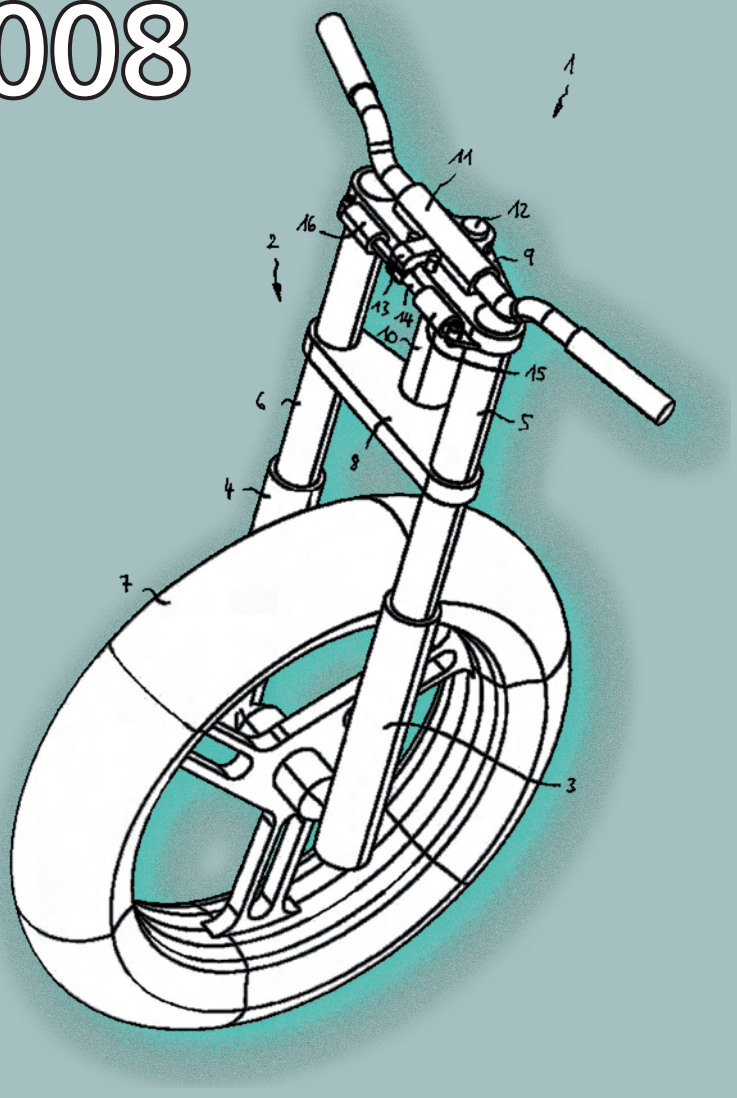
Deutsches
Patent- und Markenamt

Erfinderaktivitäten 2007/2008



Inhalt

Vorwort 2

50 Jahre Festplattentechnologie: Highlight and end of the line?
Axel Born 3

Abgasnachbehandlung für Personenkraftwagen mit Dieselmotoren
Karin Eisenmann & Stefan Schmidt 9

150 Jahre Rudolf Diesel
Thomas Flaschke 27

Aktive Fahrwerkseingriffe bei Motorrädern
Nicolai Geier 36

PKW-Chassisrahmen mit stoßabsorbierenden Mitteln
Matthias Graf 43

Reifenluftdruckregelung während der Fahrt
Rainer Graf 49

Leder, Lack und alle Arten von Gummi oder:
Wie man Spritzen dicht bekommt – Ein Überblick (1841 bis heute)
Claus Medicus 57

Mikrofabrikation, insbesondere Softlithographie in den Angewandten Biowissenschaften
Thomas Reitinger 82

Fremdkraft-Bremsanlagen für Kraftfahrzeuge:
Sicher bremsen mit Gefühl
Jan-Friedrich Süßmuth 104

Einsatz von „controlled source electromagnetics“ (CSEM) zum Aufspüren von Erdöl, Erdgas und Gashydraten
Klaus Wollny 113

Impressum 122

Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser der „Erfinderaktivitäten 2007/08“,

In dieser neuen Ausgabe geben Ihnen die Autoren einmal mehr die Gelegenheit, in die faszinierende Welt der Patente und Bahn brechenden technischen Entwicklungen einzutauchen.

Die behandelten Themen sind so unterschiedlich wie vielschichtig, so dass sowohl der Fachmann als auch der interessierte Laie eine Menge Neues entdecken kann.

Die Artikel wurden in guter Tradition von den mit den jeweiligen Fachgebieten befassten Patentprüfern des Deutschen Patent- und Markenamtes geschrieben. Einen Schwerpunkt bildet wieder die historische Entwicklung bekannter Alltagsgegenstände – wie etwa die des Dieselmotors, der Festplatte oder der auf den ersten Blick gar nicht so komplizierten Spritze – aus Sicht der Patentschriften. Weitere Kernpunkte sind die Erläuterung und Zusammenfassung aktueller Hochtechnologie, wie zum Beispiel der Softlithographie und innovativer Umwelt- und Sicherheitstechnik bei Kraftfahrzeugen, oder auch die Vorstellung einer neuen Methode zur Erkundung der letzten fossilen Energieträger unseres Planeten.

Die in den Artikeln genannten Schriften umfassen den bis zum Redaktionsschluss am 22. August 2008 der Öffentlichkeit bekannten Stand der Technik.

Viel Spaß beim Lesen wünscht Ihnen

Dr. Klaus Wollny
(Redaktion)

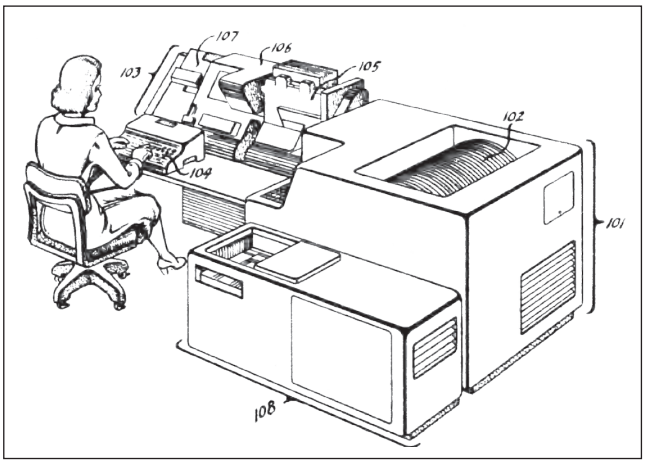
50 Jahre Festplattentechnologie: Highlight and end of the line?

Dr. Axel Born, Patentabteilung 1.55

Die Festplatte erblickte vor über 50 Jahren das Licht der Welt. Im Folgenden soll ihre Entwicklung mit den wichtigsten technologischen Meilensteinen vorgestellt und ein Ausblick auf die nächsten Jahre gegeben werden.

1. Einleitung

Als am 13. September 1956 die erste Festplatte (HDD = hard disk drive; hard im Sinne von rigid) IBM 350 RAMAC ausgeliefert wurde, hatten die Entwickler innerhalb von nur vier Jahren ein vollkommen neues Massenspeichersystem entwickelt. Ziel war ein Speichermedium, auf dessen Inhalt, wie der Name schon sagt (RAMAC = Random-Access Method of Accounting and Control), frei und nicht sequentiell, wie bei damals üblichem Magnetdraht/band- oder Lochkartenspeicher, zugegriffen werden konnte. Doch keiner der Entwickler, namentlich Rey Johnson (Teamleiter und „Vater der Festplatte"), Al Hoagland, Will Goddard, Al Shugart (gründete 1979 den heutigen Marktführer Seagate Technology) und Bobby Smith, ahnte damals, dass sie eine der rasantesten technologischen Entwicklungen angestoßen hatten. Allein die Datendichte stieg von 0,002 MBits/in² (entspricht 310 Bits/cm²) auf heutzutage 300 000 MBits/in² (465 Bits/µm²), also um mehr als 8 Größenordnungen.



Figur 1: Die erste Festplatte füllte einen ganzen Raum aus. Neben dem Operator ist der 24 inch-Plattenstapel (102) – hier in liegender Ausführung – zu sehen (aus DE 11 29 736 B).

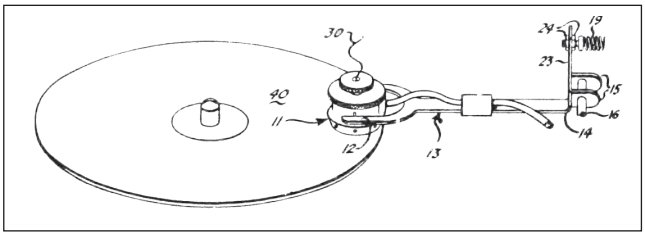
2. Die Zeit vor der Festplatte

Herman Hollerith, ein Kind deutscher Auswanderer aus der Pfalz, meldete 1887 die erste Datenverarbeitungsanlage (DVA), die auf Lochkarten beruhte, zum Patent an (US 430 804 A; DE 49 593 A). 1896 gründete er die *Tabulating Machine Company* aus der 1924 die *International Business Machines Corporation* (IBM) hervorging, die die nachfolgende Entwicklung von DVAs dominieren sollte.

Die erste magnetische Aufzeichnung gelang Valdemar Poulsen auf einem Stahldraht, der an einem Elektromagneten vorbeigezogen wurde (DE 109 569 A {bemerkenswert ist der Schutzbereich des Hauptanspruchs} mit dem Zusatzpatent DE 155 270 A; US 661 619 A). Solche Drahttongeräte (wire recorder) waren in den 1940er und 1950er Jahren in den USA recht verbreitet. In Deutschland begann dagegen schon früh die Entwicklung eines Tonbandgerätes, basierend auf einem Papierband, das mit Stahlpulver beschichtet wurde (DE 544 302 A). 1928, im Anmeldejahr des Patentes, baute der Erfinder Fritz Pfleumer auch ein Magnetbandgerät, mit dem er seine Magnetbänder vorführte. Die Rechte verkaufte er 1932 an die AEG, in der Eduard Schüller 1935 das erste serienmäßig produzierte Magnetbandgerät (die K1) entwickelte (DE 637 642 A {Magnetband}; DE 612 489 A {Magnetbandrekorder}; US 2 247 847 A). Ein Meilenstein war dabei die Entwicklung des „Luftspalt-Ringmagnet"-Schreib-Lesekopfes (DE 660 377 A), nach dessen Prinzip alle Magnetspeichergeräte arbeiteten.

In den 1950er Jahren war neben der Lochkarte (punch/IBM card) und dem Magnetband (tape drive) noch der Trommelspeicher (magnetic drum mass storage), der von Gustav Tauschek für die IBM in den 1930er Jahren entwickelt wurde, der einzig gebräuchliche Massenspeicher, wobei nur beim Trommelspeicher ein wahlfreier Zugriff auf die Daten möglich war (DE 528 702 A; US 2 089 309 A; US 2 080 100 A). Die Trommelspeicher wurden noch bis in die 1970er Jahre produziert und verfügten konstruktionsbedingt über schnelle Zugriffszeiten (da es pro Spur einen Schreib-Lese-Kopf gab, erreichte schon 1965 die Fastrand II 92 ms) und eine damals akzeptable Datentransferrate (118 kBits/s bei 880 U/min). Allerdings bedingte die große Zylindermasse (die Fastrand II wog mehr als 2 t) extreme Lagerprobleme (Kreiselproblematik) und somit einen großen Abstand zwischen Schreib-Lese-

Köpfen und Zylinderoberfläche (US 3 562 725 A). Dies resultierte in einer nur schwer zu steigernden Datendichte (1965: 100 kBits/in²) und somit auch einer geringen Datenkapazität (1965 wurden 90 MBytes erreicht, mit einem Gewichtsverhältnis von 22 kg/MByte).



Figur 2: Der erste Festplattenkopf (11) wurde über eine Leitung mit Druckluft versorgt und mit einer Feder (19) auf die Platte (40) gedrückt (aus DE 10 65 629 B).

Vor diesem Hintergrund wurde 1952 die Entwicklung der ersten Festplatte in den San Jose Labs der IBM angestoßen (US 3 503 060 A; DE 11 29 736 A). Das Resultat war die RAMAC 350-1 mit einer Kapazität von 4,4 MByte, einer Datendichte von 2 kBits/in², einer Zugriffszeit von 600 ms – bei einem Kopf-Platte-Abstand von 20 µm. Gespeichert wurde auf 50 Scheiben/Platten (disks/platters) mit 24 inch (entspricht 61 cm) Durchmesser. In Figur 1 ist der Plattenstapel liegend dargestellt, wobei die IBM 350 mit einem stehenden Plattenstapel ausgeliefert wurde. Die RAMAC konnte nur geleast werden, bei einem heutigen Preis von 50 000 $/Jahr (also 10 000 $/MByte).

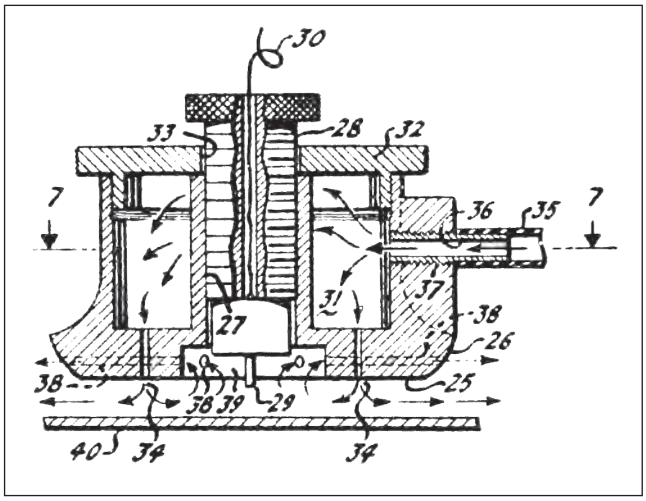
Aktuelle Festplatten erreichen eine Kapazität von 1,5 TByte (entspricht einer Steigerung um 5 Größenordnungen), eine Datendichte von 300 GBits/in² (8 Größenordnungen), eine Zugriffszeit von 4 ms – bei einem Kopf-Platte-Abstand von 4 nm. Gespeichert wird die riesige Datenmenge auf 4 Platten von 3.5 inch (9 cm) Durchmesser und kostet nicht einmal 500 $ (also 0.0003 $/MByte; dem entspricht eine Preisreduktion um 8 Größenordnungen).

Natürlich bedurfte es enormer Innovationen, um diese gigantische Steigerung zu erreichen. Im Folgenden werden einige hiervon angesprochen.

3. Technologische Meilensteine

Grob lässt sich die Technologie der Festplatte in die Bereiche Schreib-Lese-Köpfe (Ausgestaltung der Köpfe und Sensormethode), Platten (Material und Antrieb) und Auswerteelektronik samt Datenformatierung auf der Platte einteilen.

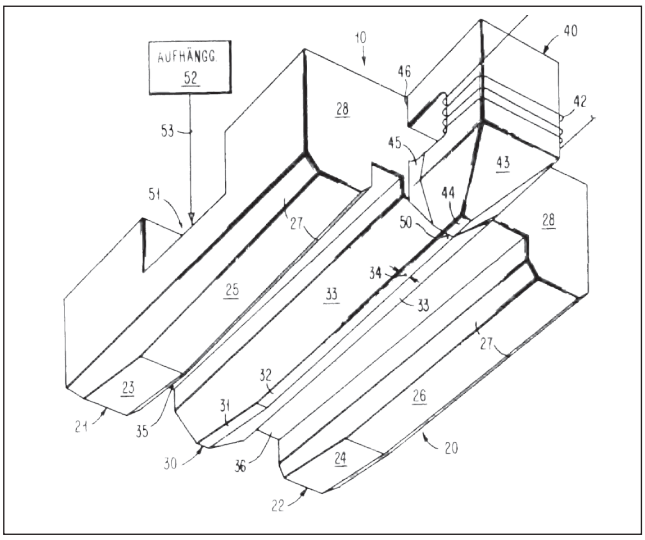
Getriggert wurde die Entwicklung jahrzehntelang durch die notwendige Verringerung des Abstandes des Schreib-Lese-Kopfes von der Plattenoberfläche, denn je geringer der Abstand, desto kleiner können die Datenmarkierungen ausfallen, desto kleiner ist aber auch das Auslesesignal, was wiederum einen kleineren Schreib-Lese-Kopf und einen empfindlicheren Lesesensor voraussetzt. Ein geringerer Abstand erfordert außerdem eine glattere Oberfläche und einen störungsärmeren Antrieb.



Figur 3: Querschnitt des Festplattenkopfes (11) aus Figur 2. Die Druckluft wird durch den Hohlraum (31) auf die Platte (40) geblasen (hydrostatic air bearing). Das Aufzeichnungselement (29) kann durch die Schraube (28) relativ zum Kopf in den gewünschten Abstand zur Platte (40) gebracht werden (ebenfalls aus DE 10 65 629 B).

Bei der ersten HDD wurde mit großem Aufwand ein Platte-Kopf-Abstand von 20 µm (ein menschliches Haar hat zum Vergleich einen Durchmesser von etwa 50 µm) erreicht (DE 10 65 629 B; US 2 886 651 A). Dabei schwebten die Köpfe auf einem Luftfilm, der durch Düsen in den Köpfen auf die Platte geblasen wurde (hydrostatic air bearing) (vergleiche Figur 2 und 3). Der dazu nötige Kompressor führte dazu, dass die Operatoren/Programmierer einen Gehörschutz tragen mussten.

Deutlich leiser wurden die Festplatten erst 1962 (IBM 1301) mit Köpfen, die aufgrund ihrer Form (Keil/wegde) auf einem selbst erzeugten Luftpolster (hydrodynamic air bearing slider) in nur 6 µm über die Plattenoberfläche dahinflogen (US 3 051 954 A). Diese Köpfe wurden mit einer Belastungskraft von 350 g auf die Platte gedrückt.



Figur 4: Schema eines Festplattenkopfes, der sich selber ein Luftlager erzeugt (hydrodynamic air bearing slider). Der Gleitkörper/Slider (20) umfasst drei Schienen (21, 22 und 30). Der Magnetkern (40) wurde samt Wicklung (42) mit einem Glaskitt an die Hinterfläche (28) des Sliders (20) geklebt (aus DE 24 07 500 A).

Viele kleine Entwicklungsschritte führten schließlich über den Winchester-Kopf (DE 24 07 500 A) in den 1970er Jahren (das prinzipielle Design wird auch heute noch verwendet, vergleiche Figur 4), der nur noch mit 20 g belastet wurde (bei einem Kopf-Platte-Abstand von knapp unter einem Mikrometer), und über den ersten Dünnfilm-Kopf in der IBM 3370 (US 3 344 237 A; US 4 190 872 A) in den 1980er Jahren (bei einem Kopf-Platte-Abstand von einigen 100 nm) zum ersten magneto-resistiven (MR-) Kopf (DE 22 63 077 A; DE 24 42 566 A), wobei die jährliche Steigerungsrate der Speicherdichte bei 25 % lag, das heißt also bei einer Verdopplung alle vier Jahre.

Ab 1990/91, mit Einführung des MR-Kopfes, stieg die Steigerungsrate auf 60 % und ab 1997 mit Einführung des GMR-Kopfes (DE 690 19 485 T2) auf 100 % verdoppelte sich die Speicherdichte jedes Jahr.

Das Patent zum GMR-Effekt (DE 38 20 475 C1), für den Peter Grünberg im Jahre 2007 den Nobelpreis erhielt, gilt als das erfolgreichste Patent der KFA Jülich mit Lizenzeinnahmen im zweistelligen Millionenbereich.

MR- (genauer der Anisotrope Magnetowiderstands-) und GMR-Effekt (GMR = Giant Magnetoresistance) sind beides Erscheinungen der Änderung des elektrischen Widerstandes in einem sich ändernden Magnetfeld und beruhen beide auf spinabhängigen Streuphänomenen. Obwohl in der Literatur oft nur der GMR als rein quantenmechanisches Phänomen dargestellt wird, lassen sich beide Effekte nur durch die Quantenmechanik verstehen. Anschaulich gesprochen resultiert der MR-Effekt durch die Asymmetrie und Änderung (Aufspaltung) der Wellenfunktion in einem Magnetfeld (Streuung der s-Elektronen in die freien d-Zustände an der Fermi-Kante), während sich beim GMR-Effekt zwei Wellenfunktionen über die Austauschkopplung beeinflussen, wovon eine Wellenfunktion wiederum durch ein Magnetfeld beeinflusst wird, während die andere festgepinnt ist [1]. Demzufolge funktioniert der GMR-Effekt auch nur in Schichtstrukturen, wobei zwei magnetische Materialien durch eine dünne, leitende (!) nicht-magnetische Schicht (zum Beispiel Kupfer) voneinander getrennt sind [2].

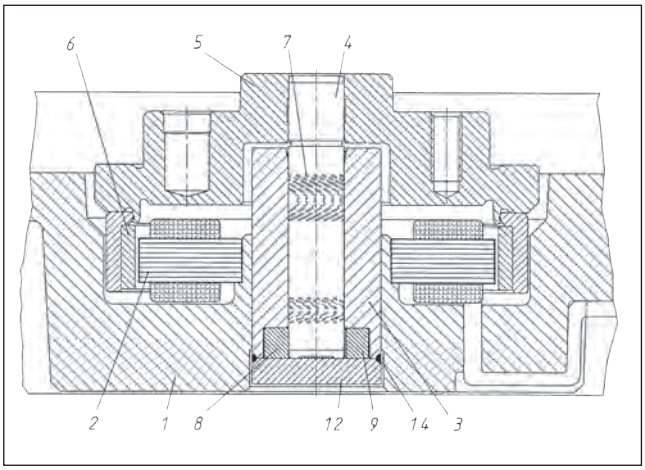
Der Vorteil des GMR-Effektes ist die höhere Empfindlichkeit bei gleicher Sensor-Schichtdicke; somit ist das Auslesen kleinerer Strukturen möglich.

Bei einer Daten(flächen)dichte (areal density) von 200 GBits/in² beträgt die Spurdichte (track density) 200 kTPI (TPI; Tracks Per Inch). Dem entspricht eine Fläche für ein Bit von 120 nm * 25 nm. Die Sensor-Schichtdicke muss somit bedeutend geringer als 25 nm sein. Bei einer Sensor-Schichtdicke von 10 nm liefert ein GMR-Sensor ein mehr als dreimal so großes Signal wie ein MR-Sensor.

Mit der Innovation im Sensorenbereich gingen auch große Verbesserungen bei den Platten, besonders der Oberflächenbeschichtung, einher. Bei einer Flughöhe von einigen Nanometern werden hohe Anforderungen an die Oberflächenbeschichtung hinsichtlich Rauheit (roughness), Welligkeit (waviness) und Abriebfestigkeit gestellt. Die Plattenoberfläche ist mittlerweile mit einer 3–5 nm dicken diamantartigen Kohlenstoffbeschichtung (carbon overcoat) geschützt und war schon 1995 so glatt, dass Schreib-Lese-Köpfe, die auf ihr landeten, fest haften blieben. IBM strukturierte daraufhin die Landezonen mittels Laser (laser zone texture bumps), was den Verschleiß der Köpfe und der Plattenoberfläche stark verminderte (DE 694 20 812 T2).

Als Substrat dienen nach wie vor Aluminiumlegierungen, wobei auch Glas und Glaskeramiken verwendet werden, die noch glatter sind und höhere Eigenfrequenzen (Resonanzflattern; flutter) besitzen. Diese betragen bei Plattendicken von

1 mm einige kHz und können zu unerwünschtem Kontakt zwischen Schreib-Lese-Kopf und Plattenoberfläche führen. Eine Dämpfung kann zum Beispiel durch zusätzliche Dämpfungsplatten erreicht werden, die zwischen den eigentlichen Datenplatten platziert werden (EP 1 256 939 A2). Auch die Schrägneigung der Platte(n) führt zu einer unerwünschten Unrundheit (runout) im Bereich einiger Mikrometer. Überlagert werden diese „großen Wellen" von der Welligkeit des Substrats (mm- und µm-Wellen) und der Rauheit der Beschichtung (nm-roughness).

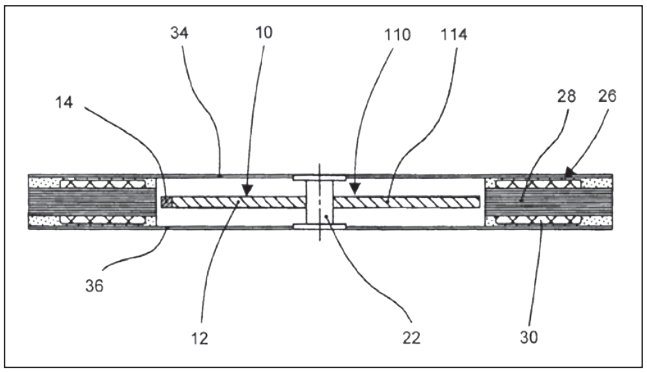


Figur 5: Spindelmotor einer Festplatte mit einem hydrodynamischen Lagersystem (aus DE 102 39 650 B3). Die Rotorglocke (5) enthält einen ringförmigen Permanentmagneten (6) und ist mit der Welle (4) verbunden, die mit einem Rillenmuster (7) versehen ist. Sobald der Rotor, und somit auch die Welle (4), sich in Bewegung setzt, baut sich aufgrund des Rillenmusters (7) ein hydrodynamischer Druck im Lagerspalt beziehungsweise im darin befindlichen Schmiermittel auf, sodass das Lager tragfähig ist.

Umso näher der Schreib-Lese-Kopf über der Plattenoberfläche hinweg fliegt, desto geringer sollten obige Abweichungen von der idealen Ebene sein. Bei einer Flughöhe von 5 nm darf die Abweichung nur 0,6 nm betragen. Ist der Abstand größer, verliert der Sensor das Signal. Ist der Abstand geringer, so nehmen die Platte-Kopf-Kontakte und damit auch die Gefahr eines sogenannten Head-Crashs zu.

Auch die Fehleranfälligkeit von Festplatten wurde in den letzten Jahrzehnten – aufgrund der Konkurrenz der Hersteller untereinander, aber auch der Konkurrenz mit anderen Produkten (Flash und so weiter) – enorm gesteigert. Lag die MTTF (Mean Time To Failure) 1990 noch bei 100 000 h, so betrug sie 2000 schon 1 000 000 h [3]. Eine Reduzierung der Flughöhe von nur einem Nanometer würde die MTTF natürlich wieder heruntersetzen. Insofern muss der Hersteller einen Kompromiss zwischen höchst möglicher Datendichte (Prototypen) und marktfähiger Fehleranfälligkeit eingehen.

Eine weitere wichtige Festplattenkomponente stellt der Motor dar. Hier vollzog sich in den letzten Jahren der Übergang von Festplatten-Motoren mit Kugellagern zu hydrodynamischen Gleitlagern (DE 69 625 569 T2) (vergleiche Figur 5).



Figur 6: Festplattenantrieb bei dem der elektromagnetische Antrieb in den Außenbereich verlagert wurde, womit ein noch flacherer Aufbau möglich ist (aus DE 102 39 650 B3). Der ringförmige Stator (26) ist um die Platte (10) angeordnet und Permanentmagnete (14) sind in die Platte integriert, sodass die Platte selber den Rotor bildet.

Diese besitzen gegenüber Kugellagern große Vorteile hinsichtlich der Geräuschreduzierung (bis zu 20 dB), der Stoßfestigkeit (shock resistance) und einer Reduzierung der NRRO (Non Repeatable Run-Out) um eine Größenordnung.

Mit einer Forderung einer noch glatteren Oberfläche wird auch die Strukturierung (texturing) der Start-Landezonen auf der Platte (laser-bumps und so weiter) problematisch. Eine Möglichkeit Start-Lande-Zonen auf der Platte zu vermeiden, besteht in der Konstruktion spezieller Start-Lande-Rampen neben der Platte. Obwohl dieses Verfahren schon in den Anfängen der Festplattentechnologie bekannt war, erlebt es nun eine Renaissance (DE 600 13 422 T2).

Die Rampe kann auch benutzt werden, um den Kopf bei Erschütterungen in Sicherheit zu bringen. Durch den vielfältigen Einsatz der Festplatte in mobilen Einheiten (Notebook, Auto, MP3-Player, Camcorder) und die Stoßunempfindlichkeit von Konkurrenzprodukten (Flash und so weiter) wird die Stoßfestigkeit ein wichtiger Produktparameter (US 5 521 772 A; WO 2005/ 04 127 A1; US 7 199 969 B2). In neueren Festplatten reagieren Beschleunigungssensoren innerhalb von

160 ms (entspricht einer Fallhöhe von 10 cm), sodass auch Erschütterungen von mehreren 100 G (G = Erdbeschleunigung) schadlos überstanden werden können.

Neben der Rampentechnologie können die Köpfe auch durch eine Vergrößerung der Flughöhe stoßfester gemacht werden. Hierbei wird zum Beispiel durch ein Heizelement im Kopf die Flughöhe gezielt geregelt (US 5 991 113 A; JP 2007-184 023 A).

Erst mit solchen Innovationen an allen Komponenten der Festplatte konnten die immensen technologischen Steigerungen hinsichtlich der Datendichte (um 8 Größenordnungen) und der Datentransferrate (mittlerweile im GBits/s-Bereich) erzielt werden.

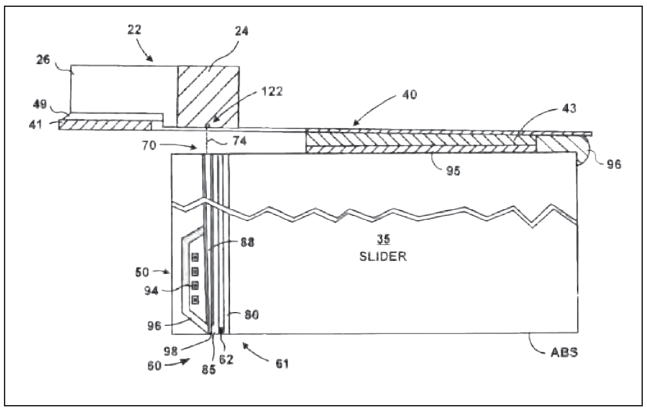
Würde man die Dimensionen eines Festplattenkopfes (beziehungsweise eines Sliders mit einer Länge von 1,25 mm) auf ein Flugzeug (Airbus A380 mit einer Länge von 72 m) übertragen, so müsste dieses in einem halben Millimeter Höhe bei einer Geschwindigkeit von mehr als 8 000 000 km/h Grashalme zählend über ganz Deutschland fliegen und dabei nur 20 Halme fehlerhaft zählen.

4. Das Ende der Festplattentechnologie

Trotz oder gerade wegen dieser phänomenalen Steigerung wurde immer wieder das Ende der Festplatte prognostiziert und ebenso wurde immer wieder die vorhergesagte Grenze überwunden.

Lange Zeit galt das superparamagnetische Limit als physikalische Grenze. Dies resultiert aus der angenommenen magnetischen Dünnschichttechnologie (eine magnetische Schicht mit longitudinaler/in-plane Magnetisierung). Demnach ist die physikalische Repräsentation des Bits eine Anhäufung von magnetisch ausgerichteten Körnern in der ansonsten homogenen Schicht, und diese werden bei Raumtemperatur ab einer bestimmten minimalen Größe magnetisch instabil und können daher für eine zuverlässige Speicherung nicht mehr verwendet werden. Die daraus resultierende Grenze liegt bei einigen 10 MBits/in². Trotzdem existieren heutzutage Festplatten mit mehr als 400 GBits/in².

Ermöglicht wurde dies durch eine Änderung der Voraussetzungen obiger Theorie, denn einmal kann durch eine magnetische Unterschicht (AFC; AntiFerro-magnetically-Coupled media) (DE 197 00 506 A1) und ein andermal durch eine senkrecht stehende Magnetisierung (PMR; Perpendicular Magnetic Recording) eine höhere Datendichte erreicht werden.



Figur 7: HAMR-Kopf (aus US 6 404 706 B1). Im Slider ist eine Laserdiode (24) integriert. Über einen optischen Wellenleiter (88) wird die Energie zum Schreib-Kopf (60) beziehungsweise zur Plattenoberfläche weitergeleitet.

Obwohl die Herstellung von PMR-Medien (US 2 853 407 A) und PMR-Köpfen (US 2 920 379 A; DE 10 92 702 A) schon lange bekannt war (ab 1955 arbeitete die IBM an dem Advanced Disk File Project, das auf PMR-Technologie beruhte, aber 1961 eingestellt wurde), kam erst 2005 die erste Festplatte mit PMR-Technologie auf den Markt (Toshiba, 1,8 inch-Laufwerk). Heute verwenden alle innovativen Modelle PMR-Technologie (2006 Seagate, 3,5 inch-Laufwerk; 2007 Hitachi, erste Terabyte-Platte mit 148 GBits/in²).

Mit konventionellen PMR-Medien sollen Speicherdichten von bis zu 500 GBits/in² erreicht werden, erst darüber müssen neue Wege beschritten werden. Eine mögliche Nachfolgetechnik heißt „Patterned Media" die Speicherdichten von mehr als 1 TBits/in² ermöglichen soll, wobei die Bits nicht mehr in einer homogenen magnetischen Schicht, sondern in einzelnen diskreten magnetischen „Punkten" gespeichert werden sollen [4]. Allerdings warten noch viele Herausforderungen (industrielle Herstellung; Spurführung und so weiter) auf die Entwickler.

Schreib-Lese-Köpfe mit Spurbreiten von 30 nm existieren schon, sollen ab 2009 in Produktion gehen und beruhen auf dem GMR-Effekt (genauer dem CPP-GMR; Current Perpendicular to the Plane-GMR (US 7 292 416 B2)). Daneben gelten TMR- (Tunnel Magneto Resistance) Köpfe als längst nicht ausgereizt (US 5 729 410 A).

Zum Schreiben bietet sich die Heat-Assisted Magnetic Recording (HAMR) Methode an (US 59 86 978 A), bei der eine Laserdiode die zu beschreibende magnetische Struktur kurz aufheizt und somit erst eine magnetische Manipulation ermöglicht (vergleiche Figur 7). Im Gegensatz zu magnetooptischen Technologien geschieht das Auslesen allerdings ohne optische Unterstützung.

Nach heutiger Sicht gelten 40 bis 50 TBits/in² (entspricht 78 kBits/µm², also einer Bitgröße von einigen Nanometern) als Grenze der Festplattentechnologie [5], die sie – bei einer jährlichen Steigerung von 30–40 % – in 15 bis 20 Jahren erreicht haben sollte. Ob sie dann mit 67 in den wohl verdienten Ruhestand treten und Platz für neue Technologien (Optische/Holografische Speicher und so weiter) machen darf, bleibt abzuwarten. Bis dahin werden noch eine ganze Reihe Innovationen (und somit auch Patente) zu erwarten sein.

Nicht-Patentliteratur

[1] BARNAS, J. et al.: Novel magnetoresistance effect in layered magnetic structures: Theory and experiment. In Phys. Rev. B. Band 42. 1990. S. 8110–8120.

[2] Animationen (java/flash) bzgl. MR und GMR heads finden sich im Internet: URL: http://www.research.ibm.com/research/gmr.html [recherchiert am 2.8.2008]

[3] SCHROEDER, B.; GIBSON, G.A.: Disk failures in the real world. Carnegie Mellon University. 2006. URL: http://www.pdl.cmu.edu/PDL-FTP/Failure/CMU-PDL-06-111.pdf [recherchiert am 20.8.2008]

[4] KIKITSU, A. [et al.]: Recent Progress of Patterned Media. In: IEEE Trans. on Mag., vol. 43, 2007, No. 9. S. 3685–3688.

[5] Eine gute Übersicht bietet auch das Hitachi San Jose Research Center. URL: http://www.hitachigst.com/hdd/research [recherchiert am 2.8.2008]

Abgasnachbehandlung für Personenkraftwagen mit Dieselmotoren

Dipl.-Ing. Karin Eisenmann & Dipl.-Phys. Stefan Schmidt, Patentabteilung 1.13

Nach einer Vielzahl technischer Innovationen erlebte der dieselbetriebene PKW in den letzten beiden Dekaden einen enormen Zuwachs der Absatzzahlen. Dadurch geriet der Diesel aber auch in den Fokus der Abgasgesetzgebung. Weltweit wurden die Emissionsgrenzen verschärft, so dass eine aufwändige Abgasnachbehandlung erforderlich geworden ist. Die damit verbundenen technologischen Hürden lösten eine rege Erfindertätigkeit aus. Schwerpunkte lagen auf dem Dieselpartikelfilter, der NO_x-Speichertechnologie, der selektiven katalytischen Reduktion sowie der Integration dieser Einzelbausteine in ein Gesamtkonzept. Heute gibt es eine Reihe konkurrierender Systeme, die in der Lage sind, auch künftige Grenzwerte einzuhalten. Neue Anforderungen an den CO_2-Ausstoß sowie der Wettbewerb mit neuartigen Ottomotorenkonzepten und Hybridtechnologie werden auch in Zukunft die weitere Entwicklung des Dieselmotors vorantreiben.

1. Einleitung

Der Automobilmarkt ist derzeit vom Wettbewerb um die sauberste Antriebstechnologie geprägt. Dies belegt beispielsweise eine Pressemitteilung aus der Stuttgarter Zeitung vom 18. April 2008 [1]. In diesem Wettbewerb konkurrieren mehrere innovative Konzepte um eine effektive Abgasreinigung bei Dieselfahrzeugen.

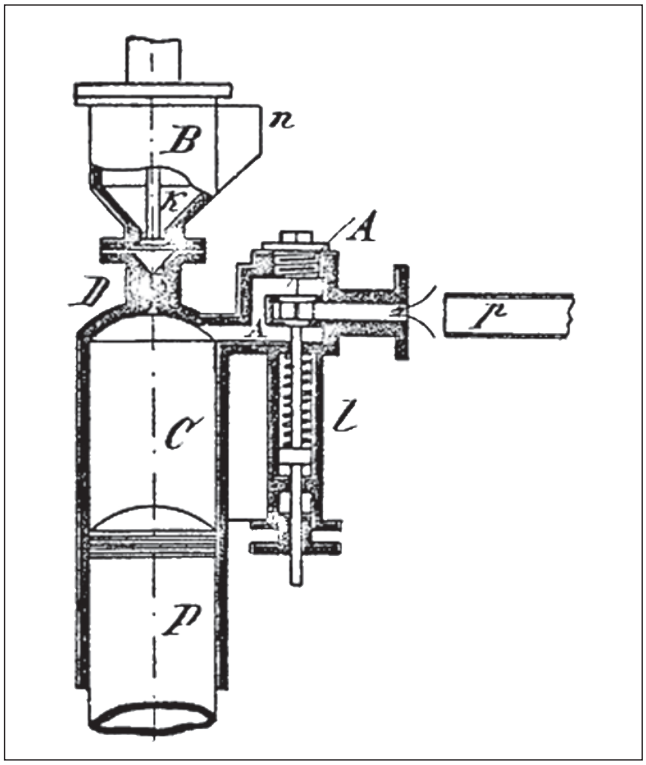
Dieser Artikel beschäftigt sich mit der Frage, warum die Abgasnachbehandlungstechnologie gerade für Hersteller von Dieselmotoren für PKW so wichtig geworden ist und welche Erfinderaktivitäten damit verbunden sind.

2. Historischer Rückblick

2008 jährt sich der Geburtstag des genialen deutschen Ingenieurs und Erfinders Rudolf Diesel zum 150. Mal. Anlass, einen Blick auf die Geschichte seiner größten Erfindung, den Dieselmotor, zu werfen.

Diesel suchte nach einer sparsamen Alternative zur damals marktbeherrschenden Dampfmaschine. Sein nach ihm benannter, selbstzündender Motor (DRP 67 207 vom 28. Februar 1892 und DRP 82 168 vom 29. November 1893) mit innerer Verbrennung erfüllte diese Anforderungen so erfolgreich, dass er nicht nur die Dampfmaschine verdrängte, sondern Weltgeschichte schrieb. Der Dieselmotor wurde ein Wegbereiter der allgemeinen Motorisierung, der Industrialisierung und schließlich der Globalisierung.

Viele Entwicklungsschritte und weitere Innovationen waren erforderlich, um Diesels Idee zum weltweiten Erfolg zu verhelfen. 1903 lief das erste Motorschiff mit Dieselmotor vom Stapel. 1908 wurde der erste Klein-Dieselmotor hergestellt,



Figur 1: Der Dieselmotor: Reichspatent 67 207 von 1893.

1912 wurde zum ersten Mal eine Lokomotive von einem Dieselmotor angetrieben. 1923 folgte schließlich der erste Lastwagen mit Dieselmotor und begründete die dominierende Stellung des Dieselmotors für den Warenverkehr. 150 Jahre nach der Geburt von Rudolf Diesel erfolgt ein bedeutender Teil des weltumspannenden Warenflusses mit dieselbetriebenen Lastwägen und Schiffen. Somit hat die Erfindung Rudolf Diesels auch zur Globalisierung beigetragen [2].

Im Jahr 1927 entwickelte Bosch die Einspritzpumpe für Dieselmotoren zur Serienreife. 1936 erschien der Dieselmotor

erstmalig in einem Serien-PKW, dem Mercedes-Benz 260-D mit dem 33 kW-Vorkammermotor OM138. Mit einem Verbrauch von 9,5 l auf 100 km war er deutlich wirtschaftlicher als der entsprechende Benzinmotor (13 l/100km). Er erreichte eine Höchstgeschwindigkeit von 90 km/h, nur 8 km/h weniger als der Benziner. Trotzdem führte der Dieselmotor als Antrieb für Personenkraftwagen lange Zeit ein Leben im Schatten des Ottomotors. Sein geringerer Verbrauch und seine relativ niedrigen Rohemissionen halfen ihm nicht, sich gegen den leistungsstärkeren, dynamischeren Konkurrenten durchzusetzen. Weitere technologische Meilensteine wie Turboaufladung mit Ladeluftkühlung, Vierventiltechnik und Erhöhung des Einspritzdrucks verhalfen dem Dieselmotor Ende der 1990er dann doch noch zum Erfolg [3,4]. Im Februar 2007 wurden 48,7 % aller in Deutschland neu zugelassenen PKW mit Dieselmotoren betrieben [5]. In Europa stieg der Dieselanteil von 20 % im Jahr 1995 [6] auf 53,3 % aller PKW-Neuzulassungen [7]. Die Zuwachszahlen der Dieselfahrzeuge fielen in eine Zeit, als der PKW-Markt in Europa bereits weitgehend gesättigt war. Europäische Automobilhersteller konnten ihre Absatzzahlen nur dann behaupten, wenn sie dem Trend folgten und attraktive Dieselmotoren in ihrer Angebotspalette aufweisen konnten. Dieseltechnologie wurde so zu einem wichtigen Mittel im Kampf um Marktanteile. Entsprechend wurden Forschung und Entwicklung verstärkt.

3. Treiber für die Technologieentwicklung in der Abgasnachbehandlung

Der Erfolg brachte neue Herausforderungen. Mit steigenden Neuzulassungen nahm auch der Anteil an den Schadstoffemissionen zu. Dies führte zu einer Gesetzgebung, die den Dieselabgasen immer engere Begrenzungen auferlegte.

Stufe	Jahr	CO mg/km	$HC+NO_x$ mg/km	NO_x mg/km	PM mg/km
Euro 3	2000	640	560	500	50
Euro 4	2005	500	300	250	25
Euro 5	2009	500	230	180	5
Euro 6	2014	500	170	80	5 + Anzahl

Tabelle 1: Europäische Abgasnormen für Diesel-PKW [8]

Ein Vergleich der Euro 3-Norm von 2000 mit der Euro 5 Norm für das Jahr 2009 zeigt beispielsweise für die Partikelmasse (PM) einen Rückgang der erlaubten Emission von 90 %. Die für 2014 geplante Euro 6 wird zwar die Partikelmasse nicht weiter einschränken, dafür ist geplant, zusätzlich eine Begrenzung der Partikelanzahl und damit insbesondere der Kleinstpartikel einzuführen. Die Anforderungen der Europäischen Gesetzgeber kann der Diesel nur noch mit einer umfangreichen Abgasnachbehandlung, speziell für Partikel mit einem Dieselpartikelfilter erfüllen.

Neben der Senkung der Schadstoffemissionen müssen beim Dieselmotor auch die CO_2-Emissionen verringert werden. Aufgrund seines höheren Wirkungsgrades gegenüber dem Ottomotor setzt die europäische Automobilindustrie hauptsächlich auf den Dieselmotor, um die von ihr eingegangene Selbstverpflichtung von 140 Gramm CO_2 pro Kilometer für /2009 zu erfüllen. Aber trotz des steigenden Dieselanteils scheint dieses Ziel nicht erreicht zu werden. 2006 lag der Durchschnittsverbrauch der Diesel-Neuzulassungen bei 172,5 g(CO_2)/km. Da die Selbstverpflichtung bisher nicht die erwünschte Wirkung gezeigt hat, beschloss die EU die verbindliche Senkung der CO_2-Emissionen ab 2012 auf 130 bzw. 120 g/km.

Die immer aufwändigere Abgasnachbehandlung führt nicht nur zu höheren Kosten, sie bedeutet auch einen Mehrverbrauch. Dies hatte zur Folge, dass 2006 der CO_2 Ausstoß bei Otto-PKW erstmals niedriger lag als beim Diesel [5]. Dabei muss man allerdings berücksichtigen, dass Dieselmotoren in der Regel in größeren, schwereren Fahrzeugen eingebaut werden als Ottomotoren, was teilweise den hohen Verbrauch erklärt.

Von den weltweit produzierten 50 Millionen PKW wurde etwa ein Drittel in Europa gefertigt. Damit ist Europa der weltweit größte Markt und die Automobilindustrie von großer Bedeutung für die europäische Wirtschaft. Der Automobilmarkt speziell in Westeuropa ist aber weitgehend gesättigt [7].

In den USA, dem zweitgrößten Markt für Personenkraftwagen, ist die Nachfrage nach Dieselmotoren traditionell sehr schwach ausgeprägt. Gelingt es den europäischen Herstellern, die amerikanischen Käufer von den Vorzügen der neuen Dieselgeneration zu überzeugen, eröffnen sich ihnen große Absatzchancen.

Allerdings ist dazu erst eine Hürde zu überwinden. Die amerikanische Umweltbehörde belegt den Dieselmotor mit strengeren Auflagen als die europäischen Gesetzgeber. Für 45 Bundesstaaten gilt die Tier 2 Bin 8-Vorschrift, die für Stickstoffoxide eine Grenze von 0,20 Gramm pro Meile vorschreibt. In den

restlichen fünf Staaten, Kalifornien, Massachusetts, New York, Vermont und Maine, beschränken die strengeren Regelungen der Tier 2 Bin 5, die NO_x-Emissionen auf 0,07g/mi. Während die Euro 5 – Grenzwerte weitgehend ohne NO_x-Nachbehandlung zu erreichen sein werden, ist eine 65-prozentige Absenkung der NO_x-Emissionen erforderlich, um die Fahrzeuge in allen US Bundesstaaten verkaufen zu können. Dieselpartikelfilter, wie sie bereits heute in Europa im Einsatz sind, werden auch in den USA zwingend erforderlich sein.

Obwohl die europäische Euro 6-Norm erst ab dem Jahr 2014 vorgeschrieben ist, werden viele Neufahrzeuge diese Norm bereits 2009/2010 erfüllen, da die erforderliche Technik einfach von den Fahrzeugen für den amerikanischen Markt übernommen werden kann [9].

Die Marktchancen in Amerika sind so groß, dass alle europäischen Automobilhersteller fieberhaft an Konzepten arbeiten, um die amerikanischen Normen erfüllen zu können, zumal absehbar ist, dass dieselben Konzepte auch für die Euro 6-Grenzwerte ausreichen werden.

Neben dem Zwang durch staatliche Regulierung hat die Abgasnachbehandlung auch dadurch an Bedeutung gewonnen, dass sie sich zunehmend zu einem Marketinginstrument entwickelt hat. Der Beweis gelang Peugeot bei der mediengerechten Einführung des Dieselpartikelfilters im Jahr 2000. Heute ist ein Diesel-PKW ohne Filter nur schwer verkäuflich – selbst wenn er die gesetzlichen Auflagen erfüllt.

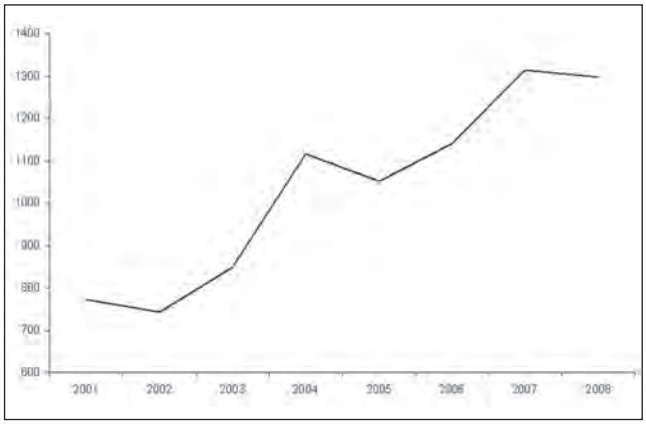
Doch nicht nur der Wettbewerb zwischen den Dieselherstellern treibt die technologische Entwicklung, auch der Wettbewerbsdruck durch neuartige Ottotechnologien und Hybridfahrzeuge setzt die Dieselentwicklung unter Zugzwang. Neben niedrigen Abgaswerten liegt deshalb ein weiterer Schwerpunkt der Entwicklung auf Wirtschaftlichkeit, d.h. niedrigen Kosten und geringem Verbrauch.

Ein Zielkonflikt, der nur durch Innovationen zu lösen ist. Die Abgasnachbehandlung für Diesel-PKW ist daher ein ideales Feld für Erfinder.

4. Statistik der Erfinderaktivitäten

Die oben ausgeführten Rahmenbedingungen, wie die strenger werdende Abgasgesetzgebung, der Zwang zur Kostenreduktion und der Wettbewerbsdruck mit anderen emissionsarmen Antriebskonzepten sind für eine steigende Anzahl von Patentanmeldungen, die sich mit der Abgastechnologie bei Kraftfahrzeugen beschäftigen, innerhalb der letzten Jahre verantwortlich. Im Jahr 2007 stieg die Zahl solcher vom DPMA und dem EPA erstveröffentlichter Patentdokumente mit Wirkung für Deutschland auf insgesamt 1314, was einen Zuwachs um mehr als 10 % gegenüber dem Vorjahr ausmacht. Dieses Niveau blieb im Jahr nahezu konstant.

Die nachfolgende Grafik zeigt den zeitlichen Verlauf oben genannter Patentanmeldungen seit dem Jahr 2001. Die hierbei ausgewerteten IPC-Klassen betreffen Abgasbehandlungsvorrichtungen für Brennkraftmaschinen, deren Steuerung und Überwachung (F01N 3/ff, F01N 5/ff, F01N 9/ff, F01N 11/ff) sowie relevante Bereiche aus der elektrischen Steuerung und Regelung von Brennkraftmaschinen (F02D 41/ff – F02D 45/ff) [10].



Figur 2: Anzahl der vom DPMA und vom EPA erstveröffentlichten Patentdokumente, welche die Kfz-Abgastechnologie betreffen, [10].

5. Erfinderaktivitäten

Nach heutigem Stand der Technik ist es nicht möglich, die Grenzwerte der Euro 5 oder vergleichbarer amerikanischer Gesetzgebung nur mit Maßnahmen am Motor selbst zu erreichen. Deshalb muss ein Abgasnachbehandlungskonzept vorgesehen sein, die limitierten Schadstoffkomponenten Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x) und Partikel in erforderlichem Umfang umzuwandeln und dabei gleichzeitig Mehrverbrauch und Mehrkosten in Grenzen zu halten.

Dazu müssen die Ingenieure innovative Ansätze entwickeln und zusammen mit bereits bekannten und bewährten Technologien zu neuen, optimierten Systemlösungen kombinieren.

5.1 Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid

Die Umwandlung nichtverbrannter beziehungsweise nicht vollständig verbrannter Kraftstoffbestandteile ist die älteste Art der Dieselnachbehandlung. Entsprechende Katalysatoren, die Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid mit auf Platin und Palladium basierenden Wabenkatalysatoren oxidieren, sind seit den siebziger Jahren im Einsatz. Die künftigen Grenzwerte für Kohlenwasserstoffe sind mit den bekannten Technologien zu erreichen. Im Rahmen der Filterregenerationsstrategien, siehe hierzu auch 5.3, werden allerdings höhere Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit und die Umsatzmengen der Katalysatoren gestellt.

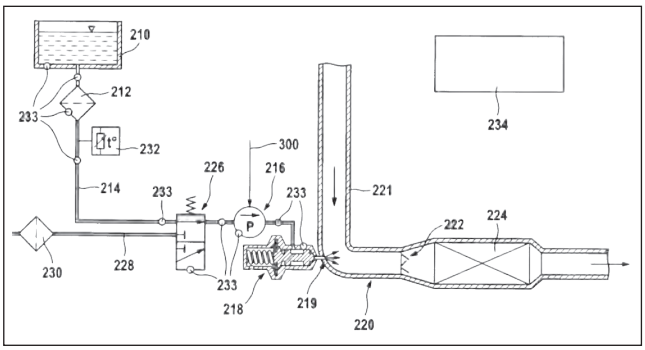
5.2 Stickstoffoxide

Stickstoffoxide sind Reizgase und daher gesundheitsschädlich. Überdies tragen sie wesentlich zur Bildung bodennahen Ozons bei. Stickstoffoxide werden während der Verbrennung im Zylinder gebildet, insbesondere bei hohen Temperaturen und Luftüberschuss. Im Gegensatz zum Ottomotor können sie nicht in einem Dreiwegekatalysator reduziert werden, da der Diesel konzeptbedingt mit Luftüberschuss arbeitet. Somit sind die Voraussetzungen für eine katalytische Reduktion nicht gegeben.

Für die NO_x-Minderung bei Abgasen mit Luftüberschuss gibt es zwei unterschiedliche Ansätze: Konzepte mit selektiver katalytischer Reduktion und NO_x-Speicherkatalysatoren.

5.2.1 Selektive katalytische Reduktion (SCR – Selective Catalytic Reduction)

Selektive katalytische Reduktion (SCR) ist ein Konzept zur nachmotorischen Entstickung, das bei LKW schon seit längerem im Einsatz ist. Dem Abgas wird ein Reduktionsmittel beigemischt, das den Luftüberschuss ausgleicht und in einem SCR-Katalysator die selektive Reduktion von Stickstoffoxiden bewirkt. Das Reduktionsmittel wird kontinuierlich zugegeben.



Figur 3: SCR-System mit Tank und Einspritzdüse (aus DE 10 2006 012 855 A1).

Als Reduktionsmittel kommen verschiedene Stoffe in Frage, unter anderem auch Kraftstoff. Allerdings erhöht die Zugabe von Kraftstoff den Verbrauch und die CO_2-Emissionen. Die heute gängige Alternative ist die Verwendung von Ammoniak (NH_3). Da Ammoniak ein ätzendes Gas ist, dessen Mitführen äußerst unpraktisch ist, wird es erst bei Bedarf im Fahrzeug gebildet. Ausgangsstoff ist in der Regel eine wässrige Harnstofflösung. In Deutschland hat sich die Automobil- und die Mineralölindustrie auf einen Standard geeinigt, der unter dem Namen „AdBlue" im Handel ist.

SCR wird kontinuierlich betrieben, das heißt dass die Reduktionsmittelzugabe stets möglichst genau auf die Stickstoffoxidemissionen abgestimmt sein muss. Bei zu hoher Dosierung kommt es zu Sekundäremissionen von Ammoniak, das sehr geruchsintensiv und darüber hinaus gesundheitsschädlich ist. Eine zu geringe Dosierung wiederum führt dazu, dass nicht die erforderlich hohe Umwandlungsrate erreicht wird, um die Stickstoffoxidgrenzwerte zu erzielen.

Personenkraftwagen haben im Vergleich zu Lastwagen zum Teil sehr dynamische Fahrmuster, was die exakte Dosierung erschwert. Der SCR-Katalysator, in dem die Umwandlung erfolgt, hat deshalb eine gewisse Speicherfähigkeit, um sprunghafte Änderungen der Betriebsbedingungen abfangen zu können.

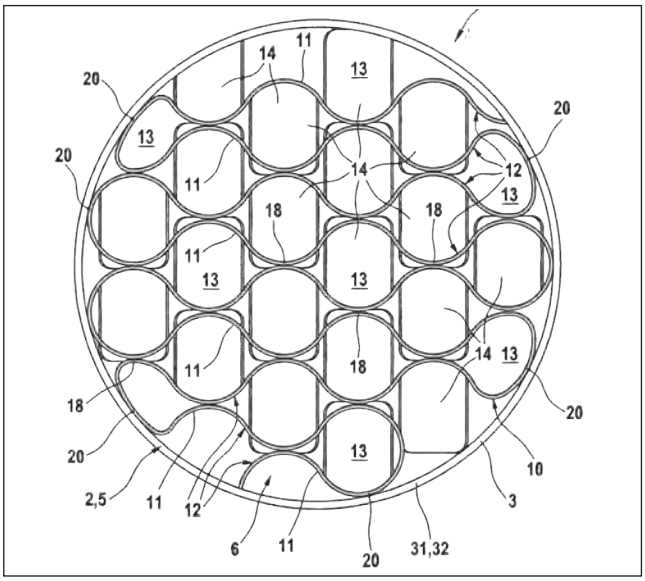
Ein Großteil der Erfinderaktivitäten befasst sich mit der Aufgabe, die Dosierung des Reduktionsmittels zu optimieren (DE 10 2006 039 381 A1, DE 10 2006 016 447 A1, DE 10 2006 016 447 A1, DE 10 2006 021 988 A1). Die eingegangenen Anmeldungen umfassen eine Bestimmung der aktuellen Rohemissionen, eine Überwachung der Reaktionsraten sowie des Ammoniakschlupfs (DE 10 2005 062 120 A1, DE 10 2006 026 739 A1). Dazu gehört auch die Entwicklung geeigneter, ammoniakselektiver Sensoren (DE 10 2006 013 698 A1, EP 1 600 768 A1).

Zur Optimierung der Dosierung ist es zudem erforderlich, den Füllstand des Ammoniakspeichers zu überwachen. Auch hierzu gibt es verschiedene Vorschläge (DE 10 2006 056 857 A1, DE 10 2005 050 709 A1).

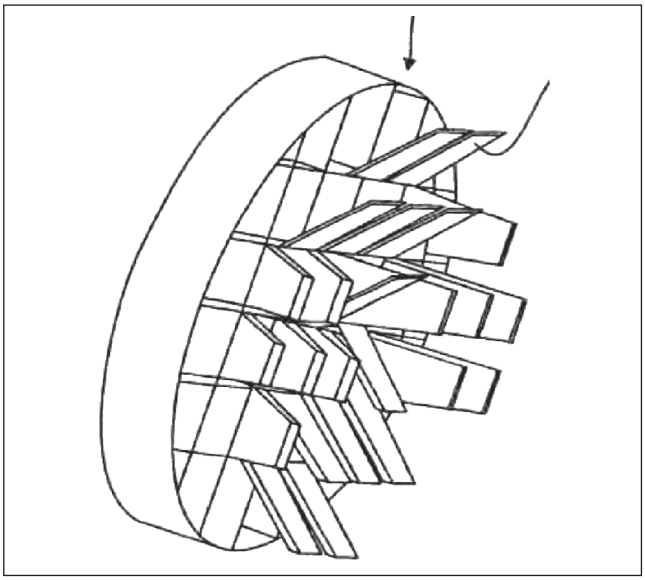
Um die erforderlichen Umwandlungsraten zu erreichen, ist es nicht ausreichend, die Zugabe von Harnstoff auf die Stickstoffoxidkonzentration abzustimmen. Ebenso wichtig ist es, den Harnstoff optimal im Abgas zu verteilen. Eine Ungleichverteilung im SCR-Katalysator führt zu lokalem Überschuss

beziehungsweise Mangel an Reduktionsmittel und somit sowohl zu Ammoniak- wie auch zu Stickstoffoxidemissionen.

Die wässrige Harnstofflösung wird unter Druck in das Abgas eingesprüht. Anschließend verdampfen die Tröpfchen im heißen Abgas und das sich bildende Ammoniak vermischt sich. Allerdings benötigt man für eine homogene Vermischung etwa einen Meter Mischlänge. Da dies aber kaum im eng begrenzten Bauraum eines modernen PKW unterzubringen ist, versucht man, die Mischstrecke durch geschickte Führung des Abgases und durch mechanische Mischer zu optimieren (vgl. Figuren 4 bis 6).

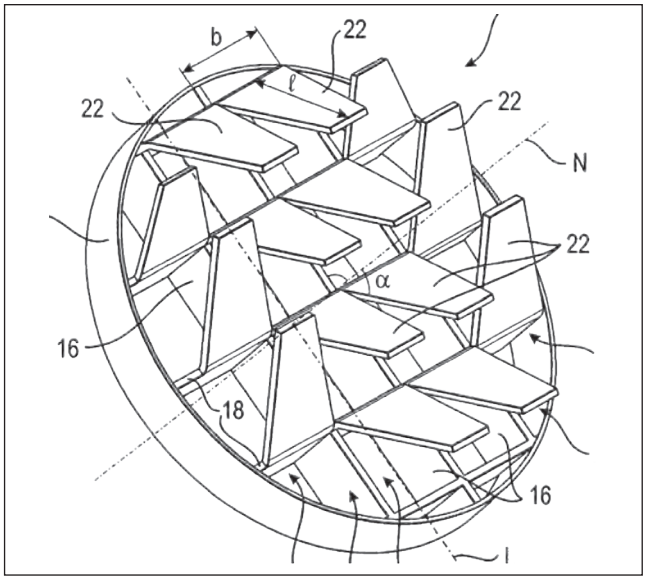


Figur 4: Mischer der Firma Eberspächer (aus DE 10 2006 024 778 B3).



Figur 5: SCR-Mischer von Audi (aus DE 10 2006 058 715 B3).

Mischer sind ein hart umkämpftes Feld, bei dem um jede kleine Änderung gerungen wird, die Verbesserungen bezüglich Durchmischung, Haltbarkeit oder Kosten verspricht.



Figur 6: SCR-Mischer von Emcon (aus DE 10 2006 055 036 A1).

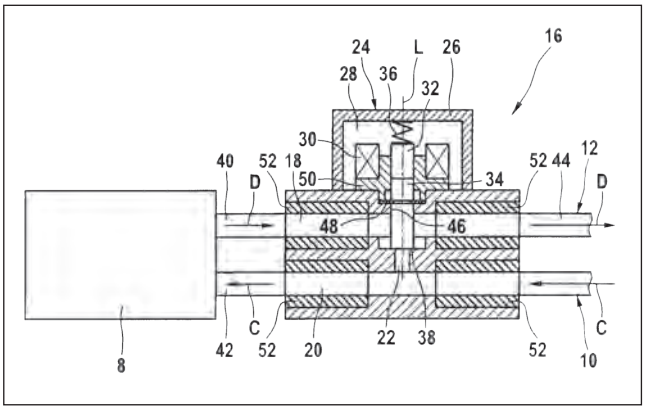
Dies zeigt sich anhand der Mischerkonzepte von Audi (Figur 5) und Emcon (Figur 6). Beide unterscheiden sich lediglich in der Stellung der Umlenkschaufeln.

Eine weitere Aufgabe ist die Entwicklung geeigneter Mittel zur Bereitstellung des Reduktionsmittels, das heißt dem Tank, den Leitungen und des Dosierventils. Das System muss dauerhaltbar und insbesondere auch frostsicher sein, da die Harnstofflösung bei -11 °C gefrieren würde. Eine elektrische Heizung des Zusatztanks und der Leitungen sorgt dafür, dass das System auch bei Minusgraden zuverlässig arbeitet.

Eine vielversprechende Entwicklung bieten hierbei Injektoren, die den Harnstoff ohne Druckluft zerstäuben (DE 10 2006 019 051 A1, DE 10 2006 012 855 A1). Daneben werden aber auch Alternativen zur Bevorratung des Ammoniaks als wässrige Harnstofflösung untersucht. Ansätze ergeben sich in der Speicherung von festem Harnstoff (DE 10 2006 021 877 A1) und in Form von Magnesiumdichloridammonium (WO 2007/ 000 170 A1, WO / 009 455 A1, WO 2007/ 095 955 A1).

Wie bei jeder Abgasnachbehandlungstechnologie ist auch bei der selektiven katalytischen Reduktion die Überwachung der Reinigungsfunktion während des Fahrbetriebs erforderlich.

Entsprechende Vorschläge zur gesetzlich vorgeschriebenen On-Board-Diagnose (OBD) findet man beispielsweise in (DE 10 2006 0210 89 A1, DE 10 2006 025 131 A1, DE 10 2006 026 739 A1).



Figur 7: Druckluftlose Einspritzung (aus DE 10 2006 019 051 A1).

Selektive katalytische Reduktion ist eine Technologie, die trotz des noch bestehenden Optimierungsbedarfs hohe Umwandlungsraten von Stickoxiden ermöglicht. Im Gegensatz zu Speicherkatalysatoren ist sie weitgehend unempfindlich gegenüber schwefelhaltigem Kraftstoff.

Sieht man von den Verlusten durch höheren Strömungswiderstand aufgrund von Katalysator und Mischer ab, verursacht selektive katalytische Reduktion keinen zusätzlichen Mehrverbrauch an Kraftstoff. Allerdings entsteht auch bei der Herstellung des Reduktionsmittels das Treibhausgas Kohlendioxid.

Der Verbrauch von Reduktionsmittel beträgt bei einem Personenkraftwagen ein bis zwei Prozent des Dieselkonsums.

Der wesentliche Nachteil der SCR-Technologie liegt in der Komplexität und den damit verbundenen Kosten. Neben dem SCR-Katalysator ist ein Einspritzsystem inklusive Zusatztank erforderlich. Ein weiteres Problem ist die flächendeckende Versorgung mit AdBlue. Derzeitige Konzepte sehen vor, den Tank so groß zu machen, dass AdBlue nur nach den Wartungsintervallen wieder gefüllt werden muss.

5.2.2 NO_x-Speicherkatalysatoren (LNT – Lean NO_x Trap)

Bei dieser Technologie verwendet man Katalysatoren, die neben der herkömmlichen Dreiwegebeschichtung noch über eine Komponente verfügen, die in der Lage ist, während des Magerbetriebs Stickstoffoxide einzufangen und zu speichern. Dies geschieht bei Temperaturen ab 150 °C, wobei der Katalysator seine volle Wirksamkeit im Bereich zwischen 300 und 400 °C hat [11]. Eine Reduktion der Stickstoffoxide ist allerdings in einer mageren, das heißt sauerstoffreichen, Umgebung nicht möglich.

Da die Speicherfähigkeit eines Katalysators begrenzt ist, muss der Speicher von Zeit zu Zeit geleert werden; abhängig von der Größe des Katalysators und den Betriebsbedingungen etwa alle zwei Minuten. Dazu muss die Abgastemperatur angehoben und der Motor fett betrieben werden. Die dann im Abgas enthaltenen Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxide reagieren mit den Stickstoffoxiden an der Katalysatoroberfläche. Bei richtiger Konzentration verwandeln sich die Schadstoffe in die ungefährlichen Substanzen Kohlendioxid, Wasser und Stickstoff.

Durch die Verwendung von Kraftstoff als Reduktionsmittel steigt zwar der Kraftstoffverbrauch, dafür entfällt eine aufwändige Peripherie wie bei der selektiven katalytischen Reduktion.

Allerdings ist auch die NO_x-Speichertechnologie mit erheblichem Regelungsaufwand verbunden. Eine Vielzahl von Erfindungen hat daher die Aufgabe, die Regeneration des Speicherkatalysators zu verbessern und damit den Mehrverbrauch auf das notwendige Minimum zu beschränken. Die Erfindungen betreffen sowohl die Diagnose des Beladungsgrades und die damit verbundene Auslösung der Regeneration sowie das Erkennen des Regenerationsendes (DE 10 2006 018 628 A1).

Darüber hinaus werden viele Vorschläge zur Durchführung und Regelung der Regeneration, das heißt der Temperaturerhöhung und der Anfettung, gemacht.

Ein grundsätzliches Problem der Speicherkatalysatoren ist ihr Alterungsverhalten. Dabei sind zwei prinzipiell unterschiedliche Alterungspfade zu unterscheiden. Eine Ursache ist die Empfindlichkeit der Speicherbeschichtungen gegenüber im Kraftstoff enthaltenem Schwefel, der im Abgas als Oxid vorliegt. Die Schwefeloxide werden ebenfalls in den Speicherkatalysatoren eingefangen und stehen damit in Konkurrenz mit den Stickstoffoxiden. Allerdings ist die Schwefelbindung wesentlich stärker, so dass sie nicht unter normalen Regenerationsbedingungen herausgelöst wird. Deshalb füllen die Schwefeloxide die freien Speicherplätze im Laufe der Zeit immer stärker, sodass die Aufnahmefähigkeit für Stickstoffoxide abnimmt.

Um die Speicher von den Schwefeloxiden zu befreien, ist eine Regeneration unter wesentlich härteren Bedingungen, das heißt bei 750 °C und größerer Anfettung, notwendig. Diese sogenannte Schwefelregeneration ist relativ aufwändig und stellt große Anforderungen an den Dieselmotor, der ja gewöhnlich sehr mager und mit niedrigen Temperaturen betrieben wird. Während der Schwefelregeneration besteht die Gefahr, dass sich aus dem frei werdenden Schwefeldioxid in der reduzierenden Umgebung Schwefelwasserstoff bildet – ein Gas, das nicht nur ätzend ist, sondern auch den penetranten Geruch von faulen Eiern verbreitet.

Durch die Einführung von Kraftstoff mit nur 10 ppm Schwefelanteil verlängern sich die Intervalle zwischen den Schwefelregenerationen, überflüssig werden sie aber nicht.

Thermische Alterung der Beschichtung ist die zweite Ursache für das Abnehmen der Katalysatoraktivität, die durch Agglomeration und Sinterung des Katalysatormaterials hervorgerufen wird. Leider sind beide Alterungsmechanismen gekoppelt. Bei jeder Schwefelregeneration wird die Temperatur erreicht, bei der thermische Alterung auftritt.

Die genannten Probleme geben die Richtung für die weitere Entwicklung der Beschichtungen vor. Inzwischen gibt es Beschichtungen, die für relativ hohe Temperaturen geeignet sind – leider auf Kosten des Niedertemperaturverhaltens. Umgekehrt sind Beschichtungen verfügbar, die bereits bei niedrigen Temperaturen aktiv sind, aber dafür sehr schnell altern. Entsprechend muss für jede Anwendung – ob motornah oder im Unterbodenbereich – die richtige Beschichtung ausgewählt werden.

Des Weiteren ist es gelungen, die für die Schwefelregeneration notwendige Temperatur von 750 auf 650 °C zu senken und somit auch die thermische Alterung zu reduzieren [12]. Für NO_x-Speicherkatalysatoren ist darüberhinaus ebenfalls als nachteilig anzusehen, dass der Dieselmotor zur Regeneration etwa alle zwei Minuten fett betrieben werden muss. Das bedeutet, dass die Anfettung auch in ungünstigen Verkehrssituationen erfolgen muss, zum Beispiel in stockendem Verkehr.

Wie bei der Filterregeneration werden auch beim Betrieb des Speicherkatalysators späte Nacheinspritzungen in die Zylinder dazu verwendet, dem Abgas unverbrannte Kohlenwasserstoffe zuzuführen. Eine solche späte Nacheinspritzung wird beispielsweise 60° bis 120° nach dem oberen Totpunkt durchgeführt.

Während beim Filter lediglich eine Temperaturerhöhung bei insgesamt magerem Abgas erreicht werden muss, ist bei der Regeneration des Speicherkatalysators ein Luftmangel erforderlich.

Diese späte Einspritzung von zusätzlichem Brennstoff erhöht nicht nur den Verbrauch, sondern führt dazu, dass sich Kraftstoff an der Zylinderwand niederschlägt und sich mit dem dort befindlichen Öl vermischt. Ein Teil dieses zusätzlichen Brennstoffes gelangt so in die Ölwanne, wodurch das Motoröl verdünnt wird, so dass die Schmiereigenschaften des Öls nachteilig beeinflusst werden. Daher sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich, diesen Brennstoff aus dem Öl herauszufiltern.

Sowohl selektive katalytische Reduktion als auch die Verwendung von NO_x-Speicherkatalysatoren haben systembedingte Nachteile. Dennoch werden wohl beide Systeme auf dem Markt ihren Platz finden. Bei großen, schweren Fahrzeugen ist eine so hohe Umwandlungsrate erforderlich, wie sie nur SCR-Systeme bieten können. Hohe Systemkosten fallen hier weniger ins Gewicht. Bei kleineren PKW bedarf es nur relativ wenig NO_x-Nachbehandlung. Hier werden günstigere und platzsparende Systeme mit Speicherkatalysatoren zum Einsatz kommen.

5.3 Dieselpartikelfilter

5.3.1 Historie

Erste Dieselpartikelfilter wurden im Zusammenhang mit dem wachsenden Umweltbewusstsein in den USA Ende der 1960er Jahre zum Patent angemeldet. Eine nennenswerte Entwicklung der erfinderischen Tätigkeit zu diesem Thema begann jedoch Ende der 1970er Jahre mit der sich abzeichnenden Verschärfung der Abgasgesetzgebung für Kalifornien. Für diesen Markt entwickelte Daimler-Benz mit Zulieferfirmen eine Lösung mit einem Keramik-Wabenkörper, die Mitte der 1980er Jahre bei einem PKW mit Turbolader in die Serie eingeführt wurde. Die typischen Fahrzyklen der Anwender in Kalifornien, mit hohem Kurzstreckenanteil und geringen Höchstgeschwindigkeiten führten zu Problemen in der Dauerhaltbarkeit des Systems. Probleme bereiteten unter anderem die Ablösung von Keramikpartikeln aus dem Filter, die mechanische Schäden am Turbolader verursachten, und Ausfälle durch eine Überhitzung des Filters. Das System wurde nach zirka zwei Jahren wieder vom Markt genommen. In den darauf folgenden Jahren 1993 bis 1996 führten die noch moderaten Abgasgesetze in Europa und die damit ausbleibende Nachfrage an Partikelfiltern am Markt sowie die

Verbesserungen in der Einspritztechnik durch die vermehrte Verwendung elektronischer Einspritzsysteme zu einem Einbruch der Entwicklungsaktivitäten beim Partikelfilter. Erste Erfolge mit elektronisch gesteuerten Common Rail- und Pumpe-Düse-Einspritzsystemen waren so vielversprechend, dass man annahm, zumindest mittelfristig auf einen Partikelfilter verzichten zu können. In den späten 1990er Jahren begann ein neuer steilerer Anstieg der Erfinderaktivitäten, der insbesondere durch die wachsende Verbreitung des Dieselmotors als Fahrzeugantrieb sowie durch die sich abzeichnenden strengeren Umweltauflagen in Europa, Japan und den USA ausgelöst wurde. Ein weiterer Schub folgte zu Beginn dieses Jahrhunderts mit der Markteinführung von Partikelfiltersystemen durch Peugeot mit Zugabe von Regenerationsadditiven zum Dieselkraftstoff. Auch die aus medizinischer Sicht zunehmend kritisch gesehenen lungengängigen Partikel im Abgas des Dieselmotors waren für diese Steigerung der Patentanmeldungen verantwortlich [13].

Dieselpartikelfilter gehören heute zur Standardausrüstung des Großteils europäischer sowie aller Diesel-PKWs in den USA und Japan [9]. Wohingegen ein Partikelfilter zur Einhaltung der aktuell gültigen Euro 4-Grenzwerte für PKW-Applikationen nicht grundsätzlich erforderlich ist, wird die in 2009 in Kraft tretende Norm Euro 5 und insbesondere die strengere US-Norm US Tier 2 Bin 5 nicht mehr ohne Dieselpartikelfilter zu erfüllen sein [14].

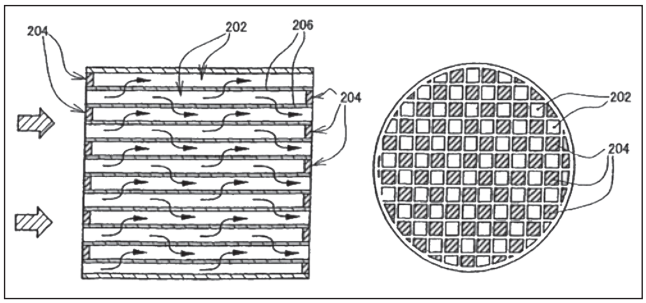
5.3.2 Funktion

Ein Partikelfiltersystem für eine PKW-Anwendung sollte als wartungsfreies System ausgeführt sein und einen zur Erfüllung der Abgasnormen über die Fahrzeuglebensdauer ausreichenden Abscheidegrad bei möglichst geringem Abgasgegendruck erzielen. Weiterhin sind gute Regenerationseigenschaften ohne übermäßigen Kraftstoffmehrverbrauch gefordert. Filterkonstruktionen aus Keramik und Sintermetall und die sog. offenen Nebenstromfiltersysteme sowie die verschiedenen Regenerationstechniken wurden bereits in „Erfinderaktivitäten 2004/2005“ beschrieben [15,16].

Für die Abgasreinigung beim PKW kommen in der Erstausrüstung üblicherweise sog. Wandstromfilter aus Keramiksubstrat zum Einsatz. Damit kann nahezu 100 % der Partikelemission zurückgehalten werden. Parallel angeordnete Ein- und Austrittskanäle, die schachbrettartig wechselweise verblockt sind, bilden einen Wabenkörper (vgl. Figur 8).

Das in den Filter einströmende Abgas wird durch die porösen Wände der Einlasskanäle geleitet, die an den Enden durch Stopfen verschlossen sind, und strömt in die benachbarten Auslasskanäle. Dabei lagert sich das Partikelmaterial an den Einlasskanalwänden ab. Das aus dem Abgasstrom herausgefilterte Partikelmaterial verstopft zunehmend den Filter und erhöht den Gegendruck für den Verbrennungsmotor. Die Motorleistung verringert sich mit der Folge eines Kraftstoffmehrverbrauchs. Eine regelmäßige Entfernung der Rußablagerung aus dem Filter, eine so genannte Regeneration, muss typischerweise alle 500–1000 km durchgeführt werden. Hierbei wird das angesammelte Partikelmaterial mit Hilfe des im Abgas vorhandenen Sauerstoffs primär zu Kohlendioxid oxidiert. Für diese Reaktion ist ein Temperaturniveau von 550–650 °C erforderlich. Unter normalen Fahrbedingungen wird das Abgas eines Dieselmotors jedoch nicht heiß genug, um eine Oxidation des Rußes auf diese Weise herbeizuführen. Mittels Treibstoffadditiven oder einer katalytischen Beschichtung auf dem Partikelfilter kann die Rußzündtemperatur um ca. 200 °C herabgesetzt werden (passive Regeneration). Beim CRT-Verfahren (Continously Regenerating Trap) wird als Oxidationsmittel statt Sauerstoff Stickstoffdioxid verwendet, das den Ruß schon bei 250–350 °C verbrennt [17]. Dieses wird in einem Katalysator vor dem Partikelfilter aus dem im Abgas vorhandenen Stickstoffmonoxid durch Oxidation gewonnen und lässt den Ruß kontinuierlich oxidieren, so dass keine größere Rußansammlung im Filter entsteht.

Alternativ oder zusätzlich kann die Abgastemperatur kurzzeitig durch verschiedene Maßnahmen angehoben werden (aktive Regeneration). Beispielsweise durch den Einbau von elektrischen Heizeinrichtungen, kraftstoffbetriebenen Brennern oder durch eine Injektion von Kohlenwasserstoffen in das Abgassystem. Der dafür verwendete Dieselkraftstoff wird entweder direkt in den Abgastrakt eingebracht oder als späte Nacheinspritzung während des Ausschubtakts in den Zylinder eingespritzt,



Figur 8: Abgasfluss durch einen Keramik-Wandstromfilter (aus DE 601 19 763 T2).

wobei keine Umsetzung des Kraftstoffs in Antriebsenergie mehr erfolgt. Durch die Verbrennung dieser Kohlenwasserstoffe in einem Oxidationskatalysator wird die benötigte Wärme für die Rußverbrennung im Filter zur Verfügung gestellt.

Als entwicklungstechnisch ausgereifte Komponente befindet sich der Partikelfilter mit hohen Produktionsstückzahlen in einer Phase der Kostenoptimierung. Ein Schwerpunkt der Entwicklungstätigkeit ist daher auf eine kostengünstige Konstruktion und Fertigung gerichtet. Optimierte Regenerationsstrategien gewährleisten eine bessere Kontrolle der Regenerationstemperatur und ermöglichen damit auch den Einsatz eines preiswerteren Materials für das Filtersubstrat. Die keramischen Wabenkörper werden hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber thermischen Belastungen und ihrer Speicherfähigkeit für Ruß und Asche verbessert. Ebenso wird an den Methoden für die Abschätzung der Filterbeladung gearbeitet, denn daraus ergibt sich der ideale Zeitpunkt des Rußabbrandes für eine kraftstoffsparende Regeneration. Zur Erkennung von defekten oder unzureichend arbeitenden Filtersystemen werden für die gesetzlich vorgeschriebene On-Board-Diagnose Rußsensoren benötigt und weiterentwickelt [9] (vgl. DE 10 2005 041 537 A1, DE 10 2006 035 058 A1, DE 10 2005 016 395 A1).

5.3.3 Filtersubstrate

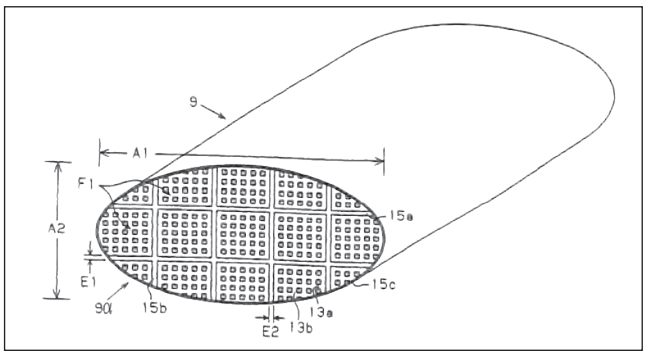
Bei der Filterregeneration entstehen aufgrund der exothermen Reaktion des Rußabbrandes kurzzeitig lokale Temperaturen von über 1 000 °C. Dies erfordert Spezialkeramiken für das Filtersubstrat mit hoher Temperaturstabilität, wie beispielsweise das unter den Keramik-Wabenkörpern dominierende Siliziumkarbid. Nachteil dieses Materials ist der relativ hohe Preis und die geringe Thermoschockbeständigkeit. Der Temperaturanstieg im Filterköper erfolgt sehr schnell und führt aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen inneren und äußeren Bereichen zu mechanischen Spannungen und Rissbildung, da die Wärme an der Oberfläche schneller abgeführt wird als im Inneren. Aufgrund dieser Materialeigenschaft wird ein Wabenkörper aus Siliziumkarbid unter hohem Fertigungsaufwand aus einzelnen miteinander verbundenen Segmenten gefertigt, wobei die Segmentgrenzen als Dehnfugen wirken (vgl. Figur 9).

Die preiswertere Keramik Cordierit ist unempfindlicher gegenüber Temperaturspannungen als Siliziumkarbid, daher sind Cordierit-Filtersubstrate ohne die aufwändige Segmentierung herstellbar. Nachteilig ist jedoch die geringere Schmelztemperatur. Infolgedessen muss die Regeneration bereits bei einer niedrigeren Rußbeladung erfolgen, da die während der Regeneration auftretende Spitzentemperatur mit der Rußmenge ansteigt. Cordierit wurde bisher nur im Nutzfahrzeugbereich eingesetzt, denn dort ist aufgrund der konstanten Fahrzustände sowohl die Filterbeladung als auch die Regeneration leichter zu kontrollieren. Beim PKW konnte sich Cordierit bisher noch nicht durchsetzen. Optimierungen im Thermomanagement, wie „DPF Advanced Control" von Bosch, zur Beherrschung von unkontrollierten Regenerationen, ermöglichen nun auch einen effizienten Einsatz von Cordierit-Filtern im PKW-Bereich [18].

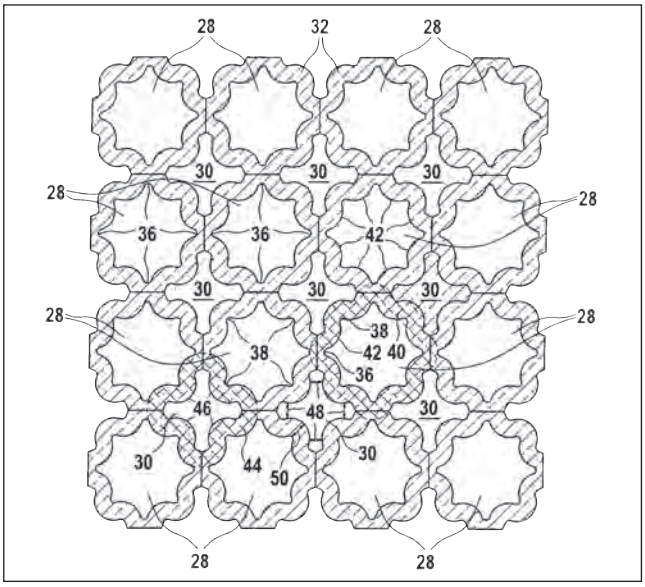
Ein ebenfalls thermoschockbeständiges Filtermaterial ist Aluminiumtitanat (WO 2006/ 039 255 A2, EP 1 483 221 B1). Die unter dem Handelsnamen DuraTrap® AT bekannten Filter des Herstellers Corning sind seit Ende 2005 auf dem Markt und werden unter anderem von Volkswagen im Golf und Touran eingesetzt [27].

Ein Teil der Erfinderaktivitäten ist auf die Vergrößerung der Speicherfähigkeit für Ruß und Asche bei möglichst geringem Abgasgegendruck gerichtet. Dadurch kann die Regenerationshäufigkeit verringert und Kraftstoff eingespart werden (DE 60 2004 004 800 T2, DE 10 2006 042 363 A1, DE 10 2006 026 161 A1). Je größer das Volumen der Einlasskanäle eines Filters, desto höher ist seine Speicherkapazität und umso geringer der Gegendruck bei gleicher Filterbeladung. Mit der in DE 10 2006 042 363 A1 dargestellten Kanalgeometrie wird der Querschnitt der Auslasskanäle zu Gunsten eines größeren Einlasskanalvolumens durch eine Einwölbung zwischen den Kanalkanten verkleinert (vgl. Figur 10).

Einige Anmeldungen zeigen konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung der Rissbildung bei Keramikmonolithen. So schlägt die DE 10 2006 045 164 A1 vor, den Verlauf der im äußeren

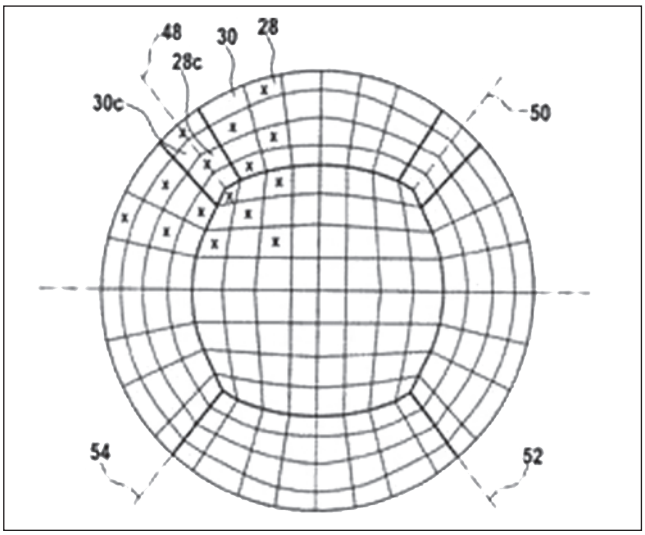


Figur 9: Aus einzelnen Segmenten zusammengesetztes Filtersubstrat aus Siliziumkarbid (aus DE 603 16 609 T2).



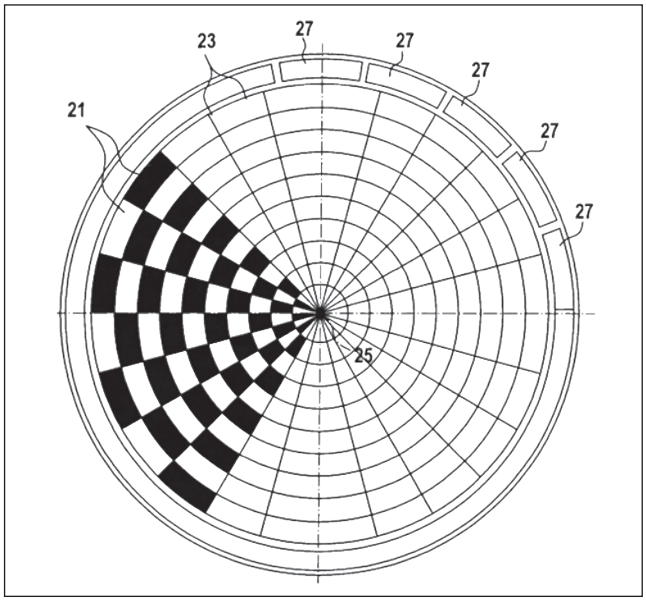
Figur 10: Optimierte Filterkanalgeometrie zur besseren Speicherfähigkeit (aus DE 10 2006 042 363 A1).

Bereich befindlichen Filterwände der gekrümmten Außenseite anzupassen und so die Filterwände unempfindlicher gegenüber mechanischen Spannungen zu machen (vgl. Figur 11).



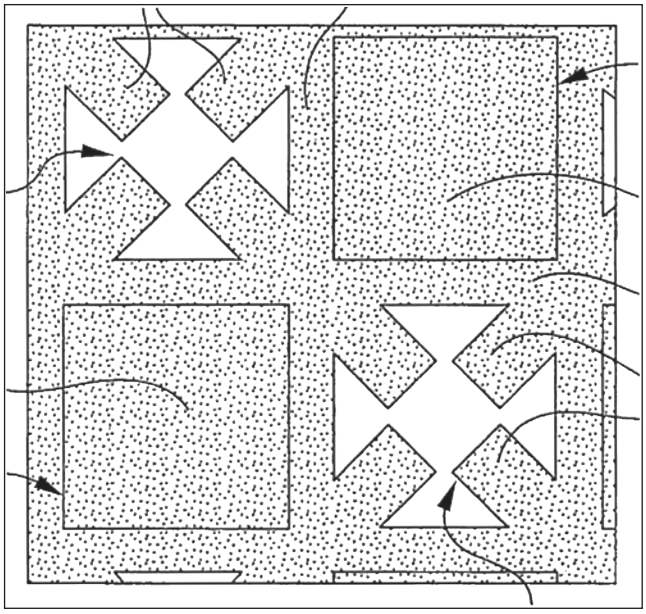
Figur 11: Optimierte Filterkanalgeometrie zur Vermeidung von Rissbildung (aus DE 10 2006 045 164 A1).

Zu einer möglichst homogenen Temperaturverteilung über den Filterquerschnitt und damit zu geringeren Temperaturspannungen soll eine Luftisolierung beitragen, die mittels nicht von Abgas durchströmten Blindkanälen an der Peripherie des Filterkörpers gebildet wird (DE 10 2006 035 053 A1, DE 10 2005 045 015 A1). Auch eine schnellere Aufheizung des Filters wird dadurch begünstigt (vgl. Figur 12).



Figur 12: Filter mit thermischer Isolierung mittels Blindkanälen (aus DE 10 2006 035 053 A1).

Dünne Wandstärken der Filterkanalwände begünstigen einen kleineren Gegendruck, bringen aber den Nachteil einer schlechteren Temperaturstabilität aufgrund der geringeren Wärmespeicherfähigkeit und dadurch bedingte höhere Spitzentemperaturen mit sich. Die WO 2006/ 093 649 A2 schlägt vor, in den Auslasskanälen wärmeabsorbierende Elemente aus porösem Keramikschaum anzuordnen (vgl. Figur 13) oder die Kanalwände mit einer entsprechenden Beschichtung zu versehen.



Figur 13: Wärmeabsorbierende Elemente in Filterauslasskanälen (aus WO 2006/ 093 649 A2).

5.3.4 Katalytische Beschichtung

Der Partikelfilter kann mit einer katalytischen Beschichtung zur Reduzierung der Rußzündtemperatur, Oxidation von Kohlenwasserstoffen oder Bildung von Stickstoffdioxid versehen sein.

Die Anmeldungen DE 10 2004 040 549 A1, WO / 022 967 A1, WO 2006/ 031 600 A1, WO / 011 146 A1 DE 10 2005 063 183 A1 zeigen im Gegensatz zur sonst üblichen einheitlichen Beschichtung des gesamten Filterkörpers eine Aufteilung in mehrere Zonen mit unterschiedlichem Beschichtungsmaterial und gegebenenfalls unterschiedlichen Funktionen, sogenanntes „zone coating". Im Beispiel der DE 10 2004 040 549 A1 ist das Beschichtungsmaterial der unterschiedlichen Temperaturverteilung im Filter mit höheren Temperaturen im Eingangsbereich als im Endbereich angepasst. So wird in einem Teilstück nach dem Eingangsbereich eine Mischung aus Platin und Palladium eingesetzt und im daran anschließenden Bereich eine Beschichtung, die nur Platin als katalytisches Material enthält. Platin wird üblicherweise wegen seiner hervorragenden Frischaktivität verwendet. Palladium ist gegenüber Platin temperatur- und damit alterungsstabiler jedoch empfindlicher gegenüber Schwefel. Durch das „zone coating" können die Vorteile beider Beschichtungsarten genutzt werden. Die Beimischung von Palladium zum Platin im heißeren Eingangsbereich macht die Beschichtung dort widerstandsfähig gegen Hitze. Die Empfindlichkeit des Palladiums gegenüber Schwefel fällt hier nicht ins Gewicht, da in diesem Bereich die Abgastemperatur regelmäßig die Desulfatisierungstemperatur überschreitet, und sich die Beschichtung dadurch regeneriert.

5.3.5 Kraftstoffnacheinspritzung

Mit Hilfe einer innermotorischen Nacheinspritzung kann die Abgastemperatur für eine aktive Regeneration des Partikelfilters auf zwei verschiedene Arten angehoben werden. Erfolgt eine Nacheinspritzung kurz nach Zündung der Hauptfüllung, verbrennt der eingespritzte Kraftstoff im Zylinder. Die dabei erzeugte Wärme erhöht zwar die Abgastemperatur steigert aber nur unwesentlich die Ausgangsleistung des Motors. Diese Art der Kraftstoffzufuhr kann eingesetzt werden, wenn ein Katalysator auf seine Anspringtemperatur aufgeheizt werden soll. Wird die Nacheinspritzung später, also während oder am Ende des Auspufftaktes durchgeführt, verbrennt der Kraftstoff nicht sofort, sondern erst im Oxidationskatalysator und heizt dadurch das Abgas für eine Regeneration des Partikelfilters. Die Schwierigkeit besteht darin, sowohl eine hohe Abgastemperatur als auch einen hohen Kohlenwasserstoffgehalt im Abgas darzustellen, da bei hoher Temperatur während einer späten Nacheinspritzung der eingespritzte Kraftstoff bereits verbrennt bevor er den Katalysator bzw. den katalytisch beschichteten Partikelfilter erreicht. Die DE 10 2006 023 674 A1 zeigt eine Steuerung, wobei die frühe und die späte Nacheinspritzung entweder in unterschiedlichen Zylindern oder in unterschiedlichen Verbrennungszyklen desselben Zylinders erfolgen. Zwischen der Funktion der Abgasaufheizung und der Kohlenwasserstoffanreicherung wird abgewechselt, so dass sich die bei unterschiedlichen Einspritzzuständen erzeugten Abgase miteinander mischen.

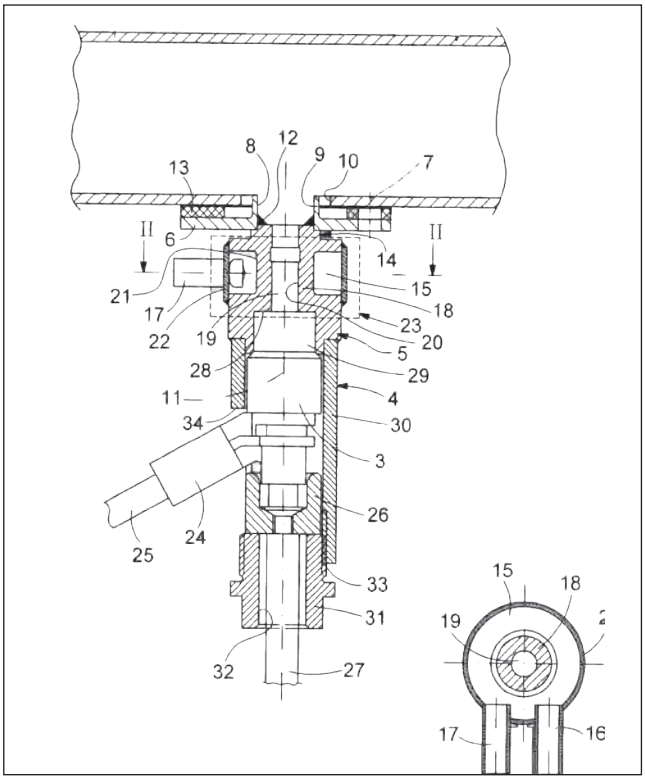
Erreicht die Abgastemperatur während einer Nacheinspritzung nicht die Anspringtemperatur des Oxidationskatalysators, kommt es zu einem Durchbruch nicht umgesetzter Kohlenwasserstoffe mit Weißrauch. Eine genauere Steuerung der Nacheinspritzung berücksichtigt auch transiente Motorzustände und steuert die Einspritzung mittels eines Luftmassensensorsignals, eines Drehzahlsensorsignals und eines Signals für die Temperatur vor dem Partikelfilter, so dass die Abgastemperatur für die Kraftstoffverbrennung im Oxidationskatalysator immer ausreichend hoch ist (DE 10 2006 029 737 A1).

Durch die Kraftstoffeinspritzung in den Zylinder nach Beenden der Verbrennung wird eine Ölverdünnung bewirkt. Je höher der Einspritzdruck der Nacheinspritzung desto mehr wird die Zylinderbohrung benetzt, wobei ein Teil des Kraftstoffs in den Ölkreislauf gelangt. Eine Verringerung des Einspritzdrucks für die Nacheinspritzung gegenüber dem der Hauptfüllung soll hier eine Verbesserung bringen (DE 10 2007 005 358 A1).

5.3.6 Kraftstoffeinspritzung in die Abgasleitung

Um die Problematik der Ölverdünnung durch Nacheinspritzung in den Motor zu umgehen, bietet es sich an, die Temperaturerhöhung außermotorisch zu erzeugen. Hierbei werden dem Abgas Kohlenwasserstoffe mittels einer Düse (vgl. Figur 14) erst vor dem Oxidationskatalysator zudosiert, um dort die erforderliche Wärme für die aktive Partikelfilterregeneration zu erzeugen. Diese Form der Aufheizung ist insbesondere für die Anordnung des Oxidationskatalysators und Partikelfilters im Unterboden des Fahrzeugs geeignet. Durch die Wärmefreisetzung im Oxidationskatalysator unmittelbar vor dem Partikelfilter werden Wärmeverluste am stromauf liegenden Teil der Abgasanlage vermieden. Die Kraftstoffeindüsung im Abgasrohr kann die motorische Nacheinspritzung vor allem bei

Kurzstreckenfahrten und im Stadtbetrieb ergänzen, wenn eine sehr große Temperaturerhöhung des Abgases gefordert ist.



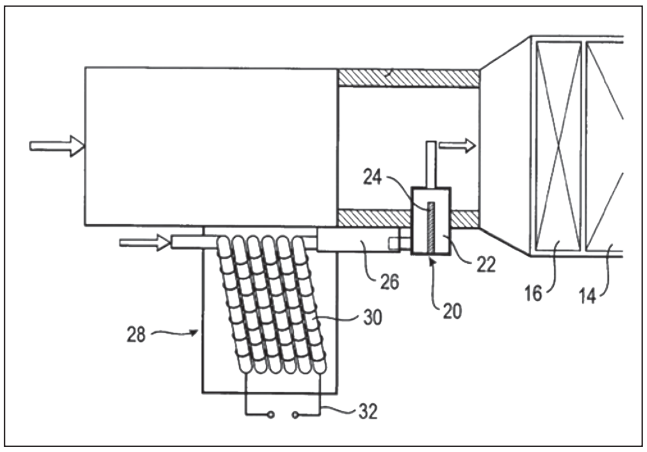
Figur 14: Kraftstoff-Zerstäuberdüsenanordnung an einem Abgasrohr (aus DE 10 2004 056 791 B4).

Für eine gute katalytische Verbrennung im Oxidationskatalysator ist eine feine Zerstäubung des eindosierten Kraftstoffs in das Abgas gewünscht. Die erforderliche Sprayqualität kann durch Mehrlochdüsen erzielt werden. Problematisch ist das Verstopfen dieser kleinsten Öffnungen durch Ruß und anhaftende Kraftstoffrückstände. Zu deren Beseitigung wird die Düse in regelmäßigen Abständen mittels einer Heizeinrichtung auf über 600 °C erhitzt (DE 10 2006 025 332 A1).

Ein anderes Verfahren zur Reinigung der Düse zeigt DE 10 2007 024 891 A1. Betriebszustände mit reduziertem Ansaugluftvolumen, die hohe Partikelmengen erzeugen, werden identifiziert und die Kraftstoffzuführrate kurzzeitig angehoben, um ein Absetzen von Partikeln an der Düse zu vermeiden.

Alternativ zur Einspritzung des Kraftstoffs mittels Zerstäuberdüsen wurden Kraftstoffverdampfer entwickelt, beispielsweise von Emcon Technologies. Dazu wird mit einer kleinen Pumpe Diesel aus dem normalen Kraftstoffkreislauf entnommen, in unmittelbarer Nähe des Abgasstrangs mit Hilfe einer Glühkerze verdampft und vor dem Oxidationskatalysator in den Abgasstrang geleitet (vgl. Figur 15). Der verdampfte Kraftstoff wird optimal mit dem Abgas vermischt, ohne dass eine ausreichend lange Verdampfungsstrecke im Abgasrohr, wie beim Einsatz von Zerstäuberdüsen, benötigt wird. Auch das Problem der Düsenverstopfung besteht bei einem Verdampfer nicht. Des Weiteren wird die Beaufschlagung des Oxidationskatalysators durch Kraftstofftröpfchen vermieden, deren Verbrennung lokal sehr hohe Temperaturen verursachen kann. Der erste Serieneinsatz des über das Motorsteuergerät geregelten Verdampfers ist ab 2008 beim Ford Transit vorgesehen. 2010 und 2011 sind Serienanläufe bei PKW-Modellen in Europa geplant [19].

Die Erhöhung der Lebensdauer der stark hitzebelasteten Bauteile und die Reduzierung der benötigten Bordspannung für die Heizelemente sowie eine genaue Dosierung des Kraftstoffs sind Themen der Druckschriften DE 10 2006 025 679 A1, WO 2008/ 009 434 A1, DE 10 2006 025 678 A1, WO 2008/ 003 520 A1 und DE 10 2005 062 924 A1. Durch einen vergleichsweise geringen Energieverbrauch soll sich die in der DE 10 2006 025 679 A1 gezeigte Vorrichtung mit einer Vorwärmstufe nach dem Durchlauferhitzerprinzip vor der Verdampfungseinheit auszeichnen. Zur Vermeidung einer Ablagerung von kohlenstoffhaltigen Zersetzungsprodukten am Heizelement im Verdampfungsraum und einer damit verbundenen Verkokung schlägt die WO 2008/ 009 434 A1 vor, einen Katalysator im Verdampfungsraum anzuordnen. Dieser soll eine Zersetzung von schweren Kohlenwasserstoffen im Brennstoff in flüchtige Bestandteile begünstigen und so die Bildung von teerartigen Ablagerungen im temperaturbelasteten Bereich verhindern.



Figur 15: Kraftstoffverdampferanordnung vor dem Oxidationskatalysator (aus DE 10 2006 025 679 A1).

5.3.7 Steuerung der Filterregeneration

Zur Vermeidung von filterschädigenden Temperaturen wird die Regeneration überwacht und gesteuert. Steuerungsparameter sind die Partikelbeladung, der Sauerstoffgehalt des Abgases, der Abgasmassenstrom und die Abgastemperatur. Der Sauerstoffgehalt beeinflusst als Reaktionspartner die Oxidationsrate des Rußes im Partikelfilter und hängt vom Betriebsmodus des Verbrennungsmotors ab. Der den Filter durchströmende Abgasmassenstrom führt einen Teil der Wärme durch Konvektion wieder ab und ist daher ebenfalls ein Einflussparameter für die Regenerationssteuerung. Eine hohe Materialbelastung des Filters entsteht beispielsweise, wenn bei laufendem Regenerationsvorgang das Abgasvolumen stark verringert wird, wie bei einem Halt an einer Ampel nach vorheriger schneller Fahrt. Abhilfe kann die Anhebung der Leerlaufdrehzahl während einer Regeneration schaffen (DE 603 11 758 T2). Wichtigste Stellschraube für die Regenerationssteuerung ist die Abgastemperatur, da sie in weiten Teilen auch ohne Eingriff in den Lastzustand des Motors beeinflussbar ist. Die Filtertemperatur, welche für die Höhe der Oxidationsrate verantwortlich ist, ergibt sich aus der Abgastemperatur und der durch die exotherme Rußoxidation frei werdenden Wärmemenge. Diese steht zusätzlich für den weiteren Verlauf der Oxidation zur Verfügung und beschleunigt den Abbrandvorgang. Der Filter heizt sich dann gewissermaßen selbst. Jedoch können insbesondere hohe Rußbeladungen zu lokal überhöhten Temperaturen innerhalb des Filters führen [20]. Diese sollen mittels einer geeigneten Steuerung vermieden werden.

Ist die Abgastemperatur zum Start der Regeneration zu hoch eingestellt, kann es zur Überhitzung des Filters kommen. Wird diese zu niedrig angesetzt, dauert es lange bis die Rußverbrennung startet, und umso mehr Kraftstoff wird für die Aufrechterhaltung der erforderlichen Regeneration verbraucht. Eine gestufte Regeneration, in der die Temperatur in Schritten angehoben wird, ist in EP 1 918 542 A1 und WO 2007/ 053 367 A2 vorgeschlagen. Zunächst sorgt eine mäßige Temperatur für eine Reduzierung der Rußbeladung. Damit wird ausgeschlossen, dass durch eine übergroße Rußablagerung unerwünschte Spitzentemperaturen hervorgerufen werden. Im nächsten Schritt kann der Filter ohne Gefahr mit einer hohen Temperatur frei gebrannt werden.

Mit zunehmendem Sauerstoffgehalt im Abgas steigt auch die Rußoxidationsrate und damit die Temperatur im Partikelfilter. In der DE 10 2007 043 168 A1 ist eine Steuerung zur Regulierung des Sauerstoffgehalts im Abgas während der Regeneration beschrieben. Hierbei werden Messwerte eines Sauerstoff- und eines Temperatursensors vor dem Filter ausgewertet. Die DE 10 2007 000 001 A1 stellt ein Verfahren vor, in dem der zeitliche Verlauf des Sauerstoffgehalts nach dem Partikelfilter erfasst wird. Sinkt dieser nach dem Filter zu schnell ab, wird dies als Anzeichen für eine übermäßige Oxidation gewertet und Maßnahmen zur Begrenzung der Sauerstoffkonzentration, beispielsweise eine Erhöhung der Abgasrückführrate oder eine Ansaugluftdrosselung, werden eingeleitet. Das Schließen der Drosselklappe bewirkt jedoch einen Ansaugunterdruck. Dieser kann durch Öffnen der Abgasrückführung wieder ausgeglichen werden. In der DE 10 2006 010 095 A1 sind die Eingriffe an der Drosselklappe und dem Abgasrückführventil so abgestimmt, dass sie drehmomentneutral und akustisch nicht wahrnehmbar sind.

5.3.8 Schätzverfahren für die Filterbeladung

Der Zeitpunkt der Regeneration richtet sich nach dem Beladungszustand des Partikelfilters. Wird sie zu früh eingeleitet, steht nicht genügend Ruß für eine stabile Verbrennung zur Verfügung, und es wird zu wenig Wärme für einen vollständigen Rußabbrand freigesetzt. Ist die Beladung schon zu weit fortgeschritten, nimmt zum einen der Gegendruck übermäßig zu, zum anderen steigt die Temperatur während der Regeneration zu stark an. Es ist also erforderlich, die Partikelablagerungsmenge genau zu bestimmen.

Üblicherweise wird zur Bestimmung der Partikelbeladung der Differenzdruck zwischen An- und Abströmseite des Filters, vorzugsweise unter Hinzunahme des Abgasvolumenstroms, herangezogen (DE 10 2006 035 488 A1). Auch eine Abschätzung der Filterbeladung aus dem Sauerstoffgehalt im Abgas ist möglich (DE 10 2006 000 845 A1). Andere Parameter wie das Fahrprofil, die Fahrstrecke, sowie die Drehzahl und das Drehmoment des Verbrennungsmotors lassen ebenfalls Rückschlüsse auf die Ablagerungsmenge im Filter zu.

Die Filterbeladung besteht, vereinfacht ausgedrückt, aus dem brennbaren Ruß und einem nicht brennbaren Ascheanteil. Die Asche verbleibt auch nach einer Regeneration, üblicherweise über die gesamte Filterlebensdauer, im Filter und trägt zu einem Druckverlust bei. Über die Differenzdruckmessung allein kann nur auf die gesamte Partikelbeladung inklusive der Asche geschlossen werden. Die Druckschriften DE 10 2006 035 458 A1, DE 60 2005 002 659 T2 und DE 10 2006 012

351 A1 zeigen Verfahren, um mit Hilfe der Parameter Wegstrecke, Motordrehzahl und Verbrauch von Kraftstoff und Schmieröl den Ruß- und den Ascheanteil der Filterbeladung abzuschätzen. Damit können die Regenerationsbedingungen besser auf den brennbaren Anteil abgestimmt werden.

In der DE 10 2007 034 709 A1 wird ein Verfahren beschrieben, bei dem zunächst die Rußablagerungsmenge aus einer Fahrstrecke abgeschätzt und daraus ein Wert für die während der Regeneration zu erwartende Spitzentemperatur abgeleitet wird. Die tatsächlich auftretende Spitzentemperatur wird gemessen und mit dem Schätzwert abgeglichen. Liegt der tatsächliche Wert höher, ist dies ein Anzeichen dafür, dass mehr Ruß im Filter war als angenommen. Das Zeitintervall bis zur nächsten Regeneration wird nach unten korrigiert, um eine thermische Überbelastung des Filters auszuschließen. Fällt umgekehrt die gemessene Spitzentemperatur kleiner aus als der Schätzwert, kann das Regenerationsintervall entsprechend verlängert werden.

Das folgende Verfahren berücksichtigt, dass die Beladung eines Filters mit Partikelmaterial nicht gleichmäßig über den Filterkörper erfolgt. Feststoffteilchen haben die Tendenz, sich im Einlassbereich des Partikelfilters niederzuschlagen. Da die Verbrennung etwas entfernt davon einsetzt und sich stromab ausbreitet, benötigen die am Einlass abgelagerten Partikel länger zur Entzündung. Die DE 60 2005 000 917 T2 gibt ein Verfahren an, das aus der Kraftstoffeinspritzmenge und der Drehzahl einen Rußverstopfungsgrad am Einlass abschätzt und gegebenenfalls die Regenerationszeit um einen zusätzlichen Betrag anhebt, so dass auch dort der Filter komplett gereinigt wird.

5.4 Integrierte Systeme

Die oben beschriebenen Einzelbausteine müssen zu einem effizienten Abgasnachbehandlungssystem zusammengesetzt werden, mit dem die Anforderungen des Gesetzgebers und der Kunden gleichermaßen erfüllt werden können. Dabei sind insbesondere die Bauraumanforderungen sowie die Arbeitstemperaturen der Einzelkomponenten zu berücksichtigen. Alle großen Automobilhersteller haben bereits ihre Konzepte vorgestellt, mit denen sie die amerikanischen Normen erreichen wollen.

Daimler, Volkswagen und Audi nutzten im Januar 2007 die „North American International Auto Show" in Detroit zu einer gemeinsamen Produktoffensive [21]. Daimler präsentierte den Vision GL 420 BLUETEC SUV sowie den E320 BLUETEC, die Volkswagen AG kündigte ein VW BLUETEC Paket mit einem Tiguan SUV Konzeptfahrzeug, sowie einem Passat und Jetta an und Audi die Markteinführung der Tier 2 BIN 5 BLUETEC Technologie für den Q7 SUV für das Modelljahr 2008. BMW folgte mit einem "Advanced Diesel with BluePerformance" [22].

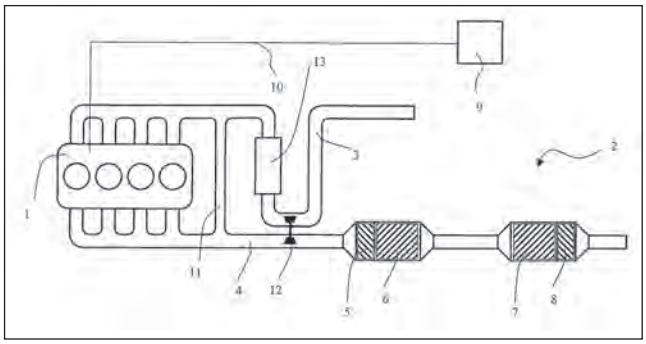
Das gemeinsame Vorgehen zielt darauf ab, endlich das schlechte Image des Dieselmotors in den USA aufzupolieren, und jeden Hinweis auf einen Dieselmotor in den Modellnamen zu vermeiden. Beim Mercedes-Benz E320 BLUETEC beispielsweise fehlt im Modellnamen jeglicher Zusatz, der auf einen Dieselmotor schließen lässt.

Welche Technologie verbirgt sich hinter dem Namen BLUETEC? Sieht man sich die Strategie von Daimler an, stellt man fest, dass mit dem Markennamen BLUETEC nicht nur eine einzige Technologie verknüpft ist. Vielmehr werden unter dem Namen BLUETEC zwei unterschiedliche Technologien angeboten [23].

Die erste Variante, BLUETEC 1, wurde mit dem E320 BLUETEC 2007 in Serie gebracht. Die Abgasanlage umfasst

- einen motornahen Oxidationskatalysator, der dank seiner Position schnell die Betriebstemperatur erreicht und Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid aus dem Abgas entfernt,
- einen NOx-Speicherkatalysator, der in Strömungsrichtung hinter dem Oxidationskatalysator platziert ist; dies ist die bestmögliche Position, um nahezu optimale Betriebstemperaturen über alle relevanten Testzyklen sicher zu stellen,
- einen beschichteten Partikelfilter hinter dem Speicherkatalysator
- und einen SCR Katalysator hinter dem Filter.

Vervollständigt wird das System durch Temperatursensoren, die die Funktion der einzelnen Komponenten überwachen und einem Drucksensor, der Informationen über die Beladung des Filters gibt.



Figur 16: BLUETEC 1-System (aus DE 101 64 833 A1).

Die Idee ist, zwei NO_x-Nachbehandlungstechnologien, nämlich den NO_x-Speicherkatalysator und den SCR-Katalysator, sinnvoll miteinander zu kombinieren (DE 10 2005 005 664 A1, DE 103 00 298 A1). Die Stickstoffoxide werden dabei sowohl durch den Speicherkatalysator als auch durch den SCR-Katalysator abgebaut. Der Vorteil liegt darin, dass bei günstigen Betriebsbedingungen an Bord des Fahrzeugs, und zwar im Speicherkatalysator, unter Kraftstoffüberschuss Ammoniak erzeugt wird. Dieses wird im nachfolgenden SCR-Kat gespeichert und bei Bedarf dazu verwendet, Stickstoffoxidmoleküle zu reduzieren, die den Speicherkatalysator ungehindert passieren konnten. Damit erreicht das BLUETEC 1 einen hohen Wirkungsgrad, ohne jedoch wie bei einem reinen SCR-System ein Reduktionsmittel wie etwa AdBlue zudosieren zu müssen.

Das BLUETEC 2 System wird voraussichtlich folgende Komponenten umfassen:

- einen motornahen Oxidationskatalysator mit schnellem Anspringverhalten, der Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid umsetzt,
- einen Partikelfilter, der näher am Motor angebracht ist als bei BLUETEC 1,
- hinter dem Filter ein Dosierventil mit nachfolgendem SCR-Katalysator.

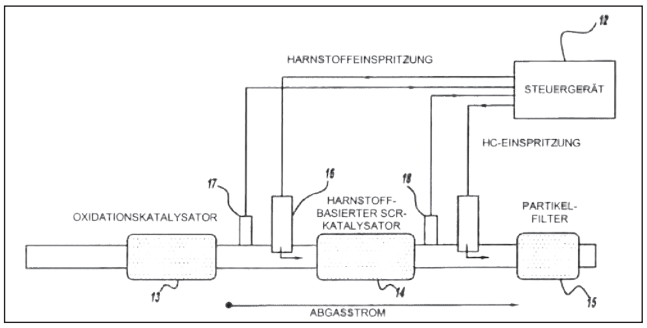
Bei diesem Konzept strömt das Abgas vom Motor zunächst durch einen Oxidationskatalysator, der Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid umwandelt und gegebenenfalls die für die Partikelfilterregeneration erforderliche Temperatur erzeugt. Der nachfolgende Partikelfilter hält den Ruß zurück. Der Abbau von Stickstoffoxiden findet im SCR-Katalysator statt. Durch ein Dosierventil wird das Reduktionsmittel AdBlue in den Abgasstrom eingedüst. Die Spraycharakteristik des Dosierventils, die Länge der Mischstrecke und die Strömungsverteilung des Abgases bei Eintritt in den SCR-Katalysator sind so ausgelegt, dass die Ammoniakverteilung im Katalysator möglichst homogen ist. Ein AdBlue-Tank mit dem benötigten Harnstoff wird im hinteren Teil des Fahrzeugs untergebracht.

Der Vorteil des seit dem Modelljahr 2007 mit dem E320 auf dem Markt erhältlichen BLUETEC 1 Konzepts liegt darin, dass kein zusätzlicher Betriebsstoff erforderlich ist. Nachteilig ist, dass die Fahrzeuge nicht die strenge Kaliforniennorm erfüllen und deshalb nicht in den Staaten Kalifornien, Massachusetts, New York, Vermont und Maine verkauft werden dürfen.

Die zweite technische Variante unter dem Namen BLUETEC wird Daimler bei den 2008er Mercedes-Benz Modellen der M-, R- und GL-Reihen einführen. Mit diesem harnstoffbasierten System wird Daimler auch die Anforderungen der kalifornischen Behörden erfüllen und kann somit diese Fahrzeuge in allen 50 Staaten verkaufen [23].

Aber auch die ausländischen Automobilhersteller arbeiten daran, die US-Normen zu erfüllen. Auch wenn sich die Konzepte der gleichen bekannten Grundbausteine bedienen, unterscheiden sie sich zum Teil wesentlich. Figur 17 zeigt ein Konzept von Ford (DE 10 2006 056 857 A1). Es setzt sich zusammen aus einem motornahen Oxidationskatalysator, der Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid verbrennt. Danach folgt ein SCR-Katalysator mit vorgelagerter Einspritzdüse (16) zur Zugabe von Reduktionsmittel und nachgelagertem beschichteten Dieselpartikelfilter.

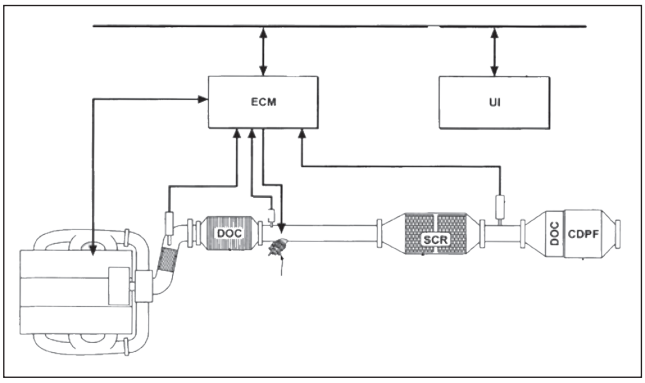
Dadurch, dass der SCR-Katalysator vor dem Filter angeordnet ist, erreichen die Stickstoffoxide den Filter nicht mehr und können somit auch nicht zu der CRT-Regeneration beitragen. Folglich muss der Filter öfter regeneriert werden. Zu diesem Zweck ist zwischen dem SCR-Katalysator und dem Filter eine Düse zur Zugabe von Kohlenwasserstoffen vorgesehen, die dann im Filter verbrennen und die notwendige Wärme für die Regeneration erzeugen. Dadurch entfällt die Notwendigkeit der Anfettung durch motorische Nacheinspritzung und die damit verbundene Ölverdünnung. Außerdem bleibt der SCR-Katalysator auch während der Regeneration kühl.



Figur 17: Gesamtkonzept von Ford (aus DE 10 2006 056 857 A1).

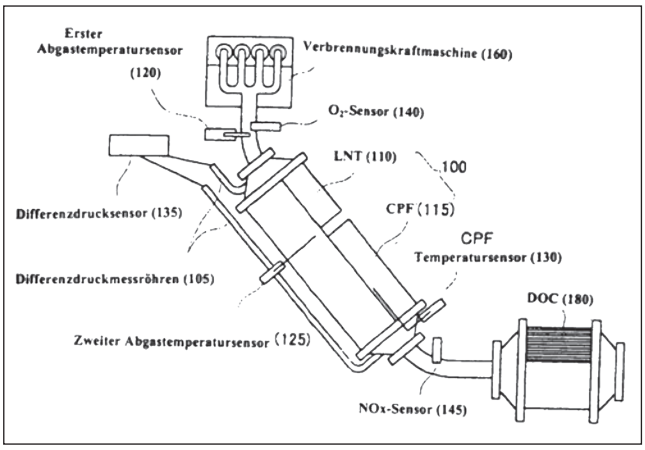
Die nachfolgende Figur 18 (DE 10 2007 044 192 A1) zeigt ein Konzept von General Motors. Obwohl es der oben beschriebenen Lösung von Ford ähnelt, unterscheidet es sich doch durch wesentliche Merkmale. Stromaufwärts des SCR-Katalysators werden Kohlenwasserstoffe beigegeben, die je nach Bedarf entweder als Reduktionsmittel für den SCR-Katalysator oder

als Mittel zur Temperaturerhöhung für die Filterregeneration dienen. Bemerkenswert ist die SCR-Beschichtung aus Silber.



Figur 18: Gesamtkonzept von GM (aus DE 10 2007 044 192 A1).

Ein anderes Konzept offenbart Hyundai in der DE 10 2005 059 815 A1 (vgl. Figur 19). Direkt an den Krümmerausgang schließt ein NOx-Speicherkatalysator (LNT) an. Ihm folgt ein beschichteter Filter (CPF). Zur Verringerung von Bauraum und Wärmeverlusten sind beide Substrate in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht. Vervollständigt wird die Anlage durch einen nachgeschalteten Oxidationskatalysator (DOC) sowie die erforderlichen Sensoren. Es handelt sich hier um ein sehr kompaktes, besonders für Kleinwagen geeignetes Layout.



Figur 19: Gesamtkonzept von Hyundai (aus DE 10 2005 059 815 A1).

Besonders interessant sind Synergien aus der Kombination einer NO_x-Speicherkatalysator-Regeneration mit einer Partikelfilterregeneration. Ein Verfahren hierzu ist in der DE 10 2006 029 211 A1 angegeben.

6. Ausblick

Die genannten Beispiele geben nur einen Ausschnitt aus der Fülle der Erfinderaktivitäten zum Thema Abgasnachbehandlung bei Dieselfahrzeugen wieder. Der technologische Wettbewerb um die beste Dieselnachbehandlungsstrategie ist in vollem Gange und dem Gewinner könnten lukrative Zuwächse insbesondere in den Vereinigten Staaten zufallen.

Mit dem Erreichen der heute bereits beschlossenen Grenzwerte für Europa und USA wird der Schadstoffausstoß der Dieselfahrzeuge so gering sein, dass es fraglich ist, ob noch niedrigere Grenzwerte folgen werden. Damit verschiebt sich der Fokus der Entwicklung in Richtung Kostensenkung und CO_2-Minderung.

Es deutet sich an, dass der Dieselmotor der nächsten Generation durch höhere Einspritzdrücke, Aufladegrade und Abgasrückführungsraten noch sparsamer wird und darüber hinaus auch noch sauberer, so dass die Abgasnachbehandlung vermutlich wieder reduziert werden kann [24]. Insbesondere könnten sich Entstickungsverfahren wie Speicherkatalysatoren und SCR als Übergangstechnologien erweisen, die lediglich die Zeitspanne überbrücken, bis die Grenzwerte durch motorische Maßnahmen erreicht werden können.

Die Hybridtechnologie gewinnt beim Ottomotor zunehmend an Bedeutung. Aufgrund seines niedrigeren Verbrauchs wurde sie beim Dieselmotor in der Vergangenheit nicht eingesetzt. Um künftige CO_2 Ziele zu erreichen, erscheint die Kombination des Dieselmotors, der bei langen Strecken und hohen Lasten unschlagbar sparsam ist, mit dem Hybrid, der seine Stärken auf der Kurzstrecke und dem Stop-and-Go Betrieb hat, durchaus zukunftsfähig (DE 10 2006 014 151 A1) [25]. Aufgrund der Verknappung fossiler Energieträger und der Treibhausgasproblematik werden alternative Dieselkraftstoffe an Bedeutung gewinnen. Nach der EU-Richtlinie 2003/30/EG soll ihr Marktanteil bis 2010 auf 5,75 % erhöht werden. Als alternative Dieselkraftstoffe stehen neben dem Rapsöl als Vertreter der ersten Generation auch die synthetisch hergestellten GTL (Gas to Liquid)- oder BTL (Biomass to Liquid)-Kraftstoffe der zweiten Generation zur Verfügung. BTL bietet aufgrund seiner regenerativen Herkunft ein hohes CO_2-Einsparpotenzial. Bisherige Untersuchungen zeigten auch vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Partikel- und Stickstoffdioxidemissionen [26]. Anpassungen der Motoren und des Motormanagements an die neuen Kraftstoffe werden auch in diesem Bereich zu einem Anstieg der Erfinderaktivitäten führen.

Somit durchlebt der Dieselmotor auch am 150. Geburtstag seines Erfinders eine rasante, technologische Entwicklung und wird auch in Zukunft ein unverzichtbares Element für die individuelle Mobilität und den weltweiten Warentransport sein.

Literatur

[1] PRETZLAFF, H.: Streit um Dieselmotoren. 18.04.2008, 2 S., URL: http://www.stuttgarter-zeitung.de/stz/page/detail.php/1687440 [recherchiert am 27.08.2008]

[2] SCHOMMERS, J.: Die Zukunft des Dieselmotors, MTZ extra, 150 Jahre Rudolf Diesel, 2008, S. 31–37

[3] FLASCHKE, T.: Elektronische Dieselregelung und ihre Bedeutung für die moderne Dieseltechnologie. In: DPMA Erfinderaktivitäten 2003, Deutsches Patent- und Markenamt, 2003, S. 19–28

[4] KRÜGER, H.: Common Rail Injektoren für direkteinspritzende PKW Dieselmotoren. In: DPMA Erfinderaktivitäten 2001, Deutsches Patent- und Markenamt, 2001

[5] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: Neuzulassungen, Emissionen, Kraftstoffe Jahr 2006. Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes, 2007, 13 S., URL: http://kba.bsh.de/Abt3_neu/FZ/Neuzulassungen/Themen_jaehrlich_pdf/n_emissionen_kraftstoffe_2006.pdf, [recherchiert am 27.08.2008]

[6] KODJAK, D.: Passenger Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards: A Global Update. The International Council of Clean Transportation, 2007, URL: http://ec.europa.eu/reducing_co2_emissions_from_cars/doc_pres/8_icct_en.pdf, [recherchiert am 27.08.2008]

[7] EUROPEAN AUTOMOBILE MANUFACTURERS ASSOSSIATION: Press Release, Brüssel, 20.02.2008, 2 S., URL: http://www.acea.be/index.php/news/news_detail/automobile_production_expanded_by_53_in_2007 [recherchiert am 27.08.2008]

[8] URL: http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php#stds, 4 S., [recherchiert am 27.08.2008]

[9] JOHNSON, T.V.: Diesel Emission Control in Review. In: SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2008, Nr. 2008-01-0069. S. 37–50

[10] Deutsches Patent- und Markenamt: Jahresbericht 2007 (ISSN 1615-0910), S. 21, Jahresbericht 2008 (in Vorbereitung)

[11] ROHR, F. et al: Dauerhaltbarkeit von NOx-Nachbehandlungssystemen für Dieselmotoren. In: MTZ, H. 3, 2008, S. 212–219

[12] ROHR, F. et al.: Diesel NOx-Storage Catalyst Systems for Tier 2 BIN 5 Legislation. Warrendale: SAE International, 2008, Nr. 2008-01-0766, S. 397–403

[13] MAYER, A. et al.: Minimierung der Partikelemissionen von Verbrennungsmotoren. Renningen: expert Verl., 2004, S. 108–111. ISBN 3-8169-2430-1

[14] JOHNSON, T. V.: Diesel Emission Control in Review. In: SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2007, Nr. 2007-01-0233, S. 39, 46

[15] FLASCHKE, T.: Die Einbindung des Diesel-Partikelfilters (Rußfilters) in aktuelle Motorsteuerungssysteme. In: DPMA Erfinderaktivitäten 2004/2005, Deutsches Patent- und Markenamt, 2005, S. 21–27

[16] KAYSER, B.: Chemische Aspekte bei der Reduktion von Rußpartikeln in Dieselabgasen. In: DPMA Erfinderaktivitäten 2004/2005, Deutsches Patent- und Markenamt, 2005, S. 64–67

[17] MAJEWSKI, W. A.; KHAIR, M. K.: Diesel Emissions and Their Control. Warrendale: SAE International, 2006, S. 471, 508. ISBN-10 0-7680-0674-0

[18] BECKER, C. et al.: Dieselpartikelfilter aus Cordierit. In: MTZ, 2008, H. 6, S. 495–496

[19] HAMMER, H.: Vorzugsbehandlung. In: Automobil Industrie, 2008, H. 4, S. 54–55

[20] BOGER, T.; ROSE, D.; TILGNER, I.: Regeneration Strategies for an Enhanced Thermal Management of Oxide Diesel Particulate Filters. Warrendale: SAE International, 2008, Nr. 2008-01-0328, S. 81

[21] Mercedes, VW showcase BLUETEC diesels in Detroit. 2007, 1 S., URL: http://www.dieselnet.com/news/2007/01bluetec.php, [recherchiert am 27.08.2008]

[22] BMW unveiling Tier 2 Bin 5 diesels. 2008, 1 S., URL: http://www.dieselnet.com/news/2008/01bmw.php, [recherchiert am 27.08.2008],

[23] BREMM, S.: Bluetec Emission Control System for the US Tier 2 Bin 5 Legislation. SAE International, 2008, Nr. 2008-01-1184, S. 515–521

[24] KOHLER, H.: Neue Brennverfahren für geringeren Verbrauch. In: MTZ, H. 3, 2008, S. 183

[25] BMW: Hybrid technology and diesel power intelligently combined: BMW Vision EfficientDynamics. BMW Media Information 03/2008, 2008, 19 S., URL: http://www.press.bmw.com/pressclub/us02.nsf/fwPresseMappeFrame?readform&docid=D7BA31CFD0724489C12573F6007FD2EE&type=1; [recherchiert am 27.08.2008]
[26] HARNDORF, H. et al.: Motorprozessverhalten und Abgasemissionen alternativer Kraftstoffe im Vergleich mit Dieselkraftstoff. MTZ, 2008, H. 7/8, S. 641, 646
[27] URL: http://www.dieselnet.com/news/2005/11corning.php, 1 S., [recherchiert am 27.08.2008]

150 Jahre Rudolf Diesel

Dr. Thomas Flaschke, Patentabteilung 1.26

Im Jahre 1892 erfand der deutsche Ingenieur Dr. Rudolf Diesel den nach ihm benannten Dieselmotor. Mit dieser Erfindung hat er die Welt verändert. Die „neue, rationelle Wärmekraftmaschine" ist heute im Straßenverkehr sowie in der Schifffahrt kaum noch wegzudenken. Im Jahre 2008 wäre Rudolf Diesel 150 Jahre alt geworden.

1. Einleitung

Im Augsburger Werk des MAN-Konzerns, direkt an den Prüfständen, dort wo heute die riesigen Schiffsdiesel ihre ohrenbetäubenden Testläufe absolvieren, erinnert eine Tafel (Figur 1) an den bedeutenden Erfinder: „An dieser Stelle entstand in den Jahren 1893 bis 1897 der erste Dieselmotor der Welt."

Figur 1: Erinnerungstafel bei MAN Diesel in Augsburg (Foto mit Genehmigung von MAN Diesel).

Mittlerweile begegnen uns Dieselmotoren überall: Der internationale Güterschwertransport auf den Straßen wird beinahe ausschließlich mit Dieselmotoren betrieben, in der Schifffahrt ist der Diesel die dominierende Antriebstechnik und auf der ganzen Welt wird elektrischer Strom durch Dieselaggregate erzeugt. Auch im Pkw-Bereich hat die Dieseltechnologie in den vergangenen Jahren einen rasanten Aufschwung erlebt.

So erhöhte sich der Marktanteil der in Deutschland neu zugelassenen Personenkraftwagen mit einem Dieselmotor im Jahr 2007 auf 48 %. Im westeuropäischen Vergleich liegt Deutschland damit sogar noch unter dem Durchschnitt – in Luxemburg beispielsweise beträgt der Dieselanteil an den Pkw-Neuzulassungen 77 %, dicht gefolgt von Frankreich und Spanien. Der aktuelle Trend geht dabei zu den vorwiegend kleinvolumigen Dieselmotoren [1].

Bei dem nach Diesel benannten Verbrennungsverfahren wird dem Motorzylinder reine Umgebungsluft zugeführt, durch den Arbeitskolben hoch verdichtet und dadurch erhitzt. Der nun unter hohem Druck in den Zylinder eingespritzte Kraftstoff entzündet sich von selbst. Die anschließende Verbrennung setzt die im Kraftstoff enthaltene Energie frei und bewirkt die Kraftentfaltung über den Arbeitskolben. Schließlich werden die Abgase ausgestoßen.

2. Kurzbiographie Rudolf Diesels

Rudolf Diesel wurde am 18. März 1858 in Paris als Sohn deutscher Einwanderer geboren. Seine Schulzeit verbrachte Rudolf Diesel bei Verwandten in Augsburg (siehe Tabelle 1).

1858 – 1870	Kindheit in Paris
1870 – 1875	Königliche Gewerbe- und Industrieschule in Augsburg (heutiges Holbein-Gymnasium)
1875 – 1880	Studium an der Königlichen Bayer. Technischen Hochschule in München (heutige TUM)
1881 – 1892	Ingenieur bei Linde in Paris und Berlin
1893 – 1897	Maschinenfabrik Augsburg (MAN)
1898 – 1911	Dieselmotorenfabrik Augsburg

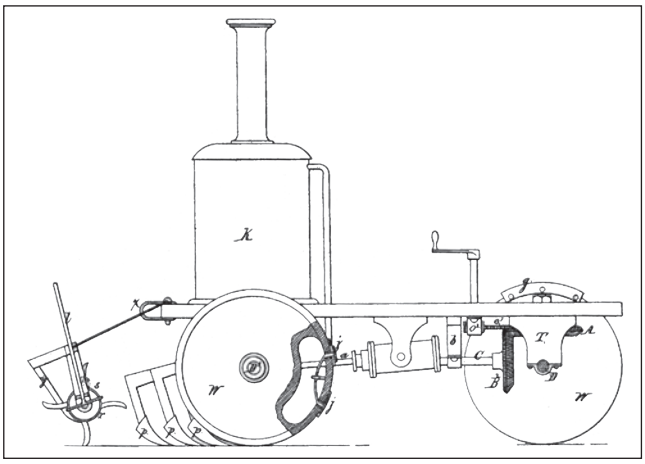
Tabelle 1: Lebensabschnitte von Rudolf Diesel.

Nach dem Schulabschluss im Jahre 1875 bekam er ein Stipendium an der Königlichen Bayerischen Technischen Hochschule in München, wo er als Schüler des Thermodynamikers Carl von Linde Maschinenbau studierte. Im Jahre 1880 legte er das beste Examen seit Gründung der Hochschule ab. Anschließend arbeitete Diesel in der Pariser Filiale der Linde Gesellschaft für Eismaschinen, bevor er 1890 nach Berlin Charlottenburg umzog. Für die Verwirklichung seiner Erfindungen fand er im Jahre 1893 als Partner die Maschinenfabrik Augsburg, eine Vorgängerfirma der heutigen MAN-Gruppe. Sie ermöglichte Diesel in Zusammenarbeit mit der Firma Krupp in Essen, seinen Motor zu bauen [2]. Im Jahre 1907 wurde ihm die Ehrendoktorwürde der Königlichen Technischen Hochschule München verliehen [3]. Am 29. September 1913 stürzte er unter mysteriösen Umständen bei einer Überfahrt nach England vom Schiff in den Ärmelkanal – die offizielle Version lautete Selbstmord. Andere Spekulationen vermuteten einen Mordanschlag im Auftrag der Ölindustrie, da Rudolf Diesel bereits versuchte, seine Motoren für den Pflanzenölgebrauch zu optimieren [4].

3. Ausgangssituation und Aufgabenstellung

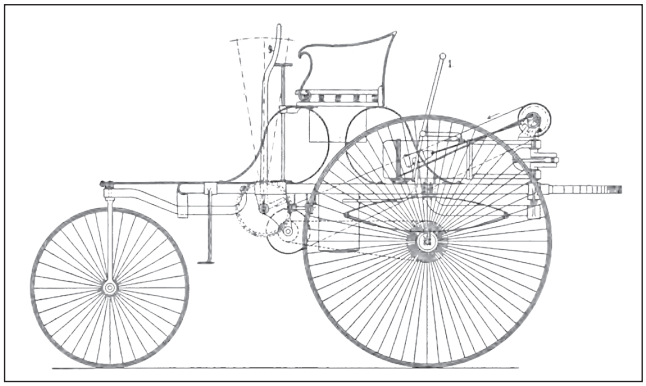
Das 19. Jahrhundert, das Zeitalter der Industriellen Revolution, war geprägt durch die Dampfmaschine. Diese wurde überwiegend für Zwecke eingesetzt, bei denen es galt, mit einem Wagen große Massen zu bewegen, wie dies bei LKWs, Lokomotiven oder Traktoren der Fall ist. So waren zu Lebzeiten Diesels dampfbetriebene landwirtschaftliche Nutzmaschinen weit verbreitet.

Ein Beispiel ist der in der US 119 216 A beschriebene Dampfpflug von 1871 (Figur 2).



Figur 2: Dampfbetriebener Traktor aus US 119 216 A aus dem Jahre 1871.

Daneben trat der von Nikolaus August Otto im Jahr 1876 fertig gestellte Viertaktmotor seinen weltweiten Siegeszug als Antriebselement für Kraftwagen an (vergleiche DE 532 A, DE 10 116 A). Bei der Kraftmaschine von Otto wird ein zündfähiges Gemisch in einem Kolben durch den Funken einer Zündkerze zur Explosion gebracht. Das erste mit einem Ottomotor bestückte Automobil war die von Carl Benz vorgestellte und in der DE 37 435 A beschriebene Motorkutsche (Figur 3) aus dem Jahre 1886 [5].



Figur 3: Motorkutsche mit Viertakt-Ottomotor von Carl Benz aus dem Jahre 1886 (aus DE 37 435 A).

In der Vorlesung über Thermodynamik hatte Rudolf Diesel vom schlechten Wirkungsgrad der Dampfmaschine gehört. Prof. Carl von Linde lehrte, dass die Dampfmaschine nur 6 bis 10 % der in der Kohle enthaltenen Wärmemenge in effektive Arbeit umwandeln könne. Hingegen versprach der Kreisprozess des französischen Physikers Sadi Carnot eine wesentlich höhere Energieausbeute [6].

Daraufhin befasste sich Diesel mit dem Gedanken, eine Maschine zu entwickeln, die den damals üblichen Kraftmaschinen überlegen sein sollte. Der Motor sollte insbesondere wirtschaftlicher sein als die damals übliche Dampfmaschine. Rudolf Diesel stellte sich die Aufgabe, die isotherme Zustandsänderung des Carnot-Prozesses praktisch zu verwirklichen [7].

4. Diesels Patente und deren Verwirklichung

Die Idee eines Verbrennungsmotors auf Basis des Kreisprozesses von Carnot führte zu Diesels erster handschriftlicher Patentanmeldung, die er am 27. Februar 1892 mit der Bezeichnung „Neue, rationelle Wärmekraftmaschine" beim Kaiserlichen Patentamt in Berlin einreichte.

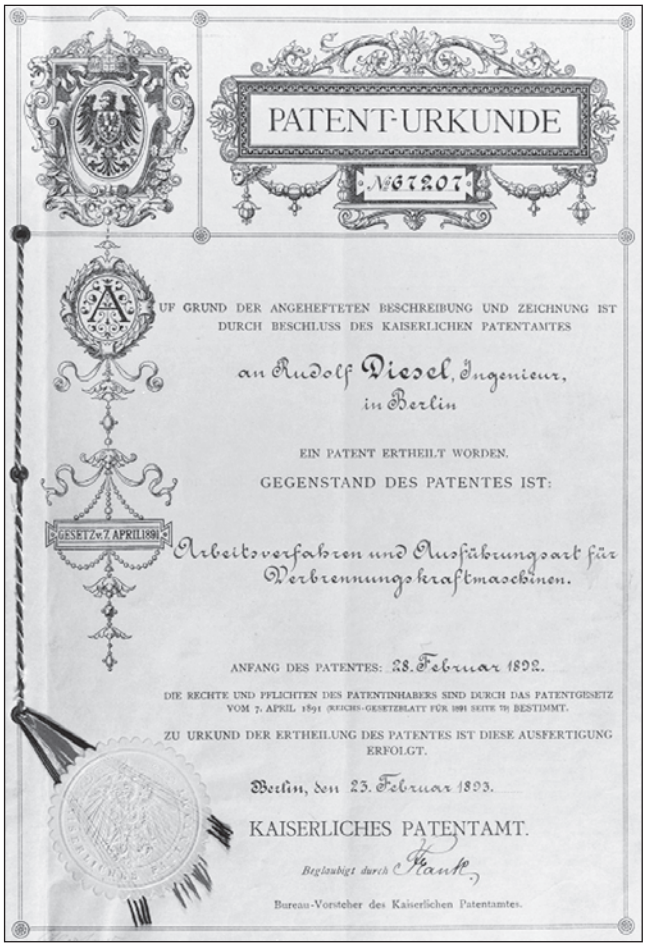
Bis zum Jahr 1904 meldete Rudolf Diesel in 37 Ländern 141 Patente an, wie zum Beispiel in Frankreich, England, Russland,

Finnland, Dänemark, USA und Japan [2]. Die Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der deutschen Patentschriften Rudolf Diesels.

Patentnummer	Jahr	Titel
DE 67 207 A	1892	Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen
DE 95 680 A	1892	Verfahren zur Erhöhung der Leistung von Explosions- beziehungsweise Verbrennungskraftmaschinen
DE 85 895 A	1892	Mehrstufige Verbrennungskraftmaschine
DE 82 168 A	1893	Verbrennungskraftmaschine mit veränderlicher Dauer der unter wechselndem Überdruck stattfindenden Brennstoffeinführung
DE 86 946 A	1893	Verbrennungskraftmaschine mit veränderlicher Dauer der unter wechselndem Überdruck stattfindenden Brennstoffeinführung
DE 86 633 A	1895	Vorrichtung zum Anlassen von Viertakt-Verbrennungskraftmaschinen durch Umwandlung derselben in Zweitakt-Druckluftmaschinen
DE 90 544 A	1895	Vorrichtung zum Anlassen von Viertakt-Verbrennungskraftmaschinen
DE 232 338 A	1909	Verfahren zur Einführung der Ladebestandteile bei Verbrennungskraftmaschinen

Tabelle 2: Deutsche Patentschriften von Rudolf Diesel.

zufuhr vom toten Punkt ab so allmählich stattfindet, dass die Verbrennung wegen des ausschiebenden Kolbens und der dadurch bewirkten Expansion der verdichteten Luft ohne wesentliche Druck- und Temperaturerhöhung erfolgt, worauf nach Abschluss der Brennstoffzufuhr die weitere Expansion der im Arbeitszylinder befindlichen Gasmasse stattfindet."


PATENT-URKUNDE

№ 67207

AUF GRUND DER ANGEHEFTETEN BESCHREIBUNG UND ZEICHNUNG IST DURCH BESCHLUSS DES KAISERLICHEN PATENTAMTES

an Rudolf Diesel, Ingenieur, in Berlin

EIN PATENT ERTHEILT WORDEN.

GEGENSTAND DES PATENTES IST:

Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen.

GESETZ v. 7. APRIL 1891

ANFANG DES PATENTES: 28. Februar 1892.

DIE RECHTE UND PFLICHTEN DES PATENTINHABERS SIND DURCH DAS PATENTGESETZ VOM 7. APRIL 1891 (REICHS-GESETZBLATT FÜR 1891 SEITE 79) BESTIMMT.

ZU URKUND DER ERTHEILUNG DES PATENTES IST DIESE AUSFERTIGUNG ERFOLGT.

Berlin, den 23. Februar 1893.

KAISERLICHES PATENTAMT.

Beglaubigt durch Kanitz

Bureau-Vorsteher des Kaiserlichen Patentamtes.

Figur 4: Patenturkunde für Diesels erstes Patent DE 67 207 A (Foto mit Genehmigung von MAN Diesel).

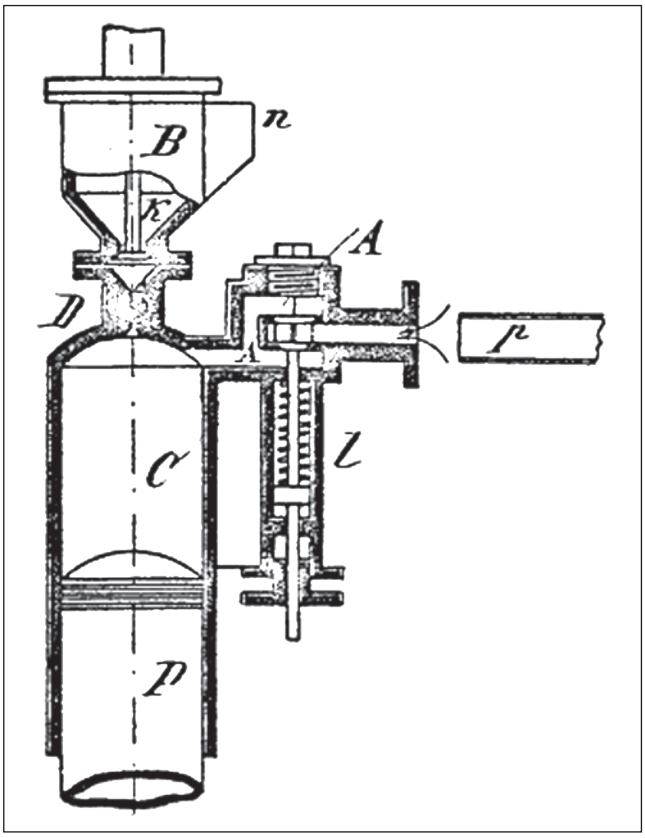
4.1 Die Hauptpatente DE 67 207 A und DE 82 168 A

Am 23. Februar 1893, knapp ein Jahr nach der Patentanmeldung, wurde das Patent DE 67 207 A mit der Bezeichnung „Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen" erteilt (Figur 4). Der Anspruch 1 der DE 67 207 A lautet: „Arbeitsverfahren für Verbrennungskraftmaschinen, gekennzeichnet dadurch, dass in einem Zylinder vom Arbeitskolben reine Luft oder anderes indifferentes Gas mit reiner Luft so stark verdichtet wird, dass die hierdurch entstandene Temperatur weit über der Entzündungstemperatur des zu benutzenden Brennstoffs liegt, worauf die Brennstoff-

Das für den eigentlichen Erfolg des Dieselmotors wesentliche Merkmal dieses Anspruchs ist, dass zunächst kein Luft-Kraftstoff-Gemisch, sondern nur Luft in den Zylinder eingebracht und dort hoch verdichtet wird. Erst dann wird der Brennstoff zugeführt, der sich aufgrund der hohen Temperatur in der Brennkammer selbst entzündet. Eine Zündkerze wie bei der Kraftmaschine von Otto (DE 532 A) wird nicht verwendet.

Die Selbstzündung war jedoch nicht das zu erreichende Ziel Rudolf Diesels [7]. Er suchte vielmehr nach einem Prozess mit höchster Wärmeausdehnung bei höchstmöglicher Brennstoff-

ausnutzung; dieser gestaltete sich unvermeidlich so, dass die Selbstzündung automatisch in ihm enthalten war.

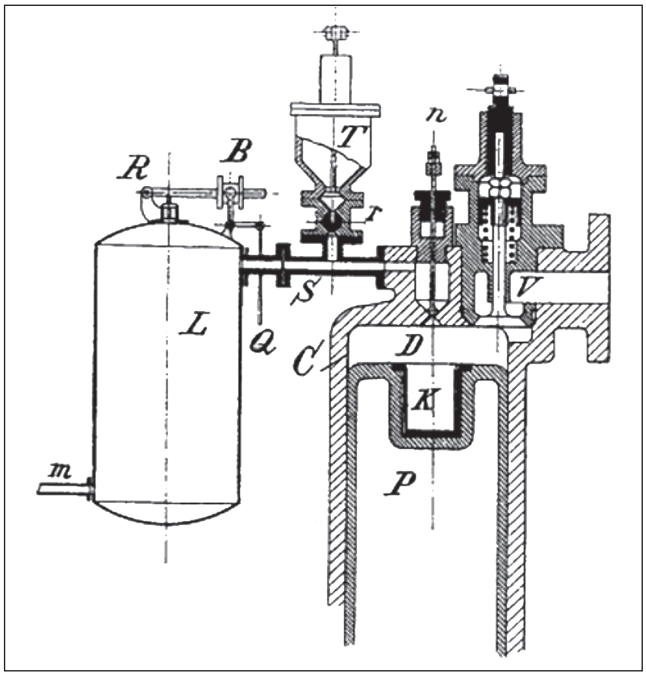


Figur 5: Zylinder (C) mit Trichter (B) für Brennstoffzufuhr und Luftventil (A) (aus DE 67 207 A).

Diesels Aufgabenstellung verlangte hochverdichtete Luft. In der DE 67 207 A erläutert er, dass die reine Luft im Zylinder so hoch komprimiert werden muss (auf etwa 250 bar), bis eine Temperatur erreicht wird, die der Verbrennungstemperatur entspricht (etwa 800 °C). Weiter schreibt Diesel in seiner Patentschrift: „Solche Drücke können nicht erreicht werden, wenn der Luft von vornherein Brennmaterial beigemischt ist, wie zum Beispiel bei Gas- und Petroleummotoren." Die Luftmasse wird damit weit über die zur Zündung nötige Temperatur erhitzt (die Entzündungstemperatur für Petroleum liegt bei etwa 70 °C bis 100 °C). Diesel folgert, dass infolge dessen im Verbrennungstakt nicht die Temperatur, sondern ausschließlich die Arbeitsleistung gesteigert wird.

Entgegen der Meinung einiger Widersacher (vergleiche Kapitel 4.3) offenbarte die DE 67 207 A bereits, dass für die Durchführung des Verfahrens alle Brennmaterialien geeignet sind. Beispielsweise können feste Brennstoffe in Pulver- oder Staubform eingestreut werden. In einem ersten Ausführungsbeispiel beschreibt Diesel die Zufuhr von pulverisierter Kohle (Figur 5). Der Trichter (B) enthält pulverisierte Kohle, welche durch die Seitenöffnung (n) eingebracht wird. Dieser Trichter ist vom Zylinder (C) durch einen Hahn (D) abgeschlossen, welcher über eine Steuerungswelle mit Hilfe von Hyperbelrädern in Rotation gesetzt wird. Bei einer bestimmten Stellung lässt der Hahn den Kohlenstaub in die komprimierte Luft einfallen; wegen der hohen Temperatur dieser Luft entzündet sich die Kohle und erzeugt Wärme, welche in Arbeit umgewandelt wird. Das Einfallen des Pulvers findet allmählich statt, um eine isothermische Verbrennung zu erzielen. Die Verbrennungswärme des Brennstoffs sollte den durch die Expansion entstandenen Wärmeverlust kompensieren können. In einem weiteren Ausführungsbeispiel der DE 67 207 A beschreibt Diesel die Zufuhr von flüssigem Brennstoff (zum Beispiel Petroleum), bei dem statt des in Figur 5 gezeigten Hahnes D eine kleine Pumpe eingesetzt wird, die den Brennstoff direkt in den Brennraum einspritzt.

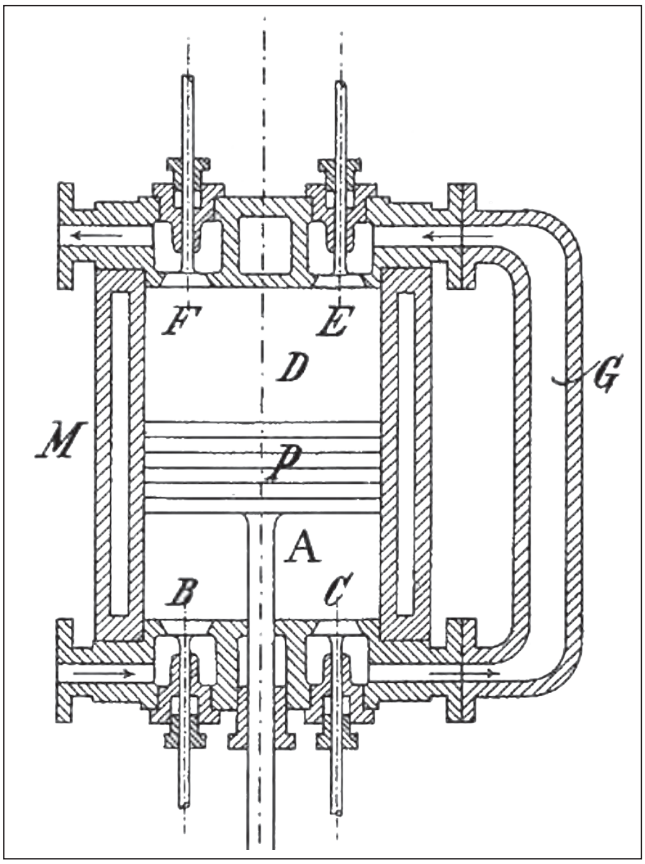
Im Gegensatz zu seiner theoretischen Betrachtung erkannte Diesel bald, dass nach der Brennstoffzufuhr unvermeidlich eine deutliche Temperatur- und Druckerhöhung erfolgt, und dass er den idealen Carnot-Prozess nur zu einem geringen Teil realisieren kann. In der im November 1893 angemeldeten DE 82 168 A verbesserte Diesel einige Schwächen der bisherigen Ausführung.



Figur 6: Verbesserter Motor von Rudolf Diesel mittels der Einblasung des Brennstoffs über ein Druckluft-Gefäß L (aus DE 82 168 A).

In der Beschreibungseinleitung der DE 82 168 A erläutert er die Auswirkungen der unvermeidlichen Druckerhöhung bei der Verbrennung auf das p-V-Diagramm. Um dennoch die Verbrennungs- und die Expansionskurve im Hinblick auf die nutzbare Leistung des Motors geeignet steuern zu können, beanspruchte er in der DE 82 168 A die Einblasung des Brennstoffs mittels Druckluft (Figur 6). Hierbei verbindet das Rohr (S) die Einspritzdüse (D) mit dem Kohlenstaubtrichter (T) und einem Druckluft-Gefäß (L), wobei der Druck im Gefäß (L) über eine Luftpumpe einstellbar ist. Beim Öffnen der Ventilnadel (n) wird das eingestreute Kohlenpulver in den Brennraum eingeblasen. Mit Hilfe der steuerbaren Brennstoffzufuhr war es Rudolf Diesel nun möglich, den Verlauf der Verbrennungskurve im Zustandsdiagramm zu beeinflussen. In der DE 82 168 A wird zudem erläutert, dass die zum Einblasen dienende Druckluft durch den Kolben selbst erzeugt werden kann (vergleiche Anspruch 2).

In der DE 95 680 A (Zusatz zum Hauptpatent DE 67 207 A) erläuterte Diesel bereits das Prinzip der Aufladung. Diesel hatte erkannt, dass die erreichbare Leistung des Motors nicht nur von der zugeführten Kraftstoffmenge, sondern auch von der im Zylinder eingeschlossenen Luftmenge abhängt.



Figur 7: Zylinder M mit Luftpumpe A und Zwischengefäß G (aus DE 95 680 A; Zusatz zu DE 67 207 A).

Figur 7 stellt den Zylinder M eines Einzylindermotors dar, deren unterer Teil (A) als Luftpumpe dient. Bei jedem Abwärtsgang des Kolbens (P) (2 x pro Arbeitszyklus) wird Luft durch das Ventil (C) in ein Zwischengefäß (G) gedrückt und vorkomprimiert. Während des Ansaugtakts (1 x pro Arbeitszyklus) strömt die Luft durch das Ventil (E) aus dem Zwischengefäß (G) ein. Besonders bemerkenswert ist, dass Diesel in der DE 95 680 A bereits im Jahre 1896 beanspruchte, dass „die Motorleistung durch Veränderung des Drucks im Zwischengefäß geregelt werden kann" (vergleiche Anspruch 1).

4.2 Patentstreitigkeiten

In der DE 67 207 A ist Diesels Erfindung eng mit dem Carnot-Prozess verbunden, was sich bei den Versuchen bald als Irrtum herausstellte. Für die weitere Entwicklung des Selbstzünder-Motors spielte dies zwar keine Rolle mehr, aber Diesels Gegner zogen daraus bis an sein Lebensende Argumente. So wurde Diesel in Patentstreitigkeiten verwickelt.

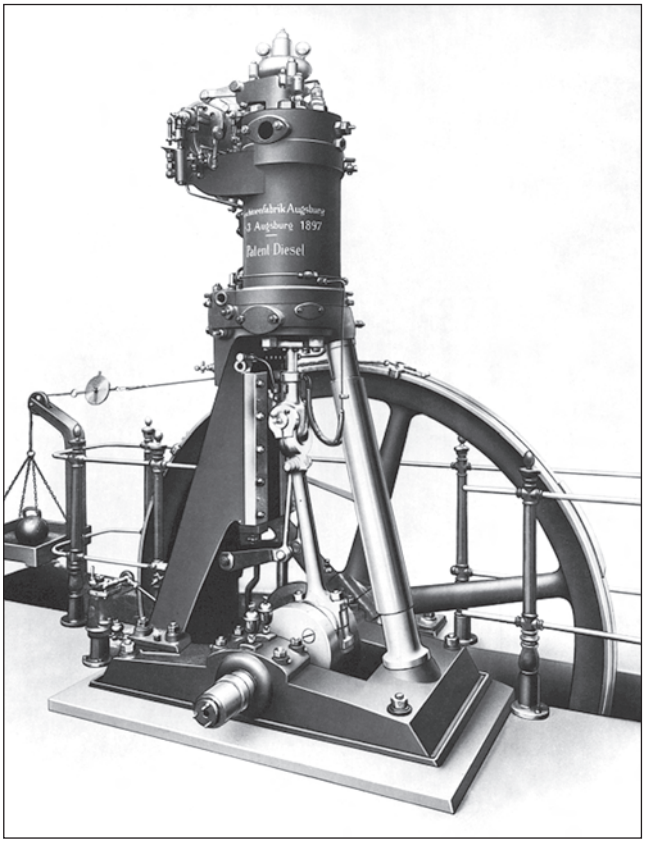
Am 31. Juli 1897 erhob der französische Ingenieur Emil Capitaine eine Nichtigkeitsklage gegen die beiden Patente DE 67 207 A und DE 82 168 A wegen mangelnder Neuheit. In seiner Begründung schrieb Capitaine unter anderem, dass das in Anspruch 1 der DE 67207 A beanspruchte Verfahren bereits durch seine Patentschriften DE 60 977 A und DE 60 801 A am Anmeldetag bekannt gewesen wäre [3].

Ferner wurde geltend gemacht, dass das in der DE 67 207 A beanspruchte Verfahren nicht ausführbar sei; Diesels Versuchsmotor, so der Vorwurf, realisiere keinen seiner Patentansprüche. Weder komme der Motor ohne Kühlung aus, noch erfolge die Expansion ohne wesentliche Temperaturerhöhung gegenüber der Kompression, auch werde kein Kohlenstaub als Brennstoff verwendet. Lediglich die im Anspruch 1 erwähnte Selbstzündung würde tatsächlich erfolgen [8].

Die Nichtigkeitsklage wurde am 21. April 1898 durch die Nichtigkeitsabteilung des Kaiserlichen Patentamtes abgewiesen. Um einen weiteren Rechtsstreit mit der Gasmotorenfabrik Deutz abzuwenden, wurde ein Lizenzvertrag mit der Firma Deutz geschlossen [3].

4.3 Realisierung des Dieselmotors

Noch im April 1893 begann Rudolf Diesel in Augsburg mit dem Bau seines Motors. Heinrich von Buz, der Direktor der Maschinenfabrik Augsburg – damals eine reine Dampfmaschinenfabrik – stellte hierfür eine Werkstatt zur Verfügung. Der erste Versuchsmotor wurde entsprechend der Lehre der DE 67 207 A zunächst ohne Kühlung ausgeführt. Um das Heißlaufen des Motors aber zu verhindern, brachte Diesel nach erfolglosen Testläufen eine Wasserkühlung ein. Nach zahlreichen Versuchsreihen lief der erste Versuchsmotor erstmals im Februar 1894 im Leerlauf, wenn auch nur für eine Minute. Im Juni 1895 brachte es der Einzylindermotor auf einen Wirkungsgrad von 17 % [9]. Bis 1896 wurde mit dem ersten Motor experimentiert. Für seine ersten Versuchsreihen verwendete Diesel Lampenpetroleum [7]. Obwohl der Versuchsmotor ausschließlich für flüssige Kraftstoffe ausgelegt war, hatte Diesel in seiner DE 67 207 A zunächst Kohlenstaub als Brennstoff für seinen Motor favorisiert. Der Grund lag wohl darin, dass Diesel die Kohle als Hauptenergiequelle seiner Zeit nicht außer Acht lassen konnte, zumal sein Motor die Dampfmaschine ersetzen sollte.



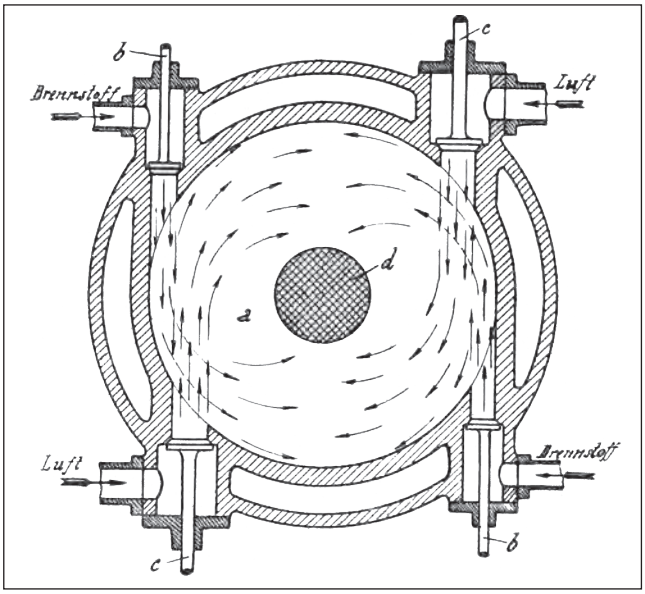
Figur 8: Erster betriebsfähiger Dieselmotor von 1897; Gesamtgewicht: 4,5 t ; Höhe: 3 m (Foto mit Genehmigung von MAN Diesel)

Im Jahr 1896 wurde Diesels Versuchsstand in der Maschinenfabrik Augsburg erweitert, und ein zweiter Motor konnte gebaut werden (Figur 8). Der neue Motor umfasste im Wesentlichen einen neuen Kolben, getrennte Ein- und Auslassventile und eine verbesserte Einspritzvorrichtung [9]. So erfolgte die Einspritzung beziehungsweise das Einblasen des Kraftstoffs direkt aus der Petroleumleitung, die unter konstantem Druck gehalten wurde (vergleiche DE 82 168 A). Gestartet wurde der Motor per Druckluft aus der Einblaseflasche, wie Diesel dies in den beiden Patentschriften DE 86 633 A und DE 90 544 A beschrieben hatte. Als Rudolf Diesel den selbstzündenden Motor im Februar 1897 zum Laufen brachte, war das die Geburtsstunde einer technischen Revolution. Der Einzylinder-Dieselmotor leistete 18 PS bei einem Wirkungsgrad von 26,2 % [2]. Damit stellte Diesels Kraftmaschine alle anderen Antriebsmaschinen in den Schatten. Der Motor arbeitete ohne Zündapparat, benötigte keine Kesselanlagen und auch keinen Kohlenbunker. Sein Wirkungsgrad übertraf die Dampfmaschine und auch den Ottomotor bei weitem. Dieser erste betriebsfähige Dieselmotor steht heute in der Kraftmaschinenabteilung des Deutschen Museums in München.

Die Versuche auf dem Prüfstand der Augsburger Maschinenfabrik sind unter Diesels Leitung bis nach der Jahrhundertwende fortgeführt worden. Zur Erprobung kamen unterschiedliche Brennstoffe. Es erfolgten Experimente mit Teeröl, Rohöl, Leuchtgas, Gasöl (Grundlage des heutigen Dieselkraftstoffs) und auch mit Kohlenstaub [3]. Auf der Pariser Weltausstellung im Jahre 1900 soll sogar ein mit Erdnussöl betriebener Dieselmotor präsentiert worden sein [2].

Im Jahr 1911 erhielt Rudolf Diesel ein Patent für ein „Verfahren zur Einführung der Ladebestandteile bei Verbrennungskraftmaschinen". In der DE 232 338 A wird die optimale Vermischung von Luft und Brennstoff beschrieben, in dem diese getrennt und in Form von kreisenden Strömen mit entgegengesetzter Drehrichtung in den Zylinder eingeführt und verwirbelt werden.

In Figur 9 sind zwei Ventile für die Brennstoffzufuhr (b) und zwei für die Ansaugluft (c) dargestellt. Jeder der Ströme, sowohl Brennstoff als auch Luft, wird tangential eingeführt, trifft auf die ihm zunächst liegende Zylinderwand und wird in kreisende Bewegung versetzt.



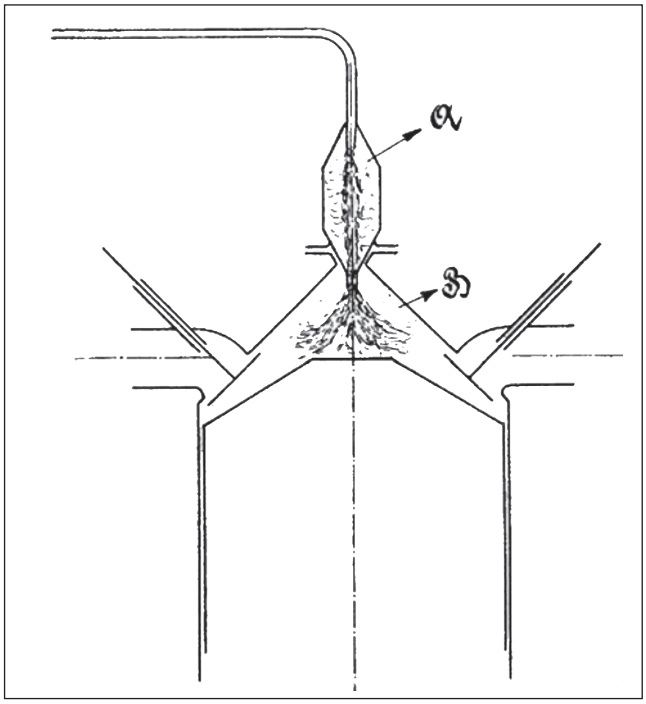
Figur 9: Verbrennungszylinder im Querschnitt bei gegenläufiger Zufuhr von Luft und Kraftstoff (aus DE 232 338 A).

5. Die Weiterentwicklung des Dieselmotors

Nach der Jahrhundertwende trat der Dieselmotor seinen Siegeszug an: 1903 fährt das erste Binnenschiff mit einem Dieselmotor, 1904 wird das erste Dieselkraftwerk in Kiew in Betrieb genommen und 1912 die erste Diesellokomotive (vergleiche Tabelle 3).

Die Verwendung seines Motors in einem Kraftfahrzeug erlebte Rudolf Diesel aber nicht mehr. Das größte Hindernis für einen hochtourigen Dieselmotor stellte die Kraftstoffzuführung dar. Das Problem war, den Kraftstoff genau dosiert zuzuführen. Die Lufteinblasung mit Kompressor, für stationäre Dieselmotoren akzeptabel, war für Fahrzeugmotoren ungeeignet. Eine direkte Hochdruckeinspritzung, wie es Diesel ursprünglich angestrebt hatte, war fertigungstechnisch noch nicht realisierbar. Man war nicht in der Lage, Einspritzpumpen mit der erforderlichen Genauigkeit herzustellen [3], [10].

Prosper L'Orange, Ingenieur bei Benz & Cie und Entwicklungspartner von Rudolf Diesel, erfand im Jahre 1909 das Vorkammerprinzip, mit dem erstmals auf die Kompressoren verzichtet werden konnte (DE 230 517 A). Zwischen einer Einspritzpumpe und dem Verbrennungsraum (B) setzte L'Orange einen Vor-Verbrennungsraum (A), die so genannte Kammer (Figur 10). Der Kraftstoff, der über eine Einlochdüse in die Kammer (A) eingespritzt wird, verbrennt dort teilweise, und wird durch den bei der Verbrennung entstehenden Druck in den Haupt-Verbrennungsraum (B) gedrückt.



Figur 10: Vorkammerprinzip von Prosper L'Orange mit dem Vorverbrennungsraum A, in den eine Düse Kraftstoff einspritzt (aus DE 230 517 A).

Ab November 1927 produzierte Bosch die Dieseleinspritzpumpe sowie die Einspritzdüsen für Nutzfahrzeuge in Serie. Die Einführung von Einspritzpumpen für Diesel-Pkw im Jahre 1936 war ein weiterer Meilenstein [11].

Die Erfindungen des Vorkammerprinzips von L'Orange und der Einspritzpumpe von Bosch bildeten schließlich die Grundlage für den ersten serienmäßig hergestellten Diesel-Personenwagen der Welt: Auf der Berliner Automobil-Ausstellung wurde im Jahre 1936 der Mercedes-Benz 260 D präsentiert.

Einen weiteren großen Entwicklungsschritt erreichte der Dieselmotor mit der Direkteinspritzung für Pkws im Jahre 1987, welche Fiat als erster Fahrzeughersteller einsetzte. Zwei Jahre später wurde die Hochdruckeinspritzung auch im Audi 100 TDI serienmäßig eingebaut. Der Brennraum wurde von einer elektronisch geregelten Verteilereinspritzpumpe mit einem Einspritzdruck von knapp 1000 bar versorgt. Die Direkteinspritzung ermöglichte erstmals eine definierte Voreinspritzung mit deutlichen Vorteilen in der Geräuschentwicklung. Zudem konnten die Vorteile des „Drive-by-Wire" in Form des E-Gas bei der elektronischen Dieselregelung genutzt werden [11].

Die immer genauer dosierte Zuordnung kleinster Kraftstoffmengen führte zur Entwicklung moderner Dieseleinspritz-

systeme, die ein hohes Druckniveau sowie die Formung des Einspritzverlaufes ermöglichen. Beim „Pumpe-Düse-System" bilden Einspritzpumpe und -ventil eine Einheit. Pro Zylinder ist eine Einheit in den Zylinderkopf eingebaut und wird direkt oder indirekt von der Nockenwelle angetrieben (vergleiche zum Beispiel DE 101 24 511 A1).

1892	Patentanmeldung für den Dieselmotor von Rudolf Diesel (DE 67 207 A)
1897	Erster lauffähiger Dieselmotor bei MAN in Augsburg
1903	Französische Kanalfähre „Petit Pierre" als erstes Schiff mit Dieselantrieb
1909	Patent für die Vorkammereinspritzung von Prosper L'Orange, Benz (DE 230 517 A)
1912	Erste Diesellokomotive
1924	Erster Diesel-LKW (MAN) in Kleinserie
1927	Serienfertigung der ersten Dieseleinspritzpumpe (Bosch)
1936	Erster in Serie gefertigte Diesel-Pkw (Mercedes-Benz 260 D)
1962	Axialkolben-Verteilereinspritzpumpe (Bosch)
1978	Erster Pkw-Dieselmotor mit Turboaufladung (Daimler-Benz 300 SD)
1986	Elektronisch geregelte Axialkolben-Verteilereinspritzpumpe (Bosch)
1987	Erster direkt einspritzender Dieselmotor (Fiat Croma TD)
1996	Magnetventilgesteuerte Radialkolbenpumpe, 1400 bar (Bosch)
1997	Erstes Common-Rail-System (Bosch) im Alfa Romeo 156 JTD
1998	Einführung des Pumpe-Düse-Systems mit dem 1,9-l-TDI (VW Passat)
1999	Serienmäßiges Drei-Liter-Auto mit Pumpe-Düse (VW Lupo 3L TDI)
2000	Partikelfiltersystem von PSA Peugeot Citroen (Peugeot 607 HDi)
2001	Piezo-Injektor von Siemens VDO serienmäßig (Peugeot 307 HDi)
2002	V10 TDI Serien-Dieselmotor (Pumpe-Düse) mit 750 Nm (VW Touareg)
2008	Prototyp mit CCS-Brennverfahren (VW Touran)

Tabelle 3: Meilensteine des Dieselmotors.

Im Gegensatz zu den nockenangetriebenen Pumpen mit einer drehzahlabhängigen Druckmodulation wird beim Speichereinspritzsystem „Common Rail" der Einspritzdruck unabhängig von der Motordrehzahl mittels einer Hochdruckpumpe erzeugt und zwischengespeichert. An die Stelle der druckgesteuerten Einspritzventile treten hier elektrisch betätigte Injektoren, über deren Ansteuersignale Zeitpunkt, Menge und Anzahl der Einspritzungen geregelt werden (vergleiche zum Beispiel die DE 101 14 039 A1). Durch den Einsatz von „Piezo-Aktoren" in den Hochdruckeinspritz-Systemen konnte die Präzision der Kraftstoffdosierung noch weiter gesteigert werden. Diese Schaltelemente, die den inversen Piezo-Effekt ausnutzen, schalten schneller als elektromagnetisch angetriebene Ventile, so dass sich eine bessere zeitliche und räumliche Verteilung des eingespritzten Kraftstoffes ergibt (zum Beispiel DE 101 43 502 C1, WO 01/33061 A1, DE 197 11 903 C2). Mit Hilfe des Injektors kann innerhalb weniger zehntausendstel Sekunden bei einem Druck von 2 200 bar ein Kubikmillimeter Kraftstoff in den Verbrennungsraum eingespritzt werden – in der Praxis in mehreren Teileinspritzungen (vergleiche DE 102 18 024 A1).

Aktuelle Entwicklungsarbeiten beim Dieselmotor beschäftigen sich mit einem neuen Verbrennungsmotor-Konzept, bei dem die Vorteile aus der Diesel- und Ottomotortechnik kombiniert werden (vergleiche DE 199 27 479 C2 von AVL List). Bezeichnet wird dieses Konzept als CCS (Combined Combustion System), CAI (Controlled Auto Ignition), HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) oder auch als Diesotto. Ziel ist eine ideale Vermischung von Kraftstoff und Luft im Brennraum des Motors, um die NO_x- und Partikelemissionen reduzieren zu können [12]. Entsprechend diesem Potential wird beim Dieselmotor, welcher bislang geschichtet betrieben wird, an der Homogenisierung der Gemischbildung gearbeitet. Im Gegenzug dazu wird beim Ottomotor der Versuch unternommen, mittels einer Kompressionszündung die Zündkerze zumindest in gewissen Teilen des Kennfeldes überflüssig zu machen. Im Jahre 2008 konnte der Volkswagen-Konzern bereits einen Prototypen mit einem CCS-Motorenkonzept vorstellen. Bei diesem Motor wird die Einspritzung im Homogenbetrieb nach früh verlegt, damit sich der Kraftstoff besser mit der Luft vermischen kann. Um trotzdem einen geeigneten Zündverzug zu erreichen, setzt VW auf einen synthetischen Dieselkraftstoff (Synfuel) mit einer gesenkten Zündfähigkeit. Untersuchungen im Hinblick auf eine ideale Homogenisierung des Gemischs haben ge-

zeigt, dass die Veränderung der Kraftstoffeigenschaften ein entscheidender Weg ist, der die Homogenisierung im Dieselmotor beziehungsweise die Selbstzündung im Benzinmotor besser beherrschbar und damit realisierbar macht [13].

Weitere Optimierungsmaßnahmen betreffen die Anpassung des Motors an alternative Kraftstoffe, wie zum Beispiel Biodiesel. Bereits im Jahr 1912 prognostizierte Rudolf Diesel: „Der Gebrauch von Pflanzenöl als Kraftstoff mag heute unbedeutend sein. Aber derartige Produkte können im Laufe der Zeit ebenso wichtig werden wie Petroleum und Kohle-Teer-Produkte von heute" [14]. Inwieweit die Verwendung von Biodiesel aber der Umwelt nützen kann, wird von Experten derzeit unterschiedlich beurteilt. So kommt verstärkt eine ethische Debatte auf um die Frage, ob Anbauflächen für Nahrungsmittel geopfert werden sollen, um nachwachsende Kraftstoffe zu erzeugen.

6. Ausblick

1897 hat Rudolf Diesel seinen Motor zur Marktreife entwickelt. Seit dieser Zeit konnten beachtliche Fortschritte erzielt werden, wie die oben genannten Beispiele zeigen. Aber auch zukünftig wird sich die Dieseltechnik weiterentwickeln. In den nächsten Jahren wird in dem Unternehmen, in welchem der Dieselmotor einst entstanden ist, der weltweit größte Schiffsdieselmotor gebaut. Der 14-Zylinder-Reihenmotor soll über eine Leistung von 115 000 PS verfügen und im Jahre 2011 an die Containerschiff-Reederei APL ausgeliefert werden [15].

Auch für weitere Entwicklungen im Pkw-Bereich weist die Dieseltechnik ein erhebliches Potential hinsichtlich der Optimierung des Motormanagements, der Kraftstoffverbrauchs- und der Emissionsminderung auf. Richtungsweisend für diese Entwicklung ist die Elektronik- Durchdringung des Dieselmotors. Nur mit der geeigneten elektrischen Mess- und Regelungstechnik ist es möglich, viele Einflussparameter – wie zum Beispiel die Motorlast – zu erfassen beziehungsweise zu modellieren und so den Motor funktionsübergreifend optimal anzusteuern. Der Dieselmotor hat zweifellos eine hochinteressante und spannende Zukunft.

Die Effizienz des Dieselmotors wird auch nach über 110 Jahren von keiner anderen Wärmekraftmaschine erreicht. Spannend wird aber dennoch sein, wie lange sich der Dieselmotor gegenüber alternativen Konzepten, insbesondere dem Hybrid-, dem Brennstoffzellenantrieb oder dem Elektromotor, behaupten wird.

Quellenverzeichnis der Nicht-Patentliteratur:

[1] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE VDA: Auto Jahresbericht 2008, Frankfurt am Main. ISSN 0171-4317, 2008.

[2] REUß H.-J.: Hundert Jahre Dieselmotor, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart, 1993. ISBN 3-440-06641

[3] STADT AUGSBURG UND MAN DIESEL SE: Katalog zur Sonderausstellung, Diesel – 2008, Schroff Verlag, Augsburg, 2008.

[4] GLASS V.: Diesel, Rotbuch Verlag, Berlin, 2008. ISBN 3-867-890307

[5] WOLLNY K.: Eine kurze Geschichte des Automobils, Deutsches Patent- und Markenamt, 16.07.2008. URL: http://www.dpma.de/service/klassifikationen/ipc/ipcprojekt/einekurzegeschichtedesautomobils/dampfmaschine_ottomotor/index.html [abgerufen am 07.08.08.]

[6] CARNOT S.: Reflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les machines propres a developper cette puissance, Paris, 1824. ISBN 978-2-7116-0112-7

[7] DIESEL R.: Die Entstehung des Dieselmotors, Springer Verlag, Berlin 1913.

[8] DIESEL E.: Diesel. Der Mensch, das Werk, das Schicksal, Hamburg, 1940. ISBN 0694716111

[9] MAUEL K.: Kraftmaschinen II, Beitragsreihe zur Technikgeschichte, Deutsches Museum, München, 2002. ISBN 3-924183-73-2

[10] ROBERT BOSCH GMBH: Dieselmotor-Management im Überblick, Stuttgart, 2002. ISBN 3-7782-2058-6

[11] DOHLE U.: 75 Dieseleinspritzung von Bosch, MTZ 1/2003, Jahrgang 64, S. 16–20.

[12] STEIGER W., SCHOLZ I.: Zukünftige Entwicklungen von Verbrennungsmotoren und Anforderungen an das Motormanagement – Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren – AUTOREG 2006, Wiesloch, VDI-Berichte Nr. 1931, 2006, S. 17–26.

[13] STAN C.: Konvergenz von Otto- und Dieselmotoren, MTZ, 6/2004 Jg. 65, S. 494–503.

[14] DIESEL R.: The Diesel Oil-Engine and its Industrial Importance, Especially for Great-Britain, Engineering Journal, Vol. 93, London, pp. 395–406, 1912.

[15] MAN DIESEL SE: Annual Report 2007.

Aktive Fahrwerkseingriffe bei Motorrädern

Dr. Nicolai Geier, Patentabteilung 1.21

**Aktive Lenkung, selbstregulierendes Fahrwerk – für Motorräder Utopie oder bald Wirklichkeit?
Dieser Beitrag befasst sich mit neuen Aspekten in der Fahrzeugsicherheit bei Motorrädern und stellt an Hand von Beispielen aus der Patentliteratur aktuelle Erfindungen auf dem Gebiet der aktiven Fahrwerkseingriffe bei Motorrädern vor.**

1. Einleitung

In modernen Kraftfahrzeugen ist heute eine große Anzahl an aktiven und passiven Sicherheitssystemen integriert, die die Fahrsicherheit im Vergleich zu Kraftfahrzeugen ohne diese Sicherheitssysteme deutlich erhöhen.

Die Aufgabe aktiver Sicherheitssysteme ist es, kritische Fahrsituationen oder gar Unfälle möglichst zu vermeiden. Die bekanntesten aktiven Sicherheitssysteme sind Fahrerassistenzsysteme wie beispielsweise das elektronische Stabilitätsprogramm, das Antiblockiersystem oder die Antischlupfreglung. Aber auch neuere Entwicklungen wie Lichtassistenten, Bremsassistenten, Abstandswarner, Spurhalte- beziehungsweise Spurwechselassistenten oder Einparkhilfen zählen dazu.

Sollte das Kraftfahrzeug trotz aller aktiven Sicherheitssysteme dennoch an einem Unfall beteiligt sein, so ist die Aufgabe der passiven Sicherheitssysteme, die negativen Auswirkungen des Unfalls hinsichtlich gesundheitlicher Schäden der Insassen so gering wie möglich zu halten. Dies geschieht beispielsweise durch Systeme wie Sicherheitsgurte oder Airbags.

Anders sieht es bei dem Einsatz aktiver Fahrsicherheitssysteme im Fall von Motorrädern aus. Dies ist vor allem darin begründet, dass sich die aus dem Bereich der vierrädrigen Kraftfahrzeuge bekannten und bewährten Sicherheitssysteme in der Regel nicht direkt auf das Motorrad übertragen lassen.

Das am weitesten verbreitete aktive Sicherheitssystem bei Motorrädern ist dabei das Antiblockiersystem. Doch obwohl bereits 1988 zum ersten Mal ein Antiblockiersystem bei einem Motorrad kommerziell eingeführt wurde [1], ist auch heute noch ein großer Teil der neu verkauften Motorräder nicht mit einem Antiblockiersystem ausgestattet [2].

Andere aktive Sicherheitskonzepte, wie beispielsweise aktive Fahrwerkseingriffe, sind dagegen in Serie bis heute noch nicht verbreitet oder bekannt.

Der folgende Beitrag soll daher anhand ausgewählter Beispiele aus der Patentliteratur Entwicklungen aufzeigen, die sich speziell der Thematik der aktiven Fahrwerkseingriffe bei Motorrädern widmen.

2. Fahrinstabilitäten

Als Einspurfahrzeug befindet sich das Motorrad immer in einem labilen Gleichgewicht und wird im Gegensatz zu einem zweispurigen Kraftfahrzeug rein dynamisch stabilisiert.

Unterhalb einer Grenzgeschwindigkeit von etwa 35 km/h muss der Fahrer das Zweirad durch Gewichtsverlagerung oder aktive Lenkausschläge ausbalancieren. Oberhalb dieser Grenzgeschwindigkeit findet eine selbsttätige Stabilisierung des Motorrades aufgrund der an dem Motorrad angreifenden Kreiselkräfte ohne Eingriff des Fahrers statt.

Die Stabilisierung des Motorrades ist dabei ein periodischer Vorgang, dessen verschiedene Phasen mehrfach durchlaufen werden. Kommt es zu unkontrollierten Abläufen, so können Fahrinstabilitäten auftreten.

2.1 Flattern, Pendeln und Lenkerschlagen

Das Gesamtsystem Motorrad-Fahrer-Fahrbahn ist wegen der Drehmöglichkeit des Vorderrades um die Lenkachse und der nur losen Koppelung zwischen Motorradreifen und Fahrbahn schwingungsfähig. Dabei wird nach den beiden Eigenschwingungsformen „Flattern“ und „Pendeln“ sowie der erzwungenen Schwingung „Lenkerschlagen“ unterschieden.

Beim Flattern wird die Vorderradgabel des Motorrades bei Fahrt in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 60 und 80 km/h in Schwingungen versetzt. Die Schwingungen können dabei auftreten, wenn die Raddrehfrequenz des Vorderrades mit der Eigenfrequenz des gesamten Radaufhängungs- und Lenksystems übereinstimmt. Die Schwingungen liegen dabei üblicherweise im Bereich zwischen 5 bis 10 Hz. Zu den Haupteinflussfaktoren zählen dabei eine Radunwucht des Vorderrades, ungünstige Reifeneigenschaften oder ungünstige Massebelegungen der Bauteile des Lenksystems.

Die zweite Eigenschwingungsform des Motorrades ist das Pendeln. Es muss im Vergleich zum Flattern als wesentlich gefährlicher für die Fahrsicherheit eingestuft werden, zumal grundsätzlich nahezu jedes Motorrad durch eine ungünstige Anregung, die beispielsweise von der Fahrbahn eingeleitet wird oder aber auch durch aerodynamische Kräfte verursacht wird, in den Zustand des Pendelns versetzt werden kann. Das Gesamtfahrzeug vollführt dabei eine komplexe Schlingerbewegung um die Hochachse des Motorrades, die aufgrund der Kreiselwirkung von einer zusätzlichen Kippbewegung um die Längsachse des Motorrades überlagert wird.

Pendeln tritt im Gegensatz zum Flattern allerdings erst bei höheren Fahrgeschwindigkeiten auf, die in der Regel über 100 km/h liegen, und nimmt mit steigender Geschwindigkeit an Intensität zu. Die Pendelfrequenz liegt mit 3 bis 4 Hz dabei deutlich niedriger als beim Flattern.

Die dritte Fahrinstabilität ist das Lenkerschlagen, das in jedem Geschwindigkeitsbereich auftreten kann. Es handelt sich dabei um eine parametrisch erregte Schwingung des Lenksystems um die Lenkachse, bei der in schneller Folge wenige, sehr große Lenkwinkelausschläge stattfinden.

Zwingende Vorraussetzung für das Lenkerschlagen ist zunächst das Abheben des Vorderrades von der Fahrbahn, beispielsweise durch eine unebene Fahrbahn. Das Wiederaufsetzen des Vorderrades führt dann zu einem impulsartigen Ausschlag der Lenkung. Wiederholt sich das Abheben in periodische Abfolge, wie dies beim Überfahren von Bodenwellen auftreten kann, oder ist die Reaktion des Fahrers verlangsamt, kann das Lenkerschlagen ebenfalls zu sehr kritischen Fahrzuständen führen.

2.2 Nicken und Abheben

Neben den bei Fahrt möglicherweise auftretenden Schwingungen kann ein starkes Abbremsen oder Beschleunigen des Motorrades zu weiteren Problemen in der Stabilität des Motorrades führen, die im direkten Zusammenhang mit dem Fahrwerk des Motorrades stehen.

So führt das abrupte Abbremsen eines Motorrades, auch wenn es über eine Antiblockierbremsregelung verfügt, aufgrund der Trägheit des Motorrades und der Trägheit seines Fahrers zu einem Eintauchen der gefederten Vorderradgabel, dem sogenannten Nicken. Im Extremfall kann dabei sogar das Hinterrad von der Fahrbahn abheben.

Anderweitig kann ein zu starkes Beschleunigen zu einem nicht beabsichtigten Abheben des Vorderrads führen.

3. Aktive Fahrwerkseingriffe im Einzelnen

Zur Vermeidung der genannten Fahrinstabilitäten kann bei einem Motorrad, neben dem bekannten Eingriff in das Bremsverhalten über ein Antiblockiersystem, ein gezielter Regeleingriff in das Fahrwerk des Motorrades durchgeführt werden.

Dieser Regeleingriff erfolgt dabei in die Charakteristik der Feder- und Dämpferelemente der Radaufhängung, in die Lenkung oder in die Vorder- oder Hinterradführung allgemein.

3.1 Veränderung der Feder/Dämpfercharakteristik der Vorder- beziehungsweise Hinterradaufhängung

3.1.1 Parallel zum Bremsvorgang

Um dem beim Abbremsen des Motorrades verursachten Eintauchen entgegen zu wirken, werden in der Patentliteratur verschiedene Sicherheitssysteme vorgeschlagen.

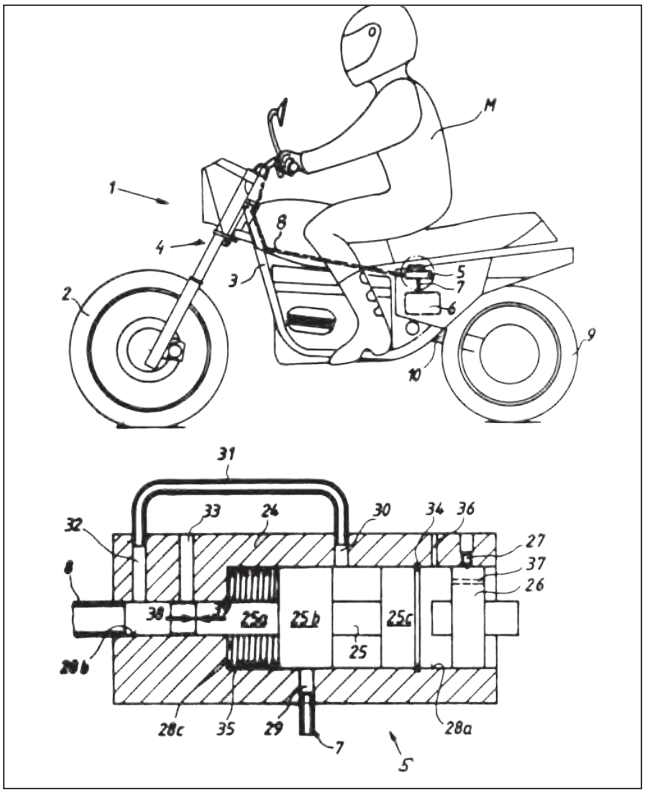
Bei dem so genannten „Anti-Dive-System" kann die Feder-Dämpfercharakteristik der Vorderradgabel bei einem Bremsvorgang gezielt so verändert werden, dass bei einem Bremsvorgang ein starkes Eintauchen der Vorderradgabel unterbunden wird.

Die DE 34 11 561 A1 (Figur 1) schlägt hierzu vor, den Druck in dem zum Federsystem gehörenden Gasdruckraum der Vorderradgabel bei einem Bremsvorgang auf einem so hohen Niveau zu halten, dass ein Eintauchen unmöglich ist.

Erreicht wird dies durch einen in ein Regelventil (5) integrierten Sperrschieber (25), der in abwechselnder Folge den Entlüftungskanal des Gasraumes öffnet und schließt. Dieser Öffnungs-Schließmechanismus wird dabei von zwei entgegengesetzt auf den Sperrschieber wirkenden Kräften gesteuert. Dies ist zum einen die Kraft, die sich durch den durch das Eintauchen verursachten Druck des Gasdruckraumes auf die wirksame Fläche des Sperrschiebers ergibt, und zum anderen die Kraft, die sich aus der Masse des Sperrschiebers und seiner Beschleunigung beim Bremsen ergibt.

Alternativ zu dem in der DE 34 11 561 A1 offenbarten Sperrschieber können auch andere Absperrsysteme wie entspre-

chend konstruierte Kugelventile (DE 36 03 937 A1) oder Magnetventile (DE 31 43 126 A1) eingesetzt werden.



Figur 1: Motorrad mit einem „Anti-Dive-System" (aus DE 34 11 561 A1).

Dabei besteht natürlich grundsätzlich die Möglichkeit, diese eher passiven „Anti-Dive-Systeme" durch eine entsprechende Steuer- und Regeltechnik in aktive ansteuerbare Systeme umzuwandeln. Solche aktiven „Anti-Dive-Systeme" gehen dabei beispielsweise aus der US 6 336 648 B1 oder der DE 39 30 966 A1 hervor.

Eine Möglichkeit einem möglichen Abheben des Hinterrades entgegen zu steuern zeigt die DE 601 12 686 T2. Sie beschreibt ein Motorrad, bei welchem bei einem Bremsvorgang und bei Gefahr des Abhebens des Hinterrades von der Fahrbahn die Feder-Dämpfercharakteristik der Hinterradfederung derart verändert wird, so dass die Hinterradgabel in etwa simultan mit der Vorderradgabel einfedert. Hierdurch wird der Schwerpunkt des Motorrades abgesenkt und somit ein Abheben des Hinterrades erschwert.

3.1.2 Sonstige Einsatzmöglichkeiten

Die Veränderung der Feder/Dämpfungscharakteristiken der Fahrwerksfederung kann aber nicht nur mögliche Nickbewegungen des Motorrades oder ein Abheben des Hinterrades ausgleichen, vielmehr ist es auch möglich, im Fahrbetrieb gezielt auf Bodenunebenheiten und damit auf mögliche Schwingungserreger zu reagieren oder alternativ die Höhe des Fahrzeugschwerpunktes über der Fahrbahn anzuheben oder abzusenken.

Die DE 35 42 353 C2 zeigt ein Motorrad, dessen Federkennung für Vorder- und Hinterrad in direkter Abhängigkeit von einer horizontalen Beschleunigung gesteuert wird. Dabei spannt beim Überfahren eines Hindernisses oder einer Bodenunebenheit das einfedernde Vorderrad über eine Druckleitung die Hinterradfederung, so dass diese nicht so stark einsinkt.

Die DE 200 17 267 U1 offenbart ein ähnliches System. Hierbei werden die Federung des Vorderrads beziehungsweise die Federung der Hinterradgabel jedoch getrennt angesteuert, wobei die Ansteuerung auf den Daten eines Sensors, wie etwa einem Radar-, Infrarot- oder Ultraschallsensor, beruht, der die Oberfläche vor dem Motorrad abtastet.

Parallel hierzu besteht die Möglichkeit, die Höhe des Schwerpunkts des Motorrades durch eine gleichzeitige gemeinsame Ansteuerung der beiden Federungen, je nach Fahrzustand, anzuheben oder abzusenken. Dies kann, wie es die DE 31 06 122 C2 oder die DE 103 47 595 A1 offenbaren, geschwindigkeitsabhängig oder aber auch neigungswinkelabhängig, wie es die DE 10 2004 021 590 A1 beschreibt, geschehen.

Es ist sogar aus der DE 101 20 848 A1 ein System bekannt, das im Fall einer Kollision des Motorrades durch eine Absenkung des Schwerpunkts des Fahrzeugs ein Hochstellen des Motorrades zu vermeiden versucht.

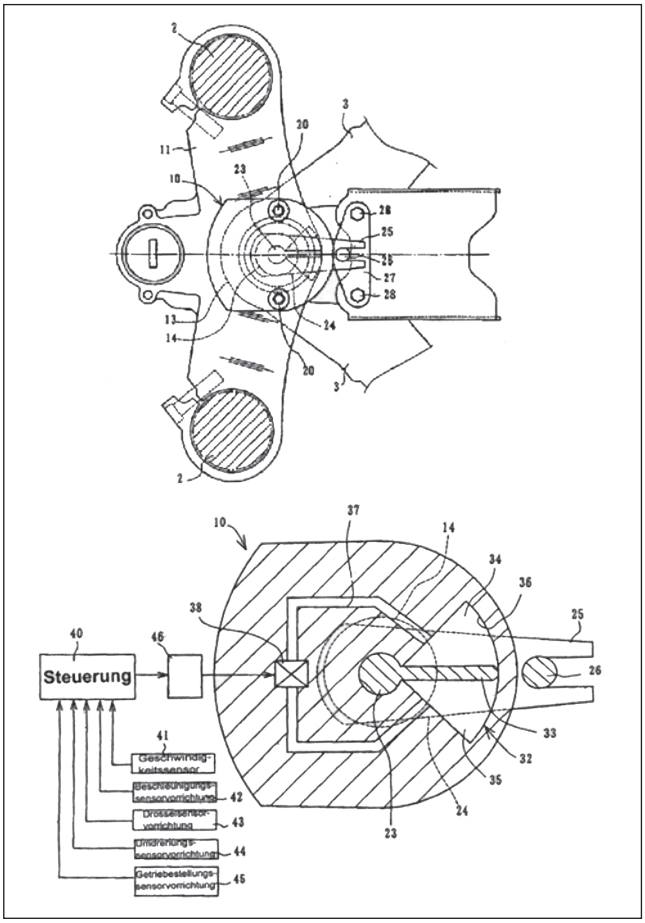
3.2 Dämpfung der Lenkerbewegung

Zur Vermeidung von ungewollten Schwingungen der Vorderradgabel eines Motorrades um ihre Lenkachse, besteht die Möglichkeit im Bereich der Vorderradgabel einen Lenkungsdämpfer einzusetzen.
Der Lenkungsdämpfer ist dabei zumeist hydraulisch ausgeführt, er kann jedoch anderweitig wie zum Beispiel durch einen Magnetreibungsdämpfer (DE 36 29 815 A1) realisiert werden.

Die Figur 2, die der Veröffentlichung DE 60 2005 001 868 T2 entnommen ist, zeigt ein Lenksystem eines Motorrades mit einem elektrisch angesteuerten hydraulischen Lenkungsdämpfer.

Der Lenkungsdämpfer (10) ist dabei zwischen einer oberen Gabelbrücke (11), an welcher die Lenkstange angebracht ist, und einem vorderen Endbereich des Motorradrahmens (3) angebracht. Der Hauptkörper des Lenkungsdämpfers umfasst ein elektrisch angesteuertes Ventil (38) und die beiden Flüssigkeitskammern (34 und 35). Er ist dabei fest mit der oberen Gabelbrücke verbunden. Die Welle (23), der Flügelabschnitt (33) und der Arm (24) sind einstückig ausgebildet und fest mit dem Motorradrahmen über den Bolzen (26) verschraubt.

Die Welle (23) ist koaxial so mit der Lenkerwelle (14) angeordnet, dass eine Drehung des Lenkers eine drehende Bewegung des Flügelabschnitts (33) innerhalb der Flüssigkeitskammern (34, 35) bewirkt. Bei dieser Drehung wird Hydraulikfluid aus der einen Flüssigkeitskammer über den Kanal (37) und das Ventil (38) in die andere Flüssigkeitskammer transportiert. Zur Erzeugung einer Dämpfungskraft beinhaltet das Ventil (38) dabei einen einengenden Durchgang und ein Linear-Solenoid zur Änderung der Durchgangsquerschnittsfläche.



Figur 2: Motorrad mit einem elektrisch angesteuerten hydraulischen Lenkungsdämpfer (aus DE 60 2005 001 868 T2).

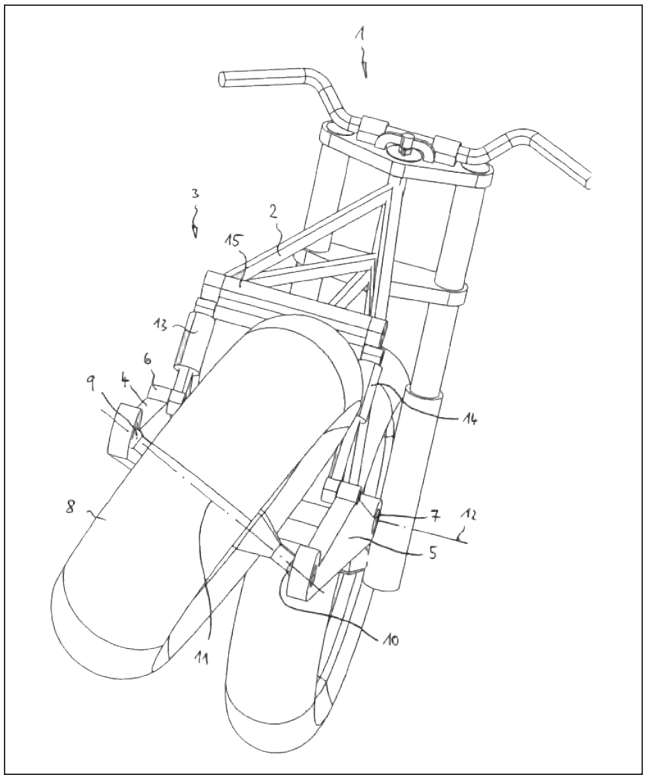
Aufgrund von Daten, die durch Beschleunigungssensoren, Geschwindigkeitssensoren oder weiteren Sensoren gewonnen werden, kann nun die Steuerung und Regelung des Ventils (38) in Abhängigkeit von möglichen Fahrinstabilitäten durch die Steuervorrichtung (40), die durch einen Mikrocomputer gebildet wird, durchgeführt werden.

3.3 Veränderung der Position der Räder

Die Figuren 3 bis 6, die den Veröffentlichungen DE 10 2006 024 324 A1, DE 10 2006 024 325 A1, DE 10 2006 024 326 A1 und DE 10 2006 024 327 A1 entnommen sind, zeigen vier verschiedene Möglichkeiten auf, bei denen jeweils ein gezielter Eingriff in die räumliche Lage des Vorder- beziehungsweise des Hinterrades des Motorrades erfolgt.

3.3.1 Veränderung der Lage des Hinterrads

Die Figur 3 aus der DE 10 2006 024 325 A1 zeigt ein Motorrad mit einer Hinterradschwinge, die um eine Querachse (12) schwenkbar ist, die durch die beiden Schwenkgelenke (6) und (7) gebildet ist. Dabei sind der linke (4) und der rechte (5) Schwingarm der Hinterradschwinge jeweils separat gelagert und können zumindest innerhalb eines gewissen Schwenkwinkelbereiches von zwei Aktuatoren (13, 14) angesteuert,



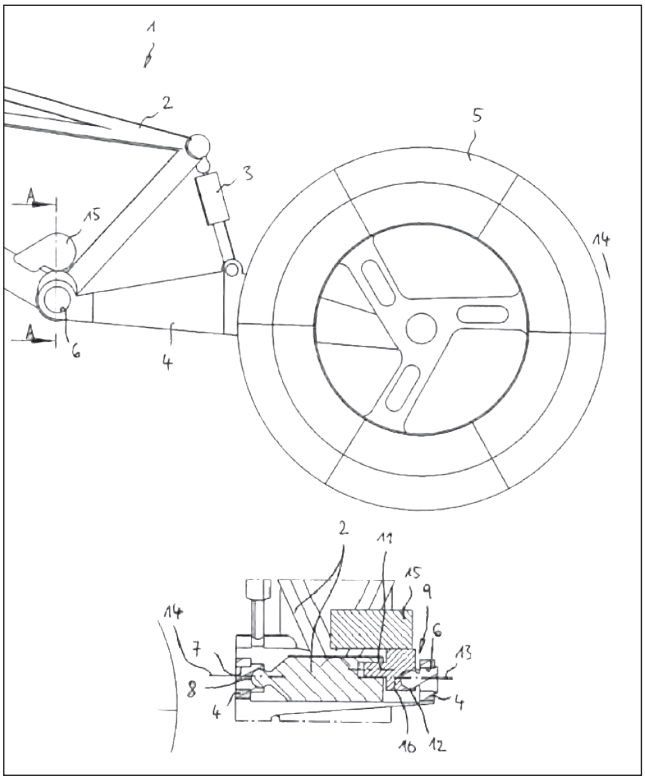
Figur 3: Motorrad mit unabhängig voneinander verschwenkbaren Schwingarmen (aus DE 10 2006 024 325 A1).

unabhängig voneinander verschwenkt werden. Das Hinterrad (8) ist dabei über ein linkes Gelenk (9) mit dem linken Schwingenarm (4) und über ein rechtes Gelenk (10) mit dem rechten Schwingenarm (5) gelenkig verbunden, so dass die beiden Gelenke (9, 10) die Drehachse (11) des Hinterrads definieren.

In dem in Figur 3 gezeigten Zustand der Hinterradaufhängung sind die beiden Schwenkarme (4, 5) relativ zueinander verschwenkt. Dies bedeutet, dass der Schwenkarm (4) weiter „eingeschwenkt" ist als der Schwenkarm (5). Das hat zur Folge, dass die Drehachse (11) des Hinterrads (8) schräg in Bezug auf die Querachse (12) des Motorrads steht.

Wird nun anhand der überwachten Fahrzustandsgrößen des Motorrads ein kritischer Fahrzustand erkannt, so kann durch Ansteuern der beiden Aktuatoren (13, 14) gezielt die „Seitenneigung" des Hinterrads (8) in Bezug auf das übrige Motorrad verändert und dadurch der Fahrzustand stabilisiert werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Lage des Hinterrades relativ zur Position der Querachse des Motorrades zu verändern, zeigt die Figur 4, die der Veröffentlichung DE 10 2006 024 324 A1 entnommen ist.



Figur 4: Hinterradschwinge eines Motorrads, dessen Lagerdrehachse mittels eines Exzenters veränderbar ist (aus DE 10 2006 024 324 A1).

Die Hinterradschwinge (4) ist in diesem Beispiel, über ein rechtes (12) und ein linkes (8) Gelenk schwenkbar mit dem Rahmen (2) des Motorrads verbunden. Dabei weist mindestens eines der beiden Schwenkgelenke eine Verstelleinrichtung auf, die in einem kritischen Fahrzustand die räumliche Position und damit den Winkel der Lagerdrehachse (13, 14) zu einer Querachse des Motorrades verstellen kann.

Erreicht wird dies durch ein gezieltes Verdrehen eines Exzenterelements (10) durch einen elektrischen oder hydraulischen Aktuator (15), wobei das Exzenterelement zwischen dem Schwenkgelenk (12) und dem Rahmen (2) angeordnet ist.

3.3.2 Veränderung der Lage des Vorderrads

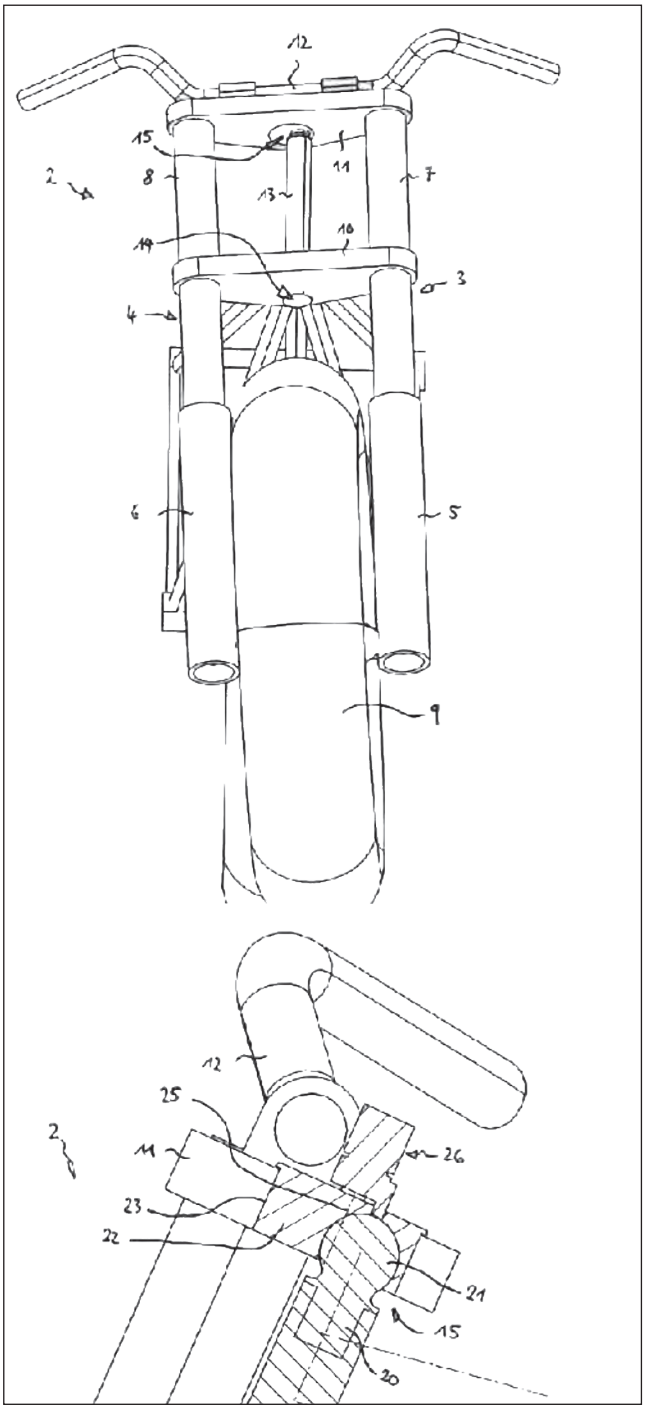
Neben der gezielten Veränderung der Lage des Hinterrades des Motorrads offenbaren die DE 10 2006 024 326 A1 und die DE 10 2006 024 325 A1 einen Eingriff in die räumliche Position der Vorderradgabel.

Die Figur 5 aus der DE 10 2006 024 326 A1 zeigt dabei eine Vorderradaufhängung eines Motorrads dessen obere (11) und untere (12) Gabelbrücke jeweils mit dem Steuerrohr (13) des Motorrads über Kugelgelenke (14, 15) miteinander verbunden ist. Das Steuerrohr (13) ist dabei in einer üblichen Art und Weise so drehbar in einem Steuerkopfrohr des Motorradrahmens gelagert, dass bei einer Betätigung des Lenkers (12) die Vorderradaufhängung um eine durch das Steuerrohr (13) verlaufende Drehachse gedreht wird.

Tritt nun ein kritischer Fahrzustand auf, so kann die Lage der Drehachse durch eine Veränderung der Lage des Steuerrohrs (13) in Relation zu den beiden Gabelbrücken korrigiert werden.

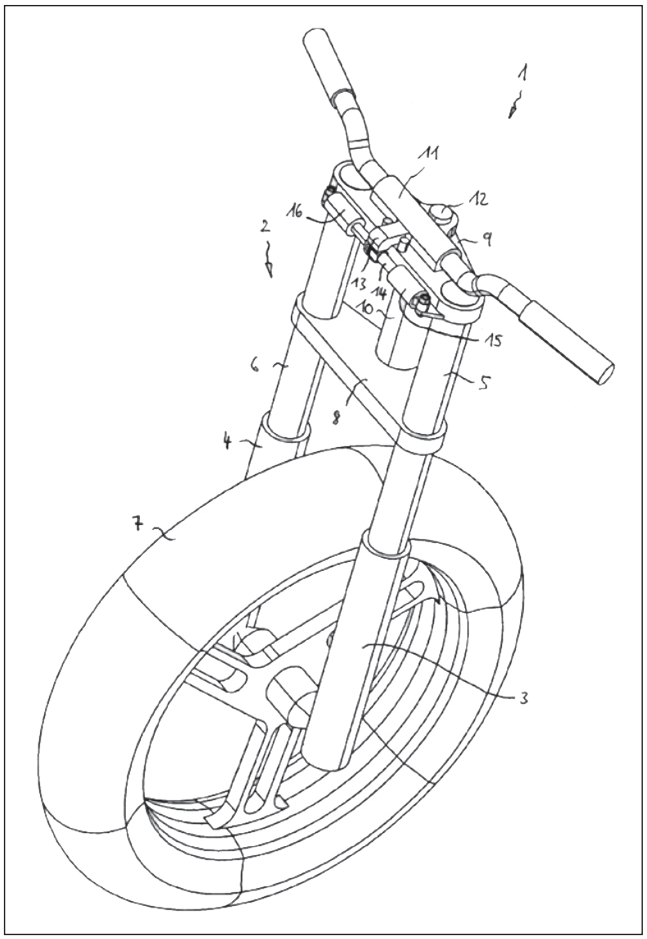
Zu diesem Zweck weist das obere Kugellager (15) einen Gelenkzapfen (20), eine damit verbundene Gelenkkugel (16) und ein Pfannenteil (22) auf, das in die kreiszylindrische Ausnehmung (23), die in der oberen Gabelbrücke (11) vorgesehen ist, eingesetzt ist. Die Mittelachse (25) des Pfannenteils (22) ist dabei in Bezug auf die Längsachse (24) des Steuerrohrs (13) exzentrisch, so dass eine Verdrehung des Pfannenteils (22) in der Ausnehmung (23) der oberen Gabelbrücke (11) bei einer fixierten Lage des unteren Kugelgelenks (14) eine Positionsverschiebung des oberen Endes des Steuerrohrs (11) in Bezug auf die Gabelbrücken bewirkt.

Die Verdrehung des Pfannenteils wird dabei durch eine Verstelleinrichtung (26) bewirkt, die durch eine Elektronik angesteuert wird, welche einen oder mehrere Fahrzustandsparameter, wie zum Beispiel Raddrehzahlen, Seitenneigungswinkel, Nickwinkel, Gierrate, Querbeschleunigung oder den eingelegten Gang überwacht.



Figur 5: Vorderradgabel eines Motorrads, deren Lenkdrehachse mittels eines Exzenters veränderbar ist (aus DE 10 2006 024 326 A1).

Alternativ zeigt die Figur 6 aus der DE 10 2006 024 327 A1 eine Vorderradgabel (2) eines Motorrads, die eine Übertragungseinrichtung aufweist, über die der Lenker mit dem Radträger gekoppelt ist.



Figur 6: Vorderradgabel eines Motorrads mit einer Übertragungseinrichtung zwischen Lenker und Radträger (aus DE 10 2006 024 327 A1).

Die Übertragungseinrichtung weist dabei zwei Kolbenanordnungen (14, 15, 16) auf, wobei jeweils ein Ende des zugehörigen Zylinders (15, 16) an der oberen Gabelbrücke (9) befestigt ist, während ein Ende des jeweiligen Kolbens (14) mit dem Lenker (11) verbunden ist.

Die durch die Kolben (14) und die Zylinder (15, 16) gebildete Anordnung fungiert somit als Stellglied, mit dem die Vorderradgabel (2) relativ zu dem Lenker (11) verschwenkt werden kann. Das Stellglied wird durch eine entsprechende Elektronik angesteuert, die wiederum verschiedene Fahrzustandssignale überwacht.

Wenn die überwachten Fahrzustandssignale auf das Vorliegen einer kritischen Fahrsituation hindeuten, kann mittels des Stellglieds ein Lenkeingriff vorgenommen werden, d. h. die Vorderradgabel (2) kann relativ zu der vom Fahrer vorgegebenen Lenkerstellung verschwenkt werden, um den Fahrzustand des Motorrads zu stabilisieren.

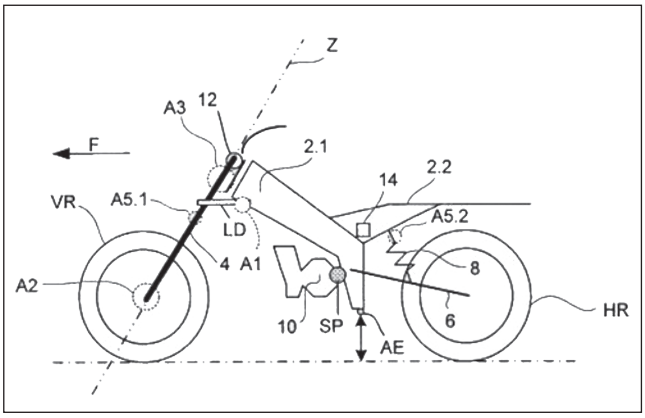
4. Kombinierter Fahrwerkseingriff

Es existieren somit zahlreiche technische Möglichkeiten, die einzeln einen aktiven Eingriff in das Fahrwerk des Motorrades ermöglichen, um so Fahrinstabilitäten entgegen zu wirken. Einige dieser Fahrwerkseingriffe wurden dabei in diesem Beitrag genauer vorgestellt.

Wird bei Betrieb des Motorrads eine auftretende Fahrinstabilität detektiert, kann ihr jedoch nicht nur gezielt durch die Ansteuerung einer einzelnen Fahrwerkskomponente entgegen gesteuert werden. Vielmehr werden im idealen Fall mehrere aktive Fahrwerkseingriffe zeitgleich, möglichst in Zusammenspiel mit einer simultanen Ansteuerung eines aktiven Bremssystems, koordiniert.

Die Figur 7 aus der DE 10 2005 047 144 A1 zeigt dabei anhand einer Schemaskizze eines Motorrades die Positionierung mehrer möglicher Aktuatoren, die in Kombination dazu genutzt werden können einem Flattern des Motorrades, das mittels Sensoren (12) detektiert wurde, entgegenzuwirken.

Dabei wird ein elektronisch steuerbarer Lenkungsdämpfer (A1), eine aktive Bremssteuerung (A2), ein steer-by-wire Lenksystem sowie die vordere und die hintere Feder-Dämpfercharakterisitk (A5.1, A5.2) der Fahrwerkfederung in die aktive Fahrregelung mit einbezogen.



Figur 7: Motorrad, umfassend ein System zu Vermeidung des Flatterns (aus DE 10 2005 047 144 A1).

Ähnliche Steuer- beziehungsweise Regelungskonzepte zur Vermeidung des Pendelns des Motorrades offenbart die DE 10 2005 047 145 A1.

Die DE 10 2005 047 142 A1 beschreibt ein System zur Vermeidung des Lenkerschlagens, die DE 10 2005 047 143 A1 zur Vermeidung des Radschlupfs.

In diesen Anwendungen werden zusätzlich weitere Systemkomponenten des Motorrades aktiv beeinflusst. So sind beispielsweise in der DE 10 2005 047 145 A1 zur Vermeidung des Pendelns zusätzlich aerodynamische Teile am Rahmen des Motorrades vorgesehen, die mittels Aktuatoren verstellbar ausgeführt sind.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Neben bekannten aktiven Sicherheitssystemen für Motorräder, wie Antiblockiersystemen oder anderweitigen aktiven Bremssystemen, die durch gezielte Eingriffe Überschläge oder weitere Fahrinstabilitäten zu vermeiden versuchen, finden sich in der Patentliteratur zahlreiche Entwicklungen, die einen aktiven Eingriff in das Fahrwerk des Motorrades offenbaren.

Die Eingriffe erfolgen dabei entweder einzeln oder in Kombination in die Feder-Dämpfercharakteristik, in die Lenkung oder allgemein in die Vorder- oder Hinterradaufhängung.

Im Aspekt der Fahrsicherheit von Motorrädern ist dabei zu hoffen, dass deren Umsetzung in die Praxis zügiger vollzogen wird, als dies für das Antiblockiersystem für Motorräder der Fall war beziehungsweise ist.

Literatur

[1] KLAVER, P.: Das Motorrad und seine Technik. Stuttgart: Motorbuch Verlag, 1990. ISBN 3-613-01320-7

[2] STOFFREGEN, J.: Motorradtechnik. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2006. ISBN 3-8348-0104-6

PKW-Chassisrahmen mit stoßabsorbierenden Mitteln

Dipl.-Ing. Matthias Graf, Patentabteilung 1.21

Trotz zunehmender Verkehrsdichte auf unseren Straßen ist die Zahl der bei einem Verkehrsunfall getöteten Personen seit Jahren rückläufig. Dieser positive Trend ist der ständigen Weiterentwicklung der passiven Sicherheit im Automobilbau zu verdanken. Bei allem Fortschritt existiert im Straßenverkehr keine absolute Sicherheit. Die Frontalkollision zählt noch immer zu den häufigsten Unfallarten mit den schwerwiegendsten Folgen. Dieser Artikel wirft deshalb einen Blick auf die Entwicklung stoßabsorbierender Chassisrahmen im Frontbereich von Personenkraftwagen.

1. Einleitung

Heute spielt die Fahrzeugsicherheit, neben Design und Zuverlässigkeit, bei der Vermarktung eines neuen Fahrzeugs ebenso wie bei der Kaufentscheidung für ein solches eine immer bedeutendere Rolle. Nach derzeitiger Betrachtung sind aktive Sicherheit (Vermeidung von Unfällen) und passive Sicherheit (Milderung der Unfallfolgen) gleichwertige Partner. Das war nicht immer eine Selbstverständlichkeit.

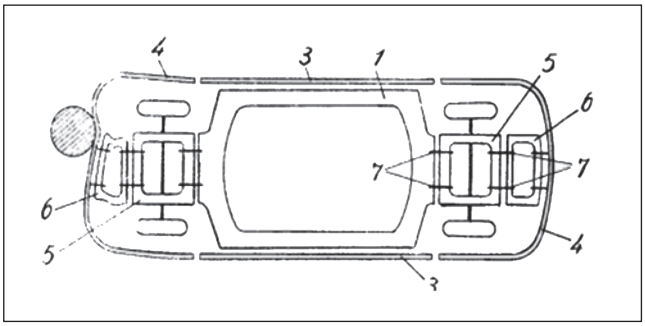
Die Begriffe „aktive und passive Sicherheit" wurden Mitte der 1960er Jahre definiert. Die Entwicklung von Systemen zur Milderung von Unfallfolgen erfolgte unabhängig von jener, die der Vermeidung von Unfällen diente und machte früher Fortschritte. So geht die Knautschzone auf eine Idee von Béla Barényi zurück, die 1952 zum Patent führte. Zum Einsatz kam diese Neuerung erstmals beim Mercedes-Benz W111 („Heckflosse"). Diese und weitere Erfindungen, wie beispielsweise die stabile Fahrgastzelle, hatten das Ziel, bei einer Kollision den Überlebensraum für die Insassen zu schützen und den Aufprall zu dämpfen. Erfolgreiche Tests bewirkten die Abkehr von der bis dahin favorisierten gleichförmigen Bauweise der Karosserie, die, geschwindigkeitsabhängig, bei einer Kollision mit einem Hindernis oder einem anderen Fahrzeug entweder nur geringe Deformationen an Karosserie beziehungsweise Rahmen zuließ oder keinen Überlebensraum für die Insassen sichern konnte. Darüber hinaus wirkten auf die Körper der Unfallbeteiligten hohe Beschleunigungen. Von da an wurden Rahmen und/oder Karosserieteile zunehmend derart ausgelegt, dass sie in der Lage waren, Bewegungsenergie in Verformungsarbeit umzuwandeln. Inzwischen verdanken der Knautschzone tausende Menschen ihr Leben.

Derzeit besteht die Herausforderung darin, einheitliche Kollisions-Voraussetzungen zu schaffen. Demnach soll es künftig keine Fahrzeuge mehr ohne wirkungsvolle Deformationselemente geben. Das idealisierte Ziel ist dabei, eine Kompatibilität zwischen den Kollisionsgegnern auch bei ungleichen Massenverhältnissen zu erreichen. Es wird also für die Insassen ungleicher Unfallgegner eine vergleichbar niedrige Verletzungsrate angestrebt. Ein großes Problem stellt in diesem Zusammenhang der erforderliche Bauraum dar. Knautschzonen sind bei kleineren Fahrzeugen wesentlich kürzer oder gar nicht vorhanden, so dass die zur Energieabsorption notwendige Deformation innerhalb eines kürzeren Weges erfolgen muss oder kaum geleistet werden kann. Dieser Konflikt ist unter anderem dadurch lösbar, dass jenes Fahrzeug, dem der größere Deformationsweg zur Verfügung steht, auch den erheblicheren Teil der Aufprallenergie durch kontrollierte Deformation abbaut. Die bei einer Kollision entstehende Aufprallenergie muss absorbiert und auf definierten Lastpfaden kanalisiert werden. Dabei müssen die spezifischen Eigenschaften der bislang verwendeten Materialien optimal genutzt und neue Verfahren und Materialien zur Verrichtung von Deformationsarbeit (beispielsweise Energie absorbierende Prallelemente aus Kunststoff) entwickelt werden. Gerade Klein- und Kleinstfahrzeuge bedürfen eines ausgefeilten Insassenschutzes. Energie absorbierende Chassisrahmen können diese Aufgabe nur gemeinsam mit modernsten Rückhaltesystemen in der Fahrgastzelle bewältigen. Im Folgenden werden Patentanmeldungen aus der IPC-Klasse B62D 21/15 vorgestellt, die einen Einblick in die fortschreitende Entwicklung Stoß absorbierender Chassisrahmen im Frontbereich von Personenkraftwagen geben.

2. Erste Patente

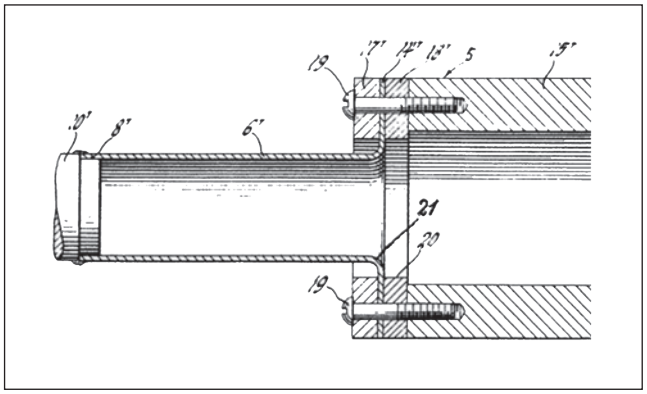
Kraftfahrzeuge, gerade jene zur Beförderung von Personen, wurden in den Nachkriegsjahren noch immer so konstruiert, dass ihre Festigkeit über die ganze Länge des Fahrzeugs, insbesondere im Bereich des Rahmens, annähernd gleich hoch beziehungsweise gering ausfiel. Bei einer Kollision boten diese Kraftfahrzeuge ihren Insassen allenfalls bei geringer Aufprallgeschwindigkeit einen mäßigen Schutz. Mit zunehmender Verkehrsdichte, die der wirtschaftliche Aufschwung mit sich brachte, erhöhte sich zwangsläufig die Zahl der Verkehrsunfälle. Der technische Fortschritt hatte darüber hinaus Einfluss auf die Fahrgeschwindigkeit der Kraftfahrzeuge. Damit rückten Leben und Gesundheit der Fahrzeuginsassen in den Fokus fortschrittlicher Ingenieure.

Bereits die ersten Erfindungen auf dem Gebiet der passiven Sicherheit beschäftigten sich mit der Umwandlung der bei einer Kollision anfallenden Energie. Aus der DE 854 157 B (Figur 1) ist ein Kraftfahrzeug in Zellenbauweise bekannt. Die Variante des dargestellten Fahrzeugs weist einen aus fünf Teilrahmen bestehenden Gesamtrahmen auf. Dabei ist der Rahmen (1) der Mittelzelle (Fahrgastzelle) derart konstruiert, dass er eine möglichst hohe Festigkeit aufweist, um den Überlebensraum für die Fahrzeuginsassen bei einer Kollision zu sichern. Die anderen vier Rahmen (5, 5 und 6, 6) dienen der Energieabsorption. Die direkt an den Rahmen (1) der Mittelzelle anschließenden Teilrahmen (5, 5) weisen eine höhere Festigkeit auf als die außen liegenden Teilrahmen (6, 6). Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die bei einer Kollision auftretenden Kräfte erst von dem Teilrahmen (6) aufgenommen werden. Ist dessen Aufnahmevermögen erschöpft, übernimmt der Teilrahmen (5) den weiteren Energieabbau. Die Zerstörung des Teilrahmens (6) unter eventueller Zuschaltung des Teilrahmens (5) garantiert demnach den unbeschädigten Erhalt der Fahrgastzelle.



Figur 1: PKW-Rahmen in Zellenbauweise (aus DE 854 157 B).

Aus der DE 1 172 558 B (Figur 2) ist der in den 1960er Jahren erfundene Stülpmechanismus bekannt. Dabei handelt es sich um eine Stoßdämpfvorrichtung zur Dämpfung eines einmaligen Stoßes. Die Vorrichtung besteht aus einer Hülse aus verformbarem Metall (6'), die zwischen zwei zylinderförmige Bauteile (Druckstange 10' und Rohr 15') unterschiedlichen Durchmessers gespannt ist. Kommt es zur Kollision, beginnt das Umstülpen der Hülse (6') an dem neben dem Flansch (14') liegenden Ende (21) durch Umbiegen um die Innenwand (20). Die weitere Bewegung der Druckstange bis zur Endlage bewirkt das fortschreitende Umbiegen der Hülsenwandung radial nach außen. Durch das Ausdehnen des Materials vergrößert sich der Durchmesser der Hülse (6'). Ist die Endlage erreicht, befindet sich die Hülse (6') im Rohr (15') und ummantelt dabei die Druckstange (10').



Figur 2: Stülprohr (aus DE 1 172 558 B).

3. Aktuelle Entwicklung

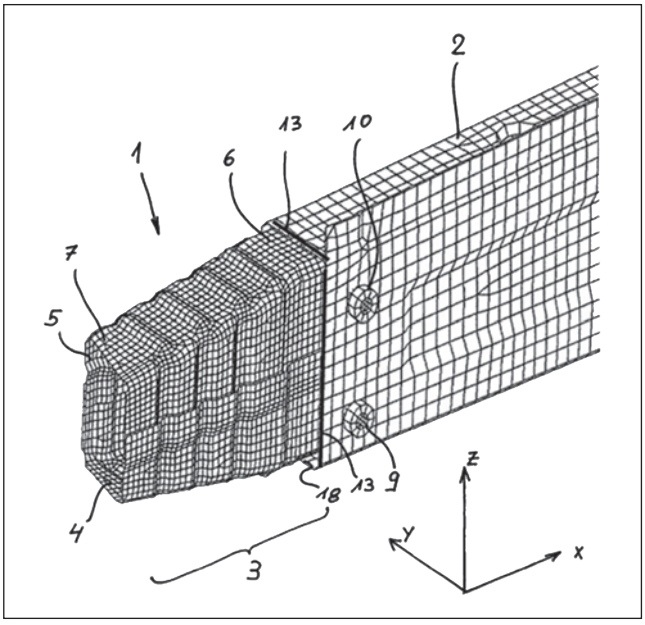
Der Ideenreichtum auf dem Gebiet der Stoß absorbierenden Chassisrahmen im Frontbereich von Personenkraftwagen führte im Laufe der Zeit zu einer Vielzahl von Patenten. Dabei verfolgten die Erfinder unterschiedlichste Wege. Die stirnseitige form- und/oder kraftschlüssige Verbindung zwischen Längsträger oder Rahmen und Crashelementen findet häufig Anwendung. Steht genug Bauraum zur Verfügung, können auch mehrere Crashboxen in Reihe hintereinander angeordnet werden.

Gegenstand der DE 42 39 460 C2 ist eine zwischen Längsträger und Stoßfänger angeordnete Stoßverzehrvorrichtung zum Aufnehmen von Stoßenergie. Die Vorrichtung besteht aus zwei hintereinander angeordneten Crashboxen, wobei jede aus zwei schalenförmigen Bauteilen besteht. Nach einem ersten Deformationsweg wird ein Verstärkungsteil zugeschaltet, das den Verformungswiderstand erhöht.

Die DE 10 2004 039 592 A1 (Figur 3) offenbart eine Crashbox (1) zur Eingliederung zwischen einem Längsträger (2) und einem Stoßfängerquerträger. Der Deformationsabschnitt (3) weist eine Reihe von Vorverformungen auf und ist der Stirnseite des Längsträgers (2) vorgelagert. Der Befestigungsabschnitt greift in den Längsträger (2) ein. Die Befestigung erfolgt über eine Schraubverbindung. Das Energieaufnahmevermögen ist durch die maximale Stauchung des Deformationsabschnitts (3) bestimmt. Ein vergleichbarer Gegenstand ist neben dem Verfahren zu seiner Herstellung in der EP 1 241 078 B1 offenbart. Die mit Ausnehmungen versehene, kastenförmige Crashbox wird teleskopartig in das vordere Ende des entsprechenden Längsträgers eingeschoben und anschließend mittels Schweißung fixiert.

Neben Crashboxen können auch Längsträger mit Hilfe von gezielt eingebrachten geometrischen Imperfektionen (Vorverformungen) derart ausgelegt werden, dass sie bei einer Kollision ein definiertes Faltbeulverhalten zeigen (siehe zum Beispiel DE 1 801 960 B).

Ziel der Vorverformungen ist es, den Träger beziehungsweise die Crashbox unter Bildung von möglichst vielen Falten kontrolliert nachgeben zu lassen. Bei diesen und vergleichbaren Systemen soll ein Biegekollaps (einmaliges plastisches Beulen beziehungsweise Ausknicken eines instabilen Kastenträgers) vermieden werden. Denn der Biegekollaps zeichnet sich zu Beginn der Verformung durch eine ausgeprägte Kraftspitze (Peaküberhöhung) und im weiteren Verlauf durch ein sehr geringes Kraftniveau aus. Die Tragfähigkeit des Bauteils nimmt plötzlich ab. Das Energieaufnahmevermögen ist gering.

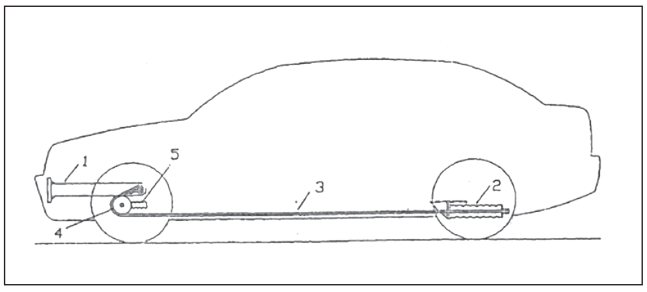


Figur 3: Crashbox (aus DE 10 2004 039 592 A1)

Das Problem bei Stoß absorbierenden Vorrichtungen, wie sie bspw. aus DE 42 39 460 C2 und DE 10 2004 039 592 A1 bekannt sind, besteht darin, dass die optimale Wirkung nur bei einem Stoß in Längsrichtung erzielt wird. Sobald die jeweilige Vorrichtung in einem bestimmten Winkel auf das Hindernis trifft, erfolgt ein Ausknicken des Systems. Dagegen ist aus der DE 10 2005 026 284 B3 ein Längsträger bekannt, der aus einem ersten und einem zweiten Rohr besteht. Das erste (innere) Rohr ist zweigeteilt, wobei die Durchmesser der Teilrohre derart variieren, dass sie ineinander verschiebbar sind. Diese beiden Teilrohre werden in der Mitte überlappend miteinander verschweißt (Sollbruchstelle). Bei Sollbruchbelastung (Kollision) erfolgt eine Relativbewegung der beiden Teilrohre ineinander und erzwingt einen geführten Faltbeulvorgang für das äußere Rohr.

Zweckmäßig kann es gerade bei Zusammenstößen zweier Fahrzeuge mit höherer Geschwindigkeit sein, zusätzliche Deformationselemente im beim Frontalaufprall unbeteiligten hinteren Fahrzeugbereich vorzusehen. Die EP 1 201 530 B1 (Figur 4) stellt einen derartigen Gegenstand vor. Bei einer Kollision erfolgt die Krafteinleitung über Längsträgerelemente (1). Mittels Seil (3) wird die eingeleitete Kraft über eine Umlenkrolle (4) auf einen im Bereich der hinteren Fahrzeugachse angeordneten Deformationskörper (2) übertragen. Die Halterung (5) ist ebenfalls definiert deformierbar ausgelegt.

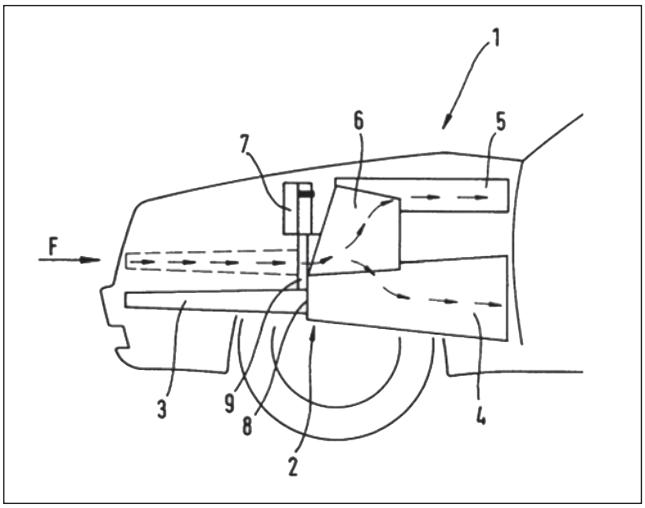
Aus der DE 102 59 428 A1 ist eine Deformationsvorrichtung bekannt, die mittels Precrash-Sensorik in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit oder dem Kollisionsgegner die Deformationselemente zwischen einer Einfahr- und Ausfahrposition bewegen kann. Somit ist bei einem Aufprall eines Fußgängers auf den Frontbereich des Fahrzeugs, insbesondere auf den Stoßfänger, durch die in der Einfahr-Position befindlichen Deformationselemente ein für den Fußgänger weicherer Aufprall mit reduziertem Verletzungsrisiko möglich.



Figur 4: Verteilung der eingeleiteten Aufprallenergie (aus EP 1 2 01 530 B1).

Der Anmelder der US 5 460 421 A stellt eine Anordnung zur Anbindung eines Stoßfängers vor, welche in einem ersten Betriebszustand zwei zueinander teleskopierbare Zylinder umfasst, um Stöße mit geringer Energie durch Kompression eines Dämpfungsmittels reversibel aufzufangen. Wird anhand der Fahrzeuggeschwindigkeit eine größere auftretende Stoßenergie erwartet, werden die beiden Zylinder durch eine Kolbenanordnung relativ zueinander arretiert, so dass ein Stoß durch Faltung der Zylinderwände aufgefangen wird.

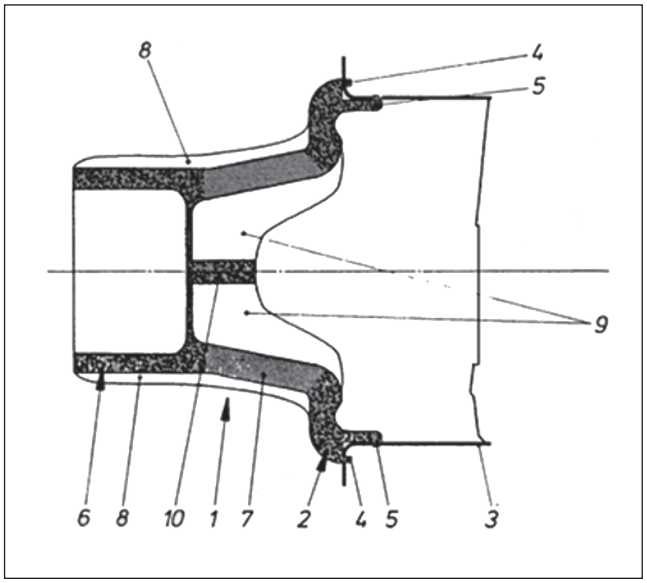
Eine Sicherheitseinrichtung mit einer abhängig von den geometrischen Abmessungen des Unfallpartners verfahrbaren Deformationseinrichtung ist in DE 102 00 737 C1 (Figur 5) offenbart. Auch hier erfolgt die Erfassung der notwendigen Daten über eine entsprechende Sensorik. Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, dass ein Querträger und mindestens ein Längsträger von einer Ausgangsposition in eine Aufprallposition verlagert werden, um so die Crashstrukturen beider Unfallpartner optimal aufeinander abzustimmen.



Figur 5: Verfahrbare Deformationseinrichtung (aus DE 102 00 737 C1).

Die Bandbreite der verwendeten Materialien ist groß. Während man sich anfänglich häufig auf Stahl beschränkte, wurden später auch Leichtmetalllegierungen eingesetzt. Inzwischen kommen sogar kombinierte Träger zum Einsatz. In der DE 10 2006 012 528 A1 wird eine Trägeranordnung vorgestellt, die aus einem äußeren Blechpressteil und einem inneren Strangpressteil besteht. Selbst Fluide (beispielsweise DE 44 27 009 C2 oder DE 102 59 983 A1) und Gase (DE 102 59 983 A1) übernehmen Absorptionsarbeit.

Eine Reihe von Entwicklungen befasst sich mit der Umwandlung von Crashenergie durch Kunststoffe. Die DE 102 42 282 C1 offenbart eine Vorderwagen-Tragstruktur für ein Kraftfahrzeug mit einem an den Längsträgerenden befestigten, sich in Fahrzeugquerrichtung erstreckenden Faserband. Dieses ist vor dem Eindringraum angeordnet und optimiert – da flexibel, aber undurchdringlich – die Absorption der Aufprallenergie. Diese Stoß absorbierende Vorrichtung entfaltet ihre besondere Schutzwirkung beispielsweise bei einem Fahrzeugaufprall auf einen Pfahl.



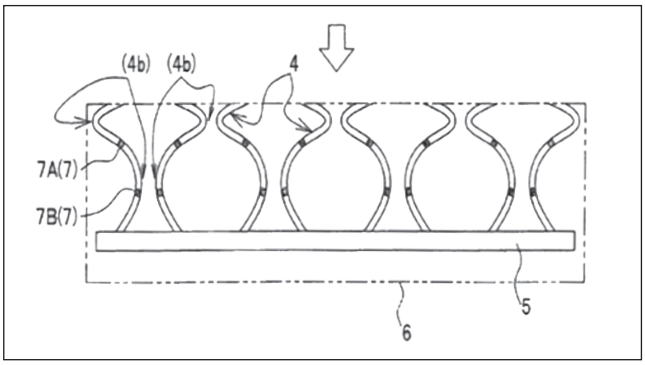
Figur 6: Stülprohr aus Kunststoff (aus DE 42 41 108 A1).

Der in den 1960er Jahren entwickelte Stülpmechanismus erlebt durch die Verwendung von Kunststoff eine Renaissance. Das aus der DE 42 41 108 A1 (Figur 6) bekannte, zwischen Stoßfänger und Längsträger angeordnete Deformationselement wirkt grundsätzlich wie sein Vorgänger (DE 1 172 558 A (Figur 2)). Im Unterschied zu jenem besteht das Deformationselement (1) der DE 42 41 108 A1 im Bereich seines Flansches (2) und im Stirnbereich (6) aus faserverstärktem Kunststoff. Der Deformationsbereich (7) besteht dagegen aus thermoplastischem Kunststoff. Radial angeordnete Versteifungsrippen (8) und querwandartige, beim Stülpvorgang auf Zug beanspruchte Rippen (9) versteifen das Bauteil und beeinflussen damit die Energieumsetzung.

Um das Energieaufnahmevermögen der Crashelemente auf kurzen Verformungswegen zu optimieren, werden verschiedene Füllstoffe oder -strukturen verwendet, beispielsweise Metallschäume (siehe z. B. DE 195 46 352 C2 oder DE 42 39 460 C2), Wabenstrukturen (DE 100 05 665 A1 oder DE 41 28 113 C2), Verstrebungen (DE 40 30 921 A1) oder in Träger integrierte Hohlkörper (wie z. B. aus DE 42 39 460 C2 bekannt).

Darüber hinaus können Bauteile im Motorraum eine Doppelfunktion besitzen. Aus DE 41 28 113 C2 ist beispielsweise ein Motorkühler bekannt, der Verformungssicken aufweist. Der Lüfter ist darüber hinaus mit einer Lüfterabdeckung versehen, welche eine wabenförmige Struktur aufweist. Auf diese Weise ist bei einer Kollision mit einer erhöhten Umwandlung

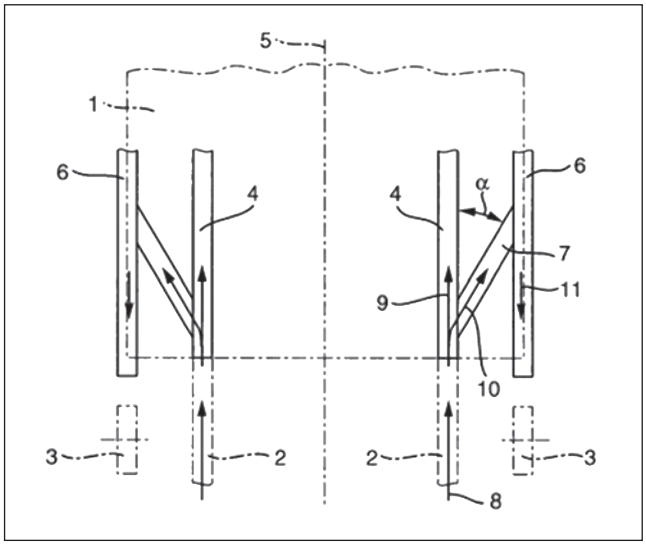
auftretender Verformungsenergie zu rechnen. Mit der DE 43 13 785 C2 versucht der Erfinder das Problem des versetzten Frontalaufpralls zu lösen. Die Längsträger und das zwischen ihnen angeordnete Antriebsaggregat sind mit kraftübertragend formschlüssig ineinandergreifenden steifen Aufprallelementen versehen, von denen wenigstens eines dem Antriebsaggregat und wenigstens ein korrespondierendes der Tragstruktur zugeordnet ist. Die Verformungsenergie wird so bei einem versetzten Frontalaufprall von einem Längsträger über die Aufprallelemente auf das Antriebsaggregat übertragen und somit die Verformungslänge vergrößert. Das steife Antriebsaggregat überträgt einen Teil der Aufprallenergie auf die verformbare Struktur des anderen Längsträgers.



Figur 7: Vorrichtung zum Steuern der Steifigkeit der Fahrzeugkarosserie (aus DE 10 2004 051 570 B4).

Aus der DE 10 2004 051 570 B4 (Figur 7) ist eine Vorrichtung zum Steuern der Steifigkeit der Fahrzeugkarosserie in Abhängigkeit vom Kollisionspartner bekannt. Die Vorrichtung umfasst, neben der notwendigen Sensorik, ein Basiselement (5) zum Halten der aus einer Formgedächtnislegierung gefertigten Wände (4) sowie ein Schieberelement (6). Die Wände (4) sind parallel zur Fahrzeuglängsrichtung angeordnet. Pro Wand (4) sind jeweils zwei vordere und zwei hintere Aktuatoren (7) vorgesehen. Erfassen die Sensoren einen möglichen Kollisionspartner, entscheidet eine Steuereinheit über die Anzahl der zu schaltenden Aktuatoren. Je mehr Aktuatoren geschaltet werden, desto stärker wird jede Wand (4) vorverformt. Es können demnach unterschiedliche Deformationsmodi gewählt werden. In Figur 7 ist die Vorverformung der Wände (4) nach Zuschaltung der beiden vorderen Aktuatoren zu sehen.

Jedes noch so effizient wirkende Crashelement kann seiner Aufgabe nur dann nachkommen, wenn die folgenden Baugruppen, wie Längsträger, Schweller, Bodenblech und so weiter, einen Zusammenhalt garantieren. Deshalb ist die Auslegung von Crashboxen kein isoliertes Betätigungsfeld, sondern sollte stets im Verbund mit der Optimierung der Lastpfade gesehen werden. Die DE 10 2005 025 200 A1 (Figur 8) zeigt einen Weg, die Gefahr eines unfallbedingten Auflösens des kraftschlüssigen Verbundes zwischen Längsträgern, Schwellern und Bodenblech zu beseitigen beziehungsweise zu verringern. Die Tragstruktur schließt sich im Bodenbereich der Fahrgastzelle (1) an den durch eine Trennwand vorgelagerten Fahrzeugvorbau an und umfasst jeweils einen zu jeder Seite der Fahrzeuglängsmittelachse (5) beabstandeten, hinteren Längsträger (4) und Schweller (6); außerdem ein mit beiden hinteren Längsträgern (4) und den Schwellern (6) verschweißtes Bodenblech. Die Schweller (6) sind an der Fahrzeugaußenseite und die hinteren Längsträger (4) gegenüber diesen zur Fahrzeuglängsmittelachse (5) beabstandet angeordnet. Die hinteren Längsträger (4) bilden mit den vorderen Längsträgern (2) einen gemeinsamen Kraftpfad. Jeder der beiden hinteren Längsträger (4) ist mit dem jeweils benachbarten Schweller (6) durch mindestens eine, gegenüber der Fahrzeuglängsmittelachse (5) geneigte Strebe (7) verbunden. Folglich teilt sich der in den hinteren Längsträgern (4) zum Fahrzeugheck gerichtete Lastpfad bei einem Fahrzeugcrash jeweils gabelförmig in einen ersten längsträger- und in einen zweiten strebenseitigen Teillastpfad (9, 10) auf.



Figur 8: Optimierung der Lastpfade (aus DE 10 2005 025 200 A1)

Einer anderen Anmeldung (DE 10 2005 031 728 A1) liegt die Idee zugrunde, die Tragstruktur aus einem Grundprofilteil herzustellen. Der Grundprofilbereich umfasst dabei mindes-

tens zwei Endprofile und mindestens ein Verbindungsprofil. Es werden jeweils mindestens zwei Endprofile über mindestens ein Verbindungsprofil miteinander verbunden. Die gesamte Tragstruktur besteht somit aus einem einteiligen Profil mit mehreren verzweigten Armen ohne Verbindungsstellen, so dass optimale Lastpfade, eine erhöhte Steifigkeit sowie eine verbesserte Aufnahme von Aufprallenergie gewährleisten. Vergleichbare Gegenstände für eine Optimierung der Lastpfade finden sich u. a. in den Druckschriften DE 42 04 826 A1, EP 1 125 829 A2, EP 1 464 565 B1 und US 5 772 267 A.

4. Ausblick

Die Erfindungen eines halben Jahrhunderts haben die Sicherheit im Straßenverkehr sukzessive erhöht. Diese Tendenz wird sich fortsetzen. In naher Zukunft werden Precrash-Sensoren mit höherer Dynamik und größerem Naherfassungsbereich die zu erwartende Unfallschwere sowie die geschätzte Aufprallrichtung mit guter Genauigkeit ermitteln können. Der Einsatz von Bild verarbeitenden Kamerasystemen erlaubt darüber hinaus sowohl die Detektion eines möglichen Kollisionsgegners als auch dessen Klassifizierung. Das wird Einfluss auf die Entwicklung der dann zum Einsatz kommenden Deformationselemente haben, da diese rechtzeitig vor dem Aufprall gezielt ausgerichtet und auf den Unfallgegner eingestellt werden können.

In visionärer Fernsicht wird die Bedeutung der passiven Sicherheit abnehmen. Die Schlüsselrolle wird dann, in Form einer „elektronischen Knautschzone", der aktiven Sicherheit zukommen. Denn das „sehende" Fahrzeug von morgen wird durch intelligente Systeme und den Datenaustausch mit anderen Verkehrsteilnehmern eine Vielzahl der Unfälle ganz vermeiden können.

Reifenluftdruckregelung während der Fahrt

Dr. Rainer Graf, Patentabteilung 1.32

Zu jeder Zeit mit dem der jeweiligen Fahrsituation angepassten Reifenluftdruck unterwegs sein zu können, hat viele Vorteile. Aus diesem Grund werden nicht nur für den Nutzfahrzeug-Bereich sondern auch zunehmend für den Pkw-Bereich Regelungssysteme für den Reifenluftdruck unterschiedlichsten Typs entwickelt.

1. Einleitung

Ein an die jeweilige Fahrsituation angepasster Reifenluftdruck bedeutet, dass der Reifenluftdruck jederzeit erhöht beziehungsweise abgesenkt werden können muss. Der Fahrzeugreifen überträgt die auftretenden Kräfte durch den Reibungskraftschluss, der durch den Reibungsbeiwert beschrieben wird, auf die Fahrbahn [1]. Der Reibungsbeiwert ist neben der Reifentemperatur, der Oberflächenbeschaffenheit des Reifens (Profil und Gummimischung), und der Oberflächenbeschaffenheit der Fahrbahn von der Flächenpressung der Reifenaufstandsfläche (Lauffläche) auf die Fahrbahn abhängig. Die Flächenpressung zwischen Reifenaufstandsfläche und Fahrbahnoberfläche hängt in erster Näherung vom Reifenluftdruck ab. Der Reibungsbeiwert ist umso größer, je größer die Reifenaufstandsfläche und je geringer die Flächenpressung, das heißt je geringer der Reifenluftdruck, ist. Die Reifenaufstandsfläche vergrößert sich allerdings auch mit steigender Radlast. Die oben angenommene Näherung gilt aus diesem Grund nicht mehr, wenn aufgrund von zu niedrigem Reifenluftdruck beziehungsweise zu hoher Radlast der Reifen stark verformt wird, so dass der Reifen im Bereich der Reifenaufstandsfläche nicht mehr vollständig flächig mit der Fahrbahnoberfläche verbunden ist. Um eine maximale Kraftübertragung zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn, das heißt eine maximale Reifenaufstandsfläche, zu erzielen, ist es also notwendig, den Reifenluftdruck so niedrig wie aufgrund der Radlast möglich einzustellen. Typische Fahrsituationen für Fahrten mit möglichst niedrigem Reifenluftdruck sind beispielsweise Fahrten auf unbefestigten Fahrbahnoberflächen, Kurvenfahrten mit hoher Geschwindigkeit oder starke Bremsvorgänge auf befestigten Fahrbahnoberflächen.

Im normalen Fahrbetrieb führt ein möglichst niedriger Reifenluftdruck zu erhöhtem Reifenverschleiß aufgrund der ständig auftretenden stärkeren Verformung des Reifens im Bereich des Reifenlatsches, das heißt im Bereich des Reifens, der gerade die Fahrbahn berührt, und führt aufgrund der höheren Walkarbeit zu einem höheren Kraftstoffverbrauch. Im normalen Fahrbetrieb sollte der aktuelle Reifenluftdruck also immer dem maximal zulässigen Reifenluftdruck entsprechen.

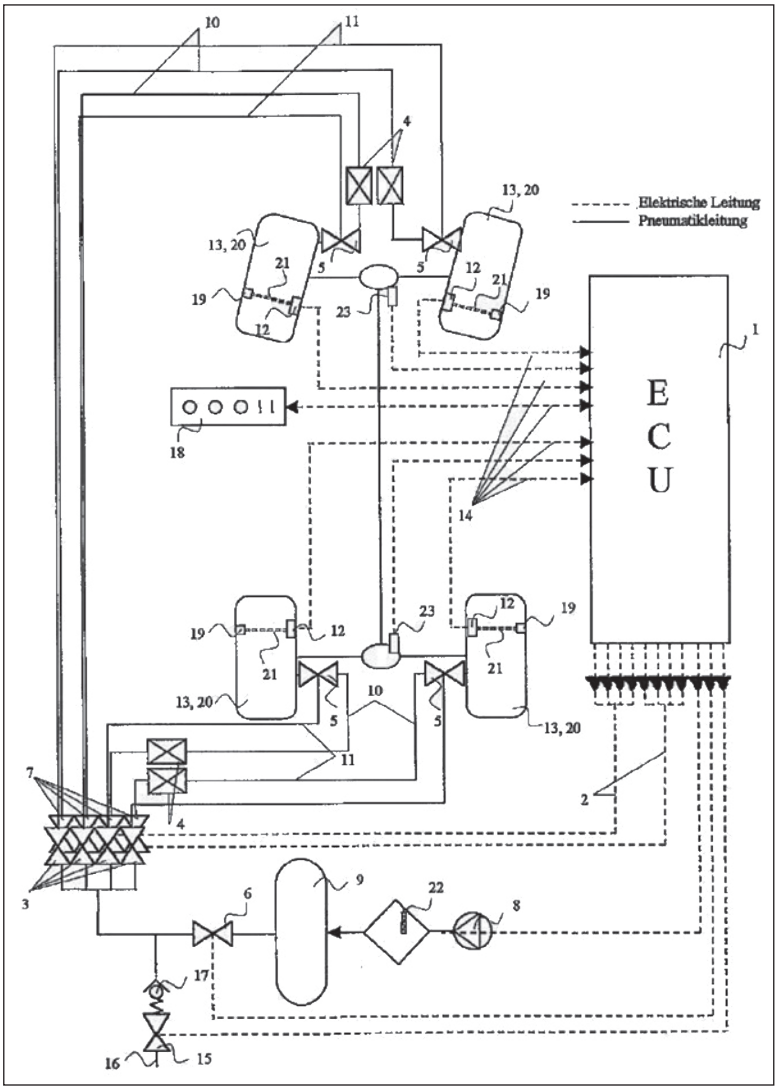
Um den Reifenluftdruck während der Fahrt diesen unterschiedlichen Fahrsituationen anpassen zu können, gibt es im Wesentlichen zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Regelungssystemen für den Reifenluftdruck. Vor allem im Nutzfahrzeugbereich aber auch zunehmend für geländegängige Personenkraftfahrzeuge werden Regelungssysteme für den Reifenluftdruck mit einer zentralen Druckluftversorgungsanlage eingesetzt. Diese haben den Nachteil, dass die Anlagenkomponenten Platz beanspruchen, das Fahrzeuggewicht deutlich erhöhen und im Allgemeinen nicht nachträglich eingebaut werden können. Aus diesen Gründen werden Regelungssysteme für den Reifenluftdruck entwickelt, die keine zentrale Druckluftversorgungs- und Druckluftverteilungsanlage aufweisen. Alle zur Veränderung des Reifenluftdruckes benötigten Komponenten befinden sich direkt am Rad.

2. Regelungssysteme für den Reifenluftdruck mit zentraler Druckluftversorgung

Diese Regelungssysteme für den Reifenluftdruck werden besonders häufig im Nutzfahrzeugbereich, in Landbearbeitungsmaschinen oder in geländegängige Personenkraftfahrzeuge eingebaut. Die Druckluftquelle ist zentral im Fahrzeug angeordnet. Die Druckluft wird über ein Verteilungssystem aus Druckleitungen, steuerbaren Ventilen und Druckluftdrehdurchführungen zu den einzelnen Reifen geleitet. Die Druckluftleitungen von den Drehdurchführungen bis zum Reifen sind entlang der Felge verlegt oder sind in die Felge integriert. Der Reifenluftdruck kann entweder durch einen zentral im Verteilungssystem angebrachten Drucksensor oder mit in jedem einzelnen Reifen montierten Drucksensoren, die Bestandteil einer mit der notwendigen Sensorik sowie Signalverarbeitungs- und Signalübertragungstechnik ausgestatten Radelektronikeinheit eines Überwachungssystems für den Reifenluftdruck sind, kontrolliert werden.

2.1 Anlagenaufbau

Die Figur 1 zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Regelungssystems für den Reifenluftdruck mit zentraler Druckluftversorgung.



Figur 1: Komponenten eines Regelungssystems mit zentraler Druckluftversorgung bestehend aus Kompressor 8, Druckluftspeicher 9, steuerbaren Ventilen 3, 5, 6, 7, Reifenelektronikmodulen mit Drucksensoren 12 und Steuereinheit 1 (aus WO 2003 / 016 078 A1).

Der Kompressor wird üblicherweise von einem Elektromotor beziehungsweise über die Brennkraftmaschine angetrieben und speist auf Vorrat einen Druckluftspeicher, damit immer ausreichend Druckluft zum sofortigen Erhöhen des Reifenluftdruckes vorhanden ist. Alternativ dazu kann auch der Turbolader als Druckluftquelle eingesetzt werden (DE 103 43 621 A1). Mit einem entsprechend dimensionierten Turbolader mit variabler, das heißt verstellbarer, Geometrie kann die benötigte Druckluft immer sofort bereitgestellt werden, so dass auf den Druckluftspeicher verzichtet werden kann. Aufgrund des hohen apparativen Aufwandes für die Erzeugung und Bereitstellung der Druckluft ist es besonders im Nutzfahrzeugbereich üblich, dass von so einer zentralen Versorgungsanlage nicht nur das Regelungssystem für den Reifenluftdruck, sondern auch noch Systeme wie die pneumatische Bremsanlage (DE 103 57 255 A1) oder aktive, luftgefederte Fahrwerke mit Niveauregelung (DE 102 23 257 A1) mit Druckluft versorgt werden. Um den apparativen Aufwand weiter zu minimieren, kann das Reserverad als Druckluftspeicher genutzt werden (DE 102 23 257 A1).

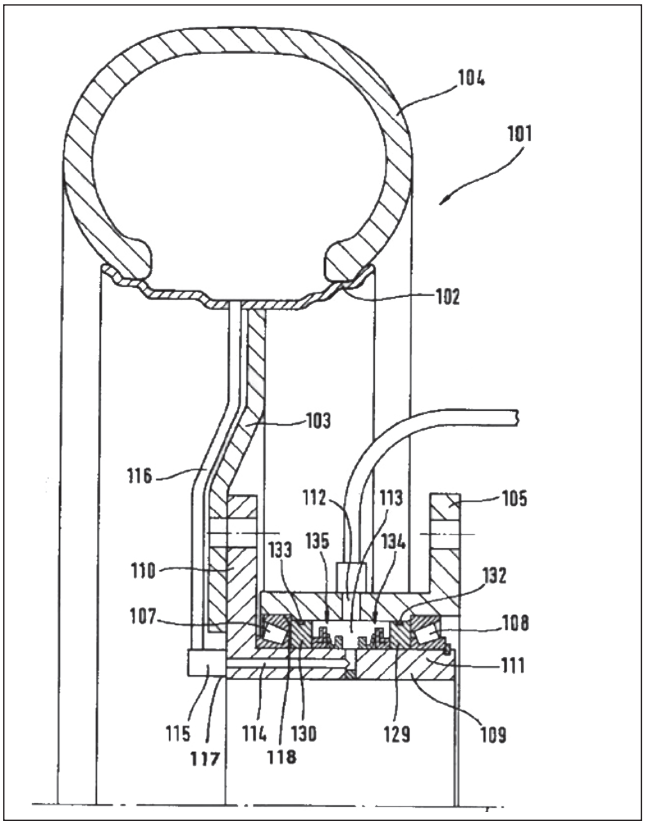
2.2 Druckluftdrehdurchführungen

Die Druckluftdrehdurchführungen stellen die Verbindung zwischen dem feststehenden Drucklufterzeugungssystem und dem rotierenden Rad her. Sie spielen eine zentrale Rolle für die verlustfreie Druckluftzufuhr zu den einzelnen Reifen.

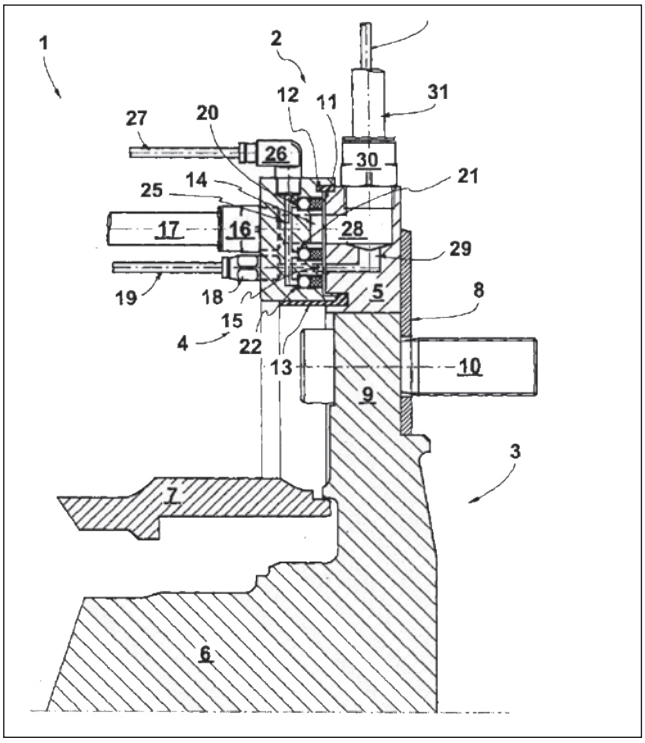
Im Wesentlichen gibt es drei verschiedene konstruktive Lösungsmöglichkeiten für die Ausgestaltung der Druckluftdrehdurchführungen. Die Drehdurchführung kann dabei zwischen den Wälzkörpern des Radlagers, siehe Figur 2, (DE 10 2004 021 161 A1, DE 103 24 410 A1, DE 103 02 444 B4, DE 37 38 529 A1, DE 694 07 724 T2), als konzentrisch zur Radachse am Radflansch angeordneter Ringköper, siehe Figur 3, (DE 10 2005 018 584 A1, DE 199 50 191 C1) oder axial in der Achse im Bereich der Radnabe, siehe Figur 4, (DE 601 09 131 T2, DE 697 18 015 T2, WO 2004 / 080 729 A2) angeordnet sein.

Die Anordnung zwischen den Wälzkörpern eines Radlagers ist besonders für den Einsatz im Personenkraftwagenbereich geeignet, während die beiden anderen Anordnungen im Nutzkraftwagenbereich eingesetzt werden.

Bei der Anordnung der Drehdurchführung zwischen den Wälzkörpern eines Radlagers muss auf jeden Fall vermieden werden, dass die Druckluft aus dem Druckluftkanal in die Lagerschalen der Wälzkörper eindringen kann und aufgrund dessen dort der Schmierstoff ausgeblasen wird (DE 694 07 724 T2, DE 103 24 401 A1, DE 37 38 529 A1). Bei den Drehdurchführungsanordnungen nach Figur 2 und 3 ist das wesentliche konstruktive Problem die Druckluftkammer oder

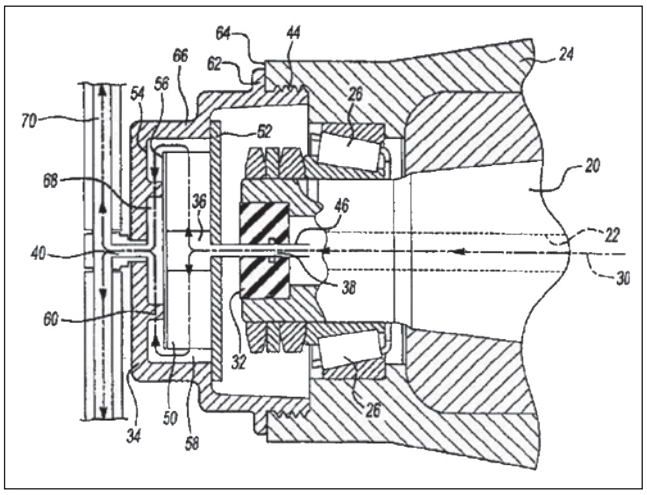


Figur 2: Drehdurchführung zwischen den Wälzkörpern 107, 108 des Radlagers (aus DE 103 02 444 B4).



Figur 3: Drehdurchführung als konzentrischer Ringkörper 4, 5 am Radflansch 9 (aus DE 199 50 191 C1).

der Druckluftkanal zwischen drehendem und feststehendem Teil absolut druckdicht auszubilden. Die aus diesen Gründen eingesetzten Dichtungselemente müssen so ausgestaltet sein, dass deren feststehender Teil nicht durch ständige Reibung am gegenüberliegenden rotierenden Teil abgenutzt wird. Die Lösung besteht darin, die Dichtungselemente an der Reibfläche mit einer Beschichtung mit geringem Reibwert und hoher Widerstandfähigkeit gegen Abrieb (DE 694 07 724 T2) auszustatten oder besonders verschleißarme Dichtungselementtypen, wie zum Beispiel Bürstendichtungen (DE 10 2005 018 548 A1) einzusetzen. Weiter werden aus diesem Grund sogenannte schaltbare (DE 10 2004 021 161 A1, DE 199 50 191 C1) beziehungsweise verschiebbare (DE 103 02 444 B4) Dichtungselemente eingesetzt, die erst bei Druckbeaufschlagung der Druckluftkammer beziehungsweise des Druckluftkanals mit dem drehenden Teil in Berührung gebracht werden.



Figur 4: Drehdurchführung axial in der Achse 20 im Bereich der Radnabe 24 (aus DE 601 09 131 T2).

Die Druckluftleitungen zu den Reifen sind mit steuerbaren Ventilen versehen, damit die Drehdurchführungen im Normalbetrieb, das heißt wenn der Reifenluftdruck nicht verändert wird, druckfrei gehalten werden können.

2.3 Steuerungs- und Regelungsverfahren

Bei weniger aufwändig aufgebauten Steuerungssystemen für den Reifenluftdruck wählt der Fahrer des Fahrzeuges anhand eines ihm vorgegebenen Menüs den Reifenluftdruck je nach Einsatzwunsch beziehungsweise Fahrsituation aus. Jeder einzelne Menüpunkt in der Auswahlliste entspricht dem optimalen Reifenluftdruck, der für eine bestimmte Fahrsituation eingestellt oder aufrechterhalten wird. Die in der Auswahlliste

als Menüpunkte vorgegebenen Fahrsituationen sind entweder abhängig von der Fahrbahnbeschaffenheit und der somit maximal möglichen Fahrzeuggeschwindigkeit, wie zum Beispiel bei einer Autobahnfahrt beziehungsweise bei einer Fahrt auf unbefestigter Fahrbahn (Kiesweg, Sand) oder aber abhängig vom Zustand der Fahrzeugreifen, wie zum Beispiel bei einem kontinuierlich auftretenden schleichenden beziehungsweise starken Druckverlust (GB 2 262 921 A, EP 0 605 198 A1). Im Falle eines detektierten kontinuierlichen Druckverlustes, kann in den betreffenden Reifen zusammen mit der Druckluft noch ein Reifendichtmittel eingebracht werden (US 2005 / 0 045 259 A1).

Im Gegensatz dazu kommen immer häufiger vollautomatisch arbeitende Regelungssysteme zum Einsatz, die den Reifenluftdruck ständig individuell für den montierten Reifentyp entsprechend den jeweiligen aktuellen Fahrzeug- und Umgebungsparametern anpassen. Bei landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen werden vollautomatische Regelungssysteme eingesetzt, die den Reifenluftdruck kontinuierlich auf den von der Fahrbahnbeschaffenheit (Straße oder Gelände), der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Fahrzeugbelastung (Anhängerlast und Achslast) abhängigen optimalen Reifensolldruck nachführen. Dafür sind diese Fahrzeuge mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet, welche die Achslast messen (DE 198 04 249 A1), die an die Zugmaschine angehängte Last messen (WO 00 / 34 060 A1) oder die Maschinenmasse indirekt über einen Füllstandssensor im Erntegutbehälter ermitteln (DE 103 29 937 A1). Im Programmspeicher der Steuereinheit des Regelungssystems sind für verschiedene für dieses Fahrzeug zugelassene Reifentypen fahrgeschwindigkeits- und achslastabhängige Drucksollwertkurven hinterlegt. Der aktuell verwendete Reifentyp muss entweder manuell durch das Bedien- oder Wartungspersonal eingegeben werden oder kann automatisch durch die Steuereinheit mittels eines funkbasierten Abfragesystems von in den Reifen eingebetteten Transpondern abgefragt werden (DE 198 04 249 A1). Bei Fahrten im Gelände kann dadurch immer der minimal zulässige Reifenluftdruck eingestellt werden, um die Belastung durch das Fahrzeug auf den Erdboden, das heißt den Bodendruck, so gering wie möglich zu halten. Stehen Daten über die Raddrehgeschwindigkeit und die exakte Fahrzeuggeschwindigkeit über Grund zur Verfügung, dann kann der Reifenluftdruck für die angetriebenen Räder so eingestellt werden, dass der Schlupf minimal ist (US 6 212 464 B1). So ist die maximale Kraftübertragung der angetriebenen Räder auf den jeweiligen Untergrund gewährleistet. Weiter ist es möglich, Geländeneigungen, wie zum Beispiel bei Fahrten entlang eines Hangs, durch unterschiedliche Reifenluftdrücke je Fahrzeugseite auszugleichen (DE 103 29 937 A1).

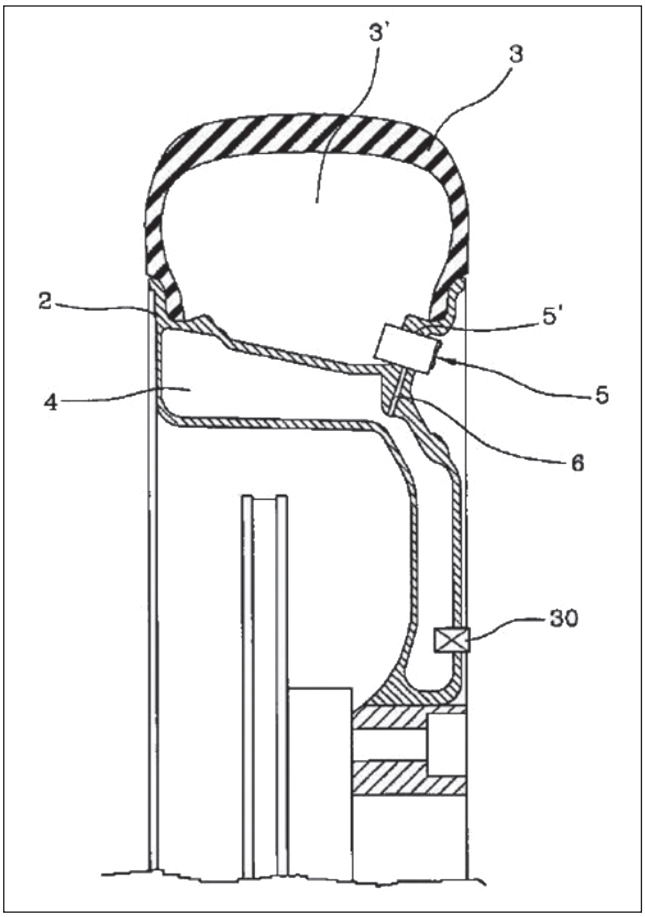
Bei Personenkraftwagen ist es im Normalbetrieb ausreichend, den Reifenluftdruck abhängig von der aktuellen Fahrzeugsgeschwindigkeit und der aktuellen Fahrzeugmasse auf den optimalen Reifensolldruck für den verwendeten Reifentyp einzustellen. Im einfachsten Fall wird der Reifenluftdruck mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit stufenweise erhöht beziehungsweise mit abnehmender Fahrzeuggeschwindigkeit wieder stufenweise abgesenkt (DE 40 14 122 A1). Die Reifenerwärmung während der Fahrt wird dabei durch einen Korrekturfaktor für die verschiedenen Solldrücke jedes Geschwindigkeitsbereichs berücksichtigt. Der Reifenluftdruck kann aber auch an die aktuelle Fahrsituation, wie Beschleunigungs-, Bremsvorgänge oder Kurvenfahrten, differenziert angepasst werden (DE 102 02 993 A1, DE 102 46 180 A1, DE 103 363 30 B3). Von besonderer Bedeutung ist dabei der Notbremsvorgang. Während einer detektierten Notbremssituation wird der Reifenluftdruck reduziert, um die Reibung zwischen den Reifen und der Fahrbahnoberfläche durch eine möglichst große Reifenaufstandfläche zu erhöhen. Dafür kann im Programmspeicher der Steuereinheit des Regelungssystems für den Reifenluftdruck entweder eine Tabelle für verschiedene Reifensolldrücke in Abhängigkeit von Fahrzeuggeschwindigkeit- und Bremskraftbereichen (DE 102 46 180 A1) oder eine Kennlinie für verschiedene Reifensolldrücke abhängig vom Reibungsbeiwert und dem Radschlupf (DE 103 36 330 B3) hinterlegt sein. Der Reifenluftdruck wird dann entsprechend dieser hinterlegten Sollwerttabellen beziehungsweise -kennlinien angepasst. Im Falle der Reifenluftdruckregelung in Abhängigkeit vom Radschlupf, der aus den Signalen der Raddrehzahlsensoren einer Fahrdynamikregelung oder einem Anti-Blockier-System ermittelt wird, kann der Reifenluftdruck während des Bremsvorgangs immer so angepasst werden, dass sich der optimale Reibwert zwischen den Reifen und der Fahrbahnoberfläche einstellt. Damit können beim Bremsvorgang Unterschiede in der Fahrbahnoberflächenbeschaffenheit entlang des Bremsweges ausgeglichen werden. Liegt die kritische Fahrsituation nicht mehr vor, erfolgt die Reifenluftdruckregelung wieder optimiert auf den Fahrkomfort oder den Kraftstoffverbrauch.

Da es mit diesen Regelungssystemen möglich ist, den Reifenluftdruck jederzeit zu beeinflussen, ergeben sich noch ein paar weitere Einsatzmöglichkeiten. Ist ein Kraftfahrzeug zu-

sätzlich mit einer Diebstahlwarnanlage ausgestattet, so kann der Reifenluftdruck im Diebstahlfall soweit abgesenkt werden, dass das Kraftfahrzeug nicht mehr fahrtüchtig ist (DE 40 14 378 A1). Wird bei einem zusätzlich mit einem „Crash"-Erkennungssystem ausgestatten Fahrzeug festgestellt, dass eine frontale Kollision nicht mehr zu vermeiden ist, so kann der Reifenluftdruck der Vorderräder stark erhöht werden, um durch Anheben des Fahrzeugvorderbaus die Fahrzeuginsassen besser zu schützen (DE 103 36 330 B3).

3. Regelungssystem für den Reifenluftdruck mit dezentraler Druckluftversorgung

Eine dezentrale Druckluftversorgung bedeutet, dass die für die Reifenluftdruckerhöhung benötigte Druckluft am Fahrzeugrad bevorratet oder erzeugt wird und somit das apparativ aufwendige Druckluftverteilungssystem samt der Druckluftdrehdurchführungen entfällt. Mit diesen Systemen ist es möglich, jedes Fahrzeug mit einer Reifenluftdruckregelung ohne großen Ein- beziehungsweise Umbauaufwand aus- beziehungsweise nachzurüsten. Es werden zwei grundsätzlich verschiedene Anlagenkonzepte eingesetzt, die sich durch die Art der Druckluftquelle unterscheiden. Als Druckluftquelle dient entweder ein Druckluftbehälter oder ein Kompressor, der Bestandteil des Fahrzeugrades, bestehend aus Felge und Reifen, ist.



Figur 5: Felge 2 mit integriertem Druckluftbehälter 4, druck- gesteuerter Ventilanordnung 5, Einfüllventil 30 und Reifen 3 (aus WO 2005 / 102 743 A1).

3.1 Druckluftbehälter am Fahrzeugrad

Die Druckluftbehälter sind als Hochdruckbehälter ausgebildet. Sie können an der Felge, zum Beispiel außen an der Radschüssel montiert sein (US 2006 / 0 201 598 A1, WO 02 / 062 596 A2) oder in das Felgenbett eingelegt sein (DE 76 18 034 U). Die Druckluftbehälter können aber auch in die Felge (siehe Figur 5), zum Beispiel in die Speichen oder in das Felgenbett, integriert sein (DE 26 49 337 A1, DE 297 18 420 U1, WO 2005 / 102 743 A1). Der Reifeninnenraum ist über steuerbare Ventileinrichtungen mit dem Druckluftbehälter und der Atmosphäre verbunden. Der Druckluftbehälter weist noch ein Einfüllventil auf, über welches der Druckluftbehälter zum Beispiel bei einem Tankstopp wiederbefüllt werden kann. Diese Regelungssysteme sind meist so ausgebildet, dass der Reifenluftdruck auf einen vorgegebenen Sollwert gehalten wird, da die Druckluftmenge im Druckluftbehälter begrenzt ist. Dazu werden temperaturkompensierte, druckgesteuerte Ventilanordnungen eingesetzt (US 2006 / 0 201 598 A1, WO 2005 / 102 743 A1).

Diese Ventilanordnungen bestehen aus einem Ausgleichventil, einem Auslassventil und einem Drucksteuerventil (WO 2005 / 102 743 A1), die durch ihren konstruktiven Aufbau so aufeinander eingestellt sind, dass das Erhöhen bei Unterschreiten eines unteren Druckschwellwertes und das Absenken bei Überschreiten eines oberen Druckschwellwertes des Reifenluftdrucks auf den vorbestimmten Sollwert autonom geschieht. Die Druckeinstellung kann auch über elektromechanisch gesteuerte Ventilanordnungen erfolgen. Diese Ventileinheiten können aufgrund der Daten eines Überwachungssystems für den Reifenluftdruck von außen per Funk oder aber über eine Druckregeleinheit, die in den Reifeninnenraum integriert ist, angesteuert werden. Die Druckregeleinheit, die wie die Ventilanordnung auf dem Felgenbett montiert ist (DE 297 18 420 U1), ermittelt dazu als Regelgröße beispielsweise den Abstand zwischen dem Felgenbett und der Innenseite der Reifenlauffläche. Die elektrische Energieversorgung wird durch einen Akkumulator sichergestellt, der während der Fahrt durch eine induktive Energieübertragungstrecke berührungslos nachgeladen werden kann. Damit kann dieses

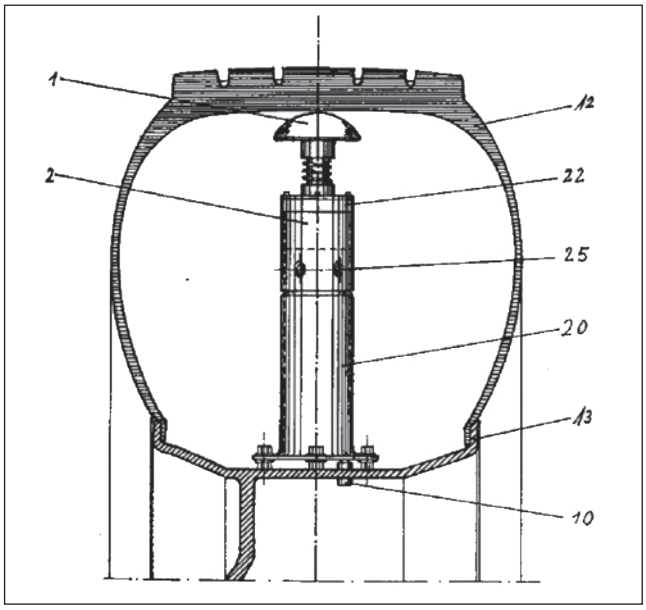
Regelungssystem für den Reifenluftdruck autonom arbeiten. In die Felge ist noch ein zweiter Behälter integriert. Dieser enthält ein Reifendichtmittel. Detektiert die Druckregeleinheit einen kontinuierlich absinkenden Reifenluftdruck, so wird automatisch das Reifendichtmittel in den Reifeninnenraum eingebracht und der Reifen wird über den Druckluftbehälter bis zum Erreichen des Solldruckes befüllt.

3.2 Pumpe am Fahrzeugrad

Mit dem Einbau einer Pumpvorrichtung (Kompressor oder Pumpe) direkt am Fahrzeugrad steht eine Druckluftquelle mit unbegrenztem Druckluftvorrat zu Verfügung. Die Pumpenvorrichtungen können entweder mechanisch durch die Radumdrehung oder elektrisch angetrieben werden. Bei den über die Radumdrehung angetriebenen Pumpenarten kann die Pumpe konzentrisch an der Radschüssel auf Höhe der Achsnabe (DE 103 50 876 A1) oder bei Speichenrädern, wie zum Beispiel einem Rad eines Fahrrads, auf der Achse zwischen den Speichen angebracht sein (DE 42 25 103 A1). Diese über die Drehbewegung angetriebenen Pumpen sind über ein steuerbares Ventil und einen Verbindungsschlauch mit dem Reifenfüllventil verbunden. Eine weitere Möglichkeit ist die Pumpvorrichtung im Reifeninnenraum senkrecht stehend auf dem Felgenbett zu montieren, siehe Figur 6 (DE 42 01 691 A1, DE 39 33 812 A1). Der Pumpenantrieb wird beim Latschdurchlauf, das heißt der Berührung der Reifenlauffläche mit der Fahrbahn, betätigt, wenn der Reifenradius aufgrund eines zu geringen Reifenluftdruckes kleiner als die Pumpenlänge ist. Um den gewünschten Solldruck zu erhalten, wird vorab die entsprechende Pumpenlänge eingestellt und über steuerbare Ein- und Auslassventile wird der Reifenluftdruck auf dem Solldruck gehalten. Als Pumpvorrichtung kann auch ein elastischer Schlauch, der zwischen einer dafür im Felgenhorn vorgesehenen Aussparung und dem Reifenwulst entlang des Radumfangs angeordnet ist, eingesetzt werden (DE 103 35 244 A1). Sobald der Reifenluftdruck unter dem Solldruck liegt, wird der Schlauch aufgrund der dann auftretenden Reifenverformung gequetscht und dadurch die sich im Schlauch befindende Luft in das Reifeninnere gedrückt.

Die Pumpvorrichtung kann auch Bestandteil des Reifens sein, zum Beispiel an der Innenfläche des Reifen angebracht (WO 03 / 049 958 A1) oder in die Profilnoppe integriert (DE 103 38 709 A1). Auf einem Teilbereich der Innenseite der Reifenlauffläche oder der Reifenseitenwand, also in einen Bereich des Reifens, der sich beim Latschdurchlauf stark verformt, ist zusätzlich zum Reifeninnenraum eine elastische Kammer einvulkanisiert (WO 03 / 049 958 A1). Die Kammer ist über ein erstes steuerbares Ventil mit dem Reifeninnenraum und über ein weiteres steuerbares Ventil mit der Atmosphäre verbunden. Beim Latschdurchlauf wird die elastische Kammer komprimiert, und die sich darin befindende Luft wird in den Reifeninnenraum gedrückt. Nach dem Latschdurchlauf erhält die elastische Kammer wieder ihre ursprüngliche Form. Dadurch kann wieder Luft aus der Atmosphäre in die Kammer gesaugt werden. In den Reifeninnenraum sind zusätzlich noch ein Raddrehzahlsensor und ein Sensor, der den Abstand zwischen Felgenbett und Innenseite der Reifenlauffläche misst, installiert. Die Daten dieser Sensoren dienen zur Steuerung der Ventile. Der Reifenluftdruck kann somit in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Radlast geregelt werden.

Die elektrisch angetriebenen Kompressoren beziehungsweise Pumpen haben den Vorteil, dass der Reifenluftdruck auch während des Fahrzeugstillstandes erhöht werden kann. Die Pumpvorrichtung und die benötigten steuerbaren Ventileinrichtungen können auf dem Felgenbett (WO 02 / 094 587 A1) oder an der Radschüssel (DE 601 21 198 T2, US 5 452 753 A) angebracht sein. Die elektrische Energie für die sich mit dem Rad drehenden Antriebs- und Steuereinheiten wird entweder mittels kontaktlosen Drehübertragern oder mittels elektrischen Schleifringen realisiert. Die Luft zum Befüllen des Reifens wird normalerweise aus der Atmosphäre angesaugt und muss entsprechend gefiltert werden (WO 02 / 094 587 A1,



Figur 6: Pumpe 1, 2 im Reifeninnenraum mit Lufteinlass 10 und Sockelteil 20, auf dem die Pumpe längenverstellbar montiert wird (aus DE 39 33 812 A1).

DE 601 21 198 T2). Um unverschmutzte, trockene Luft oder sogar ein anderes Füllgas zusätzlich noch mit der gleichen Temperatur wie die Reifengasfüllung zur Verfügung zu haben, ist ein zusätzlicher Druckbehälter in das Felgenbett integriert. Der Druckbehälter ist über eine elektrische Pumpvorrichtung mit dem Reifeninnenraum verbunden (US 5 452 753 A). Das für die Reifendruckänderung benötigte beziehungsweise nicht benötigte Gas wird ausschließlich in diesem geschlossenen System bewegt. Für den Einsatz dieser Regelungssysteme für den Reifenluftdruck muss die Radfelge speziell ausgebildet sein, das heißt sie muss zusätzlich Öffnungen, Halterungen oder Behälter aufweisen. Um keine dafür modifizierte Felge einsetzen zu müssen, kann die Druckluft auch über speziell ausgebildete Reifenfüllventile eingebracht werden (US 6 772 812 B1, DE 103 38 709 A1). Dafür wird ein Reifenfüllventil mit zwei Rückschlagventilen im zentralen Lufteinlasskanal ausgestattet. Es besitzt außerdem noch einen zweiten Lufteinlass, der zwischen den beiden Rückschlagventilen angeordnet ist und zur Druckluftzufuhr durch eine am Rad befestigte Reifenluftdruckeinheit dient (US 6 772 812 B1).

Durch den Einsatz der Mikrosystemtechnik, beispielsweise eines Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMSs), ist es möglich, ein MEMS-Pumpmittel, eine steuerbare MEMS-Ventilanordnung, einen Drucksensor, eine Steuereinheit mit drahtloser Datenschnittsstelle und einen Energiespeicher in den Schaft eines Reifenfüllventils zu integrieren (DE 103 38 709 A1). Sämtliche für ein autonom arbeitendes Regelungssystem benötigten Komponenten sind im Reifenfüllventil untergebracht. Um eine dauerhafte Versorgung mit elektrischer Energie sicher stellen zu können, muss der Energiespeicher nachgeladen werden. Dazu sind durch die Walkarbeit des Reifens verformbare Piezoelemente in die Seitenwand oder in die Lauffläche des Reifens integriert und diese sind elektrisch leitend mit dem Energiespeicher im Reifenfüllventilschaft verbunden. Die Steuereinheit übernimmt dabei das Energiemanagement.

Die im Abschnitt 2.3 beschriebenen Steuerungs- beziehungsweise Regelungsverfahren für den Reifenluftdruck, können auch mit den Regelungssystemen mit dezentraler Druckluftversorgung realisiert werden.

4. Regelungssysteme für den Reifenluftdruck ohne Druckluftversorgung

Diese Regelungssysteme für den Reifenluftdruck kommen ohne Druckluftquelle aus. Der Reifenluftdruck ändert sich, wenn sich die Temperatur der Reifenfüllung ändert. Bei konstantem Volumen steigt der Reifenluftdruck mit steigender Temperatur der Reifenfüllung ebenfalls an. Auf der Reifeninnenseite oder auf dem Felgenbett sind elektrisch betriebene Heizmittel angeordnet (DE 10 2005 057 378 A1, DE 196 51 063 A1). Dabei kann es sich um Leiterbahnfolien mit aufgebrachten Leiterschleifen oder Peltier-Elemente handeln. In die Leiterschleifen wird durch ein außerhalb des Rades erzeugtes Magnetfeld eine Spannung induziert (DE 196 51 063 A1). Die Leiterschleifen können dabei selbst als Widerstandheizelement oder als Spannungsversorgung für weitere die Temperatur der Reifenfüllung beeinflussende Halbleiterbauelemente (zum Beispiel Peltier-Elemente) dienen. Die Stromversorgung der Peltier-Elemente kann aber auch über Schleifringe oder einen elektrodynamischen Generator, der durch die Raddrehung angetrieben wird, erfolgen (DE 10 2005 057 378 A1). Der Einsatz von Peltier-Elementen hat den Vorteil, dass die Reifenfüllung aktiv gekühlt werden kann, das heißt der Reifenluftdruck auch aktiv abgesenkt werden kann. Damit ist eine stufenlose Regelung des Reifenluftdruckes möglich.

Eine weitere Möglichkeit den Reifenluftdruck indirekt zu beeinflussen, ist der Einsatz von Substanzen im Reifeninnenraum, die ihren Aggregatzustand bei den im Reifeninnenraum vorkommenden beziehungsweise erzeugbaren Druck- und Temperaturbereichen von fest oder flüssig in gasförmig ändern (DE 10 2004 011 121 A1, EP 0 316 567 B1). Durch die Änderung des Aggregatzustandes nimmt die jetzt gasförmige Substanz ein größeres Volumen ein.

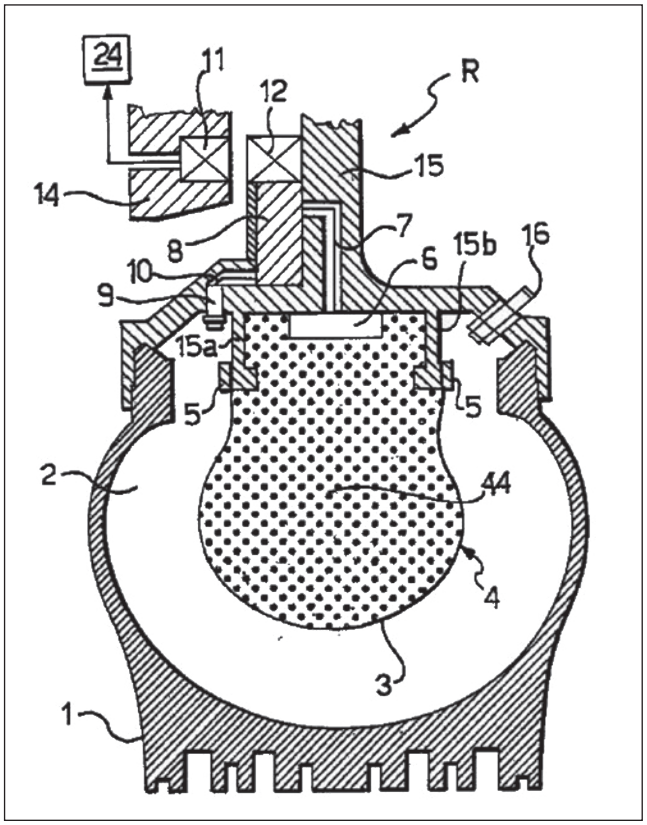
Da sich das Gesamtvolumen der Reifenfüllung, das heißt der Reifeninnenraum, nicht vergrößern kann, bewirkt die Vergrößerung des Teilvolumens eine Druckerhöhung der Gasfüllung im Reifeninnenraum. Dazu kann die Substanz in einer Blase, die im Reifeninnenraum auf dem Felgenbett angebracht ist, in einer wärmeleitenden elastischen, porösen Struktur eingebettet werden (siehe Figur 7). Die Temperatur der Blasenfüllung kann über ein Peltier-Element verändert werden. Soll nun der Reifenluftdruck erhöht werden, dann wird die Blasenfüllung über das Peltier-Element aufgeheizt, bis die Substanz oder ein Teil davon in den gasförmigen Zustand wechselt. Die Blase dehnt sich entsprechend aus, und der Druck im Reifeninnenraum steigt.

Die Substanz kann aber auch direkt der Reifenfüllung beigemengt werden (DE 10 2004 011 121 A1). Erhitzt sich ein mit

einem zu niedrigen Reifenluftdruck befüllter Reifen während der Fahrt, wechselt durch den Temperaturanstieg der Reifenfüllung die eingebrachte Substanz in den gasförmigen Aggregatzustand. Dies hat einen Reifenluftdruckanstieg zur Folge. Bei den inerten Substanzen handelt es sich um wässrige Lösungen mit organischen oder anorganischen Salzen, halogenierte Kohlenwasserstoffe oder azeotrope Mischungen. Mit der Beimengung einer Substanzmenge von 10 g ist schon ein Druckanstieg von zirka 1,0 bar zu bewerkstelligen.

5. Fazit

Realisiert sind bisher vor allem im Nutzfahrzeugbereich die Regelungssysteme für den Reifenluftdruck mit zentraler Druckluftversorgung. Im Zusammenwirken mit aktuellen Regelungssystemen für die Fahrdynamik kann ein ständig angepasster Reifenluftdruck nicht nur die Traktionseigenschaften sondern den Fahrkomfort, den Kraftstoffverbrauch und vor allem die aktive Fahrsicherheit in Notsituationen verbessern. Der Einsatz der nur am Fahrzeugrad montierten Regelungssysteme für den Reifenluftdruck stellt dafür eine kostengünstige Alternative dar.



Figur 7: Blase 4 mit poröser Struktur 44 für die einzulagernde Substanz im Reifeninnenraum 2 mit Peltier-Element 6 und induktiver Energieübertragung 11, 12 (aus EP 0 316 567 B1).

Literatur

[1] BACKFISCH, K.P.; HEINZ, D.S.: Das neue Reifenbuch, 1. Auflage, Motorbuch Verlag, Stuttgart, 2000, ISBN: 3-613-02025-4, S. 151 – 160.

Leder, Lack und alle Arten von Gummi oder Wie man Spritzen dicht bekommt – Ein Überblick (1841 bis heute)

Dr. Claus Medicus, Patentabteilung 1.44

Spritzen dicht zu bekommen, ist ein altes Problem. Das ist besonders dort schwierig, wo der Kolbenstopfen an der Zylinderinnenwand anliegt. Über die US-Patentschriften lässt sich die Entwicklung auf diesem Gebiet recht gut nachvollziehen. Die in mehr als 150 Jahren verwendeten unterschiedlichen Dichtungsmaterialien sind zahlreich. Heutzutage stammen sie vor allem aus dem Polymerbereich. Gummi, also Naturkautschuk, wird dabei seit Mitte des 19. Jahrhunderts verwendet. Trotz der Fortschritte in der Polymerchemie wurde er bis heute nicht vollständig verdrängt.

1. Einleitung

Eine Spritze besitzt einen Spritzenzylinder und einen Kolbenstopfen, der unter Druck eine Flüssigkeit aus dem Zylinder durch ein Röhrchen heraus treibt. Hierzu muss der Kolbenstopfen möglichst dicht an der Innenwand des Spritzenzylinders anliegen. Tut er dies nicht, fließt ein Teil der auszustoßenden Flüssigkeit in den Raum hinter dem Kolbenstopfen und geht für die Anwendung verloren. Gleichzeitig muss der Stopfen im Zylinder bewegt werden können, während er abdichtet. Während dieser Bewegung reibt er jedoch am Spritzenzylinder entlang, was seine Gleitfähigkeit einschränkt. Die US 4 303 070 A bringt das Problem, hohe Dichtigkeit bei gleichzeitig guter Gleitfähigkeit zu erzielen, treffend zum Ausdruck: „... when one is good the other is necessarily bad. ".

Im Laufe der Zeit wurden immer wieder Vorschläge gemacht, das Problem der mangelnden Dichtigkeit von Spritzen durch die Anwendung unterschiedlichster Materialien sowohl bei den Kolbenstopfen, wie auch bei den Spritzenzylindern in den Griff zu bekommen. Schon lange vor dem Erscheinen der ersten Patentschriften auf diesem Gebiet hatte man sich bereits mit diesem Problem beschäftigt. So waren die Kolbenstopfen seit dem 18. Jahrhundert mit Flachs oder Filz ausgestattet und gut eingefettet, um im Spritzenzylinder leicht gleiten zu können. Der metallische Spritzenzylinder wurde gebogen beziehungsweise gezogen, um vollkommene Gleichmäßigkeit zu erreichen. Der Stopfen sollte möglichst dicht an der Zylinderinnenwand anliegen. Derartige Spritzen leckten allerdings noch oft.

Seit 1841 lässt sich die weitere Entwicklung auf dem Gebiet besonders gut über die US-Patentschriften verfolgen. Man findet hier zahlreiche interessante Beispiele. Der Übersichtsartikel ist chronologisch aufgebaut, wobei die als Überschriften auftauchenden Zeitabschnitte willkürlich gewählt sind.

1841 – 1890: 1841 werden noch Elfenbein, Knochen oder Holz mit Leder, Flachs oder Garn umwickelt. Seit 1866 kommt Gummi als bedeutendes Dichtungsmaterial hinzu, und Kombinationen von Leder und Gummi sind möglich. Lacke, wie zum Beispiel Email, finden Verwendung, um eine glatte Spritzenzylinderinnenseite zu schaffen. Es gibt einige interessante Holzspritzen und Spritzen aus Celluloid. Lederpackungen werden mit Öl oder Glycerin feucht gehalten beziehungsweise von außen zur besseren Abdichtung an die Zylinderinnenseite der Spritze gepresst. 1883 taucht Asbest als Dichtungsmaterial auf.

1891 – 1910: In dieser Zeit finden sich erste Vertreter von Spritzen aus Glas oder Metall, die ganz ohne zusätzliche Dichtungsmaterialien auskommen, und zum Beispiel unter dem Namen „Ganzglasspritzen" bekannt sind. Parallel dazu bleiben Leder, Gummi und Asbest weiterhin wichtig. Gleitmittelreservoire im Stopfen werden offenbart und das Thema Sterilisierbarkeit gewinnt an Bedeutung. Leder und Metall zeigen hier Nachteile. Die zuvor bereits ansatzweise vorhandenen Umfangsrinnen am Stopfen werden jetzt bewusst eingesetzt. Gummistopfen werden mit Metallfolie oder mit Stoff ummantelt. Aufgrund langer Lagerzeiten verkleben Gummistopfen häufig mit dem Spritzenzylinder und lassen sich nicht mehr bewegen. Für dieses Problem werden Lösungen vorgeschlagen.

1911 – 1930: Man setzt sich weiterhin mit den Nachteilen von Gummistopfen auseinander. Die Stopfenmaterialien Asbest oder Metall beziehungsweise die Ganzglasspritzen gelten als Alternativen. Das unerwünschte Abbrechen der Kolbenstange von einem festklebenden Gummistopfen ist ein weiteres Problem. Die Gestalt des Gummistopfens wird in Hinblick auf eine verbesserte Gleitfähigkeit optimiert. Ein alternatives Dichtungsmaterial kommt hinzu. Es heißt Lava. Die Dichtigkeit von Glasampullen wird behandelt. Im Bereich der Gleitmittel kommt es zu Verbesserungen.

1931 – 1945: Die Umfangsrillen der Stopfen werden variiert. Die Stopfen übernehmen Zusatzaufgaben, wie zum Beispiel die Lagerung von einem in Lösung instabilen, und daher separat zu lagernden Medikament. Man kombiniert erneut mit Gleitmittel versehene Stopfen mit der Möglichkeit, den Stopfen mit Hilfe der Kolbenstange von außen so zu komprimieren, dass er an die Zylinderinnenseite gepresst wird. Ganzglasspritzen mit keimtötender Beschichtung werden entwickelt. Baumwolle und Kork als Dichtungsmaterialien sind zu finden.

1946 – 1960: Die Herstellung von Ganzglasspritzen wird verbessert. Neben Gummi wird Neopren als Dichtungsmaterial genannt. Es wird dargelegt, wann ansonsten dichte Kolbenstopfen zeitweise undicht sein müssen. Der Querschnitt eines Spritzen"zylinders" muss nicht immer rund sein. Im Bereich der Gleitmittel wird zum Beispiel Erdnussöl als Alternative genannt. In den 1950er Jahren tauchen vermehrt Plastikspritzen auf. Dichtungsringe am Kolbenstopfen werden eingeführt und ermöglichen Alternativen zur Ganzglasspritze. Es gibt erste Kolbenstopfen aus synthetischen Elastomeren. Das Silikonöl übernimmt Dichtungsaufgaben. Es werden leckdichte Glasspritzen, die kleine Volumina unter hohem Druck abgeben können, bekannt.

1961 – 1980: Plastikspritzen aus den unterschiedlichsten Materialien werden gefertigt. Spritzenzylinder sind zum Beispiel aus Polystyrol, Polyvinylchlorid, Polypropylen oder Nylon gefertigt. Silikonöl als Schmiermittel macht die Kolbenstopfen, die immer noch aus Gummi sind, gleitfähig. Man beginnt die Vor- und Nachteile der einzelnen Polymertypen zu berücksichtigen. Glaszylinder werden mit Kolbenstangen aus unterschiedlichen Materialien kombiniert. Teflon® als Dichtungsmaterial taucht auf und wird zu einem gewaltigen Konkurrenten des Kautschuks. Es gibt noch zahlreiche weitere synthetische Alternativen zum Gummi, welche zunehmend über ihre physikalischen Eigenschaften unterschieden werden. Als Alternative zu Glasampullen werden Plastikampullen diskutiert. Im Gleitmittelbereich gibt es weitere Verbesserungen. Die bei den Glasspritzen mögliche „loss of resistance" Technik soll bei den Plastikspritzen ebenfalls ermöglicht werden. Verschiedene Varianten von Dichtungsringen (O-Ringen) sind bekannt.

1981 – 1990: Bei der Blutabnahme wird über eine undichte Stelle im Stopfen ein Vakuum angelegt. Hat das Blut den Stopfen erreicht, ist die Undichtigkeit nicht mehr nötig, und kann beseitigt werden. Wie das geschieht, wird im Text erklärt. Eine Auflockerung zu den immer komplizierter werdenden Polymerzusammensetzungen des Stopfenmaterials ist es sicherlich, wenn man erfährt, wie man eine vernünftige Schaumkrone auf seinem Bier erzeugen kann. Betäubungsmitteldiebstahl aus gefüllten Ampullen heraus ist ein weiteres Problem, das konstruktiv gelöst wird. Die Nachteile des Teflons® zeigen sich und man versucht, sie konstruktiv zu umgehen.

1991 – 2000: Gummistopfen werden mit Teflon® beschichtet, so dass das jetzt kritisch gesehene Silikonöl unnötig wird. Es wird der Einfachheit halber immer mehr mit den physikalischen Eigenschaften der komplizierten Polymerzusammensetzungen argumentiert. Für letztere werden zunehmend nur noch deren Abkürzungen verwendet. Weitere alternative Dichtungsringe tauchen auf. Interessant ist, dass die Challenger-Katastrophe von 1986 mit defekten Dichtungen zu tun hatte. Als Variante zum Silikonöl wird Silikon direkt in das Stopfenmaterial eingearbeitet. Gleichzeitig optimiert man den Einsatz von Silikonöl auf verschiedenste Art und Weise. Ein Beispiel für ein weiteres thermoplastisches Material neben Teflon® ist Santoprene®.

2001 – heute: Das Material der Kolbenstopfen besteht heutzutage aus einer fein eingestellten Mischung an unterschiedlichen Polymeren, die jeweils verschiedene Aufgaben erfüllen sollen. Die Feineinstellung erfolgt über die Veränderung der physikalischen Eigenschaften der Polymere. Die Gleitfähigkeit wird möglichst bereits mit in den Stopfen eingebaut. Auch Silikonöl gibt es mit extra eingestellten Eigenschaften. Cycloolefincopolymere (COC) sind ein typisches Material für Spritzenzylinder.

Der seit mehr als 150 Jahren bekannte „rubber", das heißt Kautschuk oder Gummi, wird in den Patentschriften jedoch auch heute noch regelmäßig als ein mögliches Dichtungsmaterial mit angegeben. Er hat sich all die Zeit über gut gegenüber seinen jeweiligen Konkurrenten behaupten können.

Im Folgenden wird die soeben zusammengefasste Historie im Detail wiedergegeben. Der interessierte Leser kann sich einzelnen Zeiträumen zuwenden, aber auch den gesamten Text von Anfang an durchlesen. Selbst ein Hin- und Herspringen zwischen den Jahren ist problemlos möglich.

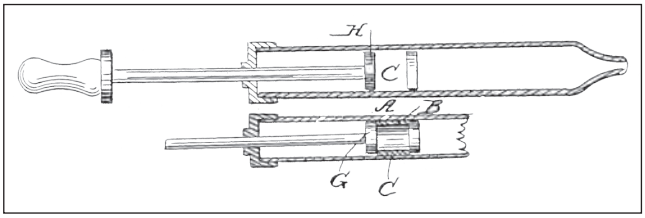
Die im Text vorkommenden Handelsnamen wurden, soweit bekannt, einmal mit dem Symbol ® versehen. Die in den US-Schriften naturgemäß vorkommenden Angaben in *inch*, *pound* und *foot* wurden der besseren Lesbarkeit wegen übernommen. 1 inch (1 in, 1˝) entspricht zirka 25,4 mm, 1 pound (1 lb) entspricht

zirka 454 g, und 1 foot (1ft) entspricht zirka 30,48 cm. Die kinematische Viskosität wird in der Praxis mit der Einheit centiStoke beschrieben. 1 centiStoke (1 cSt) entspricht dabei 1 mm²/s.

2. US-Patente 1841 bis 1890

Das Material der Kolbenstopfen besteht in vielen Fällen aus Leder. In der US 2 032 A (1841) ist von einer Spritze die Rede, deren Kolbenstopfen aus Elfenbein, Knochen, Holz oder anderem harten Material mit Leder bedeckt oder mit Flachs umwickelt ist, um im Spritzenzylinder luftdicht abzuschließen. Ferner wird Kork mit Garn umwickelt, um ein Lecken der Spritze zu verhindern.

Die US 53 002 A (1866) beschäftigt sich bereits mit Kolbenstopfen aus Gummi. Auf einen Glas- oder Metallkern (G, H) wird ein mit Rohgummi besetztes Gewebe (B) als Klebstoff aufgezogen. Darüber kommt der eigentliche Stopfen aus vulkanisiertem Kautschuk (C). Figur 1 zeigt eine solche Anordnung.

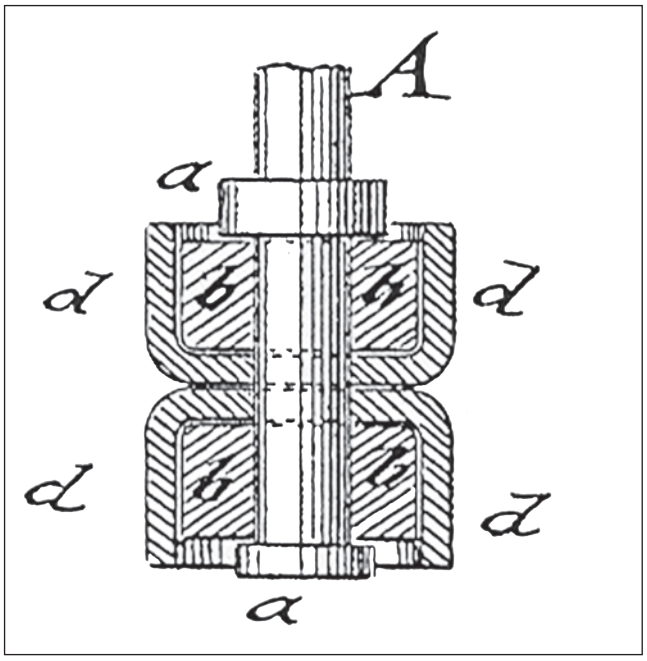


Figur 1: Gummikolbenstopfen von 1866 (aus US 53 002 A).

Auch die US 110 874 A (1871) verwendet Gummi für den Kolbenstopfen. Die Vulkanisierung des Kautschuks hatte sich Goodyear schon 1844 schützen lassen (US 3 633 A).

In der US 166 967 A (1875) wird ein hohler, birnenartiger Kolbenstopfen aus Gummi offenbart, der im Vergleich zu dem ansonsten üblichen Stopfenmaterial aus Baumwolle, Leder, Wolle oder Chamois-Leder deutlich vorteilhafter sein soll. Die zuletzt genannten Materialien mussten vor Gebrauch noch angefeuchtet werden, so dass sie anschwollen, und den Spritzenzylinder abdichteten, was wegen der Eigenelastizität des Gummis bei dem neuen Kolbenstopfen nicht mehr erforderlich war. Leder und Wolle schwollen zudem unregelmäßig an und dichteten den Spritzenzylinder nicht richtig ab. Flüssigkeit konnte hinter den Kolbenstopfen austreten. Auch aus Reinheitsgründen waren solche Dichtmaterialien zu kritisieren, und dem Gummistopfen der Vorzug zu geben.

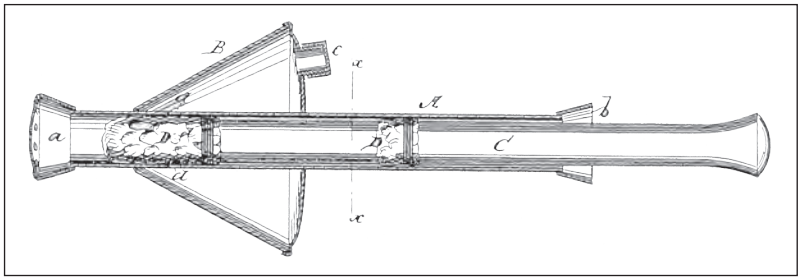
Die schlechte Passgenauigkeit des Kolbenstopfens aus herkömmlichen Materialien ist weiter in der US 181 226 A (1876) ein Thema. Zur Verbesserung werden hier Lederscheiben (d) auf Gummimanschetten (b) vorgeschlagen. Die Dichtheit des Stopfens im Spritzenzylinder wird durch die Eigenelastizität des Gummis (b) erreicht. Figur 2 zeigt die Anordnung.



Figur 2: Lederüberzug auf Gummikern, 1876 (aus US 181 226 A).

Die 1877 patentierte Kartoffelkäfergiftspritze (US 193 742 A) versucht die Hände des Benutzers dadurch vor rückwärts austretendem Gift zu schützen, dass erstens zwei Kolbenstopfen (D, D´) hintereinander an der Kolbenstange (C) befestigt sind, und zweitens, dass das Material der Kolbenstopfen aus Schwamm besteht. Figur 3 zeigt die Giftspritze.

Die US 212 975 A (1878) stellt eine Spritze aus Holz vor. Als Vorteile einer Holzspritze werden der niedrige Preis, das geringe Gewicht, Sauberkeit, Belastbarkeit und Bruchfestig-



Figur 3: Kartoffelkäfergiftspritze, 1877 (aus US 193 742 A).

keit genannt. Der große Nachteil der Glasspritzen sei deren Zerbrechlichkeit und höherer Preis. Der Nachteil metallischer Spritzen sei deren hohes Gewicht, ihr hoher Preis, und die Schwierigkeit, die Spritzen sauber zu halten, wenn Säuren das Metall angreifen und verfärben. Holzspritzen hingegen sind porös. Sie schwellen und schrumpfen. Sie verfärben sich und werden durch Säuren angegriffen. Die US 212 975 A schlägt vor, die Probleme bei den Holzspritzen dadurch zu umgehen, dass man mit Email-Beschichtungen arbeitet, das heißt also, dass man das Holz überall lackisoliert. Vorliegend werden die Innenseite des Spritzenzylinders und der hölzerne Kolbenstopfen mit einer Emailschicht (säure- und wasserfest) umgeben. Ein Rezept für den Lack findet sich in der Patentschrift. Der Lack wird auf das Holz aufgetragen und der Hitze ausgesetzt. Darüber kommt zur Endbehandlung eine weitere Lackschicht und es erfolgt eine zweite Hitzebehandlung. Die so präparierte Holzspritze ist dann dicht gegenüber den Flüssigkeiten, die mit ihr appliziert werden sollen.

Die US 213 050 A (1879) zeigt eine Giftspritze mit einer Kolbenstange aus leichtem und billigem Holz. Die Dichtigkeit wird durch einen kelchförmig gestalteten Gummistopfen erreicht, dessen Ränder dicht an der Innenseite des Spritzenzylinders anliegen.

Die US 235 953 A (1880) spricht das Problem an, dass die herkömmlichen Spritzen aus Glas, Metall oder Gummi eine unebene Zylinderinnenseite aufweisen, gleichzeitig aber eine gleichmäßige Bewegung des Kolbenstopfens darin verlangt wird. Ein Spritzenzylinder aus Celluloid soll auf seiner Innenseite dadurch glatt und eben werden, dass plastisches Celluloid auf eine Art Metallrohr mit polierter Oberfläche aufgebracht wird. Das Celluloid legt sich in Form eines Zylinders um das Metallrohr, trocknet dort und schrumpft zu einem gewissen Grad. Es legt sich dabei fest an das Metallrohr an, und übernimmt dessen glatte Oberfläche. Ein Kolbenstopfen kann sich nun in der Spritze gleichmäßiger bewegen. Es kommt zu weniger Undichtigkeiten.

Kolbenstopfen mit Gummikern und Lederüberzug, wie weiter oben zum Beispiel in der Figur 2 gezeigt, sind der Ausgangspunkt für die Entwicklung des komprimierbaren Kolbenstopfens der US 262 962 A aus dem Jahre 1882. Das Material Leder muss, wie bereits gesagt, vor Gebrauch angefeuchtet werden, so dass es aufquillt und dann abdichten kann. Ein Lederstopfen in trockenem Zustand ist umgekehrt hart und sitzt nur noch locker. In der genannten US-Schrift besteht der Kolbenstopfen aus einem Gummikern (E) zwischen zwei Metallscheiben, wobei der Gummikern von Lederringen (a, a´, a´´) umgeben ist. Die Erfindung macht sich die Elastizität des Gummikerns zunutze. Die Kolbenstange besteht aus einer inneren (C) und einer äußeren (D) Stange, die gegeneinander verschiebbar sind. Dadurch kann von außen durch den Benutzer der elastische Gummikern derart komprimiert werden, dass die Lederringe an der Zylinderinnenseite der Spritze dichtend anliegen. Figur 4 zeigt die Spritze.

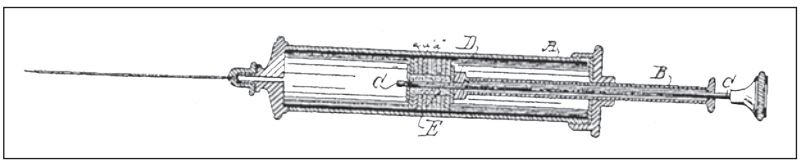
Während 1883 noch Vorschläge gemacht werden, wie der Lederüberzug eines Kolbenstopfens beständig feucht gehalten werden kann (US 286 605 A), wird im gleichen Jahr vorgeschlagen, einen Glaskolben mit Asbest zu umpacken (US 288 828 A). Die Vorteile des neuen Materials sind: Säurefestigkeit, zuverlässige Dichtwirkung, keine Absorption von Flüssigkeiten, kein Anschwellen, kein Schrumpfen, sowie Verringerung der Bruchgefahr der Glasspritze.

1889 erfolgt ein weiterer Vorschlag, in einer hypodermischen Spritze Lederummantelungen am Kolben beständig feucht zu halten. Dies geschieht durch eine hohle Kolbenstange hindurch, die ein Reservoir für Wasser, Öl oder Glycerin besitzt (US 401 157 A).

3. US-Patente 1891 bis 1910

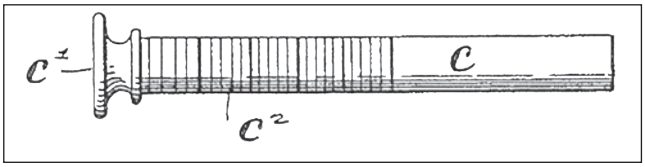
Lederummantelte Kolbenstopfen aus Gummi werden in den Patentschriften immer wieder erwähnt. Die 1882 genannte Möglichkeit, den elastischen Kolbenstopfen von außen über die Kolbenstange zur Abdichtung zu komprimieren, taucht bei den späteren Erfindungen ebenfalls mehrmals auf.

Zunehmend werden allerdings neue Varianten an Kolbenstopfen ausprobiert. Die US 565 480 A (1896) berichtet von einem einseitig offenen, hohlen Glaszylinder mit glatter polierter Oberfläche, der als Kolbenstopfen in einem Spritzenzylinder aus Glas bewegt wird. Ein massiver Glasstopfen sei ebenfalls, wenn auch weniger gut, zur Abdichtung geeignet.



Figur 4: Hypodermische Spritze mit von außen komprimierbarem Kolbenstopfen, 1882 (aus US 262 962 A).

Die Patentschrift US 600 803 A (1898) behandelt die Probleme bei der Sterilisierung von herkömmlichen Spritzen, die mit infektiösem Material in Kontakt gekommen sind. Solche Spritzen sind ihrerseits eine Gefahr für den Patienten, der als nächster damit behandelt werden soll. Daher wird in der Patentschrift eine Spritze vorgeschlagen, die komplett aus Metall besteht. In einem Metallzylinder mit einer absolut glatten Oberfläche, in der sich keine Mikroben festsetzen können, bewegt sich ein Kolben aus Metall, der mit absoluter Genauigkeit passend zum metallischen Spritzenzylinder geschliffen worden ist, und zwischen Zylinder und Kolben keinen Luftdurchtritt zulässt. Auf eine Ummantelung des Kolbenstopfens wird völlig verzichtet. Der Kolben (C) weist ferner kleine Rillen (C^2) in Umfangsrichtung auf, in denen sich eine winzige Menge Luft befindet. Diese bildet eine Art Film zwischen Kolben und Zylinder, der eine absolute Barriere für jegliche Flüssigkeit ist. Beim Aufziehen der Spritze entsteht so das nötige Vakuum. Es werden keine Blasen eingezogen, was bei den herkömmlichen Spritzen öfters der Fall war und den Patienten Schaden zufügen konnte. Umgekehrt leckt die Spritze im Bereich des Kolbenstopfens bei der Abgabe der Flüssigkeit nicht. Figur 5 zeigt den Kolben einer solchen Spritze aus Metall.

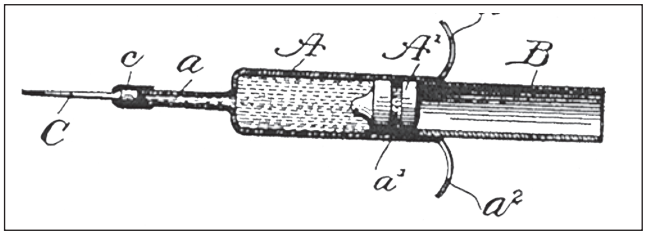


Figur 5: Metallkolben mit Umfangsrillen, 1896 (aus US 600 803 A).

Die US 609 982 A (1898) offenbart einen Kolbenstopfen, der mit einer Asbestfaser ummantelt ist. Aus der US 650 203 A (1900) ist eine weitere Metallspritze, ähnlich der des Jahres 1898, bekannt, die in ringartigen Furchen auf der Oberfläche des Kolbenstopfens einen abdichtenden Luftraum zum Spritzenzylinder bildet und einfach zu sterilisieren ist. 1901 wird erneut eine Spritze mit hohlem Kolbenstopfen patentiert, der lederummantelt ist. Im Hohlraum wird Öl vorgehalten, das durch kleine Löcher austritt, das Leder durchdringt und feucht hält (US 664 840 A).

Die US 686 451 A (1901) arbeitet mit sterilisierten, zusammengepressten Korkstopfen, die luftdicht in einen Glaszylinder eingepasst worden sind. Als Nachteil der herkömmlichen lederummantelten Kolbenstopfen und Metallzylinder wird ein weiteres Mal ausgeführt, dass das Leder von den verschiedenen Medikamenten bei häufigem Gebrauch gesättigt werden würde, und sich mit dem Metall chemische Verbindungen bilden würden, die auf andere Personen übertragen werden könnten. Die US 686 451 A zeigt letztlich Glasampullen, die in eine Spritze umgebaut werden können.

Aus der US 718 979 A (1903) ist ferner eine Glasspritze bekannt, die mit einem Kolbenstopfen (A´) aus Gummi oder Kork arbeitet. Der Kolbenstopfen (A´) soll dabei eine Rinne (a´) aufweisen. Durch diese würde ein Luftraum um den Stopfen herum gebildet werden, der ein Rückwärtsaustreten der Flüssigkeit verhindert, und den Stopfen davor bewahrt, stecken zu bleiben. Zusätzlich könnte man in der Rinne (a´) ein Gleitmittel wie Talkum aufbewahren, damit der Stopfen Unebenheiten des Spritzenzylinders besser ausgleicht. Der Vorteil der ringartigen Furchen der oben genannten Metallspritzen wird hier also auf einen herkömmlichen Gummistopfen mit Gleitmittelreservoir übertragen. Figur 6 zeigt die Spritze und den Kolbenstopfen.

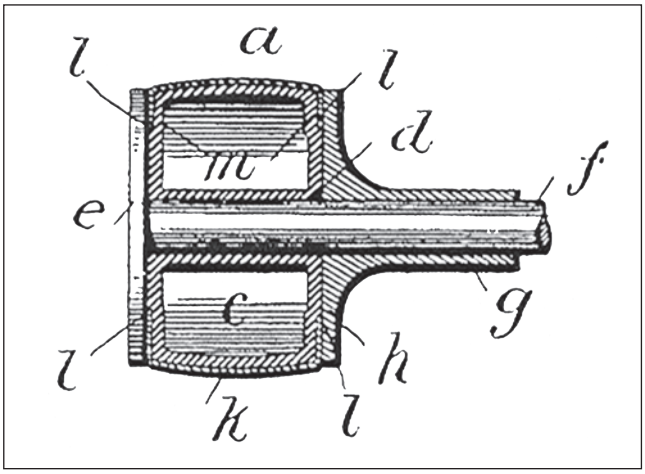


Figur 6: Kolbenstopfen aus Gummi oder Kork mit Umfangsrille, 1903 (aus US 718 979 A).

1903 wird das Patent US 723 588 A erteilt, das eine Glasspritze mit Metallkolben offenbart. Es sind auch hier keine Umpackungsmaterialien nötig. Metallkolben und Glaszylinder sind so genau aufeinander abgestimmt, dass der Innendurchmesser des Zylinders nur unwesentlich größer ist als der Durchmesser des Kolbens. Dadurch wird die Spritze dicht. Beim Aufziehen bildet sich ein Vakuum, bei der Abgabe von Flüssigkeit tritt keine Flüssigkeit hinter dem Kolben aus.

1903 wird eine weitere Spritze patentiert (US 728 160 A), die einen komprimierbaren Gummistopfen aufweist, der von außen über die Kolbenstange zusammengepresst werden kann. Ebenfalls von 1903 stammt die US 730 557 A, in der eine säurefeste Glasspritze beschrieben wird, deren Kolbenstopfen mit Asbest ummantelt ist. Die Spritze ist gut in der Hitze sterilisierbar.

Die US 730 720 A, ebenfalls aus dem Jahr 1903, offenbart einen weiteren ausdehnbaren Kolbenstopfen. Figur 7 zeigt den Stopfen (a).



Figur 7: Luftgefüllter Gummistopfen, 1903 (aus US 730 720 A).

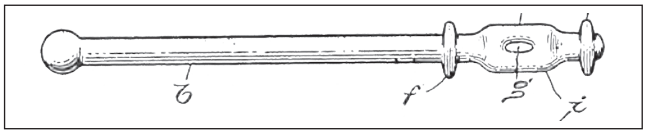
Der Stopfen (a) ist aus Gummi, druckluftbetätigt und daher hermetisch abgedichtet. Er enthält eine Druckluftkammer (c). Darüber hinaus ist der Gummistopfen (a) mit einer dünnen, undurchlässigen Metallfolie (k) ummantelt. Die Folie (k) kann aus Platin, Gold oder Silber oder aus einer geeigneten Legierung bestehen. Sie bildet eine Lage zwischen dem Kolbenstopfen (a) und der Zylinderinnenwand, die das Ankleben des Stopfens an dieser deutlich verringert, gleichzeitig aber einen dichten Kontakt zwischen beiden Bauteilen ermöglicht. Durch Betätigung der Kolbenstange (f) wird der Gummistopfen und die darin eingeschlossene Luft zusammengedrückt und dabei zur Zylinderinnenseite hin expandiert.

Das US-Patent US 748 424 A (1903) zeigt eine Ganzglasspritze mit aseptischen Eigenschaften, die leicht zu bedienen und zu reinigen ist. Die Kolbenstange bei dieser Spritze ist hohl. Flüssigkeit wird durch die Kolbenstange nach oben aus der Spritze abgegeben. Der Glaskolben ist dabei passgenau in den Spritzenzylinder aus Glas eingeschliffen. Beim Aufziehen der Flüssigkeit bilden sich keine Luftblasen, so dass auch dem Patienten nicht versehentlich Luft eingespritzt werden kann.

Die Ganzglasspritze der US 772 114 A (1904) mit eingeschliffenem Kolbenstopfen bringt weitere Verbesserungen bei der Keimfreiheit. Die aseptische Ganzglasspritze nach der US 772 450 A (1904) umfasst einen hohlen Glaskolben mit eingesetzter Skala.

Die US 869 932 A (1907) beschreibt erneut das Problem, dass die üblichen Glaszylinder aufgrund der damaligen generellen Schwierigkeit, Glaszylinder mit einheitlicher Bohrung herzustellen, erheblich in ihrem Innendurchmesser variieren. Um einen perfekten Sitz eines Glaskolbens in einem Glaszylinder zu erreichen, ist es nötig, entweder die Bohrung oder den Kolbenstopfen abzuschleifen („to grind"). Die Erfindung zielt darauf ab, das Abschleifen dadurch entbehrlich zu machen, dass ein spezieller Gummikolbenstopfen an ungleiche Glaszylinder angepasst werden kann. Der Stopfen ist auf einen Durchmesser formgepresst, der in etwa dem Innendurchmesser des Glaszylinders entspricht und genau darin hineinpasst. Durch Kompression des Gummistopfens über die Kolbenstange kann der Stopfen noch ausgedehnt werden, ein Prinzip, das vorher auch schon häufig genutzt worden ist.

Glasspritzen werden zu Beginn des 20. Jahrhunderts häufig in gefüllter Form (Serum) sehr lange gelagert, um dann bei Bedarf benützt zu werden. Aufgrund der Lagerung klebt der Kolbenstopfen durch die Verharzung des Serums oft an der Innenseite des Glaszylinders derart fest, dass er ohne Gewalt nicht mehr abgelöst werden kann. Die US 782 723 A (1905) schlägt vor, anstelle durch eine Druck- oder Zugbewegung den Gummikolbenstopfen mit Umfangsrille durch eine Drehbewegung von der Zylinderinnenwand zu lösen. Die US 919 918 A aus dem Jahre 1909 betrifft dasselbe Problem. Die Kolbenstopfen, auf die hier Bezug genommen wird, sind zur Abdichtung mit einer Ummantelung versehen (flexible, komprimierbare, aseptische Asbestfaser). In beiden Fällen verdreht sich die Kolbenstange unter Krafteinwirkung relativ zum Kolbenstopfen beziehungsweise Packungsmaterial, eine Drehbewegung kann also nicht zum Ablösen des an der Glaswand festgeklebten Kolbenstopfens führen. In der US 919 918 A wird daher die Faser an einem Loch (g) in der Kolbenstange festgebunden und dann aufgewickelt, so dass eine Relativbewegung der Faser zur Kolbenstange nicht mehr möglich ist. Figur 8 zeigt das Loch (g) in der Kolbenstange.



Figur 8: Kolbenstange mit Loch g zur Fixierung der Asbestfaser, 1909 (aus US 919 918 A).

Die US 922 331 A von 1909 zeigt eine Metallspritze, deren Spritzenzylinder an seinem nadelseitigen Ende mit einem Stopfen verschlossen ist. Dieser ist entfernbar, um Zugang zum metallenen Kolbenstopfen zu bekommen, um letzteren auf diesem Weg nötigenfalls zu reinigen, ihn aseptisch zu machen oder zu schmieren.

Der Gummikolbenstopfen der Spritze nach der US 933 398 A (1909) ist mit Stoff oder einem anderen unelastischen Material ummantelt, das eine glatte Oberfläche liefert, wobei der Stoff zusammen mit dem Gummi formgepresst wird, und somit einen integralen Bestandteil des Stopfens bildet.

Die US 962 657 A (1910) offenbart eine Glasspritze, in der Serum über längere Zeit aufbewahrt wurde. Das Serum durfte weder durch Undichtigkeiten aus der Spritze austreten, noch durch das Kolbenmaterial verunreinigt werden. Der elastische Kolbenstopfen musste keimfrei sein. Daher ist dieser mit Asbestfaser umwickelt, die aseptisch ist und bei guter Dichtwirkung gleichzeitig eine geringe Reibung aufweist. Bei langer Lagerung des Serums, so heißt es, soll die Asbestfaser aufgrund ihrer Porösität jedoch zum Durchsickern des Serums in den Bereich hinter dem Kolbenstopfen geführt haben. Deshalb wird in der US 962 657 A der Bereich des Stopfens, der mit dem Serum in Berührung kommt, aus flüssigkeitsdichtem Gummi gefertigt, und der Teil des Stopfens, der mit der Zylinderinnenwand der Glasspritze in Berührung kommt, aus keimfreier Asbestfaser gebildet.

4. US-Patente 1911 bis 1930

In der US 1 036 672 A (1912) wird erneut Asbest als Packungsmaterial vorgeschlagen. Schrift US 1 165 686 A (1915) betrifft wieder Packungsmaterial aus Asbest und das Problem, einen festsitzenden Kolbenstopfen durch Drehung von der Zylinderinnenwand der Glasspritze lösen zu können. Bei der Glasspritze der US 1 174 745 A (1916) kommt nur Glas mit der Medikamentenflüssigkeit in Verbindung. Die US 1 222 424 A (1917) schlägt einen Kolbenstopfen mit Rippen vor, der einstückig aus flexiblem, komprimierbarem Gummimaterial gefertigt ist. Es wird erneut auf die bekannten Probleme für die Dichtigkeit (Anhaften des Gummis am Glaszylinder, Verunreinigung des Medikaments durch Gummiabrieb) hingewiesen.

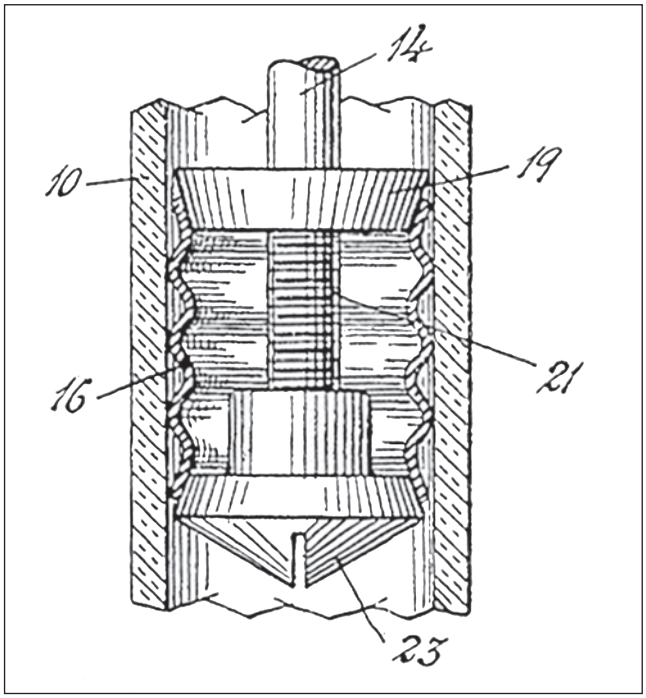
Die US 1 348 796 A (1920) schlägt vor, in einem Glaszylinder, unabhängig davon, ob dieser geschliffen ist oder nicht, einen verbesserten Kolbenstopfen einzusetzen, der in an sich bekannter Weise (vergleiche Figur 4, 1882) über die Kolbenstange zusammengedrückt werden kann, sich dabei ausdehnt und dichtend an die Zylinderinnenwand (10) anlegt. Figur 9 zeigt den Kolbenstopfen (16) mit seinem Metallmantel.

Der Kolbenstopfen (16) ist röhrenförmig und aus dünnem, gewelltem und nicht korrodierendem Metall (Liberty silver), das sich durch Hochschrauben der Mutter (23) etwas zusammenlegt und die Zylinderinnenwand (10) flüssigkeitsdicht abdichtet. Als Vorteile eines solchen Stopfens werden in der Schrift genannt: einfach und billig in der Herstellung, gut funktionierend, perfekte Abdichtung auch von nicht geschliffenen Glaszylindern, sowie kein Materialverlust durch nach hinten austretende Medikamentenflüssigkeit.

Die US 1 373 778 A (1921) greift das Problem auf, dass ein Kolbenstopfen aus Gummi mit dem Glaszylinder der Spritze verklebt und auch durch eine Bewegung der Kolbenstange nicht gelöst werden kann, zum Beispiel weil diese abbricht. Es wird daher eine besonders feste Verbindung zwischen Kolbenstange und Kolbenstopfen über einen Gewindeeingriff vorgeschlagen.

Die US 1 450 016 A (1923) schlägt erneut einen kelchartigen, hohlen Stopfen vor, der mit Gleitmittel gefüllt ist.

Aus der US 1 453 418 A (1923) ist eine Spritze bekannt mit einem zylindrischen Kolben aus Stahl, der mehrere parallel umlaufende kleine Rinnen aufweist (vergleiche Figur 5, 1896). Darüber hinaus kann der Kolben mit einer äußerst dünnen Schicht eines weicheren Metalls (zum Beispiel Gold) galvanisch überzogen sein (vergleiche Figur 7, 1903). Dies ermöglicht einen noch engeren Sitz des Kolbens im Spritzenzylinder und ein weicheres Gleiten desselben darin. Die US 1 453 418 A

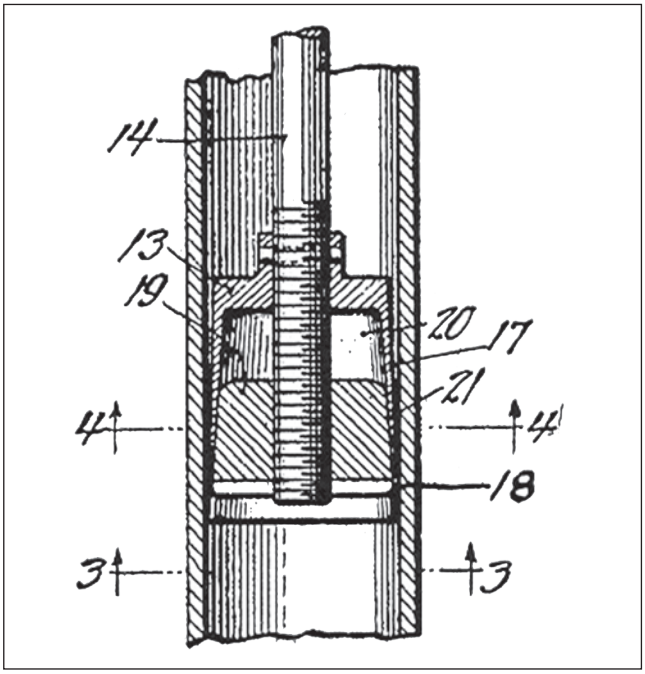


Figur 9: Ummantelter Kolbenstopfen, 1920 (aus US 1 348 796 A).

erklärt den positiven Effekt auf die Dichtigkeit der Spritze, der durch die Rinnen erreicht wird. Flüssigkeit, die aufgrund des Druckes zwischen Kolben und Glaszylinder gelangen sollte, verliert sich in den Rinnen, wobei sie den Druck abbaut. Dadurch kann sie schließlich nicht mehr nach hinten austreten.

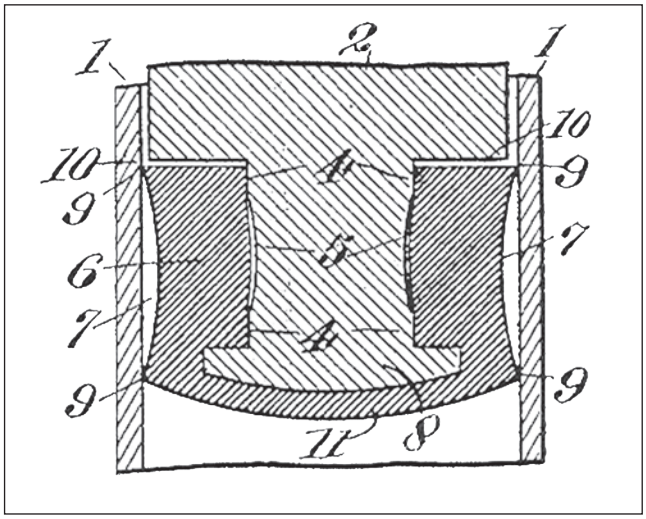
Die US 1 521 890 A (1925) offenbart eine Spritze mit einem metallischen Kolbenstopfen ohne Faser- oder Gummipackungsmaterial, so dass sich keine Partikel lösen können, die das Spritzenröhrchen verstopfen, was zum Beispiel bei Gummistopfen ein häufiges Problem ist. An der Kolbenstange (14) ist der Stopfen (13) über ein Gewinde befestigt. Der Stopfen (13) wird dabei von einem spitz zulaufenden runden Wandbereich (17) gebildet, der in einem dünnen, elastischen, metallischen Randbereich (18) endet. Dieser Bereich (18) wird durch den Block (19) im Inneren des Stopfens (13) über eine Drehbewegung mit der Kolbenstange (14) in festen Eingriff mit dem Spritzenzylinder (10) gezwungen, so dass ein flüssigkeitsdichter Kontakt zwischen dem Kolbenstopfen (13) und dem Spritzenzylinder (10) hergestellt wird. Durch die konische Form des Stopfens (13) gelangt nur der ringartige Teilbereich (18) in Kontakt mit der Zylinderinnenwand der Spritze, so dass Dichtigkeit bei gleichzeitig geringer Reibung erreicht wird. Figur 10 zeigt einen solchen Stopfen.

Laut der US 1 540 215 A (1925) sollen die beweglichen Teile bei medizinischen Spritzen nicht metallisch sein. In einem geschliffenen Spritzenzylinder aus Glas wird möglichst ein geschliffener Glasstopfen eingesetzt. Packungsmaterialien werden nicht verwendet.



Figur 10: Kolbenstopfen mit Metallfolie, 1925 (aus US 1 521 890 A).

Ein Minimum an Reibung für den Kolbenstopfen bei gleichzeitigem Maximum an Dichtigkeit gegen nach hinten drängende Flüssigkeit verspricht die US 1 540 126 A aus dem Jahre 1925 (Figur 11). Durch die besondere Form des Stopfengrundkörpers (2), der im reduzierten Bereich (4) in der Mitte (5) noch zusätzlich eingeengt ist, legt sich das Packungsmaterial aus Gummi so an diesen an, dass scharfe Kanten (9) gebildet werden, die als einzige mit der Zylinderinnenwand (1) in Reibungskontakt stehen, und diesen luftdicht abschließen.



Figur 11: Stopfen mit Gummimantel, 1925 (aus US 1 540 126 A).

Nicht mehr der Kolbenstopfen auf seiner gesamten Länge steht in dichtem Kontakt zur Zylinderinnenseite, sondern nur noch ringartige Bereiche des Stopfens tun dies, während die anderen Stopfenbereiche im Abstand von der Zylinderinnenwand gehalten sind (Figur 10 und 11). Dieser Grundgedanke ist jedoch bereits schon von den kelchartig geformten Kolbenstopfen, so zum Beispiel aus der US 213 050 A aus dem Jahre 1879, bekannt.

Die US 1 564 569 A (1925) zeigt ein weiteres Beispiel einer Spritze mit Kolbenstopfen, bei der das Packungsmaterial aus Gummi nur in einem Teilbereich mit der Zylinderinnenwand in dichtem Kontakt steht. Das Gummimaterial ist an dieser Stelle durch den Kontakt noch zusätzlich komprimiert, was zur Abdichtung beiträgt. Der Kolbenstopfen ist außerdem auch dadurch expandierbar, dass man ihn stückweise tiefer in die Kolbenstange hineinschraubt.

Das alternative Dichtungsmaterial Lava ist nicht vulkanischen Ursprungs, sondern eine Komponente aus Magnesiumoxid und Talkum (Magnesiumsilikat), wobei letzteres im Bereich der Elektronik als hitzefestes Isoliermaterial verwendet wird. Das Talkum wird als weiches Material (Speckstein) abgebaut, dann bearbeitet und danach hoher Hitze (zirka 2000 °F (das heißt zirka 1093 °C) – daher der Name „Lava“) ausgesetzt. Diese Lava ist sehr hart, ohne gleichzeitig so spröde zu sein wie Glas oder Porzellan. Die US 1 648 135 A verweist auf Literatur, aus der weitere Details entnommen werden können.

1920 wird angeregt, eine Spritze komplett aus Lava herzustellen (US 1 348 412 A (1920)). Die Dichtigkeit wird dabei nicht angesprochen.

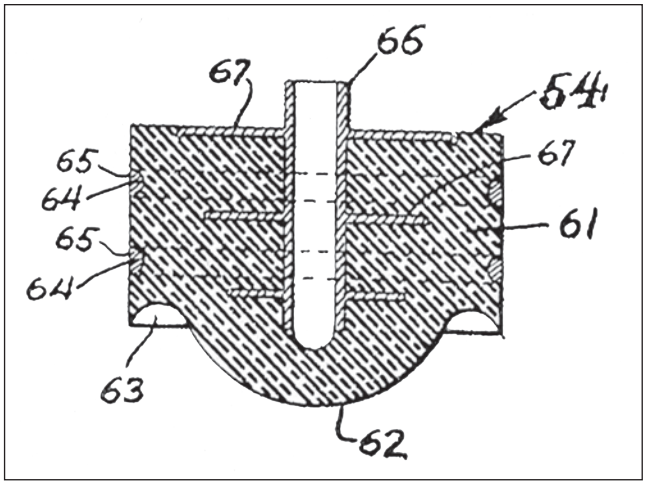
Die US 1 648 135 A (1927) schlägt vor, einen Kolbenstopfen aus Lava zu verwenden, und diskutiert dieses Material im Detail. Metall als Stopfenmaterial unterliegt übermäßiger Abnutzung und bewirkt in der Hitze durch Ausdehnung das Brechen des Glaszylinders, wenn die Spritze zu Sterilisationszwecken vorher nicht auseinandergebaut wird. Glas und Porzellan können nicht mit einem Gewinde für die Kolbenstange versehen werden und sind zu spröde. Lava hingegen ist hart, hitzebeständig, und dehnt sich nicht aus. Es besitzt eine lange Lebensdauer, ist nicht spröde und eine geschliffene Glasspritze kann mit einem Lava-Stopfen in der Hitze sterilisiert werden, ohne die Spritze vorher auseinander bauen zu müssen. Auch ist ein Lava-Stopfen problemlos mit einem Gewinde zu versehen. Ein Lava-Stopfen wird durch den längeren Gebrauch im Spritzenzylinder poliert und zerkratzt somit nicht die Zylinderinnenseite.

Die US 1 694 767 A (1928) offenbart eine Spritze mit eingesetzter Glasampulle, die durch zwei Stopfen nach außen hin abgedichtet ist. Der eine der Stopfen wird darüber hinaus noch durch eine Kolbenstange als Kolbenstopfen in dem Glaszylinder bewegt. Dieser Stopfen ist aus Gummi und Kork zusammengesetzt, wobei der Gummiteil des Stopfens weniger anfällig gegenüber Angriffen der Arzneiflüssigkeit ist, und daher dieser zugewandt ist, während der Korkteil den größeren Stopfenanteil ausmacht, um an Gummi zu sparen.

Die US 1 712 069 A (1929) offenbart ebenfalls eine Spritze mit eingesetzter Glasampulle, deren Stopfen als zusammengesetzter Stopfen ausgebildet ist. Der Stopfen besteht aus einem dickeren Hartgummianteil und einem dünneren Teil aus elastischem Gummi. Der Hartgummianteil hat einen etwas geringeren Durchmesser als der elastische Gummiteil. Der elastische Gummiteil wirkt bei einer Rückwärtsbewegung des Kolbenstopfens als Bremse, während er hingegen bei der normalen Ausschüttbewegung ohne große Reibungsverluste hinter dem Hartgummianteil mit nach vorne bewegt wird.

Aus der US 1 712 070 A (1929) ist eine weitere Spritze mit einem solchen zweigeteilten Kolbenstopfen bekannt.

Die US 1 718 599 A (1929) betrifft eine Spritze mit einem Kolbenstopfen aus Gummi, der mit einem Gleitmittel versehen ist. Figur 12 zeigt den Stopfen (54).



Figur 12: Gummistopfen mit Gleitmittel, 1929 (aus US 1 718 599 A).

Der Stopfenkörper (61) hat eine hervorstehende Spitze (62), die in eine halbrunde Rille (63) übergeht. Wird nun Druck auf den Stopfen ausgeübt, füllt Flüssigkeit die Rille (63) aus und presst dabei das untere Ende des Stopfens dicht an die Zylinderinnenwand der Glasampulle, so dass keinerlei Flüssigkeit hinter dem Stopfen rückwärts austreten kann. Weitere Rillen (64) sind vorgesehen, die ein Gleitmittel wie zum Beispiel Glycerin enthalten, um die Reibung des Kolbenstopfens (54) herabzusetzen, wenn dieser in der Glasampulle bewegt wird.

Aus der US 1 737 844 A (1929) ist ein anderer Gummistopfen mit Querrillen bekannt, der in einer Glasampulle bewegt werden soll. Gummi ist ein gutes Dichtmaterial. Es ist gegenüber den flüssigen Medikamenten inert. Es hat jedoch auch eine deutliche Tendenz, am Glaszylinder kleben zu bleiben. Im Patent wird vorgeschlagen, der Gummizusammensetzung zum Zeitpunkt ihrer Mischung Paraffin zuzusetzen. Wenn ein solcher Kolbenstopfen komprimiert wird, um ihn in den Glaszylinder

einzusetzen, wird das Paraffin aus dem Gummi herausgedrückt und bildet einen unsichtbaren Lackfilm auf der Oberfläche des Stopfens, wodurch dessen Gleitfähigkeit deutlich erhöht wird. Es werden zirka 1,5 Gewichtsprozent an Paraffin zugegeben.

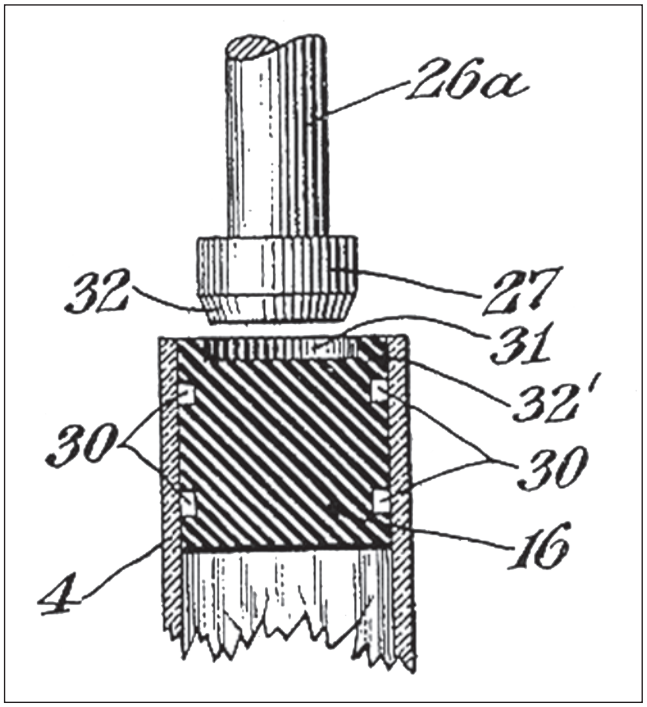
Darüber hinaus wird nach der Lehre der US 1 737 844 A der Kolbenstopfen mit einem Film an reinem Glycerin überzogen. Glycerin reagiert weder mit den meisten Medikamenten, noch mit dem Glas des Zylinders oder dem Gummi des Stopfens. Es verdampft auch nicht. Es verhindert das Klebenbleiben des Gummistopfens an der Innenwand des Glaszylinders. Es wird empfohlen, sowohl Paraffin, wie auch das Glycerin gemeinsam zu verwenden, obwohl der Einsatz von Glycerin nicht notwendig ist, wenn dem Gummi des Stopfens Paraffin zugesetzt wird.

5. US-Patente 1931 bis 1945

Aus der US 1 816 857 A (1931) ist eine Ampulle für eine Spritze bekannt, deren Kolbenstopfen nicht mit ringartig umlaufenden Rinnen versehen ist, wie es bisher üblich war, sondern mit einer spiralförmig angeordneten Rinne.

Die US 1 817 652 A (1931) offenbart einen interessanten zusammengesetzten Kolbenstopfen innerhalb einer Glasampulle. In Lösung instabile Wirkstoffe müssen zum Zeitpunkt der Applikation frisch in Lösung gebracht werden. Anderenfalls zersetzen sie sich und ihre Abbauprodukte können den Patienten schädigen. Die US 1 817 652 A schlägt vor, den Wirkstoff in Tablettenform ungelöst mit einer wasserdichten Kapsel aus Paraffin zu umgeben, die sich innerhalb der Ampulle in destilliertem Wasser befindet. Durch Erwärmen der Glasampulle in einem Wasserbad schmilzt die Paraffinschicht und der trockene Arzneistoff wird vom destillierten Wasser gelöst. Das freigesetzte geschmolzene Paraffin schwimmt oben auf und setzt sich in der konkaven Öffnung des Korkstopfens ab. Dort wird es unter Einwirkung von kaltem Wasser fest und bildet so einen Bestandteil des Stopfens, der sich dicht an die Zylinderinnenwand der Glasampulle anlegt.

Die US 1 819 258 A (1931) greift erneut (vergleiche Fig. 4, 1882) das Prinzip auf, den Kolbenstopfen mit Hilfe der Kolbenstange durch den Benutzer von außen derart auszudehnen, dass dieser zur dichten Anlage an die Innenwand des Zylinders gelangt. Der Gummistopfen (16) besitzt, wie aus der Figur 13 hervorgeht, zwei umlaufende Rinnen (30), die bevorzugt mit Glycerin gefüllt sind.

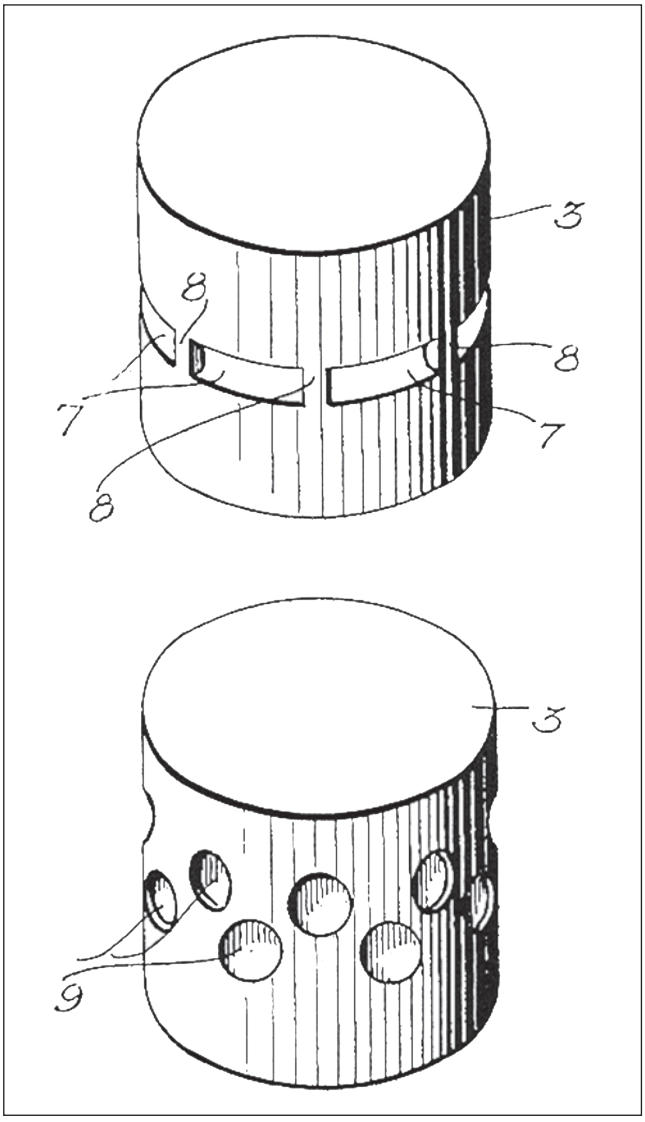


Figur 13: Ausdehnbarer Gummistopfen, 1931 (aus US 1 819 258 A).

Der Stopfen weist weiter eine Öffnung (31) für das Ende (27, 32) der Kolbenstange (26a) auf. Deren konisch zulaufender Teil (32) passt in die Öffnung (31). Durch den Druck auf die Kolbenstange (26a) drängt jedoch auch der etwas größere Teil (27) in die Öffnung (31) und presst dabei den Bereich (32´) des Gummistopfens in dichtender Weise an die Innenwand des Glaszylinders (4). So erhält man eine äußerst dichte Verbindung zwischen Stopfen und Ampulle. Flüssigkeit wird daran gehindert, rückwärts hinter den Stopfen auszutreten.

Die US 1 961 023 A (1934) diskutiert das Problem, dass die bekannten Gummistopfen mit einer umlaufenden Rille leicht verkanten, und so im Zylinder der Glasspritzen einen Kanal bilden, durch den Flüssigkeit nach hinten hinter den Gummistopfen austritt. Ein Verkanten des Gummistopfens würde vor allem dann erfolgen, wenn dieser Paraffin enthält. Es wird vorgeschlagen, die umlaufende Rinne mit Unterbrechungen (8) zu versehen, so dass kein durchgehender Kanal mehr gebildet wird. In den verbleibenden Öffnungen (7, 9) ist Platz für das Gleitmittel. Figur 14 zeigt zwei Ausführungsformen des Stopfens (3):

Die US 2 015 970 A (1935) bezieht sich auf eine Ganzglasspritze, bei der der Glaskolben aus Sterilitätsgründen an seinem elektrisch leitfähigen, vorderen Ende durch elektrolytische Abscheidung mit einer Schicht aus reinem Silber versehen wird.



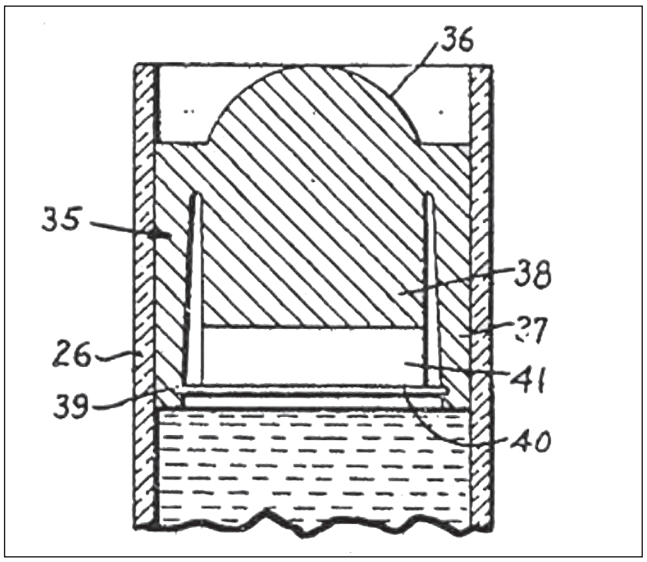
Figur 14: Unterbrochene Rinnen, 1934 (aus US 1 961 023 A).

Die keimtötende Wirkung des Silbers erfolgt über Ag_2O oder besonders gut über Ag_2O-$2MnO_2$, welches sehr beständig gegenüber Hitze, Schwefel und reduzierenden Substanzen, wie zum Beispiel Novocain sein soll. Das MnO_2 wird durch Eintauchen des Glaskolbens in $KMnO_4$-Lösung erreicht. Die Beschichtung des Glaskolbens scheint keine negativen Auswirkungen auf die Dichtigkeit der Ganzglasspritze zu haben.

Aus der US 2 028 751 A (1936) kennt man eine Mehrkammerampulle, in die ein lokales Anästhetikum, wie zum Beispiel Procainepinephrin abgefüllt wurde. Eine solche Lösung ist im gepufferten Zustand nicht lange stabil, die Ampulle also nicht lagerbar. Daher wird die Pufferlösung separat innerhalb eines extra Stopfens aufbewahrt. Dieser ist aus Metall und mit einer dünnen Membran verschlossen. Nach Öffnen der Membran kann sich die Pufferlösung mit der Lösung des Anästhetikums vermischen. Das Anästhetikum ist einsatzbereit. Der Stopfen besitzt jedoch nur geringe Dichtungsaufgaben.

Die US 2 066 868 A (1937) nennt einen Glaszylinder, in dem sich zur Abdichtung ein zylindrischer Kolbenstopfen aus mehreren Schichten von Baumwolle befindet, der mit einer Mischung von Vaseline und geschmolzenem Wachs gesättigt wurde. Die US 2 102 704 A (1937) verwendet einen Korkstopfen mit umlaufender Rinne.

Der Kolbenstopfen (35) in der Glasampulle (26) nach der US 2 157 503 A (1939) besteht aus Kork. Dieser Stopfen dient der Abdichtung und zur Produktausschüttung. Figur 15 zeigt seine Gestalt.



Figur 15: Hohler Stopfen mit Tablette, 1939 (aus US 2 157 503 A).

Der Stopfen ist hohl und enthält eine Tablette mit einem medizinischen Wirkstoff. Durch Druckausübung auf den Stempel (38) zerreißt eine Celluloidmembran (40) und die Tablette (41) kann sich auflösen.

Ähnliche Stopfenkonstruktionen sind aus vielen weiteren Schriften bekannt, so zum Beispiel aus der US 2 248 469 A (1941), aus der US 2 251 501 A (1941) oder der US 2 266 998 A (1941).

Schrift US 2 263 865 A (1941) beschreibt eine Glasspritze mit eingeschliffenem Zylinder beziehungsweise Kolben. Die US 2 361 617 A (1944) offenbart eine Glasspritze mit einem Kol-

benstopfen, der eine Rinne für einen Dichtungsring aufweist. Auch Metallzylinder beziehungsweise Kolbenstopfen aus Metall werden weiterhin eingesetzt (US 2 369 304 A, 1945).

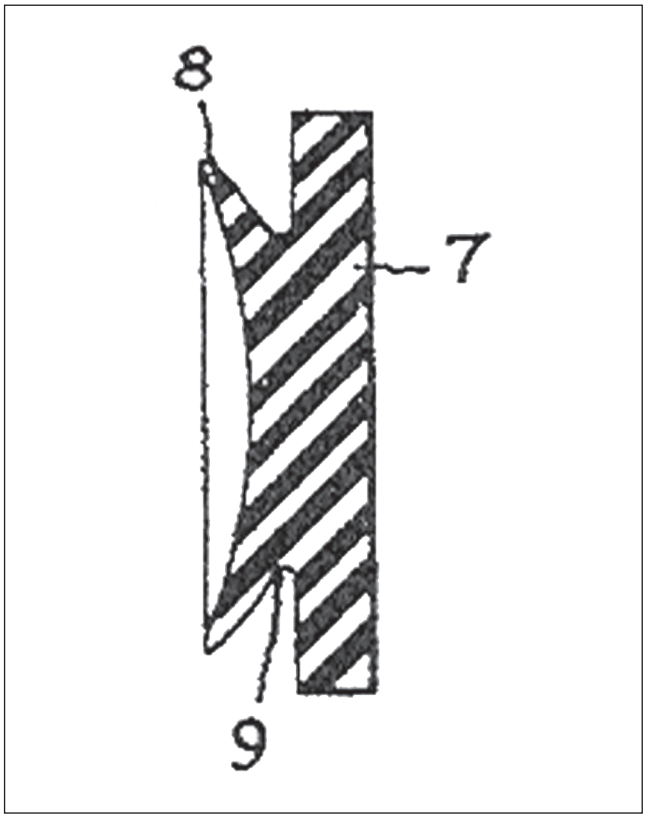
6. US-Patente 1946 bis 1960

Die US 2 392 104 A aus dem Jahre 1946 beschäftigt sich mit der Fabrikation von Glasartikeln, wie zum Beispiel Spritzenzylindern und Kolben, die äußerst genau zueinander passen müssen. Der Innendurchmesser der üblichen Glasröhrchen variiert erheblich, so dass dies auch der Innendurchmesser eines Spritzenzylinders tut, der aus solchen Röhrchen gefertigt wird. Daher muss ein Spritzenzylinder im Nachhinein noch entsprechend auf Passung geschliffen werden („ground-fit"). Die Unregelmäßigkeiten des Glaszylinders können hier auch nicht über den Kolbenstopfen ausgeglichen werden, wie es zum Beispiel 1907 in der US 869 932 A vorgeschlagen wird, da bei den Ganzglasspritzen ein Glaskolben ohne Packungsmaterial eingesetzt wird. Die Erfindung der US 2 392 104 A fertigt vielmehr Spritzenzylinder und hohle Kolben von Anfang an in so engen Toleranzen („fired-fit"), dass ein nachträgliches Schleifen („ground-fit") unnötig wird. Die Abweichung des Innendurchmessers des Glaszylinders liegt ohne Schleifen im Bereich von nur noch ± 0,0001 inch. Über den Kolben kann der volle Druck weitergegeben werden, ohne dass Flüssigkeit hinter den Kolben nach rückwärts austritt. Positiver Nebeneffekt der Methode ist, dass der Spritzenzylinder transparent ist und nicht mehr, wie beim Abschleifen, nur einen verzerrten Blick auf den Inhalt des Zylinders erlaubt. Auch sind jetzt durch die geringen Abweichungen im Innendurchmesser die Volumina der Spritzenzylinder alle mehr oder weniger einheitlich, und eine Standarddosisskala kann angebracht werden. Vorher musste mühsam jeder einzelne Zylinder ausgemessen und durch einen Ätz- und Gravierprozess mit einer individuell passenden Skala versehen werden.

Der Begriff „fired-fit" nach der Erfindung bedeutet, dass Glaszylinder und Glaskolben durch Hitze und Druck in die gewünschte Form gebracht werden.

Die US 2 394 687 A betrifft im Gegensatz hierzu wieder Packungsmaterialien des Kolbenstopfens. Neben Gummi wird immer noch Leder erwähnt. Weiter sind Kombinationen von Gummi und Gewebe genannt.

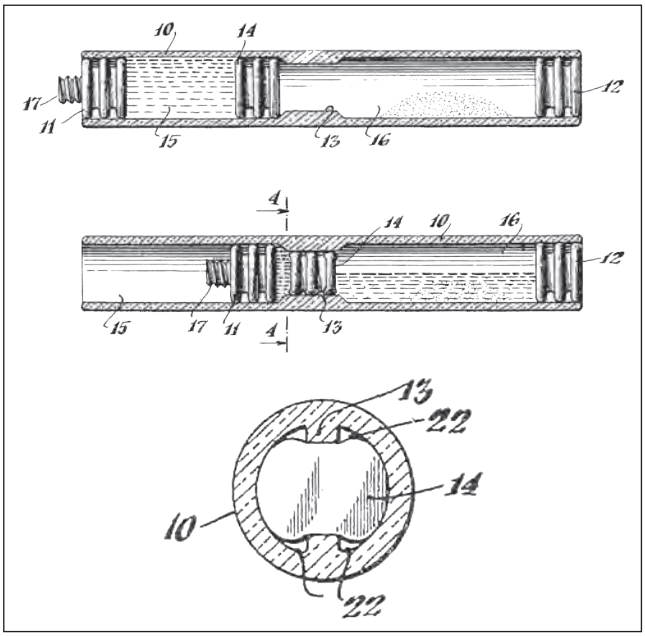
Die US 2 419 401 A (1947) handelt von den Undichtigkeiten der geschliffenen Ganzglasspritzen. Vor allem, wenn die Injektion langsam erfolgt, tritt Flüssigkeit hinter dem Kolben aus. Die Erfindung will ein Lecken auch bei langsamer Injektionsrate verhindern und weiterhin die Glaskolben, die durch das Schleifen genau an ihren jeweiligen Glaszylinder individuell angepasst wurden, austauschbar machen, so dass diese auch in anderen Glaszylindern fehlerfrei arbeiten können. So soll vermieden werden, dass bei zerbrochenem Spritzenzylinder der Glaskolben mit weggeworfen werden muss. Gelöst wird das geschilderte Problem dadurch, dass vorne an der Spitze des Glaskolbens eine Scheibe (7) mit integriertem Sauger (8) angebracht ist. Diese besteht aus einem nicht toxischen Elastomermaterial wie Gummi oder Neopren.



Figur 16: Gummistopfen mit Saugkappe, 1947 (aus US 2 419 401 A).

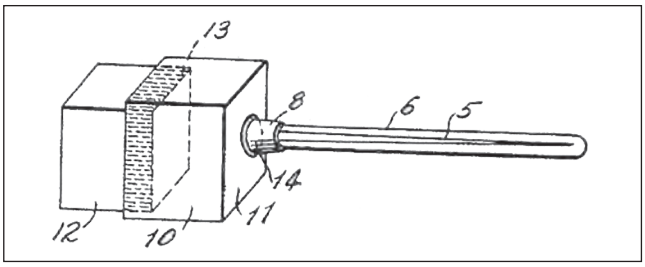
Ein gutes Beispiel für einen Kolbenstopfen, der bewusst undicht sein soll, liefern die sogenannten Mehrkammerampullen, die in einer Kammer ein Lösungsmittel, und in einer anderen Kammer ein zu lösendes Medikament aufbewahren. Die US 2 549 417 A (1951) zeigt eine solche Ampulle. Erst kurz vor der Anwendung wird das Medikament gelöst. Bis dahin kann es stabil und steril gelagert werden. Mit diesem Lagerproblem hatte sich unter anderen schon die weiter oben genannte US 2 028 751 A aus dem Jahre 1936 beschäf-

tigt. Sie hat allerdings eine andere Lösung vorgeschlagen (s. o.). Bei der US 2 549 417 A (1951) trennt zunächst ein zweiter Kolbenstopfen (14) die beiden Kammern (15, 16) dichtend voneinander ab. Erst wenn dieser zweite Kolbenstopfen (14) sich wegen der Bewegung des ersten Kolbenstopfens (11) mitbewegt, gibt er seine Rolle als Dichtungselement auf und macht seitlich (13) Platz, damit das Lösungsmittel über die neu geschaffenen Kanäle (22) in die Kammer (16) mit dem zu lösenden Medikament wechseln kann. Figur 17 zeigt, dass der Stopfen (14) absichtlich gequetscht wird, so dass Passagen (22) für das Lösungsmittel geschaffen werden.



Figur 17: Undichter Gummistopfen, 1951 (aus US 2 549 417 A).

Die US 2 552 100 A (1951) offenbart eine Ampullenspritze mit einem würfelförmigen Kolben (12) in einem hohlen, ebenfalls würfelförmigen Ampullenbehälter (10).



Figur 18: Würfelförmiger Kolbenstopfen, 1951 (aus US 2 552 100 A).

Zur Abdichtung wird im grau hinterlegten Bereich (13) ein Dichtungsfilm aus Kollodium oder Paraffin aufgebracht.

Aus der US 2 566 420 A (1951) ist bekannt, dass der dortige Gummikolbenstopfen in einer Glasampulle sitzt und in einer Rinne eine kleine Menge an üblichem Gleitmittel enthält. Neben Glycerin und Ethanol wird in diesem Zusammenhang auch eine Mischung aus Erdnussöl und Lösungsmittel genannt. Die umlaufenden Rinnen des Kolbenstopfens bei einer anderen Ausführungsform dienen dabei nicht nur zur Lagerung des Lösungsmittels. Ihre Begrenzungskanten definieren vielmehr vier gleich große Zwischenräume, deren Gesamtlänge der Länge von fünf Zwischenräumen entspricht, die durch Linien auf dem Glaszylinder der Ampulle gebildet werden. Auf diese Weise ist eine Feineinstellung bei der Dosierung des Medikaments in der Größe von ¼, ½ oder ¾ des Abstandes zweier Linien auf dem Glaszylinder der Ampulle möglich.

Die US 2 574 964 A (1951) hat es sich zur Aufgabe gemacht, die bekannten Nachteile der Glasspritzen (häufiges Brechen der Spritzen bei Herstellung, Sterilisation und Gebrauch; hoher Preis) zu beseitigen. Das geschieht dadurch, dass die komplette Spritze aus inertem Plastik gebildet ist, welches hitze- und dampfbeständig, sowie unzerbrechlich ist. Spritzenzylinder und Kolben sind aus Polystyrol gefertigt. Als Handelsbezeichnungen werden polystyrene-8, Lustron und Victron genannt. Nylon ist ebenfalls ein geeignetes Material. Der Kolben kann zur besseren Abdichtung noch mit Dichtungsringen aus Gummi versehen sein.

Die US 2 575 425 A (1951) offenbart eine leckdichte Plastikspritze aus Nylon, die durch Kochen, im Autoklaven oder chemisch zerstörungsfrei sterilisiert werden kann.

Auch die Mehrkammerspritze nach der US 2 591 046 A (1952) schafft bewusst einen undichten Bereich zwischen den Kammern, in dem der Hilfsstopfen keine dichtende Wirkung mehr besitzt. Diesmal sind in der Wandung des Spritzenzylinders (spiralförmige) Passagen vorgesehen, durch die die Flüssigkeit aus der einen Kammer seitlich am Stopfen vorbei in die Kammer mit dem Medikament strömen kann. Aktuelles Problem im vorliegenden Fall ist das Suspendieren von Penicillin G in Wasser kurz vor der Injektion.

Die US 2 592 381 A (1952) geht von einem Glaszylinder aus, in dem sich ein Kolbenstopfen aus Elastomermaterial bewegt. Beispiele geeigneter Elastomere sind Gummi, Butadien-Styrol-Copolymere, Butadien-Acrylnitril-Copolymere, Isobutylen-Diolefin-Copolymere, Polychloropren oder organische Polysulfide.

Die US 2 618 264 A (1952) beschäftigt sich mit dem Problem festsitzender Kolbenstopfen und schlägt vor, in der Glaszylinderwandung mehrere radial umlaufende Bereiche geringerer Wandstärke unterzubringen, die mit Gleitmittel gefüllt sein sollen. Als Gleitmittel kann das zu verabreichende Medikament selbst eingesetzt werden. Die Gestalt der einzelnen Reservoiröffnungen in diesen Bereichen kann dabei zum Beispiel kornförmig oder ellipsenförmig sein.

Bereits 1944 offenbarte die US 2 361 617 A eine Glasspritze mit einem Kolbenstopfen, der eine Rinne für einen Dichtungsring aufweist (s. o.). Bei dieser Variante war es nicht mehr nötig, Glaszylinder und Glaskolben individuell aufeinander abzustimmen (Beide Bauteile hatten dieselbe Seriennummer. Das eine Bauteil war sofort nutzlos, wenn das andere Bauteil zum Beispiel wegen Glasbruchs nicht mehr verwendet werden konnte). Die US 2 629 376 A (1953) hat eine Glas- oder Plastikspritze zum Gegenstand, die dadurch dicht wird, dass in einer Rinne des Kolbenstopfens austauschbar ein elastischer Ring vorgesehen ist, der sich über seinen Eigendruck dichtend an die Zylinderinnenwand anpresst. Während zuvor noch der Glaskolben selbst die Unregelmäßigkeiten der Zylinderinnenwand durch hohe Passgenauigkeit ausgleichen musste, übernimmt hier der zusammendrückbare Gummiring diese Aufgabe. Unterschiedliche Querschnittsformen des Gummirings (halbkreisförmig, kreisförmig, polygonal, sich abflachend, hohl) werden angesprochen.

Schrift US 2 641 093 A (1953) schlägt vor, Glaszylinder und Glaskolben jeweils auf einen Standarddurchmesser abzuschleifen und daran anschließend die Glasoberfläche mit einem optischen Pulver in einer chemischen und/oder Öllösung beziehungsweise einer „diamond solution" soweit zu polieren, dass die Abweichung vom vorgegebenen Durchmesser nur mehr ± 0,0001 inch beträgt, eine Größenordnung, die bereits 1946 (s. o.) ganz ohne Schleifprozess angestrebt worden ist. Derartig polierte Spritzenbauteile hielten im zur Spritze zusammengebauten Zustand wenigstens 30 s lang Drücke von 20 bis 70 lbs./sq. in. aus, ohne leck zu werden.

Die US 2 736 992 A (1956) fasst im Zusammenhang mit der Fertigung von Glasspritzen ebenfalls zusammen: Der Kolbenstopfen wurde grob vorgeschliffen und erhielt danach noch einen oder mehrere Feinschliffe. Die Bohrung des Glaszylinders wurde in mehreren Schritten geschliffen, wobei Schleifmaterialien zunehmender Feinheit eingesetzt wurden. Ein für einen Zylinder geeigneter Glaskolben wurde ausgesucht, und so angepasst, dass er über einen kurzen Bereich (1/5 der Länge des Kolbens) Dichtungszwecke erfüllte. Nach entsprechenden Reinigungsschritten erhielt man einen zu einem Glaszylinder passenden Glaskolben. Derartige Glasspritzen waren jedoch regelmäßig mit Reinigungsmitteln zu säubern. Diese griffen den Dichtungsbereich an, der dann ein Lecken nicht mehr verhindern konnte. Die Spritze musste ersetzt werden. Nach der Erfindung der US 2 736 992 A wird ein Glaskolben durch Schleifen und Polieren hergestellt, der über seine gesamte Länge in abdichtendem Kontakt mit dem Glaszylinder sein soll, also einen konstanten Durchmesser aufweist. Daraufhin erfolgt die Herstellung des Zylinders mit Hilfe eines Mandrels über einen Schrumpfvorgang, also ohne Schleifen und Polieren. Dabei kommt es zu Unregelmäßigkeiten an der Zylinderinnenseite durch minimal in den Innenraum hineinragende Glasteilchen. Um diese Glasteilchen abzuschleifen, wird der Glaskolben mit einer dünnen Schicht eines feinen Schleifmittels versehen, und so im Zylinder hin und herbewegt. Die US 2 792 833 A (1957) verfeinert die genannte Methode noch weiter. Die US 2 776 661 A (1957) behandelt dasselbe technische Problem.

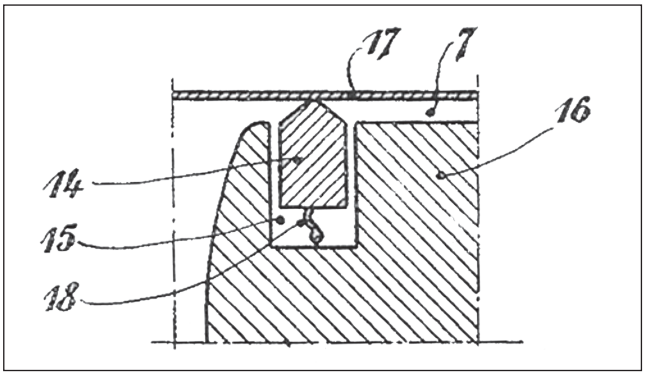
Die US 2 756 748 A (1956) betrifft eine Plastikspritze, bei der der Zylinder und auch der Kolben aus Nylon gefertigt sind. Die Dichtungsaufgabe übernimmt ein Gummiring, der eventuell noch mit Silikonöl beschichtet ist.

In der Regel ist der Dichtungsring am Kolben befestigt und wird mit der Kolbenstange im Spritzenzylinder bewegt. Die Kolbenstange kann sich jedoch auch durch einen, am Spritzenzylinder befestigten Dichtungsgummi hindurch bewegen. Ein gutes Beispiel hierfür liefert die US 2 771 880 A (1956).

Aus der US 2 812 763 A (1957) ist eine Plastikspritze bekannt, deren Zylinder aus Polyethylen und deren Kolbenstopfen aus Gummi gebildet ist.

Die US 2 882 899 A (1959) offenbart eine Spritze mit einem leichten Plastikkolben, der vier Rinnen in Längsrichtung (zur Aufbewahrung von Nadeln) aufweist und darüber hinaus eine umlaufende Rinne in Umfangsrichtung besitzt, in die ein Dichtungsmaterial eingefügt ist. Der Plastikkolben ist weiß oder besitzt eine helle Farbe. Wiederholtes Sterilisieren bewirkt ein Vergilben des Kolbens. Daher ist bei der US 2 882 899 A alternativ auch ein Metallkolben mit einem Dichtungsring vorgesehen. Es wird ferner ein verbesserter Dichtungsring (14) vorgeschlagen, der im Spritzenzylinder (17) sowohl

gleitfähig sein soll, als diesen auch gut abdichten können muss. Mitverantwortlich hierfür ist der flexible dünnwandige Bereich (18) des Dichtungsringes (14). Figur 19 zeigt dessen Lage in der Rinne (15) des Kolbenstopfens (16).



Figur 19: Dichtungsring am Plastikstopfen, 1959 (aus US 2 882 899 A).

Die US 2 895 773 A (1959) will die Passungenauigkeiten zwischen Kolben und Spritzenzylinder über Stopfen ausgleichen, die einen oder mehrere Dichtungsringe aufweisen. Die Stopfen sind dabei mit einer elastischen Hülle versehen, die in Umfangsrichtung und in Längsrichtung gedehnt werden kann. Die Anpassung des Stopfens an unterschiedlich große Spritzenzylinder erfolgt teils von außen durch entsprechende Manipulationen an der Kolbenstange, ein Prinzip, das allerdings schon seit spätestens 1882 (vergleiche Figur 4) Anwendung findet.

Die US 2 902 034 A (1959) offenbart eine weitere Plastikspritze, bei der der Spritzenzylinder aus relativ starrem Material besteht, während der Kolben aus einem flexiblen Kunststoff gefertigt ist. Erneut werden die bekannten Nachteile der ansonsten leckdichten Glasspritzen aufgezählt. Nachteilig, weil teils undicht und schlecht zu sterilisieren, seien auch die bis dahin schon aus dem Stand der Technik bekannten Plastikspritzen. Die Erfindung will eine leckdichte Plastikspritze schaffen, wobei deren Zylinder aus Styrol und deren Kolben aus Polyethylen besteht.

Die Spritze nach der US 2 902 035 A (1959) schlägt für eine Glasspritze, in der ein Metallkolben bewegt wird, vor, am Kolben mehrere Gummiringe zur Abdichtung und als Stoßschutz anzubringen, um den empfindlichen Glaszylinder nicht durch eine seitliche Bewegung zu zerbrechen.

Die US 2 933 087 A aus dem Jahr 1960 zeigt eine Glasspritze, die kleine Volumina unter hohem Druck (150 lbs./sq. in.) länger als eine halbe Minute leckdicht ausstoßen kann. Im Glaszylinder wird hierfür ein nachgiebiger Kolben aus Stahlfederdraht geführt, der an seinem vorderen Ende verchromt ist.

7. US-Patente 1961 bis 1980

Die US 3 013 557 A (1961) hat eine Spritze zum Gegenstand mit einem nachgiebigen Spritzenzylinder aus Polyethylen, der sich gegen einen vom Durchmesser her etwas größeren, relativ härteren Kolbenstopfen aus Polyethylen oder Nylon abdichtend anpresst.

Die Plastikeinmalspritze der US 3 028 862 A (1962) umfasst einen Spritzenzylinder aus Styrol oder Methylstyrol. Da Polystyrol wenig wärmebeständig ist (beschleunigte Alterung ab 55 °C), ist eine erneute Hitzesterilisierung des Spritzenzylinders der Einmalspritze nicht möglich. Der Kolben besteht ebenfalls aus Polystyrol oder Polymethylstyrol, der Kolbenstopfen ist aus (synthetischem) Kautschuk. Er weist eine für einen Stopfen typische Gestalt mit zwei angeformten Dichtungsringen auf, die die Kontaktzone mit dem Spritzenzylinder bilden. Der Stopfen kann mit Silikonöl als Schmiermittel überzogen werden.

Ein Problem bei der automatischen Ampullenherstellung war es laut der US 3 045 674 A (1962), den Kolbenstopfen mit der richtigen Seite nach vorne in den Glaszylinder einzusetzen, so dass die Kolbenstange daraufhin in die Öffnung in der anderen Seite des Kolbenstopfens eingreifen kann. Um diese Fehlerquelle zu vermeiden, wendete man im Fertigungsablauf Erkennungsmethoden an, die die Position der unsymmetrischen Kolbenstopfen überprüften. Das war teuer, kompliziert und brachte Verzögerungen mit sich. Die Erfindung geht dahin, dass sie symmetrische Kolbenstopfen vorschlägt, bei denen es egal ist, mit welcher Seite sie zuerst in den Glaszylinder eingesetzt werden.

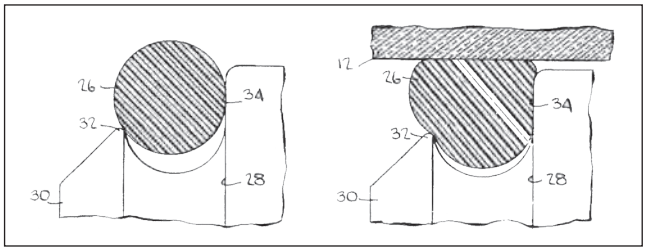
Die US 3 050 059 A (1962) strebt Verbesserungen bei billigen Plastikeinmalspritzen an. Der Spritzenzylinder solcher Spritzen kann aus Polystyrol, Poly-α-Methylstyrol (Cymac), Celluloseacetat, Methylmethacrylat oder festem Polyvinylchlorid hergestellt werden. Die bevorzugte Wandstärke liegt dabei zwischen 0,040 und 0,070 inch. Bei Wandstärken unter 0,040 inch wird das Material zu spröde, neigt dazu, Spannungen aufzubauen und Risse zu bilden. Die genannten Materialien sind transparent und sterilisierbar. Lösungsmittel und bestimmte Medikamente können sie jedoch anlösen, was für den Patienten gefährlich ist. Polypropylen ist gegenüber Lösungsmitteln und

Medikamenten beständig. Es ist jedoch nicht transparent sondern opak. Die Erfindung geht von Polypropylenzylindern aus mit einer Wandstärke von nur noch 0,015 bis 0,025 inch. In diesem Bereich ist der Zylinder überraschenderweise transparent, aber noch stark genug, die Druckbelastung auszuhalten. Die Kolbenstange ist ebenfalls aus Plastik. An ihrem vorderen Ende wird ein fingerhutähnlicher Kolbenstopfen aus Lösungsmittel-resistentem Kautschuk aufgeschnappt.

Die US 3 059 639 A (1962) baut auf dem Stand der Spritzentechnik auf, der die letztlich in Handarbeit zueinander passend hergestellten individuellen und nicht austauschbaren Paare von Glaszylinder und Glaskolben beschreibt. Es war auf diesem Gebiet der Spritzentechnik zwar angestrebt worden, die Austauschbarkeit dadurch zu erreichen, dass man Spritzenzylinder über einen Schrumpfungsprozess in engen Toleranzbereichen herstellte. Das nutzte jedoch insofern nur wenig, als im Gegenteil die entsprechenden engen Toleranzbereiche bei den Glaskolben nur sehr schwer erhältlich waren. Der Versuch, die Austauschbarkeit zu bewerkstelligen, indem man Gummiringe in umlaufende Rinnen des Glaskolbens einsetzte, war zwar erfolgreich, jedoch zersetzte sich der Naturkautschuk bei der Sterilisierung durch die Hitze. Auch wurde der Kautschuk durch Chemikalien angegriffen. Naturkautschuk schwillt ferner bei Gebrauch an und verliert seine Elastizität und die Schmiermittel am Dichtungsring verschwinden nach wiederholter Sterilisation. Die US 3 059 639 A beschreibt einen Spritzenzylinder aus korrosionsbeständigem Glas, dessen Durchmesser in bekannter Weise über einen Schrumpfungsprozess an einem hohlen Metallmandrel, der kleine Öffnungen aufwies, mit Hilfe von Unterdruck festgelegt wurde. Die dazu passende Kolbenstange kann aus Nylon, oder aber auch aus Glas, Metall oder einem anderen Kunststoff bestehen. Das vordere Ende der Kolbenstange besteht aus Teflon® (DuPont), das mit dem anderen Kolbenstangenmaterial verklebt, verschraubt oder verrastet sein kann. Die Kolbenstange kann insgesamt aus Teflon (Tetrafluorethylen) bestehen, oder aber einfach einen O-Ring aus Teflon aufweisen. Der aus Teflon bestehende Teil der Kolbenstange, beziehungsweise der Teflonring ist von seinem Außendurchmesser her nur 0,002 inch größer als der Innendurchmesser des Glaszylinders.

Teflon ist thermisch stabil bis über 300 °C und somit hitzesterilisierbar. Der Reibungskoeffizient von Teflon gegenüber poliertem Stahl ist viermal geringer als der von Graphit oder MbS_2. Teflon ist chemisch inert gegenüber Medikamenten und chemischen Sterilisier- und Reinigungsflüssigkeiten. Teflon kann wiederholt entspannt und komprimiert werden, ohne die Fähigkeit zu verlieren, die Zylinderinnenwand abzudichten. Teflon, das selbst über längere Zeit Nässe ausgesetzt ist, absorbiert kein Wasser. Es wird daher nicht unsteril oder aber schwillt an. Teflon ist vergleichsweise weich. Der vom Durchmesser kaum größere Kolben kann problemlos in den Glaszylinder eingesetzt werden. Teflon nimmt nach Beanspruchung seine ursprüngliche Form wieder ein. Es ist ungiftig. Bei der Bewegung im Spritzenzylinder erfolgt ein gewisser Abrieb des Teflons, so dass ein Film von Teflon auf der Innenseite des Spritzenzylinders gebildet wird, der als Schmiermittel wirkt. Dieser wird bei der Sterilisation und bei Reinigungsprozessen im Gegensatz zu Mineralölfilmen nicht wieder entfernt.

Der O-Ring (26) aus Teflon kann vollkommen, und somit fest in der umlaufenden Rinne (28) eingesetzt sein, wodurch eine vergleichbare Wirkung erzielt wird wie im Falle eines zum Beispiel angeklebten Teflonstopfens. Der O-Ring aus Teflon (26) wird in diesem Fall beim Einsetzen in den Zylinder (12) komprimiert, ohne gleichzeitig deformiert zu werden. Ändert man die relativen Größenordnungen von O-Ring (26) und Rinne (28) zueinander in der Weise, dass eine Deformation des Teflons möglich wird, kann bei gleicher Abdichtungswirkung die Kompressionskraft auf den Außendurchmesser des O-Ringes (26) verringert werden. Nach der Erfindung der US 3 059 639 A ist der Innendurchmesser des Teflon O-Ringes (26) größer als der Außendurchmesser der Rinne (28), so dass der O-Ring (26) nicht fest in die Rinne (28) eingesetzt ist. Außerdem ist der O-Ring (26) breiter als die Rinne (28), so dass er auch deshalb übersteht. Darüber hinaus ist der Außendurchmesser des Ringes (26) größer als der Innendurchmesser des Glaszylinders (12). Der innerhalb des Zylinders (12) komprimierte O-Ring aus Teflon (26) sitzt somit nicht passgenau in der Rinne (28), ist aber gerade deswegen leichter beweglich, während er komplett abdichtet. Die Deformation erfolgt im Wesentlichen radial nach innen in die Rinne (28). Figur 20 zeigt beide Situationen. Die US 3 059 639 A gibt zudem in Form eines Beispieles exakte Maßangaben für die einzelnen Bauteile an.



Figur 20: Teflon-Ring am Glaskolben, 1962 (aus US 3 059 639 A).

Die US 3 101 084 A (1963), die sich auf eine Glasspritze zur Abgabe sehr kleiner Volumina bezieht, setzt die Nadel nicht nur zum Einstechen, sondern auch als Reservoir ein. In der Nadel aus Edelstahl oder einer Platinlegierung bewegt sich der präzise in diese eingepasste Kolben, der aus Wolfram oder einem verchromten Draht besteht.

Die US 3 110 309 A (1963) diskutiert die Verwendung von Plastikampullen, die im Gegensatz zu den Glasampullen den Ampullenboden nicht in Form eines weiteren Gummistopfens, sondern ebenfalls, einstückig angeformt, aus Plastik aufweisen. Die Injektionsnadel durchstößt mit ihrer hinteren Spitze diesen Plastikboden, um die Fluidverbindung herzustellen. Ein Plastikboden mit zu geringer Wandstärke neigt vor allem bei dem in der Ampulle herrschenden hohen Druck mit großer Wahrscheinlichkeit dazu, undicht zu werden und zu zerbrechen. Einen zu dicken Ampullenboden kann die Nadel jedoch nicht durchstoßen. Die US 3 110 309 A schlägt neben weiteren baulichen Vorkehrungen einen dünnen Ampullenboden aus einem harten Plastikmaterial, wie zum Beispiel Polypropylen, Polyethylen oder Nylon vor.

Einmalspritzen mit einem Spritzenzylinder und einer Kolbenstange aus Polystyrol, sowie einem Kolbenstopfen aus Gummi an der Kolbenstange werden durch gewisse Medikamente angegriffen, so dass das Material anschwillt, oder aber für einen Patienten toxische Lösungen entstehen. Der Gummistopfen war hier das Hauptproblem, so dass zunächst versucht wurde, alle Bauteile der Plastikspritze aus solchen Kunststoffmaterialien herzustellen, die mit möglichst vielen der zu injizierenden Medikamentenflüssigkeiten verträglich waren. Viele der verwendeten Materialien waren jedoch lichtundurchlässig, deformierbar, schlecht abdichtend oder aber hatten zu große Reibungskoeffizienten. Die US 3 135 260 A (1964) schlägt daher einen aufschnappbaren Kolbenstopfen aus sehr weichem „low density polyethylene" zusammen mit einem Schmiermittel (Polytrifluorchlorethylen) vor, während die übrigen Bauteile der Plastikspritze aus einem anderen geeigneten festen Plastikmaterial sind. Polytrifluorchlorethylen konnte unter dem Handelsnamen Fluorolube® von der Hooker Chemical Corporation oder aber unter dem Namen Kel F® von der Minnesota Mining and Manufacturing Company bezogen werden. Es war den anderen Schmiermitteln, wie zum Beispiel Silikonfett oder Fluor-Silikonfett, zu dieser Zeit weit überlegen.

Die US 3 147 753 A (1964) offenbart einen Kolbenstopfen aus inertem und bis 120°C hitzebeständigem synthetischen Kautschuk, der an der Kolbenstange befestigt wird.

Die US 3 150 801 A (1964) offenbart eine Spritze mit einem Glaszylinder, in dem ein Edelstahlkolben bewegt wird. Dieser ist mit einer dünnen Teflonschicht versehen. Am vorderen Ende der Kolbenstange ist ein Teflonkopf befestigt, der im Durchmesser zirka 0,001 bis 0,003 inch größer ist als der Innendurchmesser des Glaszylinders.

Die US 3 151 617 A (1964) hat eine Spritze aus Nylon zum Gegenstand, bei der die Nylonkolbenstange einen festsitzenden O-Ring aus Gummi in einer relativ breiten Rinne beherbergt, so dass der Gummi des Ringes bei Druckbelastung seitlich Platz zum „Fließen" hatte.

Die US 3 216 616 A (1965) betrifft eine Spritze, deren Glaszylinder über einen Schrumpfungsprozess ohne nachträgliches Schleifen einen Durchmesser von nur 0,0206 inch ± 0,0002 inch aufweist („precision bore glass tubing"). Die Kolbenstange, die in diesem Glaszylinder frei beweglich ist, ist aus Wolframdraht mit einem Durchmesser von 0,020 inch.

Die leckdichte Spritze der US 3 281 023 A (1966) besteht aus einem Glaszylinder, und einer Metallkolbenstange, an deren vorderem Ende ein korrosionsbeständiger Teflonstopfen angebracht ist.

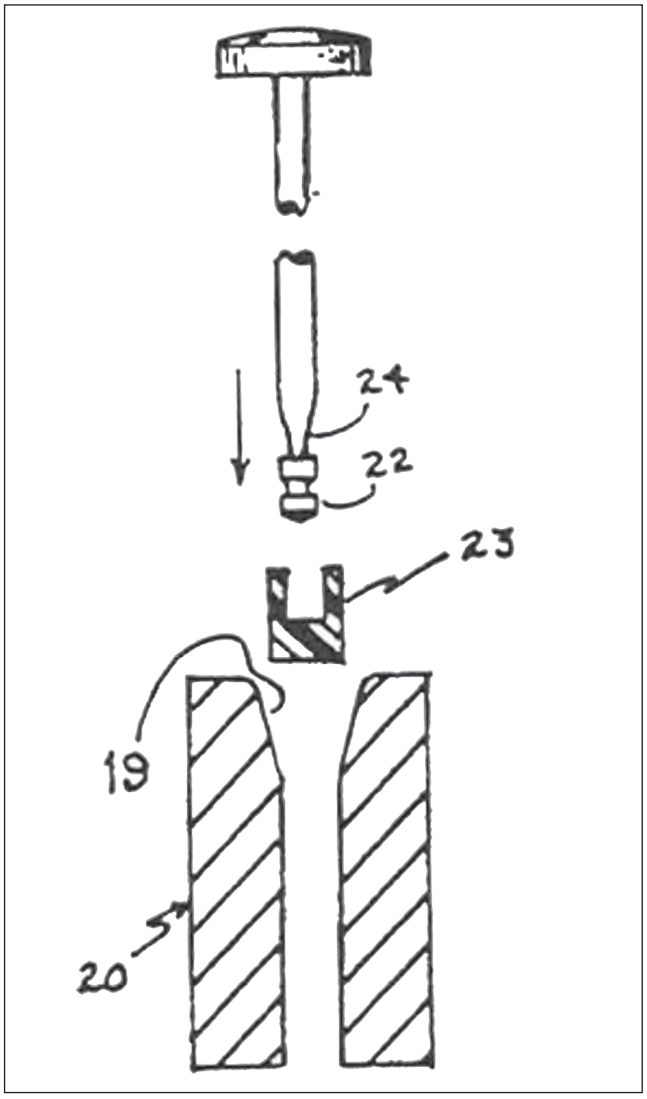
Aus der US 3 325 062 A (1966) ist eine Präzisionsspritze aus Edelstahl bekannt, mit der Gas in Systeme mit hoher Temperatur und hohem Druck injiziert werden kann. Aufgrund des hohen Druckes eines solchen Systems wirkt beim Einspritzen ein hoher Gegendruck auf den Kolbenstopfen. Gas wird zwischen den Stopfen und den Zylinder gedrückt. Um dies zu vermeiden, besteht der Kolbenstopfen nach der Erfindung aus (synthetischem) Gummi, Kautschuk, Guttapercha, Neopren, Thiokol, Koroseal, Butylgummi, Nylon, Polypropylen, aber auch aus Eisenlegierungen oder Stahl. Gleitmittel können zugesetzt werden, oder aber es werden Polyfluorethylene (Teflon) eingesetzt, die selbst Gleitmittel-Eigenschaften aufweisen. Der Kolbenstopfen ist ferner gasgefüllt (N_2 oder He). Dieses Gas steht unter Druck, und presst den Kolbenstopfen mit Drücken zwischen 30 und 1000 lbs./sq. in. zur Abdichtung an die Zylinderinnenwand. Dabei wird der Druck im Inneren des Stopfens in Abhängigkeit von dem zu erwartenden Gegendruck des Systems eingestellt, in das injiziert werden soll.

Die US 3 327 904 A (1967) bevorzugt einen Kolbenstopfen aus Teflon, während die Verwendung von Polyethylen, Nylon, Polypropylen, Kautschuk oder Siliconkautschuk nachteilig sein soll.

Die Spritze nach der US 3 353 718 A (1967) besitzt einen Glaszylinder mit einer glatten Präzisionsbohrung und einem Innendurchmesser von 0,1920 inch und einer Wandstärke von 0,100 inch. Die Kolbenstange aus Metall umfasst an ihrem vorderen Ende einen Teflonstopfen mit zwei angeformten Teflonringen, die einen Durchmesser von 0,194 inch bis 0,196 inch in ihrer nicht komprimierten Form besitzen, also etwas größer sind als der Innendurchmesser des Glaszylinders.

Die US 3 561 596 A (1971) bevorzugt bewusst einen Gummistopfen mit einer oder mehreren Wulströndern in einem Glaszylinder, um die ansonsten nötigen geringen Toleranzen bei einem herkömmlichen geschliffenen Glaskolben zu vermeiden.

Die US 3 577 850 A (1971) offenbart eine Präzisionsspritze, die im Mikroliterbereich bei hohen Temperaturen und Drücken leckfrei und genau arbeitet. Dichtungen verlieren allzu schnell ihre Elastizität. So bilden die Polytetrafluorethylene (Teflon) anfangs sehr gute Dichtungen, die sich jedoch recht bald in der Kälte verformen und zu Undichtigkeiten führen. Ein Versuch, die Dichtwirkung zu regenerieren, bestand darin, den Teflonring in heißem Wasser wieder auszudehnen, was jedoch unbefriedigend war. Die aus der US 3 325 062 A bekannten Dichtungen verlieren offensichtlich ihre Wirksamkeit, wenn der Durchmesser des Kolbens unter 0,042 inch absinkt. Diese Durchmesser sind jedoch bei manchen Präzisionsspritzen notwendig. Somit sind besondere Dichtungen hierfür erforderlich. Die Erfindung macht sich die Eigenschaft zunutze, dass manche speziell behandelte Kunststoffe eine Art Gedächtnis ihrer früheren größeren Gestalt haben und daher beständig versuchen, diese durch Ausdehnung wieder zu erreichen. Hierunter fallen Polyamide, Polyester, Polyvinylchloride, Nylon, Perlon®, Terylen® und bevorzugt Teflon. Diese Kunststoffe werden bis unter ihren Erweichungspunkt erhitzt (zirka 200 °C bis 300 °C), und dann als Kolbenstopfen in der Art einer dünnen Haut (0,001 inch bis 0,005 inch) auf einem Edelstahlkolben mit einem Durchmesser von 0,025 inch bis zu 0,042 inch in einen Spritzenzylinder eingesetzt, in dem sie aufgrund ihrer Expansionstendenz eine lecksichere Abdichtung bewirken. Der normalerweise bei Teflon unter Belastung auftretende Kaltfluss hat kaum einen bleibenden negativen Einfluss auf die Dichtwirkung des Kolbens. Figur 21 zeigt die Kunststoffkappe (23), die auf das vordere Ende (22, 24) des Edelstahlkolbens aufgebracht werden soll.



Figur 21: Teflon-Dichtungshaut, 1971 (aus US 3 577 850 A).

Die US 3 581 956 A (1971) offenbart eine Glasspritze mit einem Edelstahlkolben, an dessen vorderem Ende ein Teflonabschnitt als Kolbenstopfen angebracht ist. Darüber hinaus weist der Kolbenstopfen eine umlaufende Rinne auf, in der, ohne überzustehen, verkantet ein O-Ring aus Neopren® oder Teflon oder ein Viton® O-Ring sitzt, welcher selbst den Spritzenzylinder jedoch nicht abdichtet, sondern einen Teflonflansch zur Abdichtung an den Spritzenzylinder drückt. Der O-Ring wirkt dabei rein als eine Feder.

Aus der US 3 597 113 A (1971) ist eine Edelstahlspritze mit einem Edelstahlkolben bekannt, an dessen vorderem Ende zwei Einbuchtungen mit Teflonringen zur Abdichtung vorgesehen sind.

Die US 3 628 523 A (1971) zeigt einen Spritzenzylinder aus Bleiglas mit einem Edelstahlkolben, der mit einem Elastomermaterial überzogen ist. Die Spritze wird zur Injektion radioaktiver Substanzen in den menschlichen Körper verwendet. Um das medizinische Personal bei der Verabreichung dieser Substanzen vor γ- und Röntgenstrahlen zu schützen, wird Bleiglas einer bestimmten Dichte eingesetzt. Die Wandstärke des Bleiglaszylinders liegt zwischen 2 und 5 mm. Der Kolben weist eine Kolbenspitze aus weichem, elastischem Teflon, Polyethylen oder Polypropylen auf. Dabei kann es sich um eine dünne Teflonschicht, um einen Stopfen aus Teflon, oder aber um einen Teflonstopfen mit Teflon Dichtungsringen handeln.

Die US 3 656 480 A (1972) schlägt eine leichte, wiederholt sterilisierbare Plastikspritze mit einem zumindest teilweise aus geschäumtem Plastik bestehenden Kolben vor. Die Plastikschaumstruktur hat bevorzugt geschlossene Zellen und ist wegen der dünnen Zellwände und des darin eingeschlossenen komprimierbaren Gases elastisch. Eine gewisse Rigidität des Plastikmaterials ist nötig, um den Bereich der Kolbenstange zu stabilisieren. Beispiele für das Kunststoffmaterial stammen aus dem Bereich der Polyolefine oder Polyvinyle (Polypropylen, Polyethylen, Polyvinylchlorid, Polystyrol, Polytetrafluorethylen, Polyurethan, Celluloseacetat, Phenolformaldehyd, Ethylen Vinylacetat, Ethylen-Ethylacrylat, Silikongummi, ABS). Nur der Bereich des Kolbens, der zur Abdichtung dient, wird mittels eines Schäumungsmittels in der Hitze aufgeschäumt.

Die US 3 766 918 A (1973) schlägt einen Stopfen aus Butadien-Styrol der Handelsmarke Krayton® vor.

Die US 3 831 601 A (1974) beschäftigt sich mit dem Problem des Kaltflusses von Teflon. Ein Teflonstopfen ist durch Hineinschrauben einer Kolbenstange derart ausdehnbar, dass das Teflon, welches sich durch Kaltfluss von der Zylinderinnenwand wegbewegt hat, wieder in abdichtenden Kontakt mit dieser kommt.

Bei der Spritze der US 3 930 492 A (1976) wird die Zylinderinnenseite mit hochviskosem (30 000 cSt) Silikon als Gleitmittel überzogen. Die US 4 030 496 A (1977) zeigt einen Spritzenzylinder aus transparentem Polysulfon oder Polycarbonat, in dem ein Kolbenstopfen bewegt wird, der einen L-förmigen Gleitring aus Teflon aufweist, unter welchen in eine Rinne ein hitzebeständiger Dichtungsring eingesetzt ist, der selbst nicht in Kontakt mit der Zylinderinnenwand steht.

Die US 4 074 715 A (1978) beschäftigt sich mit der sog. Mikrometer-Injektionstechnik. Durch Rotation des Kolbens bei gleichzeitiger leichter Druckausübung können Distanzen im Mikrometer Bereich zurückgelegt werden. Oftmals dreht sich jedoch der an der Kolbenstange befestigte Kolbenstopfen nicht mit. Die Erfindung besteht in der verdrehfesten Montage des Kolbenstopfens an der Kolbenstange. Die Kolbenstange besteht aus einem rigiden Kunststoff, wie zum Beispiel Polyethylen, Polypropylen, Polycarbonat, Polyurethan oder Polyacrylat. Als Stopfenmaterial mit Gleitmitteleigenschaften wird zum Beispiel Polyurethan, Polybutadien-Kautschuk, oder Butadien-Styrol mit einem Fettsäureamid als Füller (0,01 bis 1,0 Gew. %) eingesetzt. Dadurch werden 50 % an Silikongleitmittel eingespart.

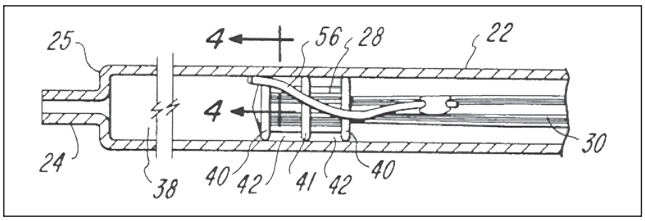
Die US 4 215 701 A (1980) behandelt Glasspritzen, deren Kolben extrem leichtgängig ist. Als ein Beispiel wird die Abnahme von arteriellem, also sauerstoffreichem Blut erwähnt, um dieses auf seinen Gehalt an Gasen hin zu untersuchen. Eine arterielle Blutabnahme erfolgt typischerweise mit einer Glasspritze, deren geschliffener Glaskolben genauestens (0,0007 inch Toleranz) in den Glaszylinder passt. Zunächst wird eine Heparin-Lösung aufgezogen, um verbleibende Restluft aus der Spritze zu vertreiben. Diese Lösung wirkt gleichzeitig unter Filmbildung als Gleitmittel für den Glaskolben, der äußerst leichtgängig im Glaszylinder bewegt werden kann. Das arterielle Blut muss daher noch nicht einmal aktiv in die Spritze aufgezogen werden. Es reicht der Blutdruck aus, den Glaskolben aus dem Zylinder heraus zu bewegen. Ein Problem dabei ist, dass der Kolben versehentlich ganz heraus getrieben wird, herunterfällt und zerbricht. Die widerstandsfreie Bewegung des Glaskolbens in einer Glasspritze ist auch wesentlich bei der sog. „loss of resistance technique" in der Epiduralanästhesie. Eine mit Salzlösung gefüllte und mit einer 16 Gauge Nadel versehene Glasspritze wird vorsichtig in den Epiduralraum im Wirbelkanal eingebracht. Beim Durchstechen des sog. „ligamentum flavum", eines die Wirbelsäule stabilisierenden gelben Bandes, spürt der Arzt an seinem Daumen einen plötzlichen Widerstandsverlust („loss of resistance"), so dass der leichtgängige Glaskolben die in der Spritze enthaltene Salzlösung sofort ausschüttet. Plastikkolben mit einem elastischen Kolbenstopfen sind im Gegensatz zu den Glasspritzen nicht mehr leichtgängig. Der Plastikkolben muss bei der arteriellen Blutabnahme manuell herausgezogen werden. Geschieht dies nicht fachmännisch, kann es zum Beispiel zum Kollaps der Arterie führen. Die Erfindung der US 4 215 701 A schlägt die Verwendung eines

speziellen elastischen Kolbenstopfens vor, so dass sich die Spritze auch bei niedrigem arteriellem Blutdruck von alleine füllt. Die Shore A Härte eines Kolbenstopfens kann zwischen 0 und 100 liegen, wobei eine hohe Zahl eine große Härte bedeutet. Hier ist sie im Bereich von 35 bis 75. Gummi, Butylkautschuk oder Silikonkautschuk sind geeignete Materialien.

8. US-Patente 1981 bis 1990

Die US 4 256 461 A (1981) offenbart eine Spritze, deren Kolbenstopfen aus Polyvinylchlorid eine Vielzahl kleiner, nur in einer Richtung gasdurchlässiger, porenähnlicher Öffnungen aufweist. Durch die Ventileigenschaften des Stopfens ist ein rückwärtiger Flüssigkeitsaustritt nicht mehr möglich.

Bei der Spritze nach der US 4 257 426 A (1981), die zur Blutabnahme dient, wird über einen Kanal entlang des Kolbenstopfens ein Vakuum zum Ansaugen des Blutes in den Spritzenzylinder erzeugt. Dieser Kanal entsteht dadurch, dass ein Baumwoll- oder Nylonfaden entsprechender Dicke den Dichtungsbereich des Kolbenstopfens an der Zylinderinnenwand unterbricht und dessen Dichtungslippen zurückdrängt. Sobald das angesaugte Blut den Kolbenstopfen erreicht hat, kann der Faden durch Drehen des Stopfens aufgewickelt werden. Dabei wird er aus dem Dichtungsbereich entfernt und die Dichtlippen des Stopfens sind wieder wirksam. Figur 22 zeigt den Faden (56), der die Dichtlippen (40, 41) zurückdrängt. Die US 4 326 540 A (1982) und die US 4 340 067 A (1982) betreffen verwandte Vorrichtungen.



Figur 22: Zeitweise undichter Stopfen zur Vakuumbildung, 1981 (aus US 4 257 426 A).

Die US 4 303 070 A (1981) arbeitet mit einem Kolbenstopfen aus einem Styrol/Ethylen-Isobutylen Blockpolymeren, wobei die Styrolblöcke am Anfang und Ende der Polymerkette sitzen. Das durchschnittliche Molekulargewicht des Blockpolymeren liegt zwischen 50 000 und 200 000. Der Styrolanteil liegt bei 2–20 Mol %, damit der Kolbenstopfen nicht zu hart wird. Die Kompressibilität des Polymeren im Kontaktbereich mit der Zylinderinnenwand wird über die Größe der Kontaktfläche eingestellt, um neben der Dichtigkeit des Stopfens eine hohe Gleitfähigkeit zu erzielen. Die Herstellung des Blockpolymeren über ein „lebendes" Polymer wird im Detail beschrieben, wobei Hydrierungen von ungesättigten Doppelbindungen gefordert werden, und Zusätze wie zum Beispiel Polyolefinharzanteile, flüssiges Paraffin, Antioxidantien wie Dibutylhydroxytoluol, aber auch Farbstoffe wie Russ oder Eisenoxid möglich sind.

Die „medizinische" Spritze der US 4 344 577 A (1982), deren Erfinder aus Irland stammen, besitzt einen Spritzenzylinder und eine Kolbenstange aus Polycarbonat, sowie einen Stopfen aus Gummi zur Abdichtung. Beim Einschenken von Flaschenbier ist es im Gegensatz zu Fassbier vielfach nicht möglich, im Glas eine gleichmäßige Schaumkrone auf dem Bier zu erzeugen. Mit der oben genannten Spritze wird daher das eingeschenkte Bier in die Spritze aufgezogen, und durch eine, in der Spritze vorgesehene Jetdüse unter hoher Geschwindigkeit wieder ausgestoßen. Hierzu muss der Gummistopfen vernünftig abdichten. Alternativ kann Luft injiziert werden. Durch die erzeugten Verwirbelungen wird die gewünschte Schaumkrone gebildet.

Die US 4 381 779 A (1983) offenbart eine Ampulle aus Glas beziehungsweise Plastik mit einem verschiebbaren selbstaspirierenden Kolbenstopfen aus Kautschuk, wie zum Beispiel aus bromiertem oder chloriertem Butylkautschuk oder Neopren. Der im vorderen Teil etwa glockenförmig geformte Stopfen kann durch die Kolbenstange axial nach vorne hin elastisch verformt werden. Hört die Krafteinwirkung auf den Kolbenstopfen auf, kann sich der glockenförmige Bereich wieder axial entspannen, wobei eine Sogwirkung entsteht. Wird dabei Blut in die Spritze gesaugt, hat man mit der Nadel in eine Vene gestochen.

Die US 4 531 940 A (1985) verbessert einen weichelastischen Kolbenstopfen dahingehend, dass er nicht mehr mit der Nadel einer zweiten Spritze durchstochen werden kann. Es sind Fälle bekannt, bei denen Betäubungsmittel aus einer Spritze beziehungsweise Ampulle heraus gestohlen wurden, indem der Kolbenstopfen mit einer Hohlnadel, die parallel zur Zylinderinnenwand der Spritze von hinten in die Spritze eingeführt wurde, durchstochen worden ist, um so den Betäubungsmittelinhalt der Spritze in eine zweite Spritze aufzuziehen. Der an sich dichte Stopfen erhält nach der Erfindung zusätzlich noch eine Barriere, die nicht durchstochen werden kann.

Die Glasspritze der US 4 583 974 A (1986) arbeitet mit einem Metallkolben, der Dichtungsringe besitzt. Für den transparenten Kolben der Spritze nach der US 4 595 021 A (1986) wird als Material vorgeschlagen: transparenter, reiner oder durchscheinender Kautschuk, sowie Polymere des Typs SBS, PVC, Olefin, Silikon, Polyurethan, EVA oder Polyester. Die Spritze nach der US 4 632 672 A (1986) besitzt einen Kolbenstopfen aus Polypropylen mit einem O-Ring aus Silikonkautschuk. Die US 4 666 430 A (1987) offenbart eine Spritze, deren Spritzenzylinder eine elliptische Gestalt aufweist. Der abdichtende Kolbenstopfen ist ebenfalls elliptisch ausgebildet.

Aus der US 4 804 290 A (1989) ist eine Spritze bekannt, in deren Glaszylinder ein Kolbenstopfen aus PTFE (Teflon) bewegt wird. Dieser Stopfen ist auf eine Kolbenstange aufgeschnappt und wird durch eine oder mehrere Federn abdichtend nach außen an die Zylinderinnenwand des Glaszylinders gepresst. Die zu einem Ring gebogenen Federn sitzen dafür in entsprechenden umlaufenden Rinnen. Sie bestehen aus Edelstahl oder speziellen Legierungen (US 4 655 462 A).
Die weiter oben genannte US 3 831 601 A (1974) hatte den Druck auf das Teflonmaterial noch über eine Schraubbewegung der Kolbenstange bewirkt.

Die US 4 820 278 A (1989) betrifft eine Spritze aus Glas, in der ein Kolben mit einem Teflonstopfen in einer Auskleidung aus Teflon hin- und herbewegt wird. Die Verwendung von Teflon führt jedoch wegen des Kaltflusses zu nachlassender Dichtigkeit. Durch den Abrieb des Teflons kommt es zu Verunreinigungen und Teflon ist teuer. Die Erfindung versieht den Kolbenstopfen mit einer Rinne, die jedoch keinen Dichtungsring trägt, sondern als Falle für die abgeriebenen Teflonflocken dienen soll.

Der Stopfen der Spritze nach der US 4 832 692 A (1989) ist aus Edelstahl mit aufgesetzten O-Ringen aus Teflon. Die US 4 832 695 A (1989) nennt einen mit Teflon überzogenen Gummistopfen in einem Glaszylinder. Die Einmalspritze der US 4 904 437 A (1990) besitzt einen Zylinder aus elastischem Polypropylen, Polyethylen oder Polyamid und eine Kolbenstange aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Der verformbare Kolbenstopfen in der Einmalspritze nach der US 4 929 231 A (1990) besteht aus einem SBR-Blockpolymeren (SBR = Styrol-Butadien-Kautschuk), EP-Copolymeren (EP = Ethylen-Propylen) oder einem PP (PP = Polypropylen) modifizierten EPDM/ EPR-Copolymeren (EPDM = Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk; EPR = Ethylen-Propylen-Kautschuk). Die US 4 973 504 A (1990) verwendet in einer Ampulle einen Kolbenstopfen aus Butylkautschuk, der einen Überzug aus Polyparaxylol aufweist.

9. US-Patente 1991 bis 2000

Bei der Plastikspritze nach der US 4 986 820 A (1991) bilden die Kolbenstange und der Kolbenstopfen aus Polypropylen eine Einheit. Polypropylen als Stopfenmaterial ist im Gegensatz zu Gummi stabil gegenüber den in der Zahntechnik verwendeten Säuren. Der Stopfen weist eine Gestalt auf, die eine gute Abdichtung bei gleichzeitig hoher Gleitfähigkeit ermöglicht.

Die Spritze nach der US 4 997 423 A (1991) umfasst einen Kolbenstopfen aus Gummi, dessen Oberfläche mit (zum Beispiel schwarz gefärbtem) Tetrafluorethylen (TFE) beschichtet ist. Hierdurch wird das ansonsten übliche Silikonöl nicht mehr als Schmiermittel nötig, so dass dem Patienten auch keine Silikonpartikel mehr mit dem Medikament versehentlich verabreicht werden können. Die TFE-Schicht ist zirka 0,01 bis 0,2 mm dick. Der Reibungskoeffizient von TFE ist mit 0,02 bis 0,03 äußerst niedrig. TFE besitzt eine milchige Farbe. Ist zudem noch der Spritzenzylinder aus ähnlich trübem Polyethylen oder Polypropylen, muss die TFE-Schicht gefärbt werden, damit man die Position des Stopfens in der Spritze von außen überhaupt wahrnehmen kann. Der Gummikern des Kolbenstopfens besteht aus (synthetischem) Kautschuk (Isopren, Butadien, Styrol-Butadien, Ethylen-Propylen, Isopren-Isobutylen, Nitrilkautschuk). Die US 5 009 646 A (1991) behandelt das gleiche Problem. Alternativ zu TFE wird mit Ethylentetrafluorethylenharzen laminiert, oder aber mit Polyethylenharzen, die ein besonders hohes Molekulargewicht aufweisen.

Bei der US 5 000 994 A (1991) und der US 5 064 083 (1991) geht es wiederum um Polyparaxylol-Beschichtungen. Die US 5 007 903 A (1991) zeigt einen ungefähr quadratischen Kolbenstopfen.

Der Kolbenstopfen der Plastikspritze nach der US 5 022 563 A (1991) besteht aus „low density polyethylene“ (LDPE), einem thermoplastischen Material mit einem Elastizitätsmodul von zwischen 180 000 und 210 000 lbs./sq. in.. Der Reibungswiderstand zwischen Kolbenstopfen und Spritzenzylinder liegt bei 0,5 bis 2,5 lbs./sq. in..

Der aus der US 5 061 247 A (1991) bekannte Stopfen besteht aus einem Verbund von a) einem mit Wasserstoff versetzten Styrolbutadien-Blockcopolymeren, b) einem Weichmacher, und c) einem Polyethylenharz der Dichte von ≥ 0,940 g/cm^3.

Der Stopfen soll insofern Vorteile gegenüber dem üblichen, bekannten vulkanisierten Gummistopfen aufweisen, als schon das Vulkanisierverfahren an sich sehr aufwendig ist, und immer die Gefahr besteht, dass Additive aus dem Stopfen heraus in die Medikamentenflüssigkeit gewaschen werden können. Konventionell verwendet wird auch ein thermoplastisches Stopfenmaterial auf Styrolbasis. Dieses unterscheidet sich vom erfindungsgemäßen Gemisch im Bestandteil c), als welcher ein Polypropylen zur Einstellung der Verarbeitbarkeit und Härte verwendet wird. Polyethylen stattdessen verhindert das sog. „pulsation phenomenon". Die US 5 061 247 A diskutiert im Detail die unterschiedlichen Zusammensetzungen.

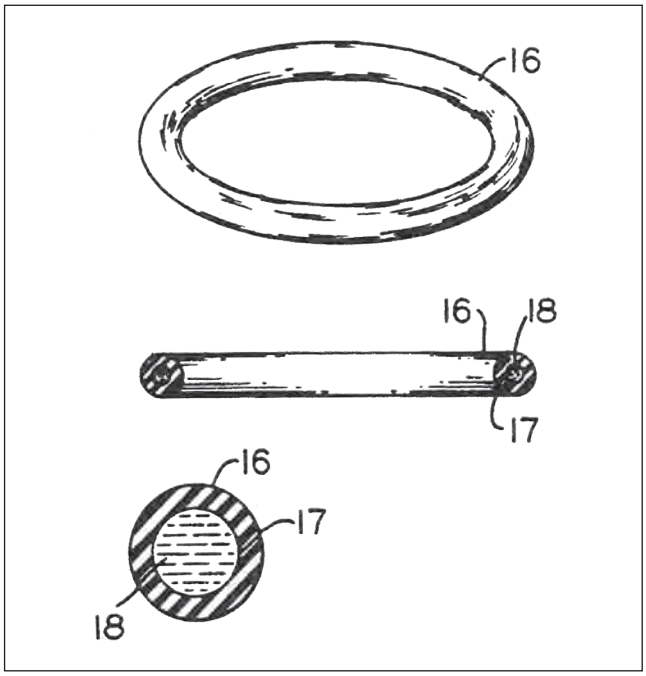
Die US 5 063 025 A (1991) betrifft eine Mikrospritze aus Borosilikatglas mit einer Kolbenstange aus Metall. Die Kolbenstangen bekannter Mikrospritzen sind aus Edelstahldraht oder Stahldraht geringer Elastizität. Diese verbiegen sich im Lauf der Zeit leicht, was zu Undichtigkeiten führt. Im Stand der Technik sind unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten hierzu bekannt. Die Erfindung geht von Kolbenstangen aus superelastischem Draht aus, die zum Beispiel durch Hitzebehandlung von Ni-Ti Legierungen erhältlich sind. Ungewünschte Deformationen wurden hiermit nicht mehr festgestellt, so dass keine Undichtigkeiten mehr zu befürchten sind.

Der im Kolbenstopfen der Spritze der US 5 062 830 A (1991) verwendete O-Ring wirkt als Feder, die das Material des Stopfens an die Zylinderinnenwand presst. Ein Bestandteil des Kolbenstopfens der Spritze nach der US 5 084 018 A (1992) ist Kork. Die Einmal-Spritze nach der US 5 090 961 A (1992) arbeitet mit einem Außenring aus Gummi, der beim Aufziehen eines Medikaments in die Spritze den Kolben zum Spritzenzylinder hin abdichtet, bei der Abgabe des Medikaments jedoch seine Dichtwirkung irreversibel verliert.

Die US 5 163 919 A (1992) beschäftigt sich mit dem Problem, das Silikonöl als Schmiermittel für den Kolbenstopfen weglassen zu können, so dass keine Silikonöltröpfchen mehr mit dem Medikament in den Körper des Patienten gelangen. Ausgangspunkt ist eine typische Kautschukmischung (Chlorbutylkautschuk), deren genaue Zusammensetzung bekannt gegeben wird. In diese wird in kontrollierter Weise ein bestimmter Anteil an Halogenatomen (Fluor) eingebracht.

Kolbenstopfen, die in eine Spritze eingesetzt werden, komprimieren die in der Spritze vorhandene Luft. Je weiter der Stopfen eingesetzt werden soll, desto höher ist der Druck, der sich in der Spritze aufbaut. Dieser treibt den Stopfen wieder aus dem Spritzenzylinder heraus. Das passiert v.a. dann, wenn im Zylinder der Druck durch Wärmeeinstrahlung noch weiter erhöht wird, oder aber, wenn zum Beispiel in großen Höhen der Außendruck absinkt. Die Erfindung nach der US 5 236 420 A (1993) löst dieses Problem mit einem Stopfen, der einerseits einen Bypass zum Druckabbau aufweist, und andererseits eine abdichtende Wirkung besitzt.

Die US 5 294 133 A (1994) beschäftigt sich mit dem Problem abnehmender Dichtigkeit von O-Ringen bei niedrigen Temperaturen. In der Kälte zieht sich der Gummi von konventionellen O-Ringen zusammen und wird unflexibel. Die Dichtwirkung nimmt ab, bis bei einer bestimmten Temperatur ein Leck auftritt. Genau dies passierte auch bei der Challenger-Katastrophe im Januar 1986. Der Grund für dieses Unglück während des Aufstiegs waren Dichtungsringe, die in der kalten Nacht zuvor ihre Dehnungseigenschaften verloren hatten, spröde wurden und so die Hitze der abbrennenden Raketen nicht mehr zurückhalten konnten. Der gebildete Feuerstrahl gelangte nach außen und brachte den Tank mit dem flüssigen Sauerstoff und Wasserstoff zur Explosion. Die Erfindung schlägt daher O-Ringe (16) zum Beispiel aus Gummi vor, die innen hohl sind, und in deren Hohlraum (17) eine Flüssigkeit (18) eingespritzt worden ist. Figur 23 zeigt eine Ausführungsform.



Figur 23: Flüssigkeitsgefüllter Dichtungsring, 1994 (aus US 5 294 133 A).

Während sich der Gummi in der Kälte zusammenzieht, muss sich die Flüssigkeit im Gegensatz dazu in der Kälte ausdehnen. Einen negativen Ausdehnungskoeffizienten hat zum Beispiel Wasser oder eine Mischung aus Wasser und Glycol, über deren Mischungsverhältnis in der Kälte die Ausdehnung des O-Rings exakt eingestellt werden kann. Der O-Ring arbeitet in der Wärme unverändert, wirkt jedoch jetzt auch in der Kälte abdichtend. Anstelle des runden Querschnittes ist auch ein viereckiger Querschnitt des Ringes möglich.

Die US 5 397 313 A (1995) versucht, die für geschliffene Glasspritzen typische Leichtgängigkeit des Kolbens, mit der jede Druckänderung im Inneren des Spritzenzylinders sofort durch eine für den Anwender deutlich spürbare Kolbenbewegung ausgeglichen wird, durch Anformen von Dichtungsringen am Kolbenstopfen auf Plastikspritzen zu übertragen. Es wird wieder Bezug auf die weiter oben beschriebene „loss of resistance" Technik genommen.

Die US 5 401 246 A (1995) zeigt eine Spritze mit einem Kolbenstopfen, in dem verschiedene Typen eines O-Rings aufgenommen sein können. Der O-Ring kann aus jedem geeigneten Material bestehen. Bevorzugt ist jedoch Gummi. In einem Beispiel sitzt der O-Ring in einer Nut, die deutlich breiter als tief ist. Die Nut ist allerdings nur so breit, dass der Ring nicht heraus fällt und sich in ihr nicht umdreht. Ein alternativer O-Ring ist in der Mitte leicht gespalten, wobei ein symmetrisches Aussehen des Spaltes die Montage des Ringes erleichtert. Eine ähnliche Ausführungsform wird als Doppel-O-Ring bezeichnet.

Die US 5 456 940 A (1995) offenbart eine Methode, einen Spritzenzylinder mit einem Schmiermittel auf Silikonbasis zu versehen. Das Schmiermittel wird gegen einen Luftstrom in den Zylinder gesprüht, was zu einer gleichmäßigen und dünnen Beschichtung der Zylinderinnenseite führt. Ein später eingeführter Spritzenkolben besitzt mehrere Dichtungsringe.

Der Kolbenstopfen der Spritze nach der US 5 496 285 (1996) aus einem elastomeren Kautschukmaterial besteht im Wesentlichen aus einem Blockpolymeren (Styrol-Ethylen-Butylen-Styrol (SEBS)), aus einer gewissen Menge an Polyolefin (1–30 Gew. % Polypropylen) und etwas Silikonkautschuk (0,–2 Gew. %). Über die Menge an Polypropylen wird die Elastizität des Stopfens eingestellt. Je größer diese Menge ist, desto starrer wird der Stopfen, was für die Verabreichung viskoser Medien gut ist. Der zugesetzte Silikonkautschuk verbessert die Gleitfähigkeit des Stopfens.

Die Plastik-Einmalspritze nach der US 5 549 573 A (1996) ist gleichermaßen zum Injizieren, wie auch Ansaugen geeignet. Ein dicht an der Zylinderinnenwand anliegender O-Ring geht in seiner Mitte in eine dünne Membran über, die wiederum an der Kolbenstange anliegt (vergleiche US 2 882 899 A). Im Querschnitt ähnelt dies einer Hantel mit einem Loch in der Mitte.

Die US 5 607 400 A (1997) zerlegt den Kolbenstopfen in einen vorderen (distalen) und einen hinteren (proximalen) Anteil. Der vordere Stopfenteil ist zur Erhöhung der Gleitfähigkeit mit einem silikonfreien Material entsprechend laminiert beziehungsweise versiegelt. So werden Verunreinigungen des Medikaments mit Silikon vermieden. Da die aus der US 5 009 646 A bekannten silikonfreien Beschichtungen, zum Beispiel auf Tetrafluorethylen-Basis, zu Kaltfluss neigen und die Stopfen so luftdurchlässig werden, kommt es stattdessen jedoch zur Beeinträchtigung des Medikaments durch die Umgebungsluft. Die Erfindung sieht daher noch einen hinteren Stopfenteil vor, der nun mit einem üblichen Schmiermittel auf Silikonbasis (PDMS) versehen werden kann, da kein direkter Kontakt des hinteren Stopfenteils mehr zum Medikament hin besteht.

Die US 5 620 425 A (1997) geht von einem Kolbenstopfen aus, dessen Kern aus relativ hartem Polypropylen oder Polycarbonat und dessen Hülle aus flexiblem Butyl- oder Halobutylkautschuk besteht. Die Herstellung der Plastikspritze erfolgt keimfrei und unter Berücksichtigung folgender Normen (Class 10 000; Class 1 000; Class 100; Class MCB 1; MCB 2; MCB 3).

Der Stopfen nach der US 5 620 423 A (1997) ist aus Polyethylen, so dass er gleichzeitig flexibel und sogar an dünnen Stellen ausreichend starr ist.

Die US 5 735 825 A (1998) erinnert an das bereits eingangs genannte Problem, dass hohe Dichtigkeit kaum bei gleichzeitig guter Gleitfähigkeit zu erzielen ist, insbesondere dann, wenn eine große Flüssigkeitsmenge innerhalb kurzer Zeit oder durch eine schmale Öffnung, wie die eines Katheters, injiziert werden muss. Je dichter ein Kolbenstopfen anliegt, desto weniger gleitfähig ist er. Bei zu hoher Haftreibung des Stopfens an der Zylinderwand („stiction") ist es dann nicht mehr möglich, kleine Volumina zu applizieren. Der Stopfen springt. Er gleitet nicht über die zurückzulegende kurze Distanz. Druckunterschiede können nicht mehr gefühlt werden. Die US-Schrift offenbart einen speziell geformten Stopfen aus Silikon oder Gummi.

Nach erfolgter Injektion füllen die Kolbenstopfen oftmals den Spritzenzylinder nicht vollständig aus. Ein Restvolumen an Medikamentenflüssigkeit verbleibt im Spritzenzylinder. Die Spritze muss daher von Anfang an um dieses Mehr an Medikamentenflüssigkeit befüllt werden, was bei der üblicherweise großen Zahl an zu befüllenden Spritzen eine nicht zu unterschätzende Gesamtmenge an teurem Medikament bedeutet, das schließlich mit der Spritze weggeworfen wird. Die US 5 795 337 A (1998) offenbart einen Stopfen bestimmter Gestalt, mit dem Toträume in der Spritze vermieden werden sollen.

Die US 5 843 042 A (1998) offenbart eine Spritze, deren Stopfen oval geformt ist und mit Teflon-Dichtungsringen versehen ist. Die US 5 880 380 A (1999) offenbart eine Spritze, in deren Glaszylinder ein Teflonstopfen mit O-Ringen aus Silikon bewegt wird. Auch von einem Teflonumhüllten Silikon-O-Ring ist die Rede.

Der Kolbenstopfen nach der US 5 902 276 A (1999) besitzt einen Kern aus hartem Kunststoff, der in einem ersten Schritt in einer Spritzform hergestellt wird. Nach Aushärtung des Kerns wird der Kern an seiner glatten äußeren Oberfläche in einer zweiten Form mit weichem Gummi beschichtet, wobei es zu chemischen Bindungen zwischen beiden Materialien kommt (Einstückigkeit). Dieses Verfahren ist vergleichsweise billig und schnell.

Die US 6 004 300 A (1999) offenbart einen Stopfen aus einem harten bioverträglichen Kern (PS, HDPE, PP) und einer äußeren Hülle aus einem thermoplastischen Kautschuk. Als Beispiel hierfür wird Santoprene® genannt. Dieses ist ein thermoplastisches Polypropylen Gel, das eine dichte Matrix aus mikroskopisch kleinen Teilchen (zirka 1 µm Ø) an vulkanisiertem Kautschuk enthält. Als weiteres Material für die äußere Hülle wird Vinylacetatcopolymer genannt. Geringe Gleitmittelanteile, wie zum Beispiel Silikonkautschuk, können beigemischt werden. Es wird auf das Herstellungsverfahren für thermoplastische Kautschuke in der US 6 004 300 A (1994) verwiesen.

Die US 6 053 895 A (2000) lehrt die Vermeidung von Schmiermitteln, wie zum Beispiel Silikonöl, durch Verwendung von Polytetrafluorethylen, oder teilweise mit Fluor substituiertem Polyethylen oder Polypropylen als Stopfenmaterial. Die US 6 093 175 A (2000) beschreibt hingegen ein Verfahren, einen Spritzenzylinder beziehungsweise einen Kolbenstopfen mit einem Gleitmittel (Silikonöl, Glycerin) zu versehen. Die US 6 162 200 A (2000) beschreibt ein ähnliches Verfahren, wobei das Gleitmittel nicht in Kontakt mit der Medikamentenflüssigkeit kommen soll.

Aus der US 6 090 081 A (2000) ist ein Stopfen bekannt mit einem Kern aus Gummi und einer speziellen Oberflächenbeschichtung (zum Beispiel aus PTFE, UHMWPE, PFA, FEP, ETFE, PCTFE, PVDF, PVF, o.ä.) versehen. Die Herstellung eines Stopfens mit einer PTFE-Beschichtung wird erklärt. PTFE kann aufgrund seiner Eigenschaften einem sog. „thermal melt molding" nicht unterzogen werden. Ähnlich ist die US 2005/0137533 A1 (2005).

Schrift US 6 102 699 A (2000) offenbart einen Stopfen aus porösem gesinterten Material. Bei viskosen Dentalmassen wird der Kolbenstopfen oft erst nach Befüllung des Spritzenzylinders in diesen eingesetzt. Dabei kann es zum Einschluss von Luft in der Dentalmasse kommen, der verhindert werden muss. Das gelingt zum Beispiel, indem man in der Kolbenstange eine längliche Bohrung vorsieht, durch die die eingeschlossene Luft wieder nach außen entweichen kann. Damit nicht auch Dentalmasse in diese Bohrung eindringt, wird diese im Bereich der Bohrung bereits polymerisiert, also ausgehärtet. Danach ist ihre Viskosität zu groß, um in die Bohrung eindringen zu können. Die Erfindung schlägt einen Stopfen aus Polyethylen vor, der Mikroporen aufweist, durch die zwar Luft entweichen kann, aber keine Dentalmasse. Eine Vorpolymerisation ist nicht mehr nötig.

Die US 6 140 418 A (2000) betrifft einen Stopfen mit einer thermoplastischen Polymerzusammensetzung aus einem Block-Copolymeren aus aromatischen Polyvinylblöcken und Isobutylenblöcken, und einem quervernetzten Kautschuk auf Basis von zum Beispiel Dienen, Olefinen, Acrylaten oder Fluor in einem Verhältnis von 90:10 bis zu 10:90. Die gute Gasundurchlässigkeit wird betont.

10. US-Patente 2001 bis heute

Schrift US 6 213 985 B1 (2001) lehrt eine Plastikspritze, deren Zylinder (aus PE, PP, PC, COC, PS, o.ä.) sich zur Abgabeöffnung hin leicht verjüngt. Die Abweichung liegt bevorzugt bei 0,25°. Der Kolbenstopfen ist aus einem elastischen Material (Butylkautschuk, Polyisopren, EPDM, Kautschuk) gefertigt, dessen „core set" ≤ 20 % ist. Dabei ist „core set" definiert als der Größenverlust eines Elastomers über 24 h bei 120 °C bei einer Kompression von 50 %. Ziel auch dieser US-Schrift ist „to improve the balance between fluid tightness and sliding property in a syringe".

Die US 2001/0002434 A1 (2001) lehrt, eine Spritze mit einem Schmiermittel zu versehen, ohne dass sich letzteres im Medikament ansammelt. Hierzu wird die äußere Oberfläche des Kolbenstopfens mit Polydimethylsiloxan (PDMS) einer Viskosität von 100 000 cSt beschichtet und dann unter Einsatz von Co-Strahlung quervernetzt, so dass das PDMS mit dem Stopfen verklebt wird. Auch das Plastikmaterial des Spritzenzylinders wird mit PDMS vermischt, so dass insgesamt die Gleitfähigkeit in der Spritze erhöht wird. Eine Liste verschiedener geeigneter Silikone ist in der Schrift enthalten.

Die US 2001/0004466 A1 (2001) betrifft eine Spritze, in deren Spritzenzylinder (aus COC) eine Gleitmittelschicht aufgebracht wurde. Diese besteht aus einer Mischung eines reaktiven (zum Beispiel durch Vinylgruppen; Quervernetzung ist möglich) Silikonöls mit einem nicht-reaktiven Silikonöl (zum Beispiel PDMS). Die US 2002/0013554 A1 (2002) versieht die Kolbenstange mit einer Silikongleitschicht beziehungsweise fertigt diese aus PTFE. Die US 6 425 886 B1 (2002) beschäftigt sich ebenfalls mit Silikonbeschichtungen, genauso wie die US 6 461 334 B1 (2002).

Aus der US 6 312 413 B1 (2001) ist eine Ampulle mit dreieckigem Querschnitt und einem dazu passenden dreieckigen Kolbenstopfen bekannt. Die US 2002/0016572 A1 (2002) erwähnt im Zusammenhang mit dem Kolbenstopfen seit langer Zeit einmal wieder Holz zumindest als ein alternatives Baumaterial. Die US 6 413 236 B1 (2002) zeigt einen O-Ring mit sternförmigem Querschnitt. Der Spritzenkörper nach der US 2002/0139088 A1 (2002) besteht aus Norbornen-Ethylen-Copolymer, der Stopfen aus Halobutylkautschuk. Das Copolymer fällt unter die Abkürzung COC für Cycloolefincopolymere. Eine Liste weiterer Vertreter von COC incl. Handelsnamen ist angegeben. Andere Beispiele synthetischer Kautschuke für den Stopfen sind genannt.

Die Spritze der US 2003/0097096 A1 (2003) zeigt eine Spritze mit ellipsenförmigem Querschnitt. Die Kolbenstange aus thermoplastischem Material und der Dichtungsring aus einem elastomeren Material sind ebenfalls ellipsenförmig. Eine ausführliche Aufzählung geeigneter Ringmaterialien ist vorhanden.

Die US 2004/0084852 A1 (2004) offenbart eine Spritze mit einem harzbeschichteten Kolbenstopfen, wobei unterschiedliche Kunststoffe für den Spritzenzylinder und unterschiedliche Harze für den Stopfen aufgezählt werden. Es wird mit Reibungskoeffizienten argumentiert.

Der Kolbenstopfen nach der US 2006/0069356 A1 (2006) hat ein Kernelement, das über Arme von einem Ringelement getrennt ist, um so die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der unterschiedlichen Materialien von Kern- und Ringelement zu berücksichtigen. Darüberhinaus ist der Ring mit einem Gleitfilm überzogen. Eine Liste handelsüblicher thermoplastischer Elastomere, wie zum Beispiel Santoprene, ist enthalten.

Die US 2006/0178643 A1 (2006) nennt zahlreiche handelsübliche fluorierte Gleitmittel zur Beschichtung von Kolbenstopfen. Auch die US 2007/0088291 A1 (2007) beschäftigt sich ausführlich mit der in den Spritzen eingesetzten Chemie. Moderne Gleitmittel werden schon bei der Herstellung des Stopfens in diesen eingearbeitet, als dessen möglicher Hauptbestandteil wird jedoch neben den vielen zahlreichen modernen Polymeren immer noch der natürliche „rubber", also der Gummi genannt.

11. Ausblick

Der Artikel gibt einen Überblick über mehr als 150 Jahre Spritzengeschichte. Er betrifft hierbei nur einen kleinen Ausschnitt, nämlich das Gebiet der Dichtigkeit der Spritzen. Einen so langen Zeitraum zu betrachten, bedeutet, aus der Vielzahl der Patentdokumente eine subjektive Auswahl zu treffen. Der Artikel, obwohl länger als üblich, ist daher keinesfalls vollständig. Er ist aber hoffentlich interessant und an manchen Stellen vielleicht sogar spannend. Es fällt auf, dass die Polymerchemie die moderne Stopfen- und Dichtungstechnik voll und ganz in ihrem Griff hat. Dies wird sich sicherlich in der Zukunft so fortsetzen. Möglicherweise verwendet man irgendwann einmal die alten bewährten Dichtungsmaterialien erneut und kombiniert sie mit den modernen Kunststoffen. Wie dem auch sei, die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet bleibt auf jeden Fall faszinierend. Denn es gilt immer noch, das eingangs geschilderte Problem zu lösen „... when one is good the other is necessarily bad. ".

Mikrofabrikation, insbesondere Softlithographie in den Angewandten Biowissenschaften

Dr. Thomas J. Reitinger, Patentabteilung 1.44

Mikrofabrikationsprozesse sind heute die Grundlage für vielfältige Anwendungen in den Biowissenschaften. Besonders die so genannte Softlithographie bietet gegenüber den üblichen Mikrofabrikationsmethoden wie beispielsweise der Photolithographie viele Vorteile und herausragende Anwendungsmöglichkeiten für die Zukunft.

1. Einleitung

Viele bahnbrechende Entwicklungen in der modernen Wissenschaft und Technik, zum Beispiel in den angewandten Biowissenschaften und in der Medizintechnik, wären ohne die so genannte Mikrofabrikationstechnologie (Erzeugung mikroskopisch kleiner Strukturen) nicht möglich gewesen.

Die Mikrofabrikation geht einher mit der Entwicklung in der Mikroelektronik. Sie war und ist Grundlage unter Anderem für die Herstellung von Mikroprozessoren, Speichern und weiteren mikroelektronischen Vorrichtungen für die Informationstechnologie. Besonders in den letzten Jahren hat sie aber auch einen stark wachsenden Einfluss in den Bereichen Biowissenschaften (US 6 485 703 B1, WO 2005/072858 A1), Mikrooptik (US 6 589 716 B2), Mikrosensoren (US 5 531 787 A), Mikroreaktoren (US 6 749 814 B1) und mikroelektromechanischer Systeme (US 5 455 547 A).

Zu den bedeutendsten Verfahren der Mikrofabrikation gehört die so genannte Photolithographie. Sie ist seit ihrer Patentierung im Jahr 1959 (US 2 890 395) der Motor der Halbleiterindustrie. Auch heute noch werden im Wesentlichen alle integrierten Schaltkreise (ICs) mit dieser Methode hergestellt (US 5 925 259 A). Das Prinzip der derzeit für die Herstellung von mikroelektronischen Bauteilen angewandten photolithographischen Verfahren beruht auf einem Projektionssystem („Stepper"), bei dem die Abbildung einer Maske mit einer Linse hoher Apertur verkleinert und auf einen dünnen Film projiziert wird, welcher aus einer auf einen Wafer aufgebrachten Photoresist-Schicht besteht. Hierbei ist die gewünschte Mikrostrukturgröße nicht beliebig verkleinerbar. Das erreichbare Minimum der Strukturgröße liegt in der Praxis im Bereich der Wellenlänge λ des eingestrahlten Lichts. Um immer kleinere Strukturen herzustellen, muss man in der Photolithographie mit immer kleineren Wellenlängen arbeiten, was deren Herstellung und damit den Preis nachhaltig erhöht (EP 1 936 437 A2, US 5 976 826 A, US 5 925 259 A). Für Strukturen unter 100 nm, aber auch für die Mikrofabrikation im µm-Bereich, stößt die klassische Photolithographie auf ihre Grenzen und ist somit nicht die für alle Anwendungen optimale Methode in der Mikrofabrikationstechnologie: Die Photolithographie ist vergleichsweise teuer, aufwändig und sie kann nicht ohne weiteres auf nichtebenen Oberflächen zum Einsatz gebracht werden. Darüber hinaus ist sie ineffizient in der Erzeugung von 3D-Strukturen, beschränkt auf die Einführung spezieller chemischer Funktionalitäten und auf bestimmte Photoresist-Materialien wie Halbleiter, nicht unbedingt aber auf Kohlenstoffverbindungen, Kunststoffe, Keramiken oder Gläser (US 5 512 131 A, US 5 976 826 A, US 7 338 613 B2).

Derzeit gibt es eine Vielzahl von nichtlithographischen Techniken für die Herstellung qualitativ hervorragender Strukturen im Mikro- und Nanometerbereich. Dieser Artikel beschränkt sich auf nichtlithographische Methoden, die sich unter dem Begriff „Softlithographie" subsumieren lassen und die vor allem von der Arbeitsgruppe um Prof. Whitesides von der Harvard University in den USA entwickelt wurden. Unter diese Methoden fallen vor allem diejenigen Techniken, die in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden. Es sind dies unter Anderem das Mikrokontakt-Drucken (µCP, microcontact printing), das Replikatformen (replica molding), das Mikrotransferformen (µTM, microtransfer molding), sowie das Mikroformen in Kapillaren (MIMIC, micromolding in capillaries). Allen diesen Techniken ist gemeinsam, dass eine Gussform oder ein Stempel aus einem Elastomer das Hauptelement für den Transfer der herzustellenden Struktur auf das Substrat ist. In der Softlithographie werden häufiger flexible organische Materialien bzw. Moleküle als rigide anorganische Materialien, welche im Allgemeinen in der Mikroelektronik eingesetzt werden, verwendet (US 5 512 131 A, US 5976826 A).

Die Softlithographie ist in der Lage, Mikrostrukturen in selbstorganisierten Monoschichten (self-assembled monolayers, SAMs) zum einen durch Mikrokontaktdrucken (WO 98/27463 A1) beziehungsweise mittels Prägen (US 6 663 820 B2, US 2002/0133129 B2) als auch durch Replikatformen (US 6 039 897 A, WO 98/34886 A1, US 6 699 665 B1) zu bilden.

Die Vorteile der Softlithographie gegenüber der konventionellen Photolithographie liegen hauptsächlich in der Reproduktion einer Struktur oder eines Musters. Vorlagen für spezielle Mikrostrukturen können relativ rasch durch Veränderung eines elastomeren Stempels oder einer Gussform erstellt werden (WO 02/093125 A2, WO 02/14078 A2, WO 2006/113727 A2, WO2005/0066613 A1, US 6 645 432 A1). Softlithographische Verfahren sind relativ einfach durchzuführen, benötigen wenig Kapital, vielfach kann auf vorhandenes Laborequipment zurückgegriffen werden.

Mit Hilfe der Softlithographie können neue Oberflächen- bzw. optische Strukturen erzeugt oder analysiert werden, die nur schwer mit photolithographischen Methoden zugänglich sind (US 7 057 832 B2, US 6 541 539 B1, DE 600 298 16 T2).

2. Grundlagen der Softlithographie und ihre Bedeutung in den angewandten Biowissenschaften

2.1 Oberflächentechnik (Surface Engineering)

Bei der Suche nach Möglichkeiten, immer kleinere Strukturen zu immer günstigeren Preisen herzustellen, hat sich die Methode der Selbstorganisation am ehesten in der Praxis bewährt.

Unter Selbstorganisation wird die spontane Anordnung von Molekülen oder Objekten in eine stabile, gut definierte Struktur durch nicht-kovalente Kräfte bezeichnet. Das Prinzip der Selbstorganisation beruht darauf, dass die Endstruktur im oder nahe dem thermodynamischen Gleichgewicht liegt. Aus diesem Grund verläuft die Selbstorganisation von Molekülen oder Objekten freiwillig und die Ausbildung von Defektstrukturen wird vermieden, mit anderen Worten mittels Selbstorganisation sind „geordnetere" Strukturen möglich als ohne sie. Die Eigenschaften der durch Selbstorganisation erhaltenen Endstruktur wird durch dessen Ausgangsmaterialien bzw. dessen Strukturen und Eigenschaften wie zum Beispiel Oberflächen- und Substratfunktionalitäten determiniert (US 2006/0040276 A1, US 7 007 370 B2, DE 600 29 816 T2, (WO 2004/041317 A1, WO 03/087590 A2, EP 0 948 757 B1).

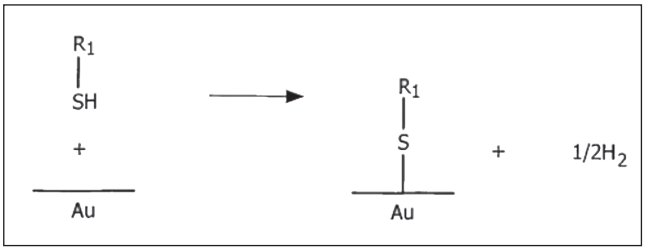
Selbstorganisation ist in der Natur weit verbreitet. Die Faltung von Proteinen (US 5 561 221 A) und der tRNA (WO 2001/023612 A2) in der Biologie sind nur einige Beispiele.

Verschiedene Wege zur Erzeugung zwei- und dreidimensionaler Strukturen durch Selbstorganisation in molekularen bis mesoskopischen Dimensionen sind bisher intensiv untersucht worden (WO 2004/041317 A1, WO 2007/089464 A2, US 6 322 979 B1, US 6 872 522 B1, DE 10 2004 041 555 B4, US 6 893 851 B2, WO 03/087590 A2, US 2002/072074 A1, WO 02/09175 A2, US 6 507 989 B1, US 2001/023024 A1, WO 98/34886 A1, US 6 518 168 B1, DE 101 46 970 A1, US 6 597 989 B1, US 6 264 741 B1, US 6 548 630 B1, US 6 264 741 B1).

In den angewandten Biowissenschaften, beispielsweise bei mikroskopischen Systemen in der Biologie, ist es oft erforderlich, die Oberflächeneigenschaften auf molekularer Ebene zu verändern, da mit abnehmender Größe der biologischen bzw. biochemischen Vorrichtungen das Oberflächen-Volumenverhältnis zunimmt und die Oberflächeneigenschaften zunehmend deren Leistungsfähigkeit bestimmen. Zur Simulation bzw. Kontrolle biologisch relevanter Oberflächen eignen sich besonders selbstorganisierte Monoschichten (self assembled monolayers, SAMs) von Alkanthiolaten auf Gold. Softlithographische Techniken sind generell hervorragend geeignet, die Eigenschaften, die Topographie und die Zusammensetzung von Oberflächen nachzubilden. Die Kombination von SAMs und Softlithographie ist also von unschätzbarem Wert für den Aufbau von Mikrosystemen, welche in den Biowissenschaften benötigt werden.

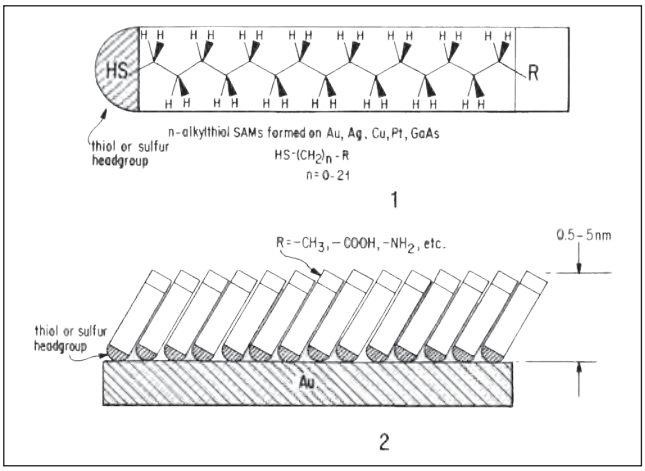
2.1.1 Selbstorganisierte Monoschichten (SAMs, self-assembled monolayers)

Selbstorganisierte Monoschichten entstehen spontan durch chemische Adsorption und Selbstorganisation von funktionalisierten, langkettigen organischen Molekülen auf den Oberflächen geeigneter Substrate. Sie werden im Allgemeinen durch Eintauchen des Substrats in eine Lösung des Liganden, der mit der Oberfläche reagiert, oder durch Versetzen des Substrats mit Dämpfen einer reaktiven Verbindung hergestellt. Derzeit gibt es eine Vielzahl von SAM-bildenden Systemen (WO 2007/041570 A1, WO 2005/049741 A1, US 2004/0200575 A1, WO 2004/000471 A1, WO 02/071151 A1, US 6 893 966 B2). Die am besten untersuchten SAM-Systeme sind Alkanthiolate $CH_3(CH_2)_nS^-$ auf Gold (US 5 514 501 A, US 5 885 753 A, US 6 180 239 A, US 6 518 168 A, US 6 893 851 B2, WO 2007/089464 A2, US 6 972 155 B2, WO 98/58967 A1, US 7 033 821 B2, US 7 118 910 B2, WO 2005/049741 A1, WO 2005/045524 A2, WO2003/081204 A2, WO 2005/045524 A2, WO 03/033127 A2, US 2004/0200575 A1, WO 2007/089464 A2). Alkanthiole adsorbieren chemisch spontan aus der Lösung auf eine Goldoberfläche und bilden adsorbierte Alkanthiolate, wobei gleichzeitig Wasserstoff freigesetzt wird (Figur 1).



Figur 1: Bildung von Alkanthiolaten auf einer Goldoberfläche, R_1 entspricht $CH_3(CH_2)_nS^-$ aus EP 1 687 381 B1.

Aufgrund der auf der Goldoberfläche gebundenen Schwefelatome kommt es zu einem engen Kontakt der Alkylketten, was aufgrund der Erniedrigung der Entropie zur Ausbildung einer geordneten Struktur führt (Fig. 2, Teil 2).

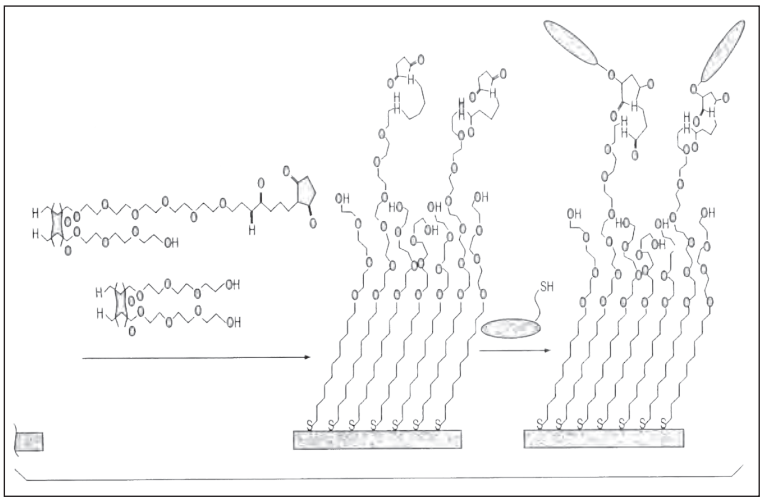


Figur 2: Schematische Darstellung einer Alkanthiolatmonoschicht auf Gold aus US 5 514 501 A.

Die Wechselwirkungen innerhalb der selbstorganisierten Monoschicht nehmen bis zu einer Alkylkettenlänge mit ca. 20 Kohlenstoffatomen (n = 20) mit zunehmender Länge der Alkylkette und mit zunehmender Dichte der Moleküle zu. Lediglich Alkanthiolate mit n > 11 bilden die für die Softlithographie geeigneten dichten zweidimensionalen organischen Quasikristalle. SAMs von Alkanthiolaten mit mehr als 10 Methylengruppen ($-CH_2-$) sind im Wesentlichen Wasser undurchlässig. Die Oberflächeneigenschaften der Monoschicht werden neben den Schwefelatomen hauptsächlich durch den funktionellen Rest (R) der Alkanthiole festgelegt. Unterschiedliche Untersuchungstechniken zeigen, dass die Alkylketten $(-CH_2-)_n$ von der Oberfläche nahezu all- trans-konfiguriert wegzeigen. Im Mittel sind sie ca. 30° gegen die Ebenennormale gekippt, um die intermolekularen Van-der-Waals-Wechselwirkungen zwischen den benachbarten Methylengruppen zu maximieren (WO 2005/089415 A2, WO 03/012392 A2, WO 02/071151 A1, WO 2005/049741 A1, US 7 0451 71 B2, US 7 276 286 B2, WO 03/033127 A2, US 2004/0200575 A1, DE 698 21 682 T2, EP 1 687 381 B1, US 7 118 910 B2). Figur 3 (rechter Teil) zeigt schematisch die Struktur typischer Alkanthiolat-SAMs auf Gold in den Biowissenschaften.

Die Struktur setzt sich hier im Wesentlichen aus der Gold-Oberfläche, der Alkylkette, Ethylenglykololigomeren, einem Linker und einem Liganden (in Figur 3 rechts die Ellipse) zusammen.

Die Bildung von Alkanthiol-SAMs auf Gold erfolgt relativ rasch. Im Falle des Hexadecanthiolats genügt das Eintauchen des Goldsubstrates für wenige Minuten in eine ca. 2mM Lösung des Thiols in Ethanol. Die Bildung der SAMs erfolgt im Falle des so genannten Mikrokontaktdruckens (vgl. Kapitel 3) sogar innerhalb weniger Sekunden. Diese Eigenschaft, geordnete Strukturen rasch zu bilden, ist Grundlage für den Erfolg dieser Methode (WO 03/033127 A2, WO 02/071151 A1, WO 2005/049741 A1, US 2004/0200575 A1, US 7 276 286 B2, US 5 514 501 A, US 5 885 753 A, US 6 180 239 A, US 6 518 168 A, US 6 893 851 B2). SAMs von Alkanthiolen auf Gold zeigen, wie auch selbstorganisierende Systeme an sich, des weiteren viele vorteilhafte Merkmale wie einfache Herstellung, für viele Applikationen ausreichend geringe Defektdichte, ausreichend gute Stabilität, Verwendbarkeit in vielen technischen Applikationen und die Möglichkeit der gezielten Steuerung von biochemischen, elektrochemischen, chemischen und physikalischen Grenzschichteigenschaften.

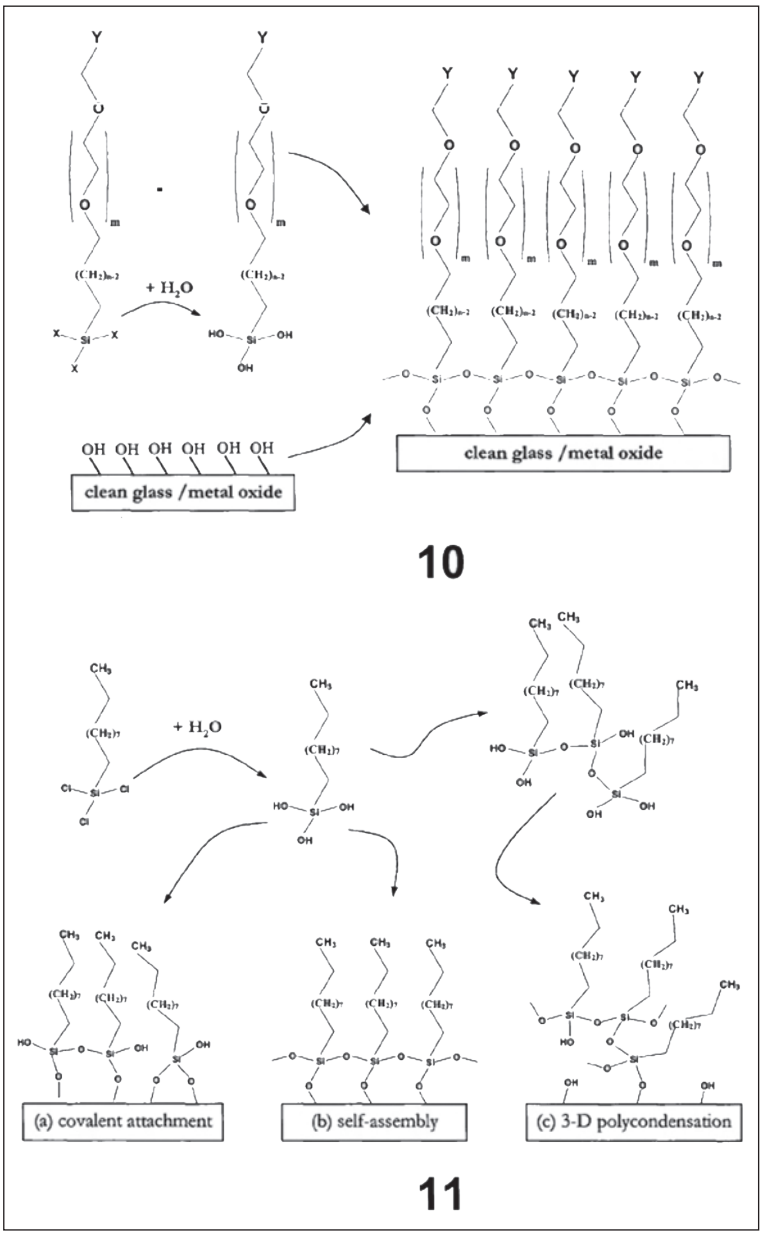


Figur 3: Typische Alkanthiol-SAM auf Gold in den angewandten Biowissenschaften aus WO 03/012392 A2.

Aus diesem Grund eignen sich SAMs hervorragend als Modelsysteme für grundlegende Studien zur Benetzbarkeit, Adhäsion, Reibung, Korrosion, Keimbildung, Protein-Adsorption und Zell-Anlagerung (US 6 903 207 A, WO 03/079403 A2). Biologische bzw. biochemische Abläufe, beispielsweise die Adsorption von Proteinen, die auf der Oberfläche von SAMs auftreten, können mit zahlreichen modernen Methoden wie zum Beispiel Oberflächenplasmonenresonanz (SPR), Rasterelektronenmikroskopie (SEM), Rastertunnel-mikroskopie (STM) und Rasterkraftmikroskop (AFM) analysiert werden (WO 2007/133714 A1, WO 2007/043498 A1).

SAMs auf Gold kommen hauptsächlich in denjenigen Handelsprodukten zum Einsatz, die eine strikte Kontrolle der Oberflächeneigenschaften bedingen, wie beispielsweise DNA-Arrays (EP 1 388 010 B1, WO 03/006948 A2) und Biosensoren (EP 1 462 528 A1, WO 03/093495 A2, US 7 332 327 B2, US 5 514 501 A, WO 2006/073465 A2).

SAMs können im Übrigen aber auch als Ätz-Schutzschichten bei der Herstellung von Strukturen und Muster verwendet werden (US 2004/0200575 A1).



Figur 4: Übersicht über Alkylsilan-SAMs sowie deren Herstellung aus Alkyltrichlorsilan und einer Oxidoberfläche aus EP 1 607 743 A1.

Die Bildung von SAMs ist auch mit anderen Komponenten als mit Alkanthiolen auf Gold möglich, auch mit nicht metallhaltigen Oberflächen. Als wichtigste Alternative haben sich Alkylsiloxan-SAMs erwiesen, sie sind jedoch weniger geordnet als SAMs von Alkanthiolaten auf Gold und zudem aufwändiger herzustellen. In den angewandten Biowissenschaften werden deshalb Alkylsiloxan-SAMs weniger häufig als Alkanthiol-SAMs eingesetzt (EP 1 607 743 A1, DE 600 29 816 T2).

Nachfolgende Figur 4 zeigt eine Übersicht über Metalloxid-Alkylsilan SAMs (10) sowie mögliche Reaktionen und Reaktionsprodukte bei der Umsetzung von Alkyltrichlorsilanen in Lösung mit einer Oxidoberfläche (11).

2.1.2 Inerte Oberflächen (Inert Surfaces)

Eine wichtige Anwendung von softlithographischen Techniken in den Biowissenschaften ist die Fabrikation von Protein- oder Zellstrukturen beziehungsweise Mustern. Grundlage hierfür ist die Erzeugung von Strukturbereichen, welche die Adhäsion von Proteinen oder Zellen entweder begünstigen oder verhindern. Als inerte Oberflächen werden solche angesehen, welche die Adsorption und Adhäsion von biochemischen beziehungsweise biologischen Spezies verhindern („biokompatible Oberflächen").

Die meisten inerten Oberflächen im Bereich der Biowissenschaften besitzen folgende Eigenschaften: (i) Sie sind polar, (ii) sie haben Akzeptor-Gruppen zur Ausbildung von Wasserstoff-Brückenbindungen, (iii) aber keine entsprechenden Donor-Gruppen und (iv) sie sind in ihrer Gesamt-

heit gesehen elektrisch neutral geladen (US 7 276 286 B2, US 2002/0102405 A, WO 02/006407 A2).

2.1.3 Ligandenbindungsvariabilität

Für die Analyse komplexer Protein-Ligand Wechselwirkungen bzw. Wechselwirkungen an Zelloberflächen haben sich gemischte SAMs (mixed SAMs) aus zwei verschiedenenartigen Alkanthiolen bewährt: Zum einen ein Alkanthiol mit endständiger Tri(ethylenglykol)-Gruppe ($(EG)_3OH$)-Gruppe im Überschuss und zum anderen ein Alkanthiol mit endständigen $(EG)_6OR$-Gruppen im Unterschuss, wobei R für einen Liganden steht, welcher spezifisch an ein Enzym bzw. Protein oder ein Peptid binden kann oder beispielsweise für eine Methylcarboxy-Gruppe CH_2CO_2H, welche leicht mit dem Liganden R substituiert werden kann (Figur 3, rechts, als Beispiel für eine gemischte SAM) (WO 2006/116545 A2, EP 0 887 694 B1, US 7 276 286 B2, WO 2007/133714 A2, WO 2006/116545 A2, WO 2007/041570 A1, WO 2006/002141 A2, US 2006/0138083 A1, WO 03/079403 A2). Mit Hilfe derartiger gemischter SAMs ist es nun möglich, biospezifische Ligand-Protein bzw. Ligand-Zelle-Bindungen in Abwesenheit von sterischen Interferenzen mit benachbarten Liganden und in Abwesenheit von unspezifischen Wechselwirkungen mit den umliegenden Substraten zu untersuchen. Diese Eigenschaften der gemischten SAMs sind insbesondere bei der Analyse der Zelladhäsion vorteilhaft, weil Zellen selbst adhäsive Moleküle sezernieren, welche die Eigenschaften der Oberfläche, an die sie gebunden werden sollen, verändern würden und ebenso die sie umgebende Oberfläche, wenn sie nicht mit gemischten SAMs „inert" ausgestaltet werden würden.

Eine elegante, flexible und relativ einfache Methode, um verschiedenartige gemischte SAMs für oben genannte biologisch-biochemische Untersuchungen herzustellen, beschreibt Whitesides et al. (US 7 276 286 B2, US 2006/0138083 A1). Ausgehend von Alkanthiolen mit endständigen $(EG)_3OH$ und/oder $(EG)_6OCH_2CO_2H$ Gruppen können die Carbonsäuregruppen (CO_2H) durch Kopplung mit Aminen mit chemischen Standard-Methoden aktiviert werden (Figur 5):

Figur 5A zeigt schematisch Alkanthiolat-SAMs auf Gold mit endständigen Carboxylgruppen, welche zum Anhydrid reagieren können. Figur 5B zeigt ein Verfahren zur Herstellung von gemischten SAMs mit endständigen Amid- und Carboxylgruppen. Figur 5C illustriert die Bildung von gemischten SAMs mit endständigen Carboxyl- und Polymergruppen.

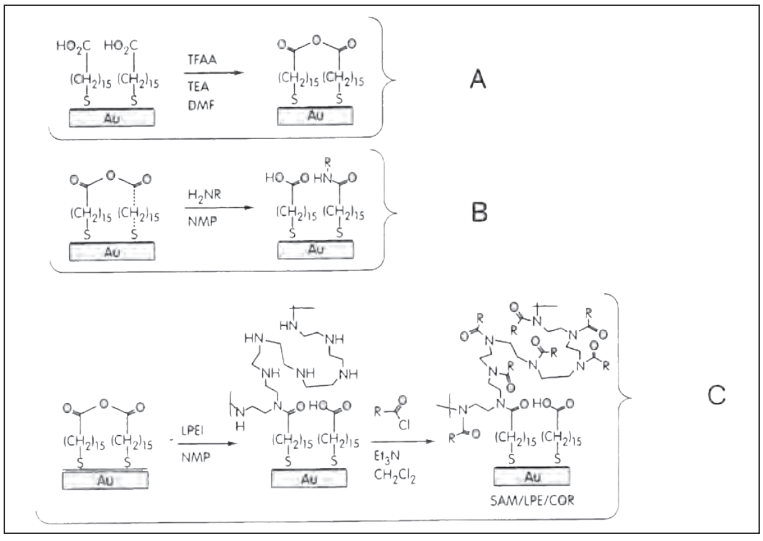
2.2 Replikatformen

Replikatformen ermöglicht einen Negativabdruck der in einer Vorlage gespeicherten Information (Struktur, Morphologie). Simultan können damit auch dreidimensionale Strukturen kopiert werden. Replikatformen mit einem geeigneten Material können also komplexe Strukturen einfach, schnell und günstig vervielfältigen (EP 0 8327 26 B1).

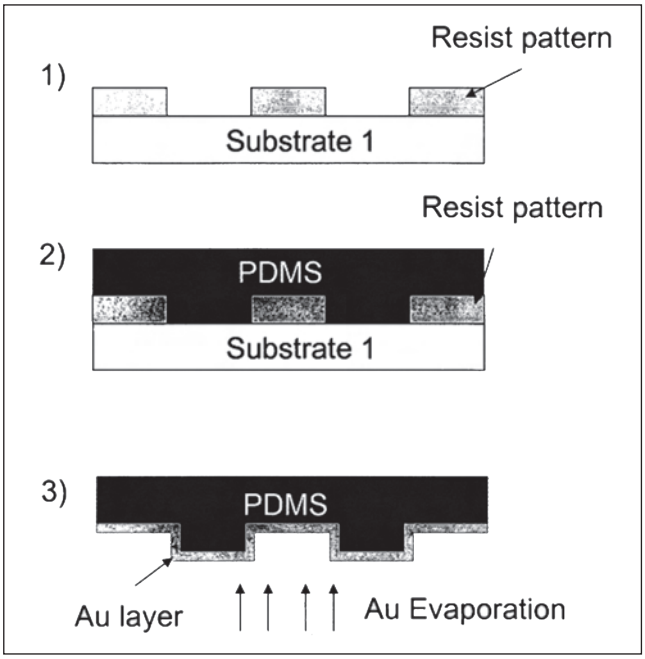
2.3 Elastomere Stempel und Gussformen

Die Verknüpfung von SAMs mit räumlich definierten Strukturen ermöglicht die Kontrolle von Ober-flächeneigenschaften verschiedenster Materialien. Softlithographie ist in der Lage, durch Kombination von SAMs mit der Methode des Mikrokontakt-Druckens (vgl. Kapitel 3.) hoch aufgelöste Reliefstrukturen auf Oberflächen zu erzeugen. Bei diesem Verfahren (μCP) überträgt eine elastomere Mikrostruktur, welche als Stempel, Gussform bzw. Maske dient, Material auf eine Ziel-Oberfläche. Diese elastomeren Stempel, Gussformen bzw. Masken werden gewöhnlich durch Replikatformen hergestellt, indem die flüssige Polymervorstufe eines Elastomers über eine (meist silanisierte) Vorlage mit der gemusterten Reliefstruktur gegossen wird (Schritt von 1) nach 2) in Figur 6).

Das Härten und Abziehen des elastomeren PDMS-Stempels vom Substrat 1 erfolgt in Figur 6 im Schritt von 2) nach 3). Die gemusterte Reliefstruktur der Vorlage (Resist pattern)

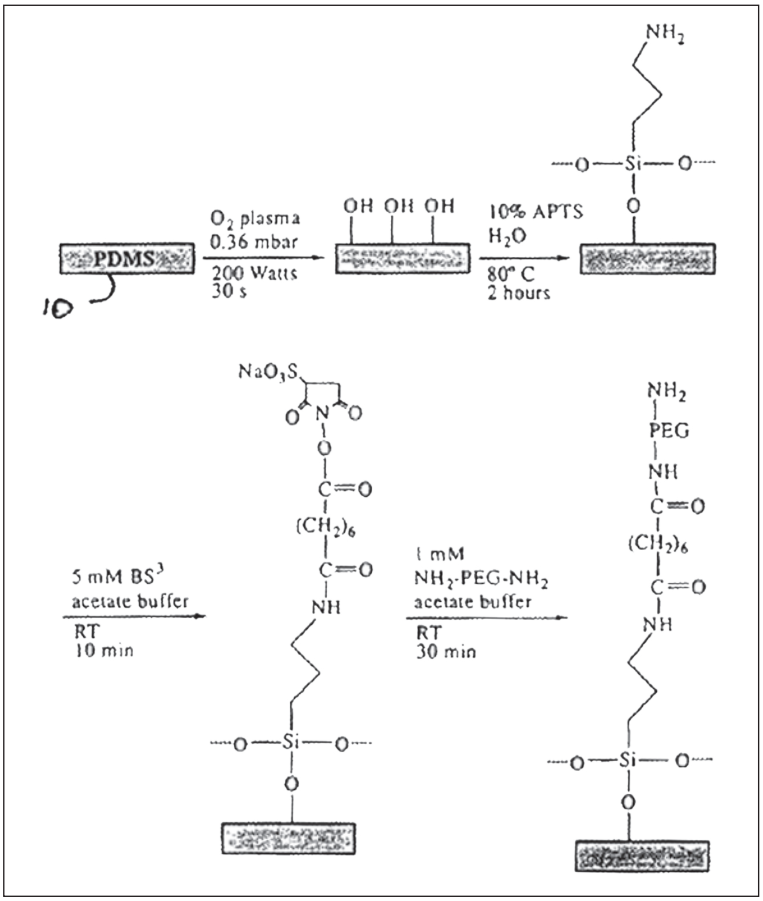


Figur 5: Herstellung und Struktur einer gemischten SAM mit typischen Alkanthiolen zur Anwendung in den Biowissenschaften aus US 7 276 286 B2.



Figur 6: Schematische Darstellung des Herstellungs-verfahrens eines PDMS-Replikats von einer Vorlage, welche Reliefstrukturen auf ihrer Oberfläche trägt aus US 6 020 047 A.

besteht i. A. aus SiO_2, Si_3N_4, Metallen, Photoresists bzw. Wachsen. Als „Substrat 1" in Figur 6 dient bevorzugt Si, SiO_2 und Glas (US 6 020 047 A, WO 00/34781 A2). Das bei diesen Verfahren in der Softlithographie am meisten verwendete Elastomer ist neben anderen Gruppen (Polyurethane, Polyimide und Phenol-Formaldehyd-Harze) vor allem Poly(dimethylsiloxan) (PDMS). PDMS bietet in der Softlithographie viele vorteilhafte Eigenschaften: (i) es adaptiert sich der Oberfläche des Substrates in einem relativ großen Bereich und ist deformierbar genug, um zu einem direkten Kontakt mit nicht ebenen Oberflächen im µm-Bereich zu kommen, (ii) aufgrund seiner Elastizität lässt sich PDMS auch von fragilen bzw. komplexen Strukturen ablösen, (iii) PDMS ist chemisch inert und besitzt eine geringe Oberflächenspannung, modellierte Polymerkörper haften oder reagieren deshalb reversibel mit der PDMS-Oberfläche, (iv) PDMS ist homogen und bis 300 nm optisch durchlässig, weshalb Polymervorstufen aktinisch gehärtet werden können, (v) PDMS ist haltbar, (vi) PDMS ist nicht-toxisch und leicht kommerziell verfügbar, (vii) PDMS ist permeabel für nichtpolare Gase einschließlich Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid, was für die Anwendung bei Vorrichtungen mit Mikrokanälen für menschliche Zellkulturen Voraussetzung ist, (viii) PDMS kann mittels Plasma einfach oberflächenmodifiziert werden (EP 1 193 056 A1, EP 1 193 056 A1) (Figur 7).

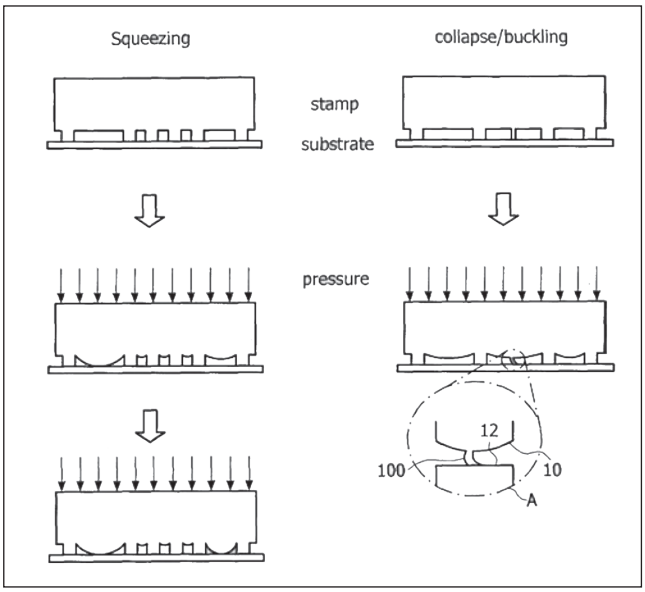


Figur 7: Schematische Darstellung der Derivatisierung einer PDMS-Oberfläche aus EP 1 193 056 A1.

Figur 7 zeigt im ersten Schritt die Behandlung des PDMS-Stempels (10) mit O_2-Plasma, und in den folgenden Schritten die Einführung einer Amino-Gruppe mittels Aminopropyltriethoxysilan (APTS) zum Aufbau einer SAM, der anschließenden Umsetzung mit dem Crosslinker Bis(sulfosuccinimidyl)-suberate (BS^3) und im letzten Schritt der Reaktion mit einem Amino-funktionalisierten Polyethylenglykol (PEG). Je nach Art der terminalen Gruppen der SAM des Endproduktes in Figur 7 entstehen unterschiedliche Oberflächeneigenschaften (EP 1 193 056 A1, US 7 276 286 B2, WO 03/018854 A2) des PDMS-Stempels.

Beim Einsatz von PDMS-Stempeln in der Softlithographie sind jedoch zur Erzeugung hoch aufgelöster Muster bzw. Strukturen generell bestimmte Bedingungen einzuhalten, da sonst mögliche Verzerrungen und Deformationen infolge Durchhängen

(Figur 8), Paarbildung (bei zu schlanken Reliefstrukturen) oder Schrumpfen der PDMS-Mikrostrukturen auftreten können.

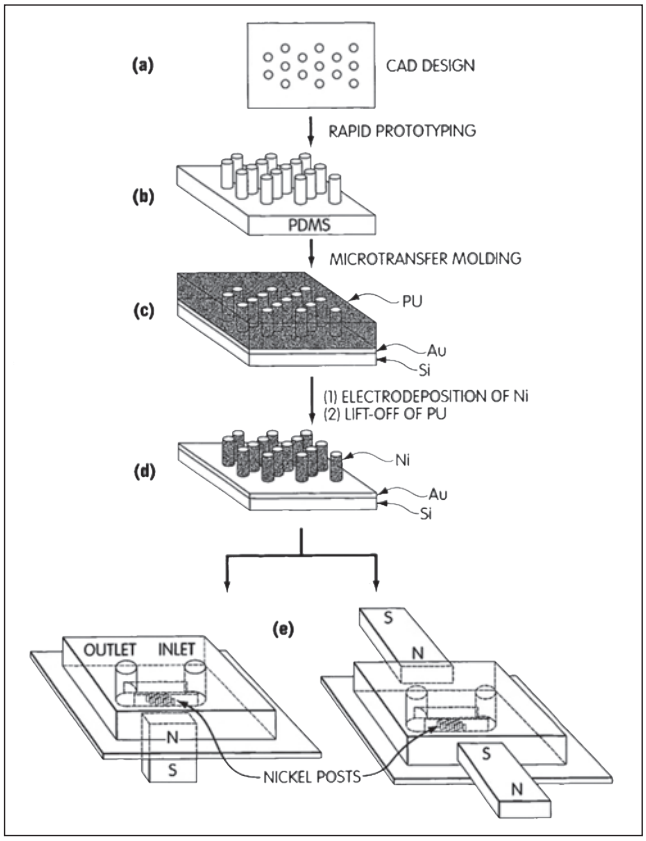


Figur 8: Mögliche Deformationen und Verzerrungen von Mikrostrukturen auf der Oberfläche von Elastomeren wie PDMS, aus WO 2005/045524 A2.

Die Reliefstrukturen des Stempels sind typischen Drücken beim µCP-Verfahren und der Adhäsion zwischen Stempel und Substrat nicht gewachsen, wenn deren Abstände zu groß sind. Es kommt zum „Durchhängen" (Figur 8 links) oder zum Kollabieren bzw. Einknicken (Figur 8 rechts) der elastomeren Mikrostrukturen und somit zu einem unerwünschten Transfer von „Tinte" (zum Beispiel Alkanthiol-SAMs) auf niedrige Reliefstrukturen des Stempels (10) zum Substrat (12), was zu einer niedrigen Auflösung der erzeugten Muster führt. Beim Kollabieren des Stempels entstehen zusätzliche Kontaktstellen (Figur 8, rechts, 100) welche beim softlithographischen Verfahren Fehlmuster erzeugen würden bzw. die Auflösung reduzieren (WO 2005/045524 A2, DE 103 44 777 B4).

2.4 Vorlagenerzeugung und schnelle Prototypenherstellung (Rapid Prototyping)

Die Anwendbarkeit softlithographischer Verfahren ist vielfach durch die Verfügbarkeit geeigneter Vorlagen limitiert. Vorlagenmuster zur Erstellung von PDMS-Stempeln bzw. PDMS-Gussformen mit komplexen Oberflächen beruhen hauptsächlich auf der Methode der Photolithographie (US 5 512 131 A). Der aufwändigste und teuerste Schritt der Photolithographie-Technik ist die Herstellung der Photomaske. Whitesides et al. (WO 02/09125 A2, WO 2008/060449 A2, WO 02/022787 A2, WO 01/51276 A1) haben ein System entwickelt, das die Herstellung von Vorlagen (Masken) mit komplexen Strukturen im unteren µm-Bereich schnell und kostengünstig ermöglicht. Bei diesem Verfahren werden die Zielstrukturen mit CAD (Computer Aided Design) gezeichnet und direkt mit einem kommerziellen, lasergestützten Photosatzsystem auf Polymerfolien gedruckt (Figur 9 (a)).



Figur 9: Prinzip der Vorlagenerzeugung und schneller Prototypenherstellung in der Softlithographie aus WO 02/093125 A2.

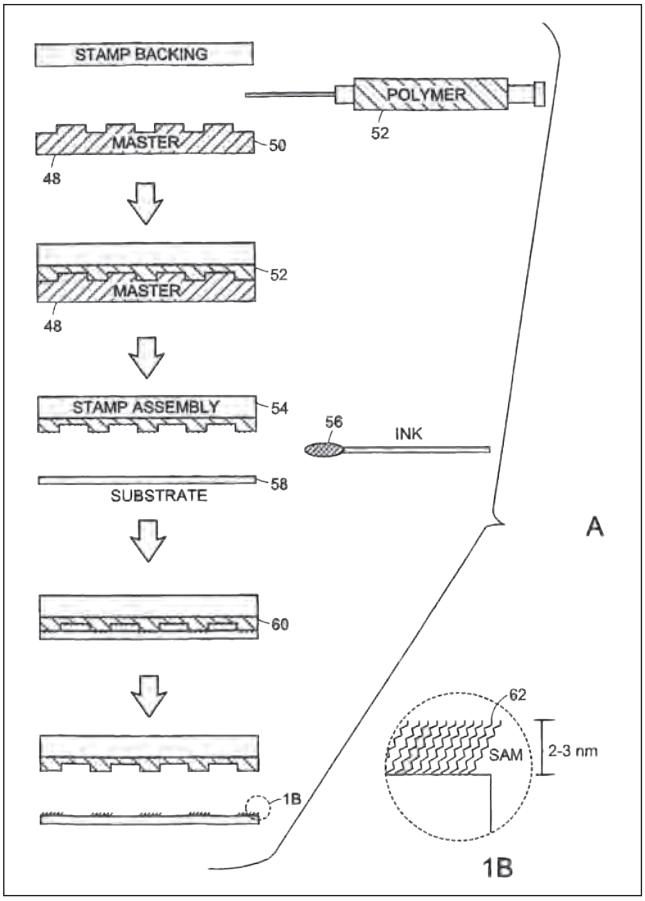
So können Photomasken aus transparenten Polymerfolien mit Mikrostrukturen aus schwarzer Tinte relativ schnell und preiswert produziert werden. Diese eignen sich vor allem für die Herstellung einfacher Strukturen, welche in mikrofluidischen oder mikroanalytischen Systemen bzw. in Biosensoren verwendet werden können (WO 2006/113727 A2, WO 2005/066613 A1, US 6 645 432 A). Nach dem photolithographischen Transfer der mikrostrukturierten Polymerfolien in Photoresists auf Siliziumsubstrate können die so hergestellten Mikromuster als Vorlage für die gewünschten PDMS-Stempel verwendet werden (Figur 9 (b)). Durch Kombination dieser Methode, welche als auch „schnelle Prototypenherstellung" bezeichnet wird, mit weiteren softlithographischen Verfahren, wie zum Beispiel dem so genannten Mikrotransferformen (vgl. Figur 9 (c) und Kapitel

4.1), ist es möglich, innerhalb eines Tages nach Abschluss des CAD-Entwurfes gemusterte Mikrostrukturen aus Polymeren und Metallen herzustellen (WO 01/51276 A2).

3. Mikrokontakt-Drucken (Microcontact printing, µCP)

Die Fähigkeit, Eigenschaften von Oberflächen mit SAMs steuern zu können, ermöglicht neben dem Studium biologischer Abläufe, wie beispielsweise der Zelladhäsion, welche bevorzugt an Grenzflächen auftritt, auch die Durchführung miniaturisierter Hochdurchsatz-Assays. Aktuelle Anwendungen von Mikrofabrikationstechniken in den Biowissenschaften erfordern Vorrichtungen im Sub-Mikrometerbereich (WO 2008/051265 A9).

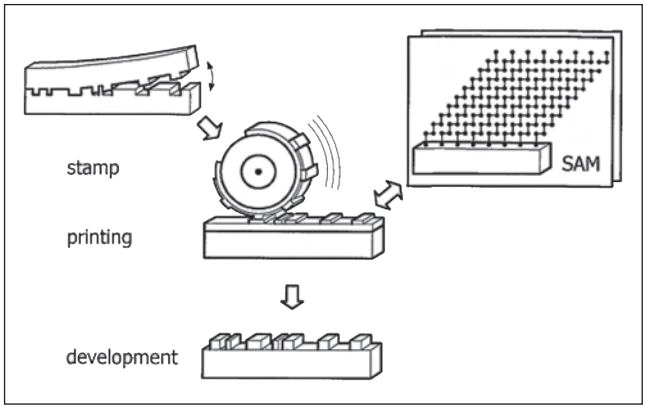
Mikrokontakt-Drucken ist eine flexible, nichtphotolithographische Technik, die routinemäßig eingesetzt werden kann, um Mikrostrukturen bzw. Mikromuster von SAMs unterschiedlicher chemischer Funktionalität auf Oberflächen zu übertragen. Figur 10, Teil A zeigt schematisch die entsprechenden Verfahrensschritte.



Figur 10: Schematische Darstellung der Verfahrensschritte beim Mikrokontakt-Drucken (µCP) auf eine planare Oberfläche aus WO 03/065120 A2.

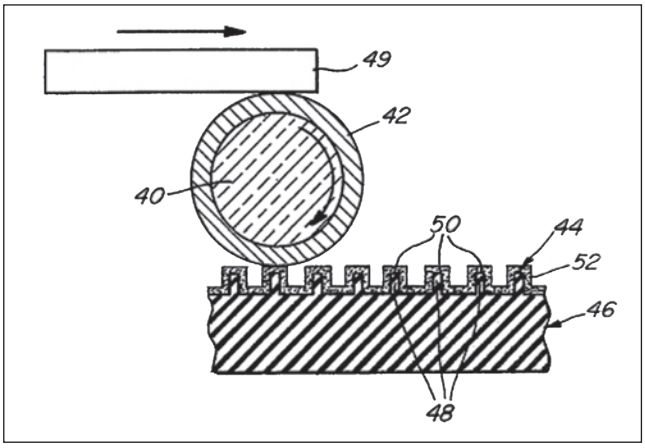
Im ersten Schritt wird durch eine Mikrofabrikationsmethode, wie beispielsweise der Photolithographie, eine Vorlage (Master) (48) erzeugt. Anschließend wird beim Replikatformen mittels eines Polymers (52) (meist in Form eines flüssigen Vorläufers) eine umgekehrte Topologie erzeugt, welche die geplanten Zielstrukturen im Submikrometerbereich und sogar mit Nanometerauflösung zuverlässig auf die Vorlage überträgt. Nach dem Aushärten des Polymers (zum Beispiel PDMS) wird das elastomere Replikat (Stempel) (54) von der Vorlage abgezogen. Der (PDMS-) Stempel wird dann mit Alkanthiol-SAMs („Tinte") (56 in Figur 10, Teil A) behandelt und letztere mittels Kontaktphänomenen (60, Figur 10, Teil A) auf eine andere Oberfläche, nämlich das Substrat (58), übertragen.

Es wird also die Struktur einer monomolekularen Schicht (62 in Figur 10, Teil 1B), entsprechend vorher definierter Kontaktbereiche (Stempelflächen) auf ein Substrat übertragen (WO 03/065120 A2). Figur 11 zeigt beim µCP-Verfahren das Bedrucken größerer Substratflächen mit einem Rollstempel.



Figur 11: Bedrucken größerer Bereiche mit einem Rollstempel beim µCP-Verfahren; aus WO 2005/049741 A1.

Figur 12 zeigt das Bedrucken einer unebenen Substratoberfläche (zum Beispiel einer Glaskapillarwand) mit einem planaren Stempel (WO 98/27463 A1, WO 2005/045524 A2, DE 10 2004 061 731 B4, EP 0 948 757 B9, WO 96/29629 A1, US 7 163 712 B2, WO 98/010334 A, US 7 338 613 B2, US 6 893 851 B2, WO 2005/049741 A1, WO 2006/113727 A2, US 7 117 790 B2, US 5 900 160 A, US 6 893 966 B2, WO 2005/045524 A2, WO 97/07429 A1, DE 697 07 853 T2, WO 03/065120 A2, WO 02/071151 A1, WO 02/04113 A2, WO 2007/021590 A2, US 6 776 094 B1, US 2006/013808 A, US 2002/0094572 A1, WO 2004/000471 A1).



Figur 12: Bedrucken einer unebenen Substratoberfläche mit einem planaren Stempel beim µCM-Verfahren aus WO 97/07429 A1.

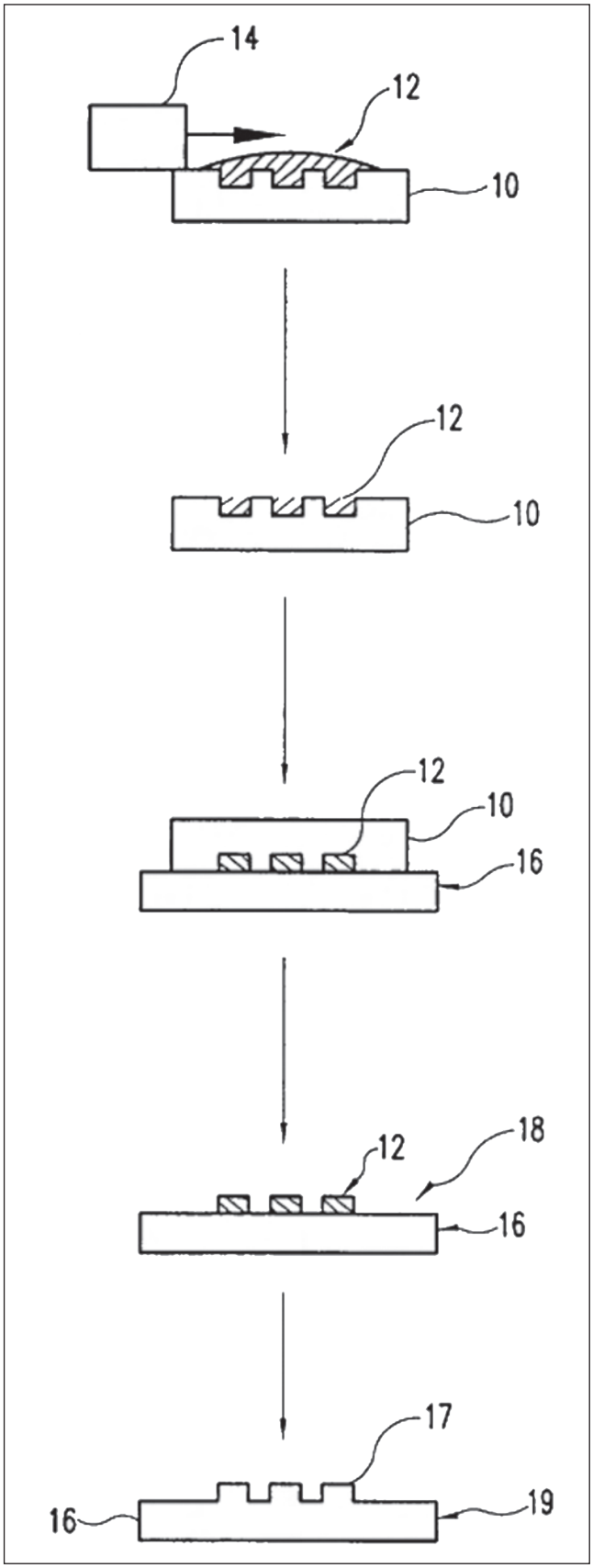
Das Mikrokontakt-Drucken mit Peptid- bzw. Protein-haltigen Lösungen auf Nicht-Gold- beziehungsweise Silbersubstraten wie etwa PET (Poly(ethylenterephthalat), PEI (Poly(ethylenimin)) oder Glas ist ebenfalls für biowissenschaftliche Anwendungen geeignet (US 7 163 712 B2, WO 02/06407 A2).
Die US 2006/0237080 A1 beschreibt im Übrigen eine interessante Technik zur Musterbildung innerhalb mikrofluidischer Kanäle unter Anwendung des µCP-Verfahrens für zellbiologische Untersuchungen.

4. Mikroformen

4.1 Miktotransferformen (µTM)

Wie in Figur 13 dargestellt, wird beim Mikrotransferformen ein Tropfen eines Polymer-Precursors (12) auf die gemusterte Oberfläche einer (PDMS-) Gussform (10) appliziert und die überschüssige Flüssigkeit entweder mit einem ebenen PDMS-Block (14) abgezogen oder durch Wegblasen mit N_2-Gas entfernt.

Im darauf folgenden Schritt wird dann die gefüllte Gussform mit dem Substrat (16) in Kontakt gebracht, aktinisch bestrahlt oder thermisch erhitzt. Nach dem Aushärten des flüssigen Polymer-Precursors zu einem Festkörper, wird die (PDMS-) Gussform (10) sorgfältig abgehoben, sodass die gemusterte Mikrostruktur auf dem Substrat bzw. Träger (16) verbleibt. Das Mikrotransferformen ermöglicht sowohl die Herstellung von isolierten, als auch miteinander verbundenen Mikrostrukturen. Gegenüber konventionellen mikrolithographischen Verfahren besitzt das µTM den Vorteil, dass auch relativ komplexe Mikrostrukturen auf relativ großen, unplanaren Oberflächen geschaffen werden können und somit auch 3D-Mikrostrukturen, was vor allem für Anwendungen auf dem

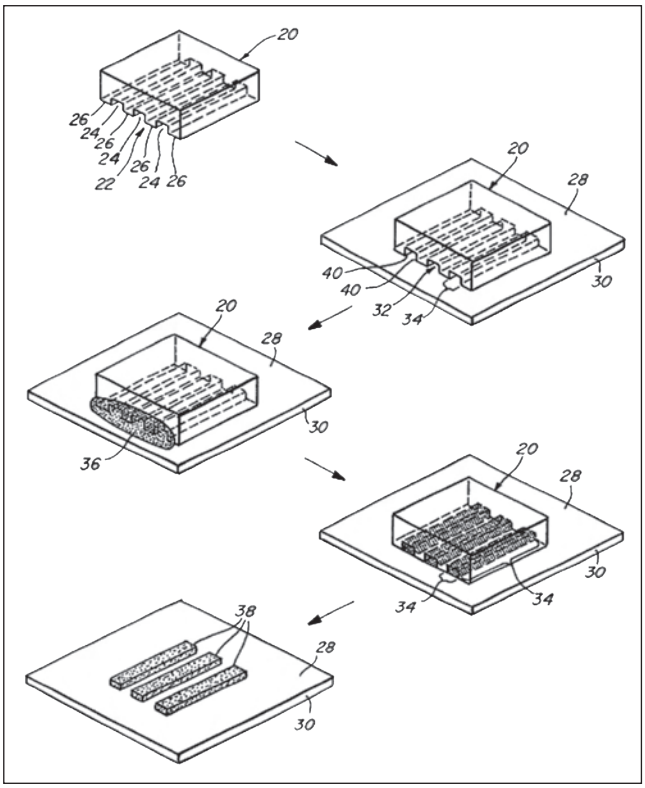


Figur 13: Prinzip des Mikrotransferformens aus US 6 027 595 A.

Gebiet der Gewebeverarbeitung und der Biomaterialien von großem Interesse ist (US 6 027 595 A, US 2002/0066978 A1, WO 02/093125 A2, US 6 143 412 A, WO 98/034886 A1, US 7 020 355 B2, US 2006/0237080 A1).

4.2 Mikroformen in Kapillaren (MIMIC)

Eine weitere softlithographische Technik ist das Mikroformen in Kapillaren (MIMIC). Mit diesem Verfahren ist es möglich, komplexe Mikrostrukturen, wie beispielsweise Mikroperlen mit biochemisch aktiven Molekülen, auf ebenen und gewölbten Oberflächen zu erzeugen. In Figur 14 wird das Prinzip von MIMIC schematisch skizziert. Im ersten Schritt wird die (PDMS-) Gussform (20) auf einen Träger (Substrat) (30) gesetzt, an dessen Oberfläche (28) sie sich adaptiert. Die Reliefstruktur (22), bestehend aus Einbuchtungen (24) und Kontaktstellen (26), bildet dann ein Netzwerk leerer Kanäle. Im darauf folgenden Schritt wird an den offenen Enden dieses Netzwerks ein Polymervorläufer mit geringer Viskosität aufgetragen, sodass sich im dritten Schritt des Verfahrens die Kanäle spontan durch die wirkenden Kapillarkräfte füllen. Nach Aushärten des Polymervorläufers wird die Gussform (20) entfernt, sodass das Netzwerk des polymeren Materials (38) auf der Oberfläche des Substrates (Trägers) (30) zurückbleibt. Das Material (38) kann



Figur 14: Prinzip des Mikroformens in Kapillaren (MIMIC) aus US 6 752 942 B2.

neben verschiedensten Polymeren auch aus Biomakromolekülen, wie zum Beispiel Proteinen bestehen, welche als Sensor für andere biologisch aktive Agenzien dienen können.

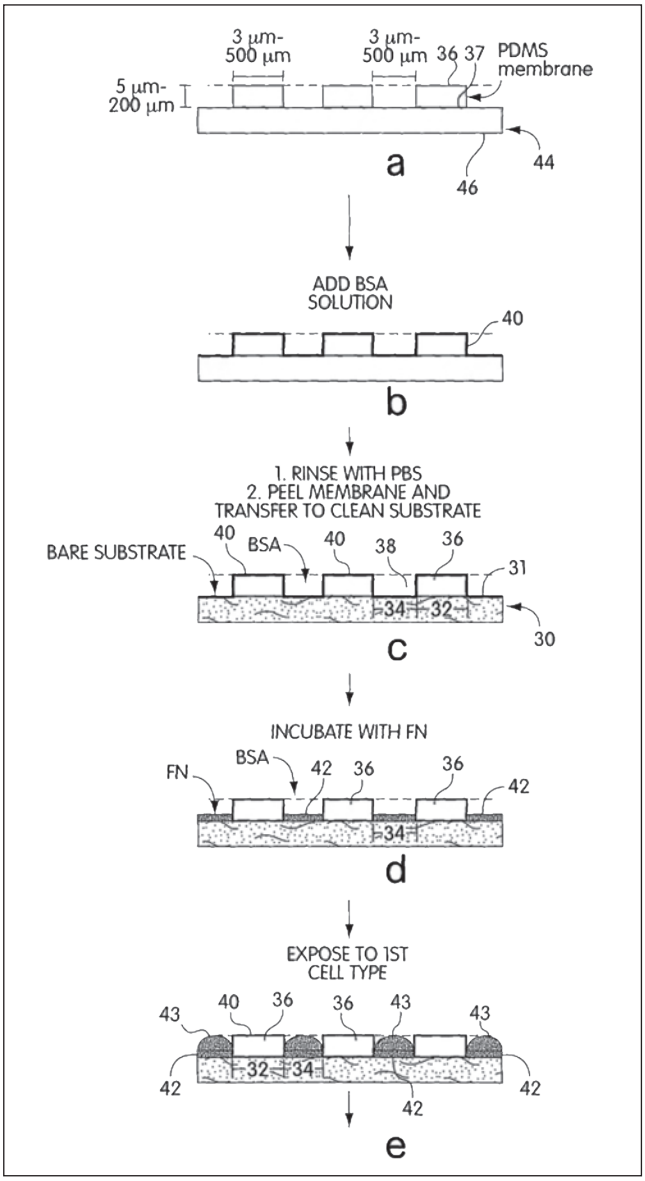
MIMIC kann mehr Materialsorten bedrucken als die konventionelle Photolithographie und erzeugt das geplante Strukturmuster in wenigen Schritten. Darüber hinaus können mit dieser Technik auch uneinheitliche Schichtdicken gezielt hergestellt werden (US 7 198 747 B2, US 2007/0000866 A1, US 6 752 942 B2).

5. Elastomere Membranen als Maskierungssysteme

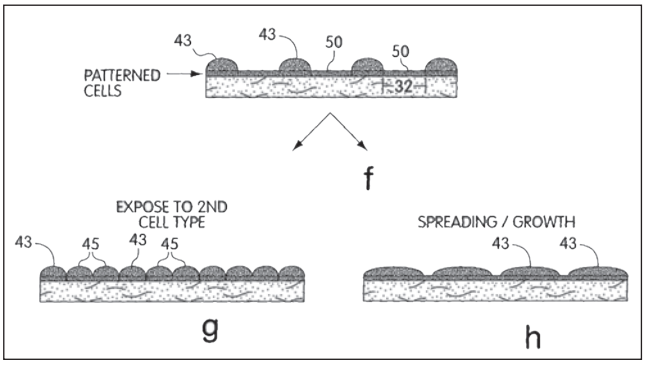
Elastomere Membranen können auch als Maskierungssysteme zur Ausbildung von Zellmustern auf bestimmten Trägern ohne Einsatz konventioneller photolithographischer Techniken verwendet werden (WO 02/04113 A2, US 6 893 851 B2). Diese Methode ist einfach und günstig und ermöglicht unter Anderem. das Studium von Zellwachstum, Zellwanderung und die gleichzeitige Bemusterung mit verschiedenen Zelltypen. Die nachfolgenden Figuren 15 und 16 veranschaulichen das Prinzip dieser Methode am Beispiel eines Verfahrens zur Bestimmung der Zellwanderung (WO 01/70389 A2, US 6 893 851 B2). Im ersten Schritt (vgl. Figur 15, a nach b) wird eine PDMS-Maske (36) (Membran; Maskierungssystem) auf dem Substrat (44) mit einem Zelladhäsionsinhibitor (40) (BSA; Bovines Serumalbumin) beschichtet. Die Oberfläche (37) der elastomeren PDMS-Maske (36) bleibt hingegen BSA-frei. Nach anschließendem Waschvorgang mit PBS-Puffer, wird die elstomere Membran (36) vom Substrat (44) abgelöst (so genannte „Dry-Lift-off-Technik") und auf ein neues Substrat (30) (zum Beispiel eine Petrischale) transferiert (Figur 15c). Nach Behandeln mit dem Zelladhäsions-Promoter Fibronectin (42) (FN; ein extrazelluläres Matrixprotein) adsorbiert dieser nur in den Bereichen der Petrischale (30), die durch die Löcher der Membran (36) begrenzt sind (Figur 15d) und steuert somit die selektive Adhäsion von Zellen in diesen Bereichen (Figur 15e). Die Ablösung der Membran (36) führt zu einem Zellmuster wie in Figur 16f dargestellt.

Die weitere Applikation eines Zell-Adhäsions-Promotors (50) in den Abschnitten (32) führt zum Zellwachstum bzw. zur Zellspreitung nur in diesen Bereichen (Figur 16h).

Alternativ kann der zweite Zelladhäsions-Promoter so gewählt werden, dass er nur spezifisch für die Zellen 43 und nicht für die Zellen 45 ist, so dass ein Zellmuster aus verschiedenartigen Zelltypen entsteht (Figur 16g und Kapitel 11.3).

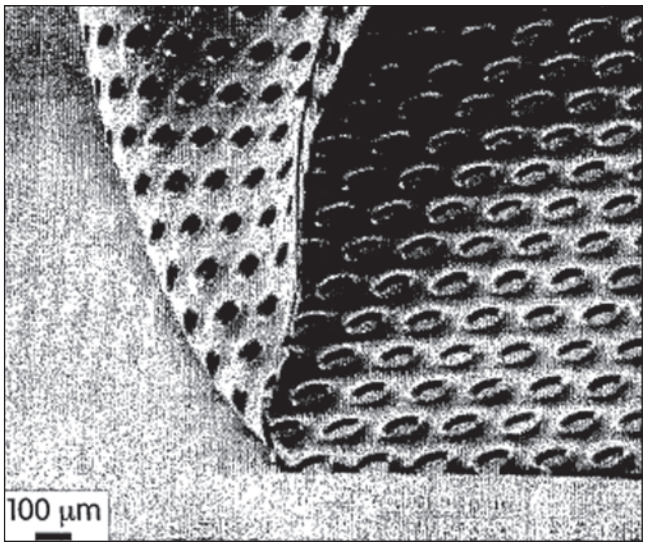


Figur 15: Elastomere Membranen als Maskierungssysteme (Teil 1) aus WO 01/70389 A2.



Figur 16: Elastomere Membranen als Maskierungssysteme (Teil 2); aus WO 01/70389 A2.

Figur 17 zeigt eine Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer elastomeren Maskierungsmembran für biowissenschaftliche Anwendungen mit ca. 100 µm großen Löchern. Die Membran ist ca. 50 µm dick.

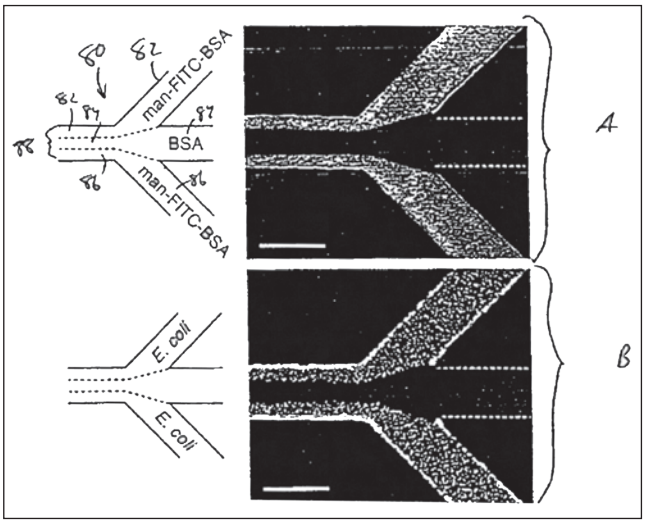


Figur 17: REM Aufnahme einer softlithograhisch hergestellten Membran aus WO 01/70389 A2.

6. Mikrofabrikation mittels laminarer Strömung in mikrofluidischen Systemen

In mikrofluidischen Systemen mit Kanaldurchmessern von 50 µm zeigen Fluide laminares Verhalten. Zwei Flüssigkeitsströme, welche aus zwei unabhängigen Zuläufen in einen gemeinsamen Kanal einer mikrofluidischen Struktur fließen, mischen sich nicht wirbelstromartig, sondern fließen in benachbarten, voneinander getrennten laminaren Strömen, die sich nur an ihren Kontaktstellen mittels Diffusion mischen. Dieses Prinzip kann nun auch dazu verwendet werden, Oberflächen zu strukturieren oder Mikrostrukturen an der Schnittstelle zwischen verschiedenen fluidischen Strömen zu erzeugen (US 2003/0124509 A1, WO 02/086333 A1, US 6 653 089 B2). Nachfolgende Figur 18 verdeutlicht das Prinzip der Erzeugung von Mikrostrukturen mittels fluidischer Ströme am Beispiel einer Zellmusterbildung. Ein kapillares Netzwerk (80), welches aus drei Einlaufkanälen (82), (84) und (86) und dem Hauptkanal (88) besteht, wird dadurch erzeugt, dass ein PDMS-Elastomer mit Strukturen dieses kapillaren Netzwerks mit der flachen Oberfläche einer Polystyrol-Petri-Schale in Berührung gebracht wird. Das Kapillarsystem wird anfangs mit Wasser gefüllt, indem die Zuläufe mit Wasser gefüllt und an den Auslässen Vakuum angelegt wird. Anschließend wird eine Lösung eines fluoreszierenden Neoglykoproteins

(man-FITC-BSA) in die Einlässe (82) und (86) und eine Lösung von BSA (bovines Serumalbumin) in die Kapillare (84) gebracht, von wo aus sie in den Hauptkanal (88) fließen, ohne sich dort turbulent zu vermischen, sodass sich die Einlässe (82), (84) und (86) im Innern des Hauptkanals fortsetzen.

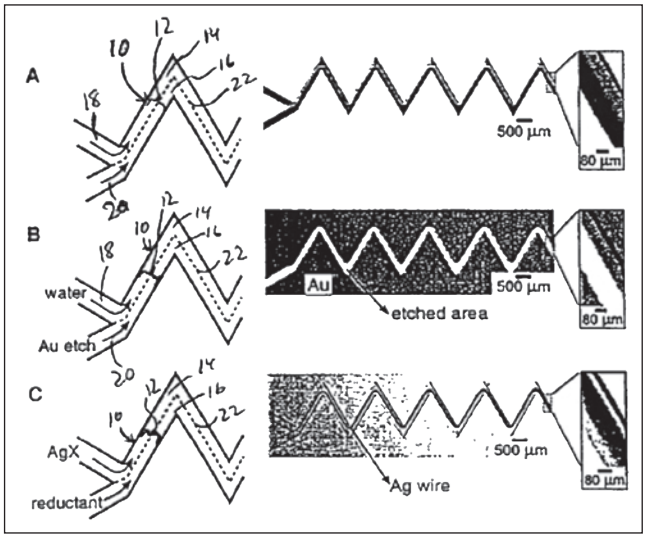


Figur 18: Mittels fluidischer Ströme erzeugte Mikrostrukturen adsorbierter biologischer Spezies aus US 2003/0124509 A1.

Im Strom des Hauptkanals binden die Proteine nicht-spezifisch an der Oberfläche der Bereiche (82) und (86) (Figur 18A). Das Kapillarnetzwerk wird anschließend mit einer Suspension von E.Coli-Zellen, welche spezifisch an Mannose-präsentierende Oberflächen binden, gefüllt.

E. Coli-Zellen haften nur an denjenigen Bereichen des Hauptkanals (88), die Mannose-enthaltende Neoglykoproteine gebunden haben (Figur 18B).

Figur 19 (Teil C) zeigt ein weiteres Beispiel, wie man mittels Laminarströmung (Laminar Flow) Mikrostrukturen erzeugen kann. Ein Silberdraht wird innerhalb des Mikrokanals (10) durch Fällung einer galvanischen Lösung aus Silberhalogenid (AgX) und Reduktionsmittel (reductant) an der Schnittstelle zweier Flüssigkeitsströme erzeugt. Dieser kann zur Herstellung von Elektroden innerhalb einer Kapillare und somit in elektrochemischen Assays und zur potentiometrischen Messung des Zellverhaltens verwendet werden. Die Herstellung von Elektroden, welche kleiner als mikrofluidische Kanäle sind und darin parallel verlaufen, ist ausschließlich durch softlithographische Techniken möglich (US 6 653 089 B2, US 2006/0237080 A1, US 2003/0124509 A).



Figur 19: Stromlose Abscheidung an der Grenze eines Mulit-Komponenten-Flüssigkeitsstromes (C) aus US 2003/0124509 A.

7. Mustererzeugung mittels zweidimensionaler mikrofluidischer Strukturen

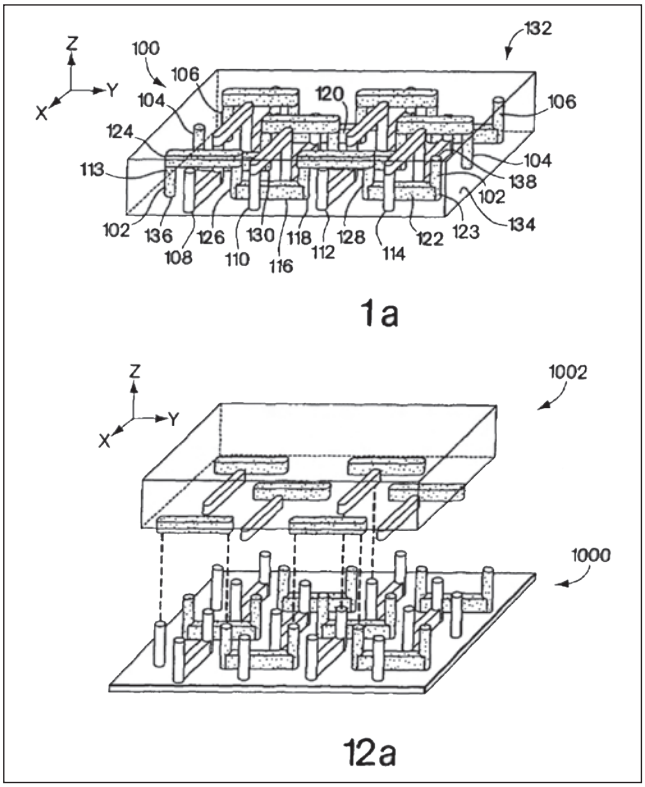
Auch Kanalsysteme, zum Beispiel mehrere benachbarte Kapillaren, in Verbindung mit laminarer Strömung können dazu verwendet werden, Oberflächen mit verschiedensten Materialien aus Lösungen zu bemustern oder chemische Reaktionen auf Oberflächen zu steuern. Ein derartiges System benötigt nur geringe Reagenzienmengen und findet Anwendung bei Immunoassays. Laminare Strömung bei Fluiden kann vor allem dazu verwendet werden, um im Innern einer Kapillare oder eines Mikrokanals Muster von Proteinen oder Zellen zu erzeugen (US 2004/0258571 A1, US 6 653 089 B2).

8. Mustererzeugung mittels dreidimensionaler mikrofluidischer Strukturen

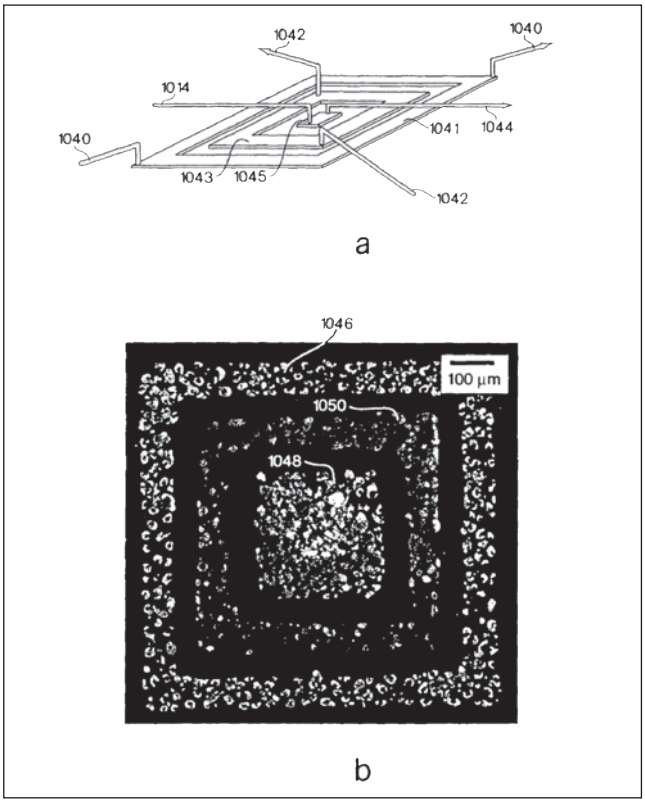
Durch Stapelung von Membranen ist es möglich, dreidimensionale mikrofluidische Strukturen herzustellen, mit denen wiederum komplexe Muster verschiedenartiger Materialien in einem Schritt auf Oberflächen durch Abscheidung aus der Lösung erzeugt werden können. Teil 1a in Figur 20 zeigt eine perspektivische Ansicht eines dreidimensionalen mikrofluidischen Netzwerks mit gewebeartig untereinander verbundenen Kanälen.

Figur 20, Teil 12a zeigt eine obere (1002) und eine untere (1000) Stempelvorlage zur Herstellung des fluidischen Netzwerks in Figur 21, Teil 1a.

Nachfolgende Figur 21 erläutert die gezielte, strukturierte Abscheidung von verschiedenen Zelltypen auf einer Ober-



Figur 20: Dreidimensionales mikrofluidisches Netzwerk aus US 7 267 938 B2.



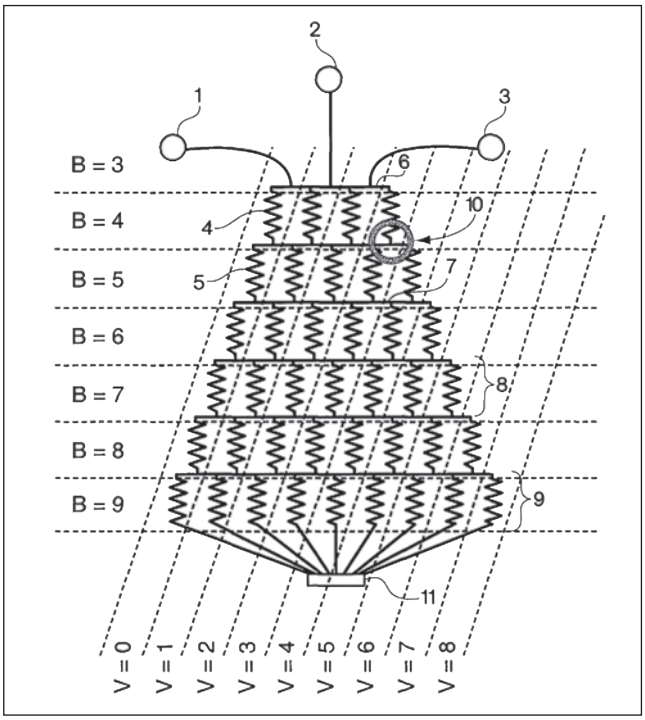
Figur 21: Dreidimensionales mikrofluidisches System mit adsorbierten Zellsystemen aus US 7 267 938 B2.

fläche (Zellkulturschale) mittels zweier verschiedenartiger mikrofluidischer Systeme. Die (PDMS-) Oberfläche des mikrofluidischen Stempels in Figur 21a besteht aus Kanälen in Form eines konzentrischen, quadratischen Musters. Der Mikrofluidische Stempel besitzt darüber hinaus drei nicht-fluidisch verbundene Kanäle (1040, 1042 und (1044), wobei der Kanal (1040) in fluidischer Verbindung zum äußeren konzentrischen quadratischen Muster, Kanal (1042) in fluider Verbindung zum mittleren konzentrischen quadratischen Muster (1043) und Kanal (1044) in fluider Verbindung zum innersten konzentrischen quadratischen Muster (1045) steht. Nach dem Autoklavieren des PDMS-Stempels und Spülen der Kanäle mit BSA-Puffer wird die Stempeloberfläche in konformalen Kontakt mit der Oberfläche einer Zellkulturschale aus Polystyrol gebracht. Anschließend werden BCE-Zellsuspensionen (Bovine adrenal capillary endothelial cells) in die Kanäle (1040) und (1044) und ECV-Zellsuspensionen (ECV-Zellinie 304) in den Kanal (1042) eingeleitet. Hierbei sedimentieren die Zellen und adsorbieren an der Oberfläche der Zellkulturschale entsprechend der Musterung des PDMS-Stempels. Nach 24 Stunden Kultivierung auf der Zellkulturschale bildet sich eine konfluente Zellschicht auf der Zellkulturschale. In Figur 21b erscheint die ECV-Zellschicht (1050) im Fluoreszenzmikroskop grün, während die adsorbierten BCE-Zellschichten in den Bereichen (1046) und (1048) rot fluoreszieren. Mustererzeugung mittels dreidimensionaler Strukturen eignet sich folglich zur Herstellung von Arrays für Biosensoren oder Wirkstoff-Screening (US 7 267 938 B2, WO 2005/104756 A2).

9. Gradientenerzeugung mit mikrofluidischen Systemen

Entsprechend gestaltete mikrofluidische Kanäle können dazu verwendet werden, stabile (Konzentrations-) Gradienten von Proteinen, Oberflächeneigenschaften und fluidischer Ströme aus Wachstumsfaktoren, Toxinen, Enzymen, Wirkstoffen und anderen biologisch relevanten Molekülen zu erzeugen. Dies ist insbesondere wichtig für das Studium konzentrationsabhängiger biologischer Phänomene wie Wechselwirkungen an Zelloberflächen, Hochdurchsatzverfahren (High-Throughput Screening) mit Zell-Arrays und Zell-basierten Biosensoren (WO 02/22264 A2, US 7 374 906 B2). Das Prinzip der Gradientenerzeugung mittels mikrofluidischer Netzwerke wird anhand Figur 22 näher erläutert. Dargestellt ist ein mikrofluidisches System mit den Fluid-Zuführungen (1), (2) und (3), einer Vielzahl von serpentinenartig verlaufenden vertikalen Kanälen, zum Beispiel (4) und (5), horizontal verlaufenden Kanäle, zum Beispiel (6) und (7) so-

wie Verzweigungspunkte wie zum Beispiel (10). Ein Satz parallel verlaufender vertikaler Kanäle wird als Generation bezeichnet. Ein mikrofluidisches Netzwerk zur Gradientenerzeugung enthält wenigstens zwei Kanäle, welche bevorzugt serpentinenartig und im Allgemeinen parallel zueinander verlaufen.



Figur 22: Fluidisches Netzwerk zur Gradientenerzeugung aus WO 02/22264 A2.

Jede Generation kann jede beliebige Form, wie zum Beispiel eine Pyramide, annehmen. Das Netzwerk enthält außerdem einen Verbundkanal (11), welcher mit jedem der vertikalen Kanäle der letzten Generation verbunden ist. Zu Beginn der Gradientenerzeugung werden beispielsweise fluidhaltige Substanzen unterschiedlicher Konzentrationen in die Zuführungen (1), (2) und (3) bei gleichem Druck und gleicher Flussgeschwindigkeit injiziert. Über den gemeinsamen Kanal (6) werden die Fluide in die serpentinenartigen Mikrokanäle der ersten Generation eingespeist, zum Beispiel in Kanal (4). Bei gleicher Größe und Länge der jeweiligen „Serpentinenkanäle" fließt durch jeden Mikrokanal der ersten Generation nur mehr 3/4 der Menge der jeweiligen Zuführungen (1), (2) oder (3). In der zweiten Generation fließt durch jede dieser Mikrokanäle lediglich 4/5 der Menge wie in jedem der Mikrokanäle der ersten Generation usw., so dass letztlich an den neun Auslässen der letzten Generation ein definierter Konzentrationsgradient im Verbundkanal (11) generiert werden kann.

10. Anwendungen der Softlithographie in mikroskopisch dimensionierten biochemischen Testverfahren (Assays)

10.1 Einführung

Miniaturisierte biochemische Test- bzw. Analyseverfahren haben gegenüber konventionellen Assays den Vorteil, dass sie nur minimale Mengen an Analysesubstanzen bzw. Reagenzien bei gleichzeitig maximaler Probenzahl benötigen. Entscheidend für den Einsatz mikrofluidischer Strukturen ist die Erzeugung von Vorrichtungen, welche es ermöglichen, laminare Flüsse in 50 bis 200 µm dicken Kanälen bzw. Kapillaren zu steuern. Ähnlich wie bei turbulenten Systemen benötigen mikrofluidische Systeme mit laminaren Strömen (Reynolds-Zahl Re<<2000) gleichartige funktionale Bauteile, wie beispielsweise Pumpen, Konnektoren, Ventile und Mischer, jedoch von einer grundlegend neuen Bauart, da diese Fluide in diesem Fall nicht turbulent strömen. Wie bereits in den Kapiteln 1 bis 4 dargelegt, bieten softlithographische Techniken in Kombination mit elastomeren Materialien nun die Möglichkeit, einfach, billig und schnell mikrofluidische Komponenten herzustellen, so dass mit fortschrittlichen Strömungsbildgebungsverfahren die Herstellung dieser mikrofluidischen Komponenen schnell evaluiert werden kann (US 7 378 280 B2, US 2005/013374 A1, US 6 747 285 B2, WO 2007/092253 A2).

10.2 Komponenten

10.2.1 Pumpen

Mikrofluidische Pumpen können generell mechanisch (piezoelektrisch, elektrostatisch, elektromagnetisch, pneumatisch, thermopneumatisch, mit Ultraschall, mit Blasenbildung) und nichtmechanisch (mittels Oberflächenspannung, elektrohydrodynamisch, elektroosmotisch oder mittels Schwerkraft) betrieben werden. Mikrofluidische Pumpsysteme, welche softlithographisch hergestellt werden, sind in beiden Fällen funktionsfähig. Eine softlithographisch hergestellte mechanisch (pneumatisch) betriebene peristaltische Pumpe wird in der US 2008/0173365 A1 beschrieben. Beispiele für nichtmechanische Pumpsysteme in elastomeren PDMS-Kanälen bzw. Kapillaren sind solche basierend auf Elektroosmose (US 2005/0133741 A1), Gravitation (WO 2004/108011 A1), Elektrokinetik (US 6 572 749 B1, US 2004/0163957 A1, US 6 068 767 A), Oberflächenspannung (US 2004/0258571 A1) und Benetzung durch Kapillarkraft (US 6 537 499 B1). Aber auch externe Pumpen können zum Antrieb fluider Ströme in mikro-

fluidischen Kanälen verwendet werden (US 6 843 262 B2, US 2004/0258571 A1). Wichtig bei den verschiedenen Pumpsystemen sind die Strömungsprofile (parabolisch, komplex etc.), die sie erzeugen. Elektroosmotische Pumpsysteme erzeugen innerhalb gleichförmig geladener Kanäle einen tröpfchenenartigen Fluss, während druckbetriebene Pumpen parabolartige Flüsse generieren. Komplexere Flussprofile können in elektroosmotischen Pumpsystemen mittels unterschiedlich geladener Oberflächenmuster durch das Mikrokontaktverfahren (vgl. Kapitel 3) hergestellt werden (DE 10 2006 004 887 A1, EP 0 808 456 B1, WO 02/076878 A2, US 2008/0000772 A1).

10.2.2 Ventile

Ventile aus elastomerem Material (zum Beispiel PDMS) werden vielfach wegen ihrer Verformbarkeit als integraler Bestandteil eines mikrofluidischen Systems eingesetzt. Die US 6 767 194 B2 beschreibt beispielsweise Ventile mit PDMS-Klappen, die sich nur öffnen, wenn unidirektional Flüssigkeit durchströmt. Quake et al. (US 2008/0173365 A1, US 7 378 280 B2) beschreiben die Herstellung eines Ventils, bei dem ein pneumatisch erweiterter Kanal in einer Ebene einen darauf senkrecht positionierten Kanal in der benachbarten Ebene abschnürt.

10.2.3 Mischer

Das Mischen von Flüssigkeiten in mikrofluidischen Kanälen ist schwierig, da dort der Fluss im Allgemeinen laminar und nicht turbulent erfolgt. In Kanälen mit einem Durchmesser von 50 bis 200 µm erfolgt die diffusionskontrollierte Mischung langsam, besonders bei Partikeln (zum Beispiel Zellen) und Biopolymeren (zum Beispiel Proteinen, DNA). Laminare Mischer, wie zum Beispiel in der WO 2008/072968 A2 beschrieben, beruhen darauf, dass sie verschiedene dünne Schichten von zwei oder mehreren Flüssigkeiten erzeugen und somit die Berührungsflächen vergrößern bzw. den diffusionskontrollierten Mischungsprozess beschleunigen.

10.2.4 Detektoren

Für portable Analysesysteme ist es wichtig, dass Vorrichtung und Detektoren nicht voneinander getrennt sind. Mit Hilfe der Softlithographie können nun solche Assays relativ einfach hergestellt werden. Burns et al. (US 7 066 453 B2, US 6 271 021 B1) beschreibt die Herstellung einer mikrofluidischen Vorrichtung aus Silikon zur DNA-Analytik mit integriertem optischen Fluoreszenz-Detektor. Weitere Detektoren molekularbiologischer Untersuchungssysteme (Mikroarrays) beruhen nicht auf der Änderung der Fluoreszenz, sondern erkennen Änderungen im Brechungsindex. Weitere Detektoren, welche in miniaturisierten Analysensystemen zum Einsatz kommen, sind Flüssigkern-Wellenleiter (Liquid-Core Waveguides) (US 2003/0205853 A1, WO 00/26157 A1, WO 2006/015360 A1, WO 2006/086551 A2), mikrofluidische optische Gitter aus PDMS (US 2005/0133741 A1), Zell-basierte Sensoren aus Silicium (US 6 654 729 B1), sowie elektrochemische Sensoren (US 2004/0258571 A1).

10.3 Trennsysteme

Kapillarelektrophorese (CE) war die erste miniaturisierte analytische Trennungstechnik. Ein softlithographisch hergestelltes miniaturisiertes CE-System aus elastomerem PDMS wurde zur Trennung von DNA-Fragmenten eingesetzt (US 5 965 237 A). Dieses CE-System basiert darauf, dass das elastomere PDMS reversibel eine flache Glasoberfläche mit Druck versiegelt. Whitesides et al. (US 6 747 285 B2) haben nun mikrofluidische Systeme entwickelt, welche in der Lage sind, CE-Trennungen derart durchzuführen, dass Glasoberflächen mittels durch Plasmaoxidation behandelter PDMS-Kapillare irreversibel versiegelt werden. Die Oxidation von PDMS ist wichtig für die Kapillarelektrophorese, da dadurch Oberflächenladungen erzeugt werden, die den elektroosmotischen Fluss und somit Trennprozesse begünstigen.

Mathies et al. beschreiben mittels Mikrofabrikation hergestellte CE-Chips mit integrierten elektrochemischen Detektoren für DNA und Zellen (US 5 906 723 A).

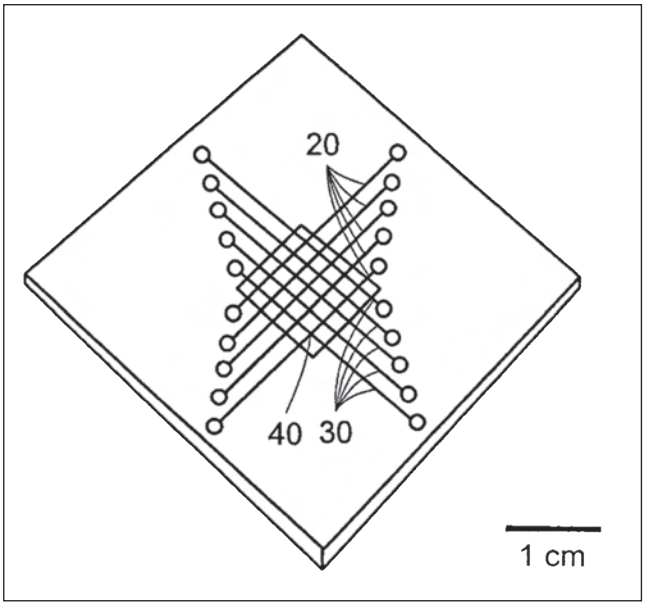
In der WO 99/61888 A9 wird ein mittels Softlithographie hergestellter, fluoreszenzbetriebener Zellsortierer (Cell sorter) und in der WO 01/75176 A2 eine durch Softlithographie hergestellte Vorrichtung zum Sortieren und zur Größenbestimmung von DNA-Molekülen in PDMS beschrieben. Austin et al. zeigt, dass mit Hilfe eines Gitters von softlithographisch hergestellten PDMS-Kanälen weiße Blutkörperchen entsprechend ihrer Größe, Morphologie und Oberflächeneigenschaften getrennt werden können (US 6 632 652 B1).

10.4 Systeme für Polymerase-Kettenreaktion (PCR) und DNA-Detektion/Analyse

Zahlreiche Arbeitsgruppen haben bereits Systeme zur Nukleinsäurevervielfältigung bzw. Nukleinsäuredetektion entwickelt (EP 1 246 700 B1, WO 00/62036 A1, WO 00/61818 A1, WO 2004/061085 A2, US 5 906 723 A). Mit Hilfe der Softlithographie, insbesondere der Technik des Replikatformens, ist es möglich geworden, analytische Chips für miniaturisierte PCR-Systeme billig aus Polymeren herzustellen (US 7 118 910 B2).

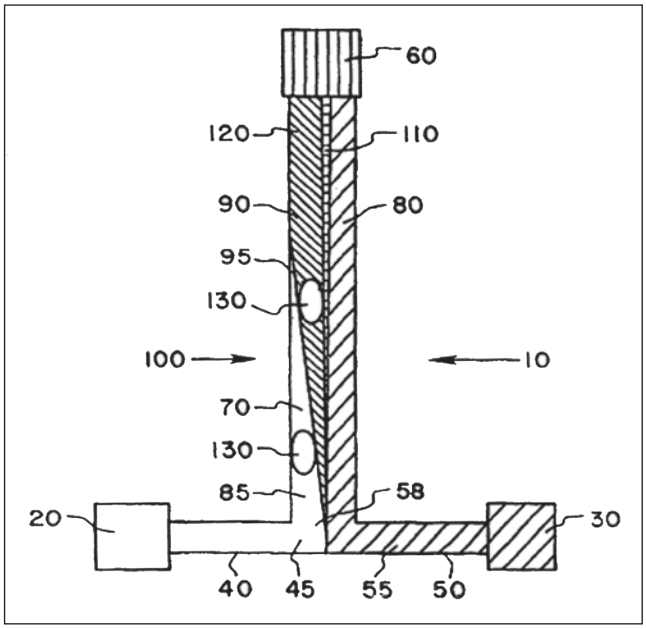
10.5 Biochemische Assays

Mikrofluidische Systeme aus übereinander gekreuzten Mikrokanälen ermöglichen das gleichzeitige Studium von Wechselwirkungen einer großen Anzahl von Molekülen mit Proteinen oder Zellen in einer kombinatorischen Anordnung. Die US 2004/0258571 A1 lehrt eine kombinatorische Vorrichtung, bestehend aus zwei elastomeren (PDMS) Ebenen mikrofluidischer Kanäle (20) und (30), welche miteinander rechtwinklig verbunden und durch eine dünne Membran voneinander getrennt sind. Diese Membran erlaubt den chemischen Kontakt zwischen den zwei Kanalebenen und hält kleine Partikel davon ab, die Kontaktstellen (40) zu durchwandern (Figur 23). Dieses Array wird bei Tests auf pathogene Mikroorganismen verwendet, kann aber generell bei allen Fällungstests eingesetzt werden, beispielsweise bei der Analytik von Serum in Anwesenheit von Proteinen oder bei vielen anderen Immunoassays.



Figur 23: Biochemisches Array aus mikrofluidischen Kanälen aus US 2004/0258571 A1.

Yager et al. haben weitere mikrohergestellte Vorrichtungen für biochemische Assays entwickelt und sich dabei die Eigenschaften des laminaren Flusses zu Nutzen gemacht, dass für verschieden große Moleküle oder Partikel auch unterschiedliche Diffusionsgeschwindigkeiten existieren, was zu einer Trennung von Molekülen senkrecht zur laminaren Strömung entsprechend ihrer Größe führt. Unter anderem beschreibt die DE 697 24 943 T2 einen mikrohergestellten chemischen Sensor, welcher dieses Diffusionsprinzip zur Analyse von Blut ausnützt. In diesem so genannten T-Sensor werden ein Probenstrom (80) (zum Beispiel Blut) und ein Indikatorstrom (70) (mit einem Indikatorfarbstoff) an dem Schnittpunkt des Probenstrom-Einlasskanals (50) und des Indikatorstrom-Einlasskanals (40) mit dem Strömungskanal (100) (d. h. der T-Stoß 58) zusammengeführt und strömen laminar nebeneinander in dem Strömungskanal (100), bis sie die Konstruktion am Auslaufstutzen (60) verlassen (nachfolgende Figur 24). Kleine Ionen, wie zum Beispiel Protonen und Natrium-Ionen diffundieren rasch entlang des Durchmessers des Strömungskanals (100), wohingegen größere Ionen, wie zum Beispiel das Farbstoffanion, nur langsam diffundieren. Größere Teilchen, wie zum Beispiel Kohlenhydrate, Proteine und Blutzellen, weisen eine signifikante Diffusion auf, solange der Indikatorstrom (70) und der Probenstrom (80) miteinander in Kontakt stehen.

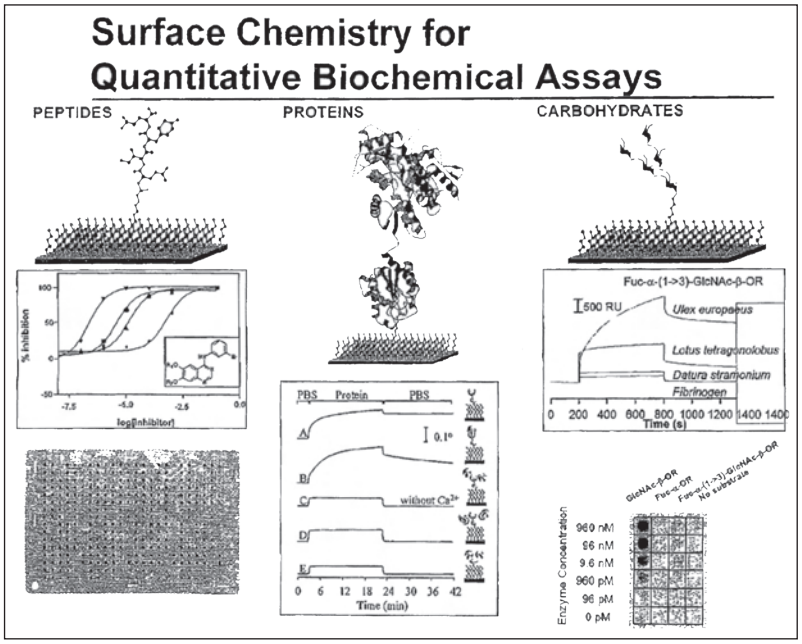


Figur 24: T-Sensor aus DE 697 24 943 T2.

Die kleineren Probenkomponenten diffundieren rascher und stellen weiter oben im Strömungskanal (100) ein Gleichgewicht her. Da der Indikator weiterhin eine besondere Halbsättigungskonzentration hat (pK_a eines pH-Farbstoffes in diesem Fall), liegt bei fortschreitender Diffusion eine Detektionsbereichsgrenze (95) aus Indikatorfarbstoff-Farbänderung oder Fluoreszenzänderung den Kanal stromaufwärts vor, um einen Detektionsbereich (90) auszubilden.

Mit Hilfe der Softlithographie können aber auch durch Erzeugung gezielter Oberflächen (SAMs) miniaturisierte quantitative biochemische Tests (Assays) durch Immobilisierung von Pep-

tiden (zum Beispiel Bindungsassay), Proteinen (zum Beispiel Protein-Protein-Interaktions-Assay) und Kohlenhydraten (zum Beispiel Protein-Kohlenhydrat-Assay) durchgeführt werden (WO 03/012392 A2, US 6 872 522 B1) (Figur 25).



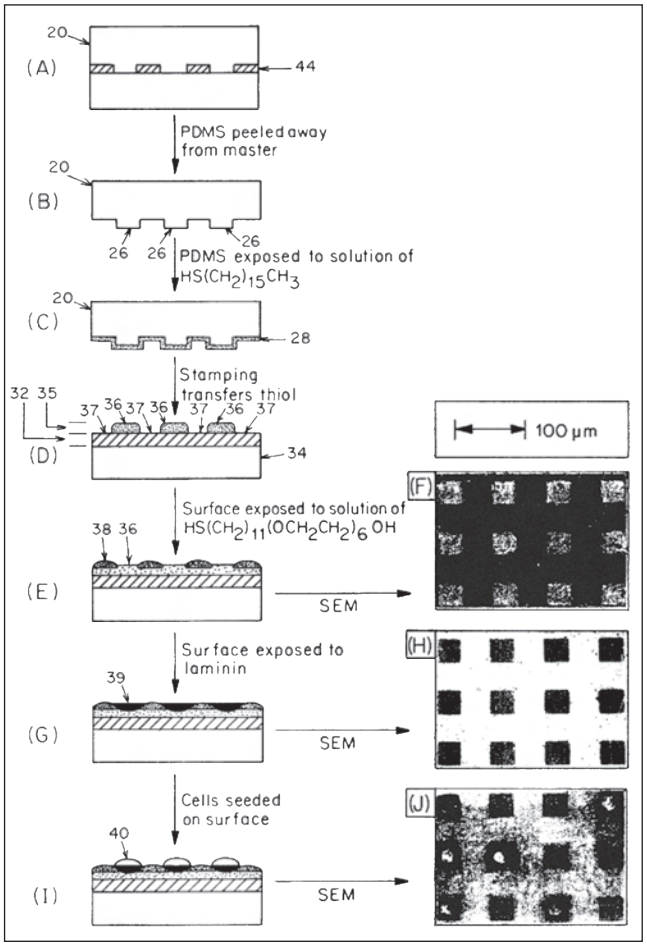
Figur 25: Quantitative biochemische Assays aus WO 03/012392 A2.

Assays zur Messung der Zellmigration und der Zellbeweglichkeit werden im Übrigen beispielsweise in der US 6 893 851 B2 beschrieben. Portable Bioassays basierend auf softlithographischen Methoden wurden kürzlich in der WO 2008/049082 A2 beschrieben.

11. Anwendungen der Softlithographie in der Zellbiologie

11.1 Zellkulturbemusterung

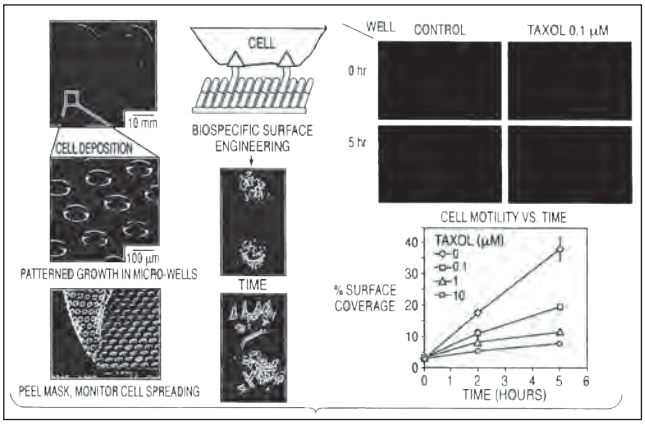
Das Studium von Zellwachstum und der Zellzyklen ist unter Anderem mittels softlithographischer Techniken möglich. Die US 6 368 838 B1 beschreibt beispielsweise ein Verfahren zur spezifischen Adsorption von Zellen auf Oberflächen aus Lösungen mittels µCP-Technik, mit dem solche Zelluntersuchungen möglich sind. Whitesides et al. (US 6 368 838 B1) nützen die Technik des Mikrokontakt-Druckens, um beispielsweise Größe und Gestalt boviner Kapillarendothelzellen (BCE) derart zu gestalten, dass Größe und Form adhäsiver Inseln von hydrophoben Alkanthiolat-SAMs strukturiert werden. Die Umgebung dieser Inselbereiche besteht aus nicht-adsorbierenden (inerten) SAMs. Extrazelluläre Matrixproteine (ECM) wie beispielsweise Laminin oder Fibronektin adsorbieren an den hydrophoben Inseln und begünstigen die Zelladhäsion. Nachfolgende Figur 26 zeigt schematisch den Ablauf einer Zellbemusterung mittels µCP-Verfahren (vgl. auch Kapitel 3).



Figur 26: Verfahren zur Bemusterung von Zellkulturen mittels µCP aus US 6 368 838 B1.

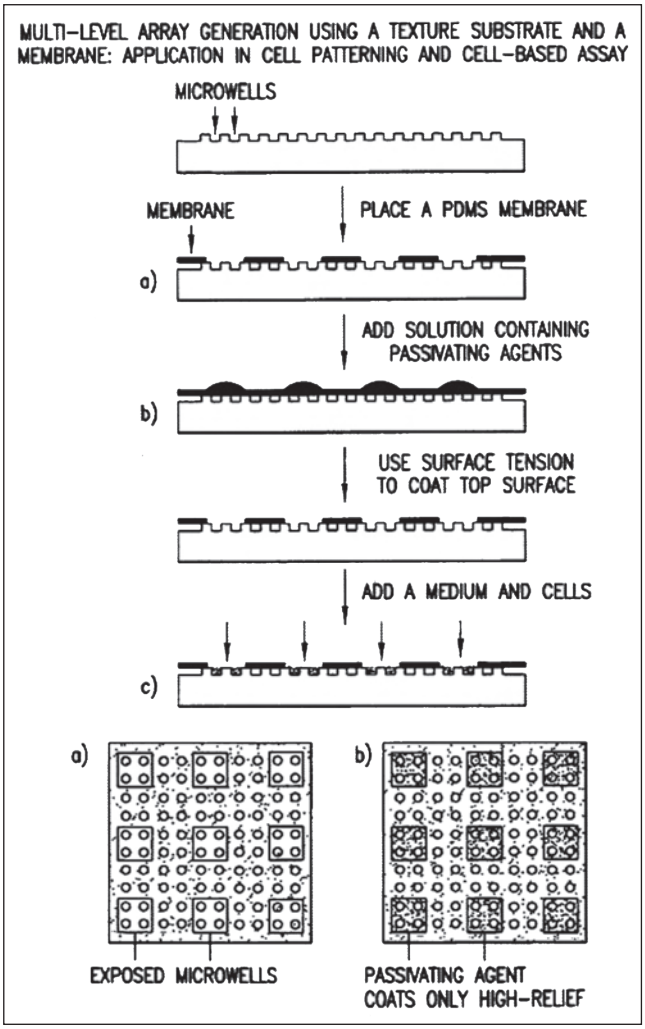
Alternativ zum µCP-Verfahren (gemusterte SAMs) kann auch das in Kapitel 5 erwähnte Membranverfahren zur Zellstrukturierung eingesetzt werden. Nachfolgende Figur 27 zeigt anhand einer vergleichenden Übersicht das Prinzip der Zellbemusterung mit dem µCP- (Figur 27, Mitte) und dem Membranverfahren (Figur 27, links) bei Zellbeweglichkeitstests.

Eine komplexere Zellbemusterung in Mikrowells mittels PDMS-Membrantechnik und unter Hinzunahme von zusätzlichen passivierenden Agenzien wird in der US 6 699 665 B1 beschrieben. Nachfolgende Figur 28 erläutert dies schematisch.



Figur 27: Zellbeweglichkeitstest (Assay) aus US 6 893 851 B2.

Die Mikrowells des Substrats werden zuerst mit einer aus mehreren Durchgangslöchern bestehenden PDMS-Membran bedeckt (Figur 28a). Anschließend wird eine wässrige Lösung eines passivierenden Agens (zum Beispiel Serum Albumin, β-Casein) zu dieser Membran-Substrat-Struktur gegeben. Hierbei benetzt die wässrige Lösung nicht die Böden der Mikrowells, sondern das passivierende Agens beschichtet nur die höchsten Flächen der Membranoberseite (Figur 28b). Die Oberflächenspannung bewirkt, dass nur die höher gelegene PDMS-Membran mit den passivierenden Agenzien beschichtet wird (Figur 28, zwischen b) und c)). Im nächsten Schritt wird dann zellhaltiges Medium verabreicht, wobei die Zellen nur an denjenigen Stellen des Membran-Substrat-Komplexes adsorbieren, die nicht mit dem passivierenden Agens beschichtet wurden, also nur an denjenigen Mikrowells der Substratschicht, welche nicht mit den höchsten PDMS-Membranschichten maskiert wurden (Figur 28c)).



Figur 28: Zellbemusterung in Mikrowells mittels Membrantechnik aus US 6 699 665 B1.

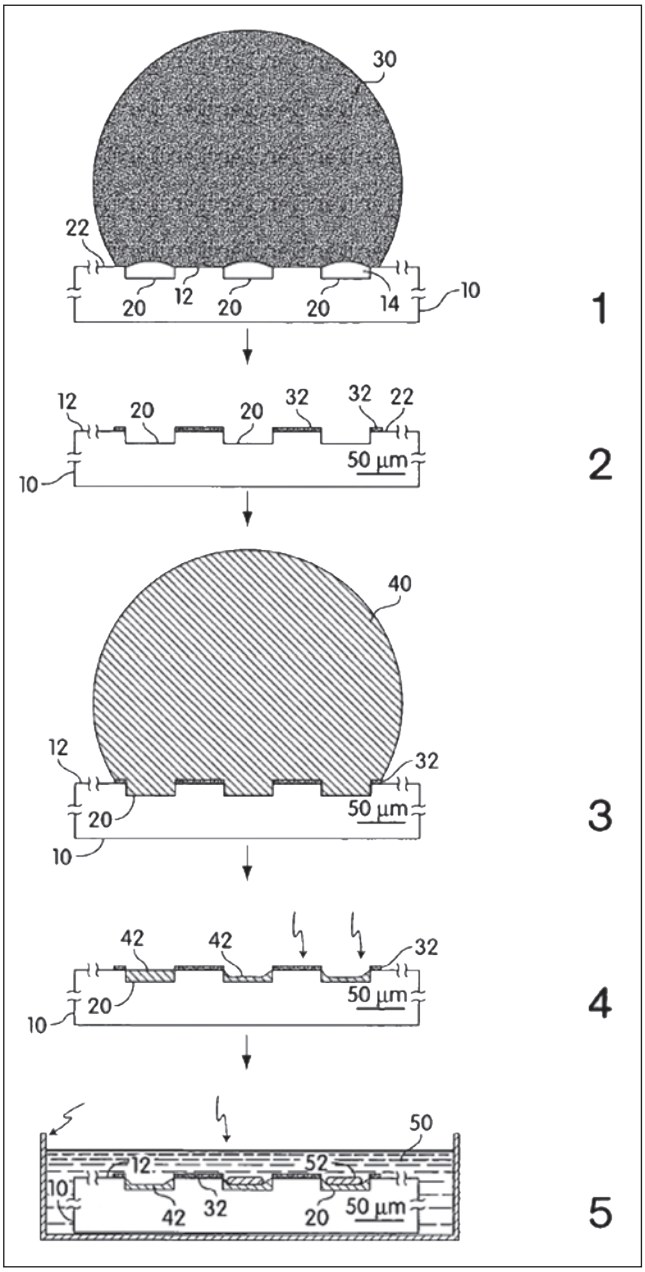
Otsuni et al. beschreibt darüber hinaus in der US 7 288 394 B2 eine weitere Möglichkeit, selektiv Mikrowells mit unterschiedlichen Zellgruppierungen zu belegen (Figur 29).

Dieses Verfahren ist besonders nützlich bei Mikrowells mit einer großen Anzahl an Durchgangslöchern und somit für zellbasierte Schablonen (Screens). Diese Technik beruht auf der Tatsache, dass Oberflächen mit unterschiedlichen Flüssigkeiten je nach deren Kontaktwinkel in verschiedener Weise benetzt werden. Das Verfahren wird anhand Figur 29 näher erläutert. Nach Applikation eines Tropfens der Flüssigkeit (30) (zum Beispiel Zelladhäsionsinhibitor BSA/Puffer) unter Luftzufuhr, werden nicht die Böden (20), sondern nur die Plateaus (32) des elastomeren PDMS-Substrats (10) benetzt (Figur 29, Nummer 1 und 2). Die erneute Applikation einer zweiten Flüssigkeit (40) (zum Beispiel ein Zelladhäsions-Promoter) führt nur zu einer Benetzung der Böden (20) der Mikrowells, so dass letztlich Böden und Plateaus des PDMS-Substrats (10) mit zwei verschiedenartigen Schichten benetzt sind (Figur 29, Nummer 3 und 4). Kultivierung des PDMS-Substrats in einem Zellkulturmedium (50) führt zum selektiven Zellwachsum, was wiederum für unterschiedliche zellbiologische Tests verwendet werden kann (Figur 29, Nummer 5).

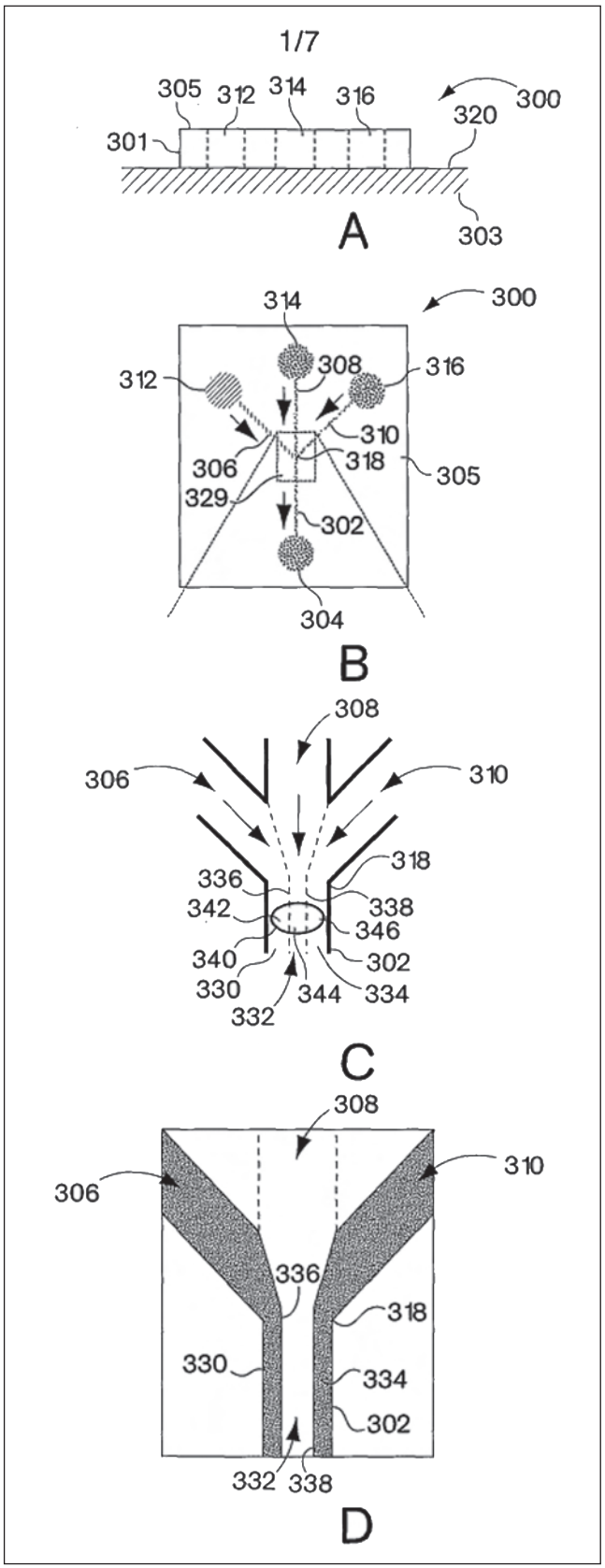
11.2 Kokulturen

Die US 6 221 663 B1 und die US 6 133 030 A beschreiben jeweils eine photolithograhische Methode, mit der es möglich ist, Kokulturen zweier verschiedener Zelltypen (zum Beispiel Hepatozyten und Fibroblasten) in mikrostrukturierter Form, beispielsweise zur Produktion bioartifizieller Organe, auf einer Oberfläche herzustellen. Hierbei wird ein Photoresist-Muster auf einem Substrat (Glas oder Polymer, zum Beispiel PDMS)

mit einer Kollagenlösung behandelt, so dass sowohl das Substrat, als auch der Photoresist mit dem Protein Kollagen beschichtet werden. Nach Ablösen des Photoresists verbleibt auf dem Substrat eine Kollagenstruktur, welche ihrerseits eine weitere Zellanlagerung begünstigt (Kollagen ist ein Zelladhäsionspromotor). Die anschließend zugeführten Hepatozyten binden selektiv an die Kollagenmuster. Im nächsten Schritt werden die Fibroblasten in die Zwischenräume der Hepatozytenmuster appliziert, sodass insgesamt eine bemusterte Kokultur aus Hepatozyten und Fibroblasten entsteht.



Figur 29: Verfahren zur Herstellung von Zellfeldern (Arrays) aus US 7 288 394 B2.

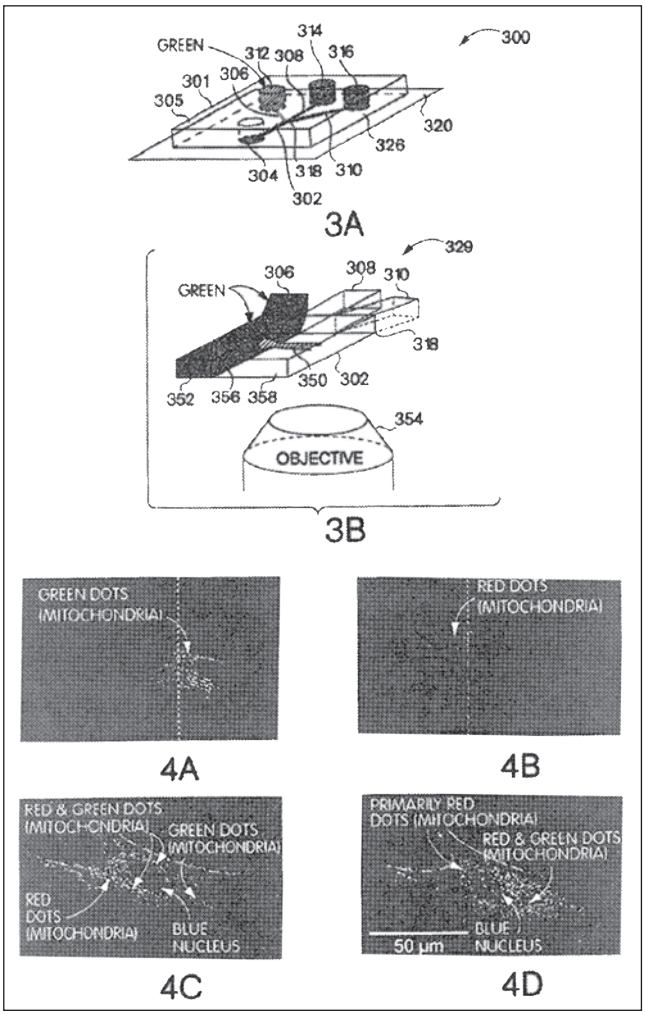


Figur 30: Teilbehandlung von Zellen im laminarem Fluss, Teil 1 aus US 6 653 089 B2.

Kokulturen von Hepatozyten mit einem anderen Zelltyp verlängern die Zellüberlebensraten und erhalten den Phänotyp der Hepatozyten in vitro für mehrere Wochen, obwohl individuelle Hepatozytenkulturen bekanntermaßen instabil sind.

11.3 Bemusterung individueller Zellen

Die laminare Strömung von Flüssigkeiten (Fluiden) kann dazu benützt werden, gelöste Stoffe auf spezielle Abschnitte individueller Zellen zu applizieren. Dies geschieht beispielsweise dadurch, dass man diese individuelle Zelle so positioniert, dass der zu untersuchende Zellabschnitt genau an der Schnittstelle zweier laminarer Ströme mit jeweils unterschiedlichen gelösten Stoffen liegt (US 6 653 089 B2, US 6 893 851 B2). Sind diese gelösten Stoffe im laminaren Strom in der Lage, durch die Zellmembran hindurch zu diffundieren, kann diese Methode sogar dazu benutzt werden, das Zellinnere zu strukturieren. Nachfolgende Figuren 30 und 31 erläutern diese Technik näher. Figur 30 zeigt schematisch das Prinzip der Strukturierung einer am Substrat (320) fixierten Zelle (340) im laminaren Strom (302). Die Zelle muss so positioniert sein, dass ihre äußere Oberfläche mit den drei Strömungskanälen (330), (332) und (334) des Flüssigkeitsstroms und außerdem mit den beiden Schnittstellen (336) und (338) in Kontakt steht. Mit so einer Vorrichtung ist es beispielsweise möglich, die Zellabschnitte (342), (344) und (346) mit biologisch aktiven Substanzen umzusetzen, welche in gelöster Form in die Zuflüsse (306) bzw. (310) eingespeist werden. Dies kann beispielsweise dazu genützt werden, die Wirkung solcher Substanzen in speziellen Bereichen im Inneren oder an der Oberfläche von Zellen zu beobachten. Prinzipiell ist es mit diesem Verfahren möglich, komplexe Zellvorgänge wie zum Beispiel Mitose, Zellwachstum, Zellbeweglichkeit, Zellmetabolismus, Zelldifferenzierung und Apoptose zu untersuchen.



Figur 31: Teilbehandlung von Zellen im laminaren Fluss, Teil 2 aus US 6 653 089 B2.

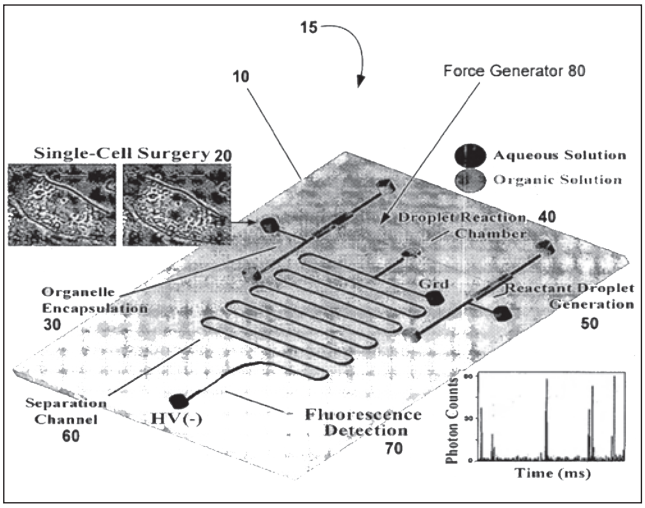
Figur 31 zeigt nochmals schematisch die perspektivische Ansicht des fluidischen Netzwerks aus Figur 30 mit entsprechenden Fluoreszenzaufnahmen untersuchter Zellen.

11.4 Biochemische Analyse subzellulärer Kompartimente individueller Zellen mittels Tröpfchentechnik

Chiu et al. beschreiben in der US 2005/0048581 A1 eine weitere Technik zur Einzelzellcharakterisierung bzw. Einzelzellstrukturierung umfassend die Schritte (i) Isolierung einer subzellulären Komponente aus einer einzelnen biologischen Zelle, (ii) Verkapselung dieser subzellulären Komponente in Mikrotröpfchen, (iii) in Kontakt bringen dieser subzellulären Komponente mit (einem) chemischen Reaktand(en), (iv) Abtrennung einer molekularen Komponente des subzellulären Kompartimentes und (v) Detektion dieser molekularen Komponente innerhalb des subzellulären Kompartimentes. Die sequentielle Verknüpfung der Verfahrensschritte (i) bis (v) wird beispielsweise auf einem einzigen Biochip (15) realisiert (On-Chip Integration), welcher in Figur 32 näher erläutert wird.

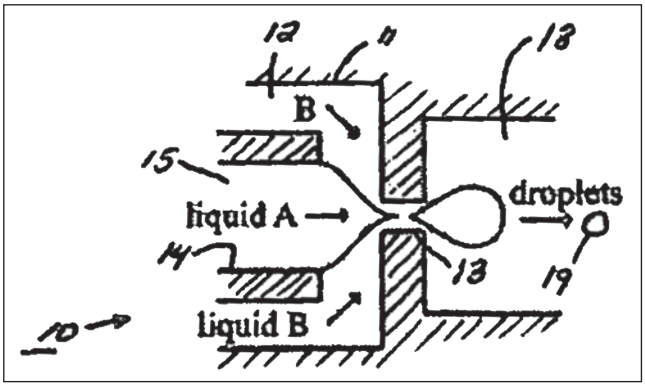
Substrat (10) des Biochips (15) enthält mikro- bzw. nanofluidischen Kanäle aus PDMS, Polymethylmethacrylat, Silikon oder Glas mit Bereichen (20), an denen die Einzelzellpräparierung erfolgt (zum Beispiel die Entfernung von Zellorganellen aus dem Zellinneren). Die Einkapselung der isolierten Zellorganelle in Mikro- bzw. Nanotröpfchen erfolgt in den Chip-Bereichen (30), die anschließende Reaktion mit Detektionsmarkern (zum Beispiel Farbstoffe, molekulare Marker, Quantenpunkte)

in den Abschnitten (40) bzw. (50). In den mikrofluidischen Kanälen (60) erfolgt dann die chemisch-analytische Trennung (zum Beispiel mittels Kapillarelektrophorese und Immunodetektion). Abschließend werden die getrennten molekularen Komponenten mittels optischer bzw. Ionisations-sensitiver Detektoren im Bereich (70) des Biochips (15) erfasst.



Figur 32: Vorrichtung zur Analytik subzellulärer Kompartimente einer individuellen Zelle mittels „Tröpfchentechnik"; aus US 2005/0048581 A1.

Das Prinzip der Verkapselung von Zellen (bzw. ganz allgemein von Partikel) in Mikrotröpfchen mit Strömungsfokussierenden Techniken ist in nachfolgender Figur 33 schematisch dargestellt. Ein Druckgradient entlang der Längsachse des „Tröpfchengenerators" (10) treibt zwei nicht miteinander mischbare Flüssigkeiten folgendermaßen in die enge Düse (13) der Vorrichtung (10): Eine kontinuierliche flüssige Phase (12) (Fluid B, zum Beispiel eine Zellsuspension) wird von den beiden Seitenkanälen (11) und ein Flüssigkeitsstrom (15) (Fluid A, zum Beispiel Wasser) vom Hauptkanal (14) bereitgestellt. In dieser



Figur 33: Prinzip der Bildung monodisperser Mikrotröpfchen mittels strömungsfokussierender Techniken („Tröpfchentechnik"), aus US 2007/0054119 A1.

Anordnung umschließt die kontinuierlich fließende Phase (12) den inneren Flüssigkeitsstrom (15):

Der daraus resultierende innere Flüssigkeitsstrom besitzt eine instabile zylindrische Form und bricht innerhalb der Düse (13) regelmäßig ab, so dass Flüssigkeitströpfchen (19) mit eingeschlossenem Fluid B im äußeren Auslasskanal (18) entstehen.

12. Zusammenfassung und Ausblick

Softlithographie bietet einzigartige Möglichkeiten im Bereich Mikrofabrikation und ergänzt konventionelle Fabrikationstechniken. Softlithograpische Verfahren sind relativ leicht, schnell und kostengünstig durchzuführen, vor allem im Bereich relativ großformatiger mikrohergesteller Vorrichtungen für die Biowissenschaften. Softlithographie ermöglicht es, sowohl eine Vielzahl empfindlicher biologische Materialien bzw. Substanzen zu bemustern bzw. zu strukturieren, als auch Oberflächeneigenschaften auf molekularer Ebene zu steuern, so dass die Miniaturisierung bereits bestehender und die Entwicklung neuer biochemischer und Zell-basierter Assays verwirklicht werden kann. Die gezielte Herstellung inerter und biospezifisch adsorbierender SAMs-Oberflächen und die Einfachheit der Produktion elastomerer Stempel ermöglicht es, Proteine und Zellen zu bemustern. Die Kombination des Mikrokontaktverfahrens (μCP) mit der Oberflächentechnik hat neue Methoden zur Bemusterung von Einzelzellen und Zellverbänden hervorgebracht Das gemeinsame Prinzip von Membran-basierten Techniken, der Mikrofluidik und des Mikrokontaktdruckens beruht auf der einfachen Herstellung polymerer Komponenten und der besonderen Fähigkeit von Elastomeren, Oberflächen reversibel zu versiegeln. Die softlithographische Herstellung komplexer Strukturen ist die Grundlage mikroanalytischer Vorrichtungen mit zwei- oder dreidimensionalen mikrofluidischen Systemen. In solchen mikrofluidischen Systemen ist der Flüssigkeitsstrom hauptsächlich laminarer Art. Verschiedene auf laminarer Strömung basierende Trenn- und Detektionstechniken für biochemische Substanzen wurden bereits entwickelt. Darüber hinaus ist es möglich, durch Reaktion an der Grenzfläche zweier laminaren Ströme Elektroden innerhalb mikrofluidischer Kanäle herzustellen. Die Erzeugung von Konzentrationsgradienten in Lösungen bzw. auf Oberflächen mikrofluidischer Systeme macht es möglich, Zellmigration, Zellproliferation, Zellentwicklung und Zelldifferenzierung in vivo zu erforschen. Darüber hinaus können durch Kombination von laminarer Strömung in mikrofluidischen Systemen mit Oberflächen-

strukturierungstechniken einzelne Zellen analysiert werden. Softlithographisch erzeugte mikroanalytische Systeme sind einsetzbar bei der kostengünstigen Produktion strukturierter Arrays, welche für Hochdurchsatzanalysen benötigt werden, in Kombination mit Oberflächentechniken im Bereich der Proteomik, bei zellbiologischen Untersuchungen (zum Beispiel Stammzellen) und für die Erforschung von Kokulturen zur Gewebezüchtung (Tissue Engineering). Verschiedene Komponenten von Mikroanalysensystemen wie Mischer oder Ventile können softlithographisch mit Elastomeren viel rascher und einfacher hergestellt werden als mit Glas oder Polyorganosiloxane. Implantierbare Vorrichtungen aus „weichen" Polymeren sind für den Patienten angenehmer und verträglicher als bei starren Materialien. Es ist denkbar, dass zukünftig durch einfache softlithographische Gradientenerzeugung in Proteinlösungen oder auf Oberflächen grundlegend neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der embryonalen Entwicklung, der neuronalen Polarität und der Stammzelldifferenzierung erzielt werden. Generell ist die Nachahmung biologischer Systeme (zum Beispiel Blutgefäße) durch Mikrofabrikation, insbesondere durch Softlithographie einfacher geworden und verspricht für die Zukunft die Klärung vieler biowissenschaftlicher Fragestellungen.

Fremdkraft-Bremsanlagen für Kraftfahrzeuge: Sicher bremsen mit Gefühl

Dr.-Ing. Jan-Friedrich Süßmuth, Patentabteilung 1.21

Dieser Beitrag beleuchtet Sicherheits- und Komfortaspekte bei Fremdkraftbremsanlagen für Personenkraftwagen und stellt an Hand von ausgewählten Beispielen aus der Patentliteratur Lösungen für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle am Bremspedal, für die Steuerung des Zusammenwirkens von Reibungs- und Regenerativ-Bremsen bei Hybridfahrzeugen, für die Störungsbehandlung in Fremdkraftbremsanlagen sowie für die Beeinflussung des Bremsvorgangs durch Assistenzsysteme vor.

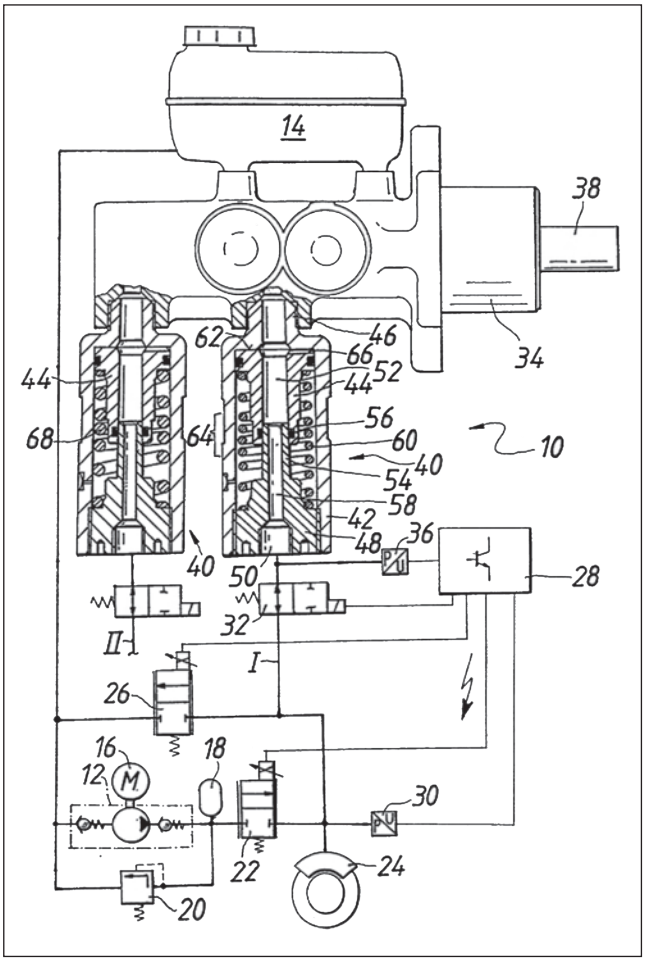
1. Einleitung

Die komfortable und sichere Bedienung der Fahrzeugbremse war schon den Pionieren des Automobilbaus ein Anliegen. Dies belegt die deutsche Patentschrift Nummer 37 435, welche 1886 für das bekannte „Benz-Dreirad" erteilt wurde. Patentiert wurde damit eine Einrichtung, die heutige Designentwürfe zum per „Joystick" gesteuerten Auto im Grundsatz vorwegnimmt: Antrieb und Bremse konnten durch nur einen Handhebel bedient werden. Ausgehend von der dort beschriebenen, nur durch Armkraft betätigten Bremse entwickelte sich in den darauf folgenden Jahrzehnten des PKW-Baus die hydraulische Bremsanlage mit Fußbetätigung und Hilfskraftverstärkung zum Standard. Bei einer solchen Hilfskraftbremsanlage wird die erforderliche Bremsenergie durch die physische Kraft des Fahrers und eine Hilfskrafteinrichtung, zum Beispiel einen pneumatischen Bremskraftverstärker, erzeugt. Im nächsten Schritt wurden Fremdkraftbremsanlagen entwickelt, bei denen die erforderliche Bremsenergie vollständig von einer Fremdenergiequelle aufgebracht wird und der Fahrer nur noch einen Verzögerungswunsch vorgibt. Eine mechanische Kopplung zwischen Bremspedal und Bremsen ist damit grundsätzlich nicht mehr erforderlich (Brake-by-Wire, BBW). Diese Bauart hat viele Vorteile. Sie erlaubt beispielsweise eine weitgehend freie Anordnung der einzelnen Komponenten der Bremsanlage im meist beengten Bauraum innerhalb der Karosserie, kann die Herstellungskosten verringern und erleichtert insbesondere die elektronische Beeinflussung des Bremsvorgangs auch unabhängig vom Fahrerwunsch. Entsprechend ist eine Abkehr von den Hilfskraftbremsanlagen hin zu den Fremdkraft-Bremssystemen zu beobachten – allerdings können die durch das Fremdkraftbremsprinzip grundsätzlich gegebenen Möglichkeiten nicht zuletzt auf Grund gesetzlich festgeschriebener Sicherheitsanforderungen derzeit noch nicht immer voll ausgeschöpft werden. So besteht für Kraftfahrzeuge etwa die Erfordernis zweier voneinander unabhängiger Bremsanlagen oder zumindest zweier unabhängiger Brems-Bedienungseinrichtungen. Auch die durch die Bremsanlage zu erreichende Mindest-Verzögerung ist in der StVZO (Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung) vom Gesetzgeber festgelegt. Die Anstrengungen der auf diesem Gebiet tätigen Anmelder richten sich vor diesem Hintergrund darauf, die steigenden Bedürfnisse nach mehr Sicherheit, mehr Komfort, geringerem Kraftstoffverbrauch und reduzierten Emissionen mit den gesetzlichen Anforderungen zu verbinden. Nicht zuletzt muss eine Bremsanlage darüber hinaus auch dem Erwartungs- und Erfahrungshorizont der Kunden entsprechen. Denn die Kraftfahrer erwarten beim Tritt aufs Bremspedal das ihnen vertraute, zu einer nachvollziehbaren Bremswirkung führende Pedalgefühl – und zwar unabhängig von den aktuellen Umgebungsbedingungen und davon, ob eine Kombination aus Hilfs- und Fremdkraftbremsanlage, reine Brake-by-Wire-Technologie oder gar ein Hybrid-Antriebsstrang mit hydraulischer und regenerativer Bremsenergieerzeugung vorliegt. Aus diesem außerordentlich umfangreichen und weitgefächerten Tätigkeitsfeld will dieser Beitrag Beispiele für die Anmeldertätigkeit vorstellen. Diese werden im Folgenden an Hand von ausgewählten Patentanmeldungen aus den IPC-Klassen B60T 8/17 bis 8/174, B60T 8/36 bis 8/42, B60T 13/12 bis 13/16 und B60T 13/22 erläutert.

2. Pedalwegsimulation und Pedalgefühl

Da bei einer Fremdkraftbremsanlage die mechanische Kopplung zwischen Bremspedal und Hauptbremszylinder nicht mehr besteht, muss die Pedalgegenkraft künstlich erzeugt werden. Dies leistet der sogenannte Pedalweg- oder Hubsimulator, indem er pedalwegabhängig eine meist progressive Gegenkraft am Pedal bereitstellt und oft auch die von klassischen Hilfskraft-Bremssystemen her bekannte Hysterese darstellt.

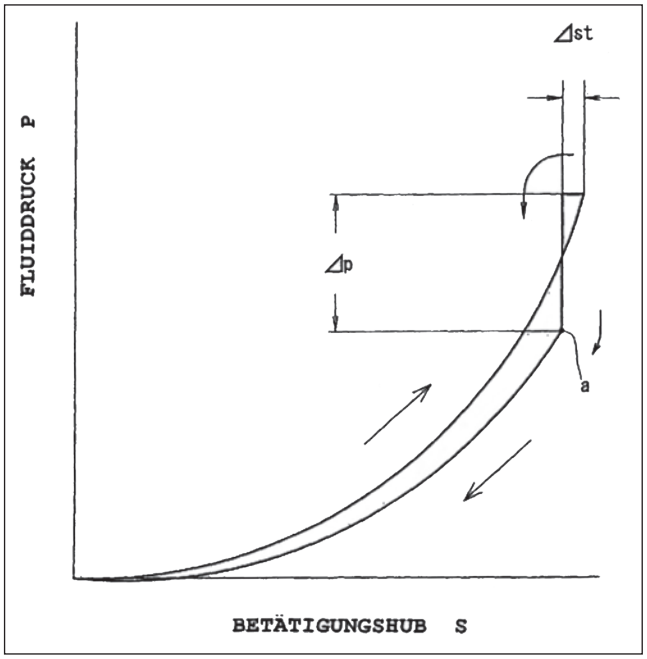
Ein progressiver Anstieg der Pedalgegenkraft ist erwünscht, damit die Bremskraft im Bereich der im Fahrbetrieb meist nur leichten Bremsungen fein dosierbar ist und bei Vollbremsungen schnell ein hoher Bremsdruck bereitsteht. Die Bedeutung der Hysterese liegt darin, dass es als gutes und vertrautes Pedalgefühl empfunden wird, wenn beim unbewußten leichten



Figur 1: Fremdkraftbremsanlage (aus DE 196 40 781 A1).

Verringern der Pedalkraft durch den Fahrer im Anschluß an eine vorangegangene Bremsbetätigung die Bremskraft aufrecht erhalten bleibt.

Zur Darstellung einer progressiven Pedalkraft in einer Fremdkraftbremsanlage schlägt die DE 196 40 781 A1 zwei Hubsimulatoren (40) mit unterschiedlichen Federsteifigkeiten vor, die als Einschraubpatronen mit einem herkömmlichen Hauptbremszylinder (34) verbunden sind (vergleiche Figur 1). Im normalen Betrieb sind die Bremskreise (I, II) durch Absperrventile (32) vom Hauptzylinder getrennt, der Rad-Bremsdruck wird durch Ansteuerung von Proportional-Einlassventilen (22) durch die elektronische Regelung (28) in Abhängigkeit vom elektrisch erfassten, durch den Fahrer vorgegebenen Hauptzylinderdruck eingeregelt (Brake-by-Wire-Betriebsart). Indem in den Hubsimulatoren vorgespannte Federn (60, 68) verschiedener Steifigkeit eingesetzt werden, kommen sie nacheinander zur Wirkung, wodurch eine progressive Pedalkraft-Kennlinie erhalten wird.



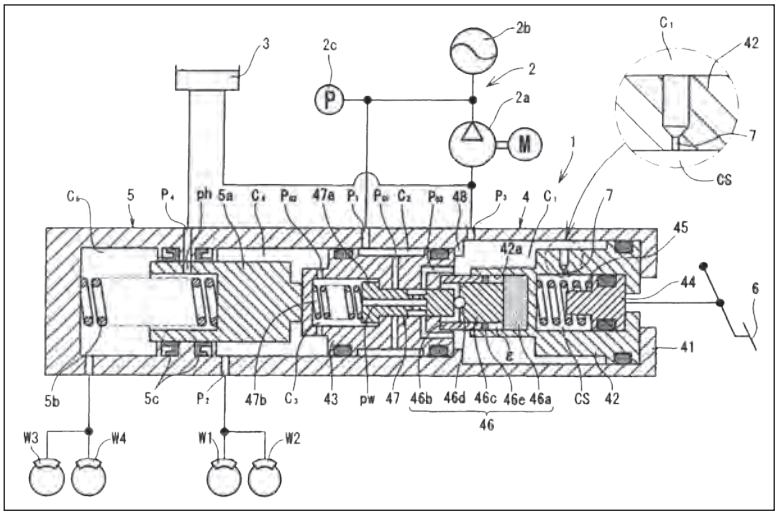
Figur 2: Bremsdruck-Pedalhub-Kennlinie (aus DE 103 08 621 A1).

Die DE 103 08 621 A1 lehrt eine Fremdkraftbremsanlage, bei der Bremspedal, Hubsimulator, Druckeinstellventil und Hauptzylinder hintereinander angeordnet sind. Hierbei betätigt der Fahrer über das Bremspedal das Druckeinstellventil, das den von einer Fremddruckquelle gelieferten konstanten Hydraulikdruck wegabhängig einstellt und dem Hauptbremszylinder zuführt. Durch die bauliche Anordnung ist sichergestellt, dass der Fahrer bei Ausfall der Fremddruckquelle über den Hubsimulator die zwei Kolben des Hauptzylinders direkt mechanisch betätigen kann. Um bei intakter Fremddruckquelle die in Figur 2 dargestellte Kennlinie zwischen Bremspedal-Betätigungshub und erzieltem Bremsdruck zu erhalten, verfügt der Hubsimulator über eine Reihenschaltung aus einer viskoelastischen (Gummi-)Feder und einer elastischen (Stahl-)Feder. Zur Realisierung der erwünschten Hysterese sind neben der viskoelastischen Feder auch Dichtungselemente bewegter Teile hinsichtlich ihrer Reibungseigenschaften gezielt aufeinander abgestimmt.

Die DE 103 08 607 A1 lehrt einen ähnlich aufgebauten Hubsimulator, vergleiche Figur 3. Dieser weist eine zusätzliche Einrichtung auf, um bei schneller Betätigung des Bremspedals, zum Beispiel im Fall einer Notbremsung, ein besonders steifes Pedalgefühl zu vermitteln. Hierzu ist die Ausgleichsbohrung (7) als hydraulische Drossel ausgeführt. Durch die Ausgleichsbohrung strömt das Bremsfluid aus der Simulatorkammer (CS) ab, das beim Betätigen des Kolbens (44) durch das Bremspedal (6) verdrängt wird. Somit kann die Pedalkraft-Pedalhub-Kennlinie

in weiten Grenzen an ein gewünschtes Verhalten angepasst werden.

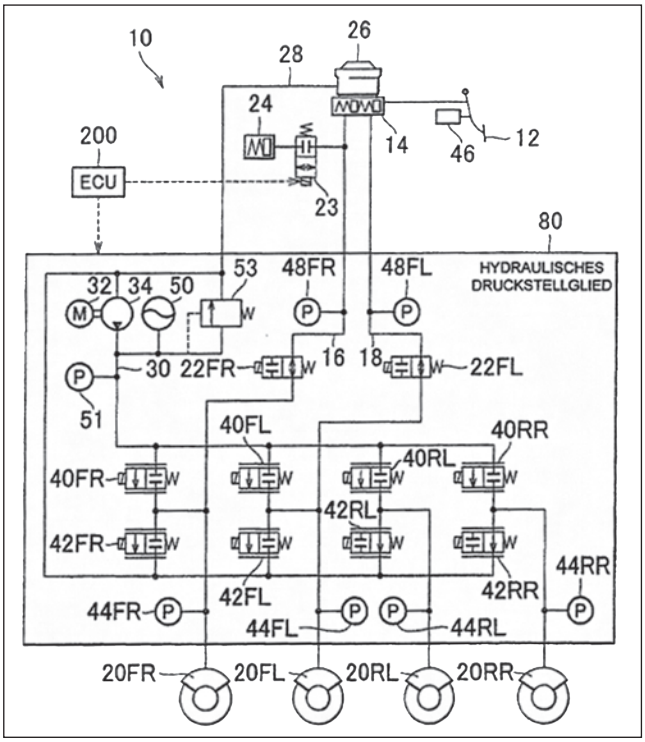
Grundsätzlich besteht bei einer Fremdkraftbremsanlage die Möglichkeit, den Hubsimulator räumlich getrennt vom Hauptzylinder anzuordnen, wie dies gemäß DE 10 2007 001 502 A1 vorgesehen ist, vergleiche Figur 4. Dort wird der Hauptzylinder (14) mittels des Bremspedals (12) betätigt, wobei Bremsfluid zum Hubsimulator (24) ausströmt. Entsprechend der Simulatorcharakteristik stellt sich in Abhängigkeit vom aufgenommenen Fluidvolumen ein Hauptzylinderdruck ein, der als Maß für die gewünschte Fahrzeug-Soll-Verzögerung dient. Bei sehr schneller Pedalbetätigung entsteht jedoch das Problem, dass durch die unvermeidliche Drosselwirkung der Leitungswege und Ventile zwischen Hauptzylinder und Hubsimulator der Hauptzylinderdruck zunächst sehr stark ansteigt, und somit eine zu hohe Soll-Verzögerung ermittelt wird. Um ein dadurch entstehendes, unerwartet heftiges Einbremsen zu vermeiden, werden gemäß DE 10 2007 001 502 A1 nicht nur der Hauptzylinderdruck, sondern auch der Druck im Hubsimulator sowie das Maß der Pedalbetätigung zur Bestimmung der Soll-Verzögerung von der Steuereinheit (ECU) ausgewertet. Um dabei ohne einen zusätzlichen teueren Drucksensor im Hubsimulator auszukommen, wird der Simulatordruck auf Grundlage des Hauptzylinderdrucks und der mit dem Sensor (46) erfassten Pedalbetätigung unter Verwendung eines gespeicherten (Hydraulik-) Modells abgeschätzt beziehungsweise korrigiert.



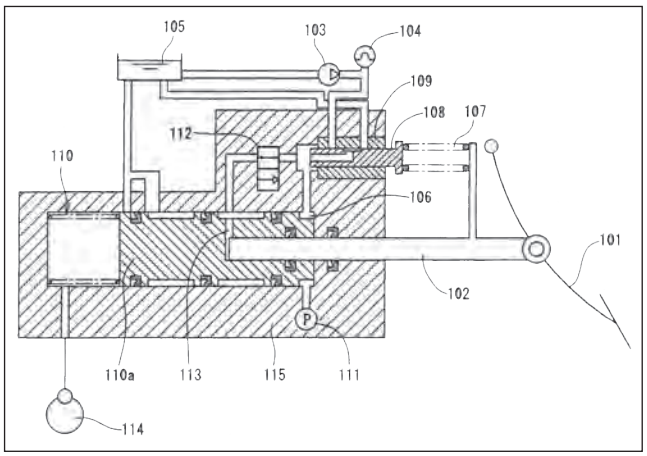
Figur 3: Fremdkraftbremsanlage mit Hubsimulator (aus DE 103 08 607 A1).

Ein weiteres Tätigkeitsfeld der Anmelder sind die bei bestimmten Betriebsbedingungen möglichen Rückwirkungen der Bremsanlage auf das Bremspedal, die für den Fahrer unangenehm sind.

Während es bei bekannten ABS-Systemen beabsichtigt sein kann, dem Fahrer das Blockieren von Rädern beim Bremsen durch ein Pulsieren am Bremspedal spürbar zu machen, haben sich die Anmelder der DE 103 48 617 A1 (vergleiche Figur 5) das Ziel gesetzt, den Betätigungshub des Bremspedals



Figur 4: Fremdkraftbremsanlage mit räumlich vom Hauptzylinder getrennt angeordnetem Hubsimulator (aus DE 10 2007 001 502 A1).



Figur 5: Rückwirkungsfreie Fremdkraftbremsanlage (aus DE 103 48 617 A1).

(101) vom Fluidverbrauch in den Radbremszylindern (114) zu entkoppeln. Unter Fluidverbrauch ist hier das automatische Ablassen von Bremsfluid in den Niederdruckspeicher zur Reduzierung des Bremsdrucks an einer Radbremse zu verstehen.

Mit dem Pedal (101) betätigt der Fahrer das Druckeinstellventil (108, 109), welches wegabhängig Druck aus dem Hochdruckspeicher (104) in die Druckkammer (106) einsteuert, wo er auf den Hauptzylinderkolben (110a) wirkt. Die Gegenkraft zur Pedalkraft setzt sich bei dieser Anordnung aus der Kraft der Simulator-Feder (107) und der Kraftwirkung des Drucks in der Kammer (106) auf die Stirnseite der Eingabestange (102) zusammen. Auch wenn sich der Hauptzylinderkolben in Folge von Fluidverbrauchsschwankungen im Radbremszylinder bewegt, bleibt das Kräftegleichgewicht an der Eingabestange erhalten, so dass der Fahrerfuß von der Bewegung des Hauptzylinderkolbens entkoppelt ist.

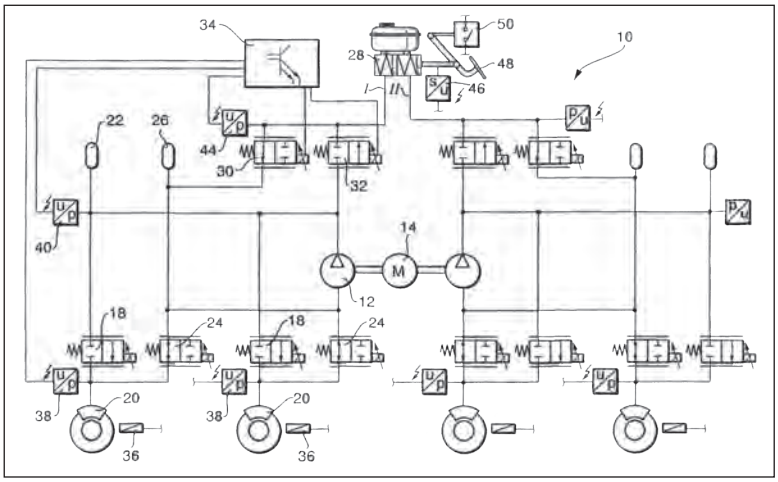
Speziell für Motorräder lehrt die DE 10 2006 023 305 A1 die Entkopplung der Pumpenpulsationen von Hand- und Fußbremshebel einer Fremdkraftbremsanlage durch gesteuerte Trennventile.

Bei den bislang beschriebenen Hubsimulatoren handelt es sich um sogenannte passive Simulatoren. Deren Charakteristik ist in der Regel durch die gegebenen Eigenschaften von mechanischen Bauelementen, Fluiden oder Gasen bestimmt. Bei aktiven Hubsimulatoren dagegen wird die Pedalgegenkraft durch das geregelte Ablassen beziehungsweise Zuführen von Druckfluid aus beziehungsweise in einen Simulatorzylinder erzeugt. Vorteile dieser Bauform sind die Unabhängigkeit der Pedalkraft-Hub-Kennlinie von Alterungseffekten, wie sie insbesondere bei Bauelementen aus Gummi oder Kunststoff auftreten können, und von der Temperatur des Hydraulikfluids. Neben diesen Vorteilen einer frei programmierbaren und während des Betriebs einstellbaren Kennlinie können durch einen aktiven Simulator auch Bauteile und damit Bauraum, Kosten und Fehlerquellen eingespart werden.

Ein Beispiel für eine derartige Anlage zeigt die DE 199 63 760 A1, vergleiche Figur 6. Im Normalbetrieb betätigt der Fahrer das Bremspedal (48) und verschiebt ein Fluidvolumen aus dem Hauptzylinder (28) durch das teilweise geöffnete Proportional-Trennventil (30) in den Niederdruckspeicher (26). Der Hauptzylinder wird in diesem Betriebsmodus als Simulatorzylinder betrieben. Das Steuergerät (34) regelt dazu das Proportional-Trennventil so, dass sich eine übliche, mit dem Pedalweg ansteigende Pedalkraft ergibt. Als Sollwerte für die Bremskraft können der sich einstellende Hauptzylinderdruck oder der Pedalweg herangezogen werden. Die Pedalkraft-Pedalweg-Charakteristik läßt sich durch Ändern des Regelalgorithmus leicht variieren und an verschiedene Fahrzeuge oder auch Fahrer anpassen. Um das Bremspedal nach der Bremsbetätigung wieder in seine Ausgangsstellung zu bringen, wird das Rückführventil (32) geöffnet. Der aktive Hubsimulator wird folglich durch das Zusammenspiel von Rückführventil (32) und Trennventil (30) verwirklicht. Bei Ausfall der Fremddruckquelle (12) ist eine Hilfsbremsfunktion gegeben, indem der Fahrer über den Hauptzylinder (28) und das stromlos offene Trennventil (30) Bremsdruck in die Radbremszylinder (20) einleitet.

3. Zusammenwirken von Reibungs- und Regenerativ-Bremsen

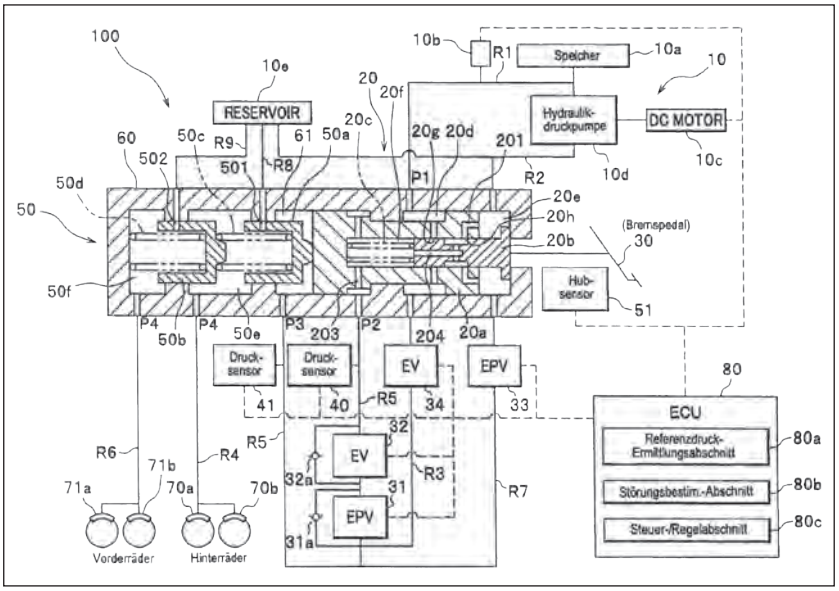
Bei sog. Hybridfahrzeugen, die mit Verbrennungs- und Elektromotor ausgestattet sind, sowie auch bei reinen Elektrofahrzeugen wird in der Regel angestrebt, beim Bremsen Bewegungsenergie zurückzugewinnen und damit einen Energiespeicher im Fahrzeug aufzuladen. Die regenerative Bremsung durch einen elektrischen Motor/Generator ist jedoch nicht bei allen Betriebszuständen wirtschaftlich beziehungsweise wirkungsvoll. Auch kann die Situation eintreten, dass der Energiespeicher bereits voll ist und nicht mehr weiter geladen werden kann. In diesen Fällen wird die Bremskraft von einer, meist hydraulisch betätigten, Reibungsbremsanlage aufgebracht. Die Herausforderung liegt bei derartigen kombinierten Bremsanlagen darin, den Übergang von regenerativer auf Reibungsbremsung bezie-



Figur 6: Fremdkraftbremsanlage mit aktivem Simulator (aus DE 199 63 760 A1).

hungsweise umgekehrt oder auch das parallele Zusammenwirken beider Bremssysteme unbemerkt vom Fahrer ablaufen zu lassen.

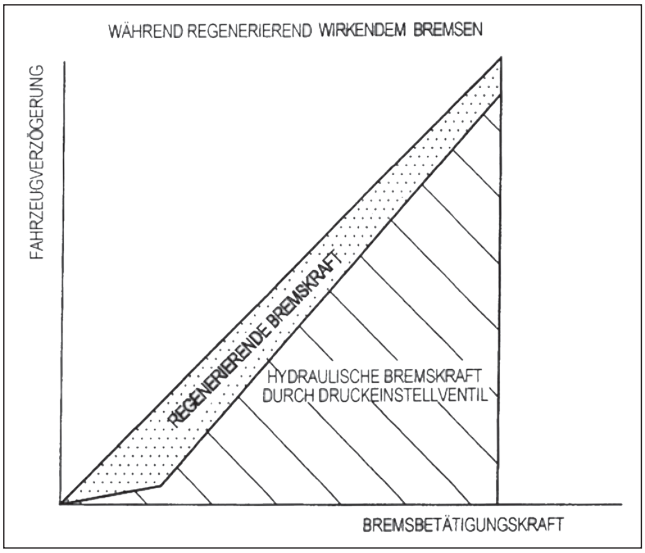
Die hierzu in der DE 10 2006 009 984 A1 offenbarte Vorrichtung (vergleiche Figur 7) sieht bei kombinierter regenerativer und hydraulischer Bremsung vor, den in der Druckkammer (61) durch ein fahrerbetätigtes Druckeinstellventil (20) erzeugten Bremsdruck, der bei rein hydraulischer Bremsung den Hauptzylinder (50) betätigt, in einen Niederdruckspeicher (10e) abzulassen. Hierzu wird das Proportionalventil (33) geregelt geöffnet, wodurch der Anteil der hydraulichen Bremskraft an der Gesamtbremskraft verringert wird.



Figur 7: Bremsanlage für ein Hybridfahrzeug (aus DE 10 2006 009 984 A1).

Die Verfasser der DE 103 56 085 A1 haben sich zur Aufgabe gemacht, das Zusammenwirken von regenerativ wirkenden Bremsen und hydraulischen Reibungs-Bremsen besonders wirtschaftlich zu gestalten. Hierzu wird von einem linearen Zusammenhang zwischen Bremsbetätigungskraft und gewünschter Fahrzeugverzögerung ausgegangen, vergleiche Figur 8.

In jedem Betriebszustand steuert der Fahrer über das Bremspedal und ein mechanisch damit verbundenes Druckeinstellventil einen Sockelbetrag an hydraulischer Bremskraft ein. Die Differenzkraft, die zur Erreichung der der Bremspedalbetätigungskraft zugeordneten Fahrzeug-Sollverzögerung nötig ist,



Figur 8: Pedalkraft-Kennlinie (aus DE 103 56 085 A1).

wird im Fall regenerativer Bremsung elektrisch erzeugt. Wenn nicht regenerativ gebremst wird, steigert eine elektronisch angesteuerte weitere Druckeinstellvorrichtung über Proportionalventile den Bremsdruck entsprechend dem Differenzanteil. Vorteilhaft bei dieser Anordnung ist, dass die Proportionalventile bei regenerativer Bremsung im Ruhezustand verbleiben können und dass nur der für die Erzeugung der Sockelbremskraft tatsächlich nötige Hydraulikdruck aufgebracht werden muss, wodurch elektrische Energie eingespart wird.

Einen anderen Weg schlägt die DE 10 2005 030 223 A1 vor. Auch dort betätigt der Fahrer mit dem Bremspedal ein Druckeinstellventil und gibt damit die Fahrzeug-Sollverzögerung vor. Wenn die Steuerung feststellt, dass die Sollverzögerung allein durch regeneratives Bremsen erzielbar ist, wird der vom Druckeinstellventil ausgegebene Hydraulikdruck nicht an die Radbremszylinder weitergegeben, sondern in einem Hochdruckspeicher gepuffert. Sobald der Verzögerungswunsch nicht mehr allein durch regeneratives Bremsen erfüllt werden kann, wird der Generator abgeschaltet und der im Druckspeicher vorhandene Druck den Radbremseinheiten zugeleitet. Die für die Druckerzeugung während der regenerativen Bremsung aufgebrachte Energie kann somit, abgesehen von geringen Verlusten, zu einem späteren Zeitpunkt zum Bremsen verwendet werden. Ein sprungfreier, komfortabler Übergang zwischen regenerativer und hydraulischer Bremsung wird dabei erzielt, indem die Charakteristik des Druckspeichers so auf die Bremsanlage und den Generator abgestimmt

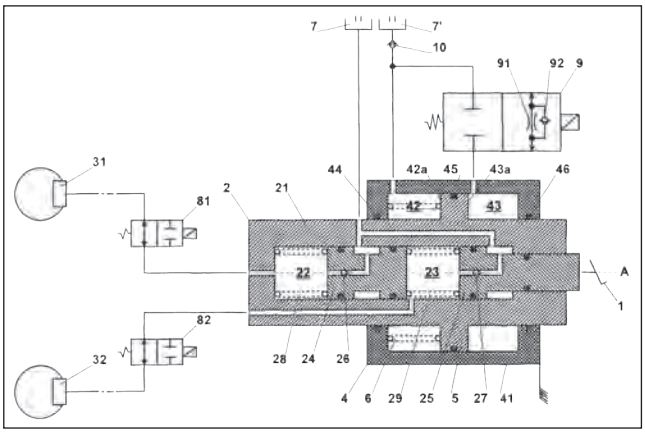
ist, dass der gespeicherte Druck zu einer der Bremswirkung des Generators vergleichbaren Fahrzeugverzögerung führt.

Weitere Beispiele für Bremsanlagen, deren Ziel das Zusammenwirken von regenerativer Bremse und hydraulischer Reibungsbremse ist, finden sich in den Anmeldungen beziehungsweise Patentschriften DE 10 2007 000 195 A1, DE 101 59 572 B4, DE 10 2004 036 984 A1, DE 10 2006 015 905 A1 und DE 10 2006 026 435 A1.

4. Störungsbehandlung in Fremdkraft-Bremsanlagen

Brake-by-Wire-Bremssysteme und allgemein fremdkraftbetätigte Bremsanlagen bergen neben den offensichtlichen Vorzügen auch Risiken, die vor allem in den vergleichsweise störanfälligen elektrischen und elektronischen Komponenten begründet sind. Gegenstand zahlreicher Anmeldungen ist daher, durch geeignete Vorrichtungen und Steuerungsverfahren auch bei Ausfall von Bauteilen oder gar der elektrischen Spannungsversorgung eine Bremskraft aufzubauen, die das Fahrzeug mit der gesetzlich geforderten Mindestverzögerung zum Stehen bringt.

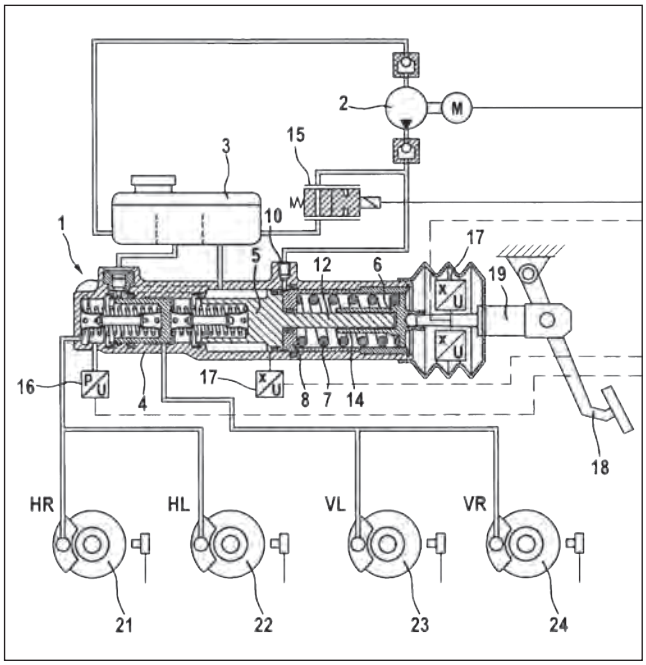
Um dies zu erreichen, schlägt die DE 198 33 084 C1 für den Einsatz in BBW-Bremsanlagen einen axial verschiebbaren Notbremszylinder vor, der mit einem Bremshubsimulator kombiniert ist, vergleiche Figur 9.



Figur 9: Notbremszylinder und Hubsimulator (aus DE 198 33 084 C1).

Wenn das elektrohydraulische System (in Figur 9 nicht dargestellt) fehlerfrei funktioniert, sind die Absperrventile (81, 82) geschlossen und die Ventileinrichtung (9) betätigt. Die Druckkammern (22, 23) des Notbremszylinders (2) sind demzufolge hydraulisch blockiert. Bei Betätigung des Bremspedals (1) ist der Hubsimulatorzylinder (4) aktiv, dessen Charakteristik über die Feder (42) und die Eigenschaften der Drossel (91) einstellbar ist. Bei Ausfall des elektrohydraulischen Systems fallen die Ventile in ihre in Figur 9 dargestellten stromlosen Schaltstellungen, so dass nun der Hubsimulator hydraulisch blockiert ist und die Druckpfade von den Druckkammern des Notbremszylinders zu den Radbremseinheiten frei sind. Der Fahrer kann dann durch Muskelkraft wie bei einem konventionellen Hauptbremszylinder Bremskraft aufbringen.

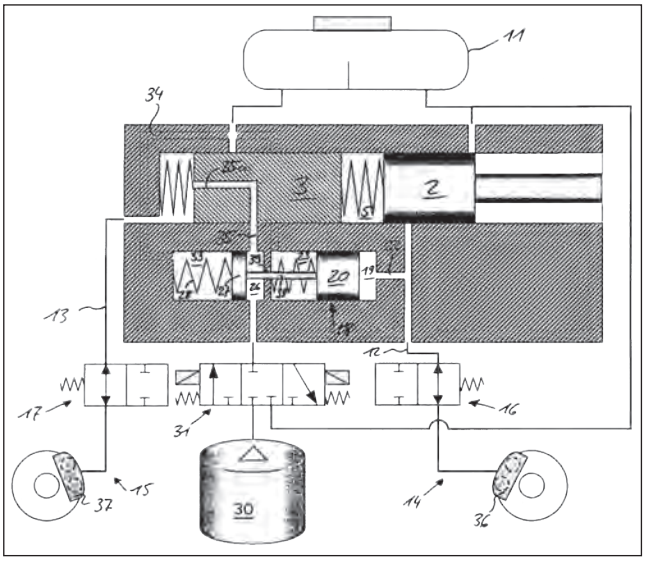
Die Autoren der DE 103 06 058 A1 schlagen vor, den Hubsimulator in den Hauptzylinder zu integrieren, vergleiche Figur 10. Bei intakter elektrohydraulischer Bremsanlage wird durch das Proportionalventil (15) in Abhängigkeit vom Bremspedalweg geregelter Druck in den Raum zwischen den Kolben (5) und (8) eingespeist und die Simulatorfeder (7) entsprechend der Betätigungskraft gespannt. Bei Ausfall der Druckversorgung durch die Pumpe (2) wirkt der Fahrer über den Simulatorkolben (6) und den Fortsatz (12) direkt auf den Betätigungskolben (5) ein, wobei nur ein vernachlässigbarer Leerweg am Bremspedal auftritt. Der Hubsimulator wird im Fehlerfall unkomprimiert verschoben, so dass keine Betätigungskraft und kein Pedalweg verloren gehen.



Figur 10: Fremdkraft-Bremsanlage mit Notbremsfunktion (aus DE 103 06 058 A1).

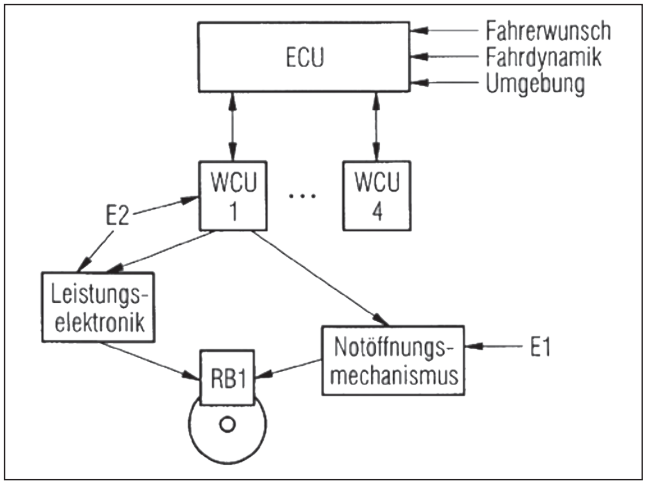
Der DE 10 2006 022 734 A1 ist ein Verfahren zum Betrieb einer elektrohydraulischen Bremsanlage zu entnehmen, das eine Verstärkung der vom Fahrer aufgebrachten Bremskraft auch dann sicherstellt, wenn entweder die Hydraulikpumpe oder der von dieser geladene Hochdruckspeicher ausfallen. In ersterem Fehlerfall kann der im Hochdruckspeicher noch vorhandene Druck durch Ansteuerung entsprechender Ventile nach Maßgabe der Pedalbetätigung geregelt und zum Bremsen verwendet werden. Bei Ausfall des Hochdruckspeichers wird dieser vom Hydraulikkreis abgetrennt und die Bremsdruckeinsteuerung erfolgt über die dann direkt wirkende Hydraulikpumpe.

Gemäß dem Vorschlag der DE 102 16 692 B3 (vergleiche Figur 11) wird bei Ausfall der Druckversorgung der für eine Notbremsung erforderliche Bremsdruck durch einen zuvor aufgeladenen Federspeicher zur Verfügung gestellt. Bei Inbetriebnahme des Fahrzeugs lädt die zu diesem Zeitpunkt als noch intakt vorausgesetzte Druckquelle (30) die Speicherkammer (26) auf, wobei die Speicherfeder (28) gespannt wird. Bei Ausfall der Druckquelle wird diese durch das Ventil (31) hydraulisch abgetrennt und die Ventile (16, 17) werden geöffnet, wie dies in Figur 11 dargestellt ist. Die sehr steif ausgeführte Speicherfeder verschiebt dann sowohl den Speicherkolben (27) als auch den Simulatorkolben (20), um die Radbremseinheiten (36, 37) mit Druckfluid zu beaufschlagen.



Figur 11: Notbremsung mit Federspeicher (aus DE 102 16 692 B3).

Zum Bereich der fremdkraftbetätigten Bremsanlagen zählen neben den elektrohydraulischen auch die elektromechanischen Bremsanlagen, bei denen die Bremskraft durch elektrische Aktuatoren erzeugt wird. Durch das Entfallen der Hydraulik können derartige Bremsanlagen große Vorteile hinsichtlich des erforderlichen Bauraums, der Regelungsdynamik und der Kosten aufweisen, wobei jedoch besondere Strategien zur Störungsbehandlung erforderlich sind. Mögliche Störungen speziell bei elektromechanischen Bremsanlagen sind das ungewollte Bremsen, das durch Blockieren von Rädern zum Verlust der Fahrstabilität führen kann, das Nichtaktivieren der Radbremseinheiten trotz Vorliegen einer Bremsanforderung oder auch das Nichtlösen einer Bremse trotz Lösebefehl. Eine Vorrichtung und ein Verfahren zum möglichst zeitverzugsfreien und an den aktuellen Fahrzustand angepassten Umgang mit derartigen Notfallszenarien hat die DE 10 2006 024 957 A1 (vergleiche Figur 12) zum Gegenstand. Demgemäß sind jeder Radbremseinheit (RB) lokale elektronische Radsteuerungen (WCU) zugeordnet, die mit einer zentralen Steuereinheit (ECU) zyklisch kommunizieren und von dieser Ansteuerbefehle erhalten.



Figur 12: Elektromechanische Bremsanlage (aus DE 10 2006 024 957 A1).

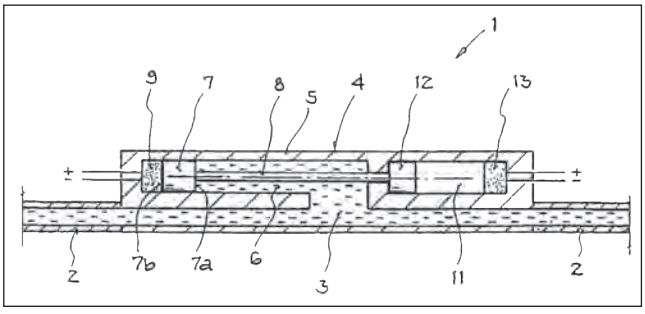
Die zentrale Steuereinheit ermittelt die Ansteuerbefehle auf Grundlage des Fahrerwunsches, des Fahrzustands und von Umgebungsdaten. Über diese Ansteuerbefehle hinaus sendet die zentrale Steuereinheit Handlungsanweisungen für mögliche, in der Zukunft liegende Fehlerfälle an die lokalen Steuereinheiten, wobei diese Handlungsanweisungen auf den Gesamtfahrzeugzustand abgestimmt sind. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass im Fehlerfall auch bei gleichzeitigem Ausfall der Kommunikation zwischen zentraler und lokalen Steuerungseinheiten Letztere im Sinne der Sicherheit des Fahrzeugs optimal reagieren können.

5. Beeinflussung des Bremsvorgangs durch Assistenzsysteme

Im Zuge der Ausstattung zahlreicher Fahrzeuge mit Systemen zur automatischen Fahrstabilitätsregelung, Abstandsüberwachung, Brems- und Parkassistenz, Getriebesteuerung, Unfallfolgenverringerung und anderem stehen umfangreiche Messdaten über den Fahrzustand, die Umgebung oder sogar den Fahrer selbst zur Verfügung. Diese Messdaten lassen sich zur weiteren Steigerung von Sicherheit und Komfort in vielfältiger Weise auswerten. Im Folgenden sollen hierfür Beispiele mit Bezug zu Fremdkraft-Bremsanlagen vorgestellt werden.

Übliche Bremsassistenten erkennen beispielsweise anhand der Geschwindigkeit, mit der das Bremspedal betätigt wird, dass der Fahrer eine Notbremsung wünscht, und steigern entsprechend die an den Radbremseinheiten wirkende Bremskraft auf ein Maximum. Um zu vermeiden, dass der Fahrer durch eine überraschend starke Bremsung verunsichert wird, sind die Auslöseschwellen für den Bremsassistenten in der Regel relativ hoch eingestellt. Ausgehend von diesem Stand der Technik schlagen die Autoren der DE 10 2005 060 298 A1 vor, die Auslöseschwelle situationsabhängig erheblich zu senken, wenn bereits eine erste Kollision des Fahrzeugs mit einem anderen Gegenstand stattgefunden hat. Dadurch soll dem Fahrer die Kontrolle des Fahrzeugs nach einer Erstkollision erleichtert und die Gefahr von Folgekollisionen verringert werden.

Die Erfinder der Vorrichtung gemäß der DE 10 2004 052 352 B3 (vergleiche Figur 13) ergänzen ein Pre-Crash-System, bei dem im Falle einer bevorstehenden Kollision den Bremsleitungen sehr schnell Druckmittel zugeführt wird, um eine Vorrichtung, die dem Bremskreis das Druckmittel auch wieder schlagartig entziehen kann. Dies eröffnet die Möglichkeit, bei doch nicht stattfindender Kollision die eingeleitete Notbremsung im Zeitraum von Millisekunden wieder zurückzunehmen, so dass sie nur als Ruck empfunden wird, aber nicht zum Verlust der Fahrstabilität führt. Um dies zu bewerkstelligen, ist ein Kolben (12) vorgesehen, der durch Aktuatoren (9, 13) in eine Hochdruckposition und zur Korrektur der Drucksteigerung wieder in die Normalposition überführt werden kann, wobei das Druckmittel der Bremsleitung (2) zugeführt oder entzogen wird. Bei den Aktuatoren kann es sich beispielsweise um reaktionsschnelle pyrotechnische Elemente handeln.



Figur 13: Pyrotechnischer Notbremsassistent (aus DE 10 2004 052 352 B3).

Ein Bremsassistent, der ein besonders komfortables Abbremsen ermöglichen soll, ist Gegenstand der DE 10 2007 030 803 A1. Mehrere Stereokameras erfassen die vor dem Fahrzeug liegende Umgebung und ermitteln aus den erkannten Fahrbahnmarkierungen und Objekten sogenannte Stopppositionskandidaten. Leitet der Fahrer durch Bremspedalbetätigung einen Bremsvorgang ein, berechnet die Steuerung, ob das Maß der Fahrerbremsung tatsächlich zum Stillstand des Fahrzeugs am nächsten Stopppositionskandidaten führt und korrigiert gegebenenfalls die Bremskraft, um ein sanftes Anhalten zu gewährleisten, ohne dass der Fahrer seine Bremsvorgabe selbst korrigieren muss. Überschreitet jedoch die Bremsbetätigung durch den Fahrer definierte Schwellenwerte, etwa im Falle einer Notbremsung, wird der Fahrervorgabe Priorität gegenüber der Komfortsteuerung eingeräumt.

Die Möglichkeiten der Objekterkennung nutzt auch das Verfahren gemäß der DE 10 2006 030 676 A1. Werden ein Objekt in kritischer Entfernung vor dem Fahrzeug und gleichzeitig ein Verzögerungswunsch des Fahrers erkannt, erfolgt ein automatischer Bremseingriff. Hierbei ist die Betätigung des Bremspedals nicht erforderlich, da bereits das Loslassen des Gaspedals als Verzögerungswunsch erkannt wird. Dieser unterstützende Bremseingriff erspart dem Fahrer somit die beispielsweise bei Kolonnenverkehr üblicherweise erforderlichen zahlreichen abwechselnden Betätigungen von Gas- und Bremspedal.

Einen Beitrag zur Zuverlässigkeit von Abstandsregelsystemen, die über eine Einrichtung zur Sicherstellung des Fahrzeugstillstands verfügen, will die Vorrichtung nach dem Vorschlag in der DE 10 2005 036 217 A1 leisten. Dazu übernimmt nach einer kurzen Zeit des Fahrzeugstillstands ein (robustes) Bremsregelmodul die Funktionsverantwortung für das Halten des Fahrzeugs von dem eigentlichen (komplexen) Längsdynamikregelmodul. Durch diese Entflechtung wird der Fahrzeugstillstand selbst bei einem Fehler im Längsdynamikregelmodul aufrechterhalten und die Programmierung der einzelnen Module übersichtlicher.

Kurz vor dem Fahrzeugstillstand bei betätigter Bremse kann es auf Grund des Übergangs von Gleit- zu Haftreibung an den Radbremseinheiten zu einem sogenannten Anhalteruck kommen, da die Verzögerung bei gleichbleibendem Bremsdruck plötzlich zunimmt. Üblicherweise wird daher eine automatische, vorbestimmte Bremsdruckverringerung beim Unterschreiten einer definierten Fahrgeschwindigkeit eingeleitet. Dies kann in Extremsituationen wie heißgelaufenen oder abgenutzten Bremsen und starken Steigungen zu einem unbeabsichtigten Weiterrollen des Fahrzeugs führen. Um dem zu begegnen, soll gemäß dem Vorschlag der DE 10 2005 029 891 A1 die Bremsdruckverringerung teilweise oder ganz deaktiviert werden, wenn die Fahrzeugsensorik das Vorliegen einer oder mehrerer der genannten Extrembedingungen feststellt.

Die Beherrschung des Reibwertübergangs von Gleiten nach Haften ist auch Thema der Anmeldungen DE 10 2005 056 985 A1 und DE 10 2005 056 986 A1, die Maßnahmen gegen Bremsenknarzen (Schwingungen bei Fahrzeugstillstand) und Bremsenquietschen (Schwingungen kurz vor dem Fahrzeugstillstand) zum Gegenstand haben.

Bei modernen Fremdkraftbremsanlagen müssen nicht nur die Radbremseinheiten und gegebenenfalls das Bremsfluid bezüglich Überhitzung, etwa durch Dauerbremsen beim Bergabfahren, überwacht werden, sondern auch die Steuergeräte. Diese können beschädigt werden, wenn beispielsweise ein sogenanntes Hill-Hold-System übermäßig lange mit hohen Steuerströmen betrieben wird. Um hier Abhilfe zu schaffen, übernimmt nach dem Vorschlag der DE 10 2005 046 300 A1 die Feststellbremse die Sicherung des Fahrzeugstillstands, wenn im Bereich der Betriebsbremse eine Überhitzung festgestellt wird.

Weitere Beispiele für Maßnahmen zum Umgang mit den vielfältigen Temperaturproblemen in Bremsanlagen finden sich in der DE 103 49 664 A1, der DE 100 64 392 A1, der DE 10 2007 008 929 A1 und der DE 10 2006 001 914 A1.

6. Ausblick

Die Einführung von fremdkraftbetätigten Bremsanlagen und aufwändiger Sensorik in nahezu allen Fahrzeugklassen war Voraussetzung dafür, automatische Fahrstabilitätsregelsysteme realisieren zu können. Doch nicht nur für die Steuerung des automatischen Betriebs, sondern zunehmend auch zur Beeinflussung der vom Fahrer initiierten Bremsungen lassen sich die dank der nun vorhandenen Sensorik vorliegenden Messdaten auswerten. Vielfältigste, weit über die in diesem Überblick genannten Beispiele hinausgehende Möglichkeiten sind denkbar, um die Bremsanlage im Hinblick auf immer mehr Komfort und Sicherheit zu betreiben, bis schließlich die Elektronik in jedem Fahrzustand „mitbremst". Es bedarf dabei weiterer Anstrengungen, um oft widersprüchliche Ziele, wie etwa hohe Regelungsdynamik und geringen Energieaufwand, zum Nutzen der Kraftfahrer und der Umwelt zu verbinden. Die Bemühungen der Erfinder werden sich darüber hinaus auch darauf richten, „echten" Brake-by-Wire-Systemen mit elektromechanischen Aktoren im PKW-Bereich zum Durchbruch zu verhelfen und zumindest in Teilbereichen die dort noch dominierende Hydraulik abzulösen. Sicherlich ist einige Überzeugungsarbeit erforderlich, um die derzeit noch bestehenden Bedenken gegen rein elektromechanische Bremsanlagen zu überwinden. Ob diese Bedenken heute noch berechtigt sind oder zu einem gewissen Teil auch in der Pflege maschinenbaulicher Tradition begründet liegen, wird die zukünftige Entwicklung zeigen.

Einsatz von „controlled source electromagnetics" (CSEM) zum Aufspüren von Erdöl, Erdgas und Gashydraten

Dr. Klaus Wollny, Patentabteilung 1.52

Die 2008 extrem gestiegenen Rohstoffpreise auf den Weltmärkten beleben die Suche und Ausbeutung von geologischen Lagerstätten aller Art. Durch die enormen Gewinne v. a. bei fossilen Energieträgern rechnet es sich jetzt auch, bisher unrentable Ressourcen aufwändig zu erschließen, wie etwa die Ölsande in Kanada, oder mit verbesserten Methoden in Weltgegenden Erdöl und Erdgas zu explorieren, die bisher unerreichbar schienen. Eine in der Praxis relativ neue Explorationsmethode stellt das elektromagnetisch arbeitende CSEM-Verfahren dar. Dieses wird im Folgenden anhand seiner Patent- und Fachliteratur kurz erläutert.

1. Fossile Energieträger

Ob man es wahrhaben will oder nicht: Unser tägliches Leben baut weltweit nach wie vor auf der Energie auf, die vor Jahrmillionen in geologischen Einheiten in Form fossiler Brennstoffe abgelagert wurde. Dies wird auf absehbare Zeit auch so bleiben, Klimawandel und Naturschutz hin, Globalisierung und individuelle Mobilität her.

Beispielsweise werden aus Rohöl oder Erdgas gewonnene Treibstoffe weiterhin von einem Großteil der Weltbevölkerung für ihre Busse, LKWs und Mofas genutzt werden. Flugzeuge werden auch in Zukunft Kerosin benötigen, Schiffsmotoren mit Schweröl laufen. Dieser Bedarf wird bei steigenden Preisen befriedigt. Die im Rohstoffgeschäft tätigen Firmen stecken einen Teil des so zusätzlich verdienten Geldes in die Forschung und Entwicklung, um zum Beispiel bisher als nicht höffig genug angesehene Lagerstätten doch ausbeuten zu können oder mit verfeinerten Techniken auch neue zu finden und zu erschließen. Die Weltmeere stehen besonders im Fokus der Explorationstätigkeit auf neue Erdöl- und Erdgasquellen.

2. Geowissenschaftliche Exploration

Viele Schelfgebiete der Kontinente sind seit Jahrzehnten als Fördergebiete für fossile Kohlenwasserstoffe bekannt (zum Beispiel Teile der Nordsee, Golf von Mexiko). Deren Entdeckung gelang aber wegen der prinzipiell als menschenfeindlich einzustufenden Randbedingungen nicht zufällig, sondern mittels der genauen Analyse aller vorhandenen geologischen und geophysikalischen Daten dieser Gebiete und der an diese angrenzenden Areale. An diese Information gelangt man jedoch erst über langwierige Messkampagnen, Probennahmen (zum Beispiel über Bohrungen) und heute auch zunehmend über Modellierungen.

In der Vergangenheit wurden geophysikalische Daten auf See weitgehend durch den Einsatz der marinen 3D-Seismik gewonnen. Die unterstützende Erkundung mittels mariner elektromagnetischer (EM) Methoden war eher eine Randerscheinung. Dies änderte sich in den letzten Jahren zunehmend.

Im Gegensatz zur Seismik, die die Dichte- und Schallgeschwindigkeitskontraste im Untergrund nutzt, um über das Ausbreitungsverhalten mechanischer Wellen den geologischen Aufbau eines Gebietes zu erkunden, ermittelt man mit den EM-Methoden dessen Struktur zum Beispiel über die räumliche Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands ρ_s. Dies ist möglich, da Gesteinseinheiten aufgrund ihrer gegenseitigen Lage im Untergrund, ihrer Mineralzusammensetzung, Mikrostruktur und Porosität charakteristische EM-Materialeigenschaften aufweisen.

Gesteinseinheiten, die zum Beispiel als Speichergestein für Erdöl dienen können, und in denen die sonst üblichen Porenwasserfüllungen durch Kohlenwasserstoffe (KW) verdrängt wurden (zum Beispiel in Sandstein), weisen gegenüber demselben nicht KW-führenden Gestein einen erhöhten spezifischen elektrischen Widerstand auf. Dieser Kontrast ist mittels spezieller EM-Methoden detektierbar und Erdöl- und Erdgaslagerstätten sind auf diese Weise zu orten.

3. Grundlagen der Elektromagnetik auf See

Die Messungen auf See sehen sich jedoch einigen Schwierigkeiten gegenüber. Beispielsweise liegen Schelfgebiete aus im Vergleich elektrisch schlecht leitfähiger ozeanischer Kruste meist unter einigen hundert Metern gut leitfähigem Meerwasser. Bringt man EM-Energie von der Meeresoberfläche ein, so nimmt diese auf ihrem Weg zum Meeresgrund exponentiell ab. Ein Teil der Energie wird absorbiert und das Meerwasser aufgrund von Induktionseffekten sogar etwas aufgeheizt.

Ferner gilt als Faustregel für zwei Frequenzen $f_1 < f_2$, dass bei gleich bleibendem ρ_s eines Mediums bei niedriger Frequenz f_1 des EM-Feldes, die Tiefe, aus der man noch sinnvolle Informationen über das Medium erwarten kann, größer ist als bei der höheren Frequenz f_2. Bei gleicher Frequenz f, aber unterschiedlichem ρ_s zweier Probemedien, dringt die EM-Energie tiefer in das Medium ein, das den höheren spezifischen Widerstand ρ_s besitzt.

Konkret bedeutet dies, dass bei dem üblichen spezifischen elektrischen Widerstand des Meerwassers von 0,2 Ωm eine EM-Welle mit f_2 = 1 kHz innerhalb von zirka 7 m auf den 1/e-ten-Teil ihrer Ursprungsenergie gedämpft wird (die sog. „Skintiefe" des Meerwassers bei dieser Frequenz). Bei einer Frequenz f_1 = 1 Hz liegt die Skintiefe bei zirka 225 m. Das Meerwasser wirkt also als Tiefpassfilter für EM-Strahlung [1].

Bei einer EM-Erkundung auf See werden daher niederfrequente EM-Felder [zirka 0.001 – 10 Hz] genutzt, um überhaupt durch das elektrisch gut leitfähige Meerwasser in die Tiefenbereiche der ozeanischen Kruste vorstoßen zu können, was jedoch bei weitem nicht alle Probleme behebt (vergleiche 5.4).

Doch woher stammt diese niederfrequente EM-Energie? In der Praxis nutzt man sowohl natürliche als auch künstliche Quellen.

4. Marine Magnetotellurik

In der marinen Magnetotellurik (MT), werden analog zur landgestützten MT passiv natürliche elektromagnetische Felder zur Untergrunderkundung genutzt.

Diese Felder haben ihren Ursprung in zeitlich variierenden primären Magnetfeldern, die in elektrisch leitfähigen Strukturen der Erde Wirbelströme induzieren. Mit diesen Strömen ist ein elektrisches Feld verbunden, das wiederum ein sekundäres magnetisches Feld zur Folge hat. Den Primärfeldern liegen im Fall der marinen MT im Wesentlichen drei physikalische Phänomene zugrunde:

- Die Wechselwirkung des Erdmagnetfeldes mit dem Sonnenwind, der aus geladenen Teilchen besteht, führt in der Regel zu niederfrequenten EM-Feldern mit f < 1 Hz [als Quelle genutzt].

- Gewitter, deren Ursprung zum Großteil in den Tropen liegt, führen aufgrund der über die elektrischen Entladungen freiwerdende Energie – die sich weltweit quasi wie in einem Wellenleiter zwischen der Erdoberfläche und der Ionosphäre ausbreitet – zu niederfrequenten EM-Feldern mit f > 1 Hz, bis zu wenigen Hz [als Quelle genutzt].

- Die Wechselwirkung des elektrisch gut leitfähigen Meerwassers über seine Strömungen in den Ozeanen mit der stationären leitfähigen ozeanischen Lithosphäre produziert Frequenzen sowohl über als auch unter 1 Hz (zum Beispiel [2]–[5]) [als „Noise" gewertet].

Auf diese Weise entstehen zwar schwache, aber kostenlose und noch messbare EM-Felder für die MT. Ein Nachteil ist jedoch deren starke zeitliche Variation. Beispielsweise sind einzelne Frequenzen auf jahreszeitliche Effekte (Monsun) oder den elfjährigen Sonnenfleckenaktivitätszyklus zurückzuführen.

Daher sind die MT-Messungen langwierig und aufwändig durchzuführen, will man eine gute Datenqualität erzielen.

5. Controlled source electromagnetics (CSEM)

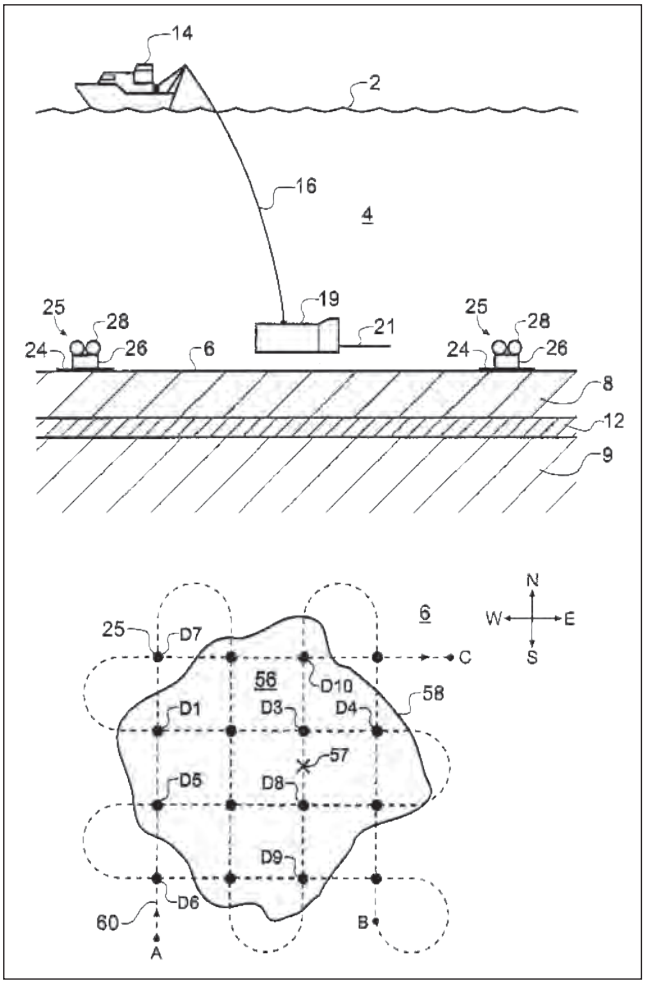
Die Nachteile zeitlich stark variabler Felder als Grundlage einer Messung umgeht man durch die Verwendung einer aktiven, definierten Quelle, wie dies beim CSEM-Verfahren verwirklicht wird.

Um auch den Einfluss der „energiefressenden" Wasserüberdeckung möglichst auszuschließen, wird eine Sendeantenne in relativer Nähe über dem Ozeanboden hinter einem Schiff hergeschleppt.

Diese Idee ist wie die marine MT im akademischen Umfeld seit den 1970er Jahren bekannt, jedoch wurde der erste erfolgreiche kommerzielle CSEM-Einsatz erst im November 2000 vor Angola im Rahmen einer Statoil-Kampagne durchgeführt. Die Apparatur hierfür stammte bezeichnenderweise vom Southampton Oceanography Center und die Messung des norwegischen Konzerns erfolgte mit einem britischen Forschungsschiff [6].

Um einen ersten Überblick über die gesamte Methode zu gewinnen, sei auf US 7 337 064 B2, WO 2008 / 066 389 A1, WO 2007 / 094 676 und WO 2007 / 136 276 A1 verwiesen. Wie eine CSEM-Messkampagne prinzipiell aufgebaut ist, zeigt zum Beispiel die Figur 1 aus US 7 337 064 B2.

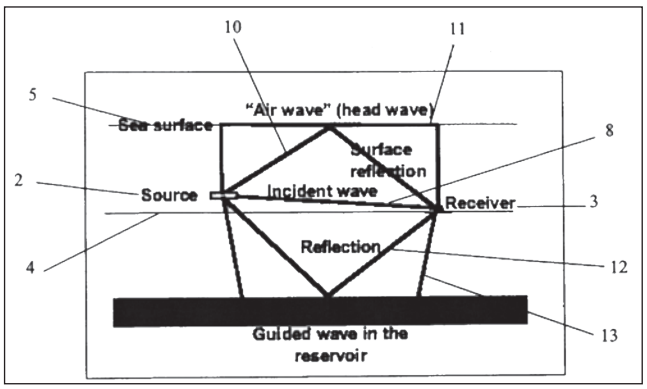
In dieser Schrift wird beschrieben, wie ein tiefseetauglicher, stabilisierter Instrumententräger (19) einen horizontalen elektrischen Dipol (HED) als CSEM-Sendeantenne (21) hinter einem Schiff (14) herzieht. Die von der Antenne abgestrahlte Energie induziert in einer Deckschicht des Ozeanbodens (8), einer darunter liegenden Reservoirschicht (12) und einer diese unterlagernden weiteren Schicht (9) ein sekundäres EM-Feld, das mittels der auf dem Meeresgrund fest installierten beiden Empfängereinheiten (25) registriert wird.



Figur 1: Survey-Design einer CSEM-Messung (aus US 7 337 064 B2).

5.1 Theoretische Grundlagen und Messbetrieb

Bevor man ein an einem CSEM-Empfänger registriertes Signal sinnvoll interpretieren kann, muss man wissen, welche Signalanteile zu diesem beitragen. EM-Energie breitet sich auf vielen unterschiedlichen Wegen vom Sender zum Empfänger aus (vergleiche Figur 2), wobei jeder mögliche Ausbreitungsweg unterschiedlich stark zum Gesamtsignal beiträgt. Zusätzlich sind diesen zunächst als Nutzsignale anzusehenden Signalanteilen auch Störanteile wie das Geräterauschen oder externe Rauschanteile, wie sie zum Beispiel durch die Gerätebewegung oder durch windinduzierte Oberflächenwellen entstehen können [7], überlagert.



Figur 2: Ausbreitungswege der EM-Energie auf dem Weg vom CSEM-Sender zur Empfangsstation (aus GB 2 415 511 A).

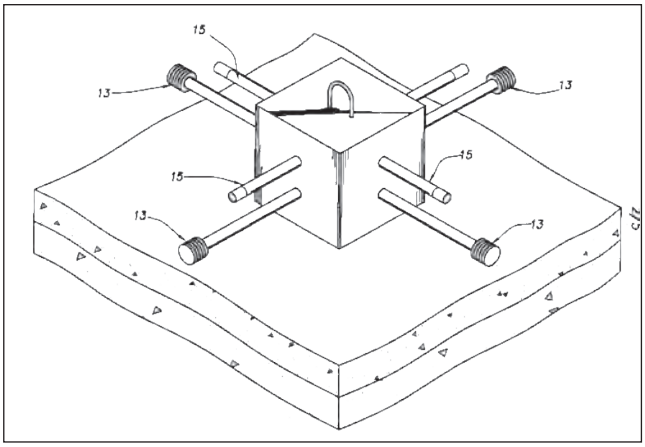
Durch geschickte Messaufstellungen, das heißt ausgesuchte Sender-Empfänger-Konfigurationen, können u. U. einige unerwünschte Signalanteile minimiert oder bereits bei der Aufzeichnung in einfacher Weise von anderen Anteilen separiert werden. Beim Design einer Messung sollten daher alle zugänglichen Informationen in die Planung für die Messkonfiguration mit einfließen (zum Beispiel Untergrundtopografie, Bohrungsresultate, ein mögliches geologisches Modell, seismische Resultate, potenzielle Störquellen, um den wahrscheinlichen Aufwand der Nachbearbeitung von vornherein zu reduzieren.

Bei einer CSEM-Messaufstellung wird der Sender auf einer oder mehreren virtuellen Profillinien geradlinig in gleich bleibender Tiefe unter dem Meeresspiegel nahe des Meeresgrundes bewegt (vergleiche Figur 1 unten). Die Empfänger sind teils über mehrere hundert Kilometer hinweg entlang einer Empfängerlinie oder zum Beispiel zweidimensional als Empfangsfeld auf dem Ozeanboden angeordnet; abseits von dieser Linie oder dem Messfeld existiert mindestens eine Referenzstation als Kontrolleinheit. Als Referenz wird meist ein Ort gewählt, der eine prinzipiell vergleichbare Geologie aufweist, nach Möglichkeit jedoch ohne bereits nachgewiesene Kohlenwasserstoffvorkommen.

5.2 CSEM - Empfänger

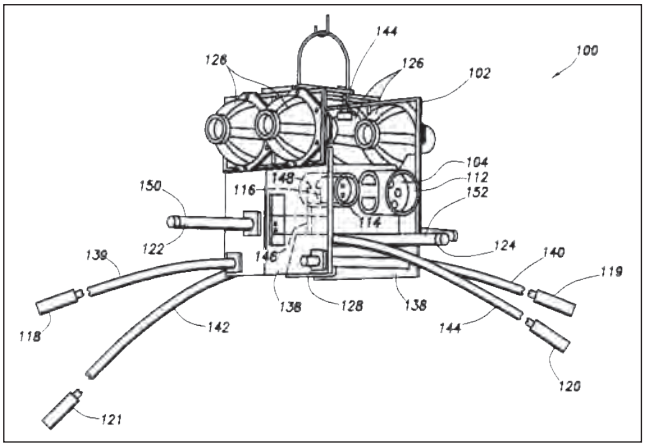
Die Empfänger sind dafür ausgelegt, mehrere oder alle Komponenten des sekundären Magnetfeldes und des elektrischen Feldes, das sich an ihrem Standort manifestiert, in Amplitude und Phase zu messen.

Ein Beispiel für einen Empfänger zeigt die Figur 3. Dieser setzt sich hier aus zwei paarweise orthogonal aufeinander stehenden elektrischen (13) und magnetischen Sensoren (15) zusammen. Diese starre Anordnung hat den Nachteil, dass der Empfänger zur Vermeidung schlechter Datenqualität möglichst parallel auf einem waagerechten Meeresboden aufsetzen muss. Dies ist aber aufgrund der Topographie des Meeresgrundes selten der Fall.



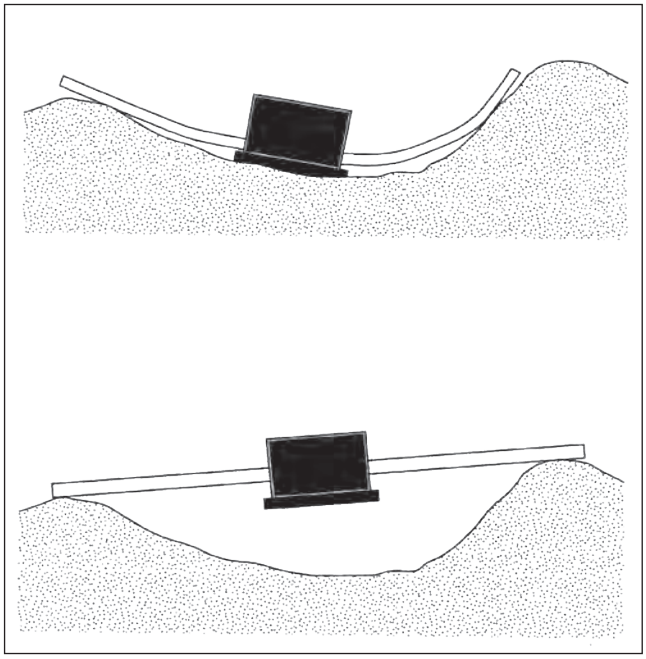
Figur 3: Einmal-EM-Empfänger (aus GB 2 396 218 A).

Der Empfängertyp der Figur 4 aus GB 2 425 182 A ist etwas moderner und zeigt halbstarre Ausleger von mehreren Metern Länge (139-142), an denen E-Feld-Sensoren (118-121) sitzen. Über einen Haken kann dieser von einem Schiff ausgesetzt werden und ein abkoppelbarer Betonanker (128) sorgt dafür, dass sein Gewicht die Apparatur auf den Meeresboden zieht. Soll die Apparatur, die ohne den Betonanker genügend Auftrieb zeigt, wieder geborgen werden, klinkt man sie vom Anker aus. Nach dem Auftauchen kann sie über den Haken auf dem Wasser treibend geborgen werden.



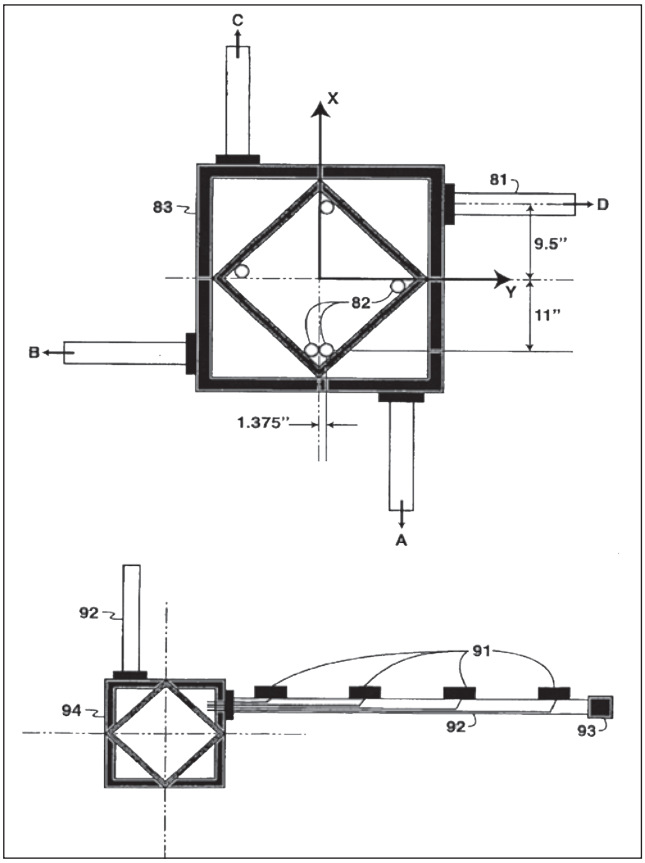
Figur 4: Wiederverwendbarer Empfänger (aus GB 2 425 182 A).

Keine der beiden Apparaturen aus den Figuren 3 und 4 ist jedoch baulich in der Lage zu garantieren, dass sie in der gewünschten Weise auf dem Meeresboden aufsetzt. Sie liefern auch keine erforderlichen Zusatzinformationen, um gegebenenfalls mit diesen eine Datenkorrektur vornehmen zu können. Wie ein Aufsetzen in der Praxis aussieht, ist zum Beispiel der WO 2007 / 136 451 A2 (Figur 5) zu entnehmen. Die obere Zeichnung kann für den Empfänger der Figur 4, der untere für den der Figur 3 als gültig angenommen werden.



Figur 5: Unerwünschte „Schieflage" und/oder mangelnder Kontakt einer Empfangseinheit mit dem Meeresgrund (aus WO 2007 / 136 451 A2).

Aber in derselben Schrift werden hierfür auch einige Lösungen vorgeschlagen. Eine sieht vor, entlang einer Auslegerstange (92) eine Anzahl von 3D-Sensoren (91) anzubringen, die in der Lage sind, jeweils ihre eigene Position im Raum, die Lage und gegebenenfalls die Verformung der Auslegerstange und folglich auch die räumliche Position der EM-Feldsensoren (93) an den Stangen zu bestimmen (Figur 6 unten). Die Auswertung hierzu erfolgt vor Ort mittels Software, wie sie auch für die Aufzeichnung von Streamerdaten der marinen Seismik genutzt wird. Der obere Teil der Figur 6 zeigt einen Querschnitt durch die Apparatur mit dem empfängerinternen Koordinatensystem (hier nur x,y), auf das sich die 3D-Positionssensordaten beziehen.



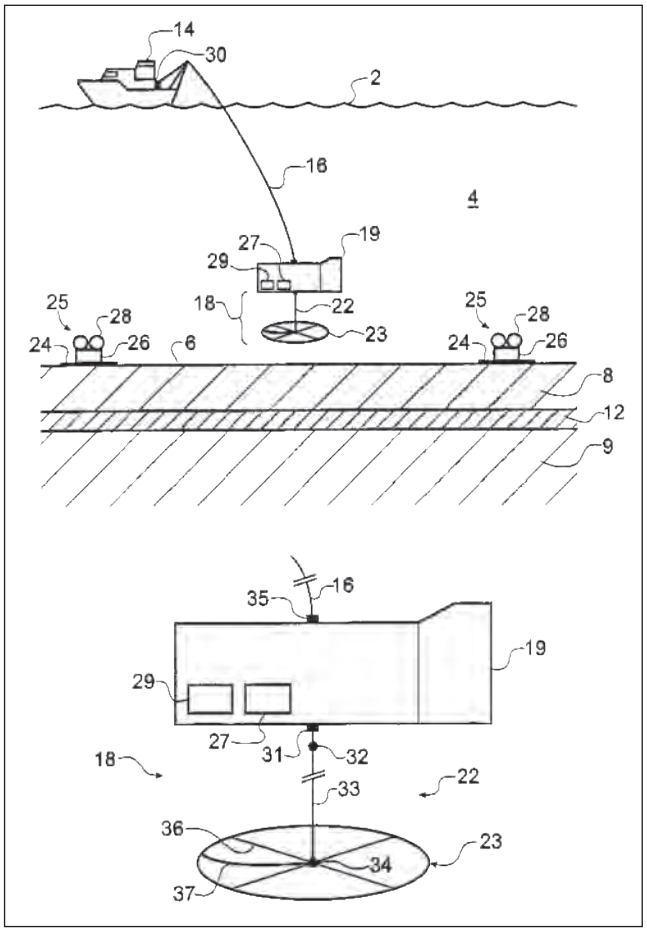
Figur 6: Bestimmung der tatsächlichen Lage von EM-Feldsensoren im Raum mittels Positionssensoren an den Auslegern eines Empfängers (aus WO 2007 / 136 451 A2).

Von der EM-Technik her ist es einleuchtend, dass derartige Empfänger nicht nur für CSEM-Messungen geeignet sind, sondern in der Regel auch bei marinen MT-Kampagnen zum Einsatz kommen können. Sie werden sogar für die Langzeitüberwachung von bereits prospektierten Kohlenwasserstoffvorkommen verwendet, um zum Beispiel die Auswirkungen der Förderung auf das angezapfte Reservoir zu dokumentieren (zum Beispiel WO 2004 / 053 528 A1).

Neben den oben genannten Empfangseinheiten sind eine Vielzahl weiterer bekannt (zum Beispiel WO 2007 / 105 956 A1), die unter anderem Verbesserungen für die Wartung und Bergung (mittels speziellen Auftriebskörpern GB 2 425 182 A), bewegliche Ausleger (US 2004 / 0 000 912 A1) oder eine Anordnung in langen Kabeln zusammen mit seismischen Sensoren (GB 2 396 218 A) vorsehen.

5.3 CSEM – Sender

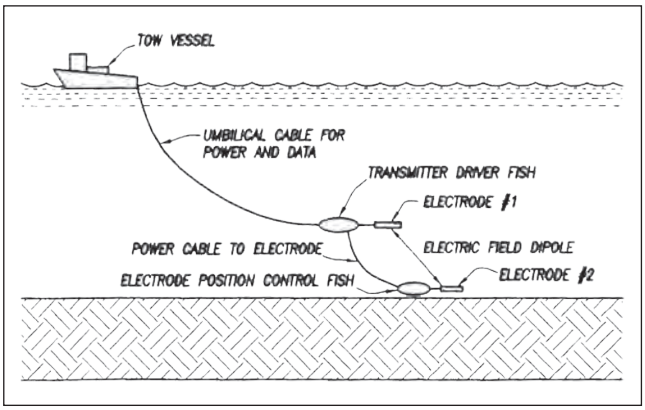
Als Sender einer CSEM-Kampagne können grundsätzlich alle auch an Land üblichen Sendertypen für künstlich erzeugte EM-Quellenfelder verwendet werden. Je nach Geologie und zu klärender Fragestellung werden jedoch bestimmte Sendertypen bevorzugt (zum Beispiel [8]). In den meisten Fällen wird ein einziger Sendertyp wie etwa der HED aus Figur 1 verwandt.



Figur 7: CSEM-Sender, der aus einem vertikalen elektrischen Dipol (VED, 22) und einem vertikalen magnetischen Dipol (VMD, 23) aufgebaut ist (aus US 7 337 064 B2).

Aber auch Kombinationen aus mehreren Typen, wie etwa einem vertikalen magnetischen und einem vertikalen elektrischen Dipol (VED, 22 und VMD, 23) sind zum Beispiel aus der US 7 337 064 B2 bekannt (Figur 7). Beide Antennen (22, 23) sind in eine gemeinsame Konstruktion integriert und werden bei gleicher Messanordnung wie in Figur 1 vom Instrumententräger (19) oberhalb des Meeresbodens (6) geschleppt. Die VED-Antenne (22) besteht aus einem Antennenkörper (33), der von zwei Elektroden (32, 34) begrenzt wird. Die VMD-Antenne (23) hängt quasi als „Reifen" an der VED-Antenne und wird durch einen Rahmen (36) stabilisiert.

Die Sendeleistung der Antennen hängt von den physikalischen Bedingungen vor Ort und dem Strom ab, der eingespeist wird. Praxistypische Längen der verwendeten linearen Sender-Dipole sind mehrere hundert Meter, der eingespeiste Strom beträgt in der Regel zirka 1 000 A. Es handelt sich somit sowohl von der Geometrie als auch vom Strombedarf her um beeindruckende Einheiten. Es werden auch räumlich weit voneinander entfernte Elektroden, die nur über das leitfähige Seewasser elektrisch verbunden sind, zusammengeschaltet und in dieser – zum Teil geometrisch beliebig veränderbaren – Weise als Sender verwendet (zum Beispiel GB 2 433 604 A, Figur 8).



Figur 8: Durch zwei unabhängig voneinander im Meerwasser positionierte Elektroden aufgespannter Sendedipol (aus GB 2 433 604 A1).

Die Sender können durch das Umschalten von Gleichströmen zwischen den Elektroden die verschiedensten Signalformen und Frequenzen aussenden (zum Beispiel WO 2008 / 033 737 A2). Die für CSEM am häufigsten verwendeten Frequenzen liegen zwischen 0,1 und 1 Hz.

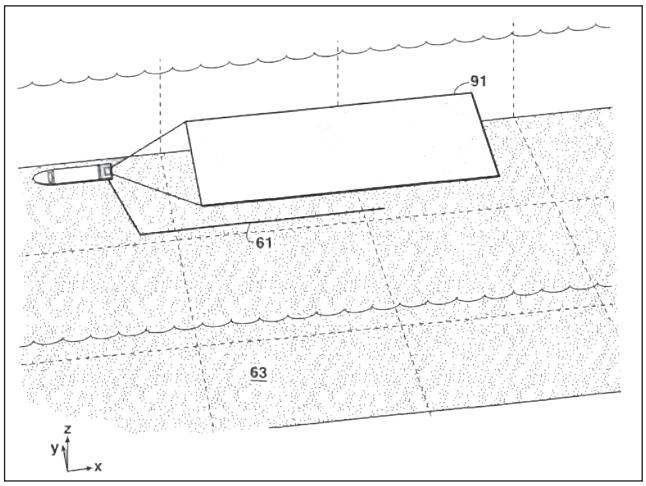
5.4 Die Probleme bei der Auswertung

5.4.1 Beispiel: Die „Luftwelle"

Von den vielen Problemen der CSEM-Messtechnik und der Auswertung von CSEM-Daten stellt sich der Einfluss der „Luftwelle" immer wieder als besonders gravierend heraus (vergleiche Figur 2 „air wave (head wave)"). Es ist daher sehr wichtig zu wissen, inwieweit man den Einfluss der Luftwelle quantifizieren oder aus den Daten eliminieren kann, um auf die reine Untergrundantwort eines CSEM-Signals und somit die Geologie schließen zu können.

Diese Fragestellung wird zum Beispiel ausführlich in WO 2007 / 097 787 A2 behandelt. Hier werden drei einzelne Lösungsmöglichkeiten vorgeschlagen sowie in der Konsequenz auch eine Kombination aus diesen Dreien:

- Abschirmung des Senders von der Luft-Wasser-Grenzfläche
- Abschirmung der Empfänger von EM-Energieanteilen, die eine relevante vertikale Komponente aufweisen
- Vorsehen einer zweiten Quelle, die in der Lage ist, sowohl den Luftwellenanteil als auch den MT-Signalanteil auszuschalten („Gegenschallprinzip")



Figur 9: Abschirmung eines CSEM-Senders mit einer leitfähigen „Decke" (aus WO 2007 / 97 787 A2).

Wie zum Beispiel die Abschirmung des linearen CSEM-Senders (61) verwirklicht ist, kann der Figur 9 entnommen werden. Hierbei wird vom Schiff oberhalb des Senders ein gut leitfähiges, großflächiges Geflecht (91) mitgeschleppt, das die nach oben abgestrahlte EM-Energie weitgehend daran hindert, an der Grenzfläche Luft-Wasser einzutreffen.

Ein Großteil der Patentanmeldungen setzt jedoch nicht auf apparative Lösungen, sondern auf Modellrechnungen. Kernpunkt ist es, nach Abschluss der Messung unter Kenntnis möglichst aller Randbedingungen die von der Luftwelle verursachten Signalanteile zu modellieren. Das Ergebnis dieser Berechnung wird dann vom Messdatensatz subtrahiert (zum Beispiel CA 2 526 266 A1). Weitere Lösungsvorschläge zur Eliminierung oder Quantifizierung der Luftwelle – zusammen mit anderen Störsignalen – über Modellierungen sind zum Beispiel US 2006 / 0 186 887 A1, US 7 191 063 B2 oder WO 2006 / 000 538 A1 zu entnehmen. Zum theoretischen

Hintergrund der Wellenausbreitung und wie dieser in Modellrechnungen einfließen kann, wird auf [9] verwiesen.

5.4.2 Weitere Fußangeln bei der Auswertung

In der marinen Elektromagnetik ist je nach Frequenz der eingesetzten Felder auch die Topographie des Meeresgrundes ein nicht zu vernachlässigender Faktor, da er teils die Interpretation der aufgezeichneten Daten massiv beeinflussen kann (zum Beispiel [10], [11]).

Neben der Topographie des Untergrundes kann zum Beispiel aber auch eine Eisbedeckung des Meeres in die Daten einfließen. Da sich – ob man das gutheißen will oder nicht – wohl in Zukunft auch die Explorationstätigkeit zumindest auf die Arktis ausdehnen wird, beschäftigt sich WO 2007 / 008 559 A2 speziell mit den dort auftretenden Problemen für CSEM und deren Messdatenauswertung.

In vielen Fällen ist es aber nicht allein mangelnde Datenqualität, die zu Fehlinterpretationen führen kann. Wie in der einschlägigen Fachliteratur ausgiebig diskutiert wird, ist auch der menschliche Faktor aufgrund bisher mangelnder Erfahrung mit dieser Methode eine entscheidende Fehlerquelle bei der Auswertung und geologischen Interpretation der Daten (zum Beispiel [12], [13]).

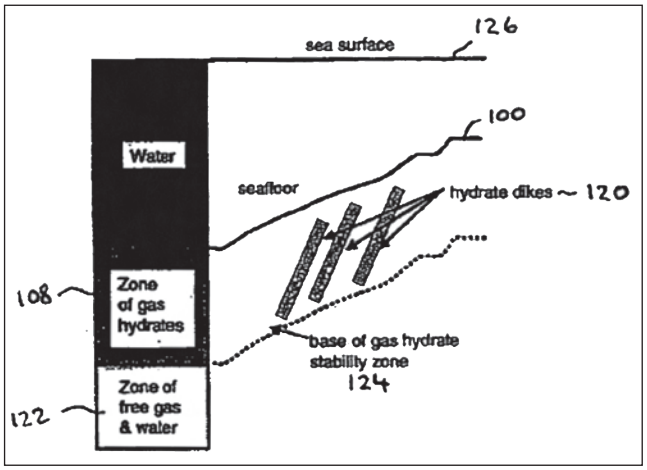
5.5 Kombination mit anderen Verfahren

Rekapituliert man die eigentliche Zielsetzung der CSEM-Methode, nämlich unterstützend für bereits etablierte geowissenschaftliche Methoden zu wirken, hat sie bereits heute ihr Ziel erreicht. In vielen Fällen konnten mit ihrer Hilfe Kohlenwasserstoffvorkommen aufgespürt und mit vergleichsweise geringem zeitlichen, apparativen und finanziellen Aufwand geeignete Bohrlokationen bestimmt werden. Es ist daher der falsche Ansatz zu fordern, dass mittels der CSEM-Methode allein eine erfolgreiche Prospektion durchgeführt werden kann. Ihre Stärke liegt im Verbund mit anderen geophysikalischen Verfahren, insbesondere mit der Seismik.

Daher beschäftigen sich Fachartikel (zum Beispiel [14]) aber auch einige Patentanmeldungen mit einer weitergehenden Verschränkung von mehreren Methoden. Dabei stehen sowohl apparative Verschmelzungen (zum Beispiel CA 2 531 801 A1, WO 2008 / 070 200 A1, US 7 400 977 B2) aber auch Verfahren für die nachträgliche gemeinsame Datenverarbeitung, -auswertung oder Modellierung im Fokus (zum Beispiel US 7 328 107 B2; hier sogar stark erweitert auf Gravimetrie, MT und Magnetik).

6. CSEM für Gashydrate?

Gashydrate (umgangssprachlich auch „Methaneis“) sind ein zwiespältig besetzter Rohstoff. Sie finden sich als Porenfüllung in den obersten Metern des Meeresgrundes in den dort abgelagerten Sedimenten bei ganz bestimmten Druck- (p) und Temperaturbedingungen (T) (vergleiche zum geologischen Hintergrund Figur 10). Sie stellen deshalb für das Niederbringen von Bohrungen ein stetes Sicherheitsproblem dar, da diese aktiv in das p-T-Regime eingreifen (zum Beispiel durch Auflast, Reibung).



Figur 10: Schematischer geologischer Schnitt durch die obere ozeanische Kruste mit möglichen Gashydratstrukturen und charakteristischen Trennlinien für deren Vorkommen (aus US 2007 / 0 265 782 A1).

Aus dem Blickwinkel der Energiegewinnung werden sie als schier unerschöpfliche zukünftige Ressource gehandelt, denn man geht davon aus, dass 50 % des organischen Kohlenstoffs auf der Erde in diesen überwiegend brennbaren Verbindungen gespeichert sind. Bei der abzusehenden Klimaerwärmung werden sich am Meeresgrund jedoch die p-T-Bedingungen ändern, und somit die in den festen Gashydraten gebundenen Treibhausgase (zum Beispiel CH_4, CO_2, H_2S) freigesetzt, was sehr wahrscheinlich einen selbstverstärkenden Effekt der Klimaänderung zur Folge haben dürfte. Ferner stabilisieren Gashydrate derzeit noch viele sonst rutschungsgefährdete Tiefseeareale, was im Falle von im Mittel steigenden Temperaturen an der Erdoberfläche auch zu einer Destabilisierung dieser Regionen und somit zu einer erhöhten Tsunami-Gefahr führen wird.

Es ist daher aus verschiedenen Gründen interessant, über die Ausbreitung und Mächtigkeit der Gashydrate am Meeresgrund Informationen zu gewinnen. Mit seismischen Wellen ist es oft sehr gut möglich, die Untergrenze eines Gashydrate enthaltenden Areals nachzuweisen ([15]–[17]). Diese Trennlinie (vergleiche Figur 10, 124) zeichnet sich in einem Seismogramm als Reflektor ab und stellt die Grenze dar, über der Gashydrate und unter der freies Gas die Porenräume eines Sediments ausfüllen. Allerdings versagt die Seismik bei Strukturaussagen aufgrund der eher diffusen Grenze der Gashydrate nach oben, das heißt zur Grenzfläche Wasser-Meeresgrund hin (zum Beispiel Figur 10, 100).

Gashydrate weisen einen hohen spezifischen elektrischen Widerstand auf, so dass sie auch durch CSEM nachgewiesen werden können. Erste Versuche hierzu wurden Ende der 1990er Jahre unternommen. Mittlerweile hat sich dieses Verfahren sehr gut bewährt, da es die Porenfüllung der Sedimente mit Gashydraten prozentual über die ρ_s-Verteilung sehr genau bestimmen kann. CSEM kann daher als eine der maßgeblichen geophysikalischen Explorationsmethoden auf diesem Gebiet angesehen werden ([15]-[17]). Dies paust sich jedoch nicht wesentlich auf die Patentaktivitäten der einschlägig tätigen Firmen durch (in Ansätzen: WO 2006 / 090 105 A1, WO 2006 / 073 315 A1, im Detail: US 2007 / 0 265 782 A1).

7. Ausblick

Die Zeiten sind günstig für die Exploration von Rohstoffen. Fossile Kohlenwasserstoffe sind aus dem Alltag der Industrie und vieler Mitmenschen nach wie vor nicht wegzudenken. Sie werden immer rarer und die Nachfrage steigt weiter mit der zunehmenden Industrialisierung und Mobilisierung unserer Welt.

Da ist es nur schlüssig, wenn bei ebenfalls steigenden Kosten für die Prospektion noch mehr Wert auf eine Steigerung der Datenqualität und die Absicherung der geophysikalischen Datenbasis gelegt wird, bevor man kostspielige Probebohrungen abteuft. Die CSEM Methode hat sich in den letzten Jahren auf See vielfach zu einer wertvollen Ergänzung der bisher üblichen und fast monopolartig betriebenen marinen Seismik entwickelt.

Obwohl der Kreis der in diesem Bereich tätigen Firmen und Konsortien überschaubar ist und aufgrund von weiteren Konzentrationen wohl auch bleibt, ist in nächster Zukunft mit einer Vielzahl weiterer Innovationen auf diesem Gebiet zu rechnen. Zum einen sprudeln derzeit die Geldquellen in der Branche reichlich und zum anderen hat die Jagd auf die letzten Reserven der Erde längst begonnen. Der Erfolg hierbei hängt entscheidend von einer ausgefeilten Ausrüstung und innovativen Ideen der Mess- und Auswertetechnik ab. Entwicklungsperspektiven zeichnen sich derzeit in einer größeren Bandbreite der bei einem Messvorgang verwendeten Frequenzen, einer größeren Datendichte – unter anderem durch die Verwendung größerer Empfängerfelder – und den integrierten Datenverarbeitungstechniken im Verbund mit anderen geophysikalischen Verfahren ab.

Nicht-Patent-Literatur

[1] JONES, E. J. W.: Marine Geophysics. Chichester: Wiley, 1999. S. 227–239. ISBN 0-471-98694-1

[2] CHAVE, A. D.; COX, C. S.: Electromagnetic induction by ocean currents and the conductivity of the oceanic lithosphere. In: J. Geomag. Geoelectr., 1983, vol. 35, S. 491–499

[3] CHAVE, A. D.: On the theory of electromagnetic induction in the earth by ocean currents. In: JGR, 1983, vol. 88, no. B4, S. 3 531–3 542

[4] CHAVE, A. D.: On the fields induced by oceanic internal waves. In: JGR, 1984, vol. 89, no. C6, S. 10 519–10 528

[5] CHAVE, A. D.; LUTHER, D. S.: Low-frequency, motionally induced electromagnetic fields in the ocean, 1. theory. In: JGR, 1990, vol. 95, no. C5, S. 7 185–7 200

[6] CONSTABLE, S.: Marine electromagnetic methods – a new tool for offshore exploration. In: The leading edge, April 2006, S. 438–444

[7] LAZAETA, P. F.; CHAVE, A. D.; EVANS, R. L.: Correction of shallow-water electromagnetic data for noise induced by instrument motion. In: Geophysics, 2005, vol. 70, no. 5, S. G 127–G 133

[8] CHEESMAN, S. J.; EDWARDS, R. N.; CHAVE, A. D.: On the theory of sea-floor mapping using transient electromagnetic systems. In: Geophysics, 1987, vol. 52, no. 2, S. 204–217

[9] WEIDELT, P.: Guided waves in marine CSEM. In: Geophys. J. Intl., 2007, vol. 171, S. 153–176

[10] BABA, K.; CHAVE, A. D.: Correction of seafloor magnetotelluric data for topographic effects during inversion. In: JGR, 2005, vol. 110, B12105, doi 10.1029/2004JB003463, 16 S.

[11] MEHTA, K. et al.: Controlled source electromagnetic (CSEM) technique for detection and delineation of hydrocarbon reservoirs: an evaluation. In: SEG/Houston 75th Ann. Meeting expand. Abstracts, 2005, S. 546–549

[12] DELL'AVERSANA, P.: Marine CSEM data interpretation: pitfalls and possible solutions. In: The leading edge, June 2007, S. 686–691

[13] SMIT, D.; WOOD, P. R.: Experience is crucial to expanding CSEM use. In: World Oil, 2006, September, S. 37–43

[14] HOVERSTEN, G. M. et al.: Integration of marine CSEM and seismic AVA data for reservoir parameter estimation. In: SEG/Houston 75th Ann. Meeting expand. Abstracts, 2005, S. 546–549

[15] WEITEMEYER, K, CONSTABLE, S.; KEY, K.: Marine EM techniques for gas-hydrate detection and hazard mitigation. In: The leading edge, 2006, S. 629–632

[16] YUAN, J.; EDWARDS, R. N.: The assessment of marine gas hydrates through electrical remote sounding: hydrate without a BSR? In: Geophys. Res. Lett., 2000, vol. 27, no. 16, S. 2 397–2 400

[17] WEITEMEYER, K. A. et al: First results from a marine controlled source electromagnetic survey to detect gas hydrates offshore Oregon. In: Geophys. Res. Lett., 2006, vol. 33, L03304, DOI: 10.1029/2005GL024896, 4 S.

Impressum

Herausgeber:
Deutsches Patent- und Markenamt
Zweibrückenstraße 12
D-80331 München
www.dpma.de

Redaktion:
Dr. Klaus Wollny

Gestaltung:
Klaus Obermaier, Katja Scholz, Konrad Dienst, Dr. Klaus Wollny

Bildquelle:
Patentzeichnung (Titelseite) aus DE 10 2006 024 327 A1

Druck:
Zentrale Vervielfältigung des Deutschen Patent- und Markenamts

Erfinderaktivitäten – Deutsches Patent- und Markenamt
© Deutsches Patent- und Markenamt, 2009