



Deutsches
Patent- und Markenamt

Erfinderaktivitäten 2018/2019



Inhalt

Vorwort	3
Galaxie-Getriebe – Getriebe einer anderen Art <i>Dr. Robert Fehling</i>	4
Stickoxide: Der Verbrennungsmotor im Spagat zwischen Sauberkeit, Kraftstoffverbrauch und Komplexität <i>Kai Brotzeller, Johannes Scheuerer</i>	10
Cabrioletverdecke in speziellen Ausbildungen <i>Dr. Andreas Monokroussos</i>	21
Siliziumcarbidwafer <i>Dr. Gesche Nahrwold</i>	31
40 Jahre VCSEL – Grundlagen, Technologien und aktuelle Anwendungen <i>Dr. Markus Ortsiefer</i>	37
Organische LED als Licht der Zukunft? <i>Sibina Sukman-Prähofer</i>	45
Sicherheit von Lithium-Ionen-Batteriesystemen in Kraftfahrzeugen <i>Dr. Dirk Ochs</i>	51
Autonome Straßenfahrzeuge <i>Dr. Nina Tetzlaff</i>	62
Schwarmintelligenz im Straßenverkehr <i>Dr. Wilfried Domainko</i>	82

Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

die Patentprüferinnen und Patentprüfer des Deutschen Patent- und Markenamts stellen Ihnen in den nachfolgenden Artikeln aktuelle technische Innovationen vor.

Basis dieser Artikel sind Patentanmeldungen, welche die neuesten Entwicklungen auf dem jeweiligen Gebiet der Technik darlegen und erklären.

Der Bereich Maschinenbau und Mechanik ist durch die Themen Cabrioletverdecke und Galaxie-Getriebe vertreten. Wir erfahren von interessanten konstruktiven Details und von der Nominierung einer Erfindung für den Deutschen Zukunftspreis.

Zwei Antipoden in der gegenwärtigen öffentlichen Diskussion, der Verbrennungsmotor und die Elektromobilität, werden untersucht und informativ beschrieben.

Wie sauber kann der Verbrennungsmotor werden und wie sicher sind Lithium-Ionen-Batterien?

Wir werfen einen Blick auf die Mobilität der Zukunft.

Die Artikel über autonome Straßenfahrzeuge und Schwarmintelligenz im Straßenverkehr stellen uns völlig neue Fortbewegungskonzepte vor, die die Autorin und der Autor anschaulich schildern.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden etliche neuartige optische Halbleiterbauelemente entwickelt, darunter die Laserdiode und die organische Leuchtdiode. Zwei lesenswerte Artikel befassen sich mit deren Aufbau und ihren Anwendungen.

Ebenfalls im Themengebiet der Halbleitertechnologie befinden wir uns mit dem interessanten Artikel über Siliziumcarbidwafer. Dieses Material steht für eine neue Ära in der Bauelementfertigung.

Viel Spaß beim Lesen wünscht Ihnen

Mark Haslinger
(Redaktion)

Galaxie-Getriebe – Getriebe einer anderen Art

Dr. Robert Fehling, Patentabteilung 1.11

Im Jahr 2018 war das Galaxie-Getriebe der Firma Wittenstein SE für den Deutschen Zukunftspreis des Bundespräsidenten nominiert. Dieser Preis wird seit 1997 jährlich für exzellente wissenschaftliche Innovationen verliehen [1]. Auch wenn der Preis nicht an die Wittenstein SE ging, zeigt bereits die Nominierung, dass es sich beim Galaxie-Getriebe um eine Innovation mit wirtschaftlichem Potential handelt. Zu diesem Getriebetyp wurden seit dem Jahr 2006 bereits einige Anmeldungen beim Deutschen Patent- und Markenamt getätigt. Dabei wurde der Name „Galaxie-Getriebe“ in den Anmeldungen nicht verwendet. Erstmals taucht dieser Begriff im Jahr 2015 in der Nennung des Standes der Technik in einer Anmeldung auf. Seit dem Jahr 2008 war der Begriff „Galaxiegetriebe“ auch markenrechtlich unter der Registernummer 30 2008 025 088 geschützt. In der Zwischenzeit wurde diese Marke jedoch gelöscht.

Im Folgenden soll auf die Besonderheiten und Unterschiede zu üblichen Zahnradgetrieben eingegangen werden.

1 Funktionsweise des Getriebes

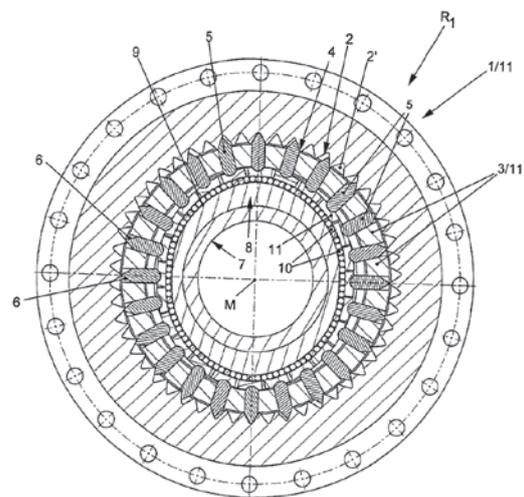
Bei üblichen Zahnradgetrieben befinden sich mindestens zwei feste Zahnräder mit solidem Zahnradkörper im Eingriff. Ein Nachteil dieser Anordnung sind die großen Massen, die bewegt werden müssen, um das Drehmoment zu wandeln.

Für hohe Übersetzungen gibt es hierzu in Form eines Spannungswellengetriebes auch eine Alternative, bei der einer der Zahnradkörper so dünn ausgeführt wird, dass ein flexibles Rad entsteht. Dieses wird von einem unrunder Körper mit einem Hohlzahnrad an wenigen Stellen – üblicherweise zwei an gegenüberliegenden Seiten – in Eingriff gebracht. Durch einen Zähnezahlnunterschied von n Zähnen zwischen dem flexiblen Rad und dem Hohlzahnrad dreht sich ein Rad pro vollständiger Umdrehung des antreibenden unrunder Körpers um n Zähne weiter.

Das Galaxie-Getriebe geht einen Schritt weiter und verwendet an Stelle des flexiblen Rads ein festes Trägerelement mit radial beweglichen Zahnsegmenten.

In Figur 1 ist ein Schnitt durch ein Galaxie-Getriebe dargestellt. Ausgehend von einem Antriebselement 7 wird ein unrunder Profil 8 angetrieben. Hier ist es eine ovale Form mit vorstehenden Bereichen in Richtung der Bildober- und -unterseite. Auf dem äußeren

Umfang des Profils 8 laufen Lagerelemente 10, die als Lagernadeln ausgeführt sind. Radial folgend sind Auflageelemente 11 vorgesehen, die als Basis für stiftförmige Zahnsegmente 5 dienen. Die Zahnsegmente 5 sind in einem kreisringförmigen, geschlitzten Trägerelement 3 angeordnet, das die Zahnsegmente 5 in Umfangsrichtung stützt und eine radiale Bewegung zulässt. Die Zahnsegmente 5 kommen mit ihren Zahnprofilen schließlich bereichsweise in Kontakt mit einem innenverzahnten Hohlrad 1. Dies geschieht dort, wo



Figur 1: Schnittansicht des Galaxie-Getriebes der Anmeldung DE 10 2007 016 189 A1

vom unrunder Profil 8 über die Lagerelemente und die Auflageelemente 11 die Zahnsegmente 5 nach außen gedrückt werden.

In Figur 1 ist das unrunde Profil 8 oval ausgeführt, so dass an gegenüberliegenden Seiten (hier oben und unten dargestellt) jeweils die Zahnsegmente 5 in Eingriff mit dem Hohlrad 1 sind. Die senkrecht dazu angeordneten Zahnsegmente 5 befinden sich vollständig außer Eingriff. Bei vollem Eingriff liegt die Zahnspitze des Zahnsegments 5 zentral in der Lücke zwischen zwei Zähnen des Hohlrads 1. Dazu senkrecht ist zudem erkennbar, dass sich die Zahnköpfe der Zahnsegmente 5 und des Hohlrads 1 gegenüberstehen. Zwischen diesen Extrempositionen befinden sich weitere Zahnsegmente 5 in teilweisem Eingriff.

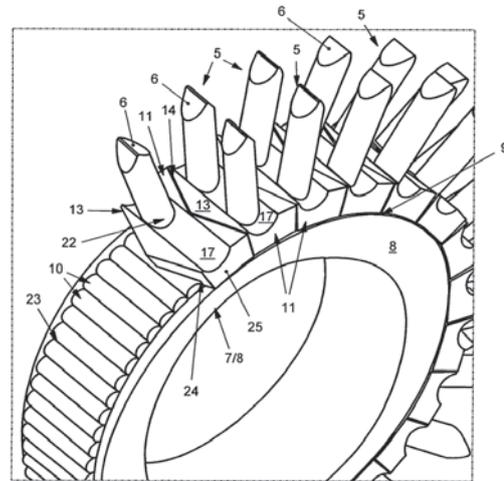
Beim radialen Verschieben der Zahnsegmente entsteht eine Kraftkomponente, die das Trägerelement 3 gegenüber dem Hohlrad 1 verdreht. Nach dem Durchlaufen der Position mit maximalem Radius wird das Zahnsegment 5 in Umfangsrichtung durch das mittels der nachfolgenden Zahnsegmente 5 weitergedrehten Trägerelements 3 innerhalb der Zahnluke des Hohlrads 1 weiterbewegt. Mit Beginn des Kontakts der Gegenflanke wird das Zahnsegment 5 wieder radial nach innen geschoben, bis dieses außer Eingriff gerät. Bei weiterer Drehung des unrunder Profils wechselt das Zahnsegment in die nächste Zahnluke des Hohlrads und beginnt erneut mit der Bewegung in die Zahnluke. Aufgrund der wechselweisen permanenten Anlage von Antriebsflanken und Gegenflanken der Zahnsegmente 5 an den Hohlradzahnflanken ist das Galaxie-Getriebe im Betrieb nahezu spielfrei.

In der Funktionsweise ähnelt das Galaxie-Getriebe somit den Spannungswellengetrieben. Aufgrund der Unterschiede in seinem Aufbau lohnt sich ein Blick auf die einzelnen Bauteile.

2 Auflageelemente

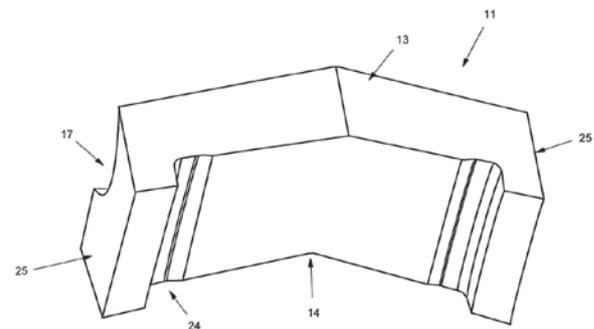
Im Unterschied zum sogenannten Wellgenerator eines Spannungswellengetriebes, bei dem meist der verformbare Außenring eines Wälzlagers das flexible Rad lagert, werden die Zahnsegmente 5 beim Galaxie-Getriebe von einzelnen steifen Auflageelementen 11 getragen.

Dabei können in Axialrichtung auch mehrere Zahnsegmente 5 nebeneinander vorgesehen werden.



Figur 2: Perspektivische Teilansicht des Galaxie-Getriebes gemäß DE 10 2007 016 189 A1

In Figur 2 sind zur besseren Erklärung der antreibenden Bauteile das Hohlrad und das Trägerelement ausgeblendet. Auf dem profilierten Antriebselement 7 ist eine Lagernut 23 mit einer inneren Laufbahn eines Lagers vorgesehen, in der Rollen als Lagerelemente 10 laufen. Auf diesen Rollen befinden sich einzelne Auflageelemente 11, die untereinander keine feste Verbindung haben. Der Zusammenhalt ergibt sich aus der radial wirkenden Kraft, die die Zahnelemente 5 auf die Auflageelemente 11 ausüben.



Figur 3: Perspektivische Ansicht auf die Lagerlaufbahn eines Auflageelements gemäß Figur 7 der Anmeldung DE 10 2007 016 189 A1

Die Figur 3 zeigt ein Auflageelement von der Unterseite in perspektivischer Darstellung. Neben der Lauffläche für die Rollen des Lagerelements in der Lagernut 24, zu

deren axialer Führung, sind auch zwei Flansche 25 zu erkennen. Im Zusammenwirken der Wälzkörper 10 in den Lagernuten 23 (im Antriebsselement 7, siehe Figur 2) und 24 (im Auflageelement 11) mit den Flanschen 25 ergibt sich somit eine axiale Sicherung der Auflageelemente.

In Umfangsrichtung kommt jeweils ein Vorsprung 13 mit einer Ausnehmung 14 des folgenden Auflageelements in Eingriff. In diesem Beispiel ist der Vorsprung als stumpfer Winkel ausgeführt. Aus der Veröffentlichung DE 10 2007 019 607 A1 sind auch andere Formen der Vorsprünge und Ausnehmungen bekannt. Vorteilhaft ist es, wenn der Vorsprung 13 jeweils einen kontinuierlichen Übergang für die Rollen des Lagers schafft, um Eingriffgeräusche durch ruckartige Übergänge der Wälzelemente zwischen den Auflageelementen zu vermeiden. In der Ausnehmung 17 werden schließlich die Zahnsegmente 5 einzeln beweglich gelagert, um eine Verteilung der Kräfte auf die Zahnsegmente zu erreichen. Der Vorteil eines segmentierten Lageraußenrings, der aus einer Mehrzahl von Auflageelementen 11 aufgebaut wird, ist dessen hohe Steifigkeit. Damit können auch sehr hohe Kräfte bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten auf die einzelnen Zahnsegmente übertragen werden. Dies bietet einen Vorteil gegenüber den dünnwandigen Lageraußenringen, die üblicherweise in Spannungswellengetrieben verwendet werden.

3 Zahnsegmente

Die Gestaltung der radial beweglichen Zahnsegmente 5 kann sehr variabel sein. Gemeinsam sind jedoch das Zahnprofil 6 an einem Ende, Führungsflächen, die in Anlage mit dem Trägerelement 3 kommen, und ein Fußbereich, der in Kontakt mit dem Auflageelement 11 kommt. So sind in Figur 2 die Zahnsegmente als Stifte mit rundem Querschnitt dargestellt. Andere Formen können auch flache Zahnelemente sein, die nahezu die gesamte Breite des Auflageelements abdecken. Ein Beispiel hierfür ist in Figur 2b der Veröffentlichung DE 10 2007 016 189 A1 dargestellt.

Im Querschnitt können die Zahnsegmente im Führungsbereich mit einer konstanten Dicke ausgeführt werden, wie dies in Figur 1 zu sehen ist. Zur Stärkung des Trägerelements können die Zahnsegmente im

Fußbereich aber auch verjüngt werden (vergleiche Figur 4 in der Veröffentlichung DE 10 2007 016 189 A1). Der Kontaktbereich der Zahnsegmente mit den Auflageelementen kann abgerundet ausgeführt werden und in entsprechend geformten Aufnahmen des Auflageelements eingebracht werden, wie dies in den Figuren 1 und 2 zu sehen ist. Prinzipiell kann die Abrundung auch auf dem Auflageelement vorgesehen werden, dann ist der Fußbereich entsprechend als Aufnahme auszuformen. Als weitere Möglichkeit kommen Rollen in Betracht, die zwischen Auflageelement und Zahnsegment eingelegt sind.

Bei der Herstellung haben Zahnsegmente auch den Vorteil, dass die Bauteile zu den Bearbeitungsstellen einfacher zugeführt werden können. So muss beispielsweise bei üblichen Zahnrädern für die Bearbeitung der Zahnflanken das gesamte Zahnrad in eine Schleifmaschine eingebaut und für jeden Zahn positioniert werden. Bei einzelnen Zahnsegmenten vereinfacht sich der Aufwand durch die Verwendung entsprechender Vorrichtungen, in denen jeweils gleichartige Zahnsegmente einzeln zur Bearbeitung zugeführt werden können. Dabei spielt auch der Radius des Zahnrads beziehungsweise des Trägerelements keine Rolle.

Die Zahnsegmente können auch für verschiedene Getriebegrößen eingesetzt werden, solange die radialen Abstände von unrundem Profil und Hohlrad gleich sind. Damit lässt sich die herzustellende Teilevielfalt reduzieren. Die Verwendung von gleichen Zahnsegmenten für mehrere Baugrößen führt dazu, dass diese in größerer Stückzahl und damit auch wirtschaftlicher hergestellt werden können.

Als abschließender Vorteil von Zahnsegmenten sei erwähnt, dass diese im Falle eines Schadens oder bei Verschleiß relativ einfach ausgetauscht werden können.

4 Zahnprofil

Im Getriebebau wird meist das Evolventenprofil verwendet, da dies für die Herstellung und Übertragung von Drehbewegungen bei üblichen Zahnrädern Vorteile bietet. Dazu gibt es noch verschiedene Verzahnungstypen wie zum Beispiel Zykloiden- oder Wildhaber-Novikov-Verzahnungen, die für Sonderfälle eingesetzt werden. Der Zahneingriff der Zahnflanken ähnelt bei

festen Zahnrädern einer Abrollbewegung mit einem gewissen gleitenden Anteil.

Für die oben erwähnten Spannungswellengetriebe mit den flexiblen Zahnrädern muss bei der Gestaltung des Zahnprofils noch die Biegung des flexiblen Rads beachtet werden. Im Vergleich zu festen Zahnrädern ist hier ein höherer Gleitanteil der Zahnflanken von flexiblem Rad und Hohlrad gegeben. Zudem ändert sich das Zahnprofil durch die Biegung des flexiblen Rads während des Eingriffs.

Bei den bekannten Zahnprofilen erfolgt der Eingriff meist in einer Linienberührung, um die zu übertragende Last möglichst gleichmäßig auf der Flanke zu verteilen. Je größer die Fläche zur Übertragung ist, umso geringer ist die Pressung auf der Fläche und als Folge daraus wird der Verschleiß reduziert. Deshalb wird für den Eingriff des Galaxie-Getriebes eine Profilform gewählt, die möglichst die gesamte Zahnflanke in Eingriff bringt. Hierzu wird in der Veröffentlichung DE 10 2007 011 175 A1 die Verwendung der logarithmischen Spirale empfohlen. Unter einer logarithmischen Spirale wird eine Kurve verstanden, die alle vom Ursprung ausgehenden Strahlen unter dem gleichen Winkel α schneidet. Beschrieben wird sie durch die Formel

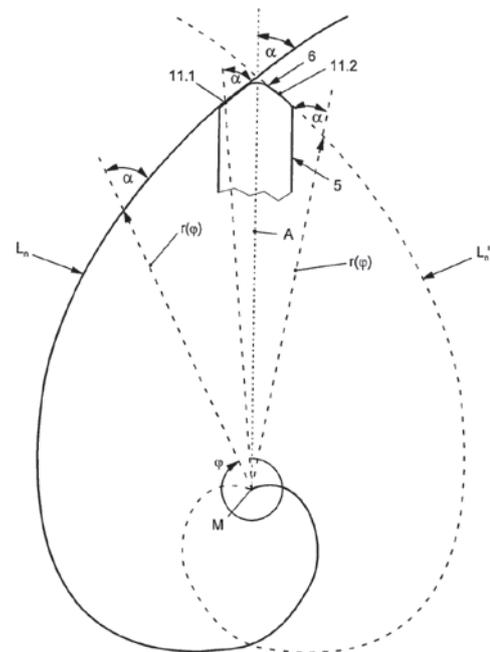
$$r = e^{a\varphi} \text{ mit: } \tan\alpha = 1/a.$$

In der Figur 4 ist eine logarithmische Spirale dargestellt, die vom Punkt M ausgeht. Ein Teil der Kurve bildet die Zahnflankenkontur 11.1 des Zahnsegments 5. Die Gegenflanke 11.2 wird durch Spiegelung der Kurve an der Mittenebene A des Zahnsegments erzeugt. Verbunden werden die beiden Zahnflanken mit einer Kopfkrümmung 17 (in Figur 5 dargestellt), die tangential an die logarithmische Spirale angeschlossen wird. Das Profil der Kopfkrümmung leitet im Betrieb auch die Bewegung der Zahnelemente von der radial äußeren Position des Zahneingriffs nach innen ein.

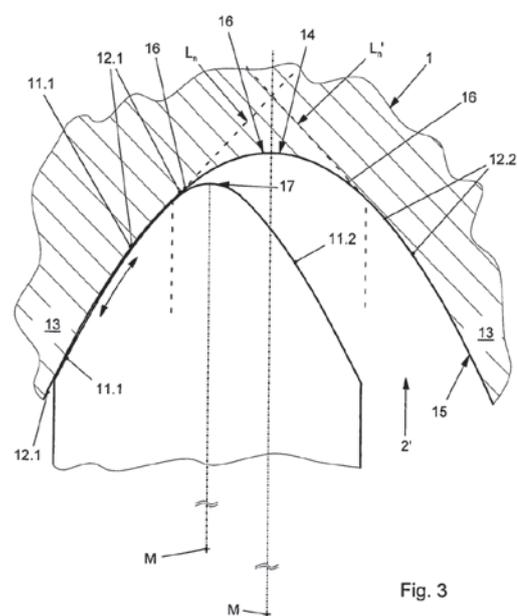
Das Zahnprofil einer logarithmischen Spirale führt zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche und damit zu einer Herabsetzung der Pressung in der Oberfläche. In Figur 5 kann die enge Anschmiegung der Zahnoberfläche des Zahnelements an der Zahnoberfläche des Hohlrads erkannt werden. Bei der radialen Bewegung des Zahnsegments verteilen sich die Kräfte vollflächig

in der Eingriffsfläche. Im Vergleich zu einer Linien- oder Punktberührung von herkömmlichen Zahnradgetrieben ist damit eine höhere Drehmomentübertragung möglich.

Ein weiterer Vorteil der logarithmischen Spirale ist der konstante Winkel, unter dem ein Radialstrahl die Kurve schneidet.



Figur 4: Logarithmische Spirale als Erzeugende des Zahnprofils 6 des Zahnsegments 5 der DE 10 2007 011 175 A1

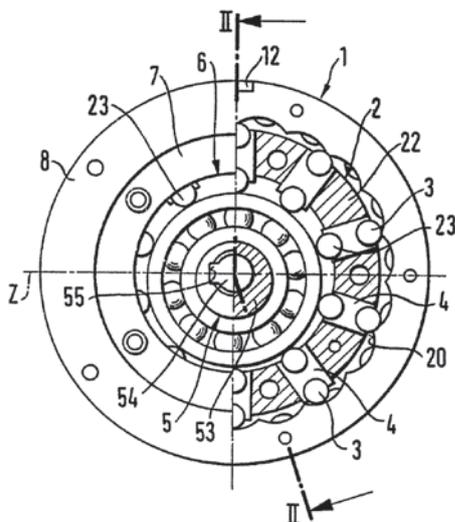


Figur 5: Vergrößerte Darstellung des Eingriffs des Zahnsegments 5 in das Hohlrad 1 der DE 10 2007 011 175 A1

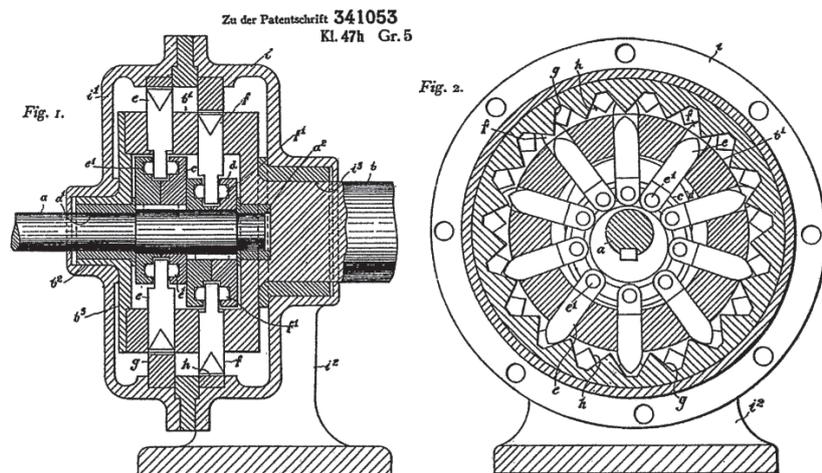
5 Stand der Technik

Das Rad kann nicht einfach neu erfunden werden. Das ist eine alte Weisheit, die auch hier zutrifft. So gibt es auch aus diesem Bereich ähnliche Erfindungen, die dem Galaxie-Getriebe bereits nahekommen. Aus der Anmeldung DE 341 053 A zu einem Übersetzungsgetriebe war bereits im Jahr 1919 bekannt, Zahnsegmente radial zu bewegen. In der Figur 6 sind zwei Ansichten dieses Getriebes zu sehen. Davon unterscheidet sich das aktuelle Galaxie-Getriebe insbesondere durch die antreibenden Bauteile. Während in Figur 6 der Antrieb über eine exzentrische Lagerung des treibenden Teils *d* erfolgt, wird bei den Galaxie-Getrieben über die ovale Form und die Auflageelemente das Zahnsegment bewegt. Die symmetrische Form bietet hierbei eine geringere Unwucht gegenüber dem Aufbau der Figur 6.

Radial bewegte Zahnelemente sind auch in der Figur 1 der Veröffentlichung EP 196 650 A1 dargestellt (Figur 7), wobei sowohl in Richtung des antreibenden Exzenters 53 als auch zum Hohlrad hin Wälzelemente 3, 23 verwendet werden.



Figur 7: Übersetzungsgetriebe mit radial bewegten Zahnelementen aus dem Stand der Technik der EP 196 650 A1



Figur 6: Übersetzungsgetriebe mit radial bewegten Zahnelementen aus dem Stand der Technik der DE 341 053 A

Die Profilform der logarithmischen Spirale ist bei Zahnrädern ebenfalls schon aus dem Stand der Technik bekannt (US 2 222 515 A und GB 2 211 893 A). Hierbei sind die Zahnprofile bei herkömmlichen Zahnrädern im Einsatz. Die Bewegung der Zahnsegmente des Galaxie-Getriebes unterscheidet sich von dem Eingriff herkömmlicher Zahnräder, so dass eine direkte Übertragung der Lehren aus den Druckschriften US 2 222 515 A und GB 2 211 893 A des Standes der Technik nicht nahegelegt ist.

6 Anwendung

Nach den Betrachtungen zum Getriebeaufbau ist für die Praxis auch wichtig, wo dieser Getriebetyp eingesetzt werden kann. Aufgrund der hohen Übersetzung und des geringen Spiels bieten sich Anwendungen an, bei denen genaue Positionierungen erforderlich sind. So sind Anwendungen bei der Produktion von Composite-Bauteilen für die Luftfahrtindustrie bekannt, bei denen ein schwerer Roboterkopf automatisch die Fasern für Leichtbauteile präzise in vorgegebener Anordnung ablegt [2]. Eine weitere Anwendung ist eine Schwenkeinheit bei einer Spritzgussmaschine, die Kavitäten exakt platzieren muss. Die hierzu bewegte Masse beträgt 270 Kilogramm [3].

Dies sind nur erste Anwendungen, in denen das Galaxie-Getriebe eingesetzt wird. Aufgrund der Nähe des Bewegungsablaufs zu dem der Spannungswellenge triebe sind weitere Anwendungen in den Bereichen zu erwarten, bei denen diese derzeit im Einsatz sind. Es bleibt abzuwarten, wie sich das Galaxie-Getriebe in Zukunft entwickelt. Mit der Nominierung zum Deutschen Zukunftspreis dürfte sich die Bekanntheit dieses Getriebetyps erhöht haben.

Nicht-Patentliteratur

- [1] Deutscher Zukunftspreis 2018, Geleitwort des Bundespräsidenten; URL: <https://www.deutscher-zukunftspreis.de/de/der-preis/geleitwort-des-bundespraesidenten> [abgerufen am 11.01.2019]
- [2] „Präzision liegt in der Luft – Galaxie®“ In: move – Das Magazin für Kunden und Freunde der WITTENSTEIN SE, Ausgabe 20/April 2018, Seite 6–7.
- [3] „Spitzenpräzision: Antriebssystem für Schwenkarme“ In: move – Das Magazin für Kunden und Freunde der WITTENSTEIN SE, Ausgabe 21/November 2018, Seite 22–25.

Stickoxide: Der Verbrennungsmotor im Spagat zwischen Sauberkeit, Kraftstoffverbrauch und Komplexität

Kai Brotzeller, Johannes Scheuerer, Patentabteilung 1.17

Durch den sogenannten Dieselskandal ist eine breite Öffentlichkeit mit der Problematik der Stickoxid-Emissionen von Verbrennungskraftmaschinen konfrontiert worden. Der folgende Artikel soll die wesentlichen Zusammenhänge bei der Entstehung und Vermeidung von Stickoxid-Emissionen von Brennkraftmaschinen darstellen. An ausgewählten Beispielen wird aufgezeigt, wie die Komplexität der technischen Systeme ansteigt.

1 Entstehung von NO_x

NO_x („Stickoxide“ oder auch „Stickstoffoxide“) ist ein Sammelbegriff für verschiedene gasförmige Oxide des Stickstoffs [1]. Stickoxide bilden sich als Folge von Nebenreaktionen bei Verbrennungsvorgängen mit Luft. Beim Verbrennungsmotor entsteht hauptsächlich Stickstoffoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂), in geringem Maß auch Distickstoffoxid (N₂O). NO wandelt sich in Luft langsam in NO₂ um [2]. Stickoxide entstehen vor allem im Dieselmotor, in geringerem Maße auch in Ottomotoren mit Direkteinspritzung [3]. Die Bildung von NO läuft auf verschiedenen Wegen ab. Bei der motorischen Verbrennung entstehen ca. 90–95% des Stickstoffoxids nach dem sogenannten Zeldovich-Mechanismus (siehe Kasten) [1], [10]. Als Entstehungsursache für NO im Verbrennungsmotor können insbesondere hohe Prozessspitzentemperaturen im Brennraum und Sauerstoffüberschuss genannt werden [10].

2 Folgen der NO_x-Emissionen

Die bei der Verbrennung unter hohen Temperaturen entstehenden Gase NO und NO₂ gelten als giftig. Stickstoffmonoxid reagiert mit Luftsauerstoff zu NO₂. Das Bundesumweltamt beschreibt die Wirkung von NO₂ wie folgt:

„Stickstoffdioxid (NO₂) ist ein ätzendes Reizgas, es schädigt das Schleimhautgewebe im gesamten Atemtrakt und reizt die Augen. Stickstoffdioxid zeigt eine stärkere schädliche Wirkung als Stickstoffmonoxid (NO), weshalb NO₂ im Zentrum der Bemühungen um saubere Luft steht. NO₂ führt als starkes Oxidationsmittel zu Entzündungsreaktionen in den Atemwegen und verstärkt die Reizwirkung anderer Luftschadstoffe zusätzlich. In der Folge können Atemnot, Husten, Bronchitis, Lungenödem, steigende Anfälligkeit für Atemwegsinfekte sowie Lungenfunktionsminderung auftreten. [...] Die mittelbare Wirkung des NO₂ auf die menschliche Gesundheit besteht in seiner Eigenschaft

Entstehung von thermischen NO nach dem Zeldovich-Mechanismus (Quelle: [1])

- (1) $N_2 + O \leftrightarrow NO + N$
- (2) $N + O_2 \leftrightarrow NO + O$
- (3) $N + OH \leftrightarrow NO + H$

Startreaktion beim Zeldovich-Mechanismus ist die Umsetzung von Luftstickstoff mit atomarem Sauerstoff, in der Stickstoffradikale entstehen. Diese oxidieren in der zweiten Reaktion weiter. Der dritte Schritt berücksichtigt, dass die bei der Verbrennung entstehenden Hydroxyl-Radikale (OH) bei Sauerstoffmangel ebenfalls mit Stickstoff reagieren können.

als Vorläufersubstanz für Feinstaub. Eine chronisch erhöhte Feinstaubbelastung führt zu mehr Herz-/Kreislauf- und Atemwegserkrankungen in der Bevölkerung und verkürzt die Lebenserwartung weiter. Eine weitere – gesundheitlich wie pflanzenphysiologisch bedeutsame – mittelbare Wirkung des NO_2 rührt daher, dass das NO_2 auch eine Vorläufersubstanz für Ozon darstellt. Ozon ist ein sehr starker Reizstoff für die Schleimhäute, die Atemwege und Augen; es schädigt auch Pflanzen und Ökosysteme. Stickstoffmonoxid reagiert im Vergleich zu NO_2 in geringerem Maße am Lungengewebe. Daher kann es stärker aufgenommen und mit dem Blut weit im Körper verteilt werden. Seine systemische Wirkung ist die Beeinflussung der Blutgefäßspannung, zum Beispiel Gefäßerweiterung (sog. Vasodilatationseffekt). NO ist auch ein körpereigen gebildeter Botenstoff, so dass von außen zugeführte NO-Mengen in diese Regelungsmechanismen eingreifen und stören können.“ [5].

Darüber hinaus tragen die durch den Verkehr emittierten Stickstoffverbindungen zu sauren und stickstoffreichen Böden bei, was erhebliche Auswirkungen auf das Ökosystem haben kann [6].

Am 2. Mai 2008 verabschiedeten das Europäische Parlament und der Europäische Rat die von der EU-Kommission vorgeschlagene Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Diese Richtlinie musste innerhalb von zwei Jahren von allen EU-Mitgliedstaaten in nationales Recht überführt werden. In Deutschland erfolgte dies durch die 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 2. August 2010 (39. BImSchV), [7]. Danach darf der an Messstationen der Außenluft ermittelte Jahresmittelwert von $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ für NO_2 nicht überschritten werden. Für den Stundenmittelwert gilt ein Grenzwert von $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ [7]. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der NO_2 -Jahresmittelwerte in Deutschland seit dem Jahr 2000 für verschiedene Belastungsregime, gemittelt über ausgewählte Messstationen.

3 Möglichkeiten der Verringerung der Stickoxid-Emissionen von Verbrennungsmotoren

Wie im ersten Abschnitt bereits beschrieben wurde, sind im Wesentlichen zwei Voraussetzungen nötig, dass sich der sonst so reaktionsträge elementare Stickstoff (N_2) mit Sauerstoff (O_2) zu Stickoxiden verbindet:

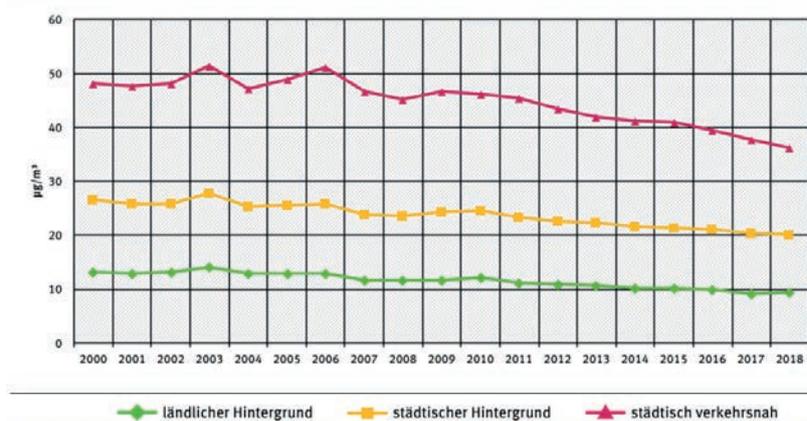
1. Die Temperaturen müssen hoch genug sein.
2. Es muss ausreichend Sauerstoff zur Verfügung stehen.

Genau an diesen beiden Hebeln greifen letztlich auch die Strategien zur Reduzierung der Stickoxid-Emissionen während des Verbrennungsprozesses im Zylinder an. Zum einen wird versucht, die lokalen Verbrennungstemperaturspitzen zu reduzieren, zum anderen soll vermieden werden, dass zu viel Sauerstoff beim Verbrennungsprozess vorhanden ist.

Dem Ziel, die lokalen Spitzentemperaturen bei der Verbrennung möglichst klein zu halten, wird durch die Optimierung der Gemischbildung und die Optimierung des Einspritzzeitpunktes begegnet. Eine weitere Möglichkeit, Spitzentemperaturen abzusenken, ist das Einspritzen von Wasser in den Brennraum oder das Herstellen einer Brennstoff-/Wasser-Emulsion vor der Verbrennung. Mittels der sogenannten Abgasrückführung (Abgasrückführung – AGR, englisch *Exhaust Gas Recirculation* – EGR), bei der ein Teil der Abgase aus dem Zylinder wieder zur Verbrennung zurückgeführt wird, kann sowohl

Entwicklung der NO_2 -Jahresmittelwerte

im Mittel über ausgewählte Messstationen im jeweiligen Belastungsregime, Zeitraum 2000–2018



Quelle: Umweltbundesamt 2019

Abbildung 1: Entwicklung der NO_2 -Jahresmittelwerte seit dem Jahr 2000 (aus [7])

die Verbrennungstemperatur gesenkt als auch das Angebot an Sauerstoff reduziert werden.

Trotz aller Bemühungen, die Bildung von Stickoxiden bereits bei der Verbrennung im Zylinder zu vermeiden, können die entstehenden Mengen über den erlaubten Grenzwerten liegen. In diesem Fall muss das Abgas durch eine Abgasnachbehandlungsanlage von den giftigen Stickoxiden gereinigt werden, bevor es in die Umwelt gelangt.

3.1 Reduzieren der Stickoxid-Entstehung durch Abgasrückführung (AGR)

Eine effektive Maßnahme, mit deren Hilfe die Stickoxidbildung unmittelbar in der Brennkraftmaschine verringert werden kann, das heißt ohne auf eine Abgasnachbehandlungsanlage zurückgreifen zu müssen, ist das Rückführen von Abgas zum Verbrennungsprozess. Es wirkt zwar zunächst verwunderlich, dass mit Hilfe der Rückführung von Abgas die Spitzentemperaturen beim Verbrennungsprozess verringert werden können und damit die Stickoxidbildung vermindert werden kann, da das rückgeführte Abgas heißer als die angesaugte Frischluft ist. Jedoch überwiegen insgesamt zwei physikalische Effekte gegenüber der höheren Ausgangstemperatur des angesaugten Luft-Abgasgemisches. Während sich die frisch angesaugte Luft ungefähr zu 78 Vol.-% aus Stickstoff und zu 21 Vol.-% aus Sauerstoff zusammensetzt, besteht das Abgas hauptsächlich aus Kohlendioxid, Wasser sowie aus Stickstoff und nicht in der Verbrennung umgesetztem Sauerstoff. Diese Zusammensetzung der Verbrennungsgase macht man sich bei der Abgasrückführung zunutze. Hierbei spielen vor allem der thermische Effekt sowie der Verdünnungseffekt eine Rolle. Der thermische Effekt der Abgasrückführung beruht auf den höheren spezifischen Wärmekapazitäten von Kohlendioxid und Wasser im Vergleich zu Luft [8]. Das heißt, dass bei Zufuhr einer bestimmten Wärmemenge durch die Verbrennung die Temperatur eines Luft-/Abgasgemisches niedriger ist als die Temperatur von reiner Luft bei Zufuhr der gleichen Wärmemenge. Die stärkste Wirkung der AGR geht jedoch vom Verdünnungseffekt aus, welcher ebenfalls die Verbrennungstemperaturen

reduziert [8]: Durch das Zuführen von Abgas zur Verbrennungsluft wird die Sauerstoffkonzentration im Verbrennungsgas reduziert. Zur Umsetzung einer bestimmten Brennstoffmenge muss dem Brennstoff daher im Vergleich zur Verbrennung mit reiner Luft eine größere Menge an Luft-Abgasgemisch zugeführt werden. Es muss also bei gleicher Brennstoffmenge auch eine größere Menge an Luft-Abgasgemisch aufgeheizt werden, wodurch ebenfalls die Verbrennungstemperaturen sinken und damit die thermale Stickoxidbildung reduziert wird [8].

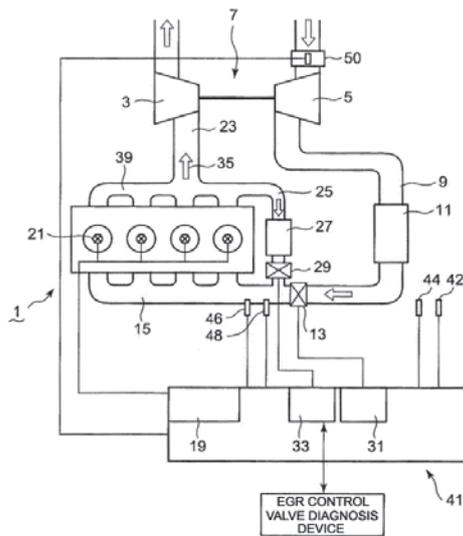
Bei modernen Brennverfahren beträgt die Abgasrückführungsrate bis zu 50% [6]. Das heißt, dass der Massenstrom an rückgeführtem Abgas genauso groß ist wie der Massenstrom der zugeführten Frischluft.

3.1.1 Externe Abgasrückführung

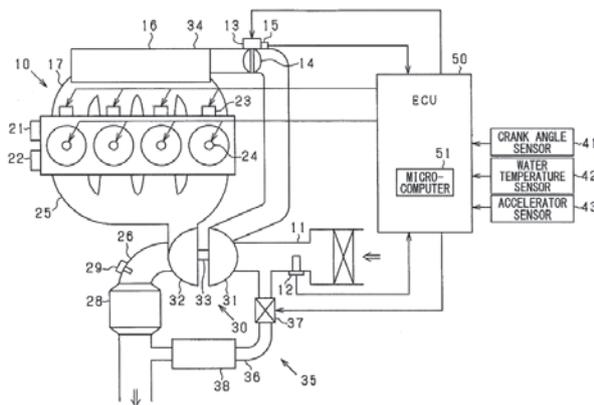
Bei der externen Abgasrückführung verbleiben die Verbrennungsgase nicht wie bei der innermotorischen AGR im Zylinder, sondern werden über die Auslassventile in die Abgasleitung ausgeschoben. Von dort werden sie über eine weitere Leitung, die sogenannte Abgasrückführleitung, in die Ansaugstrecke zurückgeführt. Dies hat unter anderem den Vorteil, dass in der zusätzlichen Leitung ein Wärmetauscher untergebracht werden kann, mit dem das heiße Abgas gekühlt werden kann, bevor es in die Ansaugstrecke eingeführt wird.

Wird die Brennkraftmaschine mittels eines Abgasturboladers mit verdichteter Luft versorgt – was aufgrund der höheren Leistungsdichte und den damit verbundenen Vorteilen bei modernen Otto- und Dieselmotoren heute die Regel ist – kann Abgas in Bezug auf den Abgasturbolader auf unterschiedliche Art und Weise zur Brennkraftmaschine zurückgeführt werden:

- Das Abgas wird vor der Turbine entnommen und entsprechend nach dem Verdichter in die Ansaugstrecke zurückgeführt (Hochdruck AGR, siehe Figur 1).
- Das Abgas wird nach der Turbine entnommen und vor dem Verdichter in die Ansaugstrecke zurückgeführt (Niederdruck-AGR, siehe Figur 2).



Figur 1: Hochdruck-Abgasrückführung; Verdichter 5, Ansaugrohr 9, Zwischenkühler 11, Ansaugkrümmer 15, Abgaskanal 23, Abgas 35, Abgasrückführung 25, AGR-Kühler 27, AGR-Ventil 29, Turbine 3 (aus EP 2 620 630 B1)



Figur 2: Niederdruck-Abgasrückführung; Ansaugrohr 11, Verdichter 31, Ansaugkrümmer 16, Abgaskrümmer 25, Turbine 32, Abgasleitung 26, Katalysator 28, Abgasrückführung 35, AGR-Kühler 38, AGR-Ventil 37 (aus US 2018/0238275 A1)

Beide Varianten haben Vor- und Nachteile:

Bei der Hochdruck-AGR besteht der größte Nachteil darin, dass nicht das gesamte Abgas durch die Turbine strömt, weil schon ein Teil des Abgases für die Abgasrückführung abgezweigt wurde. Es steht damit weniger Leistung für den Antrieb des Verdichters zur Verfügung. Darüber hinaus kann bei der Hochdruck-AGR ohne weitere Maßnahmen nicht für alle Betriebspunkte ein ausreichendes Druckgefälle garantiert werden [2]. Der Vorteil der Hochdruck-AGR liegt darin, dass der

Verdichter nicht von den heißen und partikelbeladenen Abgasen durchströmt wird. Diese Variante der Abgasrückführung wird heute fast ausschließlich angewendet [2].

Ein Nachteil der Niederdruck-AGR ist, dass nicht nur Frischluft, sondern auch das zurückgeführte Abgas den Verdichter des Abgasturboladers durchströmt. Dies kann einerseits zu Beschädigungen und Ablagerungen am Verdichter führen, andererseits wird der Verdichter durch die im Vergleich zur Frischluft höheren Temperatur des Luft-Abgasgemischs thermisch stärker belastet. Während feste Verunreinigungen wie Rußpartikel noch mittels Filtern aus dem rückgeführten Abgas entfernt werden könnten, stellt sich bei der Niederdruck-Abgasrückführung ein weiteres Problem: Wird der Abgasmassenstrom mit der angesaugten Frischluft – welche sich auf Umgebungstemperatur befindet und damit relativ kühl ist – vermischt, kann es zur Unterschreitung des Taupunktes von im Abgas befindlichen Gasen kommen, insbesondere von Wasserdampf. Der bei Kontakt mit der angesaugten Frischluft sich abkühlende Wasserdampf aus dem Abgas kondensiert aus und bildet Tröpfchen, welche auf die schnell drehenden Verdichterschaukeln treffen und dort Schäden verursachen können. Neben der Kondensation in der kalten angesaugten Frischluft kann es bei der Niederdruckabgasrückführung auch an den Wandungen des Einlasstrakts zur Kondensation von Wasserdampf kommen, speziell, wenn sich die Brennkraftmaschine in einem kalten Zustand befindet. Diese sich an den Wandungen bildenden Wassertröpfchen können von der Strömung mitgerissen werden, in den Bereich des Verdichters gelangen und diesen schädigen.

3.2 Abgasnachbehandlung von NO_x

Liegen die entstehenden Stickoxidmengen trotz innermotorischer Maßnahmen und Abgasrückführung über den zulässigen Grenzwerten, muss das Abgas von den Stickoxiden gereinigt werden. Hierzu werden NO_x-Speicherkatalysatoren und SCR-Katalysatoren eingesetzt (Selektive katalytische Reduktion, englisch: *Selective Catalytic Reduction* – SCR).

3.2.1 NO_x-Speicherkatalysatoren

NO_x-Speicherkatalysatoren sind mit chemischen Verbindungen beschichtet (zum Beispiel Bariumcarbonat BaCO₃), welche unter geeigneten Randbedingungen mit NO₂ eine feste, aber reversible Verbindung in Form von Nitraten eingehen (siehe Kasten). NO kann nicht direkt eingespeichert werden. Deshalb ist ein vorgeschalteter oder integrierter Oxidationskatalysator vorgesehen, der NO zu NO₂ oxidiert [2].

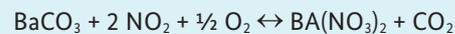
Die NO_x-Einspeicherung ist nur in einem materialabhängigen Temperaturintervall zwischen circa 250°C und 450°C optimal. Bei zu niedrigen Temperaturen ist die Oxidation von NO zu NO₂ sehr langsam, bei hohen Temperaturen ist das NO₂ nicht stabil [2]. Weitere wichtige Einflussgrößen auf die Einspeicherung und damit auf die erreichbare NO_x-Konversion sind die NO_x-Konzentration im zugeführten Abgas und die Raumgeschwindigkeit (Verhältnis aus Abgasvolumenstrom und Katalysatorvolumen) [4].

Ist der Speicher voll, muss der NO_x-Speicherkatalysator regeneriert werden. Dazu wird der Verbrennungsmotor so betrieben, dass sich im Abgas Luftmangel (fett, $\lambda < 1$) einstellt. Durch im Abgas vorhandene Reduktionsmittel (CO, H₂ und Kohlenwasserstoffe) werden die eingelagerten Stickoxide entfernt und in die Komponenten Stickstoff (N₂) und Kohlendioxid (CO₂) konvertiert (siehe Kasten). Ist der NO_x-Speicherkatalysator vollständig regeneriert, wird wieder in den Normalbetrieb gewechselt und eine erneute Beladung des NO_x-Speicherkatalysators beginnt.

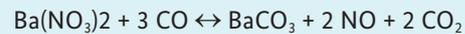
Wie lange die Beladungsphasen und die Regenerationsphasen dauern, hängt von der Dimensionierung des NO_x-Speicherkatalysators und der NO_x-Rohemission der Brennkraftmaschine ab. In der Literatur werden als betriebspunktabhängige Dauer für die Beladungsphase 30 bis 300 Sekunden und für die Regenerationsphase eine Dauer von 2 bis 10 Sekunden genannt [2]. Die Durchführung von Regenerationsphasen erhöht dabei den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs [2], [4]. Als zusätzliche Nachteile von Regenerationen sind zudem eine erhöhte Schadstoffemission während der Regeneration und möglicherweise eine Verdünnung des Motoröls mit Kraftstoff, verursacht durch die erhöhte Kraftstoffzuführung während der Regeneration, bekannt (DE 10 2015 218 893 A1).

NO_x-Speicherkatalysator: Ein- und Ausspeicherung mit Bariumcarbonat als Speichermedium (Quelle [2]).

Einspeicherung:



Ausspeicherung:



Im Anschluss an die Ausspeicherung werden die Stickoxide mittels CO zu NO₂ und CO₂ reduziert:

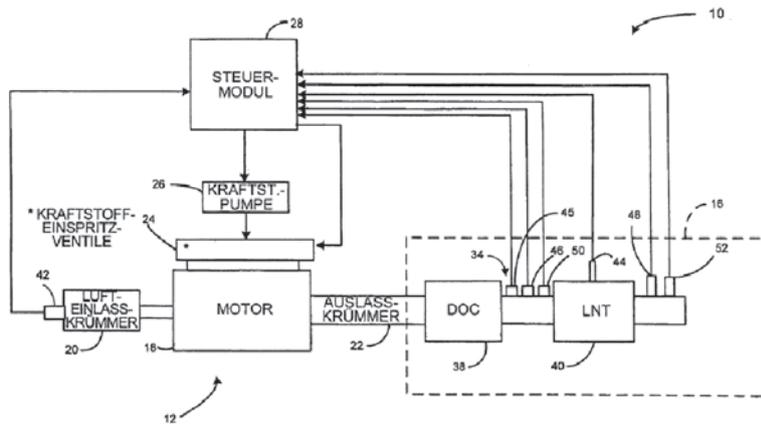


Schwefelverbindungen, die im Kraftstoff und im Schmieröl enthalten sind, werden ebenfalls im NO_x-Speicherkatalysator durch Sulfatbildung gebunden. Da die Sulfatbildungen sehr stabil sind, werden sie bei einer normalen Regeneration nicht gelöst. Durch die Verschwefelung des NO_x-Speicherkatalysators sinkt die Fähigkeit zur Einspeicherung von NO_x. Deshalb muss regelmäßig eine Schwefelregenerierung durchgeführt werden. Hierfür wird der NO_x-Speicherkatalysator für eine Dauer von mehr als 5 Minuten auf über 650°C aufgeheizt und mit fettem Abgas beaufschlagt. Zu hohe Temperaturen während der Schwefelregeneration oder zu häufige Schwefelregenerationen führen zu einer vorzeitigen Alterung des NO_x-Speicherkatalysators [2], [DE 10 2005 060 830 B4], [DE 10 2016 209 358 A1].

Der Einsatz eines NO_x-Speicherkatalysators erfordert eine aktive Steuerung der NO_x-Regenerationen und der Schwefelregenerationen durch die Motorsteuerung. Dabei besteht ein Zielkonflikt zwischen maximalem NO_x-Umsatz und geringem Kraftstoffverbrauch. Für maximalen NO_x-Umsatz sind kurze Einspeicherphasen und häufige Regenerationen günstig. Dies führt aber zu einem hohen Kraftstoffverbrauch [2], [4].

Eine optimale Steuerung setzt voraus, dass der Zustand des NO_x-Speicherkatalysators beziehungsweise des Abgases bekannt ist (insbesondere die Beladung mit NO_x, die Katalysatortemperatur, das Abgas Lambda), weshalb verschiedene Abgassensoren eingesetzt werden. Die Abgassensoren werden auch für On-Board-Diagnosen verwendet, um das System auf seine Wirksamkeit zu überprüfen.

Eine exemplarische Abgasanlage mit einem NO_x-Speicherkatalysator, einem vorgeschalteten Oxidations-



Figur 3: Abgasanlage mit Dieseloxydationskatalysator 38, NO_x-Speicherkatalysator 40, Temperatursensoren 44 und 45, NO_x-Sensoren 46 und 48, Lambdasonden 50 und 52 (aus DE 10 2008 029 877 A1)

katalysator und verschiedenen Sensoren ist in Figur 3 gezeigt (aus DE 10 2008 029 877 A1).

3.2.2 SCR-Katalysatoren

Eine andere Möglichkeit zur Reduzierung der Stickoxidemissionen ist der Einsatz eines SCR-Katalysators in Verbindung mit der Dosierung eines Reduktionsmittels in das Abgas. In der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) findet in dem SCR-Katalysator die Oxidation des Reduktionsmittels, bevorzugt (selektiv) mit dem Sauerstoff der Stickoxide und nicht mit dem im Abgas vorhandenen molekularen Sauerstoff, statt. Aus den Stickoxiden und dem Reduktionsmittel entstehen die unproblematischen Stoffe Stickstoff N₂ und Wasser H₂O.

Als Reduktionsmittel wird üblicherweise Ammoniak (NH₃) verwendet. Aufgrund der Toxizität von Ammoniak ist eine Speicherung direkt im Fahrzeug problematisch. Stattdessen wird üblicherweise eine wässrige Harnstoff-Wasser-Lösung als Trägersubstanz verwendet (auch als „AdBlue®“ bekannt). Die Harnstoff-Wasser-Lösung ist in einem Tank gespeichert und wird über die Dosiervorrichtung stromauf des SCR-Katalysators in das Abgas zugegeben. Dort entsteht durch Thermolyse und Hydrolyse Ammoniak, welches dann im SCR-Katalysator zur Verfügung steht und mit den Stickoxiden reagiert (siehe Kasten).

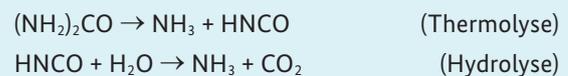
Am besten funktioniert die Konvertierung der Stickoxide, wenn das in den SCR-Katalysator eintretende Abgas ein Verhältnis von NO₂:NO von etwa 1:1 aufweist. Um dieses Verhältnis einzustellen, werden stromauf des SCR-Katalysators Oxidationskatalysatoren eingesetzt, welche NO zu NO₂ oxidieren. Stromab des SCR-Katalysators kann ein weiterer Oxidationskatalysator vorgesehen sein, der als Sperrkatalysator dient und gegebenenfalls überschüssiges Ammoniak zu N₂ und H₂O oxidiert [2].

Die Verwendung des SCR-Systems setzt ausreichend hohe Temperaturen voraus.

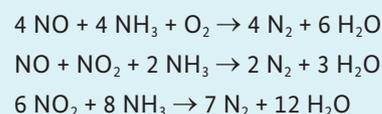
Die SCR-Reaktionen starten erst bei etwa 200–250°C in erklecklichem Maße. Die Dosierung der Harnstoff-Wasser-Lösung in das Abgas ist erst ab einer Temperatur von 180°C kontrolliert möglich. Findet die Dosierung bei niedrigeren Temperaturen statt, besteht die Gefahr, dass sich durch Kristallisationseffekte Harnstoffablagerungen in der Abgasanlage bilden und dort zu Schäden führen [DE 10 2013 003 112 B4]. Zu hohe Temperaturen beeinträchtigen die Wirksamkeit und können den SCR-Katalysator schädigen [3]. Optimale Umsatzraten werden im Temperaturfenster 250°C bis 450°C erzielt [2]. Aufgrund der geschilderten Abhängigkeiten ist oft ein aktives Temperaturmanagement nötig, um den SCR-Katalysator im günstigen Temperaturfenster zu halten. Eine Beheizung der Katalysatoren kann durch elektrische Heizvorrichtungen erfolgen. Manche Dosiersysteme verwenden elektrisch beheizte Verdampfer, welche eine verbesserte Einbringung des Reduktions-

Chemische Reaktionen in einem SCR-System (Quelle [2]).

Entstehung des Ammoniaks aus der Harnstoff-Wasser-Lösung:



Reaktion des Ammoniaks im SCR-Katalysator:



mittels in das Abgas ermöglichen sollen. Es können auch motorseitige Maßnahmen zur Anhebung der Abgastemperatur vorgesehen sein, welche ein Auskühlen des SCR-Katalysators und des Oxidationskatalysators verhindern oder ein schnelles Erwärmen nach einem Kaltstart sicherstellen.

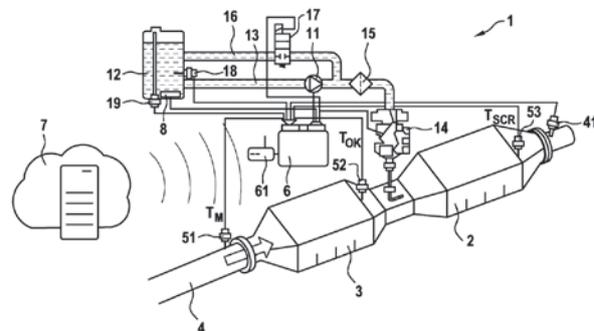
AdBlue® gefriert bei circa -11°C . Auch die Komponenten des Dosiersystems müssen deshalb beheizt werden, um die Dosierung nach einem Kaltstart zu ermöglichen.

Die Energie für die Beheizung des SCR-Systems muss letztendlich von dem Verbrennungsmotor erzeugt werden, wodurch sich der Kraftstoffverbrauch und die CO_2 -Emissionen erhöhen. Der Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V. (ADAC) hat in einem Test verschiedene Fahrzeuge nachträglich mit SCR-Nachrüstungen ausgestattet und den Kraftstoffverbrauch vor und nach der Nachrüstung gemessen. Der absolute Kraftstoffmehrverbrauch durch die SCR-Nachrüstung lag im ADAC-Test zwischen $0,11/100\text{km}$ und rund $0,31/100\text{km}$, was einem relativen Kraftstoffmehrverbrauch von ca. 1 % bis 6 % entspricht [9].

Neben dem Temperaturmanagement stellt auch die korrekte Dosierung der Harnstoff-Wasser-Lösung eine große Herausforderung dar. Wird zu wenig Reduktionsmittel dosiert, wird das NO_x nicht vollständig beseitigt. Wird mehr Reduktionsmittel dosiert als bei der Reduktion mit NO_x umgesetzt wird, kommt es zu einem unerwünschten NH_3 -Schlupf. Die Dosierung ist unter anderem deshalb schwierig, weil in Fahrzeugen der Verbrennungsmotor instationär betrieben wird – das heißt, die NO_x -Menge im Rohabgas ändert sich ständig und somit ändert sich auch ständig die optimale Dosiermenge. Übliche SCR-Katalysatoren besitzen eine temperaturabhängige Speicherfähigkeit für Ammoniak. Die im SCR-Katalysator gespeicherte Ammoniakmenge beeinflusst den Umwandlungswirkungsgrad des SCR-Katalysators. Viele in Patentanmeldungen beschriebene Dosiersteuerungen versuchen den Ammoniak-Füllstand im SCR-Katalysator deshalb so einzustellen, dass der NO_x -Umwandlungswirkungsgrad optimiert wird, ohne dass ein NH_3 -Schlupf entsteht. Auch andere Parameter wie die Temperatur des SCR-Katalysators, die Raumgeschwindigkeit des Abgases und die Alterung des SCR-Katalysators oder anderer Systemkomponenten haben Einfluss auf die optimale Dosiermenge und werden berücksichtigt.

Zur Steuerung und Regelung der Dosierung der Harnstoff-Wasser-Lösung und für das Temperaturmanagement werden verschiedene Sensoren eingesetzt, welche in der Abgasanlage verbaut sind, insbesondere NO_x -Sensoren und Temperatursensoren. Auch im Dosiersystem und im Tank für die Harnstoff-Wasser-Lösung sind Sensoren verbaut. Zu nennen sind hier insbesondere Drucksensoren, Temperatursensoren, Füllstandmesser und Sensoren zum Messen der Konzentration der Harnstoff-Wasser-Lösung. Die Sensoren in der Abgasanlage und im Dosiersystem dienen auch zur On-Board-Diagnose des Systems, um defekte Komponenten oder einen nicht mehr wirksamen SCR-Katalysator zu erkennen. Absichtliche Manipulationen am SCR-System, welche durch den Betreiber des Fahrzeugs durchgeführt werden, um die Betriebskosten zu senken (zum Beispiel das Nachfüllen von Wasser statt Harnstoff-Wasser-Lösung), sind in der Praxis ein Problem und müssen ebenfalls durch die On-Board-Diagnosen erkannt werden.

Im praktischen Einsatz kann bei einem NH_3 -Schlupf von unter 20ppm eine NO_x -Reduktion von 90 % erzielt werden, wobei die hierfür erforderliche Menge der Harnstoff-Wasser-Lösung AdBlue® etwa 5 % der Menge des eingesetzten Dieseldieselkraftstoffs entspricht [2]. Wie hoch der Verbrauch tatsächlich ist, hängt stark von den Fahrbedingungen und der Abgaszusammensetzung ab [3]. Im oben bereits erwähnten ADAC-Test gaben die verschiedenen Hersteller der SCR-Nachrüstungen den AdBlue®-Verbrauch ihrer Systeme mit rund 4 % bis zu 9 % des Dieseldieselkraftstoffverbrauchs an [9]. Der Tank für das AdBlue® ist aufgrund des geringeren Ver-

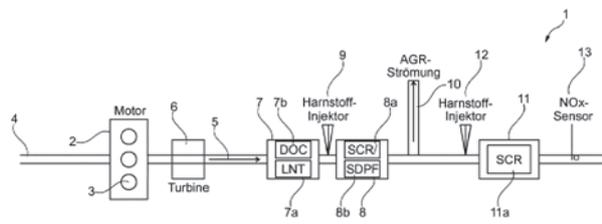


Figur 4 zeigt eine Abgasanlage, umfassend unter anderem einen Oxidationskatalysator 3, einen SCR-Katalysator 2, Temperatursensoren 51, 52 und 53, eine Lambda-Sonde 41, ein Dosierventil 14, einen Reduktionsmittel-Tank 12 mit einem Reduktionsmittel-Temperatursensor 18, einem Füllstandsmesser 19 und einem elektrischen Heizelement 8 (aus DE 10 2017 216 787 A1).

brauchs kleiner als der Kraftstofftank, wird aber dennoch aufgrund seiner Masse und seines Volumens von den Fahrzeugherstellern als Problem betrachtet [3]. Ein exemplarisches SCR-System ist in Figur 4 gezeigt (aus DE 10 2017 216 787 A1).

3.2.3 Kombination von NO_x-Speicherkatalysator und SCR-Katalysator

Zum Erreichen sehr niedriger Stickoxidemissionen kann ein NO_x-Speicherkatalysator mit einem oder auch zwei SCR-Katalysatoren kombiniert werden. Figur 5 zeigt eine solche Abgasanlage.



Figur 5: Abgasanlage mit einem NO_x-Speicherkatalysator und zwei SCR-Katalysatoren (aus DE 10 2016 223 558 A1)

Zu sehen sind in Figur 5 unter anderem ein mit einem Oxidationskatalysator kombinierter NO_x-Speicherkatalysator (Komponente 7, „DOC, LNT“), ein auf einem Partikelfilter aufgebrachter erster SCR-Katalysator (Komponente 8, „SCR / SDPF“), eine Abgasrückführung (Komponente 10, „AGR-Strömung“) und ein zweiter SCR-Katalysator (Komponente 11, „SCR“). Stromauf der SCR-Katalysatoren ist jeweils ein Injektor zum Dosieren von Harnstoff-Wasser-Lösung vorgesehen („Harnstoff-Injektor“ 9 und 12). Stromab des zweiten SCR-Katalysators ist ein NO_x-Sensor vorgesehen (Komponente 13).

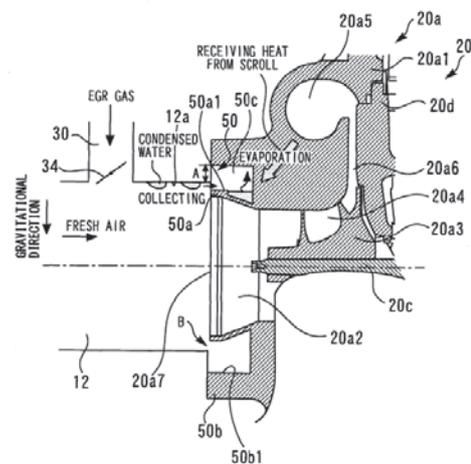
4 Der Spagat technischer Lösungen

In den vorigen Abschnitten wurde auf die Entstehung, die Folgen und die Möglichkeiten zur Vermeidung von NO_x-Emissionen bei Verbrennungskraftmaschinen eingegangen. Im Folgenden soll nun anhand von aktuellen Patentanmeldungen einerseits der Zielkonflikt zwischen Kraftstoffverbrauch und NO_x-Emissionen aufgezeigt und andererseits exemplarisch dargestellt

werden, welches hohe Maß an Komplexität mögliche technische Lösungen zur Vermeidung von NO_x-Emissionen nach sich ziehen.

4.1 Niederdruck-Abgasrückführung

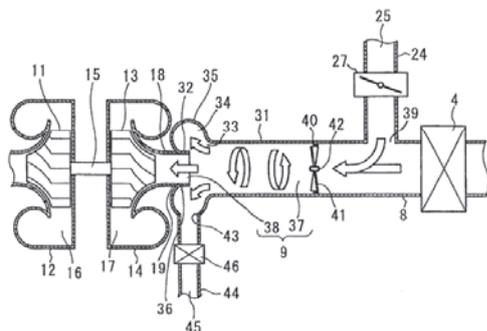
Sehr deutlich wird der Anstieg der Komplexität, wenn man die Niederdruck-Abgasrückführung betrachtet. Diese ist zwar aus Effizienzgründen der Hochdruckabgasrückführung vorzuziehen, weil der gesamte Abgasmassenstrom durch die Turbine des Abgasturboladers fließt, noch bevor ein Teil der Abgase zum Zylinder zurückgeführt wird. Allerdings tritt hier die im Abschnitt 3.1.2 genannte Problematik von auskondensierenden Wassertröpfchen auf, welche das Verdichterlaufrad schädigen können. Um dieser Problematik zu begegnen, schlägt die Veröffentlichung WO 2015/111679 A1 eine Kondensatfalle vor, welche ringförmig am Außenumfang des Verdichtereinlasses angeordnet ist (Figur 6). Hier sollen Wassertröpfchen zunächst gesammelt werden. Bei der Verdichtung der Luft im Verdichter steigt auch deren Temperatur. Um auf eine zusätzliche Heizeinrichtung zu verzichten und eine aufwändige Kondensatabfuhr zu vermeiden, soll die Wärme der durch den Verdichter komprimierten Luft genutzt werden. Die verdichtete Luft überträgt ihre Wärme auf das Verdichtergehäuse, welches die Wärme wiederum zur Kondensatfalle leitet (siehe fetten Pfeil in Figur 6),



Figur 6: Verdichtereinlass mit Kondensatfalle. Der fette Pfeil deutet die Wärmeübertragung vom Verdichtergehäuse zur Kondensatfalle an. Der dünne Pfeil deutet die Verdampfung des gesammelten Wassers an (aus WO 2015/111679 A1).

um so das gesammelte Wasser zu verdampfen (siehe dünnen Pfeil in Figur 6). Das verdampfte Wasser gelangt schließlich als für die Verdichterschaufeln unschädlicher Wasserdampf in die vom Verdichter angesaugte Luft. Es wird somit bereits zur Verfügung stehende Energie zum Verdampfen genutzt, ohne zum Beispiel eine zusätzliche Heizung anbringen zu müssen. Darüber hinaus wird eine aufwändige Kondensatabfuhr mittels Leitungen und Ventilen vermieden.

Auch die Veröffentlichung DE 10 2010 027 216 A1 beschäftigt sich damit, das Verdichterrad vor kondensiertem Wasser und festen Fremdstoffen zu schützen. Hierfür ist im Einlassrohr ein Wirbelgenerator angeordnet. Mit Hilfe des Wirbelgenerators werden auskondensiertes Wasser und feste Fremdstoffe durch die Zentrifugalkraft von der Luft getrennt und entlang der Innenwandung des Ansaugrohrs zu einer Sammelkammer geleitet. Von dort gelangen Partikel und Kondensat über ein Auslassrohr in einen nicht gezeigten Sammelbehälter. Um eine Rückströmung zu vermeiden, ist ein Rückschlagventil vorgesehen.



Figur 7: Wirbelgenerator im Ansaugrohr zum Abscheiden fester Partikel; Ansaugrohr 8, Verdichterrad 13, Niederdruckabgasrückführung 24, Niederdruck-AGR-Einlass 39, Wirbeleinrichtungen 41, Tankgehäuse 35, Fremdstoffsammelkammer 34, Rückschlagventil 46, Auslassrohr 44 (aus DE 10 2010 027 216 A1)

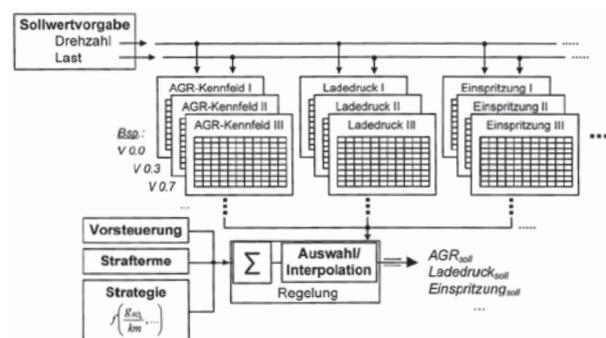
4.2 Regelung der Brennkraftmaschine und der Abgasnachbehandlung

Neben der Hardware wird durch die sich verschärfenden Anforderungen an die Schadstoffemissionen auch die Steuerung des Verbrennungsmotors und der Abgasnachbehandlung zunehmend komplexer. Waren früher in erster Linie gute Fahrbarkeit und niedriger Kraftstoffverbrauch die wichtigen Kriterien beim Entwurf

einer Steuerung, gilt es heute, zusätzlich auf niedrige Schadstoffemissionen auch im realen Fahrbetrieb zu achten („Real Driving Emissions“), insbesondere im Hinblick auf Stickoxide. Wie im Kapitel 3.2 dargelegt, widersprechen sich diese Ziele aber oft.

Viele Patentanmeldungen beschäftigen sich mit dem Problem, einen guten Kompromiss zwischen den Kriterien „Kraftstoffverbrauch“ und „Schadstoffemissionen“ zu finden, was nun an ausgewählten Beispielen dargestellt wird.

Zur Lösung des Zielkonflikts schlägt die Veröffentlichung DE 10 2016 208 834 A1 vor, die NO_x -Konzentration stromab der Abgasnachbehandlungsanlage im laufenden Betrieb des Fahrzeugs zu messen oder durch ein Modell zu schätzen (Echtzeitüberwachung der Emission). Ein Regler sorgt dann durch gezielte Beeinflussung der Betriebsparameter der Brennkraftmaschine und/oder der Abgasnachbehandlungsanlage dafür, dass die erlaubten strecken- oder leistungsbezogenen Emissionsgrenzwerte eingehalten werden. Der Regler berücksichtigt dabei auch den zu erwartenden Kraftstoffverbrauch und die Fahrdynamik.



Figur 8: Regler zum Begrenzen von NO_x -Emissionen (aus DE 10 2016 208 834 A1)

Das Grundprinzip der Regelung ist in Figur 8 gezeigt. Etwas vereinfacht ausgedrückt, sind im Steuergerät verschiedene Varianten für die Motorsteuerung hinterlegt, welche insbesondere die Abgasrückführrate, den Ladedruck und die Einspritzung steuern. Die mit römisch I bezeichneten Kennfelder stehen für eine kraftstoffoptimierte Variante, die mit römisch III bezeichneten Kennfelder stehen für eine emissionsoptimierte Variante. Abhängig von der Abweichung zwischen den in Echtzeit

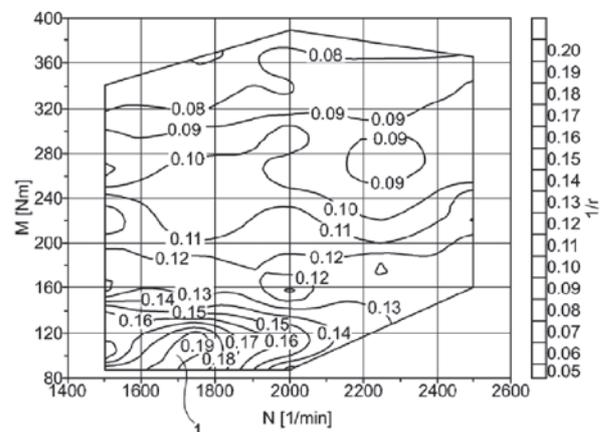
erfassten Emissionen und dem erlaubten Emissionsgrenzwert wählt der Regler eine passende Variante aus. Dabei ist auch eine Interpolation zwischen den Kennfeldern verschiedener Varianten möglich. Angesprochen wird in der Veröffentlichung DE 10 2016 208 834 A1 auch die Möglichkeit, die Regelung unter Berücksichtigung der jeweiligen Uhrzeit und/oder der jeweiligen Fahrzeugposition durchzuführen, indem ein variabler Schadstoffgrenzwert verwendet wird. So könnte beispielsweise innerhalb von Ortschaften, einer Umweltzone oder eines Naturschutzgebiets ein besonders niedriger NO_x -Grenzwert verwendet werden. In der Nacht könnte ein höherer NO_x -Grenzwert erlaubt werden als am Tag.

Die Veröffentlichung DE 10 2017 216 787 A1 beschäftigt sich mit dem Temperaturmanagement eines SCR-Systems (es handelt sich um das in Figur 4 gezeigte System). Eine Aufheizung des SCR-Katalysators kann durch motorseitige Maßnahmen erfolgen, welche zu einer Erhöhung der Abgastemperatur führen. Zusätzlich oder alternativ kann ein elektrisches Heizelement im SCR-Katalysator vorgesehen sein. Auch im Tank ist ein Heizelement vorgesehen: zum Auftauen gefrorenen Reduktionsmittels. Die Veröffentlichung DE 10 2017 216 787 A1 schlägt vor, die Beheizung des SCR-Systems abhängig von einer Streckeninformation zu steuern, welche aus einem Rechnernetzwerk abgerufen wird (siehe in Figur 4 das Steuergerät 6, welches mit dem Rechnernetzwerk 7 verbunden ist). Bei der Streckeninformation kann es sich beispielsweise um die Länge einer zu fahrenden Strecke handeln, um die Fahrzeit, um das Verkehrsaufkommen auf der Strecke und so weiter. Durch die „Vorausschau“ auf die bevorstehenden Fahrbedingungen soll einerseits eine möglichst optimale Beheizung erreicht werden. Liegen auf der geplanten Strecke beispielsweise nicht genug Abschnitte, in denen der SCR-Katalysator durch die Motorlast von alleine seine Betriebstemperatur erreicht, kann frühzeitig zusätzlich Kraftstoff eingespritzt werden oder das elektrische Heizelement aktiviert werden, um die Aufheizzeit zu verringern.

Andererseits soll ein unnötiges Aufheizen vermieden werden. Steht zum Beispiel eine sehr kurze Fahrt bevor, bei der es unmöglich sein wird, den SCR-Katalysator

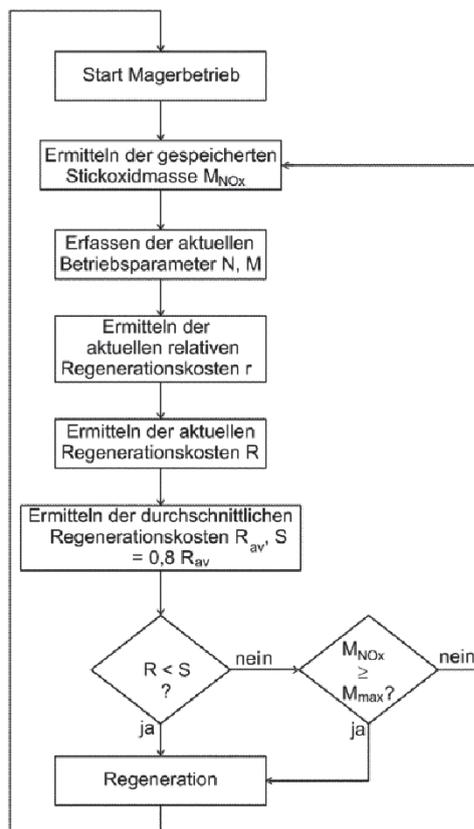
auf Betriebstemperatur zu bringen oder eingefrorenes Reduktionsmittel aufzutauen, wird die Heizung unterbunden, um Energie zu sparen. Als weitere Maßnahme zum Energiesparen kann das Auftauen von gefrorenem Reduktionsmittel und das Aufheizen des SCR-Katalysators auf die Betriebstemperatur mit Hilfe der Streckeninformation synchronisiert werden – das heißt, beide Heizmaßnahmen werden so gesteuert, dass die Ziele gleichzeitig erreicht werden und keine unnötige Beheizung einer Komponente während eines Wartens auf die Betriebsbereitschaft anderer notwendiger Komponenten stattfindet.

Die Veröffentlichung DE 10 2015 218 893 A1 beschäftigt sich mit der Regeneration von NO_x -Speicherkatalysatoren. Die negativen Auswirkungen einer Regeneration – insbesondere der Kraftstoffmehrverbrauch – werden in dieser Anmeldung als „Regenerationskosten“ bezeichnet und sollen möglichst gering gehalten werden. Hierfür schlägt die Veröffentlichung DE 10 2015 218 893 A1 vor, basierend auf den aktuellen Motorbetriebsbedingungen, die Regenerationskosten laufend zu berechnen und eine Regeneration dann einzuleiten, wenn die aktuellen Regenerationskosten unterhalb eines Schwellwerts liegen. Dieses Vorgehen beruht auf der Erkenntnis, dass die Regeneration in bestimmten Motorbetriebspunkten mit weniger zusätzlichem Kraftstoffeinsatz durchgeführt werden kann als in anderen Betriebspunkten (siehe Figur 9). Normalerweise wird die Regeneration dann ausgelöst, wenn der NO_x -Speicherkatalysator voll ist. Liegt aber ein



Figur 9: Kehrwert für die relativen Regenerationskosten $1/r$ aufgetragen über Last M und Drehzahl N (aus DE 10 2015 218 893 A1)

Motorbetriebspunkt vor, der niedrige Regenerationskosten ermöglicht, kann es unter Umständen sinnvoll sein, die Regeneration vorzuziehen. Ob es tatsächlich Sinn macht, die Regeneration vorzuziehen, wird mit einem Algorithmus abgeschätzt, welcher in Figur 10 gezeigt ist.



Figur 10: Algorithmus zum Auslösen einer Regeneration (aus DE 10 2015 218 893 A1)

Fazit: Die bei der Verbrennung in Brennkraftmaschinen entstehenden Stickoxide sind giftige Gase, welche die Gesundheit der Menschen und ökologische Systeme gefährden. Mittels technischer Maßnahmen können die Stickoxidemissionen von Verbrennungskraftmaschinen reduziert werden. Es besteht dabei ein Zielkonflikt zwischen dem Reduzieren der Stickoxidemissionen und dem Kraftstoffverbrauch. Die Komplexität der dafür nötigen technischen Systeme nimmt zu.

Nicht-Patentliteratur

- [1] WIKIPEDIA: Stickoxide, <https://de.wikipedia.org/wiki/Stickoxide>, [abgerufen am 11. April 2019]
- [2] REIF, K.: Dieselmotor-Management – Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012 – ISBN 978-3-8348-1715-0
- [3] BORGEEST, K.: Manipulation von Abgaswerten – Technische, gesundheitliche, rechtliche und politische Hintergründe des Abgasskandals. Wiesbaden: Springer, 2017 – ISBN 978-3-658-17180-3
- [4] HERTZBERG, ANDREAS: Betriebsstrategien für einen Ottomotor mit Direkteinspritzung und NO_x-Speicherkatalysator, Dissertation Universität Karlsruhe, 2001
- [5] UMWELTBUNDESAMT: Wie wirken sich Stickstoffoxide auf die menschliche Gesundheit aus?. 04.09.2013. <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-wirken-sich-stickstoffoxide-auf-die-menschliche> [abgerufen am 18.04.2019]
- [6] UMWELTBUNDESAMT: Stickstoff – Zuviel des Guten?, Januar 2011
- [7] UMWELTBUNDESAMT / MINKOS, A.; DAUERT, U.; FEIGENSPAN, S.; KESSINGER, S.: Luftqualität 2018 – Vorläufige Auswertung, Januar 2019 – ISSN 2363-829X
- [8] MERKER, G; SCHWARZ, C.; TEICHMANN, R (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011 – ISBN 978-3-8348-1393-0
- [9] ADAC e.V.: NO_x-Reduzierung an Euro 5 Dieselfahrzeugen durch Hardwarenachrüstung, Langversion Schlussbericht, Februar 2018
- [10] LACROIX, ANDREAS: Untersuchung eines Harnstoff-SCR-Systems zur Stickoxidminderung im Diesel-PKW-Praxiseinsatz: Dissertation Technische Universität Kaiserslautern, 2005

Cabrioletverdecke in speziellen Ausbildungen

Dr. Andreas Monokroussos, Patentabteilung 1.24

Eines der bedeutsamsten Bedürfnisse in jedem Menschen ist der Wunsch nach Freiheit. Dieses Aspekts nimmt sich auch die Automobilindustrie in der Kreation ihrer Produkte an. Sehr gut wird das in Fahrzeugen wie Cabriolets umgesetzt. So verzichten die Hersteller bei der Karosserieform solcher Fahrzeuge auf ein starres Verdeck. Stattdessen verbauen sie ein Stoff- oder Metallverdeck, welches sich automatisch oder manuell öffnen und schließen lässt und den Insassenraum freigibt. Hier liegt auch das markanteste Merkmal, das ein Cabriolet ausmacht, nämlich das bewegbare faltverdeck.

Mit diesem Artikel soll eine spezielle Auswahl an besonderen und außergewöhnlichen Verdeckformen vorgestellt werden. Sie sind auffallend anders als diejenigen, die im Alltag bei Cabrios zu sehen sind. Dabei wird eine Vielfalt an technischen Möglichkeiten aufgezeigt, die künftige Verdeckentwicklungen prägen könnten. Anhand von ausgewählten Patentanmeldungen werden exemplarische Verdecklösungen aufgezeigt und ihre individuellen und speziellen Eigenheiten vorgestellt. Im vorgegebenen Rahmen wird in diesem Artikel nur eine Auswahl von Verdecken mit besonders ausdrucksvollen Merkmalen in ihrem technischen Aufbau näher behandelt. Mit einem Ausblick auf denkbare Lösungen für künftige faltverdecke wird dieser Artikel abgeschlossen.

1 Einführung

„Cabriolets emotionalisieren Automarken. Sie sind eine Art Erbe des Ur-Rennwagens, den man offen fuhr und dabei den Elementen ausgesetzt war“, sagt Paolo Tumminelli von der TH Köln [1]. Cabrioletfahrer nehmen die Umwelt stärker wahr als diejenigen Autofahrer in geschlossenen Fahrzeugen. In den Anfängen des Automobilbaus wurden die Automobile fast ausschließlich ohne Verdeck gebaut. Solch ein typisches offenes Fahrzeug war damals der Motorwagen Nr. 1 von Carl Benz aus dem Jahre 1886. Diese ersten Fahrzeuge leiteten sich von den zu jener Zeit im Straßenbild üblichen Kutschen ab. So waren zu Beginn des Automobilbaus offene Autos sogar günstiger als geschlossene. In der heutigen Zeit hat sich das geändert. Da Cabriolets zwar meist von Volumenmodellen abgeleitet werden, ist die Entwicklung dieser offenen Derivate aber teurer. Bei niedrigen Stückzahlen wird dann die Entwicklung unter Umständen für den Hersteller kaum mehr tragbar. Die Fahrzeuggattung der Cabriolets wurde somit exklusiver und damit teurer in ihrer Herstellung als andere Fahrzeuge [1].

In einem Cabriolet können sich sowohl Fahrer als auch Beifahrer bei schönem Wetter die Luft um die Nase wehen lassen und wie in keinem anderen Auto das beschriebene Freiheitsgefühl genießen. Dabei ist es egal, ob es ein Zwei- oder Fünfsitzer ist. Einem Cabriolet werden besondere Charakteristiken zugesprochen, die vor allem Punkte wie Klarheit und Eleganz berühren. Seit Anfang der 1970er Jahre verfügen Cabriolets zum Schutz der Insassen bei Unfällen, insbesondere bei Überschlägen, über Überrollbügel. So etwas war bei einem der ersten Cabriolets, zum Beispiel dem Maybach Zeppelin DS 8 (1932), aber noch nicht der Fall [2].

2 Das bewegbare faltverdeck

Grundsätzlich wird ein klassisches Cabrioletverdeck als ein bewegbares faltverdeck, welches einen Verdeckbezugsstoff und ein Verdeckgestänge umfasst und über die Dachkinematik an der Fahrzeugkarosserie angeschlagen ist, angesehen. Das Verdeckgestänge umfasst verschiedene Längs- und Querspiegel, die üblicherweise über Drehgelenke miteinander verbunden sind. Während der Überführungsbewegung zwischen

der Schließ- und Öffnungsposition des faltverdeckes ändern die Spiegel ihre relative Lage zueinander, wobei das faltverdeck in der geöffneten position in einem heckseitigen Verdeckkasten abgelegt wird [3].

Das gilt sowohl für die Stoffverdecke als auch für die Hartschalenverdecke mit mehreren, flächig ausgebildeten Verdeckelementen. In besonderen Fällen wird ein Stoffüberzug über die flächigen Verdeckelemente gespannt, der sich auf diese flächigen Verdeckelemente legt und durch diese gestützt werden soll. Es entsteht dann der optische Eindruck, es handele sich um ein klassisches Stoffverdeck [3].

Die über die beschriebene Spannbügel- und Spiegelkonstruktion aufgebauten Stoffverdecke lassen sich heute möglichst vollautomatisch auf Knopfdruck in 10 bis 20 Sekunden, sowohl wenn sich das Fahrzeug bewegt als auch in stationärem Zustand, öffnen. Umgekehrt dauert es beim Schließen ähnlich lange. In der Regel liegt dabei die Geschwindigkeitsgrenze in fahrbarer Weise bei etwa 50 km/h. So braucht man zum Beispiel im dichten Stadtverkehr, wenn erste Regentropfen fallen, nicht erst anhalten, um das Verdeck zu schließen. Die Klappverdecke oder Hartschalenverdecke dagegen – sie werden auch „Retractable Hardtops (RHT)“ genannt – bestehen aus einem, zwei, drei, vier oder fünf festen Verdeckelementen. Solch ein Hartschalen-Klappverdeck ist im Regelfall in der Wagenfarbe lackiert, so dass das Cabriolet bei geschlossenem Dach optisch wie ein Coupé wirkt. Das gibt dem Wagen eine sehr elegante äußere Form. Außer einer strömungstechnisch optimaleren Geometrie der Außenkontur ist auch die mechanische Festigkeit eines mit Verdeckelementen ausgeführten faltverdeckes von Vorteil, da ein im Gegensatz hierzu ausgebildetes Stoffverdeck nachgiebiger und weicher ist. Insgesamt macht ein mit festen Verdeckelementen ausgeführtes faltverdeck einen stärkeren Eindruck von Abgeschlossenheit des Fahrzeugs als ein Stoffverdeck. Welche der beiden Verdeckarten sich als System besser eignet, hängt letztendlich von der Vorliebe des Kunden ab. Grundsätzlich werden Stoffverdecke als sportlicher und Klappverdecke als komfortabler eingestuft [3].

Eng mit dem Cabriolet verwandt und sehr beliebt in der heutigen Zeit ist eine ganz spezielle Art von Cabriolet, der Roadster. Während sich beim Cabriolet alles um gemütliches und bequemes Fahren dreht, sind Roadster reine zweisitzige Sportwagen. Das offene Verdeck haben beide gemeinsam. Als Roadster mit einem festen Klappdach ausgestattet aufkamen, wurde das Cabriolet von einem Saison- zum Ganzjahresauto. Für viele Frischluft-Liebhaber gehören aber nach wie vor das Stoffverdeck und das Cabriolet untrennbar zusammen. Ur-Roadster verzichteten dagegen sogar ganz auf ein Verdeck, ließen sich jedoch im Notfall (zum Beispiel bei plötzlichem Regen) manuell mit einem Stoffverdeck schließen. In den Anfängen des Automobils war eine Gepäckklappe typisch, die auch als Notsitz diente, oder ein extra aufsetzbares Gestell, das als Kofferträger im Heckbereich des Fahrzeugs angebracht war. Ein bekannter Klassiker aus deutscher Fertigung war der ab dem Jahr 1954 gebaute Porsche 356 Speedster. Stark geprägt wurde diese Karosserieform im Wesentlichen jedoch durch die britischen Marken MG, Jaguar und Triumph sowie später von den italienischen Autobauern Alfa Romeo und Ferrari. Heutige Vertreter dieser Fahrzeuggattung werden beispielsweise durch den Mercedes-AMG GT, BMW Z4 oder Audi TT repräsentiert [2]. Es gibt eine Zwischenkategorie von Schiebedachversionen wie beim Citroën 2CV, DS3 oder Fiat 500, bei denen die Seitenwände mit Dachrahmen und -holmen nicht versenkbar, sondern unverändert fest verbleiben, das Stoffverdeck aber trotzdem ganz geöffnet werden kann, da es nicht nur geklappt, sondern auch gerollt oder wie eine Ziehharmonika nach hinten verschoben werden kann [3].

3 Besondere Formen von faltverdecken

Das faltverdeck eines Cabriolets besteht typischerweise aus einer komplexen Baugruppe, die aus einer äußeren, sichtbaren Hülle sowie einem beweglichen Satz an Gestängen, gebildet aus Spiegeln, Latten und Gelenken, besteht.

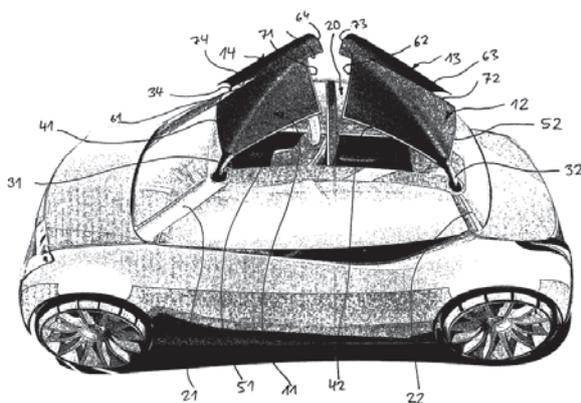
Dieses Verdeck wird heute durch eine Tasterbetätigung automatisch von einer geöffneten in eine geschlossene Position oder umgekehrt bewegt. Die Verdeckbewegung

erfolgt dabei üblicherweise durch einen hydraulischen Antrieb, welcher einen Verdeckmechanismus antreibt und somit das Verdeckgestänge mit der Textilhülle oder bei einem Hartschalenklappdach die starren Verdeckelemente und gegebenenfalls auch einen Deckel für einen Verdeckaufnahmeraum umfasst.

Im Rahmen dieses Artikels werden im Kapitel 3 exemplarisch und stellvertretend für eine Reihe außergewöhnlicher Verdecklösungen einige spezielle und ausgesuchte faltverdecke vorgestellt. Dabei ist zu beachten, dass viele Entwicklungen im Automobilbau nicht den Einzug in die Großserie schaffen, obwohl sie raffinierte und ausgeklügelte Konzepte aufweisen können.

3.1 Auffaltbare flexible Stoffabdeckungen

Hierbei handelt es sich um eine auffaltbare Abdeckung eines Faltdaches, die von mehreren jeweils für sich wieder faltbaren Elementen aus einem flexiblen Stoff gebildet wird und die im ausgebreiteten Zustand mit ihren Rändern aneinanderliegen und demzufolge gemeinsam eine wirksame Fläche einer faltbaren Abdeckung bilden. Im zusammengefalteten Zustand ist diese Abdeckung in unterschiedliche Ablagepositionen beziehungsweise Stauräume verfahrbar. Die flexible Stoffabdeckung dient zweierlei Funktionen: einerseits entspricht sie einer Außenabdeckung und andererseits einem Verdeckhimmel oder einem Rollo. Der „flexible Stoff“, der hier benutzt wird, kann aus Textilfasern als auch aus flächigem, flexiblem Kunststoffgewebe bestehen.

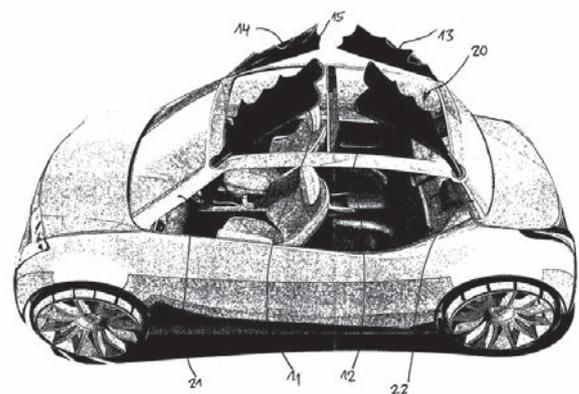


Figur 1: Auffaltbare Abdeckungselemente eines Faltdachs (DE 10 2006 014 114 B3).

Wie in Figur 1 gezeigt, wird die Verdeckabdeckung in einer sich öffnenden Position von vier faltbaren flexiblen Elementen gebildet, welche jeweils eine quadratische oder rechteckige Form aufweisen. Sie sind in Richtung und jeweils auf eine von den vier außenliegenden Ecken der Karoseriesäulen (A-Säulen und C-Säulen) gespannt. Auf den sich kreuzenden Verdeckhauptdiagonalen liegt je ein Hauptspiegel, der zusammengeklappt und in einer der Säulen der Karosserie verstaut werden kann. Die faltbaren flexiblen Elemente werden zusätzlich durch zwei Nebenspiegel an den außenliegenden Seitenkanten gespannt. Die vorderen Enden der Nebenspiegel sind mit dem Hauptspiegel verbunden.

Das in Figur 1 gezeigte Faltdach weist eine quadratische Dachöffnung auf, die von einer Dachabdeckung mit vier gleich großen faltbaren Elementen (11, 12, 13 und 14) in geschlossenem Zustand vollständig verdeckt wird. Jedes der vier faltbaren Elemente besteht aus

- einem flexiblen Bezugsstoff (15; siehe hierzu Figur 2),
- nach oben offenen Säulen (21, 22 sowie hierzu in Figur 3: 23, 24) der Fahrzeugkarosserie in Höhe jeweils einer Ecke der Dachöffnung,
- verschiebbar geführten Hauptspiegeln (31, 32, 33 und 34), die aus den Säulen auf einer Hauptdiagonale zur Mitte des Fahrzeugdachs verlaufen und
- Nebenspiegeln (41, 51, 42, 52), die sich bei geschlossenem Dach im rechten Winkel zueinander an den außen liegenden Seitenkanten der flexiblen Elemente (11, 12, 13 und 14) erstrecken.



Figur 2: Auffaltbare Abdeckungselemente in jeweiligem Einzug während der Öffnungsbewegung (DE 10 2006 014 114 B3).

Zusätzlich sind an den innen liegenden Seitenkanten der Elemente 11, 12, 13 und 14, zwischen den Enden der Nebenspiegel 41, 51, 42, 52 und den Enden der Hauptspiegel 31, 32, 33 und 34 zusätzlich Spannseile 61, 71, 62, 72, 63, 73, 64, 74 vorgesehen, die in einer schlaufenförmigen Lasche am flexiblen Bezugsstoff 15 verlaufen und dabei den Bezugsstoff bei ausgefaltetem Element 11, 12, 13 und 14 an den Seitenkanten spannen.

Wie in Figur 1 angegeben, startet die Öffnungsbewegung aus der Schließposition, wobei die flexiblen Elemente an den ihnen jeweils zugeordneten Hauptspiegeln 31, 32, 33 und 34 zuerst durch eine entsprechende Bewegung des Hauptspiegels nach oben geschwenkt werden. Dabei sind die Spannseile 61, 71, 62, 72, 63, 73, 64, 74 an den innen liegenden Seitenkanten der Elemente 11, 12, 13, 14 zunächst noch gespannt. Beim weiteren Öffnen gemäß Figur 2 werden die Nebenspiegel 41, 51, 42, 52 (siehe hierzu Figur 1) jedes Elements 11, 12, 13, 14 an den ihnen jeweils zugeordneten Hauptspiegeln 31, 32, 33 und 34 (siehe hierzu Figur 1) angeschwenkt. Gleichzeitig werden die Spannseile 61, 71, 62, 72, 63, 73, 64, 74 (siehe hierzu Figur 1) entspannt, so dass sich die innen liegenden Kanten der Elemente 11, 12, 13, 14 allmählich zusammenfallen. Während dieser Öffnungsphase (Figur 2) werden die Hauptspiegel 31, 32, 33 und 34 (siehe hierzu Figur 1) durch einen elektrischen Antrieb jeweils nach innen in die A- beziehungsweise C-Säulen 21, 22 und 23, 24 (siehe hierzu Figur 3) der Fahrzeugkarosserie hineingezogen. In dieser Bewegung legen sich die Nebenspiegel 41, 51, 42, 52 (siehe hierzu Figur 1) jedes der vier flexiblen Elemente an die ihnen zugeordneten

Hauptspiegel 31, 32, 33 und 34 (siehe hierzu Figur 1) an und der Bezugsstoff 15 faltet sich entsprechend (ebenfalls eng) an die Hauptspiegel. Somit werden die vier flexiblen Elemente 11, 12, 13, 14 vollständig zusammengefaltet in den A- und C-Säulen versenkt und wie Figur 3 zeigt, wird dann die Dachöffnung 20 vollständig freigelegt. Um den gesamten Fahrzeuginnenraum freizugeben, müssen alle vier flexiblen Elemente gleichzeitig geöffnet sein.

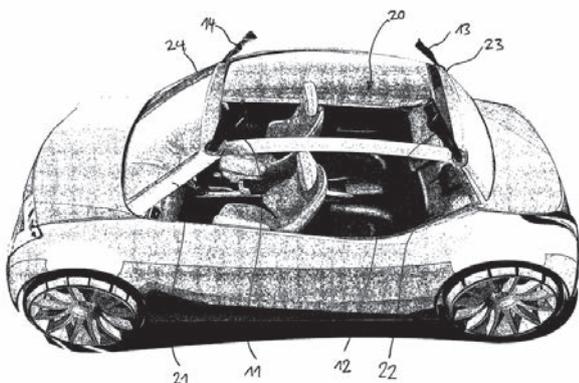
Die Hauptspiegel sind bevorzugt aus Gewichtsgründen innen hohl ausgebildet und weisen in ihren abknickenden Abschnitten flexible Scharniere sowie Federn auf, die insbesondere in den Schließpositionen die flexiblen Elemente nach unten drücken. Dadurch liegen die Nebenspiegel 41, 51, 42, 52 (siehe hierzu Figur 1) dichtend gegen entsprechende Auflagebereiche am Karosserierand der Dachöffnung 20 an.

Je nach abweichender Verdeckform können auch mehr als vier flexible Elemente angebracht werden. Diese Elemente können unterschiedliche Formen haben wie spezielle Dreiecksformen oder Rauten-, Trapez-, Kreis- oder Ovalformen. Eine selektive Betätigung der einzelnen flexiblen Elemente würde die Variabilität der Öffnungsfähigkeit des Verdecks erhöhen, um beispielsweise als variierbare Abschattungsvorrichtung für einzelne Sitze den Insassenkomfort zu steigern.

3.2 Kreisbogenförmig verfahrbares Cabrioletverdeck

Für kleine zwei- oder mehrsitzige Cabriolets, Roadster und dergleichen werden versenkbare kleine Verdecke, sogenannte Festdächer oder „Hardtop“-Dächer, mit einer formstifen Schale und einer Heckscheibe als Fensteröffnung verwendet. Diese Lösungen sind trotz ihrer rigiden Ausführung durch die festen Dachelemente mittels Tragsäulen seitlich begrenzt und werden auf Schienen im entsprechenden Unterbringungsraum auf einer kreisbogenförmigen Bahn kinematisch zwangsgeführt und können so unmittelbar hinter den Sitzen abgelegt werden.

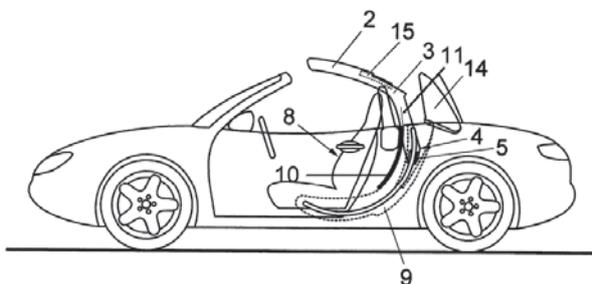
Figur 4 stellt ein zweisitziges Cabriolet mit einem verfahrbaren Verdeck dar, welches aus einem Verdeckteil



Figur 3: Eingezogene Abdeckungselemente in die jeweiligen A- und C-Säulen in der Endphase der Verdecköffnung (DE 10 2006 014 114 B3).

2, einer formstifen Schale, an deren heckseitigen Ecken im stumpfen Winkel nach unten gerichtete und nach außen divergierende Tragsäulen 3 angeschlossen sind, besteht. Die Tragsäulen 3 sind als schlanke flache Träger ausgebildet und nehmen hauptsächlich eine tragende Funktion wahr. Im unteren Bereich 4 der Tragsäulen 3 sind diese mit Führungsschlitten 5 versehen, welche Rollen oder Gleitschuhe aufweisen. Die Führungsschlitten 5 laufen beispielsweise auf Vierkant- oder Doppel-T-Schienen 6 (siehe hierzu Figur 5), die an senkrecht stehenden und parallel zur Fahrzeuglängsachse fest an der Karosseriestruktur angebrachten Trägerplatten 7 (siehe hierzu Figur 5) befestigt sind. Die Schienen 6 verlaufen auf einer kreisbogenförmigen Führungsbahn um eine horizontale Querachse und sind seitlich an der Sitzgruppe 8 angeordnet. Den beiden Schienen 6 ist ein Unterbringungsraum 9 hinter den Sitzen zugeordnet. Dem Unterbringungsraum 9 könnte ein zweiter separater Unterbringungsraum 10 vorgeordnet liegen, welcher unmittelbar hinter der Sitzgruppe 8 liegt. In diesem Unterbringungsraum 10 kann eine Heckscheibe 11 aufgenommen werden.

Das Verdeckteil 2 und die Trägersäulen 3 verfahren beim weiteren Absenken entlang von kreisbogenförmig verlaufenden Schienen 6. Die Trägersäulen 3 werden dabei entlang der Schienen 6 seitlich an der Sitzgruppe 8 vorbeigeführt. Das Verdeckteil 2 liegt nach Beendigung des Absenkvorganges etwa parallel zu den Rückenlehnen der Sitzgruppe 8.



Figur 4: Kreisbogenförmig verfahrbares festes Verdeckteil eines faltverdeckts (DE 102 12 573 A1).

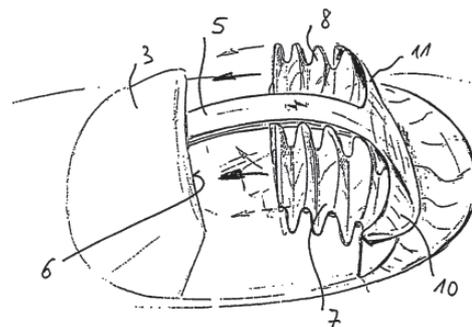
Die Heckscheibe 11 kann in ausgefahrener Stellung auch als Windschott Verwendung finden oder ist im Unterbringungsraum 10 hinter den Sitzlehnen der Sitzgruppe 8 versenkt.

3.3 Verschiebbare Stoffabdeckungen am faltverdeck

Puristische, kleine Cabriolets werden den „Roadstern“ oder „Speedstern“ zugeordnet. Solche Fahrzeuge haben in einem kleinen und meist engen Innenraum zwei nebeneinander liegende Sitze. Diese Art von Cabriolet zeichnet sich zudem durch ein einfaches Aussehen aus, so dass sie nur die nötigsten Instrumente, kleinere Fensterscheiben, kleinere Außenspiegel, weniger Innenverkleidungen und so weiter aufweist. Insgesamt wird der Eindruck vermittelt, dass das Fahrzeug auch kein Verdeck benötigt. Aufgrund der kleineren Fahrzeugabmessungen ist auch der zur Verfügung stehende Stauraum begrenzt, so dass der Stauraum für ein faltverdeck fehlt. In der Regel bleibt bei dieser Art von Cabriolet nur noch ein ebenfalls schlichtes faltbares Verdeck als sogenanntes „Notverdeck“ zu installieren.

Eine Lösung dafür wird in Figur 5 dargelegt, aus welcher ein weiches faltverdeck mit Bezugsstoff hervorgeht, das am Heckteil des Fahrzeugs angebunden ist. Abgesenkt wird das faltverdeck zusammengeschoben hinter den Fahrzeugsitzen verstaut. In der angehobenen und ausgebreiteten Stellung ist es zudem an der Oberkante der Windschutzscheibe 6 abgestützt. Als Besonderheit werden durch ein Verdeckmittelteil 5 getrennte und beidseitig über die jeweilige Sitzposition einzeln geführte schiebbare Stoffabdeckungen 7, 8 montiert. Entsprechende Arretierungen zur Sicherung der Stoffabdeckungen sind am Heck 10 im Bereich des Verdeckmittelteils und an der Oberkante der Windschutzscheibe 6 vorgesehen.

In besonderer Ausführung sind sowohl das Verdeckmittelteil als auch die beiden Abdeckelemente aus



Figur 5: Geteilt geführte schiebbare Stoffabdeckungen eines faltverdeckts (DE 197 04 846 A1).

T-förmigen Teilen gebildet. Die Stoffabdeckungen sind bevorzugt aus faltbaren flexiblen Materialien, welche bei Nichtgebrauch vollständig beidseitig vom Verdeckmittelteil getrennt zusammengesoben und hinter den Sitzpositionen verstaut sind. So entsteht für einen Außenstehenden ein sparsamer Eindruck, nämlich, dass hier gar kein Verdeck vorhanden ist.

3.4 Aufsetzbare und verschiebbare Strukturelemente

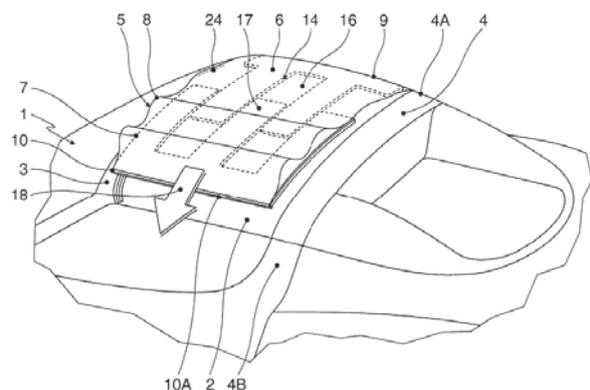
Faltverdecke für Cabriolets, insbesondere für kleine, die eine Dachöffnung zwischen einem Windschutzscheibenrahmen und einem als Überrollbügel ausgebildeten Bügel im Heckbereich aufweisen, können als zusammenfaltbare Verdecke als Spriegel-Konstruktion oder als kleine starre, plattenartige Verdecke ausgeführt sein.

In Figur 6 wird ein Verdeck gezeigt, welches ein erstes und ein zweites von einer flexiblen Stoffhaut überzogenes, plattenartiges Strukturelement aufweist. Diese sind zum Auf- und Absetzen über einer Dachöffnung in Fahrzeugquerrichtung ausgelegt und in aufgesetztem Zustand frontseitig direkt an einem Windschutzscheibenrahmen und heckseitig an einem die Fahrzeugbreite überspannenden Bügel festgelegt. Die flächigen, plattenartigen Strukturelemente sind über Führungseinrichtungen miteinander verbunden und mittels dieser in Fahrzeugquerrichtung zueinander verschiebbar angeordnet.

Unabhängig von der Stärke der Wölbung dieser flächigen Strukturelemente können diese in Fahrzeugquerrichtung zu einem kompakten Paket zusammengesoben werden, entweder ineinander oder übereinander geschoben. Um die flächigen Strukturelemente ineinander zu verschieben, ist das erste Strukturelement mit wenigstens einer sich in Fahrzeugquerrichtung erstreckenden Aussparung ausgebildet, in die eine komplementär ausgeformte Rippe eines mit dem des ersten flächigen Strukturelements verbundenen zweiten Strukturelements einführbar ist. Die mit den flächigen Strukturelementen verbundene flexible Dachhaut ist im zusammengesobenen Zustand gefaltet.

Solch eine hier vorgestellte Ausgestaltung zeichnet sich nicht nur durch einen geringen Stauraumbedarf aus, sondern zusätzlich durch ein geringes Gewicht, da die kammartig ineinandergreifenden flächigen Strukturelemente ein deutlich geringeres Gewicht aufweisen als ähnlich starre Verdeckplatten. Eine übereinanderschiebbare Ausgestaltung der flächigen Strukturelemente besteht darin, die Führungseinrichtungen mit zwei Führungsschienen auszubilden, welche schlitzartig an dem ersten flächigen Strukturelement ausgebildet sind. Mittels Roll- oder Gleitelemente, die mit dem zweiten flächigen Strukturelement verbunden sind, werden die Führungsschienen des ersten flächigen Strukturelements durchgriffen. So sind die flächigen Strukturelemente schiebbar verbunden.

In Figur 6 ist ausschnittsweise ein Fahrzeug 1 abgebildet, welches als eine Dachöffnung 2 zwischen einem Windschutzscheibenrahmen 3 und einem als Überrollbügel dienenden heckseitigen und die Fahrgastzelle über die Fahrzeugbreite überspannenden Bügel 4 aufgebaut ist. Zur Abdeckung der Dachöffnung 2 ist jeweils ein zwischen dem Windschutzscheibenrahmen 3 und dem Überrollbügel 4 einbaubares Verdeck 5 vorgesehen, welches jeweils eine vormontierte Einheit aus einem ersten flächigen Strukturelement 6, einem damit verbundenen zweiten flächigen Strukturelement 7 und einer diese überspannenden flexiblen Dachhaut 8 darstellt.



Figur 6: Kammartig ineinandergreifende flächige Strukturelemente eines abnehmbaren Cabrioletverdecks (DE 103 24 920 B3).

Über Führungseinrichtungen 14 sind die flächigen Strukturelemente 6 und 7 miteinander verbunden und in Fahrzeugquerrichtung zueinander verschiebbar.

Gemäß Figur 6 sind an dem zweiten flächigen Strukturelement 7 drei Rippen 17 vorgesehen, welche wie ein Kamm in drei Aussparungen 16 des ersten flächigen Strukturelements 6 einführbar sind. Die mittlere Aussparung ist U-förmig und die zwei seitlichen Aussparungen jeweils L-förmig. Zur Anbindung an die Fahrzeugseitenelemente werden konstruktiv einfache Nase-Nut-Steckverbindungen verwendet.

Eine flexible Stoffhaut 8 ist im eingebauten Zustand an einem an den Fahrzeugseitenelementen grenzenden Randbereich des ersten und des zweiten flächigen Strukturelements 6 beziehungsweise 7 befestigt. Wird das Verdeck 5 in die in Pfeilrichtung 18 angedeutete Fahrzeugquerrichtung aufgedeckt, überdeckt die flexible Stoffhaut 8 die sich zwischen den Aussparungen 16 und Rippen 17 ergebenden Freiräume und wird dabei gespannt.

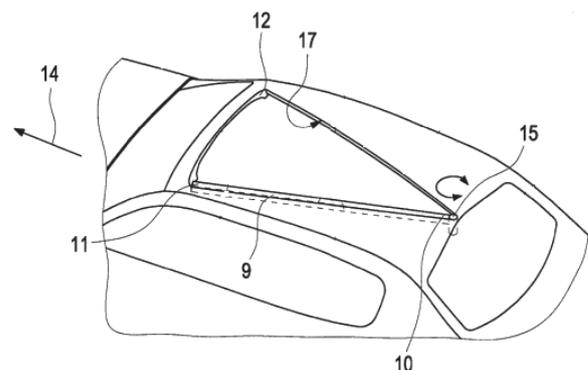
Die kammartige Ausführung der flächigen Strukturelemente 6 und 7 führt dazu, dass sie weit ineinandergreifend zusammengeschoben werden können, so dass sie ein kompaktes Paket bilden, welches im abgenommenen Zustand einen nur geringen Stauraum für seine Unterbringung beansprucht.

3.5 Bogenförmig verschwenkbares faltverdeck

Eine dem geläufigen Grundgedanken eines entlang der Fahrzeuglängsachse des Cabriolets von vorn nach hinten und umgekehrt öffnenden und schließenden Verdecks abweichende Kinematik zum Schwenken eines flexiblen faltverdecks liegt darin, das faltverdeck mit einem Längsträger auszustatten, der an einem Ende um eine Hochachse schwenkbar, während er am anderen Ende in einer Schiene in der Querrichtung des faltverdecks beziehungsweise der Fahrzeuglängsachse verschiebbar ist. Somit entsteht eine kinematische faltverdeckbewegung, ähnlich einem fächer, der es seitlich öffnet. Hierbei kann durch das seitliche bewegen des Längsträgers mit vergleichsweise wenig Stellweg ein großer teil des verdecks geöffnet werden. Dadurch sind weniger Bauteile erforderlich, um das faltverdeck bewegen und verstellen zu können.

Wie in Figur 7 dargestellt, ist das wesentliche Element die verschwenkbarkeit des Längsträgers 9, welcher an einem ersten Ende 10 in der Nähe der Heckscheibe in einem ersten schwenklager 15 um eine Hochachse bewegbar ist. Die weitere verschiebbarkeit des Längsträgers 9 in Querrichtung wird dadurch erreicht, dass er an einem zweiten Ende 11 in oder an einer ersten Schiene 12 verschiebbar angeordnet ist. Dabei ist das erste schwenklager 15 im Bereich der Längsmittelachse 14 der Verdecköffnung fest am Dachrahmen 17 angeordnet. Entsprechend wird auch die erste Schiene 12 gegenüber dem ersten schwenklager 15 am Dachrahmen 17 zur Frontscheibe angeordnet und erstreckt sich bezüglich des ersten schwenklagers 15 kreisbogenförmig, so dass die erste Schiene 12 in Fahrzeugquerrichtung orientiert ist. Diese Schiene 12 kann entweder geradlinig oder gekrümmt, insbesondere kreisbogenförmig ausgebildet sein.

Die hier vorgestellte Bauform zeigt eine besonders günstige Art der Herstellung eines faltverdecks, da nur sehr wenige bewegbare Teile erforderlich sind, was bei einem klassisch faltbaren Verdeck mit Gestänge nicht so wäre. Solch ein faltverdeck weist eine hohe Zuverlässigkeit auf.



Figur 7: Dreieckige Verdecköffnung mittels Längsträger seitlich aufdrehend (DE 10 2010 014 492 A1).

Auf diese Art können unterschiedliche faltverdeckgrößen ausgewählt werden. Während des Öffnungsvorgangs wird der stoffbezug seitlich gerafft beziehungsweise gefaltet. Zur Durchführung einer gezielten faltung können entsprechende spannbänder vorgesehen sein.

Denkbar ist, dass der Dachrahmen 17 ein Bestandteil des faltverdecks ist, so dass das faltverdeck mit dem Dachrahmen 17 am Fahrzeug flexibel montierbar ist. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass der Dachrahmen 17 im Fahrzeug selbst integriert ist, so dass das faltverdeck insgesamt in den fahrzeugseitigen Dachrahmen 17 selbst als ein integrales Bauteil eingebettet werden kann.

3.6 Teleskopartig verschwenkbares faltverdeck

Ein faltverdeck kann aus mehreren ineinander verschiebbaren verdeckelementen bestehen, um den fahrzeuginsassenraum freizugeben. Soll die dachform (dachlinie) eines cabriolets beibehalten werden, was eine sehr ästhetische anmutung des verdecks zur folge hat, ist eine mögliche lösung hierfür das teleskopartig ineinander ein- und ausfahren von verdeckelementen.

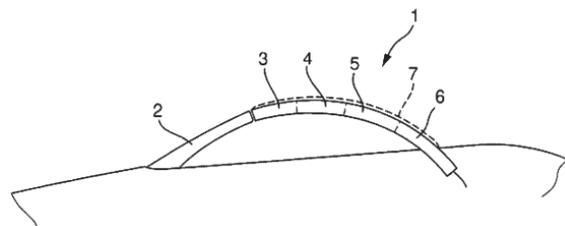
Neben der tatsache, dass eine geringere anzahl an gestellelementen eine kosten- und gewichtersparnis verursacht, ist ein weiterer vorteil der verhältnismäßig klein dimensionierte antrieb für die verdeckverstellung, da dieser nur translatorische und lineare verstellbewegungen anzutreiben hat. im gegensatz zu den ansonsten anzuwendenden rotatorischen und schwenkartigen bewegungen eines klassischen faltverdecks sind kleinere kräfte beziehungsweise momente aufzubringen.

Mindestens zwei dachelemente führen eine teilkreisförmige stellbewegung beim öffnen des verdecks aus. sie fahren teleskopartig ineinander ein beziehungsweise wieder heraus. es können auch mehr verdeckelemente (wie in figur 8 gezeigt), die im geschlossenen zustand das fahrzeugverdeck bilden, teleskopartig ineinander bewegt werden. schließlich können die verstellbaren verdeckelemente als ganzes paket in ein größeres, heckwärts angebrachtes aufnahmeteil eingefahren und verstaut werden.

Die bewegbaren verdeckelemente folgen der gebogenen verdecklinienform, die bevorzugt teilkreisförmig ist, und bewegen sich während der teleskopartigen

verschiebung entlang einer kreisbahn. grundsätzlich sind auch einfachere geradlinige ausführungen der verdeckelemente mit dann entsprechend geradlinigen und translatorischen verschiebewegungen beim ein- und ausfahren der teleskopartig aufgebauten verdeckelemente möglich. die verdeckelemente erstrecken sich in erster linie in fahrzeuglängsrichtung, wobei die konvexe außenseite der verdeckelemente nach oben beziehungsweise nach außen zeigt. ebenso wären verdeckelemente, die sich in fahrzeugquerrichtung erstrecken, denkbar.

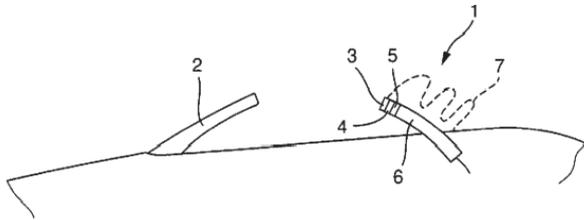
Der erforderliche antrieb für die verdeckelemente erfolgt über einen oder bei mehreren verdeckelementen über mehrere elektromotoren, die einzeln an jedem element angebracht sind.



Figur 8: Teilkreisförmig mit aneinander angeordneten Verdeckelementen eines Cabriolets (DE 10 2012 002 298 A1).

Figur 8 stellt ein verdeck 1 für ein cabriolet dar, das mehrere verdeckelemente 3 bis 6 umfasst, die jeweils nach oben gebogen geformt sind und sich bei geschlossenem verdeck in fahrzeuglängsrichtung erstrecken. drei verdeckelemente 3 bis 5 sind teleskopartig verstellbar, wobei das im heckbereich liegende verdeckelement 6 fest an der fahrzeugkarosserie angebunden ist. ist das verdeck geöffnet (wie in figur 9), sind die dachteile 3 bis 5 teleskopartig nach hinten ineinander verschoben und in dem karosseriefesten verdeckelement 6 aufgenommen. die verdeckelemente weisen von hinten nach vorne eine immer kleiner werdende querschnittsfläche auf, so dass das hintere an der karosserie fest angebrachte dachteil 6 die größte querschnittsfläche und das in geschlossener verdeckposition vorne liegende dachteil 3 die kleinste querschnittsfläche aufweist. neben einer verdeckausführung mit festen verdeckelementen kann auch ein bezugsstoff 7 die verdeckelemente überziehen und darauf aufliegen. solch ein verdeckbezugstoff

7 ist in diesem Fall im Bereich der Vorderkante des vorderen Verdeckelements 3 befestigt und wird beim Zurückbewegen der Verdeckelemente 3 bis 5 in Falten geschlagen.



Figur 9: Teleskopartig ineinander verfahrbare Verdeckelemente eines Cabriolets (DE 10 2012 002 298 A1).

In jedem der Verdeckelemente 3 bis 5 ist jeweils ein Elektromotor integriert, der das betreffende bewegbare Verdeckelement gegenüber dem unmittelbar benachbarten Verdeckelement elektrisch bewegt. So werden die jeweils benachbarten Verdeckelemente in das direkt dahinter liegende Verdeckelement hineinbeziehungsweise aus diesem herausgefahren.

4 Fazit und Ausblick

Die hier vorgestellten Verdecksysteme zeigen nur eine kleine Bandbreite von speziellen Lösungen, die individuell besondere Vorteile bieten. Trotz sehr fortschrittlicher Ideen werden viele dieser Lösungen nicht in Serie umgesetzt und verharren im Studien- oder Prototypenstatus. Trotzdem können einzelne Teilbereiche oder Grundideen in künftigen Serienlösungen Verwendung finden und umgesetzt werden.

Doch der Trend bei Cabriolets geht weiter in Richtung größer, offener und multifunktionaler. Offenes Fahren soll verbunden werden mit dem Ganzjahres-Komfort eines Coupés. Hier entsteht ein Potenzial für die Entwicklung neuer, multifunktionaler Verdeckkonzepte [4].

Ein ganz wichtiger Aspekt in der heutigen Entwicklung von Cabriolets ist der Leichtbau, der für jedes Autoteil bedeutend ist. Das faltverdeck ist ein besonders großes Fahrzeugteil mit einem gehörigen Anteil am Gewicht des Gesamtfahrzeugs. Im Rahmen der erhöhten Anforderungen an die Crashesicherheit inklusive

Insassensicherheit ist aus einer herkömmlichen Fahrzeugkarosserie gar nicht mehr so viel Gewicht herauszuholen. Auch angedachte bionische Ansätze sind im Automobilbau nicht leicht umzusetzen, da die Natur – und hier die besondere Fachrichtung Bionik – mit ganz unterschiedlichen Ausfallwahrscheinlichkeiten arbeitet. So ist ein Prozent Ausfall in der Natur beispielsweise ganz normal, da das Überleben der Gruppe über dem des Individuums steht. Im Automobilbau ist der Ansatz dagegen anders, da kommt es auf jede einzelne Person an. So werden verschiedene Fahrzeugteile unterschiedlich behandelt. Während an der Karosserie beispielsweise gewichtsoptimal entwickelt wird, wird an anderen Stellen – wie bei Schraubenverbindungen oder Karosserie- und Rahmenträgern – höherdimensioniert oder sogar überdimensioniert, um auch bei Überlasten oder „Missbrauchsfällen“ und bei einer eher unausgeglichene, das heißt „harten“ Gebrauchsweise des Fahrzeugs die Sicherheit nicht zu gefährden. So müssen die Komponenten im Automobilbau dauerhaft, hoch belastbar und möglichst inspektionsfrei sein, um beispielsweise eine harte Bordsteinüberquerung, tiefe Schlaglöcher bei hoher Geschwindigkeit oder das Sitzen auf der Motorhaube ohne Dellen zu überstehen. Bei diesem Konzeptansatz müssen andere Fahrzeugteile wie das faltverdeck für ein Cabriolet im Konzept besonders gewichtssparend, aber auch sicher ausgelegt werden [5]. Da könnten auch außergewöhnliche Ansätze, wie sie im Kapitel 3 vorgestellt wurden, ihren Weg in die Serienfertigung finden.

Aktuelle Trends gehen zum eigenständigen und individuellen Fahrzeugcharakter, um die wesentlichen Unterschiede in den Vordergrund zu stellen. Gleichwohl steigt durch die Individualisierung der Kostenfaktor an. Die Kundenkreise sind aber noch bereit, dafür Aufpreise zu zahlen [6].

Hinzu kommt, dass, je mehr Optionen für unterschiedliche Fahrzeugverdecke vorrätig gehalten werden müssen, die Produktions- und die Lagerhaltungskosten beachtlich steigen. Der Kunde kann dann aber aus einem großen Angebot unterschiedlicher Designs auswählen. Um der Kostenexplosion entgegenzuwirken, müssten möglichst alle Teile vom Fahrzeughersteller selbst produziert werden, was durch bestehende und

im Zulauf befindliche Herstellungsverfahren unterstützt werden muss. So können Teile erst im Laufe der Produktion angepasst, zusammengestellt und auch eingefärbt werden. Da das faltverdeck relativ groß ist, ist es neben der Wagenfarbe der sichtbarste Nachweis für Individualisierung am Fahrzeug selbst. Da so der optische Eindruck eines Fahrzeugs nachhaltig beeinflusst werden kann, käme dies zusätzlich dem Individualisierungsanspruch des Kunden entgegen [6].

Entwicklungen, insbesondere bei Verdecken mit sehr unterschiedlichen Klappabläufen, bringen spezielle fahrzeugspezifische Lösungen für optimierte Gestänge-Mechaniken, elektrohydraulische Antriebe und intelligente Steuerungselektroniken mit sich. Durch neue Ablagekonzepte für faltverdecke – insbesondere Hartschalenverdecke – könnten die bis heute in Kauf genommenen Problempunkte wie geringes verbleibendes Kofferraumvolumen, ungünstige Schulterhöhe bei Heckantrieb und eingeschränkte Schulterfreiheit der Fondpassagiere oder massive C-Säulen-Ausführungen gelöst werden. Künftige Optimierungen im Verdeckbereich zur Reduzierung des Platzbedarfs könnten nicht nur an den Geometrien der Verdeckbauteile und Gestänge selbst stattfinden, sondern durch verstärkten Einsatz von Materialien wie Aluminium, Magnesium oder Carbon, um Gewicht zu sparen [4]. Demzufolge wird künftig eine Kombination aus Individualisierung und sportlichen Qualitäten neben einer Art wachsender sorglosen Alltagstauglichkeit eines Cabriolets im Vordergrund stehen.

Nicht-Patentliteratur

- [1] Cabrios: Das sind die neuen Modelle für 2018
URL: https://www.t-online.de/auto/neuvorstellungen/id_83261984/cabrios-das-sind-die-neuen-modelle-fuer-2018.html [recherchiert am 08.07.2019]
- [2] Cabrio, Roadster, Shooting Brake – die verschiedenen Karosseriebauformen
URL: <https://www.topersatzteile.de/blog/cabrio-roadster-shootingbrake-karosseriebauformen/> [recherchiert am 26.06.2019]
- [3] Gefaltet, gebügelt oder geschichtet
URL: <https://www.nzz.ch/mobilitaet/automobil/cabriolet-gefaltet-gebuegelt-oder-geschichtet-ld.15106> [recherchiert am 26.06.2019]
- [4] Innovative Dachkonzepte für neue Crossover-Cabrio-Generationen
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03223487> [recherchiert am 30.07.2019]
- [5] Wellnitz, Jörg: „Denken Sie an den Golf, nicht an den Ferrari“
URL: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/joerg-wellnitz-denken-sie-an-den-golf-nicht-an-den-ferrari-a-807225/?cmp=nl-422&uuid=7B36D50C-EE79-98B9-B193BA4C9178EC0C> [recherchiert am 24.07.2019]
- [6] Zukunft Personalisierung: Individualität contra Fahrzeugbau?
URL: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/zukunft-personalisierung-individualitaet-contra-fahrzeugbau-a-852276/?cmp=nl-99&uuid=7B36D50C-EE79-98B9-B193BA4C9178EC0C> [recherchiert am 30.07.2019]

Siliziumcarbidwafer

Dr. Gesche Nahrwold, Patentabteilung 1.33

Wafer aus Siliziumcarbid werden benötigt, um Halbleiterbauelemente mit besonderen Anforderungen herzustellen. Zwar sind sie dabei nicht mehr als ein per se halbleitendes Ausgangsmaterial, aber die Herstellung dessen birgt im Gegensatz zu weiter verbreiteten Materialien wie beispielsweise herkömmliches Silizium einige besondere Schwierigkeiten. Erst in jüngerer Vergangenheit wird der Bedarf hierfür dennoch groß genug, um verstärkt Verbesserungen in der Siliziumcarbidwaferherstellung voranzutreiben – der vorliegende Artikel soll einen Überblick über aktuelle Erfindungen auf dem Gebiet bieten.

1 Einleitung

Die Fertigungsprozesse für Halbleiterbauelemente („Chips“) verwenden als Ausgangsmaterial in aller Regel sogenannte Wafer, dünne Scheiben aus halbleitendem Material. Auf diesen Wafern werden in vielen einzelnen Prozessschritten, bestehend aus gezieltem Einbringen von Fremdstoffen (sogenanntes „Dotieren“), durch Aufbringen dünner leitender und isolierender Schichten sowie gezieltem Ätzen dieser Schichten unter Verwendung von Masken eine Vielzahl meist identischer Bauelemente hergestellt. Diese Herstellungsprozesse sind seit jeher großen Änderungen unterworfen: Die einzelnen aus den fertigen Wafern herausgetrennten Bauelemente werden im Laufe der Jahre immer kleiner, aber auch komplexer, so dass die kleinsten Strukturen immer feiner definiert werden müssen. Dies erfordert hohe Präzision in den einzelnen Prozessschritten, weshalb viele davon unter erheblichem Aufwand – zum Beispiel unter Vakuum, in Reinräumen, unter sehr bestimmten Licht- und Temperaturverhältnissen – stattfinden. Um diesen Aufwand in einem ökonomisch sinnvollen Rahmen zu halten, werden mit den Jahren die Wafer immer größer, so dass in einem Schritt eine größere Anzahl an Halbleiterbauelementen gefertigt werden kann.

Silizium ist das wohl am weitesten verbreitete Ausgangsmaterial für die hierbei verwendeten Wafer. Die Bandlücke von Silizium als intrinsischem Halbleiter, also die Energielücke zwischen dem Valenz- und dem

Leitungsband im Energieschema der Elektronen, ist eine Materialkonstante. Sie kann jedoch durch Dotierstoffe effektiv variiert und so an die Anforderungen der jeweiligen herzustellenden Bauelemente angepasst werden. Dies stößt für bestimmte Bauelemente, insbesondere solche, die eine besonders große Bandlücke erfordern wie beispielsweise Leistungshalbleiteranwendungen oder auch bestimmte Laser, jedoch an natürliche Grenzen, sodass andere Materialien in den Fokus rücken. Eine besonders große Bandlücke weist Diamant auf, aber auch Galliumnitrid und Siliziumcarbid sind vielversprechende Optionen mit verhältnismäßig großen Bandlücken.

Siliziumcarbid steht bereits seit einigen Jahrzehnten im Fokus vielversprechender Forschungsarbeiten, findet aber erst in den letzten Jahren schleichend Einzug in kommerziell erwerbbaare Bauelemente; ein Grund hierfür ist sicherlich der im Vergleich zu Silizium extrem hohe Preis eines Siliziumcarbidwafers.

2 Ausgangsmaterial für Wafer

Um Siliziumwafer herzustellen, werden in der Regel zuerst sogenannte Ingots (oder auch „Boules“), massive Zylinder, langsam aus der Schmelze gezogen und kontrolliert abgekühlt, so dass das Silizium möglichst einkristallin und frei von Verunreinigungen vorliegt. Von diesen Ingots werden dann die einzelnen Wafer scheibenweise, meist durch Sägen, abgetrennt. Das

3 Abtrennen von Wafern

Nach der Herstellung der Ingots können hiervon einzelne Wafer abgeschnitten werden. Auch dieses Vorgehen ist bei Siliziumcarbid-Ingots aufgrund der großen Härte des Materials jedoch ungleich komplizierter als in der herkömmlichen Siliziumwaferherstellung, wobei ironischerweise häufig Siliziumcarbid als Schleifmittel in Drahtsägeverfahren Verwendung findet – beim Sägen von Siliziumcarbid kommt hierfür nur Diamant in Frage.

Ein Verfahren zum Abtrennen einer Festkörperschicht, beispielsweise einem Wafer von einem Festkörper, der als Ingot ausgebildet sein kann, ist aus der Veröffentlichung DE 10 2016 014 821 A1 der Firma Siltecta GmbH aus Dresden, die zwischenzeitlich von Infineon aufgekauft wurde [Inf18b], bekannt. Um die hohen Materialverluste herkömmlicher Drahtsägeprozesse zu vermeiden, werden hier in einen Siliziumcarbid-Ingotschnittebenen definiert. In diesen Schnittebenen werden mittels gepulstem Laser Mikrorisse im Material erzeugt, entlang denen das Siliziumcarbid gezielt geschwächt wird und sich unter nachfolgender mechanischer Belastung ganz ablöst. Die mechanische Belastung kann beispielsweise durch eine aufgebraute Schicht aus Polymermaterial erzeugt werden, die über einen Wechsel des Aggregatzustandes, den Glasübergang, abgekühlt wird und dadurch Spannungen im Kristall auslöst, der folglich an seiner schwächsten Stelle nachgibt.

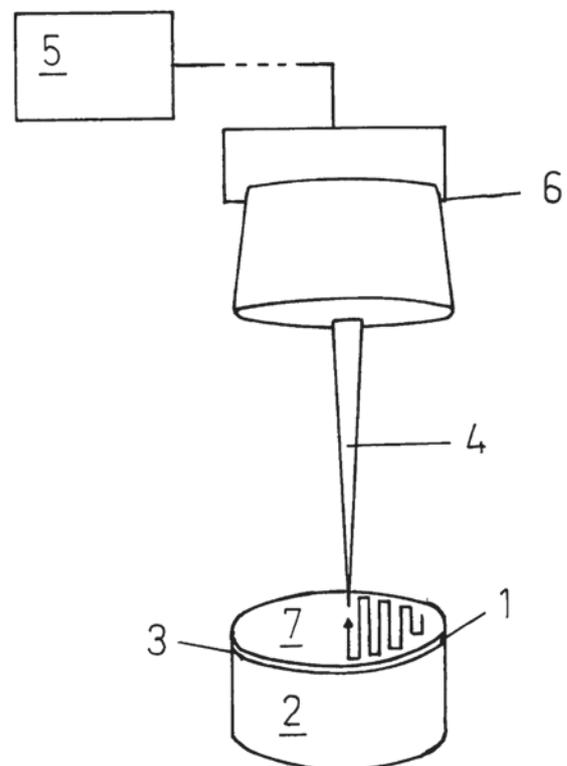
Das Verfahren kann auch verwendet werden, um einfache Wafer ressourcenschonend zu dünnen und infolgedessen mehrfach zu verwenden, da das Bauteil oft eine viel geringere Dicke aufweist als der Wafer während der Bauteilprozessierung benötigt.

Auch die Patentanmeldung DE 10 2017 009 136 A1 der Hochschule Mittweida beschreibt ein solches Verfahren.

Die Patentanmeldung DE 10 2016 003 556 A1, ebenfalls von Siltecta, beschreibt ein erweitertes Verfahren zum Erstellen einer solchen laserdefinierten Abtrennebene.

Diese Abtrennebene liest in einem ersten Schritt die lokale Variationen des abzutrennenden Siliziumcarbids aus (beispielsweise durch Inhomogenitäten in der während des Ingotwachstums eingebrachten Dotierung) und berücksichtigt diese anschließend bei der Wahl des Fokuspunktes der Laserbeaufschlagung. Hierdurch kann die Kontrolle über die Rissausbreitung entlang der Schnittebene erhöht werden.

Die Patentanmeldung DE 10 2018 202 042 A1 der Firma DISCO Corporation behandelt ähnlich hergestellte Abtrennebenen für Wafer vom Ingot oder auch Bauteile von einem Wafer, wobei das Abtrennen durch eine Beaufschlagung des Ingots mit Ultraschall nahe der Eigenfrequenz des Siliziumcarbids zum Trennen entlang der so geschaffenen Ebenen erfolgt. Hierfür wird der Ingot mit der durch Laser zuvor definierten Trennschicht nach unten in ein Flüssigkeitsbad getaucht und durch einen Ultraschallschwinger zum Schwingen angeregt. Die Frequenz des Ultraschallschwingers wird dabei von tiefen Frequenzen kommend graduell erhöht, bis sich bei Frequenzen von etwa 0,8 Mal der Eigenfrequenz des Ingots der Wafer an der



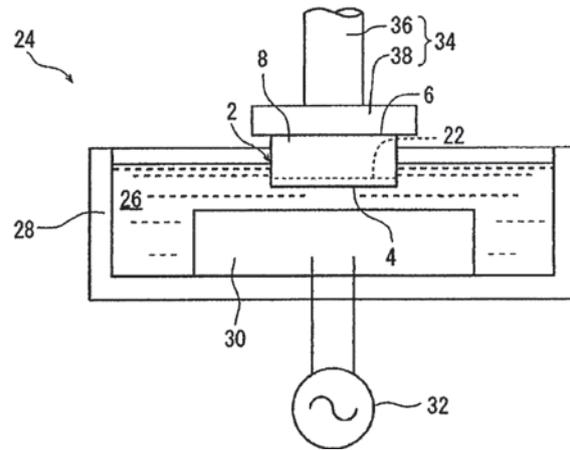
Figur 2: Einrichtung zum Trennen und Ablösen von Wafern 1 von einem Ingot 2 mit einem Laser 5 und einer Scaneinrichtung 6 (aus DE 10 2017 009 136 A1)

geschwächten Trennebene abzutrennen beginnt. Die Erfinder haben in Experimenten herausgefunden, dass bei Eigenfrequenzen eines Siliziumcarbidingots von 25 Kilohertz (kHz) die optimalen Bedingungen in einem Wasserbad bei Temperaturen von 0°C bis 25°C liegen und die Zeit bis zur vollständigen Abtrennung eines Wafers bei gleichbleibender Leistung nahe der Eigenfrequenz des Ingots am geringsten ist. Diese Zeit sinkt zudem mit steigender Leistung der Ultraschallwelle.

Wie in der später noch eingehender beschriebenen Veröffentlichung DE 10 2017 127 169 A1 von Infineon können Abtrennebenen auch durch Implantation von Atomen oder Ionen realisiert werden.

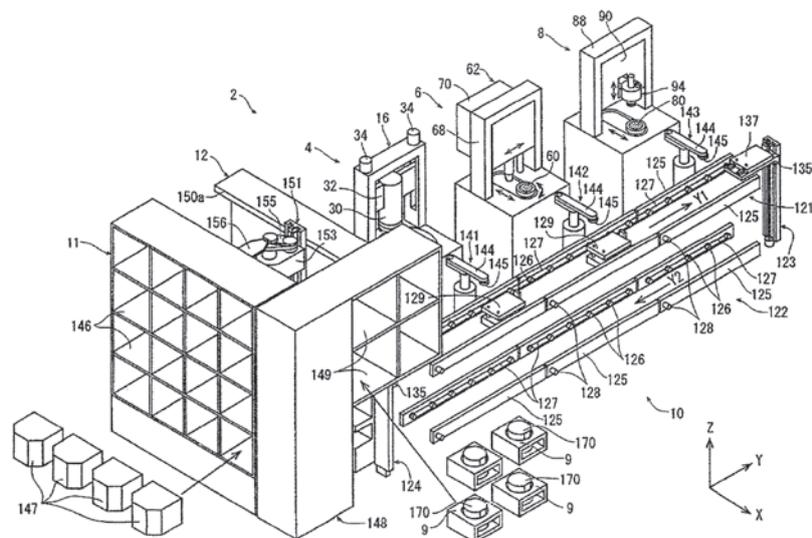
Mit der Industrialisierung der Siliziumcarbidwaferherstellung befasst sich die Offenlegungsschrift DE 10 2018 221 394 A1 der Firma DISCO Corporation: Beschrieben wird hier eine Waferherstellungsvorrichtung, in der Siliziumcarbidingots geschliffen und planarisert, mit Lasern zur oben beschriebenen Schnittebenendefinition behandelt werden können sowie speziellen Halte- und Abziehvorrichtungen, die dafür sorgen sollen, dass sowohl die empfindlichen Ingots als auch die abgezogenen Wafer während des Trennprozesses keinen Schaden nehmen. Wie in Figur 4 gezeigt, ist vorgesehen, all diese Vorrichtungen in einer Anlage zu vereinen, die so automatisiert und im großen Stil Siliziumcarbidwafer für nachfolgende Produktionsprozesse bereitstellen soll.

Aus Qualitätssicherungsgründen können einzelne Wafer zur gezielten Rückverfolgbarkeit mit Markierungen versehen werden. Diese beinhalten dann beispielsweise die Information, von welchem Impfkristall sie „abstammen“ und können zum Beispiel in das Material eingelasert werden.



Figur 3: Trennvorrichtung 24 mit Siliziumcarbidingot 2, Trennschicht 22 in einem Flüssigkeitsbad 28 und Flüssigkeit 26, das durch den Ultraschallschwinger 30 zu Schwingungen angeregt wird, um einen Wafer entlang der Trennschicht abzulösen (aus DE 10 2018 202 042 A1).

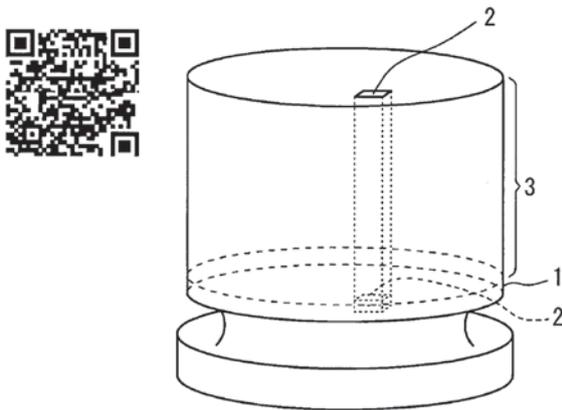
Die Veröffentlichung DE 11 2013 004 844 T5 der japanischen Firma DENSO Corporation beschreibt eine noch weitergehende Rückverfolgungsmethode der von ihr vertriebenen Wafer, die gleichzeitig als Diebstahlsicherung der wertvollen Impfkristalle dienen kann: Die gewünschten Markierungen werden dort, beispielsweise in Form einer Vertiefung auf der Oberfläche des Wafers durch Laserbearbeitung, Diamantschneiden oder Trockenätzen, sowie durch absichtlich Ionenimplantation hergestellte Kristalldefekte, ausgebildet.



Figur 4: Siliziumcarbid-Waferherstellungsvorrichtung 2 mit einer Ingotschleifeinheit 4, einer Laseraufbringeinheit 6, einer Waferabzieheinheit 8 und einer Förderbandeinheit 10, um fertige Wafer in ein Kassettenlager 11 zu transportieren (aus DE 10 2018 221 394 A1).

Die Markierung in Form eines auslesbaren QR-Codes, der Informationen zur eindeutigen Identifizierung des Impfkristalls beinhaltet, setzt sich dann während des Wachstums des Ingots in Form von Mikroröhren, Schraubenversetzungen oder Stapeldefekten fort. Jeder Wafer der später von diesem Ingot geschnitten wird, trägt so die gleiche Markierung und kann folglich eindeutig seinem Mutterimpfkristall zugeordnet werden.

Um einerseits den Großteil der Fläche der so gezogenen Wafer unbeeinträchtigt durch die Markierung zu lassen, kann diese beispielsweise am Rand des Impfkristalls eingebracht werden. Es ist ebenfalls möglich, viele verschiedene solcher Stellen über die gesamte Waferfläche zu verteilen und damit zu verhindern, dass im Falle eines Diebstahls der markierte Bereich einfach verworfen werden kann. Dies erscheint besonders für Impfkristalle der höchsten Qualität angebracht.



Figur 5: Siliziumcarbid-Impfkristall 1 mit Markierung (beispielsweise QR-Code, wie links gezeigt), der sich beim Wachstum eines Siliziumcarbid-Einkristallingots 3 fortsetzt (aus DE 11 2013 004 844 T5).

4 Materialeinsparung

Wie bereits zuvor angedeutet, werden Siliziumcarbidwafer aufgrund ihres relativ hohen Preises häufig auch mehrfach verwendet. Diese Möglichkeit ergibt sich daraus, dass fertige Bauteile oft deutlich dünner sind als die Waferrohlinge. Diese benötigen unabhängig vom Ausgangsmaterial aus Prozessführungs- und Stabilitätsgründen eine gewisse Dicke, werden aber bei preisgünstigen Materialien wie Silizium normalerweise nach Fertigstellung der Bauteile auf die benötigte Dicke

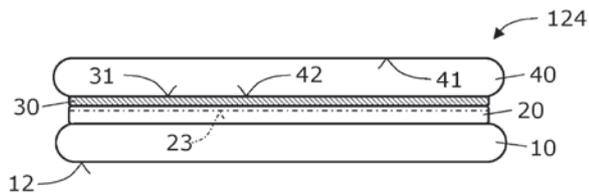
heruntergeschliffen oder -geätzt, so dass das überschüssige Material nutzlos und während des Dünnens entsorgt wird. Durch den bereits erläuterten Aufwand der Siliziumcarbidwaferherstellung ist dieses Verfahren nicht wirtschaftlich, daher werden unterschiedliche Ansätze verfolgt, um Kosten einzusparen.

Die meisten der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Verfahren eignen sich nicht nur, um Wafer von einem Ingot abzutrennen, sondern auch um fertige Wafer beispielsweise nach der Prozessierung zu halbieren. Die verbleibende Hälfte durchläuft erneut die Prozesskette, so dass die Bauteile pro Wafer verdoppelt werden können [Inf18a].

Oft sind die qualitativen Anforderungen an Siliziumcarbid als Ausgangsmaterial für Halbleiterbauelemente sehr hoch und die gleichzeitig benötigte Dicke der Schichten so gering, dass es sich stattdessen lohnen kann, verhältnismäßig günstige Polysubstrate (also Wafer aus nicht monokristallinem Siliziumcarbid) zu verwenden und darauf Schichten aus Siliziumcarbid mit geringen Defektdichten epitaktisch aufzuwachsen. Dies wird beispielsweise in der Offenlegungsschrift DE 10 2017 127 169 A1 von Infineon beschrieben, hier mit der Intention aus Materialermüdungsgründen resultierenden, also erst im Betrieb des Bauteils entstehenden, Stapelfehlern entgegenzuwirken.

Hierzu wird ein monokristallines Siliziumcarbid-Donorsubstrat mit einer relativ geringen Defektdichte (bezogen auf Basalebeneversetzungen) als Ausgangsmaterial verwendet und eine hochqualitative epitaktische Siliziumcarbidschicht mit den optimalen Parametern aufgewachsen. Diese aufgewachsene Schicht kann noch weniger Defekte enthalten als das Donorsubstrat. Nun wird über eine dünne Graphenschicht als Bondschnittstelle ein Siliziumcarbidwafer geringerer Qualität, der preisgünstig sein kann, als Akzeptorwafer an diese hochqualitative Schicht angebondet. Anschließend kann der entstandene Waferversbund so gespalten werden (beispielsweise mit einem der oben beschriebenen Verfahren zum Abtrennen von Wafern), dass der Akzeptorwafer und die hochqualitative Schicht in einem Verbund übrig bleiben. Das ursprüngliche Donorsubstrat wird hierbei also wieder

von der hochqualitativen Schicht getrennt und kann erneut verwendet werden. Der Akzeptorwafer wird so zu einem Wafer, der einen Herstellungsprozess für Bauteile in der hochqualitativen Schicht unterstützen kann, ohne dass ein Großteil des Materials die hohen Qualitätsanforderungen aufweisen muss.



Figur 6: Waferverbund 124, bestehend aus Siliziumcarbid-Donorsubstrat 10, mit epitaktischer monokristalliner Siliziumcarbidsschicht 20 und optionaler Graphenverbindungs-schicht 30, das durch beispielsweise Implantation zur Ausbildung einer Trennebene 23 behandelt wird, um nur einen Teil der Siliziumcarbidsschicht 20 auf den Siliziumcarbid-Akzeptorwafer 40 zu übertragen (aus DE 10 2017 127 169 A1).

Die Veröffentlichung DE 10 2015 218 218 A1 der Firma Sumco Corporation beschreibt ebenfalls ein aus zwei qualitativ unterschiedlichen Siliziumcarbidsschichten gebondetes Siliziumcarbidsubstrat.

Ein ähnliches Verfahren zur definierten Qualitätskontrolle einer verhältnismäßig dünnen (0,1 µm Dicke), ebenfalls epitaktisch gewachsenen Siliziumcarbidsschicht auf einem 300 µm bis 600 µm dicken Einkristallsubstrat beschreibt die deutsche Veröffentlichung DE 11 2016 004 163 T5 der internationalen Patentanmeldung der japanischen Firma Sumitomo Electric Industries. Das Hauptaugenmerk des hier beschriebenen Verfahrens liegt auf einer möglichst gleichmäßigen Dotierung bei geringer Dichte ungewollter Verunreinigungen durch Fremdstoffe über die gesamte Waferfläche. Auf ein Abspalten der so gewonnenen besonders gleichförmigen Schicht wird hier, wenngleich eine Kombination beider Verfahren denkbar ist, verzichtet und das so gewonnene Einkristallsubstrat mitsamt der aufgewachsenen Schicht wird zur weiteren Prozessierung verwendet.

5 Ausblick

Auch im Zuge der Verbesserungen in der Waferherstellung strömt ganz aktuell eine Vielzahl an neuen Bauteilen, hauptsächlich Leistungshalbleiterbauelemente also solche, die mit hohen Strömen und Spannungen betrieben werden, auf Siliziumcarbidbasis auf den Markt [Li18], der hauptsächlich aus Gründen der Energieeinsparung und Miniaturisierung danach verlangt. Dies wiederum kreiert weitere, neue Anforderungen an die Waferhersteller: Die Firma Cree beispielsweise, vertraglicher Lieferant für Siliziumcarbidwafer von Infineon [Inf18b], verkündete am 7. Mai 2019, bis zu eine Milliarde US-Dollar in die Ausweitung ihrer Siliziumcarbidwaferproduktion investieren zu wollen. Dabei handele es sich um das größte Investment der Firmengeschichte und man wolle damit zukünftig in der Lage sein, die Produktionskapazitäten für Siliziumcarbidwafer zu verdreifachen [Cre19].

Nicht-Patentliteratur

- [Cre19] <https://www.cree.com/news-events/news/article/cree-to-invest-1-billion-to-expand-silicon-carbide-capacity> (abgerufen am 28.08.2019)
- [Inf18a] <https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2018/INFXX201811-016.html> (abgerufen am 02.09.2019)
- [Inf18b] <https://www.infineon.com/cms/de/about-infineon/press/press-releases/2018/INFXX201802-035.html> (abgerufen am 29.08.2019)
- [Li18] Z. Li, „Ein Plädoyer für den Einsatz von SiC-Devices“, In: ELEKTRONIKPRAXIS Leistungselektronik und Stromversorgung, Seite 54–56, März 2018 <https://files.vogel.de/vogelonline/vogelonline/issues/ep/2018/602.pdf> (abgerufen am 04.09.2019)
- [Mad04] Roland Madar: „Silicon carbide in contention“, in: Nature volume 430, pages 974–975 (2004).

40 Jahre VCSEL – Grundlagen, Technologien und aktuelle Anwendungen

Dr. Markus Ortsiefer, Patentabteilung 1.33

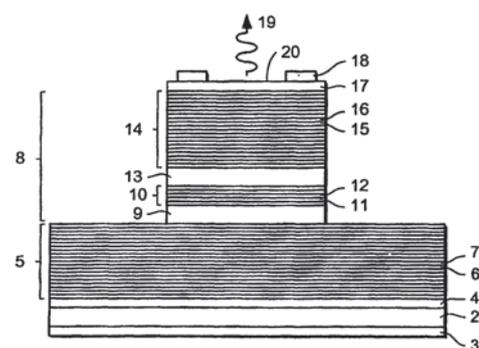
1 Einleitung

Im Jahr 2019 kann im Rahmen eines 40-jährigen Jubiläums auf ein Ereignis zurückgeblickt werden, welches den Startschuss für eines der heute wichtigsten optoelektronischen Halbleiterbauelemente definieren sollte [1]: Ein senkrecht zur Waferenebene abstrahlender Diodenlaser mit Vertikalresonator wurde erstmalig im Jahr 1979 von Prof. Kenichi Iga am Tokyo Institute of Technology präsentiert [2]. Obwohl dieser erste Prototyp nur zaghafte Lebenszeichen im gepulsten Betrieb bei Temperaturen von flüssigem Stickstoff zeigte, führte dieses neuartige Konzept angesichts der zu erwartenden Vorteile in der Folgezeit zu signifikanten Forschungsaktivitäten im industriellen und akademischen Umfeld. 10 Jahre später, im Jahre 1989, konnte der erste Oberflächenemitter oder VCSEL (englisch: *vertical-cavity surface-emitting laser*) bei Raumtemperatur im Dauerstrichbetrieb und bei extrem niedrigen Schwellströmen von lediglich 1 Milliampere (mA) demonstriert werden [3]. Damit hatte dieses neuartige Konzept seine Leistungsfähigkeit bewiesen und den endgültigen Durchbruch erzielt.

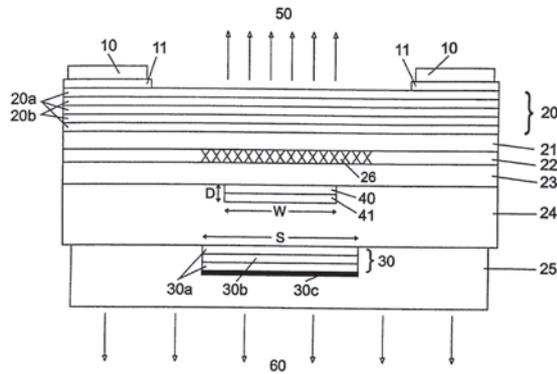
In den letzten 20 Jahren hat die Entwicklung von VCSEL große Fortschritte verzeichnet; die damit verbundenen Anwendungsfelder haben eine enorme technische und kommerzielle Bedeutung erlangt. Dies zeigt nicht zuletzt die Tatsache, dass VCSEL aktuell mit jährlichen Produktionszahlen im dreistelligen Millionenbereich die nach Stückzahlen größte Gruppe unter sämtlichen Lasertypen bilden. Während die bisherige Entwicklung größtenteils von Anwendungen im Bereich optischer Datenübertragung sowie Sensorik bestimmt war, kommen mit Applikationen wie 3D-Bildaufnahme in Smartphones stetig neue Einsatzmöglichkeiten hinzu, die für die Zukunft weiterhin ein rasantes Wachstum erwarten lassen.

2 Grundlagen

Das Akronym „VCSEL“ bildet die Abkürzung für „Vertical Cavity Surface Emitting Laser“, das heißt für einen oberflächenemittierenden Laser mit Vertikalresonator. Bei einem VCSEL wird der Laserresonator durch zwei hochreflektierende Spiegel parallel zur Waferenebene gebildet, zwischen denen eine aktive Zone eingebettet ist. Hierdurch ergibt sich eine Oberflächenemission der in der aktiven Zone erzeugten Laserstrahlung. Wie bei Lasern üblich, muss auch bei einem VCSEL zur Erreichung der Lasertätigkeit mindestens so viel optische Lichtleistung während des Durchgangs durch die aktive Zone gewonnen werden, so dass die bei einem vollständigen Umlauf der Lichtwelle im Resonator aufgrund von Reflexion an den Spiegeln sowie aufgrund interner Absorption vorhandenen Verluste kompensiert werden. Da bei VCSEL diese Gewinnlänge jedoch sehr kurz ist, müssen die verwendeten Spiegel sehr hohe Reflektivitäten aufweisen, typischerweise mehr als 99%. Dies ist nur mit Bragg-Spiegeln möglich, einer Vielfach-Schichtstruktur aus alternierend angeordneten Materialien mit unterschiedlichem Brechungsindex und definierter Schichtdicke, bei der sich die Reflexionen an den einzelnen Grenzflächen jeweils konstruktiv überlagern und so zu der benötigten hohen Gesamtreflektivität führen.



Figur 1: Querschnitt eines VCSELs (aus DE 602 14 536 T2)

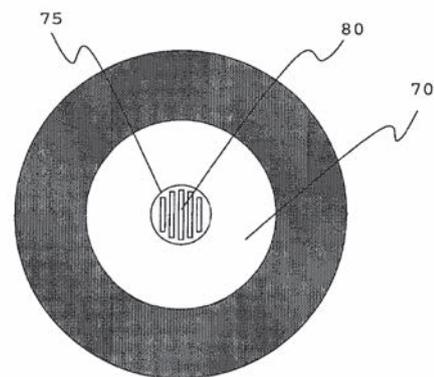


Figur 3: Querschnitt eines InP-basierten VCSEL mit vergrabener Tunnelkontakt (aus DE 101 07 349 A1)

Der InP-basierte BTJ-VCSEL verwendet einen vergrabenen Tunnelkontakt zur lateralen Strom- und Wellenführung, zu dessen Herstellung zwei Epitaxieschritte nötig sind. Durch die Substitution der p-seitigen hochohmigen Stromzuführungsschichten durch niedrigohmige n-dotierte Schichten aufgrund der Ladungsträgerkonversion im Tunnelkontakt können sehr niedrige Serienwiderstände erzielt werden. Die interne Erwärmung kann folglich drastisch reduziert werden. In Verbindung mit einem kurzperiodigen dielektrischen Spiegel sowie hochwärmeleitfähiger Stromzuführungsschichten aus InP wird ferner ein niedriger thermischer Widerstand ermöglicht.

Aufgrund der kurzen Resonatorlänge in Verbindung mit einer in aktiven Halbleiterschichten begrenzten, spektralen Gewinnkurve sind VCSEL grundsätzlich longitudinal, das heißt in Richtung des Resonators, monomodig. Ein Emissionsspektrum mit mehreren Wellenlängen ist jedoch möglich aufgrund des Auftretens mehrerer transversaler Moden sowie konkurrierender Polarisationsmoden. Viele Anwendungen wie optische Datenkommunikation mit Einmoden-Glasfasern oder optische Gassensorik benötigen allerdings eine stabile Einmodencharakteristik des optischen Sendelements. Der Sprung zwischen zwei Polarisationsmoden eines VCSEL kann beispielsweise begleitet sein von einer Veränderung der Emissionswellenlänge, welche zum Beispiel größer ist als die spektrale Breite der Absorptionslinie eines Gases. In der optischen Sensorik wäre dadurch der benötigte Überlapp zwischen der Absorptionslinie und der Laseremission nicht mehr gegeben. Zur Unterdrückung höherer transver-

saler Moden wird in Abhängigkeit der Wellenlänge und der Wellenleitereigenschaften ein hinreichend kleiner Aperturdurchmesser verwendet. Eine größere Herausforderung für monomodige VCSEL-Emission stellt in der Regel die Sicherstellung einer stabilen Polarisationsmode dar. Obwohl orthogonale Polarisationsmoden in einer symmetrischen Wellenleiterstruktur identische Wellenlängen erwarten lassen, zeigt die Praxis, dass durch minimale, unvermeidbare Abweichungen in der VCSEL-Struktur Polarisationsmoden mit unterschiedlicher Wellenlänge konkurrieren. Eines der meist verwendeten Konzepte zur verlässlichen Polarisationskontrolle, welches auch für hochvolumige kommerzielle Bauteile verwendet wird, besteht in der Verwendung eines Oberflächengitters. Die Wirkung eines solchen Gitters ist darauf zurückzuführen, dass die Reflektivität und Transmission eines linearen Gitters von der Polarisation der eintreffenden elektromagnetischen Welle abhängen.



Figur 4: Aufsicht eines VCSEL mit Oberflächengitter zur Polarisationskontrolle (aus DE 103 53 951 A1)

Die Herstellung von VCSEL erfolgt unter anderem durch Kristallwachstumsverfahren wie metallorganische Gasphasenepitaxie (MOVPE) oder Feststoff-Molekularstrahlepitaxie (MBE). Diese Verfahren bieten eine bis in den Nanometerbereich reichende präzise Einstellung der Zusammensetzung und der erforderlichen Schichtdicken. Um die hohen Stückzahlen bei GaAs-basierten VCSEL erfüllen zu können, werden hierfür Multi-Wafer-Anlagen mit entsprechend großen Wafern verwendet. Die kleine Grundfläche eines VCSEL ermöglicht hierbei einige hunderttausend Chips pro Wafer.

4 Anwendungen

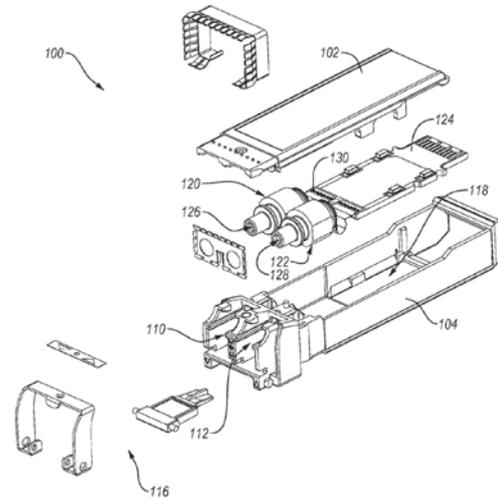
Innerhalb der letzten 20 Jahre konnten VCSEL eine Vielzahl von Anwendungen besetzen, sei es, indem sie aufgrund ihrer überlegenen Eigenschaften bisher verwendete Komponenten ersetzt oder neue Applikationen erst ermöglicht haben. VCSELs finden sich heute in alltäglichen Gebrauchsartikeln als Massenapplikation ebenso wie in technisch wichtigen Spezialanwendungen. Die folgende Aufstellung gibt nur eine Auswahl der wichtigsten Anwendungsfelder für VCSEL wieder.

Transceiver für optische Datenkommunikation

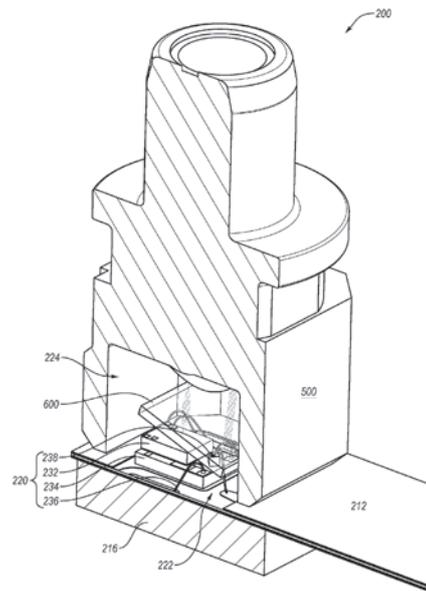
Das stetige Verlangen nach gesteigerter Systemperformance mit immer höheren Datenraten, Integrationsdichte und Kosteneffizienz hat dazu geführt, dass VCSEL-basierte Transceiver auf breiter Front Anwendungsfelder besetzt haben, die früher alleinig kupferbasierten Technologien vorbehalten waren. Der Einsatz von VCSEL in Verbindung mit Multimode-Fasertechnologien ermöglicht optische Datenverbindungen mit signifikanten Kostenvorteilen im Vergleich zu Technologien für langreichweitige einmodenfaserbasierten Verbindungen. Als Lichtquelle kommen hierfür vorrangig multimodig-abstrahlende GaAs-basierte VCSEL mit 850 nm Emissionswellenlänge zum Einsatz. Multimodige VCSEL erlauben einen größeren Aperturdurchmesser mit besserer thermischer Charakteristik und niedrigeren Betriebsspannungen. Darüber hinaus ist die Ausbeute während der Produktion erhöht. In millionenfacher Anzahl verrichten diese Systeme ihren Dienst in Daten- und Rechenzentren und bilden damit einen unverzichtbaren Bestandteil unserer Informationsgesellschaft. Kommerzielle VCSEL-basierte Multimode-Transceiver erreichen heute Übertragungsbandbreiten bis zu 28 Gbit/s bei Reichweiten bis zu 100 m und Umgebungstemperaturen bis zu 70°C. Mit fortschreitender Entwicklung rücken auch Anwendungen wie 40 Gbit/s Ethernet basierend auf direkter Modulation einzelner VCSEL zunehmend in Reichweite.

Die Integration der VCSEL für optische Transceiver erfolgt im Rahmen offener Industriestandards für das

elektro-optische sowie mechanische Design. Einer der am weitestverbreiteten Standards stellt hierbei das SFP+ (Small Form-Factor Pluggable) -Transceiver-Format dar.



Figur 5: Explosionszeichnung eines SFP+ optischen Transceivers (aus US 2013 / 0 156 418 A1)

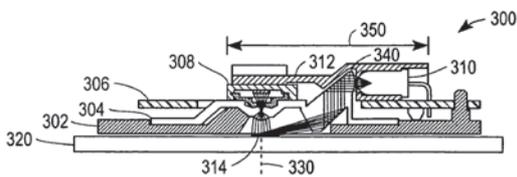


Figur 6: Aufbau der optischen Unterbaugruppe aus Figur 5 mit integriertem VCSEL (aus US 2013 / 0 156 418 A1)

Lasermouse

Optische Computermäuse sind Massenprodukte mit Stückzahlen im Milliardenbereich an bisher verkauften Einheiten. Die Lasermaus ist eine optische Computermaus, die eine Laserdiode mit kohärentem Licht sowie

ein Array aus Photodioden verwendet, um Bewegungen relativ zu einer Oberfläche zu detektieren. Der Vorteil von Lasermäusen gegenüber optischen Mäusen mit zum Beispiel den bekannten rot-emittierenden LED besteht in der präzisen Erkennung von Bewegungsmustern selbst auf unstrukturierten, transparenten oder spiegelnden Oberflächen, da durch den bei kohärentem Laserlicht deutlich auftretenden Speckle-Effekt ein ausgeprägtes und gut zu detektierendes Muster entsteht. Um störende Artefakte bei Änderungen dieses Musters aufgrund unterschiedlicher Moden der Laserstrahlung zu vermeiden, kommen üblicherweise nur monomodige Laser mit stabiler Polarisation zum Einsatz.



Figur 7: Querschnitt des Systems einer optischen Maus zur Erkennung von Bewegungsmustern (aus US 2006 / 0 007 148 A1)

Ein weiterer wichtiger Vorteil von VCSEL als Lichtquelle in optischen Computermäusen besteht in einem niedrigen Leistungskonsum, der insbesondere für batteriebetriebene Geräte von großer Bedeutung ist. Das kreisrunde Emissionsprofil mit geringer Divergenz reduziert ferner die Anforderungen an den optischen Aufbau und erlaubt ein einfacheres System. Die in Lasermäusen eingesetzten VCSEL besitzen üblicherweise eine für das menschliche Auge nicht oder nur schwach wahrnehmbare Wellenlänge um 850 nm. Mit Ausgangsleistungen unter 0.5 mW zählen sie zu den Klasse-I-Lasern und erfüllen somit auch Anforderungen nach Augensicherheit.

Das erste Modell einer VCSEL-basierten optischen Maus stellte die Firma Logitech im Jahre 2004 vor [5].

Optische Gassensorik

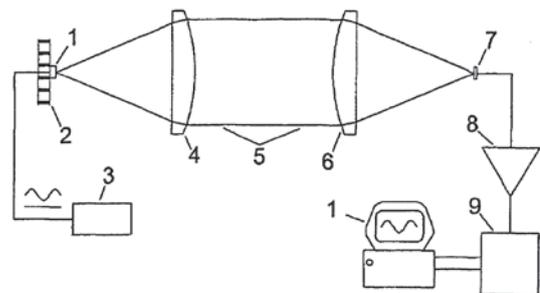
Die optisch basierte Sensorik mittels abstimmbarer Diodenlaser-Spektroskopie (TDLS – Tunable Diode Laser Spectroscopy) stellt einen seit mehreren Jahren zunehmend bedeutenden Markt dar. TDLS-Systeme arbeiten berührungslos und integral über skalierbare

Absorptionspfade, bieten eine schnelle und hochpräzise Konzentrationsbestimmung im ppm-Bereich (Anteile pro Million) und erlauben einen Betrieb ohne aufwändige Wartung. Entsprechende Systeme finden sich beispielsweise in der industriellen Prozesskontrolle, der Umweltüberwachung sowie bei Sicherheitsapplikationen.

Gasmoleküle wie Sauerstoff, Methan, Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff oder Wasserdampf besitzen im nahen und mittleren Infrarot definierte Energiezustände. Die Übergänge zwischen den einzelnen Energiezuständen können indirekt beobachtet werden durch die wellenlängenabhängige Absorption von eingestrahltm Licht. In einem TDLS-System wird daher die Wellenlänge der schmalbandigen Laseremission mittels Veränderung des Betriebsstroms über die Absorptionslinie hinweg abgestimmt.

Im Vergleich zu kantenemittierenden Diodenlasern weisen VCSEL für TDLS-Anwendungen besonders vorteilhafte Eigenschaften auf. Aufgrund des kleinen elektrisch gepumpten aktiven Volumens ist bei VCSEL die Abstimmrate über dem elektrischen Strom deutlich höher. Kontinuierliche Abstimmbereiche von mehreren Nanometern ermöglichen dabei die gleichzeitige Messung mehrerer Linien eines Gases oder sogar die gleichzeitige Messung mehrerer Gase. Die schnelle Modulierbarkeit bis in den Megahertzbereich (MHz-Bereich) sowie der geringe Leistungskonsum, zum Beispiel für batteriebetriebene Feldsysteme, sind weitere vorteilhafte Eigenschaften [6-8].

Die Lasereinheit befindet sich üblicherweise in einem hermetischen Gehäuse mit einer temperaturkontrollierten Wärmesenke, um den Wellenlängenbereich unabhängig von der Umgebungstemperatur durch Stabilisierung der Lasertemperatur zu fixieren.

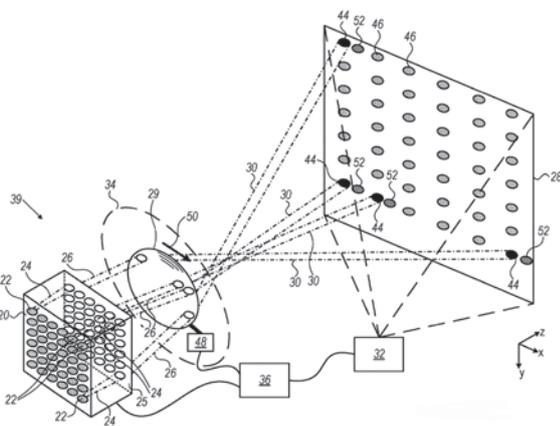


Figur 8: TDLS-basiertes Gas-Messsystem (aus DE 60 2005 003 337 T2)

Zur Erreichung einer hohen Nachweisempfindlichkeit bis zu Konzentrationen von nur wenigen ppm werden TDLS-Systeme heute üblicherweise mit dem Verfahren der Wellenlängen-Modulationsspektroskopie betrieben, um Störeffekte während der Messung zu reduzieren und das Signal-Rausch-Verhältnis zu optimieren. Typischerweise wird hierzu eine Sinusmodulation mit kleiner Amplitude dem veränderlichen Laserstrom überlagert und über die Analyse der höheren harmonischen Signale am Detektor die Konzentration des entsprechenden Gases bestimmt.

Räumliche Bildaufnahme

Die Erweiterung bisheriger 2D-Aufnahmetechniken mit räumlichen Bildinformationen zum Erhalt eines 3D-Abbilds führt aktuell zu vielfältigen Anwendungen mit beachtlichem Marktpotential. Hierzu zählen Applikationen wie biometrische Sensorik, Gestenerkennung, 3D-Bildaufnahme, maschinelles Sehen, Mensch-Maschine-Interaktion oder Entfernungsmessung. Sicherheitsfunktionen, zusätzliche Bildinformationen sowie Möglichkeiten zur erweiterten Realität sind beispielsweise wichtige Treiber für den Einsatz in dem Massenprodukt Smartphone. In der Automobilindustrie laufen viele Entwicklungen auf gleicher technologischer Basis zur Überwachung von Insassen im Fahrzeuginnenraum. Zur Bestimmung der räumlichen Information werden im Wesentlichen zwei unterschiedliche Methoden verwendet, wobei beide Methoden bevorzugt mit VCSEL ausgeführt werden. Bei der ersten Methode wird ein



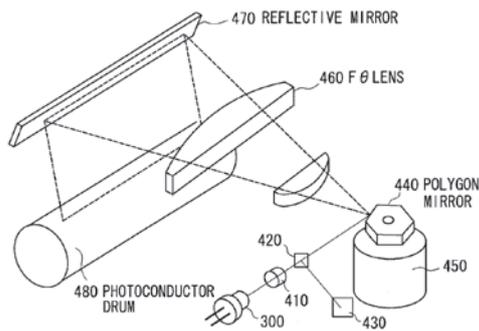
Figur 9: Schematische Ansicht einer Vorrichtung zur Bestimmung dreidimensionaler Bildinformationen (aus US 2018 / 0 062 345 A1)

Lichtmuster, zum Beispiel ein Linienmuster, auf das zu beobachtende Objekt gestrahlt und über eine Kamera die aufgrund von gekrümmten Oberflächen entstehende Verformung des Musters aufgenommen und über eine anschließende Bildverarbeitung ein räumliches Abbild gewonnen. Bei der zweiten Methode wird über eine unterschiedliche Laufzeit von Lichtstrahlen, welche an dem Objekt in unterschiedlichen Tiefen reflektiert werden, ein 3D-Bild errechnet. In Mobilgerätenwendungen werden VCSEL bei 940 nm Wellenlänge eingesetzt, so dass die Messvorgänge für das menschliche Auge vollkommen unbemerkt ablaufen.

Die Firma Apple brachte im Jahre 2017 das erste Smartphone auf den Markt, das eine räumliche Bilderkennung mit VCSEL beinhaltet. Dem Benutzer ist es auf diese Weise möglich, mittels einer dreidimensionalen Abtastung seines individuellen Gesichtsprofils das Gerät sicher und berührungslos zu entsperren ohne Eingabe eines Codes oder Bestimmung des Fingerabdrucks.

Laserdrucker

Eine möglichst optimale Bildqualität sowie höhere Geschwindigkeiten sind bleibende Forderungen in Druckanwendungen. Durch die Möglichkeit, VCSEL auf einfache Weise in einem zweidimensionalen Array anzuordnen, ist es bedeutend einfacher, die Pixeldichte zu erhöhen. Das Unternehmen Fuji Xerox stellte im Jahre 2003 den ersten Laserdrucker vor, der auf VCSEL basierte und eine Auflösung von 2 400 dpi erreichte [9]. Für Druckanwendungen werden GaAs-basierte VCSEL mit Wellenlängen im nahen Infrarot um 780 nm eingesetzt. Da die Strahlform sich direkt auf das Bildprofil überträgt, werden VCSEL ohne höhere Transversalmoden verwendet, welche die Fokussierung des Strahlprofils erschweren und zu Fluktuationen des Latent-Bildes führen würden. Der verringerte Leistungskonsum aufgrund niedriger Betriebsströme sowie hoher Konversionswirkungsgrade gestaltet den Einsatz in Laserdruckern weiterhin attraktiv.



Figur 10: Schematische Ansicht der Belichtungseinheit als Teil einer Vorrichtung zur elektrophotographischen Bildgebung (aus US 2007 / 0 147 459 A1)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgenannten Anwendungen zeigen wichtige Applikationen, bei denen VCSEL unverzichtbare Schlüsselkomponenten darstellen. Das wirtschaftliche Marktpotential dieser Anwendungen ist bereits heute enorm und unsere moderne Welt wäre ohne die kleinen VCSEL-Chips nicht denkbar.

Diese Anwendungen bilden jedoch nur einen Ausschnitt aus der Menge an vielfältigen weiteren Einsatzmöglichkeiten, die aufgrund der imponierenden Entwicklung und der faszinierenden Eigenschaften von VCSEL zunehmend in Erscheinung treten. Zu nennen sind hier beispielsweise Applikationen in LIDAR-Systemen für autonome Fahrzeuge, Strahlungsheizungen, diodengepumpte Festkörperlaser, Atomuhren oder Lasermaterialbearbeitung [10-12]. Die meisten der hierfür eingesetzten VCSEL basieren nach wie vor auf der etablierten GaAs-Technologie. Parallel gibt es viele Forschungsanstrengungen zur Erschließung weiterer Wellenlängenbereiche auf Basis alternativer Materialsysteme. Hiermit könnte erneut eine Vielzahl neuer Applikationen ermöglicht werden. Insbesondere haben InP-basierte VCSEL bereits ein beachtliches Leistungsvermögen hinsichtlich ihrer statischen und dynamischen Eigenschaften bewiesen. Ihr möglicher Einsatz in der glasfaserbasierten optischen Datenkommunikation bei den hierfür üblichen Wellenlängen um 1.3 μm und 1.55 μm bis hin zum Endanwender – Stichwort: *Fiber to the home* (FTTH) – beziehungsweise ihre Integration in siliziumbasierte-Photonik stellt Anwendungsfelder mit einem enormen Bedarf an Lasern dar [13-16].

VCSEL auf Galliumnitrid-Basis für Wellenlängen im ultravioletten bis sichtbaren Spektrum sowie auf Galliumantimonid-Basis für Wellenlängen im nahen bis mittleren Infrarotbereich befinden sich noch in einem früheren Stadium ihrer Entwicklung. Die Verfügbarkeit solcher Bauelemente wäre attraktiv für Anwendungen zum Beispiel im Bereich optische Speicher, Displaytechnologie sowie Bio- und Gassensorik [17,18]. Auch 40 Jahre nach ihrer Erfindung haben VCSEL nichts von ihrer Faszination verloren. Die Entwicklung auf diesem Gebiet verläuft nach wie vor mit hoher Dynamik und lässt für die Zukunft noch viel Spannendes erwarten.

Nicht-Patentliteratur

- [1] IGA, K.: Forty years of vertical-cavity surface-emitting laser: Invention and innovation, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 57, 2018, 08PA01.
- [2] SODA, H. [et al.]: GaInAsP/InP surface emitting injection lasers, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 18, 1979, No. 12, Seite 2329–2330.
- [3] JEWELL, J. L. [et al.]: Low-threshold electrically pumped vertical-cavity surface-emitting micro-lasers, Electronics Letters, Vol. 25, 1989, No. 17, Seite 1123–1124.
- [4] DALLESASSE, J. M. [et al.]: Hydrolyzation oxidation of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-AIAs-GaAs}$ quantum well heterostructures and superlattices, Applied Physics Letters, Vol. 57, 1990, Seite 2844–2846.
- [5] Logitech Unveils the World's First Laser Mouse, URL: <https://phys.org/news/2004-09-logitech-unveils-world180s-laser-mouse.html> [abgerufen am 05.08.2019]
- [6] WERLE, P. [et al.]: Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 37, 2002, Seite 101–114.
- [7] TOTSCHNIG, G. [et al.]: 1.8 μm vertical-cavity surface-emitting laser absorption measurements of HCl, H₂O and CH₄, Measurement Science and Technology, Vol. 14, 2003, Seite 472–478.
- [8] LACKNER, M. [et al.]: Demonstration of methane spectroscopy using a vertical-cavity surface-emitting laser at 1.68 μm with up to 5 MHz repetition

- rate, *Measurement Science and Technology*, Vol. 14, 2003, Seite 101–106.
- [9] UEKI, N. [et al.]: Vertical-cavity surface-emitting laser diode (VCSEL)-VCSEL array and its application to the copier, *Journal of the Imaging Society of Japan*, Vol. 44, 2005, Seite 149–155.
- [10] MOENCH, H. [et al.]: VCSEL-based sensors for distance and velocity, *Proceedings of SPIE*, 9766, SPIE OPTO, 2016, San Francisco.
- [11] PRUIJMBOOM, A. [et al.]: Near-infrared digital heating solutions with power VCSEL arrays, *IEEE Photonics Conference*, 2014, San Diego. DOI: 10.1109/IPCon.2014.6995334
- [12] GRUET, F. [et al.]: Metrological characterization of custom-designed 894.6 nm VCSELs for miniature atomic clocks, *Optics Express*, Vol. 21, 2013, No. 5, Seite 5781–5792.
- [13] KUCHTA, D. M. [et al.]: Error-Free 56 Gb/s NRZ Modulation of a 1530-nm VCSEL Link, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 34, 2016, No. 14, Seite 3275–3282.
- [14] KARINOU, F. [et al.]: 1.55- μm Long-Wavelength VCSEL-Based Optical Interconnects for Short-Reach Networks, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 34, 2016, No. 12, Seite 2897–2904.
- [15] WAGNER, C. [et al.]: Full C-band tunable MEMS-VCSEL for next generation G.metro mobile front- and backhauling, *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2017, San Diego, Inspec-Zugangsnummer 16929811.
- [16] YANG, Y. [et al.]: Integration of an O-band VCSEL on silicon photonics with polarization maintenance and waveguide coupling, *Optics Express*, Vol. 25, 2017, No. 5, Seite 5758–5771.
- [17] YU, H.-C. [et al.]: Progress and prospects of GaN-based VCSEL from near UV to green emission, *Progress in Quantum Electronics*, Vol. 57, 2018, Seite 1–19.
- [18] BACHMANN, A. [et al.]: GaSb-Based VCSEL With Buried Tunnel Junction for Emission around 2.3 μm , *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 15, 2009, No. 3, Seite 933–939.

Organische LED als Licht der Zukunft?

Sibina Sukman-Prähofer, Patentabteilung 1.33

1 Einleitung

Die Zukunft der organischen Elektronik ist schon in der Gegenwart angekommen. Ob es sich dabei um den Einsatz der organischen Beleuchtung, leuchtende Smartphone-Displays, immer noch teure große OLED-Bildschirme, Heckbeleuchtung bei Fahrzeugen oder organische Photovoltaik handelt – sie sind ein Teil unserer Gegenwart.

Die Abkürzung „OLED“ steht für „organic light emitting diode“, die Kohlenstoffverbindungen als leuchtende Stoffe verwendet statt kristalline, anorganische Halbleitermaterialien wie bei klassischen Leuchtdioden.

1.1 Von der LED zur OLED

Eine LED (englisch: *light emitting diode*) besteht aus zwei Elektroden (Kathode [-] und Anode [+]) und einem pn-Halbleiterübergang, der zwischen den Elektroden angeordnet ist. Wenn an die Elektroden elektrische Spannung angelegt wird, rekombinieren die Elektronen und Löcher an dem pn-Halbleiterübergang. Bei dieser Rekombination wird Energie in Form von Licht (Photon) abgegeben. Das ist das Funktionsprinzip einer Leuchtdiode. Die Farbe der LED wird durch die Auswahl der Halbleitermaterialien bestimmt. Wird zum Beispiel Galliumarsenid gewählt, leuchtet die LED infrarot, bei Aluminiumgalliumarsenid rot, bei Indiumgalliumnitrid grün, bei Siliziumkarbid blau. Die Vielfalt der Auswahl an Halbleitermaterialien wie auch die passende Dotierung ermöglichen das Leuchten der LEDs in verschiedenen Farben. Auf dem gleichen physikalischen Prinzip beruht auch die OLED. Im Gegensatz zu der LED besitzt die OLED statt des Halbleitermaterials eine organische Schicht, die zwischen den Elektroden platziert wird. Die OLEDs sind im Vergleich zu den LEDs dünner, können flächig Licht abstrahlen und sind biegsam. Der folgende Absatz geht näher auf das Funktionsprinzip und den Aufbau einer OLED ein.

1.2 Das Funktionsprinzip der Lichterzeugung bei OLEDs

Die erste OLED wurde von den Wissenschaftlern der Nancy Universität in Frankreich in den frühen fünfziger Jahren entwickelt. Sie enthielt Acridinorange und wurde einem Wechselfeld ausgesetzt. Im Jahr 1990 wurde mit Polymereinsatz die erste grün leuchtende Polymer-OLED von J.H. Burroughes an der Cambridge University hergestellt. Sie bestand aus einer leitfähigen Polymerschicht und zwei Aluminiumelektroden. Die Elektrolumineszenz stellte sich erst bei einer Spannung von circa 70 Volt ein mit einer sehr kleinen Effizienz von 0,1 Candela pro Ampère (cd/A) und hatte eine Lebensdauer von 2 Tagen. Das waren die Anfänge der OLEDs – an eine Verwendung als Lichtquelle war nicht zu denken. Weitere Entwicklungen folgten in Bezug auf die Auswahl der organischen leuchtenden Materialien wie auch Materialien für Elektroden. Mit dem Einsatz von Magnesium (Mg), Aluminium (Al) oder Calcium (Ca) für die Kathode und Indium-Zinn-Oxid (ITO) für die Anode konnte der Wirkungsgrad der OLED weiter verbessert werden. Der Einsatz mehrschichtiger OLEDs brachte noch eine weitere Verbesserung. Eine OLED besteht heutzutage aus mehreren organischen Halbleiterschichten zwischen zwei Elektroden, von denen mindestens eine transparent ist. Auf die Anode, die meistens aus transparentem ITO besteht, wird eine Lochleitungsschicht HTL (englisch: *hole transport layer*) aufgebracht. Auf die HTL wird dann ein leuchtender Stoff, die sogenannte EL-Schicht oder Rekombinationsschicht, aufgetragen. Danach folgt die Elektronenleitungsschicht ETL (englisch: *electron transport layer*) und die Kathode. Obwohl eine OLED aus mehreren Schichten besteht, ist sie nur einige 100 Nanometer (nm) dick. Beim Anlegen einer Spannung von 3 bis 12V werden Elektronen aus der Kathode in die organische Schicht injiziert. Gleichzeitig werden Löcher als positive Ladungen von einer transparenten Anode mit hoher Austrittsarbeit in das organische Material injiziert.

Unter Spannung beziehungsweise im angelegten elektrischen Feld wandern Löcher und Elektronen durch die organische Schicht und rekombinieren im angeregten Zustand unter Aussendung von Photonen – es entsteht Licht [1].

2 Einsatz der OLEDs

2.1 Beleuchtung

Die OLED-Technologie bietet in der Beleuchtungselektronik vielfältige Designmöglichkeiten. Dünne OLED-Folien sind biegsam, lassen sich deshalb gut formen und haben eine gleichmäßige Oberflächenleuchtdichte. Einige Ideen, wie die OLED-Beleuchtung zu realisieren ist, sind in mehreren Offenlegungsschriften dargestellt.

Zum Beispiel zeigt die Abbildung 1 der Offenlegungsschrift US 9 196 869 B2 eine Lampe, die auf unterschiedliche Arten gebogen werden kann. Die organischen Beleuchtungsschichten sind dabei im Gehäuse platziert. Wie man hier sehen kann, eignen sich OLED-Leuchtfächen hervorragend zur Gestaltung der gewölbten Flächen der Lampen.

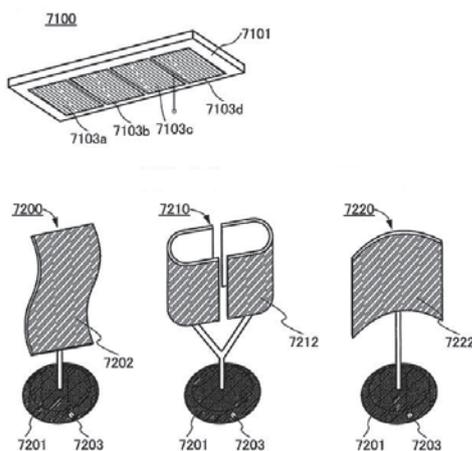


Abbildung 1: Beleuchtung (aus US 9 196 869 B2)

Die Offenlegungsschrift US 8 772 820 B2 liefert noch weitere Beispiele für den Einsatz der leuchtenden organischen Folien wie in der Abbildung 2 gezeigt. Wegen ihrer Flexibilität können die organischen Folien auch auf den einrollbaren Fensterrollläden angebracht werden.

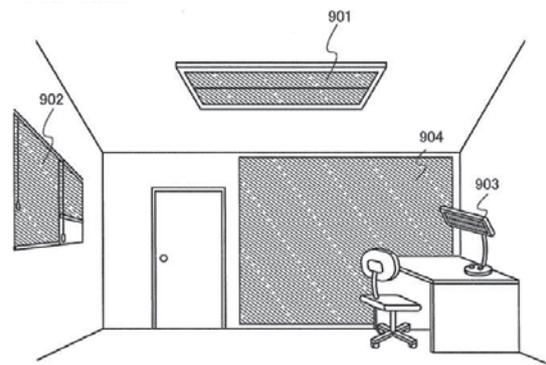


Abbildung 2: OLED als Fensterrollladen (aus US 8 772 820 B2)

Die Offenlegungsschrift DE 10 2006 060 781 A1 zeigt in der Abbildung 3, wie die organischen Leuchtmittel stilisierte Sterne, Monde oder Herzen bilden, womit sie sich besonders gut als Nachtlicht in einem Kinderzimmer eignen.

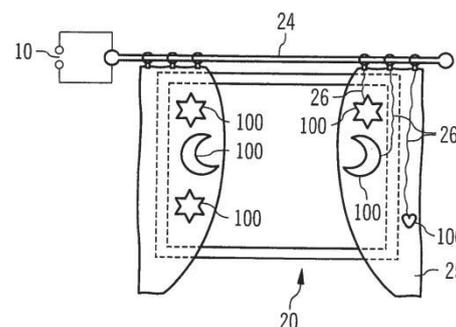


Abbildung 3: OLED-Einsatz im Kinderzimmer (aus DE 10 2006 060 781 A1)

Die vielseitigen OLEDs können farbig leuchten und auch in beliebigen Formen gestaltet werden. Die Anwendungsgebiete sind dabei vielfältig. Mit allen diesen Eigenschaften haben sie den Weg auch zu Textilien gefunden. Aus OLED-Folien gestaltete leuchtende Logos in der Arbeitskleidung erhöhen die Sichtbarkeit der Personen, die diese Kleidung tragen. In die Kleidung integrierte OLEDs können auch für medizinische Zwecke als Infrarot-Leuchten zur Lichttherapie bei Hautkrankheiten eingesetzt werden.

Die OLED-Industrie versucht auch in der Modebranche Fuß zu fassen. Die Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP haben für Modezwecke einen Knopf entwickelt, den sogenannten „O-BUTTON“, der

in die Kleidung integriert werden kann. Bei diesem „O-BUTTON“ ist eine dünne folienbasierte OLED zusammen mit einem Mikrokontroller auf einer konventionellen Leiterplatte kombiniert. Der Knopf kann in unterschiedlichen Farben leuchten. Mit den leuchtenden Knöpfen wie auch weiteren in Textilien eingebauten Mustern sollen Modedesignern Anregungen für neue innovative Designs gegeben werden [2].



Abbildung 4: O-BUTTON, kundenspezifische OLED-Elemente zur Textilintegration O-BUTTON, customer-specific OLED elements for textile integration © Fraunhofer FEP, Photo: Jan Hesse

OLED-Hersteller haben einige Ideen mit interessanten Features für die OLEDs, wie zum Beispiel einen Neuheitsindikator, angemeldet. Dabei soll dem Betrachter werkzeuglos angezeigt werden, ob es sich bei der Leuchtdiode um eine neue Leuchtdiode oder um eine gebrauchte Leuchtdiode handelt. Werkzeuglos bedeutet etwa, dass der Zustand der organischen Leuchtdiode, also ob neuwertig oder gebraucht, für einen Betrachter mit bloßem Auge erkennbar ist. Ein Beispiel für diese Erfindung finden wir in der Offenlegungsschrift DE 10 2015 110 071 A1. In der Abbildung 5 ist der Schriftzug zu sehen. Der genannte Schriftzug ist der Neuheitsindikator mit dem Bezugszeichen 4. In der mittleren Figur der Abbildung 5 ist zu erkennen, dass ein Kontrast zwischen dem Neuheitsindikator 4 und den verbleibenden Bereichen der organischen Schichtenfolge 3 abgenommen hat. Mit anderen Worten ist der Neuheitsindikator weniger deutlich zu erkennen, wenn die organische Leuchtdiode bereits eine Zeit lang in Betrieb war, bis er schließlich nicht mehr erkennbar ist. Der Neuheitsindikator verblasst also schnell mit zunehmender Betriebsdauer der OLED.

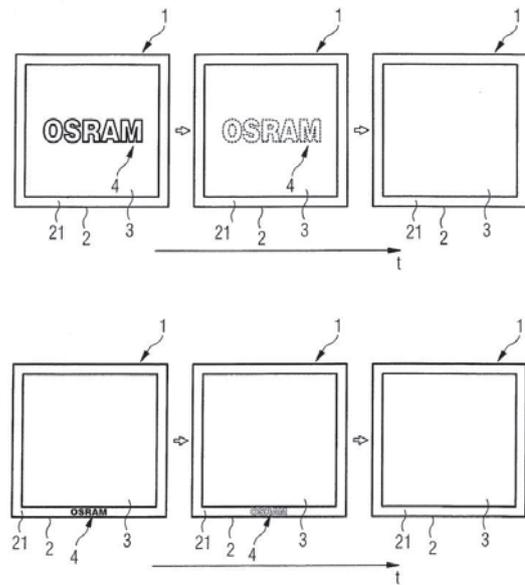


Abbildung 5: Neuheitsindikator (aus DE 10 2015 110 071 A1)

2.2 Rücklichter

Seit einigen Jahren sieht man sie auf den Straßen – OLED-Rücklichter. Bei vielen Herstellern haben sie schon die Serienreife erreicht. Auch hier sind die OLED wegen ihrer Biegsamkeit und den flächig leuchtenden Streifen gefragt. Mit den OLED haben die Hersteller die Möglichkeit, jeder Automarke noch ein spezielles 3D-Rücklichtdesign zu verleihen.

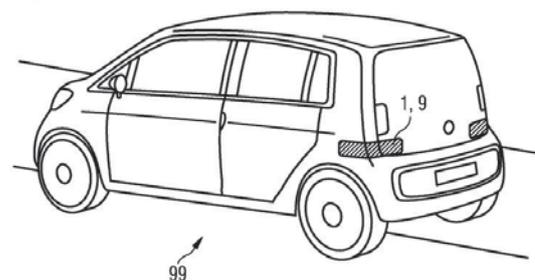


Abbildung 6: OLED-Rücklichter (aus DE 10 2016 119 987 A1)

2.3 Einsatz der OLED im OLED-Display und der Vergleich zu dem herkömmlichen LCD-Display

Bei einer Flüssigkristallanzeige (englisch: *liquid crystal display*, LCD) kommt für die Anzeige Flüssigkristall zum Einsatz, während OLEDs durch organische Halbleitermaterialien leuchten.

Die OLED-Displays sind durch gute Bildschärfe gekennzeichnet. Sie benötigen keine Hintergrundbeleuchtung und somit emittieren schwarze Pixel auch kein Licht. Während ein dunkler Bildpunkt bei LCD abgeschattet wird, was die schwarzen Bildpunkte grau erscheinen lässt, ist dieser bei OLED-Displays ausgeschaltet und dadurch auch komplett schwarz. Dies trägt nicht nur zu einer wesentlich höheren Bildqualität bei, sondern vermindert auch den Verlust von Energie und Wärme und hilft dabei, Strom zu sparen. Die OLED-Displays benötigen weniger Energie als die LCD-Displays bei der Darstellung der dunklen Bilder. Wegen des geringen Energiebedarfs sind die OLED-Displays bei den tragbaren Geräten wie bei Smartphonedisplays, Notebooks, MP3-Playern im Vorteil.

OLED-Displays sind auch deutlich dünner als LCD-Displays, weil sie keine Hintergrundbeleuchtung benötigen. Die Reaktionszeit (englisch: *response time*) von OLED-Displays liegt bei unter 1 Mikrosekunde und ist somit 1000-mal schneller als das aktuell schnellste LCD mit einer Millisekunde.

Das größte technische Problem stellt die vergleichsweise geringe Lebensdauer mancher aus organischen Materialien bestehenden Bauelemente dar. OLED-Displays halten circa 30 000 Stunden, während LCDs 100 000 Stunden halten, bis ihre Leuchtkraft nachlässt [3].

Wieso die Lebensdauer der organischen Materialien vergleichsweise kurz ist, wird durch die sogenannten Singlett- und Triplettzustände erklärt: Ein Emittermolekül wird durch die Rekombination von Elektron und Loch angeregt und erreicht einen höheren Energiezustand und wenn es wieder in den Grundzustand zurückfällt, wird ein Photon ausgesendet – es entsteht Licht. Die Moleküle können aber in zwei Zustände angeregt werden. Dabei führt Singlettzustand zur Lichtumwandlung und beim Triplettzustand geht die Energie verloren. Diese verlorene Energie wird in Wärme umgewandelt. Aus dem Grund entwickeln Wissenschaftler neue organische Materialien, um diese Triplettzustände für die Lichtemission zu nutzen. Die Wissenschaftler von der Cambridge University haben metallorganische Materialien entwickelt, die bei einer Anregung fast komplett zur Aussendung von Licht führen [4].

Ein weiteres Problem ist immer noch die Verkapselung der OLEDs, die sie vor den äußeren Einflüssen schützen soll. In Verbindung mit Wasser oder Sauerstoff verliert die OLED ihre Leuchtkraft. Auf der Leuchtfläche entstehen schwarze Flecken, die auch als „dark spots“ bekannt sind [5].

Aufgrund der Vorteile von OLED gegenüber herkömmlichen Displays besteht wachsendes Interesse an ihrer Verwendung. OLED haben eine relativ niedrige Betriebsspannung und einen relativ geringen Stromverbrauch und lassen sich leicht zu großflächigen Displays verarbeiten. Der Bedarf an OLED-Displays wächst.

3 Einige Herausforderungen bei OLED-Design und die Lösungsansätze

Für die Verdrahtung einzelner Pixel der OLED-Displays werden weiterhin – wegen ihrer guten Leitfähigkeit – Metallbahnen eingesetzt. Diese Metallbahnen sollen aber genauso wie die OLED-Displays biegsam sein, was die OLED-Forschung vor die Herausforderungen stellt. Eine renommierte amerikanische Firma stellt in der Offenlegungsschrift DE 11 2013 005 478 T5 einen Vorschlag für die Verdrahtungsgestaltung dar: Eine biegbare Anzeigevorrichtung mit Metallbahnen, die sich krümmen können ohne zu brechen oder Risse zu bilden, wenn die Anzeigevorrichtung gebogen wird. Die Metallbahnen der Anzeigevorrichtung können auch durch ein organisches Material ersetzt werden, aber die elektrische Leitfähigkeit des organischen Materials ist nicht so hoch wie die der Metallbahnen. Andererseits können die Metallbahnen zerbrechen oder getrennt werden, wenn ein Anzeigefeld gebogen

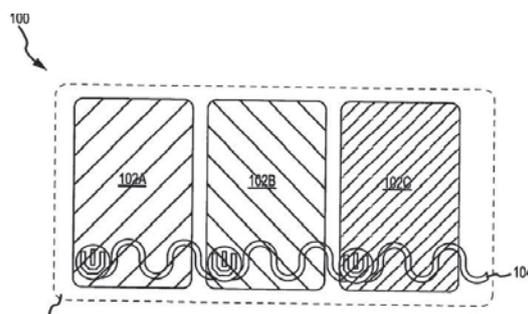


Abbildung 7: Verdrahtung der OLED-Komponenten (aus DE 11 2013 005 478 T5)

wird, weil Metallbahnen eine Bruchdehnungsgrenze von etwa 1% haben. Es ist also wünschenswert, biegbare oder krümmbare Anzeigekomponenten mit einer guten Leitfähigkeit zu haben.

Die genannte Offenlegungsschrift zeigt serpentin-förmige Metallbahnen wie in der Abbildung 7, die eine gute Leitfähigkeit haben und gebogen beziehungsweise gekrümmt werden können.

Verbesserte Verdrahtung der OLED-Displays bringt uns bald interaktive biegbare und klappbare Bildschirme wie aus der Zukunftsvision des Buches „Per Anhalter durch die Galaxis“ von Douglas Adams. Viele Smartphone-Hersteller arbeiten daran, ab dem Jahr 2020 faltbare Smartphones anbieten zu können.

Heutige Displays müssen nicht nur schönes, sattes Licht in den Bildern abgeben, sie müssen auch weitere Funktionen in Bezug auf Sicherheit, zum Beispiel bei Finanzgeschäften, erfüllen. Ein Fingerprint Sensor für autorisierte Personen sollte auch relativ einfach in ein Display eingebaut werden. Die Offenlegungsschrift US 2018 / 0 130 857 A1 bietet die Variante des Einbaus eines kapazitiven Sensors, wie in der Abbildung 8 zu sehen ist, an. Dabei ist mit dem DP-Bezugszeichen ein Display Pixel und mit dem Bezugszeichen SP eine Sensor Pixel Einheit dargestellt.

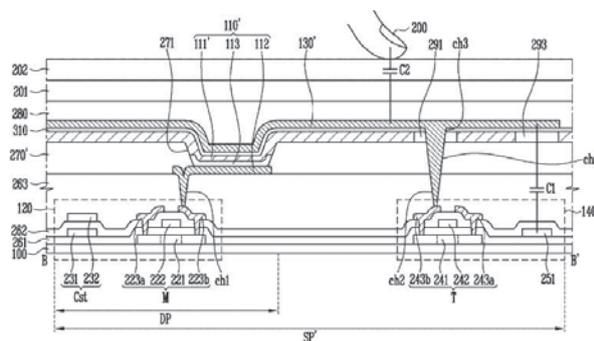


Abbildung 8: Sensor integriert im OLED-Display (aus US 2018 / 0 130 857 A1)

Die OLED-Displays sollen also nicht nur ein schönes Licht geben, wenig Energie verwenden, sie sollen auch kompatibel mit den anderen Anforderungen an die Smartphones sein.

4 Organische Solarzellen als Energie der Zukunft?

Wenn man von organischen Leuchtdioden und deren Einsatz in Beleuchtung und Displays spricht, verdient es die organische Solarzelle auch genannt zu werden. Solange eine Leuchtdiode Licht spendet, liefert eine Solarzelle Spannung beziehungsweise Strom. Organische Solarzellen, die die Umwandlung des Sonnenlichts in elektrische Energie ermöglichen, können unsere Welt verändern. Organische Photovoltaik ist allerdings vom Wirkungsgrad noch nicht so gut wie die übliche Solarzelle, aber dafür sehr viel leichter. Der Wirkungsgrad der organischen Solarzelle liegt bei unter zehn Prozent, solange herkömmliche Silizium Solarmodule einen Wirkungsgrad von etwa mehr als zwanzig Prozent liefern. Organischen Solarzellen sind aber keine Grenzen gesetzt. Es werden ständig neue organische Materialien entwickelt, was auch auf neue Eigenschaften und somit auf einen größeren Wirkungsgrad der organischen Solarzellen hoffen lässt. Es sind also einige Hürden in Bezug auf passende Materialien zu überwinden.

Als Beispiel und mit der Aufgabe, eine organische Solarzelle mit verbessertem Elektronentransportmaterial bereitzustellen, bietet eine renommierte deutsche Firma die Lösungsansätze in der Offenlegungsschrift EP 2 498 315 A2 an. Das Bauelement soll aufgrund den, gegenüber des Standes der Technik, verbesserten Eigenschaften des Elektronentransportmaterials eine gesteigerte Lichtabsorption und damit verbunden eine erhöhte Effizienz zeigen. Diese Aufgabe wird gelöst durch den Einsatz von 2,7-Bis(9H-fluoren-2-yl)benzo[1,2,3-c]phenanthrolin-1,3,6,8(2H,7H)-tetrone-Verbindungen (5), hier N,N-Bis(flouren-2-yl)-naphthalintetracarboxydimid (Bis-FI-NTCDI) genannt. In der nachstehenden Figur ist die chemische Formel abgebildet.

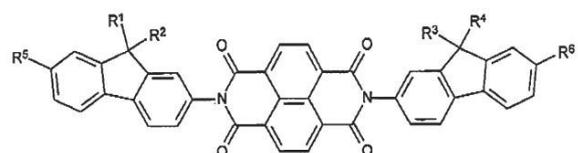


Abbildung 9: Bis-FI-NTCDI (aus EP 2498315 A2)

Die organischen Solarzellen können auf Kunststofffolien aufgebracht werden und können auf Dächern, die keine große Last tragen können, platziert werden. Sie können auch aufgerollt werden, was bei der klassischen kristallinen Elektronik nicht möglich ist. Wegen ihrer Transparenz besteht auch die Möglichkeit, sie in die Fenster zu integrieren. Die Wissenschaftler sind auf einem guten Weg, die organische Leuchtdiode und die organische Solarzelle zu vereinen. Wenn diese doppelt einsetzbare Zelle ihre Serienreife erreicht, werden wir mit den organischen Solarzellen beklebte Fenster haben, die sich unter Sonnenlicht aufladen und am Abend ein schönes, warmes Licht liefern. Sogar unsere Kleidung kann mit diesen dünnen Folien beschichtet werden, die dann die nötige Energie für unsere Smartphones liefern [6], [7].

5 Ausblick

Eingesetzt in den Displays haben die OLED ihren Durchbruch schon geschafft. Ob wir in der Zukunft unsere faltbaren Smartphones mit den OLED-Solarzellen, die in unserer Kleidung integriert sind, aufladen können, wird sich noch zeigen. Auf die Zukunft der OLED sind wir gespannt!

Nicht-Patentliteratur

- [1] URL: <https://kompendium.infotip.de/organische-leuchtdioden.html>
- [2] Quelle: Fraunhofer FEP Presseinformation 7. September 2018
- [3] URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Organische_Leuchtdiode, abgerufen am 18.04.2019
- [4] Dawei Di, Alexander S. Romanov, Le Yang, Johannes M. Richter, Jasmine P. H. Rivett, Saul Jones, Tudor H. Thomas, Mojtaba Abdi Jalebi, Richard H. Friend, Mikko Linnolahti, Manfred Bochmann, Dan Credgington: "High-performance light-emitting diodes based on carbene-metal-amides", *Science* 14 Apr 2017: Vol. 356, Issue 6334, pp. 159-163.
- [5] URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Organische_Leuchtdiode, abgerufen am 18.04.2019
- [6] Prof. Dr. Karl Leo – Zukunftstechnologie Organische Elektronik, Hector Fellow Academy, abgerufen am 07.05.2019
- [7] URL: <https://www.solaranlage.eu/photovoltaik/technik-komponenten/solarzellen/organische-solarzellen>, abgerufen am 07.05.2019

Sicherheit von Lithium-Ionen-Batteriesystemen in Kraftfahrzeugen

Dr. Dirk Ochs, Patentabteilung 1.42

Batterien sind das Schlüsselement, um der Elektromobilität zum Durchbruch zu verhelfen. Um gegenüber dem Verbrennungsmotor konkurrenzfähig zu sein, wird an Verbesserungen bei der Reichweite, der Ladezeit, den Herstellungskosten, der Energiedichte und der Lebensdauer gearbeitet. Mit steigender Anzahl von Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr kommt aber ein weiterer wichtiger Aspekt hinzu: die Sicherheit der Batteriesysteme. Gerade bei dem zum Fahrzeugantrieb verwendeten Batterietyp, der Lithium-Ionen-Batterie, ist die Gewährleistung der Batteriesicherheit ein anspruchsvolles Thema. In diesem Artikel werden technische Entwicklungen zur Gewährleistung der Sicherheit der Batteriesysteme sowohl im normalen Betrieb, also beim Laden und Entladen der Batterie, als auch in Sondersituationen, wie bei Unfällen, betrachtet. Insbesondere geht es darum, ein unkontrolliertes Aufheizen der Batterie, welches schließlich zu einem Batteriebrand führen kann, zu verhindern sowie Personen vor den hohen Spannungen der Batterie auch in Ausnahmesituationen zu schützen.

1 Einleitung

Der Einsatz von Batterien zum Antrieb von Kraftfahrzeugen reicht von relativ kleinen Batteriesystemen in Hybridfahrzeugen zum Speichern von Bremsenergie – mit einer Reichweite der geladenen Batterie von ungefähr 15 Kilometer (km) – über Plug-In-Hybrid-Systeme mit Reichweiten von 10 bis 60 km bis zu den großen Batteriesystemen in reinen Elektrofahrzeugen mit typischen realen Reichweiten von 200 bis 300 km. Zur Versorgung des Motors muss die Traktionsbatterie Spannungen von typischerweise 400 Volt (V) und Leistungen in der Größenordnung von 100 Kilowatt (kW) sowie Kapazitäten von mindestens 15 bis 25 kWh bereitstellen [1]. Um diese Werte zu erreichen, werden die einzelnen Batteriezellen zu Batteriemodulen und diese wiederum zur Fahrzeugbatterie zusammengeschaltet. Die momentan den Markt dominierende Lithium-Ionen-Batterie besitzt eine hohe Energiedichte sowie eine niedrige Selbstentladungsrate [2].

Technische Entwicklungen zur Optimierung von Reichweite, Ladezeit, Herstellungskosten, Energiedichte und Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batteriesystemen wurden bereits diskutiert [3]. Mit zunehmender Einsatzreife der Batteriesysteme für die Elektromobilität

gewinnt gegenwärtig das Thema der Sicherheit der verwendeten Batteriesysteme mehr und mehr an Bedeutung. Technische Innovationen auf diesem Gebiet sollen im vorliegenden Artikel anhand von Patenten und Patentanmeldungen näher betrachtet werden.

Weltweit gibt es zahlreiche Berichte von Bränden und Explosionen von Lithium-Ionen-Batterien [4], [5]. Zwar wird die Wahrscheinlichkeit von Feuer oder Explosion einer einzelnen Lithium-Ionen-Batteriezelle mit 1 zu einer Million bis 1 zu 10 Millionen als relativ gering eingeschätzt [4]. Bei der Verwendung der Batterie in Kraftfahrzeugen als Traktionsbatterie sind aber mehrere hundert Einzelzellen zu einer Batterie zusammengebaut, was die Wahrscheinlichkeit einer Batteriezerstörung auf Werte in der Größenordnung 1 zu 10 000 erhöht. Vergleicht man diese Zahl mit den weltweit aktuell knapp 6 Millionen Elektroautos und den nach einer Schätzung der Internationalen Energieagentur für 2030 prognostizierten 125 Millionen Elektroautos [6], so wird die Relevanz der Batteriesicherheit deutlich.

Außerdem erhöht die Batteriesystemgröße generell die Anforderungen an die Sicherheit, da die abzuführende

Wärmemenge sich erhöht und die Menge gefährlicher Chemikalien wie beispielsweise der brennbaren Elektrolytflüssigkeit ebenfalls zunimmt [7].

Die Sicherheit von Batteriesystemen lässt sich grob in die drei Bereiche elektrische Sicherheit [8], chemische Sicherheit [9] und funktionelle Sicherheit [10] unterteilen. Ein Schwerpunkt der Betrachtungen ist die durch den Einsatzort der Batteriesysteme bedingte Sicherheit bei Unfällen. Ein anderer ist die Gewährleistung der Sicherheit bei normalem Betrieb, das heißt während der Ladungs- und Entladungsprozesse, über die gesamte Lebensdauer der Batterie.

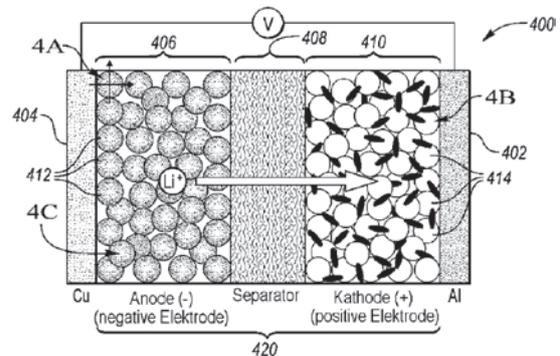
Die Schädigung einer Lithium-Ionen-Batterie kann von verschiedenen Ereignissen ausgelöst werden und wie oben bereits beschrieben zur Zerstörung der Batterie führen.

Durch externe Faktoren wie elektrischen, thermischen oder mechanischen Fehlgebrauch sowie durch interne Faktoren wie metallische Verunreinigungen, schadhafte Separatoren und Lithiumabscheidung auf der Anode kann eine Erwärmung und thermische Zersetzung des in der Batterie verwendeten Elektrolyts ausgelöst werden. Das Ergebnis ist immer ein Anstieg der Zelltemperatur, welcher zur thermischen Zersetzung weiterer Zellkomponenten und wiederum zusätzlicher Wärmeentwicklung führt. Dieser sich selbst beschleunigende Vorgang wird als thermisches Durchgehen oder auch Thermal Runaway bezeichnet [9].

2 Aufbau der Lithium-Ionen-Batteriezelle

Bei Lithium-Ionen-Batterien sind die Batteriezellen (wie in Figur 1 dargestellt) so aufgebaut, dass zwischen einer negativ geladenen Elektrode 406, der sogenannten Anode, und einer positiv geladenen Elektrode 410, der sogenannten Kathode, ein poröser Separator 408 angeordnet ist. Die Anode besteht häufig aus Kohlenstoff oder Graphit, während die Kathode aus einem Lithium-haltigen Material, wie beispielsweise Lithium-Kobaltdioxid (LiCoO_2) oder Lithium-Eisenphosphat (LiFePO_4), hergestellt ist.

Des Weiteren besitzt die Batteriezelle noch einen negativen Stromabnehmer 404, welcher häufig aus Kupfer besteht, und einen positiven Stromabnehmer 403, der gewöhnlich aus Aluminium hergestellt wird.



Figur 1: Lithium-Ionen-Batteriezelle (DE 10 2015 111 954 A1)

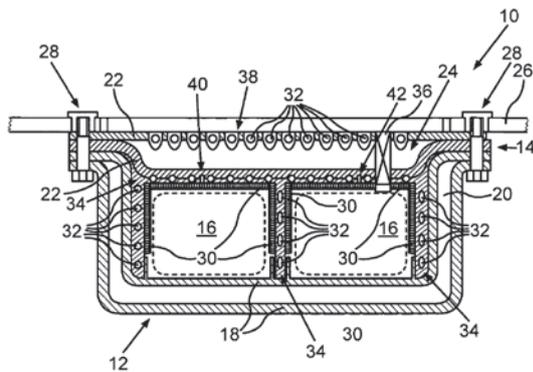
Die Anordnung aus Kathode, Separator und Anode befindet sich in einer nicht wässrigen Elektrolytflüssigkeit, in der positiv geladene Lithiumionen frei durch den Separator zwischen den beiden Elektroden hin- und herwandern können. Bei einer geladenen Batteriezelle sind die Lithiumionen in Form einer sogenannten Intercalationsverbindung im Anodenmaterial eingelagert. Beim Entladen der Lithium-Ionen-Batterie gibt die Intercalationsverbindung Elektronen ab, die über den externen Stromkreis von der Anode über den Verbraucher zur Kathode fließen. Gleichzeitig wandern die Lithium-Ionen von der Anode durch den Separator zur Kathode wie in Figur 1 durch den Pfeil dargestellt. Beim Ladevorgang bewegen sich die Lithium-Ionen auf entgegengesetztem Weg von der Kathode durch den Separator zur Anode.

3 Sicherheit bei Unfällen

Eine speziell beim Einsatz von Batteriesystemen in Kraftfahrzeugen anfallende Aufgabe ist die Gewährleistung der Sicherheit der Batterie bei einem Unfall. Hier stehen der strukturelle Schutz des Batteriezellgehäuses gegen jegliche Krafteinwirkungen und der Schutz von Personen vor frei liegender Hochspannung im Vordergrund.

3.1 Schutz der Batteriezellen vor struktureller Zerstörung

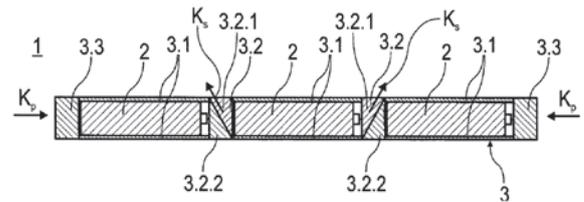
Eine Möglichkeit besteht darin, die Batteriezellen durch ein Batteriegehäuse mit möglichst hoher Festigkeit zu schützen. Um ein zu hohes Gewicht zu vermeiden, kann als Gehäusematerial Kunststoff mit einem hohen Glasfaseranteil verwendet werden. Ein sandwichartiger Aufbau des Batteriegehäuses würde die Crasheigenschaften verbessern. Auch kann die Integration von Brandschutztextilien vorgesehen sein. Ein Batteriegehäuse mit derartigen Komponenten ist in Figur 2 dargestellt.



Figur 2: Batteriegehäuse mit Batteriemodulen (DE 10 2017 000 263 A1)

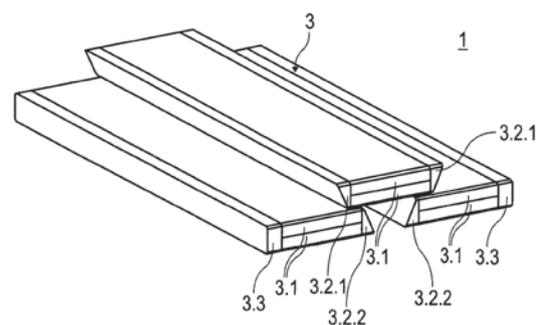
Die Batteriemodule 16 befinden sich in einer Gehäusewanne 12, die als Sandwichkonstruktion aus zwei sogenannten Organoblechen 18 mit dazwischenliegendem thermoplastischem Kunststoffschaum 20 aufgebaut ist. Organobleche bestehen aus Fasergewebe oder Faserlege, die in eine thermoplastische Kunststoffmatrix eingebettet sind. An mehreren Seiten der Batteriemodule sind Brandschutztextilien 30 angeordnet, die von Spritzgussmaterial 34 mit hohem Glasfaseranteil umgeben sind. In das Spritzgussmaterial sind zum Heizen und Kühlen der Batterie Rohre aus Faserverbundwerkstoff 32 eingesetzt. Der Gehäusedeckel 14 ist – wie die Gehäusewanne – in Sandwichbauweise aus zwei Organoblechen 22 und dazwischenliegendem thermoplastischem Kunststoffschaum 24 aufgebaut. Starr ausgebildete Batteriegehäuse haben allerdings den Nachteil, dass bei einem Unfall einwirkende

Kräfte ungeschwächt weitergeleitet und die Fahrzeuginsassen gefährdet werden können. Um dies zu vermeiden, werden bei einem aus mehreren Elementen bestehenden Batteriesystem die einzelnen Gehäusesegmente so verbunden, dass diese im Falle eines Unfalls gegeneinander verschiebbar, zusammenfaltbar oder zusammenklappbar sind.



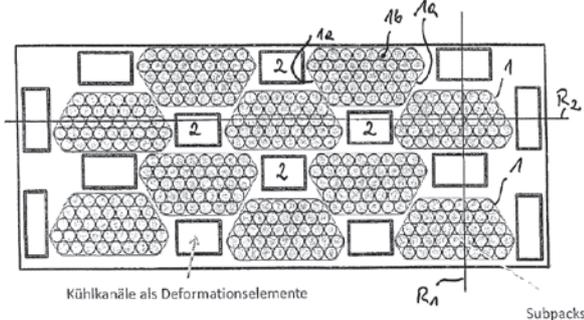
Figur 3: Batteriegehäuse mit bei Unfall wirkenden Kräften (DE 10 2008 010 822 A1)

Figur 3 zeigt ein Batteriegehäuse 3, welches durch verbundene Gehäusesegmente, bestehend aus Reihen von Einzelzellen 2, aufgebaut ist. Die Verbindungselemente 3.2 sind jeweils in zwei Teilelemente 3.2.1 und 3.2.2 unterteilt, deren Enden zueinander angeschrägt ausgeführt sind. Zwei aufeinanderfolgende Verbindungselemente sind mit zueinander entgegengesetzt verlaufenden Schrägen versehen. Die Teilelemente sind lösbar miteinander geklebt, gespannt oder gerastet verbunden. Im Falle einer von außen auf die Batterie einwirkenden Kraft K_p , die beispielsweise bei einem Heck- oder Frontalaufprall auftreten kann, wirken an den angeschrägten Enden der Teilelemente Schubkräfte K_s . Hierdurch werden die einzelnen Gehäusesegmente über- und/oder untereinander geschoben, wobei die einzelnen Gehäusesegmente intakt bleiben wie in Figur 4 dargestellt.



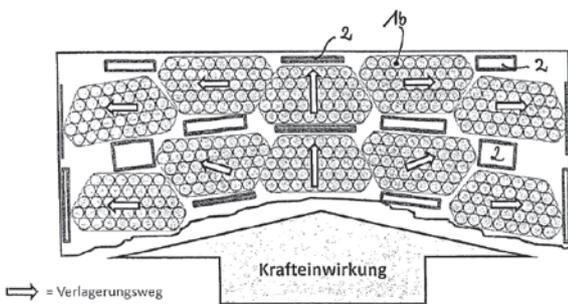
Figur 4: Deformiertes Batteriegehäuse (DE 10 2008 010 822 A1)

Eine weitere Möglichkeit, die Krafteinwirkung auf die Batteriezellen zu schwächen, ist die Anordnung von Deformationselementen im Batteriegehäuse zwischen den Batteriemodulen oder den Batteriezellen.



Figur 5: Anordnung von Batterieelementen und Deformationselementen in einem Batteriegehäuse (DE 10 2010 033 806 A1)

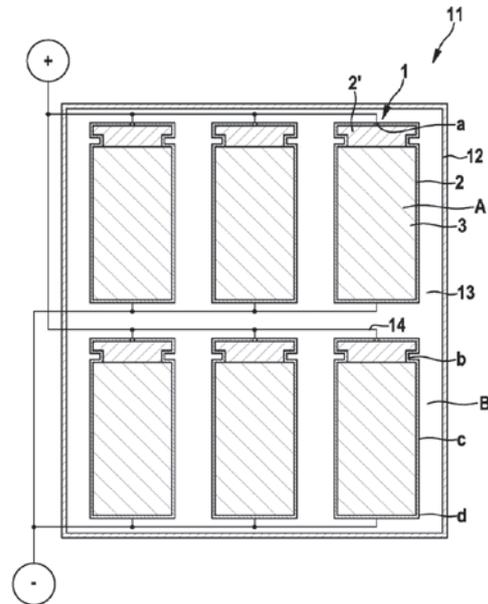
In Figur 5 ist eine derartige Batterie, bestehend aus den mehrere Batteriezellen 1b enthaltenden Batterieelementen 1 und dazwischen angeordneten Deformationselementen 2, dargestellt. Die Deformationselemente können durch Hohlprofile realisiert werden, welche zusätzlich als Kühlkanäle fungieren.



Figur 6: Anordnung von Batterieelementen und Deformationselementen in einem Batteriegehäuse nach einer Krafteinwirkung (DE 10 2010 033 806 A1)

Bei einer unfallbedingten Krafteinwirkung (wie in Figur 6 dargestellt) kommt es zu einer Verschiebung von Batterieelementen, wodurch die wirkende Kraft auf die Deformationselemente weitergeleitet wird. Diese nehmen durch Verformung – wie beispielsweise Quetschen oder Stauchen des Hohlprofils – die Kraft auf, wodurch Teile der Aufprallenergie absorbiert werden. Durch zur Längserstreckung schräg angeordnete, gegenüberliegende Flächenbereiche 1a der Batterieelemente können diese so zueinander verschoben werden,

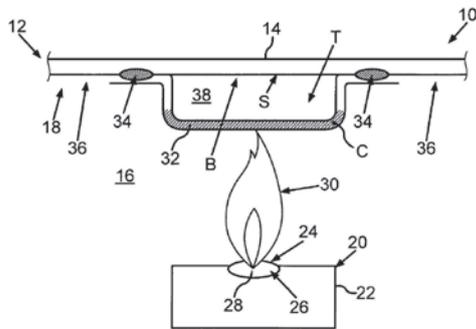
dass die wirkende Kraft sowohl auf in einer Reihe hintereinanderliegende Deformationselemente als auch auf weitere umgebende Deformationselemente gelenkt wird. Während die Deformationselemente die Kraft aufnehmen, bleiben die räumlich verschobenen Batterieelemente unbeschädigt.



Figur 7: Batterie mit Batteriezellen (DE 10 2012 200 980 A1)

Bei einem anderen Ansatz wird die Sicherheit der Batterie erhöht, indem eine durch Leckage geöffnete Zelle wieder verschlossen wird. Figur 7 zeigt eine schematische Darstellung einer Lithium-Ionen-Batterie bestehend aus sechs galvanischen Zellen 1, die jeweils von einem Zellgehäuse 2 umgeben sind. Im Innenraum 3 der Zellgehäuse sind jeweils die elektrochemisch aktiven Bestandteile der Zellen wie Anode, Kathode und Elektrolyt enthalten. Der Elektrolyt umfasst eine erste chemische Komponente A. Die galvanischen Zellen befinden sich in einem Batteriegehäuse 12, wobei der Raum 13 zwischen den Außenseiten der Zellgehäuse und der Innenseite des Batteriegehäuses zur Leitung eines Kühlmittels ausgelegt ist. Eine zweite chemische Komponente B ist in dem Kühlmittel gelöst. Bei einer Leckage der Batteriezelle treten die chemische Komponente A und die chemische Komponente B in Kontakt und reagieren miteinander. Die beiden chemischen Komponenten sind so gewählt, dass das Reaktionsprodukt ein fester Stoff ist, der das Leck verschließt. Bei der chemischen Reaktion der beiden

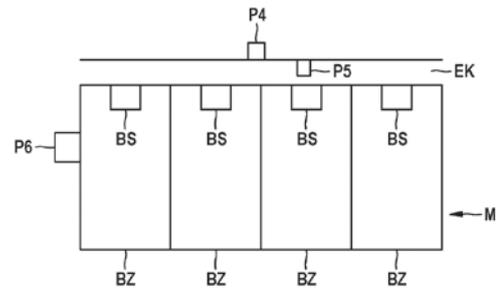
Komponenten A und B kann es sich beispielsweise um eine Polymerisationsreaktion, eine Polykondensationsreaktion, eine Polyadditionsreaktion oder eine Fällungsreaktion handeln.



Figur 8: Batterieeinzelzelle mit Entlüftungseinrichtung und gegenüberliegendem Batteriegehäusedeckel (DE 10 2018 006 280 A1)

Kommt es infolge eines Kurzschlusses in der Speicherzelle, der beispielsweise durch einen Unfall hervorgerufen wurde, zu einer beschleunigten Erwärmung und infolgedessen zu einem Zersetzen des Elektrolyts, so steigt der Druck im Inneren des Zellgehäuses rasch an. Eine Möglichkeit, wie ein übermäßiger in dem Zellgehäuse herrschender Druck vermieden werden kann, wird in Figur 8 dargestellt. Die Speicherzelle 20 weist eine dem Batteriegehäusedeckel 14 zugewandte Entlüftungseinrichtung 24 zum Entlüften des Zellgehäuses 22 auf. Die Entlüftungseinrichtung wird durch eine Durchgangsöffnung 26 im Zellgehäuse und ein diese Öffnung verschließendes Berstelement 28, welches eine Berstmenbran oder eine Berstscheibe sein kann, gebildet. Überschreitet der Druck im Zellgehäuse einen Grenzwert, kommt es zu einem Bersten des Berstelementes und die Durchgangsöffnung wird teilweise frei, so dass das Gas aus dem Zellinnenraum entweichen kann, wie es mit Bezugszeichen 30 dargestellt ist. Damit dieses heiße Gas oder die daraus entstehende Flamme nicht den Gehäusedeckel 14 beschädigt, welcher das Batteriegehäuse verschließt, das eine Vielzahl der oben beschriebenen Speicherzellen aufnimmt, ist gegenüber der Durchgangsöffnung ein U-Profil 32 über Kontaktpunkte 34 am Gehäusedeckel angebracht. Der dadurch entstehende Hohlraum 38 kann mit Luft oder auch thermischem Isolationsmaterial gefüllt sein. Hierdurch wird ein lokaler thermischer Schutz des Gehäusedeckels erzielt.

Um die Sicherheit des Batteriesystems weiter zu erhöhen, ist es notwendig, die nach dem Bersten folgende Gasentstehung möglichst schnell zu detektieren. Dies kann durch geeignete Sensoren nach Austreten des Gases aus dem Batteriesystem erfolgen, aber auch schon frühzeitig innerhalb der Batterie durch akustischen Nachweis des Berstens der Berstscheibe.



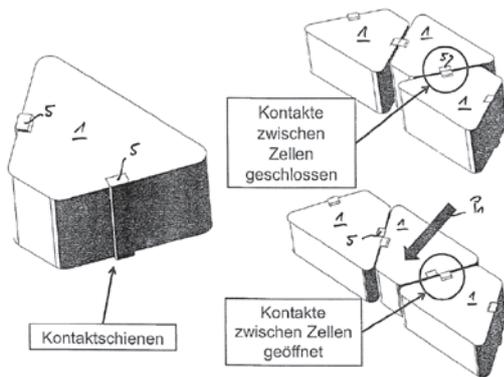
Figur 9: Batteriezellen mit Entgasungssystem (DE 10 2013 223 373 A1)

Eine derartige Nachweisschaltung zum Erzeugen eines Warnsignals im Fall des Berstens einer Berstscheibe ist in Figur 9 dargestellt. Das Batteriemodul M enthält eine Vielzahl von Batteriezellen BZ, in deren Zellgehäuse jeweils eine Berstscheibe BS den Innenraum verschließt. Ein Entgasungssystem EK dient der kontrollierten Abführung der im Falle des Berstens einer der Berstscheiben entstehenden Gase. Die durch das Bersten erzeugte, den Klang tragende mechanische Welle wird durch die Nachweisschaltungen, die an den Positionen P4, P5 oder P6 angeordnet sein können, detektiert und ein Warnsignal wird direkt nach dem Bersten ausgegeben.

3.2 Schutz von Personen vor Hochspannung

Neben der Vermeidung der Beschädigung einzelner Batteriezellen mit anschließendem unkontrolliertem Reaktionsverlauf muss bei einem Unfall auch sichergestellt werden, dass die Fahrzeuginsassen und weitere beteiligte Personen vor den hohen Spannungen der Batterie von typischerweise 400 V bis 600 V geschützt werden. Auch muss ein eventuell auftretendes kurzschlussartiges Entladen der Batterie mit der Gefahr eines Brandes oder einer Explosion vermieden werden. Dies kann durch eine Unterbrechung der Verbin-

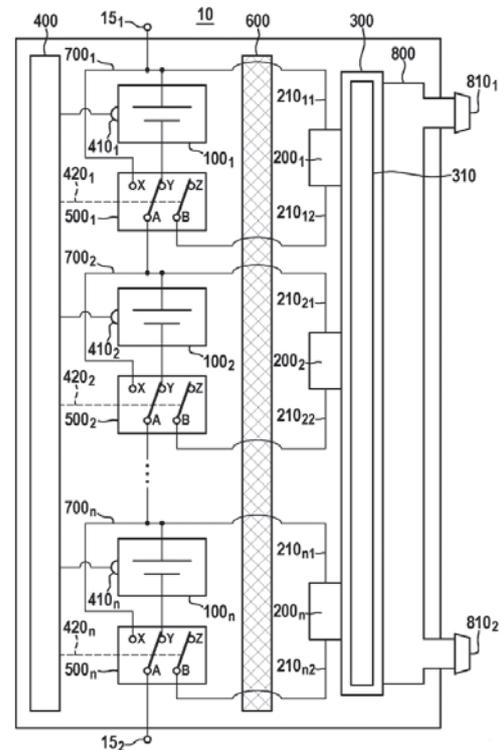
dung zwischen Traktionsbatterie und Verbraucher, beispielsweise durch Öffnen eines Leistungsschalters bei der Detektion eines Unfalls, geschehen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass die einzelnen Batteriemodule über Kontakte miteinander elektrisch verbunden sind, welche sich bei einem Unfall öffnen.



Figur 10: Elektrische Kontaktierungen zwischen benachbarten Batterieelementen vor und nach einer Krafteinwirkung (DE 10 2010 033 806 A1)

Ein derartiges System ist in Figur 10 dargestellt. Die mehrere Batteriezellen enthaltenden Batterieelemente 1 sind im unverschobenen Zustand so angeordnet, dass die elektrischen Kontaktelemente 5 von benachbarten Batterieelementen einander berühren und somit einen elektrischen Kontakt herstellen. Kommt es im Rahmen eines Aufpralls zu einer Krafteinwirkung P_1 und daraus resultierend zu einer Verschiebung der Batterieelemente relativ zueinander, so geraten die benachbarten Kontaktelemente außer Kontakt. Die elektrische Verbindung zwischen den Batterieelementen wird somit unterbrochen und die Gefährdung bei einem Unfall durch hohe Spannung beseitigt.

Als eine weitere Sicherheitsmaßnahme wird im Fall eines Unfalls oft eine sofortige Entladung der Hochvoltbatterie initiiert, unabhängig davon, wie geschädigt die Batterie ist. Dies hat die Nachteile, dass ein zumindest eingeschränkter Weiterbetrieb der Batterie nicht mehr möglich ist und dass durch die komplette Entladung in kurzer Zeit eine große Menge Wärmeenergie entsteht, die abgeführt werden muss. Diese Nachteile lassen sich umgehen, wenn die Steuervorrichtung so eingerichtet ist, dass nicht die komplette Batterie, sondern nur einzelne Batteriezellen, die ein außergewöhnliches Verhalten zeigen, entladen werden.



Figur 11: Batterie mit Entladungsvorrichtung (DE 10 2014 212 122 A1)

Figur 11 zeigt schematisch eine derartige Vorrichtung zur Entladung einer Batterie, welche aus mehreren Batteriezellen 100 besteht. Eine Steuervorrichtung 400 überwacht die einzelnen Batteriezellen, beispielsweise mittels Temperatursensoren, und erkennt Fehler. Wenn die Temperatur einer bestimmten Batteriezelle im Vergleich zu den übrigen zu hoch ist oder eine zulässige Maximaltemperatur überschreitet, kann die Steuerung durch Umschalten des zugehörigen Schaltelements 500 die Entladung dieser Batteriezelle über das zugeordnete Lastelement 200 veranlassen. Die im Lastelement entstehende thermische Energie wird von dem Wärmespeicherelement 300 aufgenommen, zwischengespeichert und dann über das Temperierelement 800 abgeführt.

4 Sicherheit beim Betrieb

Das Überladen und zu tiefe Entladen von Lithium-Ionen-Batterien führt zur Ablagerung von metallischem Lithium an der Anode. Es bilden sich dabei spitze Kristalle, die sogenannten Dendrite, die beim Wachs-

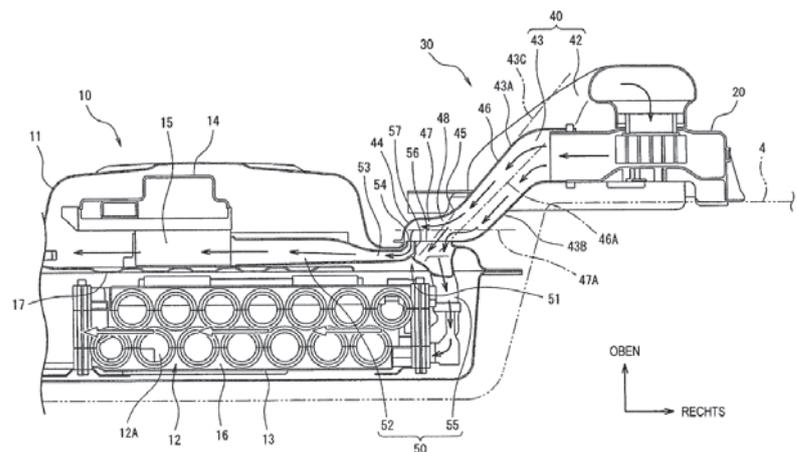
tum durch den Separator zu einem Kurzschluss und einem Entzünden des Lithiums führen [11]. Auch metallische Verunreinigungen bei der Produktion können für innere Kurzschlüsse in den Batteriezellen und anschließendem „Thermal Runaway“ führen. Diese Erwärmung führt – wie bereits oben erwähnt – zum Ausgasen und Entzünden des leicht brennbaren Elektrolyts. Bei Temperaturen von über 200°C zersetzen sich auch die meisten Kathodenmaterialien. Die Graphitanode entwickelt ebenfalls Wärme und verstärkt das thermische Weglaufen [11].

4.1 Kühlung der Batteriezellen

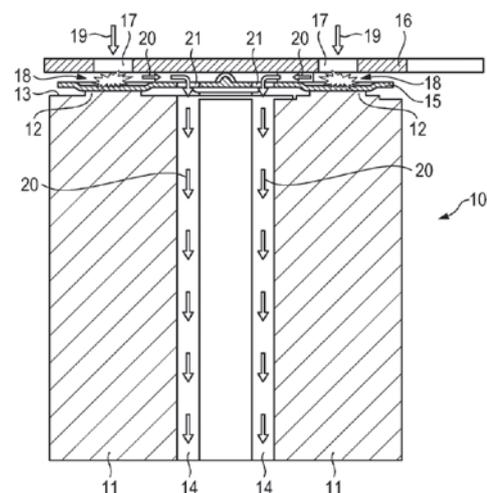
Von sehr großer Bedeutung für die Sicherheit der Batteriesysteme ist die effiziente Kühlung der einzelnen Batteriezellen. Die beim Betrieb der Batterie entstehende Verlustwärme muss abgeführt werden. Dies kann mittels einer Kühlflüssigkeit, aber auch durch Luftkühlung geschehen.

Ein Batteriepack mit einer kompakten Luftkühlung zur möglichst effizienten Kühlung der Batteriezellen und einer elektrischen Anordnung ist in Figur 12 dargestellt. Im Gehäuse 11 des Batteriepacks 10 sind ein Batteriegehäuse 13 und eine elektrische Vorrichtung mit einem Wechselrichter 14 angeordnet. Der über einen Ventilator 20 angesaugte Luftstrom wird über die Luftansaugführung 43 dem Batteriepack zugeführt. An der am Gehäuse des Batteriepacks angeordneten Verzweigungstelle 51 teilt sich der Luftstrom auf und wird zum einen über den ersten Kühllufteinlass 54 in den ersten Kühlkanal 52 eingelassen und kühlt über diesen die elektrische Vorrichtung. Zum anderen wird die Kühlluft über den zweiten Kühllufteinlass 56 in den zweiten Kühlkanal 55 eingelassen, über diesen in das Batteriegehäuse geführt und umströmt die dort angeordneten Batteriezellen. Durch die parallele Kühlung der elektrischen Vorrichtung und der Batteriezellen reduziert sich der Druckverlust der Kühlluft im Vergleich zu einer seriellen Anordnung.

Statt mittels Luft kann die Batteriekühlung auch mit Hilfe einer Kühlflüssigkeit erfolgen. In Figur 13 ist eine Batterie mit einer derartigen Kühlung schematisch dargestellt, wobei eine besonders effiziente Kühlung der sich im Betrieb besonders stark erheizenden Polkontakte realisiert ist. Die Polkontakte 12 der Batteriezellen 11 sind über die Terminalplatte 15 miteinander elektrisch verbunden. Die Terminalplatte besitzt als Mulde ausgebildete Pralltöpfe 18, welche direkt über den Polkontakten angeordnet sind. Durch eine Lochplatte 16 wird nun Kühlmittel, wie durch die Pfeile 19 angezeigt, in die Mulden der Pralltöpfe eingespritzt, um diese verstärkt zu kühlen. Anschließend wird das Kühlmittel durch die in der Terminalplatte vorgesehenen



Figur 12: Luftkühlung eines Fahrzeug-Batteriepacks (DE 10 2016 200 600 A1)

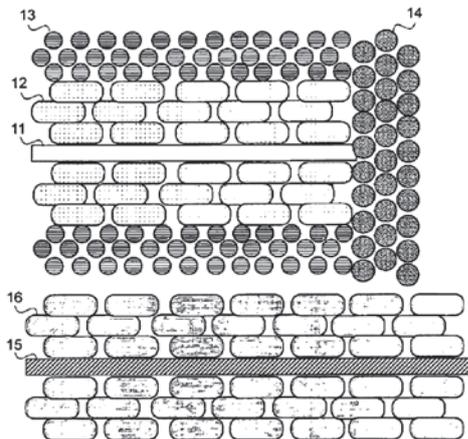


Figur 13: Batterieanordnung mit Kühlmittelverlauf (DE 10 2012 111 970 A1)

Löcher 21 in die Zwischenräume 14 zwischen den Batteriezellen geleitet und strömt entlang der Außenflächen der Batteriezellen entlang deren Längsachse, um eine Zwischenzellenkühlung zu gewährleisten.

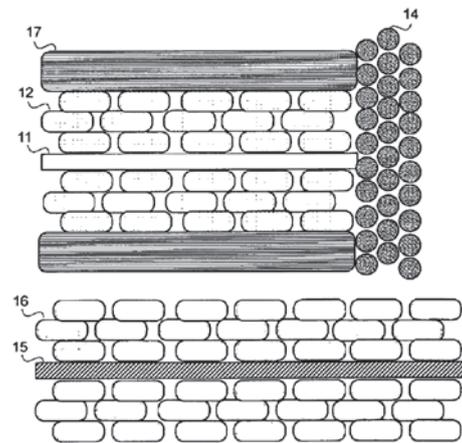
4.2 Integrierte Abschaltfunktionen

Um den Thermal Runaway der Batterie zu verhindern, können technische Maßnahmen direkt in die Batteriezellen integriert werden. So kann eine automatische Abschaltfunktion in jeder Batteriezelle bei Überschreiten einer bestimmten Grenztemperatur durch geeignete Schichten zwischen Kathode und Anode realisiert werden.



Figur 14: Schichtanordnung in einer Batteriezelle (DE 10 2016 109 203 A1)

In Figur 14 ist eine derartige Batteriezelle mit einer Kathode bestehend aus Kathodenstromkollektor 11 und Kathodengemischschicht 12 sowie einer Anode bestehend aus Anodenstromkollektor 15 und Anodengemischschicht 16 dargestellt. Zwischen der Kathode und der Anode befindet sich eine poröse Schicht aus thermoplastischen Harzteilchen 13. Auf den Kantenflächen der Kathodenschicht ist eine Schicht aus anorganischen Oxidteilchen aufgebracht. Die thermoplastischen Harzteilchen besitzen eine Schmelztemperatur, die deutlich geringer ist als die der anorganischen Oxidteilchen. Wenn sich die Batteriezelle durch Fehlfunktion erhitzt, schmilzt die Schicht aus thermoplastischen Harzteilchen wie in Figur 15 dargestellt.

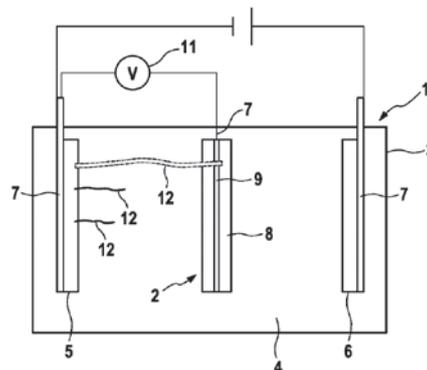


Figur 15: Schichtanordnung in einer Batteriezelle nach Überhitzung (DE 10 2016 109 203 A1)

Die Poren in der thermoplastischen Schicht werden geschlossen und der weitere Fluss von Strom und Ionen zwischen Kathode und Anode wird blockiert. Die Gefahr eines unkontrollierten Entladens der Batteriezelle ist somit gebannt. Bei der Schicht aus anorganischen Oxidteilchen bleiben die Poren dagegen auch bei erhöhten Temperaturen offen, so dass über diese Schicht weiterhin eine gute Wärmeableitung möglich ist.

4.3 Detektion des Wachstums von Dendriten

Zur Verhinderung des durch Dendritenwachstum verursachten Kurzschlusses innerhalb der Batteriezelle werden verschiedene Ansätze verfolgt. Einer sieht die frühzeitige Detektion des Dendritenwachstums vor dem Eintritt eines Kurzschlusses vor. Eine Batteriezelle 1 mit einer Anode 5 einer Kathode 6 und einem dazwischen angeordneten Separator 2 ist in Figur 16 dargestellt.

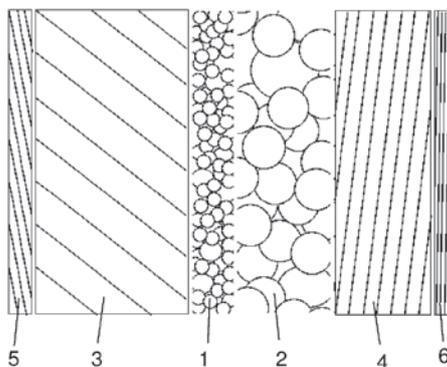


Figur 16: Batteriezelle mit Separatoreinrichtung (DE 10 2013 224 294 A1)

Beginnend von der Anode wachsen Li-Dendriten 12 in Richtung der Kathode. Zur Detektion der Dendriten ist der Separator aus drei Schichten aufgebaut. Die mittlere, ionendurchlässige, leitfähige Einlage 9 ist auf beiden Seiten von einer elektrisch nichtleitenden, porösen Schicht 8 aus Kunststoff oder Keramik umgeben. Die leitfähige Einlage ist über einen Spannungsmesser 11 mit der Anode verbunden. Ist der Dendrit so weit gewachsen, dass er die leitfähige Einlage erreicht, wie in der Abbildung für den Obersten Dendrit dargestellt, wird der durch den Dendriten zwischen Anode und leitfähiger Einlage erzeugte Kurzschluss über den Spannungsmesser detektiert. Dies geschieht lange bevor das fortgesetzte Dendritenwachstum einen Kurzschluss zwischen Anode und Kathode erzeugt. Somit kann die Batteriezelle oder das Batteriemodul über ein Batteriemangement rechtzeitig abgeschaltet werden.

4.4 Verhinderung des Wachstums von Dendriten

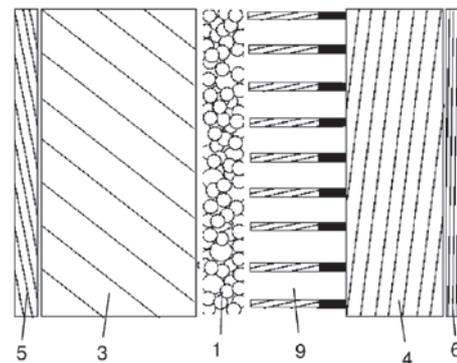
Ein anderer Ansatz soll direkt das Dendritenwachstum verhindern.



Figur 17: Schnitt durch eine Batteriezelle mit einem zweilagigen porösen Separator (DE 10 2012 107 848 A1)

Hierzu wird, wie in Figur 17 dargestellt, zwischen Kathode 3 und Anode 4 ein aus zwei Einzellen mit verschiedener Porosität bestehender Separator verwendet. Die Einzellen sind so angeordnet, dass die Einzelle mit der kleineren durchschnittlichen Porengröße 1 zur Kathode hin angeordnet ist. Die Einzellen können dabei perforierte Folien, Gewebe, Netze mit Kett- und Schussfäden, Filze oder Fliese unterschiedlicher Maschen- und Porengrößen sein.

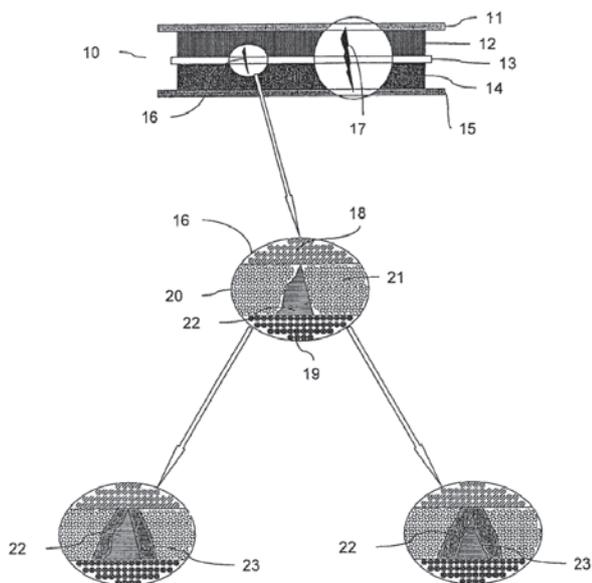
Die große Porengröße der an der Anode anliegenden Einzelle sorgt dafür, dass der Innenwiderstand des Separators nicht zu groß und der Stromfluss dadurch behindert wird. Außerdem wird durch die Poren ein ausreichendes Volumen zur Aufnahme von Anodenmaterial bereitgestellt. Durch die kleinen Poren der an der Kathode anliegenden Einzelle wird die Metallionenverteilung vor der Kathode homogenisiert, was einer Dendritenbildung entgegenwirkt.



Figur 18: Schnitt durch eine Batteriezelle mit einem zweilagigen Separator mit teilweise elektrisch leitenden Stegen (DE 10 2012 107 848 A1)

Die Einzelle mit der größeren Porengröße kann auch, wie in Figur 18 gezeigt, eine Porosität nahe 100% besitzen. Die Einzelle 9 ist aus dünnwandigen, nicht elektrisch leitenden Stegen beziehungsweise Stegwänden gebildet, wobei ein Anteil der Einzelle, der der Anode 4 am nächsten liegt, elektrisch leitend ist. Dies vergrößert die Oberfläche, an der die ausgetauschten Ionen während des Ladens an der Anode abgeschieden werden können und senkt den Innenwiderstand, was die Leistungsfähigkeit der Batteriezelle erhöht. Wächst ein Dendrit an der leitfähigen Stegwand, so ist die Wachstumsrichtung senkrecht zur Verbindungsachse zwischen Anode und Kathode. Der Dendrit trägt also nicht zur Kurzschlussbildung bei.

Ein weiterer Ansatz sieht die Verwendung eines speziellen Separatormaterials vor, um eine Dendritbildung zu begrenzen. Hierbei werden dem Separator Glaspartikel beigemischt, die so ausgewählt sind, dass sie Wärme gut aufnehmen, aber wegen ihrer geringen thermischen Leitfähigkeit nicht weiterleiten. Der Batteriezellaufbau und die Funktionsweise sind in Figur 19 dargestellt.



Figur 19: Lithium-Ionen-Zelle mit verschiedenen Stadien eines Dendritenwachstums (DE 10 2010 013 295 A1)

Im oberen Abschnitt der Zeichnung ist eine Lithium-Ionen-Zelle mit einer Kathode 12, einer Anode 14 und dazwischenliegendem Separator 13 dargestellt. Auf beiden Seiten dieser Schichtanordnung ist jeweils eine Ableiterfolie 11 beziehungsweise 15 angebracht. Des Weiteren ist der Störfall 16 dargestellt, der einen Kurzschluss von Anode zu Kathode beschreibt, sowie der im Folgenden nicht weiter betrachtete Störfall 17, der einen Kurzschluss zwischen den beiden Ableiterfolien darstellt. Im mittleren Abschnitt ist der Störfall 16 in Vergrößerung dargestellt. Zwischen Kathodenmaterial 18 und Anodenmaterial 19 ist der Separator 20 angeordnet, der Glaspartikel 21 enthält. Der Kurzschluss wird durch den Dendriten aus Lithium-Metall 22 ausgelöst. Durch den Kurzschluss kommt es zu einem lokal starkem Stromfluss mit starker Wärmeentwicklung. Ein reiner, nicht mit Glaspartikeln versehener, organischer Separator schrumpft oder verbrennt mit der Folge des flächenhaften Kurzschlusses der Elektroden. Im Gegensatz hierzu gibt es zwei Reaktionsmöglichkeiten des Systems mit Glaspartikelzumischung im Separator, wie sie im unteren Abschnitt der Zeichnung dargestellt sind. Der Dendrit 22 wird von einem Glasmantel 23 aus aufgeschmolzenen Glaspartikeln umgeben, der auf diese Weise die beim Kurzschluss entstehende Wärme lokal begrenzt. Der Dendrit kann seine Form beibehalten, wie im linken unteren Ab-

schnitt dargestellt, oder er kann, wie im rechten unteren Abschnitt gezeigt, auch gekappt werden. In beiden Fällen wird ein weiteres Wachstum des Dendriten verhindert.

5 Ausblick

Mit dem zunehmenden Einsatz von Batteriesystemen als Antrieb in Kraftfahrzeugen nimmt die Bedeutung der Sicherheit dieser Batteriesysteme stetig zu. Die derzeit für diese Anwendung ausschließlich verwendeten Lithium-Ionen-Batterien erfordern die Weiterentwicklung verschiedenster Sicherheitsmaßnahmen zur Sicherstellung der ordnungsgemäßen Funktion der Batteriesysteme im täglichen Gebrauch und bei Unfällen. Wichtige Herausforderungen sind die Verhinderung der unkontrollierten thermischen Erwärmung mit anschließendem Batteriebrand oder Batterieexplosion sowie die Vermeidung frei liegender Hochspannung. Unabhängig davon befinden sich Batteriezellen, welche einen Festkörperelektrolyten verwenden, in der Entwicklung. Festkörperelektrolyten haben gegenüber den Flüssigelektrolyten den Vorteil, dass sie nicht entzündbar sind und auch nicht auslaufen können [7]. Auch wird an Batteriezellen geforscht, die als Elektrodenmaterial Magnesium statt des leicht entzündlichen Lithiums verwenden. Ein weiterer Vorteil hierbei ist, dass Magnesium-Anoden keine Dendrite bilden [12]. Wie auch immer zukünftige Batteriesysteme aussehen werden, gilt es für jedes Batteriesystem die jeweiligen spezifischen Sicherheitsprobleme zu lösen.

Nicht-Patentliteratur

- [1] KARLE, Anton.: „Elektromobilität – Grundlagen und Praxis“, Hanser Verlag, München 2017
- [2] RAHN, Christopher D. et al.: „Battery Systems Engineering“, Wiley 2013
- [3] OCHS, Dirk: „Traktionsbatterien – Schlüssel für die Elektromobilität“, Erfinderaktivitäten 2017, Deutsches Patent- und Markenamt 2017
- [4] WANG, Quingsong et al.: “Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery” Journal of Power Sources 2008, 2012

- [5] KUNKELMANN, Jürgen: „Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen“ Brandschutzforschung der Bundesländer, Forschungsbericht Nr. 175, Karlsruhe 2016
- [6] „Die Quellen des Lithiums“, Spektrum der Wissenschaft 5, 2019, 6
- [7] TAKADA, Kazunori: “Progress and prospective of solid-state lithium batteries” Acta Materialia 61, 2013
- [8] SATTLER, Heiko: „Elektrische Sicherheit“ in: Korthauer, Reiner (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Springer Vieweg, 2013
- [9] FLEISCHHAMMER, Meike et al.: „Chemische Sicherheit“ in: Korthauer, Reiner (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, 2013
- [10] VOGT, Michael: „Funktionelle Sicherheit von Fahrzeugen“ in: Korthauer, Reiner (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Springer Vieweg, 2013
- [11] VEZZINI, Andrea: „Mobilität und erneuerbare Energie – Elektrofahrzeuge“ Phys. Unserer Zeit 41, 2010
- [12] SCHLICHTMEIER, Tobias: „Magnesium-Batterien: Aufbruch ins Post-Lithium-Zeitalter“, Elektronik 6, 2019

Autonome Straßenfahrzeuge

Dr. Nina Tetzlaff, Patentabteilung 1.56

Seit einigen Jahren schreitet die Entwicklung selbstfahrender – autonomer – Kraftfahrzeuge rasant voran. Die Zahl der Patentanmeldungen auf diesem Gebiet hat sich in den letzten zehn Jahren mehr als verdoppelt. Durch Weiterentwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und einer Vernetzung der am Straßenverkehr beteiligten Komponenten steht das autonome Straßenfahrzeug, das zum Transport von Personen eingesetzt wird, bereits in den Startlöchern. Vorteile wie eine ökonomische und sichere Fahrweise liegen klar auf der Hand. Doch brächte die Einführung autonomer Fahrzeuge auf unseren Straßen auch Probleme mit sich wie das Verhalten autonomer Autos in unausweichlichen Gefahren- beziehungsweise Unfallsituationen, sogenannten „Dilemmasituationen“.

Dieser Artikel soll insbesondere anhand von Beispielen aus der Patentliteratur einen Überblick über die Entwicklung auf dem Gebiet des autonomen Fahrens im Straßenverkehr geben.

1 Einleitung

„Des Deutschen liebstes Kind“ – Das Auto ist das wichtigste Verkehrsmittel in Deutschland. Lange Zeit galt das Auto als Symbol für Freiheit und Unabhängigkeit. Auch steht es für Dynamik, Status, Lebensstil und Spaß. Die Beziehung vieler Menschen zu ihrem Auto ist sehr emotional. Doch scheint sich das Verhältnis des Menschen zu seinem Auto allmählich zu verändern. Fragen wie Umweltverträglichkeit und Sicherheit im Straßenverkehr rücken zunehmend in den Vordergrund. In diesem Zusammenhang rückt auch das autonome Automobil, ein Fahrzeug, welches ohne Zutun des Menschen von A nach B fährt, ins Rampenlicht.

Vorteile durch autonome Fahrzeuge im Straßenverkehr sind ohne Zweifel gegeben. So weisen durch Computer gesteuerte Autos eine ökonomischere und effizientere Fahrweise auf als von Menschenhand gesteuerte Fahrzeuge [1], [2]. Auch wenn es um sicheres Fahren geht, sind autonome Fahrzeuge zu bevorzugen. Eine US-Studie zeigte auf, dass über 90% der Verkehrsunfälle auf Fehler menschlicher Fahrer zurückzuführen sind. So sind die Hauptursachen für Unfälle im Straßenverkehr Alkohol, überhöhte Geschwindigkeit und Ablenkung des Fahrers [1]. Diese Faktoren entfielen bei einem durch einen Computer gesteuerten Fahrzeug.

Weitere Vorteile betreffen die Verminderung von Stress beim Fahren, zum Beispiel in Stausituationen oder bei der Parkplatzsuche. Auch wird darüber diskutiert, dass beim Einsatz autonomer Fahrzeuge Personen, welche nicht fahrtüchtig oder nur eingeschränkt fahrtüchtig sind wie Kinder und ältere Menschen, mit einem Automobil sein könnten [1], [3].

Das erste selbstfahrende Auto fuhr bereits in den frühen 1980er Jahren auf Autobahnabschnitten, die noch nicht für den Verkehr freigegeben waren. Der Robotiker Ernst Dickmanns wurde durch sein Versuchsfahrzeug VaMP (deutsch VaMoRs für „Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen“) zum Pionier auf dem Gebiet der autonomen Straßenfahrzeuge. VaMP fuhr bereits ab 1986 auf Teststrecken und wurde in den 1990er Jahren im Rahmen des EUREKA-PRO-METHEUS-Projekts weiterentwickelt. 1994 legte es bereits verkehrsreiche längere Strecken autonom mit Geschwindigkeiten von bis zu 130 km/h zurück. Eingriffe eines menschlichen Fahrzeugführers waren aber noch vorhanden [4]–[7].

In den Jahren 2004, 2005 und 2007 wurde in den USA die DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency* – Behörde, die Forschungs-Projekte für die Streitkräfte der Vereinigten Staaten durchführt)

Grand Challenge ausgetragen, ein Wettbewerb für unbemannte Landfahrzeuge zur Unterstützung der Entwicklung autonomer Fahrzeuge [8].

Im Januar 2015 stellte Audi auf der CES (*Consumer Electronics Show* – Fachmesse für Unterhaltungselektronik) in Las Vegas die ersten seriennahen autonomen Fahrzeuge vor, welche mehrere hundert Kilometer Highway durch die Wüste von Nevada völlig autonom fahren [9].

Der Weg zum vollautomatisierten Fahrzeug beginnt bei den Fahrerassistenzsystemen, welche im Laufe der Weiterentwicklung immer mehr Aufgaben im Fahrzeug übernehmen. Die Norm SAE J3016 klassifiziert das autonome Fahren in sechs Stufen (Tabelle 1) [10]. Eine ähnliche Klassifikation wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vorgenommen, wobei dort jedoch kein fahrerloses Fahren (Stufe 5 der Klassifizierung nach SAE J3016) enthalten ist [11].

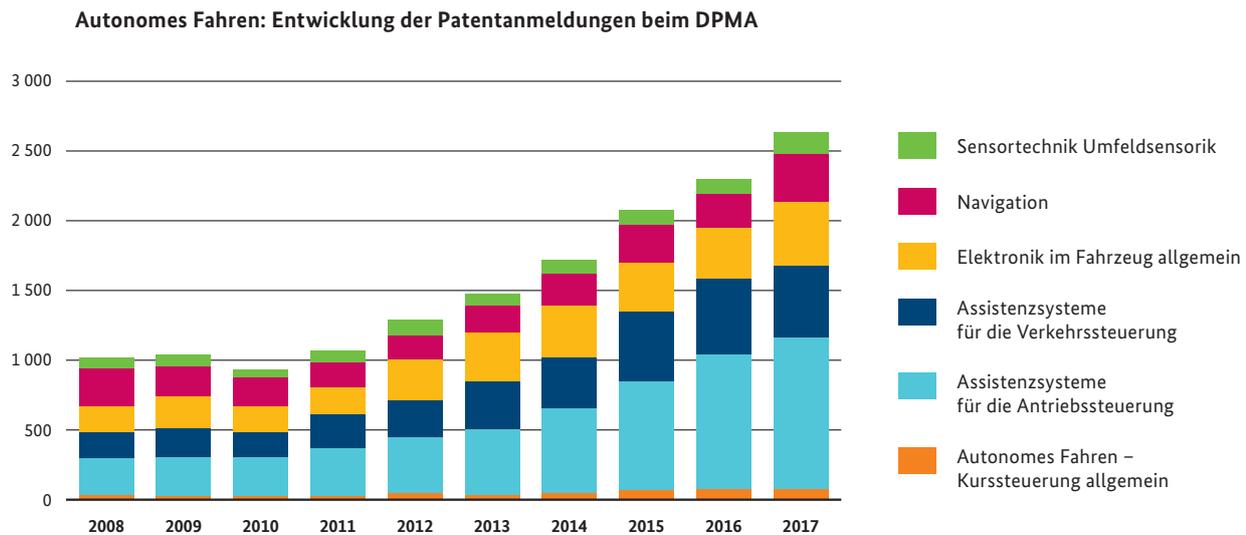
Die Zahl der Patentanmeldungen, welche sich mit autonomem Fahren befassen, hat sich in den letzten zehn Jahren weit mehr als verdoppelt (Fig. 1). Die Anmeldungen liegen dabei auf den Gebieten der Assistenzsysteme für die Antriebssteuerung von Kraftfahrzeugen und für die Verkehrssteuerung sowie der Elektronik im Fahrzeug, Navigationsanwendungen, Sensortechnik und Kurssteuerung [12].

52 Prozent der zum Thema autonomes Fahren weltweit eingereichten Patentanmeldungen entfallen auf deutsche Hersteller [13]. Dabei nehmen drei deutsche Unternehmen die ersten drei Plätze ein [13]. Deutschland spielt demnach eine gewichtige Rolle in der Entwicklung des autonomen Fahrens.

Diese Entwicklung bringt jedoch auch Probleme mit sich. Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, sammelt ein autonomes Fahrzeug eine große Menge an Daten, welche das Fahrzeug selbst und seine Umgebung

Tabelle 1: Autonomiestufen nach SAE J3016 [10]

SAE-Stufe	Name	Beschreibung	Quer-/Längsführung	Umgebungsbeobachtung	Rückfallebene
0	Keine Automatisierung	Menschlicher Fahrer mit unterstützenden Systemen wie ABS oder ESP	Fahrer	Fahrer	keine
1	Fahrerassistenzsysteme	Menschlicher Fahrer mit Fahrerassistenzsystemen zur Längs- oder Querführung	Fahrer und System	Fahrer	Fahrer
2	Teilautomatisierung	Menschlicher Fahrer mit Fahrerassistenzsystemen zur gleichzeitigen Längs- und Querführung	System	Fahrer	Fahrer
3	Bedingte Automatisierung	Automatisiertes Fahren, wobei der menschliche Fahrer auf Anforderung zum Eingreifen reagieren muss.	System	System	Fahrer
4	Hohe Automatisierung	Automatisiertes Fahren, wobei der menschliche Fahrer auf Anforderung zum Eingreifen nicht reagieren muss; reagiert der Fahrer nicht, steuert das Fahrzeug weiterhin autonom.	System	System	System
5	Vollautomatisierung	Vollständig automatisiertes Fahren wie von einem menschlichen Fahrer	System	System	System



Figur 1: Entwicklung der Anmeldezahlen der Patentanmeldungen beim DPMA auf den Gebieten, die autonomes Fahren umfassen [12].

betreffen. Diese Daten werden verarbeitet und können gespeichert werden. Daher muss eine Regelung des Datenschutzes stattfinden. Auch der Betrieb vollautomatisierter Fahrzeuge im Straßenverkehr, insbesondere dann, wenn nicht autonome Verkehrsteilnehmer am Verkehrsgeschehen beteiligt sind wie Fußgänger oder durch menschliche Fahrer gesteuerte Fahrzeuge, ist noch nicht geregelt. Beispielsweise spielt in diesem Zusammenhang das Verhalten automatisierter Fahrzeuge in unausweichlichen Gefahren- beziehungsweise Unfallsituationen, sogenannten Dilemmasituationen, eine Rolle. Auch rechtliche und versicherungstechnische Fragestellungen ergeben sich. Der Bericht der Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ der BASt geht auf die Problematik autonomer Fahrzeuge im Straßenverkehr ein [11]. Nach derzeitiger Rechtslage muss der Fahrer jederzeit die Steuerung seines Fahrzeugs übernehmen können.

Dieser Artikel soll einen Überblick über Entwicklungen auf dem Gebiet des autonomen Fahrens im Straßenverkehr bieten. Dabei wird überwiegend auf Schriften aus der Patentliteratur eingegangen und deren Inhalte zumeist exemplarisch vorgestellt. Kapitel 2 umfasst das automatisierte Parken, die erste Anwendung des autonomen Fahrens, welche bereits in modernen Fahrzeugen verfügbar ist. Das anschließende Kapitel 3 beschäftigt sich mit autonomen Fahrzeugen im Straßenverkehr, wobei insbesondere auf die Erfassung

der Fahrsituation sowie die Vernetzung verschiedener Verkehrskomponenten anhand von Beispielen aus der Patentliteratur eingegangen wird. Im vierten Kapitel werden Schriften aus der Patentliteratur vorgestellt, welche gesellschaftliche Fragestellungen ansprechen. So werden Beispiele vorgestellt, welche sich mit der Steigerung der Akzeptanz des autonomen Fahrens in der Bevölkerung befassen. Des Weiteren wird auf die Themen Manipulationssicherheit und Datenschutz eingegangen, zu denen ebenfalls exemplarisch Druckschriften aus der Patentliteratur vorgestellt werden. Ein kurzer Ausblick schließt den Artikel ab.

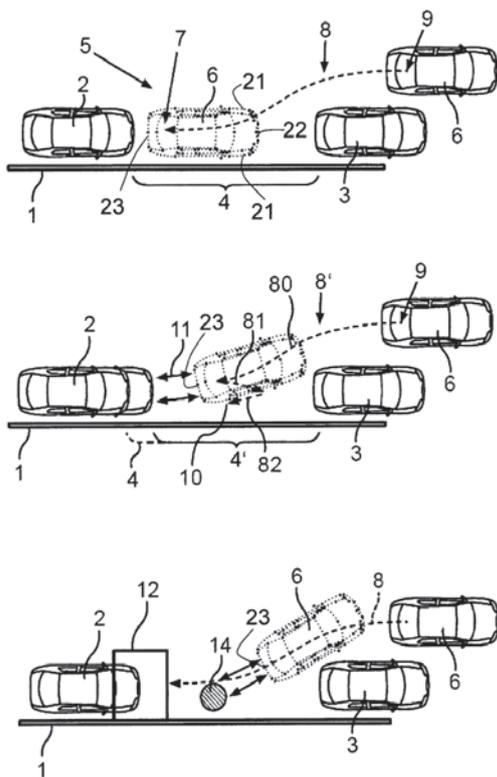
2 Autonomes Parken

2.1 Einparkvorgänge

Eine Anwendung des autonomen Fahrens, die seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlich ist, betrifft das automatisierte Einparken [14]–[18]. Hier aktiviert der (mitunter nicht mehr im Fahrzeug befindliche) Benutzer mit einer Fernbedienung oder seinem Smartphone den Autopiloten zum Einparken. Die Fahrzeughersteller bieten unterschiedliche Systeme an, wobei bei einigen bereits das selbstständige Einparken des Fahrzeugs aus der Fahrsituation der Parkplatzsuche möglich ist. Das Fahrzeug muss dann langsam an möglichen Parkplätzen vorbeifahren werden und

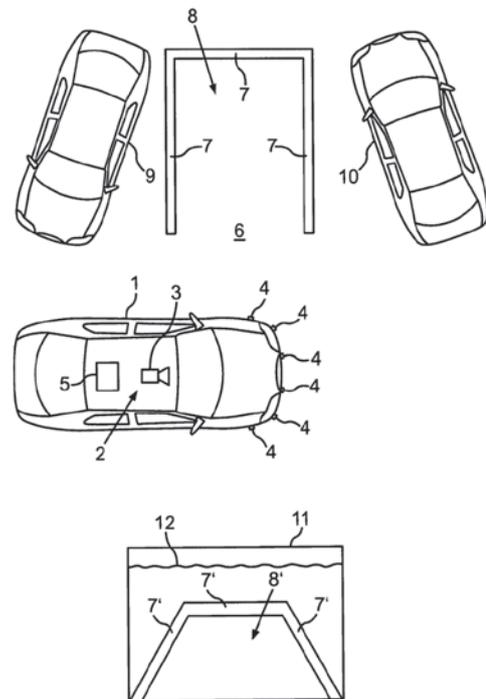
erkennt selbständig eine geeignete Lücke, in welche es eigenständig einparkt [14]–[18].

In der Patentliteratur findet man bereits aus den frühen 2000er Jahren Anmeldungen, welche Verfahren zum autonomen Parken beschreiben. Beispielsweise schlägt die Veröffentlichung DE 10 2004 007 850 A1 ein Verfahren zur Unterstützung des Fahrers bei einem Einparkvorgang vor, wobei zunächst die Parklücke mittels der Sensorik des Fahrzeugs vermessen wird und das Steuergerät des Fahrzeugs entscheidet, ob die Parklücke zum Einparken geeignet ist. Danach wird eine Bewegungsbahn (im Folgenden auch als Sollbahn oder Trajektorie bezeichnet) berechnet und der Parkvorgang wird gestartet. Falls eine Unterbrechung oder ein Abbruch des Parkvorgangs (durch den Fahrer) erfolgt, überprüft das Steuergerät des Fahrzeugs, ob der Parkvorgang abgeschlossen wurde oder ob Korrekturen vorzunehmen sind. Ist Letzteres der Fall, wird eine neue Sollbahn des weiteren Parkvorgangs bestimmt und dieser fortgeführt. Die Veröffentlichung DE 10 2010 047 161 A1 lehrt ein ähnliches Verfahren, wobei das Fahrzeug selbständig Hindernisse erkennt (Figur 2).



Figur 2: Autonome Parkvorgänge eines Fahrzeugs in Parklücken in Längsrichtung mit Berücksichtigung von Hindernissen (DE 10 2010 047 161 A1)

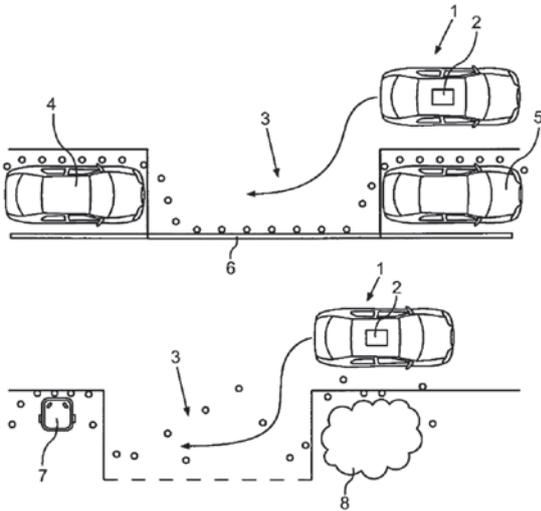
Die für solche Anwendungen verwendeten Umfeldsensoren sind in der Regel Abstandssensoren wie beispielsweise Ultraschallsensoren oder Radarsensoren. Zur zuverlässigen Erfassung einer Parklücke auch in Fällen, in denen die umgebenden Fahrzeuge schräg stehen, schlägt die Veröffentlichung DE 10 2013 021 326 A1 vor, ein zweidimensionales Abbild von Markierungen auf dem Boden zu erfassen (Figur 3). In Kombination mit Abstandssensoren ist es möglich, zu unterscheiden, ob die Markierung auf dem Boden aufgebracht ist oder ob es sich um ein auf dem Boden stehendes Objekt handelt. Markierungen können somit sicher erkannt werden, wodurch das Fahrzeug gerade zwischen anderen Fahrzeugen einparken kann.



Figur 3: Erfassung einer Parklücke durch Detektion einer auf dem Boden befindlichen Markierung (DE 10 2013 021 326 A1)

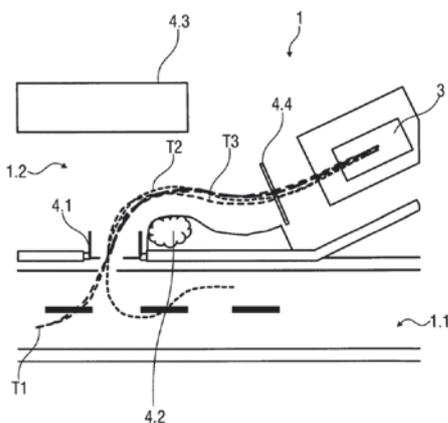
Die Zuverlässigkeit der Umgebungserfassung ist essentiell für einen autonomen Fahrvorgang. Im Falle eines Einparkvorgangs müssen die Ausmaße des zur Verfügung stehenden Parkraums genau bekannt sein und Hindernisse müssen sicher erkannt werden. In diesem Zusammenhang schlägt die Veröffentlichung DE 10 2011 112 149 A1 vor, die Zuverlässigkeit der Umgebungserfassung zu ermitteln. Abhängig von dem ermittelten Zuverlässigkeitswert entscheidet der Autopilot, ob ein autonomer Parkvorgang möglich ist

oder ob lediglich ein semiautonomer Parkvorgang durchgeführt werden kann, bei dem der Fahrer mit Unterstützung des Einparkassistenten agiert (Figur 4).



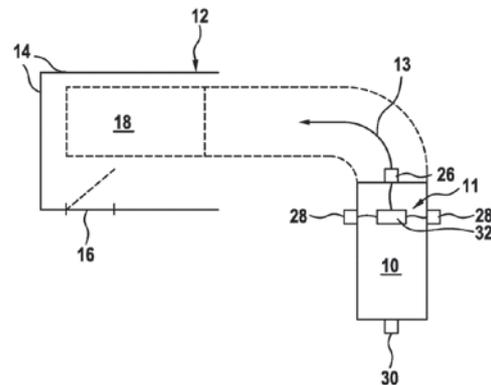
Figur 4: Erfassung der Umgebung zur Vermessung einer Parklücke, um zu entscheiden, ob ein automatisierter Parkvorgang durchgeführt werden kann (DE 10 2011 112 149 A1).

Zur verbesserten Umgebungserfassung bei wiederkehrenden Parkvorgängen schlägt die Veröffentlichung DE 10 2014 014 219 A1 vor, die Umgebung des Fahrzeugs während einer Lernfahrt zu erfassen und zu speichern (Figur 5). Erkannte Hindernisse werden in „passierbar“ (zum Beispiel Bordstein) und „nicht passierbar“ (zum Beispiel Bäume) klassifiziert. Eine Einparktrajektorie wird ermittelt und gespeichert. Jedes Einparkmanöver stellt wiederum eine erneute Lernfahrt dar, wobei die gespeicherten Umgebungsdaten stets aktuell gehalten und verbessert werden.



Figur 5: Umgebungserfassung während einer Lernfahrt mit Klassifizierung passierbarer und nicht passierbarer Hindernisse (DE 10 2014 014 219 A1)

Die Veröffentlichung DE 10 2011 084 588 A1 beschreibt ein Verfahren zum Einparken in einem geschlossenen Bereich, in dem zudem ein schwenkbares Objekt, beispielsweise eine Tür, vorhanden ist. Der Parkbereich wird hierzu während des Anfahrens bildlich erfasst und ein schwenkbares Objekt erkannt. Abhängig von dessen Position wird eine Zielparkposition und eine Einparktrajektorie ermittelt und der Einparkvorgang autonom ausgeführt (Figur 6).

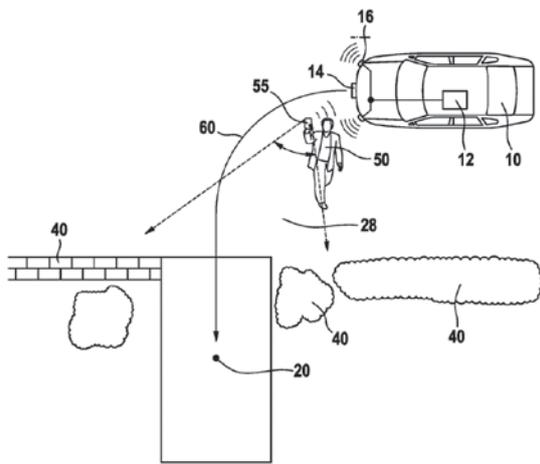


Figur 6: Berücksichtigung eines schwenkbaren Objekts, beispielsweise einer Tür, bei der Bestimmung der Zielparkposition (DE 10 2011 084 588 A1)

Möglichkeiten der Fahrzeugbedienung durch einen Benutzer außerhalb des Fahrzeugs ergeben sich durch die Verwendung von Fernbedienungen. Diese können beispielsweise als Mobiltelefon oder elektronischer Schlüssel vorliegen.

Beispielsweise beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2014 200 611 A1 die Aktivierung des autonomen Parkvorgangs mittels eines mobilen Geräts, welches der Nutzer bedient. Zuvor nimmt dieser mit dem mobilen Gerät Umfeldinformationen des Parkbereichs auf und legt die Zielposition fest. Während des Parkvorgangs findet ein ständiger Vergleich der vom Benutzer erfassten Daten mit Umfelddaten, die durch das Fahrzeug während der Fahrt erfasst werden, statt (Figur 7).

Die Veröffentlichung DE 10 2014 116 854 A1 beschreibt ein Verfahren, wobei ein autonomer Parkvorgang abhängig von Gesten einer Person, die vom Fahrzeug in einem Bild erfasst werden, durchgeführt wird. So bewirkt ein Heranwinken den Start des autonomen Vorgangs und durch eine Anhaltegeste wird das Fahrzeug gestoppt

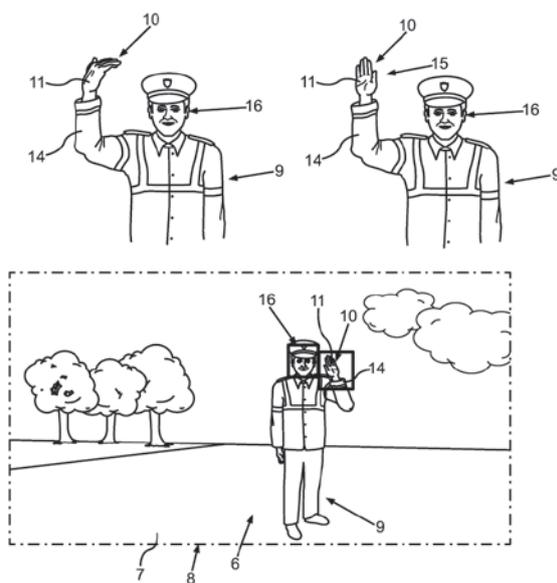


Figur 7: Erfassung des Umfelds der Zielparkposition mittels eines mobilen Geräts durch den Benutzer außerhalb des Fahrzeugs (DE 10 2014 200 611 A1)

(Figur 8). Die Festlegung einer Zielparkposition mittels Gesten auf einem Touchpad wird durch die Veröffentlichung DE 10 2016 205 286 A1 vorgeschlagen (Figur 9).

2.2 Parkraumverwaltung

Autonomes Fahren kann bei der Verwaltung von Parkraum eine große Rolle spielen. So kann der Benutzer das Fahrzeug an einem Abgabeort verlassen, dieses fährt selbständig zu einem Parkplatz und nach Beendigung des Parkvorgangs auch selbstständig wieder zu



Figur 8: Steuerung eines autonomen Parkmanövers mittels der Erkennung von Gesten einer außerhalb des Fahrzeugs befindlichen Person (DE10 2014 116 854 A1)

einem Abholort. Zum einen erspart dies dem Nutzer die Parkplatzsuche. Zum anderen können Fahrzeuge näher beieinander abgestellt werden, da die Insassen nicht ein- und aussteigen müssen, während das Fahrzeug in der Parklücke steht. Der Parkraum kann somit optimal genutzt werden. Eine große Anzahl von Schriften in der Patentliteratur beschäftigen sich mit diesem sogenannten „Automated Valet Parking“ (AVP).

Die Veröffentlichung DE 10 2013 222 071 A1 schlägt ein System zur Parkraumverwaltung vor, bei welchem der Fahrer an einer Abgabeposition sein Fahrzeug abstellt und an das Parkverwaltungssystem übergibt. Dieses berechnet eine Trajektorie zu einem freien Parkplatz und übergibt sie an das Fahrzeug, welches daraufhin entlang dieser Trajektorie autonom den ihm zugewiesenen Parkplatz anfährt. Während der Fahrt findet eine Umfeldüberwachung durch das Fahrzeug zur Kollisionsvermeidung mit etwaigen Hindernissen statt. Möchte der Besitzer das Fahrzeug abholen, sendet er mit einem mobilen Gerät eine Anfrage an das Parkverwaltungssystem. Im Rahmen dieser Anfrage kann er eine Abholzeit festlegen. Alternativ wird anhand der Position des Fahrzeugbesitzers eine Abholzeit berechnet und

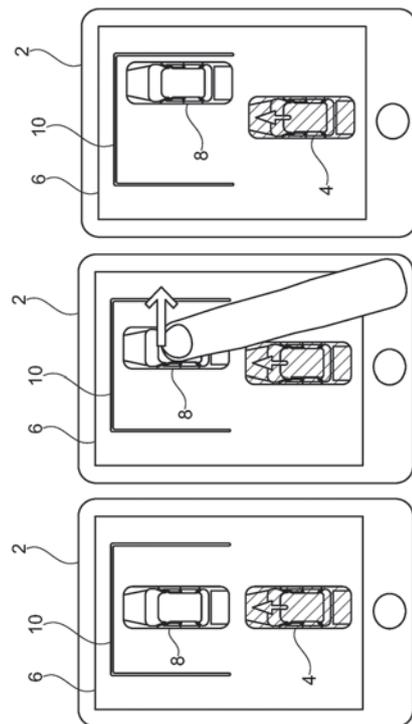
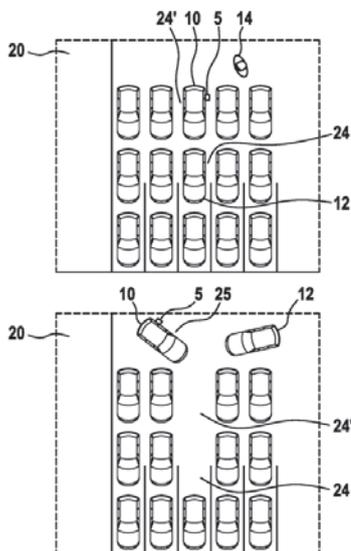


Fig. 9: Einstellung der gewünschten Parkposition mittels Touchpad eines mobilen Geräts (DE 10 2016 205 286 A1)

ihm vorgeschlagen. Nimmt der Fahrzeugbesitzer den Vorschlag an, kommt sein Fahrzeug zur vereinbarten Abholzeit selbstfahrend am Abholort an.

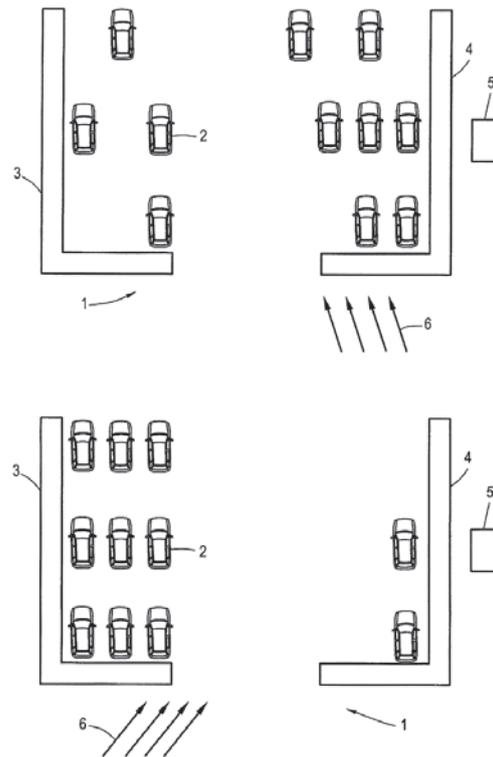
Zur optimalen Nutzung einer Parkfläche im Mischbetrieb mit automatisiert und manuell gesteuerten Fahrzeugen schlägt die Veröffentlichung DE 10 2017 204 162 A1 vor, die Parkfläche vollständig auszunutzen. Hierbei werden Parkplätze, die ein anderes Fahrzeug blockieren können, von autonomen Fahrzeugen besetzt. Bei Bedarf parkt ein solches aus und lässt das manuell gesteuerte Fahrzeug passieren (Figur 10). Die Anforderung zum Ausparken erfolgt durch Betätigung eines hierfür eingerichteten Bedienelements am autonomen Fahrzeug.



Figur 10: Optimale Ausnutzung einer Parkfläche mit Mischbetrieb, das heißt im Betrieb mit automatisiert und manuell gesteuerten Fahrzeugen (DE 10 2017 204 162 A1)

Die Fähigkeit der Umgebungsbeobachtung durch ein Fahrzeug mittels seiner Sensoren zusammen mit der Fähigkeit, dass sich das Fahrzeug autonom bewegt, bietet Möglichkeiten einer weiteren Optimierung des Parkens und Verbesserung des Komforts für die Fahrzeugbenutzer. So schlagen beispielsweise die Veröffentlichungen DE 10 2015 003 888 A1, DE 10 2015 217 033 A1, DE 10 2015 224 429 A1 und DE 10 2014 001 554 A1 Verfahren vor, bei denen das Fahrzeug abhängig von Umgebungseinflüssen – wie Parkbeschränkungen, mögliche Behinderungen anderer oder Wetterbedingungen – autonom umparkt (Figur 11). Damit der Benutzer sein Fahrzeug wiederfindet, wird gemäß der Veröffentlichung

DE 10 2015 003 888 A1 das Fahrzeug nach einer bestimmten Zeitspanne oder unter Berücksichtigung des Bewegungsprofils des Benutzers autonom an den Ausgangsort zurückverbracht. Gemäß der Veröffentlichung DE 10 2015 224 429 A1 wird bei der Wahl eines geeigneten Stellplatzes die Aufheizung des Fahrzeuginnenraums berücksichtigt.



Figur 11: Autonomes Umparken von Fahrzeugen in Abhängigkeit von Wettereinflüssen, beispielsweise Sonneneinstrahlung oder Hagel, auf besser bewertete freie Parkplätze (DE 10 2014 001 554 A1)

Autonome Parkvorgänge bieten folglich eine Steigerung des Komforts für die Benutzer und eine optimale Parkraumausnutzung.

3 Autonome Fahrzeuge im Straßenverkehr

Die Sicherheit von anderen Verkehrsteilnehmern ist ein wesentlicher Aspekt bei der Weiterentwicklung autonomer Straßenfahrzeuge. Ein Automobil, welches sich automatisiert im Straßenverkehr bewegt, muss sicherstellen, dass auch unerwartete Situationen oder auftretende Hindernisse erkannt werden und das Fahrzeug seine Bewegung entsprechend anpasst.

Zusätzlich zu einer präzisen Beobachtung und Erfassung der Fahrzeugumgebung ist eine präzise Ortsbestimmung notwendig, damit sich ein Auto autonom im Straßenverkehr bewegen kann. In der Regel erfolgt die Positionsbestimmung in Fahrzeugen mittels eines globalen Positionsbestimmungssystems, zum Beispiel *Global Positioning System (GPS)*. Dessen Genauigkeit ist jedoch auf einige Meter beschränkt, was für den Betrieb eines autonomen Fahrzeugs nicht ausreichend ist. Auch schlägt das Verfahren fehl, wenn eine Unterbrechung des Empfangs der GPS-Signale stattfindet wie bei der Durchfahrt eines Tunnels oder in einem Parkhaus.

Eine Verbesserung der Genauigkeit der Positionsbestimmung kann durch den Einsatz des sogenannten differentiellen GPS erreicht werden. Hierbei werden mit Hilfe von ortsfesten Referenzstationen die Abweichungen der GPS-Daten ermittelt und korrigiert [19], [20]. In vielen Fahrzeugen wird das GPS-System mit einem sogenannten Koppelnavigationssystem kombiniert. Bei der Koppelnavigation werden die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung des Fahrzeugs beispielsweise mittels eines Drehratenmessers bestimmt. Hierdurch kann der Weg zwischen zwei Punkten interpoliert werden oder eine Extrapolation ausgehend von einem Startpunkt erfolgen. Dadurch ist auch eine Navigation möglich, wenn der Empfang der GPS-Signale unterbrochen ist. Durch die Kombination der verschiedenen Systeme wird eine Redundanz erreicht, wodurch Fehler erkannt werden und die Genauigkeit gesteigert wird [20].

Die Veröffentlichung DE 10 2015 221 551 A1 schlägt ein System zur Verbesserung der Bestimmung einer Fahrzeugposition unter Verwendung eines Koppelnavigationssystems vor, wobei die vertikale Position eines Fahrzeugs, beispielsweise in einem Parkhaus, erkannt wird. Dies erfolgt durch die Messung des Neigungswinkels des Fahrzeugs, wenn es auf einer Rampe in das Parkhaus hineinfährt. Die Kombination der gemessenen Neigungsänderungen und der Koppelnavigation führen zu einer effizienten Bestimmung der Fahrzeugposition auch in vertikaler Richtung, wodurch der Benutzer das Fahrzeug leichter wiederfinden kann.

Alternativ oder zusätzlich werden bei der Fahrzeugnavigation sogenannte Map-Matching-Verfahren ein-

gesetzt. Hierbei wird die GPS-Position mit einer Karte korreliert und die wahrscheinlichste Position des Fahrzeugs auf einer Straße dargestellt [20], [21].

Die Veröffentlichung DE 10 2017 203 151 A1 beschreibt in diesem Zusammenhang ein System, welches die durch ein globales Positionsbestimmungssystem ermittelte Position in eine Navigationskarte einträgt, sodass eine (ungefähre) Fahrzeugposition in der Karte festgelegt ist. Aus Sensordaten des Fahrzeugs werden Umgebungsinformationen erzeugt, welche mit den in den Kartendaten hinterlegten Umgebungsinformationen abgeglichen werden. Dies erfolgt so, dass eine bestmögliche Überlagerung gefunden wird. Hierdurch ist es möglich, eine sehr präzise Fahrzeugposition zu bestimmen.

Die Zuverlässigkeit der Erfassung einer Fahrsituation muss bei einer autonomen Fahrt gegeben sein. Dies wird zum einen dadurch erreicht, dass Sensoren immer redundant im Fahrzeug verbaut sind. Zudem sind Systeme bekannt, welche die Funktionsfähigkeit der Sensoren und weiterer Fahrzeugkomponenten überwachen. Beispielsweise offenbart die Veröffentlichung DE 10 2016 214 123 A1 ein System zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der fahrzeugeigenen Sensoren. Diese kann beispielsweise durch Witterungsbedingungen beeinflusst sein. Wird in einer Fahrsituation eine größere Leistungsfähigkeit des betreffenden Sensors benötigt, zum Beispiel eine größere Reichweite oder eine höhere räumliche oder zeitliche Auflösung, wird die Leistungsfähigkeit des Sensors angepasst, falls dies möglich ist. Dies erfolgt beispielsweise durch Ausklappen des Sensors aus seinem Gehäuse oder eines weiteren (gleichen) Sensors, wodurch eine zuvor bestehende teilweise Verdeckung des Sensors reduziert wird.

Die Veröffentlichung DE 10 2017 213 496 A1 beschreibt ein System, das ein bevorstehendes sicherheitsrelevantes Fahrzeugmanöver erkennt und die benötigten Fahrzeugkomponenten bestimmt. Dies erfolgt mit Hilfe verschiedener fahrzeugeigener Sensoren oder auch externer Quellen. Des Weiteren werden möglicherweise auftretende Fehler und Fehlfunktionen ermittelt und alternative Aktionen festgelegt, welche im Fehlerfall ausgeführt werden und das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführen. Beispielsweise

kann bei einem Ausfall des Lenksystems ein diagonales oder einseitiges Bremsen eingesetzt werden, um das Fahrzeug in eine sichere Position zu bringen.

Ein „virtuelles Abschleppen“ schlägt die Veröffentlichung DE 10 2014 210 147 A1 vor. Falls ein Sensor während einer autonomen Fahrt ausfällt oder ein Fehler auftritt, wird von einem vorausfahrenden Fahrzeug ein Sensorsignal empfangen, welches zur weiteren autonomen Fahrt in Form eines virtuellen Abschleppens verwendet wird.

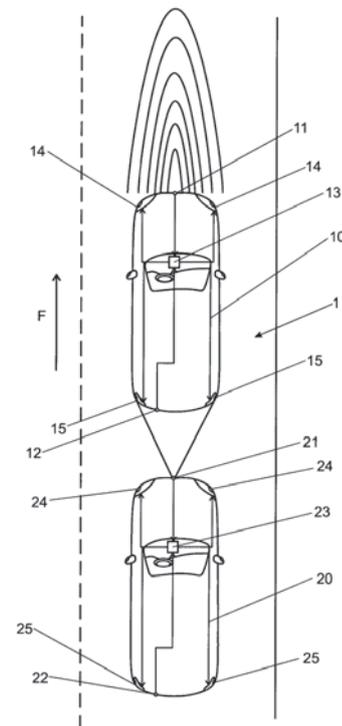
Der Bezug von Sensordaten, die durch externe Datenquellen erfasst wurden, ist ein wichtiges Werkzeug beim Betrieb eines autonom fahrenden Automobils. Diverse Beispiele sind hierzu in der Patentliteratur zu finden. Die Vernetzung eines Fahrzeugs mit externen Datenquellen ermöglicht eine Erhöhung der Reichweite der im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Sensordaten. Im nachfolgenden Kapitel 3.2 wird noch einmal gesondert auf diese Thematik eingegangen.

3.2 Vernetzung und Kooperation

Im Straßenverkehr findet eine ständige Kommunikation der Verkehrsteilnehmer untereinander statt: sei es bei der Abstimmung der Vorfahrtsberechtigung bei gleichrangigen Straßen, beim Einfädeln auf eine Fahrspur oder beim Überholen. Auch nichtmotorisierte Personen nehmen am Straßenverkehr teil, wobei hier die Kommunikation eine entscheidende Rolle spielt, zum Beispiel beim Überqueren einer Straße. Zumeist erfolgt diese Kommunikation der Verkehrsteilnehmer über Gesten, Blickkontakt oder Lichtzeichen. Beim Betrieb autonom fahrender Fahrzeuge ist ein kooperativer Austausch mit anderen Verkehrsteilnehmern ebenfalls notwendig, um einen sicheren Ablauf im Straßenverkehr zu gewährleisten, allerdings mit entsprechenden technischen Mitteln wie leistungsfähigen Kommunikationsnetzwerken. Da die Reichweite fahrzeugeigener Sensoren begrenzt ist, werden fahrzeugexterne Sensordaten über diese Kommunikationsnetzwerke bezogen. Hierbei erfolgt der Austausch von Daten mit anderen Fahrzeugen oder Anlagen zur Verkehrssteuerung (Ampeln oder Wechselverkehrs-

zeichen, im Folgenden meist unter dem Begriff Infrastruktureinheiten zusammengefasst). Somit ermöglicht das autonome Fahren nicht nur, Fahrzeuge in einer optimal aufeinander abgestimmten Weise zu betreiben, sondern auch einen optimierten Verkehrsbetrieb zu erreichen. An dieser Stelle werden exemplarisch einige Beispiele aus der Patentliteratur genannt, welche Systeme beschreiben, die einen solchen vernetzten Straßenverkehr unterstützen. Eine ausführliche Diskussion der Thematik findet sich im Artikel von Dr. W. Domanko mit dem Titel „Schwarmintelligenz im Straßenverkehr“, der ebenfalls Bestandteil dieser Ausgabe der Erfinderaktivitäten ist.

Die Veröffentlichung DE 10 2016 009 707 A1 beschreibt ein System zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen, wobei die von einem vorausfahrenden Fahrzeug erfassten Umfelddaten einem anderen nachfolgenden Fahrzeug zur Verfügung gestellt werden (Figur 14).

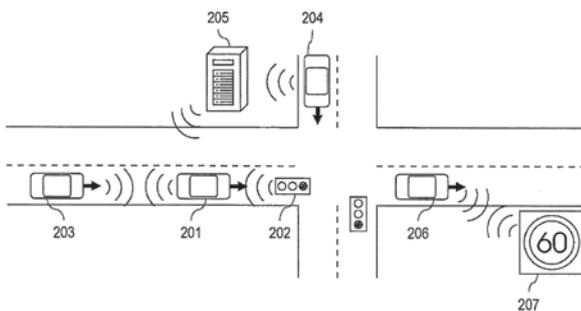


Figur 14: Bereitstellung von Umfelddaten durch ein anderes Fahrzeug (DE 10 2016 009 707 A1)

Auch die Veröffentlichung DE 10 2008 042 565 A1 beschreibt die Verwendung von Sensordaten externer Quellen wie anderer Fahrzeuge oder Infrastruktureinheiten. Die von extern erhaltenen Sensordaten können

entweder ausschließlich genutzt werden, wenn im eigenen Fahrzeug keine Sensordaten zur Verfügung stehen, oder sie dienen der Ergänzung der vom eigenen Fahrzeug erfassten Sensordaten.

Die Veröffentlichung DE 10 2010 003 249 A1 lehrt ebenfalls ein Kommunikationsverfahren, welches einem Fahrzeug ermöglicht, die Reichweite der ihm zur Verfügung stehenden Sensordaten zu erweitern (Figur 15). Die Umgebungsinformationen werden von Infrastruktureinheiten und anderen Fahrzeugen bereitgestellt (zusammengefasst als Fahrzeug-zu-X-Kommunikation). Auch können Daten weitergeleitet werden, wodurch sich die Reichweite der empfangenen Daten weiter erhöht. Hierdurch sind vorausschauende Fahrmanöver und Fahrтанpassungen möglich.



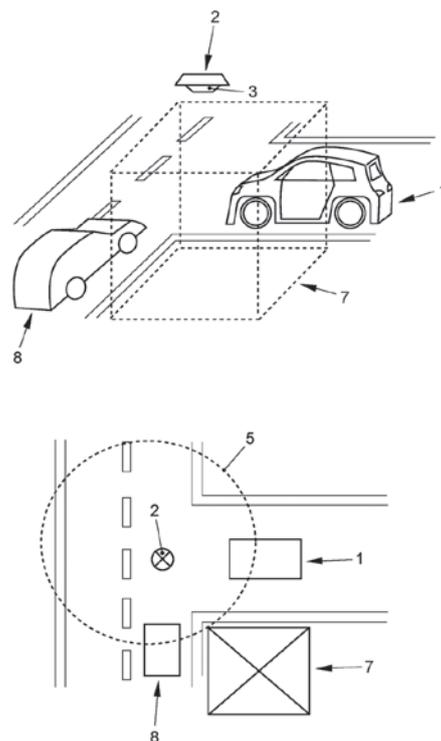
Figur 15: Erweiterung des Sensordaten-Abdeckungsbereichs mittels Fahrzeug-zu-X-Kommunikation (DE 10 2010 003 249 A1)

Andere Systeme, bei denen Daten von externen Quellen empfangen werden, sind beispielsweise aus den Veröffentlichungen DE 10 2014 226 458 A1 und DE 10 2018 007 021 A1 bekannt. Diese beschreiben Systeme, bei welchen das autonom fahrende Fahrzeug mit einer Flugdrohne gekoppelt ist, welche Sensoren zur Umgebungserfassung aufweist. Die Umgebungsdaten der Flugdrohne werden vom Fahrzeug bei der Steuerung berücksichtigt (Figur 16).

Von besonderem Interesse ist der Datenaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinheiten bei der Abstimmung von Manövern in verschiedenen Verkehrssituationen. Hierzu schlägt die Veröffentlichung DE 10 2016 122 686 A1 vor, einen Verkehrsteilnehmer – insbesondere ein Fahrzeug – über eine Verkehrssituation zu informieren, die von einem autonomen Fahr-

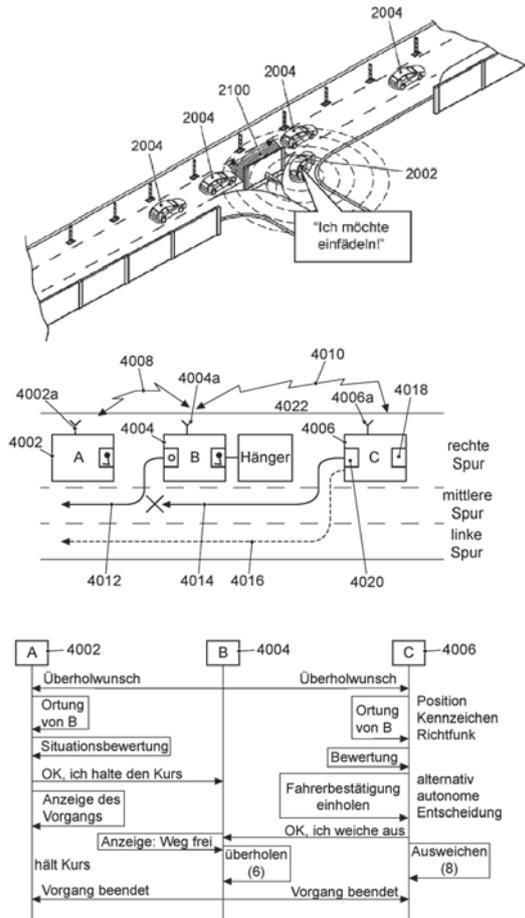
zeug erfasst wurde. Im empfangenden Fahrzeug findet ein Vergleich der empfangenen Daten zu der Verkehrssituation mit den durch ein fahrzeugeigenes Sensorsystem ermittelten Daten zu derselben Verkehrssituation statt. Falls der Vergleich keine Übereinstimmung ergibt, wird eine Warnung an den Benutzer des empfangenden Fahrzeugs ausgegeben. Gegebenenfalls wird das sendende Fahrzeug ebenfalls gewarnt. In diesem Fall können gefährliche Verkehrssituationen, die entstehen können, wenn in einem der Fahrzeuge ein Fehler auftritt, entschärft werden. Ein solcher Fehler kann beispielsweise eine fehlerhafte Ortsbestimmung sein, die eine gefährliche Positionierung des Fahrzeugs zur Folge haben kann.

Ein kooperatives System zum Abstimmen der Fahrmanöver von Fahrzeugen, welche miteinander per Funk kommunizieren können (häufig bezeichnet als Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation), beschreibt auch die Veröffentlichung DE 10 2016 205 142 A1 (Figur 17). Hierbei sendet ein Fahrzeug eine Initialisierungsnachricht aus, welche das beabsichtigte Fahrmanöver enthält. Die Fahrzeuge in der Umgebung des sendenden Fahrzeugs empfangen die Nachricht. Nach einer Analyse der Umgebung und einem Ergebnis, das keine



Figur 16: Umgebungserfassung eines Fahrzeugs mittels einer mit dem Fahrzeug gekoppelten Flugdrohne (DE 10 2018 007 021 A1)

Konflikte oder Gefahrensituationen erkennen lässt, senden die umgebenden Fahrzeuge jeweils eine positive Antwort an das anfragende Fahrzeug aus, in der das angefragte Fahrmanöver akzeptiert wird. Nachdem das anfragende Fahrzeug die Akzeptanznachrichten empfangen hat, wird das Fahrmanöver ausgeführt.



Figur 17: Kooperative Abstimmung von Verkehrsteilnehmern (DE 10 2016 205 142 A1)

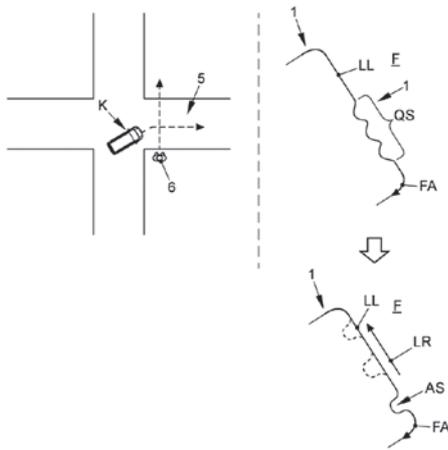
Ein alternatives Steuerungsverfahren für autonome Fahrzeuge beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2017 216 507 A1. Demnach kann je nach Situation die autonome Steuerung eines Fahrzeugs durch das Fahrzeug selbst oder eine zentrale Steuereinheit erfolgen. In bestimmten kritischen Situationen beziehungsweise Gebieten schlägt die Veröffentlichung vor, dass die Fahrzeuge durch die zentrale Steuereinheit gesteuert werden. Dies ermöglicht eine sichere und optimale Steuerung aller autonomer Fahrzeuge gleichzeitig, da eine umfassende Informationslage in der zentralen Steuereinheit zur Verfügung steht.

Ein vollständig automatisierter Straßenverkehr setzt voraus, dass alle Verkehrsteilnehmer automatisiert agieren. Der Verkehr verläuft nach Regeln, wobei in Situationen, in denen die Regelung nicht eindeutig ist, eine Kooperation durch eine Fahrzeug-zu-X-Kommunikation der Verkehrsteilnehmer stattfindet. Jedoch gibt es auf den Straßen auch Verkehrsteilnehmer, die nicht automatisiert handeln wie Radfahrer oder Fußgänger. Auch wird es weiterhin Fahrzeuge geben, die manuell, also durch einen menschlichen Fahrer, gesteuert werden. In diesem Mischbetrieb ist dennoch eine Kommunikation und Kooperation der autonomen und nicht-autonomen Verkehrsteilnehmer möglich.

Die Veröffentlichung DE 10 2017 200 727 A1 beschreibt ein System zur Überwachung eines Parkplatzes, wobei Warnungen und Handlungsanweisungen für nicht-autonome Verkehrsteilnehmer auf einer Anzeigeeinrichtung des Parkplatzes dargestellt werden, um über das Vorhandensein und die Fahrt autonomer Fahrzeuge zu informieren.

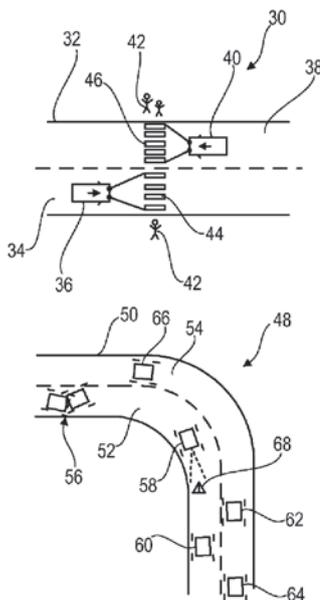
Ein System zur Kommunikation eines autonomen Fahrzeugs mit einem anderen Verkehrsteilnehmer wird durch die Veröffentlichung DE 10 2015 210 780 A1 vorgeschlagen. Ziel der Kommunikation ist es, den anderen Verkehrsteilnehmer zu warnen oder ein kooperatives Fahrmanöver auszuführen. Zusätzlich wird das Ergebnis der Kommunikation im Fahrzeug an die Insassen ausgegeben, um Fahrhandlungen des autonomen Fahrzeugs nachvollziehbar zu gestalten.

Die Veröffentlichung DE 10 2017 216 934 A1 beschreibt ein System zur Erkennung eines Verkehrsteilnehmers durch ein autonomes Fahrzeug, welches ein Signal an den Verkehrsteilnehmer ausgibt, um diesem mitzuteilen, dass er durch das autonome Fahrzeug erkannt wurde. Das Signal wird im vorderen Fahrzeugbereich als Lichtsignal erzeugt, wodurch der Verkehrsteilnehmer aufgefordert wird, ein beabsichtigtes Manöver durchzuführen. Beispielsweise wird ein Fußgänger, der eine Straße überqueren möchte, damit aufgefordert, dies zu tun (Figur 18). Hierdurch wird auch das Vertrauen in autonome Fahrzeuge gesteigert.



Figur 18: Kommunikation eines autonomen Fahrzeugs mit einem Fußgänger (DE 10 2017 216 934 A1)

Ein System, welches andere Verkehrsteilnehmer mittels einer Projektion eines Symbols auf die Straße über eine Verkehrssituation informiert, ist aus der Veröffentlichung DE 10 2017 103 862 A1 bekannt (Figur 19). Die autonom betriebenen Verkehrsteilnehmer stimmen sich mittels einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ab. Die Warnung oder Information von Verkehrsteilnehmern, die nicht an dieser Art der Kommunikation teilnehmen können, erfolgt über die Projektion von Symbolen auf die Straßenoberfläche (zum Beispiel Zebrastrifen als Aufforderung von Fußgängern zum Überqueren der Straße oder Warndreieck zur Warnung nachfolgender Verkehrsteilnehmer).



Figur 19: Verfahren zur Information von Verkehrsteilnehmern mittels der Projektion eines Objekts auf die Straßenfläche (DE 10 2017 103 862 A1)

Die Vernetzung der Verkehrsteilnehmer und Infrastruktureinheiten unter- und miteinander ermöglicht den Austausch von Umfeldinformationen über die Reichweite fahrzeugeigener Sensoren hinaus. Die Menge an Daten und die Reichhaltigkeit an Information, die einem vernetzten Fahrzeug zur Verfügung stehen, sind enorm. In der Regel wird aus den Informationen ein Umfeldmodell entwickelt. In modernen Systemen basiert diese Auswertung meist auf der Anwendung künstlicher Intelligenz. Diese Thematik wird im nachfolgenden Kapitel 3.3 angerissen.

3.3 Verarbeitung von Sensordaten mittels künstlicher Intelligenz

Um die Vielzahl der durch Sensoren erhaltenen Modelle effektiv auswerten zu können und daraus ein Umfeldmodell des Fahrzeugs zu erstellen, wird vermehrt künstliche Intelligenz eingesetzt, insbesondere in Form von maschinellem Lernen und sogenanntem „Deep Learning“. Der Einsatz künstlicher Intelligenz eignet sich besonders bei der Auswertung großer Datenmengen, da es sich um ein Verfahren handelt, welches statistische Methoden verwendet [22]. Mit Hilfe von maschinellem Lernen erkennt das System anhand einer Vielzahl von Beispielen (Messungen) Gesetzmäßigkeiten. Diese werden in einem Modell gespeichert. Durch die Verwendung weiterer Daten kann das Modell angepasst und verbessert werden. Beim Deep Learning handelt es sich um eine Methode des maschinellen Lernens, welche auf künstlichen neuronalen Netzwerken basiert, die ähnlich wie das menschliche Gehirn strukturiert sind [22], [23]. Die künstlichen Neuronen sind in Schichten angelegt, wobei jede Schicht einfache Berechnungen durchführt und das Ergebnis an die nächste Schicht weitergibt. So sind komplexere Berechnungen und hierdurch komplexe Modelle möglich. Zudem spielt es keine wesentliche Rolle für das spätere Modell, ob das Anfangsmodell genau ist. Das Modell wird mit jeder Zuführung weiterer Trainingsdaten verbessert, bis das Optimum erreicht ist [22].

Auch in der Patentliteratur finden sich viele Anwendungen mit Bezug zum autonomen Fahren, welche die Anwendung künstlicher Intelligenz beschreiben.

Beispielsweise beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2017 216 802 A1 ein Verfahren zur Fahrspurerkennung anhand von Kamerabildern. Zunächst werden Kanten im Bild erkannt und entsprechende Bildausschnitte festgelegt. Diese werden dann unter Verwendung eines neuronalen Netzes analysiert, wobei das neuronale Netz zuvor mit Trainingsdaten angeleitet worden ist. Die Trainingsdaten beinhalten mit der Kamera aufgenommene Bilddaten bekannter Fahrbahnbegrenzungen und anderer bekannter Bildausschnitte (Figur 20). Somit kann für jeden Bildausschnitt erkannt werden, ob er eine Fahrbahnmarkierung/-begrenzung beinhaltet.

Die Veröffentlichung DE 10 2017 216 202 B3 beschreibt ein Verfahren zur Vorhersage einer optimalen Fahrspur auf einer mehrspurigen Straße. Aus einer Vielzahl von spurgenaue Fahrzeugpositionen in Echtzeit, die von Fahrzeugen und Infrastruktureinheiten erfasst werden, bestimmt ein Maschinenlernmodell eine zurückgelegte Zeitspanne für die entsprechende Fahrspur. Somit kann eine optimale Fahrspur vorgeschlagen werden.

Ein Verfahren zur Erkennung von relevanten Verkehrszeichen beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2017 105 764 A1. Die Relevanz eines Verkehrszeichens wird anhand einer erfassten Fahrsituation und einer

Referenz-Fahrsituation mittels maschinellen Lernens bestimmt. Eine Fahrsituation kann beispielsweise sein, ob sich das Fahrzeug auf einer Autobahn bewegt oder auf welcher Fahrspur es sich bewegt. Beispielsweise kann abhängig von der Fahrspur entschieden werden, welche Verkehrszeichen das Fahrzeug zu beachten hat.

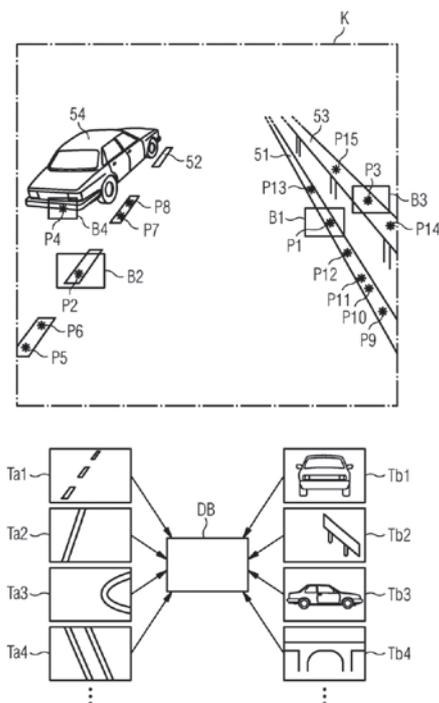
Ein weiteres Beispiel zum Einsatz künstlicher Intelligenz schlägt die Veröffentlichung DE 10 2018 117 428 A1 vor. Die Veröffentlichung beschreibt ein Verfahren zur Klassifizierung von Objekten. Hierbei wird das Maschinenlernmodell zunächst mit einem Satz von Bildern bekannter Objekte trainiert. Aufgenommene Sensordaten können anschließend mit Hilfe des Modells klassifiziert werden.

4 Gesellschaftliche Fragestellungen

4.1 Akzeptanz autonomer Fahrzeuge

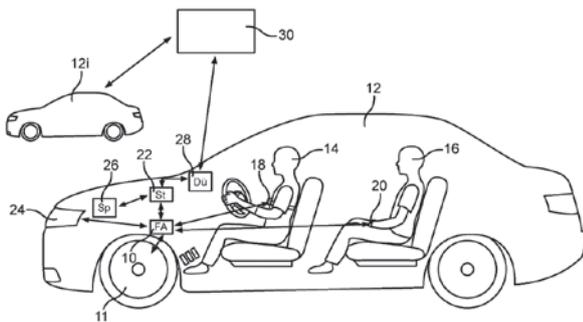
Damit sich zukünftig selbstfahrende Fahrzeuge auf den Straßen durchsetzen können, ist die Akzeptanz dieser neuen, den Straßenverkehr nachhaltig beeinflussenden Technik durch die potentiellen Benutzer essentiell. Eine Studie des Informatik-Instituts der Hochschule Ruhr West stellte fest, dass zum Zeitpunkt der Befragung im Jahr 2015 nur wenige der Befragten mit dem Thema „Autonomes Fahren“ vertraut waren und die Nutzungsabsicht gering war [24]. Eine weitere deutsche Studie aus dem Jahr 2017 zeigte, dass die Akzeptanz autonomer Fahrzeuge bei jüngeren Fahrern höher ist als bei älteren [25]. Auch Vielfahrer haben eine höhere Bereitschaft, ein selbstfahrendes Fahrzeug zu nutzen. Die Akzeptanz der Befragten war höher, wenn die Möglichkeit der Kontrolle durch den Fahrer des Fahrzeugs gegeben ist. Die größten Akzeptanzprobleme des autonomen Fahrens bestehen in der Einstellung, dass die Technik zu unsicher sei, Haftungsfragen nicht geklärt seien und der Spaß am Fahren verloren ginge [25]. Vorteile werden vor allem gesehen bei der Verbesserung des Verkehrsflusses, einem erhöhten Komfort und einem geringeren Verbrauch [25].

Auch in der Patentliteratur wird auf die Akzeptanz-Problematik autonomer Fahrzeuge eingegangen.



Figur 20: Fahrspurerkennung mittels eines neuronalen Netzes (DE 10 2017 216 802 A1)

So beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2016 223 794 A1 ein Verfahren zum Bewerten der Akzeptanz eines fahrerlos fahrenden Automobils. Hierbei wird während der autonomen Fahrt der körperliche Zustand der Fahrzeuginsassen überwacht wie beispielsweise die Herzfrequenz oder die Blickrichtung. Falls ein bestimmter Grenzwert überschritten wird, was auf das Vorliegen einer Stresssituation für den oder die Insassen des Fahrzeugs hindeutet, sendet das Fahrzeug die Zustandsdaten der Fahrzeuginsassen sowie die zugehörigen Daten des Fahrzeugs zur entsprechenden Fahrsituation an eine Datenverarbeitungszentrale. Diese wertet die psychische Belastung der Fahrzeuginsassen abhängig von der Fahrsituation aus. Die Daten können zur Verbesserung des autonomen Fahrmodus verwendet werden (Figur 21).



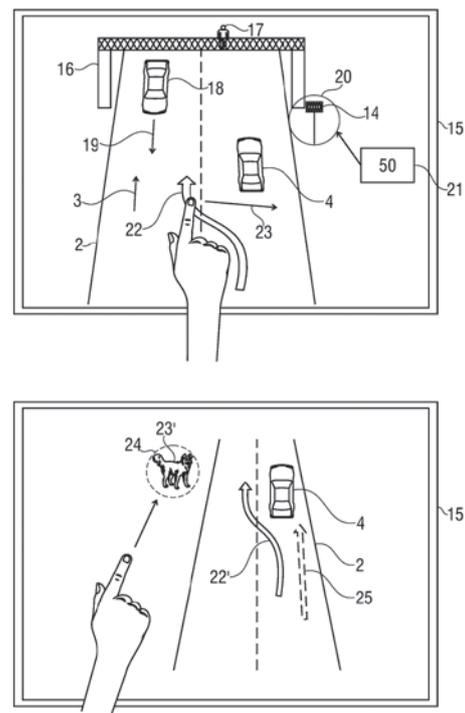
Figur 21: Verfahren zum Beurteilen der Akzeptanz eines autonomen Fahrzeugs durch dessen Insassen unter Berücksichtigung von deren Zustand (DE 10 2016 223 794 A1)

Weitere Schriften aus der Patentliteratur beschäftigen sich damit, dass die autonome Fahrt eine an den menschlichen Fahrstil angepasste Fahrweise aufweisen sollte. So beschreiben beispielsweise die Veröffentlichung DE 10 2016 222 484 A1 sowie die Veröffentlichung DE 10 2015 210 428 A1 entsprechende Verfahren, wobei während einer durch einen Fahrer gesteuerten Fahrt Bewegungsdaten erfasst werden. Das Fahrverhalten während einer autonomen Fahrt wird dann so angepasst, dass es dem Fahrverhalten des menschlichen Fahrers entspricht.

Die Akzeptanz eines automatisierten Fahrsystems ist davon abhängig, ob einem Insassen des Fahrzeugs die Handlungen des Autopiloten sinnvoll erscheinen. Hierzu beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2017 004 033 A1 ein Verfahren, welches dazu dient, die

Fahrweise des autonomen Fahrzeugs für den Fahrer nachvollziehbar zu machen. Das Fahrverhalten wird abhängig von der durch Sensoren des Fahrzeugs erfassten Umwelt angepasst, wobei auch prognostizierte Bewegungsbahnen anderer Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden. Um auch hier ein dem Fahrer angepasstes Fahrverhalten zu erzielen, werden Fahrmanöveralternativen ermittelt, wobei die Auswahl des durchzuführenden Manövers anhand von Parametern erfolgt, welche vorher durch den Benutzer des Fahrzeugs festgelegt werden, das heißt, die autonome Fahrweise wird an das Fahrerprofil angepasst.

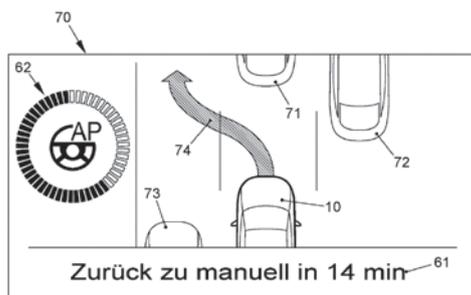
Die Akzeptanz erhöhend wirkt sich auch aus, wenn der Fahrzeugbenutzer noch immer die Kontrolle über das Fahrzeug hat [21]. In diesem Zusammenhang beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2016 211 646 A1 ein System, welches in unklaren Fahrsituationen, in denen eine Übernahme durch den Fahrer wünschenswert, aber noch nicht zwingend notwendig ist, dem Fahrer eine Auswahl verschiedener Fahrmanöver anbietet, aus denen er wählen kann. Das System dient dazu, dass es zu weniger den Fahrkomfort störenden Fahrerübernahmen kommt, der Fahrer jedoch stets das Gefühl behält, das Fahrzeug zu kontrollieren.



Figur 22: Darstellung einer Fahrsituation einer autonomen Fahrt für den Benutzer des Fahrzeugs, welcher Korrekturen und Ergänzungen vornehmen kann (DE 10 2013 213 039 A1).

Die Veröffentlichung DE 10 2013 213 039 A1 beschreibt ein System, das die autonome Fahrsituation für den Fahrer visuell darstellt. Dieser kann Korrekturen vornehmen oder weitere Informationen, zum Beispiel über nicht erkannte Objekte, hinzufügen (Figur 22)

Die Veröffentlichung DE 10 2013 110 852 A1 beschreibt ein System, welches ebenfalls die Transparenz des Autopiloten gewährleistet, indem Fahrmanöver angezeigt werden und die Dauer der pilotierten Fahrt ausgegeben wird (Figur 23). Der Fahrer kann sich allmählich an den Autopiloten gewöhnen, da er auch selbst die Steuerung übernehmen kann.



Figur 23: Darstellung einer Fahrsituation einer autonomen Fahrt für den Benutzer des Fahrzeugs sowie weiterer Informationen zum Autopiloten wie der verbleibenden Zeitspanne des pilotierten Fahrens (DE 10 2013 110 852 A1)

Häufig werden Warnungen und Informationen von Fahrerassistenzsystemen und Autopiloten von Fahrzeuginsassen als störend empfunden. Die Veröffentlichung DE 10 2015 217 389 A1 beschreibt daher ein System, das bei einer autonomen Notstoppanforderung noch einmal prüft, ob der Alarm notwendig ist, um die Anzahl von Fehlalarmen zu reduzieren.

Die Veröffentlichung DE 10 2017 210 859 A1 offenbart ein System zur Selbstüberprüfung einer Fahrfunktion nach dem Auftreten einer Fehlermeldung. Beim Auftreten eines Fehlers wird das Fahrzeug zunächst aus dem Verkehrsfluss gebracht und dessen Betrieb eingestellt. Alternativ wird die Fahrt – wenn es die Verkehrssituation zulässt – mit verminderter Geschwindigkeit auf dem Seitenstreifen fortgeführt. Dann wird die betroffene Fahrzeugelektronik oder der betroffene Sensor neugestartet. Tritt der Fehler nicht erneut auf, wird die Fahrfunktion während des eingeschränkten Betriebs des Fahrzeugs überprüft. Verläuft die Über-

prüfung erfolgreich, kann das Fahrzeug wieder normal am Straßenverkehr teilnehmen. Es wird nicht unnötig stillgelegt. Tritt der Fehler erneut auf, wird beispielsweise ein Pannendienst kontaktiert.

Ebenfalls kann die Akzeptanz autonomer Fahrsysteme dadurch gesteigert werden, dass sichergestellt wird, dass das fahrerlose Fahrzeug auch in einer Mischumgebung aus autonomen Fahrzeugen und manuell betriebenen Fahrzeugen sowie Fußgängern, Radfahrern und dergleichen betrieben werden kann [20]. Hierzu werden autonome Fahrzeuge so ausgestattet, dass ihnen die Kommunikation mit anderen nicht-autonomen Verkehrsteilnehmern möglich ist, indem ein Datenaustausch stattfindet oder eine Anzeige an den nicht-autonomen Verkehrsteilnehmer erfolgt (vergleiche Kapitel 3.2, Figuren 18, 19).

4.2 Schutz vor Manipulationen

Anknüpfend an das vorherige Kapitel spielt bei der Akzeptanz autonomer Fahrzeuge auch der Schutz vor Manipulationen, beispielsweise durch Angriffe von außen, eine Rolle [24]. In der Patentliteratur finden sich zu diesem Thema diverse Schriften.

So beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2017 201 517 A1 ein Verfahren zum Plausibilisieren einer Fahrzeugtrajektorie. Die vom Fahrzeug berechnete Bewegungsbahn wird zu bestimmten Zeitpunkten, die abhängig von einem im Fahrzeug hinterlegten Schlüssel sind, auf einer gesonderten Speichereinheit oder in einer externen Cloud gesichert. Die abzufahrende Trajektorie wird während des Fahrzeugbetriebs mit dieser separat hinterlegten Trajektorie verglichen. Dadurch, dass die gesonderte Sicherung der Bewegungsbahn nur zu bestimmten Zeitpunkten erfolgt, kann eine manipulierte Bewegungsbahn die separat hinterlegte Trajektorie nicht sofort überschreiben. Hingegen wird sie durch den Vergleich beider Trajektorien sogleich verworfen. Manipulationen können daher sicher erkannt werden.

Die Veröffentlichung DE 10 2018 103 181 A1 beschreibt ein Verfahren zur Erkennung von Sicherheitsverletzungen während einer fahrzeuginternen Kommunika-

tion. Das Verfahren ermöglicht die Unterscheidung von Übertragungsfehlern und böswilligen Manipulationen, indem ein dynamisch erzeugtes Datenfeld, das in den übertragenen Nachrichten enthalten ist, geprüft wird.

Ein weiteres Verfahren zum Erkennen einer Manipulation eines Steuergeräts eines Fahrzeugs zeigt die Veröffentlichung DE 10 2017 214 661 A1. Hier sind im Fahrzeug mehrere Modelle hinterlegt, welche jeweils ein normales Kommunikationsverhalten für verschiedene Fahrzustände des Fahrzeugs beschreiben. Weicht das tatsächliche Kommunikationsverhalten vom Modell ab, wird eine Schutzmaßnahme ausgelöst.

Ein System zum Schutz von insbesondere autonomen Nutzfahrzeugen vor Entführung oder Diebstahl schlägt die Veröffentlichung DE 10 2018 007 828 A1 vor. Daten einer fahrzeugeigenen Umfeld-, Innenraum- oder Laderaumsensorik sowie an einem Schloss des Fahrzeugs erfasste Daten werden an eine fahrzeugexterne Recheneinheit übermittelt. Diese erkennt anhand der Kombination dieser Daten, ob eine Diebstahlsituation des Fahrzeugs oder der Ladung vorliegt oder ob ein technischer Defekt des Fahrzeugs besteht.

Aber nicht nur die Fahrzeuge selbst können Manipulationen ausgesetzt sein. Auch durch Veränderungen an Verkehrszeichen können gefährliche Situationen entstehen, wenn beispielsweise ein autonomes Fahrzeug wegen eines veränderten Geschwindigkeitszeichens mit zu hoher Geschwindigkeit fährt. Hierzu zeigt die Veröffentlichung DE 10 2016 208 621 A1 ein Verfahren zur Verifizierung des Inhalts und Aufenthaltsorts von Verkehrszeichen auf. Das Verkehrszeichen stellt neben seinem visuell erkennbaren Inhalt Daten bereit, welche nicht unmittelbar für einen Menschen erkennbar sind. Diese Daten geben den Inhalt und den Aufstellort des Verkehrszeichens an. Vom Fahrzeug wird nun mittels einer Kamera der visuell erkennbare Inhalt des Verkehrszeichens bestimmt und mittels eines Positionsbestimmungssystems die Position ermittelt. Durch den Vergleich des so bestimmten Inhalts und der Position mit den vom Verkehrszeichen bezogenen Daten kann das Verkehrszeichen plausibilisiert und bei Übereinstimmung können die Daten an das Fahrsystem übergeben werden.

4.3 Datenschutz

In einer Gesellschaft, in welcher die Digitalisierung und Vernetzung immer weiter voranschreiten, spielt der Datenschutz eine wesentliche Rolle, um das Persönlichkeitsrecht des Einzelnen zu sichern. Bereits heute sammeln moderne Fahrzeuge eine Vielzahl von Daten, die das erfassende Fahrzeug und dessen Umgebung betreffen. Autonome Fahrzeuge sind zur sicheren Fortbewegung auf diese Daten in ausreichender Menge angewiesen. Damit der Straßenverkehr sicher und effizient funktionieren kann, ist eine Vernetzung der Fahrzeuge, im Idealfall aller Verkehrsteilnehmer, und Infrastrukturelemente notwendig. Es werden Daten betreffend den Verkehrsfluss, Stauungen, Baustellen, die Parkplatzlage sowie weitere Daten gesammelt und ausgewertet. Solche Daten geben Rückschluss auf den jeweiligen Benutzer eines Fahrzeugs, beispielsweise über dessen Fahrgewohnheiten oder besuchte Orte. Gemäß den geltenden Datenschutzgesetzen verlangt die Sammlung und Verwendung solcher Daten in der Regel die Einwilligung des Benutzers.

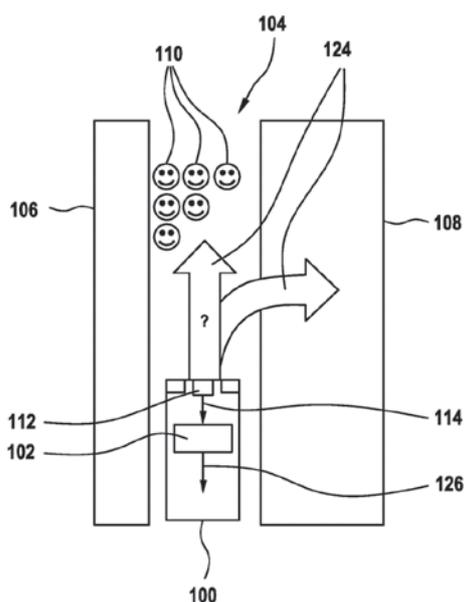
Die Veröffentlichung DE 10 2016 225 287 A1 stellt sich in diesem Zusammenhang die Aufgabe, eine Datenerhebung und -verarbeitung zu ermöglichen, welche ohne Nutzereinwilligung auskommt. Hierzu wird nach Empfang eines Datensatzes eine Verschleierung bezüglich des Erfassungsorts oder des Erfassungszeitpunkts vorgenommen oder der Datensatz wird in Teildatensätze zerlegt. Durch diese Verschleierung soll eine Gruppenanonymität erreicht werden.

Um einen sicheren autonomen Fahrbetrieb zu gewährleisten, müssen die Fahrzeuge miteinander kommunizieren und sich auch innerhalb eines Verkehrsbereichs identifizieren können, in welchem sie miteinander kooperieren. Die Veröffentlichung DE 10 2016 209 514 A1 beschreibt hierzu auch unter Aspekten des Datenschutzes ein Verfahren zur Optimierung des Verkehrsflusses, wobei den Fahrzeugen innerhalb eines Gebiets mit einem bestimmten Radius – beispielsweise um eine Kreuzung – sogenannte logische Identifikationsnummern zugewiesen werden. Diese ermöglichen die Identifikation des Fahrzeugs in der jeweiligen Verkehrssituation, aber keine Nachverfolgung des Fahrzeugs.

4.4 Dilemmasituationen

Durch das Voranschreiten der Entwicklung des autonomen Fahrens rücken nun ethische und rechtliche Fragestellungen in den Vordergrund, zum Beispiel [26], [27]. Wer trägt die Verantwortung in einer unausweichlichen Unfallsituation, in der Personen zu Schaden kommen, einer sogenannten „Dilemmasituation“? Entscheidet noch immer der Mensch oder der Computer, der das Fahrzeug steuert, über den Ausgang der Situation? Wenn der Computer entscheidet, wie wird die Entscheidung getroffen? Welche Entscheidung würde ein menschlicher Fahrer treffen? Kann hieraus ein Entscheidungsmuster für das autonome Fahrzeug gefunden werden? Eine weltweite Studie zeigt auf, dass bei der menschlichen Entscheidungsfindung auch kulturelle Aspekte eine Rolle spielen [28]. Die ethischen Probleme werden daher nicht so einfach zu lösen sein.

Ein autonomes Fahrzeug ist im Idealfall durch seine Sensorik und Einrichtungen zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern und Infrastruktureinheiten so ausgestattet, dass es jede Situation erfassen und mögliche alternative Handlungen berechnen kann. Eine unausweichliche Kollision wird hierdurch im besten Maß abgemildert. Dennoch muss auch in diesem Fall eine Entscheidung getroffen werden, welche Ausweichmaßnahme vorgenommen wird.



Figur 24: Handlung eines autonomen Fahrzeugs in einer unausweichlichen Unfallsituation, einer sogenannten Dilemmasituation (DE 10 2016 211 587 A1).

In der Patentliteratur findet sich zu diesem Thema beispielsweise die Veröffentlichung DE 10 2016 211 587 A1 (Figur 24). Die Schrift beschreibt, dass zunächst eine unausweichliche Unfallsituation genau erfasst und klassifiziert wird. Danach wird eine Nottrajektorie gewählt. Die Nottrajektorien wurden während der Entwicklung des Systems von erfahrenen Fahrern eingefahren, sodass die Handlung des autonomen Fahrzeugs einer menschlichen Handlung entspricht. Die Auswahl der Nottrajektorie aus einer Mehrzahl von Trajektorien, die durch verschiedene Fahrer eingefahren wurden, erfolgt beispielsweise zufällig.

5 Ausblick

Die Entwicklung des autonomen Fahrens schreitet stetig voran. Die Zahl der Patentanmeldungen zu diesem Thema wächst rasant. Auf Teststrecken – wie der A9 zwischen München und Nürnberg – wird die neue Technologie bereits erprobt [29].

Gleichzeitig ist der Gesetzgeber gefragt, denn derzeit steht der Fahrer noch in der Verantwortung, da er jederzeit die Kontrolle über sein Fahrzeug erlangen können muss. Die Entwicklung autonomer Fahrzeuge zielt jedoch darauf ab, dem Fahrzeuginsassen die Fahraufgabe vollständig abzunehmen. Die ethischen Probleme in sogenannten Dilemmasituationen lassen sich jedoch durch eine Änderung der Gesetzgebung nicht so einfach lösen, da es keine allgemeingültige Entscheidung in einer individuellen Gefahrensituation gibt.

Trotz aller noch bestehenden Herausforderungen zeichnet sich ab, dass autonome Fahrzeuge die Automobile der Zukunft sind und ihren Benutzern viele Vorteile bieten. Der durch ihren Einsatz optimierte Verkehrsfluss sowie die autonomen Funktionen der Fahrzeuge verringern den Stress und die Belastung der Fahrzeugbenutzer erheblich. Da menschliche Fehler durch autonome Fahrzeuge nicht begangen werden, reduzieren sich die Unfallzahlen und die Sicherheit im Straßenverkehr wird erhöht. Autonome Autos zeichnen sich zudem durch eine ökonomische und effiziente Fahrweise aus und haben daher einen geringeren Kraftstoffverbrauch. In Kombination mit einem optimierten

Verkehrsfluss bietet diese Technologie somit auch Potential für den Klima- und Umweltschutz.

6 Danksagung

Ich danke sehr herzlich meinem Kollegen Michael Koch für den ausführlichen Review dieses Artikels. Ebenfalls danke ich meinen Kollegen Dr. Alexander Baust und Dr. Wilfried Domainko für ihre Unterstützung.

Nicht-Patentliteratur

- [1] Fagnant, D. J., Kockelman, K. M.: Preparing a Nation for Autonomous Vehicles; Eno Center for Transportation, Oktober 2013; URL: <https://www.enotrans.org/wp-content/uploads/AV-paper.pdf> [URL abgerufen am 29.03.2019]
- [2] Aria, E., et al.: Investigation of Automated Vehicle Effects on Driver's Behavior and Traffic Performance; Transportation Research Procedia, Vol. 15, 761-770, International Symposium on Enhancing Highway Performance (ISEHP), 2016; URL: https://www.researchgate.net/publication/303949933_Investigation_of_Automated_Vehicle_Effects_on_Driver's_Behavior_and_Traffic_Performance/download [URL abgerufen am 29.03.2019]
- [3] Maurer, M., et al.: Autonomes Fahren; Springer-Verlag GmbH Berlin, ISBN 978-3-662-45854-9, 2015; URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-662-45854-9.pdf> [URL abgerufen am 29.03.2019]
- [4] Wikipedia: Autonomes Fahren; URL: https://de.wikipedia.org/Autonomes_Fahren [URL abgerufen am 29.03.2019]
- [5] Wikipedia: Ernst Dickmanns; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Ernst_Dickmanns [URL abgerufen am 29.03.2019]
- [6] Wikipedia: VaMP; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/VaMP> [URL abgerufen am 29.03.2019]
- [7] Delcker, J.: The man who invented the self-driving car (in 1986); Politico, 19.07.2018; URL: <https://www.politico.eu/article/delf-driving-car-born-1986-ernst-dickmanns-mercedes/> [URL abgerufen am 03.05.2019]
- [8] Wikipedia: DARPA Grand Challenge; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge [URL abgerufen am 29.03.2019]
- [9] Polchow, Y.: CES 2015: Audi läutet nächstes Kapitel ein, 07.01.2015; URL: <https://www.car-it.com/ces-2015-audi-laeutet-naechstes-kapitel-ein/id-0041831?cookie-state-change=1555567202964> [URL abgerufen am 18.04.2019]
- [10] Wikipedia: SAE J3016; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/SAE_J3016 [URL abgerufen am 08.04.2019]
- [11] Gasser, T.M., et al.: Rechtsfolgenzunehmender Fahrzeugautomatisierung; BASt-Bericht F83, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 2012; URL: https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-f/2013-2012/f83.html;jsessionid=A44E572C6CD2CC12A67905A7EBD953C0.live11293 [URL abgerufen am 08.04.2019]
- [12] Infografik des DPMA „Autonomes Fahren: Zahlen und Fakten“, URL: https://www.dpma.de/docs/presse/infografiken_autonomes_fahren.pdf [URL abgerufen am 08.04.2019]
- [13] Bardt, H.: Deutschland hält die Führungsrolle bei Patenten für autonome Autos; Institut der deutschen Wirtschaft Köln, IW-Kurzberichte 61.2017, 2017; URL: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2017/356331/IW-Kurzbericht_55_2017_Patente_autonomeAutos.pdf [URL abgerufen am 08.04.2019]
- [14] Motoreport: Ferngesteuertes Parken & Parking Assistant Plus im 5er BMW (2018) im Test; Youtube-Video, 19.11.2017; URL: <https://www.youtube.com/watch?v=EWcQTbDps2E> [URL abgerufen am 08.04.2019]
- [15] Kröger, Ove: Tesla Model S Autoparken und Summon im Test. Autonomes Einparken; T&T Tesla, Youtube-Video, 11.09.2017; URL: <https://www.youtube.com/watch?v=VEKnN2RHvhU> [URL abgerufen am 08.04.2019]
- [16] Motor-Talk: Per Knopfdruck in die Parklücke; dpnews, 02.02.2016; URL: <https://www.motor-talk.de/news/per-knopfdruck-in-die-parkluecke-t5577323.html> [URL abgerufen am 08.04.2019]

- [17] Schönherr, M.: Einparken mit Fernbedienung; Deutschlandfunk, 06.05.2015; URL: https://www.deutschlandfunk.de/fahrzeugtechnik-einparken-mit-fernbedienung.676.de.html?dram:article_id=319098 [URL abgerufen am 08.04.2019]
- [18] Teslamag: Paralleles Einparken dank Update auch mit dem verbesserten Autopiloten möglich; 28.02.2017; URL: <https://teslamag.de/news/paralleles-einparken-dank-update-auch-mit-dem-verbesserten-autopiloten-moeglich-12709> [URL abgerufen am 08.04.2019]
- [19] Wikipedia: Differential Global Positioning System; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Differential_Global_Positioning_System [URL abgerufen am 06.05.2019]
- [20] Lutz, A.: Realisierung und Bewertung von Navigationsmethoden zur fahrzeugautonomen Positionsbestimmung mit low-cost Sensorik; Dissertation, Darmstadt 2008; URL: tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/1197/4/alu_dissertation.pdf [URL abgerufen am 06.05.2019]
- [21] Wikipedia: Map Matching; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Map_Matching [URL abgerufen am 06.05.2019]
- [22] Huang, H.: The basics of modern AI – how does it work and will it destroy society this year?; arstechnica, 09.04.2019; URL: <https://arstechnica.com/features/2019/04/from-ml-to-gan-to-hal-a-peak-behind-the-modern-artificial-intelligence-curtain/> [URL abgerufen am 12.04.2019]
- [23] Wikipedia: Deep Learning; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Deep_Learning [URL abgerufen am 12.04.2019]
- [24] Eimlar, S., Geisler, S.: Zur Akzeptanz Autonomen Fahrens – Eine A-Priori Studie; Institut Informatik, Hochschule Ruhr West, Mensch und Computer 2015, 533–540, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2015; URL: https://dl.gi.de/bitstream/handle/20.500.12116/8075/Eimlar_Geisler_2015.pdf?sequence=2&isAllowed=y [URL abgerufen am 27.03.2019]
- [25] Fuß, P.: Autonomes Fahren in Deutschland; Ernst & Young, 2017; URL: [https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-autonomes-fahren-in-deutschland/\\$FILE/ey-autonomes-fahren-in-deutschland.pdf](https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-autonomes-fahren-in-deutschland/$FILE/ey-autonomes-fahren-in-deutschland.pdf) [URL abgerufen am 15.04.2019]
- [26] Randelhoff, M.: Fahrzeugethik und moralische Fahrzeuge; Zukunft Mobilität, 11.01.2016; URL: <https://www.zukunft-mobilitaet.net/147239/zukunft-des-automobils/automatisiertes-fahren-ethik-fahrzeugethik-moralische-fahrzeuge/> [URL abgerufen am 17.04.2019]
- [27] Simon, H.: Zur Ethik des autonomen Fahrens; Frankfurter Allgemeine, 01.04.2017; URL: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/neue-mobilitaet/wie-soll-ein-autonomes-auto-von-tesla-entscheiden-14943703.html> [URL abgerufen am 17.04.2019]
- [28] Maxmen, A.: A moral map for AI cars; Nature 562, 469–470, 2018; URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07135-0> [URL abgerufen am 17.04.2019]
- [29] Peter, J.: Digitales Testfeld Autobahn; 12.03.2019; URL: <https://blog.adac/digitales-testfeld-autobahn/> [URL abgerufen am 17.04.2019]

Schwarmintelligenz im Straßenverkehr

Dr. Wilfried Domainko, Patentabteilung 1.56

Fahrzeuge im Straßenverkehr müssen, um Kollisionen zu vermeiden, abgestimmt auf Verkehrsteilnehmer in ihrer Umgebung geführt werden. Durch diese geregelten Interaktionen entsteht ein kollektives Verhalten des Gesamtverkehrs. Eine Vielzahl von Schriften in der Patentliteratur befasst sich mit verschiedenen Aspekten einer entsprechenden Schwarmintelligenz. Erfindungen reichen dabei von der Einzelfahrzeug-mit-Einzelfahrzeug-Interaktion bis zur Optimierung von komplexen Verkehrssystemen. Die Intelligenz des Kollektivs kann dabei genutzt werden, um Staubbildungen zu vermindern und um den Energieverbrauch und Schadstoffausstoß zu minimieren. Ein Schwarmintelligenzansatz könnte zu einer Lösung der großen Herausforderungen im Straßenverkehr der Gegenwart beitragen.

1 Einleitung

Damit ein geregelter Straßenverkehr überhaupt möglich ist, müssen sich Fahrzeuge abgestimmt auf die Aktionen anderer Fahrzeuge in ihrer Umgebung bewegen. Durch diese Abstimmung der Bewegungsbahnen kommt es zu einem kollektiven Verhalten der Verkehrsteilnehmer. Ein entsprechendes System kann mit Mitteln der Schwarmintelligenz beschrieben werden [1].

Als mögliche Vorbilder für den Straßenverkehr [2] können Beispiele für kollektives Verhalten aus dem Bereich der staatenbildenden Insekten [3], [4] herangezogen werden. Diese Zusammenschlüsse von Individuen sind durch einfache Regeln bei Interaktionen einzelner Mitglieder untereinander gekennzeichnet [5]. Zur Befolgung dieser Regeln ist eine effiziente Kommunikation zwischen den Mitgliedern des Schwarms notwendig. Generell führt ein kollektives Verhalten zu einer Optimierung der Entwicklung des entsprechenden Insektenstaats.

In der Patentliteratur gibt es eine Vielzahl von Schriften, die sich mit der Ausbildung von kollektivem Verhalten im Straßenverkehr befassen. In den folgenden Abschnitten werden daher Druckschriften oft exemplarisch diskutiert. Erfindungen erstrecken sich

dabei vom Festlegen einfacher Verhaltensregeln bei der Interaktion von einzelnen Verkehrsteilnehmern untereinander bis hin zur Optimierung ganzer Verkehrssysteme. Diese Erfindungen erfordern dabei typischerweise eine gewisse Automatisierung der Steuerung der involvierten Fahrzeuge [6].

Eine sich ausbildende Schwarmintelligenz im Straßenverkehr könnte zur Lösung wichtiger aktueller Probleme beitragen:

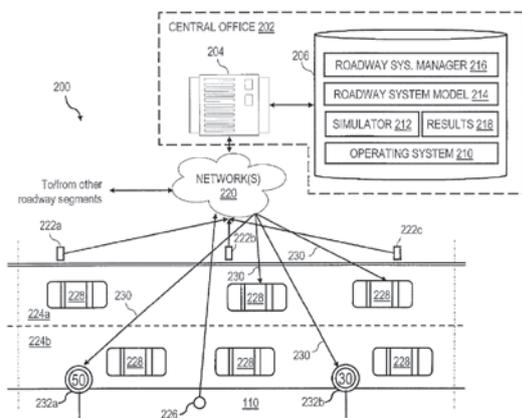
- Kollektives Verhalten könnte durch eine Optimierung des Verkehrsflusses Staubbildung auch in größeren Städten vermindern [6].
- Die Anwendung entsprechender Verfahren könnte zusätzlich zu einer Reduzierung des Kraftstoff- oder Energieverbrauchs des Gesamtverkehrs führen – wodurch die Emission von Schadstoffen und Treibhausgasen verringert werden würde [7].
- Mittels Schwarmintelligenz könnten auch Fahrzeuge identifiziert werden, die dem antizipierten Verkehrsfluss nicht folgen. Medizinische Notfälle, technische Defekte und menschliche Fehler („Geisterfahrer“) oder kriminelle und terroristische Aktionen könnten so identifiziert werden [8], [9].

2 Kommunikation und Verhaltensregeln der Verkehrsteilnehmer

2.1 Austausch von Informationen

Eine wichtige Voraussetzung für die Ausbildung von abgestimmtem Verhalten in einem Schwarm von Fahrzeugen ist ein effizienter Austausch von Informationen zwischen den einzelnen Schwarmmitgliedern.

Zur Informationsweiterleitung beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2013 210 395 A1 die Datenkommunikation zwischen Fahrzeugen und einem fahrzeugexternen zentralen Informationspool. Die Veröffentlichung US 2011 / 0 121 993 A1 diskutiert die Verteilung von Verkehrsinformationen an verschiedene Verkehrsteilnehmer durch eine zentrale Kontrolleinrichtung (Figur 1). Der Datenaustausch mittels einer zentralen Einrichtung hat den prinzipiellen Vorteil, dass alle Informationen an einem Punkt zusammengeführt werden und zur effizienten Verkehrssteuerung ein Gesamtüberblick über das Verkehrsgeschehen erhalten werden kann.



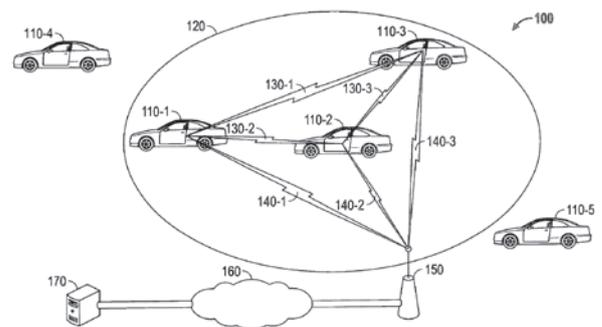
Figur 1: Verteilung von Verkehrsinformationen durch eine zentrale Einrichtung (US 2011 / 0 121 993 A1)

Die Veröffentlichung DE 101 33 001 A1 und die Veröffentlichung DE 100 18 562 C1 zeigen den Einsatz einer Flotte von speziellen Meldfahrzeugen zur Ermittlung von Verkehrsdaten. Die Veröffentlichung US 2015 / 0 254 986 A1 wiederum beschreibt die Ermittlung und den Austausch von Informationen zu Fahrbedingungen zwischen den Mitgliedern einer Flotte von autonomen Fahrzeugen. Diese Verkehrsdaten können

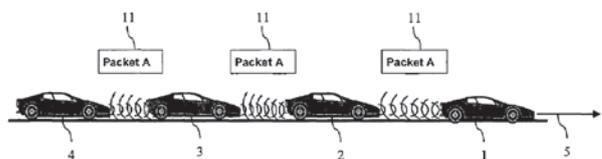
an eine Zentrale übermittelt oder zwischen den Flottenfahrzeugen geteilt werden.

Eine dezentrale Kommunikation von Fahrinformationen direkt zwischen den einzelnen Fahrzeugen hat den Vorteil, dass bei Ausfall einer zentralen Einrichtung dennoch eine ausreichende Verteilung von Verkehrsdaten gewährleistet ist. So zeigen die Veröffentlichungen DE 10 2012 022 207 B3, DE 10 2014 204 694 A1 (Figur 2) und DE 10 2016 207 791 A1 einen direkten Datenaustausch zwischen einzelnen Fahrzeugen. Die Veröffentlichung US 2007 / 0 252 723 A1 und die Veröffentlichung EP 1 788 749 A1 (Figur 3) zeigen eine – potentiell auch kaskadenartige – Informationsausbreitung und Informationsweitergabe von Fahrzeug zu Fahrzeug. Die Veröffentlichung DE 10 2010 001 276 A1 (Figur 4) wiederum beschreibt die Definition von Gebietsabschnitten, wobei dezentrale Einrichtungen Fahrzeuge in den entsprechenden Gebietsabschnitten mit gebietsspezifischen Verkehrsinformationen versorgen.

Die Verarbeitung der empfangenen Daten kann bei großen Datenmengen zu einer Überlastung des Fahrzeugcomputers führen. Zur Vermeidung dieses Problems zeigt die Veröffentlichung DE 10 2016 219 645 B3

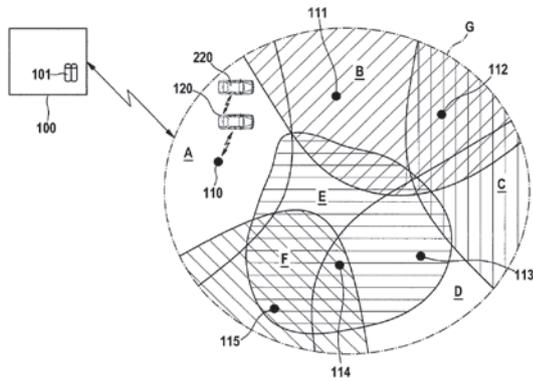


Figur 2: Dezentraler Datenaustausch, individuell zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen (DE 10 2014 204 694 A1)

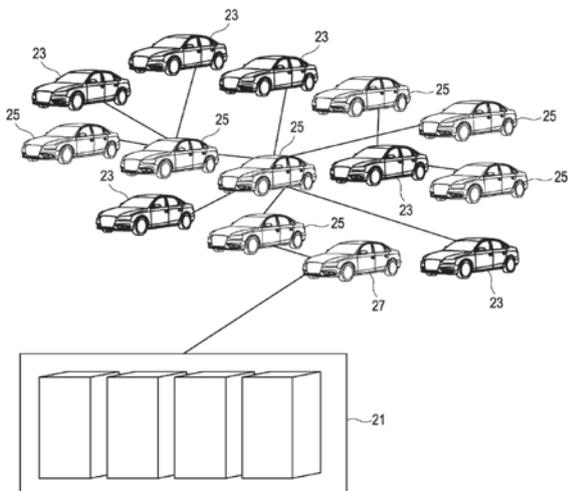


Figur 3: Weitergabe eines Datenpakets von Fahrzeug zu Fahrzeug (EP 1 788 749 A1)

die Aufteilung der Datenanalyse auf mehrere Fahrzeuge nach dem Prinzip eines Parallelrechners (Figur 5).



Figur 4: Versorgung von Fahrzeugen mit Verkehrsinformationen entsprechend definierter Verkehrsgebiete. Dabei werden Fahrzeuge ortsabhängig von dezentralen Leiteinrichtungen mit Daten beliefert (DE 10 2010 001 276 A1).



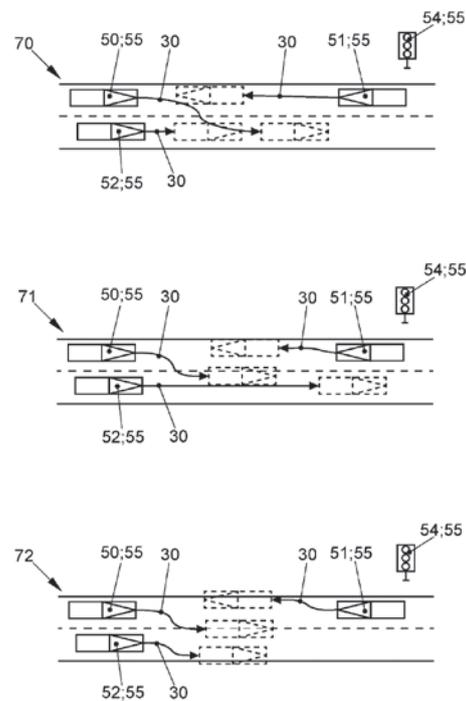
Figur 5: Datenanalyse in einer Flotte von Fahrzeugen nach dem Prinzip eines Parallelrechners (DE 10 2016 219 645 B3).

Alle in diesem Abschnitt genannten Vorgehensweisen zur Informationsweitergabe können sodann zur Durchführung von abgestimmten Fahrmanövern zwischen den Verkehrsteilnehmern genutzt werden.

2.2 Kommunikatives Durchführen von abgestimmten Fahraktionen

Bei zeitgerechter Informationsteilung sind den einzelnen Fahrzeugen eines Schwarms bei einer Interaktion

miteinander alle relevanten gemeinsamen Verkehrsdaten bekannt. In diesem Rahmen lehrt die Veröffentlichung DE 10 2016 207 791 A1 für autonom fahrende Fahrzeuge eine Überprüfung der entsprechenden Bewegungsbahnen (im Folgenden auch als Trajektorien bezeichnet) auf eine räumliche und zeitliche Überlappung. Für den Fall eines sich daraus ergebenden Konflikts wird vorgeschlagen, mindestens eine der Trajektorien gemäß einer konfliktvermeidenden Regel anzupassen. Die Veröffentlichung DE 10 2015 220 481 A1 zeigt ebenfalls eine kooperative Abstimmung von Fahrmanövern von mindestens zwei Fahrzeugen (Figur 6).



Figur 6: Kooperative Abstimmung eines Fahrmanövers zwischen mindestens zwei Fahrzeugen (DE 10 2015 220 481 A1).

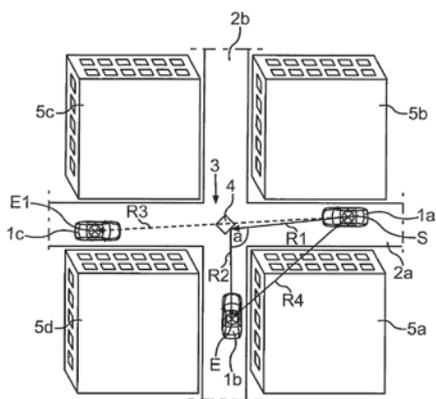
Die Veröffentlichung DE 10 2005 045 891 B3 wiederum beschreibt ein Verfahren zur Anpassung der Antriebsleistung eines Fahrzeugs an das Verkehrsaufkommen. Alternativ dazu lehrt die Veröffentlichung EP 2 159 122 A2 einen Eingriff in die Fahrzeugsteuerung durch ein externes zentrales System. Dieser Eingriff erfolgt bevorzugt gemäß aktuellen Umfeld- und Verkehrsinformationen. Bei temporär übereinstimmenden Fahrtrouten zeigt die Veröffentlichung DE 10 2017 200 168 A1 eine automatische Fahrzeugführung eines Folgefahrzeugs, angepasst an die Bewegungsbahn eines Führungsfahrzeugs.

Koordinierte Fahraktionen führen typischerweise zu einer optimierten und unfallärmeren Verkehrsführung.

2.3 Überwachung und Regelung des Schwarms durch zusätzliche Einrichtungen

Eine weitere Steuerung des Schwarmverhaltens im Straßenverkehr erfolgt in der Praxis bereits durch zuvor festgelegte Verkehrsregeln, die meist durch Ampeln, Verkehrszeichen und Bodenmarkierungen angezeigt werden. In der Patentliteratur gibt es zusätzlich zu diesen noch weitere Vorschläge für Apparaturen zur Verkehrserfassung und Verkehrsoptimierung.

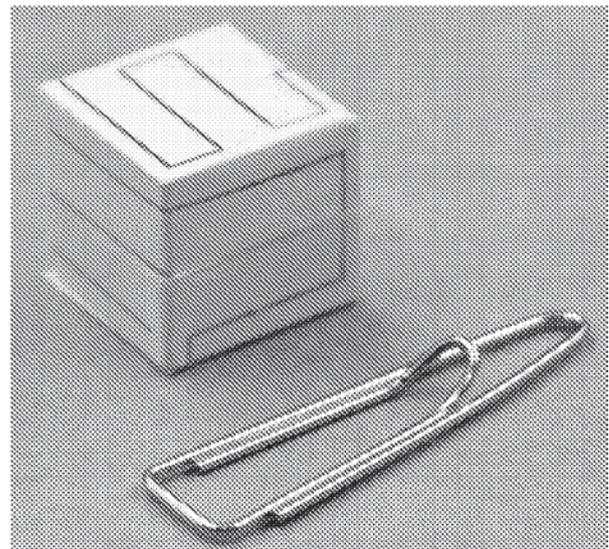
Die Veröffentlichung DE 10 2011 010 846 A1 beschreibt den Einsatz von Reflektoren an Straßenkreuzungspunkten, um eine Kommunikation zwischen mehreren Fahrzeugen zu ermöglichen, auch wenn kein Sichtkontakt zwischen ihnen besteht (Figur 7). Die Veröffentlichung DE 10 2011 007 040 A1 zeigt den Einsatz einer intelligenten Fahrspur zur Lokalisation und Navigation von autonomen Fahrzeugen. Da dabei wesentliche Steuerungsaufgaben der Fahrzeuge von der Fahrspur durchgeführt werden, könnten hier relativ einfache autonome Fahrzeuge zum Einsatz kommen.



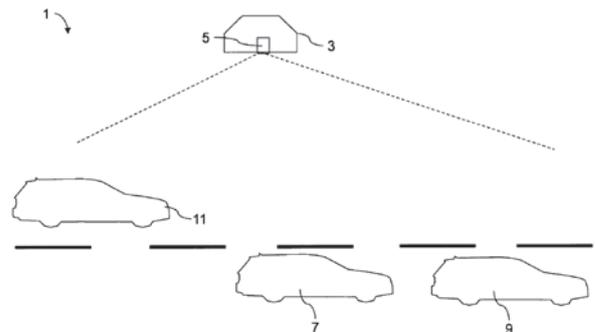
Figur 7: Reflektierende Verkehrsinfrastruktur zur Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen ohne gegenseitigen Sichtkontakt (DE 10 2011 010 846 A1)

Die Veröffentlichung US 2016 / 0 097 672 A1 (Figur 8) wiederum lehrt eine Verkehrsverfolgung mittels in das Verkehrsgeschehen ausgebrachter intelligenter Nanomaschinen, sogenanntem „Smartdust“ [10]. Die Veröffentlichung US 2015 / 0 205 298 A1 hingegen

schlägt autonome Datensammelmaschinen zur Verkehrskontrolle vor. Diese Maschinen könnten sich in Reaktion auf die jeweiligen Verkehrsbedingungen autonom an entsprechend vorteilhafte Positionen bewegen. Die Veröffentlichung DE 10 2016 007 568 A1 beschreibt eine luftfahrtbasierte Verkehrsbeobachtung und Steuerung (Figur 9).



Figur 8: Smartdust aus der US 2016 / 0 097 672 A1



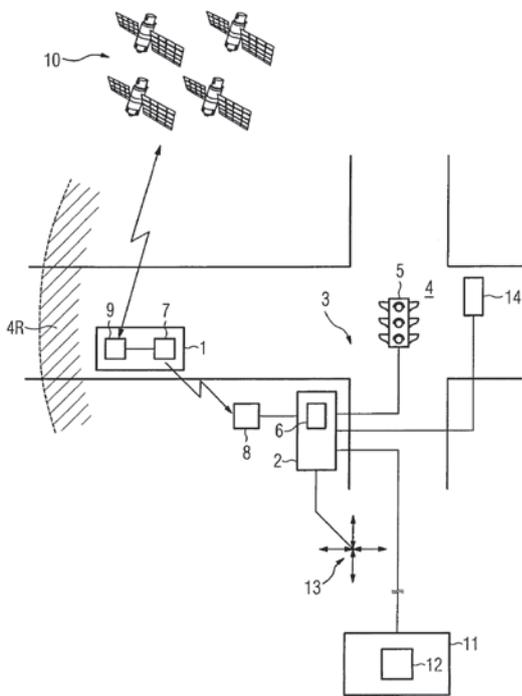
Figur 9: Fliegende Einrichtung zur Verkehrsüberwachung und Verkehrssteuerung (DE 10 2016 007 568 A1)

3 Verminderung von Staubbildung

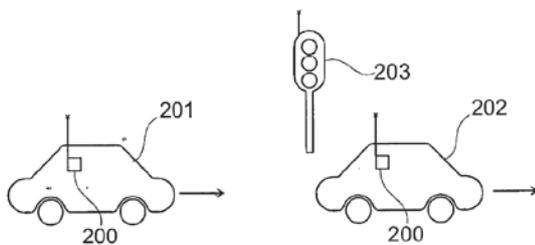
3.1 Kreuzungen

Kreuzungen stellen einen Engpass im Verkehrsfluss dar. Daher kann eine koordinierte Verkehrsführung an Kreuzungen die Wahrscheinlichkeit einer Staubbildung vermindern. Entsprechend können mit dem Verkehr vernetzte Ampeln bedarfsorientiert betrieben werden,

wobei jedem Fahrzeug individuell ein Durchfahrtslot zur Verfügung gestellt wird (EP 0 821 334 A1, DE 10 2004 039 854 A1 [Figur 10]). Die Veröffentlichung DE 10 2008 061 303 A1 beschreibt eine dafür notwendige Fahrzeug-zu-Ampel-Kommunikation sowie eine Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (Figur 11). Alternativ zu einer Ampelregelung kann mithilfe einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auch eine kooperative Fahrzeugführung zur Verkehrsflussoptimierung an Kreuzungen durchgeführt werden, wie die Veröffentlichung DE 10 2012 009 555 A1 aufzeigt (Figur 12).



Figur 10: Slotbasierte Ampelsteuerung für ein einfahrendes Fahrzeug (DE 10 2004 039 854 A1)

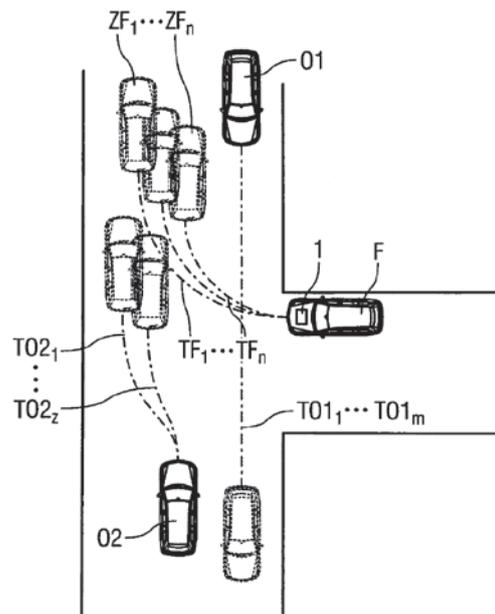


Figur 11: Fahrzeug-zu-Ampel- und Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (DE 10 2008 061 303 A1)

3.2 Vermeiden von Fluktuationen im Verkehrsfluss

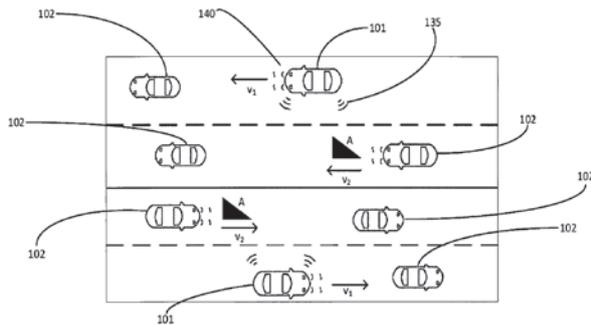
Verkehrsstaus können sich durch vermehrte kleinere Fluktuationen (Spurwechsel) in einem Verkehrsfluss bilden [11]. Verschiedene Methoden wurden vorgeschlagen, um eine solche Entwicklung abzumildern. Die Veröffentlichung EP 2 164 059 A1 beschreibt eine abgestimmte fluktuationsvermeidende Abstandsregelung von Fahrzeugen auf einer Fahrspur. Für den Fall, dass mehrere Fahrspuren für eine bestimmte Fahrtrichtung zur Verfügung stehen, kann durch eine vorausschauende Wahl der Fahrspur eine Verbesserung der Verkehrsbewegung erzielt werden. Die Veröffentlichung DE 10 2014 222 357 A1 zeigt hierzu die Analyse des Verkehrsgeschehens auf unterschiedlichen Fahrstreifen und die Veröffentlichung DE 10 2015 223 656 A1 sowie die Veröffentlichung DE 10 2012 214 979 A1 behandeln Spurwahlassistenten zur Optimierung des Verkehrsflusses.

Eine kooperative Verkehrsführung erfordert typischerweise eine gewisse Automatisierung der involvierten Fahrzeuge. Die Veröffentlichung DE 10 2016 117 138 A1 schlägt ein Verfahren zur kommunikativen Spurwechselverhandlung zwischen zwei Fahrzeugen vor (Figur 13) und die Veröffentlichung DE 10 2015 205 133 A1 beschreibt einen auf die Umgebungsfahrzeuge

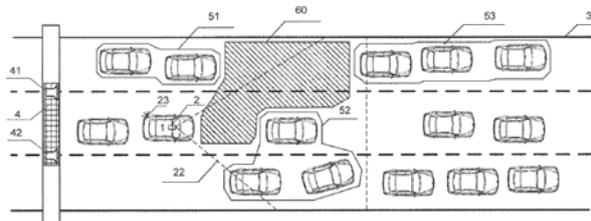


Figur 12: Kooperative Verkehrsführung an einer Kreuzung ohne Ampelregelung (DE 10 2012 009 555 A1)

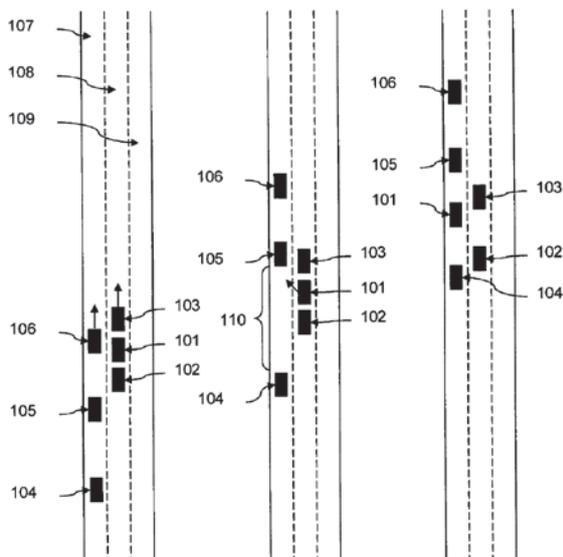
abgestimmten Bewegungsplan eines autonomen Fahrzeugs (Figur 14). Die Veröffentlichung DE 10 2014 000 843 A1 wiederum zeigt einen Spurwechselassistenten für autonome Fahrzeuge (Figur 15). Eigene Fahrstreifen für autonome Fahrzeuge in einem Mischverkehr aus nichtautomatisierten und automatisierten Verkehrsteilnehmern diskutiert die Veröffentlichung DE 10 2017 100 280 A1.



Figur 13: Kommunikative Spurwechselerhandlung auf einer mehrspurigen Fahrbahn (DE 10 2016 117 138 A1)



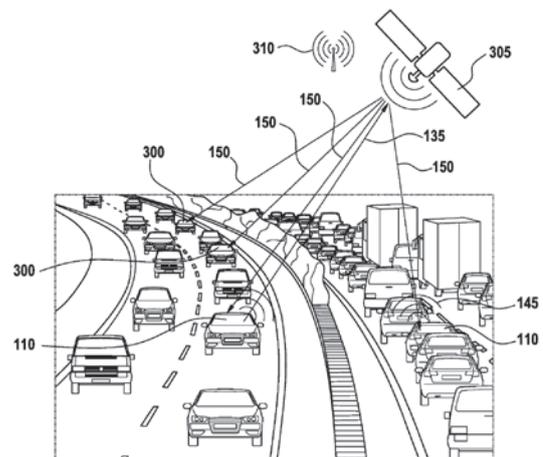
Figur 14: Auf die Verkehrsumgebung abgestimmter Bewegungsplan eines autonomen Fahrzeugs (DE 10 2015 205 133 A1)



Figur 15: Ablauf eines Spurwechsels für autonome Fahrzeuge (DE 10 2014 000 843 A1)

3.3 Gefahrenstellen

Gefahrenstellen und suboptimale Fahrbahnverhältnisse können den Verkehrsfluss ebenfalls beeinträchtigen. Entsprechend beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2012 215 064 A1 eine Erkennung von Gefahrenstellen mittels fahrzeuginterner Sensoren. Die Veröffentlichung DE 10 2015 010 469 A1 wiederum zeigt die Erfassung von Fahrbahnzuständen und deren zeitliche Entwicklung durch eine Vielzahl von Fahrzeugen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Veröffentlichungen DE 10 2015 007 036 A1, DE 10 2016 219 124 A1 (Figur 16) und DE 10 2017 201 612 A1 schlagen vor, Informationen zu witterungsbedingten Fahrbahnverhältnissen oder Gefahrenstellen an andere Verkehrsteilnehmer zu verteilen. Solchermaßen informierte Fahrzeuge können dann ihr Fahrverhalten oder ihre Routenwahl an die aktuellen Gegebenheiten anpassen.

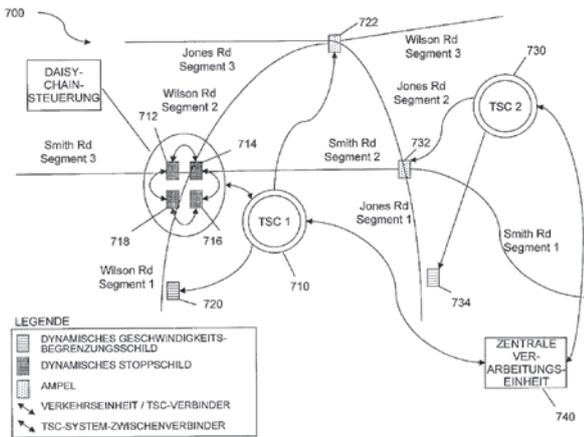


Figur 16: Meldung und Verteilung von Gefahreninformationen aus der DE 10 2016 219 124 A1

3.4 Optimieren des Gesamtverkehrs

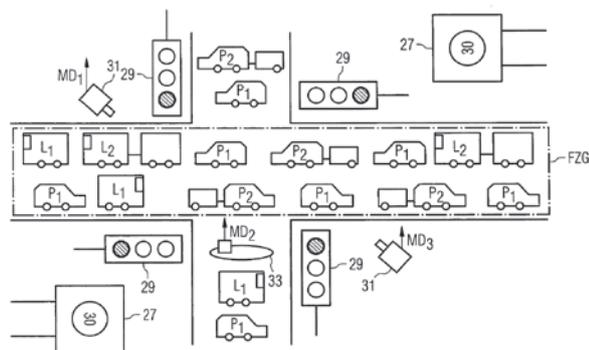
Alternativ zu einer Optimierung des Verkehrsflusses mittels Verfahren zur Einzelfahrzeug-mit-Einzelfahrzeug-Interaktion kann ein entsprechend antizipierter Verkehrsfluss auch über eine globale Optimierung des Gesamtverkehrs erfolgen. Hierzu beschreibt die Veröffentlichung DE 101 08 611 A1 eine Prognose der Bewegung von Einzelfahrzeugen unter Verwendung von aktuell gemessenen und historischen Verkehrsdaten. Die Veröffentlichung US 2007 / 0 273 552 A1 zeigt eine optimale Verkehrsregelung basierend auf

dem Vergleich zwischen einem tatsächlichen und einem üblichen Verkehrsfluss. Ein selbstoptimierter Verkehrsfluss nach den Prinzipien des maschinellen Lernens [12] wird von der Veröffentlichung DE 10 2012 211 620 A1 vorgeschlagen (Figur 17). Die Veröffentlichung US 2017 / 0 178 505 A1 wiederum beschreibt ein Verfahren zur Verkehrsflussregelung durch Zuordnung unterschiedlicher Prioritäten an Einzelfahrzeuge im Gesamtverkehr.



Figur 17: Selbstoptimierendes Verkehrssynchronisationssystem aus der DE 10 2012 211 620 A1

Die Hinzunahme eines zusätzlichen Verkehrsweges, also eine Kapazitätserhöhung, kann unter der Annahme von rationalen Entscheidungen der einzelnen Verkehrsteilnehmer in manchen Fällen zu einer Verschlechterung der Gesamtverkehrssituation bei gleichbleibendem Verkehrsaufkommen führen. Ein solcher Fall ist beispielsweise gegeben, wenn der zusätzliche Verkehrsweg von vielen Verkehrsteilnehmern benutzt



Figur 18: Individuelle Emissionswerte von Einzelfahrzeugen werden ermittelt und zur Verkehrssteuerung genutzt (DE 10 2007 045 991 A1).

wird, weil er außerordentlich attraktiv ist und daher von einem überproportionalen Verkehrsaufkommen belastet wird. Diese Situation nennt sich Braess-Paradoxon [13]. Die Veröffentlichung WO 2015 / 170 990 A1 zeigt eine Regelung des Gesamtverkehrs zur Vermeidung dieser paradoxen Situation.

4 Reduktion von Schadstoff- und Treibhausgasemission durch kollektives Verhalten

4.1 Verkehrssteuerung zur Emissionsreduktion

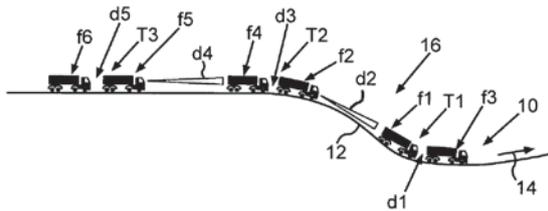
Durch eine effiziente Verkehrsführung ist es möglich, den Gesamtschadstoffausstoß zu minimieren. Hierzu zeigt die Veröffentlichung DE 100 43 797 A1 ein Verkehrsüberwachungssystem mit Einrichtungen zum Messen von Umweltdaten, wobei zur Verringerung der Umweltbelastung Stellingriffe im Verkehrssystem vorgenommen werden können. Gemäß der Veröffentlichung DE 10 2007 045 991 A1 werden die individuellen Emissionswerte der Einzelfahrzeuge ermittelt und ebenfalls bei der Verkehrssteuerung mitberücksichtigt (Figur 18).

Fahrzeuge können relevante Informationen von den Verkehrsleitsystemen empfangen und zur Auswahl einer emissionsoptimierten Fahrweise heranziehen. Entsprechend beschreiben die Veröffentlichungen DE 101 41 805 A1 und DE 10 2008 028 746 A1 eine kraftstoffoptimierende Fahrzeugführung unter Berücksichtigung von Verkehrsinformationen. Die Veröffentlichung DE 10 2008 000 131 A1 wiederum schlägt vor, den Betrieb einer emissionsärmeren Antriebseinheit – wie ein Elektromotor in einem Hybridfahrzeug – auf eine aktuelle Verkehrssituation abzustimmen.

4.2 Fahrzeugverbände

Fahrzeugverbände können bei geeigneter Fahrzeugführung verbrauchseffizient betrieben werden. Dazu schlagen die Veröffentlichungen DE 10 2007 046 765 A1 und DE 10 2008 026 686 A1 eine optimierte Abstandsregelung zwischen den Verbandsmitgliedern vor. Die Veröffentlichung DE 10 2010 028 637 A1 be-

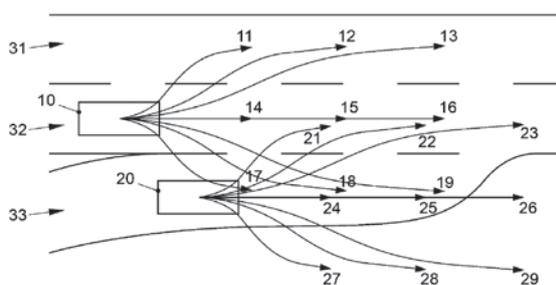
schreibt eine Abstandsregelung zur Minimierung des Luftwiderstands einer Gruppe von Fahrzeugen. Die Veröffentlichung DE 10 2015 016 758 A1 wiederum zeigt eine emissionsoptimierte Betriebsstrategie für eine Kolonne von Fahrzeugen auch für den Fall, dass das zurückzulegende Streckenprofil Steigungen aufweist (Figur 19).



Figur 19: Emissionsoptimierte Abstandsregelung für einen Fahrzeugverband auf einer Strecke mit Fahrbahnsteigungen (DE 10 2015 016 758 A1)

4.3 Emissionsreduktion durch Kooperation im Schwarm

Vernetzte Verkehrsteilnehmer können durch kooperatives Fahrverhalten ebenfalls eine Emissionsreduktion erzielen. Entsprechend beschreibt die Veröffentlichung DE 10 2014 211 507 A1 eine Auswahl des effizientesten Fahrmanövers aus einer Gruppe von möglichen Eigen- und Fremdfahrmanövern von mindestens zwei Verkehrsteilnehmern (Figur 20). Die Veröffentlichung US 2016 / 0 054 736 A1 zeigt einen Logistikmanager für eine Flotte von Fahrzeugen, welcher anhand von Positions- und Zieldaten der Einzelfahrzeuge deren Routen bedarfsorientiert temporär abstimmt. Dadurch können sich flexible Fahrzeugverbände bilden. Schließlich schlägt die Veröffentlichung US 2017 / 0 158 203 A1 vor, Fahrzeuge mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch durch einen Vergleich mit dem Fahrverhalten von



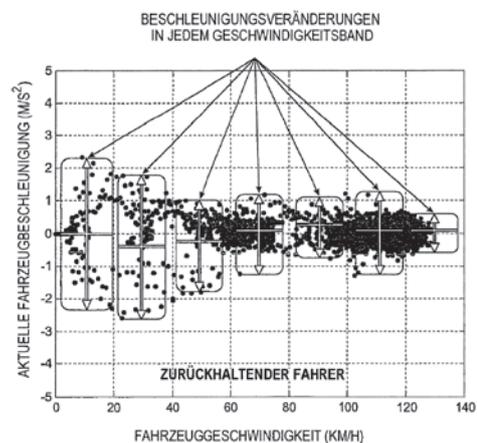
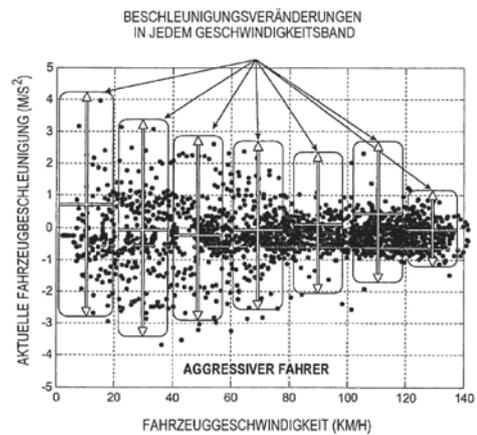
Figur 20: Bei einer Fahrzeug-mit-Fahrzeug-Interaktion wird aus einer Vielzahl von möglichen Bewegungsbahnen die sparsamste Variante ausgewählt (DE 10 2014 211 507 A1)

Fahrzeugen der entsprechenden Fahrzeuggruppe zu identifizieren. Dadurch könnte der Grund für den erhöhten Verbrauch erkannt und behoben werden.

5 Fahrzeuge, die dem Schwarm nicht folgen

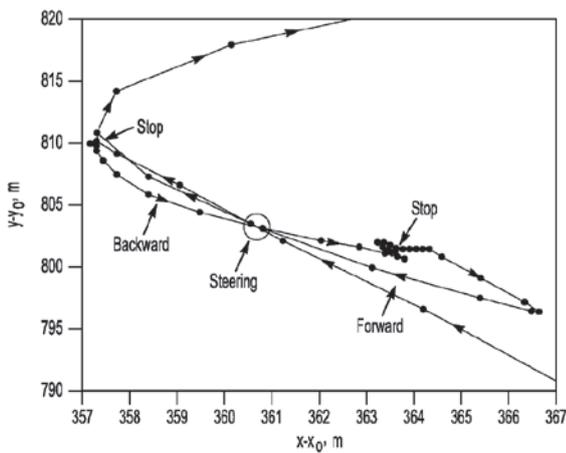
5.1 Erkennen von anormalen Verhalten

Durch einen Vergleich der Bewegungsdaten vieler Fahrzeuge können Verkehrsteilnehmer erkannt werden, die dem generellen Schwarmverhalten des Verkehrs nicht folgen. Gründe hierfür können medizinische Probleme, technische Defekte, Computerviren oder kriminelle und terroristische Aktivitäten sein. Als Kriterium zur Erkennung von anormalem Verhalten können individuelle Fahrzeug-Fahrzeug-Interaktionen herangezogen werden, wie die Veröffentlichung DE 10 2006 039 183 A1 beschreibt. Alternativ kann auch das Verhalten von Fahrzeugen an Verkehrszeichen als Entscheidungs-

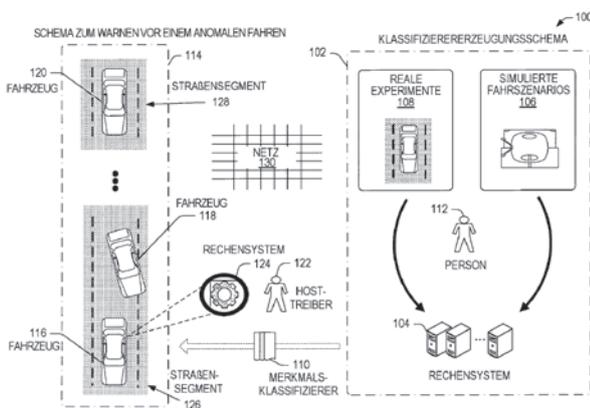


Figur 21: Bewegungsdaten für verschiedene Fahrertypen (DE 10 2012 207 458 A1)

grundlage genutzt werden, wie die Veröffentlichung DE 10 2010 033 324 A1 zeigt. Die Veröffentlichung US 2017 / 0 278 323 A1 schlägt vor, einen Malware-Befall des Fahrzeugs durch die Auswertung einer Vielzahl von fahrzeuginternen und -externen Sensoren festzustellen. Außergewöhnliche Verhaltensmuster können sehr effizient auch in den gesamten Bewegungsdaten von Fahrzeugen gefunden werden, siehe hierzu die Veröffentlichung DE 10 2012 207 458 A1 (Figur 21) und die Veröffentlichung US 2016 / 0 110 650 A1 (Figur 22).



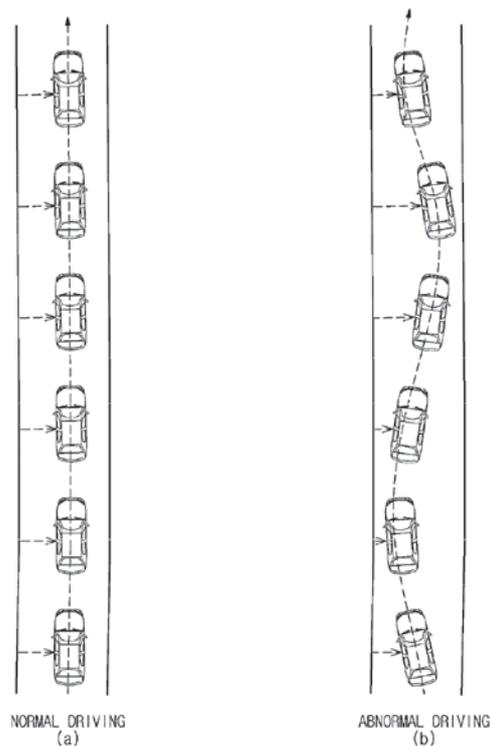
Figur 22: Bewegungsdaten eines Fahrzeugs aus der US 2016 / 0 110 650 A1



Figur 23: Erkennen anomalen Fahrverhaltens mittels maschinellen Lernens (DE 10 2016 116 068 A1). In einem Klassifizierungsschritt wird das individuelle Fahrverhalten ausgehend von gut verstandenen Trainingsdaten evaluiert und die gefundenen Bewegungsmuster werden auf den aktuellen Verkehr zur Bewertung von Einzelfahrzeugen angewendet.

5.2 Warnung an andere Verkehrsteilnehmer

Sobald eine Abnormität in der Bewegung eines Fahrzeugs gefunden wird, können Verkehrsteilnehmer vor dieser potentiellen Gefahr gewarnt werden. Die Veröffentlichung US 2013 / 0 135 092 A1 zeigt die Ausgabe einer Warnmeldung bei der Detektion von ungewöhnlichem Fahrverhalten. Die Veröffentlichung US 2001 / 0 020 902 A1 beschreibt die Ausgabe einer Unfallwarnung. Dabei werden Verkehrsdaten vergangener Unfälle mit aktuellen Verkehrsdaten verglichen, wobei bei Übereinstimmung eine Warnung erfolgt. Die Veröffentlichung DE 10 2016 116 068 A1 (Figur 23) wiederum schlägt eine Klassifizierung des Fahrverhaltens von Fahrzeugen basierend auf maschinellem Lernen [12] vor. Wird dabei ein sich anormal verhaltendes Fahrzeug identifiziert, wird eine Warnmeldung an andere Verkehrsteilnehmer ausgegeben und es werden zusätzlich noch weitere Daten über das sich ungewöhnlich verhaltende Fahrzeug gesammelt.



Figur 24: anomales Fahrverhalten aus der US 2017 / 0 057 410 A1

[12]. Beim maschinellen Lernen leitet der Computer typischerweise statistische Muster und Gesetzmäßigkeiten aus gut verstandenen Trainingsdaten ab und verwendet diese zur Analyse von neu gewonnenen Datensätzen (siehe auch Figur 23). Die Anwendung von maschinellem Lernen auf den Straßenverkehr als vernetztes und koordiniertes System von Fahrzeugen bietet interessante Perspektiven, birgt aber auch Herausforderungen.

Ein auf die Verkehrsumgebung abgestimmtes Fahren ist generell sehr rechenintensiv. Entscheidungen müssen dabei durch Analysen einer Vielzahl von Informationskanälen und auf den für den Straßenverkehr typischen kurzen Zeitskalen getroffen werden. Maschinelles Lernen könnte hier eine vielversprechende Performanceverbesserung bieten [16], [17]. Zu bedenken ist allerdings, dass maschinelles Lernen zu überraschenden und nicht ganz einfach nachvollziehbaren Lösungen führen kann (siehe [18], [19]).

Ein statistikbasiertes Verfahren wie maschinelles Lernen könnte bei Ereignissen, die statistisch schwer erfassbar sind, in einen Grenzbereich seiner Anwendbarkeit gelangen. Bei solchen Ereignissen könnte es sich um Extremereignisse handeln (siehe [20] sowie US 2009 / 0 070 282 A1) oder auch um Ereignisse, die sich nichtlinear aus kleinen Fluktuationen entwickeln (wie selbstorganisierte Kritikalität [21], US 10 139 844 B1, WO 2015 / 175 427 A1 oder Riesenwellen (Freak Waves) [22], [23] sowie US 2013 / 0 163 071 A1). Maschinelles Lernen könnte schließlich sogar an eine fundamentale Grenze stoßen [24].

6.3 Kontrolle über das Verkehrsgeschehen

Durch den Einsatz von autonomen Fahrzeugen und durch die Anwendung von komplexen Algorithmen wird sich die Verkehrssteuerung vermutlich weiter in Richtung eines Systems mit schwer vorhersehbaren Eigenschaften entwickeln. Dabei wird der Mensch voraussichtlich einen Teil der unmittelbaren Kontrolle über individuelle Ereignisse abgeben, jedoch die generelle Kontrolle über das Gesamtsystem durch Vorgaben für die Eingangsparameter der Algorithmen

behalten. Daneben wirft diese Entwicklung ethische und juristische Fragen auf (zum Beispiel [25], [26]), die bei weitreichendem Einsatz entsprechender Technologien zeitnah geklärt werden müssen.

Generell scheint ein Schwarmintelligenzansatz für die Verkehrssteuerung jedoch viele Vorteile zu bieten. Daher wird dieses Gebiet vermutlich weiterhin eine sehr schnelle Entwicklung aufweisen.

7 Danksagung

Meinem Kollegen Dr. Volker Schaller danke ich für seine Hilfestellung.

Nicht-Patentliteratur

- [1] Wikipedia: Kollektive Intelligenz; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Kollektive_Intelligenz [abgerufen am 04.03.2019]
- [2] Senge, S.: „Ein Bienen-inspiriertes Schwarmintelligenz-Verfahren zum Routing im Straßenverkehr“, Dissertation Universität Oldenburg, 2014; URL: https://uol.de/fileadmin/user_upload/informatik/senbie14.pdf [abgerufen am 04.03.2019]
- [3] Wikipedia: Westliche Honigbiene; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Honigbiene> [abgerufen am 04.03.2019]
- [4] Wikipedia: Ameisen; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ameisen> [abgerufen am 04.03.2019]
- [5] Deblais, A., et al.: “Boundaries Control Collective Dynamics of Inertial Self-Propelled Robots”, Phys. Rev. Lett. 120, 188002, 2018; URL1: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.120.188002>, URL2: <https://physics.aps.org/articles/v11/45> [abgerufen am 04.03.2019]
- [6] Hutson, M.: “Watch just a few self-driving cars stop traffic jams”, Science online, 2018; URL: http://www.sciencemag.org/news/2018/11/watch-just-few-self-driving-cars-stop-traffic-jams?utm_campaign=news_daily_2018-11-16&et rid=350789030&et_cid=2493471 [abgerufen am 04.03.2019]

- [7] Grubler, A., et al: “A low energy demand scenario for meeting the 1.5°C target and sustainable development goals without negative emission technologies”, *Nature Energy* 3, 515–527, 2018; URL: <https://www.nature.com/articles/s41560-018-0172-6> [abgerufen am 04.03.2019]
- [8] Manrique, P. D. et al.: “Generalized Gelation Theory Describes Onset of Online Extremist Support”, *Phys. Rev. Lett.* 121, 048301, 2018; URL1: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.121.048301>, URL2: <https://physics.aps.org/articles/v11/76> [abgerufen am 04.03.2019]
- [9] Vivek, S. et al.: “Cyber-physical risks of hacked Internet-connected vehicles”, APS March Meeting 2019; March 4–8, 2019; Boston, Massachusetts; Session B05; URL: <http://meetings.aps.org/Meeting/MAR19/Session/B05.9> [abgerufen am 07.03.2019]
- [10] Wikipedia: Smartdust; URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Smartdust> [abgerufen am 04.03.2019]
- [11] Sugiyama, Y. et al.: “Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam”, *New Journal of Physics*, 10, 033001, 2008; URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/10/3/033001> [abgerufen am 04.03.2019]
- [12] Wikipedia: Maschinelles Lernen; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Maschinelles_Lernen [abgerufen am 04.03.2019]
- [13] Wikipedia: Braess-Paradoxon; URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Braess-Paradoxon> [abgerufen am 04.03.2019]
- [14] Wikipedia: Terroranschläge am 11. September 2001; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Terroranschlag_am_11._September_2001 [abgerufen am 04.03.2019]
- [15] Wikipedia: Malaysia-Airline-Flug 370; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Malaysia-Airlines-Flug_370 [abgerufen am 04.03.2019]
- [16] Reid, K. et al.: “Modelling collective motion based on the principle of agency: General framework and the case of marching locusts”, *PLoS ONE* 14(2): e0212044, 2019; URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0212044> [abgerufen am 04.03.2019]
- [17] Openai Blog 2018; URL: <https://blog.openai.com/ai-and-compute/> [abgerufen am 04.03.2019]
- [18] 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/> [abgerufen am 04.03.2019]
- [19] Segeler, M. H. S. et al.: “Planning chemical syntheses with deep neural networks and symbolic AI”, *Nature* 555, 604–610, 2018; URL: <https://www.nature.com/articles/nature25978> [abgerufen am 04.03.2019]
- [20] Ghil, M. et al.: “Extreme events: dynamics, statistics and prediction”, *Nonlin. Processes Geophys.*, 18, 295–350, 2011; URL: <https://www.nonlin-processes-geophys.net/18/295/2011/npg-18-295-2011.pdf> [abgerufen am 04.03.2019]
- [21] Wikipedia: Selbstorganisierte Kritikalität; URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Selbstorganisierte_Kritikalit%C3%A4t [abgerufen am 04.03.2019]
- [22] Dyste, K. B. et al.: „Freak waves, rogue waves, extreme waves and ocean wave climate“, publiziert online 2005; URL: https://folk.uio.no/karstent/waves/index_en.html [abgerufen am 04.03.2019]
- [23] Cavaleri, L. et al.: “The Draupner wave: A fresh look and the emerging view”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 6061–6075, 2016; URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2016JC011649> [abgerufen am 04.03.2019]
- [24] Ben-David, S. et al.: „Learnability can be undecidable: Nature Machine Intelligence 1“, 44–48, 2019; URL1: <https://www.nature.com/articles/s42256-018-0002-3>, URL2: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-00012-4>, URL3: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-00083-3> [abgerufen am 04.03.2019]
- [25] Zeitonline, Der Todesalgorithmus, 2017; URL: <https://www.zeit.de/kultur/2017-09/kuenstliche-intelligenz-algorithmus-spam-autonomes-fahren/seite-4> [abgerufen am 04.03.2019]
- [26] Maxmen, A.: “Self-driving car dilemmas reveal that moral choices are not universal”, *Nature* 562, 469–470, 2018; URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07135-0> [abgerufen am 04.03.2019]

Notizen

A series of 20 horizontal dotted lines for writing notes.

Impressum

Herausgeber

Deutsches Patent- und Markenamt
Zweibrückenstraße 12
80331 München

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

Stand

Dezember 2019

Bildnachweis

[iStock.com/JaCZhou](https://www.iStock.com/JaCZhou)

