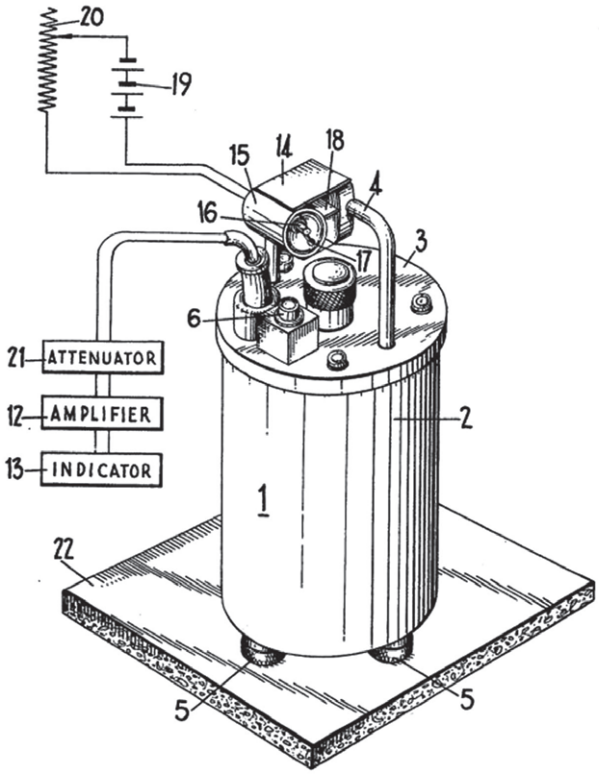
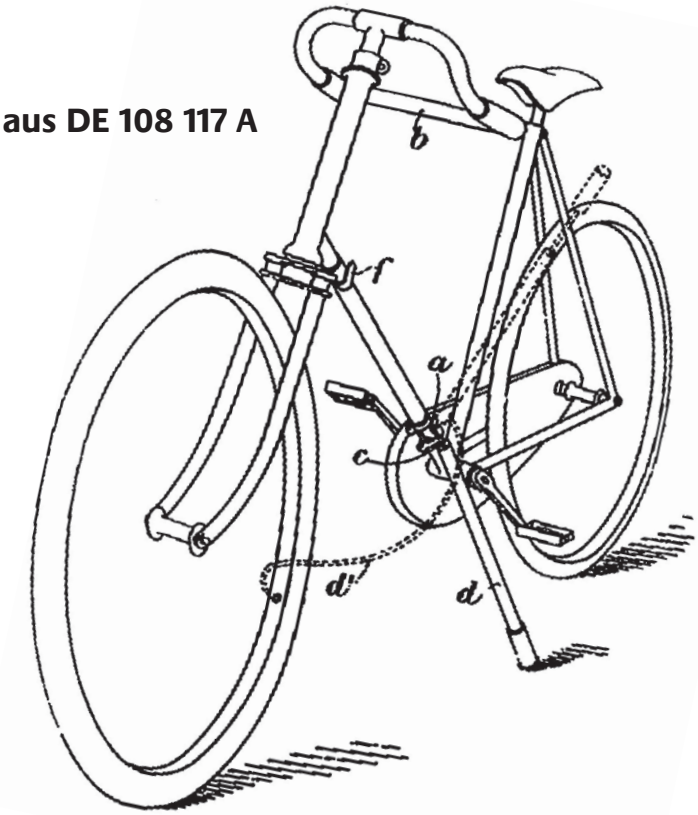
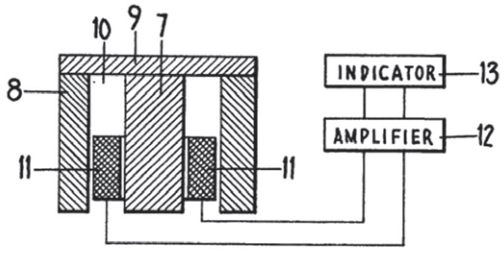
Deutsches
Patent- und Markenamt

Erfinderaktivitäten 2009





aus DE 108 117 A



aus GB 819 140 A

Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser der „Erfinderaktivitäten 2009“,

wissen Sie über die Erfindungsgeschichte von Radständern Bescheid? Wollen Sie mehr über Seismometer oder Biokraftstoffe erfahren? Haben Sie Lust, neue Metallwerkstoffe kennenzulernen oder auf eine Reise durch die mikroskopische Welt der Genetik zu gehen? Wie steht es mit einer optischen Tarnkappe oder warum staut sich‘s immer dann, wenn man selbst mit dem Auto unterwegs ist? Und vor allem: Was wird dagegen unternommen?

Wenn Sie das alles interessiert sind Sie hier genau richtig!

In dieser neuen Ausgabe der „Erfinderaktivitäten“ des Deutschen Patent- und Markenamtes gewähren Ihnen die Autorinnen und Autoren aus der Prüferschaft faszinierende Einblicke in all diese Arbeitsfelder. Grundlage für Ihre Artikel sind die jeweils maßgeblichen Patentdokumente sowie die zugängliche Fachliteratur, die gemeisam betrachtet und analysiert werden.

Die in den Artikeln genannten Schriften umfassen den bis zum Redaktionsschluss am 15. August 2009 der Öffentlichkeit bekannten Stand der Technik.

Viel Spaß beim Lesen wünscht Ihnen

Dr. Klaus Wollny
(Redaktion)

Inhalt Seite

Vorwort 1

Biomasse getankt?
Die Anpassung der Motorsteuerung an die momentan vorliegenden Kraftstoffeigenschaften
Dr. Thomas Flaschke 3

Wölbstrukturen nach Professor Mirtsch
Dr. Michael Hajduk 14

Leicht, extrem dehnbar und stabil – eine neue Stahlgeneration:
Hochfeste, supraduktile TRIP- und TWIP-Leichtbaustähle
Dr. Stefanie Radeck 20

Epigenetik
Dr. Leonhard Riedel 25

Metamaterialien in der Optik
Dr. Uwe Schwengelbeck & Dr. Erwin Wismeth 34

Die Der-Phasen-Theorie des Verkehrs und ihre Anwendungen
Dr. Florian Siebel 39

Patente gegen das Kippen: Ein Streifzug durch 120 Jahre Zweirad-Parkstützen
Dr. Jan-Friedrich Süßmuth 46

Seismometer – Erdbeben auf der Spur
Dr. Klaus Wollny 56

Biomasse getankt? Die Anpassung der Motorsteuerung an die momentan vorliegenden Kraftstoffeigenschaften

Dr. Thomas Flaschke, Patentabteilung 1.26

Abgasnormen, klimapolitische Ziele sowie die abnehmende Energiesicherheit verlangen effiziente und verbrauchsarme Verbrennungsmotoren. Insbesondere aufgrund der begrenzten Vorkommen an Mineralöl als Rohstoff wird der Einsatz regenerativer Kraftstoffe zunehmend interessant. Die Fortschritte bei der Motoren- und Kraftstoffentwicklung sind dabei untrennbar miteinander verbunden.

1. Aktuelle Situation und Aufgabenstellung

1.1 Trends bei der Motorenentwicklung

Die Anforderungen an moderne Verbrennungsmotoren, sowohl im Hinblick auf die CO_2-Emissionen als auch angesichts der Erwartungen der Endverbraucher an Leistung, Fahrkomfort und niedrigen Kraftstoffverbrauch, steigen kontinuierlich. In diesem Spannungsfeld zwischen Verbrauch und Fahrdynamik erweist sich das sogenannte Downsizing als ein wirkungsvolles Werkzeug. Der Begriff Downsizing steht für eine Reduzierung des Hubvolumens bei gleich bleibender Motorleistung [1], [2]. Welche Maßnahmen ein Verringern von Hubraum zulassen, ohne dass ein Leistungsdefizit entsteht, verdeutlicht die Gleichung 1. Demnach errechnet sich die Motorleistung P eines Verbrennungsmotors zu

$$P = V_H \cdot z^{-1} \cdot n \cdot p_{me} \qquad (1)$$

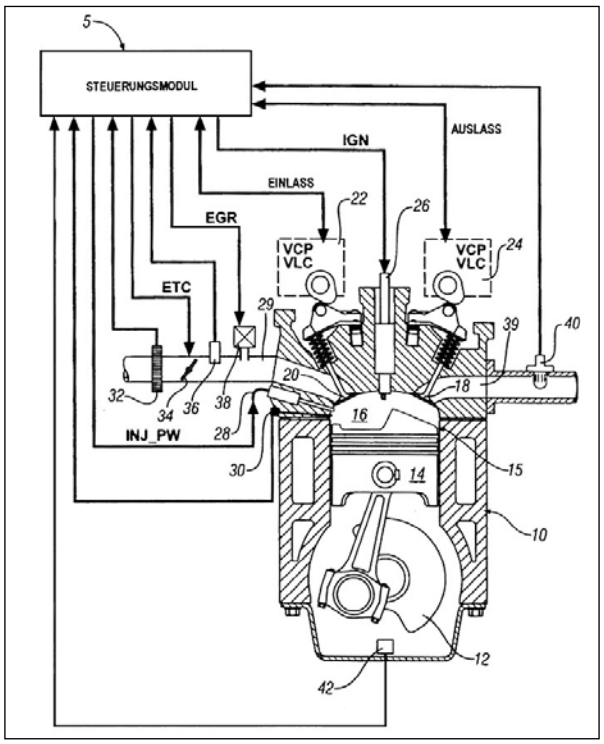
mit V_H als Motorhubvolumen, z^{-1} als Taktzahl, n als Motordrehzahl und p_{me} als maximaler effektiver Mitteldruck. Wird nun ein konventioneller Motor mit großem Hubvolumen V_H durch einen kleinvolumigen Motor ersetzt, muss entweder die Motordrehzahl n oder der effektive Mitteldrucks p_{me} erhöht werden, damit dies ohne Leistungsverzicht möglich ist. Der effektive Mitteldruck ist definiert als

$$p_{me} = \rho_0 \cdot \lambda_L \cdot \eta_e \cdot \lambda^{-1} \cdot P_{Kraftstoff} \qquad (2)$$

mit ρ_0 als Dichte der Luft vor dem Zylinder, λ_L als Liefergrad, η_e als effektiver Wirkungsgrad, λ als Luftverhältnis und PKraftstoff als Kraftstoffparameter (in Anlehnung an [3]).

Die Gleichung 2 zeigt, dass sich der effektive Mitteldruck p_{me} und damit die Leistung P des Verbrennungsmotors über die Luftdichte erhöhen lassen. Innermotorische Entwicklungstrends betreffen daher die Erhöhung der Leistungskonzentration durch Aufladung und Maßnahmen zur vollvariablen Ventilsteuerung.
Eine weitere Schlüsselfunktion bei der Optimierung des Verbrennungsmotors ist die Direkteinspritzung. Insbesondere die genaue und wiederholbare Zumessung kleinster Kraftstoffmengen in den Brennraum des Motors ist eine wichtige Voraussetzung, um niedrigste Abgasemissionen zu gewährleisten. Figur 1 zeigt in vereinfachter Form, welche Eingangs- und Ausgangsgrößen der Motorsteuerung für eine exakte Kraftstoffzumessung berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise ist das Steuergerät 5 mit dem Luftmassensensor 32, dem Ansaugdrucksensor 36, dem Zylinderdrucksensor 30, dem Lambdasensor 40 und dem Kurbelwellendrehzahlsensor 42 verbunden. Um das vom Fahrer angeforderte Moment bereitstellen zu können, erzeugt das Steuergerät

Stellsignale, mit denen das Verhalten der Brennkraftmaschine 10 entsprechend beeinflusst werden kann. Beispielsweise ist das Steuergerät 5 mit dem Einspritzventil 28, der Zündkerze 26, der Drosselklappe 34 und den variablen Gaswechselventilen 22 und 24 verbunden und erzeugt die zu deren Ansteuerung erforderlichen Stellsignale für die Direkteinspritzung INJ_PW, den Zündwinkel IGN, die Abgasrückführung EGR und Drosselklappenstellung ETC.



Figur 1: Schematische Darstellung der Eingangs- und Ausgangsgrößen einer Motorsteuerung (aus DE 10 2008 037 639 A1).

Durch den Einsatz von Piezo-Injektoren in den Hochdruckeinspritz-Systemen konnte die Präzision der Kraftstoffdosierung in den letzten Jahren noch weiter gesteigert werden (vergleiche DE 103 13 862 A1). So ist es bei einem Druck von bis zu 2000 bar möglich, innerhalb weniger zehntausendstel Sekunden einzelne Kraftstoffportionen mit einem Volumen von weniger als einem Kubikmillimeter in die Zylinder einzuspritzen. Aber nicht nur beim Dieselmotor, sondern auch beim Ottomotor ergeben sich mittels der Piezo-Direkteinspritzung erhebliche Verbrauchsvorteile. Gegenüber einem herkömmlichen Ottomotor mit Saugrohreinspritzung lässt sich durch eine strahlgeführte Benzindirekteinspritzung der Drehzahlbereich für den Magerbetrieb erweitern, so dass dadurch eine deutliche Kraftstoffersparnis erzielt wird [4], [5].

Aktuelle Entwicklungsarbeiten beschäftigen sich mit einem neuen Verbrennungsmotor-Konzept, bei dem die Vorteile aus der Diesel- und Ottomotortechnik kombiniert werden (vergleiche DE 199 27 479 C2). Bezeichnet wird dieses als CCS (Combined Combustion System), CAI (Controlled Auto Ignition), HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) oder auch als Diesotto. Ziel ist eine ideale Vermischung von Kraftstoff und Luft im Brennraum des Motors, um die NO_x- und Partikelemissionen weiter reduzieren zu können [6].

1.2 Trends bei der Kraftstoffentwicklung

Brennkraftmaschinen werden im Allgemeinen mit Kraftstoff aus Kohlenwasserstoffen aus fossilen Brennstoffen auf Basis von raffiniertem Erdöl betrieben. Alternativ stehen als fossile Kraftstoffe Flüssiggas (Autogas, Liquified Petroleum Gas: LPG), Erdgas (Compressed Natural Gas: CNG, Liquid Natural Gas: LNG), aus Erdgas erzeugte synthetische flüssige Kraftstoffe (Synfuels) sowie aus Erdgas hergestellter Wasserstoff zur Verfügung.

Steigende Rohstoffpreise sowie die Auflagen der Politik, die Abhängigkeit von Ölreserven zu verringern, verstärken die Tendenz zu einer zumindest teilweisen Substitution des auf fossilem Rohöl basierenden Kraftstoffs durch einen regenerativ hergestellten Anteil. Aus diesen Gründen stehen Kraftstoffe, die aus erneuerbaren Energieträgern wie Wasserkraft, Windkraft oder Solarstrom erzeugt werden, im Fokus.

Zu den regenerativen Kraftstoffen zählen auch aus Biomasse hergestellte Brennstoffe, die so genannten Biokraftstoffe. Auf Anordnung der Europäischen Union soll bis zum Jahr 2020 der Anteil von Biokraftstoffen am Benzin- und Dieselkraftstoff-

verbrauch mindestens 10 Prozent betragen [7]. Zur schrittweisen Umsetzung dieser Richtlinie müssen in Deutschland bereits seit dem Jahr 2009 insgesamt 5,25 Prozent Biokraftstoff zum Benzin- und Dieselkraftstoff zugemischt werden (nach Biokraftstoffquotengesetz [8] und Biokraftstoffänderungsgesetz [9]). Unter anderem werden folgende Arten von Biokraftstoffen unterschieden:

Pflanzenöl: Pflanzenöl-Kraftstoff besteht aus unbehandeltem oder raffiniertem Pflanzenöl in Reinform. In Deutschland kommt überwiegend Rapsöl zum Einsatz. Aufgrund der gegenüber Dieselkraftstoffen höheren Viskosität und der niedrigeren Cetanzahl kann Rapsölkraftstoff ausschließlich in pflanzenöltauglichen Dieselmotoren eingesetzt werden.

Biodiesel: Um aus Pflanzenöl Biodiesel herzustellen, ist eine chemische Behandlung unter Zuhilfenahme von Alkohol notwendig (vergleiche DE 10 2006 016 588 A1). Nachteilig bei der Gewinnung von Pflanzenöl beziehungsweise Biodiesel ist, dass von der geernteten Pflanze nur die ölhaltigen Samen verwertet werden können. Beispielsweise haben Rapssamen einen Ölgehalt von 40 Prozent. Aus einem durchschnittlichen Ertrag von drei Tonnen Rapssamen je Hektar Anbaufläche lassen sich bis zu 1 500 Liter Biodiesel gewinnen (vergleiche WO 2008/080495 A1 und DE 44 21 448 A1). Da Biodiesel sich chemisch anders zu Kunststoffen verhält als fossiler Dieselkraftstoff, müssen die im Kraftstoffsystem eingebauten Leitungen und Dichtungen aus biodieselresistenten Stoffen hergestellt werden [10].

Bioethanol: Ethanol (Ethylalkohol) entsteht durch die alkoholische Vergärung von zuckerhaltigen (Zuckerrübe, Zuckerrohr), stärkehaltigen (Getreide, Kartoffeln, Mais) oder aus zellulosehaltigen Pflanzen (Holz, Stroh); vergleiche hierzu DE 10 2007 058 394 A1. Aufgrund ihrer geringen Zündwilligkeit sind Alkohole wie Ethanol oder Methanol primär für den Einsatz in Ottomotoren prädestiniert. Dabei werden reines Ethanol (so genanntes E100) und Mischungen aus Ethanol mit Benzin (beispielsweise E5 mit 5 % Ethanol) verwendet [11]. E85-Kraftstoffmischungen weisen einen Bioethanol-Anteil von 85 Prozent auf und können nur in speziell dafür ausgestatteten Fahrzeugen, sogenannten Flexible Fuel Vehicles (FFVs) verwendet werden.

Biomethan: Biomethan, auch Bioerdgas genannt, entsteht durch anaeroben Abbau von organischen Stoffen durch Mikroorganismen. Als Rohstoffe für die Produktion kommen vergärbare, biomassehaltige Reststoffe wie Klärschlamm, Bioabfall oder nicht genutzte Pflanzen beziehungsweise Pflanzenteile in Frage. Methangas ist bereits als fossiler Kraftstoff bekannt und wird bei entsprechend ausgestatteten Kraftfahrzeugen eingesetzt.

Biomass-to-Liquid (BtL)-Kraftstoffe: Synthetische Kraftstoffe aus Biomasse werden auch häufig als Kraftstoffe der zweiten Generation bezeichnet [12]. Vorteil dieser Kraftstoffe ist, dass bei der Herstellung die ganze Pflanze verwendet werden kann und nicht nur wie für Biodiesel die ölhaltigen Samen. BtL-Kraftstoff wird allgemein aus fester Biomasse, wie beispielsweise Stroh, Brennholz, Bioabfall oder Schilf gewonnen, also aus Zellulose beziehungsweise Hemizellulose und nicht nur aus Pflanzenöl. Die großen Vorzüge dieses synthetischen Biokraftstoffes sind seine hohen Biomasse- und Flächenausbeuten, die bei bis zu 4 000 l pro Hektar liegen (vergleiche DE 10 2008 014 297 A1). Für die Produktion von BtL-Kraftstoffen wird in einem ersten Schritt die Biomasse in ein Synthesegas umgewandelt. Im zweiten Schritt wird aus dem Gas über eine Fischer-Tropsch-Synthese (vergleiche DE 484 337 A) flüssiger Kraftstoff gewonnen. BtL-Kraftstoffe werden auch „Designer-Kraftstoffe“ genannt, weil man ihre Zusammensetzung durch die Synthesebedingungen fast beliebig variieren kann. Herstellbar ist sowohl Otto-Kraftstoff (SunFuel®) als auch Diesel-Kraftstoff (Sun-Diesel®, Biotrol®) [13]. Im Jahr 2008 wurde in Freiberg (Sachsen) die weltweit erste kommerzielle Anlage zur Erzeugung synthetischen Kraftstoffs in Betrieb genommen [14].

1.3 Problemstellung

Die Fortschritte im Bereich der Motorenentwicklung zeigen, dass die Kraftstoffeinspritzsysteme in ein komplexes Motormanagementsystem eingebunden sind. Qualitativ hochwertiger Kraftstoff trägt dabei wesentlich zu einer hohen Motorleistung und zu niedrigen Abgasemissionen bei. Biokraftstoffe weisen jedoch andere Eigenschaften als herkömmliche Kraftstoffe auf. Zudem unterscheiden sie sich weltweit in ihrer Qualität [15] und damit in ihren Verbrennungseigenschaften (vergleiche DE 10 2007 050 122 A1). Eine Zumischung von biogenen Kraftstoffen zu Benzin oder Diesel beeinflusst daher die wichtigsten Kennwerte der resultierenden Kraftstoffzusammensetzung, wie Viskosität, Dichte, Heizwert, Sauerstoffgehalt, Luftbedarf, Dampfdruck, Klopffestigkeit oder Zündfähigkeit. Beispielsweise ist bei der Verwendung von Biokraftstoffen aufgrund von Unterschieden bei der Kraftstoffdichte eine Erhöhung der Einspritzmenge erforderlich. Diese Mehrmenge führt aber wiederum zu einer erhöhten Abgastemperatur und Verschlechterung der Abgaswerte (DE 10 2007 050 122 A1). Insbesondere bei modernen Verbrennungsmotoren, deren Motorelektronik für den Einsatz von fossilen Kraftstoffen optimiert ist, können daher Probleme hinsichtlich der Emissionen, des Verbrauchs, des Geräuschs sowie der Fahreigenschaften auftreten. Sind dann die Kraftstoffeigenschaften unbekannt, wird es für das Motorsteuergerät unmöglich, die einzuspritzende Kraftstoffmenge so zu regeln, dass eine optimale Verbrennung mit der vom Fahrer gewünschten Motorleistung und den geforderten minimalen Abgasemissionen entsteht. Es ist daher erforderlich, den momentan verwendeten Kraftstoff zu klassifizieren, um damit die Motorsteuerung optimal auf den verwendeten Kraftstoff einstellen zu können.

2. Erfinderaktivitäten

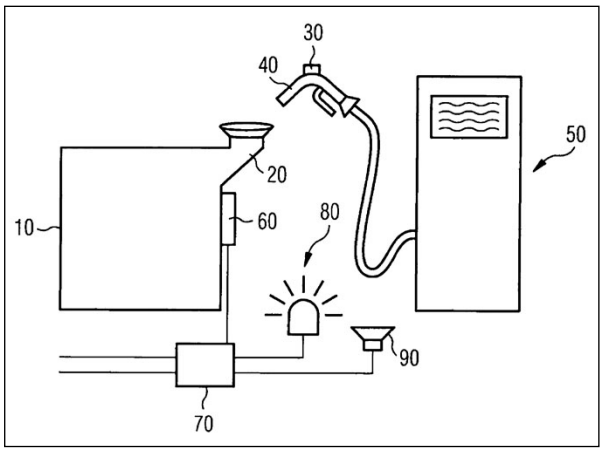
Die DEKLA-Gruppe F02D 41/00 C8 umfasst Patentschriften, die sich speziell mit der elektrischen Steuerung und Regelung von Brennkraftmaschinen in Abhängigkeit von den ermittelten Kraftstoffeigenschaften befassen. Auf diesem Gebiet ist eine besonders starke Zunahme der Anmeldetätigkeit zu beobachten. Im ersten Halbjahr 2009 und im Jahr 2008 wurden 64 Offenlegungs- und Patentschriften veröffentlicht, die speziell zu dieser Thematik beim Deutschen Patent- und Markenamt direkt eingereicht wurden (Quelle: Datenbank DOKIDX). Im Vergleichszeitraum fünf Jahre vorher waren es dagegen nur 11 Direktanmeldungen. Dieser deutliche Anstieg der Patentanmeldungen ist den Entwicklungstätigkeiten der zunehmenden Forschungs- und Entwicklungstätigkeit im Bereich der Biokraftstoffe zuzuschreiben. Die Brisanz der Thematik regenerativer Kraftstoffe lässt sich auch in der Klasse G01N 33/22 (Untersuchen oder Analysieren von Brennstoffen durch spezifische Methoden) aufgrund gestiegener Anmeldezahlen feststellen.

3. Erkennung der Kraftstoffzusammensetzung

3.1 Identifikation der Kraftstoffsorte

Eine direkte Identifikation des Kraftstoffs kann durch die in der DE 10 2006 044 780 A1 beschriebene Überwachungsvorrichtung erfolgen. Die Kraftstoffart wird dabei bereits während des Tankvorgangs über ein Transponder-System erkannt (Figur 2). Hierbei ist der Zapfhahn 40 einer Zapfsäule 50 mit einem Transponder 30 ausgestattet. Der Transponder beinhaltet die Informationen über den zur Verfügung gestellten Kraftstoff und überträgt diese drahtlos an den Empfänger 60. Der Empfänger ist am Tank 10 nahe dem Einfüllstutzen 20 angeordnet. Die aus dem Transponder ausgelesenen Daten werden an die im Fahrzeug integrierte Signalverarbeitungseinheit 70 weitergeleitet, welche mit Hilfe einer vor und nach dem Tanken durchgeführten Füllstandsmessung die momentan im Tank vorliegende Kraftstoffzusammensetzung berechnet. Diese Information wird wiederum an die Motorsteuerung übermittelt, so dass eine Anpassung der Einspritzsteuerung erfolgen kann. Das System verfügt zudem über eine Warneinrichtung: Im Fall einer bevorstehenden fal-

schen Betankung (zum Beispiel Benzin statt Diesel) erfolgt eine Warnung durch Ansteuerung der Fahrzeughupe 90 und der Blinker 80. Zudem wird die Pumpe an der Zapfsäule 50 deaktiviert.



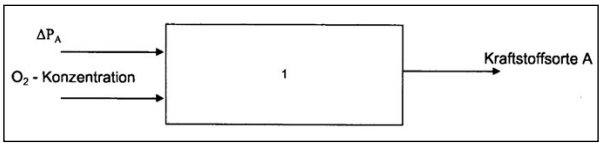
Figur 2: Drahtlose Signalübertragung mittels Transponder 30 und Empfänger 60 zur Identifikation der getankten Kraftstoffart und zur Berechnung des sich ergebenden Kraftstoffgemischs (aus DE 10 2006 044 780 A1)

Diese Methode zur direkten Erkennung des getankten Kraftstoffs wird durch die in der DE 10 2007 013 146 A1 beschriebene Kommunikationseinheit noch ergänzt. Informationen über die getankte Kraftstoffart und Kraftstoffmenge können mit diesem System von der Tankstelle an das Fahrzeug via W-LAN oder Bluetooth übertragen werden.

3.2 Physikalische Modelle

Die Zusammensetzung des Tankinhalts lässt sich auch indirekt durch Auswertung vorhandener Sensorsignale schätzen. Das Verfahren gemäß DE 10 2007 050 122 A1 nutzt hierzu die im Abgastrakt des Motors integrierte Lambdasonde. Über einen in der Motorsteuerung abgespeicherten funktionalen Zusammenhang zwischen der bei einem definierten Motorbetriebspunkt gemessenen Luftzahl und der Kraftstoffsorte lässt sich der Kraftstoff klassifizieren. Grundlage hierfür ist, dass das Sauerstoffsensorsignal in bestimmten Betriebspunkten charakteristisch für die verwendete Kraftstoffart ist.

Die DE 10 2007 053 248 B4 beschreibt die Erkennung der Kraftstoffart in Abhängigkeit von der ermittelten Größe der Schallausbreitungsgeschwindigkeit im Kraftstoff. Dabei werden die bei der Einspritzung erzeugten Druckschwingungen in der Kraftstoff-Sammelleitung (Common Rail) mit einem Drucksensor analysiert. Die Kraftstoffart wird anschließend durch einen Vergleich der Schwingungsspektren mit in der Motorsteuerung hinterlegten Daten von Referenzkraftstoffen ermittelt.



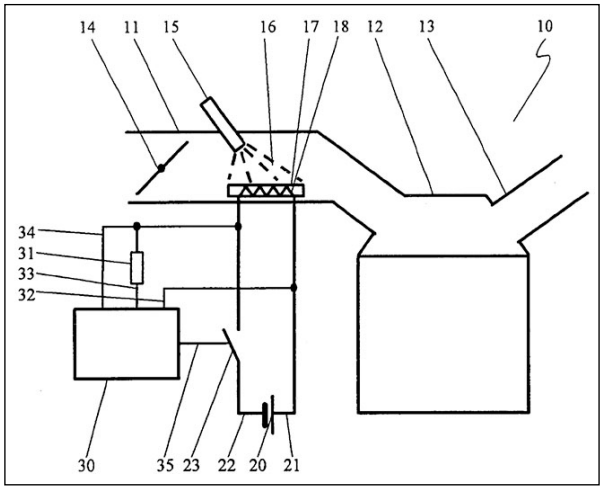
Figur 3: Modell zur Bestimmung der Kraftstoffsorte (aus EP 1 873 378 B1)

Die Bestimmung der Kraftstoffart in Abhängigkeit von der Druckänderung in einer Kraftstoffhochdruckleitung beschreibt auch die EP 1 873 378 B1. Hierbei wird das unterschiedliche, jeweils typische Leckageverhalten der unterschiedlichen Kraftstoffsorten ausgenutzt. In Abhängigkeit des Druckabfalls ΔP_A und der mittels Lambdasonde gemessenen Sauerstoffkonzentration (O_2) im Abgas schätzt die Motorsteuerung 1 die Kraftstoffsorte durch einen Vergleich mit abgespeicherten Referenzkurven (Figur 3).

3.3 Bestimmung des Ethanol-Anteils

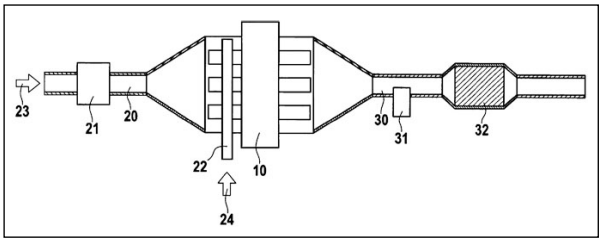
Die Erkennung des Ethanol-Mischungsverhältnisses kann entweder durch eine direkte messtechnische Erfassung mithilfe eines Kraftstoffsensors [16] oder modellbasiert erfolgen. Ein zur Bestimmung des Ethanolgehalts geeigneter kapazitiver Sensor wurde von Siemens in Zusammenarbeit mit Mercedes-Benz und Volkswagen entwickelt [17]. Dieser Sensor misst die komplexe Impedanz (Kapazität und Leitfähigkeit) sowie die Temperatur des Kraftstoffs und berechnet daraus den Alkoholgehalt, der an das Steuergerät weitergegeben wird, so dass die Einspritzmenge und der Zündzeitpunkt entsprechend der aktuellen

Kraftstoffzusammensetzung angepasst werden können. Ein weiteres Messsystem zur Bestimmung der Zusammensetzung eines Benzin-/Ethanolgemischs wird in der DE 10 2007 054 813 A1 vorgestellt. Figur 4 zeigt in einer schematischen Darstellung eine Brennkraftmaschine 10 mit einem Einspritzventil 15 und einem Heizelement 17. Das Einspritzventil und das Heizelement sind derart in einen Ansaugkanal 11 der Brennkraftmaschine eingebaut, dass das Kraftstoffgemisch 16 von dem Einspritzventil direkt auf das Heizelement gespritzt wird. Das Heizelement wird elektrisch mit Hilfe eines integrierten Heizleiters 18 beheizt. Dabei wird der auf das Heizelement aufgebrachte Kraftstoff verdampft. Die zum Aufheizen und Verdampfen des Kraftstoffgemischs benötige Energie wird dem Heizelement entzogen. Da sich Kraftstoffgemische unterschiedlicher Zusammensetzung in ihrer Wärmekapazität unterscheiden, kann aus der dem Heizelement entzogenen Wärmeenergie auf die Zusammensetzung des Kraftstoffgemischs geschlossen werden.



Figur 4: Bestimmung der Zusammensetzung eines Benzin-/Ethanolgemischs 16 in einer Brennkraftmaschine 10 mit einem Einspritzventil 15 und einem Heizelement 17 im Saugrohr 11 (aus DE 10 2007 054 813 A1)

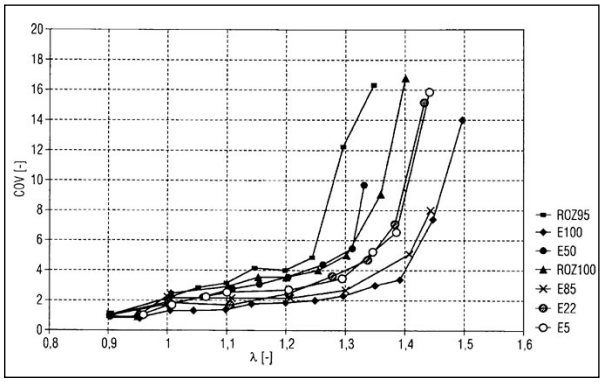
Ein Verfahren zur Bestimmung des Ethanol-Anteils, bei welchem keine zusätzlichen Sensoren benötigt werden, zeigt die DE 10 2008 043 697 A1. Ermittelt wird die Zusammensetzung des Kraftstoffs anhand des Ausgangssignals der im Abgastrakt vorhandenen Lambdasonde. Das Verfahren nutzt den eindeutigen Unterschied im Oxidationsverhalten von Benzin und Alkohol, was je nach Sauerstoffkonzentration im Abgas zu jeweils definierten Ausgangssignalen der Lambdasonde führt. Figur 5 zeigt einen Ottomotor 10 mit einem Ansaugkanal 20 und der im Abgaskanal 30 integrierten Lambdasonde 31. Zur Diagnose des Kraftstoffgemischs wird der Lambdasonde 31 unverbrannter Kraftstoff zugeführt. Dies erfolgt dadurch, dass die Kraftstoffeinspritzvorrichtung 22 eine definierte Menge Kraftstoff genau während einer Schubbetriebsphase einspritzt. Während des Schubbetriebs wird das Luft-Kraftstoff-Gemisch nicht gezündet und gelangt unverbrannt zur Abgassonde 31. Dadurch steigt die Ausgangsspannung der Abgassonde an, deren Änderung charakteristisch für den Ethanol-Anteil des Kraftstoffs ist.



Figur 5: Schematische Darstellung des Ottomotors (10) mit Ansaugkanal 20, Kraftstoffeinspritzvorrichtung (22) und Lambdasonde (31) im Abgaskanal (30) (aus DE 10 2008 043 697 A1).

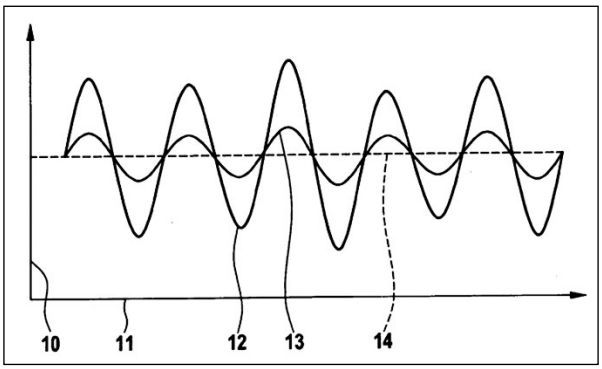
Mit einem Modell zur Bestimmung des Ethanol-Anteils im Kraftstoff beschäftigt sich auch die DE 10 2006 043 341 B4. Diese erklärt die Abhängigkeit der Magerlaufgrenze vom Ethanol-Anteil. Dieser Zusammenhang geht aus dem Diagramm der Figur 6 hervor, in dem der Laufruhewert COV (Coefficient Of Variance) über der Luftzahl λ für verschiedene Kraftstoffe aufgetragen ist. Die dargestellten Kurven ROZ95 und ROZ100 (Research-Oktanzahl) gelten für reines Benzin mit einer Oktanzahl von 95 und 100, während die Kurven E5, E 50, E85 und E100 für Kraftstoffe mit einem Ethanol-Anteil von 5 %, 50 %, 85 % beziehungsweise 100 % gelten. Der dimensionslose Laufruhewert COV charakterisiert die Laufunruhe einer Brennkraftmaschine; mit größer werdendem Laufruhewert COV steigt die Laufunruhe. Als Magerlaufgrenze wird üblicherweise ein vorgegebener

Schwellenwert (typisch COV = 5) definiert, oberhalb dessen keine akzeptable Laufruhe der Brennkraftmaschine mehr gegeben ist. Wie sich den Kurven entnehmen lässt, verschiebt sich die Magerlaufgrenze mit größer werdendem Ethanol-Anteil des Kraftstoffes in Richtung größerer Luftzahl λ, das heißt in Richtung mager. So liegt die Magerlaufgrenze für Benzin ROZ95 bei einem λ-Wert von 1,25 während die Magerlaufgrenze für reines Ethanol (E100) bei einem λ-Wert von 1,42 liegt. Um auf den Ethanol-Anteil des Kraftstoffes zu schließen, wird im Betriebsbereich des Leerlaufs die Kraftstoffmenge schrittweise verringert, bis die Laufruhe COV den vorgegebenen Schwellwert überschreitet und somit die Magerlaufgrenze erreicht ist.



Figur 6: Zusammenhang zwischen dem Laufruhewert COV und der Luftzahl λ bei Kraftstoffen mit unterschiedlichem Ethanolanteil (E100 = reines Ethanol; ROZ = reines Benzin mit einer Oktanzahl von 95).

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Zusammensetzung des Kraftstoffgemischs zeigt die DE 10 2007 060 224 A1. Dabei wird der Verlauf der Kurbelwellenwinkelgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Zündwinkeln beobachtet. Auf der Ordinate 10 des in der Figur 7 dargestellten Koordinatensystems ist die Winkelgeschwindigkeit der Brennkraftmaschine gegenüber einer Zeitachse 11 aufgetragen. Die beiden Kurven 12 und 13 schwingen mit unterschiedlicher Amplitude um eine mittlere Drehzahl 14. Aus der Höhe der Amplituden der dargestellten Drehungleichförmigkeit kann auf das abgegebene Drehmoment der Brennkraftmaschine geschlossen werden. Die Kurve 12 beschreibt den zeitlichen Verlauf einer Winkelgeschwindigkeit bei einem hohen Drehmoment, während die zweite Kurve 13 die Winkelgeschwindigkeit bei einem niedrigen Drehmoment angibt. Verläuft die Verbrennung eines unbekannten Kraftstoffgemischs aufgrund eines ungünstig gewählten Zündwinkels nicht optimal, wird ein kleines Drehmoment erzielt. Das Ergebnis ist eine Kurve mit kleinen Amplituden. Durch eine Variation des Zündwinkels lassen sich das resultierende Drehmoment und damit die Höhe der Amplituden beeinflussen. Sind die Amplituden der Winkelgeschwindigkeit maximal, ist der optimale Zündwinkel gefunden. Aus der Lage des optimalen Zündwinkels lässt sich auf die Kraftstoffzusammensetzung schließen.



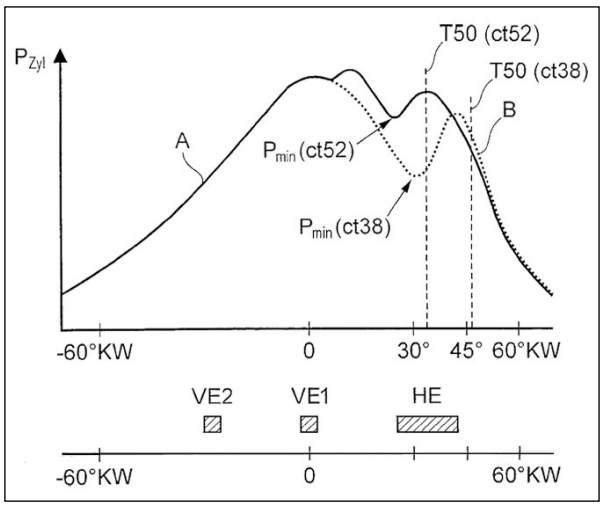
Figur 7: Darstellung der Drehungleichförmigkeit der Kurbelwellenwinkelgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Zündwinkeln (aus DE 10 2007 060 224 A1)

3.4 Bestimmung der Kraftstoffqualität

Im Allgemeinen wird die Kraftstoffqualität eines Kraftstoffs durch die Kennwerte Viskosität, Dichte und Heizwert beschrieben (DE 10 2008 010 107 A1). Darüber hinaus wird die Kraftstoffqualität von Diesel-, Biodiesel- oder BtL-Kraftstoff durch die **Cetanzahl** angegeben. Die Cetanzahl charakterisiert die Zündwilligkeit des Kraftstoffs. Ein Dieselkraftstoff mit niedriger Cetanzahl ist demnach relativ schwer entzündbar und zündet erst bei einem relativ hohen Druck. Dementsprechend weist ein Kraftstoff mit niedriger Cetanzahl einen großen Zündverzug auf, was sich bei einem Dieselmotor unmittelbar auf die Brennlage auswirkt (DE 10 2008 010 107 A1). Die Cetanzahl eines Dieselkraftstoffs kann weltweit variieren. So führen nicht nur Toleranzen bei der Herstellung zu Schwankungen der Cetanzahl, son-

dern auch die verschiedenen gesetzlichen Auflagen in den einzelnen Ländern führen dazu, dass dort Dieselkraftstoffe unterschiedliche Cetanzahlen aufweisen können [15].

Die Cetanzahl des verwendeten Kraftstoffs kann durch eine Auswertung des Zylinderdruckverlaufs bestimmt werden. Der Lehre der DE 10 2007 048 650 A1 liegt die Erkenntnis zugrunde, dass sich mit der Cetanzahl der Zylinderdruck verändert. Figur 8 zeigt den Verlauf des gemessenen Zylinderdrucks P_{Zyl} in Abhängigkeit des Kurbelwellenwinkels (KW) für zwei Voreinspritzungen VE2 und VE1 sowie einer Haupteinspritzung HE. Während sich der als durchgezogene Linie A dargestellte Druckverlauf einstellt, wenn ein Dieselkraftstoff mit einer Cetanzahl von 52 verbrannt wird, spiegelt die punktierte Linie B den Druckverlauf im Zylinder im Falle einer Verbrennung von Dieselkraftstoff mit einer Cetanzahl von 38 wider. Wie sich den Druckverläufen entnehmen lässt, weicht der Druckverlauf bei dem Kraftstoff mit der Cetanzahl von 38 bei Kurbelwellenwinkeln zwischen 0 Grad KW und etwa 45 Grad KW aufgrund des größeren Zündverzugs von demjenigen des Kraftstoffs mit der Cetanzahl von 52 ab. Um die Cetanzahl eines unbekannten Gemischs abschätzen zu können, werden insbesondere die Zylinderdruckwerte analysiert, welche nach der Verbrennung von etwa 50 Prozent des zugeführten Kraftstoffs gemessen werden (T50).



Figur 8: Zylinderdruckverlauf bei Verwendung von Dieselkraftstoffen mit einer Cetanzahl von 38 (Linie B) beziehungsweise 52 (Linie A) (aus DE 10 2007 048 650 A1)

In der DE 10 2007 049 705 A1 wird ein Verfahren zur Bestimmung der Zündwilligkeit von Biodiesel- oder BtL-Kraftstoff mit unbekannter Kraftstoffqualität beschrieben, bei dem in einem ersten Schritt zunächst die Dichte des Kraftstoffs ermittelt wird. Diese berechnet das Motorsteuergerät als Funktion der Masse und des Volumens des eingespritzten Kraftstoffs. Kraftstoffmasse und -volumen werden in Abhängigkeit von der Luftmasse, der Luftzahl, der Ansteuerdauer der Injektoren und in Abhängigkeit vom Raildruck geschätzt. In einem zweiten Schritt wird mittels einer empirischen Formel die Cetanzahl berechnet.

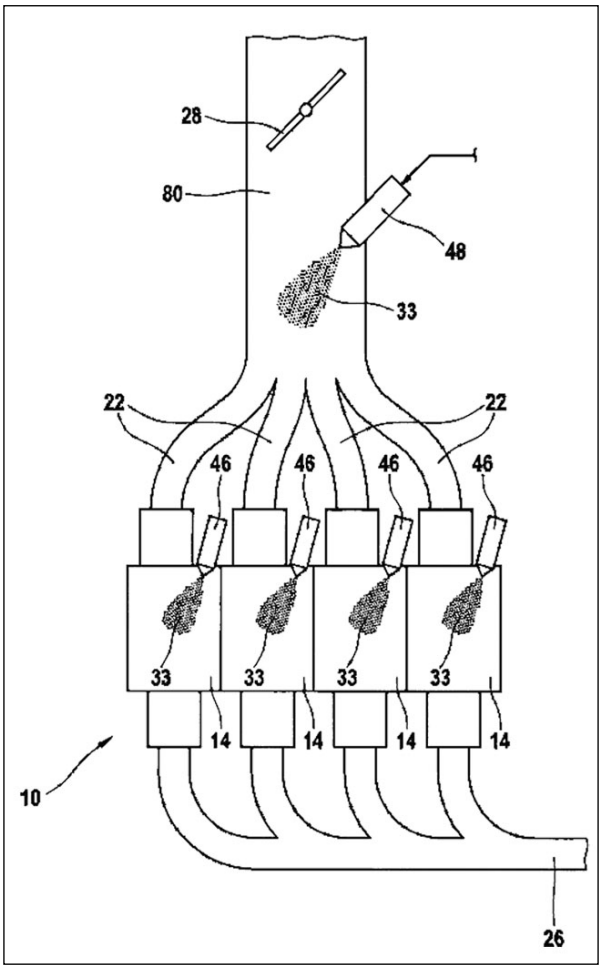
Für den Betrieb von Ottomotoren ist die Klopffestigkeit von Kraftstoffen ein wichtiges Qualitätskriterium. Als Maß für die Klopffestigkeit dient die **Oktanzahl**. Insbesondere die sehr hohen Oktanzahlen der Alkohol-Kraftstoffe sind für den ottomotorischen Verbrennungsprozess besonders wertvoll, da sie eine hohe Verdichtung des Motors zulassen. Kraftstoffgemische mit unterschiedlichen Anteilen von Ethanol zu Benzin weisen eine unterschiedliche Oktanzahl auf. Beispielhaft weist Superbenzin eine ROZ (Research-Oktanzahl) von mindestens 95 auf, während reines Ethanol eine ROZ von mindestens 108 aufweist. Dies bedeutet, dass die beiden Kraftstoffarten und die aus ihnen erzeugten Mischungen ein unterschiedliches Klopfverhalten aufweisen. Dies muss beim Betrieb der Brennkraftmaschine berücksichtigt werden, um einerseits einen guten Wirkungsgrad zu erzielen und andererseits Schäden an der Brennkraftmaschine zu vermeiden. Die DE 10 2007 034 189 A1 beschreibt ein Verfahren, mit dem in Abhängigkeit von den Messsignalen des Klopfsensors die Oktanzahl geschätzt werden kann.

4. Anpassung der Motorsteuerung

Ein Fahrzeug mit Ottomotor, das so ausgelegt ist, dass es sowohl mit reinem Benzin als auch mit Mischungen bis hin zu 85 % Ethanol (E85) betrieben werden kann, wird als ein an den Kraftstoff anpas-

sungsfähiges Fahrzeug **(Flex-Fuel-Vehicle FFV)** bezeichnet. Für einen sparsamen Betrieb mit einem geringen Schadstoffausstoß bei gleichzeitig hoher Motorleistung und gutem Startverhalten müssen die Betriebsparameter im Flex-Fuel-Betrieb an die jeweilig vorliegende Kraftstoff-Mischung angepasst werden. Beispielsweise muss die Einspritzzeit bei einem Wechsel von reinem Benzin auf ein Kraftstoffgemisch aus 85 % Ethanol und 15 % Benzin um mehr als 40 % verlängert werden, um die gleichen Lambdawerte im Abgas zu erhalten. Dies ist begründet in dem unterschiedlichen Luftbedarf für eine stöchiometrische Verbrennung. Des Weiteren ist für eine optimale Verbrennung der Zündwinkel der Brennkraftmaschine an das Mischungsverhältnis anzupassen (vergleiche DE 10 2007 060 224 A1). Der gemessene oder geschätzte Ethanolgehalt wird dem Motorsteuergerät zur Verfügung gestellt, welches die variablen Größen, wie die Einspritzdauer und den Zündzeitpunkt, entsprechend anpasst.

In der DE 10 2007 000878 A1 wird ein spezielles Einspritzsystem für ein Flex-Fuel-Vehicle vorgestellt. Der Verbrennungsmotor verfügt über unterschiedliche Wege, auf denen der Kraftstoff in den Brennraum gelangen kann. Bei der in der Figur 9 dargestellten Ausführungsform wird eine Direkteinspritzung 46 mit einer Saugrohreinspritzung 48 kombiniert. Die Motorsteuerung hat somit die Möglichkeit, den Einsatz der unterschiedlichen Wege (46, 48) in Abhängigkeit von dem ermittelten Typ des flüssigen Kraftstoffs (33) zu steuern. Insbesondere bei der Verwendung von Kraftstoffgemischen mit geringem Energiegehalt, kann die zusätzlich benötigte Kraftstoffmenge praktikabel zugeführt werden. Mit diesem Einspritzsystem sind sowohl die Vorteile der Direkteinspritzung als auch der Saugrohreinspritzung anwendbar. Beispielsweise besteht die Möglichkeit der Aufteilung der Einspritzung in verschiedene Teileinspritzungen (Vor-, Haupt- und Nacheinspritzung). Die Saugrohreinspritzung bietet Vorteile bei einem Teillastbetrieb der Brennkraftmaschine.



Figur 9: Flex-Fuel-Einspritzsystem mit Direkteinspritzung 46 und zusätzlicher Saugrohreinspritzung 48 (aus DE 10 2007 000 878 A1).

Bei Dieselmotoren orientiert sich die Anpassung der Motorparameter an der Cetanzahl des verwendeten Dieselkraftstoffs. Mit dem in DE 10 2007 022 850 A1 vorgestellten Verfahren können in Abhängigkeit von der ermittelten Cetanzahl die Parameter zur Steuerung und Regelung der Verbrennung in der Brennkraftmaschine verändert werden, damit bei einer entsprechenden Drehmomentanforderung eine optimale einzuspritzende Kraftstoffmenge berechnet werden kann.

Die EP 1 775 584 A2 beschreibt die Berechnung eines kraftstoffspezifischen Faktors k, mit dem die die Qualität des Kraftstoffs beeinflussenden Parameter Dichte und Heizwert des Kraftstoffs beurteilt werden können. In Abhängigkeit dieses Faktors k korri-

giert das Motorsteuergerät den Kraftstoffdruck, die Abgasrückführrate, das Einspritzmuster, die einzuspritzende Kraftstoffmenge, den Einspritzbeginn und das Einspritzende.

Da Dieselkraftstoff gegenüber biogenen Kraftstoffen einen höheren Heizwert aufweist, wird in der DE 10 2007 031 770 A1 ein Verfahren zur Optimierung der Einspritzung beschrieben, bei dem die maximale Kraftstoffeinspritzmenge vom gemessenen Heizwert abhängt. Wird nun ein Kraftstoffgemisch mit einem Biodiesel-Anteil verwendet, resultiert daraus eine Minderleistung. Diese Leistungsverringerung gleicht die Motorsteuerung durch eine Erhöhung der Einspritzmenge wieder aus.

Bleibt die Frage, wann und in welcher Häufigkeit die Motorparameter adaptiert werden müssen. Die DE 10 2007 049 705 A1 schlägt vor, dass die Ermittlung der Kraftstoffeigenschaften und die Anpassung des Motors nach jedem Tankvorgang erfolgen sollen. Dieser lässt sich aus einer Veränderung der Füllhöhe des Kraftstoffs im Tank oder dem Öffnen der Tankklappe ableiten.

5. Ausblick

Die Endlichkeit der fossilen Ressourcen und die globale Klimaveränderung führten in den letzten Jahren zu einem Umdenken im Umgang mit der Energie. Auch die Entwicklungen im Bereich der Motoren- und Kraftstofftechnik beschreiben einen Übergang in das post-fossile Zeitalter. Unbeantwortet ist aber noch die Frage, mit welchem Brennstoff der steigende Energiebedarf einer wachsenden Weltbevölkerung zukünftig gedeckt werden kann. Kraftstoffe wie Bioethanol oder Biodiesel stehen aufgrund der Konkurrenzsituation zur Nahrungsmittelerzeugung in der Kritik. Es ist daher davon auszugehen, dass synthetische BtL-Kraftstoffe zukünftig eine Schlüsselrolle innerhalb der Biokraftstoffe übernehmen werden; zum einen, weil für ihre Produktion auch Reststoffe geeignet sind (beispielsweise Stroh oder Restholz), zum anderen weil der Energieertrag pro Anbaufläche erheblich höher ist als bei Biokraftstoffen der ersten Generation.

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von regenerativen Kraftstoffen spielt ihre CO_2-Bilanz eine entscheidende Rolle. Mit Ausnahme von Wasserstoff sind alle regenerativen und fossilen Kraftstoffe kohlenstoffhaltig und setzen bei der Verbrennung CO_2 frei. Der umfassende Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Energieträger könnte somit deutlich zur Umweltentlastung beitragen. Wasserstoff reagiert in der Brennstoffzelle mit Sauerstoff zu chemisch reinem Wasser. Dabei wird elektrischer Strom freigesetzt, mit dem letztlich ein Elektromotor angetrieben werden kann (vergleiche DE 10 2007 007 934 A1). Ab dem Jahr 2010 will Daimler das erste Serienauto mit Brennstoffzellenantrieb produzieren. Geplant ist eine Kleinserienproduktion der B-Klasse mit dem Beinamen F-Cell. Der Elektromotor soll eine Spitzenleistung von 100 kW und ein maximales Drehmoment von 320 Newtonmeter entwickeln [19]. Aufgrund der aufwendigen Erzeugung von Wasserstoff und der noch fehlenden kostengünstigen alltagstauglichen Wasserstoffspeicher-Technologie ist jedoch nicht damit zu rechnen, dass die Brennstoffzellentechnologie innerhalb der nächsten Jahre die notwendige Marktreife und Wettbewerbsfähigkeit für eine Großserienproduktion erreichen wird [20]. Es bedarf daher neben dem Fernziel, ausreichend Wasserstoff zu produzieren, einer mittelfristigen Strategie, die in planvollen Schritten hin zu einer nachhaltigen Mobilität führt.

Nicht-Patent-Literatur:

[1] PISCHINGER, S.: Downsizing als Verbrauchskonzept für zukünftige Dieselmotoren. In: Tagungsband, 4. Dresdner Motorenkolloquium, 31.05.2001. – ISSN 1433-4135

[2] GOLLOCH, R.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren – Grundlagen, Stand der Technik und zukünftige Konzepte. In: MTZ, 2005, Ausgabe Nr. 2, Jahrgang 66. S. 126-131. – ISSN 0024-8525

[3] BASSHUYSEN, R. van: Handbuch Verbrennungsmotor. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2005. S. 447. – ISBN 978-3-528-23933-6

[4] FREUDENBERG, H.: PCR3, das Piezo Common Rail System der 3. Generation von Siemens VDO, die innovative Weiterentwicklung des seit 2000 in Serie produzierten PCR2-Systems. In: 24. Internationales Wiener Motorensymposium 15. bis 16. Mai 2003. Düsseldorf: VDI, 2003. – ISBN 3-18-353912-8

[5] ROBERT BOSCH GMBH: Piezo-Einspritztechnik ausgezeichnet, Deutscher Zukunftspreis 2005 für Bosch-Entwickler, Presseinformation, Stuttgart. 11. November 2005

[6] STEIGER, W.: Zukünftige Entwicklungen von Verbrennungsmotoren und Anforderungen an das Motormanagement – Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren, AUTOREG 2006, VDI-Berichte Nr. 1931, Wiesloch, 2006. S. 17-26. – ISSN 0083-5560

[7] Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG

[8] BioKraftQuG: Biokraftstoffquotengesetz. Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften, BGBl. I 2009, Nr. 44. ausgegeben am 24.07.2009. S. 2053-2132

[9] BioKraftFÄndG: Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen. BGBl. I 2009. Nr. 44, ausgegeben am 24.07.2009. S. 2053-2132

[10] LAMPING, M.: Erhöhter Biodieselanteil im Kraftstoff. In: MTZ. 2009, Ausgabe 1, Jahrgang 70. S.38-49. – ISSN 0024-8525

[11] MENRED, H.: Alkoholkraftstoffe. 1. Auflage. Wien: Springer, 1982. S. 33-54. – ISBN 3-211-81696-8

[12] ROBERT BOSCH GMBH (Hrsg.): Ottomotor-Management. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg, 2005. S. 32-39. – ISBN 3-8348-0037-6

[13] BARTSCH, C.: Sunfuel und Synfuel. In: ATZ, 2003, Ausgabe 1. Jahrgang 105. S. 42.45. – ISSN 0001-2785

[14] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: Biokraftstoffe. In: Auto Jahresbericht 2008. S. 175-184. – ISSN 0171-4317

[15] PISCHINGER, S.: Weltweit unterschiedliche Kraftstoffqualitäten, MTZ, 2008, Ausgabe 4, Jahrgang 69. S. 302-312. – ISSN 0024-8525

[16] FAHRENBRUCH, A.: Ethanolsensoren für den Flex-Fuel-Betrieb. In: MTZ, 2008, Ausgabe 9, Jahrgang 69. S. 732-735. – ISSN 0024-8525

[17] BRABETZ, L: The Siemens Alcohol Fuel Sensor – Concept and Results; In: Proceed-ings of the 9th International Symposyium on Alcohol Fuels: ISAF, Firenze, 1991. S. 552-559. – ISBN: 2710805170

[19] BARETT, S.: Mercedes B-Class F-Cell passes winter testing. In: Fuel Cells Bulletin. 2008, Oxford: Mayfield Press, S. 2-3. – ISSN 1464-2859

[20] MOLLENHAUER, K.: Handbuch Dieselmotoren. 3. Auflage, 2007, Berlin: Springer. S. 110. – ISBN 3-540-72164-9

Wölbstrukturen nach Professor Mirtsch

Dr. Michael Hajduk, Patentabteilung 1.24

Unter dem Stichwort „Wölbstruktur“ findet man die Definition, dass das Wölbstrukturieren ein Verfahren der Umformtechnik ist, mit dem vier- oder sechseckige Strukturen in Blech, Kunststofffolie, Pappe oder Papier eingebracht werden [1]. Weiter ist ausgeführt, dass dieses Verfahren sich von konventionellen Umformverfahren durch einen Energie minimierten Selbstorganisationsprozess unterscheidet. Ungewöhnlich ist dabei, dass ein Begriff wie „Selbstorganisation“ mit der Umformtechnik in Verbindung gebracht wird. Denn in der Umformtechnik sind die technisch angewandten Verfahren in der Regel technologisch ausgereift und sie werden steuerungsmäßig voll beherrscht. Die Selbstorganisation wird dagegen meist als höherer Prozess den Lebewesen zugeschrieben.

1. Ein Versuch mit überraschendem Ergebnis

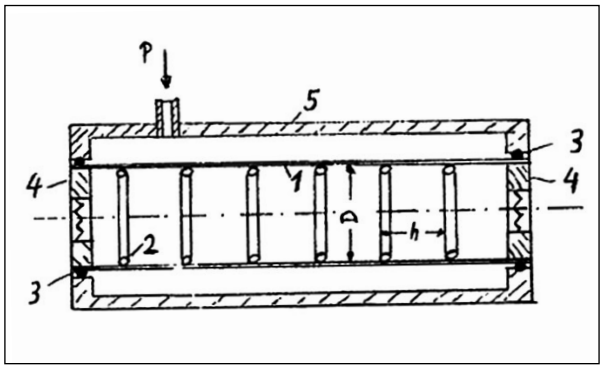
Die oben erwähnte Definition der Wölbstruktur kann durch eine kurze Filmsequenz verdeutlicht werden, die im Internet zu finden ist [2]. Ein zunächst glattes Rohr beult sich an einem Ende beginnend wie von alleine fortlaufend ein. Nach Ablauf des Prozesses liegt ein Rohr mit an der Oberfläche sehr gleichmäßig verteilten Dellen vor. Das dargestellte Experiment wurde auch in den großen Wissenschaftsshows des Deutschen Fernsehens (Know How Show, Einsteins Erben) von Professor Mirtsch vorgeführt, der an der BHT Berlin Thermische Verfahrenstechnik und Thermodynamik lehrt. In ein sehr dünnwandiges, instabiles Metallrohr wird eine Wendel als Stütze eingeführt. Das Metallrohr mit der Stützwendel wird in ein durchsichtiges Druckgefäß gegeben und an den Enden so abgedichtet, dass auf die Außenoberfläche des Metallrohrs Überdruck aufgegeben werden kann, im Rohrinneren aber der Normaldruck verbleibt. Zu erwarten ist, dass sich das Metallrohr bei ansteigendem Druck in den nicht abgestützten Bereichen zwischen den Wendelgängen einbeult und sich die Wendel an der Rohraußenoberfläche abzeichnet.

Aber etwas anderes geschieht, was auch in der genannten Filmsequenz im Internet zu sehen ist. In der Oberfläche des Metallrohrs bildet sich ein gleichmäßiges Muster aus viereckigen Eindrücken aus. Die innere Stützspirale lässt sich nur insoweit erahnen, als dass dieses Muster auch spiralförmig um das Rohr läuft. Woher aber kommen die sehr gleichmäßig verteilten Kanten der Eindrücke, die parallel zur Rohrachse verlaufen? Der Laie staunt und der Fachmann fragt sich, ob nicht doch das Ausgangsblech heimlich durch eine Materialtextur oder -verstärkung vorher vorbereitet war, damit dieser „Trick“ gelingen konnte.

Trotzdem geht alles mit rechten Dingen zu. Physikalische Modelle auf einer fundierten mathematischen Grundlage sind entwickelt worden, die erklären, warum sich das Rohr von alleine gerade so verformt, dass es dem höchsten Außendruck widerstehen kann. Der im Fernsehen gezeigte Versuch ist auch keine Spielerei oder Zaubertrick zur reinen Unterhaltung, sondern dieses Verformungsverfahren lässt sich technisch vorteilhaft anwenden. Das ursprünglich glatte Rohr hat nicht nur eine ansprechende Außenstruktur erhalten, sondern es weist auch andere Eigenschaften auf. Denn nachdem die Stützwendel aus dem Rohr vorsichtig wieder herausgedreht ist, ist das strukturierte Rohr nicht mehr instabil und leicht beweglich, sondern es lässt sich nicht mehr so leicht eindrücken und verformen wie das Ausgangsrohr.

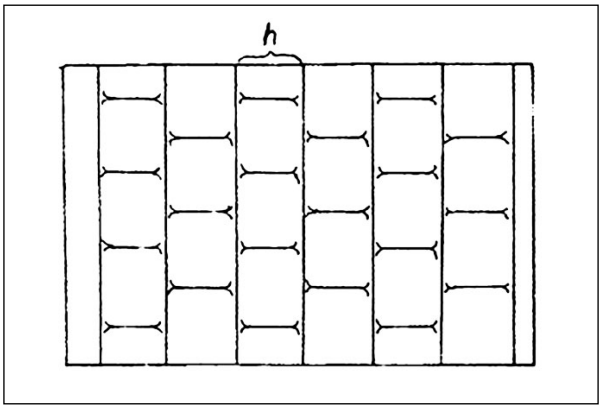
2. Der entwicklungstechnische Hintergrund

Die Ursprünge dieser Erfindung liegen einige Jahrzehnte zurück. Am 19. Dezember 1975 hat der Diplomingenieur und Diplomphysiker Frank Mirtsch ein „Verfahren zur Verformung dünnwandiger Rohr- und dünnwandiger Behälterwände und Verwendung derselben“ beim Deutschen Patentamt eingereicht (DE 25 57 215 A1). Die Anmeldung betraf dünnwandige Rohre und zylindrische Behälter aus Metall oder Kunststoff, deren Festigkeit im Verhältnis zu ihrem Gewicht groß ist und die günstige Strömungs- und Wärmeübergangseigenschaften besitzen. Die Anmeldung ging von der Erfahrung aus, dass bei dünnwandigen Rohren die Festigkeit gegenüber Scheitelkräften durch spiralförmig angebrachte Wendeln und die Festigkeit gegenüber Biegekräften durch längsförmig eingebrachte Sicken erhöht werden kann (DE 1 452 774 C und DE 2 027 583 A). Wenn nun bei einem dünnwandigen Rohr eine erhöhte Formstabilität sowohl gegenüber Scheitelkräften als auch gegenüber Biegekräften eingestellt werden soll, dann erscheint es rein logisch, dass in das Rohr eine Verformungsstruktur sowohl in Längsrichtung als auch in Umfangsrichtung eingebracht werden muss. Überraschend ist nun, auf welche einfache Art solche Strukturen in dem Rohr gebildet werden können (Figur 1):



Figur 1: Vorrichtung zum Beulstrukturieren (aus DE 25 57 215 A)

In ein dünnwandiges Rohrstück 1 werden an der Innenwand anliegende Stützringe 2 eingebracht, das Rohrstück 1 mit den Stützringen 2 wird in eine Druckkammer 5 gelegt und die Rohrenden gegenüber der Druckkammer mit Dichtungsringen 3 abgedichtet, so dass auf die Außenoberfläche des Rohrstücks Überdruck P aufgebracht werden kann, im Rohrinneren aber weiterhin Atmosphärendruck herrscht. Wird nun auf die Außenoberfläche des Rohrstücks ein Überdruck vom 1 bis 8 fachen (Metallrohre) bzw. 0,5 bis 6 fachen (Kunststoffrohre) des Normaldrucks aufgebracht, so wird die Rohrwand nicht – wie zunächst zu erwarten wäre – stetig zwischen die Stützringe Richtung Rohrachse gedrückt, sondern es bildet sich überraschenderweise eine Wabenstruktur aus, wobei die einzelnen wabenförmigen Einbuchtungen sich mit einem deutlich hörbaren Plopp-Geräusch nach innen einbeulen.

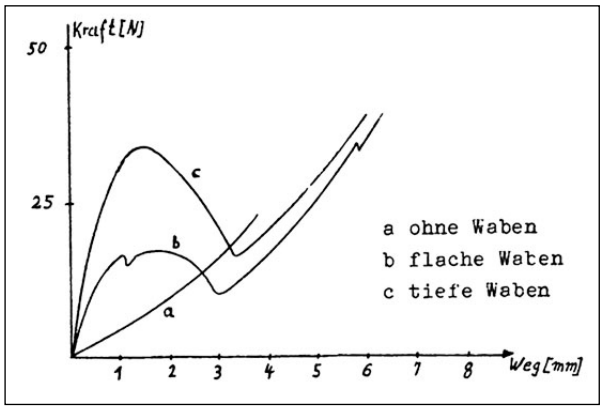


Figur 2: Beulstrukturiertes abgewickeltes Rohr (aus DE 25 57 215 A)

Die Wabenstruktur ist sehr regelmäßig und damit ästhetisch ansprechend (Figur 2). Die Anzahl der sich bildenden Waben auf dem Kreisumfang hängt hauptsächlich vom Rohrdurchmesser D und dem Abstand h der Stützringe und weniger von der Rohrwanddicke ab. Bei dem Einbeulvorgang handelt es sich um eine isometrische Verformung, bei der die konvexe Krümmung der Rohroberfläche in eine konkave springt. Es fließt hierbei kein Material und die Wanddicke bleibt überall erhalten.

Im Gegensatz hierzu wird bei den üblichen mechanischen Präge- und Profilierverfahren mit einer Matrize Material stark verformt und die Wanddicke wird in den Verformungsbereichen mit kleinem Krümmungsradius geschwächt. Es ist aber nicht nur die höhere Stabilität der beulstrukturierten Rohre gegenüber den zwangsverformten Strukturen,

sondern die Oberfläche des beulstrukturierten Rohres bleibt ohne Einbußen erhalten, weil kein Werkzeug an der Oberfläche angreift. Sogar eine nanostrukturierte Oberfläche des Ausgangsrohres bleibt nach dem Umformvorgang bestehen.



Figur 3: Weg-Kraft-Diagramm für beulstrukturiertes und nicht strukturiertes Material (aus DE 25 57 215 A)

Figur 3 zeigt den Vergleich der Biegekräfte, die ein dünnes glattwandiges Rohr zu einem Rohr mit flachen bzw. tiefen Waben aufnehmen kann. Dazu wurden Rohrstücke an den Enden fest eingespannt und in der Mitte punktförmig belastet. Die Figur 3 zeigt das Weg-Kraft-Diagramm für Rohre aus 0,1 mm Messing-Hart-Folie mit einem Durchmesser von 55 mm. Die beulstrukturierten Rohrstücke weisen je nach Wabentiefe zunächst die 3 bis 7 fache Biegefestigkeit auf, knicken allerdings bei größeren Verformungswegen an den Wabenkanten ein, was an dem Kräfteabfall der Kurven b und c zu sehen ist.

3. Prüfungsverfahren

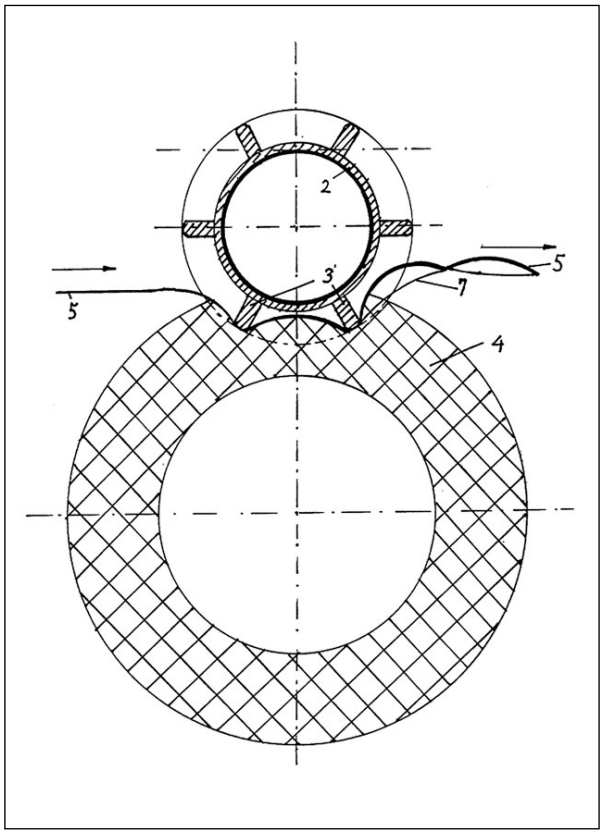
Im damaligen Prüfungsverfahren beim Deutschen Patentamt wurde neben dem einleitend genannten Stand der Technik folgende weitere Druckschriften berücksichtigt: Die Druckschrift DE 24 54 434 A (Verfahren zur Herstellung eines Behälters mit polygonalen Flächen mittels eines Innendorns), die DE 1 921 719 A (Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung quergewellter Rohre) und die GB 9 08 480 A (Herstellung eines dünnwandigen Rohres mit durch Walzen eingebrachte Vertiefungen). Keine dieser Druckschriften kann das anmeldungsgemäße Verfahren (aus heutiger Sicht) nahe legen, da es sich um zwangsgeführte Verformungen mittels Walzen oder Matrizen handelt. Trotzdem hat Herr Mirtsch seine Anmeldung zurückgezogen. Auf die heutige Frage, warum er eine so aussichtsreiche Erfindung nicht weiter verfolgt habe, antwortet Herr Professor Mirtsch, dass damals andere Dinge wie die Kohlevergasung wichtiger waren.

3.1 Neue Anläufe

Erst viele Jahre später (1993) meldet Herr Professor Mirtsch ein Verfahren zur Beulverformung dünner Materialbahnen und Folien an (DE 43 11 978 C1). Die Beulverformung wird nicht mehr nur auf zylindrische Körper, sondern auf das größere Einsatzgebiet dünner Materialbahnen beliebiger geometrischer Abmessungen angewendet. Dazu wird eine zu beulende Materialbahn mehrlagig auf beabstandete Stützelemente aufgewickelt und miteinander verbunden. Auf das so entstandene Rohr wird außen Überdruck und innen Unterdruck aufgegeben. Die Rohrwand beult ein, wobei die Größe der Beulen sich aus dem Durchmesser und dem Abstand der Stützelemente ergibt. Die Tiefe der Beulen wird über die Druckdifferenz und die Verformungstemperatur eingestellt. Da die profilierten Materialbahnen auch bei mehrfacher Biegung ihre Beulstruktur beibehalten, lassen sie sich unter anderem auf dem Gebiet der Verschalungen und Verpackungen einsetzen, ebenso wie zur diffusen Lichtstreuung oder als Schallreflektoren in Musiksälen. Durch Verwendung flexibler Stützstrukturen wird dieses Verfahren verbessert (DE 44 01 974 A1).

3.2 Verbessertes Herstellverfahren

Die Begriffe „Wölbstrukturierung“ und „Selbstorganisation“ tauchen in den Anmeldungen der Jahre 1994 und 1997 auf (DE 44 37 986 A1 und DE 197 50 576 A1).

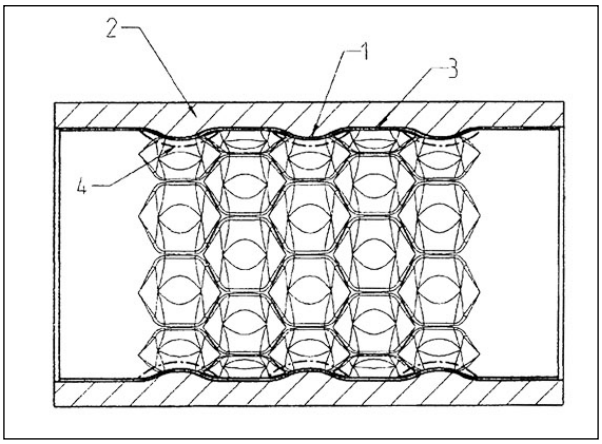


Figur 4: Vorrichtung zur Herstellung beulstrukturierter Materialbahnen (aus DE 197 50 576 A1)

Zur Erzeugung der Beulen wird eine Materialbahn 5 um die Stützkonturwalze 2 mit den Stützelementen 3 geführt und durch eine flexible Druckwalze 4 an die Stützkontur-Walze 2 gedrückt (Figur 4). Auf diese Weise lassen sich drei- bis sechseckige oder auch wappenförmige Wölbungen erzeugen. Die Materialbahn 5 wird nicht flächig an die Stützwalze 2 gedrückt, sondern durch die Elastizität der Druckwalze nur an den Stützelementen 3 eingedrückt. Zwischen den Stützelementen 3 wird die Materialbahn in Gegenrichtung verformt. Im Unterschied zu einem Konturwalzen mit starren Walzen werden durch die weichen Druck- und Stützwalzen nicht alle Beulfalten von vorneherein festgelegen, sondern nur ein oder zwei Beulfalten. Die nächsten Beulfalten bilden sich in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Materials selbst. Durch diesen „Selbstorganisationseffekt“ wird eine besonders schonende Verformung erreicht. Die ist besonders wichtig, da in Figur 3 gezeigt wurde, dass beulstrukturierte Teile gegen hohe Verformungswege anfällig sind, weil die Beulenränder einknicken können und das verformte Material seine Festigkeit verliert, vgl. auch den Abfall der Kurven b und c in Figur 3 bei größeren Verformungswegen. Beim Richten beulstrukturierter Materialbahnen müssen deshalb besondere Maßnahmen getroffen werden, die darin bestehen, dass die Materialbahnen schräg zur Bahnenlängsrichtung gebogen, gestreckt oder tordiert werden (DE 198 56 236 A1).

3.3 Weitere Anwendungen

Die Dr. Mirtsch GmbH meldet im Jahr 2000 ein Verfahren zur metallischen Verkleidung thermisch belasteter Flächen an (DE 100 59 055 A1). Der Hintergrund ist, dass Rohre zum Transport von speziellen



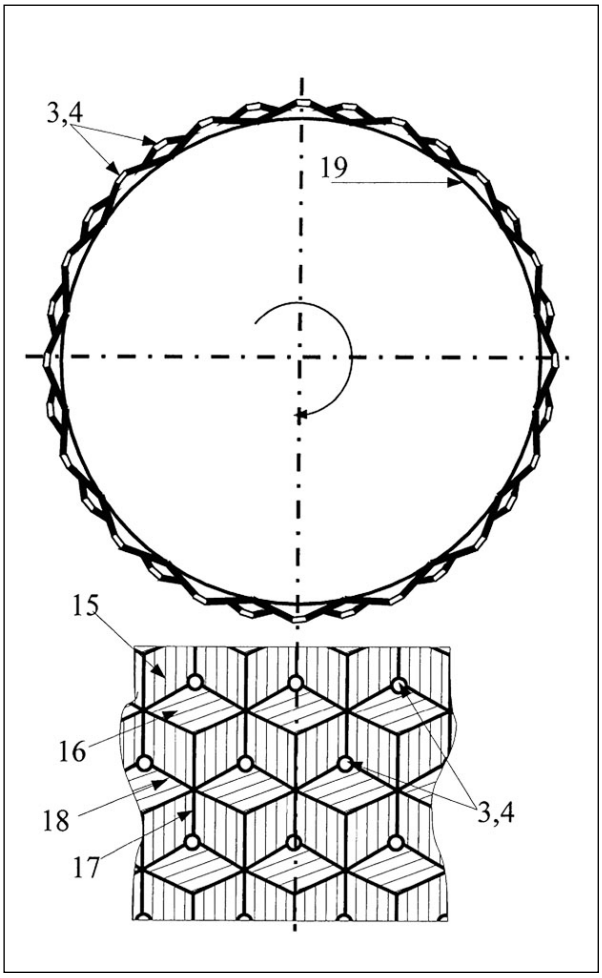
Figur 5: Keramikrohr für heiße Schmelzen mit einer Innenverkleidung aus einem beulstrukturierten Metallrohr (aus DE 100 59 055 B4)

Hochtemperaturschmelzen aus einem Metallinnenrohr bestehen, das zur Wärmedämmung außen mit Keramik ummantelt ist. Da sich beim Erwärmen ein glattes Metallinnenrohr stärker ausdehnt als die Keramikaußenisolierung, muss ein Ausgleich für den zwischen Metallrohr und Keramikisolierung entstehenden Druck geschaffen werden. Ein beulstrukturiertes Innenrohr kann die Materialausdehnung beim Erwärmen durch eine stärkere Einbeulung nach innen auffangen (Figur 5).

Da beulstrukturiertes Material bei der Verformung Energie absorbieren kann, eignet es sich für schalenförmige Karosserieteile von Kraftfahrzeugen.

Hinsichtlich eines Fußgängeraufprallschutzes kann ein Verstärkungsbauteil für eine Motorhaube aus beulstrukturiertem Material das Verletzungsrisiko bei einem Unfall verringern (DE 10 2004 044 550 A1).

Ein weiteres großes Anwendungsgebiet für beulstrukturiertes Material bietet sich an, wenn an der tiefsten Stelle jeder Wölbung ein Loch angebracht wird (DE 10 2006 062 189 A1). Solche Materialbahnen können von flüssigen Medien durchströmt werden und dienen dann zur Separation von Fluiden und Feststoffen. Eine solche Materialbahn ist die Grundlage zur Herstellung von Waschmaschinentrommeln, Filtermitteln und -stützen, Siebwänden sowie Verteilungs- und Dosiereinheiten. Figur 6 zeigt eine dreidimensional facettenförmig strukturierte Trommel 19 für eine Waschmaschine. Die Löcher 3 befinden sich in den Pyramidenspitzen 4, die sich auf dem äußeren Radius der Trommelwand angeordnet sind. Dadurch erhält das Wasser innerhalb der Trommel 19 am Ort der Löcher nicht nur die größte Zentrifugalbeschleunigung bei gegebener Trommeldrehzahl, sondern gleichzeitig an jedem Ort der Trommelinnenwand stets eine nach außen radial gerichtete Strömungskomponente. Dadurch wird der Abscheidegrad des Wassers von der Wäsche verbessert. Im unteren Teil der Figur wird die Draufsicht auf die dreidimensional facettenförmig strukturierte Trommelwand in einer abgewickelten Ansicht dargestellt.

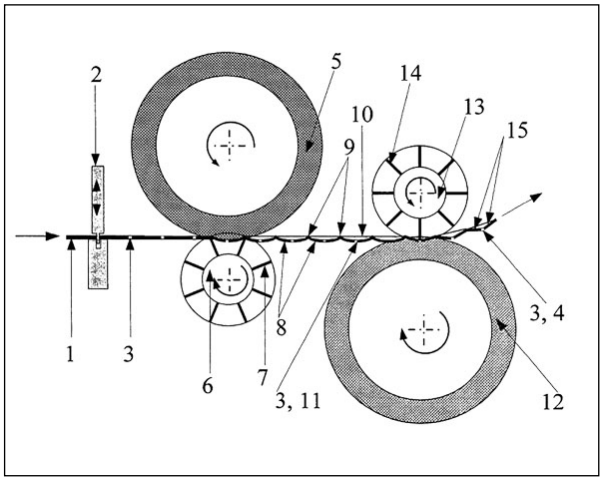


Figur 6: Waschmaschinentrommel mit nach außen weisenden Pyramidenspitzen (DE 10 2006 062 189 A1)

Wie vorher gezeigt, besteht die grundlegende Idee des Beulstrukturierens darin, die nach außen konvexe Fläche eines Rohres oder eines Behälters durch ein Umklappen des Materials konkav nach innen einzubeulen.

Bei einer Waschmaschinentrommel (Figur 6) müssen die pyramidenförmigen Vertiefungen aber nach außen zeigen, um einen guten Wasserablauf zu gewährleisten. Es ist somit ein Gegenbiegen erforderlich, ohne das Material an den Beulkanten zu schwächen.

Erreicht wird dies durch eine Anlage mit zwei um 180° gegeneinander verdrehten Walzenpaaren aus jeweils einer elastischen Druckwalze und einer Stützelementwalze (Figur 7).



Figur 7: Vorrichtung zum Herstellen einer dreidimensional facettenförmig strukturierten Materialbahn für Waschmaschinentrommeln (DE 10 2006 062 189 A1)

Eine ebene Blechbahn 1 wird zunächst mittels einer Lochvorrichtung 2 an Stellen mit einem Loch versehen, an denen beim Verformen die Pyramidenspitzen 4 gebildet werden. Mit Hilfe einer elastischen Druckwalze 5 wird dann die Metallbahn 1 gegen die Stützwalze 6, auf der hexagonale Stützelemente angeordnet sind, gedrückt, so dass hexagonale Wölbstrukturen, bestehend aus Mulden 8 und Falten 9 quer zur Laufrichtung der Materialbahn 1 sowie Falten 10 in Laufrichtung zur Materialbahn, entstehen. Anschließend wird die hexagonal strukturierte Materialbahn mit Hilfe der elastischen Druckwalze 12 gegen die Stützelementwalze 13, auf der jeweils drei Stützelemente 14 zu einem Sternpunkt zusammenlaufen, gedrückt.

4. Selbstorganisation

Die verschiedenen Erfindungen von Professor Mirtsch sind Beispiele, auf welche Weise Selbstorganisationseffekte für technische Prozesse angewandt werden können. Die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Thema Selbstorganisation sind in der im Juni 2009 erschienenen Abhandlung „Technology Guide von H. J. Bullinger [2] zu finden. Danach ist die Selbstorganisation eines der fundamentalen Prinzipien bei dem Strukturaufbau und Wachstum in der Natur. Es ermöglicht die Entwicklung komplexer Systeme, die Ansammlung galaktischer Cluster, kristalliner Strukturen und lebender Zellen. Technisch angewandt wird Selbstorganisation bisher bei der Laser- und Nanotechnologie sowie – wie gezeigt – bei der Wölbstrukturierung. In der Natur sind Selbstorganisationsprozesse so verbreitet, weil sie mit einem minimalen Energieverbrauch einhergehen. „Die technische Anwendung der Selbstorganisation steckt noch in den Kinderschuhen, aber sie ist keine Vision mehr. Der Einsatz von Selbstorganisations-Phenomenen für technische Anwendungen kann zu einer kostengünstigen und nachhaltigen Fertigung beitragen. Außerdem ermöglicht er die Herstellung von Strukturen, die auf andere Weise kaum erreichbar wären.“ [3], S. 63.

Literatur:

[1] URL: http://www.domaintools.com/de/W%C3%B6lbstruktur [recherchiert am 10.Juni 2009]

[2] URL:http://www.woelbstruktur.de/entdecken [recherchiert am 10.Juni 2009]

[3] EICKENBUSCH, H., HASSE, G Self-organisation. In: BULLINGER, H.J. (Hrsg.): Technology Guide: Principles, Applications, Trends. Berlin: Spinger Verlag, 2009, S. 60-63 – ISBN-13: 978-3-54088545-0

Leicht, extrem dehnbar und stabil – eine neue Stahlgeneration: Hochfeste, supraduktile TRIP- und TWIP-Leichtbaustähle

Dr. Stephanie Radeck, Patentabteilung 1.24

Seitdem vor 15 Jahren von Audi der A8 als erstes Serienfahrzeug mit Aluminiumkarosserie vorstellte wurde, wird dem seit 3 000 Jahren bekannten und als mehr oder minder ausgereizt geltenden Werkstoff Stahl wieder neues Leben eingehaucht: Als zukunftsträchtige Alternative zu Aluminium wurden und werden TRIP- und TWIP-Stähle entwickelt, die mit reduzierter Dichte und aufgrund außergewöhnlicher Eigenschaften speziell für den Karosseriebau die Möglichkeit bieten, Insassenschutz, reduzierten Kraftstoffverbrauch und kostengünstiger Serienfertigung zu verbinden.

1. (Guss-)Eisen ist nicht gleich Stahl ist nicht gleich Stahl

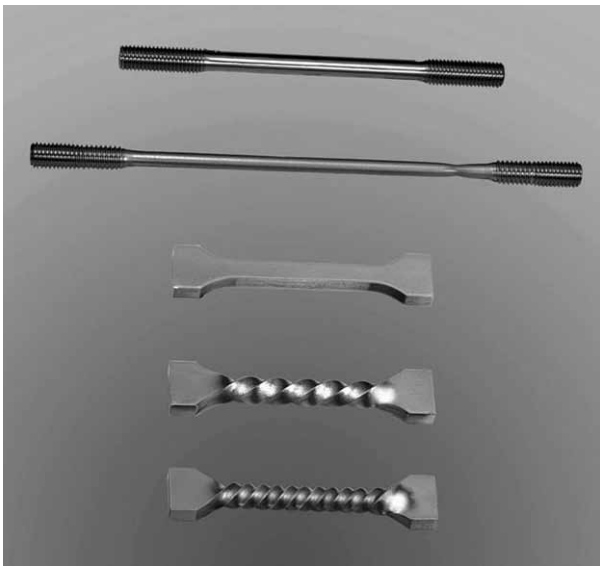
Wird umgangssprachlich von „Eisen“ gesprochen, ist meistens Gusseisen gemeint, also eine Legierung aus dem Element Eisen mit mehr als 2 % Kohlenstoff sowie mit Mangan und Silizium. Gusseisen ist im Alltag allgegenwärtig, beispielsweise als Werkstoff für Pfannen und Herdplatten, Kanaldeckel, Brücken und Balkone.

Stahl ist nach DIN EN 10020, „Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle“, ein „Werkstoff, dessen Massengehalt an Eisen größer ist als der jeden anderen Elements, dessen Kohlenstoffgehalt im Allgemeinen kleiner als 2 % ist und der andere Elemente enthält“. Stahl wird nach seiner chemischen Zusammensetzung in „unlegierte“, „nichtrostende“ und „andere legierte“ Stähle oder nach „Haupteigenschaften“ und „Anwendungsmerkmalen“ oder „Hauptgüteklassen“ in „Stahlsorten“ eingeteilt: Bekannte Stahlsorten sind hier beispielsweise Edelstahl, nichtrostende Stähle, Baustahl, Federstahl oder Werkzeugstahl. Die TRIP- und TWIP-Stähle gehören zu den „anderen legierten“ und als „höherfest“ oder auch „höchstfest“ bezeichneten Stählen. Aufgrund ihres hohen Anteils an Nichteisenelementen und des damit im Vergleich zum „reinen“ Stahl reduzierten Gewichts liest man regelmäßig auch den Begriff „Leichtbaustahl“.

2. Was sind TRIP- oder TWIP-Stähle?

Die TRIP- und TWIP-Stähle gehören zur gleichen Familie der hochmanganhaltigen Leichtbaustähle. Als Erfinder gilt Prof. Dr.-Ing. G. Frommeyer, der mit einem Mitarbeiter 1997 am Max-Planck-Institut für Eisenforschung die „Verwendung eines Leichtbaustahls“ beim Deutschen Patent- und Markenamt angemeldet hat. Das erteilte Patent wurde unter der Nummer DE 197 27 759 C2 am 18.05.2000 veröffentlicht.

In dieser Schrift sind erstmalig TRIP- und TWIP-Stähle mit ihren neuartigen Eigenschaften beschrieben: Die patentierten Stähle sind „gut kalt-umformbar, insbesondere gut tiefziehfähig, mit einer Zugfestigkeit bis 1100 MPa, mit TRIP- und TWIP-Eigenschaften“ und „kostengünstig herstellbar, weil mit preiswerten Elementen legiert“. Sie bestehen aus Eisen mit (jeweils bezogen auf die Masse) 1 bis 6 % Silizium, 1 bis 8 % Aluminium, wobei der Gesamtgehalt von Silizium und Aluminium kleiner oder gleich 12 % ist, aus 10 bis 30 % Mangan und den üblichen Stahlbegleitelementen in den bekannten Mengen. Aufgrund ihres Eigenschaftsspektrums ergeben sich damit auch mögliche und vorteilhafte Anwendungen: Als „warm- und kaltgewalzte Bleche für crashstabile Karosseriestrukturen von Kraftfahrzeugen, aber auch für die Cryogentechnik [Tiefsttemperaturtechnik] als Behälter und Rohrleitungswerkstoff“.



Figur 1: aus [1], Torsions- und Zugproben, (c) MPI für Eisenforschung.

Die TRIP- und TWIP-Stähle wurden basierend auf theoretischen Überlegungen und Berechnungen entwickelt: Generell gilt, dass die Eigenschaften der verschiedenen Stähle durch ihre Zusammensetzung und vor allem aber durch ihr Gefüge, also durch die räumliche Anordnung der Atome, bestimmt werden. Dieses wiederum lässt sich – und auch das ist bekannt – durch Zugabe verschiedener Legierungselemente steuern. Deswegen wird Stahl seit jeher mit unterschiedlichsten Gefügen, einschließlich diverser Mischgefüge, gezielt hergestellt. Aus thermodynamischen Berechnungen wurde nun gefolgert, dass sich für die neuen Leichtbaustähle vor allem eine Kombination aus Mangan, Silizium und Aluminium in relativ hohen und bis dato unüblichen Mengenanteilen eignen müsste [1].

2.1 TRIP-Stähle

Das Akronym TRIP steht für „TRansformation Induced Plasticity“, oder übersetzt „verformungsinduzierte Plastizität“ und deutet auf das Verhalten dieser Stähle beim Anliegen äußerer Kräfte hin: Sie verformen sich bei Dehnung und verfestigen sich dabei, ohne zu zerreißen und weisen damit eine sehr vorteilhafte Kombination von Festigkeit und Dehnfähigkeit auf.

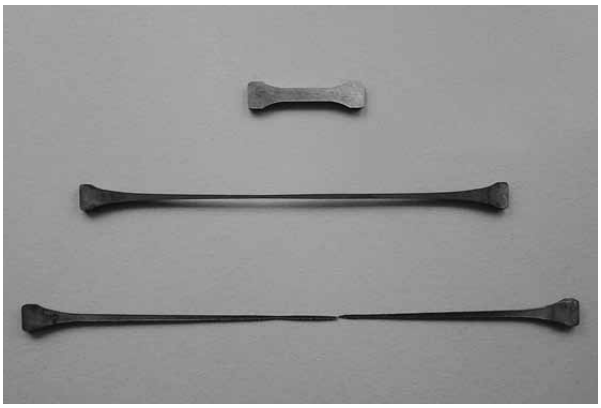
Makroskopisch betrachtet verformt sich beispielsweise im Falle eines Crashes ein TRIP-Bauteil über einen sehr großen Bereich hinweg plastisch und es kommt erst sehr spät – wenn überhaupt – zum Bruch, wodurch im Vergleich zu Bauteilen aus konventionellen Stählen deutlich mehr Crashenergie absorbiert werden kann. Außerdem verfestigt sich das Bauteil während der Verformung, was dann einer weiteren Verformung entgegensteht und damit zur Stabilität während des Crashes beiträgt. Deswegen eignen sich TRIP-Stähle idealerweise für den Einsatz überall dort, wo Stöße mit großer Energie abgefangen werden müssen und wegen des um bis zu etwa 20 bis 30 % reduzierten Gewichts im Vergleich zum herkömmlichen Stahl insbesondere für den Karosseriebau.

Mikroskopisch betrachtet ändert sich das Gefüge des zunächst dreiphasigen, also drei verschiedene Gefügebestandteile aufweisenden, TRIP-Stahls: In einer weichen Ferritmatrix liegt im unverformten Zustand neben Bainit zunächst dehnbarer Austenit vor. Der größte Teil des Austenits wandelt sich während der plastischen Verformung in zwei Stufen in festen Martensit um. Durch diesen Prozess wird Energie absorbiert und das Gefüge und damit das gesamte Bauteil werden verfestigt. Im verformten Zustand existieren dann vier Gefügebestandteile nebeneinander: Ferrit, Bainit, Martensit und ein deutlich reduzierter Anteil an Austenit.

Als einer der ersten wurde ein TRIP-Stahl mit einem Gehalt von 15 % Mangan und jeweils 3 % Aluminium und Silizium entwickelt. Dieser lässt sich um mehr als 50 % dehnen, gleichzeitig verfestigt er sich ohne zu reißen und widersteht dabei Spannungen von bis zu 1 100 Megapascal, was dem Druck entspricht, den das Gewicht von 10 Elefantenbullen auf einer Briefmarke erzeugen würde. Etwas konventioneller: Herkömmliche höherfeste Karosseriestähle reißen bereits bei 700 Megapascal [1], [2]. Dieser Stahl verfügt über einen doppelten TRIP-Effekt und damit über eine Art doppelter Dehnreserve, was darauf zurückzuführen ist, dass die Umwandlung von Austenit zum Martensit in zwei Stufen erfolgt. Das

ist nicht nur aus theoretischer Sicht interessant, sondern eigentlich unabdingbar, wenn der TRIP-Stahl als crashstabiles Karosserieteil verwendet werden soll: Bei der Herstellung werden die flachen Stahlbleche in sogenannten Tief- oder Streckziehformen in die gewünschte Form gepresst. Durch diesen Prozess, den man mit einem „langsamen" Crash vergleichen könnte, wird allerdings bereits eine bestimmte Menge des Austenits in Martensit umgewandelt – also verbraucht – und steht dann für den Fall eines „echten" Crashes nicht mehr zur zur Verfügung. Bei einem Stahl mit doppeltem TRIP-Effekt verbleibt nach dem Tief- oder Streckziehen hingegen noch ein Dehnungspotential von bis zu 35 % [1].

2.2 TWIP-Stähle



Figur 2: aus [1], Dehnprobe mit einer Bruchdehnung von 1025 %, (c) MPI für Eisenforschung.

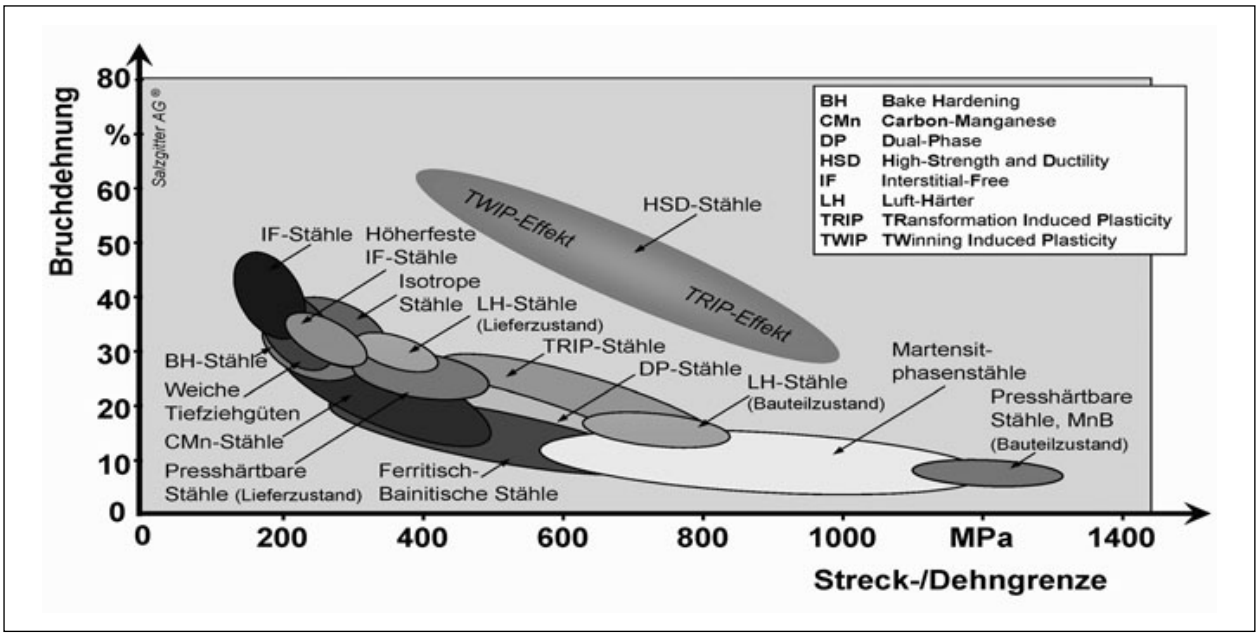
TWIP steht für „TWinning Induced Plasticity" (durch Zwillingsbildung induzierte Plastizität). Ein Weiterentwickelung der TRIP-Stähle führte zu einem Stahl mit etwa 25 % Mangan und jeweils 3 % Aluminium und Silizium. Dieser Stahl verfestigt sich nicht mehr so stark, lässt sich aber um bis zu 90 % in die Länge ziehen, ohne zu zerreißen. Zum Vergleich: Gold, das derartig dehnbar ist, dass man es als Blattgold bis auf eine Dicke von wenigen Atomlagen austreiben kann, lässt sich „nur" bis zu 60 % dehnen.

TWIP-Stähle besitzen ein einphasiges, nur aus Austenit bestehendes Gefüge mit bestimmten Baufehlern im Kristallgitter, die über die Zusammensetzung sehr genau gesteuert werden können. Im Crashfall führen die äußeren Kräfte zu einer plastischen Deformation durch Scherung, die von einer ausgeprägten, sogenannten „Zwillingsbildung" gekennzeichnet ist. Bereits geringe Kräfte verursachen eine neue räumliche Anordnung der Atome, die an den Baufehlern im Kristallgitter beginnt: An diesen Stellen klappen die Atomreihen rechts und links aus dem Kristallgitter heraus, es entstehen regelmäßig gespiegelte Kristallstrukturen, die besagten „Zwillinge". Die Bildung von Zwillingen bewirkt eine Verformung bei gleichzeitiger lokaler Verfestigung, welche lokale Einschnürungen unterdrückt und so Bruchdehnungen von mehr als 90 % ermöglicht.

Die Vorteile des TWIP-Stahls gegenüber dem TRIP-Stahl liegen aber nicht nur in seiner deutlich größeren Dehnungsreserve, sondern vor allem auch in seiner Fähigkeit, sich auch bei höheren Aufprallgeschwindigkeiten schnell genug dehnen, ohne zu reißen und damit die Aufprallenergie absorbieren zu können [2], [3], [4].

3. Korrosionsbeständige TRIP- und TWIP-Stähle

Im Jahr 2007 wurde unter der Nummer DE 10 2005 030 413 B3 ein Patent für einen korrosionsbeständigen „Hochfesten austenitisch-martensitischen Leichtbaustahl und seine Verwendung" erteilt. Die von der Arbeitsgruppe um Prof. Dr.-Ing. P. Scheller, TU Bergakademie Freiberg, entwickelten korrosionsbeständigen TRIP- und TWIP-Stähle sind immer mit Chrom legiert: Für nichtrostende Stähle werden 12 bis 18 % Chrom zugesetzt, für witterungsbeständige oder korrosionsträge Stähle 2 bis 12 %. Der Mangangehalt dieser Stähle liegt zwischen 2 und 20 %, die Gehalte von Aluminium und Silizium betragen jeweils 1 bis 4 %. Der Stickstoffgehalt wird auf bis zu 0.1 % eingestellt und als optionale Komponente können diese Stähle bis zu 10 % Nickel aufweisen. Mit dieser Stahlsorte wird der Aspekt der Korrosionsbeständigkeit abgedeckt, eine weitere Anforderung, der Stähle genügen müssen, um sinnvollerweise im Karosseriebau eingesetzt werden zu können [5].



Figur 3: Bananendiagramm zur Bruchdehnung und Zugfestigkeit verschiedener Stähle, (c) Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH

4. Herstellungsverfahren für TRIP- und TWIP-Stähle

Da jeder Verformungsschritt die Dehnungsreserven der TRIP- und TWIP-Stähle reduziert, muss das Herstellungsverfahren so angepasst werden, dass während der Herstellung möglichst wenig Dehnungsreserve verbraucht wird. Ein erster Schritt hierzu ist für die großtechnische Fertigung das sogenannte „endabmessungsnahe" Gießen von Stahlbändern oder Stahlblechen, bei dem nach dem Gießen nur noch eine minimale Dickenreduktion durch Warm- oder Kaltwalzen und damit eine minimale Verformung erfolgen muss.

Nach der beispielhaft herausgegriffenen DE 102 59 230 B4 der ThyssenKrupp Stahl AG soll nach dem Gießen ein Kaltwalzschritt mit einem Umformgrad von 2 bis 25 % und idealerweise höchstens 10 % sowie optional danach ein Glühschritt durchgeführt werden, um die für die TRIP- und TWIP-Stähle charakteristischen hohen Zugfestigkeits- und Dehngrenzen zu erhalten.

5. Ausblick: Ist das Ende der Fahnenstange damit erreicht?

Sicher nicht. Zum einen gibt es einen weiteren Verformungsmechanismus, der auf der sogenannten „Shear Band Induced Plasticity" (Scherband-induzierte Plastizität) beruht. Scherband-induzierte Plastizität ist eine Eigenschaft der ebenfalls neuen hochaluminium- und kohlenstoffhaltigen TRIPLEX-Stähle und führt zu ähnlich hohen Dehn- und Streckgrenzen wie bei den TRIP- und TWIP-Stählen [3].

Des Weiteren steht – analog zu den herkömmlichen Stählen – die Entwicklung neuer TRIP-, TWIP- und TRIPLEX-Stahlsorten für spezielle Anwendungen an: Außer der oben bereits angeführten Korrosionsbeständigkeit waren es beispielsweise Temperaturbeständigkeit, Verschleißfestigkeit, Schweißverhalten oder mechanische Bearbeitbarkeit, die optimiert wurden und so zu den verschiedenen herkömmlichen Stahlsorten geführt haben.

Abschließend müssen außerdem parallel dazu die zugehörige Prozesstechnik sowie die Verfahren zur Weiterverarbeitung entwickelt werden, damit die heute bereits in den Karosserien des VW Touareg und Porsche Cayenne eingesetzten Stähle breite Anwendung finden können.

Literatur:

[1] SCHRÖDER, TIM: Ausgekochter Stahl für das Auto von Morgen. In: MaxPlankForschung 3/2004, S. 36 – 41.

[2] JOPP, Klaus: Hart und trotzdem Weich – Wie moderner Stahl seine Eigenschaften ändert. In: Innovate! [online], 11.08.2009 [recherchiert am 11.08.2009].
Im Internet: <URL: http://www.innovate-magazin.de/ beitrag_2040242.html>

[3] FROMMEYER, G.; RADLBAUER, R.: Entwicklung hochfester und supraduktiler Leichbaustähle für die Verkehrstechnik. In: Jahrbuch 2008, Max-Planck-Gesellschaft [online], 11.08.2009 [recherchiert am 11.08.2009].
Im Internet: <URL: http://www.mpg.de/ bilderBerichteDokumente/ dokumentation/ jahrbuch/2008/eisenforschung/forschungs-Schwerpunkt1/index.html>

[4] KÄMPFER, Siegfried: Stahl zehrt sich für die Sicherheit auf. In: Industrieanzeiger 2008/7 [online], 11.08.2009 [recherchiert am 11.08.2009].
Im Internet: <URL: http://www.industrieanzeiger.de/themen/-/ article/12503/11824221/>

[5] WEISS, A.; GUTTE, H., SCHELLER, P.R.: Kostengünstige Leichtbaustähle [online], 11.08.2009 [recherchiert am 11.08.2009].
Im Internet: <URL: http://www.umformtechnik.net/content/BlechRohreProfile/110/ Reports/37/ 59015_BL-06-05_037xx0506bl.html>

Epigenetik

Dr. Leonhard Riedel, Patentabteilung 1.41

Zusammenfassung
Epigenetik umfasst die Vererbung von Eigenschaften, die nicht in Form von Gensequenzen kodiert vorliegen. Hierunter werden verschiedene Phänomene zusammengefasst, die sichtbare Veränderungen in der Ausprägung der genetischen Information (= Genexpression) zeigen und die eine wichtige Rolle bei der Differenzierung eines multizellulären Organismus spielen. Epigenetische Phänomene sind phylogenetisch konserviert, wobei drei Mechanismen unterschieden werden können, die mit epigenetischen Modifikationen einhergehen: (i) eine chemische Veränderung an den Trägern der Erbinformation (DNA), (ii) eine spezifische Modifikation an den Proteinen, die bei der Verpackung der DNA beteiligt sind (Histone) und (iii) eine gezielte Stilllegung von DNA-Abschnitten (Gene), die die Grundinformationen zur Herstellung einer biologisch aktiven RNA bzw. eines kodierten Proteins enthält. Obwohl die epigenetischen Modifizierungen biochemisch gesehen eher einfache Modifikationen darstellen, greifen sie auch regulativ in die Entwicklung einer Zelle ein. Epigenetische Modifikationen entsprechend dem Zeitpunkt und der Häufigkeit ihres Auftretens die Aktivierung und Inaktivierung (Expression) von Genen regeln können. Dabei kann eine epigenetische Fehlregulationen die Ursache für Krankheiten, einschließlich Krebs sein. Im Hinblick auf neueste Entwicklungen im Bereich der RNAi-Technologie wird deutlich, dass das Auftreten epigenetischer Modifikationen mit der Präsenz kurzer RNA-Moleküle (insbesondere siRNAs und miRNAs) einhergeht. Der Artikel behandelt daher schwerpunktmäßig die Rolle der aus dem RNAi-Mechanismus bereits bekannten RNA-Spezies bei der epigenetischen Genregulation. Gegenwärtige Erkenntnisse lassen vermuten, dass epigenetische Modifikationen durch die Aktivität kurzer RNA-Spezies ausgelöst werden und so regulativ in die für die Entwicklung einer Zelle notwendigen Änderungen im Expressionsmuster der Gene eingreifen.

1. Molekulare Mechanismen epigenetischer Phänomene

Zu den wichtigsten epigenetischen Modifikationen zählen die biochemischen Modifikationen an den Basen der DNA des Erbguts sowie an einigen Aminosäuren der die DNA umlagernden Proteine, den Histonen. Zusammen bilden sie das so genannte Chromatin, das in Form von Chromosomen in den Zellkernen der Zellen von Eukaryoten (Lebewesen mit Zellkern) vorkommen, zu denen alle Tiere, Pflanzen und Pilze gehören. Im Falle der epigenetischen Modifikationen der DNA werden Methylgruppen mittels DNA-Methyltransferasen gezielt an eine der die DNA bildenden vier Basentypen, dem Cytosin angehängt, wobei 5-Methylcytosin entsteht. Diese DNA-Methylierung betrifft nun insbesondere solche Cytosinbasen, die innerhalb von Cytosin-Guanin-Dinukleotiden (CpG) angetroffen werden. Dabei treten solche „CG"-Dinukleotide gehäuft vor allem in solchen Bereichen auf, die für die Steuerung der Gene, den Promotoren,zuständig sind. Hierbei wird beobachtet, dass der Methylierungsgrad in diesen so genannten „CpG-Inseln" häufig ein Maß für die Aktivität ist, mit der die dazugehörige kodierende Gensequenz abgelesen (transkribiert) wird. Eine Methylierung von Cytosinbasen in regulativen DNA-Abschnitten führt in der Regel dazu, dass die betroffenen Gene und manchmal sogar größere Chromosomenabschnitte eines Genoms stillgelegt werden [1]. Vermutlich kann die Transkriptionsmaschinerie, zu denen Ableseenzyme und andere Proteinfaktoren gehören, aufgrund der Basenmodifikationen nicht mehr richtig an die DNA binden, um diese abzulesen. Mit diesem Mechanismus, der

prinzipiell reversibel (umkehrbar) ist, wird quantitativ auf die von der DNA abgeschriebenen mRNA Einfluss genommen und damit auch auf die Menge eines herzustellenden Proteins.

Die andere mit epigenetischen Phänomenen einhergehende Modifikation, umfasst die biochemische Markierung von Aminosäuren, die sich am Ende der Proteinkette (N-Terminus) basischer Histone befinden. Histonproteine spielen bei der Verpackung der im Zellkern vorliegenden Erbsubstanz eine wichtige Rolle, denn die DNA liegt in eukaryotischen Zellen nicht „nackt" vor. Insgesamt verpacken acht verschiedene Histonproteine etwa 170 Basenpaare eines DNA-Stranges und bilden zusammen das Nukleosom. Die Enden der Histonproteinstränge ragen aus dem Nukleosom heraus, sodass dort die epigenetischen Modifikationen erfolgen, die hauptsächlich Anknüpfungen von Acetyl-, Methyl- und Phosphorylgruppen beinhalten und die zusammen ein bestimmtes Muster (den Histon-Code) bilden. Es wird vermutet, dass die Modifikationen an den Histonen einen Zustand im Chromatin hervorrufen, der den davon betroffenen DNA-Abschnitt (Genbereich) unzugänglich für die Transkriptionsmaschinerie macht.

Zu den epigenetischen Phänomenen zählen einige auffällige genetische Erscheinungen, unter anderem die „Genomische Prägung" („genomic imprinting", siehe Kapitel 3), die Inaktivierung eines X-Chromosoms in den weiblichen Zellen (wobei das Chromosom dann zum „Barr-Körperchen" wird), die „Paramutation" [2] sowie die – üblicherweise nur bei transgenen Organismen beobachtete – „Co-Suppression" [3]. Zwischen diesen unterschiedlich ausgeprägten Phänomenen kann eine interessante Übereinstimmung festgestellt werden, nämlich dass jeweils doppelte oder mehrere Kopien bzw. signifikant ähnliche Kopien von DNA-Sequenzen vorliegen. Diese befinden sich entweder bereits in einem methylierten Zustand oder werden durch neu eingeführte (de novo) Methylierung modifiziert und sind dadurch in der Regel inaktiv. Mit einem solchen Mechanismus kann die Zelle offenbar regulativ auf eine unnötige und/oder schädliche Expression eines Genprodukts Einfluss nehmen. Beispielsweise wird durch die Inaktivierung eines X-Chromosoms in weiblichen Zellen dafür gesorgt, dass nun beide Geschlechter vergleichbare Mengen an Genprodukten produzieren, die durch das X-Chromosom kodiert werden.

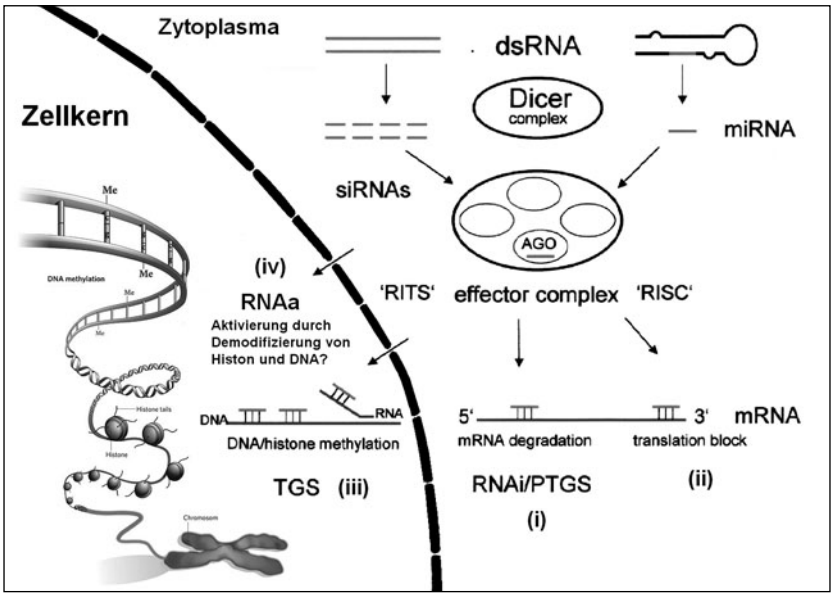
Im Laufe der Zeit hat die Fachwelt mehrere molekulare Modelle entwickelt, um die unterschiedlichen epigenetischen Phänomene, die mit spezifischen Methylierungen genomischer DNA einhergehen, zu erklären. Erste Hinweise, dass RNA in epigenetischen Phänomenen involviert sein könnte, lieferten Untersuchungen mit gentechnisch veränderten (transgenen) Tabakpflanzen, in deren Genom eine fremde DNA eingeschleust wurde [4]. Bei der in das Genom integrierten DNA handelte es sich um DNA-Kopien eines virusähnlichen Pflanzenpathogens, das üblicherweise nur aus weitgehend doppelsträngiger RNA besteht (Viroid). Die Infektion solcher transgener Pflanzen mittels Viroid-RNA-Molekülen führte zu einer spezifischen „de novo"-Methylierung der zuvor in das Genom integrierten DNA-Kopien. Dieser zur damaligen Zeit (1994) überraschende Befund gab erste Hinweise dafür, dass eine epigenetische DNA Methylierung durch RNA ausgelöst werden kann. Dies führte schließlich zum Modell eines auf RNA basierten Regulationsmechanismus der Genexpression, der RNA-dirigierten DNA-Methylierung (RdDM) [5].

Schon ein paar Jahre zuvor versuchte die Forschergruppe um Jorgensen und van der Krol, die Blütenfärbung von Petunien zu verstärken. Sie beabsichtigten, zusätzliche Kopien des Gens einer Chalcon-Synthase in die Pflanzen einzubringen und hofften dadurch, die Produktion der Blütenfarbstoffe anregen zu können. Beobachtet wurde allerdings das Gegenteil, denn zur Überraschung aller waren die meisten der gentechnisch veränderten Pflanzen weniger stark gefärbt als die unbehandelten Pflanzen, einige sogar schneeweiß. Für dieses Phänomen wurde der Begriff „Co-suppression" geprägt, da nicht nur die in die Pflanzen eingebrachten (transgenen) Fremdgene, sondern auch die natürlicher-

weise in den Pflanzen vorkommenden (endogenen) Gene kein oder ein nur wenig funktionelles Protein lieferten [6]. Zunächst wurde vermutet, dass der auf einer Sequenzidentität zwischen transgenen und endogenen Gensequenzen beruhende Effekt und die damit einhergehende DNA-Methylierung, allein durch die eingeschleuste transgene DNA hervorgerufen wird. Neben dem „Co-Suppressions"-Phänomen bei Pflanzen wurde beim Fadenwurm C. elegans die RNA-Interferenz (RNAi) entdeckt, die offenbar auf einem ähnlichen Mechanismus, dem RNA-vermittelten Abbau der Boten-RNA (mRNA) beruht [7]. Parallel hatten Forschergruppen im Zusammenhang mit der Abwehr von Viruserkrankungen in Pflanzen festgestellt, dass Gene nicht nur auf der Ebene der Transkription durch das so genannte „transkriptionelle gene silencing" (TGS) [8] abgeschaltet werden, sondern dass eine Geninaktivierung auch durch einen raschen Abbau der mRNA-Moleküle erfolgen kann – ein Vorgang, der als „post-transkriptionelles gene silencing" (PTGS) bekannt ist [9]. Etwa zur gleichen Zeit sind ähnliche Phänomene auch in Pilzen (Neurospora crassa) unter dem Namen „Quelling" [10] bekannt geworden.

Erste Hinweise dafür, dass es offenbar einen funktionellen Zusammenhang zwischen den Mechanismen des TGS, PTGS und RNAi gibt, konnten mit Hilfe transgener Pflanzen (2000) geliefert werden [11]. Demnach wurden sequenzspezifische DNA-Methylierungen in einer in das Genom eingeschleusten Promotorsequenz gefunden, nachdem ein weiteres DNA-Konstrukt in das Genom integrierte, welches zur Synthese promotorspezifischer, doppelsträngiger RNA im Zellkern führte. Die Erzeuger postulierten, dass die doppelsträngige RNA das sequenzspezifische Signal für eine DNA-Methylierung darstellt. Die damit einhergehende Stilllegung der Gene entspricht dabei funktionell dem zuvor bekannten „transkriptionellen gene silencing" (TGS). Beide Mechanismen, TGS und PTGS, wobei letzteres bei nicht-pflanzlichen Systemen dem RNAi entspricht, führen letztendlich zu ähnlichen Ergebnissen, einer spezifischen Verminderung oder Inhibierung der Genexpression und somit zur Hemmung der Bildung von Proteinen.

Im Gegensatz zum „DNA-fernen" posttranskriptionellen gene silencing (PTGS), das im Zytoplasma stattfindet, ist das „transkriptionelle gen silencing" (TGS) im Zellkern angesiedelt. Heute herrscht im Wesentlichen Einigkeit darüber, dass das TGS von epigenetischen Modifikationen, spezifischen Methylierungen in regulativen DNA-Bereichen (Promotoren) sowie Histonmodifikationen, begleitet wird. PTGS führt zu einem intensiven Abbau der mRNA, welches auf dem als RNAi bekannt gewordenen Mechanismus beruht. In diesem Prozess sind spezifische, kurze doppelsträngige RNAs, die sogenannten „small interfering RNAs" (siRNAs) oder „micro RNAs" (miRNAs), in einem Komplex aus Proteinen und Enzymen beteiligt. Dass siRNAs und miRNAs offenbar auch an epigenetischen Veränderungen im Zellkern beteiligt sind, soll in den nächsten Ausführungen verdeutlicht werden. Zur Illustration der unterschiedlichen Aktivitäten von siRNA und miRNA in einer Zelle zeigt Figur 1, dass die kurzen RNAs in Abhängigkeit einer geeigneten Sequenzspezifität an folgenden Prozessen beteiligt sind: (i) dem Abbau von mRNA (RNAi/PTGS) mittels dem RNA-induced silencing complex (RISC), (ii) der Blockierung der Proteinsynthese durch Hemmung des Translationsapparates, (iii) den epigenetischen Modifikationen von DNA und Histonen im Zellkern (TGS), die durch den „RNA-induced initiation of transcriptional silencing complex" (RITS) vermittelt werden, und (iv) der „small activating RNA"-vermittelten Genaktivierung, kurz RNAa genannt. Aber zunächst ein kurzer Rückblick auf die Historie des posttranskriptionellen Inhibierungsmechanismus, des RNAi.



Figur 1: Stark vereinfachte schematische Darstellung der Funktion und Zusammenhänge zwischen RNAi, siRNA, miRNA, PTGS, TGS und RNAa. Einzelheiten zu den Mechanismen sind der Beschreibung zu entnehmen.

2. Bedeutung kleiner RNA-Spezies für die Epigenetik

Mit der vollständigen Sequenzierung des Genoms von C. elegans veröffentlichten fast gleichzeitig Andrew Fire und Craig Mello 1998 die Technik der RNA-Interferenz (RNAi), bei der doppelsträngige RNA (dsRNA) zu einem effizienten und spezifischen „Gen-knockdown" führt, wofür ihnen der Nobelpreis für Medizin des Jahres 2006 zuerkannt wurde (siehe Übersichtsartikel [12], [13]). Wie die in den Organismus eingebrachte dsRNA zum Abbau der Ziel-RNA führt, wurde erst klar, als 1999 Hamilton und Baulcombe kurze RNAs mit einer Länge von zirka 25 Nukleotiden isolieren konnten, die in direktem Zusammenhang mit den regulierten RNAs stehen: siRNAs, die der RNAi ihre Spezifität verleihen, indem sie die Ziel-RNAs über eine spezifische Basenpaarung binden [14]. Im Wesentlichen wirkt der RNAi-Mechanismus dadurch, dass eine in die Zelle eindringende, längere, doppelsträngige, zellfremde RNA (die aus Viren stammen kann), enzymatisch in kleinere doppelsträngige RNA-Moleküle zerhackt wird (siehe Figur 1, (i)).
Das Prinzip der RNA-Interferenz beruht auf der spezifischen Sequenzerkennung und einem daran anschließenden enzymatischen Abbau des Zielmoleküls. Dies ist insbesondere deshalb so interessant, weil sich dieses System offenbar in allen Organismen anwenden lässt [15]. Die molekularbiologische Forschung setzt hierbei synthetisch hergestellte siRNAs ein, um durch RNA Interferenz die Expression spezifischer Zielgene zu verringern oder zu unterdrücken und kann so die Genfunktion und die Folge von Gendefekten untersuchen [16]. Seit der Entdeckung des RNAi-Mechanismus erfolgten zahlreiche Patentanmeldungen zu gentherapeutischen Anwendungen (siehe hierzu [13]). Es zeigt sich, dass mehr oder weniger alle im RNAi-Mechanismus involvierten Komponenten schutzwürdige Erzeugnisse zur Behandlung infektiöser und solcher Erkrankungen darstellen, die auf einer gestörten Genexpression beruhen (siehe hierzu beispielhaft WO 2007/048629 A2).

Neben den siRNAs, die durch Zerlegen zellfremder RNA generiert werden, sind noch weitere RNA-Spezies entdeckt worden, die im Gegensatz zur siRNA, zelleigenen Ursprungs (endogen) sind. Es wird angenommen, dass einige dieser sogenannten micro-RNAs (miRNAs) bei allen Pflanzen und Tieren vorkommen und eine ausschlaggebende Rolle bei der Steuerung einer Vielzahl von zellulären Prozessen spielen. Bei Pflanzen regulieren sie Wachstum und Blütenbildung, in Drosophila melanogaster (der Taufliege) den programmierten Zelltod, in menschlichen Zellen die Differenzierung von den potentiell unsterblichen Stammzellen zu spezialisierten Geweben und vieles mehr. Auch bei einigen Krebserkrankungen scheinen miRNAs involviert zu sein. Für Säuger wird inzwischen angenommen, dass miRNAs die Aktivierung von etwa 30% aller proteinkodierter Gene kontrollieren; beim Menschen sind bereits über 700 miRNAs identifiziert worden. Da jede miRNA sogar zahlreiche mRNAs reguliert und umgekehrt mRNAs von mehreren miRNAs be-

einflusst werden können, ergibt sich ein äußerst komplexes regulatorisches Netzwerk (vergleiche Übersichtsartikel [12]). Die wesentlichen Unterschiede zwischen siRNA und miRNA bestehen im Ursprung (miRNAs entstammen dem Zellkern) und der spezifischen Region der Zielsequenz. miRNAs erkennen bevorzugt die endständigen Bereiche auf dem mRNA-Molekül, die nicht die kodierenden Informationen, z.B. für die Amino-säurekette eines Proteins, enthalten. Hierbei bewirkt die miRNA entweder analog dem siRNA-Mechanismus eine endonukleolytische Spaltung (also ein Abbau) der Ziel-mRNA oder eine Blockierung des Ableseapparates der Translation (ohne Abbau). Letzteres geschieht offenbar dann, wenn nur eine unvollständige Basenpaarung mit der Zielsequenz möglich ist. miRNAs und siRNAs funktionieren also teilweise über ähnliche Mechanismen, weshalb sie oft zusammen beschrieben werden (siehe Figur 1; für weitere Details siehe auch [12]).

Erstaunlicherweise kodieren nur etwa zwei Prozent der menschlichen DNA für Proteine. Dabei machen nichtkodierende Sequenzanteile, wie die genregulierenden Promotorregionen, sowie die teilweise sehr umfangreichen Abschnitte innerhalb eines Gens (Introns), mehr als 90 Prozent des Genoms aus. Gerade in diesen nichtkodierenden DNA-Bereichen haben die miRNAs jedoch ihren Ursprung. Dass miRNAs komplementäre Teilsequenzen zu transkribierten mRNAs oder Promotorregionen darstellen, kennzeichnet ihre bedeutende Rolle bei der Genregulation. Dies wird gerade auch im Hinblick auf die Zielgene der miRNAs deutlich, da es sich dabei wohl überwiegend um entwicklungsspezifische Gene handelt [17] (siehe hierzu auch die verfügbaren Datenbanken für miRNAs [18]).

Parallel zu den siRNA- und miRNA-vermittelten RNAi-spezifischen posttranskriptionellen Geninhibierungen wurde also bekannt, dass doppelsträngige RNAs epigenetische Modifikationen in Pflanzen hervorrufen können, die mit einem transkriptionellen gene silencing, also dem TGS, einhergehen [11]. Das eine Inhibierung auf DNA Ebene durch siRNAs nachweislich möglich ist, bestätigt die zuvor beobachtete spezifische de novo DNA-Methylierung bzw. der RNA-dirigierten DNA-Methylierung (RdDM) (siehe oben). Inzwischen wurde die siRNA-induzierte transkriptionelle Geninhibierung auch in menschlichen Zellen beobachtet [19]. Weitere Untersuchungen mit humanen Zellen zeigen, dass Promotor-assoziierte RNAs (pRNAs), die komplementär zu kurzen Teilsequenzen einer Promotorregion sind, für einen RNA-dirigierten TGS-Mechanimus benötigt werden [20]. Ähnlich dem RNA-induzierten silencing complex (RISC) im siRNA-vermittelten PTGS-Mechanismus wirkt eine TGS-dirigierende RNA, die im Prinzip einer Promotor-spezifischen Antisense-RNA entspricht, in einem anderen Protein-Komplex, dem „transcriptional silencing complex“ (TSC), der auch unter dem Namen „RNA-induced initiation of transcriptional silencing complex“ (RITS) bekannt ist. Da im RNA-vermittelten TGS unter anderem auch die Proteine aus der Argonautfamilie involviert sind, deutet darauf hin, dass das Ziel in der Promotorregion tatsächlich eine RNA ist, denn Argonautproteine sind auch Vermittler für RNA-RNA Interaktionen.

Interessanterweise wird im RITS-Komplex eine Histon-spezifische Methyltransferase gefunden, was darauf hindeutet, dass RNA während der Epigenese auch in der zeitlich früher auftretenden Histonmodifikation involviert sein könnte. Dagegen treten DNA-Methylierungen signifikant erst zu einem späteren Zeitpunkt während einer TGS auf. Dies könnte einige Fälle erklären, in denen epigenetische DNA-Methylierungen während einer RNA-vermittelten TGS zunächst nicht beobachtet werden. Vermutlich treten diese erst einige Tage später zu einem Zeitpunkt auf, wenn die epigenetische Histonmethylierung schon längst statt gefunden hat [21].

Eine geeignete miRNA, ist offenbar in der Lage, die Expression eines Gens durch induzierte de novo DNA Methylierung einer Promotorsequenz sowie durch Histonmodifikationen zu beeinflussen. Diese Phänomene wurden kürzlich auch im Zusammenhang mit der Regulierung eines Brustkrebsgens

beobachtet, so dass miRNAs als Werkzeug für Tumortherapien geeignet erscheinen [22]. Trotz der noch relativ jungen Erkenntnisse über eine RNA-vermittelte Regulation der Gene, sind in diesem Bereich bereits zahlreiche Patentanmeldungen erfolgt. Beispielsweise wurden Verfahren für die gezielte Auslösung einer epigenetischen Modifikation von DNA und Protein (Epigenese) in einem bestimmten Gen als Patent angemeldet (US 2007/0104688 A1) sowie Verfahren und pharmazeutische Zusammensetzungen, um hypermethylierte Bereiche in Genen von Tumorsuppressoren wieder zu demethylieren (WO 2008/082646 A2) oder Verfahren um ein TGS in Tumorsuppressorgenen zu verhindern (WO 2009/045965 A2).

Darüber hinaus müssen die Vorstellungen über die phylogenetisch konservierten Mechanismen des RNA-vermittelten Abbaus einer RNA (PTGS) sowie der epigenetischen Stilllegung eines Gens (TGS) dahin gehend erweitert werden, dass kurze doppelsträngige RNAs offenbar auch in der Lage sind Gene zu aktivieren [23]. Zielmoleküle dieser „small activating RNA“ (saRNA)-vermittelten Genaktivierung (RNAa) sind offenbar Antisense-RNAs mit einer Spezifität für Promotorbereiche [24]. So konnte gezeigt werden, dass eine synthetische doppelsträngige Promotor-spezifische RNA in der Lage ist, ein durch Methylierung stillgelegtes humanes Gen wieder zu aktivieren [25]. Interessanterweise geht eine solche Genaktivierung durch eine promotorspezifische RNA auch mit einer Abnahme von Histonmodifikationen einher, wobei eine signifikante Änderung im Umfang der DNA Methylierung allerdings nicht beobachtet wurde [23], [24]. Dass die Genaktivierung nicht nur durch eine artifiziell hergestellte dsRNA ausgelöst werden kann, zeigt die Anwendung von zellulären Promotorspezifischen miRNA-Sequenzen natürlichen Ursprungs (wie miR-373), die eine dsRNA-induzierte transkriptionelle Genaktivierung (hier in einem Zelladhäsionsgen) hervorrufen [26] (siehe hierzu die korrespondierende Patentschrift WO 2006/113246 A2). Weitere Untersuchungen mit einer inaktivierten RNAi-Komponente, dem RNA-Zerhack-Enzym „Dicer“ (siehe Figur 1), deuten darauf hin, dass die RNAi-Maschinerie möglicherweise auch bei der miRNA-vermittelten Genaktivierung involviert ist [27].

3. Epigenetische Vererbung

In Ergänzung zu den kodierten Informationen der Gene, sind es vor allem die epigenetischen Modifikationsmuster im Chromatin, also Änderungen an der DNA und den Histonen, die die Informationen für einen räumlich und zeitlich korrekt gesteuerten Entwicklungsablauf speichern und so den funktionellen Zustand einer Zelle gewährleisten. Alle Zellen eines Organismus haben nahezu einen identischen DNA-Gehalt (Genom), wobei das Zusammenspiel räumlich und zeitlich unterschiedlich aktiver Gene zu den entwicklungs- und gewebespezifischen Zelldifferenzierungen führt. Die Steuerung dieses Zusammenspiels im Prozess der zellulären Differenzierung kann als das vielleicht beste Beispiel einer epigenetischen Aktivität angesehen werden. In der frühen Embryonalentwicklung eines Säugers (Fertilisierung bis zum Achtzellstadium) liegt das Genom zum größten Teil demethyliert vor. Danach finden vom Achtzellstadium bis zum 128-Zellstadium (Blastula) de novo-Methylierungen statt, die der DNA so wichtige Informationen für die weitere Differenzierung der Zellen und des Embryos hinzufügen. In diesem Zusammenhang werden bereits Versuche durchgeführt, um pluripotente Stammzellen durch Reprogrammierung des epigenetischen Status herzustellen. Hierzu werden dann geeignete Agenzien eingesetzt, um einzelne Komponenten des Epigenese-Apparates, wie die DNA-Methylase und die Histon- Deacetylase, zu inhibieren (WO 2008/038148 A2).

Ein besonderes Phänomen, das mit der epigenetischen Kodierung entwicklungsspezifischer Gene einhergeht, stellt die so genannte genomische Prägung („genomic imprinting“) dar. Durch die epigenetische Prägung werden bestimmte Gene in Abhängigkeit ihrer elterlichen Herkunft aktiv oder inaktiv weiter vererbt, unabhängig von den klassi-

schen Mendelschen Vererbungsregeln (paternale und maternale Genome sind nicht identisch). Die elterlichen Prägungen werden durch epigenetische Methylierungen der DNA [28] geschlechtsspezifisch in den Keimzellen etabliert und in den frühen Keimzellen jedes Menschen wieder gelöscht (epigenetische Reprogrammierung) [29]. Mittels der epigenetischen Prägung werden beim Menschen, der ja als diploider Organismus einen doppelten Chromosomensatz enthält, einige der doppelt vorhandenen elterlichen Gene (Allele) jeweils inaktiv geschaltet, so dass nur eines der Allele exprimiert wird [30]. Bis heute sind davon etwa 80 Gene aus Mensch und Maus bekannt, von denen die meisten in Entwicklungs- und Wachstumsprozessen involviert sind. So wurden tatsächlich auch epigenetischen DNA-Modifikationen gefunden, die eine Keimzell-spezifische Gen-Expression regulieren [31].

Das therapeutische Potential liegt dabei vor allem in der Erkennung von Geburtsdefekten, Diabetes oder erhöhtem Krebsrisiko, bzw. von Erkrankungen, die mit einer abnormalen epigenetischen Prägung assoziiert sind. Hierzu werden diagnostische Verfahren und Testverfahren zur Verfügung gestellt, beispielsweise um epigenetisch relevante Regionen im Genom zu identifizieren (z.B. die CpG-Inseln), die Zelltyp-spezifisch unterschiedlich methyliert vorliegen (siehe hierzu EP 1 290 139 B1).

In einigen Fällen wird ein Zusammenhang zwischen „erlerntem“ maternalen Verhalten und epigenetischen Modifikationen in bestimmten Genen in Nachkommen gefunden („maternale Programmierung“) [32]. Offenbar kann ein bestimmtes Verhaltensmuster durch starke Reize (Stress) und/oder Umwelteinflüsse in Form einer epigenetischen Prägung – trotz eines Reprogrammierungsmechanismus – an die Nachkommen weitervererbt werden. Ähnliches wird auch im Zusammenhang mit Suizid berichtet, wonach in bestimmten Hirnarealen von Selbstmördern ein Anstieg epigenetischer Veränderungen (DNA-Methylierungen) unter Abnahme der spezifischen Expression ribosomaler RNA-Gene beobachtet wurde. Die Autoren stellen hierzu fest, dass solche Ergebnisse die Hypothese stützen, dass schon früh während der Entwicklung auftretende Ereignisse einen Einfluss auf den epigenetischen Status neuronaler Gene haben können und somit möglicherweise auch auf das individuelle Selbstmordrisiko. Das ist insofern bemerkenswert, da suizidales Verhalten gehäuft in Familien auftritt [33].

4. Fazit

Den meisten der hier beschriebenen epigenetischen Phänomene ist gemeinsam, dass doppelt vorhandene und/oder überflüssige Erbinformationen, wie z.B. nicht benötigte Genkopien und Allele, bei Bedarf stillgelegt werden. Mit einem solchen Mechanismus kann die Zelle räumlich und zeitlich eine unerwünschte Produktion eines Genprodukts oder eine entwicklungsspezifische Genexpression regulieren. Mit den neuen Entdeckungen, die mit den omnipotenten kleinen RNAs einhergehen, resultieren auch neue hoffnungsvolle Anwendungsmöglichkeiten, insbesondere im medizinischen Bereich (siehe zitierte Patentliteratur). Es bleibt abzuwarten, welche überraschenden Erkenntnisse uns die kleinen RNA-Moleküle noch liefern werden. Offenbar entfalten sie ein regulatorisches Potential bei epigenetischen Phänomenen und der epigenetischen Prägung. Sollte sich die wahrnehmbar gewordene Vererbung „neu erworbener“ Eigenschaften durch Umwelt-induzierte epigenetische Modifikationen nachweislich bestätigen, darf an-genommen werden, dass diese Erkenntnisse, zumindest in einigen Fällen, signifikante Auswirkungen auf unser bisheriges Verhalten haben werden.

Referenzen

[1] NEWELL-PRICE, J.; CLARK, A.J.L.: KING, P.: DNA methylation and silencing of gene expression. In: TEM, Vol. 11, 2000, No. 4, S. 142–148.

[2] DELLA VEDOVA, C. B; CONE, K.C.: Paramutation: The Chromatin Connection. In: The Plant Cell, Vol. 16, 2004, S. 1358-1364.

[3] JONES, A L.; THOMAS C.L.; MAULE A.J.: De novo methylation and co-suppression induced by a cytoplasmically replicating plant RNA virus. In: EMBO J., Vol. 17, 1998, No. 21, S. 6385–6393.

[4] WASSENEGGER, M. [u.a.]: RNA-directed de novo methylation of genomic sequences in plants. In: Cell, Vol. 76, 1994, No. 3, S. 567-576.

[5] HAWKINS, P. G; MORRIS, K.V.: RNA and transcriptional modulation of gene expression. In: Cell Cycle, Vol. 7, 2008, No. 5, S. 602-607.

[6] 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: The Plant Cell, Vol. 2, 1990, No. 4, S. 279-289

[7] KETTING R. F.; PLASTERK R.A.H.: A genetic link between co-suppression and RNA interference in C. elegans. In: Nature, Vol. 404, 2000, S. 296-298

[8] MATZKE M. A. [u.a]. Reversible methylation and inactivation of marker genes in sequentially transformed tobacco plants. In: EMBO J., Vol. 8, 1989, No. 3, S. 643–649.

[9] VAUCHERET H.; BECLIN C.; FAGARD M.: Post-transcriptional gene silencing in plants. In: Journal of Cell Science, Vol. 114, 2001, S. 3083-3091.

[10] ROMANO, N.; MACINO G.: Quelling: transient inactivation of gene expression in Neurospora crassa by transformation with homologous sequences. In: Molecular Microbiology, Vol. 6, 1992, No. 22, S. 3257-3454.

[11] METTE M. F. [u.a.]: Transcriptional gene silencing and promoter methylation triggered by double stranded RNA. In: EMBO J., Vol. 19, 2000, N. 19, S. 5194-5201.

[12] KURRECK, Jens: RNA Interference: from basic research to therapeutic applications, 2009, In: Angewandte Chemie Int. Ed., Vol. 48, S. 1378-1398.

[13] REITINGER, T.: RNA-Interferenz – Stummschaltung von Genen. In: DPMA-Erfinderaktivitäten 2006/7, S. 43-51.

[14] HAMILTON A.J.; BAULCOMBE D.C.: A species of small antisense RNA in posttranscriptional gene silencing in plants. In: Science, Vol. 286, 1999, No. 5441, S. 950-952.

[15] ELBASHIR S. M. [u.a.]: Duplexes of 21-nucleotide RNAs mediate RNA interference in cultured mammalian cells. In: Nature Vol. 411, 2001, S. 494-498.

[16] TUSCHL T.: RNA interference and small interfering RNAs. In: CHEMBIOCHEM, Vol. 2, 2001, No. 2, S. 239-145.

[17] WILLIAMS A. E.: Functional aspects of animal microRNAs. In: Cell. Mol. Life Sci., Vol. 65, 2008, No. 4, S. 545–562.

[18] miRBase: the home of microRNA data. URL: http://microrna.sanger.ac.uk/sequences/index.shtml [abgerufen am 21.08.2009].

[19] MORRIS K. V. [u.a.]: Small interfering RNA-Induced transcriptional gene silencing in human cells. In: Science, Vol. 305, 2004, No. 5688, S.1289-1292.

[20] HAN J.; KIM D.; MORRIS K.V.: Promotor-associated RNA is required for RNA-directed transcriptional gene silencing in human cells. In: PNAS, Vol. 104, 2007, No. 30, S. 12422-12427.

[21] HAWKINS P. G. [u.a.]: Promoter targeted small RNAs induce long-term transcriptional gene silencing in human cells. In: Nucleic Acids Research, Vol. 37, 2009, No. 9, S. 2984-2995.

[22] TAN Y. [u.a.]: Transcriptional inhibition of Hoxd4 expression by noncoding RNAs in human breast cancer cells. In: BMC Molecular Biology, Vol. 10, 2009, No. 12, S. 1-9.

[23] LI L. C. [u.a.]: Small dsRNAs induce transcriptional activation in human cells. In: PNAS, Vol. 103, 2006, No. 46, S. 17337-17342.

[24] SCHWARTZ J. C. [u.a.]: Antisense transcripts are targets for activating small RNAs, Nat Struct Mol Biol, Vol. 15, 2008, No. 8, S. 842-848.

[25] JANOWSKI B. A. [u.a.]: Activating gene expression in mammalian cells with promoter-targeted duplex RNAs. In: Nat Chem Biol., Vol. 3, 2007, S. 166-173.

[26] PLACE R.F. [u.a.]: MicroRNA-373 induces expression of genes with complementary promoter sequences. In: PNAS, Vol. 105, 2008, No. 5, S. 1608–1613.

[27] CHECK E.: RNA interference: hitting the on switch. In: Nature, Vol. 448, 2007, S. 855–858.

[28] LI E.; BEARD C.; JAENISCH R.: Role for DNA methylation in genomic impinting. In: Nature, Vol. 366, 1993, S. 362-365.

[29] MANN M.R.W.; BARTOLOMEI M.S.: Epigenetic reprogramming in the mammalian embryo: struggle of the clones. In: Genome Biology, Vol 3, 2002, No. 2, S. 1003.1-1003.4.

[30] ONYANGO P. [u.a.]: Monoallelic expression and methylation of imprinted genes in human and mouse embryonic germ cell lineages. In: PNAS, Vol. 99, 2002, No. 16, S. 10599-10604.

[31] LINHER K. [u.a.]: An epigenetic mechanism regulates germ-specific expression of the porcine Deleted in Azoospermia-like (DAZL) gene. In: Differentiation, Vol. 77, 2009, No. 4, S. 335-349.

[32] WEAVER I.C.G.: Epigenetic programming by maternal behaviour and pharmacological intervention. In: Epigenetics, Vol. 2, 2007, No. 1, S. 22-28.

[33] MCGOWAN P. O. [u.a.]: Promoter-wide hypermethylation of the ribosomal RNA gene promoter in the suicide brain. In: PLOS ONE, Vol. 3, 2008, No. 5, S. 1-10.

Metamaterialien in der Optik

Dr. Uwe Schwengelbeck & Dr. Erwin Wismeth, Patentabteilung 1.51

Metamaterialien mit künstlichen nanostrukturierten Elementarzellen, welche aufgrund ihrer Struktur und Größe die Ausbreitung von Strahlung im Material beeinflussen, versprechen optische Eigenschaften, die mit herkömmlichen Materialien nicht realisierbar sind. Zu möglichen Anwendungen zählt eine verbesserte optische Nahfeld-Auflösung im Zusammenhang mit sogenannten „Superlinsen“ oder „perfekten Linsen“.

1. Einleitung

Wenn in letzter Zeit in der Physik von Super- oder Hyperlinsen mit extrem hoher Auflösung sowie von Tarnkappenwirkungen (“Cloaking”) die Rede ist, dann sind so genannte Metamaterialien im Spiel. Es handelt sich dabei um synthetische Materialien mit periodisch angeordneten Elementarzellen, die aufgrund ihrer Nanostrukturierung einfallendes Licht in die „falsche Richtung“ brechen und somit scheinbar die Gesetze der Optik auf den Kopf stellen. Dieses Verhalten ergibt sich nicht aufgrund der chemisch makroskopischen Eigenschaften sondern vielmehr aufgrund der physikalisch strukturellen Eigenschaften des Materials. Ein solcher Effekt, der bereits Ende der 1960er Jahre in einer theoretischen Arbeit vorhergesagt wurde [1] und in Verbindung mit dem Stichwort „negativer Brechungsindex“ zu Kontroversen unter Wissenschaftlern geführt hat, ist inzwischen für elektromagnetische Strahlung im Mikrowellen- und Infrarotbereich experimentell nachgewiesen worden [2]. Im optischen Bereich funktionierende Anwendungen auf der Grundlage von Metamaterialien befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstadium [3-6]. So befassen sich mittlerweile auch Patentanmeldungen mit der Herstellung von Metamaterialien (siehe beispielsweise US 2005 / 0 200 540 A1 und DE 10 2005 052 208 A1). Damit elektromagnetische Wellen nur effektive Eigenschaften des Materials in seiner Gesamtheit „sehen“, müssen die künstlichen maßgeschneiderten Strukturen von Metamaterialien deutlich kleiner sein als die Wellenlänge der verwendeten elektromagnetischen Strahlung. Die Strukturen reichen daher in Abhängigkeit von der anvisierten Strahlungswellenlänge bis in den Nanometerbereich hinein. Die Herstellung von Metamaterialien mit Nanostrukturen ist insbesondere mittels moderner hochauflösender Methoden im Zusammenhang mit Lithographie- und Ätzschritten möglich, wie sie aus der Halbleiterherstellung bekannt sind (siehe beispielsweise US 2008 / 0 174 754 A1).

2. Split-Ring-/Wire-Grid-Strukturen

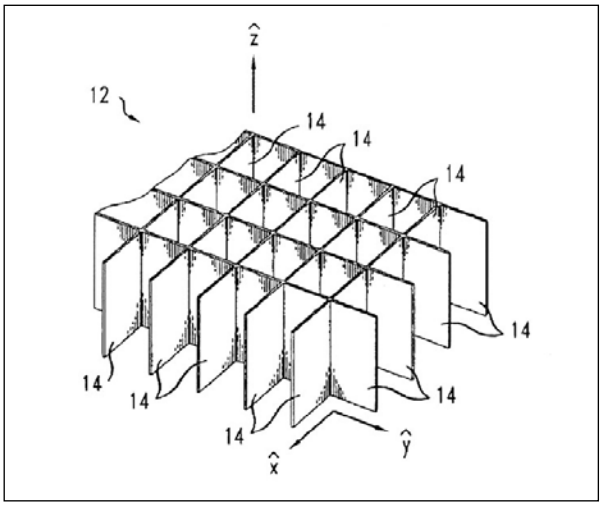
Bei sogenannten Split-Ring-/Wire-Grid-Strukturen führen Resonatoren in Form von künstlich strukturierten Doppel-Ringen mit Spalt („Split-Ring Resonators“) in einem eng begrenzten Wellenlängenbereich zu einer negativen Permeabilität μ, die die Durchlässigkeit des Materials für magnetische Felder charakterisiert. Zugleich führen die leitfähigen Gitter solcher Split-Ring-Strukturen zu einer negativen Permittivität ε, die die Durchlässigkeit des Materials für elektrische Felder charakterisiert. Es handelt sich dabei um Resonanzeffekte in periodischen Anordnungen von winzigen metallischen Leiterelementen, die eine Vielzahl von nebeneinander angeordneten elektrischen Schwingkreisen mit kapazitiven und induktiven Bauelementen in der Größenordnung von Mikro- oder Nanometern bilden. Dabei werden die einzelnen kapazitiven Elemente in einem Metamaterial durch einander gegenüberliegende Enden von Leiterelementen gebildet, während die induktiven Elemente durch die Leiterelemente selbst gebildet werden. Durch die Resonanzeffekte in Verbindung mit der Anregung

von Schwingungen können sich für Strahlungen im Mikrowellen- und optischen Bereich rücklaufende Wellen („Backward Waves“) ergeben. Dieses Konzept wird bereits seit langem im Bereich der Elektrotechnik im Zusammenhang mit Oszillatoren und Antennen genutzt, also für Wellenlängen, die um mehrere Zehnerpotenzen größer sind als die von optischer Strahlung.

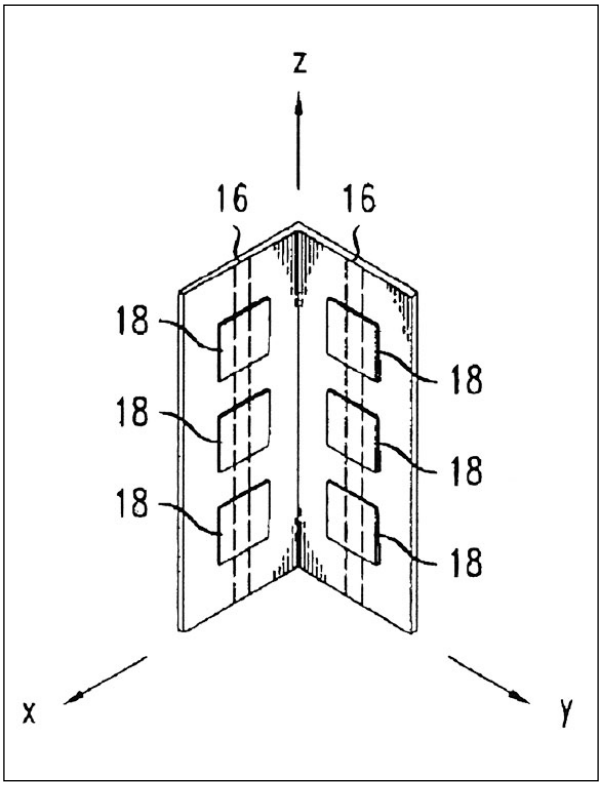
Nachdem in neuerer Zeit die theoretisch postulierten optischen Eigenschaften von Metamaterialien experimentell nachgewiesen werden konnten, zeigen sich auch erste Auswirkungen dieses Forschungsfeldes im Bereich der Patentliteratur. Nachfolgend sollen hierzu einzelne Beispiele gezeigt werden.

3. Beispiele für Metamaterialien

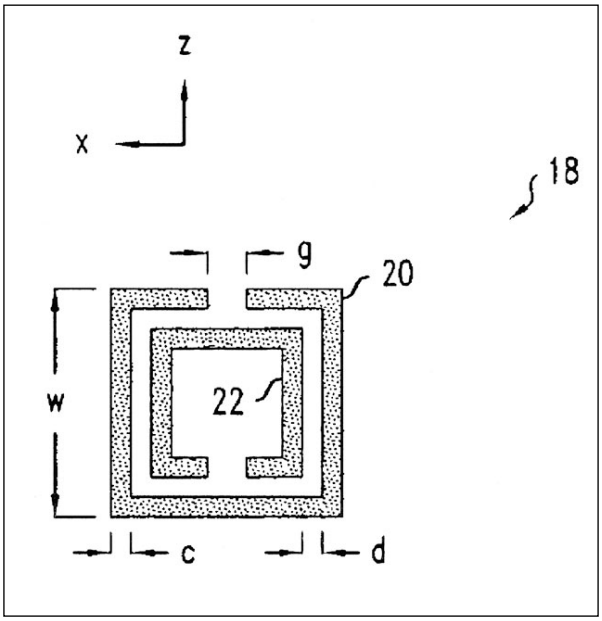
In Figur 1 ist ein Abschnitt 12 eines Metamaterials dargestellt, wobei der Abschnitt aus einem würfelförmigen Gitter aus rechteckigen Glasfaserplättchen 14 gebildet wird. Die Figur 2 zeigt eine Elementarzelle des in der Figur 1 dargestellten Metamaterials mit zwei Plättchen 14, die auf der Vorderseite jeweils drei Split-Ring-Resonatoren 18 und rückseitig zwei leitfähige Streifen 16 in Form von dünnen Kupferschichten aufweisen. In der Figur 3 ist ein Split-Ring-Resonator 18 der in der Figur 2 dargestellten Elementarzelle mit zwei Spaltringen 20, 22 dargestellt.



Figur 1: Abschnitt eines Metamaterials mit einem würfelförmigem Gitter, das aus rechteckigen Plättchen 14 gebildet wird (aus US 2005 / 0 200 540 A1).

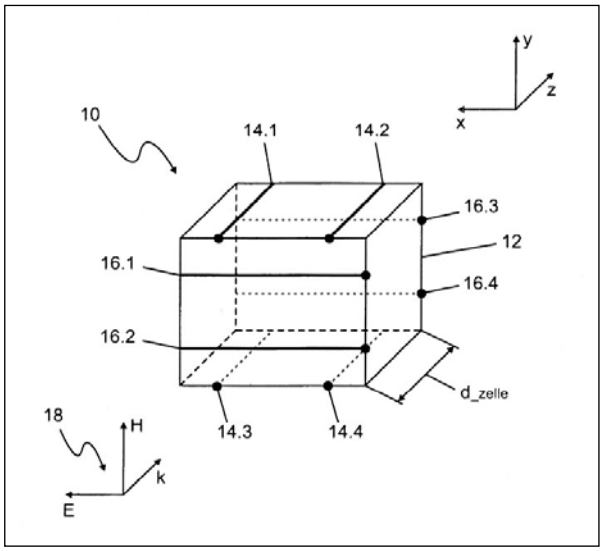


Figur 2: Elementarzelle im Metamaterial mit zwei Plättchen, die jeweils drei Split-Ring-Resonatoren 18 und zwei Drahtstreifen 16 aufweisen (aus US 2005 / 0 200 540 A1).



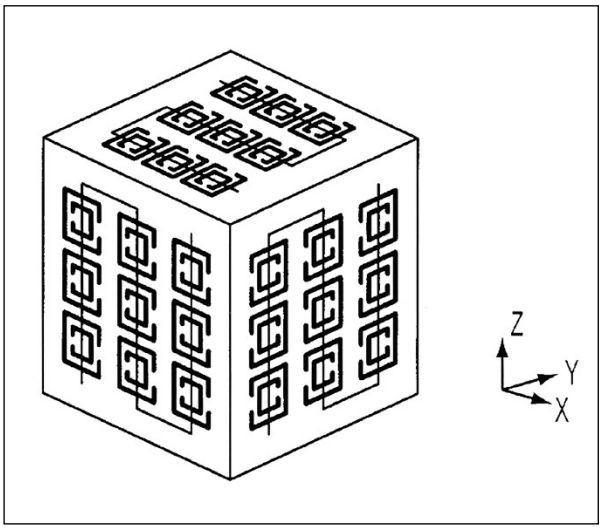
Figur 3: Split-Ring-Resonator 18 einer Elementarzelle mit zwei Spaltringen 20, 22 (aus US 2005 / 0 200 540 A1).

Die Figur 4 zeigt eine perspektivische Ansicht einer kubischen Elementarzelle 10 eines Metamaterials mit elektrisch leitfähigen Abschnitten 14.1, 14.2, 14.3, 14.4 sowie weiteren quer dazu angeordneten elektrisch leitfähigen Abschnitten 16.1, 16.2, 16.3, 16.4, die jeweils ein Gitter bilden und in ein dielektrisches Volumen-Trägermaterial 12 eingebettet sind. Als Volumen-Trägermaterial kommen beispielsweise Siliziumdioxid (SiO_2) und Magnesiumfluorid (MgF_2) in Frage. Größere Metamaterialvolumina entstehen durch eine periodische Fortsetzung der Elementarzelle 10 längs der angegebenen Raumrichtungen x, y und z. Bei der Beleuchtung eines solchen Metamaterials mit elektromagnetischer Strahlung 18, die sich in Richtung k ausbreitet, kann man den optischen Gitterstrukturen nach dem Prinzip des äquivalenten Schaltkreises jeweils elektrische Ersatzschaltbilder zuordnen. Mit dem in der Figur 4 dargestellten Material ergibt sich die Möglichkeit eines anwendungsorientierten Einstellens der induktiven und kapazitiven Materialeigenschaften über die Gestaltung der leitfähigen Abschnitte, die ein Gitter bilden. Hierdurch besteht die Möglichkeit eines Maßschneiderns der Brechzahl des Metamaterials, etwa für die Realisierung von Linsen, Spiegeln, Wellenleitern und Resonatoren (DE 10 2005 052 208 A1).

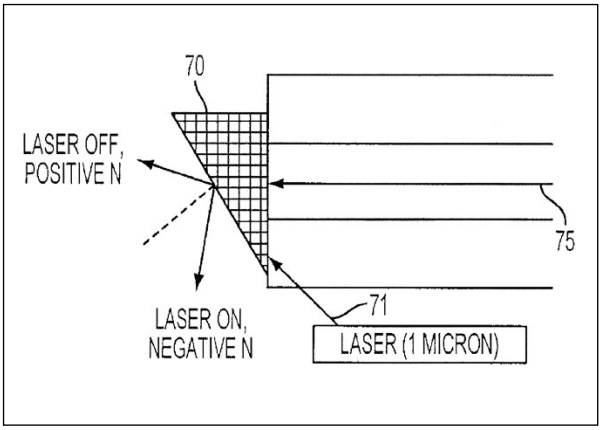


Figur 4: Perspektivische Ansicht einer kubischen Elementarzelle 10 eines Metamaterials mit elektrisch leitfähigen Abschnitten 14.1 bis 14.4 sowie 16.1 bis 16.4 (aus DE 10 2005 052 208 A1).

In der Figur 5 ist eine dreidimensionale Metamaterial-Struktur mit sogenannten Split-Ring-Resonatorelementen auf der Basis von photoleitfähigem Material dargestellt (US 2009 / 0 009 853 A1). Gemäß Figur 6 können einzelne oder mehrere der Resonatorelemente des Metamaterials 70 so mit Laserstrahlung 71 beleuchtet werden, dass der Brechungsindex des Materials verändert wird. Ein solches "Tuning" mittels Laser-Anregung ermöglicht ein Umlenken von elektromagnetischen Wellen 75 in zwei unterschiedliche Richtungen, je nachdem ob der Laser ein- oder ausgeschaltet ist.

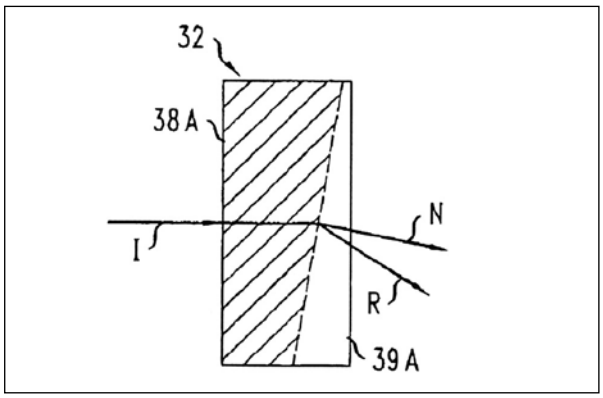


Figur 5: Dreidimensionale Metamaterial-Struktur mit sogenannten Split-Ring-Resonatorelementen auf der Basis von photoleitfähigem Material (aus US 2009 / 0 009 853 A1).



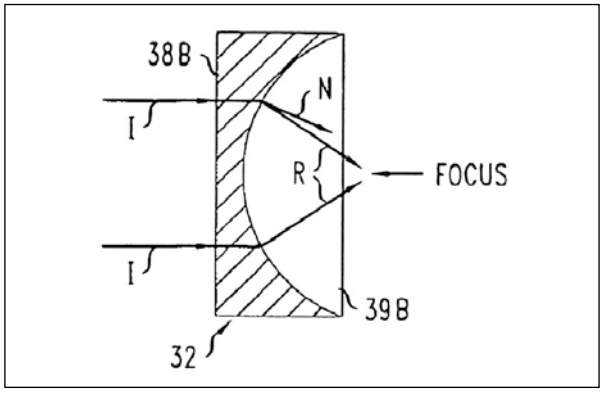
Figur 6: "Tuning" eines Metamaterials 70 auf Basis von photoleitfähigem Material mittels Laserstrahlung 71 führt zu einer Änderung der Lichtbrechung (aus US 2009 / 0 009 853 A1).

Die Wirkungen von Metamaterialien werden in den Figuren 7 und 8 veranschaulicht. Figur 7 zeigt ein Element 32 mit einem keilförmigen Bereich 38A, der die Eigenschaften eines Metamaterials aufweist. Der Bereich 39A weist dagegen herkömmliche Brechungseigenschaften auf. Beim Durchgang durch das Material 38A produziert die einfallende Strahlung I einen gebrochenen Strahl R, der von der Normalen N der Materialoberfläche aus gesehen in die entgegengesetzte Richtung wie bei einem konventionellen Material abgelenkt wird.



Figur 7: Strahlenbrechung bei einem keilförmigen Metamaterial. Einfallende Strahlung I wird in Richtung R gebrochen (aus US 2005 / 0 200 540 A1).

In Figur 8 wird der Strahlengang durch ein Element mit einem konkav geformten Bereich 38B gezeigt, der die Eigenschaften eines Metamaterials aufweist. Der Bereich 39 weist hingegen konventionelle Brechungseigenschaften auf. Im Gegensatz zu einem Element auf Basis eines konventionell brechenden Materials ergibt sich bei dem in der Figur 8 dargestellten Element eine sammelnde Wirkung, das heißt, Strahlung wird hier durch den konkav geformten Bereich fokussiert und nicht zerstreut.



Figur 8: Fokussierung von Strahlung durch einen konkav geformten Bereich 38B, der die Eigenschaften eines Metamaterials aufweist (aus US 2005 / 0 200 540 A1).

4. Ausblick

Bei den derzeit oft genannten optischen Anwendungen von „perfekten Linsen“ auf der Basis von Metamaterialien ist zu berücksichtigen, dass ein Einsatz von derartigen Linsen nur im Nahfeld von Objekten sinnvoll sein kann, wo sogenannte evaneszente (oder dahinschwindende) Lichtwellen noch nicht zu stark abgeklungen sind. Für optische Wellenlängen bedeutet dies einen Abstand von Linse zu Objekt unterhalb von einem tausendstel Millimeter. Hierbei ist auch zu bedenken, dass sowohl durch Dispersion und Dämpfungsverluste als auch durch die endliche Größe der strukturierten Einzelelemente von Metamaterialien die optische Auflösung begrenzt ist und Abbildungsfehler erzeugt werden.

Im optischen Bereich funktionierende Systeme auf der Basis von Metamaterialien befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstadium. Der Mikrowellenbereich, in dem bereits Anwendungen von entsprechend größer dimensionierten und somit auch leichter herzustellenden Metamaterialien demonstriert werden konnten, ist daher im Augenblick auch von besonderem Interesse. Angesichts der früheren Entwicklung vom sogenannten Maser für Strahlung im Mikrowellenbereich zum Laser für Strahlung im optischen Wellenlängenbereich ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass sich die Entwicklung von Metamaterialien zukünftig in ähnlicher Weise in Richtung optischer Wellenlängen verschieben könnte [7].

Literatur:

[1] VESEALGO, V.G.: The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ. - In: Soviet Physics Uspekhi, 1968, Vol. 10, S. 509 - 514.

[2] SHELBY, R.A. et al.: Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. - In: Science, 2001, Vol. 292, S. 77 - 79.

[3] GRBIC, A. und ELEFTHERIADES, G.V.: Overcoming the diffraction limit with a planar left-handed transmission-line lens. - In: Physical Review Letters, 2004, Vol. 92, S. 117403 - 117406.

[4] PENDRY, J.B. et al.: Controlling Electromagnetic Fields. - In: Science, 2006, Vol. 312, S. 1780 - 1782.

[5] DOLLING, G. et al.: Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength. - In: Optics Letters, 2007, Vol. 32, S. 53 - 55.

[6] ROCKSTUHL, C.: Aufbruch ins Volumenland. - In: Physik Journal, 2008, Vol. 7, S. 18 – 19.

[7] PENDRY, J.: All smoke and metamaterials. - In: Nature, 2009, Vol. 460, S. 579 - 580.

Die Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs und ihre Anwendungen

Dr. Florian Siebel, Patentabteilung 1.52

Verkehrsstaus sind jedem von uns aus dem Alltag bekannt. Eine detaillierte Analyse des Verkehrs auf Schnellstraßen und Autobahnen zeigt eine komplexe, nichtlineare Dynamik von Verkehrsstaus. Dieser Beitrag befasst sich mit der Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs, die ausgehend von detaillierten experimentellen Untersuchungen in den 1990er Jahren entwickelt wurde und sich in einer großen Anzahl von Patentanmeldungen und Patenten widerspiegelt.

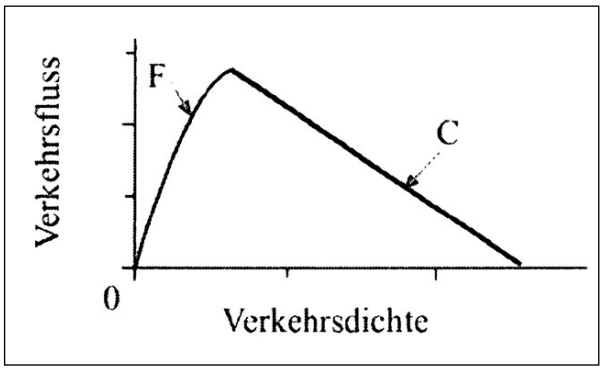
1. Einleitung

Bei allen negativen Konsequenzen besitzen Verkehrsstaus interessante Aspekte. So können beispielsweise Staus ohne ersichtlichen Grund „aus dem Nichts“ entstehen (siehe [1] mit den zugehörigen Filmen).

Um die Verkehrsdynamik und Staubildung zu beschreiben, sind insbesondere die Verkehrsgrößen Geschwindigkeit, Verkehrsdichte (reziproker Abstand) und Verkehrsfluss von Bedeutung. Dabei gibt der Verkehrsfluss die Anzahl der Fahrzeuge pro Zeiteinheit an, die einen gegebenen Ort passieren, und berechnet sich als Produkt der Verkehrsdichte und der Geschwindigkeit.

Es existieren unterschiedliche Methoden, diese Verkehrsgrößen zu messen. Dabei spielen stationäre Messstellen, insbesondere in Form von in die Straße integrierten Induktionsschleifen, eine wichtige Rolle (zum Beispiel DE 198 35 979 B4). Oft wird auch auf Daten von sich mit dem Verkehr bewegenden Fahrzeugen (so genannten „Floating Cars“, zum Beispiel US 6 522 970 B2) zurückgegriffen. Darüber hinaus ist auch die Fernüberwachung aus der Luft oder aus dem All möglich, oder die Bestimmung von Verkehrsgrößen über die Ortung von Mobiltelefonen (zum Beispiel DE 101 10 326 A1). Es ist üblich, Messgrößen geeignet zu mitteln.

Mit einer Vielzahl von Modellen wurde versucht, die beobachtete Verkehrsdynamik zu erklären. Während mikroskopische Modelle die Bewegung von einzelnen Fahrzeugen beschreiben, verwenden makroskopische Modelle gemittelte Verkehrsgrößen und modellieren die Verkehrsdynamik in Analogie zur Dynamik von Flüssigkeiten. Sie beruhen dabei im Allgemeinen auf dem so genannten Fundamentaldiagramm (Figur 1), welches den Verkehrsfluss im Gleichgewicht als Funktion der Verkehrsdichte beschreibt.



Figur 1: Fundamentaldiagramm (aus DE 10 2008 023 704 A1)

Im Fundamentaldiagramm kann man zwischen freiem Verkehr (F) und Stauzuständen (C für „congestion“) unterscheiden.

2. Die Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs

Die Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs wurde von B.S. Kerner und Kollegen entwickelt und basiert auf detaillierten zeitlich-räumlichen Analysen des Verkehrs auf Autobahnen ([2] bis [5] sowie DE 198 35 979

B4). Sie unterscheidet zwischen drei verschiedenen Verkehrsphasen, dem freien Verkehr, dem synchronisierten Verkehr und sich bewegenden breiten Staus. Zwischen diesen drei Verkehrsphasen kann es zu Phasenübergängen kommen. Die Theorie und die zu Grunde liegenden experimentellen Befunde sind im Detail im Lehrbuch [6] beschrieben und im Folgenden kurz zusammengefasst.

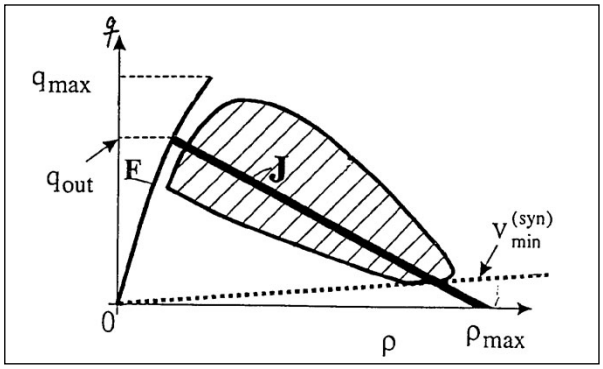
2.1 Verkehrsphasen

Verkehrstaus bilden sich insbesondere an so genannten effektiven Engstellen (zum Beispiel DE 100 36 792 A1). Effektive Engstellen können dabei Zufahrten, Abfahrten und Stellen sein, an denen sich die Anzahl der nutzbaren Fahrspuren verändert, aber auch Streckeninhomogenitäten wie Kurven und Steigungen. Auch langsame Fahrzeuge können effektive Engstellen bilden.

An effektiven Engstellen kann es zur Entstehung des charakteristischen Musters von Stauzuständen gemäß Figur 2 kommen.

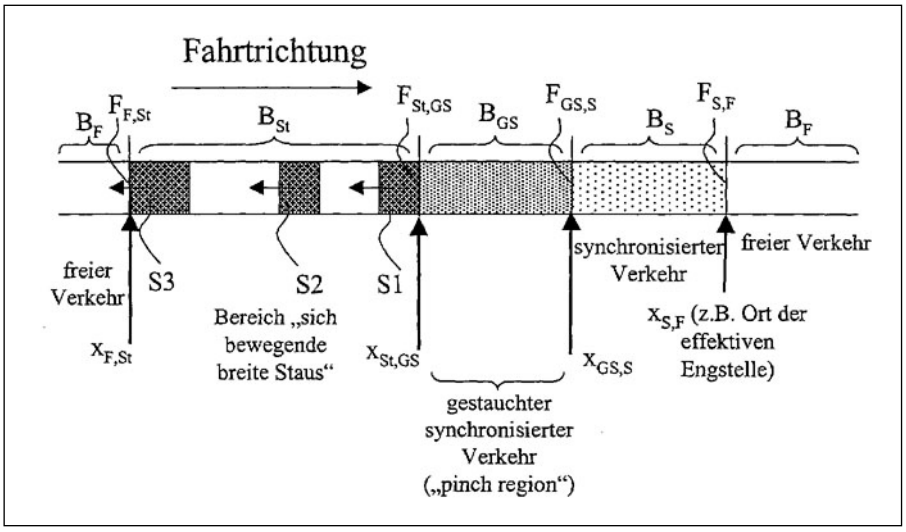
Direkt stromaufwärts der effektiven Engstelle, das heißt von der effektiven Engstelle aus entgegen der Fahrtrichtung, bildet sich zuerst ein Bereich B_S synchronisierten Verkehrs, der sich in einen speziellen Bereich synchronisierten Verkehrs, den so genannten gestauchten synchronisierten Verkehr (Bereich B_{GS}, „pinch region“), ausdehnen kann. Zusätzlich entsteht bei großen Verkehrsstärken stromaufwärts des (gestauchten) synchronisierten Verkehrs ein Bereich B_{St} sich bewegender breiter Staus, in dem sich einzelne breite Staus (S1, S2, ...) entgegen die Fahrtrichtung bewegen.

Zu Unterscheidung der verschiedenen Verkehrsphasen ist darüber hinaus das Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagramm der Drei-Phasen-Theorie von großer Bedeutung, welches in Figur 3 dargestellt ist.



Figur 3: Verkehrsfluss (q) – Verkehrsdichte (ρ) – Diagramm für die Drei-Phasen-Theorie (aus DE 101 01 652 B4)

In diesem Diagramm sind Verkehrszustände des freien Verkehrs mit F bezeichnet und sich bewegende breite Staus mit J (für „jam“). Der schraffierte Bereich entspricht synchronisiertem Verkehr. Man beachte, dass im Fluss-Dichte-Diagramm Zustände mit einer konstanten Geschwindigkeit auf einer Geraden liegen. Zum Beispiel liegen Zustände mit der Geschwindigkeit $v_{\min}^{(syn)}$ auf der gepunkteten Geraden.

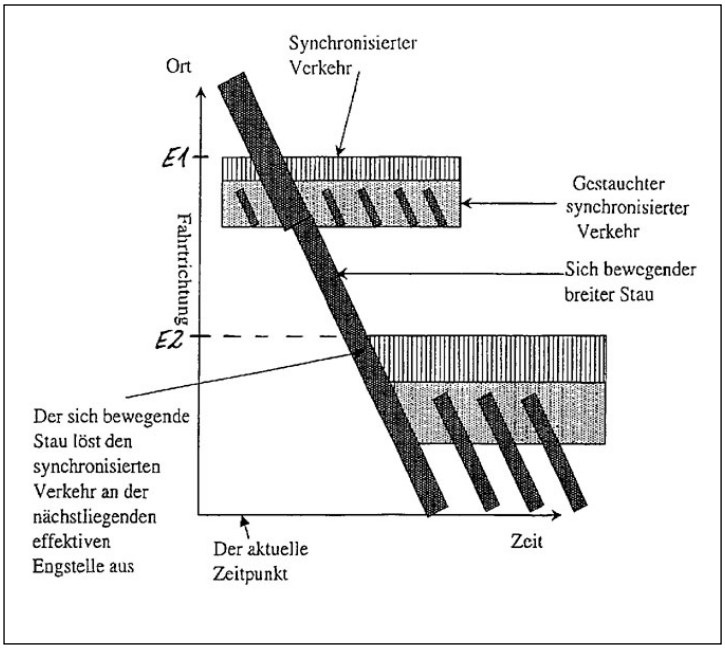


Figur 2: Typische Stauzustände an einer effektiven Engstelle (aus DE 199 44 075 C2)

2.1.1 Freier Verkehr („free flow" oder „freely flowing traffic")

Freier Verkehr ist gekennzeichnet durch geringe Verkehrsdichten und hohe Geschwindigkeiten. Auf Grund der geringen Verkehrsdichten ist auf mehrspurigen Straßen ein Spurwechsel problemlos möglich. Die experimentellen Daten für den freien Verkehr können, gegebenenfalls für einzelne Fahrspuren getrennt, gut durch eine eindeutige Beziehung zwischen Verkehrsfluss und Verkehrsdichte beschrieben werden (Kurve F in den Figuren 1 und 3).

Für freien Verkehr mit vergleichsweise hohen Dichten werden maximale Verkehrsflüsse erreicht (q_{max} in Figur 3). Für höhere Dichten existiert kein stabiler Zustand des freien Verkehrs. Bereits für einen Bereich kleinerer Verkehrsflüsse (in etwa der Bereich der Kurve F zwischen q_{out} und q_{max} in Figur 3) ist freier Verkehr nur metastabil, das heißt, er bleibt gegenüber lokalen, temporären Störungen stabil, solange diese klein genug sind, geht aber in den synchronisierten Verkehr oder Stauzustände über, wenn auftretende Störungen ein gewisses Maß überschreiten (DE 199 54 971 B4).



Figur 4: Zeitlich-räumliches Schema der Staudynamik (aus DE 100 62 856 B4)

2.1.2 Sich bewegende breite Staus („wide moving jams")

Sich bewegende breite Staus zeichnen sich durch hohe Verkehrsdichten (bis zur maximalen Verkehrsdichte) sowie geringe Verkehrsflüsse und Geschwindigkeiten aus (Kurve J in Figur 3). Innerhalb eines sich bewegenden breiten Staus kommt der Verkehr (fast) zum Stillstand. Der Name entstammt der Beobachtung, dass sich diese Staustrukturen (entgegen der Fahrtrichtung) bewegen und die Ausdehnung des Staus groß gegenüber den typischen Breiten der Stauflanken ist. Die Bewegung der stromabwärtigen Stauflanke eines sich bewegenden breiten Staus ist durch eine charakteristische Geschwindigkeit von etwa 15 km/h gekennzeichnet (zum Beispiel [2]). Auch der Verkehrsfluss aus einem sich bewegenden breiten Stau ist eine charakteristische Verkehrskonstante (Fluss q_{out} in Figur 3), deren Wert kleiner als der Wert für den maximalen Verkehrsfluss im freien Verkehr ist.

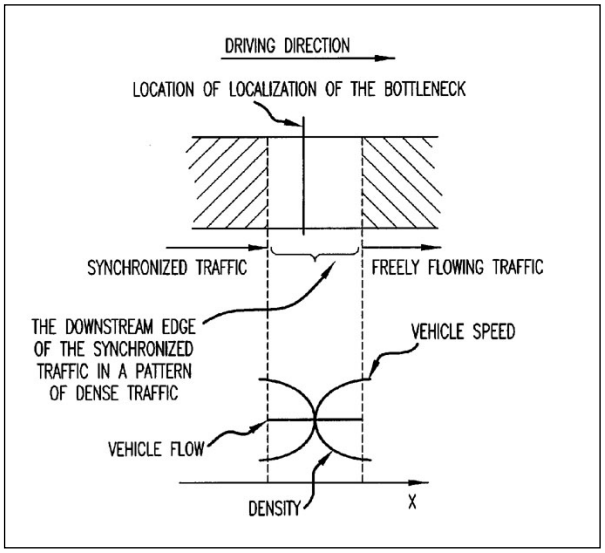
Sich bewegende breite Staus können über lange Zeiten bestehen. Sie sind äußerst stabil und durchlaufen andere Verkehrsphasen weitgehend ungestört. So zeigt Figur 4 beispielsweise einen sich bewegenden breiten Stau, der an der effektiven Engstelle E1 einen Bereich synchronisierten Verkehrs durchläuft.

Gelangt ein sich bewegender breiter Stau stromaufwärts zu einer effektiven Engstelle (zum Beispiel zur Engstelle E2 in Figur 4), so durchläuft er die Engstelle ungestört, kann dort aber einen Bereich synchronisierten Verkehrs induzieren.

2.1.3 Synchronisierter Verkehr („synchronized flow" oder „synchronized traffic")

Synchronisierter Verkehr kann hohe Werte für den Verkehrsfluss, vergleichbar dem maximalen Fluss für den freien Verkehr, annehmen. Jedoch

sind im Vergleich zu freiem Verkehr die mittleren Geschwindigkeiten deutlich niedriger (beziehungsweise die Verkehrsdichten erhöht), was dazu benutzt werden kann, synchronisierten Verkehr zu identifizieren (DE 198 35 979 B4). Der Übergang zwischen synchronisiertem und freiem Verkehr ist in Figur 5 verdeutlicht.



Figur 5: Übergang zwischen synchronisiertem und freiem Verkehr (aus US 6 522 970 B2)

Gemäß der Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs lässt sich synchronisierter Verkehr nicht durch eine eindeutige Beziehung zwischen Verkehrsdichte und Verkehrsfluss beschreiben, sondern durch einen zweidimensionalen Bereich im Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagramm (die schraffierte Fläche in Figur 3). Synchronisierter Verkehr besitzt keine charakteristischen Verkehrskonstanten.

Die stromabwärtige Flanke des synchronisierten Verkehrs ist gewöhnlich an effektiven Engstellen lokalisiert. Innerhalb des Bereichs synchronisierten Verkehrs kann es zur Bildung von gestauchtem synchronisiertem Verkehr kommen. Dabei entstehen mehrere schmale Staus, das heißt Staus mit relativ geringer Ausdehnung, innerhalb derer die Geschwindigkeit stark abfällt, und die sich im Allgemeinen entgegen der Fahrtrichtung bewegen (zum Beispiel DE 199 44 077 C2). Synchronisierter Verkehr kann darüber hinaus verschiedene Muster ausbilden (zum Beispiel DE 10 2005 055 245 A1).

2.2 Kritik

Die Drei-Phasen-Theorie, insbesondere das Konzept des synchronisierten Verkehrs, ist im Fachgebiet umstritten (zum Beispiel [7]).

Ein Kritikpunkt richtet sich gegen den Begriff des synchronisierten Verkehrs als solchen. Synchronisierter Verkehr zeichnet sich dadurch aus, dass sich Verkehrsgrößen (zum Beispiel die Geschwindigkeit) an einem Ort für unterschiedliche Fahrspuren sehr ähnlich verhalten, der Verkehr zwischen den Fahrspuren also „synchronisiert“ ist (zum Beispiel DE 199 44 075 C2, Absatz [0003]). Allerdings trifft dieses Merkmal auch auf sich bewegende breite Staus zu. Inzwischen hat sich der Begriff des synchronisierten Verkehrs jedoch weitgehend etabliert.

Darüber hinaus wird der Drei-Phasen-Theorie vorgeworfen, den Begriff des synchronisierten Verkehrs nur unzureichend zu definieren. Will man sich bewegende schmale Staus, welche zur Verkehrsphase des synchronisierten Verkehrs zu rechnen sind, von sich bewegenden breiten Staus unterscheiden, so gilt als Entscheidungskriterium das Eingefangenwerden des Staus an effektiven Engstellen (zum Beispiel DE 10 2008 003 039 A1, Absatz [0021]). Das bedeutet aber, dass ein Verkehrszustand so lange undefiniert bleibt, bis er – wenn überhaupt – auf eine effektive Engstelle trifft.

3. Anwendungen

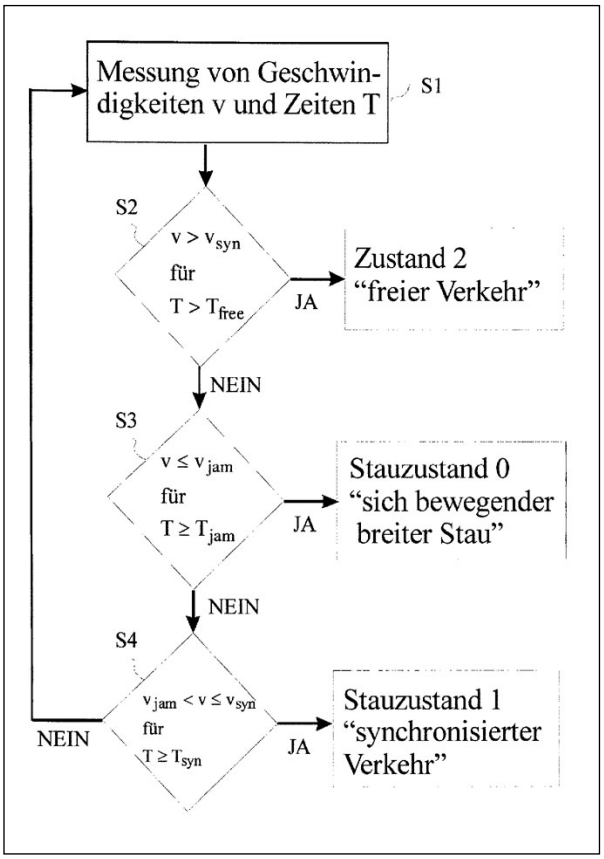
Mit der Zusammenstellung der Anwendungen dieses Abschnitts soll ein Überblick über die Patentliteratur gegeben werden, die von der Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs direkt beeinflusst ist. Dabei wird zwischen den Anwendungen der Verkehrslagebestimmung und Verkehrsprognose sowie der Verkehrssteuerung unterschieden, auf die im Folgenden einzeln eingegangen wird. Auf eine Behandlung des Standes der Technik jenseits der Drei-Phasen-Theorie wurde verzichtet.

3.1 Verkehrslagebestimmung und Verkehrsprognose

Ausgangspunkt einer Verkehrsprognose ist eine realistische Einschätzung des aktuellen Verkehrszustands, das heißt die Bestimmung der aktuellen Verkehrslage. Im Rahmen der Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs bedeutet dies die Klassifikation des Verkehrs in eine der drei Zustandsphasen „freier Verkehr", „synchronisierter Verkehr" und „sich bewegende breite Staus" (zum Beispiel DE 199 44 077 C2). Basierend auf der aktuellen Verkehrslage oder einer Verkehrsprognose können Routeninformationen berechnet werden (DE 100 63 763 A1), es können eine optimale Route und Reisezeiten abgeschätzt werden (DE 198 56 704 C2 oder DE 103 36 590 A1), oder es kann eine optimale Fahrstrategie im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch bestimmt werden (DE 10 2004 024 259 A1 und DE 10 2005 049 458 A1).

Mehrere Schriften beschäftigen sich mit der Verkehrslagebestimmung an effektiven Engstellen (zum Beispiel DE 199 44 075 C2 oder US 6 522 970 B2). Gemäß der DE 100 36 792 A1 kann auf das Vorliegen einer effektiven Engstelle in einem Straßenverkehrsnetz geschlossen werden, wenn es an einem Ort wiederholt zur Bildung des typischen Musters dichten Verkehrs kommt (vergleiche Figur 2). Um die Datenmenge zur Verkehrslagebestimmung zu begrenzen, wird in der DE 10 2004 050 771 A1 vorgeschlagen, Verkehrsdaten durch Meldefahrzeuge nur im Bereich von effektiven Engstellen zu gewinnen. Die Lage der effektiven Engstellen im Verkehrsnetz mit ihrem Verkehrsmuster kann gemäß der DE 101 19 730 A1 im Fahrzeug angezeigt werden, um den Betrachter zuverlässig und genau über den relevanten Verkehrszustand zu informieren.

In einer Reihe von Schriften (zum Beispiel DE 100 51 777 A1 oder DE 100 62 856 B4) wird vorgeschlagen, die Verkehrslage dezentral (das heißt ohne Rückgriff auf eine Verkehrszentrale) für die lokale Umgebung eines Fahrzeuges abzuschätzen und dynamisch zu prognostizieren. Dabei werden kontinuierlich Verkehrszustandsparameter durch das Fahrzeug aufgezeichnet. Die DE 10 2008 003 039 A1 beschreibt eine einfache Möglichkeit, den Verkehrszustand auf der Basis der fahrzeugeigenen Geschwindigkeit in eine der Phasen „freier Verkehr", „synchronisierter Verkehr" oder „sich bewegende breite Staus" zu klassifizieren (Figur 6).



Figur 6: Verfahren zur Ermittlung des lokalen Verkehrszustands (aus DE 10 2008 003 039 A1)

Gemäß der DE 100 57 796 B4 wird für die Verkehrslagebestimmung auf die Verkehrsdaten von Fahrzeugen in der Nachbarschaft über Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zurückgegriffen, gemäß der DE 103 57 921 A1 speziell auf Verkehrsdaten von Fahrzeugen auf der Gegenfahrbahn.

Für die Erstellung von Verkehrprognosen besteht die Möglichkeit, Ganglinien zu verwenden. Ganglinien sind komprimierte historische Verkehrsdaten, die ortsaufgelöst typische zeitliche Verläufe eines Verkehrsparameters darstellen. Aus der EP 1 528 524 B1 ist bekannt, zur Erstellung einer Ganglinien-datenbank die typischen Verkehrsphasen an effek-

tiven Engstellen zu berücksichtigen und die Ganglinien beim Auftreten von temporären Engstellen zu aktualisieren. In der Patentschrift DE 102 34 367 B3 wird vorgeschlagen, zur Erstellung von Ganglinien für einen Streckenabschnitt auf korrelierte Ganglinien für einen anderen Streckenabschnitt zurückzugreifen. Des Weiteren ist auch die Verwendung der zeitlich-räumlichen Muster selbst für die Verkehrsprognose möglich (zum Beispiel DE 10 2004 039 283 A1, DE 10 2005 055 245 A1 oder DE 10 2006 001 354 A1). Die prognostizierten zeitlich-räumlichen Verkehrsmuster können der DE 10 2008 057 372 A1 folgend im Rahmen einer animierten Routenvorschau angezeigt werden.

Darüber hinaus beschreibt die DE 10 2005 055 244 A1 ein Verfahren zur verkehrsdatenbasierten Unfallerkennung, bei dem insbesondere Abweichungen des typischen Verkehrsmusters von sich bewegenden breiten Staus zur Unfallerkennung benutzt werden. Gemäß der DE 10 2005 041 731 A1 wird aus der herrschenden Verkehrsphase eine Unfallwahrscheinlichkeit abgeleitet. Wetterverhältnisse können das zeitlich-räumliche Muster der Verkehrsphasen verändern. Die DE 10 2007 050 375 A1 schlägt daher unter anderem vor, Wetterinformationen für die Klassifikation und Prognose der zeitlich-räumlichen Verkehrsmuster zu verwenden.

3.2 Verkehrssteuerung

Um die Effizienz der bestehenden Verkehrsinfrastruktur zu erhöhen, ist bekannt, regelnd in den Verkehr einzugreifen, zum Beispiel mit Hilfe einer dynamischen Geschwindigkeitsbegrenzung oder der Zuflusssteuerung an Einfahrten. Im Zusammenhang mit der Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs wird gemäß der Patentschrift DE 198 35 979 B4 (vergleiche Anspruch 11) der Zufluss in Abhängigkeit von Phasenübergängen zwischen freiem und synchronisiertem Verkehr gesteuert.

Aus den Schriften DE 101 01 652 B4 und DE 100 38 089 A1 sind Verfahren zur kollektiven Beeinflussung des Fahrverhaltens von Fahrzeugen bekannt, welche die Auflösung und Vermeidung von lokalen Verkehrsstörungsstrukturen, wie sich bewegenden breiten Staus und synchronisiertem Verkehr an effektiven Engstellen, zum Ziel haben. Dabei sind unterschiedliche Maßnahmen angedacht, gemäß letzterer Schrift insbesondere eine automatische Beeinflussung über Fahrerassistenzsysteme. Aus der Patentschrift 199 54 971 B4 ist bekannt, den Verkehr so lange wie möglich im metastabilen Bereich des freien Verkehrs bei maximalen Verkehrsflüssen zu halten.

Ein Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control, ACC), auch adaptive Geschwindigkeitsregelung oder automatische Distanzregelung genannt, regelt für ein Fahrzeug den Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug. Dabei werden die Position und die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges durch geeignete Sensorik erfasst. Mehrere Schriften beschreiben das Verhalten von derartigen Assistenzsystemen gemäß der Drei-Phasen-Theorie, indem die Ansteuerung in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrsphase erfolgt (zum Beispiel DE 10 2005 017 559 A1 und DE 10 2005 017 560 A1). Insbesondere steuert ein Assistenzsystem gemäß der Drei-Phasen-Theorie nicht notwendigerweise einen eindeutigen Zustand nach dem Fundamentaldiagramm an, um der weiten Streuung von synchronisiertem Verkehr Rechnung zu tragen. In diesem Zusammenhang wird auf die Schriften EP 1 597 106 B1, DE 10 2005 033 495 A1, DE 10 2007 008 253 A1 bis DE 10 2007 008 255 A1, DE 10 2007 008 257 A1 sowie DE 10 2008 023 704 A1 verwiesen.

Die DE 10 2008 057 384 A1 schlägt darüber hinaus vor, einen Hybridantrieb in Abhängigkeit der Verkehrsphasen „freier Verkehr“, „synchronisierter Verkehr“ und „sich bewegende breite Staus“ zu steuern.

4. Zusammenfassung

Experimentelle Befunde im Rahmen der Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs zeigen, dass die Verkehrsdynamik auf Schnellstraßen und Autobahnen komplex ist. Trotz unterschiedlichem Fahrerverhalten existieren charakteristische Kenngrößen und Muster der Verkehrsdynamik, die Verkehr weitgehend berechenbar machen und die Entwicklung von diversen Verkehrsanwendungen erlauben.

Literatur

[1] SUGIYAMA, Y. [et al.]: Traffic jams without bottlenecks - experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. In: New Journal of Physics, Vol. 10, 2008, 033001. URL: http://www.iop.org/EJ/article/1367-2630/10/3/033001/njp8_3_033001.html

[2] KERNER, B.S., REHBORN, H.: Experimental features and characteristics of traffic jams. In: Physical Review E, Vol. 53, 1996, R1297-R1300.

[3] KERNER, B.S., REHBORN, H.: Experimental properties of complexity in traffic flow. In: Physical Review E, Vol. 53, 1996, R4275-R4278.

[4] KERNER, B.S., REHBORN, H.: Experimental Properties of Phase Transitions in Traffic Flow. In: Physical Review Letters, Vol. 79, 1997, 4030-4033.

[5] KERNER, B.S.: Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow. In: Physical Review Letters, Vol. 81, 1998, 3797-3800.

[6] KERNER, B.S.: The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory. Berlin: Springer, 2004. ISBN 3-540-20716-3

[7] SCHÖNHOF, M., HELBING, D.: Criticism of three-phase traffic theory. In: Transportation Research Part B, Vol. 43, 2009, 784-797.

Patente gegen das Kippen: Ein Streifzug durch 120 Jahre Zweirad-Parkstützen

Dr.-Ing. Jan-Friedrich Süßmuth, Patentabteilung 1.21

Dieser Beitrag behandelt Zweirad-Parkstützen, die an Fahr- oder Motorrädern befestigt oder an diesen separat mitführbar sind. Schwerpunkt der ausgewählten Beispiele aus der Patentliteratur seit 1889 sind dabei Erfindungen von Parkstützen mit Zusatzfunktionen wie komfortables Aufbocken schwerer Motorräder, integrierter Diebstahlschutz des Zweirades, Sicherung gegen Umkippen beim Halten mit aufgesessenem Fahrer, kippsicheres Abstellen des Zweirades an Steigungen und andere.

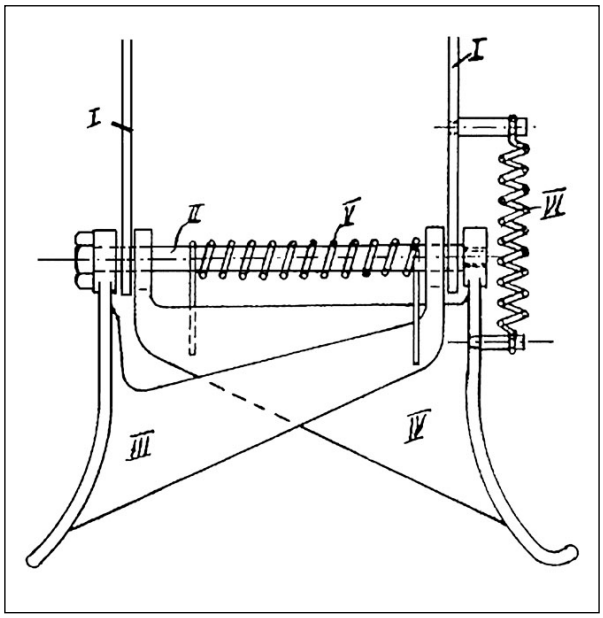
1. Einleitung

Beginnend im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts entwickelten sich Fahrrad und Motorrad zu Verkehrsmitteln für jedermann. Seit den Anfängen werden Einsatzzweck und Nutzwert, insbesondere aber auch die Freude am Rad- oder Motorradfahren, in hohem Maße von den Anbau- und Ausstattungsteilen des Zweirades mitbestimmt. Da diese somit einer Betrachtung wert sind, beschäftigt sich der vorliegende Beitrag mit früheren und aktuellen Entwicklungen aus dem Bereich der Zweiradstützen. Hauptaufgabe einer Zweiradstütze ist zunächst das kippsichere Abstellen des an sich instabilen Fahr- oder Motorrades. Es erscheint auf den ersten Blick nicht weiter schwierig, zu diesem Zweck eine alltagstaugliche Stütze zu entwickeln. Doch sicherlich jeder Fahrrad- oder Motorradfahrer kämpft gelegentlich mit den Unzulänglichkeiten der verfügbaren Technik: Sei es, dass das Aufbocken eines Motorrades zu große Körperkraft erfordert oder dass das Abstellen eines Fahrrades auf geneigter Fläche zum Geschicklichkeitsspiel gerät, um nur zwei Beispiele zu nennen. Derlei Schwierigkeiten lassen Erfinderinnen und Erfindern keine Ruhe – entsprechend groß ist die Zahl der Anmeldungen, die zum Ziel haben, die bekannten Zweiradstützen zu verbessern und ihnen zur Steigerung von Sicherheit und Komfort im Alltag nützliche Zusatzfunktionen zu verleihen.

Im Folgenden werden hierzu beispielhaft ausgewählte Patente vorgestellt, die den IPC-Klassen B62H 1/00 bis B62H 1/12 entnommen sind. Das Jahr der Anmeldung ist jeweils hinter den zitierten Patentschriften in Klammern gesetzt, um die zeitliche Einordnung zu erleichtern. In diesem Beitrag ist der Begriff Fahrrad oft synonym zu Zweirad und Motorrad aufzufassen, da die betrachteten Erfindungen häufig sowohl für Fahrräder als auch für Motorräder geeignet sind. In allen Fällen handelt es sich um Stützen, die nicht ortsfest sind und an den Zweirädern befestigt oder mitführbar sind.

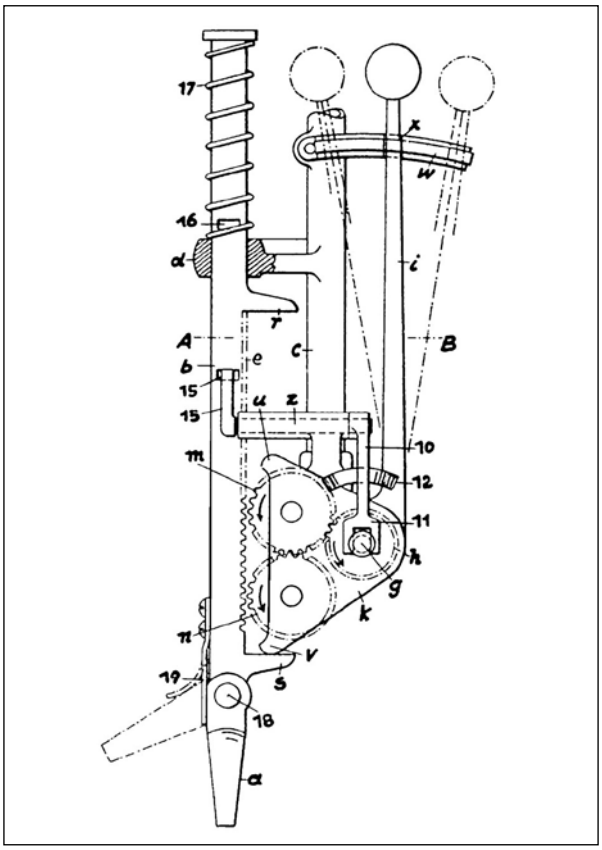
2. Leichter über den Berg: Aufbockhilfen für schwere Motorräder

Zum Aufbocken schwerer Motorräder auf einen konventionellen Hauptständer, beispielsweise bekannt aus DE 535 592 A (1929), zieht der Fahrer das Motorrad auf den Ständer und „über den Berg“, bis es in einer Übertotpunktlage einrastet. Dies ist für körperlich schwächere Personen oder bei beladenem Motorrad oft schwierig, da die Maschine hierbei angehoben werden muss. Um Abhilfe zu schaffen, wurden manuelle und motorisch angetriebene Stützen erdacht. Zu den manuell betätigten Aufbockhilfen zählen die Hauptständer, bei denen das Aufbocken schrittweise durch seitliche Kippbewegungen des Motorrades erfolgt, wie dies in DE 660 683 A (1931), siehe Figur 1, vorgeschlagen ist.



Figur 1: Motorradständer (aus DE 660 683 A)

Der über dem Motorrad stehende Fahrer neigt das Motorrad hin und her, so dass die unabhängig voneinander beweglichen, aber durch die Feder V aufeinander zu vorgespannten Stützfüße III und IV nacheinander in Bodenkontakt kommen, wobei das Motorrad auf den Ständer gehebelt wird. Vergleichbar arbeiten die Ständer gemäß DE 612 735 A (1933) und DE 9 26 230 B (1953). Andere Entwicklungen setzen auf Hebelwirkung, ohne das Motorrad selbst bewegen zu müssen, wie beispielsweise die DE 539 051 A (1930) oder die DE 605 954 A (1934): Vom Sattel aus zieht der Motorradfahrer einen Hebel, der den Hauptständer zunächst in eine senkrechte Position unter der Maschine bringt und bei weiterer Betätigung die eigentlichen Stützfüße ausfährt, wobei das Motorrad gehoben wird. Neben einfachen Hebeln können auch regelrechte Getriebe eingesetzt werden, um die Hebekraft zu erzeugen, wie dies aus der DE 550 980 A (1932) hervorgeht. Die Kraft des Motorradmotors dafür zu nutzen, ist in der DE 486 634 A (1928), siehe Figur 2, vorgeschlagen: Um die Maschine aufzubocken, wird eine aus- und einfahrbare verzahnte Ständerstange b mit dem Stützfuß a ausgefahren. Dazu kuppelt der Fahrer durch Betätigung des Hebels i den Ständerantrieb mit der laufenden Motorwelle.



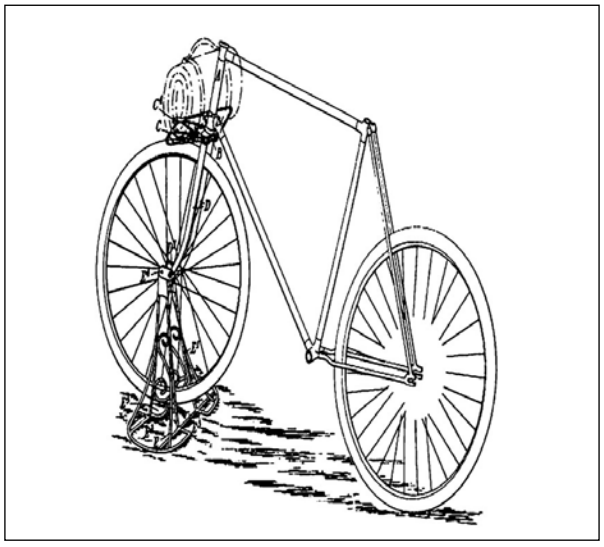
Figur 2: Motorgetriebener Motorradständer (aus DE 486 634 A)

Bei einer neueren Entwicklung steht im Vordergrund, den Fahrer beim Aufbocken des Zweirades mit Fremdkraft die vertraute Haptik eines manuellen Parkvorgangs erleben zu lassen. Hierzu verwenden die Erfinder des Verfahrens gemäß DE 10 2004 049 568 B4 (2004) eine Sensorik zur Bestimmung der Höhenlage des Motorradrahmens über dem Boden sowie ein mittels Kompressor belüftbares Feder-Dämpfer-Element, beispielsweise an der Hinterradschwinge. In Abhängigkeit der erfassten Höheninformation wird die Länge des Feder-Dämpfer-Elements so beeinflusst, dass nur noch ein leichtes Überheben zum Aufbocken erforderlich ist. Das Verhältnis von Ständerlänge und Rahmenhöhe wird somit den aktuellen Gewichtsverhältnissen angepasst. Der Fahrer kann dadurch den Parkvorgang wie gewohnt durchführen, benötigt dabei aber nur wenig Kraft. Für maximalen Komfort stellt die elektronische Steuereinheit einen alternativen Park-Modus zur Verfügung, der durch Knopfdruck initiiert werden kann. Dabei hebt sich der Rahmen soweit an, dass der Ständer bodenbe-

rührungsfrei in seine Halteposition abgesenkt und eingerastet werden kann. Anschließend senkt sich das Motorrad dann auf den Ständer.

3. Mehr als Stützen: Multifunktionales Zubehör

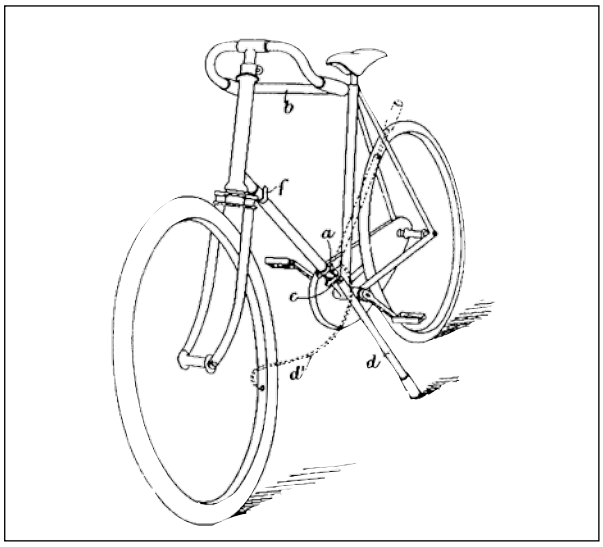
Das Vorankommen beim Fahrradfahren hängt stark von der zu bewegenden Masse ab. Daher wird ein ernstzunehmender Rennradfahrer Ballast wie eine Fahrradstütze gar nicht erst an sein Sportgerät schrauben. Für Normalradler aber, die Gewicht sparen und dennoch auf eine Fahrradstütze nicht verzichten möchten, sind die im Folgenden vorgestellten Erfindungen gedacht. Deren Grundgedanke ist, die Fahrradstütze für weitere Funktionen zu nutzen beziehungsweise sowieso mitgeführten Zubehörteilen die Stützfunktion beim Abstellen zu übertragen. So entstand früh der Vorschlag, den Gepäckträger oder Teile davon derartig zu gestalten, dass sie als Radständer benutzbar sind, wie dies die Konstruktion gemäß der DE 93 377 A (1897) vorsieht. Deren Besonderheit ist, neben der geschmackvollen Gestaltung im Stile ihrer Zeit, dass das Gepäck beim Parken auf dem eigentlichen Gepäckträger C (siehe Figur 3) verbleiben kann. Lediglich das während der Fahrt als Gepäckträgerstütze dienende Gestellteil E wird um die Vorderradachse heruntergeklappt.



Figur 3: Gepäckträgerstütze als Fahrradständer (aus DE 93 377 A)

Viele spätere Konstruktionen dieser Art mögen leichter gebaut sein, haben jedoch den Nachteil, dass das Gepäck beim Abstellen des Fahrrades abgeladen werden muss. Ein Beispiel für eine derartige Kombination von Gepäckträger und Fahrradstütze ist in der DE 437 577 A (1924) zu finden. Zusätzlichen Gebrauchswert bietet diese Vorrichtung, die für die Montage an Vorder- oder Hinterrad geeignet ist, im Hinblick auf eine platzsparende Lagerung des Fahrrades: Dieses kann aufgerichtet auf der entsprechend angeordneten Stütze auf den Boden gestellt und dabei mit dem Sattel an eine Wand gelehnt werden. Gleich drei Funktionen, nämlich Gepäckträger, Parkständer sowie Anfahrstütze vereint der Vorschlag gemäß DE 180 511 A (1905): Im Sattel sitzend kann der Radfahrer mittels eines Hebels am Oberrohr die Fahrradstütze einklappen und somit aus einer stabilen Position anfahren. Hierzu finden sich weitere Beispiele in Kapitel 8 dieses Beitrags. Die bodenfreie Aufstellung des Fahrrads zu Wartungszwecken ermöglicht der aus dem Gepäckträger gebildete Ständer gemäß DE 691 763 A (1937). Nicht nur Gepäckträger, auch Luftpumpen lassen sich als Fahrradstütze verwenden. Eine minimalistische Lösung hierzu zeigt die DE 672 585 A (1937): Ein speziell geformtes Verbindungsblech wird an der handelsüblichen Luftpumpe befestigt, die während der Fahrt in bekannter Weise am Fahrrad mitgeführt wird. Beim Abstellen des Fahrrades wird die Luftpumpe mittels des Verbindungsteils so am Fahrrad eingehängt, dass sich dieses darauf abstützen kann. Gegen einfache Wegnahme der Pumpe kann die Vorrichtung sogar absperrbar sein. Einfach und leicht ist auch die Fahrradstützpumpe gemäß der DE 849 961 B (1952), deren Kolbenstange in ausgezogenem Zustand durch eine Art Bajonettverschluß verriegelt wird, so dass die Pumpe eine Stützstange bildet. Eine Luftpumpenstütze mit herausnehmbarer Kolbenstange, die zusammen mit dem Pumpenzylinder einen Dreibein-Ständer für die bodenfreie Aufstellung des Fahrrades bildet, zeigt die DE 429 311 A (1925). Bei den bisher dargestellten Pumpen mit Stützfunktion wird in Kauf genommen, dass das Fahrrad gerade beim Aufpumpen, wofür regelmäßig zwei Hände erforderlich sind, nicht abgestützt ist.

Wem dies zu unkomfortabel ist, kann sich der in Figur 4 (aus DE 108 117 A [1899]) dargestellten Pumpe bedienen, die sowohl bei Ständer- als auch bei Pumpbetrieb (in Figur 4 gestrichelt) über ein Kugelgelenk a mit dem Fahrradrahmen verbunden bleibt. Indem der Benutzer die Pumpe beim Pumpen festhält, sichert er gleichzeitig das Rad gegen Umfallen. Der Druckausgang der Pumpe ist dann über einen Schlauch d´ mit dem jeweiligen Ventil der Luftreifen verbunden.

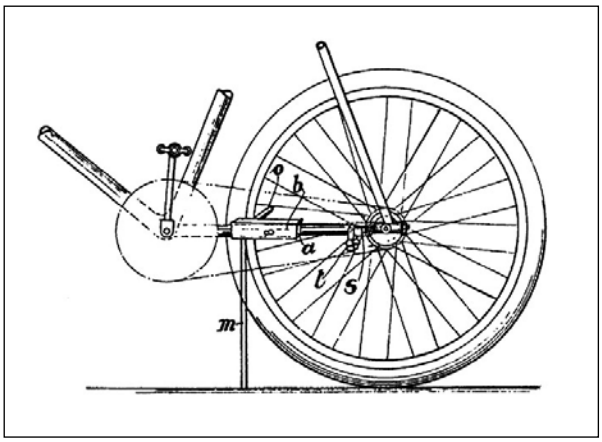


Figur 4: Luftpumpe als Fahrradstütze (aus DE 108 117 A)

Weitere Ideen, ohnehin vorhandene Anbauteile des Fahrrades einer Nutzung als Stütze zuzuführen sind für den Kettenschutz mit DE 825 056 B (1951), die Schutzbleche mit DE 490 861 A (1928) sowie DE 589 798 A (1933) und für eine abnehmbare Lenkstange mit DE 90 238 A (1896) veröffentlicht worden. Fotografische Aufnahmen vom Fahrrad aus soll die in DE 175 540 A (1904) vorgeschlagene Fahrradstütze mit integriertem Kamerastativ ermöglichen.

4. Gegen Langfinger: Ständer als Diebstahlschutz

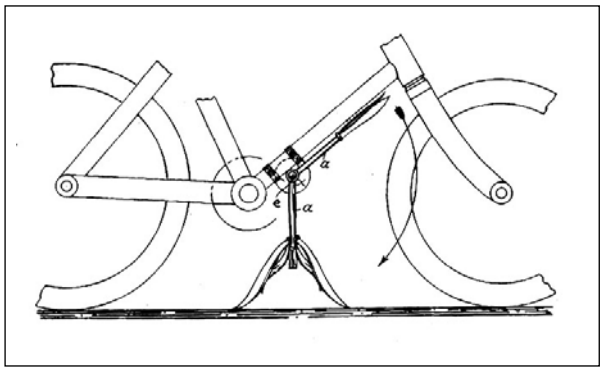
Typischer Einsatz für ein Fahrrad ist das Einkaufen in mehreren Ladengeschäften nacheinander. Vor jedem Laden steht die Fahrradbenutzerin oder der Fahrradbenutzer dann vor der Entscheidung, ob es gerade hier erforderlich ist, das abgestellte Fahrrad gegen Diebstahl zu sichern oder nicht. Aus Bequemlichkeitsgründen wird bei voraussichtlich kurzer Abwesenheit eine Sicherung manchmal unterlassen und somit das Risiko des Fahrraddiebstahls eingegangen. Eine große Zahl von Anmeldern sieht hier Handlungsbedarf, entsprechend zahlreich sind die Vorschläge für Fahrradstützen, die beim Abstellen des Fahrrades automatisch einen gewissen Diebstahlschutz bieten.
Hierzu vereinigt die ein- oder zweiarmig ausführbare Stütze gemäß dem Vorschlag der DE 93 475 A (1896) die Vorzüge eines auch heute aktuellen Speichen-Ringschlosses mit denen eines schwenkbaren Ständers. Beim Herunterklappen des oder der Ständerbeine umgreifen zwei zangenartige Schloßbügel das Hinterrad, wobei sich der Ständer gegen Zurückbewegen über ein Klinkengesperre selbsttätig verriegelt. Eine sehr einfache Konstruktion mit vergleichbarer Wirkung ist der DE 549 232 A (1930) zu entnehmen. Technisch elegant und den heute üblichen Seitenständern recht nahe ist die in der DE 439 207 A (1925) gezeigte Lösung, siehe Figur 5: Beim Ausklappen des Seitenständers m bewegt sich automatisch ein Sperrstift o zwischen die Speichen des Hinterrades.



Figur 5: Seitenständer mit Sperrstift (aus DE 439 207 A)

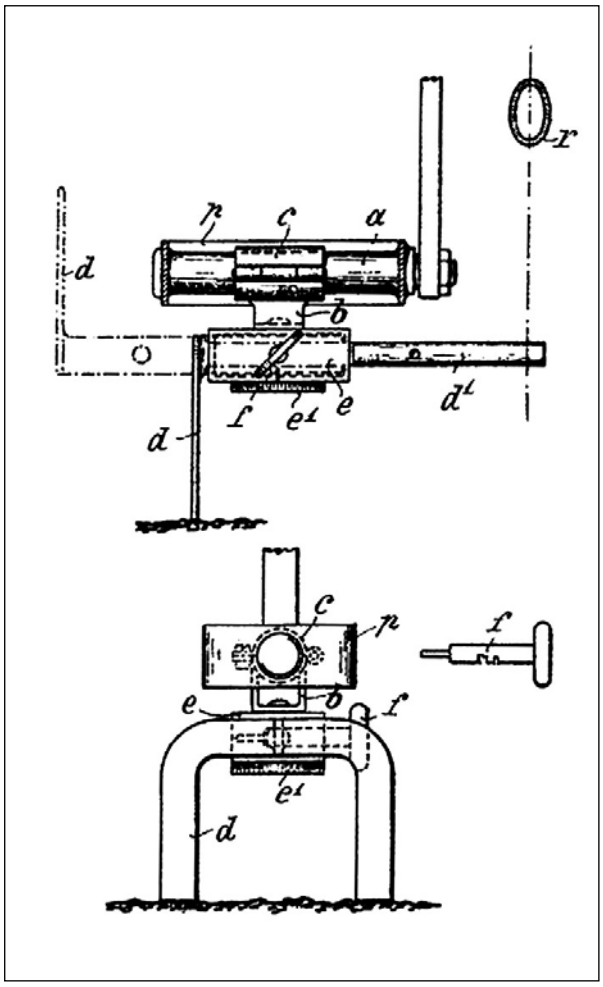
Zu diesem Fahrradständer ist über die Sicherungsfunktion hinaus zu bemerken, dass das Ausklappen von hinten nach vorne erfolgt. Bei einem Ausklappen während der Fahrt, beispielsweise durch ein Versagen der Halterung für die Ruhestellung, kommt es somit nicht unweigerlich zu einem Unfall.

Denn das Stützbein wird einfach mitgeschleift, ohne sich in der Fahrbahn verhaken zu können. Diese „passive Sicherheit“ ist nicht bei allen der frühen Fahrradstützen gegeben. Dies belegt beispielhaft die Stütze gemäß DE 159 444 A (1904). Man führe sich an Hand von Figur 6 unter Beachtung des die Schwenkrichtung anzeigenden Pfeils die Folgen eines unbeabsichtigten Ausklappens des Ständers während der Fahrt vor Augen!



Figur 6: Abschließbare Fahrradstütze (aus DE 159 444 A)

Mit einem Minimum an bewegten Teilen kommt schließlich der Ständer nach DE 590 016 A (1933) aus. Die Stütze selbst dient hier als Sperrriegel, indem sie durch die Speichen des Hinterrades gesteckt und im Schlossgehäuse verriegelt wird. Das Schloss ist mit der Achsmutter der Hinterradnabe am Ausfallende befestigt, wobei das Lösen der Achsmutter durch eine Abdeckung verhindert wird. Um das Wegschieben des Rades zu verhindern, schlägt der Autor der DE 84 750A (1895) vor, beim Ausklappen des durchaus modern wirkenden Ständerbeins Bremshebel gegen Vorder- und Hinterreifen zu drücken. Diese Idee ist auch Kern der mehr als hundert Jahre jüngeren Patentschrift DE 102 36 247 B4 (2002). Zur Sicherung des abgestellten Fahrrades gegen Bewegung wird die Hinterradbremse genutzt, indem deren Bowdenzug beim Ausklappen des Ständers angezogen und dieser dann verriegelt wird.
Eine Sonderstellung nehmen mit Alarmanlagen gekoppelte, kombinierte Stütz- und Absperrvorrichtungen ein. Diese machen sich häufig den Gedanken zu Nutze, Bewegungen des mittels Fahrradstütze abgestellten Rades zu detektieren, indem das oder die durch das Fahrradgewicht belasteten Stützbeine als „Bewegungsmelder“ dienen. Solche mit dem Ständer gekoppelten Alarmanlagen mit Schreckschussvorrichtungen zeigen die DE 114 005 A (1898) und die DE 112 522 A (1899). Beim Verschieben oder Anheben des auf der Stütze ruhenden Fahrrades wird eine Knallpatrone zur Explosion gebracht, um den Radbesitzer zu alarmieren. Ein kaltblütiger Fahrraddieb wird möglicherweise die Wirkung des Knalls abwarten und, wenn alles ruhig bleibt, das Fahrrad dennoch unauffällig davontragen. Damit ihm Letzteres nicht gelingt, schlägt der Erfinder der Vorrichtung gemäß DE 410 218 A (1924) die explizite Kennzeichnung eines Fahrrades als gestohlen vor: Beim Abstellen des Fahrrades fährt ein Federspeicher zwei Stützen neben dem Hinterrad aus, gleichzeitig wird eine optische Alarmvorrichtung scharfgestellt. Hebt ein Dieb das Fahrrad an, lässt der Federspeicher die Stützen weiter herausschnellen, wobei gleichzeitig ein Schild mit der Aufschrift „GESTOHLEN“ am Fahrrad sichtbar wird. Eine mit dem Ständer kombinierte akustische Alarmvorrichtung mit Läutewerk, das mittels Federspeicher oder elektrisch angetrieben wird, geht aus DE 726 764 A (1940) hervor.
Neben den ein- oder zweibeinigen, zumeist schwenkbaren Stützen soll schließlich die Bauform der Pedalstützen nicht unerwähnt bleiben: Die DE 417 757 A (1924) zeigt eine Pedalstütze d (siehe Figur 7) mit einer als Sperrstift dienenden Achse d1. Diese wird in Parkstellung in die Ebene des Rades r geschoben und mit dem Schloss e verriegelt, um eine unzulässige Benutzung des abgestellten Fahrrades zu unterbinden. Darüber hinaus ist diese Pedalstütze bereits mit zwei Kontaktstellen zum Boden ausgeführt, eine Gestaltung, die beispielsweise bei der später behandelten DE 10 2005 006 165 B4 aus jüngster Zeit wieder zu finden ist, vergleiche Figur 10.

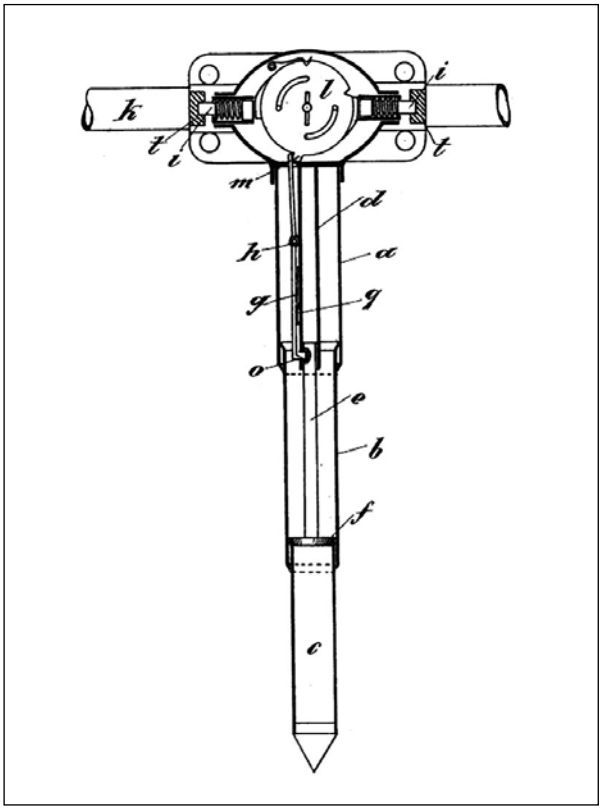


Figur 7: Abschließbare Pedalstütze (aus DE 417 757 A)

5. Ständer bei Bedarf: Abnehmbare Zweiradstützen

Sport-Fahrräder wie Rennräder oder Mountainbikes weisen, sofern es sich dabei tatsächlich um Sportgeräte handelt, aus Gewichts- und Sicherheitsgründen keine Stütze auf. Beim Familienausflug oder bei der Fahrt zum Einkaufen kann es aber gelegentlich wünschenswert sein, dennoch eine Stütze für derartige Fahrräder zur Verfügung zu haben. Hierzu ist in der DE 54 001 A (1890) ein einfach aufgebauter, abschließbarer Radständer vorgeschlagen, der ausweislich der Patentschrift in zusammengelegtem Zustand so klein ist, dass er in die Werkzeugtasche des Fahrrades passt. Dieser Ständer weist die Besonderheit auf, dass er an einem Laufrad, durch die Speichen greifend, festgeklemmt wird.

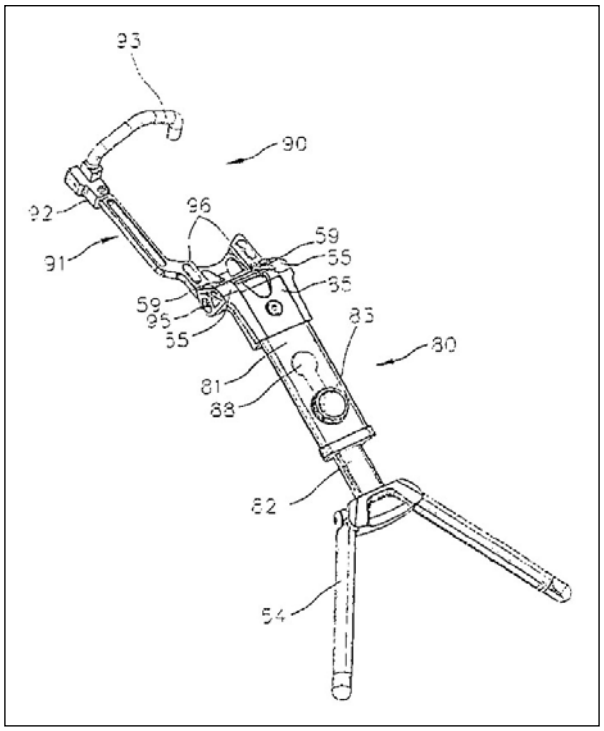
Ein weiterer zusammenlegbarer und mitführbarer Ständer ist aus der DE 88 631 A (1896) bekannt. Der abnehmbare Teleskop-Seitenständer gemäß der DE 106 683 A (1898), siehe Figur 8, wird an einer Kettenstrebe k des Fahrrades angebracht und dort verriegelt, um zusätzlich Diebstahlschutz zu bieten. Allerdings sind für die Verriegelung an der Kettenstrebe bereits montierte Anschlussteile, die so genannten Knaggen t, erforderlich.



Figur 8: Abnehmbarer Teleskop-Fahrradständer (aus DE 106 683 A)

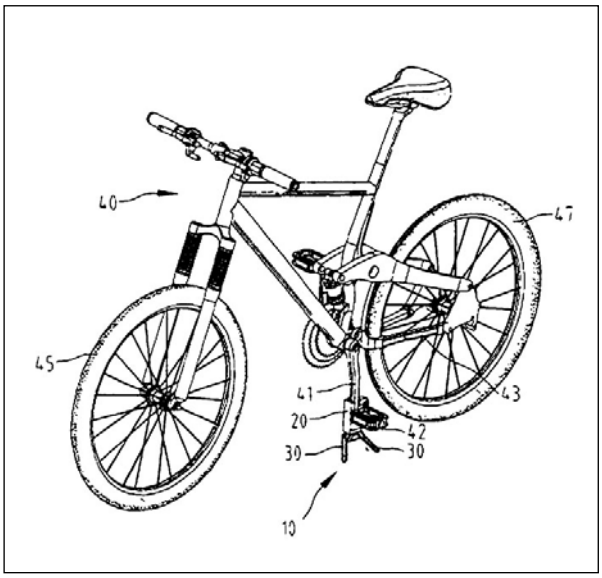
Universell einsetzbar ist dagegen die Fahrradstütze nach dem Vorschlag der DE 177 756 A (1905), die an ein Rahmenrohr des Fahrrades mittels Haken und Gabeln festzuklemmen ist. Im Nichtgebrauchszustand werden die Stützfüße in einen köcherartigen Behälter eingezogen. Eine auf das Nötigste reduzierte, aus Rundmaterial gebogene Stützvorrichtung ist der DE 80 350 A (1905) zu entnehmen. Eine vergleichbare Vorrichtung dient nahezu hundert Jahre später als Ausgangspunkt für die Überlegungen der Erfinder des Fahrradständers gemäß DE 10 2004 032 713 B4 (2004), die zu einer klein zusammenklapp-

baren und universellen Stütze geführt haben, siehe Figur 9. Der Ständer unterstützt das Fahrrad am Tretlager mit den Gummi-Unterlagen 59 und 96, wobei der Bügel 93 am Unterrohr eingehängt ist. Durch die Unabhängigkeit von der Gestaltung der Kettenstreben ist der Ständer auch für das Abstützen eines vollgefederten Fahrrades geeignet.



Figur 9: Abnehmbarer universeller Fahrradständer (aus DE 10 2004 032 713 B4)

Die alte Idee der Pedalstütze wird durch die abnehmbare Fahrrad-Pedalstütze aus der DE 10 2005 006 165 B4 (2005) wieder aufgegriffen, siehe Figur 10. Um eine Anpassung an verschiedene Raddurchmesser beziehungsweise Tretlagerhöhen zu ermöglichen, ist die den Kurbelarm umfassende Pedalstütze 10 in der Länge einstellbar.
Eine ähnliche Lösung für eine Pedalstütze zeigt auch die DE 10 2007 034 365 B4 (2007).

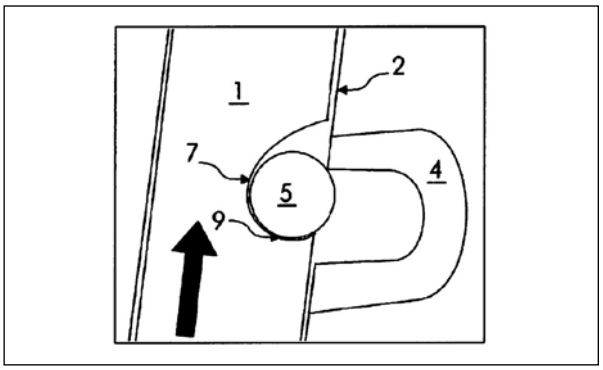


Figur 10: Abnehmbare Pedalstütze (aus DE 10 2005 006 165 B4)

6. Standfest am Hang: Stützen für geneigte Parkflächen

Die für stabilen Stand eines Fahrrades mit Seitenständer erforderliche Seitenneigung ergibt sich aus der Ständerlänge im Verhältnis zum halben Raddurchmesser. Diese Größe ist meist für die Ebene optimiert, weshalb ein stabiler Stand auf geneigter Abstellfläche Glückssache ist. Die Vorschläge für eine Anpassung an die Neigung der Abstellfläche gemäß DE 580 486 A (1930), DE 606 179A (1933) und DE 828 959 B (1950) haben gemeinsam, dass sie sich auf teleskopisch ausziehbare Seitenständer beziehen. Zu deren Bedienung wird das Kraft- oder Fahrrad zunächst in der gewünschten Neigung gehalten. Der Benutzer schiebt dann den Unterteil der ausziehbaren Stütze mit dem Fuß soweit heraus, bis der Stützfuß in Kontakt mit dem Boden kommt. Die Neigung, die das Zweirad letztlich in abgestelltem Zustand aufweist, hängt somit vom Benutzer ab, der zudem mit einem Fuß den Ständer betätigen muss, während er die möglicherweise schwere Maschine in Schräglage hält. Um hier Abhilfe zu schaffen, hat es sich der Erfinder des Fahrradständers gemäß der DE 10 2006 001 105 B4 (2006) zur Aufgabe gemacht, einen Seitenständer zu schaffen, dessen Länge sich vollkommen selbsttätig an eine geneigte Abstell-

fläche anpasst. Die in Figur 11 erkennbaren zwei teleskopisch ineinander verschieblichen Rohre 1 und 2, die den Seitenständer bilden, werden beim Erreichen einer konstruktiv vorgegebenen optimalen Neigung des Fahrrades durch eine formschlüssige Sperrvorrichtung gegeneinander verriegelt. Die Sperrvorrichtung besteht aus einer freibeweglichen Kugel 5, die beim Neigen des Fahrrades aus einem Kugelkanal 4 am Außenrohr 2 durch eine Bohrung in eine der Kerben 7 des Innenrohrs 1 rollt. Der Pfeil in Figur 11 verdeutlicht die Stützkraft, die vom Boden her auf die Sperrvorrichtung wirkt. Beim Entlasten der Sperrvorrichtung schiebt eine Druckfeder das Innenrohr 1 aus dem Außenrohr heraus, so dass die Kugel 5 in den Kugelkanal 4 zurückgedrückt wird.

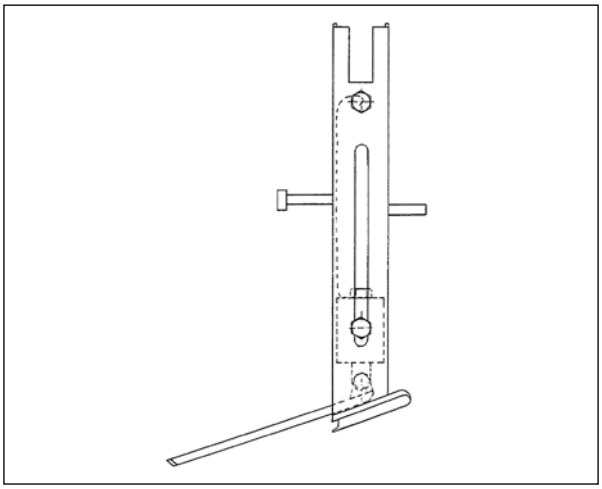


Figur 11: Sperrvorrichtung der Längeneinstellung (aus DE 10 2006 001 105 B4)

Mit zwei unabhängig voneinander durch ein Zugorgan betätigbaren Stützen arbeitet die DE 97 322 A (1896), wobei die Stützen in dem Moment verriegelt werden, in dem sie den Boden berühren. Einen an geneigte Untergründe anpassbaren Fahrrad-Mittelständer schlägt die Erfinderin in der DE 638 794 A (1934) vor. Der in Fahrstellung längs orientierte breite Ständerfuß wird zum Parken um 90 Grad gedreht, um eine große Abstützbasis zu bieten. Gegenüber dem Gestell ist der Ständerfuß, der mit dem Boden an zwei Stellen Kontakt hat, drehbar gelagert, wobei die Drehung mittels einer einstellbaren Reibkupplung gebremst ist. Indem der Benutzer das Fahrrad zunächst lotrecht zu einer bezogen auf die Fahrtrichtung seitlich geneigten Fläche positioniert, dann den Stützfuß absenkt und schließlich das Fahrrad gegen den Widerstand der Reibkupplung in die senkrechte Lage drückt, kann die Neigung der Abstellfläche ausgeglichen werden.

7. Nicht in Grund und Boden sinken: Stützen für weichen Untergrund

Wie das Abstellen eines Zweirades auf geneigter Fläche kann auch das Parken auf weichem Untergrund zum Problem werden. Der Stützfuß handelsüblicher Zweiradständer ist oft von so kleiner Fläche, dass er auf unbefestigtem Boden einsinkt und das Gefährt umkippt. Abhilfe ist nicht so einfach, wie es zunächst scheint, da ein größerer, tellerförmiger Stützfuß viel Platz beansprucht und dadurch bei der Bedienung des Fahrzeugs hinderlich ist. Daher sieht der Erfinder des Motorrad-Seitenständers gemäß DE 196 09 997 C1 (1996) eine ausklappbare Zusatzauflagefläche vor, die in Figur 12 links unten erkennbar ist. Diese kann im Bedarfsfall fußbetätigt aus dem Ständergehäuse ausgeklappt werden und zieht sich beim Entlasten des Ständers durch Federwirkung selbsttätig wieder in das Gehäuse zurück.

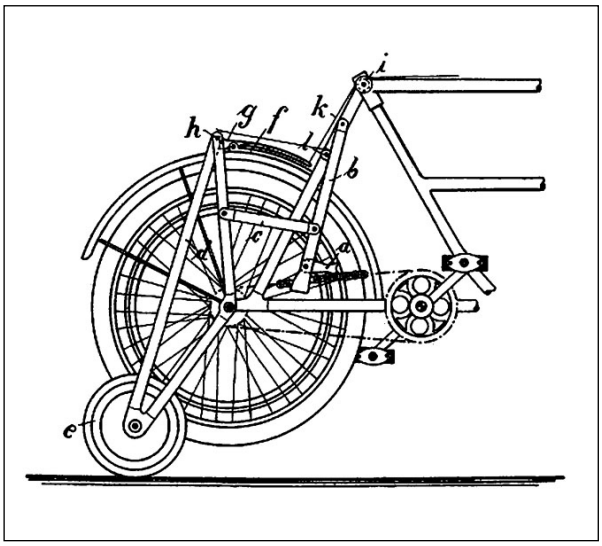


Figur 12: Zweiradständer mit Zusatzauflagefläche (aus DE 196 09 997 C1)

Ein kompaktes Transportmaß weist die in DE 198 54 289 C2 (1998) vorgeschlagene separat am Zweirad mitzuführende Seitenständerunterlage auf, die vermöge raffiniert-einfacher Konstruktion zu einer starren Platte auffaltbar ist.

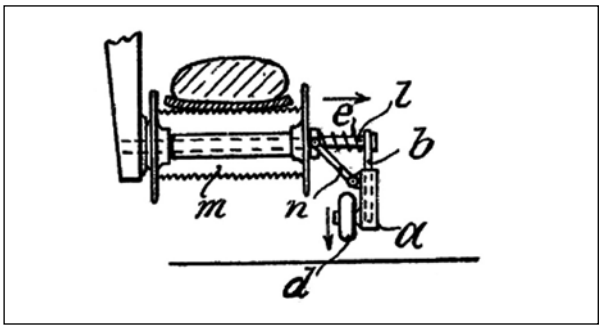
8. Fest im Sattel: Aufrecht Stehen im Haltezustand

Physikalisch bedingt besteht bei jedem Zweirad bei geringen Fahrgeschwindigkeiten ein Stabilitätsproblem. Ist beim Anfahren, beispielsweise an einer Verkehrsampel, auch noch versehentlich ein zu großer Gang gewählt, kommt der Radfahrer „nicht richtig weg". In Folge der nötigen Ausgleichsbewegungen kann dies zu Kollisionen mit neben ihm befindlichen Fahrzeugen führen. Sehr viele Erfinder haben in Anbetracht dessen Stützen vorgeschlagen, die im Stillstand und/oder bei langsamer Fahrt das Zweirad aufrecht halten. So ist ein Verbleiben des Rad- oder Motorradfahrers im Sattel möglich, ohne dass sich dieser mit den Füßen am Boden abstützen muss. Ein Beispiel für manuell betätigte Stützen dieser Art sind Stützräder, die beiderseits des Vorderrades durch Betätigung von der Lenkstange aus abgesenkt werden können, wie in DE 52 315 A (1889) gezeigt. Ebenfalls durch Handbetätigung werden die Stützen gemäß DE 93 569 A (1896), DE 290 619 A (1915), DE 543 862 A (1929), DE 835 700 B (1950) und DE 880 559 B (1951) aktiviert. Mit der Einleitung eines Bremsvorgangs durch Hebelbetätigung an der Lenkstange koppelt der Autor der DE 182 754 A (1906) das Absenken der Stützräder.
Ein gewisser Grad an Automatisierung zeichnet die sich beim (Wieder-)Anfahren automatisch einziehenden seitlichen Stützen gemäß DE 102 945 A (1898) aus. Für diese Funktion sind die am Hinterbau geführten Stützen als Zahnstangen ausgebildet, die wahlweise mit Ritzeln koppelbar sind, die auf der Hinterachse sitzen. Elegant auch die Lösung wie sie in DE 169 700 A (1905) verwirklicht ist: Das Ausfahren der Stützräder erfolgt durch Rückwärtstreten im Zuge des Anhaltens, wobei dann die federbelastete Sperrklinke a (siehe Figur 13) in die Fahrradkette einrastet und die Hebel b und c mitnimmt, so dass die um die Hinterradachse schwenkbare Stützvorrichtung abgesenkt wird. Das Hinterrad hebt sich, bis es vom Boden frei ist, und die Vorrichtung verriegelt. Durch Betätigen des Schnurzuges k erfolgt das Entsperren, und der Fahrer kann durch langsames Vorwärtstreten das Hinterrad absenken, um die Fahrt fortzusetzen.



Figur 13: Durch Rückwärtstreten aufgebocktes Hinterrad (aus DE 169 700 A)

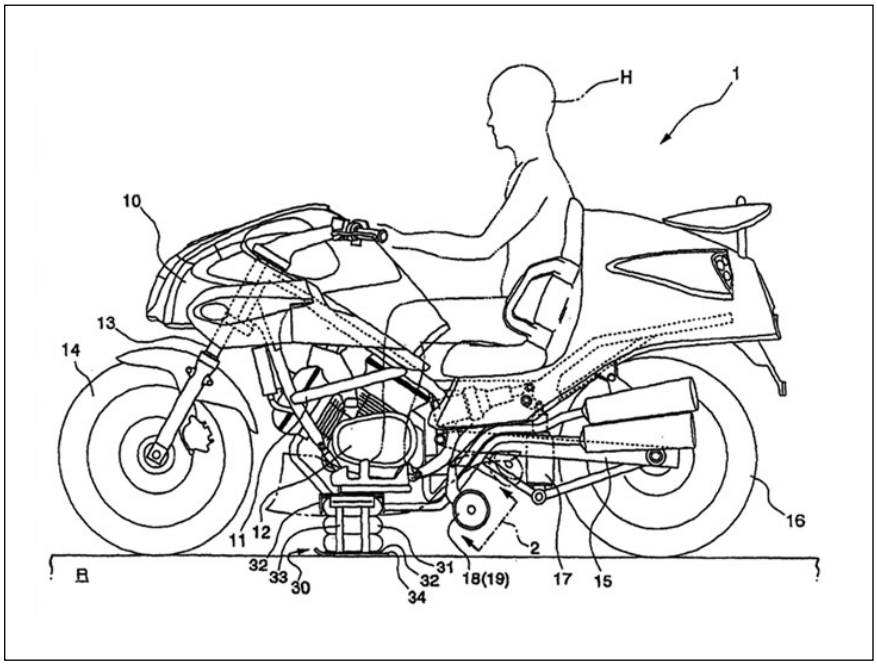
Wesentlich weniger Bauaufwand erfordert die Pedalstütze gemäß DE 452 599 A (1926), die eine durch Fußbewegung in Richtung des waagerechten Pfeiles (siehe Figur 14) ausfahrbare Anfahr- und Stillstandsstütze mit Rädern d aufweist. Funktional vergleichbare Pedalstützen gehen aus der DE 475 359 A (1927) und der DE 483 630 A (1928) hervor.



Figur 14: Fußbetätigte Pedalstütze (aus DE 452 599 A)

Für einspurige Kraftfahrzeuge interessant ist die Lösung gemäß der DE 406 847 A (1921), bei der die Kraft zum Ausfahren der seitlichen Stützräder vom Fahrzeugmotor aufgebracht wird. Im Schaltgetriebe befindet sich eine ein- und ausrückbare Kupplung, die beim Hochschalten vom ersten in den zweiten Gang, also beim Beschleunigen, automatisch ein Hochklappen und beim Herunterschalten wieder ein Absenken der Stützräder bewirkt.
Den Stützrädern zum Sichern des aufrechten Stillstandes verwandt sind Vorrichtungen, die ein

Kippen von Zweirädern bei schneller Fahrt verhindern. So lehrt die DE 615 671 A (1934), die Neigung eines Motorrads über eine elektrisch ausgewertete Pendelstellung zu erfassen und in Abhängigkeit davon auf der Kurveninnenseite Stützräder abzusenken. Eine mechanische Sensierung der Motorradneigung zeigt die ältere DE 448 563 A (1925).
Da keine Technik frei von Fehlern ist, besteht die Möglichkeit des Versagens der seitlichen Stützräder an einem damit ausgestatteten Motorrad. Vor diesem Hintergrund schlagen die Autoren der DE 10 2005 000 806 B4 (2005) vor, zusätzlich zu seitlich ausfahrbaren, konventionellen Stützrädern 18 und 19 ein redundantes Stützelement 30 nach Art von mit Gas befüllbaren Balgelementen 31 oder Airbags vorzusehen, siehe Figur 15. Der Balg 31 ist, um leicht über die Fahrbahn gleiten zu können, mit einer kufenartigen Bodenplatte 34 aus Kunststoff versehen. Somit ist bei Versagen der konventionellen Seitenstützräder 18 und 19 eine reaktionsschnelle Abstützung gegeben. Diese zusätzliche Sicherheit soll nach dem Wunsch der Erfinder auch Menschen mit körperlichen Behinderungen das Motorradfahren ermöglichen, wenn diese nicht in der Lage sind, ihre Beine zum Abstützen der Maschine zu gebrauchen.



Figur 15: Redundante Motorradstütze (aus DE 10 2005 000 806 B4)

9. Ausblick

Bei Annäherung an die umfangreiche, bereits existierende Patentliteratur zum Thema der Zweiradstützen und in Anbetracht der zahllosen weiteren Ideen auf diesem Gebiet, die als Gebrauchsmuster angemeldet sind, mag die Frage auftreten, was es denn hier noch zu erfinden gebe. Derlei Sorgen sind jedoch unbegründet: Zum einen lehrt die Erfahrung, dass es fast für jedes alltägliche Problem eine neue Lösung gibt, die zumindest ein bisschen kostengünstiger, leichter, komfortabler oder zuverlässiger ist als die aus dem Stand der Technik bekannte. Zum anderen verändern sich die Bedürfnisse der Zweiradfahrer über der Zeit, so dass auch Vergessenes wieder in den Fokus der Anmelderschaft rückt: So spiegelt etwa die in den letzten Jahren gesteigerte Anmeldertätigkeit auf dem Gebiet der abnehmbaren, kleinen und leichten Zweiradstützen die inzwischen große Durchsetzung des Marktes mit Mountainbikes als Sport- und Alltagsgefährt wieder.
Möglicherweise entsteht darüber hinaus durch die zunehmende Verbreitung von Fahrrädern mit elektrischem Hilfsmotor, deren Zielgruppe in Folge des demografischen Wandels in Deutschland ständig wächst, Bedarf und – dank der bereits in diesen Fahrzeugen vorhandenen elektrischen Komponenten – Potential für automatische Stützen, die das sichere Anfahren erleichtern. Letztere könnten schließlich auch dabei helfen, künftige energieeffiziente motorisierte Einspurfahrzeuge sicher und komfortabel am Straßenverkehr teilnehmen zu lassen und somit zu deren Verbreitung beitragen.

Seismometer – Erdbeben auf der Spur

Dr. Klaus Wollny, Patentabteilung 1.52

In seinem Leben von einem Erdbeben betroffen zu sein ist für jeden Menschen eine einschneidende Erfahrung. Der Boden auf dem man geht und steht, lebt und arbeitet ist keine fixe Größe mehr und das Urvertrauen, sich an Land auf „festem Grund“ zu befinden, ist gestört. Seit dem Altertum versuchen Menschen diesem Phänomen auf den Grund zu gehen und die Natur der Beben zu erforschen. Hierbei entwickelten sie immer raffiniertere Messgeräte, von denen dieser Artikel ohne Anspruch auf Vollständigkeit handelt. Als Quelle dienen vor allem Patentdokumente der letzten 130 Jahre aus den Gruppen G01V 1/16 und 1/18 der internationalen Patentklassifikation sowie die einschlägige Fachliteratur.

1. Erdbeben und Menschen

Der Mensch muss ein Erdbeben als eine Naturgewalt erdulden, die scheinbar unvorhersehbar und ohne Vorwarnung losbricht. Andere Naturkatastrophen wie Stürme, Überschwemmungen oder starke Temperaturschwankungen kündigen sich auf verschiedene Weise an und lassen ihm wenigstens etwas Zeit zu reagieren. Er kann sich mit Glück in windgeschützte, höher gelegene oder lebensfreundlichere Gefilde zurückziehen. Bei Erdbeben scheint dies aussichtslos. Diese potenziell deprimierende Ausgangslage hat Forscher und Entwickler aber nicht davon abgehalten, sich mit der Natur von Erdbeben zu beschäftigen. Ihre Arbeiten prägen unser heutiges Verständnis der Geologie, auch wenn nach wie vor viele Fragen offen bleiben, und Erdbeben nicht pauschal vorhersagbar sind.

Als unverzichtbare Hilfsmittel schufen sie spezielle Geräte, die fähig sind, ein Erdbeben anzuzeigen oder die von ihm ausgehenden Wellen zu messen und aufzuzeichnen. Sie sollen der Schwerpunkt des vorliegenden Artikels sein, wenn auch einige andere Entwicklungen, die bei ihrer Konstruktion und der stetigen Verbesserung ihrer Funktionsfähigkeit von Bedeutung waren, ebenfalls erläutert werden.

Da Forscher auf dem Gebiet der Erdbebenkunde ihre Apparaturen nur selten patentieren lassen, werden Experten im Folgenden manchen berühmten Namen vermissen. Aber auch weniger bekannte Fachleute haben sehr kreative und wichtige Beiträge zum Bau einschlägiger Messgeräte geleistet. Mag dieser Artikel ein kleines Forum für ihre Arbeiten sein, wenn auch aus einer für diese Wissenschaft eher ungewohnten Perspektive.

2. Ausgangssituation und Kernfragen

Beschäftigt man sich mit Erdbeben, muss man global denken, denn der Planet Erde ist in diesem Punkt ein weitgehend geschlossenes System. Diese banale Aussage gründet auf einem jahrtausendelangen Erkenntnisprozess, der viele Weltbilder zerstört und Theorien revidiert hat. Selbst heute mit der Fülle von Messstationen und aller inzwischen gewonnenen Hintergrundinformation sind wir uns über den inneren Aufbau der Erde im Detail noch nicht völlig klar und können nur selten vorhersagen, wann einzelne geologische Ereignisse eintreten werden. Dies liegt am Untersuchungsobjekt an sich.

Die Erde ist für den Menschen von der Dimension her – im wahrsten Sinne des Wortes – schwer zu „begreifen“. Er kann sie daher auch nur mühsam beobachten und zunächst nicht in sie „hineinsehen“.

Teils weil ihm die Sinne dazu fehlen, teils weil ein Menschenalter allein nicht ausreicht, um sich über gewisse Zusammenhänge klar zu werden. Deshalb dauerte es ungewöhnlich lang, bis Erfolg versprechende Ansätze für die Untersuchung von Erdbeben existierten. Erdbeben treten nicht relativ kurzperiodisch auf wie andere Naturphänomene, etwa die Nilhochwasser, der Monsun oder die Gezeiten, für die es dem Menschen schon vor Jahrtausenden gelang, recht zuverlässige Vorhersagen zu erstellen. Daher muten die ersten Ansätze Erdbeben auch nur anzuzeigen im Prinzip sehr primitiv an (siehe Kapitel 4.1).

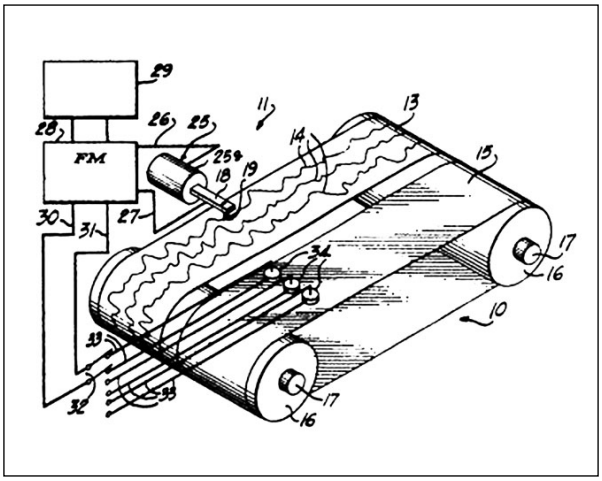
Der Mensch musste über Generationen, Länder und Kulturkreise hinweg lernen, anhand von Beobachtungen aller Art auf Anzeichen für ein Beben zu schließen oder dessen Auswirkungen richtig zu dokumentieren. Damit dies auch nur ansatzweise gelingen konnte, bedurfte es unterschiedlichster Informationen, die sich an folgenden Kernfragen orientieren:

- Wo kann ein Erdbeben stattfinden?
- Warum tritt dieses Beben auf?
- Wie kann sich das Beben an einem konkreten Ort auswirken?

Um diese auch nur rudimentär zu beantworten, müssen die geologischen Zusammenhänge global und lokal erfasst, geografische Häufigkeitsverteilungen von Beben dokumentiert und weltweit vernetzte Messstationen aufgebaut werden. Hierbei kommt den in den Messstationen installierten Messgeräten die entscheidende Rolle zu. Daher sei zunächst deren Namensgebung erläutert, bevor ein geschichtlicher Überblick und messtechnische Einzelheiten vorgestellt werden.

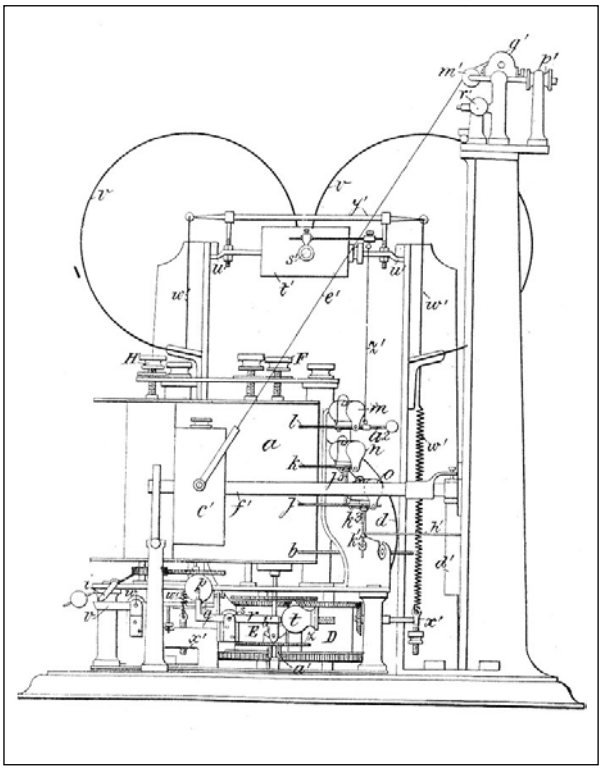
3.Begriffsdefinitionen

Erdbebenmessgeräte werden über die Namensgebung entsprechend ihren Fähigkeiten charakterisiert. Allen Bezeichnungen sind die beiden Anfangssilben gemeinsam, die sich vom altgriechischen seismós ableiten, das „Erschütterung“ bedeutet. Je nachdem, ob das Messgerät nur ein Beben anzeigen kann (altgriechisch: *skopeîn* = sehen), ein Beben aufgezeichnet wird (altgriechisch: *grapheîn* = schreiben), oder ein Beben allgemein „gemessen“ (altgriechisch: *metreîn* = messen) werden soll, bezeichnet man diese Geräte als Seismoskop, Seismograf oder Seismometer. Die letzten beiden Ausdrücke werden in der Praxis oft synonym gebraucht. Die grafische Aufzeichnung von Erdbebenwellen wird als Seismogramm (eine Vergangenheitsform von altgriechisch: *grapheîn*; sinngemäß: das was aufgeschrieben wurde) bezeichnet. Wie ein Seismogramm in der Praxis aussehen kann, zeigt zum Einstieg die Figur 1 (aus FR 1 181 561 A).



Figur 1: Prinzipskizze für die Aufzeichnung eines Seismogramms (aus FR 1 181 561 A)

Ein Beispiel für den recht komplexen mechanischen Aufbau eines Seismografen liefert GB 1887-3046 (Figur 2). Sie hat das erste patentierte Vertikal-Seismometer von Gray und Milne aus dem Jahre 1887 zum Inhalt.



Figur 2: Seismograf von Gray & Milne (aus GB 1887-3046)

4. Die Anfänge der Messtechnik

Wie die Geschichte von Seismoskopen und Seismometern nach heutigem Kenntnisstand angefangen hat, soll der folgende kurze Einschub darstellen. Für einen detaillierteren historischen Überblick und die hiermit befassten Personen sei auf die umfangreiche Fachliteratur verwiesen ([4],[5],[7],[8],[12],[13]).

4.1 Chinesisches Altertum

Um das Jahr 132 nach Christus soll der kaiserlich chinesische Astronom Zhang Heng (nach [13] auch in der japanisierten Form als Chôko aufgeführt) ein Seismoskop entwickelt haben, das erstmals das Auftreten eines Erdbebens dokumentieren konnte. Es gelang mit diesem aber noch nicht, wie der Name schon sagt, den Verlauf oder die Art der Bebenwellen aufzuzeichnen ([3],[14]). Eine äußerlich beeindruckende Replik der Apparatur steht im Foyer der Weltorganisation für geistiges Eigentum (WIPO) in Genf (Figur 3).



Figur 3: Nachbildung von Zhang Hengs Seismoskop (mit freundlicher Genehmigung von Lutz Mailänder)

Leider existieren nur Spekulationen über den Wirkmechanismus. Eine Theorie besagt, dass sich im Inneren eines zylindrischen Gefäßes ein invertiertes Pendel befand, das über Hebelmechanismen mit acht auf dem Umfang desselben platzierten Drachenfiguren radial in Verbindung stand (links). Die Drachen trugen in Ruhestellung jeweils eine arretierte Kugel im Maul (rechts) und unterteilten das Gefäß in acht gleichgroße Sektoren, die den Himmelsrichtungen entsprachen. Wurde nun durch ein Beben das Pendel in Schwingung versetzt und über den Hebelmechanismus eine Kugel ausgelöst, fing diese eine direkt unter dem Drachen platzierte Froschfigur in ihrem Maul auf. Dadurch soll die grobe Richtung, aus der Bebenwellen den Messpunkt erreichten, bestimmt worden sein, jedoch steht die Funktionsfähigkeit dieses Messprinzips in Frage ([14]).

Weitere Seismoskop-Entwicklungen aus Asien oder dem europäischen Raum sind bis zum 18. Jahrhundert aus der Literatur nicht bekannt, so dass Zhang Hengs Erfindung wohl eine Singularität in der Geschichte der Erdbebenkunde darstellt.

4.2 Europa ab dem 18. Jahrhundert

Die Überlieferung vermeldet erst im Jahre 1703, also knapp 1600 Jahre nach Zhang Hengs Apparatur, ein weiteres Seismoskop und zwar das des französischen Abbé Jean de Hautefeuille (1647-1724). Allerdings existiert kein Beweis, dass dieses auch

tatsächlich gebaut wurde. Der Abbé schlug als Anzeigemittel Quecksilber vor, das in einer Schüssel verwahrt wurde und im Falle eines Erdstoßes über im Schüsselrand angebrachte Kanäle in unter diesem Behälter stehende Auffanggefäße fließen sollte ([10]). Die Menge des aufgefangenen Quecksilbers sollte ein Maß für die Bebenstärke sein.

Einen komplett anderen Bebenanzeiger dachte sich der Neapolitaner Nicola Cirillo aus. Im Jahre 1731 verwendete er zum ersten Mal die durch ein Beben ausgelösten Schwingungen eines Pendels zu dessen direkter Beobachtung ([14]). 1751 konzipierte Andrea Bina (1724-1792) aus Perugia ein Pendel mit einer Nadel, damit dieses etwaige Ausschläge mit wenig Reibung in Sand zeichnen konnte und so ein Beben „grafisch" festhielt ([12]). Man kann dieses Gerät durchaus als ersten Seismografen bezeichnen, wenn auch die Aufzeichnung des Bebens aufgrund des gewählten Materials natürlich nicht von Dauer war. Ein weiterer Italiener, Ascanio Filomarino (1749-1799), sicherte ein Pendel mittels eines Haares, das mit der Unruh einer Uhr verbunden war. Wurde diese Sicherung durch das Schwingen des Pendels gelöst, fing die Uhr an zu laufen und es war erstmals möglich, den Auslösezeitpunkt zurückzurechnen ([6]). In dieser Tradition wurden bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts weitere Optimierungen an Seismometern und Erdbebenaufzeichnungen vorgenommen, ohne jedoch bahnbrechende Neuerungen hervorzubringen. Ein Grund hierfür war unter anderem, dass nur eine spärliche internationale Zusammenarbeit existierte und Erdbeben aus geologischen Gründen lediglich einige oft wirtschaftlich wenig potente Nationen in für menschliche Dimensionen relativ großen Zeitabständen heimsuchten.

4.3 Die beiden Messprinzipien eines Seismometers

Mitte bis Ende des 19. Jahrhunderts vervielfachte sich in kurzer Zeit das Wissen in allen Naturwissenschaften und auch die Kunst der Feinmechanik erreichte qualitativ höchstes Niveau. Seit den 1870er Jahren wurde vor diesem Hintergrund auch verstärkt am Verständnis von Erdbeben geforscht. Der Einsatz von Pendeln aller Art als instrumenteller Grundbaustein in Seismometern erschien hierfür am erfolgversprechendsten ([13],[16]), wenn auch mit einfacheren Mitteln experimentiert wurde, um Bodenverformungen zu messen.

Aus diesem Vorgehen haben sich zwei Messprinzipien für Seismometer herauskristallisiert, die in den folgenden Abschnitten mit ihren technischen Charakteristika vorgestellt werden:

- Messung der Bodenbewegung am Ort eines Seismometers
- Messung der am Ort eines Seismometers erzeugten Bodendeformationen.

Der Schwerpunkt liegt auf den Bewegungen anzeigenden Pendelseismometern (Kapitel 5), da diese heute die größte praktische Bedeutung und Verbreitung besitzen. Die Deformationen messenden Strainseismometer werden nur knapp abgehandelt (Kapitel 6).

5. Pendelseismometer

Pendelseismometer bestehen aus einem Pendelkörper, der oft auch seismische Masse genannt wird, und einer Vorrichtung, die diesen Körper hält, wie etwa ein Gestell mit einer Aufhängung für den Pendelkörper. Das Gestell ist fest im Erdboden verankert und vollzieht bei einem Erdbeben die Bewegung des Bodens mit. Die seismische Masse versucht hingegen aufgrund ihrer Trägheit in Ruhe zu bleiben. Dies kann aber nicht vollständig gelingen, da die Aufhängung, oft eine Feder, mit einer gewissen Verzögerung auch auf die seismische Masse einwirkt.

Für einen Beobachter auf dem Erdboden erscheint es bei einem Beben, als ob das Pendel selbst aufgrund des Bebens schwingt, im Wesentlichen bewegt sich jedoch zunächst das Bezugssystem des Gestells (und des Beobachters) gegenüber dem der seismischen Masse. Die Aufhängung der

seismischen Masse bewirkt aber letztlich, dass der Pendelkörper zu einer erzwungenen Schwingung angeregt wird. Diese Bewegung kann auf unterschiedlichste Weise aufgezeichnet werden, wie in Kapitel 5.3. genauer beschrieben wird.

Zunächst ist es jedoch wichtig nachzuvollziehen, wie diese Konstruktion die eigentliche Bodenbewegung oder eine daraus abgeleitete Größe darzustellen vermag, denn einmal angeregt schwingt das Pendel zunächst auch ohne erneuten Impuls weiter. Dazu muss man wissen, dass das „Feder-Pendelmasse-System" je nach Masse des Pendelkörpers, Steifigkeit der Feder und einem später betrachteten Dämpfungsfaktor ein charakteristisches Schwingungsverhalten aufweist, das durch die Eigenperiode T_e des Pendels charakterisiert wird.

Das heißt, wenn man das Pendel zum Schwingen anregt, wird es bei konstanter Masse mit einer umso größeren Eigenperiode T_e schwingen, je kleiner die Federsteife ist. Könnte man als ein Extremfall eine Feder konstruieren, die keine Steifigkeit mehr aufweist, wäre T_e unendlich und das Pendel bliebe idealerweise in Ruhe. Nur in diesem Fall würde das Pendel die Bodenbewegungen bei einem Beben eins zu eins abbilden können und als – den Namen im strengen Sinne rechtfertigender – absoluter **Bewegungsmesser** arbeiten.

Dies ist in der Realität nicht möglich. Dieser scheinbare Nachteil kann aber auch genutzt werden, indem man versucht T_e des Pendels beispielsweise mit einer möglichst unnachgiebigen Feder so klein wie möglich zu halten. Die auf die Pendelmasse wirkenden Kräfte sind dann als quasi statisch anzusehen und verursachen Pendelauslenkungen, die direkt proportional zu diesen Kräften sind. Nach dem zweiten Newtonschen Gesetz folgt, dass diese dann auch direkt proportional zur Bodenbeschleunigung sind, was heißt, dass das Pendel in diesem anderen Extremfall als **Beschleunigungsmesser** arbeitet.
Von diesen theoretischen Voraussetzungen eines gedämpften harmonischen Oszillators ausgehend wurden für die Erdbebenaufzeichnung Bewegungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmesser auf Basis von Feder-Pendelmasse-Systemen entwickelt. Dies ist möglich, da sie je nach geometrischer Dimensionierung und Konstruktion für verschiedene Frequenzen eines Bebens unterschiedlich empfindlich konzipiert werden können. Als Beispiel sei DE 2 157 812 A angeführt, die zeigt, wie T_e an einem Seismometer in Grenzen reguliert und somit der Charakter eines Seismometers festgelegt werden kann.

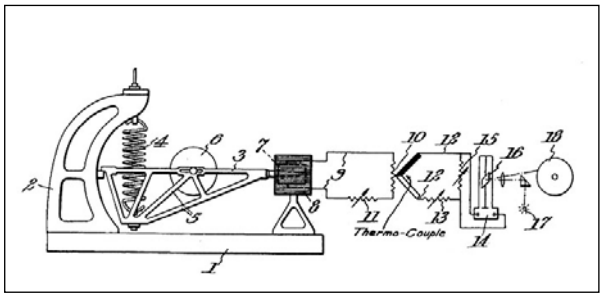
Erdbeben senden Energie in Form von Bebenwellen aus, die prinzipiell das gesamte Spektrum abdecken. Sehr hochfrequente Wellen werden jedoch bereits in Herdnähe vom Gestein absorbiert. Registriert werden mit modernen Apparaturen Frequenzen im Bereich von 10^2 Hz bis 10^{-4} Hz. Bebennah – also wenige Dutzend Kilometer vom Bebenherd entfernt – eingesetzte Seismometer sind daher eher im „hochfrequenten" Spektralbereich empfindlich, bebenferne – mehrere Hundert Kilometer vom Herd entfernte Systeme – zeichnen meist im niederfrequenten Spektralbereich auf. Kein Seismometer ist baulich geeignet, das gesamte Spektrum aufzuzeichnen, sondern arbeitet nur in einem streng definierten Frequenzbereich.

5.1 Die Komponenten einer Pendelaufzeichnung

Die Aufzeichnung von Erdbebenwellen ist nur dann sinnvoll, wenn man damit ihr räumliches Ausbreitungsverhalten energetisch und vom Frequenzspektrum am Ort der Aufzeichnung her erfassen kann. Daher wird das Bebensignal in Form von drei unabhängig voneinander aufgezeichneten und jeweils senkrecht aufeinander stehenden Komponenten dokumentiert. Weit verbreitet ist eine Messgeometrie, in der eine Komponente vertikal zur Erdoberfläche und zwei horizontal zur Erdoberfläche angeordnet sind. Die Horizontalkomponenten werden dann zweckmäßigerweise nach geografisch Nord-Süd und Ost-West orientiert (selten werden auch Systeme mit Komponenten verwandt, die sich an der Geometrie eines auf einer Ecke stehenden Würfels und seiner Kanten orientieren).

Für jede einzelne Komponente muss in der Praxis ein eigenes Feder-Pendelmasse-System realisiert werden. Hierbei gilt natürlich, dass so ein System nur dann auf die Bewegung des Erdbodens reagiert, wenn diese Bewegung vektoriell auch einen Richtungsanteil aufweist, der senkrecht auf der Ebene steht, die den Schwerpunkt der Pendelmasse und den Drehpunkt des Pendels enthält. Für Feder-Pendelmasse-Systeme, die die Vertikalkomponente eines Bebens aufzeichnen, hat sich der Name Vertikalpendel und für die, die eine horizontale Komponente messen, Horizontalpendel eingebürgert.

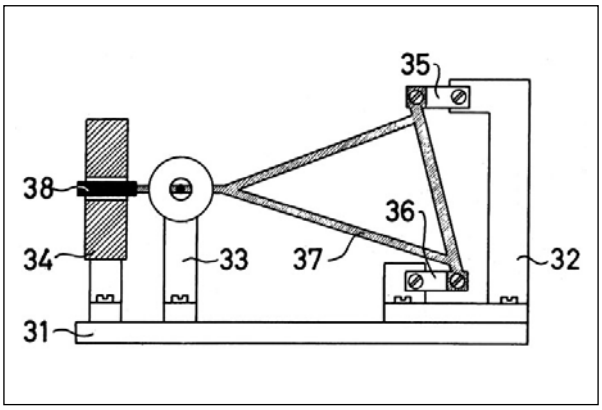
Wie eine Vertikalpendelanordnung in ein Seismometer eingebaut wird, um dort die senkrechten Bewegungen des Erdbodens messen zu können, ist etwa der Figur 4 zu entnehmen (US 1, 784, 415 A von Hugo Benioff (1899-1968) aus dem Jahre 1927). Das eigentliche Pendel (3,5,6) ist horizontal an einem Gestell 2 gelagert und die Feder M ist als Aufhängung mit für die Auslösung der Vertikalbewegung zuständig. Der Hebelarm 3 bewegt sich somit in der Bildebene.



Figur 4: Vertikalseismograph (aus US 1784 415 A)

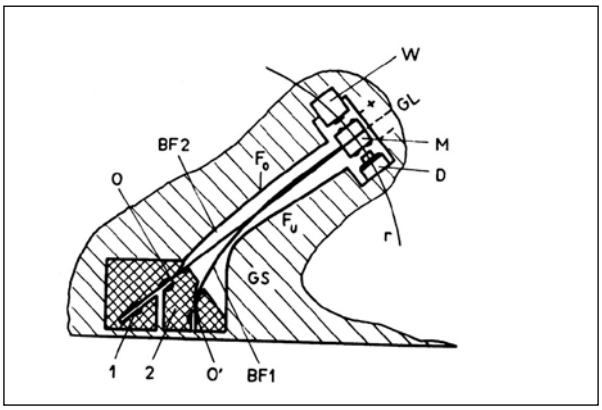
Ein typisches Horizontalpendel kann beispielsweise nach dem Prinzip der „schiefen Tür“ verwirklicht sein, wie es die Figur 5 aus DE 1 234 037 B zeigt. Es besteht aus dem Pendelkörper (der „schiefen Tür“, 37,38), der mit den Aufhängungspunkten 35 und 36 am Fixiergalgen 32 befestigt ist und sich in Richtung senkrecht zur Bildebene bewegen kann.

Für beide Pendeltypen kommen neben Spiralfedern und verschiedenen anderen Lagerungs- und Aufhängungsmethoden auch tragende Blattfedern zum Einsatz (siehe DD 273 513 B5, DD 211 183 A



Figur 5: Horizontalseismograf (aus DE 1 234 037 B)

(Figur 6)). Sie erlauben den Bau von transportablen Seismometern, da sie aufgrund des Federtyps kompakter konstruiert werden können und robuster sind als die Seismometer der Figuren 4 und 5, die mit ihren elastischen Bindungen zwischen sonst starren Gehänge- und Gestellteilen vorwiegend in Dauerstationen eingesetzt werden. Zwar können Blattfederpendel meist nur im hochfrequenten Bereich betrieben werden, haben aber zusätzlich den Vorteil, dass aus ihnen leicht ein einheitlicher Satz von Instrumenten für alle drei Komponenten der Bodenbewegung erstellt werden kann. Für weitere Varianten und technische Details zur Konstruktion von Pendeln aller Art sei auf [5] verwiesen.



Figur 6: Vertikalseismograf mit Blattfedern BF1, BF2 und Schwingermasse M (aus DD 211 183 A)

5.2 Dämpfung der Eigenschwingungen

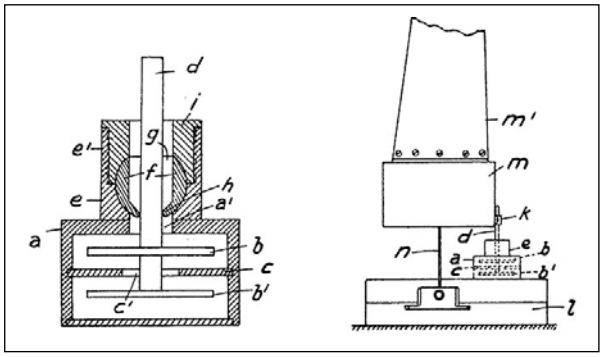
Wie oben erwähnt, schwingt ein Feder-Pendelmasse-System nach einer Anregung auch weiter, wenn

keine weitere Energiezufuhr durch eine erneute Bodenbewegung erfolgt. Daher sind diese Bewegungen unerwünscht und werden durch den Einbau einer Dämpfung nach Möglichkeit so schnell wie möglich eliminiert. Um dies zu erreichen, sind drei Techniken etabliert.

5.2.1 Flüssigkeits- und Luftdämpfung

Eine Möglichkeit besteht darin, dass eine an die Pendelmasse montierte Extension in eine zähe Flüssigkeit eintaucht und bei der Bewegung durch deren Viskosität gebremst wird. Eine andere Variante nutzt die vom Pendelanschlussstück in einem Gefäß durch die Reibung mit der Flüssigkeit verursachten Verwirbelungen zur Dämpfung.

Ein Beispiel für die technische Ausführung solch einer Dämpfung ist der Figur 7 aus DE 493 296 A zu entnehmen. Man fühlt sich hier an ein Stoßbutterfass und seinen Stößel erinnert. An der seismischen Masse des vertikal schwingenden Pendels m, m' (Figur 7, rechts) ist über eine Fixierung k eine Dämpfungsplattenanordnung b, b‘ angebracht, die über den Zapfen d im zweikammerigen ölgefüllten Gefäß a senkrecht beweglich ist. Zusätzlich kann für den Transport dieses Seismometers auch eine Arretierung für die Dämpfung aktiviert werden, die durch die gegeneinander pressbaren Lagerschalen e, i und die drehbar gelagerte Kugel f realisiert ist.



Figur 7: Flüssigkeitsdämpfung für Seismometer (aus DE 493 296 A)

Die Luftdämpfung nutzt dieselbe Technik, ist aber aufgrund der geringeren Dichte und Zähigkeit dieses Mediums apparativ aufwändiger zu verwirklichen und weit weniger effektiv.

5.2.2 Elektromagnetische Dämpfung

Schwingt eine Pendelextension – sei sie als Spule oder metallische Platte ausgeführt – bei der Pendelbewegung zum Beispiel im inhomogenen Feld eines Hufeisenmagneten, dann werden in dieser Ströme induziert, die der Bewegung des Pendels entgegenwirken. Im Falle der metallischen Platte ist dieses Prinzip auch als Wirbelstrombremse bekannt. Diese Dämpfungsmethode ist heute am weitesten verbreitet und zudem weitgehend temperaturunabhängig. Ein Beispiel für diese Dämpfung kann ebenfalls der Figur 5 (aus DE 1 234 037 B) entnommen werden, die als Pendelextension eine Platte 38 zeigt, die sich in einem als Dämpfungsmagnet 34 bezeichneten Bauteil bewegt.

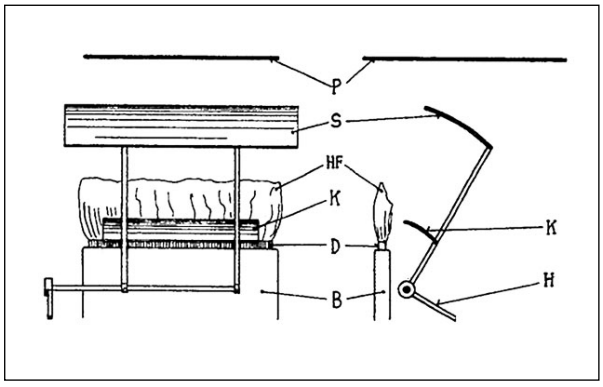
5.3 Aufzeichnungsarten

Damit sie nach der Messung jederzeit und auch wiederholt ausgewertet werden können, müssen die von Erdbeben ausgelösten Schwingungen permanent auf einen Träger gebannt werden. Methodisch hat sich seit Andrea Bina im Jahre 1751 nichts wesentlich verändert, nur die Kopplungsmechanismen und Aufzeichnungsmedien variieren im Laufe der Zeit.

5.3.1. Mechanische Registrierung

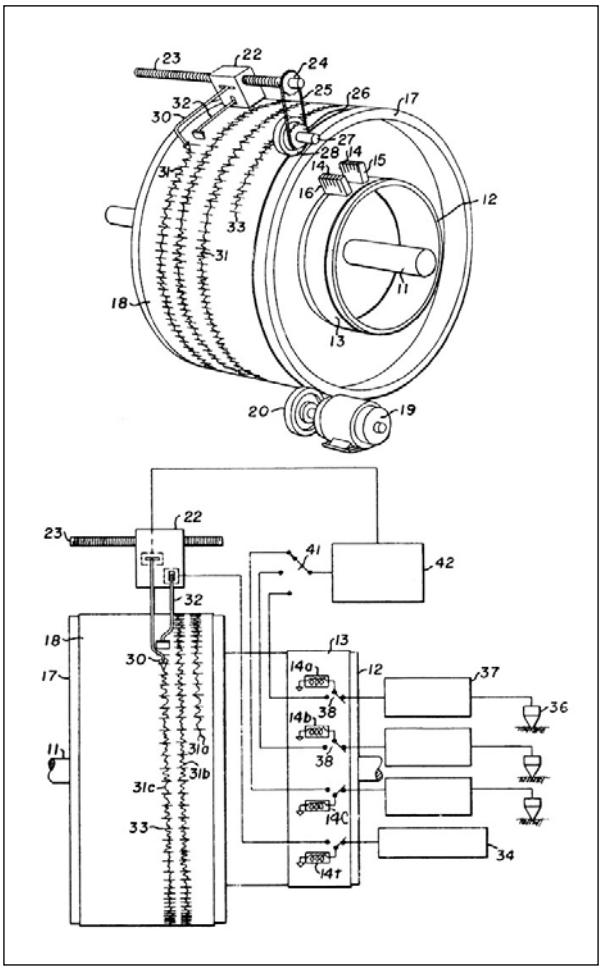
Dies bedeutet für ein Seismometer, dass die Wellenbewegung des Erdbodens vor Ort mechanisch auf einen Aufzeichnungsträger wie Papier geschrieben wird. Es finden sich je nach Papierart Tintenfedern oder Ritzvorrichtungen, die über Hebelarmkonstruktionen mit den Schwingungsaufnehmern mechanisch gekoppelt sind ([2],[5]). Ihr Grundprinzip

ist vergleichbar mit dem von Raumklimamessern oder meteorologischen Stationen mit papierbestückten Trommelaufzeichnungsgeräten. Jedoch spielt in Seismometern die Reibung und Klarheit der gezeichneten Spuren eine wichtigere Rolle. Da Tintenfedern oftmals nicht die gewünschte Spurenschärfe liefern konnten, hielten sich auch berußte Papierrollen in der Praxis sehr lang, auf denen dann ein Stift statt einer Tintenfeder entlangfuhr.
Als Exkurs zum Thema sei kurz mitgeteilt, dass die Herstellung von berußtem Papier für Seismometeranwendungen an sich recht anspruchsvoll ist, denn der „Schreibstift" muss gegen Widerstand durch eine Rußschicht hindurchpflügen, um eine Spur zu hinterlassen, die man in fixierter Form anschließend auswerten kann. Daher ist eine konstante und nicht zu große Dicke der Rußschicht entscheidend ([5]).
Wie man eine derartige Berußung technisch verwirklicht, ist der Figur 8 aus CH 198 162 A zu entnehmen. Als Rußquelle dient hier eine Flamme HF, die aus einem Behälter B mit Brennstoff (meist Petroleum oder Benzol) gespeist wird. Die Flamme wird als in eine Richtung ausgedehnte „Flammenfront" unterhalten, über die senkrecht zur Front und mit konstanter Geschwindigkeit eine Papierbahn P bewegt wird. Die derart realisierte Berußung des Papiers kann durch einen Hebelmechanismus H, mit zwei Schutzabdeckungen K, S unterbunden werden.



Figur 8: Papierberußungsanlage (aus CH 198 162 A)

Die eigentliche Aufzeichnung der Wellenbewegung auf einer Registriertrommel kann etwa Figur 1 oder Figur 9 (aus DE 1 074 865 B) entnommen werden. Sieht man in Figur 1 die dreikomponentige Aufzeichnung der Spuren 14 auf der Endlospapierbahn 13, kann man der Figur 9 insbesondere den durch einen Motorantrieb und eine Zeitregelung verursachten Vorschub der Papierbahn auf einer endlichen Registriertrommel entnehmen. Eine seismische Spur wird hier fortlaufend wie bei einem Schraubengewinde aufgezeichnet.

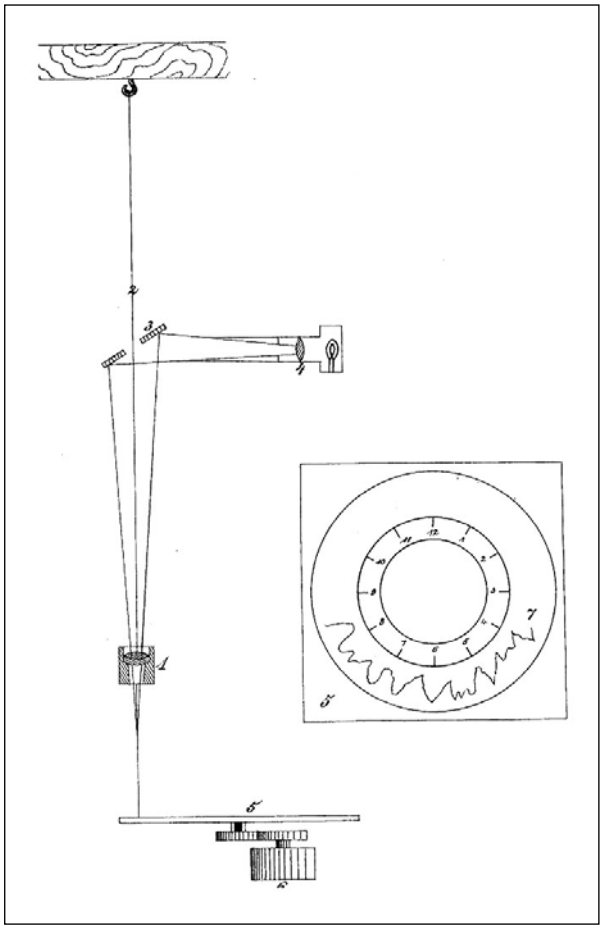


Figur 9: Registriertrommel mit Vorschub
(aus DE 1 074 865 B)

5.3.2 Optische und/oder galvanometrische Registrierung

Eine rein optische Aufzeichnung von seismischen Daten ist heute eher ungewöhnlich, daher werden hier beide Verfahren gemeinsam in einem Abschnitt behandelt.

„Optische Registrierung“ bedeutet streng genommen, dass Pendelausschläge direkt oder nur über zusätzliche optische Bauteile auf ein photosensitives Aufzeichnungsmedium gelangen. Dies ist bei der Vorrichtung aus DE 114 700 A des Jahres 1900 (Figur 10) der Fall. In der Pendelmasse 1, die am Faden 2 hängt, ist ein Linsensystem integriert, auf das über einen durchbohrten Umlenkspiegel 3 Licht aus der feststehenden Lichtquelle 4 gelangt. Das Licht durchstrahlt das Linsensystem und fällt auf eine Platte 5, die mit einem lichtempfindlichen Papier inklusive Zeitskala versehen ist und durch ein Uhrwerk 6 angetrieben wird. Das Licht hinterlässt im Zeitverlauf auf diesem eine Schwärzungsspur, die bei bekannter Geometrie der Apparatur ein Maß für die Bodenbewegung vor Ort ist.

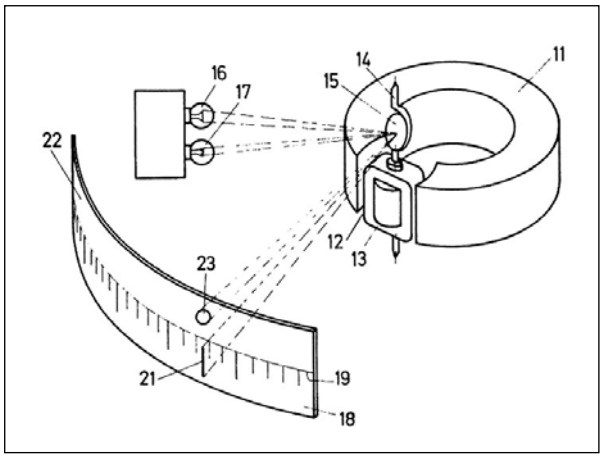


Figur 10: Optische Aufzeichnung auf einer mit Photopapier ausgelegten Scheibe (aus DE 114 700 A).

In den Anfangszeiten der Registrierung seismischer Wellen war es gängig, Aufzeichnungsmittel auf Basis von polaren Koordinatensystemen zu nutzen (Figur 10: 5, [5]). Heute ist dies aufgrund der Entwicklungsgeschichte der Aufzeichnungstechnik mit Drei-Komponenten-Seismometern die Ausnahme.

Bei rein optisch arbeitenden Registriersystemen ergibt sich eine bauliche Grenze für deren sinnvollen Einsatz und die Aussagekraft, da ein „normaler“ Lichtstrahl über große Entfernungen projiziert zwar eine Vergrößerung der Ursprungsschwingung bewirkt, aber auch an Schärfe verliert, zumal keine zusätzlichen das Licht bündelnden Elemente zwischengeschaltet werden können, es sei denn man setzt wie heute üblich Lasertechnik ein (US 4, 119, 173 A). Es ist daher oft sinnvoller, den geometrisch kleinen Ausschlag des Pendels erst in eine elektrische Größe zu wandeln, die in Darstellung und Weiterverarbeitung apparativ weniger Probleme aufwirft, bevor die eigentliche Aufzeichnung erfolgt.

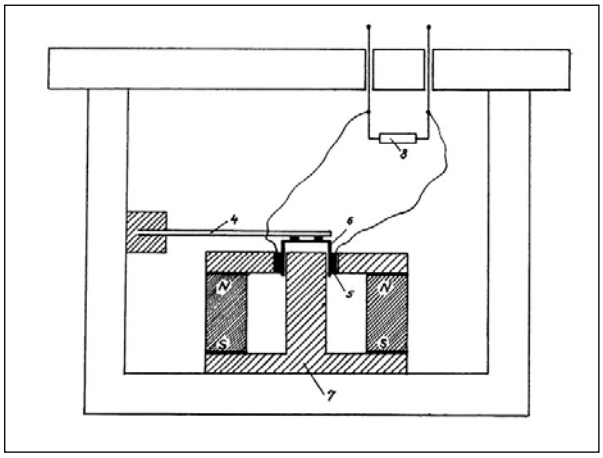
Dieses Vorgehen wird oft als galvanometrische Registrierung bezeichnet. Grund hierfür ist, dass Galvanometer seit den 1880er Jahren speziell für die Anzeige von sehr kleinen elektrischen Strömen optimiert wurden (heute bis zu 10^{-10} A), wie sie hier aufgrund der sehr kleinen Pendelausschläge auftreten. Oft werden Galvanometer auch als Drehspulmesswerke bezeichnet, was die eigentliche Arbeitsweise des Gerätetyps beschreibt, denn sie beruht auf der Verdrehung einer in einem Permanentmagnetfeld befindlichen Spule, sobald ein Strom durch diese fließt. Oftmals wird an dieser Spule ein Spiegelelement angebracht, das deren Verdrehung durch eine Verschiebung des Reflexionswegs eines Lichtstrahls, der auf den Spiegel fällt, auf einem Anzeigelement dokumentiert. Dann wird diese Apparatur Spiegelgalvanometer genannt. Eine Prinzipskizze ist hierfür Figur 11 aus CH 528 068 A zu entnehmen, mit der Spule 12, dem Spiegel 15, dem Magneten 11 und der Aufhängung/Stromleitung 14.



Figur 11: Prinzipskizze eines Spiegelgalvanometers (aus CH 528 068 A)

Die Wandlung des Pendelausgangssignals vor der optischen Aufzeichnung erfolgt entweder elektrodynamisch oder elektromagnetisch, wobei sich (Spiegel-) Galvanometer und Wandler in einem gemeinsamen Stromkreis befinden.

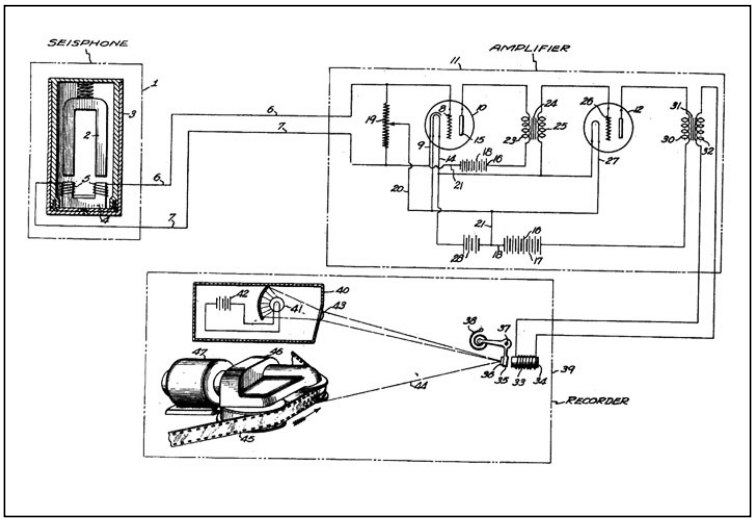
Bei einer elektrodynamischen Wandlung bewegt sich eine Spule, die Teil des Pendels ist, in einem homogenen Permanentmagnetfeld, wodurch in dieser ein Stromfluss induziert wird. Ein Beispiel hierfür ist der Figur 12 (aus DE 707 257 A) zu entnehmen, mit der Spule 5 am Schwinger 4, die ins Feld des Magneten 7 taucht.



Figur 12: Elektrodynamische Wandlung im Seismometer (aus DE 707 257 A)

Bei einer elektromagnetischen Wandlung ist der Pendelkörper, der zumindest teilweise aus einem ferromagnetischen Material besteht, selbst nicht mit Spulen versehen, sondern ein dieser Masse benachbarter Magnet. Bei einer Bewegung des Pendelkörpers ändert sich der magnetische Fluss durch das System Pendelkörper-Permanentmagnet, und durch die Spule fließt ein elektrischer Strom.

In der Figur 13 (aus US 2, 164, 196 A) ist (unten) eine weitere Möglichkeit der optischen Aufzeichnung von seismischen Signalen dargestellt, nachdem (links oben) eine elektromagnetische Wandlung durch den vertikalpendelartigen Messwertaufnehmer erfolgt ist. Hat das als elektrische Größe an einen Verstärker (rechts oben) weitergegebene Signal diesen passiert, steuert es eine Spulenanordnung 33, 34 an, die auf eine Hebelvorrichtung 35, 37 mit einem Spiegel 36 einwirkt. Die Auslenkung dieser Hebelvorrichtung aus der Ruhelage ist proportional zum durch die Spule fließenden elektrischen Strom und gibt eine verstärkte Schwingungsbewegung des Vertikalpendels wieder. Auf den Spiegel 36, fällt ausgehend von einer Lampe 41 Licht, wird dort reflektiert (44) und gelangt auf einen Film 45, der in gleichmäßiger Geschwindigkeit durch einen Motor 47 angetrieben wird. Das reflektierte Licht erzeugt auf dem Film eine Spur, die nach der Entwicklung eine fixierte und vergrößerte ursprüngliche Bewegung des Pendels zeigt, die nun weiter analysiert werden kann. Hier wird aber kein Spiegelgalvanometer eingesetzt, da die Bewegung des Spiegels durch eine variable magnetische Anziehungskraft der Spulenanordnung 33, 34 auf ein ferromagnetisches Teil der Hebelvorrichtung 35, 37 verursacht wird, und der Spiegel nicht unmittelbar an einer stromführenden Spule angebracht ist.



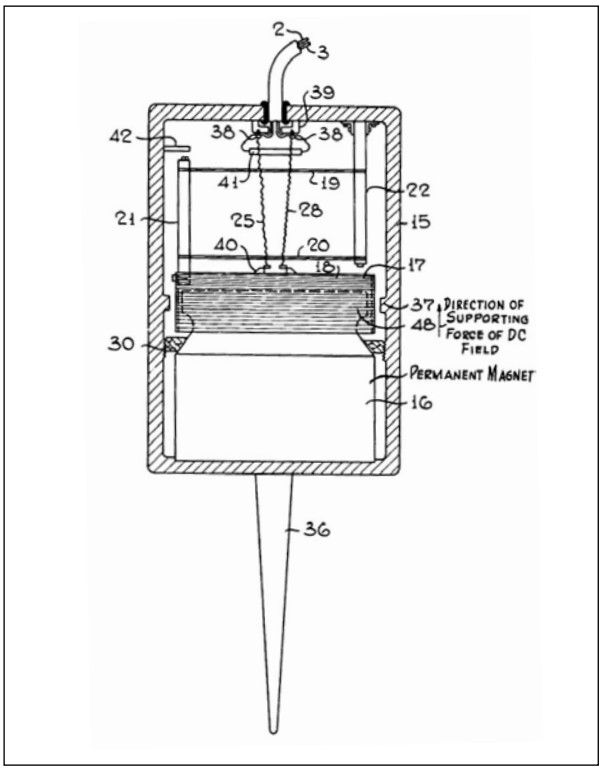
Figur 13: Optische Aufzeichnung auf Film (aus US 2, 164, 196 A)

5.3.3 Digitale Registrierung

Die digitale Verarbeitung elektrischer Impulse oder Messwerte mit Rechnern wurde in der Seismologie als einem der ersten Forschungsgebiete Standard. Einen Grund stellen die riesigen Datenmengen der Seismometerstationen in aller Welt dar und das Interesse, diese sowohl zeitnah als auch wiederholt prozessieren zu können. Fortschritte und Innovationen auf diesem Gebiet wurden durch die Seismologie und ihre Bedürfnisse mit angestoßen und zur Praxisreife entwickelt. Die Digitalisierung von seismologischen Messdaten, deren Weiterverarbeitung und Speicherung (= digitale Registrierung auf Magnetbändern, Festplatten, CDs) unterscheidet sich aber nicht vom Umgang mit vergleichbaren physikalischen Daten anderer Gebiete und trägt daher auch nichts Substanzielles zur seismologischen Messtechnik bei. Deshalb sei nur abschließend erwähnt, dass Seismometer heute gehäuseinterne Speicher aufweisen, die Daten digital zwischenlagern, bis sie via Schnittstelle ausgelesen werden können. Damit unterscheiden sich diese technisch in keiner Weise von handelsüblichen Datenloggern.

5.3.4 Geofone als Seismometer?

Geofone (Figur 14 und die unter Wasser eingesetzten Hydrofone wie etwa aus DE 556 194 A) nutzen prinzipiell dieselbe Technik der elektrischen Wandlung von Schwingungen, wie sie auch in Seismometern zum Einsatz kommt (DE 1 053 796 B, DE 1 177 352 A, CH 329 438 A). Sie können heute auch nicht wie ursprünglich nur die Vertikalkomponente einer Bodenbewegung aufzeichnen, sondern innerhalb eines recht kleinen Gehäuses alle drei Komponenten zeitgleich registrieren. Allerdings sind sie nach wie vor auf höherfrequente Quellsignale ausgerichtet, als sie gemeinhin Bebenwellen darstellen. Ihr Empfindlichkeits- und Arbeitsbereich zielt auf die Erfassung von Signalen ab, wie sie in der Rohstoffexploration mittels Sprengungen oder Vibroseis-Rüttlern künstlich ausgesandt werden.



Figur 14: Geofon mit elektromagnetischem Wandler 16,18,25,28 und Stecksporn 36 (aus US 2, 600, 967 A)

5.4 Zeitmarken

Eine Grundvoraussetzung der Seismologie ist es, möglichst genau die Zeitpunkte zu kennen, zu denen verschiedene Wellenanteile eines Erdbebens am Seismometer eintreffen. Beispielsweise, weil sich theoretisch bereits mit drei Seismometerstationen über eine Trigonometrie der Laufzeiten von Bebenwellen die Quelle lokalisieren lässt, oder weil die Laufwege unterschiedlicher Erdbebenwellen wichtige Aufschlüsse über den Aufbau des Erdkörpers geben. Auf den Seismogrammen werden deshalb in regelmäßigen Abständen so genannte Zeitmarken angegeben. Diese stammen – sei es in einer Papieraufzeichnung oder digital – aus der Korrelation des Seismometerbetriebs mit funkgesteuerten Quarzuhren oder sogar Atomuhren. In früheren Zeiten wurden hierfür hochgenaue Pendeluhren verwendet.

In der Praxis ist heute noch bei konventionellen Papierausdrucken neben den drei Komponenten der Bodenbewegung immer auch eine Zeitspur zu sehen, die meist in Minutenabständen einen Ausschlag zeigt.

5.5 Standort- und Messbedingungen

Seismometer sollen nach Möglichkeit nur diejenigen Bodenbewegungen aufzeichnen, die durch ein Erdbeben verursacht werden. Das ist aber nicht zu verwirklichen. Einen Grund stellt die Erdkruste an sich dar, die sich ständig auf den verschiedensten Größenskalen und aus den unterschiedlichsten Gründen bewegt oder bewegt wird. Diese Bewegungen führen zu seismischen Signalen, die sich aus natürlich und künstlich verursachten Anteilen zusammensetzen und von Menschen normalerweise nicht als solche wahrgenommen werden. Beide Anteile sind direkt von den geologischen Bedingungen vor Ort abhängig.

5.5.1 Standortfaktoren für Seismometer

Natürliche Störsignalquellen sind etwa die Gezeitenkräfte, die die Erdkugel durchwalken, unterirdische Fließvorgänge des Wassers in den verschiedenen Grundwasserstockwerken und Wasserbewegungen an der Erdoberfläche, wie sie viel Geröll und Wasser führende Flüsse oder an Küsten aufprallende Meereswellen darstellen.

Daneben existieren auch durch Menschen verursachte Störsignale, die sich in besiedelten Gebieten häufen, wie etwa der Schwerlastverkehr auf Straße und Schiene, Erdarbeiten und Sprengungen in Steinbrüchen oder Bergwerken aber auch die Bewegungen von hohen Bauwerken im Wind und der Überschallknall von Flugzeugen.

Sind diese Signalanteile bekannt und apparativ beherrschbar, ist für den Standort eines Seismometers entscheidend, dass die Geologie möglichst homogen ist, soweit man dies von einem natürlich gewachsenen Untergrund behaupten kann. Wesentlich ist, dass die Dichte des Gesteins und die korrelierten Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Erdbebenwellen lokal nicht über große Wertebereiche streuen, da sonst zusätzliche Variable in einem ohnehin schon sehr komplexen System zu berücksichtigen sind. In der Praxis bedeutet dies beispielsweise, dass anstehender Granit als Standort einem unverfestigten Flussschotter oder tiefgründig verwittertem Schiefergestein vorzuziehen ist.

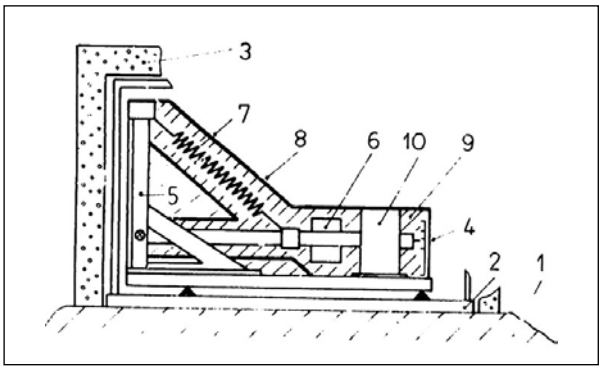
5.5.2 Ideale Messbedingungen und Wartung

Auch apparative Störfaktoren sind im Seismometerbetrieb zu beachten. Zu diesen gehören die Temperatur- und Luftdruckempfindlichkeit, die elektromagnetische Schirmung sowie die Ansprechbarkeit auf andere Formen von Strahlung, die mechanische Störempfindlichkeit beweglicher Teile sowie der Einfluss von bewegten Luftmassen in der Apparatur.

Hintergrund hierfür ist, dass Temperaturänderungen, trotz Speziallegierungen für den Federstahl, stets Einfluss auf die Federkonstante und über die Wärmeausdehnung auch auf die anderen mechanisch relevanten Bauteile des Pendels haben. Man kann diesem Effekt zwar teils durch die Verwendung von Nulllängenfedern entgegenwirken (DD 80 328 A, [11]), aber selbst nur an wenigen wesentlichen Komponenten der Apparatur auftretende physikalische Veränderungen sind für eine korrekte Aufzeichnung der größenordnungsmäßig winzigen Pendelbewegungen nicht vernachlässigbar. Der Luftdruck hat einen vergleichbaren Einfluss auf die Apparatur, denn die seismische Masse erfährt bei dessen Schwankungen einen unterschiedlichen Auftrieb.

Daher empfiehlt es sich, alle funktionsrelevanten Teile in einem Gehäuse einzuschließen, das wiederum in einem Messraum betrieben wird, der möglichst weiteren Schutz vor den oben genannten Störungen gewährt. Das Seismometergehäuse kann dabei zusätzlich evakuiert und/oder thermisch, elektromagnetisch und strahlenschutztechnisch isoliert werden. Zudem ist anzuraten, den Messraum bei konstanter Temperatur zu betreiben und diesen nur für die absolut notwendigen Wartungsarbeiten zu betreten. Kabelverbindungen sollten kurz und geschirmt sein, da sie sonst zu Einstreuungen elektromagnetischer Störquellen neigen oder – wenn sie etwa bei transportablen Geräten über größere Entfernungen hinweg im Freien liegen – bei Blitzschlag die gesamte Apparatur einem zusätzlichen Risiko aussetzen. Letzterem begegnet man heute meist durch die funktechnische Übertragung von Messwerten oder Betriebsparametern.

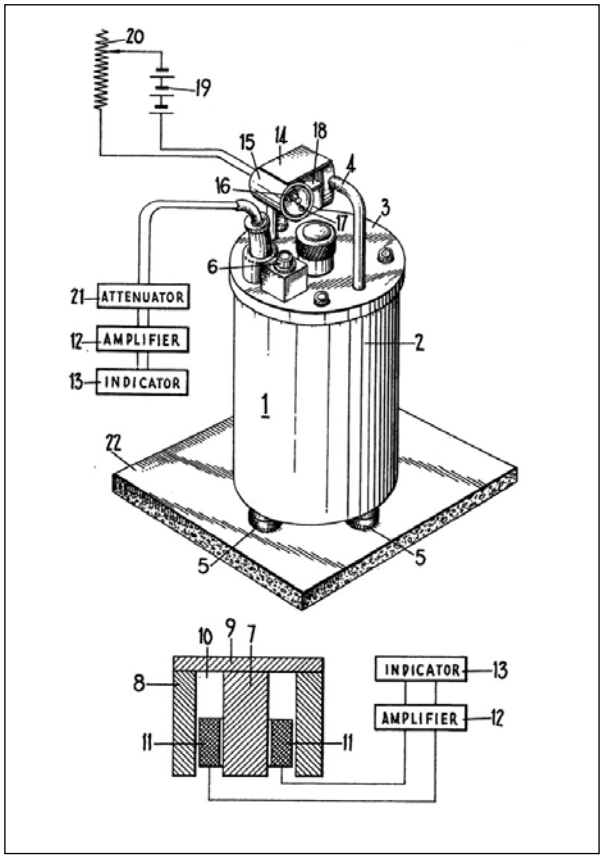
Wie diese Vorgaben zumindest teilweise für ein Vertikalpendel baulich umgesetzt werden können und damit einen möglichst ungestörten und kontinuierlichen Messbetrieb gewährleisten, zeigt die Figur 15 aus DD 271 183 A1. In diesem Pendelsystem 4 ist das Feder-Pendelmasse-System 6, 7 und andere wesentliche Bestandteile in einem druckdichten Gehäuse 2 gelagert, das zudem von einer thermischen Isolierung 3 umgeben ist. Ferner ist das an sich schon geschirmte Pendelsystem zusätzlich von gut wärmeleitfähigen Kanälen 8 durchzogen, um die Temperaturstabilität des Seismometerinneren zu optimieren.



Figur 15: Störsicheres Vertikalseismometer (aus DD 271 183 A1)

Andere Lösungsvorschläge für eine Temperaturkompensation greifen direkt an der Mechanik des Pendels an, wie etwa SU 629 520 A. Hier wird der Arm eines Vertikalpendels unter anderem an einer Thermokompensationsblattfeder aus Bimetall gelagert. Diese hält von einem Fixierpunkt weg entsprechend ihrer ausgeklügelten Mehrfachwindung das Pendelsystem bei seismischer Ruhe in einem weiten Temperaturbereich im Gleichgewicht.

Für viele Pendelseismometer der oben genannten Arten ist es von Bedeutung, dass diese genau waagerecht positioniert sind, um exakt zu funktionieren. Auf Seismometergehäusen befindet sich deshalb meist mindestens eine Libelle oder eine andere Richthilfe für die korrekte Aufstellung auf dem Untergrund (vergleiche WO 2006 / 011 021 A1 und Figur 16).



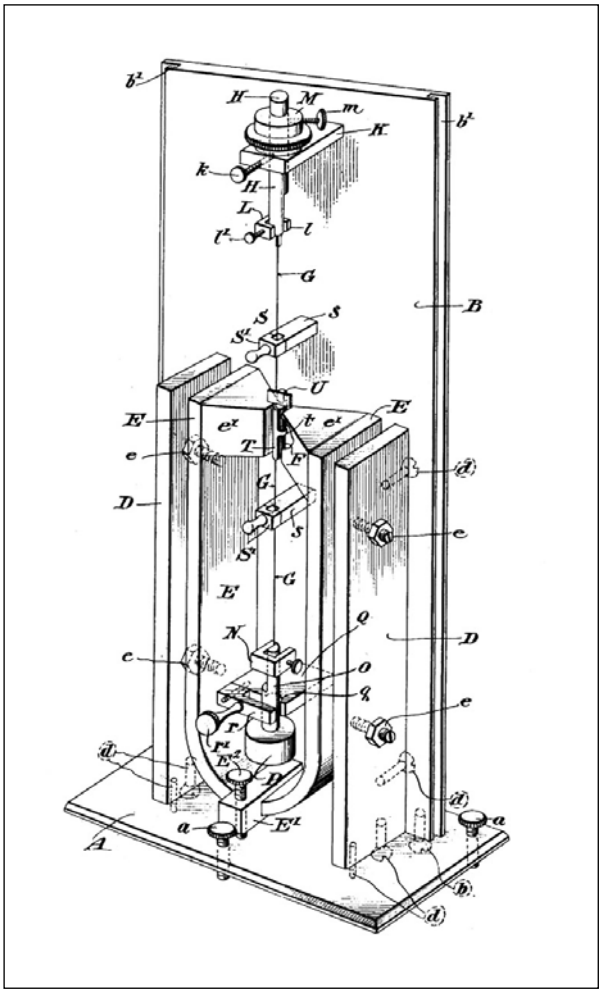
Figur 16: Transportables Vertikalseismometer mit Libelle 6, verstellbaren Füßchen 5 und Tauchspulenanordnung 7-11 (aus GB 819 140 A)

In Abständen ist es nötig, die Messbedingungen und das Seismometer selbst zu überprüfen, damit die Qualität und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse nicht leidet. Wie eine Prüfung mechanischer Bauteile eines Seismometers realisiert wird, zeigt DE 197 10 217 C1.

5.6 Beispiele für etwas ungewöhnlichere Pendelseismometer

5.6.1 Torsionsseismometer

Ein besonderes Seismometer stellt das Horizontalpendel von Anderson und Wood dar ([1]), wie es unter US 1, 552, 186 A patentiert wurde (Figur 17). Es nutzt bei geringem Raumbedarf die Torsion eines Drahtes durch die Schwingung einer vergleichsweise kleinen seismischen Masse, um eine Horizontalkomponente einer Bodenbewegung zu messen. Diese Masse ist ein exzentrisch aufgehängter Zylinder an einem durch ein Gewicht P straffgehaltenen dünnen Draht G. Oberhalb der Masse ist ein leichter kleiner Spiegel U angebracht, durch den eine optische Anzeige ermöglicht wird, wenn sich der Draht verdrillt.

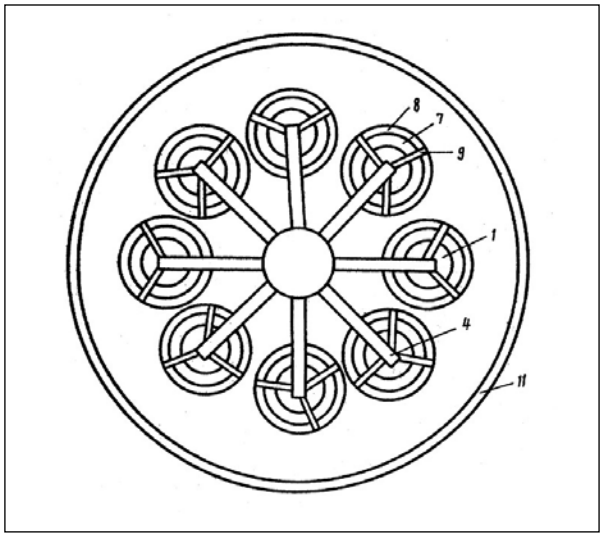


Figur 17: Torsionsseismometer von Anderson & Wood, 1924 (aus US 1, 552, 186 A)

Es existieren jedoch auch baulich weniger filigrane Torsionsseismometer, wie etwa SU 1 312 500 A1 (1984) zeigt. Hier besteht das Torsionselement nicht aus einem feinen Draht, sondern aus einer massiven Stange im Zentrum eines Gehäuses, die durch eine konzentrisch und schwingfähig an dieser angebrachten seismische Masse tordiert wird.

5.6.2 Mehrpendelseismometer

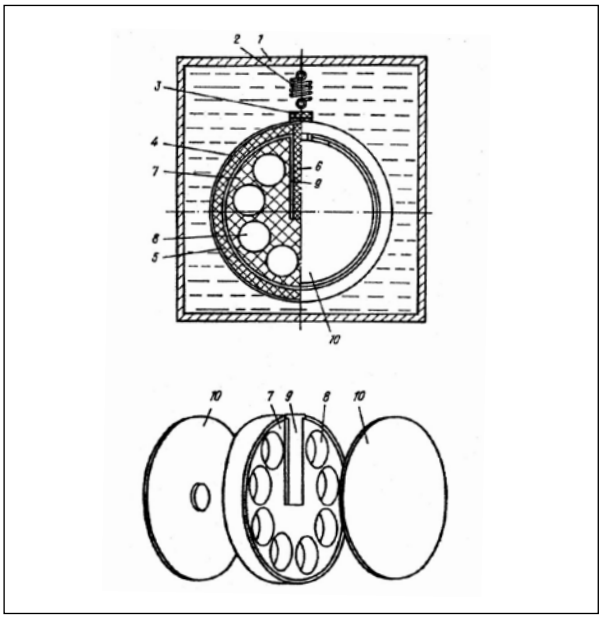
Diese zunächst seltsame Bezeichnung bezieht sich auf Seismometer, die in demselben Gehäuse mehrere gleichartige und gleich orientierte Pendel aufweisen. Der Hintergrund hierfür ist die Gewinnung einer soliden Datenbasis für die Aufzeichnung von seismischen Wellen an ein und demselben Ort. Ein Beispiel hierfür mag die SU 1 117 551 A sein (Figur 18). Hier werden in einem Gehäuse 11, an Auslegern einer zentralen Tragsäule 4 insgesamt acht sternförmig angeordnete Pendel 1 elastisch aufgehängt.



Figur 18: Mehrpendelseismometer mit sternförmiger Anordnung (aus SU 1 117 551 A)

5.6.3 In Flüssigkeit gebettetes Seismometer

Das Horizontal-Seismometer aus SU 1 120 262 A (Figur 19) vereinigt elegant mehrere Systemvorgaben für ein Pendelseismometer: Vor äußeren Störeinflüssen ist es zunächst durch ein Gehäuse 1 geschützt, in dem der Pendelkörper 4 an einer Feder 2 hängend von einer dielektrischen Flüssigkeit umgeben ist. Diese ist Dämpfungsmedium und Temperaturkompensation zugleich und lässt das Pendel aufgrund seiner scheibenförmigen Ausgestaltung nur in einer Vorzugsrichtung – nämlich horizontal – schwingen. Der Messwertaufnehmer ist ein piezoelektrisches Element 6, das in einer Aussparung des Pendelkörpers mit einem elektrisch leitfähigen Klebstoff befestigt ist. Der dreilagige Aufbau des Pendelkörpers 4, aus einer durchlöcherten und nach der Versiegelung mit den Endplatten 10 in den Aussparungen 8 Luft als Auftriebsmittel enthaltenden Masse 4, bestimmt zusammen mit der Flüssigkeit und der Federkonstante die Gleichgewichtslage des Pendels bei dessen Betrieb. Aufgrund seiner Konstruktion schließt dieses Seismometer statische Belastungen des Piezoaufnehmers in Ruhestellung aus, ist bei hoher Messempfindlichkeit sehr robust und geeignet, herdnah relativ hochfrequent zu messen.



Figur 19: Flüssigkeitsumhülltes Seismometer (aus SU 1 120 262 A)

6. Strainseismografen, die „anderen“ Bebenmesser

Die Sicherheit von Bauwerken ist direkt daran gekoppelt, wie elastisch sie sich im Falle von Belastungen verhalten. Dass Hochhäuser im Wind schwanken oder Staumauern den Druck riesiger Wassermassen abfedern müssen, ist bekannt und wird auf verschiedenste Weise überwacht. Im Bauingenieurwesen nutzt man oft zwei Metallstifte, die in definiertem Abstand an einem Bauwerk angebracht werden und deren Entfernung voneinander ständig gemessen wird. Diese als Extensometer

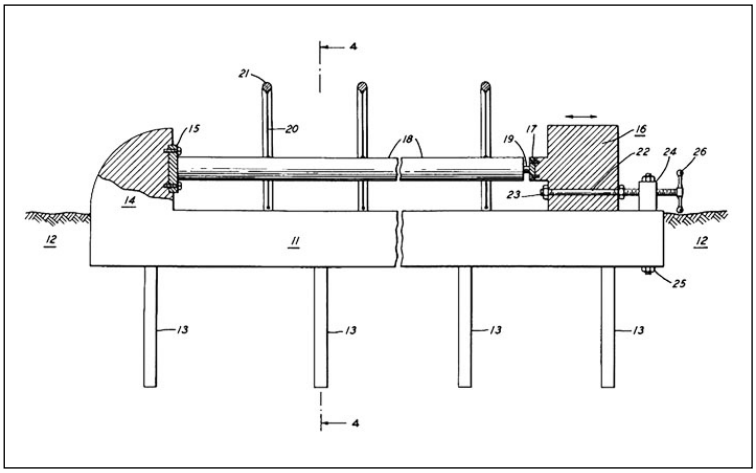
(oder im Kleinstformat mit dimensionsabhängig anderer Technik auch als Dehnungsmessstreifen) bekannten Messapparaturen können nicht nur langfristige Streckenveränderungen dokumentieren, sondern auch als Erdbebenmesser eingesetzt werden, wenn man etwa die oben erwähnten Metallstifte im anstehenden Fels verankert und das Messprinzip beibehält ([9],[15]).

Grundlage hierfür ist, dass bei der Ausbreitung einer Erdbebenwelle durch den Untergrund dieser so deformiert wird, dass benachbarte Teile des Bodens in gleicher Art verformt werden aber nicht zur gleichen Zeit. Die Genauigkeit dieses Seismografentyps ist in der Regel nicht mit der der Pendelseismografen zu vergleichen, es sei denn man versucht, sehr große Entfernungen zwischen den einzelnen Messpunkten hochgenau zu beobachten. Dies erfordert allerdings Messstrecken, die in der Regel mehrere Dutzend Meter lang sind. Daher werden Strainseismometer bei weitem nicht so häufig und nur in Ergänzung zu Pendelseismometern eingesetzt.

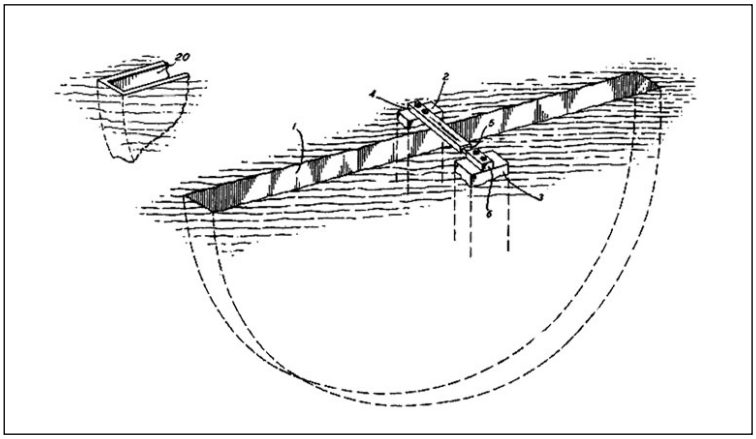
Beispiele für den Aufbau eines Strainseismometers sind etwa EP 0 593 483 B1 und den Figuren 20 sowie 21 zu entnehmen. In Figur 20 (aus US 3, 009, 126 A) sieht man die Verankerung 13 der Metall-Messplattform 11 samt Widerlagern 14, 16 im Untergrund 12. Zwischen den Widerlagern 14,16 ist eine Stange 18 platziert, die an einem Ende einen Stift mit einem Dehnungsmesser 19 aufweist, der etwaige Verformungen anzeigt.

Dass diese Anzeige auch „über Gräben hinweg“ sinnvoll sein kann, zeigt Figur 21 (aus US 3, 142, 173 A). Hier ist die Verankerung des Seismometers zweiteilig auf beiden Seiten eines halbscheibenförmigen Aushubs realisiert, wobei die beiden Ankerpunkte durch eine Messstange verbunden sind. Die Technik der Dehnungsmessung ist vergleichbar zu der in Figur 20.

Neben der Messung von Längenänderungen auf kapazitivem oder piezoelektrischen Wege bietet sich natürlich auch die Messung mittels Lasern über die Laufzeit der Lichtsignale an. Ein Beispiel hierfür ist etwa US 4, 480, 480 A und [15] zu entnehmen.



Figur 20: Strainseismometer mit Ankerplatte (aus US 3, 009, 126 A)



Figur 21: Strainseismometer mit halbscheibenförmigem Graben (aus US 3, 142, 173 A)

7. Fazit

Für die Dokumentation von Erdbeben sind Seismometer bald 130 Jahre die Registriermittel der Wahl. Erst mit ihrer Entwicklung und der Interpretation der von ihnen aufgezeichneten Messergebnisse war es dem Menschen möglich, die geologischen Zusammenhänge global zu verstehen. Sie halfen

die Theorie der Plattentektonik zu beweisen, Erklärungen für den Aufbau der Erde und Gründe für das Auftreten von Beben zu liefern. Doch die von ihnen produzierte Datenfülle reicht trotz allem nicht aus, Erdbeben vorherzusagen. Dies kann – wenn überhaupt – nur dann für jeden Ort auf der Erde Realität werden, wenn eine Kombination von verschiedenen global einsetzbaren und abrufbaren Messverfahren zusammen mit Labormethoden unser Verständnis von den inneren Zusammenhängen und den geologischen Prozessen noch wesentlich mehr vertieft und erweitert hat. Seismometerstationen werden auch weiterhin eine große Rolle in einem Verbund von Messmethoden spielen. Daher ist nicht nur der Ansatz zu verfolgen, die Qualität und Aussagekraft der Daten durch verbesserte Datenbearbeitungsmethoden weiter zu optimieren, sondern auch die Weiterentwicklung der Messgeräte, die diese Daten liefern. Bei Seismometern bietet sich in Sachen Handhabbarkeit im Gelände und variables Auszeichnungsspektrum der Geräte immer noch Spielraum für Verbesserungen.

Literaturverzeichnis

[1] ANDERSON, J.A.; WOOD, H.O.: A torsion seismometer. In: J. Optic. Soc. Am., 1924, Band 8, S.817-822

[2] BERKHEMER, H. & HILLER, W.: Kurzperiodische Stationsseismographen mit Trägerfrequenzverstärker und mechanischer Registrierung. In: Ztschr. f. Geoph., 1960, Band 26, S.1-8

[3] BOLT, B.A.: Erdbeben, eine Einführung. Berlin: Springer Verlag, 1984, S.83-87. - ISBN 0-387-12594-9

[4] DEWEY, J.; BYERLY, P.: The early history of seismometry (to 1900). In: Bull. Seism. Soc. Am., 1969, Band 59(1), S. 183-227

[5] GUTENBERG, B. (Hrsg.): Handbuch der Geophysik. Band IV Erdbeben. Berlin : Gebrüder Borntträger, 1932, S. 299-474

[6] HOWELL, B.F. Jr.: An Introduction to Seismological Research: History and Development. Cambridge : Cambridge University Press, 1990, S.58. - ISBN-13: 978-0521385718

[7] KERTZ, W. : Geschichte der Geophysik. Reihe: Zur Geschichte der Wissenschaften, Band 3, Olms Verlag : Hildesheim, 1999, S. 272-315. - ISBN 3-487-10843-7,

[8] KERTZ, W. : Biographisches Lexikon zur Geschichte der Geophysik. Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft: Braunschweig, 2002, S. 123-124, 149-150, 166, 235-239, 257-259, 285, 303-304, 370-372. - ISBN 3-934656-10-2,

[9] KING, G.C.P.; BILHAM, R.G.: Strain measurement instrumentation and technique. In: Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 1973, Band 274, S.209-217

[10] JACOBS F.: Immer wieder bebt die Erde. Ost-Berlin : Verlag Neues Leben, 1985, S.125-130

[11] LACOSTE, L.J.B.: A new type long period vertical seismograph. In: Physics, 1934, S.178-181

[12] LAY, T.; WALLACE, T.C.: Modern global seismology. Oxford : Academic Press, 1995, S.173. - ISBN-13: 978-0-127328706

[13] MILNE, J.: Earthquakes and other earth movements. London : Kegan Paul - Trench – Trubner, 1891, S.13-16

[14] SCHNEIDER, G.: Erdbeben. Entstehung – Ausbreitung – Wirkung. Stuttgart : Enke, 1975, S. 265-302. – ISBN 3-432-87601-7

[15] VAN VEEN, H.J.: A laser strain seismometer. In: Verhandelingen der Nederlandse Akademie van Wetenschappen, AFD. Natuurkunde, Eerste Reeks, Deel XXVI, No. 1. Amsterdam : North-Holland Publ. Comp, 1970, S. 1-79

[16] WIECHERT, E.: Theorie der automatischen Seismographen. In: Abhandlungen der Gesellsch. d. Wiss. in Göttingen, Math.-Physik. Klasse, 1903, Band 2, S.3-125



Impressum

Herausgeber:
Deutsches Patent- und Markenamt
Zweibrückenstraße 12
80331 München

Telefon: +49 (0) 89 2195-0
www.dpma.de

Stand
Juli 2010