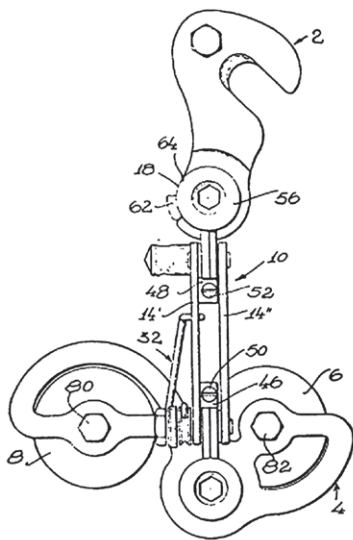
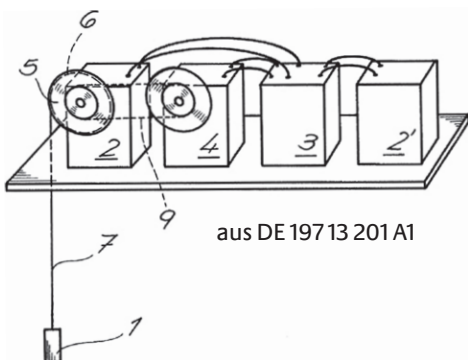




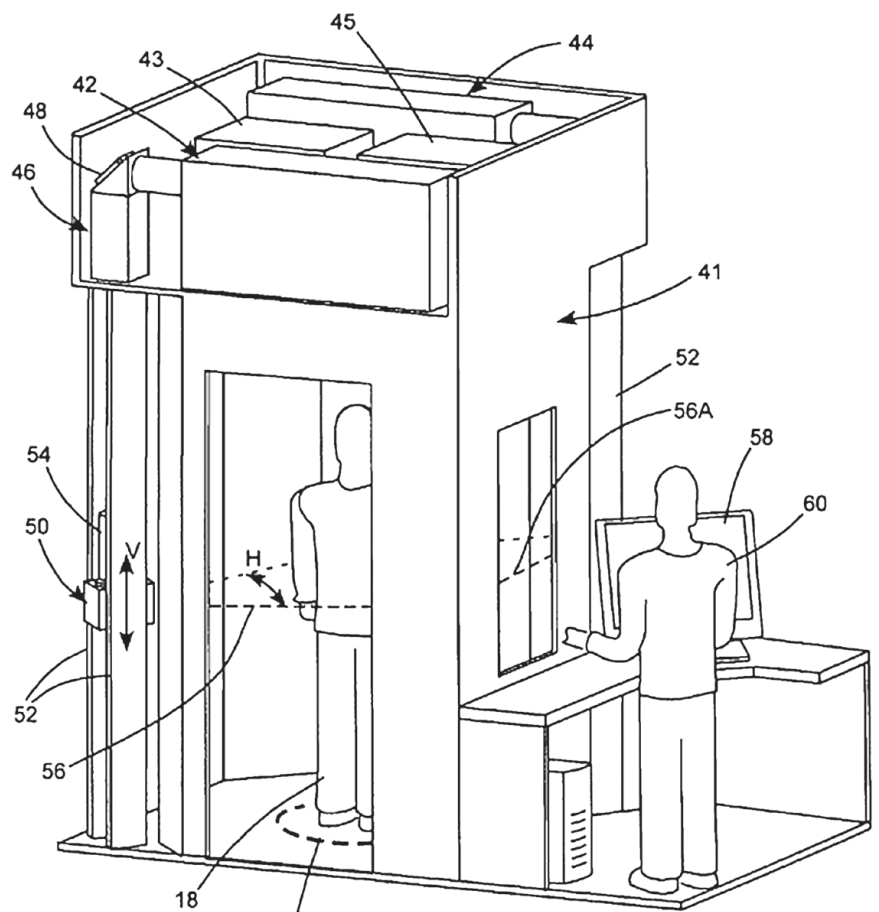
Erfinderaktivitäten 2010



aus DE 1947 857 U



aus DE 197 13 201 A1



aus US 2007/01 14 418 A1

Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser der „Erfinderaktivitäten 2010“,

wissen Sie bereits, wie sich Fahrradschaltungen entwickelt haben? Gibt es doch ein Perpetuum mobile? Was muss man bei der Herstellung von Nanopartikeln beachten? Wie funktioniert ein Terahertz-Scanner und was kann man damit erkennen? Sie lesen viel über die Nutzung von Geothermie, haben aber keine rechte Vorstellung davon, welche Technologien konkret eingesetzt werden? Viele Fragen. Hier finden sie Antworten dazu und auch viele Neuigkeiten aus anderen technischen Fachgebieten.

In der aktuellen Ausgabe der „Erfinderaktivitäten“ gewähren Ihnen unsere Patentprüfer wieder einmal faszinierende Einblicke in ihre breitgefächerten Arbeitsfelder. Grundlage für ihre Artikel sind die jeweils maßgeblichen Patentdokumente sowie die zugängliche Fachliteratur.

Die in den Artikeln genannten Schriften umfassen den bis zum Redaktionsschluss am 1. März 2011 der Öffentlichkeit bekannten Stand der Technik.

Viel Spaß beim Lesen wünscht Ihnen

Dr. Klaus Wollny
(Redaktion)

Inhalt	Seite
Vorwort.....	1
Laserzündung – Voraussetzung für die Zukunft des Verbrennungsmotors? <i>Dipl.-Tech. Math. Matthias Dangl</i>	3
Der Erfinder Hermann Papst <i>Dr. Thomas Flaschke</i>	11
Die Herstellung von Nanopartikeln <i>Dr. Johannes Freudenreich</i>	21
Perpetua mobilia <i>Dipl.-Phys. Uwe Gebranzig</i>	29
Aktuelle Erfindungstrends zur Regelung und Steuerung von mechatronischen Antriebssystemen in Kraftfahrzeugen <i>Dipl.-Ing. Gianni Monti</i>	36
Geschichte der Kettenumwerfer an Fahrrädern <i>Dipl.-Ing. Martin Nockenberg</i>	43
Technologie und Anwendung von Terahertz-Strahlung <i>Dr. Jens Philipps</i>	52
Geothermie – die Energie der Zukunft? <i>Dr. Klaus Wollny</i>	60

Laserzündung – Voraussetzung für die Zukunft des Verbrennungsmotors?

Dipl-Tech. Math. Matthias Dangl, Patentabteilung 1.13

In den letzten Jahren konnte man teilweise sogar der Tagespresse oder den bekannten Automobil-Magazinen für Endkunden Berichte über die Entwicklung von Laserzündungen für Ottomotoren entnehmen. Dem fachlich interessierten Leser stellt sich bei derartiger Lektüre die Frage, wie weit diese Entwicklung bereits fortgeschritten ist, während für den potentiellen Kunden von Interesse ist, welche Vorteile er davon hätte und wann derartig ausgerüstete Autos zu kaufen sein werden.

1. Geschichte

Der Erfolg des Ottomotors ist untrennbar mit der Entwicklung der Zündkerzen verbunden. Auch heute noch wird bei fast allen in Kraftfahrzeugen verbauten Ottomotoren das Luft-Kraftstoff-Gemisch mittels herkömmlicher Zündkerzen gezündet. Derartige Zündkerzen besitzen im einfachsten Fall eine mit Hochspannung beaufschlagte Mittelelektrode sowie mindestens eine Masseelektrode. Beim Anlegen einer Hochspannung zwischen Mittel- und Masseelektrode springt im Luftspalt (der kürzesten Strecke zwischen Mittelelektrode und Masseelektrode) ein Zündfunke über, welcher das durch den Kolben im Zylinder komprimierte Luft-Kraftstoff-Gemisch entzündet.

Die dazu benötigte Hochspannung wird durch die Zündspule bereitgestellt. Die Zündspule funktioniert nach dem Wirkungsprinzip eines Transformators, welcher die Spannung aus der 12V-Autobatterie in die erforderliche Hochspannung transformiert.

2. Nachteile der herkömmlichen Elektrodenzündkerze

Bei der Zündung mittels herkömmlicher Zündkerzen ist der Zündfunke räumlich auf den Luftspalt festgelegt. Nachdem die Zündkerze nicht zu weit in den Brennraum ragen darf, da ein Abstand zum Kolben im oberen Totpunkt sichergestellt sein muss, muss

dieser Zündfunke in jedem Zylinder relativ nah am Zylinderkopf gebildet werden. Außerdem beeinflusst die in den Brennraum ragende Zündkerze im Motorbetrieb die Strömung im Zylinder, was in einigen Betriebspunkten zu unerwünschten Effekten führen kann.

Im steten Bemühen um Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs wird bereits seit geraumer Zeit an der Weiterentwicklung von Motoren mit Direkteinspritzung gearbeitet.

Diese bieten Vorteile sowohl für das Abgasverhalten als auch für den Verbrauch. Besonders günstig auf den Verbrauch wirkt es sich aus, wenn dabei ein Teil des Abgases über ein Abgasrückführventil zum Brennraum zurückgeführt wird und der Motor im sogenannten Schichtladebetrieb läuft.

Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass sich das Kraftstoff-Luft-Gemisch zum Zündzeitpunkt nur in einem kleinen Bereich innerhalb des Brennraums befindet. Der Motor wird mager betrieben, das heißt mit einem Luftüberschuss gegenüber einem stöchiometrischen Verhältnis. Eine Herausforderung im mageren Betrieb besteht darin, dieses Gemisch sicher zu entzünden. Nachdem im herkömmlichen Motor die Zündkerze einen festen Platz innerhalb des Brennraums hat, muss sich die Wolke aus dem brennbaren Gemisch zum gewünschten Zündzeitpunkt mindestens teilweise im Bereich des Zündfunkens befinden. In der Praxis ist es jedoch schwierig, die Brennraumgeometrie und die Gemischbildung derart auszugestalten, dass die Verbrennung zum optimalen Zeitpunkt

erfolgreich mit einer herkömmlichen Zündkerze eingeleitet werden kann. An diesem Punkt setzen mehrere Weiterentwicklungen an herkömmlichen Zündkerzen an, welche beispielsweise das Ziel haben, die Funkenstrecke zu verlängern oder den Funken durch Hilfseinrichtungen in den Brennraum hinein zu treiben.

Allerdings wurde bald deutlich, dass die Weiterentwicklung der herkömmlichen Zündkerze an ihre physikalischen Grenzen gelangt.

Aus diesem und ähnlichen Gründen wird seit einigen Jahren an Vorrichtungen geforscht, die die herkömmliche Zündkerze ersetzen und diese Nachteile umgehen können.

Entsprechende Patentanmeldungen sind in der IPC-Klasse F02P 23/00 (Sonstige Zündvorrichtungen oder -verfahren) oder noch passender in der F02P 23/04 (Sonstige Zündvorrichtungen oder -verfahren mit anderen physikalischen Mitteln, zum Beispiel mit Laser-Strahlen) klassifiziert.

Vor allem die Entwicklung der Laserzündung ist mittlerweile weit fortgeschritten.

Die technische Grundlagenforschung ist soweit, dass ein Serieneinsatz zumindest bei Großserienmotoren in greifbare Nähe rückt.

3. Anfänge der Laserzündung

Die theoretischen Grundlagen zum Laser wurden bereits 1917 von Albert Einstein mit der Entdeckung der Absorption und der spontanen und stimulierten Emission von Strahlung gelegt.

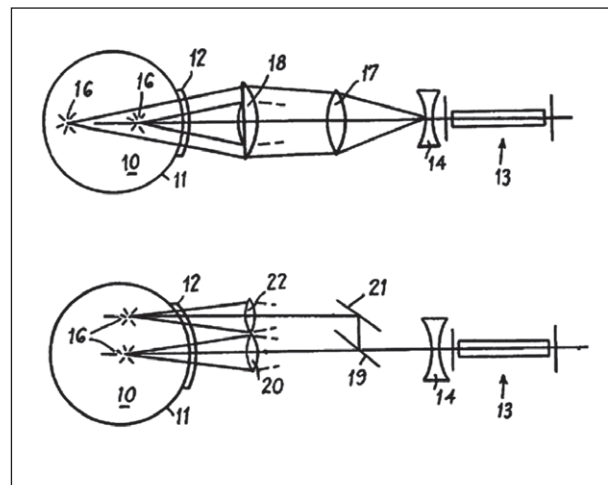
Diese Theorie wurde 1953 vom Amerikaner Charles H. Townes durch Berechnungen und Versuche im Mikrowellenbereich gestützt. Hierbei konnte eine stabile Strahlung im Mikrowellenbereich erzielt werden, der sogenannte Maser („Microwave amplification by stimulated emission and amplification“). Zusammen mit seinem Kollegen Arthur Schawlow konnte Townes zeigen, dass sich diese stabile Strahlung im Mikrowellenbereich auf den Bereich der optischen Strahlung übertragen lässt.

Für diese Arbeiten erhielten Townes und seine Mitarbeiter 1964 den Nobelpreis für Physik.

Sieben Jahre nach der Entwicklung der theoretischen

Grundlagen baute der amerikanische Physiker Theodore Harold Maiman am 26. Mai 1960 den ersten Laser (Benennung in Anlehnung an den Maser, „Light amplification by stimulated emission and amplification“) (vergleiche [4] und [1]).

Bereits kurze Zeit später gab es Ideen, den Laser für die Zündung in Ottomotoren zu verwenden. Die Britische Firma Associated Engineering Limited schlägt in 1 236 561 A (1967) sowie GB 1 360 196 A (1970) vor, anstelle einer herkömmlichen Zündkerze das Luft-Kraftstoff-Gemisch in einer Brennkammer direkt mit Hilfe des Strahls eines Festkörperlaser zu zünden. Dabei wird bereits erwähnt, den Laserstrahl mittels Lichtwellenleiter den Brennräumen zuzuführen.



Figur 1: Frühe Idee einer Laserzündung, bereits mit verschiedenen Brennpunkten 16 (aus GB 1 360 196)

4. Aktuelle Entwicklungen bei der Laserzündung

4.1. Integration in bestehende Motoren

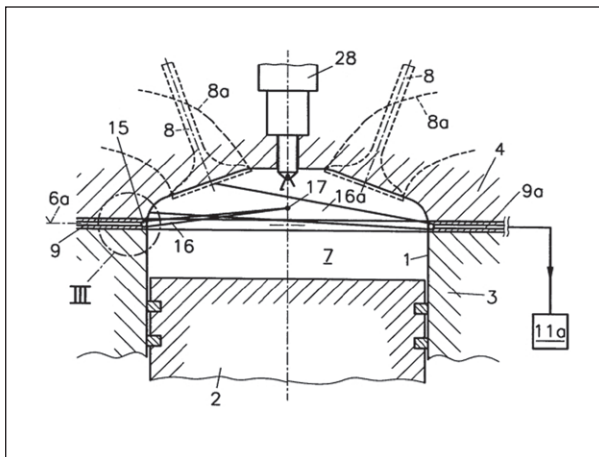
Um die Laserzündung zur Serienreife zu entwickeln, gilt es neben den üblichen Kriterien wie Bezahlbarkeit, Serienfertigung et cetera, die Laserzündung möglichst so in das bestehende System „Antriebsstrang“ zu integrieren, dass in diesem keine grundlegenden Änderungen notwendig sind.

Vor allem sollten möglichst keine Änderungen am Motorblock und am Zylinderkopf nötig sein.

Ebenfalls sollte eventueller zusätzlicher Bauraum-

bedarf minimal sein, da bei modernen Autos der Motorraum in der Regel so ausgefüllt ist, dass ein zusätzlich zu integrierendes Bauteil eine komplette Neubetrachtung der Gesamtkonzeption erforderlich macht.

Einen möglichen Ansatz liefert DE 199 11 737 C2. Dort wird vorgeschlagen, den Laserstrahl 16 quer zur Zylinderachse in den Brennraum 7 einzuführen. Insbesondere soll ein Lichtwellenleiter 9 in der Ebene der Zylinderkopfdichtung in diese integriert werden. Als primitive Form einer Linse wird hier vorgeschlagen, das in den Brennraum geführte Ende 15 des Lichtwellenleiters in etwa kugelförmig anzuschmelzen.



Figur 2: Lichtwellenleiter 9 im Bereich der Zylinderkopfdichtung 5 eröffnet neue Gestaltungsfreiheiten am Zylinderkopf 4 (aus DE 199 11 737 C2)

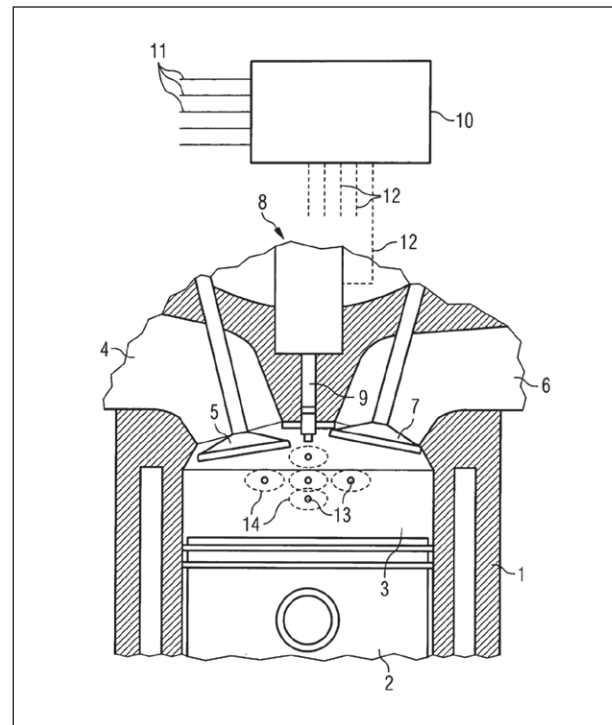
Durch diese Ausführungsform wird die Montage in bestehenden Motoren ermöglicht, da keine zusätzlichen Bohrungen im Zylinderkopf notwendig sind. Ganz allgemein wird die Montage hierdurch erleichtert. Außerdem besteht die Möglichkeit, in der Ebene weitere Lichtwellenleiter vorzusehen, über welche zu Diagnosezwecken Laserstrahlen in den Brennraum zuführbar sind.

4.2. Regelung der Laserzündung

Es ist mittlerweile bei Funkenzündungen Stand der Technik, die Parameter der Zündung (Zündwinkel, Funkendauer, Zündenergie et cetera) in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen einzustellen oder zu regeln. Die Laserzündung bietet die Möglichkeit,

auf veränderte Betriebsbedingungen im realen Motorlauf schneller und genauer zu reagieren, da hier der Ort der Entzündung nicht durch die Geometrie des Zylinderkopfes festgelegt ist.

So zeigt die Patentschrift DE 10 2004 053 493 B4 ein Verfahren zur Regelung einer Laserzündung, wobei in jedem Zylinder ein Laserstrahl auf einen Brennpunkt 13 gebündelt wird. Dabei lässt sich dieser Brennpunkt 13 variabel in Abhängigkeit von der Position einer zündfähigen Luft-Kraftstoff-Gemischwolke 14 wählen.



Figur 3: Variable Brennpunkte 13 des Laserstrahls im Zylinder (aus DE 10 2004 053 493 B4)

Dazu wird am brennraumseitigen Ende der Laserzündvorrichtung eine verstellbare Fokussiereinrichtung vorgesehen. Der Eintrittsort in den Brennraum 3 liegt hier im Zylinderkopf. Somit kann unabhängig von den Betriebsbedingungen sichergestellt werden, dass in jedem Zylinder während des Motorbetriebs der Brennpunkt in der Gemischwolke liegt.

4.3. Ausgestaltungen zur Festlegung von Lage und Anzahl der Brennpunkte

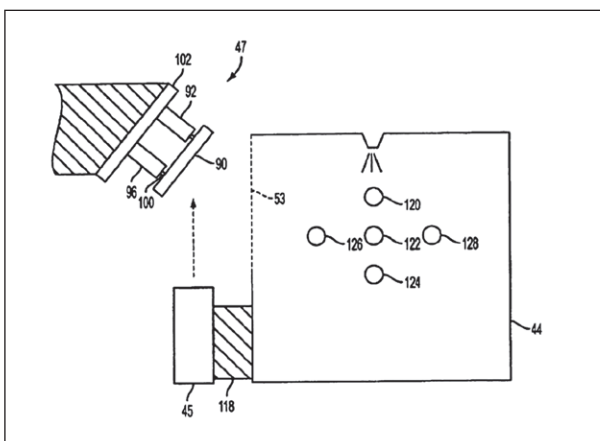
Was sich mit Laserzündungen auch deutlich eleganter umsetzen lässt als mit herkömmlichen Zündanlagen ist die Mehrfachzündung. Hierbei werden in einem oder jedem Zylinder während eines Arbeitstaktes mehrere Zündfunken gleichzeitig oder kurz nacheinander an einem oder mehreren Punkten im Zylinder gezündet.

Ein Vorteil der Mehrfachzündung ist, dass die Verbrennung zuverlässiger abläuft. So kann mittels Diagnosesystemen beispielsweise erkannt werden, wenn eine Zündung zu keiner ausreichenden Entflammung geführt hat, um dann im gleichen Takt eine oder mehrere weitere Zündungen zu veranlassen, so dass das verbleibende Gemisch noch vollständig verbrennen kann.

In Funkenzündanlagen muss dafür entweder eine zweite Zündkerze vorgesehen sein, was einen erhöhten baulichen und finanziellen Aufwand bedeutet, oder die eine Zündkerze muss während eines Taktes nachgeladen werden, was jedoch eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt.

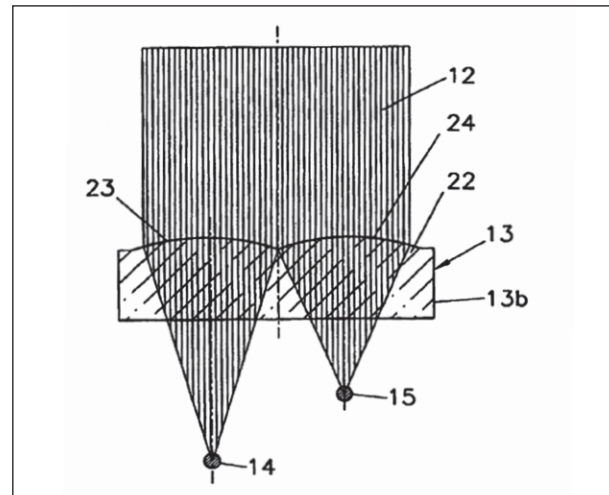
Durch die Laserzündung können diese Anforderungen konzeptbedingt sehr leicht umgesetzt werden, wie die folgenden Beispiele zeigen.

In US 6 796 278 B2 wird über eine adaptive Optik der Laserstrahl während eines Taktes nacheinander auf verschiedene Punkte im Zylinder fokussiert. Dieser gesamte Vorgang läuft jeweils während des Taktes ab, in dem das Kraftstoff-Luft-Gemisch gezündet werden soll.



Figur 4: Mehrfachzündung ist mit Lasern besonders elegant umsetzbar (aus US 6 796 278 B2)

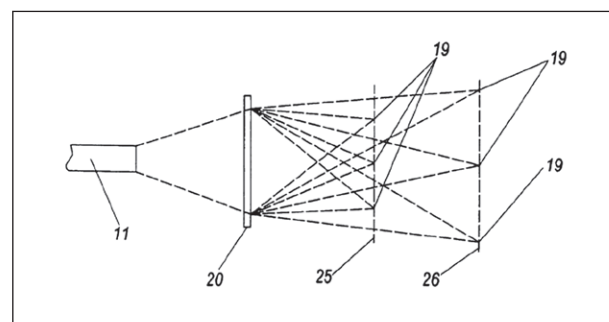
Im Gegensatz dazu wird in EP 1 253 316 B1 vorgeschlagen, eine Optik 13 zu verwenden, die mehrere Brennpunkte aufweist; dabei wird ein Laserstrahl so aufgeteilt, dass sein Licht auf mehrere Brennpunkte gleichzeitig gebündelt wird.



Figur 5: Durch eine spezielle Form der Linse wird der Laserstrahl auf mehrere Brennpunkte (hier: Brennpunkte 14 und 15) gleichzeitig fokussiert (aus EP 1 253 316 B1)

Diese Vorrichtung soll besonders für die Zündung von mit Wasserstoff betriebenen Brennkraftmaschinen geeignet sein.

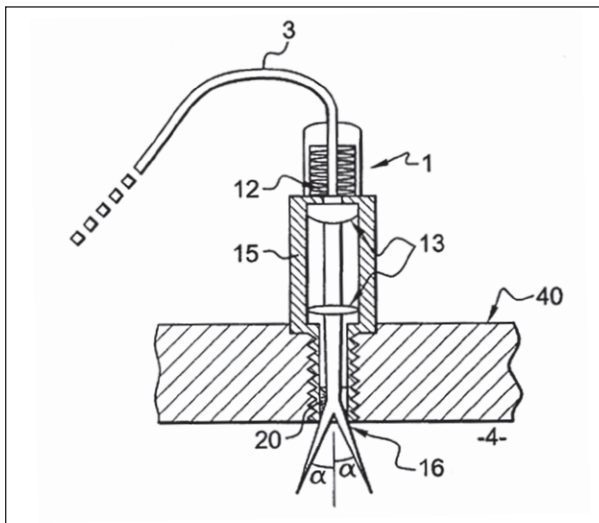
Eine ähnliche Überlegung liegt DE 103 50 101 B4 zugrunde. Hier wird eine Laserzündvorrichtung vorgeschlagen, die über wenigstens ein holografisches optisches Element 20 verfügt, welches das aus einer Laserlichtquelle stammende Licht 11 auf wenigstens zwei Brennpunkte 19 fokussiert. Dabei soll für einen Motor mit mehreren Zylindern insgesamt nur eine Laserlichtquelle verwendet werden. Alternativ können noch andere optische Elemente, wie zum Beispiel Linsen, vor oder nach dem holografischen Element vorgesehen werden.



Figur 6: Ein holografisches Element 20 ermöglicht Brennpunkte 19 in mehreren Ebenen (aus DE 103 50 101 B4)

Hierbei ist es auch möglich, das holographische Element derart auszugestalten, dass die Brennpunkte in mehreren Ebenen liegen. Auch ist die Intensität des Laserlichts in jedem Brennpunkt einzeln vorgebar. Als holographische Elemente werden beispielsweise Beugungsgitter vorgeschlagen.

Eine ähnliche Ausgestaltung schlägt FR 2 871 856 B1 vor. Hier wird ein doppelbrechendes Element 20 zum Fokussieren eines Laserstrahls auf zwei Brennpunkte vorgesehen.



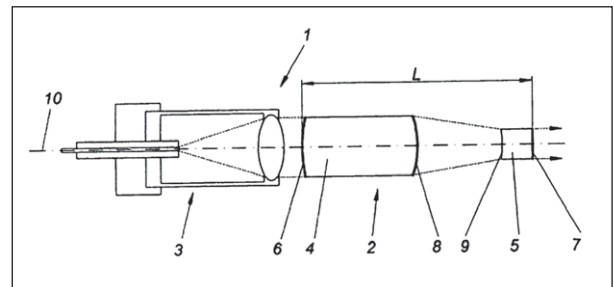
Figur 7: Ein doppelbrechendes Element 20 erzeugt aus einem Laserstrahl zwei Brennpunkte (aus FR 2 871 856 B1)

4.4. Erzeugung der Laserstrahlen für eine Laserzündung

Wie in der Einleitung dargelegt, ist die Erzeugung von Laserstrahlen gut erforscht. Allerdings bestehen zur Integration einer Laserzündung in einen Motor auch besondere Anforderungen an die Erzeugung dieser Laserstrahlen.

Dazu wird in der Patentschrift AT 502 565 B1 eine Laserlichterzeugungsvorrichtung 1 beschrieben, bei der die Konfiguration des Laserresonators 2 durch eine geeignete Ausbildung der optischen Oberflächen 5, 6, 7, 8, und 9 eine Variabilität der Stabilitätsbedingung des Laserresonators ermöglicht.

Die optischen Oberflächen des Laserresonators 2 werden hierfür derart ausgeformt und zueinander angeordnet, dass der Strahldurchmesser eines in

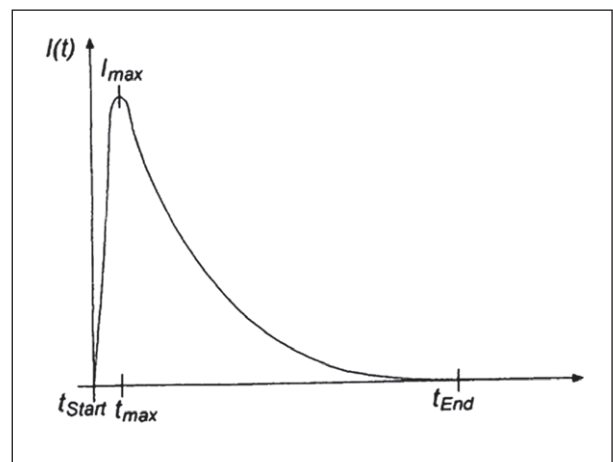


Figur 8: Spezielle Ausgestaltung eines Laserresonators 2 für eine Laserzündung (aus AT 502 565 B1)

den Laserresonator (Teleskopresonator) eingebrachten Lichtstrahls veränderbar ist.

Dadurch werden Laserstrahlen erzeugt, die sich sehr gut fokussieren lassen.

Die AT 501 531 B1 beschäftigt sich hingegen mit dem zeitlichen Verlauf des Einbringens von Laserstrahlen in einen Brennraum. Dabei wurde festgestellt, dass die Dauer eines Laserimpulses für diesen Zweck idealerweise zwischen 0,1 und 1 Nanosekunden liegt. Dadurch wird das Brennraumfenster, durch welches der Laserstrahl in den Brennraum eintritt, weniger abgenutzt.



Figur 9: Ein asymmetrischer zeitlicher Verlauf der eingebrachten Laserstrahlen reduziert die Schäden am Brennraumfenster (aus AT 501 531 B1)

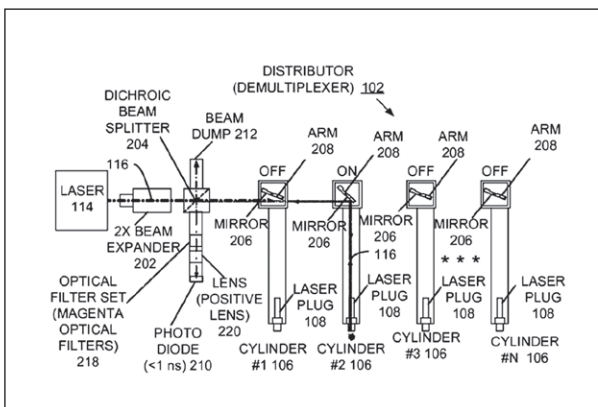
Ferner wird vorgeschlagen, den Intensitätsverlauf eines Laserstrahls über die Zeit asymmetrisch zu gestalten (siehe Figur 9). Dadurch werden die Schäden am Brennraumfenster minimiert.

4.5. Verteilen und Einbringen der Laserstrahlen in den Brennraum

Nachdem ein Lasergenerator nicht beliebig klein herstellbar ist, gibt es von verschiedenen Anmeldern Ideen, für einen Motor mit mehreren Zylindern nur einen Lasergenerator vorzusehen und die Strahlung bedarfsgerecht auf die Zylinder zu verteilen.

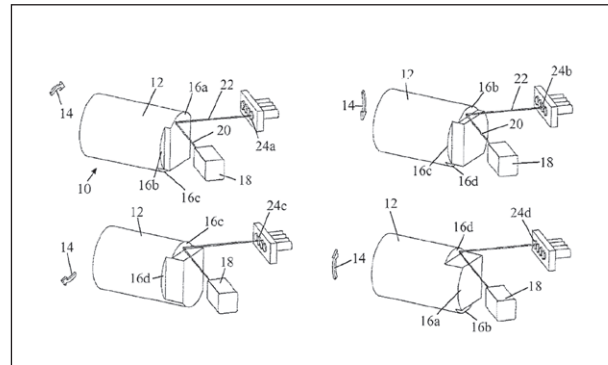
Hierfür existieren verschiedene Ansätze, von denen im Folgenden beispielhaft einige betrachtet werden sollen.

US 7 699 033 B2 zeigt einen Verteiler 102, der den Laserstrahl 114 jeweils dem gerade zu zündenden Zylinder 106 zuteilt. In einer konkreten Ausführung arbeitet dieser mit Spiegeln 206, welche hintereinander angeordnet auf einer optischen Achse liegen. Laserlicht, das entlang dieser Achse eingestrahlt wird, wird in den zu zündenden Zylinder gelenkt, indem der zu diesem Zylinder gehörige Spiegel 206 jeweils in die optische Achse eingeklappt wird.



Figur 10: Durch Spiegel 206 wird ein Laserstrahl 114 in den jeweils zu zündenden Zylinder eingeführt (aus US 7 699 033 B2)

Anschließend wird dieser Spiegel wieder herausgeklappt und in der Zündreihenfolge fortgefahren. Auf diese Weise wird das Prinzip des mechanischen Zündverteilers auf die Laserzündung übertragen. Ein ähnlicher Weg wird in US 7 350 493 B2 aufgezeigt. Hier wird ein drehbarer Zylinder 12 vorgesehen, der mehrere parallele Ebenen 16a, 16b, 16c, 16d, die zur Drehachse senkrecht stehen, als Reflexionsflächen aufweist. An diesen wird der Laserstrahl 20, der aus einem Laser 18 stammt, reflektiert.

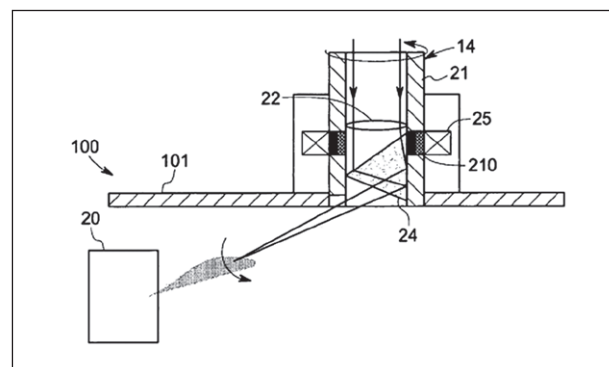


Figur 11: Durch Spiegel 206 wird ein Laserstrahl 114 in den jeweils zu zündenden Zylinder eingeführt (aus US 7 350 493 B2)

Da diese Flächen zueinander beabstandet sind, wird der Laserstrahl 20 bei sich drehendem Zylinder 12 nacheinander auf verschiedene Punkte 24a, 24b, 24c, 24d gespiegelt, welche aber auf einer Achse liegen (siehe Figur 11). Somit wird ein Laserstrahl nacheinander auf verschiedene Punkte verteilt, wodurch ein Zündverteiler gebildet wird.

4.6. Weitere Ausgestaltungen

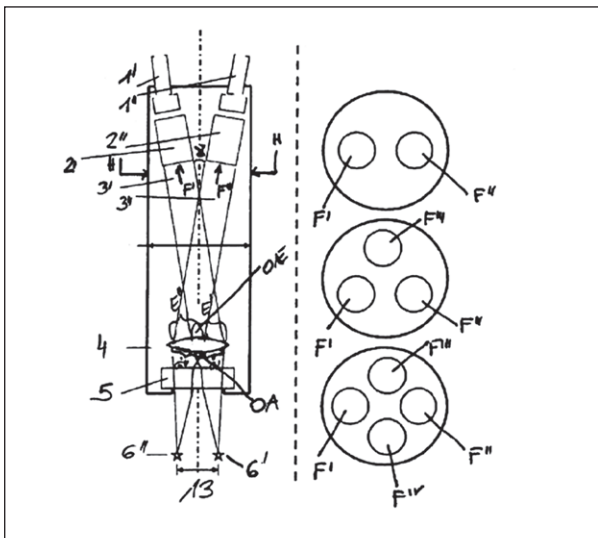
Eine weitere Möglichkeit, die Lage des Brennpunktes im Zylinder zu variieren, wird in DE 10 2010 017 381 A1 beschrieben. Hier ist im Strahlengang des Lasers vor dem Eintritt in einen Brennraum ein Prisma 24 vorgesehen, welches beispielsweise auch drehbar gelagert sein kann.



Figur 12: Durch ein drehbares Prisma 24 kann der Brennpunkt im Zylinder variiert werden (aus DE 10 2010 017 381 A1)

Eine vorgeschaltete Linse 22 kann wahlweise auch längs der Zylinderachse verschiebbar gelagert sein. Das Hintereinanderschalten einer derart ausgestalteten Linse und Prisma ermöglicht große Freiheiten bei der Festlegung des Brennpunktes.

Interessante Überlegungen werden auch in AT 506 201 B1 angestellt. Hier wird der Fall betrachtet, dass die Strahlen von mehreren Lasern durch eine gemeinsame Linse in den Zylinder eingebracht werden. Eine Möglichkeit dabei ist, die Laservorrichtungen derart anzuordnen, dass sich ihre Strahlen in einem Brennpunkt überlagern, wodurch auf einfache Weise eine höhere Intensität der Laserstrahlen im Brennpunkt erreicht werden kann.



Figur 13: Verschiedene Laserstrahlen werden durch eine gemeinsame Linse auf verschiedene Brennpunkte 6', 6'' fokussiert (aus AT 506 201 B1)

Als weitere Variante dieser Patentschrift wird vorgeschlagen, dass die Strahlen verschiedener Laservorrichtungen durch eine Linse auf verschiedene Brennpunkte 6', 6'' fokussiert werden (siehe Figur 13).

5. Ausblick: Der Weg zur serienreifen Laserzündkerze

Der Einsatz der Laserzündung in Großgasmotoren steht kurz vor der serienmäßigen Umsetzung.

Bei stationären Großgasmotoren wird sich der finanzielle Mehraufwand schneller amortisieren als für Fahrzeugmotoren. Dennoch bleibt die Hauptaufgabe die Vorbereitung einer Großserienproduktion von Laserzündvorrichtungen, wodurch diese bezahlbar werden.

Um Verbrennungsmotoren für die Automobilindustrie noch bedeutend umweltfreundlicher werden zu lassen, ist die Laserzündung sicher ein geeignetes Mittel, da sie die Möglichkeit bietet, Motoren zu bauen, die mit einem deutlich magererem Luft-Kraftstoff-Verhältnis fahren können.

Dadurch ergibt sich vor allem deutliches Einsparpotential beim Kraftstoffverbrauch.

Gleichzeitig kann die Verbrennung viel sauberer ablaufen, da das Gemisch deutlich effizienter verbrannt wird.

Dennoch bleiben für die Entwicklungsabteilungen noch einige Aufgaben, die aber in absehbarer Zeit lösbar erscheinen.

Für allgemeine und weiterführende Informationen zum Thema Laserzündung im Allgemeinen sei auf die Schriften [4] bis [15] sowie die Publikationen der Institute [2] und [3] verwiesen.

Literaturverzeichnis

- [1] Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, FZD: Geschichte der Lasers.
URL: <http://www.fzd.de/db/Cms?pNiD=1804>
[recherchiert am 23.02.2011]
- [2] Arbeitsgruppe Laserzündung an der TU Wien: Laserzündung.
URL: <http://info.tuwien.ac.at/Laserzuendung/de>
[recherchiert am 23.02.2011]
- [3] University of Liverpool: Lasers and Laser Applications. URL: <http://www.lasers.org.uk/>
[recherchiert am 23.02.2011]
- [4] WISSEN.DE: Das erste Mal: Entdeckungen & Erfindungen, die die Welt bewegten. München: Bassermann-Verlag, 2005, ISBN 3 8094 1836 6
- [5] GERINGER, B. et al.: Laserzündung – ein neuer Weg für den Ottomotor? MTZ – Motortechnische Zeitschrift 3, pp. 214-219, 2004.
- [6] HÜTTL, C.; BRÜGGEMANN, D.: Stand der Entwicklung bei der Laserzündung. In: Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 70. Jahrgang, 2009, S. 228-231.
- [7] GROSS, V. et al.: Laserzündung und Verbrennung im Ottomotor mit Direkteinspritzung. In: Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 71. Jahrgang, 2010, S. 532-539.

- [8] BEDUNEAU, J.-L. ; IKEDA, Y.: Application of laser ignition on laminar flame front structure investigation. In: 11th International Symposia on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics.
- [9] GERINGER, B. et al.: Laserinduzierte Zündung an einem Otto-DI-Brennverfahren der zweiten Generation. Vortrag: 24. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien (eingeladen); 15.05.2003-16.05.2003. In: „24. Internationales Wiener Motorensymposium 15.-16. Mai 2003“, H.-P. Lenz [Hrsg.], Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2003, S. 87-109. ISBN: 3-18-353912-8.
- [10] GERINGER, B. et al.: Direkteinspritzender Ottomotor und Laserzündung. Vortrag: 5. Dresdner Motorenkolloquium, Dresden (eingeladen); 05.06.2003-06.06.2003. In: 5. Dresdner Motorenkolloquium, 2003, S. 15-23. ISSN: 1433-4135.
- [11] GERINGER, B. et al.: Das Potenzial der Laserzündung bei verbrauchs- und emissionsreduzierenden homogenen Brennverfahren. Vortrag: Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, Grazer Congress, Graz (eingeladen); 22.09.2005-23.09.2005. In: Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, 2005, 14 S.
- [12] GERINGER, B. ; GRAF, J.: Laserzündung: Ein zukunftsweisendes Zündsystem für strahlgeführte Verbrennungssysteme. Vortrag: Strahlgeführte Verbrennung, Essen (eingeladen); 23.11.2004-24.11.2004. In: STEINMETZ, E. , BRINKMANN, B; MENNE, R. [Hrsg.] : Strahlgeführte Verbrennung. Haus der Technik Fachbuch Band 39, 2004, Renningen: Expert Verlag, S. 52-63. ISBN: 3-8169-2451-4;
- [13] MÖNCH, M., HÜTTL, C.; BRÜGGEMANN, D: Einfluss der laserinduzierten Mehrfachzündung auf die Flammenausbreitung in homogenen Gemischen. 23. Deutscher Flammentag – Verbrennung und Feuerung, Berlin : VDI-Bericht 1988, 2007, S. 271-276.
- [14] BIHARI, Bipin et al.: Development of Advanced Laser Ignition System for Stationary Natural Gas Reciprocating Engines. In: ASME, ICEF 2005-1325.
- [15] PHUOC, T. X.: Laser-induced spark ignition fundamental and applications. In: Optics and Lasers in Engineering, Vol. 44(5), 2006, S.351-397.

Der Erfinder Hermann Papst

Dr. Thomas Flaschke, Patentabteilung 1.26

Hermann Papst (1902-1981) war ein ungewöhnlich ideenreicher Ingenieur. Mit seinen vielen Erfindungen hat er wesentliche Bereiche der modernen Technik entscheidend beeinflusst. Weltbekannt wurde er durch die Erfindung des nach ihm benannten Papst-Außenläufermotors, ohne den viele Produkte in der Unterhaltungselektronik und der Büroautomation nicht hätten realisiert werden können.

1. Einleitung

Erfindungen großer deutscher Wissenschaftler haben in den letzten 125 Jahren die Welt verändert. Man denke beispielsweise an das Automobil (erfunden 1886 durch Karl Benz und Gottlieb Daimler), den Dieselmotor (1890 durch Rudolf Diesel), die Zündkerze (1902 durch Robert Bosch), das Tonband (1928 durch Fritz Pfeleumer), die Fernsehübertragung (1930 durch Manfred von Ardenne), den Computer (1941 durch Konrad Zuse), den Airbag (1951 durch Walter Linderer), den Scanner (1963 durch Rudolf Hell) oder an das MP3-Format (1987 durch Karlheinz Brandenburg). Dem Erfindergeist zahlreicher Forscher und den Innovationen, die bis heute daraus entstanden sind, verdankt das vergleichsweise rohstoffarme Deutschland letztendlich seine wirtschaftlichen Erfolge. Seine Schätze liegen in den Köpfen genialer Ingenieur- und Naturwissenschaftler. Insbesondere Patente sind Ausdruck dieses Erfindergeistes.

Zur Erfolgsgeschichte von „Made in Germany“ gehört auch zweifellos das Lebenswerk von Hermann Papst. Von Lautsprechersystemen über Elektromotoren und Brennkraftmaschinen mit Direkteinspritzung bis hin zu Luftschiffen – Papst brachte Erfindungen hervor, die zu über 400 Patenten in den unterschiedlichsten technischen Fachbereichen führten.

Abbildung 1 zeigt Hermann Papst im Alter von 70 Jahren mit einem Modell seines ersten Außenläufermotors. Papst entwickelte den Außenläufermotor im Kleinantriebsbereich bis zur Großserienreife. Sein Unternehmen in St. Georgen im Schwarzwald baute nach dem zweiten Weltkrieg für fast alle bekannten

Magnetbandgeräte die Antriebsmotoren. Bei Grundig, dem in den 1960er Jahren weltgrößten Tonbandgeräte- und Musikschränk-Hersteller, war Hermann Papst Haus- und Hoflieferant ([1], [2]).



Abbildung 1: Hermann Papst im Alter von 70 Jahren mit einem Modell seines ersten Außenläufermotors (Foto mit Genehmigung von Papst Licensing, St. Georgen).

2. Biographie

Hermann Papst wurde am 13. August 1902 in Aussig im früheren Böhmen geboren. Im Alter von acht Jahren zog er mit den Eltern und seinen zwei Brüdern nach Wien, wo er am Technologischen Gewerbemuseum die höhere Fachschule für Elektrotechnik besuchte. Schnell zeigte sich sein ungewöhnlicher Ideenreichtum. Bereits während seines Studiums, im Alter von 17 Jahren, meldete Hermann Papst sein erstes Patent für den elektrischen Antrieb einer Pendeluhr an (AT 86 359 B). Fünf Jahre später baute

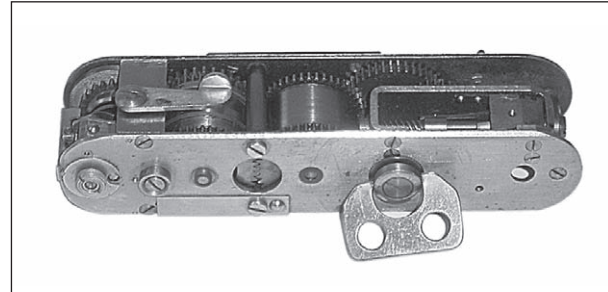
er ein Motorfahrrad mit einer neuartigen Wälzfederung (AT 104 582 B).

Lebensabschnitte von Hermann Papst

- 1902-1916 Kindheit in Aussig/Böhmen und Wien
- 1916-1921 Fachschule für Elektrotechnik am Technologischen Gewerbemuseum in Wien
- 1922-1928 Berufliche Anfänge als Konstrukteur und Ingenieur für verschiedene Firmen in Wien und Berlin
- 1928-1937 Ingenieur bei der Firma Gebrüder Steidinger in St. Georgen im Schwarzwald (ab 1935: Dual-Motoren GmbH)
- 1937-1981 Gründung, Auf- und Ausbau des eigenen Unternehmens in St. Georgen im Schwarzwald (Papst-Motoren GmbH & Co. KG)

Im Jahr 1925 ging Hermann Papst nach Berlin, dem damaligen Mekka der auf Funk und Fernsehen basierenden Kommunikationstechnologie ([1]). Die Berliner Jahre konnte Papst dazu nutzen, um auf den Gebieten der Unterhaltungselektronik technische Kompetenzen zu erwerben. Für die Entwicklungsaufgabe eines neuartigen Antriebs für Grammophone wurde Hermann Papst im März 1928 nach St. Georgen im Schwarzwald gerufen, wo er schließlich bei der Firma Gebrüder Steidinger als Konstrukteur angestellt wurde. Dort entwickelte er einen serienreifen Elektroantrieb für Plattenspieler, wobei dieser Elektromotor mit einem Federlaufwerk zu einer Antriebseinheit kombiniert wurde. Dieses duale System begründete schließlich den späteren Firmennamen „Dual“. Hermann Papst blieb in St. Georgen, insbesondere da er dort die Frau fand, mit der er eine Familie gründete. Im Jahr 1931 heiratete er Mathilde Steidinger. Aus der Ehe gingen fünf Kinder hervor. Während seiner Zeit bei der Firma Gebrüder Steidinger, welche ab dem Jahr 1935 unter dem Namen Dual firmierte, erfand Hermann Papst den Drehfeldmotor mit Außenkäfig (DE 697 146 A). Dieser Elektromotor bildete die Ausgangsbasis für den weltbekannt gewordenen „Papst-Motor“. In diese Zeit fällt auch seine Konstruktion für einen Schnellaufzug für Fotoapparate. Papst entwickelte im Auftrag der Firma Leitz aus Wetzlar einen anflanschbaren Schnellaufzug

für den Filmtransport von Leica-Kameras (Figur 2). Dieser Federwerkmotor namens Mooly fand ab dem Jahr 1938 seine Verwendung in den Leica-Modellen ([3]).



Figur 2: Federwerkmotor als Schnellaufzug für die Leica III aus dem Jahr 1936 (Foto mit Genehmigung von Papst Licensing, St. Georgen).

Im Jahr 1937 machte sich Papst selbständig. In seinem Einmannbetrieb konstruierte und produzierte er nun Bauteile, die aus eigenen Erfindungen hervorgingen, welche er teilweise lizenzierte. Zu diesen patentierten Erfindungen gehörte beispielsweise ein obertonarmer Lautsprecher (DE 763 939 A), der in den damals millionenfach gebauten Volksempfänger eingebaut wurde.

Gemeinsam mit neun Mitarbeitern und unterstützt vom Aufbauprogramm aus dem Marshallplan startete Papst ab 1950 die Serienproduktion seines Außenläufermotors. Schnell wuchs die Nachfrage nach dem Papst-Motor als konstantem und lauf-ruhigem Antrieb von Tongeräten. Einen wichtigen Wachstumsimpuls für das Unternehmen stellte auch die Verwendung der Außenläufermotoren für die Luftkühlung in elektronischen Geräten dar. Der exponentiell steigende Bedarf von Geräten der Unterhaltungsindustrie und der Bürotechnik brachte Motorenaufträge beispielsweise von Grundig, Löwe-Opta, Tefi, Saba, Braun, Nordmende, Ericsson, IBM, Triumph-Adler, AEG und Olympia. Sein im Jahr 1952 zur Papst-Motoren KG umgewandeltes Ingenieurbüro hatte im Jahr 1960 bereits 1000 Mitarbeiter ([1], [4]).

Nach Jahren des Aufbaus und der Führung des Unternehmens zog sich Papst in den siebziger Jahren fast ganz auf seine Forschungstätigkeit zurück. Zu den Projekten der späteren Jahre gehörte die Entwicklung des Taumelscheibenmotors und eines neuartigen Luftschiffes.

Im Jahr 1981 stirbt Hermann Papst. Elf Jahre später müssen die Söhne Günter und Georg Papst sowie die Tochter Hannelore Papst-Jung auf Druck ihrer Hausbank das Familienunternehmen PAPST-Motoren an die EBM Werke (heutige ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG) verkaufen ([1]). 1992 gründet Georg Papst die Papst Licensing GmbH, welche bis heute Lizenzen auf ehemalige Papst-Motoren Patente vergibt und sich ausschließlich mit der Verwertung verletzter Schutzrechte auch fremder Dritter beschäftigt ([1]).

3. Die Patente von Hermann Papst

In den Jahren 1919 bis 1980 meldete Hermann Papst über 400 Patente an, darunter zum Beispiel in Österreich, der Schweiz, Frankreich, England, den Niederlanden, Belgien, Dänemark, Finnland, Norwegen, den USA und in Kanada (Quelle: Espacenet-Datenbank). Allein in Deutschland reichte er 106 Patentanmeldungen ein (Quelle: Datenbank DOKIDX). Die Tabelle 1 zeigt eine Auswahl deutscher Patentschriften von Hermann Papst, welche seine universelle Ideenvielfalt dokumentiert:

Auswahl deutscher Patentschriften von Hermann Papst

Patentnummer	Jahr der Anmeldung	Titel
DE 579 268 A	1931	Federlaufwerk
DE 616 281 A	1931	Wählen bestimmter Teilnehmer von Selbstanschlussanlagen
DE 697 146 A	1932	Drehfeldmotor mit Außenkäfig
DE 552 465 A	1932	Hohlzylindrischer Läufer für Asynchronmotoren
DE 763 939 A	1937	Lautsprecher mit Ringanker
DE 932 132 B	1938	Farbenübertragung von Fernsehbildern
DE 885 315 B	1939	Tonabnehmer mit nachgiebig gelagertem Abtastsystem
DE 913 719 B	1939	Verfahren und Einrichtung zum Betrieb von Gasturbinen
DE 758 565 A	1940	Oberflächenvergaser für flüssigen Brennstoff
DE 761 979 A	1941	Lichtmaschine für Brennkraftmaschinen
DE 923 920 B	1940	Anordnung zur Bildspeicherung für Bildprojektion
DE 903 856 B	1940	Einrichtung zum Schmelzen pulvriger oder körniger Stoffe
DE 904 363 B	1942	Kraftstoff-Einspritzdüse
DE 922 387 B	1942	Taumelscheibenmotor
DE 868 407 B	1949	Sattel- oder Sitzfederanordnung für Fahr- und Motorräder
DE 975 420 B	1949	Induktionsmotor mit außenliegendem Sekundärteil
DE 1 069 764 B	1954	Asynchronmaschine der Außenläuferbauart
DE 928 499 B	1954	Einspritzventildüse
DE 1 139 197 B	1954	Drehfeldmaschine mit hysteretischer Wirkung
DE 1 053 807 B	1955	Außenläufermotor für Tonaufzeichnungsgeräte
DE 1 180 835 B	1959	Induktions- oder Hysteresemotor
DE 1 175 903 B	1958	Antriebsanordnung für Tonbandgeräte
DE 1 259 139 B	1960	Kraftstoffspeichereinspritzpumpe
DE 1 430 222 C3	1961	Hybridantrieb für Kraftfahrzeug
DE 1 476 951 C3	1963	Kraftstoffeinspritzvorrichtung für Brennkraftmaschinen
DE 1 671 875 B2	1964	Akkumulator
DE 1 476 235 C3	1965	Kraftstoff-Einspritzpumpe für Brennkraftmaschinen
DE 1 481 222 C3	1966	Luftschiff
DE 1 817 123 C3	1968	Kolbenmotor
DE 26 52 642 C2	1976	Axialventilator mit der Außenkontur eines Quaders
DE 30 02 391 C2	1980	Anordnung zur Schmierung einer Brennkraftmaschine

Im Folgenden werden seine Erfindungen zu den Themen Außenläufermotor, Grammophonantrieb, Lautsprecher, Verbrennungsmotor und Luftschiff näher vorgestellt:

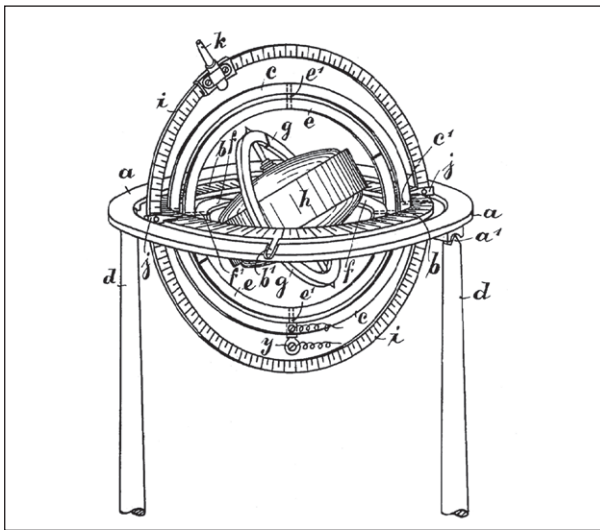
3.1. Der Außenläufer-Motor

Bereits während seiner Studienzeit beschäftigte sich Papst mit der Konstruktion von Elektromotoren. Basierend auf seinen beiden Patenten DE 697 146 A und DE 975 420 A entwickelte Hermann Papst seinen Außenläufermotor zur Großserienreife.

3.1.1. Die historischen Grundlagen

Die Geschichte des Elektromotors geht auf die Entdeckung des Engländers Michael Faraday aus dem Jahre 1821 zurück. Er zeigte, wie ein stromdurchflossener Leiter unter dem Einfluss eines Dauer magnets um die eigene Achse rotiert. Die angelegte elektrische Spannung wurde in mechanische Bewegung umgewandelt. Den ersten praxistauglichen Elektromotor baute der deutsche Ingenieur Hermann Jacobi im Jahr 1834. Als Rotor waren vier Elektromagnete auf einer beweglich auf einer Achse gelagerten Holzscheibe gegenüber vier feststehenden Elektromagneten (Stator) angebracht. Die Stromzuführung und Umpolung des Rotors erfolgte über einen auf der Achse angebrachten Kommutator ([5]). Jacobis Motor wurde über eine Batterie aus in Schwefelsäure getauchten Zinkplatten gespeist. Dieser Gleichstrommotor konnte sich aber wegen der ungeeigneten Stromversorgung nicht durchsetzen. Erst als Werner von Siemens im Jahr 1866 das elektrodynamische Prinzip entdeckte und die Dynamomaschine entwickelte, war es möglich, leistungsfähige Elektromotoren zu konstruieren. Technische Probleme bei der Abstimmung der Motoren an das verfügbare Gleichstromnetz trugen jedoch wesentlich dazu bei, dass sich die Gleichstrommotoren in der Praxis nicht durchsetzen konnten. Als Erfinder des Mehrphasenmotors gilt der Elektroingenieur Nicola Tesla. Er entdeckte 1887 das Drehfeldprinzip. Es besagt, dass sich ein Magnet in einem Magnetfeld dreht, das von mehreren verschobenen Wechselströmen in je einer Spule erzeugt wird

(US 359 748 A, US 381 968 A). Damit war es möglich, Elektromotoren für mehrphasige Wechselströme zu konstruieren. Das amerikanische Unternehmen Westinghouse Company kaufte Teslas Patente und entwickelte die ersten funktionsfähigen Mehrphasenmotoren. Auf der Weltausstellung in Chicago im Jahr 1893 präsentierte George Westinghouse den ersten zweiphasigen Induktionsmotor. Um die Schwankungen des pulsierenden Drehfelds des Zweiphasenmotors zu vermindern, experimentierte Michael von Dolivo-Dobrowolsky, Konstrukteur bei dem Berliner Elekrounternehmen AEG, an einem Mehrphasenmotor, der mit Dreiphasen-Wechselstrom und einer Phasendifferenz von 120° versorgt wurde (US 422 746 A). Dolivo-Dobrowolsky gab dem dreifach verketteten Wechselstrom den Namen Drehstrom. Im Jahr 1889 baute er den ersten brauchbaren Drehstrom-Asynchronmotor, dessen Läufer als Kurzschlussläufer (Innenkäfigläufer) ausgeführt war ([6]). Dieser Motor nutzte die induktive Übertragung des Wechselstromes auf den Rotor, der sich somit völlig kontaktlos drehte. So waren bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts leistungsstarke elektrische Antriebe verfügbar. Sie verdrängten nach und nach die Dampfmaschinen aus den Fabriken. Die für industrielle Anwendungen verwendeten Drehfeldmotoren waren bis zu diesem Zeitpunkt als Motoren mit Innenläufer ausgeführt. Motoren mit Außenläufer waren nur aus der Theorie bekannt. Als Außenläufermotoren werden Elektromotoren bezeichnet, bei denen sich der ruhende Teil (Stator) des Motors im Inneren befindet und vom bewegten Teil (Läufer) umschlossen ist ([7]). Der Berliner Ingenieur Emil Ziehl erhielt bereits im Jahr 1900 ein US-Patent für eine Außenläuferkonstruktion (US 662 484 A). In dieser Schrift wird ein Außenläufermotor dargestellt, der den zentralen Bestandteil eines Kreiselkompasses bildet. Figur 3 zeigt das sogenannte Gyroskop mit dem elektrisch betriebenen Kreisel h in kardanischer Aufhängung. Die Welle des Außenläufermotors h ist mit dem Kardanring g drehfest verbunden. Gespeist wurde der Motor mit Wechselstrom über die von einander entsprechend isolierten metallischen Anschlusskontakte y und Ringe c, e, f, g.



Figur 3: Elektrisch betriebener Kreisellkompass mit einer Außenläuferkonstruktion von Emil Ziehl (aus US 662 484 A).

3.1.2. Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Mit dem Aufblühen der deutschen Wirtschaft in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts und der Einführung elektrischer Geräte in Haushalt, Handwerk und Verkehr wuchs der Wunsch nach geeigneten elektrischen Kleinantrieben ([5]). Insbesondere für Haushalts-, Büro- und Unterhaltungsgeräte wurden Elektromotoren benötigt, die zum einen über einen konstanten und laufruhigen Antrieb verfügen und zum anderen möglichst kleine Abmessungen aufweisen.

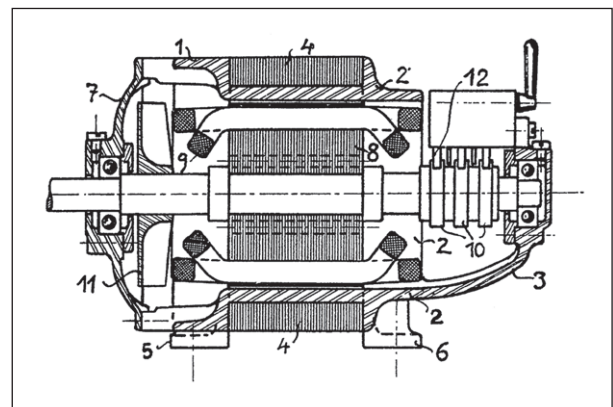
Bereits während seiner Studienzeit stieß Hermann Papst auf die Frage, warum alle bekannten Kurzschlusskäfigmotoren ausschließlich einen Innenläufer hatten. Papst rätselte, ob die Konstruktion eines Motors mit einem Außenläufer, nicht vorteilhafter sein könnte. Zudem fragte er sich, warum das Design des Außenläufermotors von Emil Ziehl (vergleiche Kapitel 3.1.1) seit seiner Patenterteilung im Jahr 1900 keine Anwendung gefunden hatte.

3.1.3. Die Patente DE 697 146 A und DE 975 420 A

Hermann Papst sah die Gründe, warum sich Außenläufermotoren bislang in der Praxis nicht durchsetzen konnten, vor allem in der Ausgestaltung des Käfigläufers. Die Kurzschlusskäfiganker motoren nach dem Stand der Technik hatten massive Kupferstäbe in den Rotoruten, die an den Rotorstirnseiten mit

schweren Kupferringen verbunden waren. Dadurch waren sie in ihrer Herstellung relativ teuer. Zudem musste der Außenkäfig zweiteilig ausgeführt und bei der Montage zusammengesraubt werden, was die elektrischen Eigenschaften des Läufers nachteilig beeinflusste.

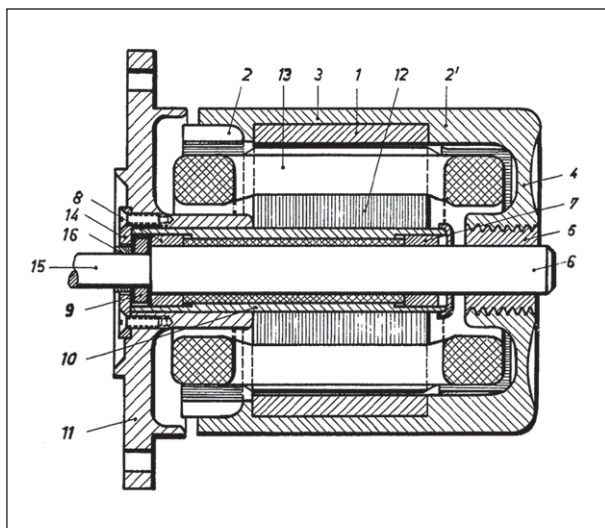
Der damals immer stärker aufkommende Werkstoff Aluminium gab Hermann Papst die Anregung, das Kupfer des Kurzschlussankers im sehr viel wirtschaftlicheren Druckgussverfahren durch Aluminium zu ersetzen und den Kurzschlussanker gleichzeitig als Gehäuse auszubilden. So kam es im Jahr 1932 zu dem Grundlagenpatent „Drehfeldmotor mit Außenkäfig“. Der Anspruch 1 gemäß DE 697 146 A lautet: „Drehfeldmotor mit Außenkäfig, dadurch gekennzeichnet, dass die mit den Stäben in einem Stück gegossenen Stirnringe als Gehäuse ausgebildet sind.“ Praktisch alle nicht-permanentmagneterregten Außenläufermotoren für Wechselstrom nutzen die Merkmale dieses Patentanspruchs.



Figur 4: Drehfeldmotor mit Außenkäfig und Innenläufer (aus DE 697 146 A).

Der Außenkäfigmotor gemäß DE 697 146 A ist in der Figur 4 dargestellt. Hierbei bilden die Stirnringe 1 und 2, das Lagerschild 3, das Blechpaket 4 und die Fußwinkel 5 und 6 den in einem Stück gegossenen Außenkäfig. Die umlaufende Wicklung 9 des Läufers 8 wird dabei über die Schleifringe 10 gespeist. Papst berechnete, dass der Außenkäfigmotor aufgrund der größeren Luftspaltfläche, der geringeren Feld-dichte und der geringeren Windungslänge bei gleichem Gesamtgewicht etwa ein Drittel mehr Leistung erbringt als ein nach dem Stand der Technik bekannter Innenkäfigmotor.

In den darauf folgenden Jahren hat Hermann Papst den Drehfeldmotor mit Außenkäfig schließlich zum Außenläufermotor weiterentwickelt. Im Jahr 1949 meldete er ihn beim Deutschen Patentamt als Patent an. Das im Jahr 1961 erteilte Patent DE 975 420 A beschreibt den Aufbau des als Außenläufermotor ausgebildeten Außenkäfigmotors. Figur 5 zeigt die Konstruktionszeichnung des Außenläufermotors. Der glockenförmige Außenkäfig 1, 2, 2' und 4, welcher über die Nabe 5 mit der Welle 6 formschlüssig verbunden ist, rotiert um den Innenstator, bestehend aus dem Blechpaket 12 und der Wicklung 13.



Figur 5: Außenläufermotor mit rotierendem Käfig (aus DE 975 420 A).

3.1.4. Der Papst-Motor

Den im Aluminiumdruckgussverfahren hergestellten Außenläufermotor mit Kurzschlusskäfig hat die Fachwelt in den Jahren 1955 bis 1975 mit dem Begriff „Papst-Motor“ gleichgesetzt. Hermann Papst hat seinen Motor schrittweise optimiert und ihn durch Variationen am Stator, am Rotor oder der Luftspaltgröße an die unterschiedlichsten Anwendungen angepasst. Beispielsweise erzielte er durch die Optimierung der Nutformung am Stator und das Einbringen von Nutenschlüssel mit sehr geringer Schlitzbreite eine unerwartete Reduktion der Eisenverluste bei nutenlosen Wirbelstrom- und Hystereseläufern (DE 1 168 554 B und DE 1 180 835 B). Durch unterschiedliche Ausführungen des Rotoraufbaus konnte Papst lastabhängig regelbare Wir-

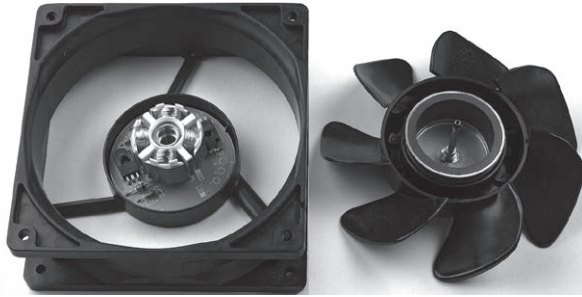
belstrom- und Induktionsläufer unterschiedlicher Charakteristik realisieren. Die Drehmoment- und Drehzahlcharakteristik der Außenläufermotoren konnten so an die unterschiedlichen Bedürfnisse der anzutreibenden Geräte angepasst werden.

Wegen des sehr guten Gleichlaufs, des geringen Streufeldes, der hohen Laufruhe und seiner bemerkenswerten Integrationsfähigkeit eignete sich dieser Kleinantrieb besonders für Anwendungen in der Unterhaltungs-, Büro- und Feinwerktechnik. In den Jahren von 1955 bis heute fanden die Außenläufermotoren eine breite Anwendung in Tonbandgeräten (DE 1 053 807 A, DE 976 338 B), Kassettenabspiel- und Diktiergeräten (DE 2 145 417 A, DE 1 231 453 A), elektrischen Schreibmaschinen (DE 1 966 205 A), medizinischen Geräten oder auch in Werkzeugmaschinen (DE 1 101 043 A, DE 904 562 B). Zudem wurden sie eingesetzt als lastabhängig regelbare Antriebe bei Textilmaschinen (DE 24 04 912 A1, DE 1 028 669 B, DE 1 510 897 A), als Synchron-Außenläufermotoren mit direkt aufgesetzten, rotierenden Spiegeln zum Einsatz in Sicherheitsanlagen oder als Motoren für HiFi-Plattenspieler (DE 1 175 785 B).

Ab den achtziger Jahren wurde der elektronisch kommutierte Gleichstrom-Außenläufermotor (EC) milliardenfach in der Datenspeicherung, insbesondere als Antrieb von Festplatten-Laufwerken eingesetzt (WO 98/44500 A1).

3.1.5. Der Papst-Lüfter

In den 1950er Jahren hat Hermann Papst erkannt, dass der Außenläufermotor durch sein rotierendes Außengehäuse besonders dafür geeignet ist, Träger für Lüfterräder oder mit ihm direkt verbundene Lüftungsschaufeln zu sein. In DE 1 752 098 B beschreibt Papst einen Einbaulüfter, für den am Gehäuse eines Außenläufermotors Lüfterflügel aufgelötet wurden. Die direkt auf die Motornabe aufgesetzten Flügel führten zu einer optimalen Wärmeableitung aus dem Motor, was wiederum vorteilhaft für den Motorbetrieb war. Die DE 1 088 183 A offenbart einen Deckenventilator mit drehzahlregelbarem Außenläufermotor, der drei Fächerblätter trägt.



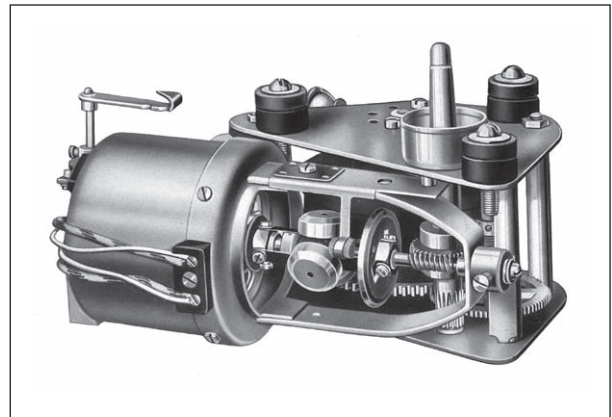
Figur 6: Gerätelüfter von Papst-Motoren mit Ständerwicklung (links) und Außenläufer (rechts) mit Lüfterschaufeln (Foto mit Genehmigung von Papst Licensing, St. Georgen).

Im Jahr 1963 beantragte Papst die Patenterteilung für einen Axiallüfter kompakter Bauart in quadratischer Grundform (DE 1 728 338 B). Dieser mit Wechselstrom betriebene Lüfter sollte der Belüftung von elektrischen Geräten dienen. Die Aufgabe nach DE 1 728 338 B ist es, die Leistung eines Axialventilators zu erhöhen, ohne dass die Größe und die Abmessungen des Ventilators über das den Ventilator durchmesser umschreibende Quadrat verändert werden. Papst erzielte die Leistungsverbesserung durch eine trichterförmige Ausgestaltung der Gehäuseecken und setzte somit den Strömungswiderstand herab. Im Jahr 1964 begann die Papst-Motoren KG mit der Großserienfertigung von Axiallüftern mit Außenläufermotor zur Elektronik- und Gerätekühlung ([1]). Figur 6 zeigt einen Axiallüfter für die Elektronik- kühlung, bestehend aus dem Ventilatorgehäuse mit der elektronischen Schaltung, dem Stator (links im Bild) und dem glockenförmigen Außenläufer mit den aufgesetzten Lüfterschaufeln (rechts im Bild).

4. Der duale Grammophonantrieb

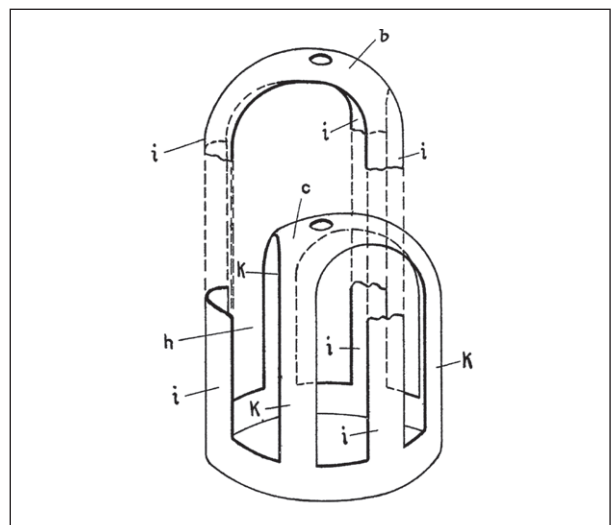
Während seiner Berufsjahre bei der Firma Gebrüder Steidinger hatte Papst maßgeblichen Anteil an der Entwicklung eines serienreifen Kleinantriebs, mit dem sich ein Grammophon gleichzeitig mit einem Elektromotor und einem mechanischen Antrieb bestücken ließ. Dieser Doppelantrieb eignete sich speziell für Kofferplattenspieler, da der Plattenteller wahlweise mit einem Federaufzugwerk oder einem Elektromotor angetrieben werden konnte. Hermann Papst hat dieses kombinierte Elektrofederwerk, das –

wie oben bereits erwähnt – unter dem Namen Dual ein Marktbegriff wurde, schrittweise optimiert. Figur 7 zeigt das von Hermann Papst konstruierte Elektrofederwerk, bei dem die Kraftübertragung vom Motor zum Plattenteller über ein Schneckengetriebe erfolgte. Für diese Konstruktion entwickelte Hermann Papst zunächst einen Motor mit einem eisenlosen, glockenförmigen Rotor mit Kollektoreinspeisung. Statt Magneten waren innen liegende Erregerspulen angeordnet ([1]).



Figur 7: Der Dualmotor: Elektromotor kombiniert mit einem Federlaufwerk, (Foto mit Genehmigung von Papst Licensing, St. Georgen).

Um die Lebensdauer des Elektroantriebs zu erhöhen, realisierte Papst in einer weiteren Ausführung einen raumgleichen Asynchronmotor ohne Kollektoren. Figur 8 veranschaulicht die Konstruktion des Rotorkäfigs (aus DE 552 465 A).



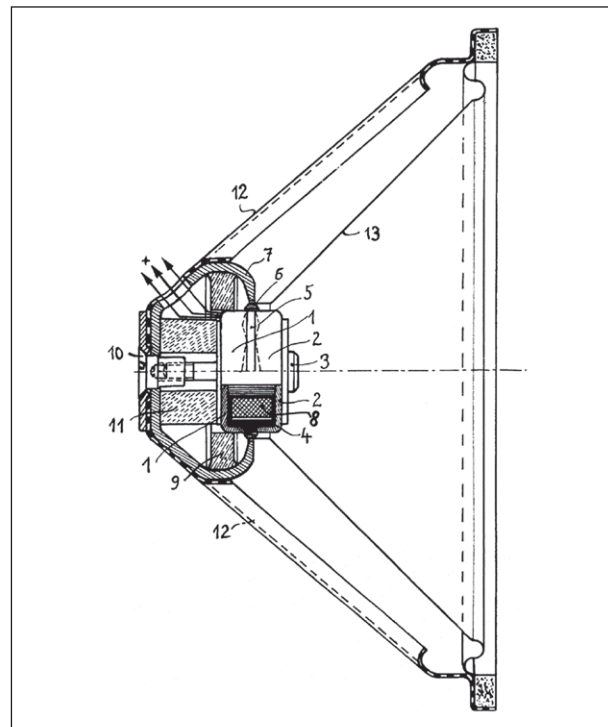
Figur 8: Hohlzylindrischer Außenläufer eines Asynchronmotors für Dual-Plattenspieler (aus DE 552 465 A).

Der glockenförmige Rotor ist mit axialen Schlitzfenstern versehen, um die Wirbelstromverluste herabzusetzen. Als Werkstoff für den Läufer schlägt DE 552 465 A Messing oder Kupfer vor. Der Läufer besitzt einen zylindrischen Teil, der auf der einen Seite durch zwei Böden b und c abgeschlossen ist. Des Weiteren enthält der Läufermantel zwei durch axiale Schlitzfenster h gebildete Stabgruppen i und k, die je in sich kurzgeschlossen und voneinander isoliert sind und deren Stäbe sich am Läuferumfang abwechseln, so dass im Läufer zwei gegeneinander isolierte Stromkreise entstehen. Mit dieser Ausführungsform erhielt man einen relativ leichten und ruhig laufenden Motor, der bei geringem Schlupf einen hohen Wirkungsgrad besaß. Dieser Motor wurde hunderttausendfach in Dual-Grammophone eingebaut ([1]).

5. Lautsprecher mit Ringanker

Zur Klangverbesserung von Lautsprechern hat Hermann Papst verschiedene Lautsprechersysteme entwickelt. Im Jahr 1933 meldete Papst ein Patent für ein Freischwinger-Magnetsystem an (DE 630 970 A). Bei diesem Lautsprecher mit Ringanker konnte durch eine winkelförmige Ausgestaltung der Ankerstirnfläche vermieden werden, dass sich der Anker bei großen Felddichteänderungen nachteilig verdreht. Über den gesamten Arbeitsbereich konnte somit ein dem Sprechstrom proportionaler Ausschlag der ferromagnetischen Teile des Ankers erzielt werden. Mit diesem obertonarmen Lautsprecher konnte Papst eine deutliche Klangverbesserung gegenüber den aus dem Stand der Technik bekannten Systemen erzielen. Figur 9 zeigt eine weitere Konstruktion aus dem Jahr 1937 (DE 763 939 A). Hierbei wird vom Rohrmagneten 11 eine Kraft auf den beweglichen Ringanker 6 ausgeübt, welcher wiederum die im Korb 12 befestigte Membran 13 antreibt. Die in dem Ringankerfeld angeordnete Schwingspule 8 ist über eine sogenannte Rollwendel 5 reibungs- und rückstellfrei gelagert. Der unmagnetische Ring 4, welcher den Ringanker 6 und die Polschalen 1 und 2 zueinander mittig hält, kann so den Ringanker ohne Rückstellkraft allseitig führen. Mit dieser Anordnung konnte ein sehr kleiner Luftspalt realisiert

werden, was den Wirkungsgrad und schließlich den Klang des Lautsprechers verbesserte. Mit der speziellen Konstruktion des Luftspaltes hat Papst einen obertonarmen Lautsprecher entwickelt, welcher in dem von der deutschen Rundfunkindustrie herausgebrachten Volksempfänger eingebaut wurde. Die Erfindung fand in Millionen von Geräten ihre Anwendung. Die daraus erzielten Lizenzgebühren bildeten viele Jahre die Existenzgrundlage des Ingenieurbüros von Papst ([8]).

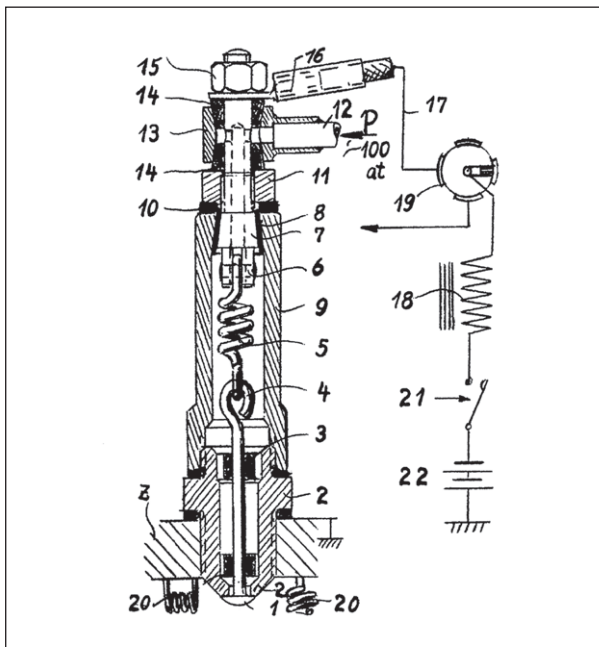


Figur 9: Lautsprecher mit Ringankersystem aus dem Jahr 1937 (aus DE 763 939 A).

6. Verbrennungsmotoren

Bereits im Jahr 1942 entwarf Hermann Papst eine Konstruktion für einen Taumelscheibenmotor mit einer gegenüber Brennkraftmaschinen mit einer Pleuelwellenanordnung kompakteren Bauform. DE 922 387 B beschreibt die Anordnung und Gestaltung der Pleuelstangen des Taumelscheibenmotors, deren Enden mit Hohlkugelschalen versehen waren. Diese Hohlkugelkonstruktion ermöglichte eine bessere Kraftübertragung des Verbrennungsdrucks auf die Taumelscheibe. In weiteren Entwicklungsschritten in den 1950er- und 1960er-Jahren

realisierte Papst einige Funktionsmuster ([1]). Ein zentrales Thema bei Papsts Forschungsarbeiten an Verbrennungsmotoren stellte die Optimierung der Kraftstoffeinspritzung dar. DE 905 907 B beschreibt hierfür ein als sogenannte Ventilszünddüse ausgestaltetes Kraftstoffeinspritzventil. Figur 10 zeigt die Zünddüse, deren Ventilschaft 1 direkt in den Brennraum ragt. Über die Kraftstoffleitung 12 wird Kraftstoff mit einem Druck von etwa 100 bar zugeführt. Das mit der Zündspule 18 verbundene Zündkabel 17 ist mit dem Kabelschuh 16 an der Düse befestigt. Wird der Ventilschaft mittels der Feder 5 vom Sitz 2 getrennt, wird ein Spannungsstoß generiert. Dabei wird zwischen der Mittelelektrode und der ringförmig gestalteten Gegenelektrode eine Funkenstrecke erzeugt. Der Kraftstoffstrahl tritt durch den Lichtbogen und entzündet sich. Ohne Verzug wird die Verbrennung eingeleitet. Dies hat zur Folge, dass nicht der flüssige Kraftstoff in den Zylinder eingespritzt wird, sondern der entzündete Kraftstoff in Form eines Feuerstrahls. In diese Anfangsflamme wird der weitere Kraftstoff eingespritzt.



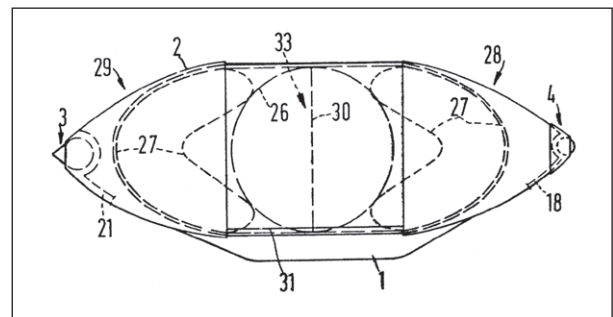
Figur 10: Ringspaltzünddüse aus dem Jahr 1941 (aus DE 905 907 B).

Wesentliche Fortschritte erzielte Hermann Papst bei der Entwicklung eines Hochdruckspeichers für die Kraftstoffeinspritzung. Um bei kleinen Dieselmotoren eine gute Verbrennung zu erzielen, sah er

es als notwendig an, kleine Kraftstoffmengen unter höchstem Druck in die Zylinder einspritzen zu können. DE 1 476 235 C3 beschreibt eine Kraftstoffspeichereinspritzpumpe, deren Einspritzcharakteristik drehzahlunabhängig ist und mit der auch bei hohen Drehzahlen der Brennkraftmaschine sehr kurze Einspritzzeiten erzielbar sind. Schon 1975 konnten mit dieser Einspritzpumpe die für diese Zeit außergewöhnlich hohen Einspritzdrücke von circa 1000 bar erreicht werden ([1]).

7. Dampfauftrieb-Luftschiff

Im Mai 1937 wurde der Zeppelin „Hindenburg“ bei der Landung im US-amerikanischen Lakehurst zerstört, als sich die Wasserstofffüllung entzündete. Getrieben durch diese Katastrophe beschäftigte sich Hermann Papst mit der Frage, wie Luftschiffe ohne Wasserstoff und Helium betrieben werden könnten ([9]).



Figur 11: Luftschiff mit Doppelwandhülle (aus DE 1 781 447 A).

In der im Jahr 1967 angemeldeten DE 1 781 447 A schlug Papst vor, zum Auftrieb von Luftschiffen den relativ auftriebsstarken Wasserdampf als Traggas zu verwenden. Damit der heiße Wasserdampf seine Wärme nicht kontinuierlich nach außen abgeben kann, konstruierte Papst eine wärmeisolierende, doppelwandige Außenhülle aus teflonbeschichtetem Polyestergerüst für sein Luftschiff. Zudem war vorgesehen, aus der Verbrennung von gespeichertem Erdgas auch neuen Wasserdampf generieren zu können. Das in der Figur 11 gezeigte Luftschiff besitzt neben seinem Kielgerüst 1 eine wärmeisolierende Außenhülle 2. Diese doppelwandige, mit Stickstoff gefüllte Hülle ist mit Spannseilen 31 und einem

Stützgerüst auf dem Kiel befestigt. Im Inneren enthält das Luftschiff mehrere ausstülpbare Zellen für die unterschiedlichsten Auftriebsgase. Die zentrale Zelle 33 ist für brennbares Gas vorgesehen. Der die Zelle 33 umgebende und durch die Stülpwände 27 begrenzte Raum ist mit dem Auftriebsgas, insbesondere mit heißem Wasserdampf gefüllt. Der Auftrieb des Luftschiffs wird über die veränderbare Befüllung der Ausgleichszellen 28 und 29 geregelt.

8. Fazit

Aus seinem im Jahr 1937 gegründeten Einmannbetrieb entwickelte Hermann Papst ein global agierendes Unternehmen. Sein Lebenswerk ist ein sehr gutes Beispiel dafür, dass Erfolg letztlich aus Ideen gemacht wird. Berühmt sind vor allem seine Papst-Außenläufermotoren, die in riesigen Stückzahlen als permanentmagneterregte Variante in der ganzen Welt heute noch ihren Dienst tun. Die Effizienz des Außenläufermotors in der kleinmotorischen Antriebstechnik sowie bei Laufwerken zur magnetischen Ton-, Bild- und Datenaufzeichnung wird bis heute von keiner anderen Antriebsform erreicht. Der Siegeszug des Elektromotors mit Außenläufer wird weiter gehen. Unter anderem weisen die Entwicklungen im Automobilbereich ein erhebliches Potential für den Einsatz des Außenläufermotors auf. Fünfzig Jahre nachdem Hermann Papst in DE 1 430 222 C3 ein „Fahrzeug zum wahlweisen Antrieb durch einen Verbrennungsmotor oder eine elektrische Maschine“ beschrieben hat, setzt die neue Mercedes S-Klasse mit Hybridantrieb auf einen Außenläufer als Fahrzeugantrieb [10]. Der Außenläufermotor hat zweifellos eine hochinteressante und spannende Zukunft.

Nicht-Patent-Literatur

- [1] MAURER, F.: Hermann Papst, 1. Auflage, Konstanz: Stadler-Verlag, 2002. ISBN 3-7977-0489-5
- [2] BRONNENMEYER, CH.: Max Grundig, Berlin: Ullstein-Verlag, 1999. S. 67. ISBN: 3-548-35877-2

- [3] DORN, P. O.: Der Ur-Mooly. In: Vidom, Nr. 83, Vereinszeitschrift Leica Historica e.V., 2005, S. 16-17
- [4] REDLICH, G.: Wer damals „Motoren“ sagte, meinte Papst. In: Tonbandmuseum [online], 18.02.2011 [recherchiert am 18.02.2011]. Im Internet: URL:<http://www.tonbandmuseum.info/die-firma-papst.html>
- [5] ABELE, J., MENER, G.: Der Tesla-Motor, In: Technikgeschichte, Modelle und Rekonstruktionen, Deutsches Museum. München: Prograph Verlag, 1997. ISBN: 3-924183-34-1
- [6] NEIDHÖFER, G.: Early Three-Phase Power History. In: IEEE Power & Energy Magazine, September 2007, S. 88-100
- [7] STÖLTING, H.-D., KALLENBACH, E.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe, München: Hanser-Verlag, 2002. ISBN: 3-446-21985-4, S. 88-92
- [8] WEIHER, S. VON: Männer der Funktechnik. Berlin: VDE-Verlag, 1983. S. 139-140. ISBN 3-8007-1314-4
- [9] GÖBEL, N.: Der Vater macht dem Luftschiff Dampf, In: Südkurier, St. Georgen, 09.02.2011.
- [10] BLUMENSTOCK, K.-U.: Elektromotoren-Entwicklung: Das sind die Entwicklungs-Trends, In: auto motor und sport, 16. März 2010 [recherchiert am 28.02.2011]. Im Internet: URL: <http://www.auto-motor-und-sport.de/eco/elektromotoren-das-sind-die-entwicklungstrends.html>

Die Herstellung von Nanopartikeln

Dr. Johannes Freudenreich, Patentabteilung 1.43

Zum Begriff Nanopartikel existiert keine international gültige Definition. Gemeinhin handelt es sich um Partikel, die in zumindest einer Dimension kleiner oder gleich 100 nm sind. Ein Nanometer entspricht einem Milliardstel Meter. Viele Anmelder definieren jedoch 1000 nm, also 1 Mikrometer, als Obergrenze. Nanopartikel besitzen außergewöhnliche Eigenschaften, deren industrieller Nutzen sich über eine Vielzahl von Anwendungsgebieten erstreckt. Je nach Herstellungsverfahren können Nanopartikel mit enger oder breiter Partikelgrößenverteilung (Polydispersität) erhalten werden, so dass für bestimmte Anwendungsbereiche oftmals nur bestimmte Herstellungsmethoden in Frage kommen. Dieser Artikel behandelt Neuerungen auf dem Gebiet der Synthese von Nanopartikeln mit Fokus auf die nationale Patentliteratur des vergangenen Jahrzehntes.

1. Einleitung

Die Nanotechnologie als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts war bereits Gegenstand der Erfinderaktivitäten [1]-[3]. Im Folgenden soll versucht werden, einer etablierten Systematik für die Herstellung derartiger Verbindungen folgend [4], [5], die verschiedenen Methoden anhand ausgesuchter Beispiele vornehmlich nationaler Patentanmeldungen zu beleuchten und zu diskutieren.

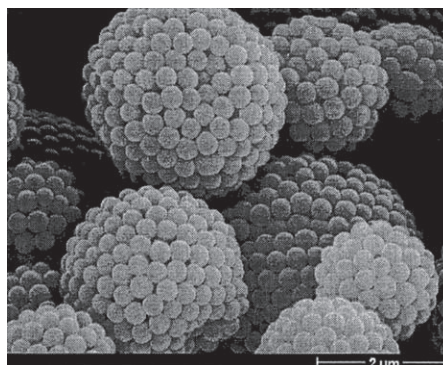
Betrachtet man die weltweite Entwicklung, ist festzustellen, dass die USA hinsichtlich Menge und Vielfalt der Patentanmeldungen derzeit führend sind. Bei den Patentanmeldungen europäischer Länder und damit auch Deutschlands dominieren solche auf dem Gebiet der Nanobiotechnologie, in Japan auf dem Gebiet der Nanoelektronik. Auch China zeigt in seiner Patenttätigkeit auf dem Gebiet der Nanotechnologie starkes Wachstum, während die ebenfalls rasch steigenden Aktivitäten russischer Anmelder derzeit wenig beachtet werden. Die Herstellung von Nanomaterialien befindet sich noch immer in einer Frühphase, was sich darin zeigt, dass sehr viele Patente die Herstellungsmethode und die Nanopartikel beanspruchen können [4].

2. Überblick

Nanopartikel werden im Prinzip auf zwei unterschiedliche Arten erzeugt, nämlich mit der sogenannten „Top-Down“-Technik durch mechanisch-physikalisches Zerkleinern von größeren Ausgangsmaterialien oder mit der sogenannten „Bottom-Up“-Technik, bei welcher kleine molekulare Komponenten selbstorganisierend zu größeren Verbänden zusammengesetzt werden. Daneben kann als dritte Technik die Modifizierung bereits vorhandener Nanopartikel genannt werden, welche mit keiner signifikanten Größenänderung der Partikel verbunden ist. Diese Technik wird jedoch selten als eigener Schritt, sondern regelmäßig gleichzeitig mit den Abbau- oder Aufbauverfahren durchgeführt.

Aufgrund der hohen Oberflächenenergie von Nanopartikeln verbrücken diese im trockenen Zustand innerhalb weniger Sekunden zu größeren Verbänden

(vgl. Figur 1), so dass stabile, vereinzelte Nanoteilchen im trockenen Zustand bislang nicht bekannt sind.



Figur 1: Cluster von Nanopartikeln (DE 10 2005 061 965 A1)

Um nicht aggregierte Nanopartikel zu erhalten, müssen Trägermedien wie beispielsweise Lösungsmittel oder Polymere als „Verdünnungsmittel“ vorhanden sein, welche die Nanopartikel im notwendigen Abstand halten und optional Dispergiermittel zugegeben werden.

2.1. „Top-Down“-Verfahren

Die Zerkleinerung größerer Ausgangsmaterialien auf mechanischem Weg erfolgt in der Regel durch Mahlen. Da das Mahlen keine gezielte Steuerung der Partikelgröße erlaubt, sondern zu Produkten mit breiter Streuung der Partikelgrößen führt, können diese Verfahren nur dann eingesetzt werden, wenn die gewünschten Partikelgrößen nicht eng verteilt sein müssen oder wenn das Preisgefüge für das Produkt ein Nacharbeiten zum Beispiel durch wiederholtes Mahlen oder Klassieren (Trennen eines Feststoffgemisches in Fraktionen, vorzugsweise nach den Kriterien Partikelgröße oder Partikeldichte, z.B. mittels Sieben) gestattet.

Beim Trockenmahlen in einer Trommelmühle ermöglicht die Integration von Siebeinsätzen die kontinuierliche Abnahme von Nanoteilchen mit mittleren Partikeldurchmessern $<1 \mu\text{m}$ (DE 100 16 388 A1). In der so genannten Reaktivmahlung können Nanoteilchen während des Mahlvorgangs mit chemischen Substanzen an der Oberfläche modifiziert werden (DE 100 35 679 A1, DE 10 2006 047 302 A1).

Nassmahlverfahren bieten den Vorteil, dass die gebildeten Nanopartikel bereits in einem stabilisierenden Verdünnungsmittel vorliegen, was deren Aggregation einschränkt. Zur weiteren Stabilisierung können Dispergiermittel zugesetzt werden. Nassmahlverfahren werden bei organischen und anorganischen Substanzen angewendet (DE 10 2008 035 515 B3, DE 103 03 527 A1), wobei Dispersionen oder Suspensionen der Ausgangsmaterialien mit keramischen Mahlkugeln, die üblicherweise aus Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid bestehen, gemahlen werden. Redispergierbare Nanopartikel erhält man durch Reaktivmahlung größerer Partikel in Anwesenheit von Dispergiermitteln und optional Kristallisations-

inhibitoren in einer Mühle wie einer Kugelmühle oder einem Dissolver (Scheibenrührer) mit Glaskugeln (DE 10 2005 047 807 A1).

Bei der Herstellung von Pharmazeutika im Nanometer-Maßstab sind Verunreinigungen, die vom Mahlkörper oder den Mahlkammern herrühren, nicht akzeptabel. Dieser Problematik wird durch den Einsatz von vermahlenden Oberflächen aus Nylon mit eingearbeiteten Gleitmitteln (DE 601 05 023 T2), durch Einsatz polymerer Harze als Mahlkörper (DE 693 28 815 T2) oder durch Beschichtung der Mahlkörper mit Polymeren (DE 698 31 677 T2) begegnet.

Sehr feine Dispersionen von Nanopartikeln können gewonnen werden, wenn Lösungen der Edukte lyophilisiert oder sprühgetrocknet und die erhaltenen Pulver dispergiert und entweder durch Mahlverfahren oder durch alternative Zerkleinerungsverfahren mittels Hochdruckhomogenisator, Jet-Stream-Gerät, Rotor-Stator-Kolloidmühle oder Ultraschall behandelt werden (DE 10 2005 017 777 A1, DE 10 2005 011 786 A1). Abhängig von der Vorbehandlung der Edukt dispersion sind dabei mehrere Homogenisationszyklen notwendig. Es lassen sich mittlere Partikelgrößen von weniger als 100 nm erzielen.

Nanokompositmaterialien lassen sich nach DE 10 2006 025 848 A1 durch ein im Trockenen durchzuführendes Dispersionsverfahren herstellen, bei dem anorganische oder organische Teilchenagglomerate in organisch basierte Matrixpartikel durch Anlagerung oder Einlagerung dispergiert werden, wobei eine Vorrichtung vom Rotor-Stator-Typ mit Prallplatten Anwendung findet.

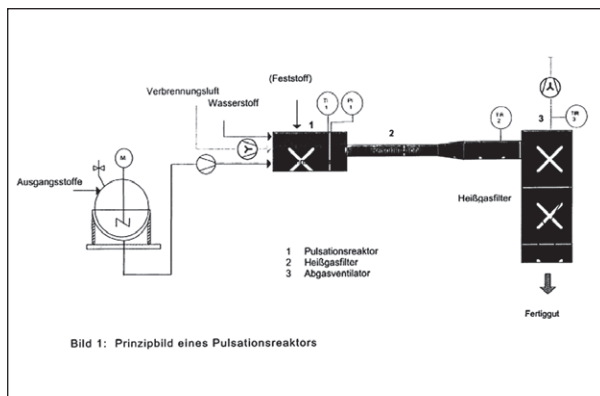
2.2. „Bottom-Up“-Verfahren

Die weltweit überwiegende Zahl an Anmeldungen liegt auf dem Gebiet der „Bottom Up“-Verfahren, also der aufbauenden Synthese von Nanopartikeln. Im Vergleich mit den „Top-Down“-Verfahren gewährleistet die „Bottom-Up“-Methode eine bessere Kontrolle der Partikelgröße und Partikelform. Als nicht-mechanisches Verfahren kann die aufbauende Synthese von Nanopartikeln in der Gasphase,

an Phasengrenzen und in flüssiger Phase durchgeführt werden.

2.2.1. In der Gasphase

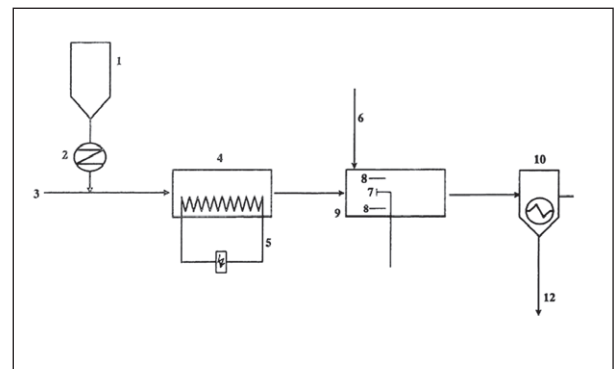
Für die Synthese in der Gasphase werden häufig Pulsationsreaktoren eingesetzt (Figur 2 aus DE 101 11 938 A1).



Figur 2: Aufbau eines Pulsationsreaktors (DE 101 11 938 A1)

Ein derartiger Reaktor, der mit einem Verbrennungsmotor verglichen werden kann, besteht aus einer Brennkammer (1), an die sich abgasseitig ein Resonanzrohr (2) mit einem gegenüber der Brennkammer verringerten Strömungsquerschnitt anschließt. Zur Herstellung der Nanopartikel werden Lösungen oder Suspensionen der Ausgangsmaterialien in eine heiße Gasströmung verdunstet, wobei eine sehr rasche Verbrennung des Brennstoff-Luftgemisches unter Bildung von Überdruck erfolgt und eine Druckwelle in Richtung Resonanzrohr entsteht. Dies führt dann zu einem Unterdruck in der Brennkammer. Die Gaseintrittsseite wird durch Ventile bei Überdruck verschlossen, bei Unterdruck strömt neues Verbrennungsgemisch nach, das selbst zündet. Damit wird ein periodischer Prozess mit hohem Turbulenzgrad in Gang gesetzt. Auf diese Weise lassen sich verschiedenartige Metallmischoxide mit Kristallitgrößen unter 500 nm darstellen (DE 101 11 938 A1, DE 10 2007 059 990 A1, DE 10 2008 017 311 A1). Durch den Einsatz von Pulsationsreaktoren kann die Agglomeration der Nanoteilchen bei der Synthese unterbunden werden.

Eine andere Methode, die Agglomeration von Nanoteilchen zu unterbinden, ist in DE 10 2004 033 320 A1 durch das Aufbringen elektrischer Ladung auf die Teilchen verwirklicht (Figur 3). Hier werden die Ausgangsmaterialien im Ofen (4) in die Gasphase und mittels eines Trägergases (3) in eine Vorrichtung (9) überführt, in die zur Abkühlung des Trägergases ein Kühlgas (6) eingeleitet wird. Durch die Abkühlung scheiden sich die die Feststoffe aus dem Trägergas ab und werden bei der Entstehung mit Hilfe elektrischer Feldes, das über die Sprühelektrode (7) und von dieser separierte Anoden (8) erzeugt wird, elektrostatisch geladen.



Figur 3: Verfahrensfließbild zur Herstellung elektrostatisch geladener Nanopartikel (DE 10 2004 033 320 A1)

Auch gemäß DE 10 2004 049 850 A1 lassen sich Nanopartikel durch Überführen der Ausgangsmaterialien in die Gasphase und anschließendes Abkühlen gewinnen. Hier wird jedoch die Gasphase beim Abkühlen komprimiert, wozu eine Flüssigkeitsringpumpe eingesetzt wird. Die erhaltenen Nanopartikel weisen einen mittleren Durchmesser von 500 nm auf.

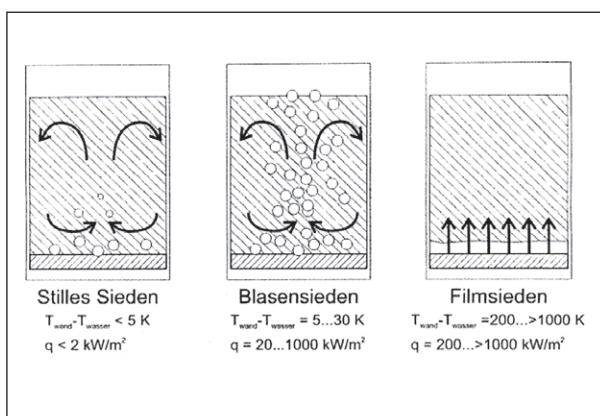
Ebenfalls ohne großen apparativen Aufwand ist die Herstellung von auf Kohlenstoff basierenden Nanoteilchen möglich. Hierfür werden feste, nicht unzerstört verdampfbare Salze von Übergangs- und Selten-erdmetallen rasch aufgeheizt und unter Ausschluss von Sauerstoff pyrolysiert (DE 10 2008 045 742 A1).

Die Gewinnung von Nanoteilchen durch Laserverdampfung ist in DE 101 60 817 A1 beschrieben. Die Neuerung besteht darin, dass das eingesetzte grobkörnige Ausgangsmaterial von 1 bis 1000 µm Teilchendurchmesser durch einen Gasstrom vereinzelt und

mittels Düsen dem Laserstrahl so zugeführt wird, dass sich die einzelnen Pulverstrahlen im Fokus der Laserstrahlung treffen. Auf diese Weise wird der direkte mechanische Kontakt und der Wärmeaustausch zwischen den Partikeln reduziert, was große Teile der durch den Laserstrahl eingebrachten Energie erhält, da diese nicht in weiteres Ausgangsmaterial abfließen kann.

2.2.2. An Phasengrenzen

An der Phasengrenze zwischen Flüssigkeit und Dampfphase ist die Erzeugung von oxidischen Nanopartikeln durch sogenanntes „Filmsieden“ gemäß DE 10 2006 038 703 A1 möglich. Diese Synthese kann in jedem Haushalt durchgeführt werden, da sich die apparative Ausstattung in einem „schlichten Becherglas auf einer Heizplatte“ erschöpft. In diesem Becherglas werden wässrige Metallsalzlösungen erhitzt, bis sich unterhalb des Wasserkörpers ein Wasserdampfpolster bildet. Das „Filmsieden“ findet statt, wenn der Temperaturunterschied zwischen der wärmeübertragenden Wand (dem Boden des Becherglases) und dem Wasser bei 200 Kelvin und darüber liegt (Figur 4). Der Dampf wird nicht mehr schnell genug vom Wasser aufgenommen und abgeführt, so dass sich ein isolierendes Dampfpolster zwischen Wasser und Wand bildet.



Figur 4: Siedeverhalten von Wasser für verschiedene Temperaturdifferenzen zwischen einer an das Wasser Wärmeenergie abgebenden Wand und Wasser (DE 10 2006 038 703 A1).

Unter diesen Bedingungen bilden sich aus Metallsalzen Nanopartikel an der Unterseite des Wasserkörpers, welche Auftrieb erfahren und sich an der Wasseroberfläche sammeln. Diese können dann durch einfaches Eintauchen eines Gegenstandes als Film auf diesen abgeschieden werden. Ein ähnliches Verfahren ist DE 10 2005 060 407 B3 zu entnehmen, bei welchem Metallsalzlösungen auf eine erhitzte Kochplatte gegeben werden. Die Tropfen schweben hierbei auf dem eigenen Dampfpolster (Leidenfrost-Effekt) und verbleiben als verteilte Nanostrukturen auf der Oberfläche.

Nanopartikel lassen sich auch durch die Reaktion von festen Metallen mit geeigneten Partnern darstellen. In DE 10 2008 034 452 A1 wird ein Verfahren zur Herstellung von Metalldisulfid-Nanostrukturen wie Nanoflakes oder Nanoröhren beschrieben, bei welchem Metalle induktiv auf bis zu 1400 °C erhitzt und mit gasförmigen Schwefelverbindungen einstufig zu einer Reaktion gebracht werden, die in weniger als 50 Minuten abgeschlossen ist.

2.2.3. In Flüssigkeiten

Fällungsreaktionen zählen zu den wichtigsten Reaktionen bei der Herstellung von Nanopartikeln, da sie eine gezielte Steuerung der Partikelgröße bei geringem apparativem Aufwand zulassen. Als Ausgangsmaterialien finden im Allgemeinen Metallverbindungen oder Polymere Anwendung, die in wässrigen oder organischen Lösungsmitteln gelöst sind. Unter den organischen Lösungsmitteln gewinnen die ionischen Lösungsmittel bei solchen Reaktionen zunehmende Bedeutung, da sie als flüssige organische Salze besondere Eigenschaften wie thermische Stabilität, fehlende Entzündlichkeit sowie elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Zudem sind sie fähig Substanzen zu lösen, die in herkömmlichen Lösungsmitteln nicht gelöst werden können.

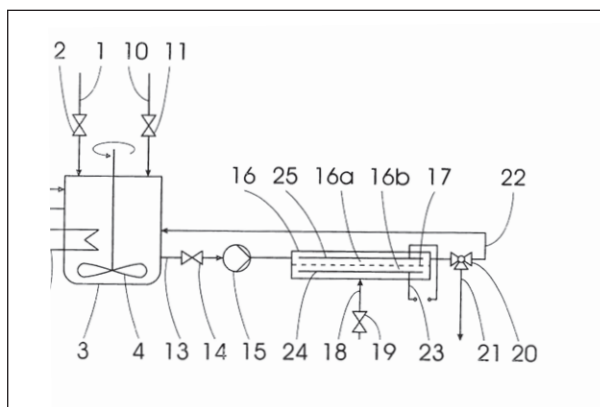
Spezielle Vorrichtungen erlauben dabei eine kontinuierliche Herstellung von Nanopartikeln, was gerade für großtechnische Anwendungen von Vorteil sein kann, da eine hohe Ausbeute über eine geringe Zeitdauer ermöglicht wird.

Der Einsatz von Mikroreaktoren ermöglicht die kontinuierliche Herstellung von Nanopartikeln durch Umsetzung von Lösungen des Ausgangsmaterials mit Lösungen der Fällungsreagenzien in mehreren Flüssigkeitsstrahlen, die sich schnell durchmischen. Diese Methode eignet sich sowohl für die Herstellung von Nanopartikeln auf Metallbasis als auch für solche aus Polymeren (DE 199 25 184 A1, DE 10 2005 048 201 A1). Das Reaktionsvolumen kann dabei den Kubik-Mikrometer-Bereich überschreiten, wenn die Flüssigkeitsstrahlen der Reaktionspartner über definierte Winkel aufeinander gerichtet sind (DE 10 2007 008 878 A1).

Auch die Membrantechnik kann für kontinuierliche Verfahren genutzt werden.

Nanopartikel auf Basis von Polymeren können dadurch gewonnen werden, dass in einem Lösungsmittel gelöste Polymere durch die Poren der Membran in ein Fällungsmittel geführt werden (DE 10 2005 025 057 A1). Fällungsmittel stellen Lösungsmittel dar, in welchen sich die Polymere nicht lösen. Sie werden als „Nicht-Lösungsmittel“ bezeichnet.

Die Umsetzung von gelösten Edukten mit gasförmigen Reaktionspartnern wird mittels einer Membraneinheit verwirklicht (Figur 5), bei welcher eine Membran (17) den Reaktionsraum in einen Flüssigkeitsraum (16a) und einen Gasraum (16b) unterteilt. Der Flüssigkeitsstrom des gelösten Ausgangsmaterials wird kontinuierlich mit dem durch die Membran eingeleiteten gasförmigen Reaktionspartner (18) versetzt (DE 10 2006 020 288 A1).



Figur 5: Umsetzung von flüssigen mit gasförmigen Reaktionspartnern mittels Membrantechnik (DE 10 2006 020 288 A1)

Allen Fällungsreaktionen ist das Problem gemein, dass die zunächst ausgefallenen, sehr kleinen Partikel mit der Zeit zu stabileren, größeren Kristallen anwachsen. Diesem Problem wird durch Zusatz von Stabilisatoren, sofortige Trocknung oder Eintrag mechanischer Energie begegnet.

Unter den zahlreichen Fällungsmethoden wird häufig die Entfernung von Lösungsmitteln für die Ausgangsverbindung oder der Zusatz von „Nicht-Lösungsmitteln“, wie diese oben bereits besprochen wurden, praktiziert.

Wasserlösliche Nanopartikel aus Lithiummolybdat lassen sich entsprechend durch Herstellung einer durch Polymere stabilisierten Wasser-in-Öl Emulsion des Ausgangsmaterials gewinnen, indem Wasser bis auf einen kleinen Restgehalt durch Trocknungsmittel oder durch destillative Verfahren entfernt wird (DE 10 2006 005 165 A1). Metallphosphate werden als Nanopartikel durch Sprühtrocknung gewonnen. Dabei wird die Lösung des Ausgangsmaterials unter Zugabe organischer Carbonsäuren durch Versprühen bei Temperaturen oberhalb 100 °C von Wasser und Säure befreit (DE 10 2006 033 152 A1). Es werden Teilchengrößen kleiner 200 nm gebildet. Zusatz organischer Lösungsmittel wie Alkohol oder Aceton zu einer sauer eingestellten wässrigen Gelatine-Lösung führt zu Nanopartikeln aus Gelatine mit schmaler Partikelgrößenverteilung (DE 10 2004 041 340 A1).

Ein vielseitig einsetzbares Verfahren zur kontinuierlichen Darstellung von Nanopartikeln ist in DE 10 2005 053 862 A1 beschrieben. Dabei wird der Flüssigkeitsstrom der Lösung eines Wirkstoffes mit einem zweiten Flüssigkeitsstrom, der den Wirkstoff nicht oder schlechter löst, in einer hochenergetischen Zone wie einer Ultraschallzone oder einem Rotor-Stator-Spalt vermischt, wobei die Nanopartikel durch Verdrängung des Lösungsmittels ausfallen.

Gefällte amorphe Metalloxid(hydroxid)-Partikel können in kristalline Nanopartikel mit Partikeldurchmessern kleiner 50 nm überführt werden, wenn die Metalloxid(hydroxid)-Partikel als Dispersion in einem Gemisch aus ionischer Flüssigkeit und Cosolvens zur Entfernung des Cosolvens erwärmt

werden und anschließend im Vakuum mit Mikrowellen bestrahlt werden (DE 10 2006 011 754 A1).

Ohne Entfernung von Cosolvenzien erfolgt die Herstellung von Nanopartikeln durch Veränderung der Reaktionsparameter und/oder durch Zugabe geeigneter Reaktionspartner.

Zu dieser Methodik existieren zahllose Anmeldungen, so dass im Folgenden nur beispielhaft gezeigt werden kann, wie unterschiedlich die Ansätze gewählt werden.

DE 10 2007 001 473 A1 beschreibt ein Herstellungsverfahren durch Verschiebung des pH-Wertes. So lassen sich Ausgangsmaterialien wie das Pharmazeutikum Ibuprofen, dessen Löslichkeit pH-abhängig ist, durch Absenken des pH-Wertes in der Lösung gewinnen. Diese Absenkung, also das „saurer Machen“ der Lösung erfolgt durch Zusatz von festem Kohlendioxid und Anwendung von Druck. Die Bildung größerer Kristalle wird dabei durch Hochdruckhomogenisation verhindert.

Im alkalischen Medium sind Metalloxid(hydroxide) als Nanoteilchen nach Druckschrift DE 10 2004 016 649 A1 herstellbar. Die Lehre besteht in der Umsetzung von Metallsalzlösungen mit Hydroxiden und Polyasparaginsäure als Modifizierungsmittel, wobei modifizierte Nanopartikel mit 10 bis 200 nm Durchmesser erzeugt werden. In einer Variante gemäß DE 10 2005 046 263 A1 kann die Lösung dabei bis auf Temperaturen von 300°C temperiert werden.

DE 102 54 567 A1 nutzt die Eigenschaften koordinierender Lösungsmittel wie der von Polyalkoholen, beim Ausfällen von löslichen Erdalkalimetallsalzen mit Sulfaten. Die erhaltenen Kristalle haben Teilchengrößen von 0,5-50 nm.

In DE 10 2007 045 878 A1 werden in ionischen Lösungsmitteln gelöste metallhaltige Verbindungen thermisch, photolytisch oder oxidativ zersetzt, um Metallnanopartikel zu bilden. Dabei wird die stabilisierende Eigenschaft ionischer Lösungsmittel ausgenutzt, die den Zusatz weiterer Dispergiermittel entbehrlich

macht. Es wird angenommen, dass die erste, die Nanopartikel direkt umgebende Ionenschicht aus Anionen aufgebaut ist, so dass sich die einzelnen entstehenden Kern-Schale-Partikel gegenseitig abstoßen.

Durch Komplexbildung werden in der DE 10 2005 041 860 A1 Nanopartikel erhalten, indem Lösungen kationischer Wirkstoffe mit anionischen Einschlussbildnern in Kontakt gebracht werden.

Unter Hydrothermalverfahren versteht man das Erhitzen von Lösungen eines Ausgangsmaterials mit Reaktionspartnern in einem geschlossenen Behälter unter Druck. Das Verfahren gewährleistet homogene Fällungsbedingungen und damit Kristalle mit enger Partikelgrößenverteilung.

In DE 10 2006 032 590 A1 werden Lösungen aus Metallsalz und schwach basischen Amin-Verbindungen als Fällungsreagenz hydrothermal umgesetzt, was Nanopartikel mit Partikelgrößen unter 10 nm hervorbringt. Die DE 602 20 941 T2 verwendet einen gerührten Rohrreaktor zur Durchführung dieses Verfahrens bei der Herstellung von Mischoxiden.

Auch kombinierte Fällungs- und Nachbehandlungsverfahren können zu vorteilhaften Eigenschaften bei Nanopartikeln führen.

In DE 10 2006 017 696 A1 werden Metallsole durch Reaktion von Metallsalzlösungen mit Hydroxiden und Reduktion des gebildeten Metallhydroxids zum Metall gewonnen, wobei in einem der beiden Reaktionsschritte Dispergierhilfsmittel genutzt werden. Das angewendete Verfahren ermöglicht die Herstellung von Solen mit einem Metallpartikelgehalt von größer 1 g/l.

Neben den Fällungsreaktionen kommen andere Methoden zur Herstellung von Nanopartikeln aus der Lösung in Frage.

Nanopartikel auf Metallbasis werden beispielsweise auf elektrochemischen Weg gewonnen.

In DE 10 2007 038 879 A1 erfolgt die Herstellung von Metallnanopartikeln in ionischen Flüssigkeiten mittels Reduktion von Metallsalzen mit Wasserstoff im Autoklaven. Dabei kann es vorteilhaft sein, Protonenfänger zuzusetzen, um die aus den Anionen der eingesetzten Metalle freiwerdende Säure abzufangen und das Zusammenlagern der gebildeten Nanoteilchen zu verhindern. Es können Nanopartikel aus Silber mit einer mittleren Partikelgröße von 3 nm erzielt werden.

Statt mit Wasserstoff als Reduktionsmittel lassen sich in ionischen Flüssigkeiten gelöste Metallsalze auch mit freien Elektronen einer Plasmaphase reduzieren, die durch homogene Gasentladung eines inerten oder reaktiven Prozessgases bei hohen Drücken zwischen zwei Elektroden erzeugt wird (DE 10 2006 013 871 A1). Im Fall von Silber liegt der Durchmesser der so erzielbaren Nanopartikel bei 5 bis 50 nm.

Auch auf oxidativem Weg können Nanopartikel gewonnen werden.

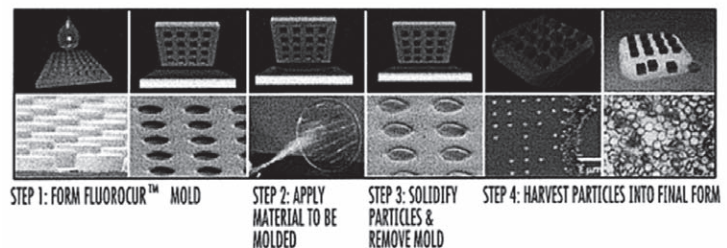
Durch anodisches Auflösen von Metallen in einem wässrigen Elektrolyten, der eine Fällungskomponente und ein Oberflächenmodifizierungsmittel enthält, werden an der Oberfläche modifizierte Nanopartikel gebildet. Die im Zuge der Reaktion oxidativ gebildeten Metallionen werden in situ, also im Augenblick der Bildung, mit dem Fällungsreagenz und dem Modifizierungsmittel zu Nanopartikeln umgesetzt (DE 10 2005 044 873 A1).

Im Sol-Gel-Verfahren führt die Hydrolyse von Metallalkoholaten zur Bildung von Nanopartikeln. Hochkonzentrierte Titandioxid-Sole mit Teilchengrößen zwischen 20 und 50 nm lassen sich gemäß DE 10 2004 029 303 A1 durch Hydrolyse von Titanalkoholaten in Gegenwart eines Emulgators und eines komplexierend wirkenden aprotischen Lösungsmittels durch nachfolgendes Stabilisieren mit Alkyltrialkoxysilanen gewinnen. In protischen Lösungsmitteln wie Alkoholen werden Zinkoxid-Nanopartikel mit vergleichbarer Partikelgröße durch Hydrolyse von Zinksalzen und Modifikation der gebildeten Zinkoxid-Partikel mit Silanen erhalten. Die Partikel-

größe kann dabei „online“ über UV-Absorption der Lösung verfolgt und weiteres Teilchenwachstum durch Zugabe von Silanen abgebrochen werden (DE 10 2007 032 189 A1).

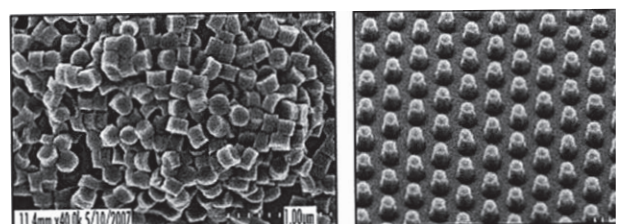
2.2.4. Durch Formung

Monodisperse und hinsichtlich Größe und Form beliebig einstellbare Nanopartikel sind nach einem Verfahren zugänglich, wie es in WO 2010/0098087 A1 beschrieben ist. Figur 6 zeigt die wesentlichen Verfahrensschritte. Eine mikro- beziehungsweise nanostrukturierte Hohlform („Mold“), die über Methoden der Halbleitertechnik gefertigt und mit einer abweisenden Beschichtung versehen ist (Schritt 1 = Step 1) wird mit dem zu formenden flüssigen Material beschickt (Schritt 2 = Step 2), das Material wird ausgehärtet (Schritt 3 = Step 3) und die Partikel aus der Hohlform entfernt (Schritt 4 = Step 4).



Figur 6: Herstellung monodisperser Nanopartikel über Hohlformen (aus WO 2010/0098087)

Dieses Mikro- oder Nanospritzgußverfahren ermöglicht die Herstellung von Nanoteilchen mit beliebigen Größen und Formen. Insbesondere asphärische Formen sind auf diese Weise ohne Weiteres zugänglich. Im Gegensatz zu allen bisher aufgeführten Verfahren können hinsichtlich Größe und Form völlig einheitliche Partikel geschaffen werden (Figur 7). Gehören alle Partikel einer Größenklasse an, spricht man von Monodispersität.



Figur 7: Monodisperse Nanopartikel (aus WO 2010/0098087)

2.4. Modifizierungsverfahren

Obwohl die Modifizierung von Nanopartikeln in der Regel während der Nanopartikelbildung durchgeführt wird, kann ein zweistufiges Vorgehen, nämlich die Herstellung der Nanopartikel gefolgt von deren separater Modifizierung, sinnvoll sein.

So werden Nanopartikel durch Reaktion mit Silylierungsreagenzien oleophil, wodurch sie statt in wässrigen in organischen Lösungsmitteln dispergiert werden können (DE 103 11 849 A1).

Die Oberflächenmodifizierung von anorganischen Nanopartikeln mit mehreren Schichten, verbessert deren Dispergierbarkeit und Stabilität in verschiedensten Anwendungsbereichen (DE 10 2008 052 678 A1, DE 102 47 359 A1).

Für pharmazeutische Anwendungen können Nanopartikel beispielsweise adsorptiv mit Substanzen belegt werden, die diese chemisch oder biologisch wirksam machen (DE 10 2008 023 228 A1, DE 100 63 092 A1) oder Antigene an bereits funktionalisierte Nanopartikel gekoppelt werden, um eine Zielsteuerung über die interstitielle Flüssigkeit (Flüssigkeit zwischen den Zellen) zu ermöglichen (DE 10 2008 033 175 A1).

3. Zusammenfassung und Ausblick

Selbst wenn man sich auf die deutsche Patentliteratur beschränkt, findet sich eine Vielzahl an Methoden zur Herstellung von Nanopartikeln, wobei nicht nur physikalische Verfahren, sondern in großer Anzahl auch chemische Fällmethoden zur Anwendung gebracht werden. Das breite Spektrum an Herstellungsmethoden erlaubt die Herstellung von Partikeln mit breiter oder wahlweise enger Partikelgrößenverteilung, mit Oberflächenmodifikationen und dergleichen mehr.

Die Anwendung von Nanopartikeln erstreckt sich in fast alle Bereiche des täglichen Lebens. Sie finden nicht nur in Medikamenten oder Kosmetika wie

Sonnenschutzcremes Anwendung, sondern auch als nicht schmutzende Beschichtungen, als Zusätze für Textilien oder in der Computerindustrie. Diese vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten bieten Anlass auch für zukünftig rege Patentierungstätigkeit aus allen Bereichen der Technik.

Nicht verschwiegen werden soll jedoch die laufende Diskussion zur Toxikologie derartiger Verbindungen. Da Nanopartikel mit Eiweißmolekülen der Zelle hinsichtlich der Größe vergleichbar sind, sollten sie ebenso wie die Eiweißmoleküle in die Zelle aufgenommen werden können. Was jedoch dann mit den Zellen passiert, ist derzeit weitgehend unbekannt. Als neuer Wissenschaftszweig steckt die Nanotoxikologie noch in den Kinderschuhen, so dass Wohl oder Wehe der Nanopartikel von zukünftigen Untersuchungsergebnissen abhängig ist.

Nicht-Patent-Literatur

- [1] MAKSYMOW, R.: Nanotechnik. Erfinderaktivitäten 2000, Deutsches Patent- und Markenamt, S. 39-40.
- [2] KALLINGER, C.: Nanoröhren – Bausteine der Zukunft. Erfinderaktivitäten 2001, Deutsches Patent- und Markenamt, S. 2-6.
- [3] KRÜGER-GRASSER, R.: Nanopartikel in der Oberflächenbehandlung. Erfinderaktivitäten 2001, Deutsches Patent- und Markenamt, S. 7-11.
- [4] ILIEV, I.: Recent Patenting Trends In NanoParticle Manufacturing. Nanoformulation 2010, Stockholm, Book Of Abstracts, S. 42.
- [5] SIMKÓ, M. et al.: Herstellungsverfahren von Nanopartikeln und Nanomaterialien. NanoTrust-Dossier Nr. 006, 2008: epub.oeaw.ac.at/ita/nano-trust-dossiers/dossier006.pdf. ISSN: 1998-7293.

Perpetua mobilia

Dipl.-Phys. Uwe Gebranzig, Patentabteilung 1.13

Im vorliegenden Beitrag werden Perpetua mobilia erster und zweiter Art erläutert sowie die zugrunde liegenden Naturgesetze erörtert.

1. Einleitung

Perpetua mobilia erster Art sind Vorrichtungen, die mehr Energie abgeben sollen als ihnen zugeführt wird. Sie widersprechen damit dem Satz von der Erhaltung der Energie, der wegen seiner Entstehungsgeschichte auch Erster Hauptsatz der Thermodynamik genannt wird.

Perpetua mobilia zweiter Art sind Maschinen, die Wärme mit einem höheren Wirkungsgrad in Arbeit umwandeln sollen als nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik möglich ist.

2. Perpetua mobilia erster Art

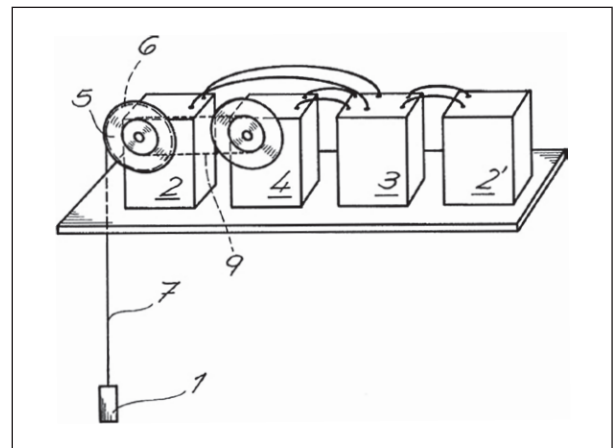
Beim Satz von der Erhaltung der Energie handelt es sich um einen in der gesamten Naturwissenschaft anerkannten und unwiderlegten Satz, nach dem Energie weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur von einer Form in eine andere umgewandelt wird [1, 2].

Im Übrigen hat Emmy Noether bereits im Jahre 1918 erkannt, dass die Sätze von der Erhaltung der Energie, des Impulses und des Drehimpulses ihre Ursachen in Symmetrieeigenschaften von Raum und Zeit haben. So entsprechen den Tatsachen, dass kein Zeitpunkt, kein Ort und keine Richtung ausgezeichnet sind, die Erhaltung von Energie, Impuls und Drehimpuls [3-9].

Trotz der nach alledem sehr großen Vertrauenswürdigkeit dieser Erhaltungssätze versucht man es immer wieder, die Natur zu überlisten.

So betrifft DE 197 13 201 A1 eine die Schwerkraft ausnutzende Vorrichtung zur Erzeugung elektrischer

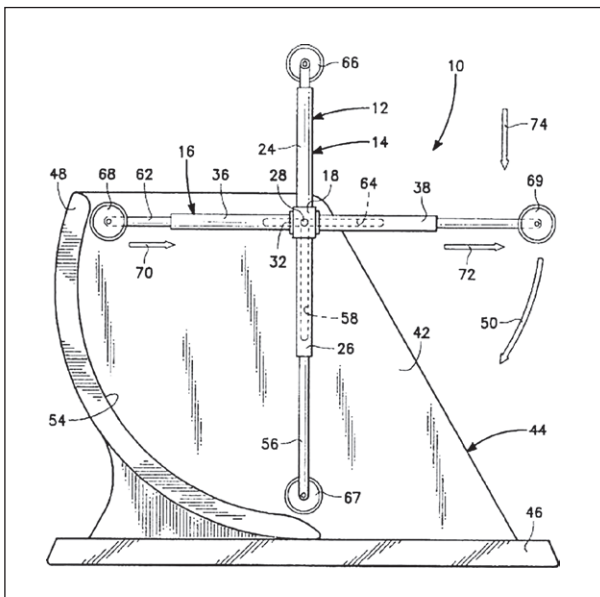
Energie, wobei diese Vorrichtung in der Lage sein soll, aus sich selbst heraus Energie zu gewinnen. Dazu treibt ein unter dem Einfluss der Schwerkraft fallendes Gewicht über ein Seil einen Generator an, der dabei eine Batterie auflädt. Die Batterie versorgt einen Elektromotor, um das Gewicht wieder auf die Ausgangshöhe anzuheben (Figur 1).



Figur 1: Vorrichtung zur Erzeugung elektrischer Energie (aus DE 197 13 201 A1)

Mit dieser Vorrichtung könnte aber nur dann Energie gewonnen werden, wenn die Schwerkraft beim Fallen des Gewichts größer wäre als beim Anheben. Da das Gesetz der Schwerkraft aber von der Zeit unabhängig ist, kann diese Vorrichtung den versprochenen Energiegewinn nicht erbringen [9].

In US 6 237 342 B1 wird ein Schwerkraftmotor beschrieben, bei dem umlaufende Hebelarme, die an ihren äußeren Enden Massen tragen, derart verschoben werden, dass sich auf einer Seite ein größeres Drehmoment ergibt als auf der anderen Seite (Figur 2).



Figur 2: Schwerkraftmotor (aus US 6 237 342 B1)

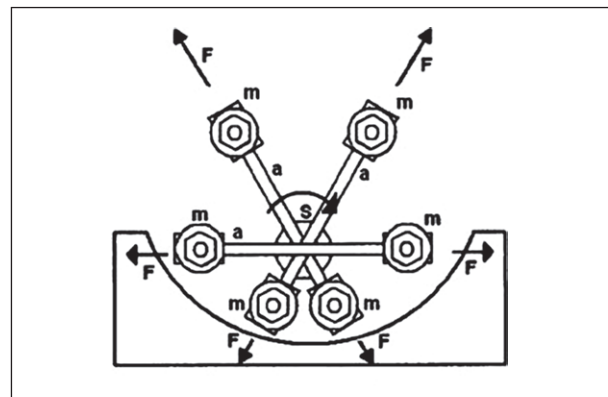
Hierzu ist jedoch festzustellen, dass bei diesem Schwerkraftmotor jede Masse um einen Höhenunterschied, den sie fällt, auch wieder angehoben werden muss, der längere Hebelarm hierbei aber einen kleineren Drehwinkel überstreicht als der kürzere Hebelarm, das größere Drehmoment somit aber nur über einen kleineren Drehwinkel wirksam ist und daher beim Sinken der Massen nur so viel Arbeit verrichtet wird, wie zu ihrem Anheben erforderlich ist

Dem entspricht, dass der Schwerpunkt derartiger Vorrichtungen eine Bahn beschränkter Variation beschreibt [10].

Im Übrigen ist die Schwerkraft grundsätzlich nicht zur Energiegewinnung geeignet. Dies ergibt sich daraus, dass die potentielle Energie im Schwerfeld zwar vom Ort abhängt, aber nicht davon, auf welchem Weg der Ort erreicht wird [3].

3. Impulssatz

Nach US 2008 0 000 324 A1 soll es möglich sein, die Fliehkraft als Antriebskraft zu nutzen. Hierzu sind mit veränderlichen radialen Abständen umlaufende Massen vorgesehen (Figur 3).



Figur 3: Fliehkraftantrieb (aus US 2008 0 000 324 A1)

Vorrichtungen dieser Art verstoßen aber gegen den Satz von der Erhaltung des Impulses (Impulssatz), nach dem die zeitliche Änderung des Gesamtimpulses eines Systems gleich der Summe der äußeren Kräfte ist, der Impuls eines abgeschlossenen Systems – also eines Systems, auf das keine äußeren Kräfte wirken – somit erhalten bleibt und die Bewegung des Schwerpunktes des Systems durch innere Kräfte nicht beeinflusst wird [3].

Da derartige Vorrichtungen ohne äußeres Medium auskommen sollen, können sich diese Vorrichtungen auch nicht gegen ein äußeres Medium abstoßen und diesem dabei einen Impuls $-p$ als Kraftstoß übertragen und daher wegen des Impulssatzes auch nicht einen entgegengesetzt gleich großen Impuls p erhalten.

Da auch kein nach außen abgestoßenes Medium benötigt werden soll, kann ein Impuls $-p$ auch nicht von einem Medium weggetragen werden und die Vorrichtung daher wegen des Impulssatzes auch nicht einen entgegengesetzt gleich großen Impuls p erhalten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass derartige Fliehkraftantriebe nicht ausführbar sind, weil sie ohne ein äußeres oder nach außen abgestoßenes Medium den für ihren Antrieb nötigen Impuls wegen des Impulssatzes nicht erhalten können.

4. Vakuumenergie

Aus der Quantentheorie ist bekannt, dass das Vakuum auf Grund von Vakuumfluktuationen des elektromagnetischen Feldes eine Vakuumenergie oder auch Nullpunktenergie genannte Energie besitzt. Diese Vakuumenergie kann jedoch nicht unterschritten werden, weil die Vakuumfluktuationen ursächlich mit den Heisenbergschen Unbestimmtheitsbeziehungen zusammenhängen, nach denen Paare gewisser physikalischer Größen nicht beliebig kleine Werte annehmen können [11].

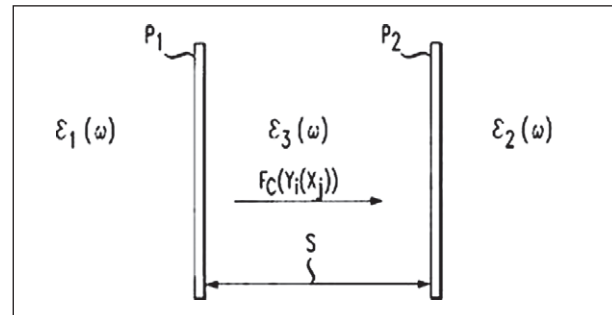
Hendrik B. G. Casimir hat im Jahre 1948 vorausgesagt, dass die Vakuumfluktuationen zu einer zwischen zwei parallelen Metallplatten wirkenden, später experimentell nachgewiesenen Casimir-Kraft führen [11-16].

Die Entstehung der Casimir-Kraft kann man sich so erklären, dass sich zwischen den Metallplatten als Vakuumfluktuationen nur elektromagnetische Wellen bestimmter Längen ausbilden können, so dass der auf die Metallplatten ausgeübte Strahlungsdruck der zahlreicheren Wellen des Außenraums gegenüber dem Strahlungsdruck der Wellen des Innenraums überwiegt und die Metallplatten daher zusammendrückt [16].

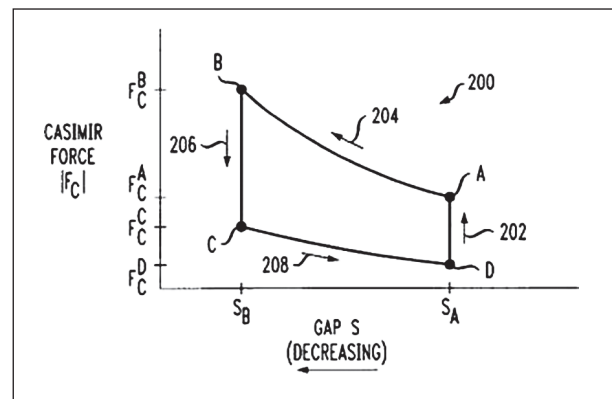
Wird der Abstand der Metallplatten vergrößert oder verkleinert, so wird gegen die Casimir-Kraft oder von der Casimir-Kraft eine Arbeit verrichtet, die der Differenz der Vakuumenergien vor und nach der Änderung des Abstands der Metallplatten entspricht, so dass hierbei weder Energie erzeugt noch vernichtet wird.

In DE 35 41 084 A1, GB 22 83 611 A, GB 22 76 488 A, US 2003 0 090 852 A1 und US 6 477 028 B1 wird vorgeschlagen, die die Casimir-Kraft beeinflussenden Faktoren zyklisch derart zu ändern, dass die Casimir-Kraft beim Verkleinern des Abstands der Metallplatten stärker ist als beim Vergrößern, so dass die Casimir-Kraft beim Verkleinern des Abstands der Metallplatten eine größere Arbeit verrichtet als zur Wiederherstellung des anfänglichen Zustands

durch Vergrößern des Abstands aufzubringen ist. Dies soll die Freisetzung von Energie aus dem Reservoir der Vakuumenergie ermöglichen (Figuren 4 und 5).



Figur 4: Casimir-Kraft (aus US 6 477 028 B1)



Figur 5: Veränderliche Casimir-Kraft (aus US 6 477 028 B1)

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Vakuumenergie eine Folge der Heisenbergschen Unbestimmtheitsbeziehungen ist, nach denen Paare gewisser physikalischer Größen nicht beliebig kleine Werte annehmen können, und der Vakuumenergie daher keine Energie entnommen werden kann.

Im Übrigen hängt die Casimir-Kraft mit den Änderungen der Vakuumenergie zusammen, die sich durch Einbringen und Anordnen der Metallplatten oder das Ändern der die Casimir-Kraft beeinflussenden Faktoren ergeben. So ist beim Einbringen und Anordnen der Metallplatten gegen die Casimir-Kraft oder von der Casimir-Kraft Arbeit zu verrichten. Ebenso ist für die Änderung der die Casimir-Kraft beeinflussenden Faktoren Energie erforderlich.

5. Perpetua mobilia zweiter Art

Als Perpetua mobilia zweiter Art werden Maschinen bezeichnet, die angeblich Wärme mit einem höheren Wirkungsgrad in Arbeit umwandeln als nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik möglich ist.

Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik verbietet Vorgänge, die zwar nach dem auch als Erster Hauptsatz der Thermodynamik bekannten Satz von der Erhaltung der Energie möglich wären, die aber trotzdem nicht beobachtet werden.

Nach der Lebenserfahrung kühlt sich eine Tasse heißen Tees zwar von selbst ab. Es wird aber nicht beobachtet, dass sich die Tasse heißen Tees unter Abkühlung der kälteren Umgebung ohne äußeres Zutun von selbst erwärmt, obwohl dies nach dem Satz von der Erhaltung der Energie möglich wäre.

Dieser Lebenserfahrung entspricht die von Rudolf Clausius stammende Aussage des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik: Wärme kann nicht von selbst von einem kälteren Körper zu einem wärmeren Körper übergehen.

Dazu äquivalent ist die nach Kelvin und Planck benannte Aussage des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, nach der es keinen Vorgang gibt, dessen einzige Wirkung darin besteht, Wärme vollständig in Arbeit umzuwandeln.

Aus dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik folgt, dass reversible Prozesse, also Prozesse, die sich durch einen inversen Prozess rückgängig machen lassen, die Prozesse sind, bei denen Wärme mit dem größtmöglichen Wirkungsgrad in Arbeit umgewandelt wird und somit die geringste Abwärme anfällt [17].

Im Rahmen seiner theoretischen Untersuchung von Dampfmaschinen gelangte Sadi Carnot bei der Analyse von Kreisprozessen – also von Prozessen, die pro Arbeitszyklus bei höherer Temperatur eine größere Wärmemenge aufnehmen, bei geringerer Temperatur eine kleinere Wärmemenge abgeben und die Differenz dieser Wärmemengen in Arbeit umwan-

deln – im Jahre 1824 zu der Erkenntnis, dass reversible Kreisprozesse dies mit dem größtmöglichen Wirkungsgrad tun und alle reversiblen Kreisprozesse denselben, nur von den beiden Temperaturen abhängigen Wirkungsgrad aufweisen.

William Thomson, der spätere Lord Kelvin, nutzte die letztgenannte Eigenschaft reversibler Kreisprozesse im Jahre 1848 zur Definition einer von Thermometersubstanzen unabhängigen und daher als absolut bezeichneten Temperatur.

Rudolf Clausius fand auf Grund der Ergebnisse von Carnot und Kelvin im Jahre 1865 heraus, dass es eine Entropie genannte, aus abgegebener sowie aufgenommener Wärme und der dabei jeweils herrschenden Temperatur gebildete Zustandsgröße gibt, die sich bei reversiblen Prozessen nicht ändert, bei irreversiblen Prozessen zunimmt, aber von selbst niemals abnimmt. Ludwig Boltzmann hat die Entropie im Jahre 1877 auf Grund des atomaren Aufbaus der Materie statistisch gedeutet.

Mit Blick auf den Schwierigkeitsgrad und die Bedeutung der Thermodynamik kommen nun Arnold Sommerfeld und Albert Einstein zu Wort.

Arnold Sommerfeld [22]: „Thermodynamik ist ein komisches Fach. Das erste Mal, wenn man sich damit befasst, versteht man nichts davon. Beim zweiten Durcharbeiten denkt man, man hätte nun alles verstanden, mit Ausnahme von ein oder zwei kleinen Details. Das dritte Mal, wenn man den Stoff durcharbeitet, bemerkt man, dass man fast gar nichts davon versteht, aber man hat sich inzwischen so daran gewöhnt, dass es einen nicht mehr stört.“

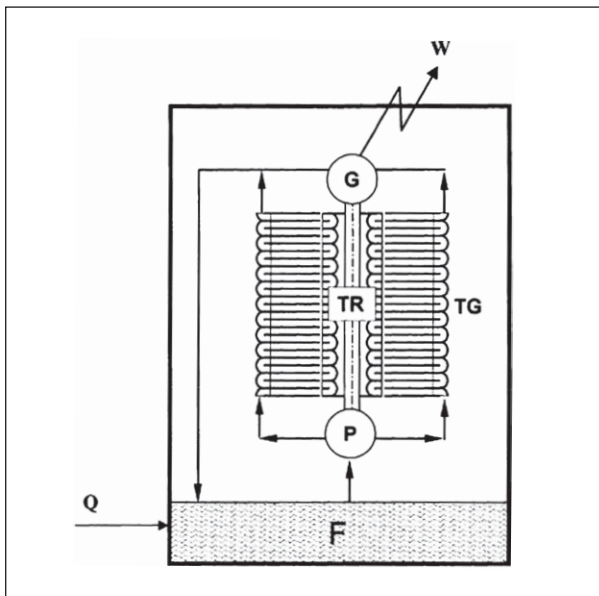
Albert Einstein [29]: Die Thermodynamik „... ist die einzige physikalische Theorie allgemeinen Inhalts, von der ich überzeugt bin, dass sie im Rahmen der Anwendbarkeit ihrer Grundbegriffe niemals umgestoßen wird“.

Bezüglich näherer Einzelheiten wird auf gängige Lehrbücher der Thermodynamik [17-21], aber auch auf die Beiträge [22-24] von André Thess verwiesen,

mit denen in die von Lieb und Yngvason im Jahre 1999 veröffentlichte logisch strenge und mathematisch exakte Theorie der Thermodynamik eingeführt wird.

Obwohl der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik der Umwandlung von Wärme in Arbeit unüberwindbare Grenzen setzt, die daher kommen, dass Wärme von selbst nur vom Warmen zum Kalten fließt, und diese Grenzen daher zu den sichersten Erkenntnissen überhaupt gehören, wird immer wieder versucht, diese Grenzen zu durchbrechen.

So betrifft DE 101 02 899 A1 eine Strömungskraftmaschine, deren einzige Wirkung darin bestehen soll, dass Wärme einem Wärmespeicher, wie ruhender Luft oder ruhendem Gewässer entzogen und vollständig in Arbeit umgesetzt werden soll.



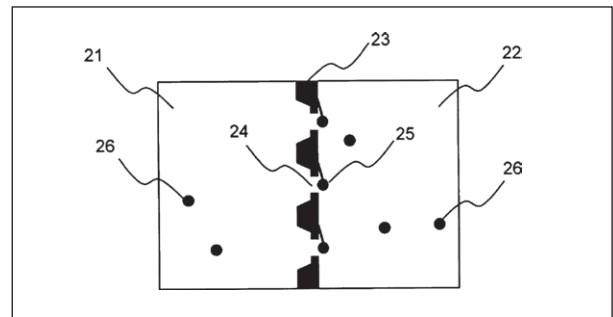
Figur 6: Strömungskraftmaschine (aus DE 101 02 899 A1)

Damit widerspricht diese Strömungskraftmaschine aber der nach Kelvin und Planck benannten Aussage des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, nach der es keinen Vorgang gibt, dessen einzige Wirkung in der vollständigen Umwandlung von Wärme in Arbeit besteht.

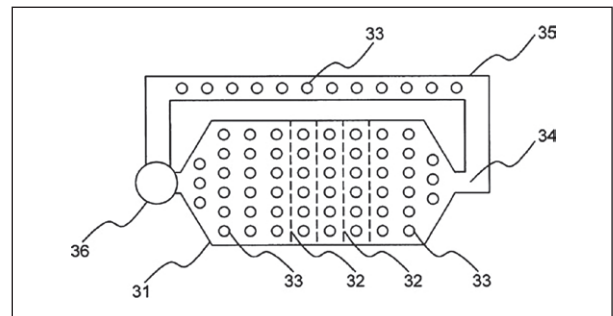
In DE 10 2006 019 369 A1 wird ein Energiekonverter beschrieben, bei dem zwei mit Gas gefüllte Behälter durch eine Membran getrennt sind und die Membran

an eine Vielzahl kleiner Ventile aufweist, die von den Gasmolekülen aufgestoßen werden und es den Gasmolekülen dadurch erlauben sollen, nur von einem der beiden Behälter in den anderen zu gelangen.

Ein sich dabei zwischen den beiden Behältern aufbauender Druckunterschied wird zum Antrieb einer Turbine genutzt, die in einem beide Behälter verbindenden Rückflussrohr angeordnet ist. Die dabei auf Grund des Satzes von der Erhaltung der Energie auftretende Abkühlung des Gases soll durch die Wärme der Umgebung ausgeglichen werden.



Figur 7: Energiekonverter (aus DE 10 2006 019 369 A1)



Figur 8: Energiekonverter (aus DE 10 2006 019 369 A1)

Somit soll die Wirkung dieses Energiekonverters im Ergebnis also lediglich darin bestehen, Umgebungswärme ohne Abwärme in Arbeit umzuwandeln.

Damit widerspricht dieser Energiekonverter aber der nach Kelvin und Planck benannten Aussage des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, nach der es keinen Vorgang gibt, dessen einzige Wirkung in der vollständigen Umwandlung von Wärme in Arbeit besteht.

Im Übrigen können die Ventile dieses Energiekonverters ihre Aufgabe, Gasmoleküle nur in einer

Richtung durchzulassen, nicht erfüllen. Dies ergibt sich daraus, dass die Masse der Ventile zur Erfüllung dieser Aufgabe etwa so groß sein muss wie die Masse der Gasmoleküle. Damit ist die Wärmebewegung der Ventile aber zu groß, um die Gasmoleküle nur in einer Richtung passieren lassen zu können.

Maxwellscher Dämon wird eine Vorrichtung der in der Figur 7 gezeigten Art genannt, bei der die Ventile in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und Flugrichtung der Moleküle derart geöffnet und geschlossen werden, dass sich die schnelleren Moleküle in einem der beiden Behälter und die langsameren Moleküle in dem anderen der beiden Behälter ansammeln. Der dabei entstehende Temperaturunterschied soll der Umwandlung von Wärme in Arbeit dienen.

Der Maxwellsche Dämon wurde im Jahre 1871 von James Clark Maxwell zur Diskussion gestellt und ist seitdem Gegenstand der Forschung, wobei es insbesondere um die Frage nach der Vereinbarkeit des Maxwellschen Dämons mit dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik geht. Diese Forschung ist auch deshalb von Interesse, weil dabei die Frage nach der von einem Computer benötigten Energie dahingehend beantwortet wird, dass prinzipiell lediglich zum Löschen der Speicher Energie erforderlich ist [25-32].

6. Schlussbemerkungen

Im Vorangegangenen wurden an Hand einiger Patentedokumente typische Perpetua mobilia erläutert. Bezüglich weiterer Beispiele wird auf die Literatur verwiesen [33, 34].

Im Übrigen ist es dem Deutschen Patent- und Markenamt auf Grund des Patentgesetzes und der Rechtsprechung untersagt, Patente für Erfindungen zu erteilen, denen die technische Brauchbarkeit und damit die Möglichkeit einer Realisierung fehlt. Dies trifft auf Erfindungen zu, die gegen Naturgesetze verstoßen.

Literaturverzeichnis

- [1] COOPERSMITH, Jennifer: Energy, the Subtle Concept. Oxford : Oxford University Press, 2010. ISBN 978-0-19-954650-3
- [2] FEYNMAN, Richard P.; LEIGHTON, Robert B.; SANDS, Matthew: Feynman Vorlesungen über Physik. Band 1; Mechanik. München : Oldenbourg Verlag, 2007. ISBN 978-3-486-58108-9
- [3] ARNOLD, V.I.: Mathematical Methods of Classical Mechanics. Berlin : Springer, 1978. ISBN 3-540-90314-3
- [4] LANDAU, L.D.; LIFSHITZ, J.M.: Lehrbuch der theoretischen Physik. Band 1, 14. Auflage. Frankfurt : Harri Deutsch, 1997. ISBN 978-3-8171-1326-2
- [5] MITTELSTAEDT, Peter: Klassische Mechanik. 2. Auflage. Mannheim : B.I.-Wissenschaftsverlag, 1995. ISBN 3-411-75002-2
- [6] KOSMANN-SCHWARZBACH, Yvette: The Noether-Theorems. Berlin : Springer-Verlag, 2011. ISBN 978-0-387-87867-6
- [7] NEUENSCHWANDER, Dwight E.: Emmy Noether's Wonderful Theorem. Baltimore : The Johns Hopkins University Press, 2011. ISBN 978-0-801896941
- [8] NORDBROCK, Uwe: Über die systematische Berechnung von Erhaltungssätzen. Marburg : Der Andere Verlag, 2006. ISBN 3-89959-430-4
- [9] GENZ, Henning; DECKER, Roger: Symmetrie und Symmetriebrechung in der Physik. Braunschweig : Friedr. Vieweg & Sohn, 1991. ISBN 3-528-08558-4
- [10] BÜRGER, Wolfgang: Perpetua mobilia. In: Technische Rundschau; Heft 19; 1990; S. 92-97
- [11] BALLENTINE, Leslie E.: Quantum Mechanics, A Modern Development. World Scientific, 1998. ISBN 978-981-02-4105-6
- [12] ITZYKSON, Claude; ZUBER, Jean-Bernard: Quantum Field Theory. Dover Publications, 2006. ISBN 978-0486-44568-7
- [13] MILONNI, Peter W.: The Quantum Vacuum. Academic Press, 1994. ISBN 0-12-498080-5
- [14] MILTON, Kimball A.: The Casimir Effect: Physical Manifestations of Zero-Point Energy. World Scientific, 2001. ISBN 981-02-4397-9

- [15] BORDAG, Michael et. al.: Advances in the Casimir Effect. Oxford: Oxford University Press, 2009. ISBN 978-0-19-923874-3
- [16] LAMBRECHT, Astrid: Der Casimir-Effekt: Das Vakuum kommt zu Kräften; Physik in unserer Zeit; 2005; Heft 2; Seiten 85 bis 91
- [17] CALLEN, H. B.: Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics; 2nd edition; John Wiley & Sons; 1985; ISBN 0-471-86256-8
- [18] ADKINS, C. J.: An Introduction to Thermal Physics; Cambridge University Press; 2004; ISBN 0-521-33715-1
- [19] ADKINS, C. J.: Equilibrium Thermodynamics; Cambridge University Press; 1997; ISBN 0-521-27456-7
- [20] CARRINGTON, G.: Basic Thermodynamics; Oxford University Press; 2003; ISBN 0-19-851747-5
- [21] BLUNDELL, S.; BLUNDELL, K.: Concepts in Thermal Physics; Oxford University Press; 2006; ISBN 978-0-19-856770-7
- [22] THESS, André: Was ist Entropie?; Forschung im Ingenieurwesen; 2008; Band 72; Seiten 11 bis 17
- [23] THESS, André: Das Entropieprinzip; Oldenbourg Wissenschaftsverlag; 2007; ISBN 978-3-486-58428-8
- [24] THESS, André: The Entropy Principle; Springer-Verlag; 2011; ISBN 978-3-642-13348-0
- [25] BUSCHLINGER, W.: Denk-Kapriolen?: Gedankenexperimente in Naturwissenschaften, Ethik und Philosophy of Mind; Königshausen & Neumann; 1993; ISBN 3-88479-749-2
- [26] CARRIER, Martin: Raum-Zeit; Walter de Gruyter; 2009; ISBN 978-3-11-017694-0
- [27] LEFF, H.S.; REX, A.F.: Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing; Adam Hilger; 1990; ISBN 0-7503-0056-6
- [28] LEFF, H.S.; REX, A.F.: Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing; Institute of Physics Publishing; 2003; ISBN 0-7503-0759-5
- [29] LYRE, H.: Quantentheorie der Information: Zur Naturphilosophie der Theorie der Ur-Alternativen und einer abstrakten Theorie der Information; mentis Verlag; 2004; ISBN 3-89785-237-3
- [30] LYRE, H.: Informationstheorie: Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung; Wilhelm Fink Verlag; 2002; ISBN 3-8252-2289-6
- [31] PENROSE, Oliver: Foundations of Statistical Mechanics; Dover Publications; 2005; ISBN 0-486-43870-8
- [32] GERSHENFELD, Neil: The Physics of Information Technology; Cambridge University Press; 2000; ISBN 0-521-58044-7
- [33] ORD-HUME, Arthur W.J.G.: Perpetual Motion: The History of An Obsession; Adventurers Unlimited Press; 2005; ISBN 1-931882-51-7
- [34] HEINZERLING, Jürgen: Energie aus dem Nichts; 2. Auflage; Kopp Verlag; 2009; ISBN 978-3-938516-65-2

Aktuelle Erfindungstrends zur Regelung und Steuerung von mechatronischen Antriebssystemen in Kraftfahrzeugen

Dipl.-Ing. Gianni Monti, Patentabteilung 1.13

Inhalte aktueller Patentliteratur zur Regelung und Steuerung von Brennkraftmaschinen betreffen zunehmend komplexe mechatronische Aggregate. Dieser Beitrag beinhaltet eine Übersicht der aktuellen Anmeldungsstrategien und Erfindungstrends, die dieser Patentliteratur zugeordnet sind. Vordergründig werden dabei algorithmische Funktionsbeschreibungen erläutert, die unterschiedliche Aspekte der Optimierung, Einsparung und Ergonomie beim Betrieb der Brennkraftmaschine im modernen Fahrzeug berücksichtigen.

1. Einleitung

Die ständig wachsenden Anforderungen moderner Kraftfahrzeuge an die Funktionalität verbrennungsbasierter Antriebssysteme bedingen, dass diese Systeme immer häufiger als komplexe mechatronische Aggregate ausgebildet sind. Diese Aggregate beinhalten leistungsfähige elektronische Schaltkreise zur Steuerung und Regelung der zentralen Antriebseinheit, der Brennkraftmaschine. Solche Schaltkreise zeichnen sich heutzutage durch eine Echtzeitverarbeitung von hohen sensorischen Datenmengen mittels flexibel implementierbaren Regelungs- und Steuerungsalgorithmen von beachtlicher Komplexität aus. Zur Einstellung eines optimierten Betriebs der Brennkraftmaschine erfolgt die Auslegung von Regelungs- und Steuerungsalgorithmen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Aspekte. Eine Analyse der aktuellen Erfindungstrends zeigt, dass Kraftfahrzeughersteller nach wie vor der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, den schädlichen Abgasemissionen und den Betriebs- und somit Reparaturkosten besondere Aufmerksamkeit schenken. Auch ergonomische Aspekte bei der Bedienung moderner Kraftfahrzeuge sind von Bedeutung. Ein großer Anteil der dazu relevanten Patentliteratur ist in der IPC-Klasse F02D angesiedelt. Regelungs- und Steuerungsalgorithmen sind dort üblicherweise als Verfahren, insbesondere als Kombination aus Beschreibungen und schematischen Darstellungen, formuliert.

2. Strategien zur optimierten Regelung und Steuerung

Eine detaillierte Analyse der Patentliteratur des oben genannten IPC-Bereichs verdeutlicht, dass sich aktuelle Verfahren zur Regelung und Steuerung vor allem auf folgende Strategien stützen:

- Deaktivierung von Zylindern
- Abgasrückführung
- Vielstoffbetrieb
- mehrdimensionale Parameterabstimmung

2.1 Deaktivierung von Zylindern

Verbrauchssenkungen können bei modernen Fahrzeugen durch eine temporäre Deaktivierung von Zylindern der Brennkraftmaschine erfolgen. Hierbei wird zwischen zwei temporären Fällen unterschieden, der teilweisen und der vollständigen Abschaltung. Die teilweise Zylinderabschaltung betrifft üblicherweise Limousinen der Mittel- und Oberklasse sowie Sportwagen, die mit Brennkraftmaschinen mit mindestens sechs Zylindern ausgestattet sind. Durch den partiellen Abschaltvorgang, der vorwiegend bei niedriger bis mittlerer Last sinnvoll ist, folgen Last- und somit Druckerhöhungen an den verbleibenden aktiven Zylindern. Aus thermodynamischen Gründen entsteht dadurch eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Brennkraftmaschine,

wobei bei gleich bleibender Lastanforderung seitens des Fahrers eine Verbrauchssenkung eintritt. Die vollständige Zylinderabschaltung von Brennkraftmaschinen ist eine häufige Maßnahme von Start-Stopp-Systemen. Beim Stillstand des Fahrzeugs in bestimmten Verkehrssituationen ergibt sich durch solche Systeme neben einer Kraftstoffeinsparung auch eine Senkung des Emissionsausstoßes.

2.2. Abgasrückführung

Durch Maßnahmen der Abgasrückführung kann ebenfalls eine Reduktion der Emission von Schadstoffen, genauer von Stickoxiden, erfolgen. Hierbei wird üblicherweise während eines Teillastbetriebs der Brennkraftmaschine eine definierte Menge von Abgasen in den Brennraum zurückgeführt. Eine Verringerung der Stickoxidbildung erfolgt dann sowohl durch Senkung der Temperatur als auch durch Verminderung des Sauerstoff-Anteils im Brennraum, wobei eine Hemmung eines Stickstoff bindenden Oxidationsprozesses von Kraftstoffmolekülen eintritt. Weiterhin ermöglicht die Abgasrückführung neben leichten Verbrauchssenkungen auch eine Reduzierung von Vibrationen und damit eine Erhöhung des Fahrerkomforts. Es wird zwischen interner und externer Abgasrückführung unterschieden. Die interne Abgasrückführung beruht auf einer gemeinsamen Öffnungsphase der Ein- und Auslassventile im Ansaugtakt. Die externe Abgasrückführung wird durch eine Zusatzeinrichtung ermöglicht, die Abgase mittels einer Verbindungsleitung zwischen Ansaug- und Abgastrakt kontrolliert über ein zwischengeschaltetes Abgasrückführventil in den Brennraum zurückführt.

2.3. Vielstoffbetrieb

Ein wesentlicher Teil der Betriebskosten eines Fahrzeugs wird durch Kraftstoffkosten verursacht. Aufgrund der Preisentwicklung der meist verwendeten Benzin- und Dieselmotorkraftstoffe besteht weiterhin das Bestreben, kostengünstigere Kraftstoffe einzusetzen, um damit die Betriebskosten zu senken. Obwohl einige fossile Kraftstoffe wie zum Beispiel LPG (Liquefied Petroleum Gas = Flüssiggas) bereits

seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich als zusätzliche Kraftstoffe zum Einsatz kommen, gilt die Aufmerksamkeit aufgrund endlicher Vorkommen von fossilen Brennstoffen zunehmend der Anwendung von biogenen Kraftstoffen, die herkömmlichen Kraftstoffen zugemischt werden. Die Regelung und Steuerung von Brennkraftmaschinen, die auch mit biogenen Kraftstoffen betrieben werden, birgt einige Herausforderungen. Ein zentraler Aspekt ist hier die temperatur- und lastabhängige Anpassung der Regelungs- und Steuerungsalgorithmen in Bezug auf die Kraftstoffzumengung in den Brennraum unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften des Kraftstoffs.

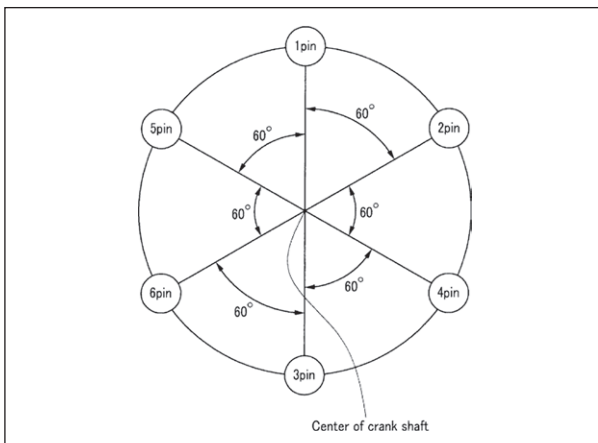
2.4. Mehrdimensionale Parameterabstimmung

Generell wird von Fahrzeugherstellern ein optimierter Betrieb der Brennkraftmaschine angestrebt. Hierzu ist vor allem bei komplexen Ausgestaltungen des Antriebssystems eine Abstimmung vieler Parameter erforderlich. Betrachtet man die Brennkraftmaschine als abgeschlossenes System kann zwischen inneren und äußeren Parametern unterschieden werden. Typische innere Parameter bilden beispielsweise Temperatur-, Druck- oder Durchflussgrößen im Inneren der Brennkraftmaschine ab. Äußere Parameter berücksichtigen Zustandsgrößen weiterer Systeme des Kraftfahrzeugs, zum Beispiel Getriebe- oder Bremssysteme. Zur vereinfachten Regelung und Steuerung der Brennkraftmaschine kann die wechselseitige Abhängigkeit von Parametern in mehrdimensionalen mathematischen Beziehungen zusammengefasst werden. Auf vorteilhafte Weise lassen sich durch eine mehrdimensionale Parameterabstimmung neben der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der schädlichen Abgasemissionen auch eine Erhöhung der Lebensdauer der Brennkraftmaschine sowie eine Verbesserung des Fahrkomforts bewirken.

3. Aktuelle Erfindungstrends

3.1. Deaktivierung von Zylindern: Teilweise und vollständige Zylinderabschaltung

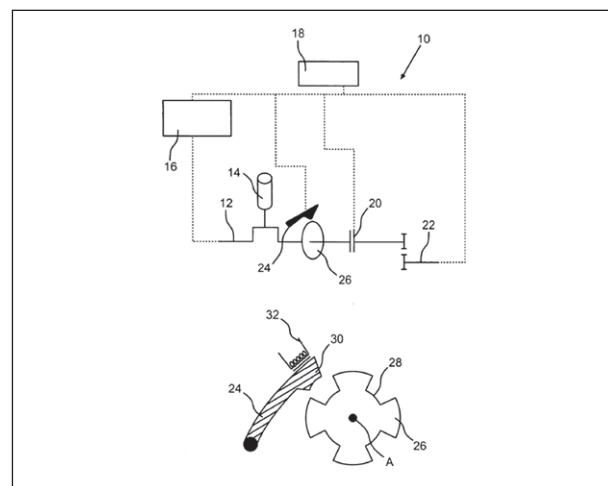
Die teilweise Abschaltung von Zylindern verursacht insbesondere bei einem asymmetrischen Zylinderbetrieb eine Erhöhung der Drehzahlschwankungen und daher der Vibrationen sowie des Geräuschpegels der Brennkraftmaschine. Bei einer Vielzahl von Anmeldungen werden Regelungs- und Steuerungssysteme vorgeschlagen, die in Abhängigkeit bestimmter Parameter eine teilweise Zylinderabschaltung verhindern. Beispielsweise offenbart die US 2009/0 292 439 A1 ein Verfahren, in dem für bestimmte Wertebereiche der Drehzahl, der Last, der Fahrzeuggeschwindigkeit oder für definierte Zustände des Getriebes eine Abschaltung bestimmter Zylinder verhindert wird. Ein weiteres Verfahren zur Vibrationsreduzierung zeigt die DE 10 2007 022 201 A1, in dem mittels einer gesteuerten Bremseinrichtung Drehzahlschwankungen der Kurbelwelle durch kontinuierliche Beaufschlagungen von synchronisierten Bremsmomenten ausgeglichen werden.



Figur 1: Zylinderzahlabhängige (De-)Aktivierungskurbelwinkel (aus US 2009/0 314 248 A1)

Die WO 2008/096 104 A1 enthält ein Verfahren, in dem Zylinder anhand der Leistungsanforderung und der Anzahl der aktiven Zylinder aktiviert werden. Eine Reduzierung der Vibrationen wird in der US 2009/0 314 248 A1 auch lastabhängig, allerdings durch die Festlegung des Aktivierungs- und Deaktivierungszeitpunkts bei bestimmten Kurbelwinkeln

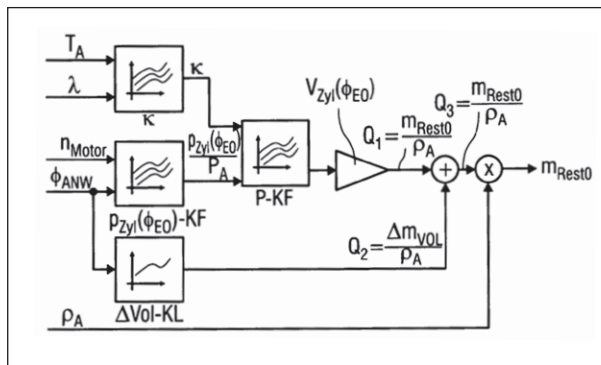
in Abhängigkeit von der Anzahl der verbleibenden aktiven Zylinder erreicht (siehe Figur 1). Zugunsten einer aus zeitlicher und energetischer Sicht günstigen Reaktivierung von Brennkraftmaschinen die im Start-Stopp-Modus betrieben werden, wird seitens der Anmelderschaft verstärkt angestrebt, eine vollständige Zylinderdeaktivierung derart durchzuführen, dass die Kurbelwelle der Brennkraftmaschine in einem vorgegebenen, für den erneuten Start der Brennkraftmaschine günstigen, Winkel zum Stillstand kommt. Während die DE 10 2007 029 424 A1 ein Verfahren zum aktiven Einstellen der Kurbelwellenposition mittels einer elektrischen Antriebseinheit beinhaltet, zeigt die DE 10 2008 010 835 A1 ein Verfahren und eine Einstellanordnung, in welchem auf der Grundlage der gemessenen Winkellage die Kurbelwelle durch ausschließliches Abbremsen in einer definierten Winkellage positioniert wird. Figur 2 zeigt die dazu vorgesehene Einstellanordnung 10 sowie eine detaillierte Ansicht der Mittel 24 und 26 zum Abbremsen der vom Kolben 14 angetriebenen Kurbelwelle 12, die über die Kupplung 20 mit dem Getriebe 22 verbunden ist. Zur Einstellung des Stillstandskurbelwinkels wird die Winkellage der Kurbelwelle von der Messeinrichtung 16 erfasst und der Start-Stopp-Automatik 18 übermittelt. Das Sperrklinkenrad 26, wird über ein elektromechanisches Sperrklinkensystem 24, 32, das auf vier gleich verteilte Aussparungen 28 wirkt, beim Vorliegen entsprechender Steuerbefehle der elektronischen Einheit 18, kontrolliert zum Stillstand gebracht.



Figur 2: Modellhafte Einstellanordnung und Mittel zum Abbremsen (aus DE 10 2008 010 835 A1)

3.2. Abgasrückführung: Kombinierte Verfahren

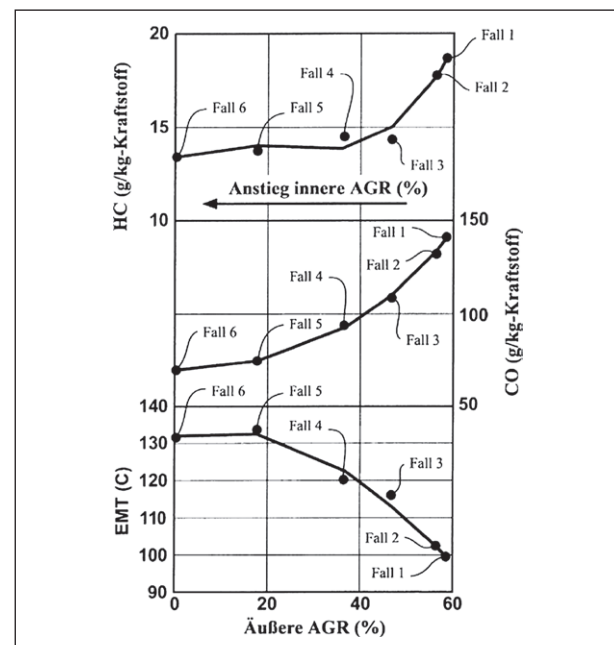
Aktuelle Patentanmeldungen, die Abgasrückführverfahren beinhalten, verdeutlichen das Bestreben von Herstellern zur optimierten Beimengung der Abgase im Brennraum, vor allem unter Berücksichtigung der zum optimalen Betrieb der Brennkraftmaschine erforderlichen geringen Abgasrückführungseinstellzeiten. Hierzu werden zurzeit bevorzugt Regelungsstrategien vorgeschlagen, die aus einer Kombination von internen und externen Abgasrückführungsmaßnahmen bestehen, um eine optimierte Grob- und Feineinstellung der rückgeführten Abgasmengen zu ermöglichen. Die Offenlegungsschrift DE 10 2008 022 644 A1 betrifft ein Abgasrückführverfahren, in dem mittels eines echtzeitfähigen Gasmodells in Abhängigkeit vom Verstellwinkel einer Auslassnockenwelle eine Restabgasmasse ermittelt wird. Da der Verstellwinkel der Auslassnockenwelle für die interne Abgasrückführungsrate maßgeblich ist, kann eine optimale gesamte Abgasrückführungsrate durch Einstellung einer externen Abgasrückführungsrate in Abhängigkeit von der berechneten Restabgasmasse erzielt werden.



Figur 3: Schematische Darstellung des Gasmodells zur Berechnung einer Restabgasmenge (aus DE 10 2008 022 644 A1)

Figur 3 zeigt eine schematische Darstellung des Gasmodells. Zur Berechnung der Restabgasmasse m_{Rest0} sind neben dem Verstellwinkel der Auslassnockenwelle Φ_{ANW} auch die Abgastemperatur T_A , das Verbrennungsluftverhältnis λ , die Motordrehzahl n Motor und die Abgasdichte ρ_A erforderlich. Diese sensorisch erfassten Eingangsgrößen werden zur Berechnung der Restabgasmasse über unterschiedliche Kennlinienfelder abgebildet und arithmetisch

verknüpft. Ein weiteres Verfahren aus DE 10 2009 033 958 A1 schlägt insbesondere für Diesel-Brennkraftmaschinen mit Direkteinspritzung eine Einstellung (siehe Figur 4) der internen und externen Abgasrückführungsrate unter Berücksichtigung der Emissionen und in Abhängigkeit von den Abgastemperaturen vor. Die Abgastemperaturen sind dabei unterschiedlichen Fällen zugeordnet. Figur 4 veranschaulicht, dass der Anteil der Kohlenwasserstoffemissionen (HC) allein durch eine geeignete Einstellung der inneren Abgasrückführung um bis zu 30 % verringert werden kann. Des Weiteren führt eine optimierte Einstellung der äußeren Abgasrückführung zu einer maximalen Reduktion des Kohlenmonoxidausstoßes (CO) um 55 %. Die Abgastemperaturen hängen vornehmlich von der Leistung der Brennkraftmaschine ab, so dass die genannten Emissionen insgesamt für bestimmte Betriebsbereiche der Brennkraftmaschine in Bezug auf die verbrauchte Kraftstoffmenge nur teilweise verringert werden können.

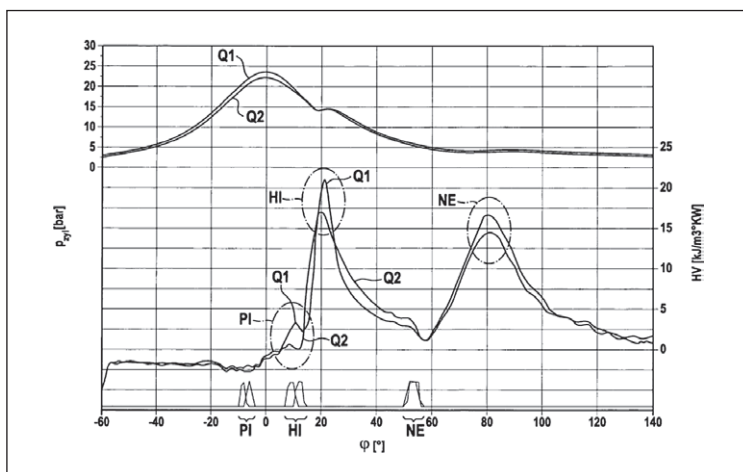


Figur 4: Prozentuale Emissionsabhängigkeit der inneren und äußeren Abgasrückführung (aus DE 10 2009 033 958 A1)

3.3. Vielstoffbetrieb: Flex-Fuel-Antriebsverfahren

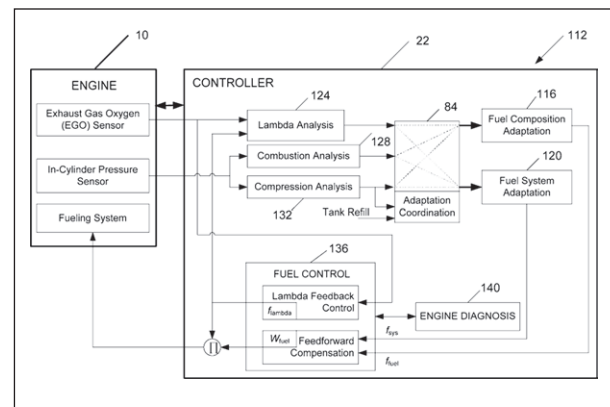
Bei der Regelung und Steuerung von Brennkraftmaschinen mit Vielstoffbetrieb, die auch als Flex-Fuel-Antriebe bekannt sind, geht der aktuelle Trend

in Richtung eines Betriebs mit einer Mischung aus herkömmlichen und biogenen Kraftstoffen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist der seit neuestem erhältliche E10-Kraftstoff, der aus einer Mischung von Benzin und bis zu 10 % Ethanol besteht. Eine Hauptaufgabe bei der Regelung und Steuerung von Flex-Fuel-Antrieben, die mit Kraftstoffen unterschiedlicher Zusammensetzung betrieben werden, besteht in der optimierten Einstellung der Brennkraftmaschinenparameter auf Basis leistungsrelevanter Kraftstoffeigenschaften. Die hierfür notwendige Detektion der Mischverhältnisse oder einer leistungsrelevanten Kraftstoffqualität ist häufig Gegenstand aktueller Anmeldungen. Zum Zwecke der Einhaltung der gesetzlichen Emissionsgrenzwerte und zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs sowie zur Erhöhung des Fahrkomforts durch Verbesserung der Laufruhe der Brennkraftmaschine, schlägt DE 10 2008 001 474 A1 ein Verfahren zur Erkennung der Kraftstoffqualität vor, bei dem im Schubbetrieb der Brennkraftmaschine eine Reihe von Testeinspritzungen getätigt werden. Die von den Testeinspritzungen bewirkten Drehzahländerungen können ohne weitere sensorisch erfasste Größen zur Bewertung der Kraftstoffqualität $Q1$, $Q2$ herangezogen werden, in dem der für eine Drehzahländerung der Brennkraftmaschine ursächliche Druck p_{zyl} und der Heizverlauf HV im Brennraum in Abhängigkeit des Kurbelwellenwinkels φ bewertet wird (siehe Figur 5). Die daraus abgeleiteten Drehzahlschwankungen sind unmittelbar an der Abszisse des Diagramms in Figur 5 dargestellt und mit PI, HI und NE bezeichnet.



Figur 5: Bewertung der Kraftstoffqualität über Brenneigenschaften (aus DE 10 2008 001 474 A1)

Ein weiteres, in der WO 2010/036 417 A2 beschriebenes Verfahren zur optimierten Regelung eines Flex-Fuel-Antriebs beinhaltet eine Bestimmung der Kraftstoffzusammensetzung unter Zuhilfenahme des Sauerstoffgehalts im Abgas sowie des Zylinderdrucks im Brennraum. Das dem Betrieb des Flex-Fuel-Antriebs zugrunde liegende Regelungsschema 112 ist umfassend in Figur 6 dargestellt. Die gemessenen Signale des Sauerstoffgehalts im Abgas und des Zylinderdrucks im Brennraum werden jeweils einer Luft/Kraftstoff-Analyseeinheit 124 sowie einer Verbrennungs/Verdichtungs-Analyseeinheit 128/132 zur Analyse und Parametrisierung zugeführt.



Figur 6: Bewertung der Kraftstoffqualität über Brennraumeigenschaften (aus WO 2010/036 417 A2)

Die aus diesen Einheiten ausgehenden Parameterströme können durch eine Kraftstoffzusammensetzungs-Adaptionseinheit 116 und Kraftstoffsystems-Adaptionseinheit zum Zwecke der Kraftstoffsystem-Stellgrößenerzeugung (siehe hierzu die Parameter

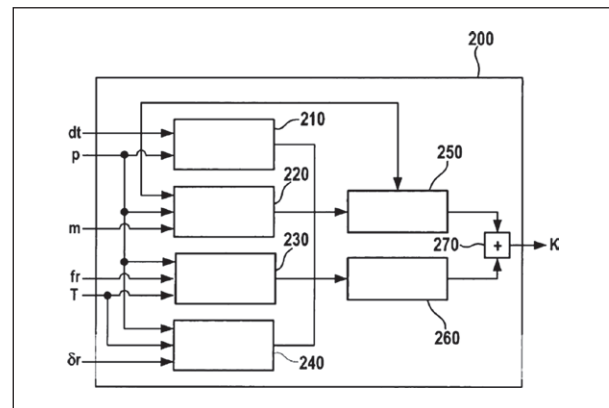
f_{sys} , f_{fuel}) unterschiedliche Algorithmen wie zum Beispiel Kalman Filter, Maximum Likelihood Schätzer, Neuronale Netzwerke, Fuzzy Logic et cetera beinhalten. Der Parameterstrom aus der Verdichtungs-Analyseeinheit 132 wird zusätzlich mittels einer Adaption-/Koordinationseinheit 84 zur Einstellung einer optimierten Kraftstoffoxidation im Verbrennungsprozess der Brennkraftmaschine 10 verwendet, wobei auch berücksichtigt wird, wann eine Tankfüllung getätigt wurde.

Die Regelungseinheit 136 regelt die zum optimalen Betrieb des Flex-Fuel-Antriebs verwendeten Regelungsparameter. Hierzu gehören ein negativ rückgeführter Luft/Kraftstoff-Verhältnisparameter f_{λ} sowie ein positiv kompensierender Kraftstoffparameter W_{fuel} , der die Stellgrößen f_{sys} und f_{fuel} abbildet. Die Regelungsparameter werden der Diagnoseeinheit 140 zu Kontrollzwecken zur Verfügung gestellt.

3.4. Mehrdimensionale Parameterabstimmung: Parametrische Verarbeitungsmethoden

Aus den vorangegangenen Beispielen wird deutlich, dass die Erfassung und Verarbeitung von Regelungs- und Steuerungsparametern eine zentrale Rolle bei der Umsetzung von funktionalen Algorithmen innerhalb mechatronischer Antriebssysteme spielt. An dieser Stelle werden abschließend Verfahren aus Patentschriften gezeigt, die aktuelle parametrische Verarbeitungsmethoden beinhalten. Die WO 2010/040 600 A2 zeigt ein Verfahren, bei dem von einem im Kurbelgehäuse befindlichen Motoröl ausgegaste Kraftstoffgase zur Einstellung eines kraftstoff- und verschleissarmen sowie optimierten Betriebs eines Flex-Fuel-Antriebs verwendet werden, indem sie in den Ansaugtrakt des Antriebs rückgeführt werden. Dieses Verfahren stützt daher auf besonders effiziente Art auf die Verflüchtigung von Kraftstoffmengen, die während vorangegangener Verbrennungszyklen in das Motoröl gelangt sind. Betriebseinstellungen erfolgen dabei über schwellenwertbasierte Beobachtungen der Lambdawerte und entsprechende Änderungen des Luft/Kraftstoff-Verhältnisses in multipler Abstimmung mit weiteren Betriebsparametern, wie zum Beispiel Drehzahl, Drehmoment, Massenstrom im Ansaugtrakt, Kraftstoffdruck, Stöchiometriefaktor der Kraftstoffzusammensetzung, Einspritzzeit et cetera.

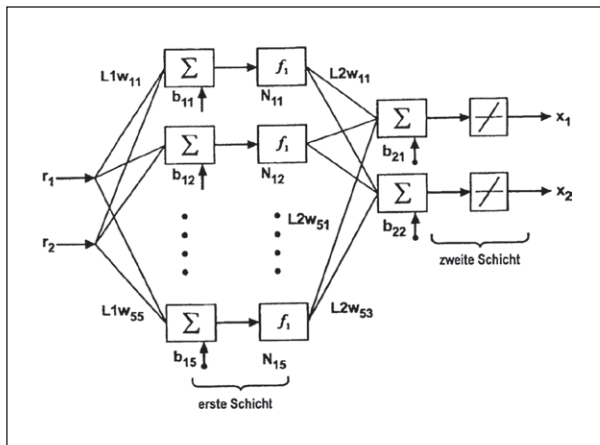
Gerade bei Berücksichtigung einer hohen Anzahl von Parametern wird herstellerseitig angestrebt, die Anzahl der Sensoren möglichst gering zu halten, indem eine bestimmte Anzahl von Parametern über Motorbetriebsmodelle oder bestimmte Zusammenhänge ermittelt werden. Die französische Patentschrift FR 2 906 052 B1 schlägt hierzu ein Motorbe-



Figur 7: Modell zur Bestimmung eines Teileinspritzzeit-Korrekturfaktors (aus DE 10 2008 040 325 A1)

triebsmodell vor, das eine allgemeine Vorschrift zur Ermittlung von Betriebsparametern aus einer breiten Datenbasis vorsieht. In Figur 7 ist das Steuerungsmodell aus DE 10 2008 040 325 A1 zur optimierten Bestimmung der zweiten von zwei aufeinander folgenden Teileinspritzungen schematisch dargestellt. Die parametrische Verarbeitung erfolgt hier mit Hilfe eines komplexen mathematischen Modells. Als Eingangsparameter werden Ansteuerdauer dt , Druck des Einspritzmediums p , Menge der ersten Einspritzung m , Referenzfrequenzen f_r , Temperatur des Einspritzmediums T und Referenzdämpfung δ_r der Steuerung 200 zugeführt. Während die Einheit 210 die Nadelöffnungs- und -schließzeiten bestimmt, berechnen die Einheiten 220 und 230 jeweils die zum Einspritzvorgang erforderlichen Amplituden und Frequenzen. Dämpfungsparameter werden durch die Einheit 240 bestimmt. Die von den Einheiten 250 und 260, die jeweils ein Modell des Nadelöffnens und ein Modell des Nadelschließens enthalten, erzeugten Werte werden zu einem Korrekturwert K addiert, der zur Bestimmung der zweiten Einspritzzeit vom ursprünglichen Ausgangswert abgezogen wird. Eine auf neuronalen Netzen basierende parametrische Verarbeitungsmethode ist Gegenstand der DE 11 2008 002 195 T5. Diese Schrift beschreibt ein Verfahren, das durch Verarbeitung von in Bezug auf die Brennkraftmaschine externen Parametern eines Turboladers einen aus diagnostischer Sicht optimierten Brennkraftmaschinenbetrieb ermöglicht. Dies wird unter anderem durch Berechnung und Bewertung von Wertemengepaaren (x_1, x_2) in Abhängigkeit von Leitschaufelpositionsrestwerten

r_1 und Abgasdruckrestwerten r_2 des Turboladers ermöglicht. Das in Figur 8 dargestellte neuronale Netzwerk führt hierzu innerhalb einer ersten Schicht n Abbildungen der zeitlich ermittelten Restwertepaare (r_1, r_2) auf Zwischenwerte $L2w_{n1}$ durch. Diese Zwischenwerte werden anschließend durch weitere, zur zweiten Schicht gehörende, Abbildungen manipuliert und verschiedenen Orten zweidimensionaler Ausgangsebenen zugewiesen. Das neuronale Netz wird mit Hilfe unterschiedlicher, in Bezug auf die Eigenschaften von Störungsmodi repräsentativer Parametersätze b trainiert.



Figur 8: Zweidimensionales neuronales Netzwerk (aus DE 11 2008 002 195 T5)

4. Ausblick

Die in diesem Beitrag behandelten Patentliteraturinhalte verdeutlichen das hohe Innovationsmaß und beachtliche technologische Niveau von Erfindungsgedanken zur Steuerung und Regelung von Brennkraftmaschinen. Hierbei spielen nach wie vor Erfordernisse der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, der schädlichen Abgasemissionen und der Betriebs- und somit Reparaturkosten sowie auch ergonomische Aspekte bei der Bedienung im Bereich moderner Kraftfahrzeuge eine ursächliche Rolle. Die von der Anmelderschaft verfolgten Schwerpunkte streben vor allem eine Optimierung von Verfahren zur Zylinderabschaltung, Abgasrückführung und Parametrierung der Motorsteuerung sowie Verfahren zum verbesserten Betrieb von Brennkraftmaschinen mit Vielstoffbetrieb an.

Dieser fortschrittlichen Trend der Anmeldungsgegenstände lässt vor allem hinsichtlich der rasanten Entwicklung von elektronischen Schaltkreisen erwarten, dass der mechatronische Charakter verbrennungsbasierter Antriebssysteme kommender Generationen ebenfalls relevanten Innovationen unterliegen wird. Höchstwahrscheinlich ist daher auch zukünftig mit spannender Patentliteratur zur Regelung und Steuerung von Brennkraftmaschinen zu rechnen.

Geschichte der Kettenumwerfer an Fahrrädern

Dipl.-Ing. Martin Nockenberger, Patentabteilung 1.22

In diesem Artikel wird dargestellt, wie sich aus der Entwicklungsgeschichte der Fahrräder der Bedarf für Gangschaltungen ergab und daraus die heute bekannten Umwerfer (Derailleurs) hervorgingen. Dabei kann diese Geschichte aufgrund der Fülle der Ideen nur schlaglichtartig anhand ausgewählter Beispiele dargestellt werden. Weiterführende Literatur wird am Ende des Artikels empfohlen.

1. Einleitung

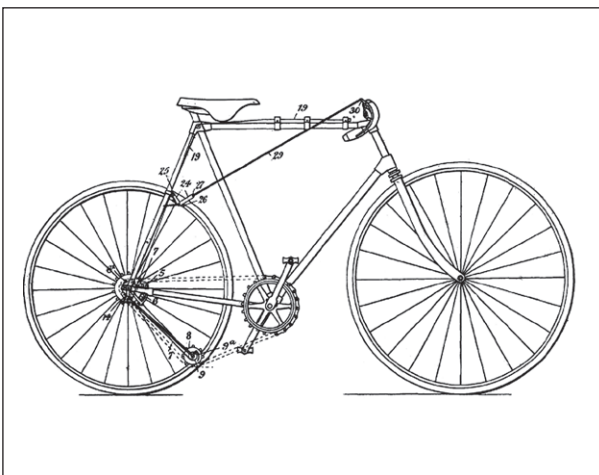
Hier wird der Entwicklungsgang des Fahrrads dargestellt, aus dem sich als sinnvolle Maßnahme ergab, eine Gangschaltung hinzuzufügen. Zunächst erfolgte ein großer Teil der maßgeblichen Entwicklungen in Großbritannien. Nach allgemeiner Auffassung erblickte das erste Fahrrad im Jahre 1817 als „Draisine“ das Licht der Welt. Räder dieser Bauweise sind heute wieder für Kinder als „Laufrad“ erhältlich. Zu Beginn der 1840er Jahre entstanden vierrädrige Fahrzeuge, die mit Fußhebeln angetrieben wurden. 20 Jahre später erschienen Räder, bei denen Pedale direkt am Vorderrad angebracht waren. Vorder- und Hinterrad waren hier zunächst gleich groß (siehe beispielsweise US 59 915 A). Die Räder dieser ersten Fahrräder waren aus Holz und mit Eisen umreif. Daher erhielten sie den englischen Spitznamen „boneshaker“ (siehe auch [1]). Bereits 1871 gab es Räder mit Gummireifen, bei denen das Vorderrad deutlich größer als das Hinterrad war, die so genannten Hochräder. Mit einem größeren Vorderrad konnte man schneller fahren. Auch rollte es auf schlechten Strecken besser. Daher wuchsen die Vorderräder immer weiter. Dies führte allerdings zu Problemen beim Erklimmen der Räder. Auch waren sie eher wackelig zu fahren und kippten leicht (siehe auch [1]). Schon in den Jahren 1868 und 1869 entstanden mehrere Fahrradgetriebe. So gab es feste Übersetzungen zwischen Pedal und Vorderrad, ein Getriebe, bei dem die Kette mit den Fingern wahlweise auf zwei Ritzel (Zahnräder) verschiedener Größe aufgelegt werden konnte und das erste Fahrrad, bei dem Rückwärtstreten eine andere Übersetzung als Vorwärtstreten ergab (siehe auch [1]).

Um den Mängeln der Hochräder zu begegnen, wurde gegen 1890 in England das „Sicherheitsfahrrad“ entwickelt. Dieses Rad war der Vorläufer des modernen Tourenrades und wies einen Hinterradantrieb mit Zahnrädern und Kette auf, bestehend aus Trekkurbeln, dem vorderen Kettenblatt zum Antrieb der Kette, der Kette selbst und dem von der Kette angetriebenen Ritzel am Hinterrad. Vorder- und Hinterrad waren dabei gleich groß ausgeführt. Schließlich wurde auch der Diamantrahmen eingeführt, der heute noch der typische Rahmen für ungefederte Herrenräder ist. Dabei gehen vom Steuerrohr, in dem die Vorderradgabel drehbar gelagert ist, ein waagerechtes und ein schräg abwärts verlaufendes Rohr aus. Das obere waagerechte Rohr verläuft zum Sattel, das untere zum Tretlager, in dem die Trekkurbeln drehbar gelagert sind. Zwischen Sattel und Tretlager verläuft das leicht rückwärts geneigte Sattelrohr. Diese Rohre bilden ein erstes Dreieck. Nach hinten schließt sich ein zweites Dreieck an, das mit dem Sattelrohr von zwei Rohrpaaren gebildet wird, die sich an der Hinterachse treffen. Dieses Dreieck wird Hinterbau, die paarweisen Rohre oben Sattelstreben und die Rohre unten Kettenstreben genannt. Das Verbindungsstück der Rohre je einer Seite an der Hinterachse heißt „Ausfallende“. Der Teil der Kette, der unten zwischen den Zahnrädern (Kettenblatt und Ritzel) verläuft, heißt dabei Untertrum. Folgerichtig heißt der oben verlaufende Teil der Kette Obertrum (siehe auch [1]). Das Antriebsrad eines solchen „Sicherheitsfahrrades“ war deutlich kleiner als das Vorderrad eines Hochrades, so dass es im Vergleich langsamer war. Daher ergab sich gerade für ein solches Rad der Wunsch nach einem Getriebe. Da die Kurbeln nicht mehr

direkt auf dem Antriebsrad angeordnet waren, sondern im Tretlager um eine eigene Achse drehen, war es zudem einfach, eine Änderung der Übersetzung vorzusehen (siehe auch [1]).

2. Erste Entwicklungen von Kettenschaltungen

Die ersten Getriebe, die praktische Bedeutung erlangten, waren Planetengetriebe in der Hinterradnabe. Kettenschaltungen waren zunächst nicht sinnvoll umsetzbar. So gab es Lösungen, Ritzel auszutauschen, ein Vergrößerungsritzel auf ein normales Ritzel aufzustecken oder die Kette wahlweise mit den Fingern auf verschiedene Ritzel aufzulegen. Durch das geänderte Verhältnis der Zähnezahlen zwischen Kettenblatt und Ritzel ergab sich jeweils eine andere Übersetzung. Die verschiedenen Ritzel waren meist nebeneinander als Paket auf einer Seite des Hinterrades angeordnet. Aber es gab auch Hinterräder, die auf jeder Seite ein Ritzel (verschiedener Größe) aufwiesen und zur Anpassung der Übersetzung jeweils umgedreht eingebaut werden konnten. In Ermangelung eines Kettenspanners musste jedoch bei allen diesen Lösungen jedes Mal die Kettenlänge entsprechend angepasst werden (Einsetzen oder Entnahme von Kettengliedern). Andere Pedalisten fuhren mit einer durchhängenden Kette. Die damaligen Ketten waren so steif, dass der heute übliche Schräglauf, also der Fall, in dem Ritzel und Kettenblatt nicht in einer Linie stehen, kaum möglich war (siehe auch [1]).



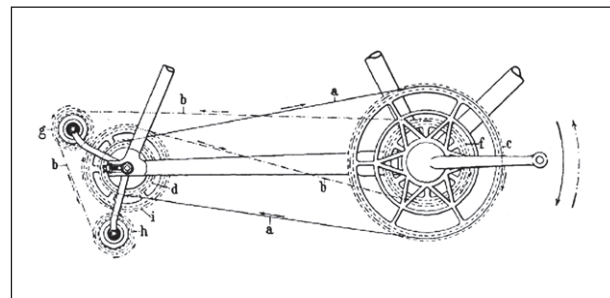
Figur 1: Einer der ersten Kettenspanner (aus GB 1897 16 715 A)

GB 1897 16 715 A zeigt einen der ersten Kettenspanner, der, wie damals die meisten maßgeblichen Entwicklungen bei den Fahrrädern, in Großbritannien eingeführt wurde (Figur 1).

Durch Rücktreten wurde die Kette von den Ritzeln gelöst, das Ritzelpaket mittels eines Hebels seitlich verschoben und die Kette dann durch Vorwärtstreten gespannt, so dass sie nun ohne Schräglauf über ein anderes Ritzel lief. Interessant ist dabei, dass das größte Ritzel außen positioniert war und nicht innen, wie bei heutigen Kettenschaltungen.

Aus Kostengründen konnte sich diese Schaltung in Großbritannien jedoch gegenüber den Nabengetrieben nicht durchsetzen. In Fachzeitschriften wurde den Kettenschaltungen ein schlechtes Erscheinungsbild mit einer baumelnden Kette attestiert. Die Kettenschaltungen wurden, da es für sie in Großbritannien keine Perspektive gab, in Frankreich übernommen und dort weiterentwickelt (siehe auch [1]).

FR 373 624 A zeigt eine andere, damals kostengünstigere Lösung, die ohne das Umlegen der Kette mit den Fingern auskam (Figur 2).

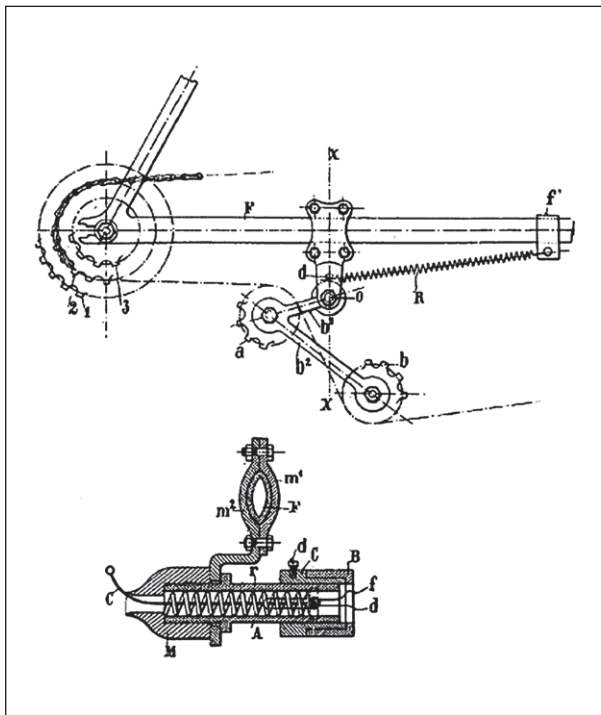


Figur 2: Zwei Übersetzungen mit zwei Ketten, eine wirksam beim Vorwärts-, die andere beim Rückwärtstreten (aus FR 373 624 A)

Dabei waren sowohl an den Tretkurbeln je zwei Kettenblätter und an der Nabe je zwei Ritzel montiert, von denen jeweils ein Kettenblatt und ein Ritzel paarweise durch eigene Ketten verbunden waren. Verschiedene Zähnezahlen der Kettenblätter und Ritzel auf beiden Seiten führten dazu, dass jeweils durch eine Kette verbundene Zahnradpaare verschiedene Übersetzungen hatten. Eine der Ketten wurde durch zwei zusätzliche Führungsrollen so geleitet, dass sie das ihr zugeordnete Ritzel an der Nabe rückwärts drehte. Beide Nabenritzel waren mit jeweils einem Freilauf versehen, der eine davon war in Vorwärts-,

der andere in Rückwärtsrichtung wirksam. Der Fahrer konnte so das Fahrrad durch Vorwärts- oder Rückwärtstreten mit jeweils verschiedenen Übersetzungen antreiben. Das ist eine heute etwas ungewöhnliche Vorstellung, zu der es aber auch moderne Entwicklungen gibt, bei denen ein gelegentlicher Wechsel der Tretrichtung von den Entwicklern als entspannend angesehen wird.

In der Zeit vor dem ersten Weltkrieg waren die aktuellen Innovationen von den offiziellen Renn-Reglements verboten. Die Radrennfahrer mussten deshalb ohne Umwerfer fahren. So ergab sich die paradoxe Situation, dass Tourenfahrer mit Umwerfern bei der Tour de France vor den Rennfahrern oben auf den Bergpässen ankamen (siehe auch [1]). Damals wurde ein Umwerfertyp ersonnen, dessen Grundprinzip bis in die 50er Jahre des 20. Jahrhunderts erhalten blieb. Dieser Umwerfer wurde an die Kettenstrebe montiert (siehe FR 439 224 A, Figur 3).



Figur 3: Umwerfer an der Kettenstrebe (aus FR 439 224 A).

Zum Schalten wurde der Kettenspanner mit einem Seil gegen eine Rückstellfeder parallel zur Hinterachse verschoben. Dadurch war die mögliche Gesamtübersetzung eher klein, denn der Kettenspanner durfte sich beim Schalten nicht zu weit von den Ritzeln entfernen.

Dies funktionierte nicht zuverlässig und gelegentlich landete auch der Kettenspanner in den Speichen. Bei einem neuen Umwerfer von Raimond gab es zwischen Verstellhebel und Umwerfer zwei Bowdenzüge. Der eine zog den Kettenspanner in Richtung Speichen, der andere in die Gegenrichtung, immer noch parallel zur Hinterachse (siehe FR 615 017A). Gegen Ende der 1920er Jahre entwickelte Lucien Juy eine weitere Variante dieser Umwerfer-Bauform. Hier wurde der Umwerfer wahlweise, statt an der Hinterbaustrebe, an der Hinterradachse befestigt. Die Rahmen wiesen zu dieser Zeit oft Langlöcher zur Aufnahme der Achsen auf, so dass sich die Einbauposition des Hinterrades, beispielsweise nach einer Reparatur, ändern konnte. Ein an der Achse befestigter Umwerfer blieb, im Gegensatz zu den am Rahmen montierten Varianten, korrekt zu den Ritzeln ausgerichtet (siehe FR 37 231 E).

In den Jahren vor dem zweiten Weltkrieg wurden die Konzepte für Umwerfer immer weiter optimiert. Umwerfer wurden immer öfter an Tourenräder montiert und schließlich 1937 auch für die Tour de France zugelassen. Es gab auch erste besser brauchbare vordere Umwerfer (siehe beispielsweise FR 705 945 A).

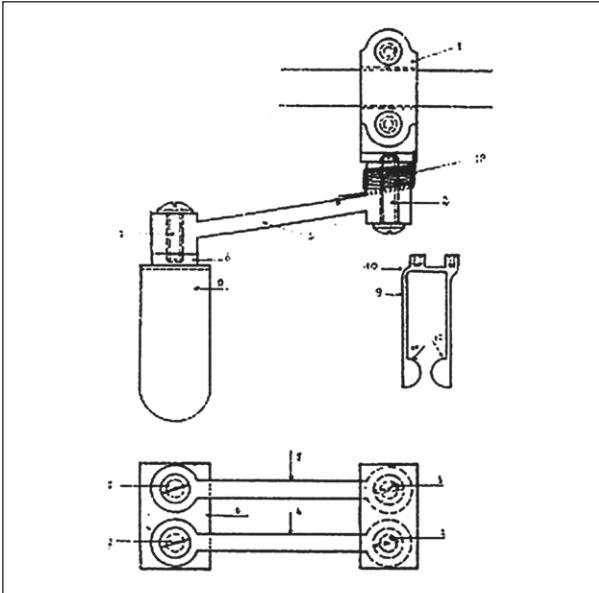
3. Das Parallelogramm

1935 brachte Lucien Juy eine neue Version seines Umwerfers auf den Markt. Es handelte sich hierbei um eine einfache Bauart, bei der die Kette mittels einer Gabel verschoben wurde. Neu war hierbei, dass dazu ein Parallelogramm verwendet wurde (siehe FR 778 474 A, Figur 4).

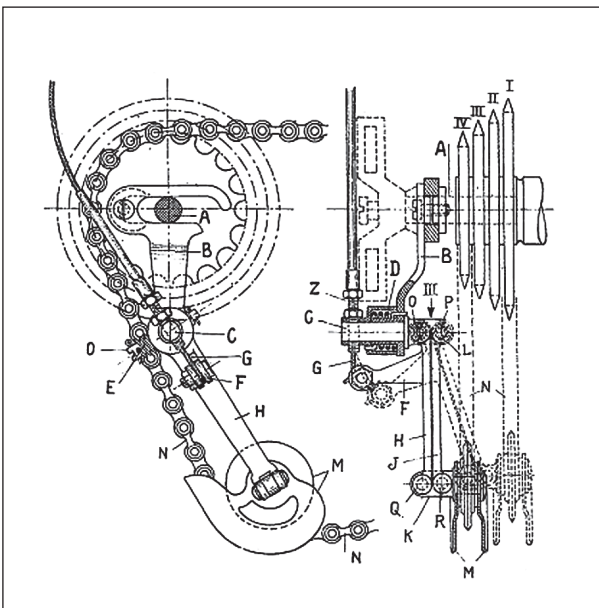
Der erste Parallelogrammumwerfer mit den Merkmalen heute üblicher Umwerfer ist in FR 838 657 A gezeigt. Er wurde ab 1938 produziert und wies einen Kettenspanner mit zwei Rollen auf. Montiert war dieser Umwerfer, wie damals weithin üblich, an der Kettenstrebe.

In Italien gab es die Umwerfer von Vittoria und Campagnolo. Außerdem entwickelte hier Francesco Ghiggini einen Parallelogramm-Umwerfer, der keine große Bekanntheit erlangte. Er kann, ebenso wie

der vorgenannte aus FR 838 657 A, als einer der Vorläufer des modernen Umwerfers angesehen werden (siehe FR 978 189 A, Figur 5).



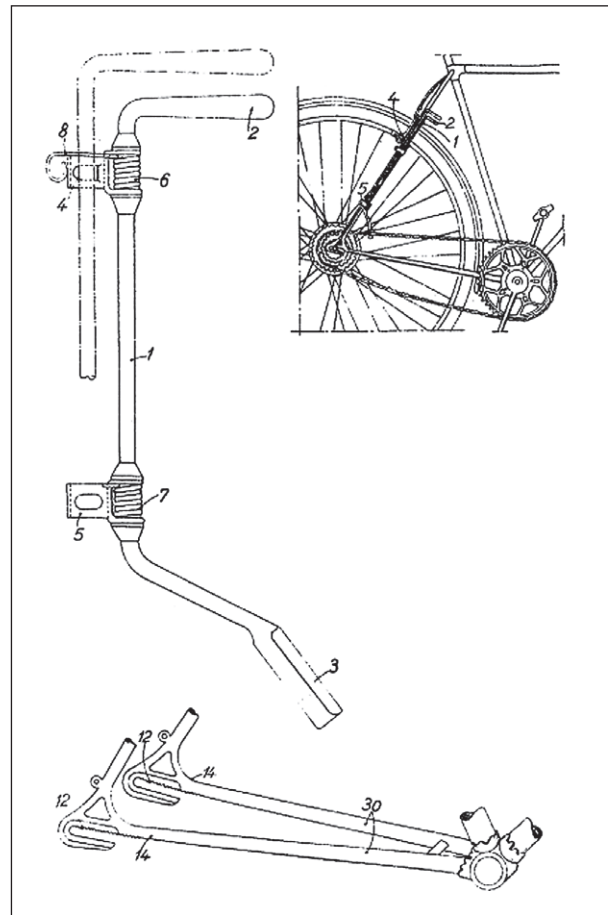
Figur 4: Parallelogrammumwerfer von Juy (aus FR 778 474 A).



Figur 5: Parallelogramm-Umwerfer von Francesco Ghigginì (aus FR 978 189 A).

Nicht alle Hersteller von Umwerfern waren von den Kettenspannern überzeugt. So kam in den 1930er Jahren eine deutsche Kettenschaltung auf den Markt, die keinen Kettenspanner benötigte. Sie wurde bis in die 1950er Jahre verkauft. Ihr „Geheimnis“ war eine längenveränderliche Kette (siehe CH 200 887 A). Hierzu wurden an den Ritzeln und Kettenblättern

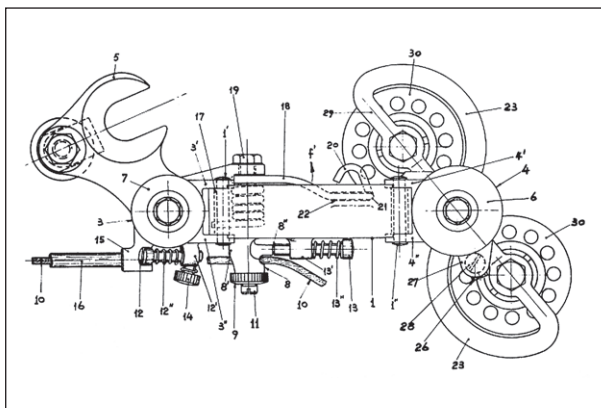
auch spezielle Zahnprofile benötigt. Vor und auch noch nach dem zweiten Weltkrieg nutzten namhafte italienische Rennfahrer die Campagnolo-Schaltung, die ohne Kettenspanner auskam (siehe FR 899 402 A und Figur 6 sowie [1]).



Figur 6: Campagnolo-Schaltung von 1945 (aus FR 899 402 A).

Wegen des fehlenden Kettenspanners war sie besonders geeignet für schmutzige Strecken. Allerdings war ein Schaltvorgang recht kompliziert. Dazu befanden sich am Sattelrohr oberhalb des Hinterrades zwei Hebel 2. Mit einem Hebel wurde zunächst der hintere Schnellspanner etwas geöffnet, so dass die Achse sich frei entlang dem gezahnten Ausfallende bewegen konnte. Das Rad drängte nun von selbst nach hinten. Jetzt wurde mit dem anderen Hebel, während der Fahrer rückwärts trat, mit Hilfe einer daran ausgebildeten Öse 3 die Kette auf ein anderes Ritzel bewegt. War dies kleiner, so bewegte sich das Hinterrad, weil die Kette lose wurde, von selbst nach hinten, bis die Kette wieder gespannt war. Beim Schalten auf ein größeres Ritzel musste die Achse

des Hinterrades mit Hilfe der Antriebskette durch Treten nach vorn bewegt werden. Dabei stellte der Fahrer durch weiteres feinfühliges Treten die Kettenspannung ein und verriegelte mit dem anderen Hebel wieder den Schnellspanner an der Hinterachse. Es erscheint heute schwer vorstellbar, dass man so ein Rennen gewinnen konnte. Die italienischen Rennfahrer waren dann nach dem zweiten Weltkrieg wohl nicht mehr bereit, diesen Umwerfer so zu akzeptieren, zumal es in Frankreich erfolgreiche Alternativen gab. Tullio Campagnolo entwickelte daraufhin einen wichtigen Urahn aller modernen Umwerfer, der wohl der erste in großer Stückzahl verwendete Umwerfer heutiger Bauart ist. Diese Bauart zeichnet sich durch eine Verstellung mittels Parallelogramm und einen Kettenspanner mit zwei Ritzeln aus (siehe DE 918 313 B, Figur 7).

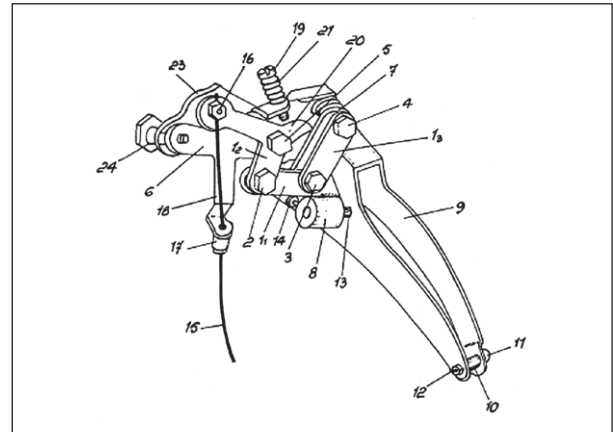


Figur 7: erster Parallelogramm-Umwerfer von Campagnolo (aus DE 918 313 B).

Interessant ist hier, dass sich der Kettenspanner – wie auch bei den heutigen Rennradumwerfern – nicht um die Achse des oberen Ritzels dreht. Es handelte sich um teure, aber sehr robuste Umwerfer für den Rennsport (siehe auch [1]).

Zu Beginn der 1960er Jahre führte dann Huret vordere und hintere Umwerfer in Parallelogramm-Bauart ein, die von Bowdenzügen betätigt wurden (vordere Umwerfer wurden bis dahin überwiegend mit Hebeln betätigt, siehe FR 1 263 140 A, Figur 8). In FR 1 204 027 A ist auch deutlich erkennbar, dass der Kettenspanner nicht mehr, wie bisher, parallel zur Hinterachse sondern – leicht bogenförmig – parallel zur Linie der Zahnspitzen der hinteren Ritzel geführt wird. Mit diesen Umwerfern begann die Ära der

modernen Parallelogramm-Umwerfer, die in großen Stückzahlen auch an günstigen Renn- und Tourenrädern verbaut wurden.

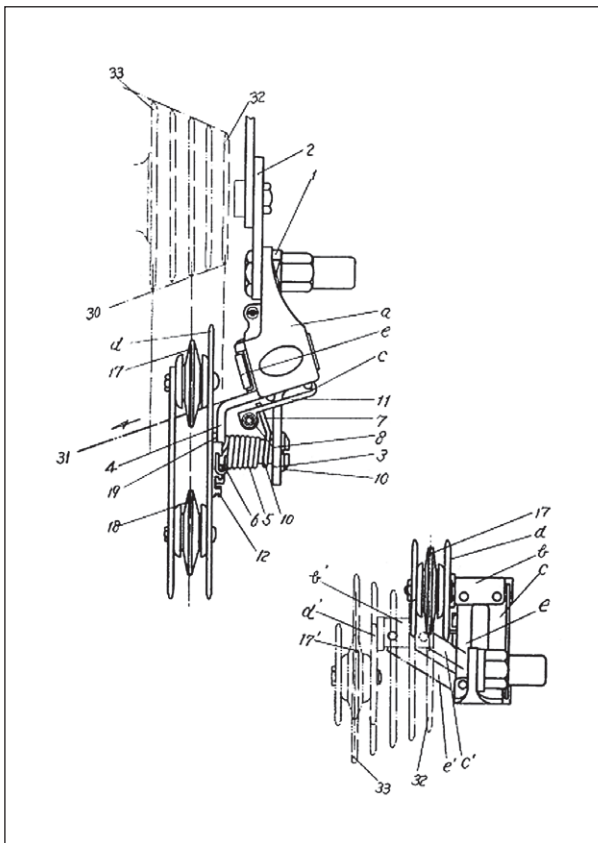


Figur 8: vorderer Umwerfer von Huret (aus FR 1263 140 A).

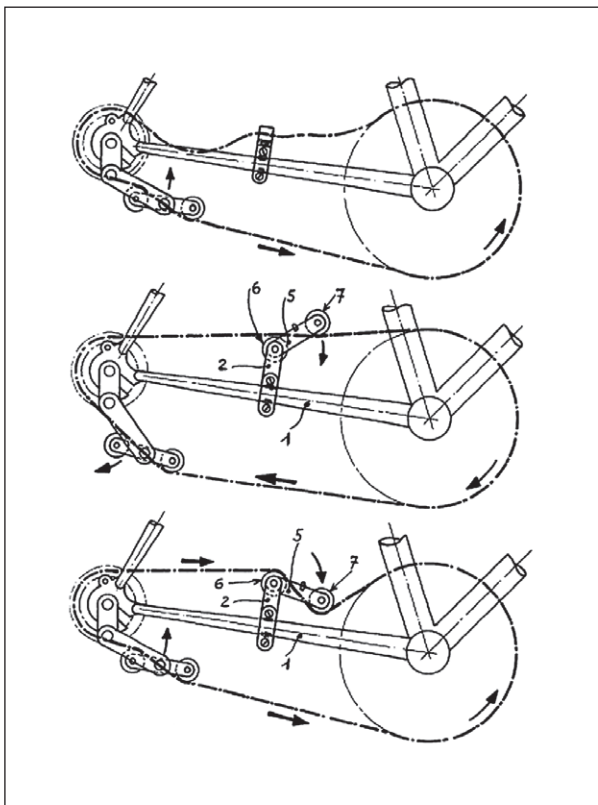
Juy wechselte später ebenfalls zu dieser Bauart. Dabei wurde ein kostengünstiger „Massen“-Umwerfer entwickelt, der erstmals Kunststoffteile für die Mechanik verwendete. So wird im Patent US 3 181 383 A ausdrücklich erwähnt, dass Mechanik-Teile aus „synthetic plastic material“, gegebenenfalls mit metallischen Verstärkungen, hergestellt sein können. Bemerkenswert ist an diesem Umwerfer die Einstellung der Endanschläge mit Rändelmuttern. Die Verwendung von Kunststoff bewährte sich damals jedoch nicht und führte zu einem Imageverlust, der wohl auch zum Niedergang und letztlich dem Verschwinden von Juy's Unternehmen führte (siehe auch [1]).

Mit dem Patent US 3 364 762 A kam eine wichtige Innovation erstmals aus Japan. Tetsuo Maeda patentierte den ersten hinteren Umwerfer, dessen Kettenspanner sich wirklich parallel zu den Spitzen der Ritzel bewegte (siehe Figur 9). Dieses Patent wurde konsequent bis zum Erlöschen 1984 weltweit durchgesetzt.

Es gab viele Versuche, auch bei Kettenschaltungen eine Rücktrittbremse zu ermöglichen. Wenn der Fahrer zur Betätigung einer solchen Rücktrittbremse rückwärts tritt, so wird das Obertrum der Kette entlastet und hängt durch. FR 1 378 296 A zeigt exemplarisch als Lösung einen Kettenspanner, der auch das Obertrum der Kette spannt (siehe Figur 10).



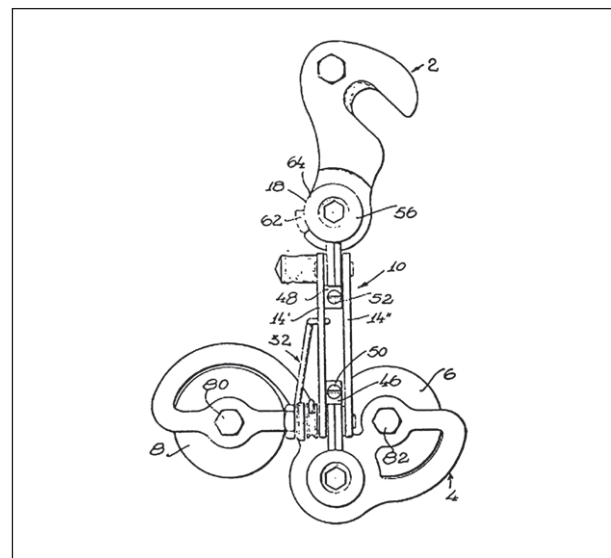
Figur 9: Hinterer Umwerfer von Maeda mit Verstellweg parallel zu den Ritzeln (aus US 3 364 762 A).



Figur 10: Kettenspanner im Obertrum für Rücktrittsbremse (aus FR 1378 296 A).

4. Entwicklung der Bauart moderner Umwerfer

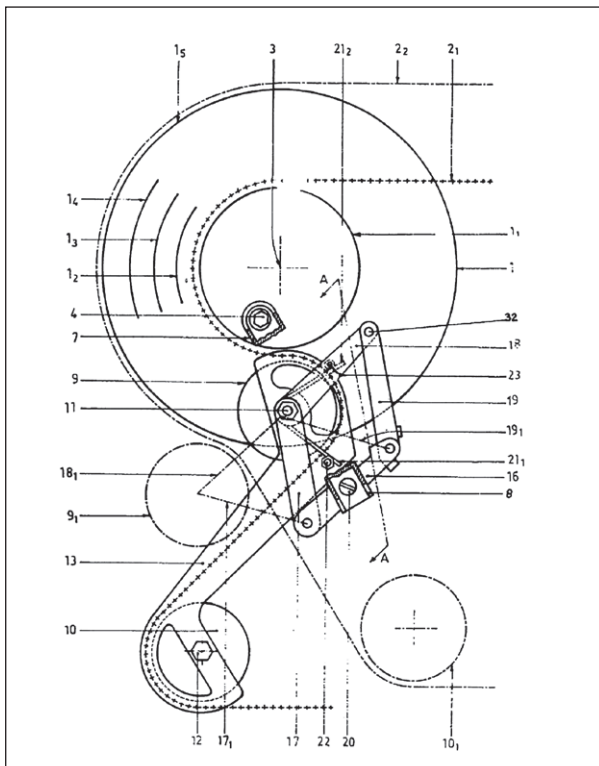
Campagnolos Umwerfer dominierten den Rennbereich, obwohl sie einige Übung in der nötigen Überschalt-Technik verlangten. Das heißt, abhängig von der Größe des Ritzels, auf das geschaltet werden sollte, musste der Fahrer erst „zu weit“ schalten und dann den Schalthebel wieder etwas in die Gegenrichtung bewegen, um einen sauberen Lauf der Kette (ohne Rattern) zu erzeugen. Auch die nicht für den Rennsport bestimmten Umwerfer hatten ihre Tücken, beispielsweise mit der Geometrie des Kettenspanners. DE 1 947 857 U (siehe Figur 11) zeigt die Grundform, bei der der Drehpunkt weder mit der Achse eines Ritzels zusammenfällt, noch auf der Verbindungslinie der Achsen liegt. Für die Touren-Umwerfer wurde der Abstand der Ritzelachsen des Kettenspanners vergrößert, um einen größeren Unterschied der Zähnezahlen zwischen kleinerem und größerem Ritzel am Hinterrad abzufangen und so eine größere Spreizung der Übersetzungen zu ermöglichen.



Figur 11: Campagnolo-Umwerfer (aus DE 1947 857 U).

Am Anfang der 1980er Jahre erschien, zunächst in den USA, das Mountainbike auf dem Markt. Es verbreitete sich rasch, da es das bot, was den damaligen Tourenrädern fehlte: breite, vergleichsweise pannen-sichere Reifen, eine aufrechtere Fahrposition, einen geraden Lenker, eine große Übersetzungsbandbreite, kräftige Bremsen und einen stabilen Rahmen.

Damit war es sehr gut für Anfänger und Tourenfahrer geeignet und war auch ein robustes Alltagsrad. Im Vergleich dazu waren die damaligen leichten Tourenräder eher kompliziert und unzuverlässig. Das Schalten der großen Übersetzungsbandbreite an Mountainbikes stellte besondere Anforderungen an den Umwerfer. Besonders gut bewährte sich damals ein Huret-Umwerfer (siehe DE 24 00 835 A), der neben dem üblichen Verstellparallelogramm, das den Kettenspanner zwischen den hinteren Ritzeln verschiebt, auch noch über ein weiteres, im rechten Winkel dazu angeordnetes und ungesteuertes Parallelogramm verfügte, das dem Kettenspanner einen zusätzlichen Bewegungsraum in der Ebene vor- und rückwärts, auf- und abwärts verschaffte (siehe Figur 12, das obere Ritzel des Spanners konnte sich zwischen den Positionen 9 und 9-1, das untere zwischen den Positionen 10 und 10-1 bewegen).

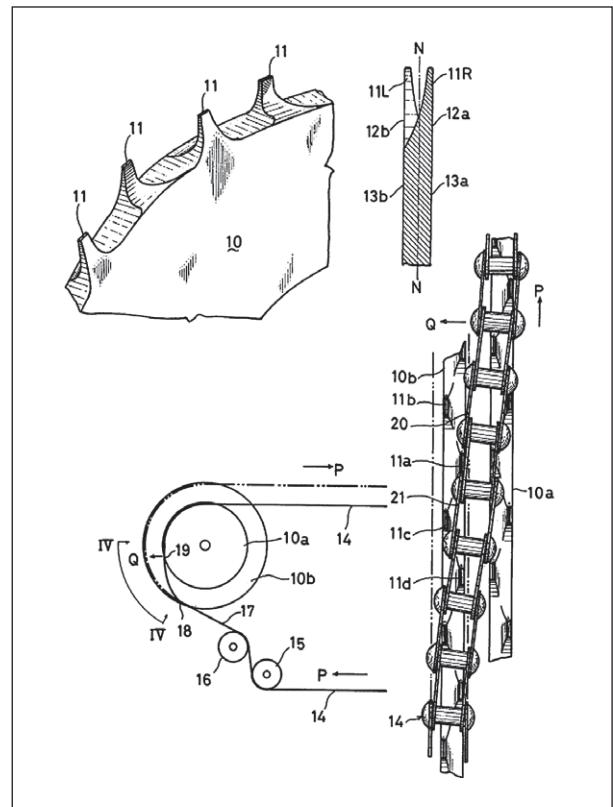


Figur 12: Huret-Umwerfer mit Doppel-Parallelogramm (aus DE 24 00 835 A).

Immer wieder wurde versucht, den Durchmesser des Kettenblattes an der Tretkurbel variabel zu gestalten, um damit verschiedene Übersetzungen zu erzeugen. Keine der entsprechenden Erfindungen konnte sich durchsetzen, vermutlich aus Kosten-

und Gewichtsgründen. Exemplarisch wird hier GB 2 062 142 A genannt. Als Besonderheit dieser Lösung erfolgt die Verstellung automatisch über das Drehmoment in bis zu 16 Stufen.

Zwei wichtige Innovationen zu Beginn der 1980er Jahre stammten aus Japan. Zum einen wurden die Ritzel auf der Hinterachse immer schmaler ausgeführt, um somit mehr Gänge bei gleich bleibender Breite des Ritzelpakets unterzubringen. Zum anderen wurde die Zahnform der Ritzel modifiziert, um das Schalten zu erleichtern, beispielsweise in der in Figur 13 gezeigten Zick-Zack-Form (siehe US 3 956 943 A).

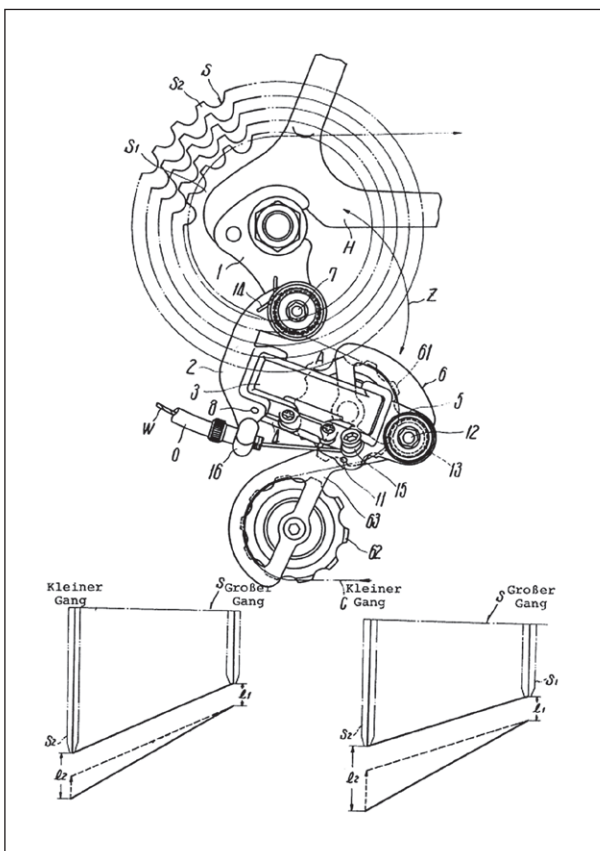


Figur 13: Zick-Zack-Zähne zur Erleichterung des Schaltens (aus US 3 956 943 A).

Auch gab es erste Schaltungen, bei denen Schalthebel oder Umwerfer in vorbestimmten Stellungen einrasten, um somit speziell Anfängern das Schalten zu erleichtern. Dazu mussten die Schaltungen jedoch ohne Überschalten betätigbar sein.

1984 brachte Shimano eine neue Umwerfergeneration (siehe DE 34 06 566 A1), die zwei bereits länger bekannte Prinzipien verknüpfte: Das schräge Parallelogramm von Maeda (US 3 364 762 A, Figur 9), dessen Patent nun ausgelaufen war, und die zwei

Federn von Juy. Das schräge Parallelogramm sorgte, wie bereits oben ausgeführt, für eine Verstellbewegung des Kettenspanners parallel zu den Ritzeln des hinteren Ritzelpaketes. Weiterhin waren, wie heute üblich (siehe Figur 14), beide Drehpunkte, also der Drehpunkt 7 des Umwerfers an der Befestigungsschraube zum Fahrradrahmen und der Drehpunkt 12 des Kettenspanners am Umwerfer, jeweils mit einer Feder belastet, so dass sich die Position des Umwerfers aus dem Kräftegleichgewicht dieser Federn ergab.



Figur 14: Shimano-Umwerfer mit schrägem Parallelogramm und Federn an beiden Drehpunkten (aus DE 34 06 566 A1).

Diese Konstruktionsmerkmale führten, zusammen mit speziellen Ausformungen und Zusatzteilen an den Ritzeln, die den Übergang der Kette, besonders das „Aufsteigen“ auf ein größeres Ritzel, erleichterten, zu einem leichten und spontanen Schaltvorgang. Dies erleichterte die Verwendung von rastenden Schalthebeln mit geringen Bedienkräften, bei denen kein „Überschalten“ mehr nötig war.

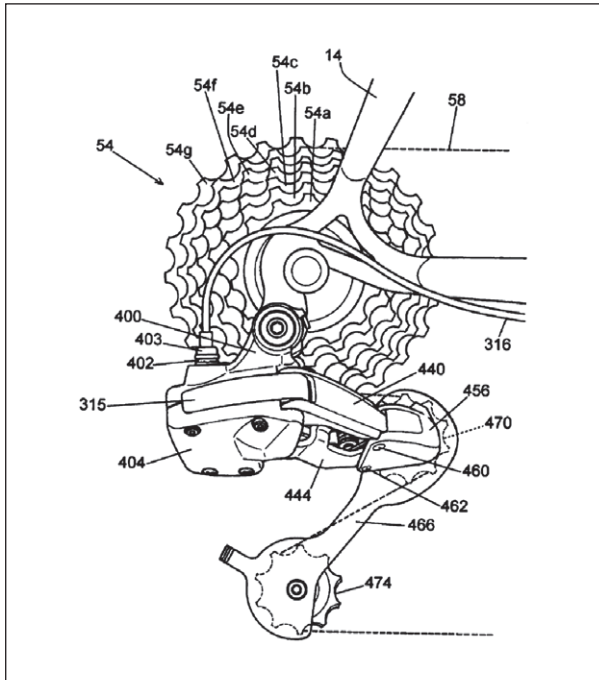
5. Weiterentwicklung im Detail

Die letzten 15 Jahre sind geprägt von steter Weiterentwicklung aller Komponenten im Detail. Ein wichtiger Punkt ist die Verbesserung der Gangwechsel durch ausgeklügelte Gestaltung von Rampen an den Ritzeln, ergänzt durch Bolzen und Ähnliches. So muss sich im günstigsten Fall die Kette nur zwei Zähne weit bewegen, um zwischen zwei hinteren Ritzeln zu wechseln. Auch wurde mit diesen Maßnahmen das Schalten leichtgängiger. Die hinteren Ritzel werden immer schmaler und dichter gepackt, um in Kombination mit schmalen Ketten bis zu zehn Ritzeln hinten zu ermöglichen. Es gibt spezielle vordere Umwerfer für gefederte Fahrräder, deren Sattelrohr nicht bis zum Tretlager reicht. Auch existieren besonders schmale hintere Umwerfer für Mountain-Bikes, die für enge Strecken, die „Trails“, ausgelegt sind. Andere hintere Umwerfer, speziell für Anfänger-Fahrräder, arbeiten „verkehrt herum“, so dass die Schalthebel für vordere und hintere Umwerfer genau gleich bedient werden können. Durch einen Materialmix von Stahl, Aluminium, Titan und Kohlefaser-Verbundwerkstoffen wird versucht, die Umwerfer möglichst leicht zu konstruieren. Auch wurde ein vorderer Umwerfer entwickelt, dessen Verstellbewegung durch die Drehbewegung der Kurbelachse angetrieben wurde. Dieser wird wegen seines geringen Energiebedarfes in modifizierter Form auch für elektrifizierte Schaltungen verwendet. Direkt elektrisch angetriebene hintere und vordere Umwerfer wurden weiterentwickelt. Hier seien exemplarisch einige Details eines elektrisch angetriebenen hinteren Umwerfers gezeigt. Figur 15 (aus US 2009 0 215 561 A1) zeigt den montierten Umwerfer, der durch seinen Motorblock eine charakteristische Form erhält.

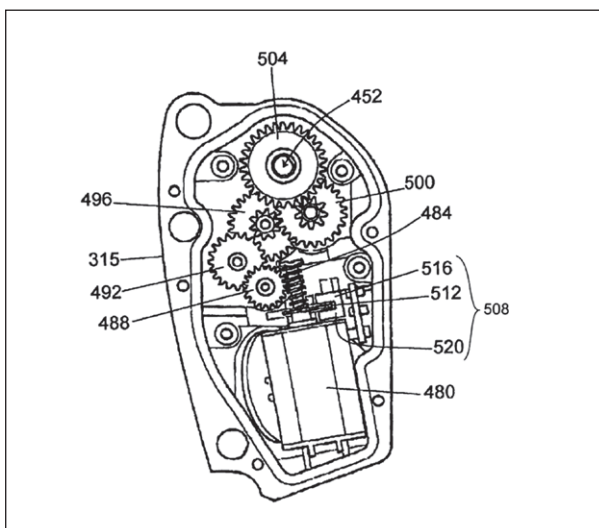
Der fahrradfeste Teil besteht aus dem Halter 400 (der Basisplatte), der Antriebseinheit 315 und einem Deckel 404. Die Parallelogrammhebel sind dann wieder ähnlich wie an herkömmlichen Umwerfern ausgeführt.

In der Antriebseinheit treibt der Motor 480 über eine Schnecke ein Reduktionsgetriebe, das die Abtriebswelle 452 dreht (Figur 16).

An der Motorwelle ist auch eine gelochte Scheibe montiert. Diese Scheibe unterbricht als Teil der Bau-
gruppe 508 dabei periodisch eine Lichtschranke. So
ist eine Rückmeldung über die Verstellbewegung
möglich.



Figur 15: Elektrischer Umwerfer, montierter Zustand (aus US 2009 0 215 561 A1).



Figur 16: Elektrischer Umwerfer, Antriebseinheit (aus US 2009 0 215 561 A1).

6. Ausblick

Nach turbulenten Anfängen sind die Umwerfer nun weitgehend ausgereifte Produkte, die über die Jahre in kleinen Schritten weiter entwickelt und optimiert werden. Entwicklungsziele sind Gewichtsverminderung, Erhöhung der Leichtgängigkeit, Verringerung der Kosten und Erhöhung der Zahl schaltbarer Ritzeln. Hier gab es zuletzt mit zehn Ritzeln an der Hinterachse einen großen Schritt, da bei dieser Ritzelanzahl vorn nur zwei Kettenblätter benötigt werden. Es ist zu vermuten, dass mit der steigenden Zahl motorisierter Fahrräder, den sogenannten Pedelects, auch elektrisch betriebene automatische Schaltgruppen populär werden. Einen umfassenden Einblick in die Entwicklung und Funktion der Umwerfer liefert [1]. Viele wertvolle Hinweise und Anregungen für diesen Artikel stammen aus diesem Buch. Interessierten sei auch der Besuch des deutschen Fahrrad-Museums in Bad Brückenau empfohlen.

Nicht-Patent-Literatur:

- [1] BERTO, Frank: The Dancing Chain: History and Development of the Derailleur Bicycle, 3. Auflage. San Francisco: Cycle publishing, 2010, ISBN 978-1-892495-59-4

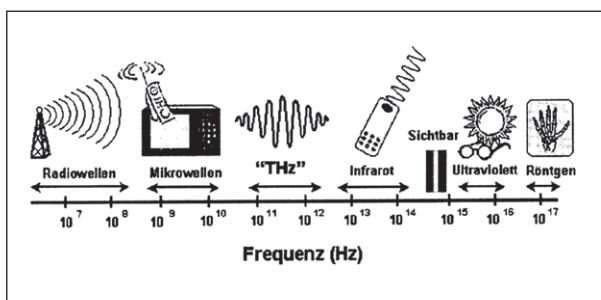
Technologie und Anwendung von Terahertz - Strahlung

Dr. Jens Philipps, Patentabteilung 1.54

Als Terahertz (THz) Strahlung wird die elektromagnetische Strahlung bezeichnet, die im Frequenzbereich zwischen dem Infrarot und den Mikrowellen liegt, und welche seit langem in Gebieten wie Astronomie und analytischer Wissenschaft untersucht wird. Erst seit wenigen Jahren ermöglichen technologische Innovationen in der Photonik und in der Nanotechnologie den Einsatz der THz Strahlung. Heute findet THz Technologie Gebrauch in einer zunehmend großen Vielfalt von Anwendungen: Informations- und Kommunikationstechnologie, Biologie und medizinische Wissenschaften, zerstörungsfreie Materialprüfung, Sicherheitskontrollen, Qualitätskontrolle von Nahrung und Agrarerzeugnissen, globale Umweltüberwachung, und vieles mehr [1].

1. Einleitung

Der THz Frequenzbereich von etwa 0,2 THz (entsprechend 2×10^{11} Hz oder einer Wellenlänge von 1,5 mm) bis etwa 10 THz (entsprechend 1×10^{13} Hz oder einer Wellenlänge von 30 Mikrometern) gilt als die letzte größere Lücke im elektromagnetischen Spektrum, die noch nicht intensiv technisch genutzt wird.



Figur 1: Übersichtsdarstellung des elektromagnetischen Spektrums mit dem THz Frequenzbereich zwischen Mikrowellen und Infrarot (aus DE 10 2008 021791 A1)

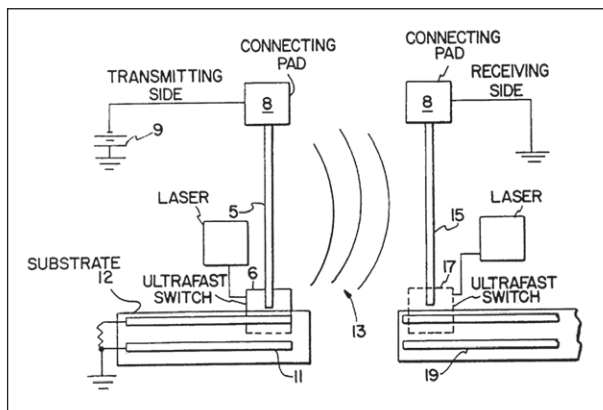
Zu höheren Frequenzen hin schließt sich der Infrarotbereich an. Er wird durch die Lasertechnik mit den bekannten Anwendungen in der Materialbearbeitung mittels Lasern und der optischen Kommunikationstechnik abgedeckt. Zu niedrigeren Frequenzen hin schließt sich der Mikrowellenbereich an und ist durch die Hochfrequenzelektronik und deren Anwendung in der Rundfunk- und Kommunikationstechnik erschlossen. Der THz Frequenzbereich liegt damit technologisch im Grenzbereich

zwischen der Optik und der Elektronik und war bislang nur mit relativ hohem apparativem Aufwand für wissenschaftliche Grundlagenuntersuchungen erreichbar. Der technologische Fortschritt der letzten Jahre in der Elektronik und der Optik scheint mittelfristig kostengünstige Quellen sowohl im unteren als auch im oberen THz Frequenzbereich zu ermöglichen. Gleichzeitig zeichnen sich für eine preisgünstigere und leistungsstarke THz Technologie unter anderem in der Sicherheitstechnik und der industriellen Inspektion der Produktion potenzielle Märkte ab [2, 3, 4].

Dieser Entwicklungslinie entsprechend sind die ursprünglich vom wissenschaftlichen Interesse getragenen optoelektronischen THz Messsysteme mittlerweile bei mehreren kommerziellen Anbietern erhältlich [5].

2. Historisches

Eines der ersten Patente (US 5 056 111 A, angemeldet im Jahr 1988), welches sich mit der THz Technologie basierend auf einem ultraschnellen fotoleitenden Schalter befasst, zeigt die für diesen Typus bis heute gültige Grundstruktur aus fotoleitendem Schalter und Antenne auf einer Siliziumschicht, welche auf einem Substrat aus Saphir aufgebracht ist (silicon-sapphire).



Figur 2: Schema der Grundstruktur eines THz Systems mit Sender und Empfänger (aus US 5 056 111 A)

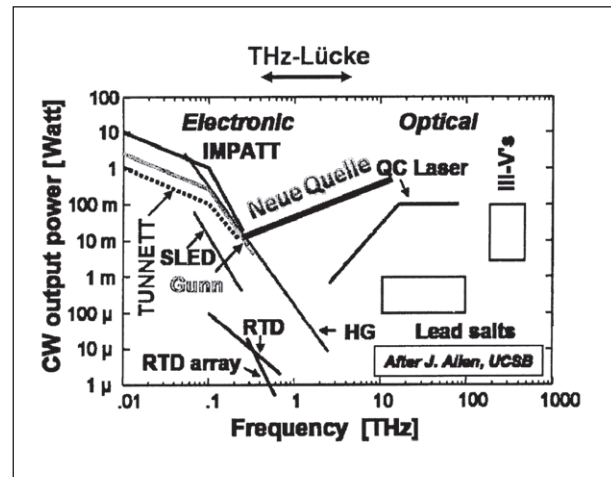
Die Anregung des ultraschnellen Schalters 6 aus der Figur 2 erfolgt mit Hilfe eines Lasers, der auf die Lücke zwischen Antenne 5 und koplanarer Übertragungslinie 11 fokussiert wird und dabei freie Ladungsträger (Elektronen) erzeugt. Durch die fotogenerierten Ladungsträger wird das Silizium leitend und durch die Antenne fließt ein kurzer Stromimpuls in Abhängigkeit von der Länge des Laserpulses und der Lebensdauer der Ladungsträger. Die zeitliche Entwicklung des Stromimpulses und die Geometrie der Antenne bestimmen das Spektrum der Abstrahlung 13. Die Empfängeranordnung kann einen identischen Aufbau besitzen wie die Senderanordnung.

Als Anwendung dieses THz Systems wurde die Verwendung in der Kommunikationstechnik vorgeschlagen. Der Vorteil gegenüber den gängigen Systemen liegt hierbei in der höheren Geschwindigkeit im Vergleich zu rein elektronischen Systemen. Bei diesen wird die Geschwindigkeit durch die bei steigender Packungsdichte zunehmenden Probleme durch Kanalübersprechen und Wärmeentwicklung begrenzt.

3. Technologie

Dem zunehmenden Interesse der letzten Jahre an der THz Technologie folgend, wurden in der Forschung die verschiedensten Ansätze untersucht, um THz Quellen bereitzustellen, die auch für einen industriellen Einsatz geeignet sind. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei in der Regel auf den Kosten und

der Leistung dieser Quellen, sowie auf deren einfachen Herstellbarkeit und einen robusten oder alltagstauglichen Aufbau.



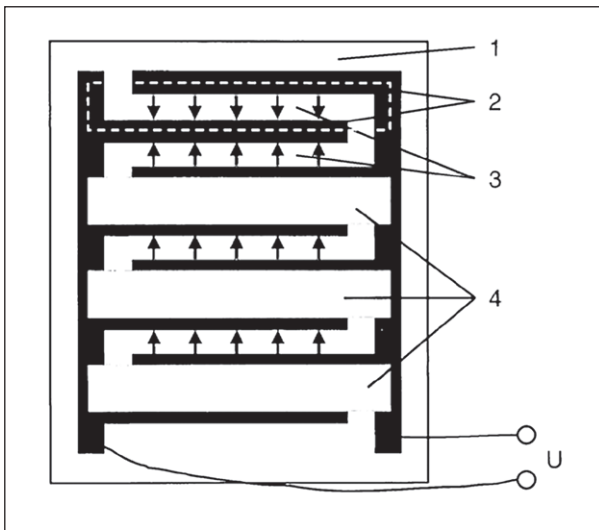
Figur 3: Übersicht über verschiedene THz Quellen und ihre Ausgangsleistung in verschiedenen Frequenzbereichen. Weiter gibt die sog. „THz Lücke“ den Frequenzbereich an, in dem bisher keine kommerziellen Quellen mit hohen Ausgangsleistungen verfügbar sind (aus DE 10 2008 021 791 A1)

a) Zu den bekanntesten gepulsten Quellen für THz Strahlung zählen nach wie vor die photoleitenden Antennen, die in der Regel mit modengekoppelten Lasern, deren Pulsdauern unter einer Pikosekunde ($< 10^{-12}$ Sekunden) liegen, angeregt werden. Mit Leistungen im Mikrowattbereich wird die Verbreitung dieser Technologie noch durch die hohen Kosten für den zur Anregung benötigten Laser beschränkt.

Um die Leistung dieser fotoleitenden Antennen weiter zu steigern werden die Antennen in Arrays zusammengefasst. Diese Anordnung soll es ermöglichen, dass eine höhere Leistung des Lasers eingekoppelt werden kann, ohne die Antenne oder das Substrat zu beschädigen.

Bei der Anordnung der Arrays wird eine Vielzahl von Elektrodenpaaren mittels einer periodischen, ineinander greifenden Fingerstruktur ausgebildet (DE 10 2006 014 801 A1, DE 10 2004 046 123 A1).

Die Figur 4 zeigt eine kohärente THz Strahlungsquelle mit einem Array aus Elektrodenpaaren mit abgedeckten Zonen 4, die durch die Laserstrahlung nicht angeregt werden. Die abgedeckten Zonen 4



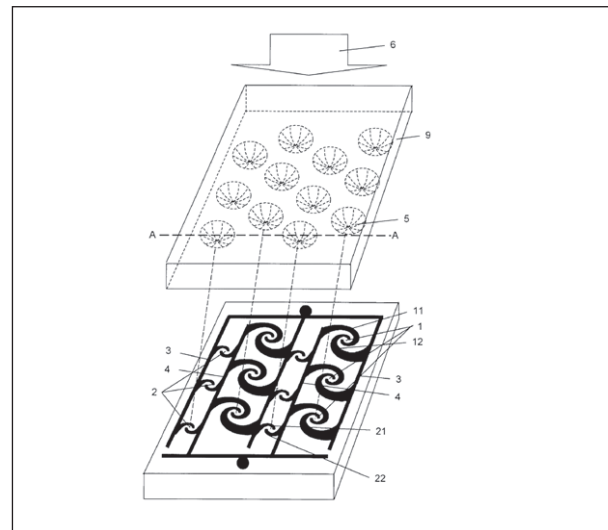
Figur 4: Eine kohärente THz Strahlungsquelle aus DE 10 2004 046 123 A1

jedes zweiten Bereichs zwischen den einzelnen Elektroden ist notwendig, um die durch die entgegengesetzte Polarisation des elektrischen Feldes 3 zwischen benachbarten Elektroden sich ergebende destruktive Interferenz der THz Strahlung im Fernfeld zu vermeiden (DE 10 2004 046 123 A1).

Eine Weiterentwicklung dieses Aufbaus überträgt das Array auf spiralförmige Antennen, die ein breiteres Spektrum abstrahlen, und daher besser für die Spektroskopie geeignet sind. Daneben wird ein größerer Anteil der einfallenden Laserstrahlung für die Erzeugung von THz Strahlung genutzt.

Die Anzahl der Windungen der Spiralen der THz Quelle aus Figur 5 ist für entlang der Linie A liegende Antennen jeweils um eine halbe Windung verschieden, um destruktive Interferenzen zwischen unterschiedlich gepolten Zweigen des Arrays zu vermeiden (DE 10 2008 031 751 B3). Die einfallende Laserstrahlung wird über ein Linsenarray auf die einzelnen Spiralen fokussiert, wobei die elektrische Feldrichtung zwischen den sich gegenüberliegenden Enden der Spiralen immer in die gleiche Richtung weist.

b) Bei den kontinuierlichen Quellen ist, neben durch nichtlineare Prozesse wie Fotomischung oder Differenzfrequenzmischung erzeugte Strahlung im THz Bereich, der Quantenkaskadenlaser zu nennen.



Figur 5: THz Quelle mit einem Array aus spiralförmigen photoleitenden Antennen aus DE 10 2008 031 751 B3

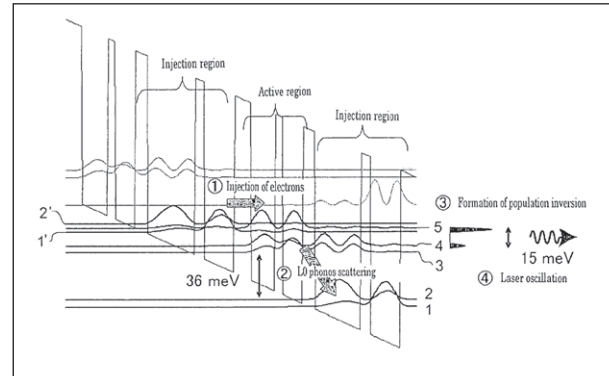
Bei der Fotomischung zweier kontinuierlicher Laserstrahlen in einer photoleitenden Antenne (DE 10 2007 012 475 B4, WO 2008/054 846 A2) werden beispielsweise zwei nahezu identische Laserdioden verwendet, die sich in ihren ausgesendeten Lichtfrequenzen nur geringfügig unterscheiden. Der Frequenzunterschied wird hierbei so eingestellt, dass die Differenzfrequenz im THz Bereich liegt. Durch Überlagerung der beiden Lichtfelder erhält man eine Frequenzschwebung mit der Differenzfrequenz. Dieses Schwebungssignal wird nun auf eine der gängigen Antennen geleitet, die ein fotoleitendes Halbleitermaterial aufweist (bevorzugt wird hier GaAs oder InGaAs mit einer kurzen Ladungsträgerlebensdauer „LT low temperature-grown“ verwendet). Durch das überlagerte Licht und den Photoeffekt werden bewegliche Elektronen erzeugt, die durch eine über die Elektroden angelegte Spannung beschleunigt werden, wodurch von der Antenne elektromagnetische Strahlung im THz Bereich emittiert wird. Die Anzahl der erzeugten Ladungsträger oder Elektron-Loch-Paare ist dabei abhängig von der Intensität des Schwebungssignals, das heißt die Anzahl der freien Ladungsträger ändert sich periodisch mit der Frequenz des Schwebungssignals. Der Strom in der Antenne ändert sich also mit der Schwebungsfrequenz, und somit wird ein elektromagnetisches Feld mit einer Differenzfrequenz abgestrahlt, die durch geeignete Wahl der Frequenzen der Laserdioden im THz Bereich liegt.

Vergleichbar arbeitet die Differenzfrequenzmischung zweier kontinuierlicher Laserstrahlen in einem nichtlinearen Prozess (DE 10 2008 021 791 A1, DE 102 17 826 A1), bei der nichtlineare Kristalle zur Frequenzkonversion, das heißt zur Frequenzvervielfältigung oder Aufwärtsmischung, wie auch zur Differenzfrequenzzeugung genutzt werden. Ausschlaggebend dafür ist ihr großer Chi(2)-Faktor, der als elektrische Suszeptibilität 2. Ordnung bezeichnet wird. Dabei ist unter anderem auf die jeweilige Absorption der einzelnen Frequenzen innerhalb des Kristalls, wie auch auf die Phasenanpassung zwischen den erzeugenden und erzeugten elektromagnetischen Strahlungen zu achten. Zur Realisierung dieser Phasenanpassung wird beispielsweise auf die aus der Optik bekannte sogenannte Quasi-Phasenanpassung zurückgegriffen, bei der sich nebeneinander liegende und gegenseitig orientierte ferroelektrische Domänen in einem Kristall in dem Abstand zueinander abwechseln, der der halben Wellenlänge des einfallenden Laserlichtes im Material entspricht.

Als Beispiel für einen weiteren Ansatz THz Strahlung mittels kompakter und leistungsstarker Quellen zu erzeugen, ist der THz Quantenkaskadenlaser zu nennen (EP 1 708 318 A1, WO 2005/057 746 A1). Das Wirkungsprinzip des Quantenkaskadenlasers beruht darauf, dass alle am Laserprozess beteiligten Energieniveaus im Leitungsband (oder Valenzband) liegen. Damit wird nicht nur eine zusätzliche Optimierung der Laserübergänge und der Zu- und Ableitungen mittels „Quantum Engineering“ (Figur 6) möglich, sondern auch das „Recycling“ der Ladungsträger, die nun nicht nur einen, sondern eine Vielzahl von Laserübergängen in kaskadierten Strukturen machen können und so eine hohe Verstärkung der elektromagnetischen Strahlung ermöglichen.

Die Energieniveaus des Quantenkaskadenlasers aus der Figur 6 sind von den Energieniveaus des Halbleitergrundmaterials deutlich verschieden, da sich, bedingt durch Quantisierungseffekte, in den sehr dünnen Schichten von wenigen Nanometern „künstliche“ Energieniveaus ausbilden, die von der Geometrie der Schicht bestimmt werden. So ist es mit Hilfe von unter Umständen über 100 verschiede-

nen Schichten möglich, maßgeschneiderte Übergänge zu erzeugen, die in Summe einen THz Strahl erzeugen.



Figur 6: Ein schematisches Diagramm zeigt die Struktur der Energiebänder und das Prinzip des Quantenkaskadenlasers (EP 1 708 318 A1)

Verschiedene elektronische Methoden der Erzeugung von THz Strahlung, wie Gunn Dioden oder IMPATT Dioden sowie HEMT Transistoren erreichen Frequenzen bis zu 1 THz, allerdings mit zu höheren Frequenzen hin deutlich abnehmenden Leistungen.

Mit CO₂ Lasern gepumpte Moleküllaser, die auch als FIR Laser (Far InfraRed) bekannt sind, nutzen Übergänge zwischen den Rotationszuständen chemischer Moleküle, um kontinuierliche Strahlung mit diskreten Frequenzen im THz Bereich zu erzeugen. Die Verbreitung dieser Laser ist wegen der mit ihnen verbundenen hohen Kosten nur gering.

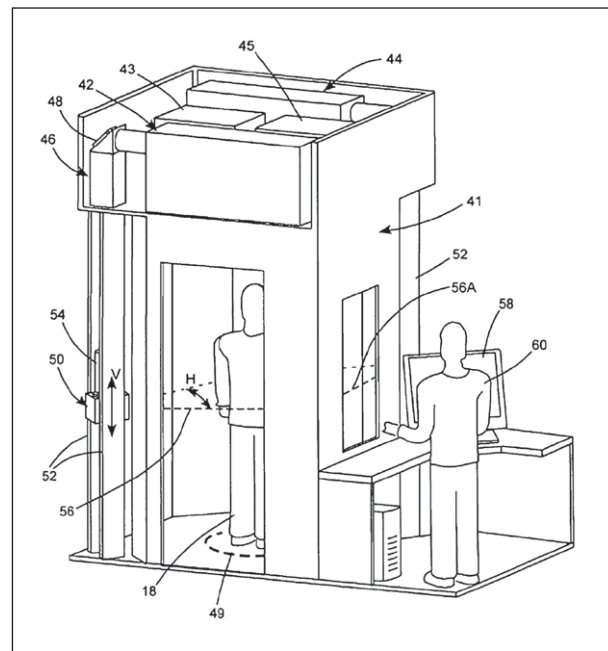
Übergänge zwischen schwerem und leichtem Lochband, diese Lochbänder bezeichnen die jeweilige scheinbare Masse eines Teilchens in einem Kristall im Rahmen einer semiklassischen Beschreibung, in Germanium liefern die THz Pulse in p-Ge Laser, die bedingt durch das hierzu benötigte starke Magnetfeld bei tiefen Temperaturen nur in Forschungslaboren eingesetzt werden.

c) Für die Abbildung von THz Strahlung sind nur eine bestimmte Auswahl von Materialien geeignet, da die meisten gängigen Optikmaterialien in diesem Frequenzbereich nicht hinreichend transparent sind. Daher werden auch hier unterschiedliche Ansätze genutzt.

Als ältestes und bekanntestes Verfahren zur Abbildung ist die Verwendung von sphärischen Siliziumlinsen zu erwähnen (US 5 789 750 A), wobei das Silizium den Vorteil einer geringen Absorption und einer geringen chromatischen Aberration aufweist, was es für die Verwendung in der Spektroskopie besonders interessant macht. Weitergehende Ansätze zur Miniaturisierung und Kostenreduzierung zielen auf Wellenleiter (WO 2006/123 153 A1) sowie Metamaterialien (Erfinderaktivitäten 2008/2009, DE 10 2005 052 208 A1). Der besondere Reiz bei der Verwendung von Metamaterialien für die Abbildung von THz Strahlen liegt in der Möglichkeit einen negativen Brechungsindex in das optische System einzuführen, und damit völlig neuartige Abbildungsmöglichkeiten zu schaffen, die bei klassischen optischen Systemen im sichtbaren Spektralbereich zurzeit noch nicht verfügbar sind.

4. Anwendungen

a) Ein Einsatzgebiet der THz Technologie, das reges Interesse auch in der Öffentlichkeit hervorruft, ist deren Einsatz zur Sicherheitskontrolle etwa auf Flughäfen [2]. Hier wird der besondere Spektralbereich der THz Strahlung ausgenutzt, in dem eine Vielzahl von Molekülen jeweils charakteristische Rotationsbanden aufweist. Diese THz Spektroskopie („Terahertz time-domain spectroscopy bzw. THz TDS“) bildet den Kern praktisch aller Anwendungen, bei denen spezielle Materialeigenschaften von Stoffen ermittelt werden sollen. Dies gilt insbesondere auch für Drogen, Sprengstoffe oder andere unter Umständen gefährliche biologische Stoffe. Allerdings weist auch das Wassermolekül in diesem Spektralbereich eine starke Absorption auf, so dass ein nur wenige Mikrometer dicker Wasserfilm ausreicht, um THz Strahlen vollständig zu absorbieren. Eine Untersuchung von Personen erscheint daher nur im Reflexionsverfahren möglich, wobei eine Durchleuchtung der Bekleidung bis auf die Haut möglich ist. Dementsprechend finden sich auch in der Patentliteratur zahlreiche Entwicklungen, die sich mit der Personen- oder Gepäckkontrolle mittels THz Strahlung befassen.



Figur 7: Ein Sicherheitsportal für die Personenkontrolle (aus US 2007/0114 418 A1)

Die zu untersuchende Person 18 begibt sich auf eine festgelegte Position 49 innerhalb des Portals der Figur 7, wo sie mittels eines THz Scanners 50 abgetastet wird. Die Ortsauflösung des Scanners soll hierbei einen Millimeter betragen. Ein Bild der so abgetasteten Person wird auf einem Display 58 von einem Operateur 60 überwacht. Es ist vorgesehen verschiedene Frequenzen zu verwenden, um den Kontrast für verschiedene Materialien von besonderem Interesse zu verbessern, und, entsprechend einer Identifikation solcher Materialien, diese in einem Bild farblich herauszuheben. Dieser Idee folgend ist eine Darstellung von Intensitätsbildern sowie von Phasenbildern möglich, um den jeweils optimalen Kontrast zu erreichen.

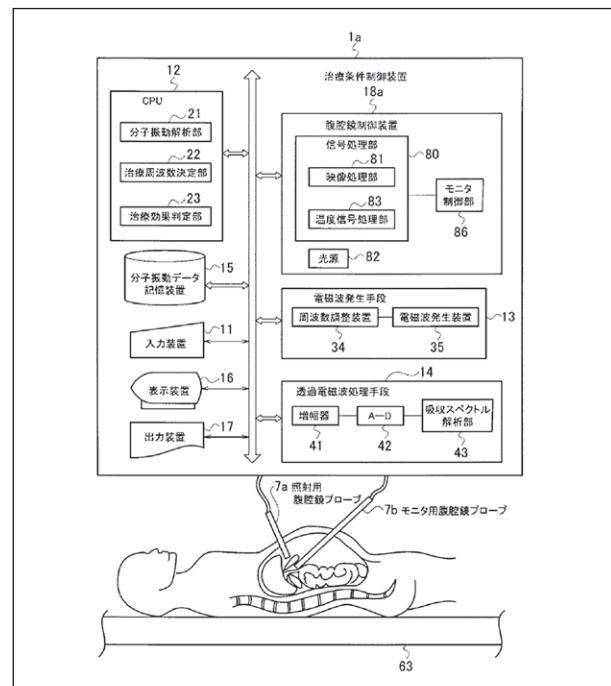
Bei der Untersuchung von Gegenständen, wie etwa Gepäckstücken, gibt es einen weiteren Ansatz neben dem Reflexionssignal auch ein Transmissionssignal auszuwerten (WO 2005/119 214 A1). In der Kombination aus spektraler Absorption, Zeitverzögerung (Brechungsindex) und Reflexivität soll es ermöglicht werden, unterschiedliche explosive Chemikalien zu identifizieren und dem Operateur mittels einer entsprechenden Falschfarbendarstellung auf einem Display ein Warnsignal zu geben.

Neben der für bestimmte Stoffe charakteristischen Absorption ist es auch möglich die Temperaturunterschiede zwischen einer Person und Objekten festzustellen, die diese unter ihrer Kleidung am Körper trägt (WO 2008/078 112 A1). Bei dieser passiven Technik wird die im THz Bereich liegende Schwarzkörperstrahlung mittels einer geeigneten Kamera aufgenommen. Allerdings sind hier zusätzliche Mittel nötig, weil nur bei einer stabilisierten Temperatur des Hintergrunds ein hinreichender Kontrast erzielt werden kann.

Eine für solche Untersuchungen geeignete THz Kamera, die in der Lage ist, bewegte Objekte unter Nutzung der Schwarzkörperstrahlung der Objekte mit einer Bildwiederholfrequenz > 16 Hz aufzuzeichnen (WO 2009/007 095 A1), basiert auf einem die einfallende Strahlung sammelnden Primärspiegel, der über einen beweglichen Sekundärspiegel auf einzelne Bolometerelemente, die die Energie im gesamten Wellenlängenspektrum detektieren, fokussiert wird. Die Notwendigkeit einer Kühlung dieser Elemente auf die Temperatur von flüssigem Helium stellt neben den Beschleunigungskräften, die auf den Sekundärspiegel einwirken, eine weitere technische Herausforderung für einen stabilen und alltagstauglichen Aufbau dar.

b) Der Einsatz der THz Technologie in der medizinischen Technik wird von zwei Faktoren begünstigt. Zum einen weist der Trend weg von Verfahren, die ionisierende Strahlung (Röntgen, radioaktive Präparate) verwenden, zum anderen besteht der Wunsch neben der reinen Information über die Gestalt von Gewebe zusätzlich detaillierte Information über dessen physikalische Eigenschaften zu erlangen.

Der Einsatz von THz Strahlung bietet sich für diese beiden Entwicklungstrends an, und vermag zudem noch eine weitere Funktion wahrzunehmen. So befasst sich beispielsweise eine Patentanmeldung (JP 2005-334 129 A) mit der Möglichkeit nicht nur verschiedene Moleküle zu detektieren, sondern auch durch einen erhöhten Energieeintrag bei einer Resonanzabsorptionsfrequenz an diesen Molekülen verschiedene Manipulationen durchzuführen.



Figur 8: Manipulation an der Molekülstruktur in Zellen eines Patienten aus JP 2005 - 334 129 A

Die Figur 8 zeigt diese Manipulation an der Molekülstruktur in Zellen eines Patienten mittels einer ersten THz Strahlungssystem 7a und Messung der Veränderungen mittels einer zweiten THz Strahlungssystem 7b. Als mögliche Moleküle werden die vier organischen Komplementärbasen der Desoxyribonukleinsäure (DNA) genannt, was eine gezielte Manipulation der DNA ermöglichen soll. Als Hauptanwendung wird in dieser Druckschrift die Bekämpfung von Krebszellen angeführt.

Die Verwendung von THz Quellen für die klinische Tomographie oder Bildgebung wird von einer weiteren Patentanmeldung beschrieben (WO 2004/097 382 A1). Dabei werden zwei Laserstrahlen in ein Endoskop eingespeist, das an seinem Ende einen THz Emitter aufweist. Durch Abstimmen der beiden Anregungslaser kann die Frequenz der THz Strahlen verändert werden, um Spektroskopie oder Tomographie zu betreiben. Auch hier soll über die spektrale Signatur (d.h. die für ein Molekül charakteristische Absorption) zwischen gesunden und kranken Zellen unterschieden werden. Als krank erkannte Zellen sollen danach durch Hyperthermie, ausgelöst durch eine entsprechend intensive Bestrahlung, abgetötet werden.

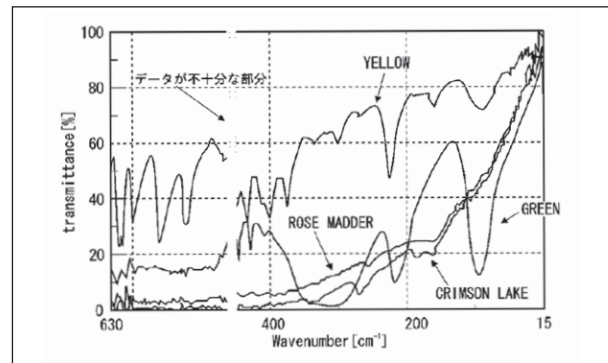
c) Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet der THz Technologie ist die industrielle Inspektion [4]. Als Anwendungsfelder für die THz Technologie werden unter anderem die Kunststoffindustrie (einschließlich „Klebertechnologie“) sowie die Pharmaindustrie und die Lebensmittelindustrie genannt. So soll es möglich sein, Hohlräume und Fehlstellen in Verbundwerkstoffen zerstörungsfrei zu detektieren. Es können Wirkstoffkonzentrationen und -verteilungen in Arzneimitteln bestimmt und Fremdkörper in Lebensmitteln erkannt werden.

Eine Anmeldung aus diesem Themenbereich (WO 2007/143 474 A1) befasst sich mit der Überwachung von kohlenwasserstoffhaltigen Verbindungen, insbesondere von Rohöl in Pipelines. In dieser Anwendung wird das Verhältnis von Öl zu Gas in der Pipeline sowie das Auftreten von Verunreinigungen überprüft, was dazu beitragen soll Korrosion und Ablagerungen in den Pipelines zu vermeiden.

Für verschiedene Untersuchungsmethoden wird es notwendig nicht nur die Absorption bei bestimmten Wellenlängen zu erfassen, sondern zusätzlich noch die Polarisations-eigenschaften der THz Strahlung zu untersuchen (WO 2008/110 017 A1). Dies wird im vorliegenden Fall ausgenutzt um weitergehende Informationen über ein zu untersuchendes Material, wie etwa über Holz zu erhalten. Beispielsweise wird für die Bestimmung der Faserorientierung von verschiedenen Hölzern eine polarisierte THz Quelle verwendet, deren reflektierte Strahlen von einem polarisationsempfindlichen Detektor nachgewiesen werden. Die Holz-Probe wird hierbei unter verschiedenen Polarisationswinkeln untersucht, was eine Aussage über die Orientierung der Fasern erlaubt.

Schließlich geht das mögliche Untersuchungsgebiet der THz Technologie über technisch-industrielle Anwendungen hinaus, wie die Untersuchung von Kulturgütern (JP 2008-215 914 A) aufzeigt. Hier sollen beispielsweise unterschiedliche Farbzusammensetzungen anhand ihrer spektralen Signatur identifiziert werden. Die gemessenen Spektren werden dazu mit bekannten Spektren einer Datenbank verglichen, um eine Identifizierung zu ermöglichen.

Mit diesen detaillierten Informationen soll es danach ermöglicht werden, eine sachgerechte Restaurierung in die Wege zu leiten.



Figur 9: Transmission verschiedener organischer Farbstoffe aus JP 2008-215 914 A

Die charakteristischen Absorptionsspektren, wie in Figur 9 gezeigt, erlauben eine Unterscheidung zwischen anorganischen Pigmenten und organischen Farbstoffen. Da verschiedene Farbstoffe erst seit der Industrialisierung zur Verfügung stehen, ist über die Auswertung der verwendeten Farbstoffe auch ein Rückschluss auf das Alter und etwaige Restaurierungen möglich.

d) Die bereits oben diskutierten Anwendungen der THz Spektroskopie lassen sich auch auf dem Gebiet der Medizintechnik und der Biosensorik anwenden.

So kommen THz Strahlen auch bei der Qualitätskontrolle von Arzneimitteln zum Einsatz (EP 2 042 855 A1). Durch einen Vergleich der gemessenen mit erwarteten Spektren lässt sich feststellen, ob etwa eine heterogene Mischung vorgesehener Wirkstoffe vorliegt, oder ob Fremdstoffe vorliegen, die nicht vorhanden sein sollten. In der Biosensorik wird eine THz Strahlungsquelle verwendet, um biomolekulare Bindungsereignisse festzustellen (DE 11 2005 001 895 T5). Hierbei handelt es sich bevorzugt um Bindungsereignisse in Viren, Bakterien, Proteinen oder Nukleinsäuren, wobei eine Verschiebung der Schwingungsfrequenz der Ausgangsstrahlung oder eine Veränderung des Intensitätsniveaus der Ausgangsstrahlung gegenüber der von einer nicht das Biomolekül aufweisenden Kontrollprobe festgestellten Ausgangsstrahlung das Vorhandensein des Biomoleküls anzeigt.

Schließlich wird auch die seit Anfang der Entwicklung der THz Technologie untersuchte Kommunikationstechnik weiter fortgeführt (DE 10 2008 019 010 A1). Die Anmeldung wird von der Überlegung getragen, dass eine höhere Trägerfrequenz einer Referenzwelle eine größere Übertragungsbandbreite zur Verfügung stellt, was die Übertragungsrate von Daten weiter erhöht. Dies wird hier über eine Differenzfrequenzmischung zweier abstimmbarer DFB Laser ermöglicht, wobei die Signalfrequenz in einer zweiten Differenzfrequenzmischung der Referenzwelle aufmoduliert wird. Dieses Signal wird über einen abstimmbaren THz Filter nachgewiesen, indem eine einzelne Trägerwelle ausgefiltert und einem Detektionsverfahren zugeführt wird.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die THz Technologie kann auf einer Vielzahl von Anwendungsgebieten eingesetzt werden. In vielen Fällen sind allerdings noch Fragen offen, ob sich diese Technologie im realen Umfeld verwirklichen lässt, so dass der Zeitraum bis zu marktreifen Produkten nicht immer angegeben werden kann. Generell gilt die Forderung nach kompakten, leistungsstarken und vor allem preisgünstigen Quellen sowie kompakten und preisgünstigen Detektoren für die THz Strahlung [4].

Als eine Triebkraft für die Verbreitung der THz Technologie kann die Sicherheitstechnik gelten, da in diesem Bereich ein starkes Interesse und ein entsprechender Bedarf besteht. So wird die technologische Basis in Deutschland und die internationale Wettbewerbsfähigkeit durch verschiedene Maßnahmen unterstützt (etwa EU-Projekt TeraSec „Active Terahertz Imaging for Security“). In anderen Ländern gibt es aus politischen Gründen zum Teil sehr umfangreiche Fördermittel zur Weiterentwicklung derartiger Technologien (z. B. USA: DARPA, Homeland Security).

Der hohe Anteil von Patentanmeldungen deutscher Firmen und Forschungsinstitute in diesem Bereich spiegelt eine gute deutsche Position in einem Gebiet wieder, in dem weltweit intensiv geforscht wird. Das

volle Potential der verschiedenen THz Anwendungen wird sich erst zeigen, wenn kompakte, preisgünstige und leistungsstarke THz Quellen realisiert sind und genügend Daten zur Verfügung stehen, die die Eignung dieser THz Strahlen für bestimmte Anwendungen bestätigen (z.B. Nachweis von Molekülen über einen „spektroskopischen Fingerabdruck“, Eindeutigkeit des Nachweises von Tumoren, Materialeigenschaften im THz Bereich).

Für einige potenzielle Anwendungen ist jedoch noch nicht klar ersichtlich, ob die THz Technologie so herausragende Merkmale gegenüber anderen Technologien aufweist, dass nur sie allein zur Lösung entsprechender Probleme in Frage kommt. Dies mag insbesondere für das Gebiet der industriellen Inspektion zutreffen.

Literaturverzeichnis:

- [1] TONOUCHI, Masayoshi: Cutting-edge Terahertz technology. In: nature photonics, Vol. 1, 2007, S. 97-105.
- [2] THEUER, Michael; MOLTER, Daniel; RAHM; Marco; BEIGANG, René: Terahertz-Wellen. Zwischen Mikrowellen und Infrarot. In: Physik in Unserer Zeit; Vol. 40, No. 6, 2009, S. 296-302.
- [3] WIETZKE, S. et al.: Industrial applications of Terahertz systems. In: International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009: Terahertz and High Energy Radiation Detection Technologies and Applications, Proc. of SPIE Vol. 7385, 2009, Paper No. 738506, 13 S.
- [4] HOFFKNECHT, Andreas; HOLTMANNSPÖTTER, Dirk Holtmannspötter; ZWECK, Axel Zweck: Die Terahertz - Technologie und ihre möglichen Anwendungen. Hrsg: Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, 2006, Zukünftige Technologien Nr. 64.
- [5] www.teraview.co.uk, www.picometrix.com, www.aispec.com, [abgerufen am 07. Januar 2010].

Geothermie – die Energie der Zukunft?

Dr. Klaus Wollny, Patentabteilung 1.52

Die Nutzung der Erdwärme rückt vermehrt ins öffentliche Blickfeld. Hauptgründe sind die hohen Energiepreise für fossile Energieträger und der weltweite Klimawandel. Als Folge hiervon werden geothermische Verfahren auch global konkurrenzfähig, selbst wenn die geologische Vorerkundung sowie die Installation, der Betrieb und die Wartung geothermischer Anlagen oft hohe Investitionen erfordern. Dieser Artikel möchte einen Einblick in die Grundlagen der Geothermie und wesentliche technische Entwicklungen auf dem Gebiet der Erdwärmennutzung liefern.

1. Geothermie – was ist das?

Der geophysikalische Fachbegriff „Geothermie“ oder „Erdwärme“ wird in den verschiedensten Zusammenhängen verwendet. Man liest ihn im Kontext mit der Heizung von Einfamilienhäusern, gebraucht diesen als Synonym für eine scheinbar unbegrenzte Ressource bei der Gewinnung von elektrischem Strom oder preist ihn als Allheilmittel für die Abschaffung energieintensiver Klimaanlagen. Was steckt nun wirklich dahinter? Das Wort „Geothermie“ umfasst zum einen die wissenschaftliche Beschreibung und Analyse der thermischen Eigenschaften des geologischen Untergrundes und zum anderen die ingenieurtechnische Nutzung der Erdwärme zur Gewinnung elektrischer Energie, zur Heizung und/oder zur Kühlung. Dies ist ein sehr breites Spektrum, daher kann dieser Artikel nur als Überblick über die Natur der Erdwärme und die technischen Möglichkeiten zur Ausbeutung dieses Energiereservoirs dienen. Die genutzten Technologien bündeln Beiträge aus den verschiedensten Fachgebieten und sind nicht nur im Rahmen der Geothermie anwendbar. Die im Folgenden zitierten Patentedokumente sowie die hier genannte Fachliteratur zeichnen nur die wichtigsten Entwicklungslinien nach und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie bieten jedoch eine Grundlage, sich tiefer in diese technisch vielschichtige Thematik einzuarbeiten.

2. Grundlagen der Geothermie

2.1. Erd-externe und erd-interne Wärmequellen

Es leuchtet ein, dass die von der Mond- und der Sonnenanziehung bewirkten Gezeiten durch das „Durchwalken“ der Erdkruste und die Bewegung riesiger Wassermassen über Reibung Wärme erzeugen. Dass Sonneneinstrahlung das Erdreich aufwärmt, ist ebenfalls nachvollziehbar, auch wenn dies effektiv nur die obersten ein bis zwei Meter des Bodens betrifft. Die von diesen beiden „erd-externen“ Quellen erzeugte Wärme ist jedoch vernachlässigbar klein gegenüber derjenigen, die der Erdkörper aus sich heraus produziert. Als „erd-interne“ Quellen gelten:

- der Zerfall radioaktiver Elemente
- die verbleibende Akkretionswärme, die durch die Zusammenballung von Planetesimalen und kosmischem Staub freigesetzt wurde, als sich der Erdkörper bildete
- die potenzielle Energie, die durch Anreicherung schwererer Elemente zum Erdinneren hin und bei der Bildung neuer Erdkruste frei wird (Kristallisationswärme)
- die Reibungswärme, die bei Erdbeben und durch die Konvektion im Erdmantel auftritt.

2.2. Energetische Größenordnungen

Die Temperatur in der Erdkruste steigt mit zunehmender Tiefe durchschnittlich um 3 Grad Celsius (°C) pro 100 Meter (m) an, wie sich leicht in tiefsöhligen

Stollen nachvollziehen lässt. Die Temperaturzunahme setzt sich auch im Erdmantel und Erdkern fort, jedoch weniger stark, wie die Figur 1 zeigt. Unterschiedliche Modelle prognostizieren im Erdzentrum eine Temperatur von 5000 bis 8000 °C. Dies klingt sehr heiß, lässt jedoch offensichtlich die Existenz einer nach menschlichem Maßstab stabilen Erdkruste zu, auf der wir alle leben.

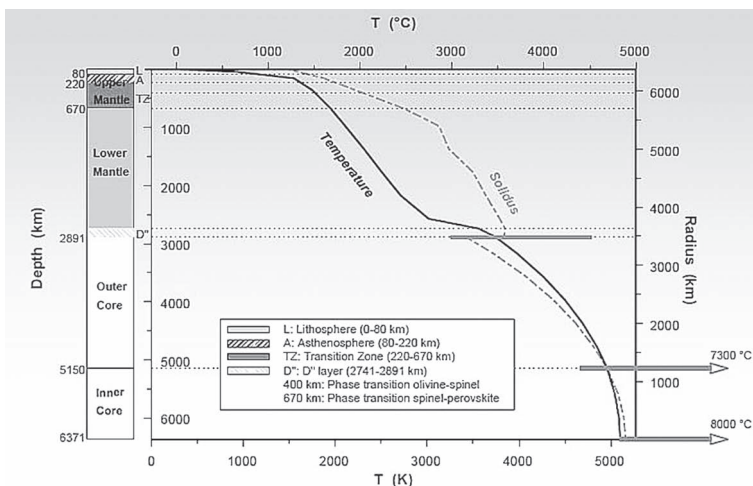
Die im Erdkörper vorhandene thermische Energie wird teilweise nach außen abgestrahlt, so dass sich in geologischen Zeiträumen betrachtet die Erde abkühlt. Quantitativ beträgt der Gesamtenergiefluss der Erde derzeit 44,2 Terawatt (TW), was etwa dem 120-fachen der maximalen Betriebsleistung aller auf der Welt am Netz befindlichen Kernkraftwerke entspricht (Stand 2009, [4]). Zirka 62 % – also 27,5 TW – des Energieflusses sind auf den Zerfall radioaktiver Elemente im Erdkörper zurückzuführen ([2]). Doch trotz dieser gewaltigen Leistungsabgabe ist die durchschnittliche flächenbezogene Wärmestromdichte der Erde eher gering. Sie beträgt auf den geologisch gesehen „dicken“ Krustenabschnitten, den Kontinenten, 0,067 W/m² und für die vergleichsweise „dünnen“ Ozeanböden 0,101 W/m² ([2]). Wie gering dieser Betrag ist wird deutlich, wenn man ihn mit einer gängigen Fußbodenheizung in Beziehung setzt, die je nach Umgebungsbedingungen eine Wärmestromdichte von 10 bis 100 W/m² oder mehr aufweist, was einem Unterschied von mindestens 3 bis 4 Größenordnungen zur natürlichen Wärmestromdichte der Erde entspricht (vergleiche auch DIN 1264-2).

2.3. Geothermische Reservoirre und ihre Nutzung

Aufgrund der unterschiedlichen Stratigrafie und Gesteinszusammensetzung sowie tektonischer Störungen existieren in der Erdkruste Gebiete, deren Wärmeflussdichte höher ist als die oben genannten Durchschnittswerte. Diese geothermischen Anomalien werden zusätzlich oft nach ihrem Wärmeinhalt, auch „Enthalpie“ genannt, unterschieden. Die Quellen für solche Anomalien können tief in der Erdkruste liegen, wie etwa auskühlende Plutone, oder direkt an der Erdoberfläche sichtbar sein, wie Vulkane. Im letzten genannten Fall existieren oft sehr steile Temperaturgradienten, so dass bereits in wenigen Zehner Metern Tiefe weit über 100 °C herrschen können und nur oberflächennahe Maßnahmen ergriffen werden müssen, um die Erdwärme zu nutzen. Reservoirre dieser Art werden meist als Lagerstätten hoher Enthalpie bezeichnet. Im Falle gering ausgeprägter geothermischer Anomalien ist oft von Lagerstätten niedriger Enthalpie die Rede. Dabei ist es zunächst gleichgültig, in welcher Tiefe das potenziell auszubeutende Erdwärmereservoir liegt.

Neben der Enthalpie wird oft auch die mögliche Nutzungsart einer Lagerstätte zu ihrer Klassifikation herangezogen. Man unterscheidet hierbei, ob die Erdwärme direkt zum Heizen eingesetzt wird oder indirekt zur Produktion elektrischer Energie. Niedrigenthalpie-Lagerstätten sind wie Hochenthalpie-Lagerstätten für die Stromgewinnung geeignet. Allerdings muss für erstere oft mehrere tausend Meter tief gebohrt werden, um im geologischen

Untergrund auf Temperaturen zu stoßen, die natürlich vorhandene oder künstlich über Bohrungen injizierte Fluide so aufheizen, dass sie mittels einer Dampfturbinenanordnung zur Stromgewinnung genutzt werden können.

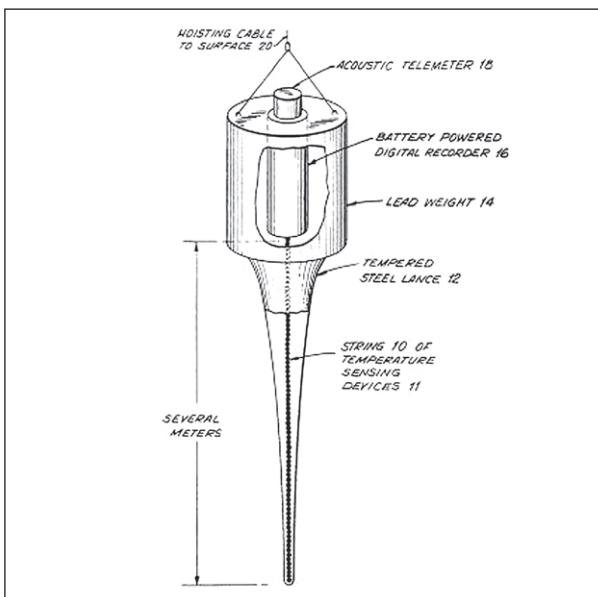


Figur 1: Geothermisches Tiefenprofil der Erde (mit freundlicher Genehmigung von Prof. C. Clauser/RWTH Aachen, [2])

Geothermische Anomalien lassen zuweilen auch auf Kohlenwasserstofflagerstätten im Untergrund schließen. Beispiele für entsprechende Prospektionsansätze sind WO 85/000 635 A1 und US 5 321 612 A zu entnehmen.

2.4. Messgeräte für thermische Größen

Die Quantifizierung von Wärmestromdichten, aber auch die direkte Bestimmung von Bodentemperaturen oder Wärmeleitfähigkeiten setzt die Existenz ausgeklügelter Messvorrichtungen voraus. Bodentemperaturbestimmungen werden im Gelände mit Widerstandsthermometern (Thermistoren), über Messungen der Strahlungstemperatur des Bodens, faseroptische Verfahren oder mittels Eigenfrequenzbeobachtung von Schwingquarzen vorgenommen, Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten im Labor an Einzelproben oder im Bohrloch mit Sonden ermittelt, wie sie etwa DE 10 2009 011 600 A1 zeigt.



Figur 2: Thermistorbombe (aus US 4 676 664 A)

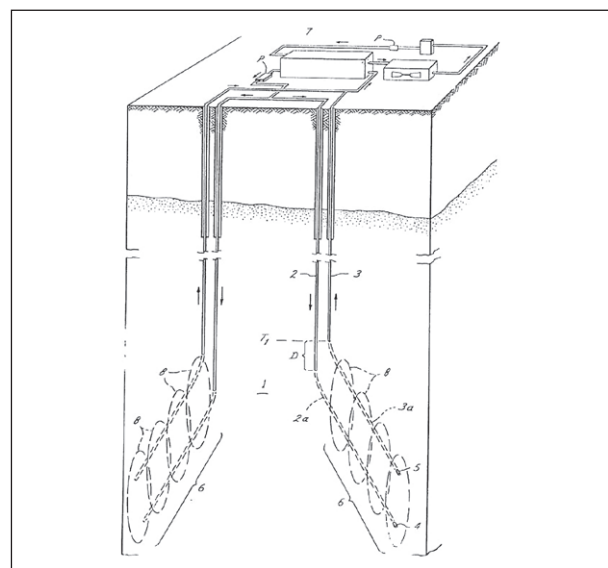
In diesem Zusammenhang wird auch auf die Thermistorbombe in Figur 2 (aus US 4 676 664 A) verwiesen, die von einem Schiff abgeworfen werden kann und sich mit dem Stachel 12 in den Meeresschlick bohrt, um dort mit einer Thermistorkette 10, 11 ein Temperaturprofil der obersten Meter des weichen Sedimentes aufzunehmen und über Kabel 20 ans Mutterschiff zu melden. Hieraus und aus [6] wird

deutlich, dass Geothermie nicht auf das Festland beschränkt ist.

Für weitergehende Informationen zur Theorie der Geothermie und zu ihren technischen Möglichkeiten wird auf die Fachliteratur verwiesen. Einen kompakten und gleichzeitig detailreichen Überblick liefert [2].

3. Erschließung der Lagerstätten

Um geothermische Reservoirs aufzufinden und zu bewerten, werden seit langem Methoden genutzt, die auch bei der Suche nach Erdöl-Lagerstätten angewandt werden ([1],[3]), wie etwa die 3D-Seismik. Sie ist besonders geeignet, Informationen über die Untergrundstruktur zu ermitteln und im Verbund mit weiteren geophysikalischen Methoden und Bohrergebnissen im Idealfall ein 3D-Bild der geologischen Verhältnisse zu gewinnen. Insbesondere können auf dieser Basis die erfolgversprechendsten Bohrlokationen in einem potenziellen Geothermieprojektareal festgelegt werden (siehe [12]). Es kann auch teilweise bestimmt werden, ob die Erdwärme mittels im Untergrund vorhandener hydrothermalen Wässer oder rein petrothermal ausgebeutet werden kann, das heißt über die im weitgehend trockenen Gestein innewohnende Wärmeenergie.



Figur 3: Injektions- und Förderbohrungen eines Geothermiekraftwerkes (aus DE 30 00 836 A1)

Sollen keine flachgründigen – das heißt bis 150 m unter der Erdoberfläche – geothermischen Ressourcen angezapft werden, wie dies in Abschnitt 4.2. näher erläutert wird, ist eine Erschließung vergleichsweise aufwendig und Bohrungen oft bis in mehrere Tausend Meter Tiefe nötig. Dafür sind die Bohrlokationen festzulegen und die bergrechtlichen Genehmigungen einzuholen. Für die Bohrungen wird Ausrüstung genutzt, wie sie für die Gewinnung von Kohlenwasserstoffen entwickelt wurde, so dass sich hier eine gesonderte Betrachtung der Bohrtechnologie erübrigt. Ebenso wie bei der Förderung von Kohlenwasserstoffen aus kerogenhaltigen Gesteinen (Einheiten, die überwiegend schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe enthalten), muss für eine effektive Erdwärmennutzung eine ausreichende Fluid-Wegsamkeit des Untergrundes vorhanden sein. Ist dies nicht der Fall, muss diese künstlich an dafür im Bohrloch vorgesehenen Orten durch unterirdische Sprengungen, ätzende Flüssigkeiten oder durch die Verpressung von Fluiden mit einem Druck geschaffen werden, der über der minimalen Hauptspannung des Gesteines in der aufzubrechenden Tiefenlage liegt. Durch eine Verpressung wird zwischen einer sogenannten Injektionsbohrung und mindestens einer weiteren Bohrung – oft Förderbohrung genannt – ein unterirdisches Kluftsystem aufgebrochen, in dem ein Betriebsmittel (meist Wasser mit Additiven) Erdwärme aufnehmen kann, bevor es über die Förderbohrung zur weiteren Nutzung an die Erdoberfläche verbracht und nach Abgabe des nutzbaren Teils der aufgenommenen Wärme wieder verpresst wird (siehe Figur 3 aus DE 30 00 836 A1). Da in den großen Tiefen, in denen dieses Verfahren zum Einsatz kommt, oftmals kein „trockenes Gestein“ vorherrscht, ist die gängige Bezeichnung „hot dry rock (HDR)“-Verfahren irreführend und wird heute häufig im Fachjargon durch „enhanced geothermal system (EGS)“ ersetzt.

4. Technische Nutzung geothermischer Quellen

Geothermische Energie kann direkt zum Heizen oder Kühlen oder indirekt zur Stromgewinnung genutzt werden. Alle geothermischen Reservoirs sind

für die direkte Nutzung geeignet, aber nur einige für die indirekte Nutzung. Über den Wirkungsgrad oder die Investitionskosten der Nutzung von Erdwärme kann keine allgemeingültige Aussage getroffen werden, da eine Fülle von Faktoren in diese Zahlen mit einfließen, die individuell von der Geologie, der Art der Lagerstätte und der Art der Nutzung abhängen.

4.1. Indirekte Nutzung

Zur Stromgewinnung aus einer geothermischen Quelle wird heißer Fluid Dampf benötigt, der beim Durchströmen einer Turbine diese in Bewegung setzt und einen mit ihr gekoppelten Generator antreibt. Eine sehr aufwendige Umsetzung einer derartigen Stromerzeugung beschreibt DE 24 34 928 A1. Natürliche Dampfquellen sind jedoch selten, weil spezielle geologische Voraussetzungen erfüllt sein müssen, und Wasser einen hohen Siedepunkt besitzt. In geothermischen Reservoirs, die eine Temperatur unterhalb der Verdampfungstemperatur von Wasser aufweisen, wird mit der Wärmequelle daher ein Betriebsmittel mit einem niedrigeren Siedepunkt als Wasser in Kontakt gebracht. Dieses durchläuft einen thermodynamischen Kreisprozess in einem geschlossenen Leitungssystem und treibt in seiner Gasphase anstelle des Wasserdampfes eine Turbine an.

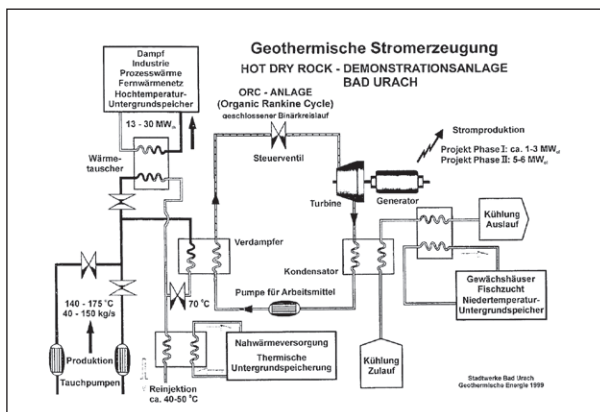
Betriebsmittel und Kreisprozesse wurden jedoch nicht speziell für die geothermische Stromgewinnung entwickelt, sondern sind auch bei der Abwärmennutzung von Abgasen oder bei industriellen Fertigungsprozessen im Einsatz.

Oft finden organische Lösungsmittel wie Toluol, Pentan oder Propan als Betriebsmittel Verwendung. Der mit ihnen betriebene Kreisprozess wird entsprechend „Organic Rankine Cycle (ORC)“ genannt (William Rankine (1820-1872); schottischer Thermodynamiker; vergleiche auch GB 1853-1416 A).

In neuerer Zeit wird auch ein von dem russischen Ingenieur Alexander Kalina entwickeltes Gemisch aus Ammoniak und Wasser eingesetzt, (sogenannter

„Kalina-Kreisprozess“, US 4 346 561 A, [7]) und in einem eng begrenzten Temperaturintervall betrieben.

Umsetzungen für beide Kreisprozesse sind etwa DE 10 2007 057 245 A1 und DE 10 2009 014 036 A1 zu entnehmen. DE 10 2004 028 601 A1 (Figur 4) zeigt neben der Einbindung des ORC-Verfahrens für die Stromproduktion auch die direkte Nutzung der geothermischen Quelle zur Heizung, wie sie im folgenden Abschnitt 4.2. beschrieben wird.



Figur 4: Stromgewinnung und Heizung mittels Erdwärme (aus DE 10 2004 028 601 A1)

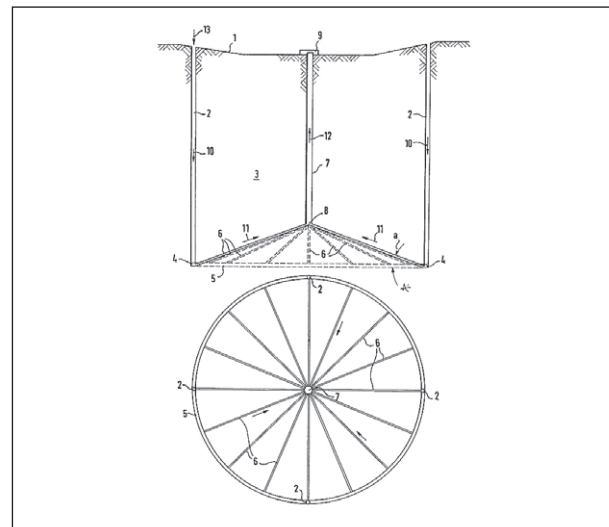
Abschließend sei erwähnt, dass inzwischen auch Turbinen, die über ein weites Spektrum von Flüssigkeit-Gas-Gemischen betriebsbereit sind (sogenannte „variable phase turbines (VPT)“ und daraus abgeleitete „variable phase cycles (VPC)“ als zugeordnete thermodynamische Kreisprozesse, US 7 093 503 B1), technisch ausgereift sind. Dadurch werden künftig auch energetisch als niedrig enthalpisch einzustufende Geothermiereservoirs häufiger zur Stromerzeugung herangezogen werden können ([5]).

Der Bau und Betrieb von Erdwärmekraftwerken erfolgt wie erwähnt unter Nutzung bewährter Verfahren und Techniken, stimuliert aber auch vollkommen neue Ideen.

Als Beispiel sei DE 10 2005 036 472 B3 genannt, die das gerichtete Bohren, wie es seit der letztjährigen Katastrophe auf der Erdölförderplattform „Deep Water Horizon“ im Golf von Mexiko der Öffentlichkeit bekannt ist, soweit treibt, dass ein komplett in sich geschlossenes Fluidkreislaufsystem geschaffen wird.

Hierzu werden zwei Bohrungen über intelligente Steuerungssysteme soweit horizontal abgelenkt, dass sie sich im Untergrund treffen und über weitere bauliche Maßnahmen ein dichter Ringschluss erzielt wird.

Ferner wird auf die Idee aus DE 42 29 185 A1 (Figur 5) verwiesen, das Prinzip eines Aufwindkraftwerks komplett in den Untergrund zu verlegen. Als Betriebsmittel wird Luft verwendet, die über Zuströmkanäle 2 und einen ringförmigen Verteilerkanal 5 von der Erdoberfläche kommend in ein unterirdisches schirmartig aufgebautes System aus Aufheizkanälen 6 gespeist wird. Im Schirmzentrum strömt die geothermisch erwärmte Luft in einem Aufwindkanal 7 über einen Rotor, der einen Generator antreibt, zur Erdoberfläche. Die bergtechnische Verwirklichung dieser Idee ist allerdings als sehr ambitioniert anzusehen.



Figur 5: Geothermisches Aufwindkraftwerk (aus DE 42 29 185 A1).

4.2. Direkte Nutzung

Eine geologische Wärmequelle auch direkt zum Heizen einzusetzen, ist die naheliegendste Nutzung der Geothermie. Diese kann über Wärmetauscher erfolgen, die ähnlich wie bei der Stromgewinnung nach Wärmeleitungskontakt geeignete Betriebsmittel in abgeschlossenen Heizsystemen zirkulieren lassen, oder indem man heißes Fluid direkt aus der geothermischen Quelle in eine Heizungsanordnung

einspeist. Letzteres ist aufgrund der chemischen Aggressivität natürlicher Fluide nur in Ausnahmefällen realisiert (siehe Abschnitt 5.).

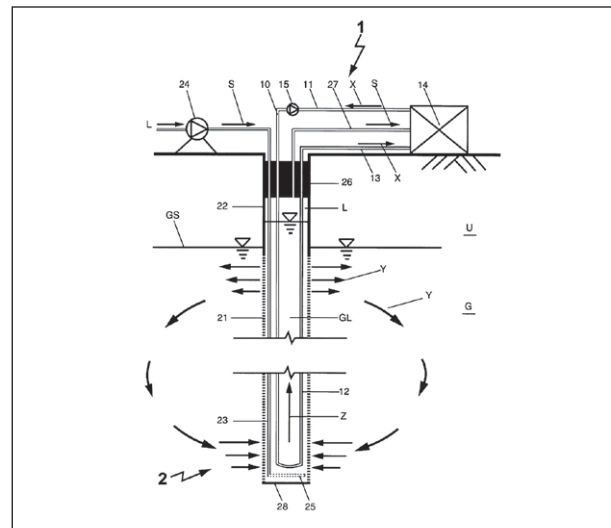
Wie eingangs erwähnt, umfasst die ingenieurtechnische Nutzung der geothermischen Eigenschaften des geologischen Untergrundes neben dem Heizen auch das Kühlen. Hierzu wird im jeweiligen thermodynamischen Kreisprozess die für einen Heizvorgang typische Zuordnung von Temperaturquelle und Temperatursenke vertauscht, das heißt der Untergrund stellt nun die Temperatursenke dar und das zu kühlende Objekt ist die Temperaturquelle.

Für die Heizung und/oder Kühlung kann zwischen der Erdwärmequelle und dem zu heizenden/kühlenden Objekt ein wesentlich geringerer Temperaturunterschied herrschen, um sinnvoll genutzt zu werden, als dies bei der Stromerzeugung der Fall ist. Allerdings gilt: Je geringer die Temperaturdifferenz, desto ineffektiver ist der Heiz- oder Kühlprozess.

Wärmetauscher werden in den verschiedensten Formen und Verlegetechniken meist in den oberflächennahen Untergrund eingebracht (DE 10 2007 045 979 A1; US 2010/0 154 216 A1) und nutzen einen geschlossenen Fluidkreislauf zur Temperaturregulierung. Das Betriebsmittel kann aufgrund des geschlossenen Systems den Untergrund chemisch nicht kontaminieren.

Zum Heizen ist es unerheblich, ob die Wärme mittels einer sogenannten „Erdwärmesonde“ dem Grundwasser über ein Brunnenrohr entzogen wird oder aus dem eher trockenen geologischen Untergrund stammt. Es besteht lediglich die Bedingung, dass der Untergrund gegenüber dem zu beheizenden Raum eine höhere Temperatur aufweist. Im Heizbetrieb werden in vertikalen Wärmetauschersystemen – deren Bohrungen oft bis 150 m tief in den Untergrund reichen ([8]) – meist ein oder mehrere U-förmige Rohre eingesetzt, die ein Betriebsmittel enthalten, das mit dem Erdwärmereservoir in Kontakt steht. Die über Wärmeleitung aufgenommene Wärme wird anschließend per Pumpe zum „Heizort“ transportiert, dort abgegeben und das Betriebs-

mittel wieder zurück in den Untergrund geleitet, wo dieses erneut erwärmt wird (siehe Figur 6 aus DE 10 2008 007 627 B3). Beim Kühlen wird – wie oben bereits ausgeführt – der Kreisprozess umgekehrt: Ein beispielsweise im Sommer als zu warm empfundener Raum stellt dann die Wärmequelle dar, der Untergrund ist die Erdwärmesenke, das heißt das Betriebsmittel wird im Raum erwärmt, in den Untergrund geleitet, dort abgekühlt und von dort wieder zum Raum zurückgeführt. Die Pumpe muss in beiden Fällen mit einer externen Energiequelle betrieben werden.



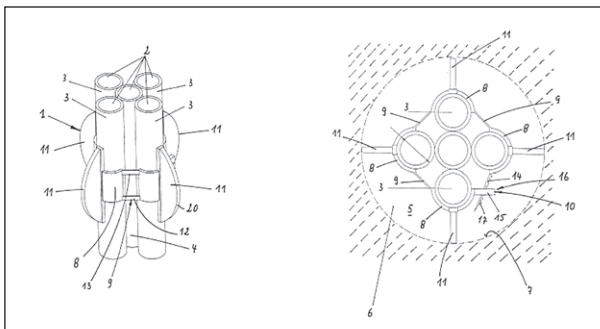
Figur 6: Geothermisch genutzter Brunnenschacht (aus DE 10 2008 007 627 B3).

Die Verrohrung von Erdwärmesonden muss zum einen eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen und zum anderen eine Außengeometrie mit einer möglichst großen effektiven Oberfläche mit dem Wärme-/Kältereservoir in Kontakt bringen. Dies stellt dasselbe Prinzip dar, wie es etwa beim Kühlerdesign von Krad-Motoren zum Einsatz kommt. Als ein Beispiel sei hier DE 10 2008 029 400 A1 genannt.

Erdwärmesonden müssen zudem robust ausgeführt sein, damit sie möglichst lange und effektiv ihre Aufgabe erfüllen können. Daher wird darauf geachtet, dass das in der Erdwärmesonde untergebrachte Leitungssystem optimal gegen mechanischen Stress geschützt wird, wie er bereits durch das Einbringen in ein existierendes Bohrloch auftreten kann. Dies kann zum Beispiel durch einen kegelförmigen Son-

denaufsatz mit Einstecköffnungen für die Rohrkreislaufsysteme erfolgen, wie er in DE 20 2007 000 763 U1 beschrieben wird. Weitere Beispiele für Sondenfüße sind etwa WO 2009-129 778 A2 und DE 20 2008 002 687 U1, für Rohrsysteme DE 29 35 832 A1 und DE 24 58 457 A1 zu entnehmen.

Damit ein Wärmetauscherrohrsystem in einem Bohrloch in Position verbleibt, werden Abstandshalter als Stabilisatoren verwendet, die in regelmäßigen Abständen das Durchbiegen der Leitungen verhindern und diese möglichst zentral im Bohrloch fixieren (DE 10 2007 018 979 B3, Figur 7).



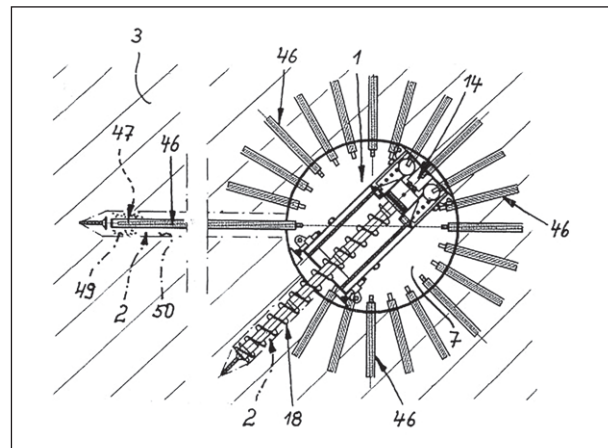
Figur 7: Mehrröhriges Leitungssystem für Geothermiesonden mit Stabilisierungselementen (aus DE 10 2007 018 979 B3)

Eine eigens auf Erdwärmesonden aufgezugene Einführhilfe wird in EP 2 123 995 A1 vorgestellt, ein Abdichten eines Erdwärmebohrlochs gegen eindringendes unerwünschtes Grundwasser durch eine sogenannte Packer-Einrichtung am Sondenkörper in EP 1 865 146 A1.

Eine sehr elegante Methode, einen Schacht für eine Vielzahl von Erdwärmesonden zu nutzen und somit den Ausbeutungsbereich zu erweitern, zeigt DE 103 17 664 B3 (Figur 8). Hier werden mittels einer Horizontalbohranlage in sternförmiger Weise Hohlräume im Untergrund vorbereitet, in den die Einzelsonden mittels einer weiteren Anlage eingeführt und verankert werden können.

4.3. Erdwärmennutzung an ungewöhnlichen Orten

Die Gewinnung von Wärmeenergie ist wirtschaftlich auch interessant, wenn sie bereits vorhandene Bauwerke nutzt, die in die Erde eindringen, wie etwa Straßentunnel oder Bergwerksstollen.



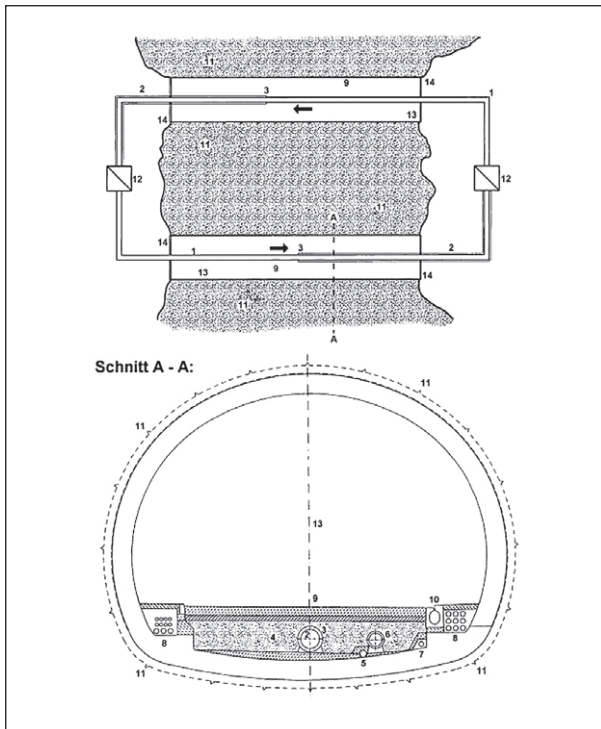
Figur 8: Sondenstern für Erdwärmesonden (aus DE 103 17 664 B3)

Hier vorgestellte Techniken werden auch für die Ausbeutung von Abwärme verwendet, wie sie beispielsweise bei der Produktion von Industriegütern, etwa in Gießereien, der Müllverbrennung oder bei der Veredelung von Rohstoffen, wie sie Verhüttungsprozesse darstellen, entsteht.

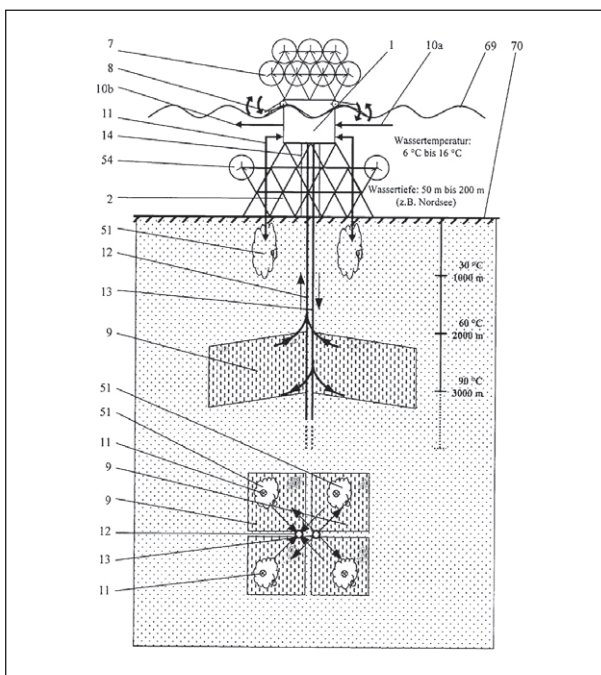
Die Verwendung der Infrastruktur von aufgelassenen oder noch in Betrieb befindlichen Bergwerken zum Zweck der geothermischen Nutzung wird beispielsweise in DE 42 34 367 A1, DE 41 27 161 A1 oder DE 10 2007 057 245 A1 beschrieben. Wärmeabsorberelemente können auch direkt in die Gründung oder andere Bestandteile von Bauten eingelassen sein und auf diese Weise thermische Energie zur Heizung oder Kühlung des Gebäudes nutzbar machen (DE 44 10 689 A1). Im Falle der in DE 103 37 693 A1 (Figur 9) vorgestellten Anordnung, die in Straßentunneln zur Erdwärmennutzung eingebaut wird, sollen neben geothermischer Energie auch die Reibung im Straßentunnelbett und die Abgasemissionen an der Tunneldecke zusätzliche Wärmequellen bieten, die genutzt werden können.

Die Ausbeutung der Erdwärme vom Meeresboden aus wird in DE 103 43 544 A1 beschrieben (Figur 10). Aber auch das natürlich vorkommende Oberflächenwasser kann einer thermischen Nutzung zugeführt werden, wie etwa AT 10 953 U2 vorschlägt. Die hier „Seewärmesonde“ genannte Apparatur ähnelt äußerlich einem Kasten, der aus vielen hintereinander angeordneten, aus Röhren bestehenden Gittern zu-

sammengesetzt ist. Diese dem Rähmchenbau im Bienenstock ähnliche Konstruktion gewährleistet, dass eine sehr große Oberfläche mit der umströmenden Wärmequelle in Kontakt steht, wenn sie von einer schwimmenden Plattform oder einem Schiff in das See- oder Meerwasser abgelassen wird.



Figur 9: Verlegeorte für geothermisch genutzte Rohrleitungen in einem Tunnel (aus DE 103 37 693 A1)



Figur 10: Offshore-Geothermieanlage (aus DE 103 43 544 A1)

5. Ökologischer Fußabdruck

5.1. Gefahrenabschätzung

Zwar gilt die Geothermie oft als unproblematische und „saubere“ Energie, pauschal trifft dieses Urteil aber nicht zu. Sowohl bei der Prospektion als auch bei der Erschließung und im Betrieb kann es zu nicht zu vernachlässigenden Umweltbelastungen kommen, sei es durch die Verschmutzung von Wasser, Luft und Boden oder durch Geräuschemissionen. Die Qualität der Luft, des Wassers und des Bodens wird durch die in den natürlich vorkommenden Fluiden des Untergrundes gespeicherten und als Folge der Bohrungen freigesetzten Gase, wie Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Ammoniak, Stickstoff, Wasserstoff und Radon sowie der gelösten Salze von Arsen, Quecksilber, Zink, Bor und Schwefel gefährdet ([2], [13]).

Zudem kann es durch den menschlichen Eingriff in das sonst weitgehend als abgeschlossen anzusehende geologische System in vorbelasteten Gebieten zur Triggerung von seismischen Ereignissen oder zu Bodensenkungen kommen, wenn extrahierte Fluidmengen im Kreisschluss nicht mehr adäquat ersetzt werden. Sowohl Initialinjektionen als auch die Rückführung von Fluiden in den Untergrund können zur Steigerung des Porendruckes und/oder zur Herabsetzung der Scherfestigkeit im Gestein führen und somit zum Abbau tektonischer Spannungen in Form von Mikrobeben. Diese verursachen zuweilen auch Gebäudeschäden, die die Akzeptanz der Geothermie in Fördergebieten auf die Probe stellen ([2],[9],[11]). Daher wird versucht, durch zumindest an der Erdoberfläche kontrollierbar geschlossene Regelkreise, regelmäßige Laboruntersuchungen der Betriebsmittel und durch eine detaillierte Vorauserkundung die Risiken bei der Erschließung und in der Produktivphase zu minimieren.

5.2. Probleme aus der Praxis

Wie etwa in [8] beschrieben, kann es in vertikalen Wärmetauschersystemen (siehe Abschnitt 4.2.) zu Leckagen in Rohrleitungen kommen, die zu einer Kontaminierung des Untergrundes und des Grund-

wassers mit Betriebsmittel führen. Betriebsmittel enthalten zur Gewährleistung eines reibungslosen Einsatzes oftmals zusätzlich Frostschutzkomponenten, unterschiedliche Biozide sowie Rostschutzmittel. Zwar sollten diese biologisch abbaubar sein, ohne hierbei giftige Zwischenprodukte zu bilden, die Abbauprozesse hängen jedoch elementar von den physikalischen und chemischen Bedingungen im jeweiligen Untergrund ab. Selbst wenn das Betriebsmittel oder seine Abbauprodukte selbst nicht toxisch wirken, so können sie jedoch auslösender Faktor für die Mobilisierung von Schwermetallen oder von anderen im gelösten Zustand giftig wirkenden Mineralen aus dem geologischen Untergrund sein und somit indirekt ein Gefahrenpotenzial darstellen. Um dieses zu minimieren, müssen daher Betriebsmittel samt Additiven unter den verschiedensten Einsatzbedingungen und unterschiedlichsten Zeitskalen auf ihre Unbedenklichkeit im Havariefall überprüft werden.

Ein praktisches Beispiel für die Umsetzung und die Probleme eines Geothermieprojektes in einer Innenstadtlage beschreibt [14]. Dort wird detailliert die Temperaturregelung in den Berliner Parlamentsbauten thematisiert und welche Rolle die Veralgung und Versinterung der Filteranlagen hierbei spielt.

6. Ausblick

Die Geothermie weist großes Potenzial auf, fossile Energieträger auf lange Sicht im Rahmen der Energiegewinnung sowie beim Heizen und Kühlen zumindest teilweise zu ersetzen. Dies zeigen nicht zuletzt die Patentanmeldungen auf diesem Gebiet, sei es im kleinen Rahmen die private Wärmepumpe im Garten oder auf großen Skalen die „enhanced geothermal systems“. Allerdings gilt dies nur, wenn verantwortungsvoll mit ihr und den die Ressource nutzenden Anlagen umgegangen, sowie die Nachhaltigkeit der Nutzung auf regionalem Maßstab beachtet wird. Realistische Angaben der Betriebsdauer einer Anlage und der Regenerationszeit der Ressource tragen hierzu bei. Für tiefgründige Erdwärmeförderstätten bewegt sich erstere in der

Größenordnung von wenigen Jahrzehnten, letztere von vielen Jahrtausenden. Langzeitstudien zur Nutzung der Geothermie sind heute noch Mangelware. Unbestreitbare Vorteile stellen aber die nahezu überall vorhandene Verfügbarkeit der Erdwärme, ihre Unabhängigkeit von jahreszeitlichen und witterungsbedingten Schwankungen sowie ihre vielseitige Einsetzbarkeit dar. Als Fazit ist festzuhalten, dass durch die Nutzung immer komplexerer Technologien, neuer Materialien und eine Erhöhung des Wirkungsgrades der Erdwärmeanlagen die Geothermie eine große Zukunft haben wird, wenngleich sie nur einen gewissen oft lokal begrenzten Beitrag zu unserem Energiebedarf im Verbund mit anderen sogenannten „alternativen“ Energien liefern wird. Eine möglichst effektive und umweltschonende Nutzung der Geothermie läßt somit auf weitere spannende Erfindungen auf diesem derzeit sehr aktiven Gebiet hoffen.

Literaturverzeichnis

- [1] BERKTOLD, A.: Electromagnetic studies in geothermal regions. In: Geophysical Surveys, 1983, Band 6, S. 173-200.
- [2] CLAUSER, C.: Geothermal Energy. In: HEINLOTH, K. [Hrsg.], Landolt-Börnstein – Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group VIII: Advanced Materials and Technologies, Vol. 3: Energy Technologies, Subvol. C: Renewable Energies, 2006, Heidelberg : Springer, S 493-604. - ISBN-10: 354042962X.
- [3] ECONOMIDES, M.J. & UNGEMACH, P.O. [Hrsg.]: Applied Geothermics. 1987, Chichester : Wiley. – ISBN 0-471-91179-8.
- [4] GERSTNER, E.: Nuclear Energy: The Hybrid returns. In: Nature, 2009, Band 460, S.25-28. – doi:10.1038/460025a.
- [5] HAYS, L.: Demonstration of a variable phase turbine power system for low temperature geothermal resources. In: Geothermal Techn. Program 2010 Peer Rev. / US Dept. of Energy, 2010, 18 S.
- [6] JONES, E.J.W.: Marine Geophysics; 1999, Chichester : Wiley, S.198-216. - ISBN 0-471-98694-1.

- [7] KALINA, A.L.: Combined-cycle system with novel bottoming cycle. In: ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 1984, Band 106 (4), S.737-742.
- [8] KLOTZBÜCHER, T. et al.: Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. In: Geothermics, 2007, Band 36, S.348-361.
- [9] KRAFT, T. et al.: Enhanced Geothermal Systems: Mitigating Risk in Urban Areas. In: EOS, 2009, Band 90, Nr. 32, S.273-274.
- [10] LOOSE, Peter: Erdwärmenutzung, Versorgungstechnische Planung und Berechnung. 2007, 2. überarb. und ergänzte Auflage, Heidelberg : C.F. Müller Verlag. – ISBN 978-3-7880-7811-9.
- [11] MAJER, E.L. et al.: Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. In: Geothermics, 2007, Band 36, S.185-222.
- [12] MISIEK, R.; BISSMANN, S.: Mit Seismik den optimalen Standort finden – Strukturerkundung geothermischer Lagerstätten. In: bbr, 2010, Heft 10, S.46-51.
- [13] MROCZEK, E.K.: Contributions of arsenic and chloride from the Kawerau geothermal field to the Tarawera River, New Zealand. In: HUNT, T. [Hrsg]: Environmental aspects of geothermal energy, 2005, Band 34(2), S.218-233.
- [14] WOLFGRAMM, M; RAUPPACH, K.; PURONPÄÄ-SCHÄFER, P.: Berliner Parlamentsbauten – Betrieb, Monitoring und Regenerierungen N2-beaufschlagter Kältespeicherbrunnen. In: bbr, 2010, Heft 10, S.36-44.



Impressum

Herausgeber:

Deutsches Patent- und Markenamt
Zweibrückenstraße 12
80331 München

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

Stand

November 2011