Deutsches
Patent- und Markenamt



Erfinderaktivitäten 2006/2007

Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser der „Erfinderaktivitäten 2006/2007“,

Die Autoren und die Redaktion dieses Bandes hoffen, dass die vielen unterschiedlichen Themen dieses Bandes ein breites Publikum ansprechen. Vielleicht regen Sie den einen oder anderen auch an, etwas tiefer in die faszinierende Welt der Erfindungen und Patente einzusteigen.

Die Artikel wurden von mit den jeweiligen Themen befassten Fachprüfern des Deutschen Patent- und Markenamtes geschrieben. Die Autoren ermöglichen Ihnen auf diese Weise etwa einen Einblick in die historische Entwicklung eines bekannten Alltagsgegenstandes oder greifen gesellschaftliche Strömungen und politische Entscheidungen auf und zeigen, wie diese sich in den Patenten widerspiegeln. Als Beispiel hierfür mag die Hybrid-Antriebstechnik bei Kraftfahrzeugen dienen, die aufgrund der politischen Vorgaben und der hohen Rohölpreise in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung erlebt hat.

Die in den Artikeln genannten Schriften umfassen den bis zum Redaktionsschluss am 17. August 2007 der Öffentlichkeit bekannten Stand der Technik.

Viel Spaß beim Lesen wünscht Ihnen

Dr. Klaus Wollny
(Redaktion)

Inhalt

Hybridantriebssysteme im Kfz-Bereich - ein Überblick	**Christian Aumüller**	5
Plastik-Solarzellen	**Mark Haslinger**	17
Thixogießen – ein Urform- oder ein Umformverfahren?	**Martina Hensel**	23
Metallschaum – ein alter Werkstoff neu entdeckt	**Martina Hensel & Stephanie Radeck**	29
Zusammendrückbare Spritzenkörper	**Claus Medicus**	36
RNA-Interferenz – Stummschalten von Genen	**Thomas Reitinger**	43
Druckerpatronen für Tintenstrahldrucker	**Ulrich Rödiger**	52
Tumortherapie mit Röntgenstrahlen	**Bernhard Steinbauer**	62
Entwicklungstendenzen bei hybriden Fahrzeugsystemen im Hinblick auf Kraftstoffeinsparung, Schadstoffminderung und Komfort	**Martin Tourneau**	68
Tsunami-Frühwarnsysteme	**Klaus Wollny**	76

Impressum

Herausgeber	Deutsches Patent- und Markenamt Zweibrückenstraße 12 D-80331 München www.dpma.de
Redaktion	Dr. Klaus Wollny Tel.: 089 / 2195 - 3319
Gestaltung	Klaus Obermaier, Dr. Klaus Wollny

Hybridantriebssysteme im Kfz-Bereich - ein Überblick

Dr. Christian Aumüller, Abt. 1.51

Durch die in letzter Zeit sehr intensiv geführte Debatte über den Schadstoffausstoß von Kraftfahrzeugen und die Einhaltung von CO_2-Grenzwerten sind Hybridfahrzeuge in den Mittelpunkt dieser Diskussion gerückt. In der Presse und Literatur findet man eine Vielzahl von Beiträgen über serielle oder parallele, Mild-, Micro- oder Full-Hybridfahrzeugvarianten. Ein Anlass, einen kurzen Überblick über den Aufbau, die Geschichte sowie die unterschiedlichen Betriebsmodi von Hybridantriebssystemen zu geben.

1. Einleitung

Die Vorsilbe „hybrid“ stammt aus dem Lateinischen und bedeutet „gemischt“, „von zweierlei Herkunft“, „aus Verschiedenem zusammengesetzt“ [1]. Internationale Gremien haben den Begriff „Hybridfahrzeug“ festgelegt als ein Fahrzeug, das mit mindestens zwei Energieumwandlern und zwei Energiespeichersystemen ausgerüstet ist, um das Fahrzeug anzutreiben. Ein Hybridfahrzeug ist nach dieser Definition ein Fahrzeug, in dem zwei unterschiedliche Antriebssysteme vorhanden sind. In der Regel ist dies bei Kraftfahrzeugen die Kombination aus einem Verbrennungsmotor, der mit Benzin, Dieselkraftstoff oder mit Gas betrieben wird, und einem Elektromotor mit einem Zwischenspeicher für elektrische Energie, beispielsweise einer Batterie oder Doppelschicht-Kondensatoren. Aber auch weitere Antriebssysteme mit Schwungrad, Brennstoffzelle, Hydraulikmotor, Nutzung der Abwärme eines Verbrennungsmotors usw. sind denkbar. [2, 3, 4].

Durch die Kombination aus einem Verbrennungsmotor und einem Elektromotor mit einem elektrischen Zwischenspeicher ergibt sich nun die Möglichkeit, mittels geeigneter Ansteuerung der Antriebsquellen durch ein Steuergerät einerseits die Vorteile dieser beiden Antriebssysteme zu nutzen und andererseits die Nachteile des einen Antriebssystems durch den Einsatz des jeweils anderen auszugleichen [2, 3].

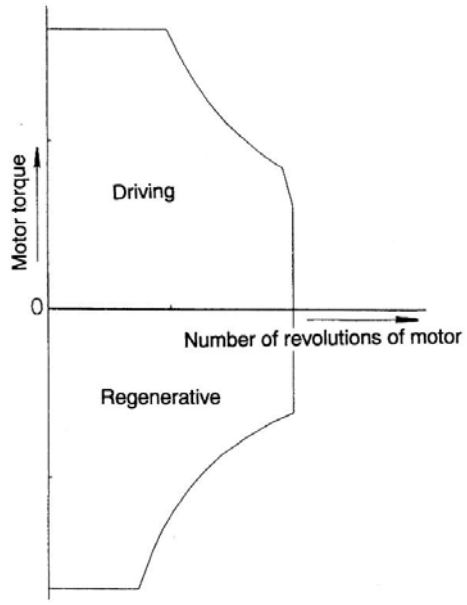
Der ideale Einsatzbereich des Elektromotors liegt im Bereich niedriger Geschwindigkeiten, wo er mit großem Wirkungsgrad, lautlos und emissionsfrei ein hohes Drehmoment ohne Getriebeübersetzung abgeben kann. Nachteile eines Antriebs mit Elektromotor sind die hohen Kosten und das Mehrgewicht sowie die vergleichsweise geringe Energiedichte des elektrischen Energiespeichers, die zu einer begrenzten Reichweite führt. Im antriebslosen Schubbetrieb eines Fahrzeugs mit elektrischem Antriebssystem jedoch kann die freiwerdende kinetische Energie genutzt werden, indem der Elektromotor als Generator angesteuert wird und somit der elektrische Energiespeicher regenerativ wieder aufgeladen werden kann. [2, 3].

Im Gegensatz dazu hat der Verbrennungsmotor im niedrigen Lastbereich einen schlechten Wirkungsgrad mit hohem Verbrauch. Insbesondere im Stadtverkehr kommt es daher zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch bei entsprechendem Emissions- und Schadstoffausstoß [2, 3]. Zudem benötigt ein Fahrzeug, das von einem Verbrennungsmotor angetrieben wird zum Anfahren, Beschleunigen und Rückwärtsfahren ein entsprechend abgestimmtes Schaltgetriebe.

In der DE 10 2005 049 992 A1 werden die typischen Arbeitsbereiche von Verbrennungsmotor und Elektromotor in einem Drehzahl-Drehmoment-Diagramm beschrieben. Sie unterscheiden sich nun dadurch, dass der Verbrennungsmotor erst ab seiner Leerlaufdrehzahl ein Drehmoment abgibt und sein maximales Drehmoment bei einer Drehzahl erreicht, die kleiner ist als die maximale Drehzahl des Verbrennungsmotors. Demgegenüber erzielt der Elektromotor bereits bei einer Drehzahl von Null sein maximales Drehmoment, das dann mit zunehmender Drehzahl abfällt.

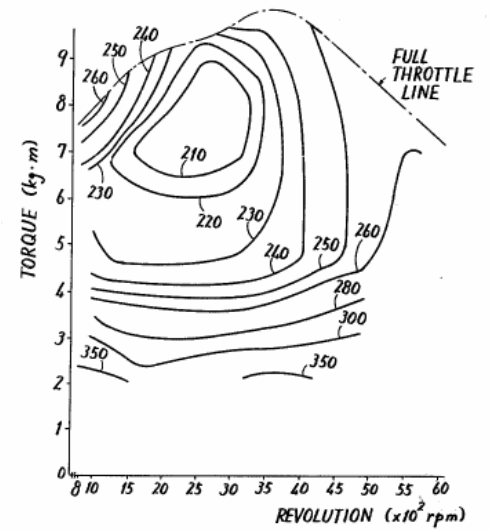
In den Figuren 1 und 2 sind nun die unterschiedlichen, charakteristischen Drehmomentverläufe eines Elektromotors und eines Verbrennungsmotors im

Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld dargestellt. Die Abszisse gibt die Drehzahl und die Ordinate das Drehmoment der jeweiligen Antriebsquelle an.



Figur 1: Drehmomentcharakteristik eines Elektromotors bzw. eines Generators; aus US 56 55 990 A.

Neben dem Antriebsdrehmoment eines Elektromotors ist in der Figur 1 noch zusätzlich der Drehmomentverlauf eines im Generatormodus betriebenen Elektromotors gezeigt [US 56 55 990 A].



Figur 2: Drehmomentcharakteristik eines Verbrennungsmotors mit Kennlinien gleichen Verbrauchs und der Kennlinie maximalen Drehmoments („full throttle line“); aus US 43 35 429.

Die Figur 2 zeigt ein typisches Drehmomentkennfeld eines Verbrennungsmotors aus der US 43 35 429. Der Verlauf des maximalen Drehmoments des Verbrennungsmotors in Abhängigkeit von der Drehzahl ist in diesem Diagramm mit „full throttle line“ bezeichnet. Die mit Ziffern beschrifteten Kurven stellen Linien gleichen spezifischen Kraftstoffverbrauchs dar.

Mit einer der wichtigsten und empfindlichsten Komponenten im elektrischen Antriebssystem eines Hybridantriebssystems ist der elektrische Energiespeicher [5]. Die Auswahl des elektrischen Energiespeichers hat im Hinblick auf die erzielbare Reichweite, die Fahrzeugleistung sowie das Fahrzeuggewicht erhebliche Auswirkungen auf das gesamte Hybridantriebssystem [6]. Die Anforderungen im Hybridbetrieb an den elektrischen Energiespeicher stehen dabei oftmals im Widerspruch zur Schonung des Energiespeichers. Um eine lange Lebensdauer zu erzielen, müssen daher Parameter wie beispielsweise der Ladezustand und die Temperatur des elektrischen Energiespeichers ständig überwacht werden. Zur Schonung des Energiespeichers sollten Tiefentladungen unterhalb eines bestimmten Niveaus grundsätzlich vermieden und der genutzte Ladezustandsbereich möglichst klein gehalten werden. [5]. Die verschiedenen Hybridfunktionen stellen nun unterschiedlichste Anforderungen an den elektrischen Energiespeicher wie die EP 1 424 494 A1 beschreibt, so dass teilweise zwei unterschiedliche Energiespeicher, beispielsweise elektrochemische Batterien und Doppelschichtkondensatoren im elektrischen Antriebssystem des Hybridantriebs eingesetzt werden.

2. Historie

Hybridfahrzeuge sind keine Entwicklung der Gegenwart. Bereits zu Beginn der 90er Jahre des 19. Jahrhunderts waren hybride Antriebstechniken im Eisenbahnsektor bekannt. In der Patentschrift CH 2563 von 1890 beispielsweise wird eine Lokomotive beschrieben, die einen Heizkessel und eine Dampfmaschine umfasst, wobei die Dampfmaschine einen Dynamo antreibt. Zum Antrieb der Elektromotoren, die auf den Achsen montiert sind, liefert der Dynamo den elektrischen Strom.

Die Entwicklung eines Hybridfahrzeugs mit Verbrennungsmotor und Elektromotor als Antriebssysteme trieb Ferdinand Porsche voran. Im Jahr 1900 stellte die Firma K.u.K. Motorenwagen- und Automobil-Fabrik Jacob Lohner & Co aus Wien ein von

Ferdinand Porsche entwickeltes Elektrofahrzeug auf der Pariser Weltausstellung vor. Das Fahrzeug wurde durch elektrisch betriebene Nabenmotoren an den Vorderrädern angetrieben [GB 1900/18 099], die die notwendige elektrische Energie aus einer 1800 kg schweren Batterie bezog. Die Weiterentwicklung dieses Fahrzeugs führte zum ersten Hybridfahrzeug mit Namen „Mixte“, bei dem die elektrische Energie für die Nabenmotoren von einem Dynamo erzeugt wurde, der von einem Verbrennungsmotor angetrieben wurde. [7, 8].

Wie die Vielzahl an Patenten zeigt, gab es zu Beginn des letzten Jahrhunderts rege Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Hybridantriebstechnik. Abgesehen von Start-Stopp-Systemen [DE 28 03 145 A1] sowie der Speicherung kinetischer Energie in einem Schwungrad [DE 29 33 542 B2] gab es jedoch erst wieder zum Ende des 20. Jahrhunderts erwähnenswerte Entwicklungen.

Das erste moderne, serienreife und kommerziell vermarktete Hybridfahrzeug in Europa war 1997 der „Audi duo“ der dritten Generation. Die Entwicklungsgeschichte des „Audi duo“ begann bereits 1989 auf der Basis eines „Audi 100 Avant quattro“. In diesem Versuchsstadium wurde die Vorderachse von einem 5-Zylinder-Benzinmotor angetrieben und die Hinterachse durch einen Elektromotor mit 9,3 kW Leistung [DE 39 40 172 A1]. Der „Audi duo“ der dritten Generation hingegen war ein Parallel-Hybridfahrzeug mit Frontantrieb, basierend auf einem „Audi A4 Avant“. Als Antriebssysteme dienten ein Vierzylinder-Turbodieselmotor mit einer Leistung von 66 kW sowie ein 21 kW starker, auf die Getriebeeingangswelle wirkender Elektromotor mit einem maximalen Antriebsdrehmoment von 20 Nm. Je nach den Anforderungen des Fahrbetriebs erfolgte automatisch der Antriebswechsel der Antriebsarten nur Dieselmotor, nur Elektrobetrieb und gemeinsamer Hybridantrieb [DE 44 36 383 A1]. Die Reichweite bei reinem Elektromotorantrieb betrug 50 km. Ein Vergleich des Verbrauchs und der CO_2-Emission nach dem Europafahrzyklus (93/116/EWG) erbrachte einen Verbrauch von 4,3 l/100 km und einem CO_2-Ausstoß von 96 g/km für den „Audi duo“ gegenüber 5,4 l/100 km und 144 g/km für einen konventionellen „Audi A4 Avant TDI“. Als elektrischer Zwischenspeicher wurde eine Blei-Vlies-Batterie verwendet, bei der der Elektrolyt in einer Vliesmatte gebunden ist, wodurch keine Säure auslaufen kann. Zudem konnte der „Audi duo“ direkt an einer Steckdose aufgeladen werden. [6].

Der „Honda Insight“, ein zweisitziges Coupé, wird seit 1999 in den USA angeboten. Weitere Hybridfahrzeuge aus dem Hause „Honda“ sind der aktuelle „Civic Hybrid“ und sein Vorgänger der „Civic IMA“ (Integrated Motor Assist). Bei allen drei Fahrzeugen ist ein rein elektromotorischer Betrieb nicht vorgesehen. Ein Starter-Generator mit geringer Leistung ist jeweils direkt mit einem Verbrennungsmotor kleinen Hubraums gekoppelt. Der Starter-Generator liefert zusätzlichen Schub beim Beschleunigungsvorgang und dient der Wiedergewinnung kinetischer Energie beim Abbremsen im Schubbetrieb [EP 0 913 287 A2]. Der CO_2-Ausstoß des „Civic Hybrid“ liegt im Schnitt bei 109 g/km. Auf der Auto-Umweltliste 2006/2007 des Verkehrsclubs Deutschland (VCD) belegte der „Honda Civic Hybrid“ den ersten Platz als umweltfreundlichstes Automobil in der Kompaktklasse. [2, 7, 9].

Das derzeit erfolgreichste und sicherlich bekannteste Hybridfahrzeug ist der „Toyota Prius“, der in Japan seit 1997 und seit 2000 in den USA sowie in Europa angeboten wird. Laut „Toyota“ sind bereits weltweit über 400 000 Exemplare verkauft worden. Neben einem reinen Antrieb mit dem Verbrennungsmotor ist auch ein rein elektromotorischer Betrieb sowie die Kombination aus beiden Antriebssystemen möglich. Der „Prius“ verfügt über einen 1,5 l Vierzylinder-Ottomotor, der stets im effizientesten Bereich arbeitet. Seine maximale Leistung liegt bei 57 kW und sein maximales Drehmoment bei 115 Nm bei 4000 Umdrehungen pro Minute. Der 50 kW starke Elektromotor liefert, in einem Bereich von 0 bis 1200 Umdrehungen pro Minute, ein maximales Drehmoment von 400 Nm. In der Kombination dieser beiden Antriebssysteme ergibt sich in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 20 km/h ein maximales Drehmoment von 478 Nm. Die elektrische Energie zum Antrieb bezieht der Elektromotor u. a. von einem zusätzlichen Generator, der über ein Planetengetriebe mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt ist [DE 197 17 844 A1]. Dieses von Toyota „Hybrid-Synergy-Drive®“ genannte Antriebskonzept wurde, neben weiteren Auszeichnungen, von Fachjournalisten aus aller

Welt zum „Internationalen Motor 2004“ gewählt. Der Durchschnittsverbrauch des „Prius“ im kombinierten Betrieb liegt nach dem Messverfahren RL 80/1268/EWG bei 4,3 l/100 km und die CO_2-Emission bei 104 g/km. [10, 11, 12].

Über die oben rein beispielhaft genannten Hybridfahrzeuge hinaus gibt es eine Vielzahl an Modellen, Konzeptstudien und Prototypen nahezu aller Automobilhersteller. Es würde jedoch den Rahmen dieses Artikels sprengen, auf jedes Modell im Einzelnen einzugehen. Eine Auflistung von Hybridfahrzeugen, von Entwürfen bis hin zu aktuellen Planungen, sortiert nach den Herstellern findet man im Internet unter [13].

3. Hybridantriebsvarianten

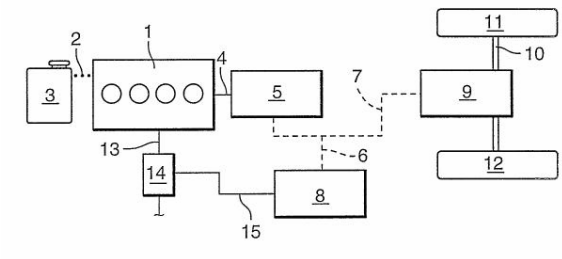
Hybridantriebssysteme werden entweder über die konstruktive Anordnung des elektrischen Antriebssystems im Antriebsstrang oder über dessen Leistungsvermögen klassifiziert.

3.1. Einteilung nach Anordnung des elektrischen Antriebssystems

3.1.1. Serieller Hybridantrieb

Beim seriellen Hybridantrieb sind die Antriebskomponenten Verbrennungsmotor, Generator und Elektromotor in Reihe angeordnet, wobei der Verbrennungsmotor keine Verbindung zu den Antriebsrädern aufweist und das Fahrzeug rein durch einen oder mehrere Elektromotoren angetrieben wird. In einer Verbrennungsmotor-Generator-Einheit wird die gesamte vom Verbrennungsmotor erzeugte mechanische Energie in elektrischen Strom umgewandelt, der nach entsprechender Wandlung entweder in einem elektrischen Energiespeicher zwischengespeichert oder direkt für den elektrischen Antrieb genutzt wird. Die fehlende mechanische Kopplung des Verbrennungsmotors mit den Antriebsrädern erlaubt den stationären Betrieb des Verbrennungsmotors im bestmöglichen Wirkungsgradbereich. Der antreibende Elektromotor muss ausreichend groß ausgelegt sein, da er die gesamte Vortriebsleistung erbringen muss. [2, 8]. Ein Vertreter der seriellen Hybridantriebssysteme war der unter 2. erwähnte „Mixte“. Aber auch schwere Nutzfahrzeuge wie beispielsweise der Großmuldenkipper „T282 B“ von „Liebherr“ setzen auf das Prinzip eines seriellen Hybridantriebs, hier realisiert auf der Basis eines diesel-elektrischen Antriebs [14, DE 202 06 821 U1].

In der Figur 3 ist nun der Konstruktionsaufbau eines seriellen Hybridantriebs aus DE 196 33 194 C2 abgebildet. Die Bezugsziffer 1 zeigt hierbei den Verbrennungsmotor mit Abgaskatalysator 14, 2 die Kraftstoffleitung, 3 den Benzintank, 4 die Kurbelwelle, 5 den Generator, 6 und 7 elektrische Verbindungsleitungen, 8 den Energiespeicher und 9 den Antriebselektromotor.



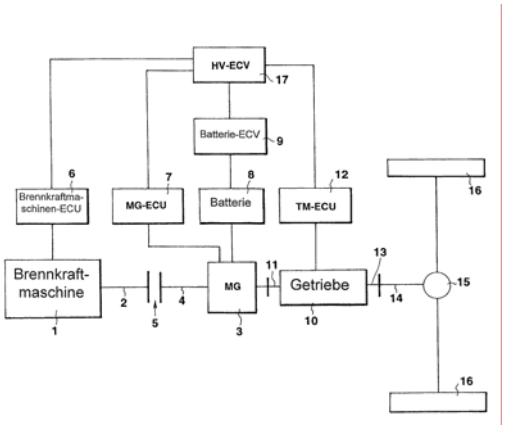
Figur 3: Konstruktionsaufbau eines seriellen Hybridantriebs; aus DE 196 33 194 C2.

3.1.2. Paralleler Hybridantrieb

Der parallele Hybridantrieb zeichnet sich dadurch aus, dass die beiden Antriebssysteme derart angeordnet sind, dass das Fahrzeug entweder rein elektrisch, ausschließlich mit dem Verbrennungsmotor oder in einer Kombination aus Elektromotor und Verbrennungsmotor angetrieben werden kann. Die beiden Antriebssysteme können hierzu über ein Getriebe miteinander verbunden sein. Der Elektromotor kann beim parallelen Hybridantriebskonzept am Verbrennungsmotorausgang, am Getriebeeingang bzw. –ausgang oder getrennt an einer zweiten Achse angeordnet sein. [2, 8]. Auch der „Audi duo“ sowie die Hybridfahrzeuge von „Honda“ zählen zu der Klasse der parallelen Hybridfahrzeuge.

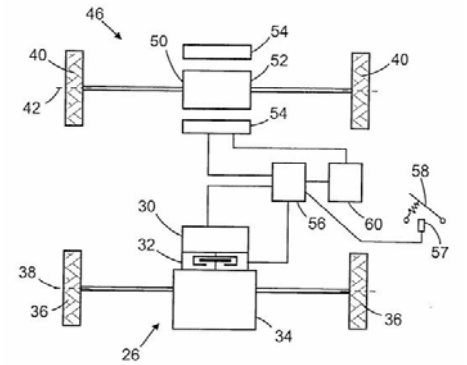
Treiben Elektromotor und Verbrennungsmotor die gleiche Antriebswelle an, so ist der Elektromotor dabei oftmals durch eine Kupplung vom Verbrennungsmotor getrennt, so dass sich ein rein elektromotorischer Antrieb sowie beim generatorischen Betrieb eine optimierte Rekuperation der kinetischen Energie ohne Verlust durch das Schleppmoment des Verbrennungsmotors ergibt. Aber auch ein Aufladen direkt über den Verbrennungsmotor ist

möglich. Ein Beispiel für einen parallelen Hybridantrieb aus DE 199 01 470 A1 ist in der Figur 4 abgebildet, wobei mit MG bzw. 3 die als Elektromotor und Generator betreibbare elektrische Maschine und mit 5 die Kupplung bezeichnet ist.



Figur 4: Konstruktionsaufbau eines parallelen Hybridantriebs; aus DE 199 01 470 A1.

Durch eine Anordnung wie beispielsweise aus der DE 199 19 452 B4, in der der Elektromotor eine zweite Welle bzw. eine zweite Achse antreibt, lässt sich ein Allrad-Antrieb realisieren, wie er in der Figur 5 abgebildet ist. Der Elektromotor ist hierbei mit 50, der Verbrennungsmotor mit 30, das Getriebe mit 34, die Steuereinrichtung mit 56 und die Räder mit 36 und 40 bezeichnet.

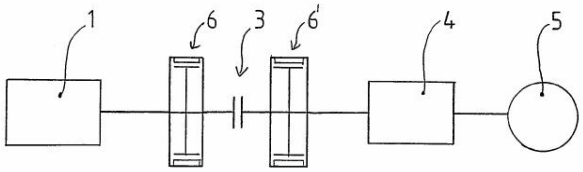


Figur 5: Paralleler Hybridantrieb mit Allradfunktionalität; aus DE 199 19 452 B4.

3.1.3. Mischformen

Um die jeweiligen Vorteile des seriellen und parallelen Konstruktionsprinzips auszunutzen, gibt es zudem noch Mischformen dieser beiden Konfigurationen.

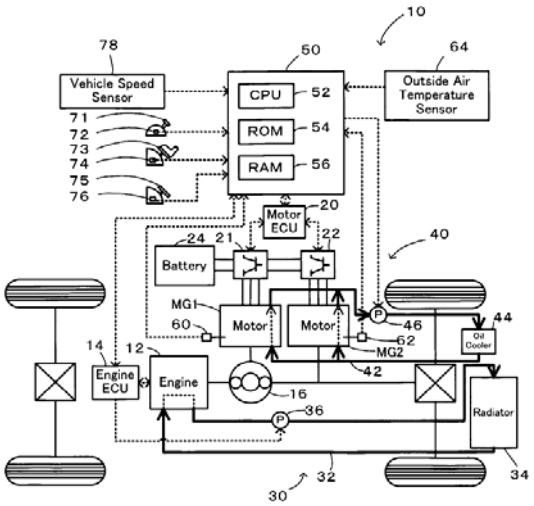
Ein kombinierter Hybridantrieb, bei dem abhängig von der Betriebssituation von einem parallelen zu einem seriellen Antrieb umgeschaltet werden kann, wird erreicht, indem ein zweiter Elektromotor sowie eine Trennkupplung eingebaut werden [2]. In der Figur 6 ist aus der DE 198 14 402 A1 ein kombinierter Hybridantriebsstrang abgebildet, wobei mit 1 der Verbrennungsmotor, mit 6 bzw. mit 6´ die beiden Elektromotoren, mit 4 das Getriebe, mit 5 die Antriebsräder und mit 3 die Kupplung bezeichnet sind.



Figur 6: Konstruktionsaufbau eines kombinierten Hybridantriebs; aus DE 198 14 402 A1.

Eine weitere Mischform aus seriellem und parallelem Hybridantrieb stellt der leistungsverzweigte Hybridantrieb dar. Ein Teil der Leistung des Verbrennungsmotors kann dabei direkt zum Vortrieb des Fahrzeugs genutzt werden, der andere dient zur Erzeugung elektrischer Energie durch einen Generator. Eine zweite elektrische Maschine kann die elektrische Energie wiederum zum Antrieb des Fahrzeugs nutzen. Die Aufteilung der Leistungsanteile kann über die Leistungsaufnahme des Generators geregelt werden. Der Wirkungsgrad eines leistungsverzweigten Hybridantriebs ist gegenüber dem eines seriellen Hybridantriebs höher, da hier nur ein Teil der Antriebsleistung über das elektrische System läuft [2, 8]. Ein Repräsentant dieses Hybridantriebssystems ist der „Toyota Prius“.

Ein leistungsverzweigter Hybridantrieb aus der WO 2006 / 095 929 A1 ist in der Figur 7 dargestellt. Hierbei ist der Generator MG1 über ein Planetengetriebe 16 mit dem Verbrennungsmotor 12 und der Elektromotor MG2 direkt mit der Antriebswelle verbunden.



Figur 7: Konstruktionsaufbau eines leistungsverzweigten Hybridfahrzeugs mit Steuerungskomponenten sowie einem Kühlkreislauf; aus WO 2006 / 095 929 A1.

3.2. Einteilung nach Leistungsvermögen des elektrischen Antriebssystems

3.2.1. Micro- und Mild-Hybridantrieb

Die einfachste Form eines Hybridantriebsstrangs bilden die sogenannten Micro- und Mild-Hybridantriebssystemvarianten. Lichtmaschine und Anlasser eines klassischen Antriebsstrangs mit Verbrennungsmotor werden hierbei durch einen Starter-Generator ersetzt. Ist der Starter-Generator mit einem Riemen mit dem Verbrennungsmotor verbunden, so spricht man von einem Micro-Hybridantrieb, ist er jedoch starr mit der Kurbelwelle verbunden, von einem Mild-Hybridantrieb. Beim Micro-Hybridantrieb, bei dem die Leistung des Starter-Generators bei maximal zwei bis drei kW liegt, lassen sich Start-Stopp-Funktionalität und ein Generatorbetrieb umsetzen. Das Einsparpotenzial im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch und der Reduzierung der Schadstoffemissionen liegt zwischen 5 und 10 %. Die Leistung des Elektromotors beim Mild-Hybridantrieb liegt bei maximal 10 bis 15 kW. Somit kann zusätzlich zu den Hybridfunktionen des Micro-Hybridantriebs beim Mild-Hybridantrieb noch die Unterstützungsfunktion durch die elektrische Maschine (Boostbetrieb), die Nutzbremsung (Rekuperation) sowie die Schwingungsdämpfung bei Lastwechseln realisiert werden. Die Verbrauchseinsparung liegt im Bereich von 15 – 20%. Vorteilhaft bei den Micro- und Mild-Hybridantriebsvarianten ist, dass keine größeren konstruktiven Änderungen an Verbrennungsmotor und Antriebsstranganordnung durchgeführt werden müssen. Ein Vertreter dieser Klasse ist der neue „Einser“ von „BMW“, der mit einer Start-Stopp-Automatik ausgerüstet ist. [13, 15, 16].

3.2.2. Full-Hybridantrieb

Der Full-Hybridantrieb zeichnet sich gegenüber den Micro- und Mild-Varianten durch einen erheblich leistungsstärkeren Elektromotor und leistungsstärkeren elektrischen Speicher aus [15]. Die Leistung des Elektromotors liegt beim Full-Hybridantrieb bei Werten weit über 15 kW und die Spannungsversorgung der elektrischen Antriebskomponenten bei Werten weit über 100 V.

Neben den Funktionen Start-Stopp und Generatorbetrieb, sind auf Grund der höheren Leistungsfähigkeit des Elektromotors ein starker, über mehrere Minuten andauernder Boostbetrieb, ein rein elektrischer Antrieb über weite Strecken sowie eine wirkungsvollere Dämpfung der Lastwechselschwingungen und auf Grund des leistungsfähigeren Speichers eine optimale Wiedergewinnung der Bremsenergie möglich. Der wesentliche Unterschied liegt jedoch in der Realisierung eines emissionsfreien, ausschließlichen Antriebs durch den Elektromotor über weite Strecken. Das Einsparpotenzial im Hinblick auf den Verbrauch liegt bei mehr als 20%. Der Eingriff in die Antriebsstranganordnung mit zusätzlichem Getriebe, Kupplung sowie einem leistungsfähigeren elektrischen Antriebssystem und der Anpassung des Verbrennungsmotors ist erheblich größer als bei den Micro- und Mild-Varianten. Der „Toyota Prius“ zählt zu dieser Klasse. [13, 15].

4. Betriebsfunktionen

Durch eine intelligente und koordinierte Ansteuerung der einzelnen Komponenten der beiden unterschiedlichen Antriebssysteme lassen sich eine Vielzahl von Betriebsstrategien und Betriebsmodi erzeugen. Neben der Einsparung von Kraftstoff sowie der Verringerung der Schadstoffemissionen sind die Leistungserhöhung und der Fahrkomfort weitere Motive von Hybridantriebsfunktionen. Es lassen sich jedoch bedingt durch die Anordnung oder auch die Leistung des elektrischen Antriebssystems nicht sämtliche Betriebsmodi in jedem Hybridantriebskonzept verwirklichen.

4.1. Reduktion von Kraftstoff und Schadstoffemissionen

4.1.1. Regeneratives Bremsen

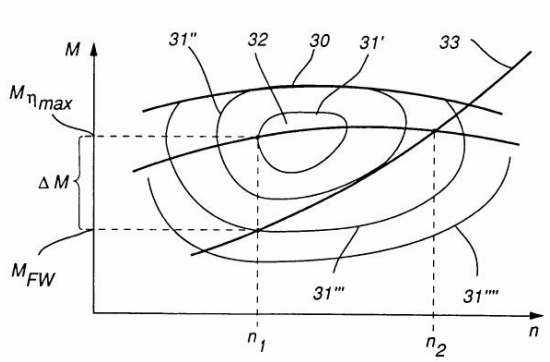
Ein wichtiger Anteil des Kraftstoffeinsparpotenzials bei Hybridantriebssystemen liegt in der Nutzung der Bremsenergie in der antriebslosen Schubphase des Fahrzeugs. Bei einem konventionellen Fahrzeug wird die kinetische Energie beim Abbremsen durch das Bremssystem in Wärme umgewandelt. Bei einem Fahrzeug mit Hybridantrieb in Form eines Verbrennungsmotors und einer elektrischen Maschine hingegen wandelt die elektrische Maschine, die in diesem Fall als Generator angesteuert wird, die Bewegungsenergie in elektrische Energie, die dann in einem elektrischen Zwischenspeicher gespeichert wird. Diese gespeicherte Energie steht dann beim nächsten Anfahr- bzw. Beschleunigungsvorgang als Antriebsenergie wieder zur Verfügung. Ist die elektrische Maschine bzw. der Generator durch eine Kupplung vom Verbrennungsmotor abtrennbar oder erfolgt eine Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr zum Verbrennungsmotor, verbunden mit weiteren technischen Maßnahmen, so kann die Effizienz des sogenannten regenerativen Bremsens erhöht werden, da der Verbrennungsmotor nicht mehr mitgeschleppt werden muss. [3, 7, 13].

4.1.2. Start-Stopp-Funktion

Ein weiteres Verbrauchseinsparpotenzial ist durch die Start-Stopp-Funktionalität eines Hybridantriebsstrangs gegeben. Erkennt die Fahrzeugsteuerung, dass das Hybridfahrzeug zum Stehen kommt, beispielsweise an einer geschlossenen Bahnschranke oder im Stau, wird die Kraftstoffzufuhr zum Verbrennungsmotor unterbrochen und somit ein verbrauchshoher Leerlaufbetrieb vermieden. Das Anlassen des Verbrennungsmotors erfolgt wiederum automatisiert in Abhängigkeit von vorgegebenen Startbedingungen durch das elektrische Antriebssystem. [3, 7, 13].

4.1.3. Lastpunktanhebung

Insbesondere im Teillastbereich läuft der Verbrennungsmotor nicht im Bereich seines besten Wirkungsgrades bzw. seines niedrigsten Kraftstoffverbrauchs. Beim Hybridantriebssystem besteht nun die Möglichkeit, den Elektromotor als Generator anzusteuern und mit dieser zusätzlichen Last den Verbrennungsmotor im Hinblick auf den Wirkungsgrad in seinen optimierten Betriebszustand anzuheben. Die Figur 8 aus DE 42 17 668 C2 zeigt den Zusammenhang zwischen Drehmoment M und Drehzahl n eines Verbrennungsmotors. Das maximale Drehmoment des Verbrennungsmotors ist durch die Kurve 30, das aufzubringende Moment zur Überwindung des Fahrwiderstands M_{FW} bei einer bestimmten Gangstufe mit 33 und der Drehmomentverlauf bei jeweils maximalem Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors durch die Kurve 32 dargestellt. Die Kurven konstanten spezifischen Kraftstoffverbrauchs bzw. konstanten Wirkungsgrads sind mit 31´, 31´´, 31´´´ und 31´´´´ bezeichnet. Der Generator wird nun zur Erzeugung von elektrischer Energie bzw. zum Aufladen des elektrischen Speichers derart angesteuert, dass der Verbrennungsmotor ein zusätzliches Differenzmoment ΔM zwischen dem Moment zur Überwindung des momentanen Fahrwiderstands und dem Idealbetrieb entlang der Kurve 32 aufbringen muss.



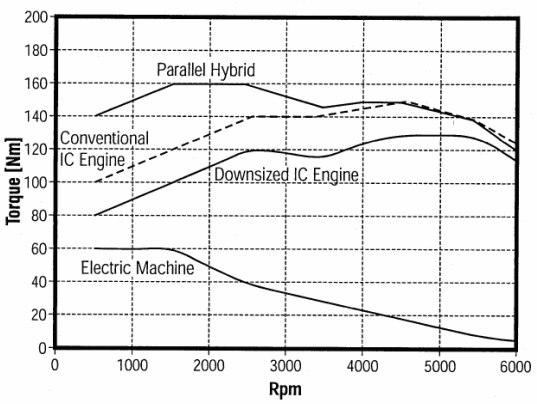
Figur 8: Lastpunktanhebung eines Verbrennungsmotors in den Bereich optimalen Wirkungsgrades durch die zusätzliche generatorische Last ΔM; aus DE 42 17 668 C1.

Neben der Lastanhebung zur Kraftstoffeinsparung kann wie in der EP 1 182 074 A2 beschrieben durch ein zusätzlich aufzubringendes Lastdrehmoment auch die Kaltstartphase eines Verbrennungsmotors bzw. die damit zusammenhängende Zeit zur Aufheizung eines Abgaskatalysators bis zu seiner optimalen Arbeitstemperatur verkürzt und somit der Schadstoffausstoß verringert werden.

4.1.4. Downsizing

Eine weitere Einsparmöglichkeit besteht nun darin, einen

Verbrennungsmotor mit verkleinertem Drehmoment- bzw. Leistungspotenzial in einem Hybridfahrzeug einzusetzen. Die geringere Drehmoment- bzw. Leistungsfähigkeit bewirkt, dass der Verbrennungsmotor häufiger in einem Betriebsbereich mit optimalem Kraftstoffverbrauch läuft. Das verkleinerte Drehmoment des Verbrennungsmotors wird durch den Einsatz eines entsprechend abgestimmten Elektromotors kompensiert. Die Figur 9 zeigt die Strategie des Downsizing gemäß der EP 1 316 460 A1. Die elektrische Maschine (Electric Machine) überkompensiert hierbei das kleinere Drehmoment (Downsized IC Engine) des Verbrennungsmotors im Gegensatz zu einem konventionellen Verbrennungsmotor (Conventional IC Engine) mit dem Ergebnis eines höheren Summenantriebsdrehmoments (Parallel Hybrid) insbesondere bei niedrigen Drehzahlen.



Figur 9: Drehmomentcharakteristik eines Hybridantriebssystems mit verkleinertem Verbrennungsmotor, zusätzlichem Elektromotordrehmoment und Gesamtantriebsdrehmoment (Parallel Hybrid) aus der Summe der Antriebsmomente des verkleinerten Verbrennungsmotors und des Elektromotors; aus EP 1 316 460 A1.

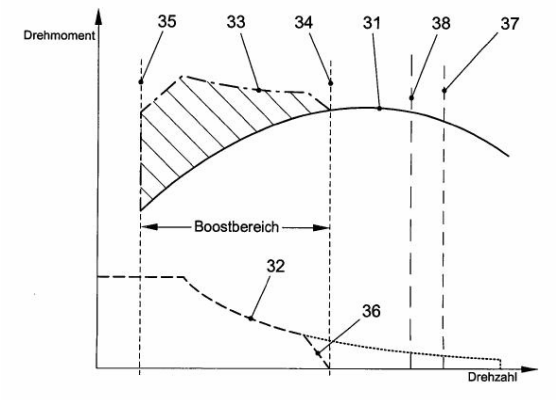
4.1.5. Emissionsfreier Betrieb

Mit Hilfe eines reinen elektromotorischen Antriebs kann ein Hybridfahrzeug emissionsfrei und nahezu lautlos angetrieben werden. Die Antriebsenergie wird dabei vom elektrischen Zwischenspeicher geliefert, der dazu einen entsprechenden Ladezustand aufweisen muss. Der elektromotorische Antrieb kommt in der Anfahrphase, beim Rangieren, im Stop-and-Go-Verkehr, in der Innenstadt oder in Smog-gefährdeten Zonen zum Einsatz. [3, 7, 13]. Auf Grund der lautlosen Fahrt im Elektromotorantriebsmodus wird sogar über künstliche Warnsignale nachgedacht [17].

4.2. Drehmomentsteigerung

Dem Hybridantriebssystem bietet sich nun, gegenüber einem konventionellen, rein verbrennungsmotorischen Antrieb, die Möglichkeit einer erheblichen Leistungssteigerung, indem der Elektromotor ein zusätzliches Antriebsmoment abgibt und dadurch das Antriebsdrehmoment des Verbrennungsmotors unterstützt. Das Unterstützungsdrehmoment des Elektromotors ist zeitlich begrenzt und abhängig vom Ladezustand sowie der Leistungsfähigkeit des elektrischen Energiespeichers. [3, 7, 13].

Ein derartiger sogenannter Boostbetrieb, bei dem die Antriebsmomente von Verbrennungsmotor und Elektromotor das Fahrzeug gemeinsam antreiben, wird in der DE 10 2004 062 938 A1 beschrieben und ist in der Figur 10 dargestellt. Die Drehmomentcharakteristik des Elektromotors ist mit 32, die des Verbrennungsmotors mit 31 und das Summendrehmoment mit 33 bezeichnet.



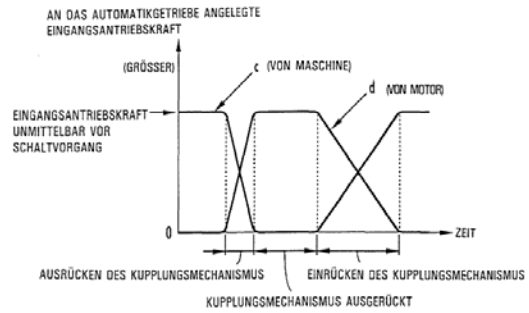
Figur 10: Boostfunktion bei Überlagerung der Antriebsleistung von Elektromotor und Verbrennungsmotor; aus DE 10 2004 062 938 A1.

Insbesondere die Drehmomentunterstützung beim Anfahren führt zu einer temperamentvollen Beschleunigungsphase. Ein Hybrid-Prototyp, bei dessen Entwicklung der Wunsch nach Fahrdynamik im Vordergrund stand, wird in [18] vorgestellt. Ein entsprechend groß dimensionierter Elektromotor mit maximalem Drehmoment von 660 Nm und einer Leistung von 70 kW verhilft diesem Prototypen zu einem von Elektromotor und Verbrennungsmotor gemeinsam aufgebrachten Anfahrdrehmoment von insgesamt 1000 Nm.

4.3. Komfortfunktionalität

Neben der Reduktion von Schadstoffen, der Einsparung von Kraftstoff sowie der Boostfunktionalität bietet ein Hybridantriebssystem zusätzlich noch die Möglichkeit, Komfortfunktionen auszuführen. Spürbare Lastwechsel während der Fahrt können gedämpft werden, indem das elektrische Antriebssystem entsprechend angesteuert wird. Hervorzuheben sind dabei die Kompensation der Zugkraftunterbrechung, die aktive Schwingungsdämpfung im Antriebsstrang sowie die Synchronisation eines Schaltgetriebes.

Während eines Gangwechselvorgangs wird üblicherweise eine Trennkupplung zwischen dem Verbrennungsmotor und dem Getriebe geöffnet, wodurch für die Insassen des Fahrzeugs spürbar die Antriebszugkraft unterbrochen wird. Gemäß der DE 100 08 344 A1 kann durch die exakte Ansteuerung des Elektromotors in einem Hybridantriebssystem nun diese Schaltübertragungslücke durch ein zusätzliches Antriebsmoment des Elektromotors während des Gangwechsels kompensiert werden.



Figur 11: Kompensation der Zugkraftunterbrechung mit Hilfe eines Elektromotors; aus DE 100 08 344 A1.

Wie aus der Figur 11 zu entnehmen ist, gleicht der Elektromotor (Motor) die beim Aus- und Einkuppelvorgang abnehmende bzw. zunehmende „Eingangsantriebskraft“ des Verbrennungsmotors (Maschine) aus, so dass sich in der Addition ein konstanter Vortrieb ergibt.

Eine weitere Komfortfunktion wird in der DE 102 23 426 A1 beschrieben. In einem Antriebsstrang, der von einem Verbrennungsmotor angetrieben wird, treten abhängig von der Drehzahl des Verbrennungsmotors und von der Anzahl der Zylinder Drehmomentschwankungen auf. Diese Drehmomentschwankungen können verringert werden, indem der Elektromotor in einem Hybridantriebsstrang nun derart angesteuert wird, dass er ein mit den Drehmomentschwankungen des Verbrennungsmotors phasengleiches, aber entgegengesetztes Gegendrehmoment abgibt, das in der Amplitude den Drehmomentschwankungen entspricht.

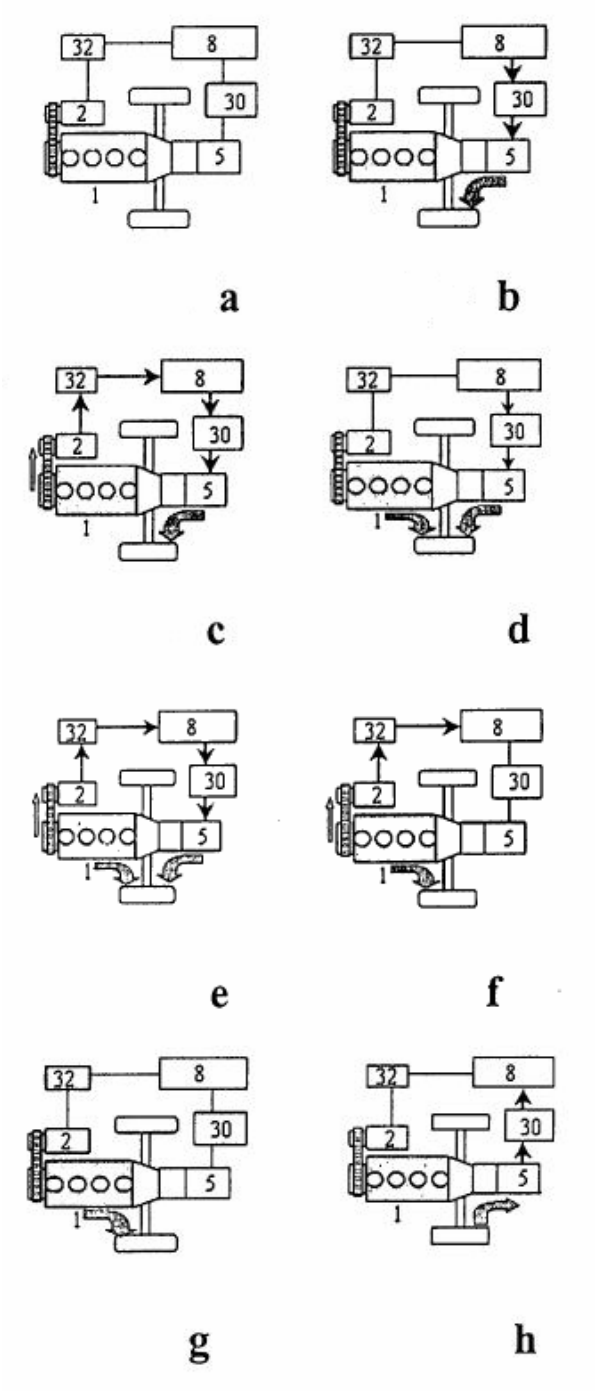
Der Elektromotor in einem Hybridantriebsstrang kann bei einer entsprechenden konstruktiven Anordnung, in der der Elektromotor beispielsweise mit der Getriebeeingangswelle eines Schaltgetriebes verbunden ist, zur Synchronisationshilfe herangezogen werden, wie es die DE 42 02 083 A1 zeigt. Erkennt das Steuerungssystem des Hybridantriebsstrangs einen Gangwechsel, so kann der Elektromotor die Welle, mit der er verbunden ist, auf die nach dem Gangwechsel errechnete Solldrehzahl beschleunigen oder abbremsen.

4.4. Management und Steuerung der Betriebsstrategie

Wie die unterschiedlichen Betriebsmodi zeigen, weist der Hybridantriebsstrang eine wesentlich höhere Komplexität auf als der konventionelle Antriebsstrang, so dass der Regelung und Steuerung eines Hybridantriebs eine bedeutende Rolle zukommt. Die Aufgabe der Steuerung ist, den Fahrerwunsch aufzunehmen und zu interpretieren sowie die geeigneten Antriebsstrangkomponenten anzusprechen. In Abhängigkeit der Zielkriterien einer Betriebsstrategie, wie beispielsweise minimaler Kraftstoffverbrauch oder optimaler Wirkungsgrad, legt die Hybridantriebsstrangsteuerung dabei den Betrieb aller Hybridantriebsstrangkomponenten sowie die Momentenverteilung auf die beiden Antriebssysteme fest. Neben dem aktuellen Zustand der Antriebsstrangkomponenten, der durch Sensoren erfasst wird, können für die Ermittlung der Betriebsstrategie auch fahrzeugexterne Informationen, wie Fahrtroute mit Steigungen und Gefälle, Autobahnfahrt oder Stadtverkehr mit vielen Ampeln, Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Stauinformationen oder auch meteorologische Daten mit herangezogen werden. [5, 8, DE 198 31 487 C1, DE 102 26 143 B4].

Insbesondere der Ladungszustand des elektrischen Energiespeichers ist ein bestimmender Parameter, der die Ansteuerung der Komponenten eines

Hybridantriebsstrangs massiv beeinflusst. In der Figur 12 sind nun einige Funktionen eines Hybridantriebsstrangs gemäß der DE 103 93 594 T5 dargestellt. Der Verbrennungsmotor ist dabei mit dem Bezugszeichen 1 bezeichnet, der elektrische Energiespeicher mit 8, die beiden elektrischen Maschinen des elektrischen Antriebssystems mit 2 und 5 sowie mit 30 und 32 die Steuerungen für die beiden Elektromotoren 2 und 5. Die Figur 12a zeigt den Anhaltemodus ohne Ansteuerung der einzelnen Hybridkomponenten. Das Anfahren des Hybridfahrzeugs gemäß der DE 103 93 594 T5 erfolgt nach dem Beispiel der Figur 12b ausschließlich mit dem Elektromotor 5, der seine Energie aus dem elektrischen Energiespeicher 8 bezieht. Fällt nun der Wert des Ladezustands des elektrischen Energiespeichers unter eine vorgegebene Schwelle, wird der Verbrennungsmotor 1 gestartet und treibt den zweiten Elektromotor 2, der nun als Generator betrieben wird, zur Stromerzeugung an (Figur 12c). Falls der Ladezustand des elektrischen Energiespeichers 8 größer als ein vorbestimmter Wert ist, tragen im Boost-Modus Verbrennungsmotor 1 und Elektromotor 5 das Hybridfahrzeug gemeinsam an (Figur 12d). In der Darstellung der Figur 12e wird das Hybridfahrzeug durch den Verbrennungsmotor 1 und den Elektromotor 5, der seine Antriebsenergie aus dem elektrischen Energiespeicher 8 bezieht, zusammen angetrieben. Gleichzeitig wird noch über den Verbrennungsmotor und den als Generator betriebenen Elektromotor 2 der elektrische Energiespeicher 8 geladen. Arbeitet der Verbrennungsmotor 1 in einem Bereich mit hohem Wirkungsgrad, so treibt der Verbrennungsmotor das Hybridfahrzeug alleine an (Figur 12g). Den Betriebsmodus, indem der Verbrennungsmotor in einem Bereich hohen Wirkungsgrades arbeitet und zusätzlich noch ein Teil der Antriebsleistung des Verbrennungsmotors zum Laden des elektrischen Energiespeichers 8 aufgewandt wird, zeigt Figur 12f. In der Figur 12h ist der Betriebsmodus des regenerativen Bremsens dargestellt.



Figur 12: Betriebsmodi mit Energieflüssen eines Hybridantriebsstrangs; aus DE 103 93 594 T5.

5. Ausblick

Im Hinblick auf einen günstigen Kraftstoffverbrauch und niedrige Abgasemissionen arbeiten Hybridantriebssysteme besonders vorteilhaft bei Fahrzyklen mit geringer Geschwindigkeit, niedriger Lastanforderung, häufigem Wechsel zwischen Anfahr- und Bremsvorgängen und hohem Leerlaufanteil. Im Bereich höherer Geschwindigkeiten und konstanter Fahrt sind nur geringe Verbrauchseinsparungen zu erzielen. Gegenüber einem konventionellen, verbrennungsmotorischen Antrieb spielt demnach der Hybridantrieb insbesondere im Stadtverkehr seine Überlegenheit aus. Dadurch wird der Hybridantrieb insbesondere für Stadtfahrten wie beispielsweise für den städtischen Lieferverkehr, für Taxis oder für Stadtbusse

interessant. [8].

Das Einsparpotenzial bei Kraftstoff und Schadstoffausstoß sowie die Marktakzeptanz der ersten Hybridfahrzeuge führen bei den Automobilherstellern und Komponentenherstellern zu verstärkten Entwicklungsaktivitäten [15]. Dies wird auch dokumentiert durch die verschiedenen Kooperationen bei der Entwicklung von Hybridantriebssystemen von Fahrzeugherstellern wie beispielsweise „BMW“, „Daimler-Chrysler“ und „General Motors“ [19] sowie auch im Bereich der Komponentenhersteller wie beispielsweise „Bosch“ und „Getrag“ [20].

Prognosen zu Folge werden um das Jahr 2015 weltweit über fünf Millionen Hybridfahrzeuge verkauft werden. Allein rund drei Millionen davon sollen dabei in diesem Jahr auf die USA entfallen, was einem Anteil von rund 18 % der PKW- und „Light-Truck“-Verkäufe in den USA entsprechen wird. Für Japan und Europa werden jeweils eine Million Hybridfahrzeugverkäufe vorhergesagt [15, 21].

Ein wichtiges Marktsegment in den USA stellen die Sport Utility Vehicle (SUV) mit ihrem hohen Benzinverbrauch dar. Durch den Einsatz von Hybridantriebssystemen im Bereich der SUV ist daher eine hohe Kraftstoffreduzierung möglich, die zu einem großen Marktpotenzial führen kann [15].

Im Gegensatz dazu ist in Europa rund die Hälfte aller neu zugelassenen PKW mit einem verbrauchsgünstigen Dieselmotor ausgerüstet [8]. Der niedrige Kraftstoffverbrauch von konventionellen Dieselfahrzeugen bewegt sich im Bereich des Benzinverbrauchs von Hybridfahrzeugen mit Ottomotor, wie Vergleichstests gezeigt haben. Der PSA Konzern verfolgt daher das Konzept eines Diesel-Hybridantriebs. Mit einem Diesel-Full-Hybrid-Prototyp des PSA-Konzerns wurde bereits ein Durchschnittsverbrauch von 3,4 l/100km erreicht, was rund 30 % eines konventionellen Dieselantriebs entspricht. [17, 22].

Unabhängig von der Kraftstoffart wird sich jedoch zuerst der Markt für die Konzepte der Micro- und Mild-Hybridantriebssysteme am schnellsten ausweiten, da sie sich ohne größere konstruktive Veränderungen realisieren lassen. Langfristig jedoch, so wird prognostiziert, werden die Full-Hybridantriebssysteme den Markt anführen, da sie das Potenzial des Hybridantriebs in Hinblick auf Kraftstoffeinsparung und Verringerung der Schadstoffemissionen voll ausschöpfen können [15].

Die funktionalen Vorteile und der geringere Kraftstoffverbrauch eines Hybridantriebs reichen jedoch derzeit noch nicht aus, um eine durchdringende Akzeptanz des Hybridantriebs beim Käufer zu erreichen [8]. Nach Auffassung verschiedener Experten würden jedoch Steuervorteile, wie beispielsweise in den USA, sowie gesetzliche Bestimmungen, wie beispielsweise die Mautbefreiung in der Londoner City, den Marktzugang für Hybridfahrzeuge beschleunigen [15].

Literatur

[1] MÜLLER, W. [Bearb.]: Fremdwörterbuch; Der Duden in 10 Bänden; Band 5. 4. Auflage. Mannheim, Wien, Zürich. Bibliographisches Institut, 1982; ISBN 3-411-20905-4.

[2] GUTTENBERG, P.: Der Autarke Hybrid am Prüfstand - Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse. Dissertation; Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik; Lehrstuhl für Maschinenelemente; Technische Universität München, 11.06.2004.

[3] www.wissen.de.

[4] Motortechnische Zeitschrift, 2006, Jahrgang 67, Nr. 02, S. 90.

[5] VOSS, B.; MEHLER, O. & LINTZ, S.: Serienentwicklung von Hybridfahrzeugen Teil 2: Elektrokomponenten, Nebenaggregate, Bremssystem, Steuerung/Regelung. - In: Automobiltechnische Zeitschrift, 2006, Jahrgang 108, Nr. 07-08, S. 592 - 599.

[6] PAEFGEN, F.-J. & LEHNA, M.: Der Audi duo - das erste serienmäßige Hybridfahrzeug. - In: Automobiltechnische Zeitschrift, 1997, Jahrgang 99, Nr. 6, S. 316 - 320.

[7] www.wikipedia.org.

[8] WALLENTOWITZ, H. & REIF, K. [Hrsg.]: Handbuch Kraftfahrzeugelektronik Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. 1. Auflage. Wiesbaden. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006, ISBN 10 3-528-03971-X.

[9] Automobiltechnische Zeitschrift, 2006, Jahrgang 108,

Nr. 10, S. 794.
[10] Werbeprospekt Toyota Prius; Stand 10/2006; Artikel-Nr. 10056.
[11] DANISCH, R. & GOPPELT, G. Der neue Toyota Prius. - In: Automobiltechnische Zeitschrift, 2004, Jahrgang 106, Nr. 3, S. 186 - 189.
[12] STUCKMANN, C.: Hybridantriebe Eine zukunftsweisende Antriebstechnologie für das 21. Jahrhundert. Vortrag Lehrstuhl für elektrische Antriebe und Mechatronik; Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik; Universität Dortmund, 2006. Im Internet: <URL:http://eam.e-technik.uni-dortmund.de/paper/upload/Vortrag.pdf>.
[13] www.hybrid-autos.info.
[14] http://www.liebherr.com/me/47597.asp.
[15] BLUMENRÖDER, K. et al.: Der Hybridantrieb - eine Technikoffensive. - In: Motortechnische Zeitschrift, 2005, Sonderausgabe, Nr. 10, S. 26 - 29.
[16] REICHLE, J.: Verzicht-Erklärung. - In: Süddeutsche Zeitung, 2007, Nr. 148; 30. Juni, S. V2/2.
[17] PFANNMÜLLER, M.: Weniger ist schwer. - In: Süddeutsche Zeitung, 2006, 11. Februar.
[18] HACK, G.: Fahrbericht Tausendsassa. - In: auto motor sport, 2004, Nr. 11, S. 62 - 64.
[19] Automobiltechnische Zeitschrift, 2006, Jahrgang 108, Nr. 06, S. 456.
[20] Automobiltechnische Zeitschrift, 2006, Jahrgang 108, Nr. 07 - 08, S. 540.
[21] DUDENHÖFFER, F.: Die Marktentwicklung von Hybrid-Fahrzeugkonzepten. - In: Automobiltechnische Zeitschrift, 2005, Jahrgang 107, Nr. 4, S.330 - 335.
[22] Automobiltechnische Zeitschrift, 2006, Jahrgang 108, Nr. 07 - 08, S. 537.

Plastik-Solarzellen

Dipl.-Phys. Mark Haslinger, Abt. 1.33

Einige der Polymere, die wir aus unserem täglichen Leben als „Plastik“ kennen, eignen sich unter bestimmten Bedingungen für den Einsatz als fotoaktive Materialien in Solarzellen.
Der Artikel gibt einen Einblick in dieses noch sehr junge Technikgebiet und beschäftigt sich mit den Zukunftsperspektiven dieser Bauelemente.

1. Kristalline Solarzellen

1.1. Historische Entwicklung

Seit der Entdeckung des p-n-Übergangs im Jahre 1949, dem Bau der ersten kristallinen Solarzelle 1954 in den Laboratorien der Firma Bell und der ersten Verwendung zur Stromversorgung eines Satelliten 1958 hat die Solarzelle eine rasante Entwicklung hinter sich. Solarzellen aus monokristallinem Silizium, Dünnschichtsolarzellen aus polykristallinem Silizium, sowie, in geringerem Maße, auch aus anderen Elementen bestehende kristalline Solarzellen (II-VI und III-V-Solarzellen) sind heute aus der weltweiten Elektrizitätsversorgung nicht mehr wegzudenken. Sie spielen, verschaltet in Solarmodulen, eine tragende Rolle im regenerativen Energiemix und werden innerhalb von Großkraftwerken, als auch zur dezentralen Energieversorgung an Dächern und Fassaden von Gebäuden eingesetzt [1].

1.2. Produktion kristalliner Solarzellen

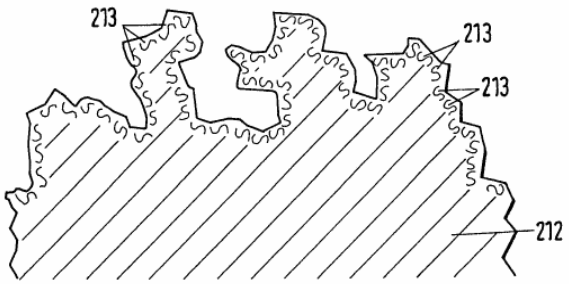
Die Herstellung relativ reiner Halbleiterkristalle als Grundmaterial kristalliner Solarzellen ist energieaufwändig und damit teuer. Während man sich in der Anfangsphase der Fotovoltaik noch des Produktionsausschusses der Computerchipindustrie an kristallinem Silizium bedienen konnte, ist durch den Erfolg und die damit drastisch gestiegene Stückzahl der Solarzellen diese Ressource nicht mehr ausreichend.

Nach Alternativen zu den Halbleiterkristallen als Grundmaterial für Solarzellen wird gesucht!

2. Alternative Solarzellen

2.1. Farbstoff-Solarzelle („Grätzel-Zelle“)

Der Bau einer ersten vielversprechenden Solarzelle, die ohne einen Halbleiterkristall auskommt, gelang einem Forscherteam aus der Schweiz und wurde dort 1990 patentiert [2]. Die Lichtabsorption und dessen Umwandlung in elektrischen Strom wird dabei mit Hilfe einer rauen Metalloxid-Halbleiterschicht realisiert, auf die eine sehr dünne Lage eines lichtsensiblen Farbstoffs (Chromophor-Moleküle) aufgebracht wurde.



Figur 1: aus [2], mit rauer Metalloxid-Halbleiterschicht 212 und einer dünnen Lage Chromophor-Molekülen 213.

Im Labor erreicht eine solche Farbstoffzelle einen Wirkungsgrad von 11%. Bis heute ist sie jedoch nicht kommerziell erhältlich, da noch keine hinreichende Langzeitstabilität erreicht werden konnte.

2.2. Organische Materialien

Neben der Farbstoff-Solarzelle werden seit einigen Jahren auch organische Materialien als Kandidaten für aktive Materialien in Solarzellen gehandelt. Ein Spezialfall dieser organischen Materialien sind Polymere, die gleichzeitig auch am häufigsten unter den organischen Materialien verwendet werden. Zu diesem Thema sind jüngst auch diverse Artikel in der Presse ([3], [4]) erschienen. Vorteil

dieser kohlenstoffhaltigen Substanzen ist, dass sie auf Grund langjährig gewonnener Erfahrung in der Kunststoff-Industrie sehr einfach, kontrolliert und kostengünstig herstellbar und verarbeitbar sind. Aber eigenen sie sich auch zum Einsatz als aktive Materialien innerhalb von Solarzellen?

3. Physikalische Grundlagen polymerer Solarzellen

In polymeren Solarzellen werden typischerweise konjugierte Polymere als aktive, Licht absorbierende Materialien verwendet [5], [6]. Konjugierte Polymere bestehen aus einer Kette von Kohlenstoffatomen, die abwechselnd einzeln und doppelt gebunden sind. Die p_z-Orbitale der einzelnen Kohlenstoffatome überlappen sich und bilden ein bindendes und ein antibindendes Orbital, die auf verschiedenen energetischen Stufen liegen, vergleichbar mit dem Valenzband und dem Leitungsband im kristallinen Halbleitermaterial. Durch die Einstrahlung eines Photons kann das Elektron auf den energetisch höheren Zustand gehoben werden. Damit enden allerdings die Parallelen zur kristallinen Solarzelle. Bei dieser können sich die Ladungsträger innerhalb des Kristalls frei bewegen und werden durch das Feld der Raumladungszone des p-n-Übergangs getrennt.

Im Polymer hingegen

- liegt das Elektronen-Loch-Paar in gebundener Form als Exziton vor und ist schwer zu trennen,
- gibt es keine dem kristallinen Bauelement vergleichbare Raumladungszone, und
- ist die Ladungsträgerbeweglichkeit generell deutlich schlechter als im Kristall; der Ladungsträger kann sich nur durch sogenanntes „Hopping“ über die Moleküle hinweg fortbewegen.

Schwerwiegende Nachteile, die bei der Realisierung polymerer Solarzellen überwunden werden müssen!

4. Realisierung polymerer Solarzellen

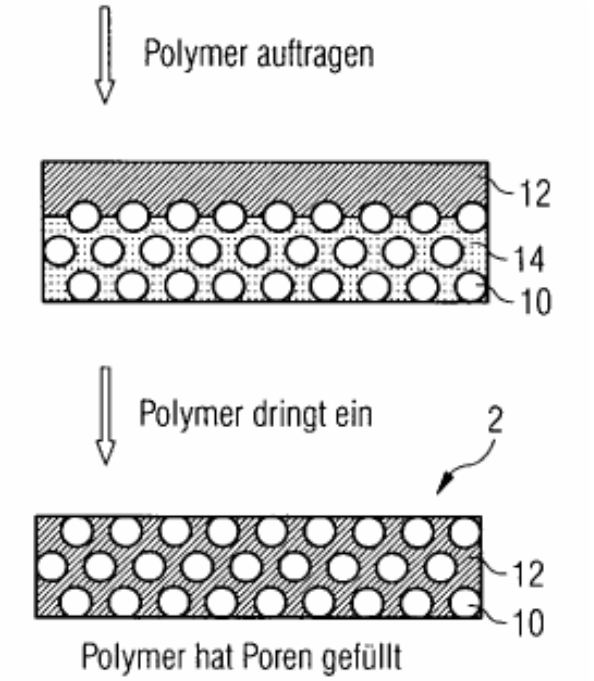
4.1. Verwendung von Fullerenen

Um das Problem der gebundenen Ladungsträger in Form von Exzitonen in den Griff zu bekommen, wird nach dem Stand der Technik dem konjugierten Polymer ein Akzeptormaterial beigemischt.

Die Grenzfläche zwischen dem konjugierten Polymer und dem beigemischten Akzeptormaterial, die sich im Idealfall über das ganze Gebiet des Sonnenlicht-Absorbers ausdehnt, wird als „Bulk-Heterojunction“ bezeichnet. An dieser Grenzfläche können die Exzitonen aufgespaltet und Ladungsträger getrennt werden, was insgesamt zu einer deutlichen Erhöhung des Wirkungsgrads der polymeren Solarzelle führt.

Als sehr gut geeignete Akzeptormaterialen hat sich die Kohlenstoffmodifikation der Fullerene erwiesen, wegen ihrer Form auch als „Fußball-Moleküle“ geläufig.

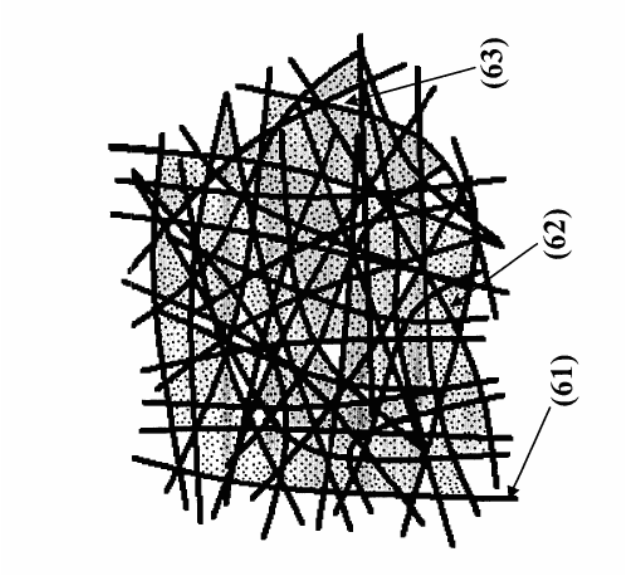
Aus der deutschen Offenlegungsschrift [7] ist ein Verfahren zur Bildung eines Licht absorbierenden Halbleitersubstrats bestehend aus einem Fulleren-Netzwerk und einem konjugierten Polymer bekannt.



Figur 2: aus [7], Polymerlösung 12 dringt in die Poren 14 eines Fulleren-Netzwerks 10 zur Bildung eines Halbleitersubstrats 2.

Ein billiges, poröses Netzwerk aus reinen, unsubstituierten Fullerenen wird als Grundmaterial verwendet. Mit Hilfe eines einfach zu handhabenden Tintendruckverfahrens lässt sich ein flüssiges Polymer auf das Fulleren-Netzwerk auftragen, dringt in dessen Poren ein und bildet so über die ganze Fläche des Halbleitersubstrats verteilte „Bulk-Heterojunctions“, den Grenzflächen zwischen beiden Materialkomponenten.

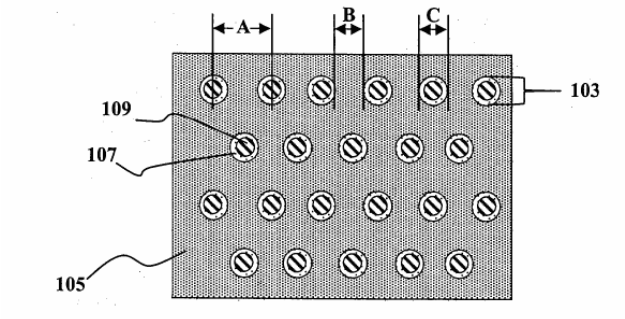
Eine andere Struktur eines Fullerennetzwerks stellt die französische Offenlegungsschrift [8] vor, in der nur einige Teile des Netzwerks mit Polymermaterial ausgefüllt werden, während andere Zwischenräume frei bleiben. Diese Struktur ist vorteilhafterweise einfach und ohne Temperaturprozessschritte herzustellen.
Als mögliche Polymermaterialien werden u. a. Polythiophene, Polyphenylene, Polyaniline, oder Polyfluorene genannt.



Figur 3: aus [8], Fulleren-Netzwerk 61, Polymer 62 und freie Zwischenräume 63.

4.2. Alternative Varianten

Die Idee eines Netzwerks greifen auch die deutschen Offenlegungsschriften [9] und [10] auf und führen sie weiter:



Figur 4: aus [9], organische Schichten 107 und Ladungstransfermaterialien 109.

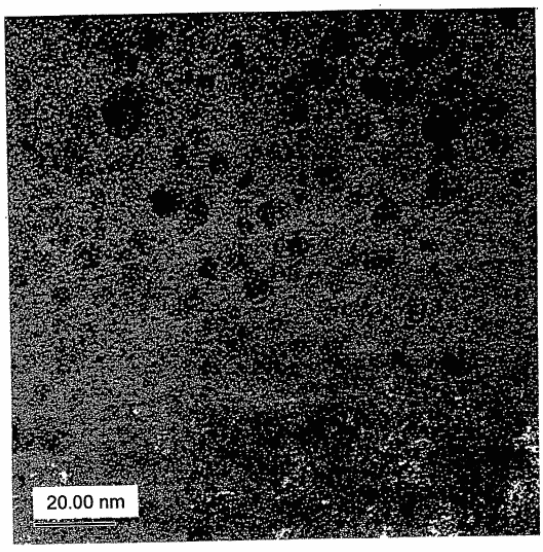
Ein Netzwerk aus Ladungstransfermaterialien, hier beispielsweise das Polymer PEDOT, wird noch von einer zusätzlichen organischen Schicht umgeben. Die Grenzfläche, die „Bulk-Heterojunction“, in der die Exzitonen entkoppelt werden können, umfasst hier den ganzen Bereich der ummantelnden organischen Schicht; mit der höheren Schichtdicke geht auch eine erhöhte Wahrscheinlichkeit zur Aufspaltung der Exzitonen einher.

Einen alternativen Ansatz verfolgen die deutschen Offenlegungsschriften [11] und [12]:

In der Offenlegungsschicht [11] wird eine dreikomponentige Mischung eines Licht absorbierenden Materials vorgestellt, die mittels eines aus der Physik bekannten Singulett-Triplett-Übergangs des Exzitons die Lebensdauer dieses Exzitons deutlich verlängert, und damit auch die Chance, die gebundenen Ladungen zu trennen.

Das gleiche Ziel verfolgt die Offenlegungsschrift [12] mit Hilfe eines „Donor-Akzeptor-Donor-Block-Kooligomer“, einer Mischung aus mindestes drei verschiedenen Monomeren.

Die PCT-Offenlegungsschrift [13] beschreibt eine aus einem Polymer und Silizium-Nanokristallen bestehende „Bulk-Heterojunction“.



Figur 5: aus [13], Silizium-Nanokristalle (weiß) in polymerem Matrixmaterial (schwarz)

Hierbei ist das Polymer mit Siliziumkristallen der Größe zwischen 2nm und 5nm gesprenkelt.

Diese Erfindung versucht, die Vorteile der konventionellen

Solarzelle aus Silizium mit jenen der organischen Solarzelle zu verbinden: Diese kleinsten Slilziumkristalle weisen einen besseren Absorptionskoeffizienten bezüglich Sonnenlicht im Vergleich zu organischen Substanzen auf und können durch diesen Absorptionsbeitrag den Wirkungsgrad einer Solarzelle verbessern. Andererseits ist die Herstellung von Silizium-Nanokristallen und deren Einbringen in ein Polymer deutlich kostengünstiger als die Herstellung makroskopischer Silizium-Bauteile, und deren Flexibilität und Biegsamkeit bleibt weiterhin durch das Polymer als Matrixmaterial gewährleistet.

5. Anwendungsgebiete polymerer Solarzellen

Als Anwendungsbereiche polymerer Solarzellen kommen in erster Linie Nischenbereiche in Frage. Ein Trumpf dieser Bauelemente ist neben ihrer kostengünstigen Herstellung die Biegsamkeit und Flexibilität der organischen Materialien, die sie gut anpassbar an verschiedenste Formgebungen machen.

Die deutsche Offenlegungsschrift [14] schlägt das Anbringen organischer Solarzellen an die Karosserie eines Kraftfahrzeugs vor. Die verschiedenen Schichten der organischen Solarzellen können dabei direkt auf das metallische Grundmaterial der Karosserie aufgedruckt oder aufgedampft werden. Die organischen Solarzellen erfüllen einerseits den Zweck, die Energieversorgung des Kraftfahrzeugs sicherzustellen, beispielsweise für das Standlicht. Andererseits verspricht man sich durch die mit den Solarzellen versehene Karosserie auch eine positive ästhetische Wirkung.

Die Integration polymerer Solarzellen in biegsame Stoffe oder Textilien schlagen die PCT-Offenlegungsschriften [15] und [16], sowie die britische Offenlegungsschrift [17] vor.

In [15] werden Solarzellen in Form von Fäden ausgeführt: Um einen elektrisch leitfähigen Kern (innere Elektrode) herum ist das fotovoltaisch aktive Material angeordnet, wiederum ummantelt von einem Katalyt und einer äußeren Elektrode.

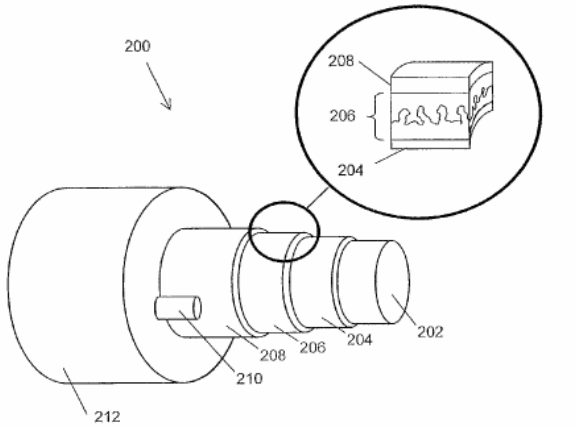
Diese Fäden sind durch ihre Materialbeschaffenheit geeignet, zu einer Textilie weiterverarbeitet zu werden.

Die Schrift [16] verfolgt einen ähnlichen Ansatz:

Als Basismaterial dient ein Glasfaserkabel, wie es in der Telekommunikationstechnik verwendet wird, oder aber ein Nylonfaden. Dieser wird weiter umhüllt von einer ersten Elektrode, wobei diese umgeben ist von einem photoaktiven Polymer mit „Bulk-Heterojunctions“, wobei dieses Polymer wiederum umhüllt ist von einer zweiten Elektrode.

Als erste Elektrode wird gängigerweise ein dünne Metallschicht als photoaktives Polymer mit „Bulk-Heterojunctions“ u. a. die bereits in diesem Artikel vorgestellten Materialien, als obere Elektrode ein transparentes Metalloxid verwendet.

Damit ist die Solarzelle um das Glasfaserkabel oder den Nylonfaden schon komplett. Die gesamte Solarzelle wird zum Schutz auf der Außenseite noch mal von einer lichtdurchlässigen Nylonschicht umgeben. Ein solcher Solar-Faden wird als geeignet zum Verweben in einem Kleidungsstück beschrieben.



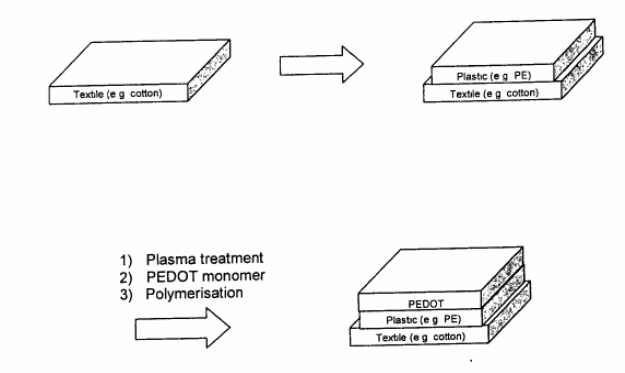
Figur 6: aus [16], Glasfaserkabel oder Nylonfaden 202, erste Elektrode 204, photoaktives Polymer mit „Bulk-Heterojunctions“ 206, zweite Elektrode 208, Hilfselektrode 210, lichtdurchlässige Nylonschicht 212.

In [17] wird eine andere Vorgehensweise zur Integration von Solarzellen auf Stoffen gewählt:

Ein textiler Stoff wird in einem ersten Schritt mit einer dünnen Kunststoffschicht beschichtet. Darauf wird die Solarzelle Schicht für Schicht auf diesen Kunststoffuntergrund aufgedampft oder aufgedruckt.

Vorteil dieser Erfindung ist deren vielseitige Verwendbarkeit: Solche Solarzellen können auf

Kleidungsstücke, Taschen, Regenschirme, Möbel Zelte, Flaggen, oder Segel aufgetragen werden.



Figur 7: aus [17], auf einen textilen Stoff wird eine dünne Kunststoffschicht aufgebracht; darauf folgen die Schichten der Solarzelle

Über ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet informiert die PCT-Offenlegungsschrift [18]:
Durch die Flexibilität der polymeren Solarzelle kann diese auf Hausdächern angebracht werden, in dem sie direkt auf einen Dachziegel aufgebracht wird. Die flexible Solarzelle ummantelt den Dachziegel auf dessen Oberseite vollständig und ist elastisch genug, so dass man sogar auf ihr laufen kann.

6. Bewertung und Ausblick

Genauso wie die Farbstoffzelle ist auch die organische Solarzelle bisher nicht kommerziell erhältlich, da auch hier die Langzeitstabilität noch große Probleme aufwirft.
Auch die Wirkungsgrade der bisher hergestellten organischen Solarzellen befinden sich durchwegs im einstelligen Prozentbereich – und reichen damit nicht an jene der kristallinen Solarzellen heran.

Gleichwohl wird sie als eine Schlüsseltechnologie der Zukunft gesehen. Erst jüngst wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung eine gemeinsame Technologieinitiative mit der Industrie vorgestellt [19], die die Kräfte auf diesem Gebiet bündeln soll und neue Fördermittel und Investitionen für diesen Forschungsbereich bereitstellt.
Als mögliche Einsatzgebiete für organische Solarzellen werden deren Einsatz für die Stromversorgung, sowohl von Mobiltelefonen, als auch in der Bauindustrie auf Dächern, Fassaden oder Fenstern genannt.

Die Ziele der Technologieinitiative der Bundesregierung sind

- deutlich bessere Wirkungsgrade,
- eine wesentlich höhere Lebensdauer, sowie
- geringere Herstellungskosten für diese Bauelemente.

Die Bundesregierung sieht in einer neuen Generation von organischen Solarzellen nicht nur einen Beitrag zum Umweltschutz in Zeiten des Klimawandels, sondern auch ein hohes wirtschaftliches Potential, in dem Deutschland im internationalen Wettbewerb eine führende Rolle einnehmen soll. Man darf gespannt sein!

Literatur

[1] JAUMANN, M.: Solarzellen. – In: Erfinderaktivitäten 2004/2005, Deutsches Patent- und Markenamt, S. 60-69.

[2] CH 674 596 A5

[3] HANDELSBLATT: Solarbranche sucht Werkstoffe [online], 20.12.2006 [recherchiert am 20.12.2006]. Im Internet: <URL: http://www.handelsblatt.com/news/Technologie/Forschung-Innovation/_pv/grid_id/1122916/_p/203116/_t/ft/_b/1189826/default.aspx/solarbranche-sucht-werkstoffe.html>.

[4] SPIEGEL ONLINE: Strom aus dem All [online], 8.12.2006 [recherchiert am 8.12.2006]. Im Internet: <URL: http://www.spiegel.de/unispiegel/jobundberuf/0,1518,446624,00.html>.

[5] MEISSNER, D. Plastic solar cells [online]. – In: Photon International 2-99 [recherchiert am 16.7.2007]. Im Internet: <URL: http://netserv.ipc.uni-linz.ac.at/~dieter/DsWeb/Paper/99Photon.pdf>

[6] WALLACE, G.G. u. a. Conjugated polymers: New materials for photovoltaics. In: Chemical Innovation, April 2000, Vol. 30, No. 1, S. 14-22.

[7] DE 10 2004 036 793 A1

[8] FR 2 892 563 A1

[9] DE 10 2005 003 841 A1

[10] DE 10 2005 003 846 A1

[11] DE 10 2005 010 978 A1

[12] DE 10 2005 010 979 A1

[13] WO 2005/083811 A2

[14] DE 103 48 118 A1
[15] WO 03/065471 A2
[16] WO 2006/019576 A1
[17] GB 2 424 121 A
[18] WO 2005/124892 A2
[19] BMBF: 360 Millionen Euro für Revolution in der Photovoltaik. –Pressemitteilung 140/2007 [online], 27.6.2007 [recherchiert am 12.7.2007]. Im Internet: <URL: http://www.bmbf.de/press/2084.php>

Thixogießen – ein Urform- oder ein Umformverfahren?

Martina Hensel, Abt. 1.24

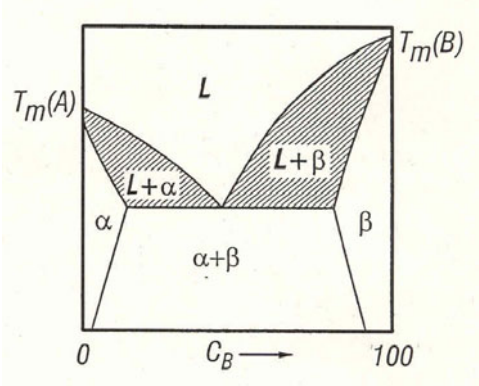
Seit mehr als 30 Jahren sind neben den klassischen Urformverfahren „Gießen“ und den klassischen Umformverfahren wie dem „Pressen“ Herstellungsverfahren für metallische Bauteile bekannt, genannt „Thixocasting“ und „Squeeze-Casting“, die als Gießverfahren bezeichnet werden, aber mit denen sich Bauteile herstellen lassen, deren Eigenschaften denen der klassischen Umformverfahren näher kommen als denen der Gusswerkstoffe („wie geschmiedet“).

1. Der Unterschied zwischen Gießen, Thixocasting und Squeeze-Casting

Zum Urformen gehören nach [1] die Verfahren, die einer formlosen Materie, wie Gasen, Flüssigkeiten, Fasern, Granulaten oder Spänen, Zusammenhalt und eine erste, feste Gestalt geben. Zu diesen Verfahren gehört damit neben der Pulvermetallurgie auch das Gießen, bei dem ein flüssiger oder breiiger Stoff in eine geometrische und feste Form gebracht wird. Das Umformen dagegen ist nach [1] das plastische Formen eines Körpers im festen Zustand. Masse und Volumen bleiben dabei konstant. Am bekanntesten sei neben dem Walzen, das Schmieden, Pressen, Ziehen und Biegen genannt.

Die Phasenzusammensetzung eines Materials (fest/flüssig) wird in einem Zustandsdiagramm in Abhängigkeit von Temperatur und Zusammensetzung dargestellt. Für Metalle und Legierungen ergibt sich in der Regel dabei ein Bereich zwischen Solidus- und Liquiduslinie (Erstarrungsintervall), in dem flüssige neben festen Phasen vorhanden sind (Metallphase+Liquid), vgl. Figur 1. Dieser Bereich, der in Figur 1 schraffiert dargestellt ist, wird in der Urform- und Umformtechnik Thixo- oder Semi-Solid-Bereich genannt.

Wird in diesem Bereich der koexistierenden Flüssig-/Fest-Phasen umgeformt, spricht man von Thixoforming und es wurden die verschiedensten Ur- und Umformverfahren weiterentwickelt, um Materialien in diesem Bereich zu verarbeiten und zwar sowohl ausgehend von den Urformverfahren, wie Gießen, Thixocasting und Squeeze-Casting, als auch von den Umformverfahren ausgehend, wie Heißisostatisches Pressen (HIP), Thixoforging (Schmieden thixotropen Materials) oder Thixomolding (Extrudieren thixotropen Materials). Eine genaue Zuordnung der Verfahren zu Ur- oder Umformverfahren ist daher allein nach dem Aggregatzustand der vorliegenden Phasen (flüssig, fest oder halbfest) nicht mehr möglich.



Figur 1: Schematisches eutektisches Phasendiagramm einer Zweistofflegierung, WO 01/52323 A2.

Auch wird den Metallen und Legierungen nicht zwangsläufig eine erste feste Gestalt verliehen, wie in [1] als Kennzeichen des Urformens definiert, wenn sie durch Thixocasting oder Squeeze-Casting hergestellt werden. Vielmehr kann das thixotrope Ausgangsmaterial einerseits zwar durch Abkühlen aus der Schmelze (Urformen), aber auch durch Wiedererwärmen eines bereits durch ein anderes Urformverfahren hergestellten Materials bereitgestellt werden, z.B durch Wiedererwärmen eines Strangpressbolzens (Umformen). Somit ist bei der Verarbeitung halbfesten/halbflüssigen Materials eine Unterscheidung nach Urformtechnik und Umformtechnik im herkömmlichen Sinne nicht möglich.

Da thixotropes Material aber mit herkömmlichen Verfahren und Vorrichtungen verarbeitet werden kann, ist eine Unterscheidung nach diesen herkömmlichen Verfahren möglich. Hierbei ist beispielsweise das Thixocasting ein

Gießverfahren, welches dem Druckgießen ähnelt. Beim Squeeze-Casting unterscheidet man zwei Verfahren, eines, welches dem Niederdruckgießen ähnelt und Indirect-Squeeze-Casting genannt wird und das Direct-Squeeze-Casting, welches dem Gesenkschmieden ähnelt.

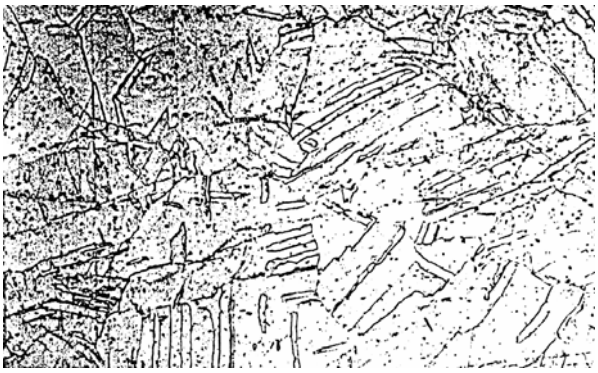
2. 30 Jahre Entwicklung des Thixogießens

2.1. Verfahren des Thixocasting

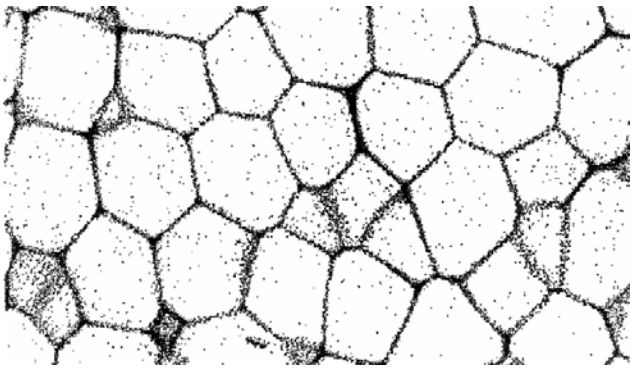
Das Pressgießen (Squeeze-casting) ist ein Verfahren, wie es bereits seit 80 Jahren bekannt war, vgl. DE 654 267 A, wohingegen das Thixocasting, also das Thixogießen, zu den neueren Verfahren zählt, da es erst seit 30 Jahren eine Rolle bei der Verarbeitung der Metalle und Metalllegierungen spielt.

Die Thixocast-Methode ist dabei einerseits erstmals in der Lage, die guten mechanischen Eigenschaften zu erzielen, die aufgrund der sonst nur mit dem Schmiedeverfahren herstellbaren Dichtheit des Bauteils zusammenhängen. Andererseits können mittels Thixocasting auch metallische Legierungen umgeformt werden, deren plastisches Umformverhalten ein Schmieden nicht erlauben würde.

Dabei werden mit dem Thixogießen geometrische Formen der Bauteile möglich, wie sie beim Schmieden undenkbar wären, da festes Material eine zu geringe Viskosität aufweist, um in alle Ecken, Kanten und Hinterschnitte einer Form zu fließen. Das Verarbeiten der Metalllegierung im halbfesten Zustand durch Gießen setzt aber ein Material voraus, dessen Gefüge keine Dendriten aufweist, sondern kugelige Gestalt hat, vgl. Figur 2 und 3.



Figur 2: Dentritische Gefügeausbildung nach dem normalen Erstarren einer Legierung, vgl. EP 545 145 A1.



Figur 3: Globolitische Gefügeausbildung einer Legierung nach spezieller Abkühlung, vgl. EP 1 266 973 A2.

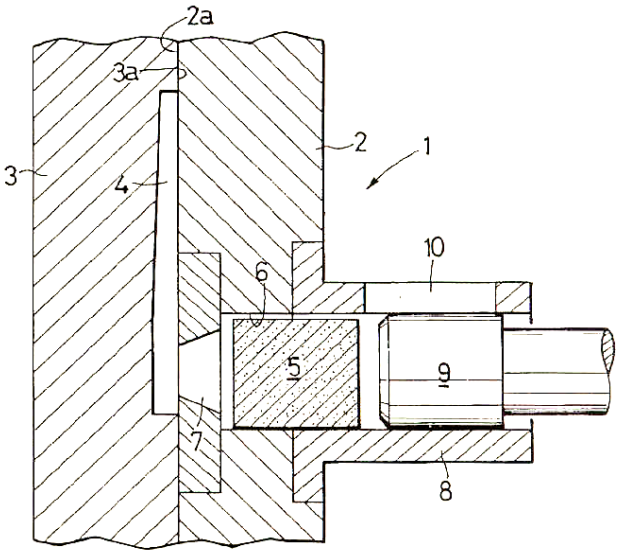
Eine globulitische Gefügeausbildung erreicht man beispielsweise bei den gebräuchlichen Aluminiumlegierungen, durch Zusatz kornfeinender Legierungselemente oder Rühren der Schmelze beim Abkühlen. Das globulitische Gefüge ermöglicht, dass sich die festen Teile, die in der flüssigen Phase vorliegen, beim Umformen aneinander vorbeibewegen und somit nicht gegenseitig behindern. Bei den nadelförmig ausgebildeten Dentriten würde eine Umformung zur Rissbildung führen.

Das Ausgangsmaterial wird entweder direkt aus der Schmelze bis in den Thixobereich abgekühlt oder als Strangpressbolzen wiedererwärmt. Beide Möglichkeiten können innerhalb der Formmaschine, meist induktiv, oder außerhalb der Formmaschine erfolgen, wobei sich bei letzterer Möglichkeit die Frage des Temperatur und Gestalt erhaltenden Transportes stellt.

Der Temperatursteuerung kommt ohnehin eine hohe Bedeutung zu, da das Fließvermögen stark von ihr abhängt.

Der eigentliche Gießvorgang erfolgt dann unter sehr hohem Druck und sehr schnell. Damit ist es möglich, dichte Gussstücke auch großer Querschnitte oder Gussstücke mit geringerer Porosität als beim Druckguss herzustellen, vgl. CH 639 300 A5, DE 42 32 742 A1 oder DE 100 52 638 A1.

Das Gießen erfolgt zumeist auf herkömmlichen Druckgießmaschinen, bei denen ein Material in die Gießkammer eingebracht und mittels eines Kolbens mit hohem Druck in die Gießform gedrückt wird, vgl. Figur 4.



Figur 4: Verarbeitung von thixotropen Material in einer Druckgussmaschine aus DE 195 18 127 C2.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt geht es bei der Weiterentwicklung, die sich im Patentanmeldeverhalten widerspiegelt, aber nicht so sehr um die Weiterentwicklung der Verfahren zur Verarbeitung thixotroper Materialien, als vielmehr um die werkstofftechnisch geeigneten Vorrichtungen, insbesondere die Gießformen und um die Weiterentwicklung der thixotrop zu verarbeitenden Werkstoffe selbst.

2.2. Geeignete Werkstoffe zum Verarbeiten mittels Thixocasting

Zu den wichtigsten Auswahlkriterien für Werkstoffe, die im teilflüssigen Zustand verarbeitet werden sollen, gehören nach [2] neben der Wirtschaftlichkeit, die mechanischen Anforderungen an das Bauteil.

Dabei ist von Bedeutung, dass nur solche Werkstoffe im teilflüssigen Zustand verarbeitbar sind, die ein breites Schmelzintervall aufweisen, da sich nur so ein definiertes und kontrollierbares fest/flüssig Gemisch einstellen lässt. Das Schmelzintervall ist dabei der Temperaturbereich, in dem beim Abkühlen oder Erwärmen einer definierten Legierungszusammensetzung gleichzeitig flüssige und feste Phasen nebeneinander auftreten und zwar sowohl im Randbereich als auch im Kern des Materials. Ein Material ist nicht thixotrop, wenn der gesamte Randbereich über einen bestimmten Durchmesser erstarrt ist, gleichzeitig aber der gesamte Kernbereich sich im flüssigen Zustand befindet. Es kommen daher nicht alle Legierungssysteme in Betracht, die ansonsten als gut giessbar gelten. Erprobt und serienreif für das Thixoforming sind die konventionellen Aluminiumknet- und Aluminiumgusslegierungen, Kupferlegierungen und die Eisenlegierungen, vgl. auch WO 00/04198 A1. Aber selbst unter diesen Legierungssystemen ist nicht jede Legierung gleich gut für eine Verarbeitung im fest/flüssig Phasenbereich geeignet.

Selbst innerhalb eines Legierungstyps gibt es wesentliche Unterschiede in der Verarbeitbarkeit im thixotropen Zustand. Bei der Vormaterialauswahl ist demnach nicht allein die chemische Zusammensetzung, sondern die Gefügeausbildung entscheidend, und diese wird von vielen Faktoren bestimmt.

Das erforderliche globulitische Gefüge lässt sich auf verschiedene Weise erzeugen. Neben der Ausbildung von feinem Korn durch eine entsprechende chemische Zusammensetzung, sind der Gehalt an metallischen und nichtmetallischen Verunreinigungen, die chemische Homogenität, die Mikrostruktur im Inneren des Vormaterialbolzens, wie auch in dessen Randbereich, eventuell vorhandene Seigerungen, die Viskosität und das rheologische (Fließ-) Verhalten beim thixotropen Umformen von Bedeutung.

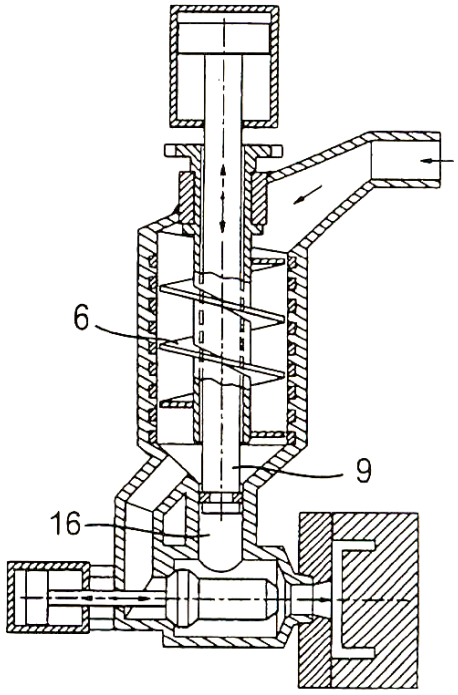
Darüber hinaus sind auch Herstellungsfehler bei der Herstellung des Vormaterials, insbesondere beim Stranggießen, verantwortlich, ob bei der weiteren Verarbeitung Porosität, Risse und Ausschwitzungen auftreten.

Neuere Entwicklungen beschäftigen sich mit der Herstellung von geeignetem Magnesiumausgangsmaterial für ein Thixoforming, insbesondere dem Thixogießen, da insbesondere im Automobilbau immer leichtere, aber auch porenfreie Materialien gefragt sind.

Dabei wird eine herkömmliche Magnesiumlegierung, die für den Druckguss geeignet ist, so durch das Herstellungsverfahren modifiziert, dass sie im halbfesten Zustand verarbeitet werden kann. Das geforderte kugelige gleichmäßige Gefüge wird dadurch erzielt, dass eine erkaltete Magnesiumlegierung nicht lediglich warm und kalt verformt wird, sondern der Warm- und/oder Kaltverformung eine Extrusion bei 350° bis 400 °C

vorangestellt wird, gefolgt von einem isothermen Halten bei Temperaturen von 570° bis 580°C für 30 s bis maximal 180 s, vgl. DE 103 61 691 B4 von Hyundai Motor & Co..

Bei der Extrusion werden die zähflüssigen Materialien durch eine Düse in den Formhohlraum gepresst. Dazu wird das Material mittels einer Schneckenpresse, die von einer Heizung umgeben ist, geschmolzen und dabei homogenisiert sowie zur Düse transportiert, um dann mit sehr hohem Druck durch die Düse gepresst zu werden, vgl. Figur 5.



Figur 5: Schmelzschnecke für Magnesiumlegierung, die mit der Gießkammer einer Druck- oder Spritzgussmaschine verbunden ist, vgl. DE 10 2004 032 443 A1.

Solche Schneckenpressen sind aus der Verarbeitung von Kunststoffen bekannt, weshalb in der Praxis europaweit thixotrope Magnesiumlegierungen eher in der Kunststoff verarbeitenden Industrie und nicht, wie anzunehmen, in Metallgießereien hergestellt werden.

Auch das Verarbeiten hoch schmelzender Stahlwerkstoffe im Thixoforming ist für den Automobilbereich interessant, wenngleich durch die höheren Verarbeitungstemperaturen besondere Anforderungen an die Prozessführung und das Material der Maschinen zu stellen sind. Eine weitere Besonderheit bei Stahl ist die direkte Abhängigkeit des Erstarrungsintervalls vom Kohlenstoffgehalt.

Erst mit steigendem Kohlenstoffgehalt hin zu den Mengen in Gusseisenlegierungen (2% C und mehr), liegt ein genügend breites Erstarrungsintervall vor, um ein definiertes fest/flüssig Verhältnis bei der thixotropen Verarbeitung einzustellen, so dass neben der hohen Verarbeitungstemperatur auch bezüglich der genauen Einstellung des festen/flüssigen Phasenanteils bei niedrigen Kohlenstoffgehalten besondere Schwierigkeiten zu überwinden sind. Das erforderliche Gefüge wird durch eine spezielle Wärmebehandlung und kontrollierte Abkühlung erzielt.

2.3. Formwerkzeugmaterialien für das Thixocasting

Für die neueren Werkstoffe, die mittels Thixocasting verarbeitbar sind, ist auch ein neues Werkzeugkonzept erforderlich, das einerseits den höheren Temperaturen als bei der Leichtmetallverarbeitung gerecht wird und andererseits eine sehr genaue Temperatursteuerung bei der Verarbeitung ermöglicht.

Geeignete Werkzeuge für das thixoptrope Gießen können aus Warmarbeitsstahl gefertigt sein, der aber den besonderen Anforderungen der festen/flüssigen Verarbeitung legierungstechnisch angepasst sein muss. Der herkömmlich für eine Druckgießform verwendete Warmarbeitsstahl wäre zu schnell verschlissen.

Da aber die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens in erheblichem Maß vom Kostenfaktor für das Gießwerkzeug, insbesondere für die Gießform, abhängt, gehört die Lebensdauer der Gießform zum wichtigsten Einflussfaktor für die Auswahl eines geeigneten Herstellungsverfahrens. Die Lebensdauer des geeigneten Formenwerkstoffes hängt von vielen Faktoren ab, vgl. [4]:

- Zu vergießender Werkstoff
- Werkzeugkonstruktion
- Wärmebehandlung
- Behandlung und Pflege der Form
- Oberflächenzustand
- Mechanische und thermische Belastung und
- Stahlqualität.

Diese Faktoren sind somit nicht allein materialtechnischer Natur, vielmehr ist auch die Art und Weise der Prozessführung von Bedeutung für den Werkzeugverschleiß, so dass nicht allein der

Stahlhersteller Einfluss auf den Werkzeugverschleiß nehmen kann.

Der erste Schritt die Lebensdauer zu erhöhen ist aber in jedem Fall die Auswahl eines geeigneten Materials für das Formwerkzeug, meist eines Warmarbeitsstahls, und dessen Herstellungsverfahren.

Die Hauptschadensart der Druckgießform entsteht auch bei Verarbeitung von thixotropem Material durch die starke mechanisch-thermische Wechselbeanspruchung, deren Folge Warmrissbildung ist. Ca. 80 % aller Schäden gehen auf Warmrissbildung zurück. Darüber hinaus sollten aber auch Spannungsrisse, Korrosion, Auswaschungen und Anklebungen vermieden werden. Deshalb werden Warmarbeitsstähle mit Chrom, Vanadium, Molybdän, Silizium und gegebenenfalls Kobalt verwendet, die die Warmfestigkeit, den Warmverschleißwiderstand, die Anlassbeständigkeit, Oxidationsbeständigkeit und Überhitzungsbeständigkeit von Warmarbeitsstählen erhöhen, vgl. [4].

So bestehen übliche Werkzeugformen aus den Stählen X37CrMoV5-1 oder X40CrMoV5-1 mit 0,37 bzw. 0,40 % Kohlenstoff, 1% Silizium, 5,3% Chrom, 0,4-1% Vanadium und 1,3-1,4% Molybdän. Eine erhöhte Warmfestigkeit und Anlassbeständigkeit erreicht man bereits bei dem gleichen Stahltyp mit einer Erhöhung des Molybdän-Gehaltes auf 3% bzw. 5%.

So wird es sogar möglich, Kupferlegierungen, die auch bei einer thixotropen Verarbeitung höhere Gießtemperaturen als die Leichtmetalle erfordern, mit diesen Warmarbeitsstählen zu gießen. Zusätzlich kann der Warmarbeitsstahl für diesen Verwendungsdungszweck mit Kobalt legiert werden, der zusätzlich als Diffusionshemmer und Mischkristallbildner im Warmarbeitsstahl dient und so die Verschleißfestigkeit erhöht.

In eine ganz andere Richtung muss der Stahlhersteller denken, vgl. wiederum [4], wenn großformatige Formkonturen hergestellt werden sollen, da diese vor allem zu Spannungsrissen neigen und bruchgefährdet sind. Hier hilft nur die Verwendung eines Warmarbeitsstahles mit hoher Zähigkeit. Geeignet scheint ein Warmarbeitsstahl X36CrMoV5 mit nur 1% Molybdän und einem sehr geringen Gehalt an Nebenelementen, also einem hohen Reinheitsgrad, wie er in früheren Jahren nicht einstellbar war.

Weitere Eigenschaftsverbesserungen sind durch geeignete Wärmebehandlungsverfahren, wie Diffusionsglühen oder Normalisieren, oder durch Umschmelzen des Stahls möglich.

Ein Umschmelzen mit dem Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren (ESU) ermöglicht es wesentlich höhere Reinheitsgrade im Vergleich zu konventionell hergestellten Stählen zu erzielen und somit die Zähigkeit signifikant zu erhöhen. Gleichzeitig zeigen sich eine Seigerungsverringerung im Werkstoffgefüge und eine verbesserte Isotropie.

Eine weitere materialtechnische Herausforderung ist die Gießkammer der Druckgussmaschine und hier insbesondere die, in der das thixotrope Material vor Ort, meist induktiv, erwärmt wird. Herrschen von Induktor zu Induktor schon unterschiedliche Temperaturen vor, ist der Temperaturgradient am Beginn und Ende des Zylinders besonders groß.

Wenn dann noch feste Teilchen aus Magnesiumlegierungen mit einer Schnecke, wie sie in Figur 5 dargestellt ist, verarbeitet werden sollen, die im Bereich der Schnecke erst aufgewärmt werden, wird klar, dass eine besondere Stabilität gegen Verzug und eine hohe Wärmeschockresistenz an das Material der Gießkammer, in der die Schnecke arbeitet, gestellt werden muss.

Mit solcherart Warmwechselfestigkeitsbelastung kommt dann ein Warmarbeitsstahl, möge er noch so ausgeklügelt sein, nicht mehr zurecht.

Für eine wärmeschocksichere Vorrichtung muss dann auf hochtemperaturbeständige Legierungen auf Nickel-Basis oder Niob- und Titan-Basis oder auf mit diesen Legierungen beschichtete Stahllegierungen oder auf Verbundwerkstoffe zurückgegriffen werden, vgl. z.B. die EP 1 019 210 B1 oder auch die DE 41 39 421 C2.

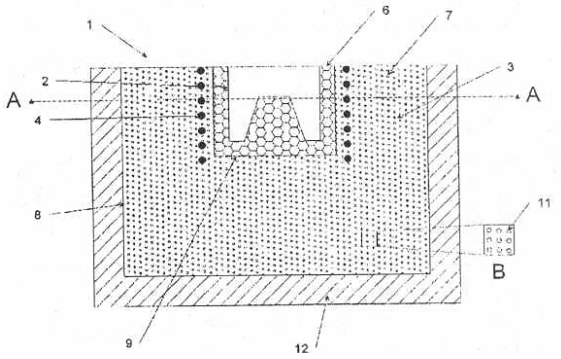
Darüber hinaus ist der Einsatz von Keramik als Gießkammerwerkstoff oder Gießformenwerkstoff vollständig oder im Verbund mit Metallen denkbar, wenn

die Keramik über eine hohe Thermoschockbeständigkeit und hohe Warmfestigkeit verfügt.

In [3] wurde ein Werkzeug für das Thixoformen vorgestellt, das aus einem Verbundwerkstoff besteht, der mit Siliziumnitrid verstärkt wurde. Das Siliziumnitrid verfügt über eine bis 1400°C gleich bleibend hohe Festigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit und Kriechbeständigkeit, so dass eine deutliche Steigerung der Werkstoffstandzeit zu erwarten ist.

Ein weiteres mögliches Verbundmaterial beschreibt die DE 10 2004 061 948 A1, bestehend aus einer mit dem Metall in Berührung kommenden Innenschicht aus infiltrations-, korrosions-, und formbeständigem sowie verschleißfestem keramischem Werkstoff oder keramisch-metallischem Mischwerkstoff und einer Außenschicht aus einem anderen keramischen Werkstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit, die über die Wandstärke der Gießform von Innen nach Außen einen genormten Temperaturgradienten ergibt, und wobei die Außenseite des Werkzeugs nicht wärmer als 600°C werden soll.

Zusätzlich wird in der Nähe der Innenschicht eine Heizeinrichtung integriert, um die Innenschicht auf Verarbeitungstemperatur zu erwärmen, die bei Stahl bis zu 1800°C betragen kann, vgl. Figur 6.



Figur 6: : Werkzeug zum Thixoformen aus Keramik mit Heizeinrichtung aus DE 10 2004 061 948 A1.

Die besondere Temperaturregelung der Werkzeugform wird auch in der Patentanmeldung US 2007/0044937 A1 hervorgehoben. Besonderes Augenmerk gilt dabei aber der Form, die zum Erwärmen und zum Transport des thixotropen Materials zur Druckgussmaschine dient. Diese ist aus einem hochfesten Warmarbeitsstahl mit regelbarer integrierter Heizeinrichtung und nur für Aluminiumlegierungen geeignet.

3. Ausblick

Für die Verarbeitung von Stahllegierungen wird die Entwicklung der Werkzeuge hin zu Keramiken und keramischen oder metallkeramischen Verbundwerkstoffen gehen. Die Warmarbeitsstähle als Formwerkzeug werden für die Verarbeitung von Leichtmetalllegierungen ihre Berechtigung behalten.

Insgesamt ist festzustellen, dass durch die Kombination von Urform- und Umformverfahren, wie es das Thixogießen und die anderen Thixoformingverfahren darstellen, alte Werkstoffe in neuer Qualität herstellbar sind. Die mechanischen Eigenschaften werden gegenüber dem Druckgussmaterial dabei so verbessert, dass sie geschmiedetem Material sehr nahe kommen und so den neuen Anforderungen im Automobilbau gerecht werden. Auf materialtechnischer Seite scheint das Potential der Thixoformingverfahren noch nicht erschöpft zu sein. Für die Verarbeitung von Stahllegierungen wird die Entwicklung der Werkzeuge hin zu Keramiken und keramischen oder metallkeramischen Verbundwerkstoffen gehen.

Literatur

[1] BÖGE, A.: " Vieweg Lexikon Technik". - Vieweg Sohn Verlags GmbH, Braunschweig, Wiesbaden, 1997, S. 442 und 448.

[2] NOLL, T. R. et al.: "Auswahl und Bewertung von Werkstoffen zur Formgebung im teilflüssigen Zustand". - In: Gießerei, Jahrgang 88, 2001, Heft 8, S. 60- 66.

[3] DOEGE, E.: "Thixoforming von hochschmelzenden Stahlwerkstoffen". - In: UTF science II/2001, S. 18-24.

[4] FUCH, K.-D.: "Für ein langes Leben". In: Gießerei-Erfahrungsaustausch, 2007, Heft 6, S. 58- 63.

Metallschaum – ein alter Werkstoff neu entdeckt

Martina Hensel & Dr. Stephanie Radeck, Abt. 1.24

Metallschaum als Verbundwerkstoff ist als Leichtbauwerkstoff im Maschinenbau und in der Medizin ein gefragter Werkstoff zu dem ständig neue Entwicklungen zu verzeichnen sind, obwohl das erste Patenbereits vor mehr als hundert Jahren erteilt wurde.

1. Geschichte

Die Verwendung von Metallschaum ist als Bauteil im Maschinen- und Automobilbau so aktuell wie nie zuvor. Normalerweise vermeidet man bei metallischen Bauteilen Porosität und unternimmt sowohl legierungstechnisch als auch verfahrenstechnisch alle Anstrengungen, um Poren im Material wegen der Gestaltfestigkeit und Korrosionsanfälligkeit zu vermeiden.

Dennoch eröffnen poröse Metalle seit mehr als hundert Jahren die vielfältigsten Anwendungsmöglichkeiten.

Bereits im Jahr 1883 erhielten die Engländer Mr. Frank Jamblyn Williams und Mr. Charles Howell aus Llanelly das erste deutsche Patent zur Herstellung poröser Bleiplatten für Akkumulatoren, vgl. DE 27 871 A. Bis 1959 folgten weltweit nur einige wenige Anmeldungen pro Jahr zu porösen Metallen oder Metalloxiden. Von 1960 bis zum Jahr 1980 verdoppelte sich zwar die Zahl der Patentanmeldungen auf diesem Gebiet , aber in den 80er und zu Beginn der 90er Jahre des vorigen Jahrhunderts waren die Anmeldezahlen wieder auf dem Niveau von 1 bis 2 Anmeldungen pro Jahr. Man hätte meinen können, auf dem Gebiet der porösen Metalle gäbe es nach 100 Jahren nichts Neues zu erfinden.

Ab Ende der 1990er Jahre folgte dagegen ein Anmeldeboom auf dem Gebiet der Herstellung von porösen Metallen und Verbundwerkstoffen, in die Metallschäume integriert wurden. Die Anmeldezahlen waren in den Hauptanmeldeländern, einschließlich EP und PCT gegenüber den Vorjahren sprunghaft von 2 auf ca. 150 Anmeldungen pro Jahr gestiegen.

Bereits zu Beginn der Entwicklung von Metallschaum wurden poröse Metalle nach der Beschreibung des 1929 erteilten Patentes DE 558 751 A aus den pulverförmigen Oxiden der Metalle Chrom, Eisen, Nickel, Mangan und Kobalt, aber auch aus den Oxiden des Kupfers, Zinks, Molybdäns oder Bleis hergestellt.

Da neben groben Poren in den meisten Schaummaterialien auch ultrafeine Poren vorlagen, waren diese Materialien als Träger für Katalysatormassen, insbesondere zur Herstellung von mit Aktivstoffen durchsetzten Katalysatoren, geeignet.

In den ersten 50 Jahren seit 1883 wurden bereits poröse Lagermetalle, Platten für Akkumulatoren, Filterkörper, Füllstoffe für Wärmetauscher und dergleichen, aus porösen Metallen hergestellt. Die Filter waren je nach Porositätsgrad für die verschiedensten Anwendungen geeignet, wie z.B. zur Entstaubung, Klärschlammreinigung, Trennung von Kohle-/ Ölgemischen in der Kohle- und Mineralstoffindustrie oder bei der Raffination von Speiseöl, welches mit Aktivkohle raffiniert wurde. Ferner wurde bereits in dieser ersten Zeit die Verwendung des Metallschaums für Diaphragmen, Gussformen, Sicherheitspatronen zur Verhütung des Rückschlagens von Flammen bei Brennern und Gebläseflammen und auch für Elektromagnetkerne in Patenten angesprochen.

2. Herstellung und Verwendung von Metallschaum

2.1. Herstellungsverfahren und allgemeine Anwendungen von Metallschaum

Wie der Name Metallschaum bereits suggeriert, handelt es sich um ein Material, welches aussieht wie Schaum, wie Seifenschaum, Polystyrolschaum und dergleichen, nur eben aus Metall. Und was läge näher, als eine Herstellung durch Aufschäumen in Betracht zu ziehen? Aber wie schäumt man Metall auf und welche Mittel sind geeignet Metalle aufzuschäumen? Bei den pulverförmigen Oxiden der Metalle lag ein Erhitzen mit Gasen oder Dämpfen, wie

Wasserstoff, Methan, Kohlenoxid, Leuchtgas, Generatorgas, Ammoniak, Methan, Formaldehyd und dergleichen oder Flüssigkeiten, wie Hydroxylamin- oder Hydrazinhydratlösungen auf der Hand, weil diese Stoffe stark reduzierend wirken. Die Ausgangsstoffe wurden mit der reduzierend wirkenden Substanz und Suspensionsflüssigkeit, meist Wasser, unter kräftigem Schlagen so lange gerührt, bis sich ein Schaum gebildet hatte.

Es wurde auch auf die Möglichkeit hingewiesen, zuerst einen Schaum zu erzeugen und dann die Metalle oder Metalloxide unterzurühren. Als Schaum erzeugende Mittel kamen dann aromatische Kohlenwasserstoffe oder deren Salze oder Seifen zum Einsatz, die mit Flüssigkeit zu Schaum gerührt wurden. Nachdem das Metall zugegeben und der gewünschte Schaum erzeugt wurde, musste die Suspensionsflüssigkeit wieder ausgetrieben werden: Der mit Metall versetzte fertige Schaum wurde dazu in Formen gestrichen oder gegossen und dort bei leicht erhöhten Temperaturen getrocknet und anschließend wurden bei höheren Temperaturen die flüchtigen Komponenten entfernt.

Unter Umständen war es zweckmäßig, Bindemittelzusätze zu verwenden, um eine mechanische Verfestigung der Schaummasse beim Erhitzen zu begünstigen. Als Bindemittel wurden Kieselsäurelösungen, plastische Bindetone, Zement, Wasserglas, leicht schmelzbare Metalle, Zucker, Stärke, Eiweiß, Bitumen, Harze usw. vorgeschlagen. Als stabilisierendes Gerüst war auch ein Metallgerüst, wie Metallwatte, Metallwolle oder Metallgeflecht, vorgeschlagen worden, welches bereits bei der Herstellung im Metalloxid platziert wurde.

Schon von Beginn der Entwicklung an hatte man erkannt, dass in die porösen Körper auch weitere Materialien eingebettet werden können und es wurde auch beschrieben, dass Isoliermassen, wie Lacke, Kautschuk oder die Polymerisationsprodukte von Butadien in flüssiger Phase in die Poren eingebracht werden können. Anschließend wurde der Körper mittels Druck verfestigt.

Ferner wurden bereits in den Anfangsjahren von 1883 bis 1929 pulverförmige Stoffe, wie Kieselsäure-Gel, Aktivkohle, aktive Tonerde oder Basenaustauscher, sowie katalytisch wirkende Stoffe in die Porenwerkstoffe eingebettet. Das pulverförmige Material wurde dabei eingeblasen oder eingesaugt und anschließend durch Pressen verfestigt.

Die katalytisch wirkenden Stoffe ließen sich aber noch einfacher durch selbsttätige Abscheidung zwischen den Poren platzieren. Hierzu tränkte man die porösen Körper mit Lösungen solcher Stoffe, die einen in der Hitze löslichen Bestandteil aufwiesen, wie Nitrate, Acetate, Ammoniumverbindungen, Chloride und Komplexsalze.

Selbst eine metallische Beschichtung der inneren Poren wurde bereits in den ersten 50 Jahren seit der ersten Anmeldung im Jahre 1883 beschrieben und hierzu wieder verschiedenste denkbare Verfahren genannt, die von der Elektrolyse über das einfache Eintauchbeschichten bis hin zum Metallpulverspritzbeschichten reichten oder es wurden Metalldämpfe durch die Poren geleitet, vgl. DE 558 751 A und US 10 51 814 A. Ferner wurden Metalloide, wie Kohle, Ruß und dergleichen in der Weise in den Poren abgeschieden, dass man die Stoffe innerhalb der Poren mittels thermischer Zersetzung oder partieller Verbrennung verkohlte. Damit wurde beispielsweise Glanzkohle in porösem Kupfer oder Eisen abgeschieden, wobei das Eisen zuvor noch mit Tonerdesol getränkt und getrocknet wurde. Solcherart beschichtete poröse Körper wurden zur Erzeugung von Essigsäure aus Acetaldehyd benutzt.

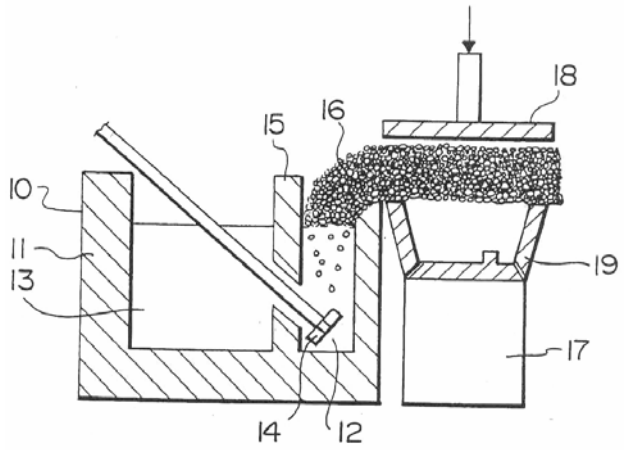
Da sich die Metallschäume in der Regel leicht durch Sägen, Drehen, Hämmern, Feilen, Stanzen usw. bearbeiten lassen und ferner schon durch geringen Druck miteinander verbunden werden können, waren vielfältigste Verwendungen denkbar.

Auch das Einpressen vorgefertigter Schäume in nichtporöses Material war einfach, indem das nichtporöse Material erwärmt und der Schaum in den zugänglichen Hohlraum eingelegt wurde. Beim Abkühlen schrumpfte das nichtporöse auf das poröse Material auf und hatte somit einen festen Sitz in seiner Umhüllung.

Durch Einpressen von vorgefertigtem Metallschaum in nichtporöses Material wurden schon in frühen Jahren der Entwicklung von Metallschaum Wärmetauscher hergestellt, vgl. DE 558 751 A aus dem Jahr 1929.

Da die Herstellung vor allem offenporiger Metallschäume bis in die 1990er Jahre sehr teuer war (650 € pro Liter), vgl. [1], beschränkte sich die breite Anwendung auf geschlossenporige Schäume, die pulvermetallurgisch oder schmelzmetallurgisch hergestellt wurden.

Eine bis heute weit verbreitete Herstellungsmöglichkeit für Aluminiumschaum ist das Aufschäumen von Aluminiumschmelze mit Wasser oder Titanhydrid, vgl. Figur 1.

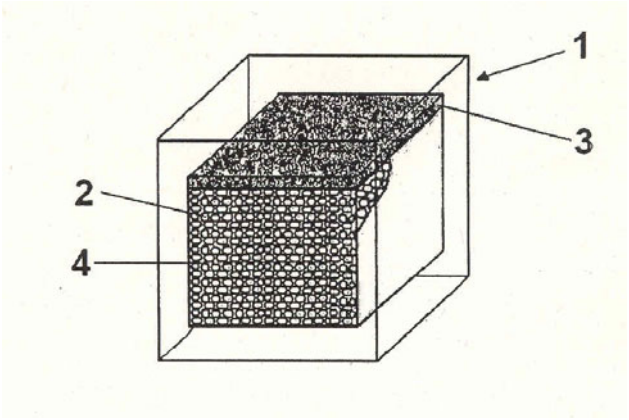


Figur 1: Aufschäumbehälter für Aluminiumschmelze mit nachgeordneter Auffangform aus WO 94/09931 A1.

Dabei wird in einem abgetrennten Bereich des Schmelzebehälters die Aluminiumschmelze gerührt, wobei gleichzeitig das Aufschäummittel mittels des Rührgerätes eingeblasen wird. Der Schaum entweicht nach oben und wird in einer Form gefangen und eingepresst. Man kann das Aufschäummittel aber auch direkt in eine Form geben, in der der Schaum erzeugt und gleichzeitig in Form gebracht wird.

Aber erst mit der preiswerten gießtechnischen Herstellung von geschlossen- oder offenporigen Schäumen und Metallschaumverbundkörpern erlebten poröse Metalle seit ca. 1999 eine Renaissance, die bis heute anhält und in internationalen Konferenzen gipfelt. Vom 5.-7. September 2007 findet bereits die 5. Konferenz zu porösen Metallen und Metallschaum in Montreal, Kanada statt.

Offenporige Metallschäume werden inzwischen, wie aus dem Feinguss bekannt, mittels „verlorener Formen“ hergestellt. Das heißt, in eine Gießform werden Platzhalter positioniert, die mit metallischer Schmelze umgossen werden. Nach dem Erstarren des Metalls oder der Metalllegierung werden die Platzhalter entfernt. Als Platzhalter kommen alle Materialien in Frage, die auch aus dem Feinguss als Positivmodell bekannt sind, wie Wachs, Styropor oder Kunststoffschwamm, vgl. Figur 2.



Figur 2: Form mit Metallschaumkern in zwei verschiedenen Porositäten, DE 10 2005 023 595 A1.

Ferner werden schlammbeschichteter Kunstharzschaum oder ein Kohlenstoffskelett als Positivmodell offenbart, vgl. US 3 695 869 A. Mit diesen Positivmodellen lassen sich noch gezielter Porengröße und Porenverteilung einstellen.

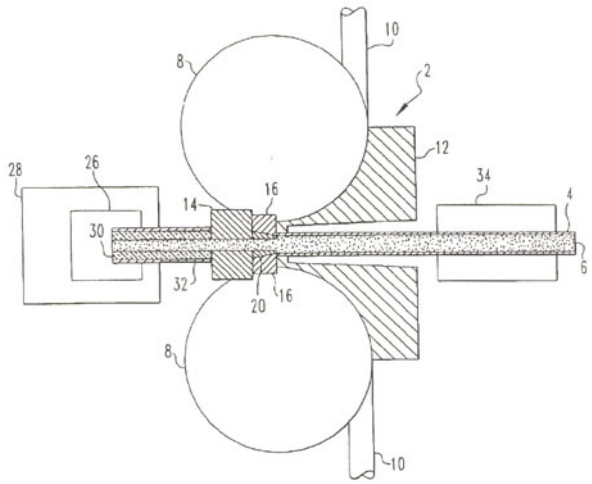
Noch variabler in der Erzeugung des Porenvolumens und der Porenvereilung scheint eine Herstellung eines Positivmodells aus einer Stützschale, die metallische oder keramische Hohlkugeln in der Größenordnung von 0,1 bis 20 mm enthält, zu sein. In der DE 100 46 174 A1 wird beschrieben, dass diese Hohlkugeln mit verschiedensten Funktionsschichten versehen werden können, die durch physikalische oder chemische Behandlung fließfähig, plastisch und/oder elastisch verformt werden können. Dadurch können die Stützschale einerseits als auch die Hohlkugeln mit der Stützschale andererseits oder die Hohlkugeln untereinander adhäsiv und/oder formschlüssig fixiert werden.

Die Funktionsschichten können beispielsweise als Korrosionsschutz der Hohlkugeln des Positivsmodells dienen. Eine Besonderheit ist, dass als Funktionsschichten auch solche Materialien verwendet werden können, die beim Erwärmen das Volumen vergrößern, also Aufschäumen. Hierdurch ist es möglich, gezielt in unterschiedlichen Bauteilbereichen unterschiedliche Porendurchmesser in vorher bestimmbarem Ausmaß zu erzeugen.

Weiterhin ist es so auf einfache Weise möglich, beim Gießen mit Stützschalen versehene Hohlkugeln nur in Teilbereichen des fertigen Gussstückes anzuordnen, da sie sich wie andere Eingießteile leicht positionieren lassen. Auf diese Weise kann in einem Gussschritt ein Verbundbauteil aus Metall mit Bereichen aus Metallschaum hergestellt werden.

Zur Herstellung von Leichtbauverbundkörpern nutzt man neben der gießtechnischen Variante mit Platzhaltern nach wie vor aber auch die reine Aufschäummethode. Dabei wird in einem Ofen oder in einem vorgefertigten metallischen Profil Metallpulver und Treibmittel gefüllt und der Vormaterial-Formkörper in diesem Zustand so weit erhitzt, dass das Treibmittel Gas abspaltet und so das Metall in dem Formkörper aufschäumt. Der Metallschaum nimmt dabei die Form des Vorformkörpers an und verschweißt mit dessen innerer Oberfläche. Durch starke Kühlung erstarrt der Schaum in der vorliegenden Form.

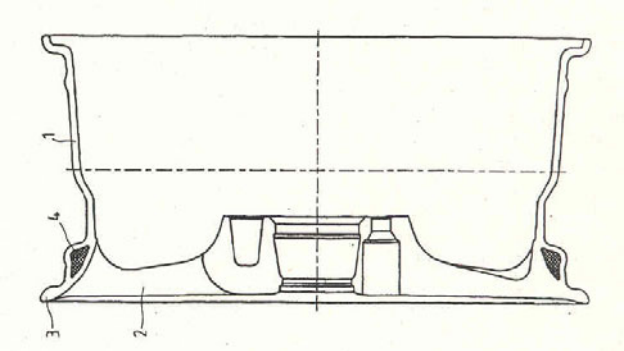
Eine andere Möglichkeit ist die Herstellung von Verbundkörpern durch gemeinsame Extrusion von Aluminiumschaum mit Beschichtung, wie es in der US 6 808 003 B2 beschrieben wird, vgl. auch Figur 3.



Figur 3: Extrusion eines Verbundwerkstoffes aus Metallschaum und Beschichtung aus US 6 808 003 B2.

2.2. Verwendung im Maschinenbau

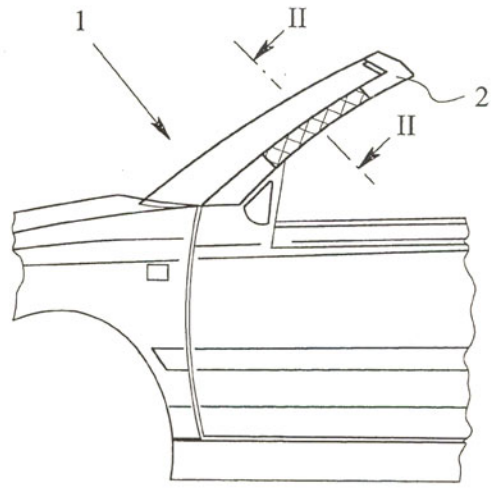
Endformnahe Schaumbauteile, die separat gefertigt und nachfolgend mit Metall umgegossen werden, können beispielsweise in Leichtmetallrädern, vgl. Figur 4, eingesetzt werden. Dabei wurde in den Hohlraum bei (4) in Figur 4 Metallschaum - an Stelle eines eingegossenen hohlen Rohres als Verstärkung - in Form eines den Hohlraum komplett ausfüllenden Einlegeteiles eingegossen.



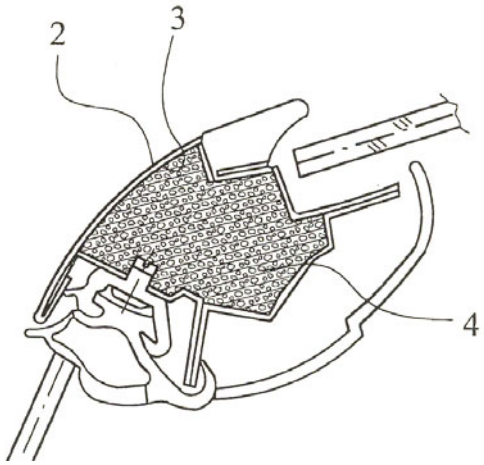
Figur 4: : Leichtmetallrad mit Einlegeteil (4) aus Metallschaum aus DE 198 26 848 C2.

Aber nicht nur die Verstärkung des Radhohlraumes ist beim PKW möglich. Die gesamte Karosserie kann zur Erhöhung der Knicksteifigkeit, zur Energieaufnahme und/oder zur Gewichtsreduktion mit Metallschaum verstärkt werden. Der Einsatz bei Karosserieteilen ist dabei nicht nur im Türbereich möglich, sondern auch in allen Stützpfeilern, also der A-, B- oder C-Säule, dem Dach, der Motorhaube und dem Rahmen sowie im Untergestell, vgl. Figuren 5 und 6.

Damit wird es möglich, die gesamte Karosserie trotz Leichtbauweise sicherheitstechnisch stark zu verbessern, denn es gelingt nicht nur eine Bauteilstabilität wie bei Stahlkarosserieteilen, sondern vielmehr eine Dämpfung der Aufprallenergie zum Schutz der Insassen. Dabei ist man bemüht, die bisher bereits mögliche Energieabsorption durch die Verbesserung des zellularen Aufbaus des Aluminiumschaums von 5kJ/kg auf 8 kJ/kg zu steigern.

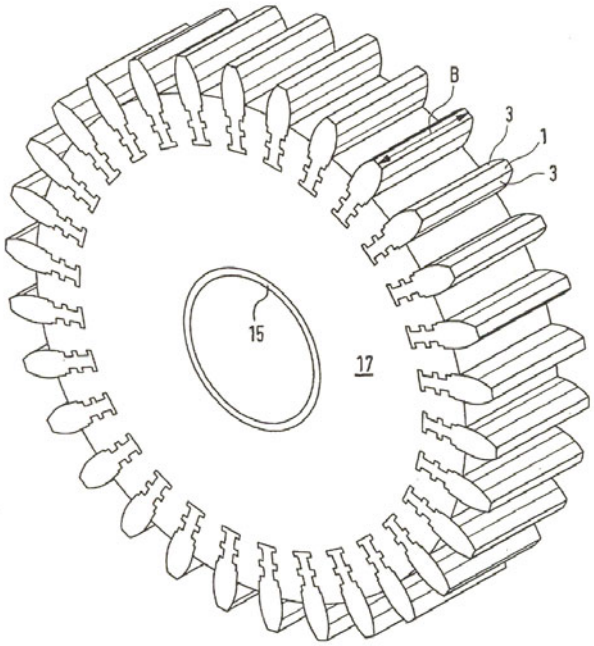


Figur 5: Mit Metallschaum verstärkte A-Säule eines PKW gemäß DE 199 25 457 C2.



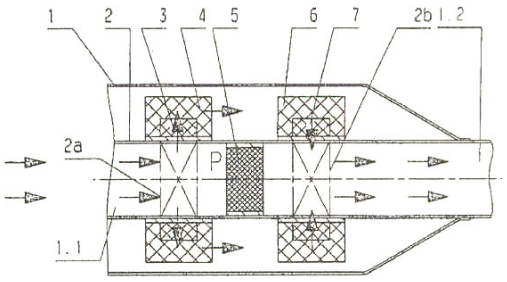
Figur 6: Querschnitt der in Figur 2 gezeigten A-Säule.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der Metallschäume ist die Gewichtsersparnis und Geräuschdämpfung bei Zahnrädern, vgl. Figur 7. Bereiche des Zahnradkörpers (17) können aus Metallschaum aufgebaut oder zumindest teilweise mit Metallschaum gefüllt sein. Die Zähne am Umfang des Zahnrades sind weiterhin aus hochbelastbarem Vollmaterial.



Figur 7: Zahnrad, bestehend aus einem Metallschaumzahnradkörper und Zähnen aus Vollmaterial gemäß WO 2006/010602 A2.

Darüber hinaus werden aus Metallschäumen in der Automobilindustrie neben den Katalysatoren auch die Russpartikelfilter für Dieselmotoren hergestellt. Als Filtermaterialien kommen dabei offenporige Schaumkeramik oder offenporiger Metallschaum in Betracht, vgl. DE 20 2005 011 604 U1 und Figur 8.



Figur 8: Dieselrusspartikelfilter mit porösen Filtern 3,4,6 und 7 aus offenporigem Metallschaum oder Schaumkeramik aus DE 20 2005 011 604 U1.

2.3. Verwendung in der Medizintechnik

Ein weiteres interessantes Gebiet, porige Metalle einzusetzen, ist die Medizintechnik und hier insbesondere der Bereich der Knochentransplantationen.

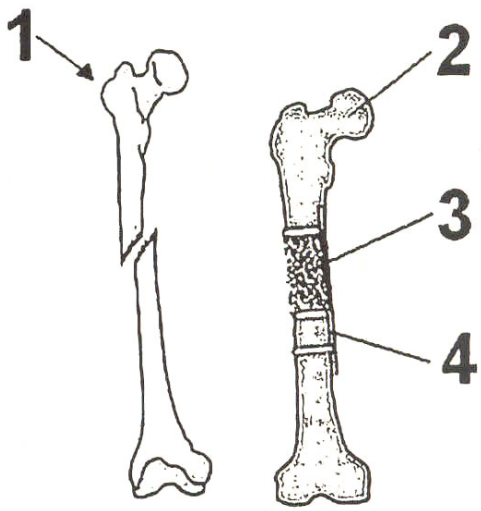
Schwammige Knochenimplantate werden dabei sowohl

aus Keramik aber auch aus Titan oder Tantal hergestellt und haben den Vorteil gegenüber Vollmaterial, dass sie von Gewebe oder mineralisierten Knochen durchwachsen werden und somit als bleibendes Gerüst dienen können, vgl. Figur 9.

Ferner sind diese schwammigen Implantate Zell- und Geweberezeptoren, Träger bioaktiver Stoffe, erhöhen die Röntgentransparenz und setzen die Erzeugung von Störsignalen bei Magnetresonanzverfahren herab.

Voraussetzung ist auch hierbei wieder die Offenporigkeit des Implantats und insbesondere der Grad der miteinander in Verbindung stehenden Poren und die Porengröße.

Als optimale Porengröße für das fibrovaskuläre Einwachsen der Zellen gilt eine Porengröße von 0.015 - 0,050 mm, wobei für das Einwachsen von mineralisierten Knochen eine Porengröße von größer als 0,15 mm gefordert ist. Porengrößen von weniger als 0,01 mm verhindern ein Einwachsen der Zellen und Porengrößen zwischen 0,05 und 0,15 mm führen zu einer Osteoidbildung, vgl. EP 560 279 B1.



Figur 9: Knochenimplantat aus Schwammstruktur 3 zwischen den vom Bruch unterbrochenen Knochen 2 und fixiert mit einer Schiene 4 aus DE 10 2005 037 141 A1.

Neben der posttraumatischen Versorgung von Knochenbrüchen ist damit auch gewährleistet, dass osteoporose- und tumorbedingte Knochendefekte dauerhaft stabilisiert werden können.

Eine hohe Stabilität des Implantatgerüstes und ein optimiertes Einwachsen des organischen Gewebes ergibt sich dann, wenn die Porosität von innen nach außen und umgekehrt kontinuierlich zu- oder abnimmt.

Außer der gießtechnischen Herstellung nach Art des Feingusses ist es auch hier möglich, mit Hohlkugeln zu arbeiten, vgl. DE 10 2004 045 410 A1und Figur 10.

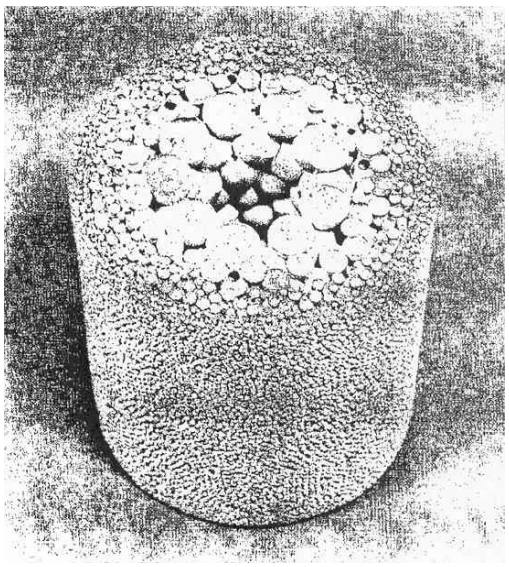
Durch den Einsatz von Hohlkugeln ist es nicht nur möglich, die Porosität einzustellen, sondern die verschiedensten Stellen des Implantats mit verschieden dicken Hohlkugeln und materialtechnisch mit verschiedenem E-Modul auszustatten, so dass eine verschiedene Verformbarkeit und Festigkeit innerhalb des Implantates erzeugt werden kann.

Die metallischen oder auch keramischen Hohlkugel-Implantate können mittels Beschichtung auf einen polymeren Kern, ggf. durch Pyrolyse und anschließende Sinterung hergestellt werden oder sie werden als Grünkörper, also ohne Sinterung in einer Form gehalten und dann erwärmt, wodurch die Hohlkugeln untereinander versintert werden.

Dem Implantat können dabei nicht nur unterschiedliche Porosität und mechanische Eigenschaften verliehen werden. Vielmehr ist es auch möglich, das Implantat aus verschiedenen Materialien herzustellen. So wird nach der DE 10 2004 045 410 A1 am äußeren mit dem Gewebe in Verbindung stehenden Umfang des Implantates biokompatibles Keramikmaterial eingesetzt, was mit steigender Porengröße in metallische Hohlkugeln im Inneren übergehen kann, vgl. Figur 10.

Ebenso kann ein solcher Implantatkörper aus Hohlkugeln und offenporigen Schäumen zusammengesetzt sein.

Es ist auch möglich, sich selbst auflösende Keramik mit Metallhohlkugeln und/oder Metallschaum zu verwenden, die zu Beginn des Heilungsprozesses das Einwachsen von Gewebe fördert. Beispiele für solche biokompatiblen Keramiken sind, neben dem Aluminiumdioxid, Hydroxylapatit oder Kalziumphosphate.



Figur 10: Aus Hohlkugeln aufgebautes biokompatibles Material mit unterschiedlicher Porengröße aus der DE 10 2004 045 410 A1.

Da die unterschiedlichen Materialien durch form- oder stoffschlüssige Verfahren, wie Sintern, Löten, Kleben, Gießen o.ä., verbunden werden können, ist eine schier unbegrenzte Gestaltungsmöglichkeit in Form und Materialverbund gegeben.

Literaturangaben

[1] BANHART, J.: „ Offenporige Aluminiumschäume - Eigenschaften und Anwendungen“. - In: Aluminium Jahrgang 75,1999, Heft 12, Sonderdruck des Fraunhofer Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Bremen.

Zusammendrückbare Spritzenkörper

Dr. Claus Medicus, Abt. 1.44

Spritzen mit einem zusammendrückbaren Spritzenkörper sind der Prototyp der modernen Spritzen mit starrem Spritzenzylinder. Sie existieren auch heute noch, haben sich aber immer mehr dem modernen Spritzentyp angenähert.

1. Einleitung

Eine Spritze, so wie wir sie kennen, besteht aus einem Spritzenzylinder, auf den ein Spritzenröhrchen aufgesteckt ist, und einer Kolbenstange, die eine Flüssigkeit, welche sich in dem Spritzenzylinder befindet, unter Druck aus diesem heraus treibt. Das ist schon deshalb ein relativ kompliziertes System, weil auch eine einfachere Lösung denkbar ist, welche im übrigen über Jahrhunderte von den Menschen bevorzugt angewendet wurde.

Anstelle des Spritzenzylinders befestigte man eine Art Schlauch an einem Spritzenröhrchen. Eine Kolbenstange war nicht nötig, da man auf die in dem Schlauch befindliche Flüssigkeit dadurch Druck ausübte, dass man den Schlauch mit den Händen ausdrückte.

Die Verwirklichung dieses simplen Prinzips erfolgte auf den unterschiedlichsten technischen Gebieten, wobei ein Schwerpunkt im Bereich der Medizintechnik zu sehen ist.

2. Frühe Beispiele in der Geschichte

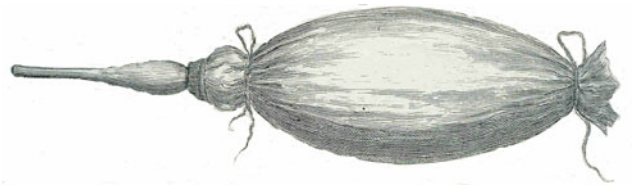
2.1. Spritze zum Feuerlöschen

Apollodor von Damaskus (ca. 65 – ca. 130 nach Christus), der als Baumeister unter Kaiser Trajan für diesen u.a. die berühmte Donaubrücke (Trajansbrücke im heutigen Rumänien) errichtete, berichtet in seinem Buch über die Kriegswerkzeuge (Poliorcetica) von der Verwendung schlauchartiger Spritzen. Um den oberen Teil eines brennenden Gebäudes löschen zu können, sollte man mit Wasser gefüllte Schläuche an langen Röhren befestigen, so dass man durch Zusammenpressen der Schläuche das Wasser aus den Röhren an den brennenden Ort spritzen kann [1].

2.2. Klistierspritzen

Hippokrates (ca. 460 – ca. 370 vor Christus) verwendete eine präparierte Harnblase, in die ein Schilfrohr als Spritzenröhrchen gesteckt wurde, als Spritze.

Deren ungefähres Aussehen zeigt Figur 1, die der von Denis Diderot (1713 - 1784) und Jean-Baptiste le Rond d´Alembert (1717 - 1783) edierten *Encyclopédie ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers* entnommen ist [2].



Figur 1: aus der Enzyklopädie von Diderot und d´Alembert.

Um eine solche Vorrichtung herzustellen, knotete man zunächst das eine Ende der Harnblase an dem Spritzenröhrchen fest, befüllte dann die Harnblase mit einer Flüssigkeit und knotete zuletzt die Blase an ihrem hinteren Ende zu.

Bei der Verwendung hielt man diese Spritze mit der einen Hand an ihrem Spritzenröhrchen fest, und konnte so mit der anderen Hand die mit Flüssigkeit gefüllte Harnblase ausdrücken.

Noch in der Mitte des 18. Jahrhunderts, so erfährt man in der oben genannten französischen Enzyklopädie, hat man im Ausland, v.a. in Holland, diese Art einer präparierten Harnblase als Spritze eingesetzt, während sich parallel dazu in Frankreich die Zinnspritzen mit ihrem starren Spritzenzylinder und ihrer starren Kolbenstange als modern durchsetzten.

Auch zu Beginn des 19. Jahrhunderts war die Situation ähnlich. In London verwendeten die etwas weniger bemittelten Leute immer noch derartige Harnblasen als Klistiere. In Brasilien wurde zu Klistierzwecken ein Stück Rinderdarm eingesetzt, der an einem Ende zugeknotet wurde, und dessen andere Öffnung in eine Holzkanüle überging [3].

Diese Protospritzen wurden im Laufe der Zeit mehr und mehr abgewandelt. Nicht nur, dass man künstliche Materialien für den Schlauch verwendete, man stattete diesen archaischen Spritzentyp zunehmend auch mit den Merkmalen der modernen Spritzen aus.

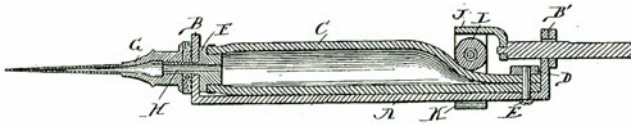
In Nordamerika gebrauchte man für Darmspülungen bereits eine Flasche aus elastischem Gummi und eine Düse aus Elfenbein (ebenfalls [3]).

3. Weiterentwicklung der zusammendrückbaren Spritzen

Bei der Verwendung eines Naturdarmes oder einer Tierblase als Spritzenkörper gelang es nicht immer, den Schlauch beim Ausdrücken vollständig zu entleeren. Auch bei den moderneren Schlauchspritzen war die endgültige Entleerung problematisch. Dementsprechend hoch ist die Zahl der Vorschläge, die gemacht worden sind, um hier Abhilfe zu schaffen.

3.1. Auspressen des Schlauches mit einer Rolle

1889 wurde eine Schlauchspritze patentiert [4], deren Erfinder aus den USA stammten. Sie verwendeten als elastischen Spritzenkörper einen übersponnenen Gummischlauch C. Diesen befestigten sie mittels einer Klammer D und einer Schraube E, sowie über den Rohransatz F an einer Platte A, B, B^1. Da durch die Befestigung ein direktes manuelles Ausdrücken des Schlauches C nur noch schlecht möglich war, montierten die Erfinder zusätzlich eine Art Kolbenstange an der Schlauchspritze, nämlich die Druckstange I. Diese drückte jedoch nicht auf einen Kolben im Inneren des Spritzenkörpers, wie es bei den Spritzen mit starrem Spritzenzylinder üblich ist, sondern über eine Druckrolle L von außen auf den Schlauch C, und entleerte durch langsames Voranbewegen den Schlauch C komplett.



Figur 2: Aus DE 51 430 A.

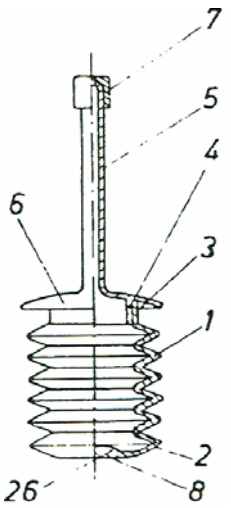
3.2. Verwendung eines Faltenbalges

Wollte man den Schlauch weiterhin direkt mit der Hand ausdrücken, so musste dieser auf andere Art und Weise modifiziert werden, um die gewünschte vollständige Entleerung zu erreichen.

Vorbilder für eine solche Lösung waren bereits in der Form des Faltenbalges bekannt. Eine wichtige Anwendung eines solchen Balges ist das „Herausspritzen“ von Luft, um die Temperatur eines Feuers zu erhöhen. Faltenbälge (Blasebälge) wurden daher schon im Mittelalter zum Schmelzen von Erz eingesetzt, und es sind uns einige Abbildungen solcher Vorrichtungen von Georg Agricola (1494 - 1555) überliefert [5].

Auch in der Medizintechnik findet man den Faltenbalg wieder. So wird in der Schrift [6] aus dem Jahre 1956 eine Klistier- oder Injektionsspritze beschrieben, die einen balgartigen, von Hand zu bedienenden Ampullenbehälter aufweist, der sich durch Druck mit dem Daumen bis zur praktisch völligen Entleerung der Ampulle zusammendrücken lässt.

Figur 3 zeigt eine solche balgartige Klistierspritze.



Figur 3: aus DE 171 90 94 U.

Die balgartig geformten Spritzenkörper waren laut der [6] aus Kunststoff gefertigt. Hierzu wurde ein üblicher glatter

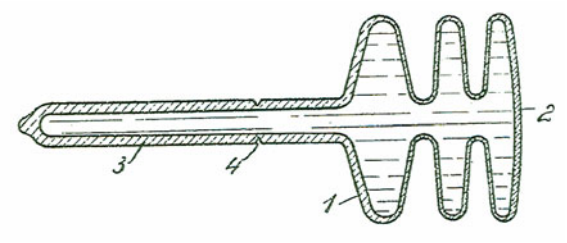
Kunststoffschlauch an zwei Stellen mit Hilfe einer Zange zusammengedrückt und der Schlauch daraufhin an diesen Stellen mit Hochfrequenzenergie verschweißt. An einer der beiden Stellen brachte man dann die Öffnung der späteren Ampullenspritze an. Ein solches Schlauchstück erhitzte man in einer beheizten Form, bis es plastisch wurde, und konnte es so zur Balgform aufblasen. Diese Balgform behielt das Schlauchstück nach dem Abkühlen bei. Es wurde ferner vorgeschlagen, dem Schlauch die balgartige Gestalt bereits bei dessen Herstellung zu geben, so dass man nicht im nachhinein einen bereits abgekühlten Kunststoffschlauch erneut plastifizieren musste.

Aus der französischen Patentanmeldung [7], die aus dem Jahre 1988 stammt, ist ebenfalls ein faltenbalgartiger Spritzenkörper bekannt, dessen Ähnlichkeit zu einem Akkordeon betont wird.

3.3. Verwendung eines Faltenbalges aus Glas

Die aus der [6] bekannte Spritze konnte sowohl als Klistierspritze (mit rohrartigem Ansatz), wie auch als Injektionsspritze (mit eingesetzter Injektionsnadel) verwendet werden. Auch die in der [4] beschriebene Schlauchspritze war mit einer Nadel versehen. Das Material, aus dem die elastischen Spritzenkörper solcher Spritzen bestanden, war zwar problemlos bei den Nähr- bzw. Spüllösungen der Klistierspritzen einzusetzen; es hielt jedoch bei den Injektionsspritzen dem Angriff der Arzneistoffe nicht immer stand, oder aber ging sogar unerwünschte chemische Verbindungen mit diesen ein. Daher war Glas zur Aufbewahrung dieser Arzneistoffe eindeutig bevorzugt. Auch heute noch werden Arzneimittel in Glasampullen abgefüllt und gelagert. Und auch heute noch hat man das Problem, eine einmal angebrochene Glasampulle vollständig zu entleeren.

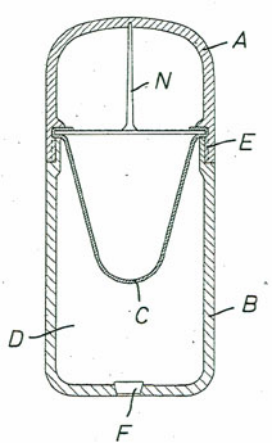
Hier soll die in der [8] vorgeschlagene Glasampulle aus dem Jahre 1930 Abhilfe schaffen, die sich das oben beschriebene Prinzip des Faltenbalges für eine bessere Entleerung zu Nutzen macht. Dabei wurde der bauchige Teil 1 der Ampulle wellrohrartig und sehr dünn ausgeführt, so dass die Ampulle in der Längsrichtung etwas zusammengedrückt werden konnte. Figur 4 zeigt, was gemeint ist. Durch Aufsetzen einer hohlen Nadel an der Sollbruchstelle 4 konnte sogar subkutan injiziert werden.



Figur 4: aus DE 577 611 A.

3.4. Auspressen mit Druckluft oder Druckwasser

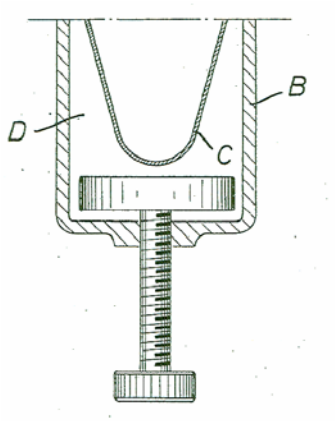
Anstelle einen elastischen Spritzenkörper mit der Hand auszudrücken, konnte man, wie in der [4] beschrieben, z.B. eine Rolle hierzu verwenden. Schrift [9] (siehe Figur 5) schlägt als weitere Alternative vor, durch das Ventil F in die Hülle B Druckluft oder aber Druckwasser zum Ausdrücken des zusammenpressbaren Spritzgutbehälters C einzupressen.



Figur 5: aus DE 178 96 94 U.

3.5. ... mit Hilfe eines Preßstempels

Dieselbe Schrift [9] schlägt weiter vor, einen Preßstempel auf den Spritzgutbehälter C wirken zu lassen, der diesen entweder unter Federdruck zur Entleerung zwingt, oder aber über ein Schraubgewinde durch Hineinschrauben gegen den Behälter C gepresst werden kann. Letztere Variante geht aus Figur 6 hervor.

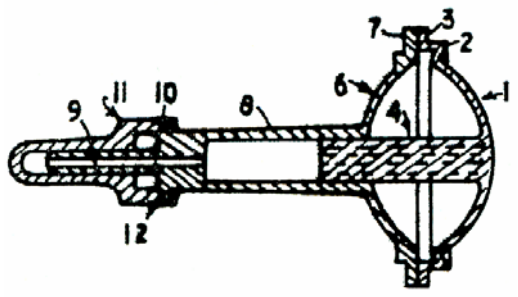


Figur 6: aus DE 178 96 94 U.

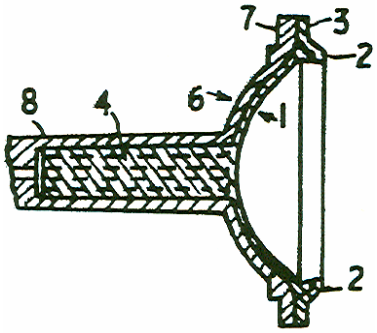
3.6. Verwendung von Halbschalen

Durch die Eigenelastizität des zusammendrückbaren Flüssigkeitsbehälters besteht bei den schlauchartigen Injektionsspritzen die Gefahr, dass bereits ausgespritzte Flüssigkeit wieder in den elastischen Spritzenkörper zurückgesaugt wird.

In der Schrift [10] ist eine Spritze offenbart, bei der die hintere Halbschale 1 vollständig in die vordere Halbschale 6 eingedrückt werden kann, so dass sich die Innenflächen derselben in dichter Anlage gegeneinander befinden, und so das Medikament aus dem Flüssigkeitsbehälter herausdrücken. Da die hintere Halbschale 1 nach dem Eindrücken in ihrer eingedrückten Lage verbleibt, wird auch kein ausgespritztes Medikament wieder zurückgesaugt. Figur 7 zeigt die Spritze in ihrer Ausgangsstellung, Figur 8 im eingedrückten Zustand.



Figur 7: aus DE 1 284 045 A.



Figur 8: aus DE 1 284 045 A.

3.7. ... und einem integrierten Kolben

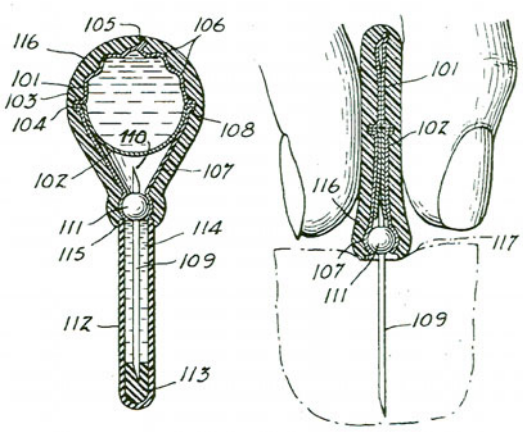
Die Spritze aus Dokument [10] besitzt noch ein weiteres Bauteil, das dazu beiträgt, eine vollständige Entleerung des Flüssigkeitsbehälters zu erreichen. Während bei den Spritzen aus der [4] oder [9] eine Rolle bzw. ein Stempel von außen auf den elastischen Spritzenkörper wirkt, ist bei der aus der [10] bekannten Spritze noch zusätzlich ein Kolben 4 in das Innere des Flüssigkeitsbehälters integriert worden, der den an die Halbschalen 1 und 6 angrenzenden hohlzylindrischen Körper 8 entleert. Dies ist ebenfalls den Figuren 7 und 8 gut zu entnehmen.

4. Zusätzliche Gesichtspunkte

4.1. Sterilität – völlig verschlossene Ampullen

Das Problem, bei den Ampullenspritzen die für bestimmte Medikamente nötige Sterilität zu gewährleisten, ist bereits weiter oben angesprochen worden. Vorteilhaft sind die Ampullen aus Glas gefertigt, dann sind diese aber kaum mehr elastisch komprimierbar. Sollten die Spritzenzylinder weiterhin aus einem biegsamen Material bestehen, konnte alternativ z.B. Aluminium für die Ampulle verwendet, und die Aluminiumampulle zusätzlich zu ihrem Schutz noch mit einem elastischen Kunststoff übergossen werden.

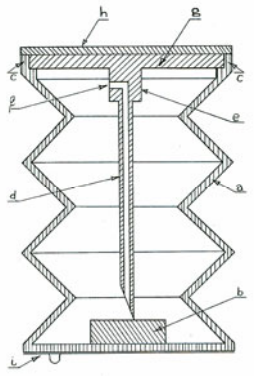
Die Sterilität solcher Ampullen wurde noch dadurch erhöht, dass die flexible, mit einem Medikament gefüllte Ampulle gänzlich verschlossen war. Schrift [11] stellt einen solchen Spritzentyp vor (siehe Figur 9). Durch das Zusammendrücken der Ampulle mit Daumen und Zeigefinger wurde die Ampulle in Richtung der Spitze 110 einer nahe gelegenen an ihren beiden Enden spitzen Injektionsnadel 109 deformiert, und die Ampullenwand von dieser Spitze 110 durchbohrt, so dass die Injektionsflüssigkeit ausfließen konnte.



Figur 9: aus DE 1 076 899 A.

4.2. ... mit zusätzlich integrierter Nadel

Während bei der Ampullenspritze der Schrift [11] die Injektionsnadel 109 außerhalb der gänzlich verschlossenen Ampulle vorgesehen war, wurde alternativ hierzu auch vorgeschlagen, die Nadel innerhalb des biegsamen Spritzenkörpers in der Injektionsflüssigkeit anzuordnen. Aus der Schrift [12] ist ein Faltenbalg bekannt, der mit Injektionsflüssigkeit gefüllt ist, und gleichzeitig in seinem Inneren eine Nadel d beheimatet (siehe Figur 10).



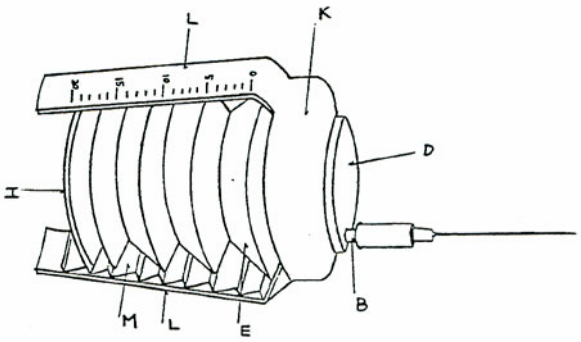
Figur 10: aus FR 1 537 831 A.

4.3. Dosierung

Neben dem Problem, eine flexible Ampullenspritze vollständig zu entleeren, ließ dieser Typ von Spritzen es kaum zu, die tatsächliche Abgabemenge genau festzustellen. Eine Dosisskala auf dem elastischen Spritzenkörper selbst anzubringen, war nicht sinnvoll, da eine solche nur eine sehr grobe Auskunft über die abgegebene Menge an Injektionsflüssigkeit hätte geben können.

Bei der Schlauchspritze der [4] befand sich demnach eine Dosierskala auf der Druckstange I. Schrift [13], die eine Spritze mit Faltenbalg offenbart, löst die Aufgabe, die Abgabemenge ablesen zu können, mit einem auf den Faltenbalg aufsteckbaren, starren Bauteil, dem eine Dosisskala aufgedruckt wurde.

Figur 11 zeigt diesen Lösungsvorschlag.



Figur 11: aus WO 83/00882 A1.

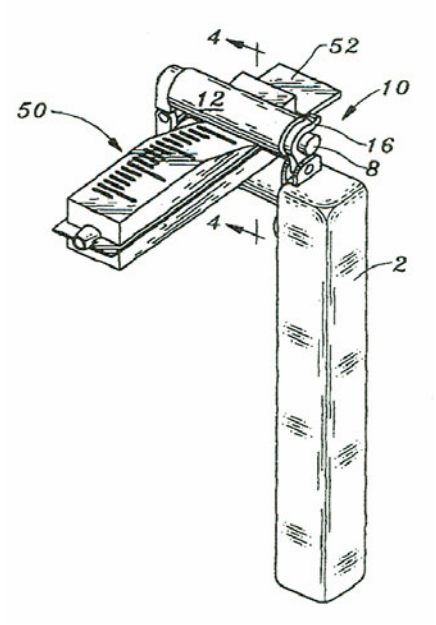
Die genannte Spritze besitzt zudem in ihrem Inneren noch einen (in der Figur 11 nicht gezeigten) integrierten Druckstempel, der ebenso wie bei der Spritze der [10], für die vollständige Entleerung der Ampulle gedacht ist.

5. Aktuelle Einsatzgebiete zusammendrückbarer Spritzenkörper in der Medizin

Die von Hippokrates schon vor Christi Geburt benutzte Klistierspritze (vgl. Figur 1) mag einem etwas aus der Mode gekommen erscheinen. Dabei sind heutzutage in der Medizin ähnliche Vorrichtungen allgegenwärtig. Man denke nur an die Infusionsbeutel mit Nährstofflösungen, die oberhalb der Krankenhausbetten aufgehängt werden, und deren Inhalt den Patienten intravenös verabreicht wird.

Auch andere Arten von Medikamentenabgabevorrichtungen nutzen die oben besprochenen Bauprinzipien.

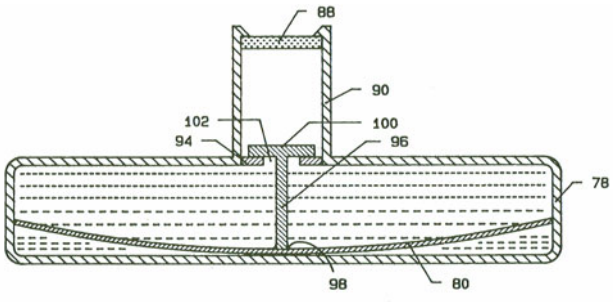
Die aus dem Jahre 2001 stammende [14] offenbart die Verwendung von Rollen 6, 12, um einen verformbaren Medikamentenbehälter 50 zu entleeren. Figur 12 erinnert dabei an die Schlauchspritze aus dem Jahre 1889 (vgl. Figur 2). Trotz aufgedruckter Dosisskala auf dem Behälter 50 ist eine exakte Dosierung jedoch nicht möglich.



Figur 12: aus US 5 158 547 A.

Weiter existieren implantierbare intravenöse Abgabevorrichtungen, die ein Platz sparendes Faltenbalg-Reservoir aufweisen [15]. Das ist sinnvoll, da es gerade im Bereich von implantierbaren Vorrichtungen auf eine geringe Größe ankommt.

Eine andere implantierbare Medikamentenabgabevorrichtung besitzt eine halbschalenförmige flexible Membran 80 mit aufgesetztem Druckstempel 96 bzw. 100, der gleichzeitig als Ventil bei der Befüllung dient [16]. Als Material für den elastischen Spritzenkörper 80 wird biokompatibles Titan eingesetzt, das in geringer Dicke biegsam ist. Figur 13 zeigt die Abgabevorrichtung in gefülltem Zustand.



Figur 13: aus US 6 296 150 B1.

Auslegeschrift [17] offenbart schließlich eine Injektionseinrichtung mit einer Spritzampulle, die als Faltenbalg konzipiert wurde, in dessen Innerem sich nicht nur die Injektionsflüssigkeit, sondern auch die Injektionsnadel befindet.

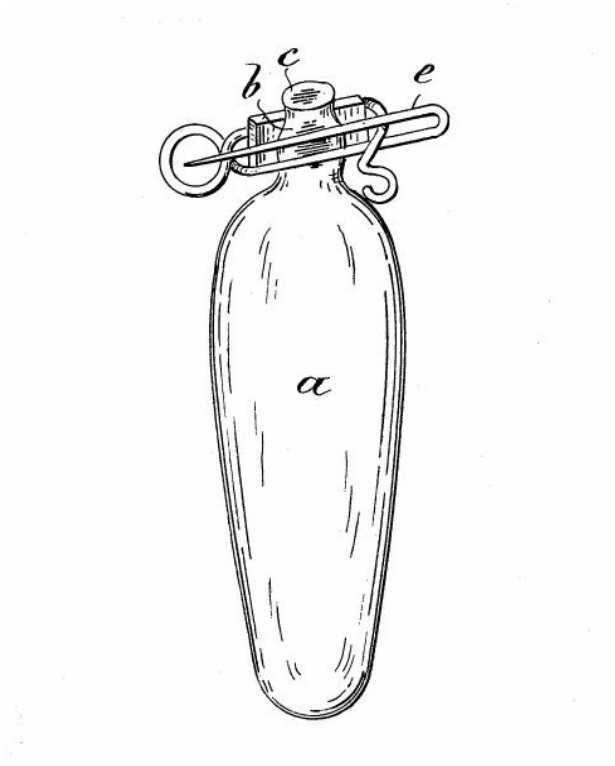
Offenlegungsschrift [18] berichtet von einem Quaddelsetzpflaster, das aus einem flachen Behälter aus elastisch verformbarem Material besteht. Darin enthalten ist nicht nur eine medizinische Flüssigkeit, sondern auch eine Kanülenplatte mit nach unten in Richtung auf die Bodenplatte des Behälters abstehenden Kanülenstücken. Wird mit dem Handballen Druck auf den Behälter ausgeübt, so verformt sich dieser, und die Kanülenstücke durchstoßen die Bodenplatte und dringen in die Haut ein.

6. Zusammenfassung

Es wurden einige Beispiele von Spritzen mit zusammendrückbaren Spritzenkörpern vorgestellt, sowie verschiedene typische Probleme bei deren Anwendung. Offensichtlich nachteilig bei diesem Spritzentyp ist wohl die nicht immer zu gewährleistende vollständige Entleerung der Spritze. Dem kann jedoch mit geeigneten baulichen Maßnahmen entgegengewirkt werden. Es fällt auf, dass sich gewisse Bauprinzipien über die Jahrhunderte und Jahrzehnte immer wiederholen.

Probleme mit der Sterilität ergeben sich, wenn der besprochene Spritzentyp, mit einer Injektionsnadel versehen, für die Abgabe von Medikamenten eingesetzt werden soll. Dass Tierhäute, bzw. –gedärme, usw. hier nicht wirklich den Anforderungen an die Sauberkeit entsprechen können, liegt auf der Hand. Die Entwicklung geht daher über einfachen Gummi immer mehr zu biokompatiblen polymeren und metallischen Materialien. Glas ist zwar gut sterilisierbar, aber gleichzeitig zu wenig elastisch. Hinzu kommt seine Zerbrechlichkeit.

Die Diskussion, aus welchen Materialien geeigneterweise Flüssigkeitsbehälter, insbesondere für medikamentöse Flüssigkeiten gefertigt sein sollten, wird auch schon in der Schrift [19] geführt, die aus dem Jahre 1899 stammt. Vorgeschlagen wird hier, für medikamentöse Flüssigkeiten Tuben aus Gelatine zu fertigen. Figur 14 zeigt eine Gelatinetube a mit einem Quetschhahn e, die nach ihrer Füllung durch Aufkleben eines Deckels c gänzlich verschlossen wurde.



Figur 14: Aus DE 110 177 A.

Zumindest heutzutage ist die Verwendung von Gelatine zur Umhüllung von Medikamenten wegen der Gefahr von BSE jedoch immer dann problematisch, wenn dieses Biopolymer vom Rind stammt.

Literatur

[1] BECKMANN, J.: Feuersprützen – In: Beyträge zur Geschichte der Erfindungen 1797, Bd. 4 III, S. 435

[2] LOUIS, A.: « Seringue ». Encyclopédie ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers par une Société de Gens de Lettres. Mis en ordre & publié par M. DIDEROT, de l´Académie Royale des Sciences & des Belles-Lettres de Prusse ; & quant à la PARTIE MATHÉMATIQUE, par. M. D´ALEMBERT, de l´Académie Royale des Sciences de Paris, de celle de Prusse, & de la Société Royale de Londres; Tome quinzieme. Chez Samuel Faulche. Neufchastel 1765, S. 98.

[3] MÉRAT, F.V.: « Seringue ». Dictionnaire des Sciences Médicales. Tome cinquante-unième. Panckoucke. Paris 1821, S. 150.

[4] DE 51 430 A

[5] AGRICOLA, G.: De re metallica libri XII 1556, Buch VI, IX.

[6] DE 171 90 94 U

[7] FR 2 633 519 A1

[8] DE 577 611 A

[9] DE 178 96 94 U

[10] DE 1 284 045 A

[11] DE 1 076 899 A

[12] FR 1 537 831 A

[13] WO 83/00882 A1

[14] US 6 296 150 B1

[15] DE 695 17 169 T2

[16] US 5 158 547 A

[17] DE 1 083 506 A

[18] DE 37 29 443 A1

[19] DE 110 177 A

RNA-Interferenz – Stummschalten von Genen

Dr. Thomas J. Reitinger, Abt. 1.44

Die Entdeckung der RNA-Interferenz durch die amerikanischen Nobelpreisträger für Physiologie oder Medizin Prof. Craig Mello und Prof. Andrew Fire eröffnen neue, revolutionierende Möglichkeiten in der biomedizinischen Forschung durch schnellere Entschlüsselung der Funktion einzelner, spezieller Gene im Organismus. Damit ist man der Aufklärung der Ursachen und damit der Verhinderung von Krankheiten durch Entwicklung neuer Medikamente ein großes Stück nähergekommen.

1. Einleitung

In den vergangenen Jahren sind immense Anstrengungen unternommen worden, bei einer Vielzahl von Spezies deren gesamtes Erbgut (Genom), welches als Desoxyribonukleinsäure (DNA), bzw. bei einigen Viren als Ribonukleinsäure (RNA) vorliegt, zu analysieren. Auch das menschliche Genom wurde im Rahmen des internationalen Humangenomprojekts [1] [2] [3] vollständig sequenziert. Das Chromosom 1 wurde als Letztes der 23 menschlichen Chromosomenpaare in den Jahren 2005/2006 mit einer Genauigkeit von 99,99 Prozent entschlüsselt [4]. Die gefundenen Gensequenzen lassen jedoch keine Rückschlüsse für das Verständnis der biochemischen, biologischen bzw. pharmakologischen Zusammmenhänge im Organismus zu. Dazu bedarf es weiterer Informationen, insbesondere die Funktion der Genprodukte betreffend. Als Genprodukte sind weitestgehend Proteine zu verstehen, welche vom Genom einer Spezies codiert werden (functional genomics).

Die Technologie der RNA-Interferenz macht es nun möglich, die Analyse der Funktion dieser Proteine, welche für die Diversität der Organismen verantwortlich sind, wesentlich schneller und einfacher durchzuführen, als es mit bisherigen Methoden möglich war.

Das Prinzip der RNA-Interferenz beruht darauf, dass doppelsträngige RNA sequenzspezifisch die Genexpression (bzw. die Biosynthese von RNAs und Proteinen aus genetischen Informationen) in Zellen und/oder in ganzen Organismen dadurch blockiert, dass Messenger-RNA (mRNA) in einem komplexen Mechanismus zerhäckselt bzw. zerschnitten wird.

2. Grundlagen

Die Umwandlung genetischer Information in Proteine erfolgt in einem strikt geregelten Prozess, da die Vielzahl der Genprodukte (hauptsächlich Proteine) niemals ubiquitär und kontinuierlich im Organismus benötigt wird. Die Gen verschlüsselnde doppelsträngige Desoxyribonukleinsäure (dsDNA) wird zunächst in einsträngige Ribonukleinsäure (ssRNA) transkribiert. Dieser Vorgang läuft bei Eukaryoten und Prokaryoten prinzipiell gleich. Das primäre RNA-Transkript unterliegt anschließend verschiedenen Entwicklungsstufen wie beispielsweise das Herausschneiden von nicht-codierenden Introns (Splicing). Am Ende der Transkription wird die dann entstandene „reife“ Boten-RNA (messenger-RNA, kurz mRNA) in die korrespondierenden Proteine übersetzt (translatiert), welche dann, je nach Funktion, in verschiedenen Kompartimenten der Zelle als metabolische Enzyme, Rezeptoren, Transport- und Speichermoleküle, molekulare Motoren, Gerüstsubstanzen, Regulatoren, Reservestoffe, Hormone etc. dienen und dort reifen, um ihre physiologischen Funktionen zu erreichen [5].

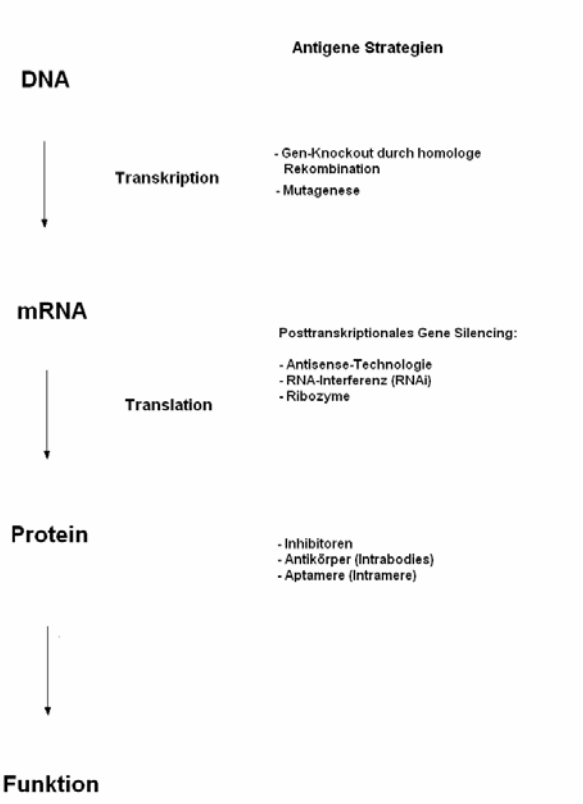
Im Hinblick auf die komplexen Transformationen und Entwicklungsstufen bei der Biosynthese von Proteinen aus genetischen Informationen werden seit langem intensiv Verfahren zur deren Funktionscharakterisierung erforscht und entwickelt. Die bisherigen Methoden waren meistens sehr arbeits- und kostenintensiv.

Bewährte Verfahren zur Aufklärung der Funktion von Proteinen waren bisher so genannte Ausschaltexperimente (knock-out experiments). Hierbei wird der Phänotyp von Zell- und Gewebekulturen oder von ganzen Organismen, welche nicht in der Lage sind, ein

spezielles Protein u. a. aufgrund von Genmutationen zu erzeugen, analysiert. Beim menschlichen Organismus dienten in vielen Fällen Erbkrankheiten dazu, die Funktion eines spezifischen Proteins aufzuklären. Ein Nachteil besteht jedoch darin, dass vielfach bei Knock-out Mäusen mit unterschiedlicher genetischer Disposition kein entsprechend unterschiedlicher Phänotyp vorliegt bzw. verschiedenartige Mechanismen zum gleichen Phänotyp führen [6]. In einigen Fällen kommt es bei typischen Gen-Knock-Outs sogar zur Letalität von Embryonen oder frühem postnatalem Exodus, sodass eine Analyse der Proteinfunktion(en) dann fast nicht mehr möglich ist. Andere mögliche Knock-out Experimente bei anderen Lebewesen, welche darauf beruhen, dass eine induzierbare und gewebespezifische Genabschaltung möglich ist, sind wiederum sehr arbeitsintensiv [7].

Weitere neuere Verfahren, um Proteine gezielt abzuschalten, liegen auf posttranslationaler Ebene. Durch Umsetzung des Proteins (Genprodukt) mit spezifisch bindenden Antikörpern (Intrabodies), Inhibitoren oder Aptameren (Intramere) werden diese komplexiert und deren Funktion blockiert [8] [9].

Das Abschalten von Genen (Gene Silencing) auf posttranskriptionalem Weg ist mittels Antisense-Oligonukleotiden, Ribozymen und anderen antigenen Strategien möglich [10] [11]. Die Antisense-Technik [12][13][14] ist ein molekularbiologisches Arbeitsverfahren, das dazu dient, mit Hilfe von antisense-RNA die Expression spezifischer Gene abzuschalten oder zumindest deutlich herunterzuregulieren, indem deren Transkription oder Translation hauptsächlich durch den Abbau der Doppelstrang-Moleküle durch die zelleigene *Ribonuclease H* verhindert wird. Alternativ zur antisense-RNA können auch kürzere DNA-Moleküle (*Oligodesoxyribonucleotide*) eingesetzt werden. Sie müssen entweder direkt in die Zellen injiziert, oder aber im Anschluss an den Transfer des „antisense-Gens“ von der zelleigenen Replikationsmaschinerie synthetisiert werden. Antisens-RNAs sind einsträngige, kurzkettige, (synthetische) Nukleinsäuren oder Oligonucleotide (Antisense-Oligonucleotide), welche jeweils der entsprechenden Messenger- (mRNA) komplementär sind. Besonders aber die RNA-Interferenz-Technologie mit dsRNA, welche durch A. Fire und C. Mello (Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 2006) [15] [16] entdeckt wurde, und 2002 vom Wissenschaftsmagazin Science zum „Durchbruch des Jahres“ gekürt wurde [17], ist den vorstehenden Methoden zum Abschalten von Genen bei weitem überlegen. In Figur 1 sind schematisch einige Beispiele für Verfahren zum Ausschalten der Funktion von Proteinen zusammengefasst.



Figur 1: Verfahren zum Ausschalten der Funktion von Proteinen.

3. Historie

Bereits zu Beginn der 1990er Jahre hatte der Pflanzenforscher Rich Jorgensen die Beobachtung gemacht, dass bei Einführen eines zusätzlichen Gens für die Synthese des Blütenfarbstoffes in Petunien, die Blüten nicht farbintensiver, sondern sogar blasser bzw. etwas ausgebleicht erscheinen [18]. In diesen Pflanzen war durch das zusätzlich eingeschleuste Gen das farbstoffproduzierende Enzym nicht vermehrt, sondern reduziert worden. Dieses Phänomen wurde zunächst als Cosuppression bezeichnet, da nicht nur die in die Pflanzen eingebrachten Gene (Transgene), sondern auch das korrespondierende, natürlich in den Pflanzen vorkommende Gen (endogenes Gen) kein bzw. nur wenig funktionelles Protein (Genprodukt) lieferte. Eine ähnliche

Beobachtung wurde 1992 beim eukaryotischen roten Brotschimmelpilz *Neurospora crassa* gemacht [19]. Dieser Pilz zeigte nach dem Einbringen eines Gens, welches an der Carotenoidsynthese involviert ist, das Auftreten von Albinomutanten. Das zusätzlich eingebrachte exogene Gen unterdrückt hierbei die Expression eines Enzymes, welches für die Carotenoidsynthese erforderlich ist. Dieser Befund, welcher den gleichen Ursprung wie die *Cosuppression* besitzt, wurde als *Quelling* bezeichnet [20] [21]. Schon seit langem ist bekannt, dass Messenger-RNA durch eine komplementäre (Antisense) RNA ausgeschaltet werden kann. Da dieser Abbauprozess nach der Transkription der mRNA erfolgt, wurde dieser als „*posttranskriptionales Gene Silencing*" (PTGS) bezeichnet [22].

Der *Antisense*-Begriff wurde 1985 durch Inouye et al. geprägt, basierend auf der Beobachtung, dass sich in dem Darmbakterium E. coli bei der Transkription einer Antisense-RNA (Gegensinn-RNA) die Menge an mRNA verringerte [23].

Auch bei vielen anderen Modellorganismen wie z.B. in bei Viren („virus-induced gene silencing" (VIGS)) [22] konnte bestätigt werden, dass Gene posttranskriptionell dadurch stillgelegt werden können, indem man eine Abschrift des Zielgens mit umgekehrter Reihenfolge (komplementäres exogenes Gen) in die Zelle einschleust. Bei diesem Verfahren wird vom exogenen Transgen eine komplementäre Gegensinn-RNA (Antisense-RNA) abgelesen, währenddessen das normale zelluläre (endogene) Gen eine translatierbare mRNA synthetisiert.

Zunächst vermutete man, dass sich RNA mit entsprechender Antisense-RNA hybridisiert und der so entstandene Doppelstrang den Weg zu den Ribosomen und damit die Translation zu den entsprechenden Genprodukten (Proteinen) verhindert. Ein Nachweis eines „Sense-und Antisense-RNA-Komplexes" konnte aber nicht erbracht werden. Vielmehr waren nach der erfolgreichen Stilllegung eines spezifischen Gens sowohl die mRNA als auch Antisense-RNA nicht mehr nachweisbar, eine Beobachtung, die der erwarteten größeren Stabilität von doppelsträngiger RNA (dsRNA) widersprach. Da weder Sense- noch Antisense-RNA Reste entdeckt wurden, musste demzufolge die Menge beider Typen von RNA exakt identisch sein, sodass der Mechanismus des „Gene silencing" basierend auf Antisense-RNA weitgehend unverständlich blieb [24]. Spezifische Doppelstrang-RNasen wurden postuliert und auch identifiziert, jedoch konnte kein direkter Zusammenhang zu Antisense-Mechanismen bewiesen werden [25]. Trotz fehlender Kenntnis des Wirkmechanismus, wurde Cosuppression und Antisense-RNA erfolgreich bei der Herstellung gentechnisch abgewandelter Nutzpflanzen, wie beispielsweise der „Anti-Matsch-Tomate" (Flavr-Savr-Tomate) [26] eingesetzt.

Bei Experimenten am Fadenwurm *Caenorhabditis elegans (C. elegans),* welcher in vielen wissenschaftlichen Arbeiten als Modellsystem dient [27], entdeckten Andrew Fire und Craig Mello 1998 [15], dass bei gleichzeitiger Injektion von Sense- (mRNA) und synthetisch hergestellter Antisense-RNA (eine zur Ziel-mRNA komplementäre RNA) überraschenderweise die Proteinproduktion wesentlich effizienter ausgeschaltet werden konnte als beim reinen Antisense-Versuch. Die Gen-Blockade funktionierte mitunter auch, wenn die Organismen als Kontrolle nur synthetisch hergestellte Sense-RNA, aber keine Antisense-RNA verabreicht bekamen.

Dies widersprach aber der Theorie, wonach ein doppelsträngiger Komplex aus Boten-RNA und Antisense-RNA nicht fähig sein sollte, eine Ziel-RNA (mRNA) spezifisch zu erkennen, sodass die Bildung des von der mRNA kodierten Proteins in den Ribosomen verhindert wird. In weiteren Experimenten konnten Fire und Mello [15] [28] zeigen, dass auch die Injektion substöchiometrischer Mengen an doppelsträngiger RNA (dsRNA) in den Fadenwurm *C. elegans* einen besseren Silencing-Effekt zur Folge hatte, als die Injektion großer Mengen an Antisense-Transkripten. Sämtliche Antisense-Experimente mit künstlich hergestellter einsträngiger RNA waren also mehr oder weniger mit doppelsträngiger RNA verunreinigt. Die Entdecker dieser Art der Geninhibition prägten in Anlehnung an die physikalische Interferenz, bei der sich Schallwellen überlagern und auslöschen, den Ausdruck „RNA-Interferenz" (RNAi), wonach sich hierbei Ribonukleinsäuremoleküle gegenseitig Matt setzen. Im Gegensatz zum „Knock-Out" durch Genunterbrechung wurde die Genrepression durch RNAi, welche nicht immer vollständig verlief, als „Knock-Down" charakterisiert.

Als Ende 1998 Kennderell und Carthew [29] zeigen konnten, dass doppelsträngige RNA (dsRNA) auch Gene der Fruchtfliege *Drosophila melanogaster* ausschalten konnte, war offensichtlich, dass die RNA-Interferenz die Möglichkeit eröffnete, jedes beliebige Gen verschiedener Organismen stillzulegen.

Vor dem Hintergrund dieser die Gentechnik offensichtlich revolutionierenden wissenschaftlichen Befunde konzentrierte sich die weitere Forschung auf die Ermittlung des genauen Mechanismus der RNA-Interferenz (RNAi).

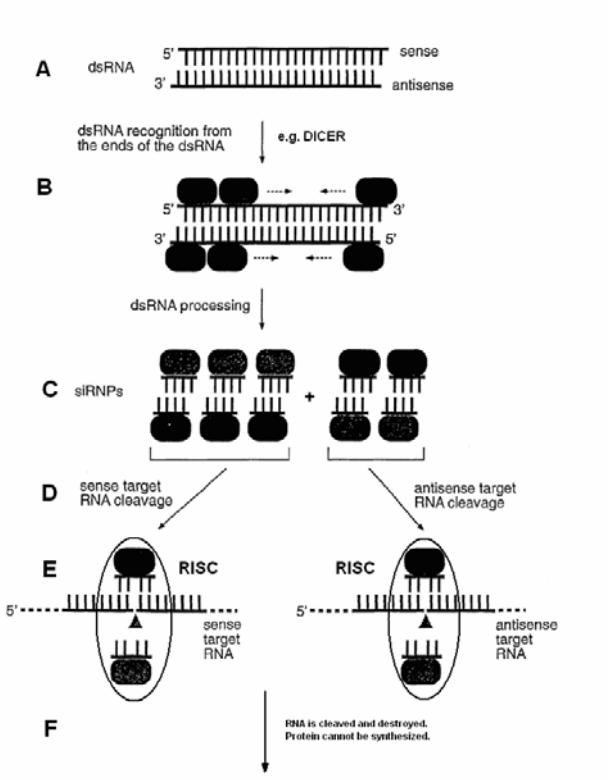
4. Der RNAi-Mechanismus

Der RNAi-Mechanismus ist noch nicht vollständig geklärt. Innerhalb weniger Jahre nach der Entdeckung der RNA-Interferenz wurden auf molekularer Ebene deren wichtigste Komponenten erkannt und die Funktionsweise zumindest in einem Basismodell [30], welches immer weitere Bestandteile erhält und immer besser verstanden wird, geklärt.

Bei der Suche nach molekularen Komponenten, die am RNAi-Mechanismus beteiligt sind, wurden verschiedene Enzyme wie Helikasen [31], RNase III Homologe [32] und die RNA-abhängige RNA-Polymerase (RdRP) [33] identifiziert. Darüber hinaus wurden überraschender Weise die dsRNA und nicht etwa die mRNA, sondern kleine, etwa 20 bis 23 Basenpaare (bp) große Fragmente dieser mRNA gefunden [34]. Diese mRNA-Bruchstücke wurden siRNAs (small interfering RNAs) genannt. Es konnte gezeigt werden, dass diese kleinen doppelsträngigen RNAs mit 21 Basenpaaren und einem 2-nt 3´ Überhang am effektivsten RNA-Interferenz in *Drosophila* (in-vitro) aber auch in Säugerzellen induzieren können [35]. Letzteres gelang Fire et al. nicht mit langer dsRNA (> 30 Basenpaare), da diese ursächlich zu einer unspezifischen Inhibition der Translation durch Interferon-Ausschüttung in Säugerzellen und damit zur Apoptose führt [36] [47].

Hannon et al. konnten 2001 zeigen [32], dass in *Drosophila* ein Enzym für die Fragmentierung ursprünglich eingebrachter doppelsträngiger RNA (dsRNA) in 21 bp lange dsRNA (siRNA) verantwortlich ist. Aufgrund seiner „Zerhacker-Funktion“ wurde es als DICER bezeichnet. Dieses Enzym ist eine Endonuclease und enthält u.a. ein RNase-Homolog zur bakteriellen RNase III fusioniert mit einer Helikasendomäne. DICER wurde neben *Drosophila* mittlerweile auch in vielen Eukaryoten, Zebrafischen, und Mäusen nachgewiesen [40] [41].

Die zusätzliche Entdeckung des Proteinkomplexes RISC (RNA-induced silencing complex), ein Komplex aus siRNA und Proteinen der Argonaut-Familie, in *Drosophila durch* Hannon et al. [38], führten zu einem Basismodell des RNAi-Mechanismus, der in Figur 1 dargestellt ist.

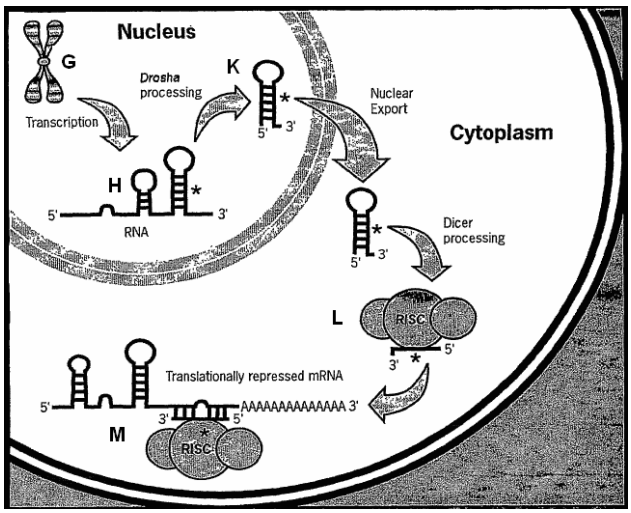


Figur 2: Basismodell des RNAi-Mechanismus; in Anlehnung an [30].

Ursprünglich in der Zelle oder im Organismus vorhandene längere doppelsträngige DNA (dsRNA), virale dsRNA-Moleküle, regulatorische dsRNA-Sequenzen oder von außen in die Zelle eingebrachte synthetische dsRNAs (exogene dsRNA) (Figur 2, **A**) bindet an die Endonuclease DICER (Häcksler), (Figur 2, **B**), welches die dsRNA in kleinere Fragmente von einheitlicher Länge (ca. 21-23 bp) zerschneidet, sodass zunächst Bruchstücke eines Komplexes aus DICER und dsRNA entstehen, welche small interfering ribonucleo-protein-compexes (siRNP) genannt werden (Figur 2, **C**). Alle diese „RNA-Schnipsel“, welche jeweils noch in den siRNP-Komplexen gebunden sind, werden in einem nächsten Schritt in ihre beiden

Einzelstränge zerlegt (Figur 2, **D**). Je einer davon verbindet sich danach mit Proteinen zum RNA-induzierenden Silencing Complex RISC (Figur 2, **E**), welcher unter ATP-Verbrauch mit Hilfe einer Helicase die siRNAs entwindet und mRNAs mit komplementären Abschnitten einfängt [39]. Stimmt deren Sequenz fast perfekt mit der Vorlage überein, wird das gefangene mRNA-Molekül durch das Enzym SLICER (Hobel) des RISC-Komplexes mittig durchschnitten und damit funktionslos gemacht. Das von dieser mRNA kodierte Protein kann dann nicht mehr synthetisiert werden. Für den Fall, dass die Ziel-mRNA nur teilweise mit der im RISC-Komplex eingebundenen siRNA übereinstimmt, hält der RISC-Komplex die Ziel-mRNA lediglich fest, sodass die Ribosomen bei der Proteinsynthese auf der mRNA blockiert werden und ebenfalls kein Protein gebildet werden kann (Figur 2, **F**). Dabei basiert die hohe Effektivität des RNAi-Mechanismus auf weiteren Vervielfachungsschritten, bei denen die siRNA-Fragmente als Muster zur Bildung weiterer zusätzlicher dsRNA dienen. Je nach Eigenschaften der dsRNA bzw. je nach Organismus kann der RNAi-Mechanismus zusätzliche Effekte auf Transkriptions- oder auf Translationsebene haben. Doppelsträngige RNAs mit nichttranskribierenden Bereichen wie beispielsweise Introns und Promotoren sind ohne Effekt [15]. Ein etwas detaillierteres molekulares bzw. zelluläres Modell des RNAi-Mechanismus wird in [66] beschrieben.

Im Lichte der (weitgehenden) Aufklärung der RNAi-Mechanismen wurde auch eine Vielzahl neuer regulatorischer RNA-Spezies identifiziert, die man unter dem Begriff miRNAs (microRNAs) subsumierte [43] [44] [45] [46]. Wie in Figur 3 dargestellt, funktionieren diese mit den Methoden der Bioinformatik nur schwer nachweisbaren miRNAs in einem zellulären System nach einem sehr ähnlichen Mechanismus wie bei der RNA-Interferenz [37] [42], so dass man siRNA und miRNA gleichsam als „molekulare Geschwister“ bezeichnen kann.



Figur 3: Basismodell der miRNA-Expression und Aktivierung; in Anlehnung an [42].

miRNA-Gene (Figur 3, **G**) werden im Zellkern (Nucleus) von einer bisher nicht näher charakterisierten Polymerase zu mehreren tausend Nukleotid langen Vorläufer-RNAs (pri-miRNA) (Figur 3, **H**) transkribiert, die mit Hilfe der dsRNA-spezifischen Ribonuklease *Drosha* haarnadelförmige, etwa 70 Nukleotid lange Strukturen ausbilden (pre-miRNA) (Figur 3, **K**). Diese pre-miRNAs verlassen den Zellkern und werden im Cytosol durch die Ribonuclease DICER auf ihre endgültige Länge von ca. 19-23 Nucleotiden zu miRNAs gestutzt. Diese werden wie auch im Falle der siRNA anschließend in einen RISC-artigen Komplex gebunden (Figur 3, **L**). Im Gegensatz zu den siRNAs können miRNAs häufig nicht in ihrer ganzen Länge mit der Ziel-mRNA hybridisieren, vielmehr bilden sie mittig, dort wo normalerweise das Enzym SLICER die Ziel-mRNA schneiden würde, eine Ausbuchtung von ungepaarten Nukleotidbasen (Figur 3, **M**). Dies hat zur Folge, dass die Ziel-mRNA bei der Translation lediglich gehemmt wird, während im Fall der siRNAs die Ziel-mRNA zerschnitten und somit die Translation komplett ausgeschaltet wird. In Analogie zu den pre-miRNAs können im Übrigen auch andere haarnadelförmige RNAs (hairpin-RNAs) synthetisch hergestellt werden [63].

5. Therapeutisches Potential der RNA-Interferenz

Im Rahmen der Identifizierung bzw. Aufklärung der verschiedenen siRNAs und miRNAs und weiterer regulatorischer RNAs in zahlreichen verschiedenen Organismen kann angenommen werden, dass es sich bei der RNA-Interferenz um einen der ältesten natürlichen in

der Evolution konservierten Regulationsmechanismen handelt. Es konnte u. a. gezeigt werden, dass Transposone (mobile, parasitäre DNA-Einheiten, die in das Genom der Wirtszelle insertieren und wichtige Abschnitte des Genoms unterbrechen und zerstören können) über einen RNAi-Mechanismus stillgelegt werden können und somit eine erhöhte Genomstabilität bewirken [48]. Auch bei der Vervielfältigung von RNA-Viren entsteht intermediär dsRNA, welche einen RNAi gesteuerten Abwehrmechanismus auslösen kann [49]. Der RNAi-Mechanismus kann die Virusvermehrung in einem Organismus u. a. durch Injektion exogener doppelsträngiger (chemisch synthetisierter) siRNA inhibieren, wobei dadurch das virale RNA-Genom als Ziel für RNA-Interferenz erkannt wird („genetische Immunisierung“) [30] [47]. Diesbezüglich könnten beispielsweise die Erreger von Aids, Kinderlähmung und Hepatitis C mittels von Tuschl et al. entwickelten, synthetisch hergestellten, 21 Basenpaare langen doppelsträngigen siRNAs (Agentien zum Genesilencing) [34] [47] prinzipiell bekämpft werden. Die neue RNAi-Technik [50][51][52][53][54], welche anderen Ausschaltexperimenten deutlich überlegen ist [28], ist neben der Virenabwehr auch bei anderen Erkrankungen denkbar, bei denen die Ursache in einer „falschen“ RNA liegt, was bei verschiedensten Krebsarten der Fall ist. Auf dem Weg zum Wirkort ist jedoch die Degradation der Nukleasen für den therapeutischen Einsatz der siRNAs derzeit ein Hindernis. Verschiedene experimentelle Ansätze versuchen dieses Problem zu lösen. Die direkte Einspritzung der synthetisch hergestellten siRNAs an den Wirkort ist ein Lösungsansatz. Hierbei sollten die entsprechenden siRNAs der besseren Haltbarkeit wegen chemisch modifiziert werden [55][68][69]. Andere Lösungswege um die siRNAs gezielt an ihren Wirkort zu bringen, bestehen darin, diese in geeigneten Kohlenstoffnanoröhren [56] oder Liposomen bzw. humanem Serumalbumin [70] zu transportieren. Auch nicht- pathogene Viren werden als siRNA-Transporter im Hinblick auf eine systemische Anwendung in Betracht gezogen [57]. Ein weiterer wichtiger Aspekt, der bei der Entwicklung von RNAi-Therapeutika berücksichtigt werden muss, ist die Tatsache, dass bei der Applikation größerer Mengen an siRNAs [58] prinzipiell auch ein Einfluß auf endogene Mechanismen möglich ist. Beispielsweise wenn der RISC-Komplex im Rahmen einer Therapie mit siRNAs besetzt ist, könnten viele wichtige regulatorische, endogene RNAs (z.B. miRNAs) nicht mehr genügend prozessiert werden, sodass bei einer möglichen medizinischen Applikation mit verschiedensten Nebenwirkungen gerechnet werden muss.

Ein Großteil der RNAi-Forschung befasst sich mit der Identifizierung von Onkogenen bzw. mit den Ursachen von Krebserkrankungen. Ein bedeutendes Tool ist hierbei der Einsatz umfangreicher RNAi-Bibliotheken, die das Genom verschiedener Modellorganismen abbilden sollen [59][60][64][65]. Durch RNAi-vermittelte Ausschaltung spezieller Gene im Hochdurchsatzverfahren (High-Throughput Screening) und durch Vergleich mit dem humanen Genom verspricht man sich neue Erkenntnisse v. a. über Ursachen und Therapiemöglichkeiten humaner Krebserkrankungen [61] [62].

Verschiedene Forschergruppen versuchen weltweit auch Arzneimittelresistenzen, die häufig während Chemotherapien auftreten, durch die RNAi-Technik zu verhindern [67]. Ferner sind viele andere Krankheitsbilder sowie genetische Defekte im Blickpunkt der RNAi-Wissenschaftler. So wird mittlerweile in mehreren Phase II Studien die Behandlung altersbedingter Makuladegeneration mittels siRNA-Technik erprobt [71]. Hierbei appliziert man eine siRNA-Lösung direkt in das Auge [72]. Bei der Makuladegeneration (MD) handelt es sich um eine Augenerkrankung, die zum Verlust der Sehkraft im Bereich des schärfsten Sehens, der Makula (auch "gelber Fleck" genannt) führt. Auch bei der Behandlung des Humanen Respiratorischen Synzytial-Virus (RSV), welcher Symtome im oberen Atmungsapparat (Respirationstrakt) verursacht und bevorzugt bei Kindern auftritt, werden mit einem RNAi-basierten inhalativ zu applizierenden Therapeutikum mehrere klinische Phase I Studien durchgeführt [73].

Literatur

[1] http://genome.wellcome.ac.uk/node30058.html

[2] http://www.genome.gov/HGP/

[3] http://www.sanger.ac.uk/Info/Press/2006/060517.shtml

[4] GREGORY, S.G. et al.: The DNA sequence and biological annotation of human chromosome 1. – In: Nature 2006, Band 441, S. 315-321.

[5] STRYER, L.: Biochemie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 4. Auflage, 1996, ISBN 3-86025-346-8.

[6] SANGO, K. et al.: Mouse models of Tay-Sachs and Sandhoff diseases differ in neurologic phenotype and ganglioside metabolism – In: Nature Genetics 1995, Band 11, S. 1170-1176.

[7] NAGY, A.: Cre recombinase: the universal reagent for genome tailoring. –In: Genesis 2000, Band 26, S. 99-109.

[8] BRONSON, S.K. & SMITHIES, O.: Altering Mice by Homologous Recombination Using Embryonic Stem Cells. – In: J. Biol. Chem. 1994, Band 269, S. 27155-27158.

[9] CAMERINI-OTERO, R.D. & HSIEH, P.: Parallel DNA triplexes, homologous recombination, and other homology-dependent DNA interactions. – In: Cell 1993, Band 73, S. 217-223.

[10] JEN, K.-Y. & GEWIRTZ, A.M.: Suppression of Gene Expression by Targeted Disruption of Messenger RNA: Available Options and Current Strategies. – In: Stem Cells, 2000, Band 18, S. 307-319.

[11] GALDERISI, U., CASCINO, A. & GIORDANO, A.: Antisense oligonucleotides as therapeutic agents. – In: J. Cell. Physiol. 1999, Band 181, S. 251-257.

[12] CROOKE, S.T.: Antisense Therapeutics. – In: Biotechnol Genet Eng Rev 1998, Band 15, S. 121-157.

[13] BRANCH, A.D.: A good antisense molecule is hard to find. – In: Trends Biochem. Sci. 1998, Band 23, S. 45-50.

[14] FLANAGAN, W.M. et al.: A cytosine analog that confers enhanced potency to antisense oligonucleotides – In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA 1999, Band 96, S. 3513-3518.

[15] FIRE, A. et al.: Potent and specific genetic interference by double-stranded RNA in Caenorhabditis elegans. – In: Nature 1998, Band 391, S. 806-811.

[16] TIMMONS, L. & FIRE, A.: Specific interference by ingested dsRNA. – In: Nature 1998, Band 395, S. 854.

[17] COUZIN, J.: Breakthrough of the Year: Small RNAs Make Big Splash. – In: Science 2002, Band 298, S. 2296.

[18] NAPOLI, C., LEMIEUX, C. & JORGENSEN, R.: Introduction of a Chimeric Chalcone Synthase Gene into Petunia Results in Reversible Co-Suppression of Homologous Genes in trans. – In: Plant Cell 1990, Band 2(4), S. 279-289.

[19] ROMANO, N. & MACINO, G.: Quelling: transient inactivation of gene expression in Neurospora crassa by transformation with homologous sequences. – In: Mol. Microbiol. 1992, Band 6 (22), S. 3343-3353.

[20] PLASTERK, R.H.A. & KETTING, R.F.: The silence of genes. – In: Curr. Opin. Genet. Dev. 2000, Band 10, S. 562-567.

[21] BLASS, B.L.: Double-Stranded RNA as a Template for Gene Silencing. – In: Cell 2000, Band 101, S. 235-238.

[22] RATCLIFF, F., HARRISON, B. & BAULCOMBE, D.: A Similarity Between Viral Defense and Gene Silencing in Plants. – In: Science 1997, Band 276, S. 1558–1560.

[23] MIZUNO, T., CHOU, M.-Y. & INOUYE, M.: A unique mechanism regulating gene expression: Translational inhibition by a complementary RNA transcript (micRNA). – In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 1984, Band 81, S. 1966-1970.

[24] NELLEN, W. & LICHTENSTEIN, C.: What makes an mRNA anti-sense-itive? – In: Trends Biochem Sci. 1993; Band 18(11), S. 419-423.

[25] NOVOTNY, J. et al.: Dictyostelium double-stranded ribonuclease. – In: Methods Enzymol. 2001, Band 342, S. 193-212.

[26] SANDERS, R.A. & HIATT, W.: Tomato transgene structure and silencing. - In: Nat. Biotechnol. 2005, Band 23, S. 287-289.

[27] GUO, S. & KEMPHUES, K.J.: par-1, a gene required for establishing polarity in C. elegans embryos, encodes a putative Ser/Thr kinase that is asymmetrically distributed. – In: Cell 1995, Band 81 (4), S. 611-620.

[28] US 6 506 559 B1.

[29] KENNDERELL, J.R. & CARTHEW, R.W.: Use of dsRNA-mediated genetic interference to demonstrate that frizzled and frizzled 2 act in the Wingless pathway. – In: Cell, 1998, Band 95, S. 1017-1026.

[30] WO 02/44321 A2.

[31] DALMAY, T. et al.: SDE3 encodes an RNA helicase

required for post-transcriptional gene silencing in Arabidopsis. – In: EMBO J 2001, Band 20, S. 2069-2078.

[32] BERNSTEIN, E. et al.: Role for a bidendate ribonuclease in the initiation step of RNA interference. – In: Nature, 2001, Band 409, S. 363-366.

[33] MARTENS, H. et al.: RNAi in Dictyostelium: the role of RNA-directed RNA polymerases and double-stranded RNase. – In: Mol. Biol. Cell, 2002, Band 13, 445-453.

[34] ELBASHIR, S.M. et al.: Duplexes of 21-nucleotide RNAs mediate RNA interference in cultured mammalian cells. – In: Nature, 2001, Band 411, S. 494-498.

[35] ELBASHIR, S.M., LENDECKEL, W. & TUSCHL, T.: RNA Interference is mediated by 21- and 22-nucleotide RNAs. – In: Genes Dev. 2001, Band 15, S. 188-200.

[36] VATTEM, K.M., STASCHKE, K.A. & WEK, R.C.: Mechanism of activation of double-stranded-RNA-dependent protein kinase, PKR: role of dimerization and cellular localization in the stimulation of PKR phosphorylation of eukaryotic initiation factor-2 (alF2). – In: Eur. J. Biochem., 2001, Band 268 (13), S. 3674-3684.

[37] MCMANUS, M.T. & SHARP, P.A.: Gene silencing in mammals by small interfering RNAs. Nature Rev. Genet. 2002, Band 3, S. 737-747.

[38] HAMMOND, S.M. et al.: An RNA-directed nuclease mediates post-transcriptional gene silencing in Drosophila cells. – In: Nature, 2000, Band 404, S. 293-296.

[39] SEN, G.L., WEHRMAN, T.S. & BLAU, H.M.: mRNA translation is not a prerequisite for small interfering RNA-mediated mRNA cleavage. – In: Differentiation, 2005, Band 73, S. 287-293.

[40] JARONCZYK, K., CARMICHAEL, J.B. & HOBMAN, T.C.: Exploring the functions of RNA interference pathway proteins: some functions are more RISCy than others? – In: Biochem. J. 2005, Band 387, S. 561-571.

[41] VERMEULEN, A. et al.: The contributions of dsRNA structure to Dicer specificity and efficiency. – In: RNA, 2005, Band 11, S. 674-682.

[42] WO 2006/137941 A2.

[43] RUVKUN, G.: Molecular biology. Glimpses of a tiny RNA world. – In: Science 2001, Band 294 (5543), S. 797-799.

[44] LAGOS-QUINTANA, M. et al.: New microRNAs from mouse and human. – In: RNA 2003, Band 9, S. 175-179.

[45] LAGOS-QUINTANA, M. et al.: Identification of novel genes coding for small expressed RNAs. – In: Science 2001, Band 294, S. 853-858.

[46] LIM, L.P. et al.: The microRNAs of Caenorhabditis elegans. – In: Genes Dev. 2003, Band 17, S. 991-1008.

[47] WO 01/75164 A2.

[48] TABARA, H. et al.: The rde-1 gene, RNA interference and transposon silencing in C. elegans. –In: Cell, 1999, Band 99, S. 123-132.

[49] WIANNY, F. & ZERNICKA-GOETZ, M.: Specific interference with gene function by double-stranded RNA in early mouse development. – In: Nat Cell Biol., 2000, Band 2, S. 70-75.

[50] WO 03/099298 A1.

[51] WO 2004/007718 A2.

[52] WO 2004/065600 A2.

[53] US 7056704 B2.

[54] US 7078196 B2.

[55] LAYZER, J.M. et al.: In vivo activity of nuclease-resistant siRNAs. – In: RNA 2004, Band 10(5), S. 766–771.

[56] LIU, Z. et al.: siRNA Delivery into Human T Cells and Primary Cells with Carbon-Nanotube Transporters. – In: Angew. Chem. 2007, Band 119, S. 1-6.

[57] SOUTSCHECK, J. et al.: Therapeutic silencing of an endogenous gene by systemic administration of modified siRNAs. – In: Nature 2004, Band 432, S. 173-178.

[58] TANG, G. et al.: A biochemical framework for RNA silencing in plants. – In: Genes Dev. 2003, Band 17, S. 49-63.

[59] BOUTROS, M. et al.: Genome-Wide RNAi Analysis of Growth and Viability in Drosophila Cells. – In: Science 2004, Band 303, S. 832-835.

[60] EP 1734118 A1.

[61] WO 2006/046217 A2.

[62] WO 2005/103299 A2.

[63] WO 2005/059157 A2.

[64] WO 2005/023991 A2.
[65] WO 2004/026227 A2.
[66] US 2005/0260652 A1.
[67] YAGÜE, E., HIGGINS, C.F. & RAGUZ, S.: Complete reversal of multidrug resistance by stable expression of small interfering RNAs targeting MDR1. – In: Gene Therapy 2004, Band 11, S. 1170 – 1174.
[68] WO 2004/090108 A2.
[69] WO 2006/020768 A2.
[70] WO 2006/036916 A2.
[71] ARNAUD, C.H.: Delivering RNA Interference. – In: Chemical & Engineering News, 2006, Band 84(46), S.16-23.
[72] WO 2005/089224 A2.
[73] WO 2006/074346 A2.

Druckerpatronen für Tintenstrahldrucker

Dipl.-Ing. Ulrich Rödiger, Abt. 1.26

Wer hat sich beim Kauf einer Tintenstrahl- (Ink-Jet) Druckerpatrone noch nicht über den (vermeintlich) hohen Preis geärgert? Die Druckerpatronen für den Tintenstrahldruck haben sich innerhalb von zwanzig Jahren von einfachen Tintenbehältern zu Bestandteilen ausgeklügelter Tintenversorgungssysteme entwickelt. Die Flut von Patentdokumenten, die in jedem Jahr in diesem Bereich veröffentlicht wird, macht deutlich, dass das Geschäft mit Druckerpatronen ein stark umkämpfter Markt ist, in dem die Verfolgung von Schutzrechten eine nicht unbedeutende Rolle spielt. Aus dieser Fülle von Anmeldungen sollen einige vorgestellt werden, die geeignet erscheinen, eine Übersicht über die Funktionsweise von austauschbaren Druckerpatronen und den derzeitigen Stand der Technik zu geben.

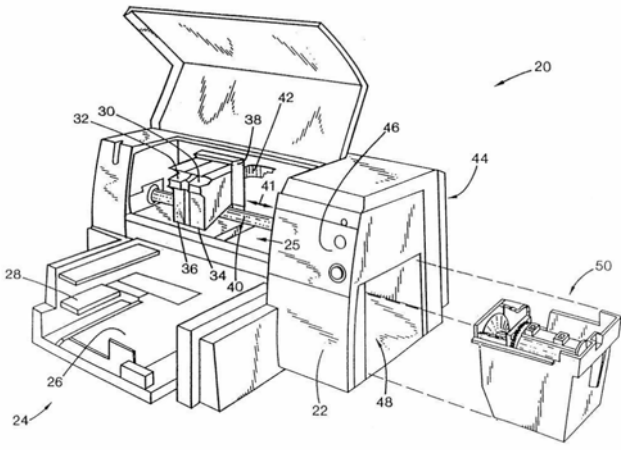


Figur 1: Rund 130 Quadratmeter im Ink-Jet Textildruck bedruckter Stoff, bereitgestellt von 3P InkJet Textiles AG, verwandeln das Eingangstor der Gemeinsamen Forschungsstelle der EU-Kommission (Joint Research Centre - JRC) in Ispra am Lago Maggiore (Italien) seit Januar 2007 sechs Monate lang optisch in das Brandenburger Tor anlässlich der deutschen Ratspräsidentschaft (mit Genehmigung der obs/3P InkJet Textiles AG).

1. Einleitung

Mit der Tintenstrahl-Drucktechnologie können heute Textdokumente mit gestochen scharfer Schrift, Schwarz/Weiß-Grafiken, Farbgrafiken, Bilder in Foto-Qualität und sogar meterlange Groß- und Textildrucke hergestellt werden (Figur 1). Die hohe Druckqualität und die unterschiedlichen Anwendungsgebiete erfordern ausgeklügelte Tintenversorgungssysteme und raffiniert aufgebaute Tintenstrahl-Druckerpatronen. Je nach Anwendungsgebiet werden sehr unterschiedliche Anforderungen an das Tintenversorgungssystem gestellt.

Bei den Tintenstrahldruckern für zu Hause sind die Tintenpatronen als Verbrauchsartikel und damit als Massenprodukte konzipiert. Häufig sind mehrere Farbtinten und die Druckköpfe zu einer austauschbaren „Einweg“-Tintenpatrone integriert. Wenn die Tinte verbraucht ist, gelangt die gesamte Anordnung „in den Müll“. Es werden jedoch alle Verschleißteile gleichzeitig ausgewechselt, so dass die Druckqualität weitgehend konstant bleibt.



Figur 2: Tintenstrahldrucker; 26 Papierzufuhrschacht, 28 Papierablage, 30/32 austauschbare Druckerpatronen für schwarze und farbige Tinten, 34/36 Druckköpfe, 38 Druckerschlitten, 40 Führungsstange, 50 Station zur Wartung der Druckköpfe (aus DE 195 31 352 C2).

Weit verbreitet sind inzwischen Tintenstrahldrucker, bei denen die Druckköpfe im Drucker verbleiben und nur die Tintentanks, teilweise sogar jede Farbpatrone einzeln, austauschbar sind. Die Druckköpfe und die Tintenpatronen sind auch hier auf einem Schlitten angeordnet, der sich entlang des Aufzeichnungsträgers hin- und herbewegt.

Bei Großformat-Tintenstrahldruckern befinden sich nur die

Druckköpfe auf dem Schlitten. Die Tintenzufuhr erfolgt über Schläuche und Pumpsysteme aus Tintentanks, die wegen ihres großen Volumens und ihrer entsprechend hohen Masse stationär („off-axis“) in speziellen Aufnahmeeinheiten einzeln austauschbar am Drucker angebracht sind.

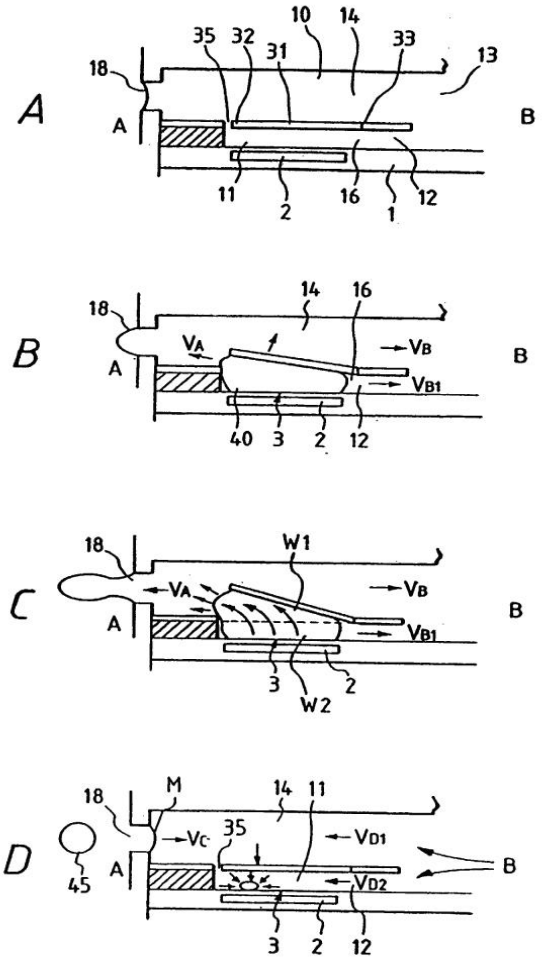
Dieser Artikel beschränkt sich auf die auf einem Schlitten angeordneten, austauschbaren Druckerpatronen. Einige der hier bei der Tintenspeicherung und der Tintenzuführung auftretenden Probleme sowie Lösungen dazu werden aufgezeigt. Dabei soll auch kurz auf Anordnungen zum Wiederbefüllen von Druckerpatronen eingegangen werden. Viele Druckerpatronen sind inzwischen mit Speicherchips versehen. Was die damit ausgestatteten Druckerpatronen leisten, sowie der Datenaustausch zwischen Druckersteuerung und Patrone, wird am Ende behandelt.

2. Grundlagen

Allen Tintenversorgungssystemen gemeinsam ist die Forderung, dass fortwährend flüssige Tinte mit einem vorgegeben Unterdruck den Tintenstrahldüsen zugeführt und das Auslecken von Tinte aus den Düsen sowie das Vordringen von Luft dorthin vermieden werden muss.

Wie funktioniert der Tintenstrahldruck? Tintenstrahl oder auch „Ink-Jet“ genannt ist der Sammelbegriff für eine Drucktechnik, bei der kleine Tintenmengen einem Reservoir entnommen, in winzige Einzeltröpfchen (von 5 bis 100 Picoliter) umgewandelt und durch eine physikalisch aufgebrachte Krafteinwirkung durch die Luft auf ein Druckmedium (Papier, Folie, Textilbahn, Verpackungsmaterial) transportiert werden, wo die Gesamtheit der Einzeltröpfchen dann ein Druckbild (Einzelbuchstaben, Text, Grafik, Farbbilder etc.) ergeben [1].

Die meisten heute verwendeten Tintenstrahldrucker arbeiten nach dem „on demand“ Prinzip, d. h. „auf Anforderung“: auf ein Signal der Druckersteuerung hin wird ein Ausstoßenergie-Erzeugungselement im Druckkopf angesteuert, das dann ein Tintentröpfchen abschießt. Figur 3 zeigt die Ausstoßschritte bei Verwendung eines Heizwiderstands zur Erzeugung der Ausstoßenergie in einem von der Firma Canon entwickelten Thermo-Druckkopf.



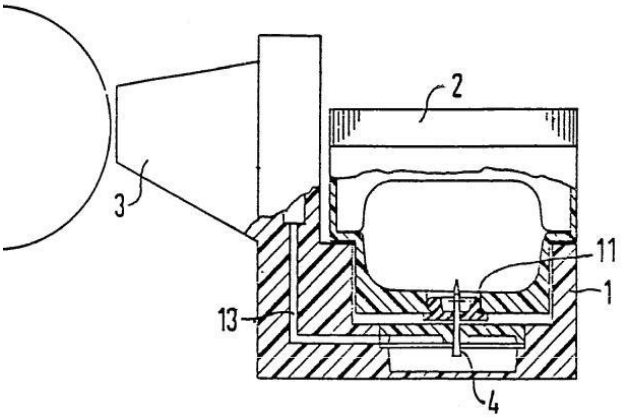
Figur 3: Ausstoß eines Tintentröpfchens **A**: Anfangs-/Ruhestellung; **B**: der Heizwiderstand 2 wird bestromt; **C**: Dampfblase 40 und der Tintenmeniskus an der Ausstoßöffnung 18 erreichen ihr maximales Volumen; **D**: die Dampfblase 40 kollabiert plötzlich, der Tropfen 45 reißt ab und wird ausgestoßen – frische Tinte wird nachgeführt (aus DE 697 27 731 T2).

Weit verbreitet sind auch Druckköpfe, bei denen piezoelektrische Wandler den Tropfenausstoß bewirken. Zur Herstellung der Druckköpfe werden heute die in der Halbleiterfertigung üblichen Produktionsverfahren genutzt. Dies ermöglicht eine preiswerte Massenfertigung und die Herstellung von Druckköpfen mit einer Vielzahl von Ausstoßöffnungen (ungefähr 30 bis 300), d. h. mit einer hohen Auflösung (300 bis 3600 dpi = dots per inch)

3. Rückblick

Schon vor nahezu 30 Jahren gab es Tintenstrahl-Drucker mit Tintenvorratsbehältern, die bereits mehr konnten, als nur Tinte zu speichern. Eine Tintenschreibeinrichtung aus dieser Zeit für Büro-, Daten oder Fernschreibmaschinen

der Siemens AG (DE 28 12 562 C2), wies eine „Tintenmosaikschreibeinrichtung“ mit einem Schreibkopf mit 12 Tintendüsen auf, die über ein Kanalsystem mit Tinte aus einem Tintenvorratsbehälter versorgt wurden. Der Tintenvorratsbehälter war bereits auswechselbar in der entlang einer Schreibwalze verfahrbaren „Tintenmosaikschreibeinrichtung“ eingesetzt. Die Tinte wurde in einer flexiblen Kunststoffblase luftdicht verschlossen gespeichert. Im Betriebszustand erfolgte die Tintenversorgung des Schreibkopfs über eine Hohlnadel, welche Bestandteil einer Aufnahmevorrichtung war. Beim Auswechseln des Tintenvorratsbehälters kam es schon damals darauf an, zu vermeiden, dass Tinte ausfließt und Luftblasen in das Versorgungssystem eindringen. Ein in der Wandung des Tintenvorratsbehälters eingesetzter Dichtungspfropfen und das Verdrehen des Tintenvorratsbehälters aus einer Betriebsstellung in eine Ruhestellung sollten dies vermeiden.

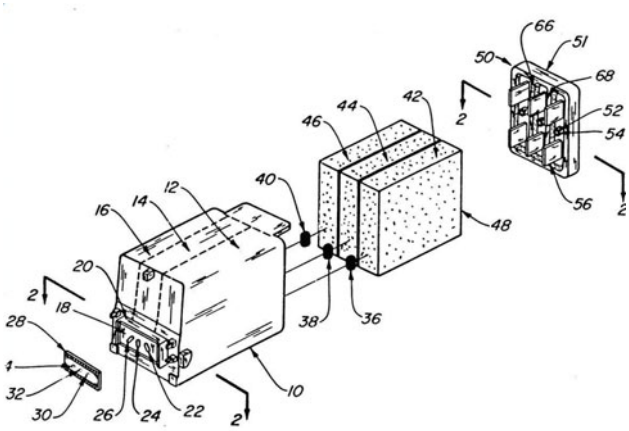


Figur 4: Siemens „Tintenmosaikschreibeinrichtung“; 1 Aufnahmeeinrichtung, 2 Tintenvorratsbehälter, 3 Schreibkopf, 4 Hohlnadel, 11 Pfropfen, 13 Kanalsystem (aus DE 28 12 562 C2).

4. Druckerpatronen mit „Schaumkörper“

Weit verbreitet sind Tintenstrahl-Druckerpatronen, deren Tintenbehälter mit einem Schwamm, einem so genannten Schaumkörper gefüllt ist, welcher mit Tinte getränkt ist. Der Schaumkörper hat die Aufgabe, die Tinte unter einem gewissen Unterdruck in dem Tintenbehälter zu speichern, so dass verhindert wird, dass die Tinte aus den Düsen ausläuft. Wenn die Tinte in dem Schaumkörper aufgenommen ist, wird jedoch auch vermieden, dass sich Druckschwankungen, die beispielsweise beim Beschleunigen und Abbremsen der auf einem Schlitten angeordneten Tintenpatrone auftreten, auf die Tintenzufuhr zum Druckkopf und damit auf das Druckergebnis auswirken. Der Schaumkörper hat aber auch die Aufgabe, zu vermeiden, dass Luftblasen aus dem Tintenbehälter zu den Düsen des Druckkopfs vordringen. Luft aus der Umgebung muss zwar entsprechend dem Tintenverbrauch in den Tintenbehälter kontrolliert eindringen können um dort einen gleich bleibenden Unterdruck zu gewährleisten, sie darf aber nicht bis in den Druckkopf vordringen, da dies zu einem fehlerhaften Ausdruck und sogar zu einer Zerstörung von Tintentröpfchen-Ausstoßelementen und damit zur Unbrauchbarkeit des Druckkopfs führen kann.

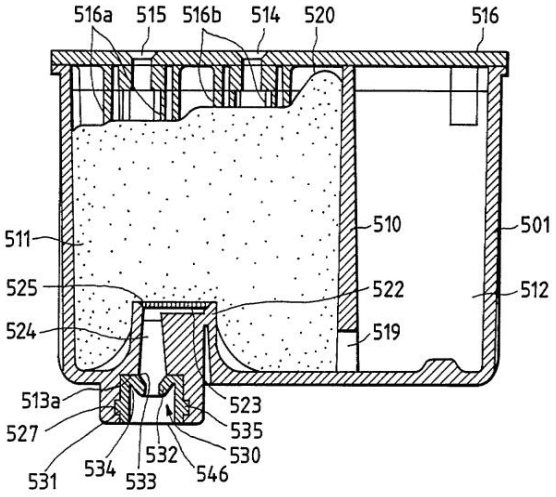
Wesentliche Grundlagen für die Tintenpatronen mit Schaumkörper wurden durch die Hewlett Packard Company bereits im Jahr 1986 mit dem in der US-Patentschrift Nr. 4 771 295 bzw. in der deutschen Gebrauchsmusterschrift DE 87 18 062 U1 beschriebenen Tintenstrahlstift geschaffen. Der Tintenstrahlstift (siehe Figur 5) zeichnet sich dadurch aus, dass Tintenbehälter und der Druckkopf 28 eine Einheit bilden und bereits für drei Druckfarben ausgelegt ist. Er weist dementsprechend drei Tintenspeicherkammern 12, 14, 16 auf. Die Kammern sind mit Polyurethanschaum 42, 44, 46 definierter Porosität gefüllt. An den Tintenauslassöffnungen 22, 24, 26 der Tintenkammern sind Maschenfilter 36, 38, 40 angebracht, um Luftblasen und feste Partikel auszufiltern. Durch die geometrische Ausgestaltung der Tintenauslassöffnungen in Verbindung mit der Gestaltung der Kammerwände werden die Schaumkörper oberhalb der Maschenfilter gezielt komprimiert. Dies wiederum erhöht die Kapillarität der Schaumkörper oberhalb der drei Filter und verringert damit die Gefahr, dass Luftblasen den Tintenfluss unterbrechen. Der Tintenstrahlstift ist an seiner Oberseite durch einen mit Rippen 56 versehenen Deckel 51 verschlossen. Die Rippen 56 dienen ebenfalls dazu, den Schaumkörper im Bereich von Belüftungsöffnungen 52 zusammenzudrücken. Die Belüftungsöffnungen 52 weisen Membranen aus einem porösen Material auf, die für eine ausreichende Belüftung der Tintenkammern sorgen, jedoch das Auslaufen von Tinte verhindern.



Figur 5: Tintenstrahlstift mit Druckkopf 28 und Schaumkörpern 42, 44, 46 (aus DE 87 18 062 U1).

Die Idee der gezielten Beeinflussung der Kapillarität des Schaumkörpers wird bei einer von der Seiko Epson Corp. 1995 angemeldeten Tintenpatrone noch weiter fortgeführt (siehe Figur 6). Deren Tintenkammer ist im Bereich oberhalb einer Tintenauslassöffnung mit einem Schaumkörper gefüllt. Hinter dem Schaumkörper weist sie eine weitere Kammer auf, in der „freie“ Tinte gespeichert wird. Durch diese Aufteilung wird der in der Tintenpatrone zur Verfügung stehende Raum besser ausgenutzt. Stufenförmig am Deckel angebrachte Vorsprünge und ein hervorstehender Abschnitt an der Tintenauslassöffnung sorgen dafür, dass sich die Kompression des Schaumkörpers zu der unten an der Patrone angeordneten Tintenauslassöffnung hin vergrößert. Dadurch verbessert sich der Tintenfluss zu der Auslassöffnung hin. Die Patrone kann dadurch insgesamt schmaler gestaltet werden.

Diese Tintenpatrone ist austauschbar über eine Tintenkanüle mit dem eigentlichen Tintenstrahl-Druckkopf verbunden. Die Tintenpatrone soll mit geringem Kraftaufwand und unter Anpassung an gewisse Positionierabweichungen eingesetzt werden können. Selbstverständlich muss auch hier das Eindringen von Luftblasen in den Druckkopf unbedingt vermieden werden. Die Tintenpatrone weist dazu an ihrer Unterseite ein Dichtteil aus nachgiebigem Material auf, mit einer sich nach oben öffnenden trichterförmigen Abdichtung. An der Unterseite ist das Dichtteil mit einer Siegelfolie verschlossen. Beim Einsetzen der Tintenpatrone durchdringt die Tintenkanüle die Siegelfolie. Durch die Formgebung und die Nachgiebigkeit des Dichtteils und den im Druckkopf herrschenden Unterdruck presst sich die Verengung des Dichtteils an die Tintenkanüle. Selbst wenn die Tintenkanüle und das Zentrum des Dichtteils etwas gegeneinander versetzt sind, ist die Tintenpatrone in diesem Bereich hermetisch verschlossen.

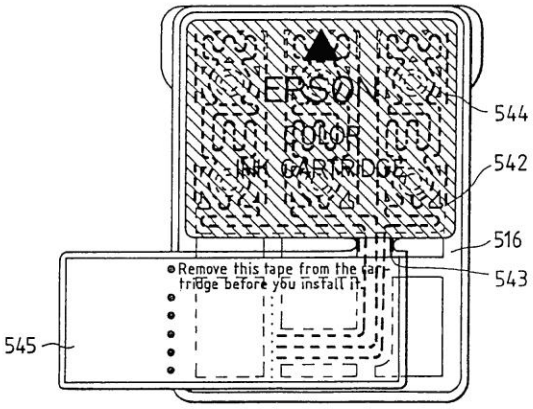


Figur 6: Tintenpatrone, 511 Kammer, 513 Tintenzuführöffnung, 530 Dichtteil, 532 Verengung, 546 Siegelfolie, 511 Schaumkammer, 512 Kammer mit „freier“ Tinte, 520 Schaumkörper, 516a/516b Vorsprünge (aus DE 195 34 577 C2).

Der Deckel dieser Tintenpatrone weist in Entsprechung zu den darunter angeordneten Tintenkammern Tinteneinfülllöcher sowie Lufteingänge auf, die mit den Tinteneinfülllöchern über in dem Deckel eingebrachte mäanderförmige Rillen verbunden sind. Nach Befüllen der Schaumkammern mit den Farbtinten werden alle Tinteneinfüllöffnungen mit einer Siegelfolie abgedeckt. Die Folie bildet zusammen mit den im Deckel eingebrachten mäanderförmigen Rillen Kapillarröhren, die einerseits ein Belüften der Tintenkammern ermöglichen, andererseits jedoch ein Verdunsten von Tinte verhindern. Die Druckerpatrone ist betriebsbereit sobald ein Teil der Siegelfolie entfernt wurde, so dass die Tintenkammern über die Lufteingänge und die mäanderförmigen Rillen mit der Atmosphäre in Verbindung stehen.

Bei der Herstellung der Tintenpatronen können sich Schwierigkeiten beim Einsetzen der Schaumkörper in die verhältnismäßig hoch und schmal gestalteten Tintenvorratskammern ergeben. Eine Lösung hat die Pelikan Produktions AG angemeldet (DE 197 06 266 A1). In einem speziellen Herstellungsverfahren wird eine Beschichtung auf die Seitenflächen des Schaumkörpers aufgebracht. Durch die Beschichtung wird erreicht, dass

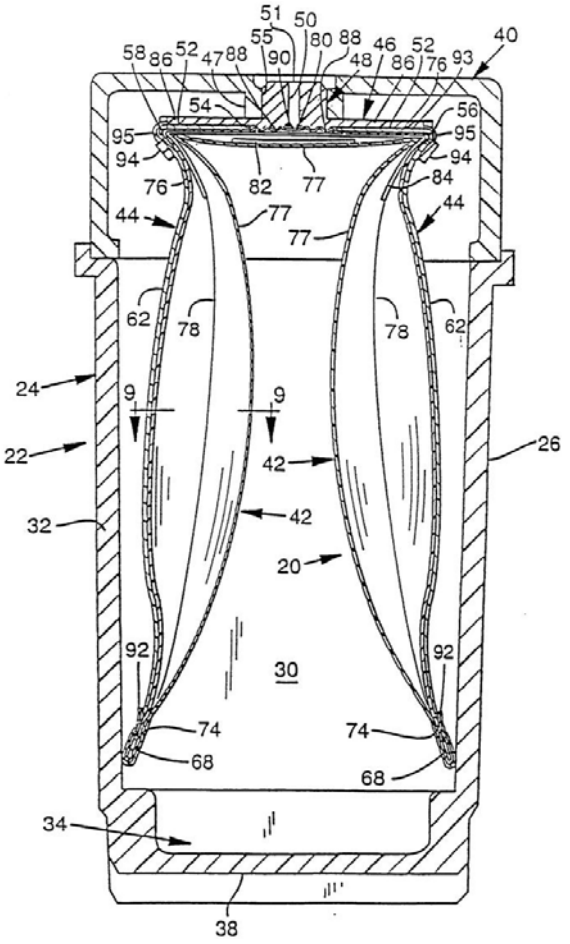
der Schaumkörper leicht ins Gehäuse einzuschieben ist, ohne dass dessen Ecken oder Kanten an dem Gehäuse hängen bleiben und damit gestauchte Bereiche mit veränderter Kapillarität bzw. Hohlräume entstehen.



Figur 7: Deckel 516 einer Druckerpatrone mit Tinteneinfüllöffnungen 544 und mäanderförmigen Rillen 542, die durch eine Siegelfolie 545 abgedeckt sind (aus DE 195 34 778 B4).

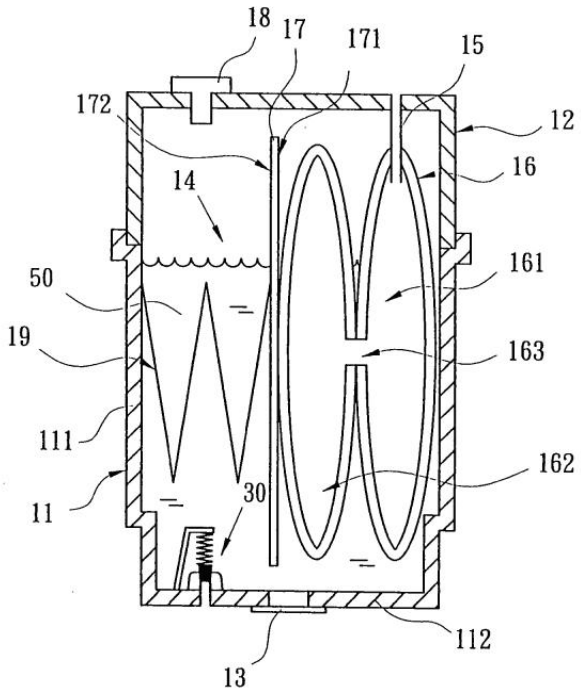
5. Tintenpatronen mit Mechanismus zur Erzeugung eines Unterdrucks

Neben den Druckerpatronen mit Schaumkörpern werden auch Patronen angeboten, bei denen der Unterdruck in dem Tintenbehälter durch einen Mechanismus aufrechterhalten wird. Figur 8 zeigt einen solchen Tintenstrahlstift, den sich die Hewlett Packard Company schützen lässt. In dessen Tintenbehälter sind an einer Feder befestigte, expandierbare Taschen angeordnet. Das Innere der Taschen steht mit der Atmosphäre in Verbindung. Während des Druckens füllen sich die Taschen entsprechend der Tintenentnahme mit Luft bzw. entsprechend der Volumenvergrößerung der Taschen nimmt das Volumen ab, welches der Tinte in dem Behälter zur Verfügung steht. Die Taschen sind zusammen mit den Federn und dem Behälter so aufeinander abgestimmt, dass sowohl bei der Tintenentnahme als auch bei starken Änderungen des Umgebungsdrucks der Unterdruck in dem Behälter erhalten bleibt. Dadurch wird verhindert, dass Tinte, beispielsweise bei einem Lufttransport, aus den Druckkopfdüsen ausläuft. Dennoch darf der Unterdruck im Behälter nicht so hoch werden, dass der Druckkopf nicht mehr in der Lage ist, diesen Unterdruck zu überwinden, um Tintentropfen auszustoßen.



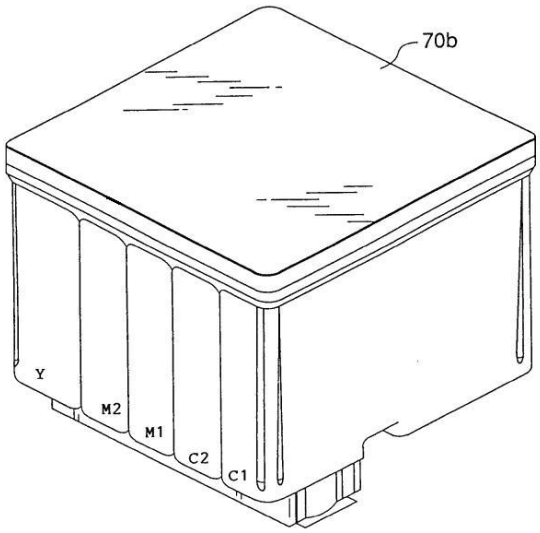
Figur 8: Tintenstrahlstift 22 mit Druckausgleichseinrichtung 20; 38 untere Behälterwand mit Druckkopf, 30 Behälterraum mit Tinte, 42 expandierbare Taschen, 44 Blattfedern, 50 Lufteinlass in die expandierbaren Taschen (aus DE 691 08 413 T2).

Es wurden zahlreiche Anstrengungen unternommen, diesen von den Erfindern der Hewlett Packard Company geschaffenen Stand der Technik zu verbessern. Figur 9 zeigt eine Tintenstrahl-Druckerpatrone die zusätzlich zu speziell ausgebildeten expandierbaren Taschen einen so genannten „Blasengenerator“ aufweist. Hat die expandierbare Tasche ihr maximales Volumen erreicht, steigert sich bei weiterer Abgabe von Tintentöpfchen im Verlauf des Druckbetriebs der Unterdruck in dem Behälterraum, bis die Umgebungsluft die Kraft einer Feder überwindet und sich ein Druckeinstellelement zurückbewegt. Durch den entstandenen Spalt kann Luft in den Behälterraum einströmen und es bilden sich dort Luftblasen, und zwar solange, bis der Unterdruck wieder auf einen bestimmten Wert absinkt. Dann schließt sich der Spalt wieder. Insgesamt soll eine zuverlässigere Entleerung der Druckerpatrone erreicht werden.



Figur 9: Tintenstrahl-Druckerpatrone mit „Blasengenerator“ 30; 13 Druckkopf, 16 Tasche mit 19 Feder (aus DE 199 14 777 B4).

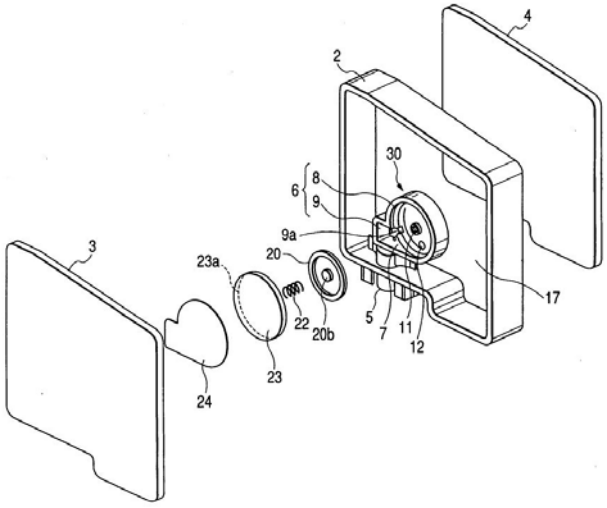
Das Drucken von Farbbildern mit Tintenstrahldruckern geschieht durch Überlagerung von Tintentröpfchen verschiedener Farben. Dazu werden von einem Druckkopf Tintentröpfchen in Cyan-, Magenta- und gelber Farbe ausgestoßen. Die Patentschrift DE 197 33 678 B4 zeigt eine Druckerpatrone für den Mehrfarbendruck, bei der zusätzlich zu diesen Farbtinten noch Farbtinten in Hellcyan und Hellmagenta gespeichert werden können. Durch die zusätzlichen Farbtinten geringerer Farbdichte soll sich ein für den Betrachter besseres Druckbild ergeben. Um ein gutes Farbbild zu erhalten kommt es auch darauf an, in welcher Reihenfolge die verschiedenen Farben durch den Druckkopf ausgestoßen werden. Überraschenderweise wird in dieser Patentschrift vorgeschlagen, die hellste, gelbe Farbtinte zuletzt auszustoßen, um einen Punkt zu bilden. Dadurch ergebe sich eine bessere Körnung des entstandenen Bildes, wenn sich die später ausgestoßene, helle Tinte in der zuvor ausgestoßenen, dunkleren Tinte verteilt. Dementsprechend ist die Tintenkammer, welche die gelbe Tinte enthält, am hinteren Ende der Reihe von Tintenkammern angeordnet, wenn die Betrachtung in Richtung des Patronentransportes beim Druckvorgang erfolgt.



Figur 10: Tintenpatrone mit Tintenkammern für Farbtinten hintereinander angeordnet mit abnehmender Farbdichte Cyan C1, Hellcyan C2, Magenta M1, Hellmagenta M2 und Gelb Y in Richtung des Patronentransports/Punktbildung betrachtet (aus DE 197 33 678 B4).

Die Forderung nach höherer Druckqualität und Druckgeschwindigkeit führt zu verbesserten Tintenstrahldruckern mit einer immer größeren Anzahl von Düsenöffnungen und einem entsprechend höheren Tintenverbrauch. Dieser Tendenz entsprechend, sind Tintenpatronen mit einer immer größeren Tintenspeicherkapazität erforderlich, die dennoch eine hohe Tintenzufuhrrate und einen gleich bleibenden Förderdruck gewährleisten. In einer aktuelleren Entwicklung der Seiko Epson Corp. (DE 103 06 258 B4) soll dies mit einer besonders schmal und verhältnismäßig hoch gebauten Druckerpatrone erreicht werden, welche wieder ohne einen Schaumkörper auskommt. Um die Tinte gleichmäßig unter Unterdruck dem Druckkopf zuzuführen, ist ein Membranventil in dem Tintenbehälter eingebaut. Der Tintenbehälterraum ist in einen oberen Bereich, der zur Atmosphäre abgedichtet ist und einen unteren Bereich, der zur Atmosphäre offen ist, aufgeteilt. Ein elastisches scheibenförmiges Ventilelement des Membranventils öffnet und schließt den Tintenströmungspfad zwischen den beiden Tintenbehälterräumen in Abhängigkeit von dem Tintenverbrauch. Eine Feder und ein speziell ausgestaltetes Abdichtungselement sorgen dafür, dass sich die bei der Bewegung des Druckerschlittens auftretenden Vibrationen nicht auf das Membranventil und damit auf den Tintenfluss auswirken. Diese Druckerpatrone erlaubt die Verwendung so genannter

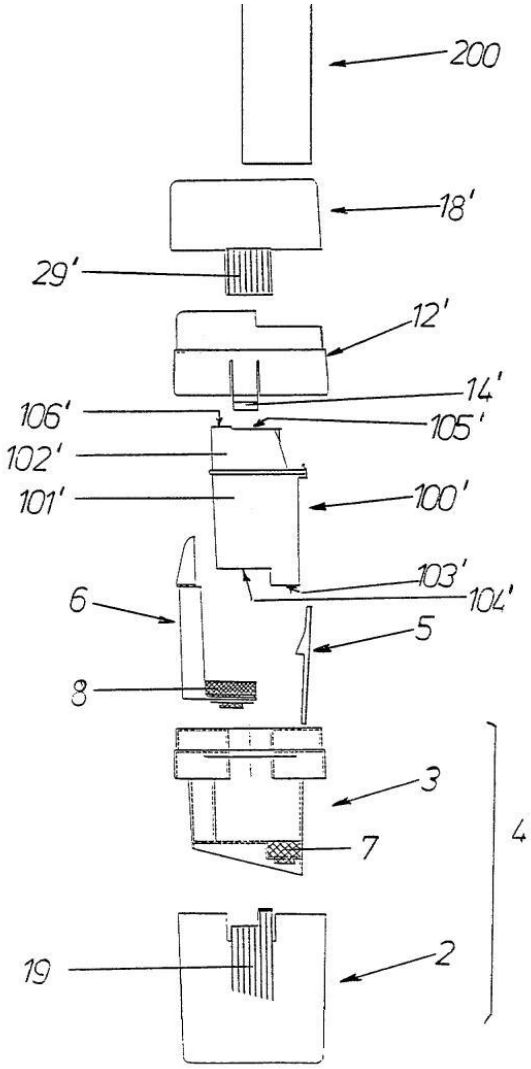
Pigmenttinten, bei denen abweichend von den üblichen Farbtinten kleine Farbstoffpartikel in einer Trägerflüssigkeit dispergiert sind. Die damit hergestellten Ausdrucke zeichnen sich besonders durch eine hohe Lichtbeständigkeit aus. Da die Tinte im Tintenbehälter als „freie“ Flüssigkeit ohne einen Schaumkörper gespeichert wird, ergibt sich im Druckbetrieb eine gleich bleibende Durchmischung der Farbteilchen mit der Trägerflüssigkeit.



Figur 11: Druckerpatrone mit Membranventil zur Regelung des Tintenflusses; 2 Rahmen, 5 Tintenöffnung zum Druckkopf, 6 Strömungspfad, 20 scheibenförmiges Ventilelement, 22 Feder zum Einstellen des Differenzdrucks (aus DE 103 06 258 B4).

6. Wiederbefüllen von Tintenpatronen

Um die Lebensdauer der Druckerpatronen zu verlängern, wurden zahlreiche Vorschläge angemeldet, die Patronen wieder zu befüllen. Bei Druckerpatronen, deren Tintenkammern mit einem Schaummaterial gefüllt sind, ist dies mittels einer Hohlnadel verhältnismäßig problemlos möglich. Das Wiederbefüllen von Druckköpfen mit expandierbaren Taschen ist wegen des ausgeklügelten Be- und Entlüftungssystem weitaus komplizierter und erfordert die strikte Einhaltung einer bestimmten Reihenfolge von Arbeitsschritten, damit die Tinte nicht aus der Patrone ausläuft. In der Patentschrift DE 43 27 178 C1 wird ein solcher Vorgang beschrieben. Zunächst muss die im Bereich der Düsenplatte befindliche Belüftungsöffnung abgedichtet werden. Danach muss die gegenüberliegend am Gehäusedeckel angebrachte Belüftungsöffnung dicht verschlossen werden. Auch müssen die Düsen verschlossen werden, damit beim Befüllvorgang keine Tinte austreten kann. Nach Entfernen einer Kugel aus einer Einfüllöffnung kann mit einem Nachfüllbehälter der Tintenvorrat ergänzt werden. Der Nachfüllvorgang muss ausreichend langsam erfolgen, um einen Druckausgleich zu ermöglichen. Die Patentschrift zeigt auch die entsprechende Nachfüllvorrichtung, mit der es möglich ist, die richtige Reihenfolge der Arbeitsschritte einzuhalten und Verschmutzungen zu vermeiden.



Figur 12: Wiederbefüllvorrichtung; 4 Halterungen, 7/8 Dichtungen für die Düsen und den „Blasengenerator“, 12’ Dichtungsträger für Luftzufuhrdichtung, 18’ Kanülenträger, 100’ Druckerpatrone, 200 Nachfüllpatrone (aus DE 43 27 178 C1).

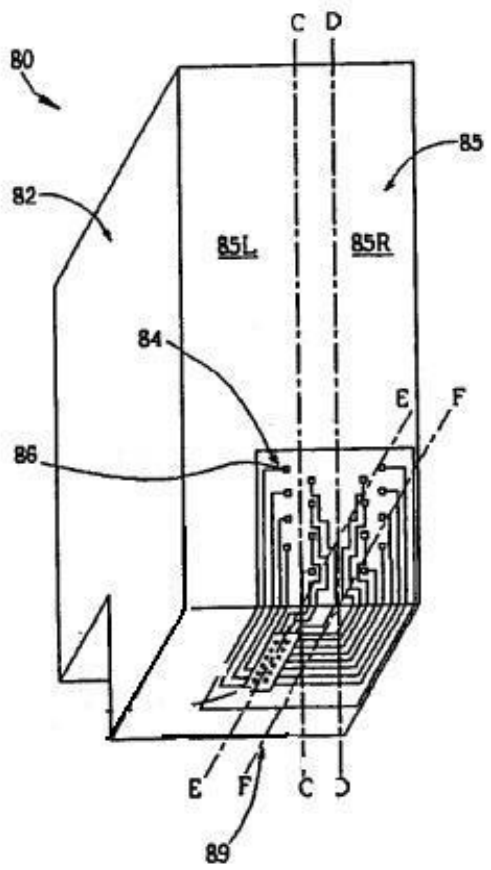
Ein voll automatisiertes Wiederbefüllen von Druckerpatronen ist aus der Patentschrift DE 196 37 235 C1 bekannt. Nach Einsetzen einer zu befüllenden Druckerpatrone in eine Halterung und dem Schließen eines Deckels der Vorrichtung erfolgt das Befüllen der Druckerpatrone über die Düsen des Druckkopfs, indem eine Pumpe pulsierend die Tinte zuführt. Eine Steuerung und Sensorelemente sorgen dafür, dass eine

vorgeschriebene Tintenmenge eingefüllt und definierte Drücke in der Patrone eingestellt werden.

7. Datenaustausch zwischen Druckersteuerung Druckerpatrone

Damit die Tintentröpfchen-Ausstoßelemente am Druckkopf entsprechend dem zu druckenden Bild angesteuert werden, müssen Druckerpatronen mit integriertem Druckkopf die Druckdaten von der Druckersteuerung über eine Schnittstelle empfangen und an den Druckkopf weiterleiten können. Um für diesen Zweck die elektrischen Verbindungen und die Leitungsstrukturen an der Druckerpatrone möglichst preiswert bereitzustellen, ist bei vielen marktüblichen Patronen eine so genannte TAB-Schaltung (TAB = tape automated bonding = automatisches Folien-Bond-Verfahren) angebracht. Diese sind in der Elektronikindustrie allgemein verfügbar und weit verbreitet. Dabei handelt es sich um einen flexiblen Streifen aus einem Polymerfilm, der mit speziell auf den Druckkopf abgestimmten Leiterbahnen versehen ist und beispielsweise mittels eines thermoplastischen Verbindungsfilms auf die Druckerpatrone aufgeklebt wird. Die TAB-Schaltung erstreckt sich von der Vorderseite der Patrone bis zur Patronenunterseite. Der Druckkopf ist an der Patronenunterseite direkt an der TAB-Schaltung montiert. An der Patronenvorderseite umfasst die TAB-Schaltung eine Vielzahl von Kontakten, die mit auf dem Druckerschlitten angebrachten Kontakten korrespondieren, so dass über Leiterbahnen die Druckersteuerung des Druckers mit dem Druckkopf elektrisch verbunden ist.

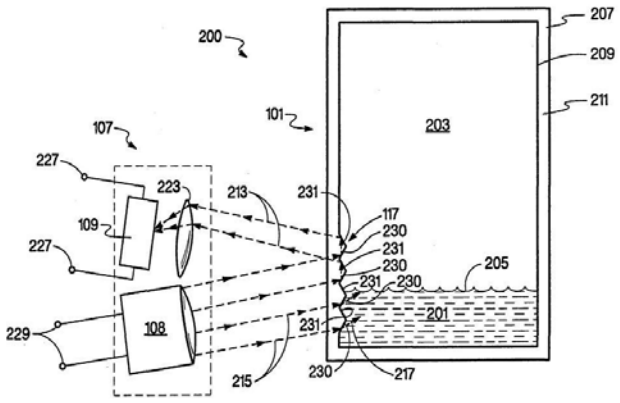
Die Patentschrift DE 101 97 260 B4 schlägt vor, die Kontakte an der vorderen Oberfläche der Druckerpatrone im Gegensatz zum Stand der Technik asymmetrisch anzuordnen. Werden zwei derartige Druckerpatronen mit jeweils asymmetrisch angeordneten Kontakten spiegelsymmetrisch zueinander in den Druckkopfschlitten eingebaut, stehen die Kontakte enger zueinander bzw. die Kontakte konzentrieren sich auf einen kleineren Bereich. Die korrespondierende Leiterbahn in dem Druckkopfschlitten kann dann dementsprechend kleiner gestaltet und damit zu geringeren Kosten hergestellt werden.



Figur 13: Druckerpatrone mit asymmetrisch angeordneten Kontakten; 82 Tintenbehälter, 84 TAB-Schaltung, 85 vordere Oberfläche, 86 Kontakte, 88 Druckkopf, 89 untere Oberfläche (aus DE 101 97 260 B4).

Inzwischen wurden bei vielen Druckerpatronen die Voraussetzungen geschaffen, tintenbezogene Daten, insbesondere Tintenverbrauchsdaten, an die Druckersteuerung zu übermitteln. Liegen der Druckersteuerung beispielsweise Informationen darüber vor, wie viel Tinte der Tintenbehälter enthält, kann ein Druckvorgang rechtzeitig gestoppt werden, bevor die Tinte in dem Behälter verbraucht ist. Die Aktivierung der Tintentröpfchen-Ausstoßelemente ohne Tinte wird so vermieden, denn ein „trockener“ Betrieb des Druckkopfs kann zu dessen Unbrauchbarkeit führen. Aber auch zum Drucken aufwändig gestalteter Farbgrafiken oder von Bildern ist es vorteilhaft, wenn der Druckersteuerung Informationen über die im Tintenbehälter gespeicherte Tintenmenge vorliegen; schließlich muss gewährleistet sein, dass die Tinte während des Druckvorgangs nicht zur Neige geht, denn ein Anhalten und Austauschen der Druckerpatrone führt in den meisten Fällen zu einer unerwünschten Streifenbildung auf dem Bild.

Eine Möglichkeit zur Erfassung der Tintenmenge in einer Druckerpatrone beschreibt die Patentschrift DE 199 02 276 C2. Ein optisches System, bestehend aus einer Lichtquelle und einer lichtdurchlässigen, mit prismenförmigen Erhebungen versehenen Wand an dem Tintenbehälter, erfasst den Tintenpegel im Behälter (siehe Figur 14). Für den Fall, dass sich die Tinte in Kontakt mit einer prismenförmigen Erhebung befindet, werden die von der Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahlen nur gebrochen. Wenn sich die Tinte jedoch nicht mehr im Kontakt mit einer prismenförmigen Erhebung befindet, werden die Lichtstrahlen reflektiert und von einer Lichtempfangsvorrichtung erfasst, welche dann ein entsprechendes Signal an die Druckersteuerung weiterleitet.



Figur 14: Druckerpatrone mit optischer Erfassung des Tintenpegels; 101 Tintenbehälter, 108 Lichtquelle, 109 Lichtempfangsvorrichtung, 117 Erfassungsbereich, 201 Tinte, 205 Tintenpegel, 213/215 Lichtstrahlen, 230/231 prismenförmige Erhebungen (aus DE 199 02 276 C2).

Eine weitere Möglichkeit, die in der Patrone verbliebene Tintenmenge zu erfassen, besteht darin, die Anzahl der ausgestoßenen Tintentröpfchen zu zählen und daraus die im Tintenbehälter verbliebene Tintenmenge zu berechnen. Zum Speichern der daraus ermittelten Tintenmenge ist die Tintenpatrone mit einem Speicherchip ausgestattet. In dem Speicherchip können noch zahlreiche weitere Informationen gespeichert werden, welche z. B. die Tintenart oder das Herstelldatum der Patrone betreffen. Vorschläge, die gespeicherten Informationen betreffend und wie diese effizient gespeichert werden können, enthält die Offenlegungsschrift DE 199 56 702 A1 (siehe Figur 15). Beispielsweise ermöglicht der Zugriff auf Informationen über die jeweils in einer Druckerpatrone gespeicherte Tintenart, dass die Druckersteuerung die Systemparameter zur Ansteuerung des Druckkopfs entsprechend der Tintenart einstellt.

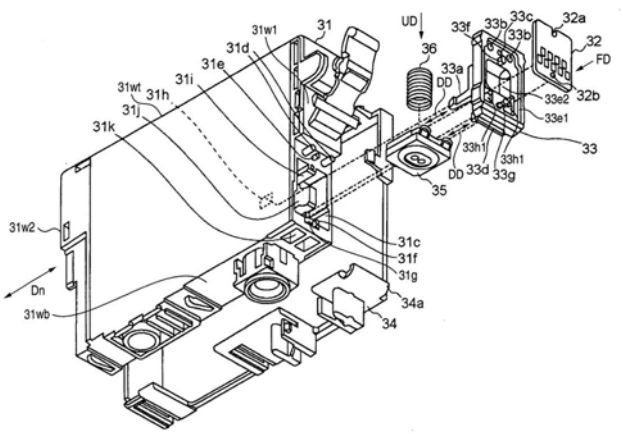
Adresse Steuer-IC200	Daten-länge (byte)	Information	Adresse Speicherelement 80 K	Kapazität (bit) im Speicher-element	
00	1	verbleibende Restmenge schwarze Tinte	00	8	650
01	1	Häufigkeit Reinigung	08	8	
02	1	Häufigkeit Anbringung	10	8	
03	2	Gesamtzeitdauer Anbringung	18	16	
05	1	Herstellungsjahr	28	7	660
06	1	Herstellungsmonat	2F	4	
07	1	Herstellungsdatum (Tag)	33	5	
08	1	Herstellungsstunde	38	5	
09	1	Herstellungsminute	3D	6	
0A	1	Produktions-Seriennummer	43	8	
0B	1	Recycle-Häufigkeit	4B	3	
0C	2	Tintenpatronenname	4E	10	
0E	1	Tintenart	58	8	
0F	1	Haltbarkeit	60	6	
10	1	Haltbarkeit nach Anbruch	66	5	

Figur 15: In einem Speicherchip einer Druckerpatrone gespeicherte Daten; 650 lesbarer und beschreibbarer Speicherbereich, 660 nur lesbarer Speicherbereich (aus DE 199 56 702 A1).

Wenn eine Tintenpatrone einen solchen, mit herstellerspezifischen Daten versehenen Speicherchip aufweist, kann ein Anwender nur den von dem Druckerpatronen-Hersteller für einen bestimmten Druckertyp zugelassenen Tintenpatronentyp einsetzen, ansonsten ist das Drucken gesperrt. Beschädigungen am Drucker oder an dem Druckkopf durch fälschlicherweise eingesetzte Patronen werden dadurch vermieden. Trotz diesem und anderer Vorteile, die eine Kodierung an der Druckerpatrone bietet, kann es gemäß zahlreicher Patentanmeldungen für den Anwender aus ökonomischen oder ökologischen Gründen vorteilhaft sein, wenn die Verwendung artfremder Druckerpatronen dennoch ermöglicht wird. In der auf die Staedler GmbH & Co. KG zurückgehenden Offenlegungsschrift DE 102 04 229 A1 wird bemängelt, dass solche Druckerpatronen nach ihrer Entleerung durch einen von dem Speicherchip erzeugten Sperrbefehl unbrauchbar gemacht werden, obwohl die Hardwareelemente, wie beispielsweise das Patronengehäuse, Tintenbeutel, Ventile, Elektronik etc. problemlos mehrfach verwendet werden könnten. Damit diese Patronen dennoch befüllt und weiter verwendbar sind, wird in dieser Offenlegungsschrift vorgeschlagen, ein Steuergerät als Kommunikationselement in die Datenleitung zwischen die Druckerelektronik und den Speicherchip der Druckerpatrone zu schalten. Dieses

Steuergerät übermittelt der Druckerelektronik anstelle des Speicherchips alle zum weiteren Drucken erforderlichen Daten, so dass für den Benutzer bei Verwendung der wiederbefüllten Druckerpatrone kein Unterschied gegenüber einer fabrikneuen Druckerpatrone zu bemerken ist.

Eine aktuelle Anmeldung der Seiko Epson Corp. (DE 10 2006 014 868 A1) offenbart eine Druckerpatrone, bei der in unmittelbarer Nähe eines Speicherchips in einem Tintendurchflussweg ein Sensorelement zum Erfassen der Anwesenheit oder Abwesenheit von Tinte vorgesehen ist. Bei dem Sensorelement handelt es sich um einen piezoelektrischen Sensor, der Schwingungen für eine vorbestimmte Dauer erzeugt und auch Schwingungen erfasst, um ein entsprechendes elektrisches Signal auszugeben, das für die Anwesenheit oder Abwesenheit von Tinte steht. Das heißt, eine Wellenform des elektrischen Signals, das von dem Sensorelement ausgegeben wird, verändert sich abhängig davon, ob die Tinte in dem Tintendurchflussweg vorhanden ist.



Figur 16: Druckerpatrone mit Speicherchip 32 und piezoelektrischem Sensor 35 zum Erfassen von Tinte innerhalb eines Tintendurchflusswegs (aus DE 10 2006 014 868 A1).

Da sich der Sensor ganz in der Nähe der Auslassöffnung der Druckerpatrone befindet, ist es möglich, die Menge der Flüssigkeit zu maximieren, die aus der Flüssigkeitskartusche entnommen werden kann.

8. Ausblick

Als die ersten Tintenstrahldrucker auf den Markt kamen, war es fraglich, ob sich diese neben den damals üblichen Nadeldruckern und den leistungsfähigen, heute weit verbreiteten Laserdruckern etablieren können. Inzwischen sind der Tintenstrahldruck und der Umgang mit Druckerpatronen aus dem Alltag kaum mehr wegzudenken. Dies wurde durch eine konsequente Entwicklungsarbeit möglich, bei der den zahlreichen Aspekten und Bauteilen, die für funktionstüchtige Tintenstrahldrucker mit zuverlässigen und preiswerten Druckerpatronen notwendig sind, bis in die letzten Details Beachtung geschenkt wurde. Schon jetzt ist abzusehen, dass der Tintenstrahldruck bei der Herstellung von Fotos, großflächiger Werbung sowie von personalisierten, in Rotationsdruckmaschinen hergestellten Druckprodukten weiter Fuß fassen wird. Auch bei der Herstellung von Elektronik-Komponenten mittels Druckverfahren wird sich der Tintenstrahldruck einen Platz erobern. Für den „Normalverbraucher“ bleibt zu wünschen, dass es den Herstellern von Druckerpatronen gelingen wird, diesen Verbrauchsartikel trotz seiner Komplexität noch preiswerter anzubieten und die Möglichkeit, diesen wieder zu befüllen, aus ökologischen Gründen weiter erhalten bleibt.

Nichtpatent-Literatur

[1] LLOYD, W. J. & TAUB H.: Output Hardcopy Devices. Academic Press Inc., 1988, S. 311 – 370. ISBN 0-12-225040-0.

Tumortherapie mit Röntgenstrahlen

Dr. Bernhard Steinbauer, Abt. 1.54

Die Strahlentherapie gehört mittlerweile zum Standardrepertoire bei der Behandlung zahlreicher Tumore; dabei bezeichnet der Begriff Strahlentherapie heute vor allem die örtlich eng begrenzte Anwendung hochenergetischer Strahlen, meist Röntgenstrahlen, auf den Tumor. Durch Schädigung der Erbsubstanz (DNS) werden bösartige Zellen zum Absterben oder um ihre Fortpflanzungsfähigkeit gebracht. Die apparativen Fortschritte, wie sie sich auch in den Patentanmeldungen der letzten Jahre am DPMA im IPC-Bereich A61N 5/10 widerspiegeln, liegen dabei in einer möglichst genauen Begrenzung des Strahls auf das Tumorgewebe, insbesondere bei benachbarten Risikostrukturen wie Nervenbahnen, in der rechnergestützten Bestrahlungsplanung sowie in einer möglichst genauen Erfassung und Berücksichtigung möglicher Positionsänderungen des Patienten.

1. Definition, Abgrenzung

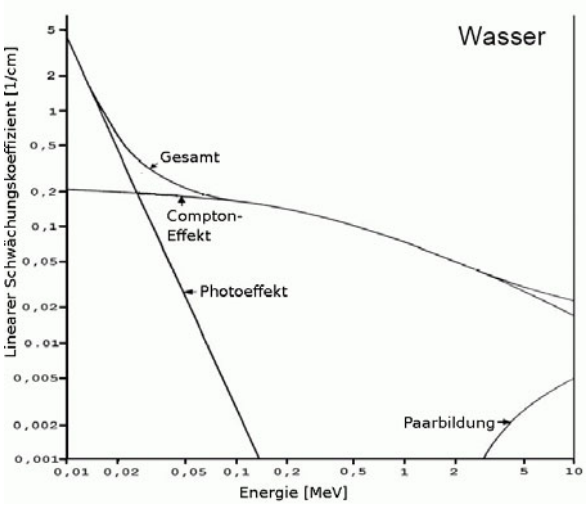
Strahlentherapie umfasst die Verwendung ionisierender, hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung bei gutartigen und bösartigen Erkrankungen. Typische Beispiele gutartiger Erkrankungen sind Fersensporn, Tennisellenbogen oder Gelenkarthrosen. Unter den bösartigen Erkrankungen werden Tumoren sehr häufig bestrahlt, hierbei etwa gleich häufig *palliativ* (schmerzlindernd) und *kurativ* (heilend); bei kurativem Einsatz oft auch unterstützend (*adjuvant*) zu anderen Behandlungen wie Operation und Chemotherapie [1].
Die Anwendung legt die eingebrachte Gesamtdosis fest: bis zu 10 Gy bei gutartigen Erkrankungen [2] (1 Gy = 1 Gray = 1 J Strahlungsenergie / kg bestrahltes Gewebe), 45-60 Gy adjuvant bei Tumoren bzw. 60-80 Gy in Teilbehandlungen (Fraktionen) zu 1,8-2 Gy bei reinen Strahlenbehandlungen von Tumoren.

Der vorliegende Artikel beschränkt sich auf die *Teletherapie*, d.h. die Bestrahlung des Körpers mit einer entfernt liegenden Quelle; im Gegensatz dazu wird bei der *Brachytherapie* ein Strahler (ein radioaktives Präparat oder eine miniaturisierte Röntgenquelle, vgl. DE 10 2005 056 066 B3) direkt in die Nähe der krankhaften Stelle in den Körper eingebracht. Von den verschiedenen Realisierungen der Teletherapie wird wiederum nur die Verwendung von Gamma-Strahlung, d.h. energiereicher Röntgenstrahlung behandelt. Eine Übersicht über die Teletherapie mit Teilchenstrahlen (Ionen- oder Protonenstrahlen) findet sich in der letzten Ausgabe der Erfinderaktivitäten des DPMA [3].

2. Funktionsweise der Röntgenbestrahlung

2.1. Absorptionsmechanismen

Der Absorptionsmechanismus und damit mittelbar die Wirkungsweise von photonischer Strahlung in biologischem Gewebe hängt stark von der Energie der Strahlung ab (Figur 1; vgl. auch [6], Kap. 1.4.9).



Figur 1: Linearer Schwächungskoeffizient μ(E) von photonischer Strahlung in Wasser als Näherung für die Wechselwirkung mit biologischem Gewebe. Für Energien bis etwa 50 keV dominiert der Photoeffekt, über ca. 5 MeV die Paarbildung; dazwischen liegt ein Bereich, in dem Photonen vor allem durch den Compton-Effekt absorbiert werden (nach [6]).

Für Energien bis etwa 50 keV überwiegt der photoelektrische Effekt, d.h. die Ionisierung von Atomen über eine Anregung von Elektronen aus inneren Schalen. Bei über 5 MeV trägt hauptsächlich die Paarbildung zur

Absorption von Röntgenquanten bei, d.h. die Bildung von Elektron-Positron-Paaren bei Wechselwirkung der Photonen mit dem Coulomb-Feld des Atomkerns.
Im Übergangsbereich zwischen ca. 50 keV und 5 MeV dominiert ein dritter Effekt, die Compton-Streuung an quasifreien Elektronen, wobei ein Photon einen Teil seiner Energie als kinetische Energie an die Elektronen abgibt.

Die Summe der verschiedenen Beiträge ergibt eine energieabhängige Absorptionswahrscheinlichkeit (auch Schwächungskoeffizient genannt), die für Wasser von sehr hohen Werten für niederenergetische Photonen stark abfällt, bei etwa 1-5 MeV ein Minimum durchläuft und anschließend wieder leicht ansteigt ([5], [6]).
Der Bereich der optimalen Bestrahlungsenergie für die Behandlung von Tumoren liegt bei 6-15 MeV ([4], [5]); hier ist die Absorptionswahrscheinlichkeit für kleinere Energien etwas höher, was dazu führt, dass aus einem bestimmten Spektrum an Anregungsenergien (s. Kapitel 3.1) beim Durchlaufen des Gewebes Photonen niedrigerer Energie bevorzugt absorbiert werden und somit die mittlere Energie des Strahls ansteigt (*radiation hardening*).

Vernachlässigt man diesen Effekt, so gilt für die Strahlabschwächung ein Gesetz ähnlich dem von Lambert-Beer für sichtbares Licht, nämlich dass ein Strahl der Einstrahlintensität I_0 nach durchlaufener Wegstrecke d im Gewebe auf $I(d) \propto I_0 \exp[-\mu(E) \cdot d]$ abgeschwächt ist.
Die Intensität fällt also exponentiell ab, mit dem größten Abfall zu Beginn der Wegstrecke. Sitzt der Tumor nun tief im Körperinneren, so ist der Strahlungseintrag im darüber befindlichen Gewebe deutlich höher.

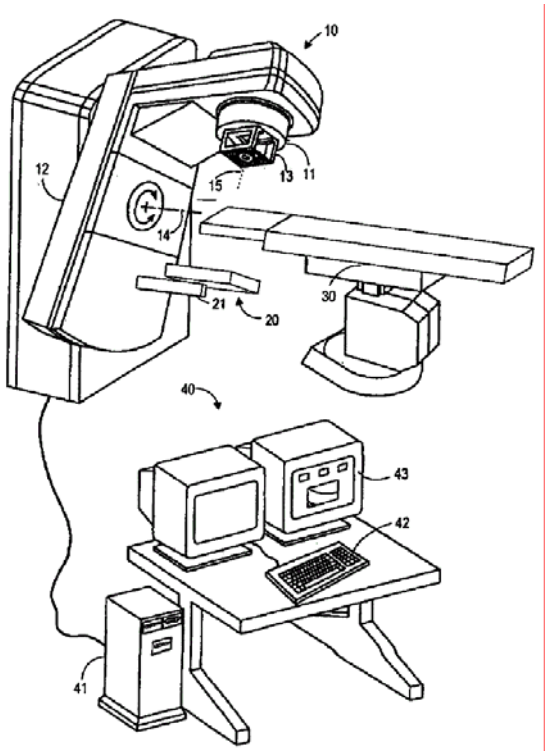
2.2. Schädigungsmechanismen

Die Wirkung hochenergetischer Strahlung auf biologisches Gewebe ist sehr komplex ([5], Kapitel 14). Für die Antitumorwirkung relevant sind neben direkten Treffern an der DNS vor allem hochtoxische freie Radikale, die durch die Ionisation von Wassermolekülen gebildet werden. Diese Radikale erzeugen Schäden an der DNS, insbesondere Doppelstrangbrüche, die entweder unmittelbar zur Einleitung der *Apoptose* führen, d.h. zum geregelten Zelltod, oder zum Verlust der Fortpflanzungsfähigkeit der Zelle. Da aber die Zelle über effiziente Reparaturmechanismen verfügt, muß bei jeder (Teil-)Bestrahlung (*Fraktion*) eine Mindestdosis verabreicht werden, um dauerhafte Schäden zu bewirken; erst oberhalb dieser Mindestdosis steigen die irreparablen Schäden stark an und erreichen schließlich einen Sättigungswert (sigmoidales Verhalten). Diese Dosis-Wirkungs-Beziehung ist für gesundes Gewebe qualitativ ähnlich, jedoch zu höheren Dosen hin verschoben, da gesundes Gewebe Strahlenschäden besser reparieren kann als Tumorgewebe ([5], Kapitel 14.9).

3. Bestrahlung

3.1. Schematischer Aufbau eines Bestrahlungssystems

Figur 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Teletherapie-Bestrahlungssystems mit Röntgenstrahlung (vgl. DE 10 2004 006 784 A1, DE 199 22 656 A1):



Figur 2: Aufbau eines Röntgen-Bestrahlungssystems (nach DE 10 2004 006 784 A1): in einem Linearbeschleuniger (*Linac,* für *linear accelerator*; 10) werden stark beschleunigte Elektronen auf ein Target gelenkt und erzeugen durch Bremsprozesse Röntgenstrahlen. Der Bereich (13) kann Vorrichtungen zur Festlegung der Feldgröße (Kollimatoren) oder der Energie (z.B. Absorberelemente) aufnehmen. Der so geformte Strahl wird unter verschiedenen Winkeln (unter Drehung der so genannten *Gantry* (12)) auf den auf der Patientenliege (30) befindlichen Patienten gerichtet, der zuvor bezüglich der Gantry positioniert wurde. Eine Detektoreinheit unter dem Patienten kann zur Kontrolle der Position und der absorbierten Strahlung herangezogen werden (*Portal Imaging*).

Der Patient wird auf der Liege (30) positioniert, gegebenenfalls immobilisiert und in die gewünschte

Stellung bezüglich der schwenkbaren Strahlenquelle (*Gantry*) gebracht. In der Gantry wird der Röntgenstrahl erzeugt, indem zuerst ein Elektronenstrahl stark beschleunigt und auf ein metallisches *Target* gelenkt wird; beim abrupten Abbremsen der Elektronen entsteht ein breites, kontinuierliches Röntgenspektrum (*Bremsstrahlung*), dessen Maximalenergie durch die kinetische Energie der Elektronen gegeben ist. Der Röntgenstrahl tritt aus dem Behandlungskopf (11) aus und durchläuft zunächst ein oder mehrere strahlformende Elemente (13), z.B. einen Kollimator zur lateralen Strahlbegrenzung oder einen Absorber zur ortsabhängigen Energieabschwächung, um exakt der zuvor berechneten optimalen Bestrahlungsdosis zu entsprechen (s.u.).

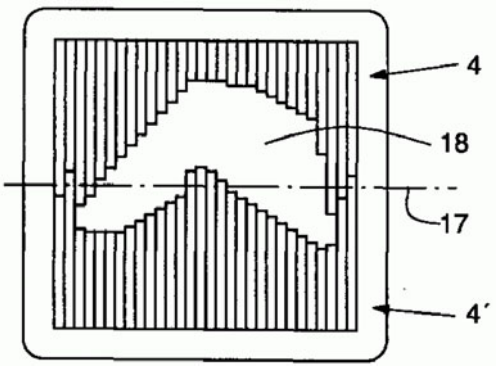
Das Bremsstrahlungsspektrum kann bei Bedarf monochromatisiert werden (US 2005 / 0259787 A1), wenn auch unter Verlust eines großen Teils seiner Intensität; allerdings stellt die Energiedispersion und die daraus resultierende ungleichmäßige Strahlabschwächung nur in Spezialfällen ein Problem dar ([7], [4]).

Entsprechend der im Behandlungsplan festgelegten Aufteilung der Gesamtdosis auf Teildosen wird nun unter verschiedenen Winkeln bestrahlt. Hierbei dreht sich die Gantry um den Patienten, wobei für jeden Bestrahlungswinkel Kollimatoren und Absorberelemente unter Berücksichtigung der relativen Lage und Geometrie des Tumors neu eingestellt werden.

3.2. Konforme Bestrahlung aus mehreren Richtungen (CRT)

Die Begrenzung des Strahlquerschnitts auf den aktuellen Tumorquerschnitt durch Kollimatoren sowie eine richtungsabhängige Bestrahlung stellen – neben einer Computer-gestützten Planung (s.u.) – wichtige Schritte dar, um den Strahleneintrag im Tumor zu maximieren und im gesunden Gewebe zu minimieren bzw. so zu verteilen, dass dort die Strahlenschäden die Regenerationsfähigkeit nicht übersteigen.

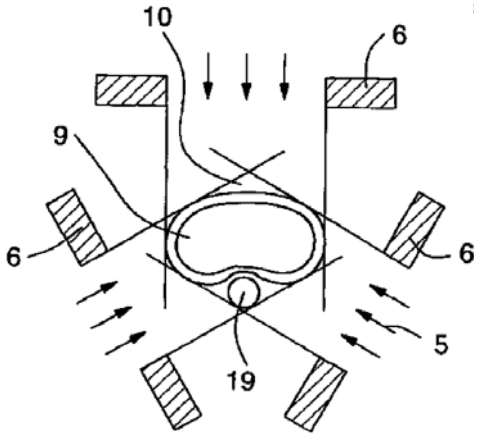
Ersteres wird sehr flexibel mit einem Multilamellen-Kollimator (*MLC*; Figur 3) erreicht, bei dem eine Vielzahl eng aneinanderliegender Metall-Lamellen auf zwei gegenüberliegenden Bänken angeordnet ist. Die einzelnen Lamellen werden mittels individueller Stellantriebe so verfahren, dass der durchgelassene Strahl der aktuellen Querschnittsfläche des Tumors aus Sicht der Bestrahlungseinheit entspricht (vgl. DE 195 36 804 A1). Der Strahlquerschnitt ist somit *konform* mit dem Tumor; die Technik heißt daher *konforme Radiotherapie* (*CRT*). Hierbei werden die vorab ermittelte Tumorgeometrie, der Ort des Tumors im Patienten, die aktuelle Position und Orientierung des Patienten sowie die Strahleigenschaften und der aktuelle Abstand des Kollimators zum Tumor berücksichtigt.



Figur 3: Prinzipskizze eines Multi-Lamellen-Kollimators (MLC) zur Tumor-konformen Strahlbegrenzung (aus DE 199 05 823 C1). Die strahlblockenden Lamellen werden einzeln durch automatisierte Antriebe so verfahren, dass der durchtretende Strahl immer dem zu bestrahlenden Querschnitt (18) des dahinterliegenden Tumors entspricht.

Der nächste Schritt besteht darin, den Tumor aus unterschiedlichen Richtungen zu bestrahlen (Figur 4), um die in gesundes Gewebe eingebrachte Dosis *auszuschmieren*, während sie sich im Tumorvolumen addiert – und nur dort die kritische Intensität übersteigt (Figur 4). Hierbei wird der Kollimator für jede Gantry-Stellung unter Berücksichtigung der oben genannten Parameter an die neue projizierte Tumorfläche angepasst.

Für eine bessere Tumorabdeckung können die zentralen Bereiche des Kollimators kleinere Lamellenbreiten aufweisen (DE 196 39 861 A1); konkave (eingestülpte) Geometrien werden mit einem zweidimensionalen Lamellengitter erfasst (DE 698 13 502 T2). Eine Leckage zwischen den einzelnen Lamellen vermeidet man durch eine geschickte Geometrie (DE 103 40 617 A1, US 5 438 454 A), eine zusätzliche Drehung des Kollimators erhöht seine Flexibilität (DE 102 50 378 A1, DE 101 40 100 A1).



Figur 4: Bestrahlung aus verschiedenen Richtungen mit jeweils angepasster Kollimator-Öffnung (aus DE 199 05 823 C1): Das zu bestrahlende Volumen (9) liegt hier zusätzlich eng an einem Risikoorgan (19) an, das nach Möglichkeit von der Bestrahlung ausgespart werden soll.

3.3. Intensitätsmodulierte Strahlentherapie (IMRT)

Eine weitere Verbesserung der konformen Bestrahlung lässt sich mit intensitätsmodulierter Strahlentherapie (*IMRT*) erzielen. Der Begriff IMRT umfasst unterschiedliche Realisierungen [8]: entweder wird die Gesamtdosis an einer bestimmten Winkelstellung der *Gantry* auf kleinere Dosissegmente aufgeteilt (US 2007/0041493 A1), oder die einzelnen Kollimator-Lamellen werden während der Bestrahlung verfahren und modulieren so die an einen bestimmten Ort eingetragene Strahlung (*dynamischer MLC*, vgl. DE 102 34 953 A1).
Ein Nachteil der IMRT, die den routinemäßigen Einsatz im klinischen Umfeld stark einschränkt, sind jedoch die deutlich höheren Anforderungen an die Positionierung der Patienten.

3.4. Dosisfraktionierung, Zeitfaktor

Wie im Abschnitt 2.2 ausgeführt, ist ein gewisser Mindesteintrag an Strahlung nötig, um überhaupt wirksam den Tumor zu bekämpfen; gleichzeitig soll die Strahlenmenge so niedrig sein, dass Nebeneffekte an gesundem Gewebe schnell und möglichst ohne Nebenwirkungen ausheilen können. Ein Kompromiss liegt in der *Fraktionierung* der Dosis, d.h. in der Aufteilung auf mehrere Bestrahlungseinheiten von etwa 1,8 – 2,5 Gy täglich ([1]; [5], Kap. 14.12). Damit sinkt zwar die Zahl abgetöteter Zellen pro Bestrahlung, über den gesamten Behandlungszeitraum kann jedoch die eingebrachte Dosis vervielfacht werden.

Nachteile einer fraktionierten Bestrahlung sind eine mögliche wachsende Strahlenresistenz der Tumoren während der Gesamtbehandlungszeit von 2 – 7 Wochen, der insgesamt höhere Strahlungseintrag sowie die Notwendigkeit, die Position von Tumoren in bewegten Körperteilen (z.B. im Bauchbereich) vor jeder Bestrahlung neu bestimmen zu müssen.

3.5. Behandlungsplanung

Ausgehend von den Vorgaben der vorliegenden Bestrahlungseinrichtung sowie der vom behandelnden Arzt, eventuell mit Computerhilfe (DE 10 2005 058 871 B3) festgelegten Dosisfraktionierung, wird im Rahmen der der Behandlung vorausgehenden Planung die optimale räumliche Aufteilung der einzubringenden Dosis für eine Vielzahl möglicher Gantry-Positionen berechnet (z.B. DE 10 2005 056 701 A1, DE 103 05 421 A1; [5], Kapitel 7 und 11). Dabei muss nicht immer an jeder Gantry-Position der jeweilige maximale Tumorquerschnitt bestrahlt werden, sondern nur der Teil, der unter Berücksichtigung eventueller Risikoorgane gerade am besten zugänglich ist; die Kollimatoreinstellungen in Figur 4 wären somit nicht optimal, da sie die Risikostruktur (19) nicht aussparen.

Die Planung erfolgt dabei in der Regel *invers*, d.h. es werden ausgehend vom zu bestrahlenden Volumen und der dafür nötigen, tumorspezifischen Dosis unter Festhaltung einiger Parameter (z.B. Strahlfraktionen, Strahlenergie oder Strahlenart) die restlichen, freien Parameter wie Strahlrichtung, Strahlquerschnitt und Gewichtung eines Einzelstrahls optimiert, wobei aus Effizienzgründen eine möglichst geringe Anzahl von Teilstrahlen angestrebt wird (siehe z.B. WO 2003/099380 A1, US 2007/0003011 A1, US 2006/0256915 A1, WO 2004/105574 A2, US 2007/0127623 A1, DE 101 45 491 A, DE 103 18 204 A1).

Zusätzlich können, wenn auch unter deutlich höherem Rechenaufwand, die biologischen Eigenschaften des durchstrahlten Gewebes (US 2006/0285640A1, [7], [9]) oder seine funktionelle Aktivität (DE 103 20 611 A1) berücksichtigt werden. Schrumpft der Tumor zwischen einzelnen Behandlungstagen aufgrund der Bestrahlung oder ist anderweitig von erheblichen Form- oder Positionsänderungen auszugehen, etwa bei Tumoren im Bauchbereich, so muss der Behandlungsplan vor der

nächsten Bestrahlung aktualisiert (WO 2007/028237 A1, US 6 792 074 B2) oder neu berechnet werden.

4. Vorrichtungen zur genauen Positionierung

4.1. Positionierung des Patienten

Die zentrale Notwendigkeit einer jederzeit exakten Positionskontrolle wurde bereits erwähnt. Auch wenn der Gesamt-Behandlungsplanung bereits ein vollständiger Satz von Bilddaten (meist CT-Daten) zugrunde liegt, muss vor jeder Bestrahlung sichergestellt sein, dass sich der Tumor – z.B. aufgrund einer anderen Körperlage, von Gewichtsänderungen oder Organverlagerungen – noch an der ursprünglichen Stelle befindet. Gerade im Bauchraum kann es durch eine veränderte Atmung oder durch unterschiedliche Füllgrade von Darm und Blase zu erheblichen Abweichungen der Tumorposition zwischen den einzelnen Behandlungen kommen; die regelmäßige Bewegung während der Behandlung durch die Atmung stellt ein eigenes Thema dar.

Für diesen komplexen Rückkopplungsprozess wurden verschiedenste Verfahren vorgeschlagen, ohne das Problem jedoch bisher umfassend lösen zu können: ein einfacher Bildvergleich (DE 101 47 633 A1; DE 10 2004 039 191 A1); die Auswertung der Bewegung von auf der Haut angebrachten reflektierenden Markierungspunkten (*Fiducial Markers*); Konturänderungen des Patienten, erfasst beispielsweise durch Videokameras anhand von Interferenzmustern oder polarisiertem Licht; die Längenänderung von Dehnungsmessbändern; Spirometrie (Atemflussanalyse); Elektromyographie (die Veränderung elektrischer Potentiale an Muskeln) (alle DE 100 33 063 A1) oder Laser-Triangulation (DE 103 42 202 A1).

Röntgenmethoden zur Bewegungserfassung können ein beigestelltes mobiles Röntgengerät (*C-Arm*) umfassen (DE 103 44 871 A1) oder direkt die durch den Patienten gehende Strahlung messen (Bildaufnahmegerät (20) in Figur 2), wobei die therapeutische Strahlung für die Bildgebung zu energiereich ist. Für dieses *Portal Imaging* wird entweder eine zweite, niederenergetischere Röntgenquelle verwendet (US 5 471 516 A, DE 101 00 958 A1), oder aus dem therapeutischen Strahl wird mittels eines Energiefilters der härtere Strahlungsanteil herausgenommen (DE 102 40 912 A1).

Apparativ noch aufwendigere Methoden sind beispielsweise mit der Bestrahlung kombinierte Kernspin-(MRI-) Messungen (US 2005/0197564 A1, WO 2006/097274 A1) oder Positronen-EmissionsTomographie (PET) mittels der bei der Absorption der Röntgenquanten durch Paarbildung erzeugten Positronen (DE 10 2005 059 210 A1, US 2007/0003010 A1).

4.2. Eichung der Strahlentherapieanlage

Neben der reproduzierbaren Lagerung des Patienten muss natürlich auch jede kritische Komponente der Strahlentherapieanlage regelmäßig auf ihre Genauigkeit hin überprüft werden. So gibt es Verfahren zur Kontrolle des Strahlungsfelds ohne (DE 10 2004 006 784 A1, DE 103 13 934 A1) und mit Berücksichtigung eines gewebeähnlichen Mediums (Phantom) (DE 103 44 539 A1, DE 195 18 192 A1, DE 101 53 864 A1). Mittels eines in der Strahlachse vor oder hinter dem Patienten angeordneten Röntgendetektors kann man die auf den Patienten treffende bzw. durch ihn hindurchgegangene Strahlung messen (DE 103 11 042 A1, DE 37 12 928 A1) und bei kritischen Intensitätsabweichungen einen Warn- oder Abbruchmechanismus auslösen (JP 2005/249509 A). Mechanische Ungenauigkeiten der Gantry-Anordnungen, z.B. während der Drehung, können mit geeigneten Teststrukturen zuverlässig bestimmt werden (DE 195 08 228 A1).

5. Ausblick

Die prinzipielle Möglichkeit einer Therapie mit Röntgenstrahlen wurde nur wenige Monate nach deren Entdeckung durch Wilhelm Conrad Röntgen 1895 erkannt; eine zielgenaue Bestrahlung innenliegender Tumoren unter weitgehender Schonung des gesunden Gewebes wurde jedoch erst mit den in den letzten Jahrzehnten entwickelten 3D-Bildgebungstechniken, vor allem der Computertomographie und Magnetresonanz-Tomographie, möglich. Ausgehend von einer genauen Kenntnis der Lage und Form des Tumors konnten komplizierte Strahlformungstechniken entwickelt und die Behandlungsstrategien Computer-gestützt optimiert werden.

Mögliche Entwicklungslinien für die nächsten Jahre liegen zum einen in der Verfeinerung der Behandlungsplanung, die mit einem zunehmend besseren Verständnis der

mikroskopischen Schädigungsmechanismen einhergeht; Verbesserungen in der Positioniergenauigkeit erlauben die routinemäßige Verwendung komplexer Bestrahlungsverfahren wie IMRT. Die Etablierung der Protonen- und Ionentherapie in den nächsten Jahren kann aufgrund einer teilweisen Konkurrenzsituation ein zusätzlicher Motor für die weitere Entwicklung der Strahlentherapie sein; hierbei ist es jedoch wahrscheinlich, dass sich mittelfristig eine klare Aufgabenteilung zwischen den verschiedenen Bestrahlungstechniken ergibt und sie sich in der Summe noch vielseitiger präsentieren können als es bereits jetzt der Fall ist.

Literatur

[1] http://de.wikipedia.org/wiki/Strahlentherapie, http://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_therapy; http://fr.wikipedia.org/wiki/Radiothérapie; http://www.krebsinformationsdienst.de/ Fragen_und_Antworten/strahlentherapie.html; ermittelt im Internet am 13.08.2007.

[2] „Strahlentherapie bei nichtmalignen Erkrankungen“, http://www.radiologen-konstanz.de/uploads/ media/Benigne-Erkrankungen.pdf; ermittelt im Internet am 13.08.2007.

[3] STEINBAUER, B.: Ionenstrahlen in der Tumortherapie. – In: Erfinderaktivitäten 2005/2006, DPMA, München, 2006.

[4] SÖDERSTRÖM, S. et al.: Aspects on the Optimal Photon Beam Energy for Radiation Therapy. – In: Acta Oncologica 38 (1999), S. 179-187.

[5] PODGORSAK, E.B. (Hrsg.): Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, IAEA, Wien 2005; http://www-pub.iaea.org/MTCD/ publications/ PDF/Pub1196_web.pdf; ermittelt im Internet am 13.08.2007.

[6] http://www.epileptologie-bonn.de/upload/ homepage/lehnertz/Roe3.pdf; ermittelt im Internet am 13.08.2007.

[7] COSTA FERREIRA, B.: Biological Optimization of Angle of Incidence and Intensity Modulation in Breast and Cervix Cancer Radiation Therapy. - Dissertation, Stockholm, 2004; http://www.diva-portal.org/su/theses/abstract.xsql?dbid=313.

[8] CHEUNG, K.Y.: Intensity modulated radiotherapy: advantages, limitations and future developments. – In: Biomed. Imag. Intervent. J. 2 (2006), S. 1-19.

[9] QATARNEH, S.: Development of a Whole Body Atlas for Radiation Therapy Planning and Treatment Optimization - Dissertation, Stockholm, 2006; http://www.diva-portal.org/su/theses/abstract.xsql?dbid=803.

Entwicklungstendenzen bei hybriden Fahrzeugsystemen im Hinblick auf Kraftstoffeinsparung, Schadstoffminderung und Komfort

Dr. Martin Tourneau, Abt. 1.26

Zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und des Schadstoffausstoßes von Kraftfahrzeugen werden zukünftig vermehrt hybride Fahrzeugsysteme eingesetzt. Damit verbunden ist die Entwicklung äußerst komplexer Antriebskonzepte, die neben einer Anpassung des Verbrennungsmotors auch eine Einbeziehung weiterer Fahrzeugkomponenten erfordern.

1. Einführung

Wesentliche Zielsetzungen bei der Entwicklung von Antriebssystemen für Kraftfahrzeuge sind die Senkung des Kraftstoffverbrauchs, die Reduzierung von Schadstoffemissionen und die Steigerung des Fahrkomforts. Zu diesem Zweck werden verschiedene Lösungsansätze verfolgt. Zum einen erfolgt die Weiterentwicklung der etablierten Diesel- und Ottomotoren beispielsweise durch Optimierung von Verbrennung, Aufladung, Gemischaufbereitung, Ladungswechsel oder Abgasrückführung sowie durch die Verwendung alternativer Kraftstoffe („Biodiesel“, Flüssiggas, Erdgas, Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe). Zunehmend werden jedoch auch alternative Antriebskonzepte entwickelt bzw. zur Serienreife gebracht. Neben Brennstoffzellenantrieben sind hier vor allem die Hybridfahrzeuge zu nennen. Die folgenden Abschnitte konzentrieren sich auf die Vorstellung verschiedener Hybridkonzepte und zeigen anhand von Anmeldungen, insbesondere im IPC-Bereich F02D 45/00, einzelne Entwicklungsschwerpunkte auf.

2. Hybridkonzepte

Der Verbrauchsvorteil von Hybridfahrzeugen entsteht durch effizientes Energiemanagement in Verbindung mit Energiespeicherung bzw. Energierückgewinnung. In der als Start-Stopp-Betrieb bezeichneten Betriebsweise wird der Verbrennungsmotor z. B. bei Fahrzeugstillstand oder im Schiebebetrieb abgeschaltet. Bei dem als Rekuperation bezeichneten Vorgang wird beim Bremsen oder im Schiebebetrieb kinetische Energie mit Hilfe eines Generators in elektrische Energie umgewandelt und in einer Batterie oder einem Kondensator gespeichert (Bremsenergierückgewinnung). Diese gespeicherte Energie wird in bestimmten Betriebsphasen zum Starten des Verbrennungsmotors, temporär unterstützend zur Erzielung großer Beschleunigungswerte (Boost-Betrieb) oder zum ausschließlich elektrischen Antrieb (bei Schwachlast) verwendet. Durch geeignete Steuer- und Regelverfahren wird der Motor zudem bevorzugt in Betriebspunkten mit hohem Wirkungsgrad betrieben.

Neben der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs wird auch eine darüber hinausgehende Verminderung der Schadstoffemissionen erreicht. Zum einen erreichen die Verbrennungsmotoren durch die verwendeten leistungsstarken Starter-Generatoren schneller die zum selbstständigen Betrieb erforderliche Drehzahl (sog. Schnellstart) und können deshalb nach kürzerer Zeit mit optimaler Verbrennung arbeiten. Zum anderen wird durch das vollständige Abschalten des Verbrennungsmotors und ggf. durch Abkopplung vom Antriebsstrang bei niedrigen Lastanforderungen der Abgasstrom unterbunden und ein Auskühlen des Katalysators stark reduziert. Der Katalysator kann dadurch stets bei optimalen Temperaturen und Wirkungsgraden betrieben werden.

Neben der reinen Verbrauchs- und Schadstoffsenkung sind mit den hybriden Fahrzeugsystemen auch weitere Vorteile verbunden: Gesteigerter „Fahrspaß“ durch größeres Drehmoment, Klimatisierung, Heizung und Lüftung auch bei stehendem Verbrennungsmotor sowie z. B. die aufgrund der hohen Systemspannung gegebene Möglichkeit einer sog. Off-Board-Versorgung (Betrieb von 110- bzw. 220 V-Elektrogeräten an einer Bordsteckdose), die insbesondere im nordamerikanischen Raum gewünscht wird.

Bei den verschiedenen Hybridkonzepten wird in Abhängigkeit der implementierten hybridspezifischen Funktionen, des elektrischen Leistungsniveaus und der damit verbundenen Funktionalität zwischen Micro-, Mild-, Medium- und Voll-Hybridfahrzeugen unterschieden [2], [4]:

2.1. Micro-Hybrid:

Beim Micro-Hybrid ersetzt ein Starter-Generator, der durch einen Riemen mit der Kurbelwelle verbunden ist, die beiden konventionellen Komponenten Lichtmaschine und Anlasser. Als Energiespeicher wird eine Bleibatterie mit 12/14 V verwendet, die ggf. von einem Kondensator als Puffer ergänzt wird. Der Verbrennungsmotor bleibt weitgehend unverändert. Die verfügbare Leistung des Starter-Generators ist aufgrund des verwendeten Riemens auf etwa 5 kW begrenzt. Der Funktionsumfang umfasst den Start-Stopp-Betrieb mit Schnellstart, eine variable Ladeleistung des Energiespeichers mit Anhebung im Schub (begrenzte Rekuperation) sowie die Möglichkeit einer Standklimatisierung.

2.2. Mild-Hybrid:

Beim Mild-Hybrid ist der Starter-Generator fest mit der Kurbelwelle verbunden, weshalb er Leistungen bis ca. 10 kW abgeben kann. Neben dem 12/14 V Bordnetz für die konventionellen Funktionen kommt ein weiterer Energiespeicher (z. T. NiMH-Batterien (Nickel-Metall-Hydrid)) mit einem Spannungsniveau von 36 bis 42 V zum Einsatz. Zusätzlich zu den Funktionen des Micro-Hybrids sind eine Drehmomentunterstützung beim Anfahren, ein Boost-Betrieb und eine Schwingungsdämpfung bei Lastübergängen (Glättung des Drehmomentverlaufs, siehe auch 6.4.) realisierbar.

2.3. Medium-Hybrid:

Der Medium-Hybrid (auch als Basic-Hybrid bezeichnet) unterscheidet sich vor allem durch ein höheres Leistungsniveau (bis ca. 15 kW) vom Mild-Hybrid. Mit ihm sind auch bei hoher Last rekuperatives Bremsen und eine Drehmomentunterstützung in vollem Umfang möglich. Die Auslegung der Energiespeicher (ca. 150 V) erfolgt entweder auf hohe Leistung („Supercaps“) oder auf hohe Kapazität (NiMH- oder Li-Ion-Batterien). Zusätzlich erfolgt eine Anpassung des Verbrennungsmotors.

2.4. Voll-Hybrid:

Beim Voll-Hybrid (auch als Full-Hybrid bezeichnet) handelt es sich um eine integrierte Lösung, die als sog. Parallelhybrid, als sog. Serienhybrid oder in einer Mischform realisiert werden kann. Beim Parallelhybrid werden die Ausgangsleistungen des (modifizierten) Verbrennungsmotors und des Elektromotors überlagert und über ein spezielles Getriebe an die Antriebsräder abgegeben. Der Fahrzeugantrieb kann sowohl rein elektrisch (Spannungsniveau größer 200 V) als auch ausschließlich über den Verbrennungsmotor erfolgen. Dadurch resultiert in der Betriebsart mit Verbrennungsmotor keine Wirkungsgradverschlechterung gegenüber einem konventionellen Fahrzeug. Beim Serienhybrid ist der Verbrennungsmotor mechanisch vollständig vom Fahrzeugantrieb entkoppelt und treibt nur einen Generator an, der über einen Energiespeicher (Li-Ionen oder NiMH) mit dem rein elektrischen Antrieb gekoppelt ist. Hierdurch kann der Verbrennungsmotor stets im Bereich mit dem besten Wirkungsgrad betrieben werden. Nachteilig ist jedoch die mehrfache Energieumwandlung. Die vollständige Abkopplung des Verbrennungsmotors erlaubt eine optimale Rekuperation. Mit der Möglichkeit des rein elektrischen Fahrens ist ein hoher Komfort beim Rangieren und im Stop-and-Go-Betrieb verbunden.

3. Einsparpotentiale beim Kraftstoffverbrauch

Die mögliche Verbrauchsreduzierung eines Micro-Hybrids gegenüber einem konventionellen Fahrzeug mit Ottomotor liegt bei 5 bis 6 % im Stadtverkehr. Durch das regenerative Bremsen werden 1 bis 2 % und der verbleibende Anteil durch den Start-Stopp-Betrieb erzielt. Die mögliche Verbrauchsreduzierung im Stadtverkehr liegt beim Mild-Hybrid bei 10 bis 15 %, beim Medium-Hybrid bei 15 bis 20 % und beim Voll-Hybrid bei 25 bis 30 % [4].

Beim Vergleich des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen mit Mild- oder Voll-Hybrid-Antrieb mit Ottomotor gegenüber Fahrzeugen mit konventionellem Dieselmotor ist festzustellen, dass der Mild-Hybrid nur im Stadtverkehr mit überwiegenden Stauphasen Verbrauchsvorteile verzeichnen kann; bei zunehmend flüssigem Verkehr und insbesondere bei Überland- bzw. Autobahnfahrten schneidet er schlechter ab als ein konventioneller

Dieselmotor. Im Vergleich dazu erbringt der Voll-Hybrid im zähen und auch im flüssigen Stadtverkehr teilweise deutliche Verbrauchsvorteile. Bei Überland- oder Autobahnfahrten jedoch schneidet er deutlich schlechter ab. Hier kommt der schlechtere Wirkungsgrad des permanent betriebenen Ottomotors sowie die durch die Hybridkomponenten deutlich erhöhte Fahrzeugmasse zum Tragen.

Es werden auch Voll-Hybrid-Konzepte verfolgt, bei denen statt eines Ottomotors ein Dieselmotor eingesetzt werden soll. Dadurch könnte der Verbrauch bei Überland- und Autobahnfahrten weitgehend dem mit konventionellem Dieselmotor entsprechen. Nachteilig in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch wäre hier lediglich die erhöhte Fahrzeugmasse. Problematisch bei diesen Konzepten sind die durch den Einsatz des Dieselmotors verursachten extrem hohen Kosten des Gesamtfahrzeugs.

4. Marktpotential für Hybridfahrzeuge

Der Markt für Hybridfahrzeuge konzentriert sich heute noch auf die USA und Japan, wo über 90 % der Fahrzeuge verkauft werden. Während im Jahr 2004 in den USA ca. 83.000 Einheiten abgesetzt werden konnten (zwei Drittel davon „Toyota Prius II“), sind es in Deutschland nur 1800 Fahrzeuge gewesen.

Prognosen, denen eine Auswertung der Planzahlen der Automobilhersteller zugrunde gelegt wurde, gehen von einem Anstieg auf etwa 1,8 Millionen Einheiten im Jahr 2015 für den US-Markt aus. Nach sehr optimistischen Prognosen könnte sogar mit einer Steigerung auf bis zu 5 Millionen Einheiten weltweit im Jahr 2015 gerechnet werden (1 Mio. Japan, 3 Mio. USA, 1 Mio. Europa). Allein Toyota plant für 2010 mit einem Absatz von 1 Mio. Einheiten [2], [5]

5. Erfinderaktivitäten

Die Entwicklungsaktivitäten der Fahrzeughersteller in diesem Fahrzeugsegment lassen sich u. a. durch die Anzahl der getätigten Patentanmeldungen verfolgen. In Tabelle 1 ist die Anzahl der für den Bereich „Hybridfahrzeuge“ und „Start-Stopp-Betrieb“ relevanten Anmeldungen von Anmeldern ausgewählter Herkunftsländer in den Jahren 1996 bis 2005 dargestellt (Betrachtet wurden die IPC-Klassen F02N, F01N, F16H, H01M, H02J, F01L, F02D, B60K, B60L, B60W.).

Deutlich zu erkennen ist die führende Position japanischer Anmelder. Zu den aktivsten Anmeldern aus Japan zählen Toyota, Honda und Nissan. Der größte Teil der US-Anmeldungen wurde von Ford, der größte Teil der deutschen Anmeldungen von Bosch getätigt. Auffällig ist, dass bei den japanischen und amerikanischen Anmeldungen der überwiegende Teil der Anmeldungen auf sehr wenige Anmelder zurückzuführen ist, während sich diese bei den deutschen Anmeldungen auf viele Anmelder verteilen.

		Herkunftsland Anmelder				
		DE	US	JP	KR	FR
Anmeldejahr	1996	134	148	250	32	23
	1997	216	132	238	17	33
	1998	186	227	308	17	61
	1999	272	293	386	28	89
	2000	284	374	817	39	118
	2001	658	1440	1726	111	208
	2002	357	761	862	52	111
	2003	341	808	956	69	107
	2004	340	721	1028	107	152
	2005	414	713	918	111	141
Summe		3202	5617	7489	583	1043

Tabelle 1: Anzahl der Anmeldungen in den Bereichen „Hybridfahrzeuge“ und „Start-Stopp-Betrieb“ in den Jahren 1996 bis 2005 für ausgewählte Herkunftsländer.

6. Entwicklungsschwerpunkte

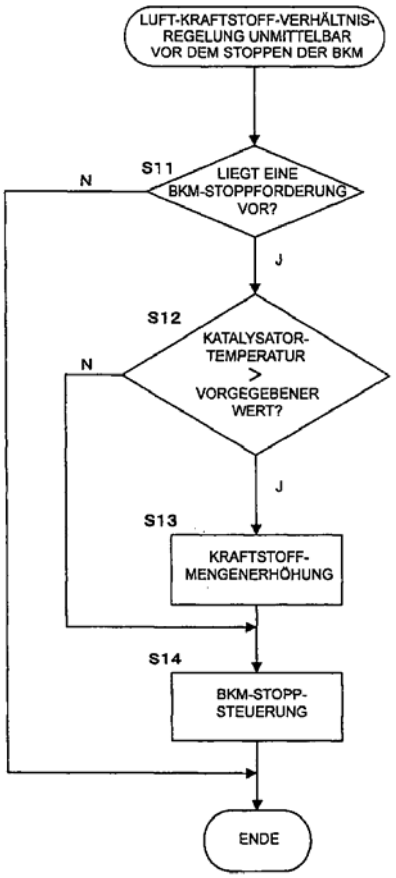
Von der Entwicklung eines Hybridfahrzeuges sind nahezu sämtliche Baugruppen eines Fahrzeugs betroffen, d. h. es können nur wenige vorhandene Elemente unverändert übernommen werden. Angefangen bei Elektromotoren, Energiespeichern und Getrieben, die komplett neu entwickelt werden müssen, sind Fahrwerk, Karosserie, Brems- und Lenksystem, Heizung und Klimatisierung teilweise sehr umfassend anzupassen. Die bereits bei konventionellen Fahrzeugen äußerst aufwändige Motorsteuerung wird durch ein weitaus komplexeres Antriebs- und Energiemanagement ersetzt [3]. Im Folgenden werden anhand von Beispielen eingereichter Patentanmeldungen einige Entwicklungsschwerpunkte aufgezeigt.

6.1. Katalysator

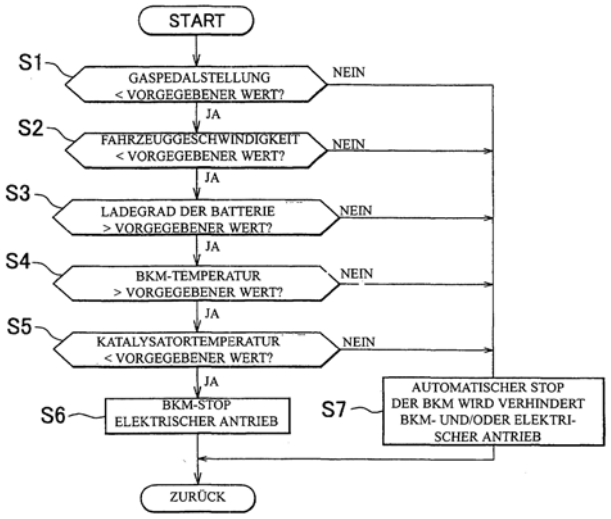
Das häufige Ein- und Ausschalten des Verbrennungsmotors hat erhebliche Auswirkungen auf die Temperatur und damit auf die Effektivität des Katalysators. Eine geeignete Motorsteuerung muss gewährleisten, dass der Katalysator nach dem ersten Start des Verbrennungsmotors möglichst schnell seinen Betriebstemperaturbereich erreicht und diesen danach weder unterschreitet (keine oder unzureichende Konvertierung) noch überschreitet (Zerstörung bzw. beschleunigte Alterung des Katalysators). Bei modernen Motoren kommt hinzu, dass diese oft sehr mager betrieben werden („Magermix“, Schichtbetrieb, „FSI“ (Fuel Stratified Injection)). Daraus resultiert ein Sauerstoffüberschuss im Abgas, der insbesondere in Verbindung mit zu hohen Temperaturen zu einer Deaktivierung des Katalysators durch ein Zusammenwachsen von Platinpartikeln und der damit verbundenen kleineren aktiven Oberfläche führen kann.

Eine Möglichkeit, um für diesen speziellen Betriebszustand eine Überhitzung des Katalysators sowie eine magere Atmosphäre zu vermeiden, besteht in der Zuführung einer gegenüber dem normalen Betrieb erhöhten Kraftstoffmenge unmittelbar vor dem automatischen Abstellen des Verbrennungsmotors. Dadurch kann verhindert werden, dass der Katalysator einer mageren Atmosphäre ausgesetzt wird (Toyota: DE 103 45 561 A1, Figur 1).

Eine weitere Möglichkeit, um eine Überhitzung zu vermeiden, besteht darin, dass oberhalb einer bestimmten Katalysatortemperatur das automatische Ausschalten des Verbrennungsmotors nicht freigegeben wird. Der Verbrennungsmotor wird stattdessen bei minimaler Last weiter betrieben, so dass er durch die Abgase gekühlt wird (Toyota: DE 103 06 954 A1, Figur 2).



Figur 1: Vermeidung einer Überhitzung des Katalysators durch Erhöhen der Einspritzmenge kurz vor dem Abschalten der Brennkraftmaschine, DE 103 45 561 A1.

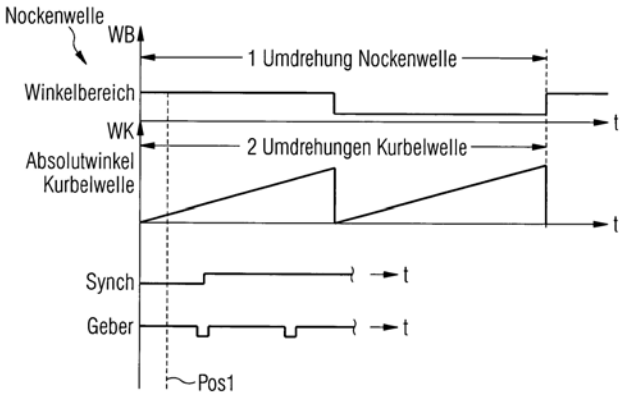


Figur 2: Vermeidung einer Überhitzung des Katalysators durch Abfrage der Temperatur und bei Bedarf Verhindern des automatischen Motorstopps, DE 103 06 954 A1.

6.2. Motorstart

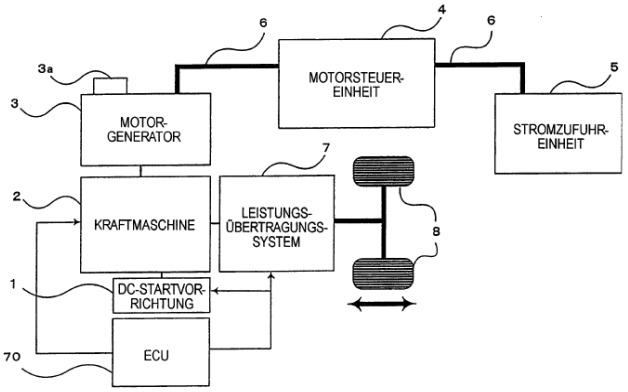
Ein wesentliches Kriterium für die Akzeptanz durch den Fahrer eines Fahrzeuges mit einer Start-Stopp-Vorrichtung ist, dass der Fahrbetrieb nicht merklich

beeinträchtigt wird, d. h. dass der Verbrennungsmotor sehr schnell gestartet werden kann und der Fahrer nach Betätigen des Gaspedals ohne nennenswerte zeitliche Verzögerung nach einem Stopp beispielsweise an einer Ampel wieder losfahren kann. Dazu muss der Verbrennungsmotor entsprechend schnell in Betrieb gebracht werden. Dies gelingt nur dann mit der erforderlichen Effizienz, wenn die genauen Winkelpositionen von Kurbel- und Nockenwelle möglichst schnell erkannt werden können, denn erst mit dieser Information ist eine zuverlässige Zündung und Kraftstoff-Einspritzung bzw. die erforderliche Synchronisation möglich. Eine Möglichkeit zur schnellen Bestimmung der Winkelpositionen besteht in der Verwendung aufwändig gestalteter Geberräder, die mit den entsprechenden Wellen drehfest verbunden sind und über mehrere Markierungen verfügen, die durch Sensoren erfasst werden können. Durch Auswertung der Sensorsignale durch das Motorsteuergerät werden die Winkelpositionen berechnet oder durch Verwendung einer Absolutgeberanordnung direkt bestimmt (Siemens: DE 103 04 449 A1, Figur 3).



Figur 3: Optimierte Ermittlung der Phasenlage beim Start einer Brennkraftmaschine, DE 103 04 449 A1.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die Kurbelwelle des Verbrennungsmotors mit Hilfe des Starter-Generators durch Aufbringen eines antreibenden oder abbremsenden Drehmomentes in der Auslaufphase in eine bevorzugte und damit bekannte Stellung positioniert wird. Zu diesem Zweck berechnet die Motorsteuerung während der Auslaufphase, d. h. nachdem Zündung und Einspritzung unterbrochen wurden, zunächst die erwartete Stopp-Position der Kurbelwelle für den Fall, dass kein Eingriff durch den Starter-Generator erfolgt. In Abhängigkeit von dieser berechneten Stopp-Position wird wiederum das vom Starter-Generator aufzubringende Drehmoment berechnet, um den Verbrennungsmotor in der bevorzugten Stellung zu positionieren. Diese Stellung kann dann beim erneuten Starten als bekannt vorausgesetzt werden (Toyota: DE 10 2004 004 078 A1, Figur 4).

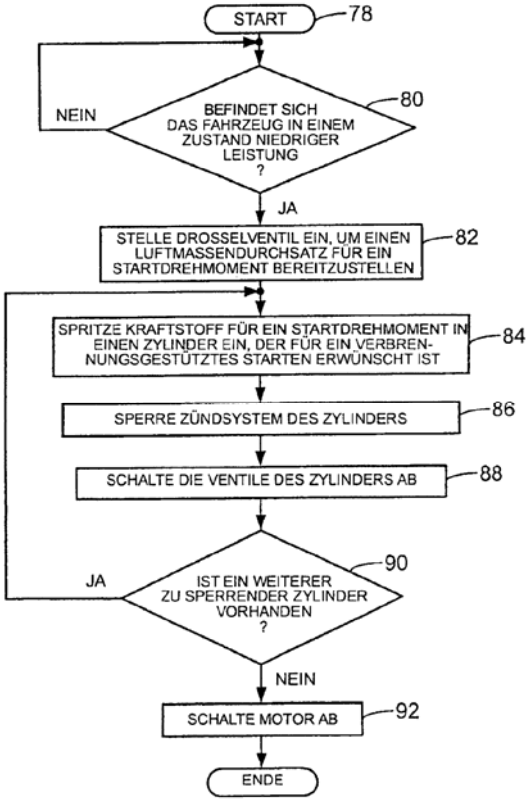


Figur 4: Systemkonfiguration eines Kraftfahrzeuges mit Start-Stopp-Einrichtung und einer Vorrichtung zum Schätzen der Stopp-Position beim Abschalten, DE 10 2004 004 078 A1.

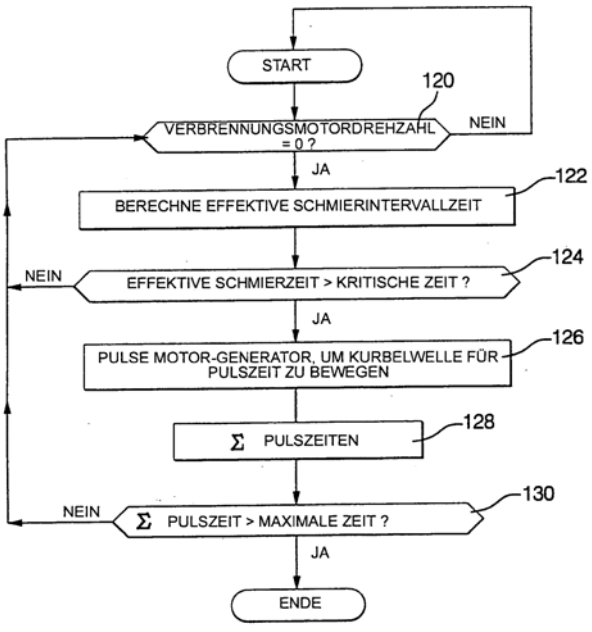
Zur Unterstützung des elektrisch betriebenen Starter-Generators kann zudem ein bereits beim Abstellen des Motors in einem Zylinder eingebrachtes Gemisch gezündet und dadurch ein zusätzliches Drehmoment erzeugt werden (General Motors: DE 10 2004 046 182 A1, Figur 5). Es ist mit ähnlichen Verfahren sogar möglich, den Verbrennungsmotor ohne elektrische Hilfsenergie nur durch Zünden des vorher bereit gestellten Gemisches zu starten (sog. „Direktstart“).

Durch die besondere Betriebsweise des Verbrennungsmotors mit häufigen Stopp-Phasen muss sichergestellt werden, dass stets eine ausreichende Schmierung bzw. ein ausreichender Öldruck gewährleistet wird. Während bei einigen Fahrzeugen zu diesem Zweck elektrisch angetriebene Ölpumpen verwendet werden, gibt es auch Startverfahren, bei denen eine Brennstoffeinspritzung erst dann erfolgt, wenn der Verbrennungsmotor über eine bestimmte Drehzahl hinaus beschleunigt wurde (Suzuki: DE 10 2004 002 706 A1). Durch diese Maßnahme wird zusätzlich gewährleistet, dass bei Verwendung eines hydraulisch gesteuerten Getriebes der Einkuppelvorgang sehr sanft erfolgen kann. Außerdem kann der Starter-Generator verwendet werden, um die Kurbelwelle des Verbrennungsmotors bei Motorstillstand kontrolliert zu bewegen, um eine

Neuverteilung des Schmiermittels zu erzielen (General Motors: DE 102 01 278 A1, Figur 6).



Figur 5: Bereitstellen eines Gemisches in einen abzustellenden Zylinder zur anschließenden Unterstützung des Startvorganges, DE 10 2004 046 182 A1.



Figur 6: Motorschmierung bei abgeschalteter Brennkraftmaschine, DE 102 01 278 A1.

6.3. Komfortfunktion, Klimaanlagenbetrieb

Ein wesentliches Kriterium für die Akzeptanz von energiesparenden Maßnahmen ist, dass der Komfort für den Fahrer nicht eingeschränkt wird. Bei herkömmlichen Start-Stopp-Systemen, bei denen Nebenaggregate, wie z. B. der Klimakompressor über einen Riemen angetrieben werden, fallen diese in der Zeit der Motorabschaltung ebenfalls aus. Damit die Auswirkungen einer vorübergehenden Außerbetriebnahme der Klimaanlage nicht als unangenehm empfunden werden, erfolgt ein Abschalten des Verbrennungsmotors nur dann, wenn Temperatur und Luftfeuchte im Fahrzeuginnenraum innerhalb eines vorgegebenen Bereiches liegen (DaimlerChrysler: DE 102 11 461 C1). Alternativ könnten diese Nebenaggregate auch elektrisch und damit unabhängig angetrieben werden. Dies ist jedoch mit erheblichen Kosten und erhöhter Fahrzeugmasse verbunden. Zudem führt diese Variante zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch, da die mechanische Energie des Verbrennungsmotors nicht direkt genutzt wird, sondern über Generator und Elektromotor mit den damit verbundenen Verlusten zweimal gewandelt werden muss.

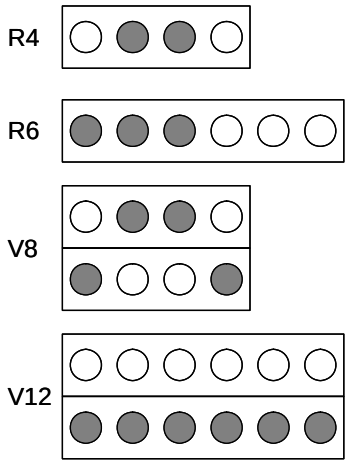
Eine mögliche Alternative hierfür ist in der DE 10 2004 044 473 A1 (BMW) beschrieben. Dabei wird der Verbrennungsmotor bei Vorliegen eines Stopp-Signals nicht in jedem Fall abgeschaltet, sondern stattdessen bei einer Drehzahl unterhalb der normalen Leerlaufdrehzahl betrieben und erforderlichenfalls durch den Starter-Generator zur Erzeugung des angeforderten Drehmoments unterstützt. Die Nebenaggregate können somit weiter allein durch den Verbrennungsmotor oder durch die Kombination von Verbrennungsmotor und Starter-Generator angetrieben werden. Gemäß einer Weiterbildung ist vorgesehen, dass z. B. der Klimakompressor über ein Getriebe mit variabler Übersetzung angetrieben wird, so dass stets die erforderliche Kälteleistung bereit gestellt werden kann. Auch können bestimmte Nebenaggregate zeitweise abgeschaltet werden, um das erforderliche Drehmoment zu reduzieren. Im Normalbetrieb werden die Nebenaggregate daher ausschließlich durch den Verbrennungsmotor angetrieben, wodurch die mehrfache Energiewandlung entfällt.

6.4. Zylinderabschaltung

Um einem möglichst optimalen Gesamtantrieb zu erhalten, genügt es nicht, den Verbrennungsmotor eines konventionellen Antriebs unverändert zu übernehmen [3]. Durch den zusätzlichen elektrischen Antrieb kann der Verbrennungsmotor kleiner dimensioniert („Downsizing“) und/oder auch einfacher konzipiert werden, denn er muss nicht mehr alleine den gesamten Leistungsbereich optimal abdecken. Ein Ansatz zur Optimierung des Gesamtaggregates ist die sog. Zylinderabschaltung. Hierbei wird zeitweise nur ein Teil der Zylinder des Verbrennungsmotors aktiv betrieben und der andere Teil der Zylinder wird deaktiviert. Im einfachsten Fall kann dies durch Abschalten der Kraftstoffzufuhr zu den betreffenden Zylindern erfolgen. Um die maximal mögliche Wirkungsgradverbesserung zu erreichen, müssen zusätzlich die Ein- und Auslassventile deaktiviert werden, wodurch unnötige Pumpverluste vermieden werden. Durch die Abschaltung einzelner Zylinder können die verbleibenden Zylinder bei erhöhter Last und damit in einem verbrauchsgünstigeren Betriebsbereich betrieben werden (General Motors: DE 10 2004 049 688 A1). Die Zylinderabschaltung wird auch in herkömmlichen Fahrzeugen, insbesondere bei großvolumigen Motoren mit hoher Zylinderzahl, eingesetzt [6].

In Figur 7 sind für verschiedene Motorbauarten (Reihen-, V-Motor) mögliche Konfigurationen einer Zylinderabschaltung dargestellt. Die leeren bzw. grau gefüllten Kreise stellen hierbei die befeuerten bzw. die abgeschalteten Zylindergruppen dar. Während der Zylinderabschaltung selbst kann zusätzlich in vorgegebenen Zeitabständen zwischen den Zylindergruppen hin- und hergeschaltet werden, so dass jede Zylindergruppe abwechselnd aktiviert und deaktiviert wird. Durch diese Maßnahme kann eine zu starke Auskühlung des Katalysators verhindert werden (siehe auch 6.1.).

Normalerweise erfolgt die Abschaltung bei jedem zweiten Zylinder in der Zündfolge. Der Betrieb mit Zylinderabschaltung ist jedoch mit einem unrunden Motorlauf verbunden, der zu zusätzlichen Schwingungen im Antriebsstrang führt, die vom Fahrer als sehr unangenehm empfunden werden und auch mechanische Probleme verursachen können. Hier kann mit Hilfe des vorhandenen Elektromotors (Starter-Generator), der mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt ist, eine aktive Dämpfung der Drehschwingungen bewirkt werden.

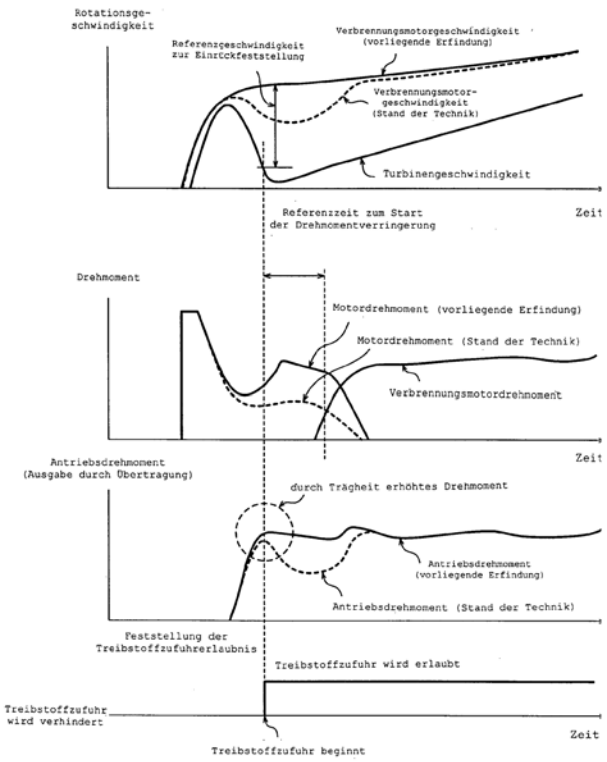


Figur 7: mögliche Konfigurationen einer Zylinderabschaltung für unterschiedliche Motortypen.

Zu diesem Zweck wird aus einer Ungleichförmigkeit der erfassten Motordrehzahl eine Störgröße des Drehmoments abgeleitet und aus dieser eine Führungsgröße (Soll-Gegenmoment) für die Regelung des Starter-Generators generiert (Siemens: DE 199 39 250 A1).

Auch der Start des Verbrennungsmotors und das Einkuppeln sollen im Fahrbetrieb möglichst unbemerkt erfolgen. Auch hier wird der Starter-Generator eingesetzt, um Drehzahlabweichungen zu kompensieren, die insbesondere während des Einkuppelns auftreten (Suzuki: DE 10 2004 002 705 A1, Figur 8).

Die Entscheidung, ob zur Regelung der Drehzahl vom Starter-Generator ein Drehmoment aufgenommen oder ein zusätzliches Drehmoment abgegeben werden soll, erfolgt abhängig vom vorliegenden Betriebszustand. Beispielsweise kann es sinnvoll sein, bei Kaltstarts, bei niedrigem Ladestand der Batterie, bei gleichzeitigem Betrieb der Klimaanlage oder beim Laden von Unterdruckspeichern den Starter-Generator als Generator und andererseits als Elektromotor zu betreiben (Ford: DE 102 21 035 A1).



Figur 8: Reduzierung von Drehmomentschwankungen beim Zuschalten der Brennkraftmaschine durch Einsatz des Starter-Generators, DE 10 2004 002 705 A1.

7. Ausblick

Die vorausgehend aufgezeigten Maßnahmen und Entwicklungen verdeutlichen das weiterhin große Einspar- und Optimierungspotential, das die konventionellen Verbrennungsmotoren (Otto, Diesel) insbesondere in Verbindung mit hybriden Fahrzeugkonzepten noch bieten. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass insbesondere der Voll-Hybrid lediglich im Stadtverkehr Verbrauchs- und Emissionsvorteile für sich verbuchen kann und daher nicht als Allheilmittel verstanden werden darf. Dennoch wird sich der Hybridantrieb zu einem Technologieträger entwickeln und ein eigenes Antriebssegment bilden. Langfristig betrachtet kann das Hybridkonzept als eine Übergangslösung bzw. als eine Entwicklungsstufe auf dem Weg zum Brennstoffzellen-Fahrzeug bewertet werden.

Literaturliste Nicht-Patentliteratur

[1] MTZ Extra: „Antriebe mit Zukunft“, Vieweg Verlag, Oktober 2005.

[2] DECIUS, N. et al.: Modulare Bordnetzarchitektur für Hybridfahrzeuge. – In: ATZ, 12/2005, Jahrgang 107, S. 1098-1105.

[3] VOSS, B.; MEHLER, O. & LINTZ, S.: Serienentwicklung von Hybridfahrzeugen, Teil 1: Entwicklungsprozess, Gesamtfahrzeug und konventionelle Antriebskomponenten. – In: ATZ, 06/2006, Jahrgang 108, S. 485-491.

[4] MAYR, B.: Hybridantrieb – Konkurrenz oder Unterstützung für den Verbrennungsmotor?, Vortrag auf der 1. Motortechnischen Konferenz „Der Antrieb von Morgen“, 17./18.02.2005, Ingolstadt

[5] DUDENHÖFFER, F.: Die Markentwicklung von Hybridfahrzeugkonzepten. – In: ATZ 04/2005, S. 330-335.

[6] INDRA, F.: „Der Antrieb von morgen mit Zylinderabschaltung?“, Vortrag auf der 1. Motortechnischen Konferenz „Der Antrieb von Morgen“, 17./18.02.2005, Ingolstadt.

Tsunami-Frühwarnsysteme

Dr. Klaus Wollny, Abt. 1.52

Der Artikel erörtert anhand von ausgewählten Patentanmeldungen und Fachartikeln die Frage, ob der weltweit beachtete Tsunami vom 26.12.2004 einen nachweisbaren Innovationsschub auf dem Gebiet der Tsunami-Frühwarnsysteme ausgelöst hat. Es wird hierbei auf die Entwicklungsgeschichte der Frühwarnsysteme eingegangen, der Aufbau ihrer Sensorik erklärt und erläutert, wie aus Daten eines Ereignisses, das die Ursache eines Tsunamis sein kann, eine Gefahrenpotenzialaussage gewonnen wird.

1. "Weihnachtstsunami 2004" und die Folgen

Vielen Menschen in unserem Land ist das japanische Wort "Tsunami" erst seit dem 26.12.2004 ein Begriff. Es steht heute synonym für eine Meereswelle, die in Südostasien mehr als 230.000 Menschen das Leben gekostet hat. Hunderttausende wurden obdachlos, landwirtschaftliche Nutzflächen, die Infrastruktur und die Lebensgrundlage von Millionen Menschen wurden innerhalb weniger Minuten vernichtet. Neben Ohnmacht und Trauer löste dieses Ereignis auch eine weltweite Hilfsbereitschaft für die Betroffenen aus. Zum einen zeigte sich dies in der vergleichsweise schnellen und direkten humanitären Hilfe zum Wiederaufbau sowie zur Linderung der größten Not im Alltag. Zum anderen aber auch in dem Versprechen, global die Forschungsgelder für die Geowissenschaften und den Katastrophenschutz zu erhöhen. Dies schloss insbesondere auch die Entwicklung effizienter Tsunami-Frühwarnsysteme für gefährdete Gebiete im Rahmen internationaler Projekte mit ein.

Seitdem sind 30 Monate vergangen und man fragt sich berechtigterweise, was aus diesen Plänen und Absichtsbekundungen geworden ist. Wurden neue Ansätze zum Schutz der Menschen und Sachgüter zur Praxisreife entwickelt und in den gefährdeten Gebieten realisiert? Gab es einen echten Innovationsschub, den man aus Veröffentlichungen (z.B. [1],[14]) und der Art und Zahl der Patentanmeldungen zum Thema ableiten kann?

Mit diesen Fragen und der geschichtlichen Entwicklung der Tsunami-Frühwarnsysteme möchte sich dieser Artikel beschäftigen. Zu diesem Zweck wird versucht, aus der Patentliteratur, aus Beiträgen in Fachzeitschriften und Internetquellen einen aktuellen Überblick zu gewinnen.

2. Grundbegriffe zum Thema Tsunami

2.1. Entstehung und Aufsteilungseffekt

Ein Tsunami ist eine hauptsächlich von Seebeben und submarinen Hangrutschungen ausgelöste Meereswelle. Sie tritt i.W. dann auf, wenn das auf dem Meeresboden auflastende Wasser – oft auch "Wassersäule" genannt – mechanisch abrupt zu einer Bewegung in der Senkrechten gezwungen wird. Dies kann z.B. bei einem Erdbeben in der Tiefsee durch den vertikalen Versatz zweier tektonischer Platten verursacht sein, wobei die Wassersäule kurzzeitig absackt oder angehoben wird. Solch ein Vorgang ist mit einem großen Energieumsatz verbunden. Diese Energie breitet sich als Meereswelle konzentrisch von ihrem Entstehungsort aus.

Die Amplitude dieser Welle hängt vom ursprünglichen Energieeintrag bei der Entstehung der Welle und von der jeweiligen Meerestiefe auf ihrem Ausbreitungsweg ab. So kann es z.B. aufgrund der Unterwassertopographie auch zu Brechungseffekten kommen, die die Richtung der Wellenausbreitung beeinflussen.

Bewegt sich die Welle z.B. aus dem Tiefwasserbereich ihrer Entstehung in den Flachwasserbereich einer Küste, wächst ihre Amplitude um so mehr, je flacher die Küste ist. Geht man nun von einem ursprünglich mit demselben Energieinhalt ausgestatteten Tsunami aus, kann es abhängig von der Geometrie der Küste (Steilküste, Schelfgebiet, Fjord, etc.) zu sehr unterschiedlichen Intensitäten und Höhen der Wellenfront direkt an der Küste kommen. Details zur Physik von Meereswellen sind der Fachliteratur zu entnehmen (z.B. [2]).

2.2. Zerstörungspotenzial

In der Regel beträgt die Wellenhöhe eines Tsunamis kurz vor dem Auftreffen auf eine Küste mehrere Meter - in Ausnahmefällen kann sie aber auch mehrere Dutzend Meter betragen. Dort bricht er sich, überflutet weite Bereiche küstennahen Geländes und richtet aufgrund des gewaltigen Wasserdrucks Verwüstungen an: Flüsse werden aufgestaut, Hausmauern eingedrückt und große Objekte wie Autos und Strommasten mitgerissen, die dabei ihrerseits Schäden verursachen. Wenn sich die Welle an Land ausgelaufen hat, bildet das sogartige Rückströmen der Wassermassen zunächst den Abschluss primärer Schadwirkungen.

Folgeschäden sind bei Gesamtschadensbetrachtungen jedoch auch zu berücksichtigen. Dazu zählen versalzene ackerbauliche Nutzflächen, zerstörte Verkehrswege, eine defekte Wasser- und Stromversorgung, Seuchen, der wirtschaftliche Niedergang ganzer Landstriche und die Abwanderung einer daher verarmten Bevölkerung.

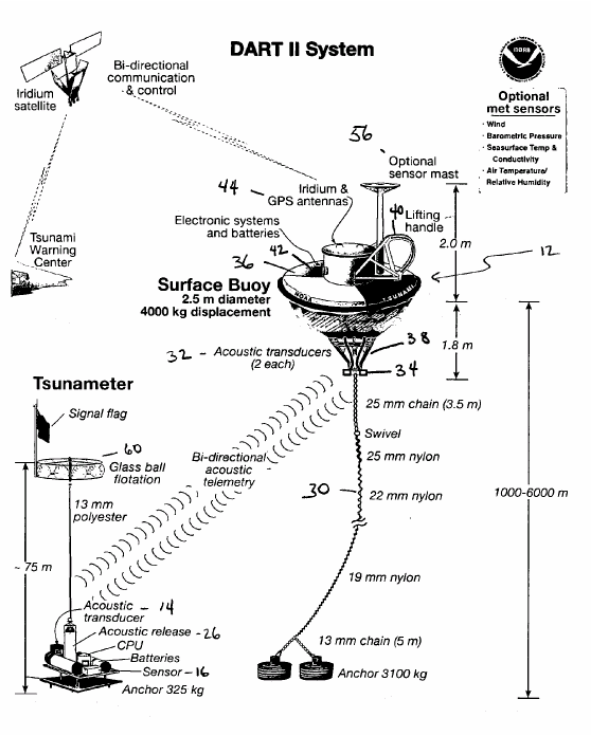
2.3. Erkennung und Bewertung

Die Tsunami-Gefährdung eines Küstenareals hängt i.d.R. von seiner Nähe zu tektonisch aktiven oder geologisch instabilen untermeerischen Gebieten ab.

In besonders gefährdeten Gebieten, z.B. in der Nähe des zirkumpazifischen Feuergürtels, mussten die Menschen im Laufe vieler Generationen besondere Fähigkeiten entwickeln, um derartige Gefahrensituationen zu überleben. Die Seenomaden Südostasiens haben etwa über genaue Naturbeobachtung gelernt, eine potenzielle Tsunami-Gefahr richtig einzuschätzen. Dieses Wissen ist jedoch nicht beliebig übertragbar und natürlich auch nicht exakt. Nicht nur aus diesem Grund verlassen sich etwa Japan und die USA auf hochtechnologische Ansätze, um die Gefahren dieses Naturphänomens zu bannen.

Um einen Tsunami zu erkennen und zu bewerten, werden meist drei physikalische Größen gemessen (vgl. Figur 1):

- Seismische Bodenunruhe (mittels Seismometern)
- Druckschwankungen der Wassersäule auf dem Meeresgrund (mittels Drucksensoren, 16)
- Höhe des Meeresspiegels (oberirdisch mittels Küstenradar, Satellit, Bojen (12,44), Pegeln).



Figur 1: Tsunami-Frühwarnsystem DART II aus der US 2006 / 0 195 263 A1.

2.3.1. Seismische Messungen und Auswertung

Findet ein Erdbeben auf dem Meeresgrund statt, wird u.a. mittels Seismometernetzwerken an Land und auf dem Meeresgrund sowie der Auswertung der von diesen aufgezeichneten Daten geklärt, ob die Bebenstärke und der Bebenmechanismus einen Tsunami auslösen können.

Solch eine Aussage ist wichtig, da sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von seismischen Wellen und von Tsunami-Meereswellen oft um mehr als den Faktor 10 unterscheiden. Ein realistischer Wert für seismische Oberflächenwellen, die sich auf ozeanischer Kruste ausbreiten, kann z.B. mit 11.000 km/h angegeben werden. Die Welle eines Tsunamis pflanzt sich bei einer Wassertiefe von 4000 m hingegen mit etwa 700 km/h fort. Damit ist die Erdbebenwelle dieses Beispiels ca. 16 Mal schneller als der Tsunami. Wird also an einer potenziell gefährdeten Küste eine Erdbebenwelle registriert, steht noch wertvolle Zeit für eine Bewertung dieses Bebens, eine Warnung und ggf. eine Evakuierung zur Verfügung.

2.3.2. Druckmessungen auf dem Meeresgrund

Vertikale Schwankungen in der Wassersäule, wie sie bei einer durchziehenden Tsunami-Welle oder auch bei den Gezeiten auftreten, können am Meeresboden physikalisch

als zeitlich variabler Druck registriert werden. Drucksensoren sind heutzutage in der Lage bei 6000 m auflastender Wassersäule Meeresspiegelschwankungen bis auf 1 mm genau nachweisen ([9]). Dies ist auch notwendig, da Tsunamis über der Tiefsee oft nur eine Welle mit einer Amplitude von einigen Zentimetern bis wenigen Dezimetern Höhe ausbilden.

2.3.3. Messung von Meeresspiegelschwankungen

Diese Messungen können mittels Küstenpegeln, bodengestütztem Radar, GPS-Bojen oder per Satellit im Rahmen von speziellen geophysikalischen und Fernerkundungsverfahren durchgeführt werden. Wichtig für die Einschätzung der gewonnenen Werte ist eine Korrektur der Daten, die die Gezeiten, den Einfluss des Windes oder anderer zweifelsfrei nachvollziehbarer Störquellen berücksichtigt.

3. Forschung und Patentanmeldungen

3.1. Bewertung der Gesamtsituation

Die Bereitschaft, in die Forschung auf einem bestimmten Gebiet zu investieren, hängt oft davon ab, welchen wirtschaftlichen Nutzen die Ergebnisse versprechen. Zwar gab es in prähistorischer und historischer Zeit im europäischen Raum einige katastrophale Tsunamis, z.B. den Storegga Tsunami – ausgelöst ca. 8000 v.Chr. vor Norwegen durch einen gigantischen submarinen Hangrutsch ([13], [17]) – und jenen, der mit dem "Erdbeben von Lissabon" 1755 in Verbindung gebracht wird. Seit der Industrialisierung blieb Europa jedoch weitgehend hiervon verschont. Folglich gab es für keinen Staat auf diesem Kontinent zwingende Gründe, sich diesem Forschungsobjekt besonders zu widmen.

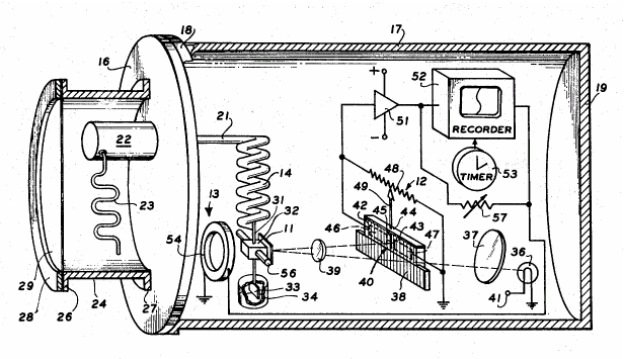
Von den Anrainerstaaten des Pazifiks, die es sich rein ökonomisch leisten können, begannen die USA und Japan erst nach dem Zweiten Weltkrieg systematisch Tsunamis zu erforschen und auf ein Warnsystem hinzuarbeiten. Von den Aktivitäten Russlands ist in der westlichen Welt nach wie vor nur wenig bekannt, aber auch ältere japanische Quellen sind z.T. schwer zu erschließen. Das Engagement der Europäer und v.a. der Deutschen hängt ursächlich mit dem Weihnachtstsunami des Jahres 2004 zusammen, dem auch viele Urlauber aus den Industriestaaten zum Opfer fielen.

3.2. USA

Zwar existierte bereits seit 1949 in Ewa Beach auf Hawaii ein Tsunami-Warnzentrum, jedoch führten die Tsunamis 1960 und 1964 sowie weitere seismisch getriggerte Katastrophen in den folgenden Jahren vor Augen, dass dieses in der bestehenden Form die Erwartungen nicht erfüllen konnte. Die "National Oceanic & Atmospheric Administration" (NOAA) entwickelte daraufhin ein komplexes Tsunami-Frühwarnsystem, das die Westküste der USA und die Küste anderer Pazifikstaaten mit einer geringen Fehlalarmquote über eine derartige Gefahr informiert. Bisherige Systeme, die rein auf der Auswertung von an Land aufgezeichneten seismischen Wellen basierten, hatten eine zu große Fehlerquote (nach [11] bis zu 75 %). Dieses führte dazu, dass die Systeme in der Bevölkerung eine geringe Akzeptanz besaßen und Warnungen kaum mehr ernst genommen wurden.

3.2.1. DART

Ausgehend von Vorläuferstationen 1986 ([5], [11]) nahm Ende der 1990er Jahre das Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis System (DART) seinen Betrieb auf. Praxistaugliche Drucksensoren, die auch im Meer eingesetzt werden konnten, gab es bereits im Vorfeld (z.B. US 3 538 772 A, Figur 2).



Figur 2: Sensor geeignet zur submarinen Messung von Meeresspiegelschwankungen mittels einer Bourdon-Röhre (14) aus der US 3 538 772 A.

Das DART besteht aus einem Messfeld von 6 einzelnen Sensoreinheiten, die in der Nähe von für die Entstehung von Tsunamis geologisch relevanten Orten des Pazifiks positioniert sind, und einem landgestützten EDV-Zentrum, das die Aus- und Bewertung der aufgezeichneten Daten übernimmt. Jede Sensoreinheit ist zweiteilig aufgebaut. Die eigentliche Sensorik, auch "Tsunameter" genannt, mit

einem Drucksensor, einer Batterie und einer Unterwasser-Kommunikationsschnittstelle, ist auf einer Plattform angeordnet, welche in mehreren Tausend Metern Tiefe auf dem Meeresboden verankert ist. Sie tauscht Messdaten mit einer Boje an der Meeresoberfläche aus, die den zweiten Teil der Sensoreinheit darstellt. Die Boje besitzt eine zusätzliche Kommunikationsschnittstelle, um Daten in ein EDV-Zentrum an Land zu senden, GPS zur Ortsbestimmung und eine eigene Energieversorgung. Einen Prinzip-Überblick über das Gesamtsystem ermöglicht die Figur 1. Als Drucksensoren werden hier piezoelektrische Schwingquarze verwendet ([9], [10]).

Das Prinzip des Warnmechanismus' ist einfach. Der Drucksensor nimmt sowohl seismische Wellen als auch Tsunami-Wellen, sofern diese angeregt werden, als Druckschwankungen in der Wassersäule über ihm wahr. Wird neben einem seismischen Ereignis auch eine Tsunami-Welle registriert, kann über die Laufzeitdifferenz beider Wellen an den Messorten und die jeweilige Größe der Druckschwankung im Falle der Tsunami-Welle vom EDV-Zentrum eine Aussage über das wahrscheinliche Gefährdungspotenzial abgegeben werden.

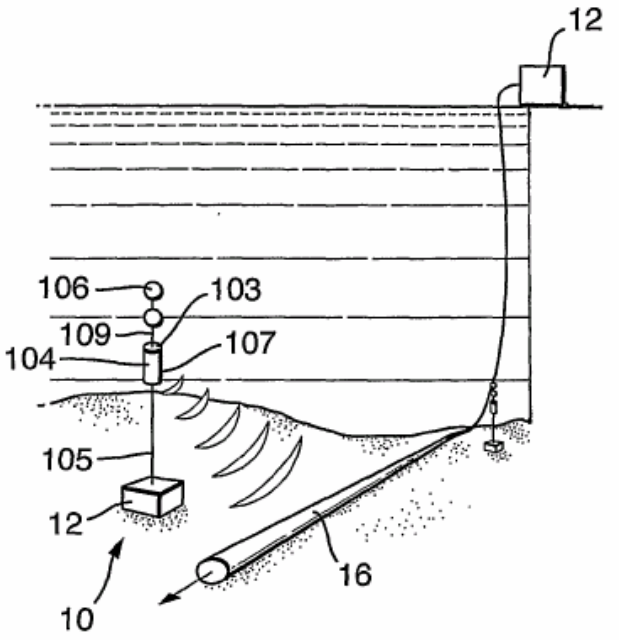
Dieses System arbeitet zwar prinzipiell recht zuverlässig und erfolgreich (z.B. [6]), weist jedoch aufgrund der geringen Datendichte, der nur einseitigen Kommunikationsrichtung und der fehlenden Möglichkeit, lokale Gegebenheiten der Küsten in die Wertung einzubeziehen, Verbesserungsbedarf auf. Diese Mängel sollte das Nachfolgeprojekt DART II beheben.

3.2.2. DART II

Eine Optimierung der Kommunikationsschnittstellen, die Erhöhung der Messnetzdichte auf 39 Sensoreinheiten im Jahre 2007 und der Abgleich von Messdaten mit Resultaten von vorab durchgeführten Modellrechnungen führt im Nachfolgesystem von DART zu einer erheblichen Steigerung der Aussagekraft einer Tsunami-Bewertung.

Die in DART II eingehenden Modellrechnungen für die Ausbreitung von Wellen werden für ein zu bewertendes Ereignis aus einer Datenbank nach bestimmten Kriterien ausgewählt und zu dessen Beurteilung herangezogen. In sie fließen neben Quellparametern lokale bathymetrische und andere die Ausbreitung von Wellen im Meer beeinflussende Daten mit ein. Als Quellparameter gelten u.a. physikalische Größen, die die freigesetzte Energie und das Hypozentrum einer seismischen Quelle beschreiben, also einen potenziellen Tsunami-Ausgangsmechanismus charakterisieren. Dies führt letztlich zu einer unendlich großen Zahl möglicher Szenarien. Den Auswahlalgorithmen kommt somit eine entscheidende Bedeutung zu.

Das Ergebnis des Vergleichs von Modelldaten mit den realen Daten im EDV-Zentrum führt zu Meldungen in lokalen Warnzentren und im Internet. Sie ermöglichen Aussagen, ob und wenn ja wie sich ein Tsunami an einem bestimmten geographischen Ort ausbildet, wie viel Zeit für rettungstechnische Maßnahmen bleibt und welche davon ergriffen werden müssen. Einen tiefergehenden Einblick gewähren Fachartikel ([3],[7],[10],[16]) und die einzige Patentschrift über DART II, die US 2006 / 0 195 263 A1 (vgl. Figur 1).



Figur 3: Ein Glasfaserkabel kommerzieller Anbieter wird im Rahmen des DART-Sensornetzwerks statt einer Boje zum Datentransfer an Land genutzt (WO 2006 – 092 611 A1).

Ein Weiterentwicklungsvorschlag, um sich die Kosten für die Bojen und die Kommunikationseinheiten zu sparen, stammt aus Großbritannien: In der WO 2006 – 092 611 A1 wird u.a. die Einkopplung der Sensordaten direkt in die weltweit verlegten submarinen optischen Datenkabel angeregt (Figur 3). Über die Kabel könnten die Daten sofort in die EDV-Zentren transferiert werden.

3.2.3. Entwicklungen außerhalb der NOAA

Die folgenden ausgewählten Erfindungen sind für ein breiteres Einsatzspektrum angelegt, können jedoch ausdrücklich auch für die Ortung und Bewertung von Tsunamis eingesetzt werden.

So z.B. ein interferometrisches Verfahren für ein SAR um sich schnell ausbreitende Oberflächenwellen zu detektieren (US 2004 / 0 090 360 A1 der Lawrence Livermore National Laboratories), oder ein Beobachtungssystem für die Ionosphäre, aus der man auch ein Tsunami-Ereignis ablesen kann (US 4 463 357 A der NASA). Grund hierfür ist, dass ein einen Tsunami auslösendes Ereignis einen akustischen Impuls in die Atmosphäre abstrahlt und dieser auf die Troposphäre einwirkt. Da Troposphäre und Ionosphäre dynamisch gekoppelt sind, kann in der Ionosphäre durch solch ein Ereignis eine Ionosphärenwelle angeregt werden. Dieser Tatbestand kann durch eine Dauerbeobachtung der Ionosphäre nahezu in Echtzeit registriert werden und lässt einen Rückschluss auf den Verursacher zu.

Viele Patentanmeldungen befassen sich jedoch nicht mit der eigentlichen Datenaufnahme, sondern mit der Weiterverarbeitung von gewonnenen Tsunami-Daten zum Zweck der Koordination, Darstellung und Umsetzung notwendiger Katastrophenschutzmassnahmen. Dies ist jedoch nicht das Hauptthema dieses Artikels, daher wird nur beispielhaft auf die US 2005 / 0 234 646 A1 verwiesen. Ergänzend sei noch erwähnt, dass derartige konzeptionelle Anwendungen sich vom Prinzip her nicht von der zeit- und wegoptimierten Vermittlung von Nachrichten unterscheiden, wie sie im Rahmen von aktuellen Verkehrsleitsystemen oder Mobiltelefon-Informationsdiensten realisiert sind. Lediglich die Thematik ist eine andere.

3.3. Japan

Japan ist aufgrund seiner Lage direkt an einer seismisch ausgesprochen aktiven Subduktionszone häufig von Tsunamis betroffen. Die Japan Meteorological Agency (JMA) gründete daher 1952 das japanische Tsunami-Warnzentrum ([8]) und betreibt heute ein Netzwerk, das aus 180 seismischen Messstationen an Land und auf See und 80 Wasserstandsmessstationen besteht. Deren Messergebnisse dienen im Verbund mit speziellen Algorithmen zur Berechnung der Gefährdungspotenziale an der japanischen Küste. Wie diese Aufbereitung aussehen kann, ist z.B. der WO 2007 – 007 728 A1 zu entnehmen.

Japanische Entwickler zeigen, dass die Detektion von Tsunamiwellen außer mittels Seismometern und piezoelektrischen Druckmessern auf dem Meeresgrund auch mittels einer optischen Sensorik erfolgen kann. Die JP 08 – 128 869 A beschreibt hierzu das Platzieren eines Sensorkabels auf dem Ozeanboden, das in festgelegten Abschnitten optisch arbeitende Auflastsensoren aufweist. Diese Anordnung ist prinzipiell mit den Hydrophonketten in einem Streamer der marinen Seismik vergleichbar. Weitere apparative Entwicklungen finden sich auf dem Gebiet gekoppelter Seismometer-Pegelmesser-Apparaturen (JP 11 - 064 051 A, JP 2001 – 264 056 A), stabilisierter Bojen (JP 11 – 281 758 A, JP 11 – 281 759 A), z.T. mit GPS ausgestattet (JP 2001 – 147 263 A, WO 2006 - 087 802 A1), und landgestützter IR-Apparaturen (JP 2006 – 201 147 A) zur Messung von Schwankungen des Meeresspiegels sowie "Vorhersagegeräten". Diese Geräte wenden i.W. das bekannte Prinzip an, registrierte seismische Wellen und Meeresspiegelwerte in Beziehung zu setzen und daraus ein Gefahrenpotenzial abzuleiten (JP 2005 – 315 872 A). Als eher ungewöhnlichen Ansatz kann man das Erstellen von Tiefenprofilen der Strömungsgeschwindigkeit im Wasser mittels Strömungsmessern ansehen, aus denen Rückschlüsse auf die Existenz von Tsunamiwellen gezogen werden (JP 2006 – 209 712 A).

3.4. Deutschland

Das deutsch-indonesische Gemeinschaftsprojekt GITEWS (German Indonesian Tsunami Early Warning System) wurde als direkte Konsequenz aus dem Tsunami vom 26.12.2004 ins Leben gerufen. Bis zu diesem Ereignis sind die Publikationen aus Deutschland zum Thema recht dünn gesät. Seitdem ist eine verstärkte Aktivität zu beobachten. Beispielhaft sei auf die Aufarbeitung des Ereignisses an sich durch [18] und die Publikation der Lösungsansätze im Rahmen des GITEWS-Projektes verwiesen (z.B. [12],[15]).

Das von den Deutschen für die Tsunami-Frühwarnung im

Hoheitsgebiet Indonesiens entwickelte System verbindet bereits bekannte Bestandteile existierender Systeme und setzt auf einen modularen Aufbau. Somit kann flexibel und schnell auf spezielle Anforderungen vor Ort und auf etwaige Neuentwicklungen reagiert werden.

Es soll bis zu Beginn des Jahres 2008 vollständig in Betrieb sein und verbindet im Wesentlichen folgende Komponenten zu einem Warnsystem:

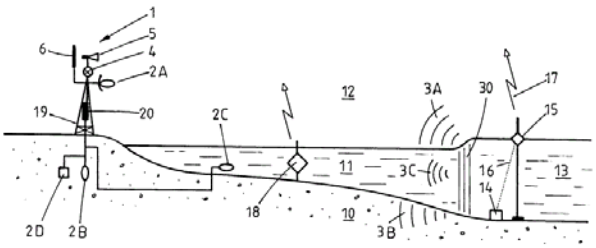
- Erdbebenaufzeichnung mittels einer Kombination aus
    - GPS-Sensoren (Oberflächenbewegung des Untergrundes, z.B. [4])
    - Breitbandseismometern (Lokalisierung eines Bebenherdes und Feststellung der Bebenmagnitude)
    - Modems zum Datentransfer zu einem EDV-Zentrum
- Meeresspiegelbeobachtung mittels
    - sogenannter Tsunami-Bojen (GPS auf den Bojen und Drucksensoren am Meeresgrund)
    - Pegelstationen an der Küste (mit GPS)
    - Modems zum Datentransfer zu einem EDV-Zentrum
- Tsunami-Modellierungsdatenbanken, die eintreffende vorverarbeitete Daten mit im Vorfeld bereits berechneten Katastrophenszenarien abgleichen und die Bewertungssicherheit erhöhen.

Genaueres über die Konzeption kann beispielsweise [12] entnommen werden.

Auffällig ist jedoch, dass zum Thema von den am Projekt beteiligten Forschungsinstituten oder Firmen bisher kaum Patentanmeldungen getätigt wurden:

Eine der wenigen Anmeldungen beschäftigt sich mit einer DART-ähnlichen Meeresbodensensor-Bojen-Anordnung zur Gewinnung und Weiterleitung von Druckdaten (DE 10 2005 042 213 A1). Eine weitere Anmeldung, die DE 10 2005 053 038 A1, beschreibt erneut die Nutzung der Atmosphäre als indirekten Detektor für tektonische Signale (vgl. 3.2.3.). Hier werden als Auswirkung einer von einem tektonischen Ereignis ausgesandten Infraschallwelle die in 85-95 km Höhe ausgelösten Temperaturfluktuationen ("Airglow") mittels eines Infrarotspektrometers vom Erdboden aus vermessen. Letztlich wird in der DE 10 2005 040 203 B3 ein Verfahren zur akustischen Datenübertragung in Flüssigkeiten vorgestellt, wie es bei der Kommunikation zwischen einer am Meeresboden verankerten Sensoreinheit mit einer an der Wasseroberfläche positionierten Boje Verwendung findet.

Daneben haben auch nicht am Konsortium Beteiligte einzelne Aspekte von Tsunami-Frühwarnsystemen neu beleuchtet (DE 20 2005 000 522 U1). In der DE 10 2005 004 786 A1 wird z.B. ein lokal begrenzt einsetzbares Sensorsystem zum Erkennen einer herannahenden Tsunamiwelle (vgl. Figur 4) beschrieben. Insgesamt bleibt aber festzustellen, dass sich im Vergleich zu ähnlich gelagerten Katastrophenszenarien (Überschwemmungen, Sturmschäden, Erdbeben usw.) erstaunlich wenige deutsche Erfinder an die Lösung der mit Tsunami-Warnsystemen verbundenen Probleme gewagt haben. Das mag an der Komplexität der Materie liegen, zeigt aber auch ihre nach wie vor bestehende natürliche räumliche Distanz zu diesem Phänomen.



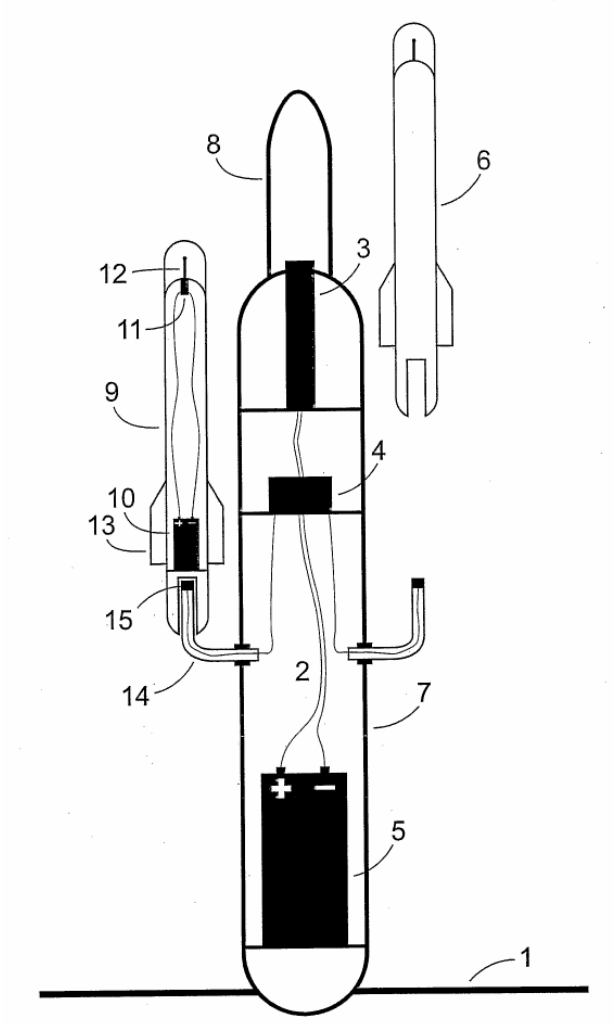
Figur 4: Frühwarnsystem der DE 10 2005 004 786 A1 mit seismischen Sensoren (2B-D, 14), einem akustischen Sensor (2A) und einem an einem Schwimmkörper fixierten Beschleunigungssensor (18).

3.5. Sonstige Nationen

Für die Entwicklungsarbeit Russlands und der ehemaligen Sowjetunion sei beispielhaft auf den im Meeresboden verankerten Messaufnehmer der RU 2 290 671 C1 verwiesen. Dieser weist einen Pendelkörper in einem Sensorgehäuse auf und nutzt u.a. dessen zeitliche Auslenkung aus der Ruhelage für eine Aussage über eine Tsunami-Gefahr.

Aus Schweden stammt die Idee, zur Warnung vor Tsunamis auf dem Meeresgrund (1) eine "Kurierstation" (7) vorzusehen (WO 2006 073 358 A1, Figur 5). Diese Kurierstation ist mit Sensoren ausgestattet, die

kontinuierlich den Wasserdruck am Ort der Station messen. Überschreitet der Druck einen gewissen Grenzwert, etwa wenn eine Tsunami-Meereswelle über die Station zieht, wird eine Kuriersonde (6) aktiviert, die an die Meeresoberfläche aufsteigt. Dort sendet sie ein Signal über eine Antenne (12) an einen Empfänger an Land und kann dort einen Tsunami-Alarm auslösen.



Figur 5: Meeresbodenstation (7) nach WO 2006 – 073 358 A1, die bei Überschreiten eines Wasserdruck-Grenzwerts Alarm auslösende Sonden (6) an die Meeresoberfläche steigen lässt.

4. Wertung der Patentanmeldungen

Betrachtet man alle in diesem Artikel zusammengefassten Patentveröffentlichungen zum Thema, muss man ein ernüchterndes Fazit ziehen: Weder weist die Anzahl der weltweit über die Patentbehörden publizierten Ideen noch deren Inhalt wesentlich über das hinaus, was bereits seit mehreren Jahren bekannt ist. Dies soll aber die teils sehr pfiffigen Erfindungen der Fachleute, die oft nicht direkt mit den multinationalen Forschergruppen, Gremien und Konsortien zusammenarbeiten, nicht schmälern. Es zeigt sich nur sehr deutlich, dass viele Forscher auf diesem Gebiet wesentlich mehr in Fachjournalen veröffentlichen, als den technischen Gehalt ihrer Arbeit patentrechtlich zu verwerten. So kann es dazu kommen, dass sich lediglich eine einzige Patentanmeldung in den USA direkt auf DART II bezieht, obwohl mit seiner Vorgeschichte mindestens zwanzig Jahre hochwertige praktische Forschungsarbeit verbunden sind.

Es bleibt abzuwarten, ob diese oder eine vergleichbare Bilanz auch für das deutsch-indonesische Projekt GITEWS gezogen werden muss, wenngleich die Ausgangsbedingungen zu DART sich in wesentlichen Punkten unterscheiden. Der erste Eindruck weist in diese Richtung.

Ohne Frage sind die Kosten der Entwicklung und des Betriebs eines Tsunami-Frühwarnsystems enorm hoch. Zum einen weist ein Teil des Einsatzgebiets der Sensoren mit der Tiefsee extreme Naturbedingungen auf, die beherrscht werden müssen, zum anderen ist der Druck enorm hoch, keine Fehler zu machen, aber trotzdem kostengünstig zu arbeiten. Das zwingt i.d.R. dazu, nur konservative Ansätze zu verfolgen, da die Gelder oft vor Nicht-Fachleuten gerechtfertigt werden müssen.

Es bleibt zu hoffen, dass weltweit die Sensibilisierung der Geldgeber fortdauert, auch wenn Tsunamis gerade nicht die Schlagzeilen der Presse beherrschen. Weitblickende Forschungsfinanzierung und auch der Mut, etwas ungewöhnlichere Wege zur Lösung eines Problems einzuschlagen, sollten die Szene beherrschen, und den Forschern die Gelegenheit gegeben werden, diese Ergebnisse auch wirtschaftlich z.B. über Patente zu nutzen.

5. Ausblick

Durch die Globalisierung ist die Welt zusammengerückt. Makabrerweise auch in der Art zu sterben: Urlauber wie Einheimische wurden in den Ferienparadiesen Südostasiens im Jahre 2004 Opfer des Tsunamis. Die finanziellen Folgen waren auf so verschiedenen Schauplätzen wie der Rohstoffbörse und der Bewilligung von Forschungsgeldern für die Tsunami-Forschung zu registrieren. Ein lokales Ereignis zeigt globale Folgen,

aber trotzdem sind die zu Beginn gestellten Fragen leider nicht alle mit "ja" zu beantworten.

Insbesondere ist in den Publikationen der Fachblätter kein echter technischer Innovationsschub auf dem Gebiet der Tsunami-Frühwarnsysteme zu erkennen. Auch die Anzahl von Patentanmeldungen zum Thema ist weltweit vergleichsweise gering. Im Wesentlichen versucht man der Gefahr durch ein immer dichter werdendes Netz aus Sensorstationen aller Art zu begegnen. Ein weiterer Punkt stellt die Einbeziehung von Modellrechnungen in den Bewertungsablauf für ein potenzielles Tsunami-Ereignis dar. Diese Berechnungen berücksichtigen lokale geologische Parameter, wie etwa die Küstenform und die Meeresbodentopographie, um die Ausprägung der anlandenden Meereswellen an einem bestimmten Ort vorherzusagen. Diese beiden Aspekte sollen zu einer größeren Sicherheit und Aussagekraft der Bewertung des Gefahrenpotenzials von Tsunamis führen. Die einzelnen Bestandteile der Systeme sind i.d.R. bekannte Komponenten, die nicht eigens für diesen Einsatzzweck entwickelt wurden. Es bleibt zu hoffen, dass die bloße Erhöhung der Datendichte und das Erstellen immer ausgeklügelterer Bewertungsalgorithmen ausreicht, um Katastrophen mit dem Ausmaß des Jahres 2004 zumindest unwahrscheinlicher zu machen. Absolute Sicherheit können sie in jedem Fall nicht bieten.

Literatur

[1] BANERJEE, P., POLLITZ, F.F. & BÜRGMANN, R.: The Size and Duration of the Sumatra-Andaman Earthquake from the Far-Field Static Offsets. – In: Science, 2005, Band 308, S.1769-1772.

[2] BARTELS, J. [Hrsg.]: Geophysik - Das Fischer Lexikon, 1960, Frankfurt, Fischer, S.207-215.

[3] BERNARD, E.N. et al.: Early detection and real time reporting of deep-ocean tsunamis. – In: ITS 2001 Proc., NTHMP Rev. Session, Paper R6, S.97-108.

[4] BLEWITT, G. et al: Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems. – In: Geophys. Res. Lett., 2006, Band 33, L11309, 4 S..

[5] EBLE, M.C. & GONZALES, F.I.: Deep-Ocean Bottom Pressure Measurements in the Northeast Pacific. – In: J. Atmosph. & Oceanic Techn., Band 8, S.221-233.

[6] GONZALES, F.I. et al.: Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART): Brief Overview and Status Report. 1998 [recherchiert am 23.05.07] - Im Internet: <URL:http://nctr.pmel.noaa.gov/dart_report1998.html>.

[7] GONZALES, F.I. et al.: The NTHMP Tsunameter Network. – In: Natural Hazards, 2005, Band 35, S.25-39.

[8] HARINARAYANA, T. & HIRATA, N.: Destructive Earthquake and Disastrous Tsunami in the Indian Ocean, What Next? – In: Gondwana Research, Band 8(2), S. 246-257.

[9] MEINIG, C. et al.: Technology Developments in Real-Time Tsunami Measuring, Monitoring and Forecasting. - In: Oceans 2005 MTS/IEEE, 19–23 September 2005, Washington, D.C., 7 S..

[10] MEINIG, C., STALIN, S.E. & NAKAMURA, A.I.: Real-Time Deep-Ocean Tsunami Measuring, Monitoring and Reporting System: The NOAA DART II Description and Disclosure. [recherchiert am 23.05.07] – Im Internet: <URL: http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/Pdf/DART_II_Description_6_4_05.pdf>.

[11] MILBURN, H.B., NAKAMURA, A.I. & GONZALES, F.I.: Real-Time Tsunami Reporting from the Deep Ocean. 1996. [recherchiert am 23.05.07] – Im Internet: <URL: http://nctr.pmel.noaa.gov/milburn1996.html>.

[12] RUDLOFF, A. & LAUTERJUNG, J.: The Tsunami Early Warning system in Indonesia – the German-Indonesian Efforts (GITEWS) [recherchiert am 23.05.07] – Im Internet: <URL: http://tsunami.jrc.it/Workshop/PRESENTATIONS%5CGITEWS_JRC.pdf>.

[13] SMITH, D.E. et al.: The Holocene Storegga Slide Tsunami in the United Kingdom. – In: Quaternary Science Reviews, 2004, Band 23, S. 2291-2321.

[14] SMITH, D.: Tsunami: A research perspective. – In: Geology Today, 2005, Band 21(2), S. 64-68.

[15] SOBOLEV, S.V. et al.: Towards Real-Time Tsunami Amplitude Prediction. – In: EOS Transactions, AGU, 2006, Band 87(37), S. 374+378.

[16] TITOV, V.V. et al.: Real-Time Tsunami Forecasting: Challenges and Solutions. 2003. 16 S. [recherchiert am 23.05.07] – Im Internet: <URL: http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/Pdf/titov_small.pdf>.

[17] TOOLEY, M.J. & SMITH, D.E.: Relative sea-level change and evidence for the Holocene Storegga tsunami from a high energy coastal environment: Cocklemill Brun, Fife, Scotland, UK. – In: Quaternary Intl., 2004, Band 133/134, S.107-119.

[18] YUAN, X., KIND, R. & PEDERSEN, H.A.: Seismic monitoring of the Indian Ocean tsunami. – In: Geophys. Res. Lett., Band 32, L15308, 4 S..

Weiterführende Internet-Links

[19] http://www.pmel.noaa.gov/

[20] http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml

[21] http://www.gitews.de/index.php?id=5&L=0

[22] http://library.lanl.gov/tsunami/