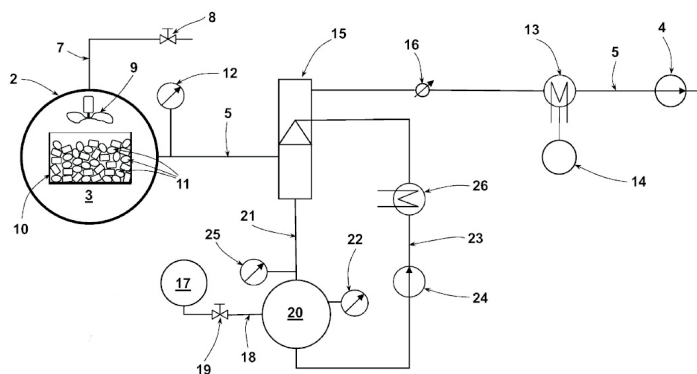
7 Hydrometallurgisches Verfahren

Ein Beispiel für einen Prozessablauf in einer hydrometallurgischen Recyclinganlage ist in Figur 16 dargestellt. Im ersten Schritt wird das zerkleinerte Batteriematerial 1 unter Sauerstoffzufuhr 2 bei 500 °C bis 650 °C thermisch behandelt, um die organischen Bestandteile 3 zu entfernen. Im zweiten Schritt wird das übriggebliebene Batteriematerial in einem Rührkessel 7 mit Hilfe von Salzsäure 6 gelöst. Unlösliches Graphit 8 wird abgetrennt. Die gelösten Metalle Nickel, Kobalt und Mangan werden im dritten Schritt durch Einleiten von H₂S (12) aus der Lösung als Sulfide ausgefällt und der Niederschlag 20 wird von der Lösung 15 getrennt. Aus der Lösung wird im vierten Schritt Lithium als Car-

bonat 19 gewonnen. Im parallel verlaufenden fünften Schritt wird das Mangan 24 gewonnen, indem es zuerst mittels Essigsäure 21 gelöst und von dem restlichen Niederschlag abgetrennt wird, und dann anschließend galvanostatisch abgeschieden wird. Im anschließenden sechsten Schritt wird der restliche nickel- und kobalt-haltige Rückstand mittels Essigsäure und Wasserstoffperoxid 26 gelöst und die Rückstände 28 abfiltriert. Die Lösung wird im siebten Schritt extrahiert 32, wobei sich Kobalt in der organischen Phase 35 anreichert und Nickel in der wässrigen Phase 33. Nach der Phasenseparation wird jeweils Nickel 34 und Kobalt 40 durch galvanostatisches Abscheiden gewonnen.

8 Pyrolytisches Verfahren

Eine Anlage für ein Verfahren zum thermischen Aufschluss von elektrochemischen Energiespeichern ist in Figur 17 dargestellt. Eine Gitterbox 10 mit ausgedienten Energiespeicher 11 wird in einen Vakuumofen 2 eingebracht. Anschließend wird die Prozesskammer 3 des Vakuumofens mittels der Vakuumpumpe 4 evakuiert und die Energiespeicher auf eine Temperatur von 160 °C bis 200 °C erwärmt. Bei diesem ersten Prozessschritt wird der Druck soweit erniedrigt und die Energiespeicher so weit erwärmt, dass die darin enthaltenen Elektrolyte verdampfen. Der Unterdruck von weniger als 10 mbar ermöglicht, dass die Elektrolyte schon bei relativ niedrigen Temperaturen verdampfen. Durch den entstehenden Dampfdruck werden die Batteriezellen geöffnet. Die Gase werden über die Leitung 5 abgesaugt und über einen Oberflächenkondensator 13 mit angeschlossenen



Figur 17: Pyrolyse-Recyclinganlage (aus DE 10 2019 133 927 A1).

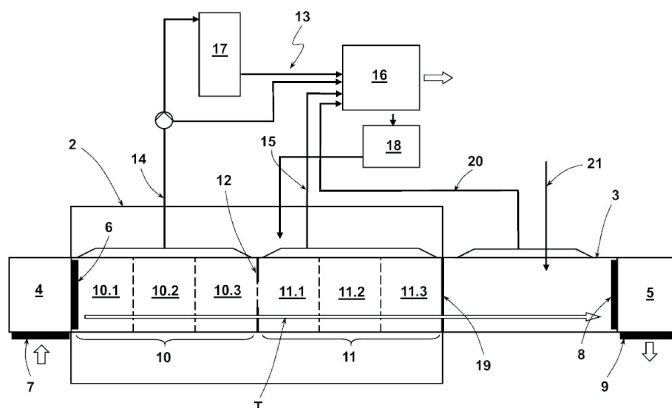
Elektrolytsammeltank wiedergewonnen. Beim anschließenden zweiten Prozessschritt wird die Temperatur bis maximal 600°C weiter erhöht, so dass sich die enthaltenen Separatoren zersetzen und die Energiespeicher so restentladen werden. Zu Beginn dieses Prozessschrittes wird die Vakuumpumpe abgeschaltet, so dass sich aus den Prozessgasen eine reduzierende Atmosphäre in der Prozesskammer bildet. Dies hat den Vorteil, dass die durch den Zersetzungsprozess frei gewordenen Metalle Eisen, Nickel und Kobalt keine oxydischen Verbindungen eingehen und daher in einem Nachfolgeprozess mittels Magnetabscheider einfach separiert werden können. Mittels dem Einspritzkondensator 15, welcher im zweiten Prozessschritt in Betrieb ist, werden die Prozessabgase gereinigt. Insbesondere wird im Prozessgas enthaltene Flusssäure entfernt und über die Leitung 21 einem Sammel tank 20 zugeführt und dort mithilfe zugegebener Lauge aus dem Laugentank 17 neutralisiert. Die so erhaltene etwa pH-neutrale Flüssigkeit wird über die Einspritzleitung 23 wieder dem Einspritzkondensator zugeführt.

Die beiden Prozessschritte können entweder, wie gerade dargestellt, nacheinander in einer Prozesskammer durchgeführt werden oder, wie in Figur 18 abgebildet, in einer Durchlaufkammer mit mehreren hintereinander angeordneten Heizzonen. Die Energiespeicher werden batchweise, jeweils in einer Gitterbox angeordnet, über die Eingangsschleuse 4 in den Tunnelofen 2 eingebracht. Der Tunnelofen ist in zwei Temperaturzonen 10 und 11 unterteilt, welche ihrerseits in drei Heizzonen 10.1, 10.2, 10.3 beziehungsweise 11.1, 11.2, 11.3 unterteilt sind. Die beiden Temperaturzonen entsprechen

den zwei oben beschriebenen Prozessschritten. Die Gitterboxen mit den Batteriespeichern durchlaufen die beiden Heizzonen nacheinander und anschließend eine Kühlstrecke 3, bevor sie über eine Ausgangsschleuse 5 die Anlage verlassen. Die beiden Gasabsaugzweige 14 und 15 sind über Absaugleitungen mit einer thermischen Nachverbrennung 16 verbunden. Der 1. Absaugzweig kann auch über einen Oberflächenkondensator 17 geleitet werden, um die im Abgas enthaltenen Elektrolyte abzutrennen und zurückzugewinnen.

9 Ausblick

Der Bedarf an neuen und effizienten Recyclingprozessen wird durch die rasant wachsende Batterieproduktion im Bereich Elektromobilität auch in den nächsten Jahren und Jahrzehnten hoch bleiben. Neben der stark steigenden Menge an Batteriemüll und der daraus folgenden Notwendigkeit noch effizienterer Recyclingprozesse, ist eine weitere große Herausforderung, die Recyclingprozesse an die sich ändernde Zusammensetzung zukünftiger Batteriezellen anzupassen beziehungsweise hierfür geeignete Recyclingprozesse zu entwickeln. Auch müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden, um zu höheren Recyclingquoten zu motivieren. Die bislang in Deutschland im Batteriegesetz (BattG) vorgeschriebene Recyclingquote von 50% wird wohl durch geplante strengere EU-Vorgaben ersetzt werden.



Figur 18: Pyrolyse-Recyclinganlage (aus DE 10 2019 133 914 A1).

Nicht-Patentliteratur

- [1] Lithium-Ionen-Akkus: Die Altlast der Elektromobilität, Spektrum der Wissenschaft 1, 2021, Seiten 58-63
- [2] LEMME, Helmuth: Batterierecycling: Aus alt mach neu, Elektronik 9, 2020, Seiten 46-49
- [3] WEIL, Marcel et al.: Recycling of Traction Batteries as a Challenge and Chance for Future Lithium Availability in: PISTOIA, Gianfranco (Editor): Lithium-Ion Batteries – Advances and Applications, Elsevier 2014, Seiten 509-528, ISBN 978-0-444-59513-3
- [4] SIEG, Klaus: Schatztruhe Alt-Akku, VDI nachrichten 35, 2021, Seiten 6 und 7
- [5] LANGE, Edgar: Neues Verfahren verwertet Akkus von Elektrofahrzeugen, VDI nachrichten 38, 2020, Seite 11
- [6] LEMME, Helmuth: Das zweite Leben des Akkus. Elektronik 5, 2019, Seiten 38-41
- [7] TREFFER, Frank: Lithium-Ionen-Batterie-Recycling, in: Korthauer, Reiner (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, 2013, Seiten 345-355. - ISBN 978-3-642-30652-5
- [8] VEZZINI, Andrea: Manufacturers, Materials and Recycling Technologies in: PISTOIA, Gianfranco (Editor): Lithium-Ion Batteries – Advances and Applications, Elsevier 2014, Seiten 529-551, ISBN 978-0-444-59513-3
- [9] OCHS, Dirk: Traktionsbatterien – Schlüssel für die Elektromobilität, Erfinderaktivitäten 2016/2017, Deutsches Patent- und Markenamt 2017, Seiten 4-12
- [10] OCHS, Dirk: Sicherheit von Lithium-Ionen-Batteriesystemen in Kraftfahrzeugen, Erfinderaktivitäten 2018/2019, Deutsches Patent- und Markenamt 2019, Seiten 51-61
- [11] SEITZ, Helmut, SCHÜÈ, Martina: Second Life – Nachhaltigkeitskonzepte für Batterien im Bereich Elektromobilität, Erfinderaktivitäten 2016/2017, Deutsches Patent- und Markenamt 2017, Seiten 13-19
- [12] THOMPSON, Dana L. et al.: The importance of design in lithium ion battery recycling – a critical review, Green Chemistry 22, 2020, Seiten 7585-7603
- [13] EKBERG, Christian et al.: Lithium Batteries Recycling, in: CHAGNES, Alexandre und SWIATOWSKA, Jolanta (Editors), Lithium Process Chemistry – Resources, Extraction, Batteries, and Recycling, Elsevier 2015 Seiten 233-267, ISBN: 978-12-801417-2
- [14] CHAGNES, Alexandre et al.: A brief review on hydrometallurgical technologies for recycling spent lithium-ion batteries, J. Chem. Technol. Biotechnol. 88, 2013, Seiten 1191-1199
- [15] BERTIN et al.: Batteries, in: VEIT, Hugo Marcelo und BERNARDES, Andrea Moura (Editors) Electronic Waste – Recycling Techniques, Springer 2015 Seiten 129-158, ISBN 978-3-319-15713-9

Verbund für's Leben? – Mehrschichtfolien und Recycling

Astrid Pant, Patentabteilung 1.27

Über die Autorin

Astrid Pant studierte Lebensmitteltechnologie an der Universität Bonn. Anschließend war sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV) in Freising in der Materialentwicklung für Verpackungen tätig. Begleitend promovierte sie am Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik der Technischen Universität München.

Seit 2019 ist Frau Pant als Patentprüferin in der Patentabteilung 1.27 für Prüfgebiete im Bereich Schichtfolien und Papiertechnik zuständig.

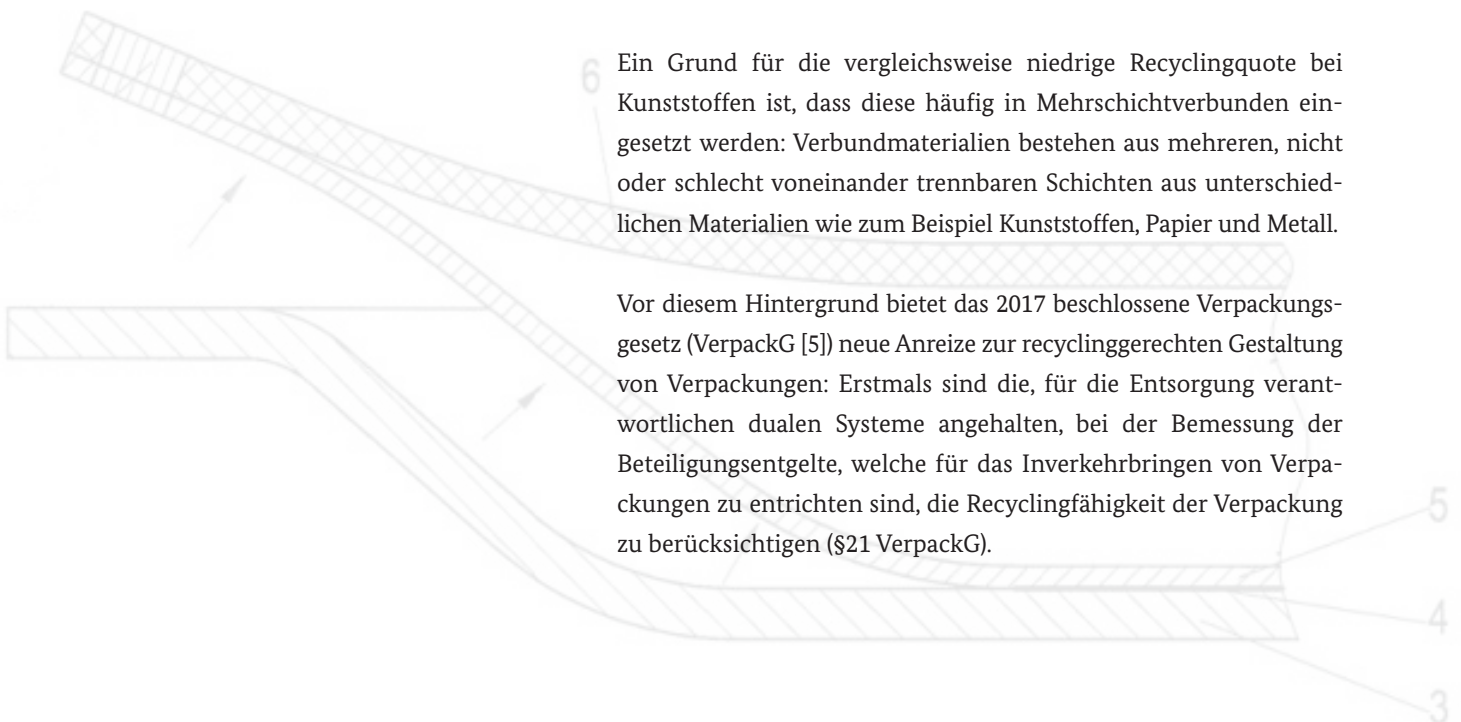
Beutel, Folien, Tuben, Schalen – all diese Verpackungen verwenden und entsorgen wir tagtäglich. Dass die Verpackungsmaterialien häufig aus vielen dünnen Einzelschichten bestehen, ist dabei den wenigsten bewusst. Aus Recyclingsicht sind diese mehrschichtigen Verpackungsmaterialien eine große Herausforderung, da unterschiedliche Kunststoffe, Papier oder Aluminium fest miteinander verbunden sind. Dieser Beitrag wirft einen Blick in das Innere von Mehrschichtverbunden und zeigt Ideen für eine recyclingfreundliche Gestaltung.

Abfall-G'Schichten

In Deutschland fielen 2018 laut Auswertungen des Umweltbundesamts pro Kopf 227 kg Verpackungsmüll an; davon gehen 107,7 kg auf private Endverbraucherinnen und -verbraucher zurück [1]. Innerhalb Europas nimmt Deutschland damit eine Spitzenposition ein [2]. Doch auch beim Recycling ist Deutschland vorne mit dabei: 69 % des Verpackungsmülls wurden recycelt. Hierbei gibt es jedoch große Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Materialien: Während zum Beispiel Aluminium zu 90,1 % und Papier/Karton zu 87,7 % recycelt wurden, lag der Recyclinganteil bei Kunststoffen 2018 nur bei 47,1 % der angefallenen Menge [1].

Ein Grund für die vergleichsweise niedrige Recyclingquote bei Kunststoffen ist, dass diese häufig in Mehrschichtverbunden eingesetzt werden: Verbundmaterialien bestehen aus mehreren, nicht oder schlecht voneinander trennbaren Schichten aus unterschiedlichen Materialien wie zum Beispiel Kunststoffen, Papier und Metall.

Vor diesem Hintergrund bietet das 2017 beschlossene Verpackungsgesetz (VerpackG [5]) neue Anreize zur recyclinggerechten Gestaltung von Verpackungen: Erstmals sind die, für die Entsorgung verantwortlichen dualen Systeme angehalten, bei der Bemessung der Beteiligungsentgelte, welche für das Inverkehrbringen von Verpackungen zu entrichten sind, die Recyclingfähigkeit der Verpackung zu berücksichtigen (§21 VerpackG).



Dieser Artikel betrachtet das Recycling von Verbundmaterialien und deren Anforderungen an die Verpackungsentwicklung: Welche Ansätze wurden in den letzten Jahren verfolgt, um Verbundmaterialien recyclingfreundlicher zu gestalten?

Doch zunächst lohnt sich ein Blick auf typische Mehrschichtverbunde, die in Verpackungen zu finden sind.

Ganz schön vielschichtig

Verpackungen erfüllen ganz unterschiedliche Funktionen und sind aus heutigen Supermärkten daher nur schwer wegzudenken: Sie erleichtern den Transport, dienen zur Kommissionierung, schützen das Produkt vor Einflüssen von außen, erleichtern die Handhabung für den Verbraucher und dienen nicht zuletzt auch als Fläche für Werbebotschaften und Information [6].

Entsprechend hoch sind die Anforderungen, die an die Verpackungsmaterialien gestellt werden: Schutzfunktion, mechanische Eigenschaften, Verarbeitbarkeit, sowie die optischen Eigenschaften müssen auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten sein.

All diese Anforderungen lassen sich selten durch ein einziges Material erfüllen. So fokussierte sich die Entwicklung der letzten Jahrzehnte auf ausgeklügelte Mehrschichtaufbauten aus Kunststoffen, Metallen und/oder Papier, wobei jede der häufig sehr dünnen Einzelschichten ein oder mehrere Funktionen erfüllt:

- Barrierschichten verbessern die Schutzfunktion der Verpackungsmaterialien, da Kunststoffe und Papier mehr oder weniger durchlässig für Gase sind, anders als zum Beispiel Glas. Hier ist vor allem die Barriere gegenüber Sauerstoff und Feuchtigkeit zu nennen.
- Mechanische Eigenschaften wie Steifigkeit und Reißfestigkeit werden durch die Auswahl geeigneter Kunststoffe, Papier oder auch Aluminium erzielt.
- Optische Eigenschaften werden zum Beispiel durch Metallisierungen, Bedruckung oder die Einfärbung von Kunststoffschichten erzeugt.

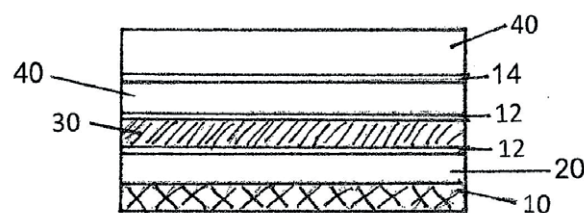
- Zusätzlich können noch Eigenschaften wie Siegfähigkeit (Verschweißbarkeit) oder besondere Absorptionseigenschaften gefordert sein.

Diese bei weitem nicht umfassende Aufzählung lässt erahnen, wie viele Kombinationsmöglichkeiten und damit unterschiedliche Verbundmaterialien entstehen können. Nicht zuletzt sind weitere Klebstoff- oder Haftvermittlerschichten erforderlich, um die Funktionsschichten miteinander zu verbinden.

Im Folgenden werden zwei typische Mehrschichtverbunde mit ihren Funktionsschichten näher betrachtet:

Schichtarbeit

Kunststoffverbunde

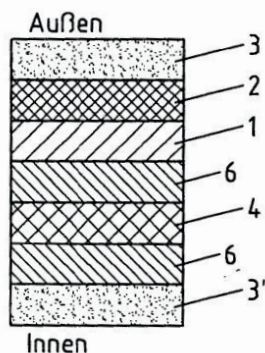


Figur 1: Schichtaufbau eines kunststoffbasierten Mehrschichtverbunds (aus DE 20 2010 007 972 U1).

Die DE 20 2010 007 972 U1 zeigt ein Beispiel für einen kunststoffbasierten Mehrschichtverbund für Lebensmittelverpackungen. Hierbei handelt es sich um eine transparente Folie, die, kaum wahrnehmbar für den Verbraucher, aus acht Einzelschichten besteht und zum Beispiel als Beutel oder als Deckelfolie für Schalen verwendet werden kann. Das Ausführungsbeispiel (Figur 1) zeigt eine innere, zum Produkt gerichtete Siegelschicht 10, die das Verschweißen zu Beuteln oder das Siegeln auf Schalen ermöglicht. Diese Schicht besteht aus Polyethylen (PE) und enthält zusätzlich ein Antifogmittel, welches verhindert, dass die Folie bei der Lagerung feuchter Lebensmittel beschlägt. Die darüberliegende Sperrschicht 20 aus Polypropylen (PP) soll das Antifogmittel daran hindern, durch die Folie in Richtung der Außenschicht zu wandern. Die Haftvermittlerschicht 12 verbindet die Sperrschicht 20 mit der Gassperrschicht 30, die aus Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH) besteht. Dieser polare Kunststoff wird häufig als dün-

ne Sauerstoffbarriereschicht verwendet, ist allerdings feuchteempfindlich und muss daher immer durch Folienschichten geschützt werden, die eine Feuchtebarriere darstellen. Diese Funktion übernehmen hier die Sperrschicht 20 sowie von der anderen Seite die Schicht 40. Mittels eines Klebstoffs 14 ist zur Außenseite der Folie eine weitere Schicht 40 als Außenschicht aufgebracht. Diese soll für Glanz und Kratzfestigkeit sorgen und kann zum Beispiel aus PP, Polyamid (PA) oder Polyethylenterephthalat (PET) bestehen. Zusätzlich kann diese Schicht auch noch eine Bedruckung aufweisen. Die Gesamtdicke dieser Folie beträgt maximal 120 µm, was in etwa der Dicke eines Blatts Kopierpapier entspricht.

Kunststoff-Metall-Papierverbunde



Figur 2: Schichtaufbau eines Kunststoff-Metall-Papierverbunds (aus DE 102 52 553 A1).

Die DE 102 52 553 A1 zeigt einen Mehrschichtverbund wie er zum Beispiel für Getränkekartons verwendet werden kann. Kern dieses Mehrschichtverbunds (Figur 2) ist eine Trägerschicht 1 aus Karton, die dem Getränkekarton seine Stabilität verleiht. Diese Trägerschicht ist bedruckt mit der Schicht 2; der Druck wird auf der Außenseite durch eine transparente Siegelschicht 3 aus PE geschützt. Auf der anderen Seite der Trägerschicht ist mittels einer Haftvermittlerschicht 6 eine Gasbarriereschicht 4 aufgebracht und mittels einer weiteren Haftvermittlerschicht eine innere Siegelschicht 3'. Die Gasbarriereschicht 4 besteht aus Materialien, die eine geringe Durchlässigkeit für Sauerstoff und/oder Wasserdampf aufweisen. In einem Getränkekarton handelt es sich dabei häufig um eine Aluminiumfolie. Abhängig von der Anwendung kann der Mehrschichtverbund auch mehrere dieser Barriereschichten aufweisen.

Schichtsalat?

Verbundmaterialien werden in Deutschland als Leichtverpackungen (LVP) über die dualen Systeme erfasst und sollten daher vom Verbraucher im sogenannten Gelben Sack entsorgt werden. Das LVP-Recycling umfasst zunächst mehrere Sortierschritte, die dazu dienen, die große Vielfalt an LVP in verschiedene Materialströme zu unterteilen.

Reine Kunststofffraktionen werden meist werkstofflich recycelt und dazu in weiteren Verarbeitungsschritten zerkleinert, gewaschen, gegebenenfalls nach Dichte getrennt, und schließlich in einem Extrusionsprozess aufgeschmolzen und zu einem Granulat als Zwischenprodukt verarbeitet [3].

Hierbei kommt es nun darauf an, wie rein die Kunststofffraktion ist beziehungsweise wie kompatibel die enthaltenen Kunststoffe in der Schmelze sind: Vorteilhaft sind sogenannte Monomaterialien, also zum Beispiel Folien oder Schalen, die nur aus einer Kunststoffart bestehen; hier kann ein möglichst reines recyceltes Polymer gewonnen werden.

Werden jedoch unterschiedliche Kunststoffe verwendet, wie in der Kunststoffverbundfolie der DE 20 2010 007 972 U1, ist es vorteilhaft, wenn diese zumindest miteinander kompatibel sind. Dies ist der Fall, wenn ähnliche Polymere gewählt werden. So können etwa in einem Material mit PP als Hauptbestandteil kleine PE-Anteile toleriert werden und umgekehrt [4]. Auch kleine Mengen an EVOH, das üblicherweise in sehr dünnen Schichten vorliegt, werden aus Recyclingsicht als weniger kritisch bewertet [4]. Aus Recyclingsicht sollte im Beispiel der DE 20 2010 007 972 U1 die äußere Schicht also aus Polypropylen bestehen und nicht aus weniger kompatiblen Polymeren wie PA oder Polyestern.

Getränkekartons wie in der DE 102 52 553 A1 beschrieben bilden im LVP-Recycling eine eigene Fraktion und werden in spezialisierten Anlagen recycelt. Hierbei ist das Hauptziel die Rückgewinnung der Fasern aus dem Pappanteil, der bis zu 75 % des Verbundmaterials ausmacht. Einmal abgetrennt, durchlaufen die Fasern die Altpapieraufbereitung und können dann zu Kartons oder ähnlichen Altpapieranwendungen weiterverarbei-

tet werden. Übrig bleibt ein Polymer-Alu-Gemisch, welches zum Beispiel in der Zementherstellung verwendet, jedoch bislang nicht werkstofflich recycelt wird [7].

Die gezeigten Beispiele lassen erkennen, was das Recycling von Verbundmaterialien so herausfordernd macht: Die unterschiedlichen Materialien sind fest miteinander verbunden und können durch bestehende Recyclingverfahren nicht voneinander getrennt werden.

Schichtwechsel!

Grundsätzlich werden in der Verpackungsentwicklung unterschiedliche Strategien verfolgt, um das Problem der Recyclingfähigkeit zu adressieren:

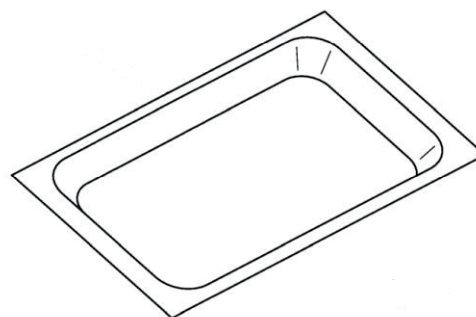
Zum einen werden alternative Mehrschichtstrukturen mit reduzierter Anzahl verwendeter Materialien, im besten Fall Monomaterialien, vorgeschlagen oder es werden miteinander kompatible Materialien verwendet. Zum anderen werden Mehrschichtstrukturen, die aus nicht kompatiblen Materialien bestehen, so gestaltet, dass sich die Schichten spätestens im Recyclingprozess wieder voneinander lösen lassen.

Monomaterialien

Bei der Verwendung von Monomaterialien stellt die unzureichende Gasbarriere für viele Anwendungen ein Problem dar. Ein Ansatz zur Optimierung von Monomaterialien ist daher das Aufbringen von dünnen Barrierschichten, die entweder aufgrund ihres geringen Anteils im Recycling nicht stören oder leicht entfernt werden können. So werden zum Beispiel Barrierschichten aus Siliziumoxid (SiO_x) im heißen Laugenbad im Rahmen der Folienaufbereitung abgewaschen [4].

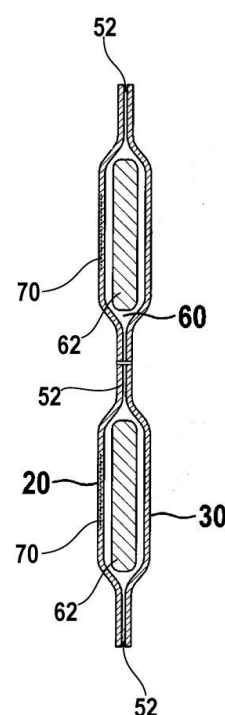
Die **DE 10 2017 109 567 A1** verfolgt einen solchen Ansatz und beschreibt eine Monofolie aus PP oder PET, die mit einer Barrierschicht aus Polyvinylalkohol (PVOH) beschichtet ist, welche zum einen nur einen geringen Anteil der gesamten Folie ausmacht und sich zum anderen im Recyclingprozess wieder ablösen lässt, so dass eine Monofolie zurückbleibt, die dann werkstofflich verwertet werden kann. Die beschichtete Folie kann

zum Beispiel als Deckelfolie verwendet oder zu Schalen tiefgezogen werden (Figur 3).



Figur 3: Beschichtete Schale aus einem Monomaterial (aus DE 10 2017 109 567 A1).

Die **DE 10 2019 101 066 A1** beschränkt sich auf die Verwendung von Polymeren einer Materialfamilie um die Recyclingfähigkeit zu verbessern: Gezeigt wird eine Durchdrückverpackung, wie sie zum Beispiel zum Verpacken von Tabletten oder Kaugummis verwendet wird. Durchdrückverpackungen bestehen häufig aus einer Kombination aus Polyvinylchlorid (PVC), PE und einer Aluminiumfolie. Diese im Recycling nicht miteinander kompatiblen und nicht voneinander trennbaren Schichten werden hier durch einen Verbund ersetzt, der insgesamt zu mindestens 95 % aus Polyolefinen besteht (Figur 4).



Figur 4: Durchdrückverpackung aus Polyolefinen im Querschnitt (aus DE 10 2019 101 066 A1)

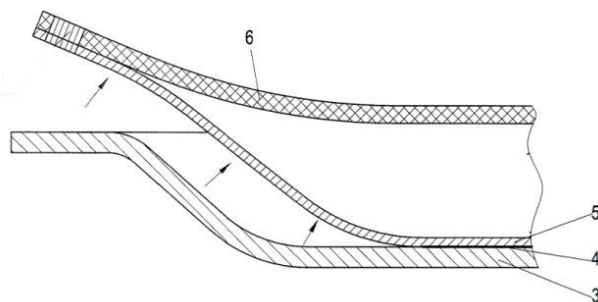
Sowohl die Vorderwand 20 als auch die Rückwand 30 der Durchdrückverpackung sind dabei aus PE, PP oder Cyclo-Olefin-Copolymer gebildet (COC) und durch Siegeln in den Bereichen 52 miteinander verbunden. Im dazwischenliegenden Aufnahme­raum 60 befindet sich das Füllgut 62, welches durch Druck auf die Rückwand durch die Vorderwand entnommen wird. Um die Entnahme zu erleichtern, sind in der Vorderwand Materialschwächungen 70 eingebracht.

Trennung durch die Verbraucher

Der erste Schritt ins Recycling ist die Entsorgung durch den Verbraucher: An dieser Stelle bietet sich auch die erste Chance, nicht kompatible Materialien voneinander zu trennen.

Besonders bei Papier-Kunststoffverbunden ist dies ein verbreiteter Ansatz, damit der Kunststoffanteil im Gelben Sack und der Papier- oder Kartonanteil im Altpapier entsorgt werden kann.

Die **DE 10 2018 123 453 A1** beschreibt eine Lebensmittelverpackung, bei der sich der stabilisierende Papierbeziehungsweise Kartonteil nach dem Gebrauch vom dünnen Kunststoffanteil der Verpackung trennen lässt. Das Ausführungsbeispiel (Figur 5) zeigt eine Papierschale 3, auf deren Innenseite mittels einer Trennschicht 4 eine Deckschicht 5 aus Kunststoffolie aufgebracht ist. Die Schale wird mittels einer weiteren Folie 6, die am Schalenrand mit der Folie 5 versiegelt ist, gasdicht verschlossen. Eine Öffnungslasche erleichtert das Herauslösen der Kunststoffbestandteile 5 und 6 in einem Stück entlang der Trennschicht vor der Entsorgung.



Figur 5: Querschnitt einer Schale aus Papier mit abtrennbarem Kunststoff-Innenteil (aus DE 10 2018 123 453 A1).

Die Herausforderung einer solchen Verpackungslösung ist es, die Trennbarkeit so einzustellen, dass sich die Einzelkomponenten nicht während des Gebrauchs voneinander lösen, sich aber nach Gebrauch problemlos, das heißt mit geeigneter Öffnungskraft, trennen lassen.

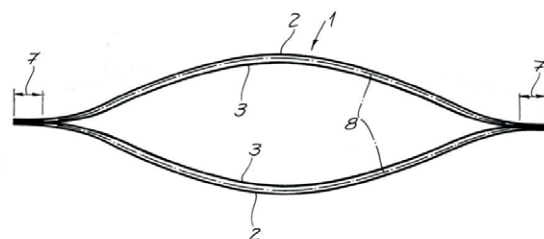
Dabei sollte die Trennschicht, die eine Klebstoff- oder Haftvermittlerschicht ist, auf der Kunststoffolie verbleiben, um möglichst wenig Verunreinigungen in das Papierrecycling einzutragen.

Vor diesem Hintergrund beschreibt die **DE 10 2019 129 712 A1** ein ähnliches Verpackungskonzept und schlägt dabei ein Verfahren zum Verbinden von Papier- und Kunststoffteil mittels Wärme vor. Die dabei verwendete Trennschicht enthält modifizierte Polyolefine beziehungsweise Polyolefin-Copolymere und soll die leichte und rückstandsfreie Trennung der Komponenten ermöglichen.

Trennung im Recyclingprozess

Auch im Recyclingprozess können unterschiedliche Bearbeitungsschritte zur Trennung von Mehrschichtverbunden genutzt werden, sofern diese entsprechend gestaltet sind:

Die **DE 10 2015 102 471 A1** (Figur 6) beschreibt einen Folienbeutel 1, dessen Einzelschichten 2, 3, 8 nur teilweise, das heißt nur im Bereich der Siegel­nähte 7, miteinander verbunden sind: Wird der Beutel während des Recyclingprozesses zerkleinert, entstehen Folienstücke aus den unterschiedlichen Monomaterialien der Schichten 2, 3 und 8, die dann sortiert werden können. Die Außenfolie 2 und die Innenfolie 3 bestehen aus dem



Figur 6: Querschnitt eines Verpackungsbeutels aus einer Folie bestehend aus zwei Außenschichten und einem Inlay (aus DE 10 2015 102 471 A1).

gleichen Kunststoff wie zum Beispiel PP, während das Kernmaterial 8 aus einem anderen Kunststoff wie zum Beispiel PET oder aus Papier besteht. Da sich Folien und Kernmaterial in ihrer Dichte unterscheiden, können sie durch eine Schwimm-Sink-Trennung separiert werden.

Auch die **DE 20 2021 000 746 U1** zeigt einen Mehrschichtverbund, dessen Schichten nach der Zerkleinerung voneinander getrennt werden können. Hier besteht das Verbundmaterial aus einer äußeren Hüllfolie und einem innenliegenden Inlay. Hüllfolie und Inlay werden durch einen bei der Herstellung erzeugten Unterdruck innerhalb des Verbunds zusammengehalten. Durch die Zerkleinerung wird die Hüllfolie mechanisch zerstört, die Druckdifferenz ausgeglichen und der Zusammenhalt somit aufgehoben. Die nun vorliegende Mischung an Folienstücken aus verschiedenen Materialien kann anhand von Dichteunterschieden (Schwimm-/Sink- oder Windsichtverfahren) oder Oberflächeneigenschaften (NIR-Spektroskopie) sortiert werden. Als mögliche Anwendung wird hier der Getränkekarton genannt, was einem Schichtaufbau von Hüllfolie/Karton/Aluminium/Hüllfolie entspricht. Besteht die Hüllfolie aus PE, ergibt sich der Aufbau eines klassischen Getränkekartons (vergleiche die oben beschriebene **DE 102 52 553 A1**) mit dem Unterschied, dass hier, zugunsten der Recyclingfähigkeit, auf Haftvermittlerschichten verzichtet werden kann.

Während die bereits genannten Beispiele auf Klebstoffe verzichten, um die Trennbarkeit der Schichten zu gewährleisten, verfolgt die **DE 10 2018 205 503 A1** den Ansatz, den Klebstoff selbst als Trennschicht zu nutzen:

Hier wird ein Klebstoff auf Basis von Diels-Alder-Addukten für den Einsatz in Verbundverpackungen vorgeschlagen. Dieser Klebstoff ist darauf ausgelegt, dass seine Vernetzung reversibel ist, so dass er sich während des Recyclings bei einer definierten Temperatur von über 50 °C zersetzt und somit die Trennung der Lagen ermöglicht wird.

Die **DE 10 2019 134 689 A1** zielt ebenfalls darauf ab, polymere Klebstoffschichten oder andere Polymer-schichten so herzustellen, dass sie im Recyclingprozess

als Trennschichten genutzt werden können. Als Beispiele werden säure- oder laugenempfindliche Trennschichten genannt, die sich bei Einwirkung der entsprechenden Substanz im Recyclingprozess zersetzen. Die gezielte Versprödung von Klebstoffschichten durch die Einwirkung von Temperatur oder Strahlung stellt eine weitere Möglichkeit dar; der spröde gewordene Verbund kann durch eine mechanische Behandlung aufgebrochen werden. Auch hier werden die verbleibenden Materialschichten dann in nachfolgenden Prozessschritten nach Materialien sortiert.

Extraschicht – Ein Ausblick

Der Anspruch, Verpackungsmaterialien recyclingfreundlich zu gestalten, spiegelt sich in den Patentanmeldungen der letzten Jahre wider: Es werden unterschiedliche Ansätze vorgeschlagen, wie das Recycling von Verbundmaterialien erleichtert oder überhaupt erst ermöglicht werden kann. Entscheidend dafür, ob sich die gezeigten Lösungen durchsetzen können, wird sein, inwieweit die neuen Verpackungsmaterialien geeignet sind, etablierte Mehrschichtverbunde in ihrer Funktionalität zu ersetzen. Wichtig hierbei ist insbesondere die Schutzfunktion für das verpackte Gut.

Doch nicht nur auf Seiten der Verpackungsentwicklung ergeben sich Ansätze um Recycling zu ermöglichen: Auch alternative und ergänzende Recyclingverfahren können dazu beitragen, die Recyclingquoten bei Kunststoffen zu erhöhen. Hier sind unter anderem lösungsmittelbasierte Recyclingverfahren zu nennen, bei denen Kunststoffschichten selektiv aufgelöst und so zurückgewonnen werden [8]. Und auch beim Recycling von Getränkekartons gibt es Fortschritte: Im Frühjahr 2021 wurde ein neues Recyclingwerk in Betrieb genommen mit dem Ziel, auch die Aluminium- und Kunststoffanteile des Verbundes werkstofflich zu recyceln [9].

Herzlichen Dank an Dr. Martin Mitzscherling für alle Tipps und Anregungen!

Nicht-Patentliteratur

- [1] Pressemitteilung Nr. 50/2020 des Umweltbundesamtes (UBA). URL: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/verpackungsverbrauch-2018-weiter-gestiegen> [abgerufen am 05.10.2021].
- [2] Pressemitteilung Nr. 20/2018 des Umweltbundesamtes (UBA). URL: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/verpackungsverbrauch-in-deutschland-weiterhin-sehr> [abgerufen am 05.10.2021].
- [3] KREIBE, Siegfried [et al.] (2017): Umweltbezogene Bilanzierung von „intelligenten“ und „aktiven“ Verpackungen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit und Durchführung eines Dialogs mit Akteuren und Entsorgungs- und Herstellungsbranche. In: UBA Texte 22/2017, 2017, Dessau-Roßlau. ISSN 1862-4804
- [4] GÜRLICH, Ulla, KLADNIK, Veronika und PAVLOVIC, Katharina: Circular Packaging Design Guideline. Empfehlungen für die Gestaltung recyclinggerechter Verpackungen. Version 04, 2021, FH Campus Wien, Wien, Österreich.
- [5] VerpackG: Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz–VerpackG) vom 5. Juli 2017 (BGBl. IS.2234), <https://www.gesetze-im-internet.de/verpackg>
- [6] ROBERTSON, Gordon L.: Food packaging: principles and practice. 2005, CRC press.
- [7] Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V. (FKN): Recycling von Getränkekartons: So funktioniert's. URL: <https://www.getraenkekarton.de/recycling/> [abgerufen am 15.11.2021].
- [8] SCHLUMMER, Martin [et al.]: Die Rolle der Chemie beim Recycling. Physikalisches und chemisches Kunststoffrecycling im Vergleich. Kunststoffe 6/20. 2020. URL: https://www.ivv.fraunhofer.de/content/dam/ivv/de/documents/Leistungsangebot/recycling-und-umwelt/I-PDF%20Fraunhofer%20IVV%20Kunststoffe_2020_06_.pdf [abgerufen am 17.11.2021]
- [9] Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V. (FKN): Neue Palurec-Anlage steigert das Getränkekarton-Recycling. Packaging Journal, 30. April 2021. URL: <https://packaging-journal.de/palurec-recyclinganlage-fur-getraenkekartons/> [abgerufen am 15.11.2021]

Impressum

Herausgeber

Deutsches Patent- und Markenamt
Zweibrückenstraße 12
80331 München

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

Stand

Dezember 2022

Bildnachweis

[iStock.com/Christoph Burgstedt](https://iStock.com/Christoph_Burgstedt)

