(Arbeitsvorlage)

GEGENLÄUFIGES DOPPELSCHWUNGRAD (GDSR) IN DER TURBOANWENDUNG

Von

Dr. Gabriel Foco

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	
Zusammenfassung	3
Vorbemerkung	
1. GDSR	
1.1 Koppelung	18
1.2 Absorption	28
1.3 Rotationssymmetrie	32
2. Magn fetlager	41
2.1 Linearmotor	44
2.2 Rotationsmotor	48
3. Thermostrom	56
4. Aluminium	58
5. Turbomembranpumpe	59
5.1 Das Wirbelrohr	77
5.2 Die Zonenplatte	84
5. 3 Ausblick	
LITERATURVERZEICHNIS:	
Graphiken	118

Zusammenfassung

Die nachstehend besprochene Turboanwendung¹ des gegenläufigen Doppelschwungrades² (GDSR) mit parallel – oder axial – fixierter bzw. gekoppelter Rotationsachse (PR) als Energiespeicher³, erfordert – wegen den Extrembedingungen im Dauerbetrieb⁴ – die gesonderte Auseinandersetzung mit der Lagerung und Antrieb als Vorfragen, weil diese die Grenzen und Bedeutung der Machbarkeit perspektivisch aufzeigt⁵. Dabei wird die Forschung und Entwicklung gefordert bzw. soll diese angeregt werden⁶. Die hierbei bevorzugten Punkte mit Anspruch auf Originalität sind:

 Bedeutung des GDSR mit PR als Absorber von störender äußeren Wirkungen und Resonanzen⁷ und Garant eines theoretisch störungsfreien Laufs auch im Turbobetrieb

¹ Vgl Schweitzer/Traxler/Bleuler 17 f, 107, 138 ff; Rueegg, in: < http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html >; Fremerey 233; Calotti 12: "Der Entwurf von schnelllaufenden Antrieben mit ihrer besonderen Problematik ist in den Standardliteraturwerken noch nicht zu finden. Hier muss man sich den spezifischen Publikationen zuwenden."

² Vgl Magnus 434 f.

³ Menz 1 ff; Calotti 3: "Kinetische Energiespeicher mit elektromagnetischem Energiewandler sind in der letzten Zeit in all ihren Komponenten deutlich weiter entwickelt worden. Sie erreichen Systemdaten, mit denen sie für verschiedene Anwendungen interessant geworden sind. Ihre Vorteile sind die im Prinzip unbeschränkte Zahl von Lade/Entlade-Zyklen, die große Leistungsdichte und die gute Resistenz gegen Überlastung."

4 Kall 82 ff. Amia 1 ff. 12 ff. 5 ff. 125 ff.

⁴ Kolk 82 ff; Aenis 1 f, 13 f, 55, 135 ff.

⁵ Schweitzer/Traxler/Bleuler 15, 17 f, 107; Calotti 15: "Aufgrund der Anforderungen an den Antrieb werden Kriterien für die Wahl des Maschinenkonzepts formuliert. Die verschiedenen Maschinentypen werden klassifiziert und einzeln vorgestellt. Es zeigt sich, dass kein Maschinentyp für alle Anwendungen die beste Wahl darstellt. Jedes Projekt hat seine besonderen Anforderungen, die auch zu unterschiedlichen Maschinen führen können." Vgl AaO 131 f: "Die Berechnung der Verluste auf dem Rotor im Last- und im Leerlauffall ist nötig, um zu einer zuverlässigen Aussage über die Eignung der Maschine für den Vakuumbetrieb zu kommen. Es wurde dazu ein Modell erarbeitet und mit numerischen Methoden verifiziert. Die Nuten des Stators und asynchrone Strombelagsoberwellen führen zu pulsierenden Magnetfeldern im Rotor. Durch den Einsatz von gesinterten Selen-Erden-Magneten erreicht man die höchste Ausnutzungen der Maschine. Diese Materialien haben aber den Nachteil, das sie elektrisch leitfähig sind und sich somit Wirbelströme ausbilden können. [...] Es wird gezeigt, dass die Pulsationen des Magnetfeldes durch die Statornuten zu massiven Verlusten führen können. [...] Eisenlose Wicklungen werden oft als Schrägwicklungen gefertigt. Die schlechte Ausnutzung des Magnetfeldes wird durch das Wegfallen des Wickelkopfes der Schrägwicklung kompensiert. [...] Der Betrieb eines Schwungrades erfordert eine Leistungsregelung. Es wurde in dieser Arbeit eine Regelung in Kombination mit einem minimierten Positionssensor entwickelt. [...] Eine stärkere Maschine belastet die Bandagierung und reduziert somit die Drehzahl. Auf der andren Seite ergibt die Reduktion der nichttragenden Masse auf dem Rotor eine Verkleinerung des Drehschubes. [...] Bei kinetischen Energiespeichern sind höchste Drehzahlen gefordert, um große Energiedichten zu erreichen. Die eisenlose Maschine ermöglicht hohe Drehzahlen ohne massive Verschlechterung des Wirkungsgrades. Sie ist daher die ideale Maschine für einen Schwungradspeicher mit

⁶ Schweitzer/Traxler/Bleuler 10 ff, 17 f, 122 f, 132 ff, 157 f, 185, 197 ff; Aenis 1 f, 13 f, 55, 135 ff; vgl Calotti 4: "Ein wesentlicher Punkt in der Nachrechnung der Maschine ist die Abschätzung der Verluste. Die Rotorverluste sind kritisch für den Betrieb, da eine Kühlung nur sehr umständlich ausgeführt werden kann und daher vermieden werden sollte. In elektrisch leitfähigen Magneten entstehen Wirbelstromverluste durch die Nutungspulsation des Magnetfeldes und durch Strombelagsoberwellen, die asynchron umlaufen."

⁷ Magnus 434 f; vgl Schweitzer/Traxler/Bleuler 17 f, 107, 115 ff, 118 ff, 151, 157 f, 165 ff; Kolk 82 ff; Bergmann/Schäfer I (1975) 117, 202 ff.

- im Hinblick auf Außenreize⁸ (am Beispiel des Energiespeichers); ohne der bisher im Turbobetrieb unentbehrlichen elektronischen Steuerung⁹.
- 2. Erneuerung des rotierenden Magnetlagers durch Rückübersetzung des linearen Magnetlagers¹⁰ (Kurzstator) in die Kreisbahn als virtuelle Rotation, um so den Turbobetrieb elektrodynamisch statt elektromagnetisch durch Tangentialkraft statt (axialer) Normalkraft zu ermöglichen¹¹. Der Einsatz des Magnetlagers empfehlt sich aus messtechnischen Gründen für den Testlauf¹² auch dann, wenn danach allenfalls eine andere Lagerung bevorzugt werde¹³. Im Idealfall würde GDSR+PR als gekoppelter Absorber die bisher unentbehrliche elektronische Steuerung des Antriebs¹⁴ überflüssig machen, bzw. mechanisch durch Selbstregulierung gleichsam "automatisieren".
- 3. Thermostrom¹⁵ (Thompson-Effekt) als Kühlung der wärmeanfälligen Spulen des Magnetlagers im Vakuum¹⁶. Analog kann die Hitzeentwicklung als Abwärme für die Rückgewinnung der so verlorenen Elektrizität genutzt werden¹⁷.
- 4. Einsatz von Aluminium beim Magnetlager¹⁸, ev. als Schiene, um so die Limits von herkömmlichen Elektromotoren zu überschreiten¹⁹: die Frage des Einsatzes von Aluminium war bisher eine Frage der schweren Kontrollierbarkeit, die nun entweder durch die elektronische Steuerung oder aber mit dem GDSR+PR lösbar scheint.
- 5. Die hochfrequenten Membrane²⁰ (Ultraschallsender) als Motor (Pumpe) zum hydraulischen²¹ (oder später pneumatischen) Antrieb²², falls der elektrische Antrieb

⁸ Aenic 80 ff

⁹ Schweitzer/Traxler/Bleuler 2 ff, 115 ff, 122 ff, 131 ff, 138 ff, 151 f; Rathausky 5.

¹⁰ Rathausky 12 ff, vgl Calotti 4: Die jüngeren Versuche zeigen, dass bei herkömmlichen Lösungen die Verluste zu hoch liegen und nur gewisse Kunstgriffe wie eine eisenlose Elektromaschine und Halbach-Magnetring, also doch grundsätzliche Neuerungen, der gesuchten Lösung näher bringen.

¹¹ Schweitzer/Traxler/Bleuler 10 f.

¹² Traupel 295: "Die genauere Berechnung der gekoppelten Schwingungen bei einem komplizierten Schwingungsgebilde, wie eine Schaufel oder ein Schaufelracket darstellt, ist im allgemeinen mit einem nicht vertretbaren Rechenaufwand verbunden. In der Praxis wird man sich in solchen Fällen stets durch das Experiment helfen."

¹³ Schweitzer/Traxler/Bleuler 2 ff; Aenis 1 f, 13 f, 55, 135 ff.

¹⁴ Schweitzer/Traxler/Bleuler 2 ff, 115 ff, 122 ff, 131 ff, 138 ff, 151 f; Rathausky 5.

¹⁵ Bergmann/Schäfer II (1971) 163 f..

¹⁶ Menz 6 ff; Strößenreuther; in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-grundlg.htm >.

¹⁷ Bergmann/Schäfer II (1971) 163 f..

¹⁸ Bergmann/Schäfer II (1971) 295 f; Kolk 31 ff; Rathausky 13 ff, 16 ff. Unter der Voraussetzung, dass der klassische rotierende Elektromotor (S. 13) im Turbobetrieb an ihre Grenzen stößt, ja schließlich durch das Magnetlager und linearen Elektromotor ersetzt werden muss (S. 14), empfehlt es sich für kurze Strecken ein asynchrone Kurzstator als einfachste und preisgünstigste Form eines Linearmotors (S. 16 f). Dabei kann Kupfer oder Aluminium als Schiene eingesetzt werden (S. 16). Weil im Systementscheid von 1977 in Deutschland dazu beitrug, dass das Kurzstatorprinzip als Linearmotor nicht mehr verfolgt werde, kann Aluminium als Neuerung angesehen werden. Vgl Kolk 132: Es gibt zwar auch eine Aluminiumnabe bei Magnetlagerung des Schwungrades für den Rotationsmotor, doch geht es hier um einen gleichsam im Kreis fahrenden Linearmotor.

¹⁹ Rathausky 13 ff; Vezzini 4.

²⁰ Bergmann/Schäfer I (1975) 540 ff, 546, 552 ff.

²¹ Ruder, Supraflüssiges Helium als hochempfindliches Gyroskop zum Nachweis der Erdrotationsschwankungen, in: http://www.uni-tuebingen.de/uni/qvf/py/py5/text/py5t26.html>.

zum Magnetlager im Turbobetrieb ergänzt oder ersetzt werden sollte (denn der Leerlauf ist beim Magnetlager beim nicht beschleunigten ruhigen Lauf bereits unter Kontrolle. Beim Antrieb bzw. bei Beschleunigung und Bremsung ist elektronische Steuerung²³ erforderlich²⁴, aber auch ohnedies können Turbospitzen derzeit nur mit pneumatischem Antrieb²⁵ problemlos erreicht werden).

- 6. (Abschnitt 5.1) Der pneumatische Antrieb aber auch der geplante Einsatz des Stirlingmotors²⁶ ladet zur Einbindung des sog. Wirbelrohrs (Zyklon²⁷ in Kleinformat) ein, das mit relativ kleinem Aufwand große Temperaturunterschiede (bis zu 150° C an beiden Enden) erzeugen²⁸ und damit beim pneumatischen Antrieb Turboeffekte generieren kann.
- 7. (Abschnitt 5.2) Nach der Entdeckung der Fresnelschen Zonenplatte als Linse für Gase²⁹ bei der Mikroskopie, drängt sich die Frage nach der industriellen Anwendbarkeit dieses Novums bei Gasströmen wie pneumatischem Antrieb auf. Weil davon unabhängig und dazu parallel die gleiche bzw. analoge Zonenplatte bei Ultraschallmembranen ebenfalls mit Erfolg als Linse getestet wurde³⁰, wobei die Zonenplatte als Schall-Linse in der Nähe der Membran am effektivsten wirkte, und man daher gleich die Linse in die Membran einbaute, erhebt sich die Frage, ob und wie weit anhand des beim Ultraschallsender festgestellten Ineins' von Schallfeld und Gasfeld³¹ ermögliche, die als Gaslinse eingesetzte Fresnelsche Zonenplatte zugleich als Ultraschall-Membranpumpe für Gase³² einzusetzen. Die auffälligen Vorteile einer in (Fresnelsche) Zonen aufgeteilten Membranpumpe wären, dass dabei jede Zone einzeln und sogar jeweils partiell zur Schwindungen angeregt werden könnte, was

²² Giles 10 ff, 201 ff, 303 ff; Ziebart 5 ff, Schwab/Krauß 77 ff; Zima 509 f, 511 Bild 11.67: "STELZER stellte Anfang der 1980er-Jahre einen Zweitakt-Motor der Öffentlichkeit vor, bei dem es sich praktisch um Freikolbenmotor handelt, dessen beiden Arbeitskolben sich, durch eine Kolbenstange verbunden, gleichsinnig bewegen. [...] Die Kraftübertragung sollte hydraulisch oder pneumatisch erfolgen."

²⁵ Schmidt E. 365 ff; Schwate 164 ff; Broelmann 46 Abb I.12, 227 f; Rueegg, in: < http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html >.

²³ Schweitzer/Traxler/Bleuler 2 ff, 115 ff, 122 ff, 131 ff, 138 ff, 151 f; Rathausky 5.

²⁴ Fremerey 242 f.

²⁶ Bergmann/Schäfer I (1975) 731 f; Basshuysen/Schäfer.1 ff, 9 ff, 852; Walzer 8 ff; Schleder 23 ff, 37 ff; Werdich/Kübler 6 ff, 18 ff; Schmidt E. 265 ff; Chen, Untersuchungen zur Optimierung eines solaren Niedertemperatur-Stirlingmotors, in:

< http://hsss.slub-dresden.de/pub2/dissertation/2005/maschinenwesen/1111049328086-3547/1111049328086-3547.pdf >, S. 5, f, 62, 98.

²⁷ Batel 30 ff, Mtalo 3 ff.

²⁸ Siekmann 177 ff; Rohling, in: < http://fluidmotor.com/motor/wirbel2.shtml >; Keller/Göbel/Staudt, in: < http://141.99.140.157/d/ifft3/Forschung/WRGrundlagen111002.pdf >; Keller, in: DPG < http://www.dpg-tagungen.de/archive/2002/ake_3.html >.

²⁹ Koenig, Pressemitteilungen der Ruhr-Uni Bochum vom 8. 11. 1999, in: < http://www.ruhr-uni-bochum.de/pressemitteilungen-1999/msg00320.html >.

³⁰ Römer 1 ff, 11 ff, 33 ff

³¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 530 ff.

³² Bergmann/Schäfer I (1975) 552 ff.

zumindest je einen Fokus pro Zone ermögliche³³. Paradoxerweise verdoppelt die nach herkömmlichen Begriffen nur halbdurchlässige Zonenplatte bei der richtigen Anregung die Intensität des Gasstrahls, so zumindest die Erwartung aufgrund der Analog zum akustischen Strahl³⁴, und ermöglicht so eine dreidimensional variable (holografische) – und dynamisch multiple – Fokussierung³⁵.

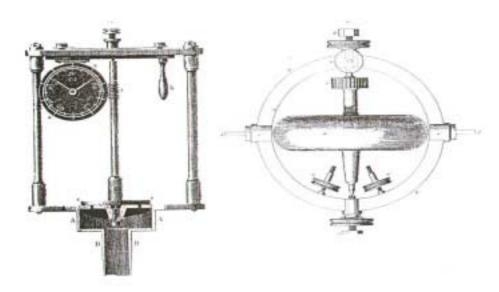


Abb. 1.12: Lagerung und Antrieb einer Sirene als Vorbild für Lagerung und Antriebsmöglichkeiten des Kreisels (Helmholtz 1870, 23; Gariel 1878, Pl. 12).

Graphik 1

Allerdings ergibt sich die Bedeutung der obigen Schwerpunkte weniger jeweils für sich betrachtet, sondern in der neu strukturierten Kombination, wie zB im Falle des pneumatischen Antriebs für Magnetlager (durch neuartige Membranpumpe³⁶). Die hier abgehandelten Kombinationen erheben allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit, vielmehr sollten die hier nach praktischen Gesichtspunkten gewählten Anwendungsbeispiele zum Weiterdenken anregen.

Die Funktionsweise des GDSR selbst im Turbobetrieb³⁷ ist weder in der praktischen Anwendung ausgereift noch in dem Langzeitbetrieb erprobt, im Gegenteil. Wohl aber können die einzelnen Komponente, also sowohl das Schwungrad³⁸ wie auch die axiale

³³ Römer 1 ff, 11 ff, 33 ff.

³⁴ Römer 3 ff, 20, 24 f, 32, 34.

³⁵ Römer 1 ff, 11 ff, 20 ff, 30 ff.

³⁶ Bergmann/Schäfer I (1975) 543 f.

³⁷ Rueegg, in: < http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html >; Calotti 12 f: "In den letzten 5 Jahren wurden einige Projekte mit kinetischen Energiespeichern durchgeführt. Einige der Entwicklungen sind in der Tabelle 1.1 zusammengefasst. Dabei handelt es sich meist um Einzelanfertigungen. Eine systematische Lösung des Problems lässt sich darin nicht erkennen. Es scheint, dass die Anwendungspalette zu breit und zu unterschiedlich ist, als dass eine einheitliche Lösung in Frage käme. In der Tabelle 1.1 ist neben neuesten Projekten auch der Gyrobus aufgeführt. Er ist sozusagen der Stammvater der modernen Schwungradspeicher-Entwicklung."

³⁸ Menz 6 ff; Strößenreuther; in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-entwcklg.htm >.

Gegenläufigkeit³⁹, jeweils als schon so weit erprobt und in der praktischen Anwendung bewährt angesehen werden. Der Turboantrieb würde tendenziell nach der Magnetlagerung und diese wiederum nach dem elektrischen Antrieb verlangen⁴⁰, aber die herkömmlichen Elektromotoren, deren Funktionsprinzip (Rotationsmotor) auch noch bei der Konstruktion des magnetisch gelagerten Schwungrads eingesetzt werden, eignen sich kaum für den Turbobetrieb⁴¹. Beim erforderlichen Dauertest⁴² des GDSR im Hinblick auf die Peripherie – wie Antrieb und Lagerung aber auch Elektronik – müsste begleitend beobachtet⁴³ und – den Testresultaten im Turbobetrieb entsprechend – weiterentwickelt (Linearmotor) oder nachjustiert werden⁴⁴. Schon allein aus diesem Grunde bietet sich die Magnetlagerung als ideales Vorfeld für die gleichzeitige Messung der Anomalien an⁴⁵, weil in dem Magnetfeld – im Gegensatz zum homogenen Materiefeld des mechanischen Kreisels oder Schwungrades – sich alle Anomalien unmittelbar manifestieren und nach außen ablesen bzw. anzeigen lassen⁴⁶. Allerdings sollte beim Magnetlager, wie schon angedeutet, nicht das für Kugellager

20

³⁹ Käppeli 89.

⁴⁰ Schweitzer/Traxler/Bleuler 7 ff; Rathausky 16 ff; Guentensperger A-11.

⁴¹ Schweitzer/Traxler/Bleuler 17 f; Calotti 131 f; Rathausky 13 ff; Vezzini 4: "Im direkten Vergleich von Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine zeigt sich, dass die elektrische Maschine bei richtiger Ansteuerung schon bei kleinen Drehzahlen ihr maximales Moment liefern kann. Das maximale Drehmoment nimmt erst bei Feldschwächung quadratisch ab. Dies geschieht typischerweise bei hohen Drehzahlen, wobei die Drehzahl bei konstanter Spannung weiter erhöht wird. Feldschwächung kann auch bei kleineren Drehzahlen im Teillastbereich angewandt werden, um die Magnetisierungsverluste zu verkleinern. In diesem Fall spricht man oft von lastangepasstem Fluss."
⁴² Traupel 295; vgl Kolk 125 f: "Der in dieser Arbeit vorgelegte Schwungradspeicher ist ein Laborprototyp, mit dem gezeigt

⁴² Traupel 295; vgl Kolk 125 f: "Der in dieser Arbeit vorgelegte Schwungradspeicher ist ein Laborprototyp, mit dem gezeigt werden sollte, daß das Prinzip der radial passiven permanentmagnetischen Lagerung auch für Rotoren über 20 Kg in Verbindung mit einer Leistungsstarken elektrischen Maschine geeignet ist. Zur Vorbereitung eines Industrieprototypen oder eines Serienmodells müssen weitere Tests durchgeführt werden, die über den Rahmen dieser Arbeit und die Möglichkeiten des Forschungszentrums Jülich hinausgehen."

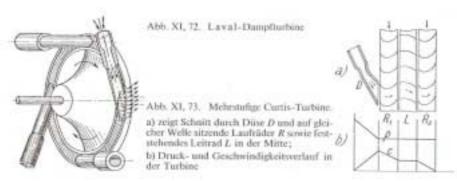
⁴³ Aenis 1 f. "Die Anforderungen an Turbomaschinen seitens der Betreiber steigen permanent. [...] Zum anderen zeigt das Beispiel des Arbeitskreises Störungsfrüherkennung der VDMA Fachgemeinschaft Pumpen, der 120 Mitgliedsfirmen angehören, dass der Trend in Richtung steigende Überwachung geht. [...] Ein weiteres Ergebnis der Studie ist, dass 94% der 50 Befragten Firmenvertreter von einer Prozessüberwachung einen Nutzen erwarten. Dies wird Aussagen untermauert, wie z. B.: "Wir sehen die Pumpe der Zukunft ganz klar als intelligente Komponente im Gesamtprozess." von Dipl. Ing. Rainer Pfeifer, Geschäftsführer der Philip Hilge GmbH, Bodenheim (*Schröder*, 2000) oder "Der Traum des Pumpenherstellers ist die Berührungs- und dichtungslose Lagertechnik in Pumpen mit umfangreicher Überwachung." von *Burchhardt et al*, Vereinigte Energiewerke AG, Berlin."

⁴⁴ Kolk 126: "Ein weiter Konstruktionsaspekt war beim Prototypen die Flexibilität des Aufbaus, Rotor, Gehäuse und Magnetlager wurden mehrfach geändert und den experimentellen Erfordernissen angepasst. Bei der Entwicklung eines Serienmodells hingegen spielen hauptsächlich die Produktionskosten eine Rolle, so daß die Vereinfachung der Bauteile und die Reduzierung der Anzahl der Komponenten wichtig sind."

⁴⁵ Schweitzer/Traxler/Bleuler 2 ff, 10 ff, 17 f, 122 f, 132 ff, 157 f, 185, 197 ff; Calotti 131 f; Aenis 13 f: "In den letzten Jahren hat parallel zu den Fortschritten der Diagnoseverfahren der Einsatz der Magnetlager in Turbomaschinen stark zugenommen. Die wesentlichen Gründe dafür sind eine extreme Reduktion der Kosten insbesondere auf der Elektronikseite, eine deutliche Steigerung der Zuverlässigkeit und nicht zuletzt der Fortschritt bei der Dimensionierung, Konstruktion und Inbetriebnahme magnetgelagerter Systeme. [...] Magnetlager besitzen aber über die ihre reine Lagerfunktion hinaus noch zusätzliche Fähigkeiten. Zum einen lassen sie sich als Sensorenelement nicht nur Bestimmung der Wellenbewegungen, sondern auch zur Messung der Lagerkräfte einsetzen (siehe Kapitel 3.1) und zum anderen eignen sie sich als Aktorelement zur berührungslosen Anregung der rotierenden Struktur (siehe Kapitel 3.2). [...] Typische Anwendungen für Magnetlager sind Turbomolekularpumpen, Turbokompressoren, hermetisch dichte Pumpen, Schwungradspeicher, Computerfestplatten sowie Fräs- und Schleifspindeln. Große Bedeutung für die Zunahme der Magnetlageranwendungen im Turbomaschinenbau hatte dabei der erfolgreiche Einsatz der Magnetlager in Turbokompressoren und Turboexpandern für Gaspipelines in Nordamerika zwischen 1984 und 1993."

⁴⁶ Aenis 15 f: "Göhler und Förch nutzten Hallsensoren zur Bestimmung der magnetischen Flussdichte im Luftspalt und Lee et al. verwendeten piezoelektrische Kraftaufnehmer, die zwischen Magnetlagerstatoren und Grundplatte befestigt waren. [...] Beim Einsatz von Magnetlagern in Turbomaschinen erhält man zu den Schwingungssignalen der Welle (Ausgangssignale) noch zusätzliche Informationen über die Lagerkräfte (Eingangssignale) und durch die Möglichkeit der Berührungslosen

bewährte Prinzip des Rotationsmotors zur Anwendung kommen, weil dieser im Turbobetrieb an seine Grenzen stößt⁴⁷, sondern das Kurzstatorprinzip des Linearmotors⁴⁸, bzw. (statt dem magnetodynamischem⁴⁹ Reluktanz-Prinzip) die Tangentialkraft des elektrodynamischen Prinzips, die sich zum Turbobetrieb eigene⁵⁰. Insofern ein Magnetlager mit Elektroantrieb zum Einsatz komme, so möchte er kein Rotationsmotor im herkömmlichen Sinne sein, sondern ein auf der Kreisbahn kurzgeschlossener Linearmotor⁵¹ (Kurzstator), wo die nur scheinbare (virtuelle) Rotation gleichsam als Nebeneffekt auftrete⁵², aber auch Rotationseigenschaften zeige. Man könnte statt von einer axialen von der radialen Rotation sprechen.



Graphik 2

Gleichzeitig müsste zum Magnetlager parallel der Luftantrieb⁵³ (GRAPHIK 1) und Luftlagerung⁵⁴ oder allenfalls Gasturbine⁵⁵ (GRAPHIK 2) als Vergleichsbasis getestet – und verglichen – werden, weil Luft oder Dampf, also die Gase, sich für den Turbobetrieb gut eignen⁵⁶. Weil Magnetlager nur in der Kombination mit Elektromotoren Komplikationen zeigen, aber im Leerlauf – besonders im Vakuum – so gut wie verlustfrei arbeiten⁵⁷, geht die Arbeitshypothese mit einer Hybridform in den Testlauf, und stellt als Ausgangsposition den

Anregung des rotierenden Systems sogar noch Aussagen über das Systemverhalten im Betrieb. Damit stellen Magnetlager ein ideales Modalanalysewerkzeug für rotierende Strukturen dar, wie es bei *Göhler* (1998) und *Förch* (1999) für einen Testrotor sehr anschaulich demonstriert wird." Vgl Schweitzer/Traxler/Bleuler 115 ff, 151 ff.

⁴⁷ Rathausky 13 ff; Vezzini 4; Calotti 131 f.

⁴⁸ Rathausky 14 ff; vgl Calotti 4.

⁴⁹ Menz 15.

⁵⁰ Schweitzer/Traxler/Bleuler 10 ff, 116 ff, 132 ff, 157 f, 165 ff

⁵¹ Rathausky 14, 16 ff; vgl Calotti 35 Abbildung 3.6..

⁵² Diese Überlegung korrespondiert mit der Tatsache, dass das GDSR alle rotationsbedingte Kreiseleffekte absorbiere, bzw. auslösche, was allerdings nicht die kontrollierte Nutzung gewisser Rotationseigenschaften ausschließe, zumal die absorbierte Energie des Kreiseleffekts stets in Rotationsenergie umgesetzt werde.

⁵³ Schmidt E. 365 ff; Schwate 164 ff; Broelmann 46 Abb I.12, 227 f; Riethmüller 75 ff.

⁵⁴ Bartz 4 ff; vgl Strößenreuther; in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-geschi.htm >; Eicher/Rigassi, in: < http://vpe.ch/pdf/WKK 2003.pdf > S 52.

⁵⁵ Bergmann/Schäfer I (1975) 704 ff, 712 ff, 730 ff, 737; Löwy 1 ff; Stachel 4 ff, 74 ff; Rueegg, in: http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html>.

Bergmann/Schäfer II (1971) 427 f, 472 ff, 480; vgl Traupel 295; Rueegg, in: http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html>.

⁵⁷ Guentensperger A-10; Calotti 3 ff, 131 f; vgl Strößenreuther; in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwunggrundlg.htm >.

Gasantrieb bei Magnetlagerung dem elektrischen Antrieb so gegenüber⁵⁸, dass dabei auch zB die Luftlagerung⁵⁹ erprobt und mit der Magnetlagerung verglichen werden sollte (wobei die Spezielle Membranpumpe getestet werden könne).

Es sollte daher für den Testlauf ein sog. Hybridsystem mit zwei oder drei (allenfalls magnetischen) Kupplungen (jeweils für den elektrischen und mechanischen Betrieb und allenfalls eine Kupplung für den Leerlauf) eingebaut sein⁶⁰, weil ein Magnetkupplung zB mit einem elektromagnetischen Drehzahlkupplung aus Auslegung, neben einem im Vakuum magnetgelagerten Schwungrad⁶¹ von außen mit Luft angetrieben werden kann.

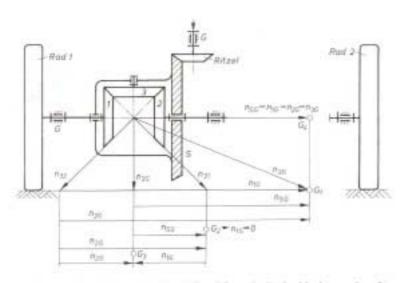


Bild 3.86: Kraftfahrzeug-Differentialgetriebe mit Drehzahlvektorenplan für unterschiedliche Fahrtoperationen

Graphik 3

Weil im Gegensatz zu herkömmlichen Schwungrädern das GDSR mit PR einerseits mit einem Differential (drei Kegelzahnräder⁶² (GRAPHIK 3) in je 90° Winkel angeordnet, so dass die zwei Wellen der Doppelräder⁶³ um 180° "phasenverschoben" sind) verbunden ist (die später durch Magnetkupplungen ersetzt werden könnten), und andererseits die Rotation nicht auf der Achse abgestützt, bzw. nicht an einer Welle gelagert ist, sondern auf einer "gekrümmten" Linie (!) bzw. Kreisbahn einen ringförmigen Umlauf an der Außenseite der Kreisscheibe darstellt und theoretisch nur der äußere Rand des Schwungrades rotiert, empfehlt es sich – für den Testlauf – das Differentialgetriebe als Schnittstelle zu nehmen.

⁶¹ Strößenreuther; in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-grundlg.htm >.

_

⁵⁸ Guentensperger A-10: "Wegen der hohen Umfangsgeschwindigkeit des Schwungrads ist das ganze System im Vakuum untergebracht." Damit fällt hier die Luft als Kühlsystem aus, und muss ein alternatives Kühlsystem installiert werden, was beim Luftantrieb wegfiele.

⁵⁹ Bartz 4 ff; Riethmüller 75 ff; Eicher/Rigassi, in: < http://vpe.ch/pdf/WKK 2003.pdf > S 52.

⁶⁰ Vezzini 8 f.

⁶² Luck/Modler 141 ff Bild 3.84 und 3.86; Grote/Feldhusen G 124; Scherr-Thoss 38, 44.

⁶³ Magnus 434 f.

Beim Luftantrieb⁶⁴ oder Gasantrieb, ob mit oder ohne Magnetlagerung, könnte sich die Gegenläufigkeit der Schwungräder als Vorteil erweisen, denn angefangen beim Hubschrauber oder Lüftungsventilator⁶⁵ bis hin zu der Dampfturbine⁶⁶ und Verdichter bzw. Gaspumpe⁶⁷, sind gegenläufige Rotationen im gleichen Gerät und im gleichen Arbeitsvorgang durchwegs gebräuchlich, wenn auch nur bevorzugt im Turbobetrieb. Bereits mehrfach ist es im Maschinenbau aufgefallen, dass etwa bei Mehrstufigkeit sich gegenläufige Rotationen



Graphik 4

besser machen, man meint aber in der Theorie – wie es zu zeigen sein wird – irrig, dass die Störungen bloß infolge der Einseitigkeit des Angriffs beim Antrieb zeigten, und die Gegenläufigkeit (GRAPHIK 4) die Achse entlasten würde⁶⁸. Ein hier zentral behandelter Effekt der Gegenläufigkeit wurde bisher in der Form nicht beachtet. Die in der Praxis ohnehin

⁶⁴ Schwate 164 ff; Schmidt E. 365 ff; Broelmann 46 Abb I.12, 227 f.

⁶⁵ Käppeli 89 ff..

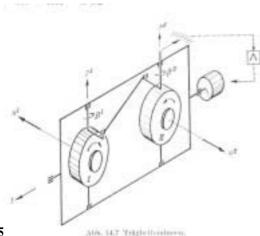
⁶⁶ Fister I 22; Gülich 510. 67 Fister II 11 f, 23, 26 ff, 37, 43 ff. 68 Gülich 510; Fister II 11 f, 23, 26 ff, 37, 43 ff.

schon erfolgreich angewendete Gegenläufigkeit sollte hier theoretisch untermauert und der Horizont – mit neuen Aspekten – erweitert werden.

12

Vorbemerkung

Da es kein Vorzeigemodell gibt und ein Entwurf den technischen Voraussetzungen eines Testlaufs angepasst werden müssen, werden nachstehend einige ähnliche Modelle gezeigt, die entsprechend modifiziert werden könnten und so als Anhaltspunkt für einen Entwurf dienen.



Graphik 5

Gegenläufiges Doppelschwungrad (GDSR) mit antiparallel gekoppelten Rotationsachse⁶⁹ (GRAPHIK 5), wo es ein Leichtes wäre, die Achsen parallel zu koppeln.

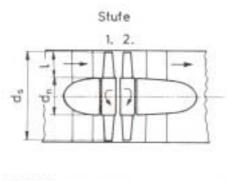


Bild 6.2 Gegenläufiger Axialventilator

Graphik 6

GDSR-Prinzip mit axial gekoppelten Rotoren⁷⁰. In diesem Fall (GRAPHIK 6) sind die Achsen mehr als nur parallel. Es ist gleichsam der Idealfall der parallelen Achse.

⁶⁹ Magus 434 Abb 14.7: Es gibt leider kein GDSR mit parallel gekoppelten Rotationsachse, doch ist auf Anhieb ersichtlich, dass die hier antiparallele Koppelung der Rotationsachsen mit einer Querstange mit wenigen Handgriffen in eine parallele Koppelung umgewandelt werden kann, sofern die Koppelung der Rotationsachsen mit der nämlichen Querstange bewerkstelligen lassen, wenn diese nunmehr die gleichen Seiten der Kreisel (parallel zur Vorrichtung) verbinde.

⁷⁰ Käppeli 89: Es gibt leider kein GDSR mit axialer Koppelung, doch kann der hier abgebildete Ventilator die Funktionsweise der gegenläufig axial fixierten Schwungräder funktionell veranschaulichen.



Bild 3.31 "Reluktarız"-Radiallager

Graphik 7

Magnetlager in Sandwich-Bauweise (GRAPHIK 7), die zur zweirotorigen Bauweise (GDSR) einlade⁷¹. Auch hier wäre die Gegenläufigkeit axial.

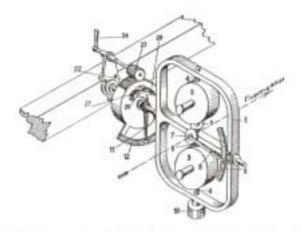


Abb. VIII.11: Unmetzung des Leithüdes des Seiblinzen: Stabibierung über einen Rahnien, in dem zwei gegeminnig wirkende Kreisel verspannt sind, der bereits auf kleise Abweichungen zespiert: din Regelfall, wo die Niegung J...] von der vorgeschriebenen Lage habt nach der einen, bald nach der anderen Seite wirkt, wird nur die Stabibierung durch Ausscheren der Achten der beiden Kreisel 2 u. 3 in Tärigkeit treten, ohne daß es zu einer wahrsehmbaten Anderung der Hugnung "Bage kommt. Es ist das zu vergleichen der Tärigkeit einen geschieken Seiklänzen, welcher
sich im Gleichgewicht hält, ohne daß es überhaupt zu wahrschmbaren Anderungen seiner
Gleichgewichtslage kommt.» DRP 388 402, 26.9.18, C. F. Goecz (vernunf. Boytow), Stabibiterung von Flugzuggen, U-Biotien usw., S. 3, Z. 75.

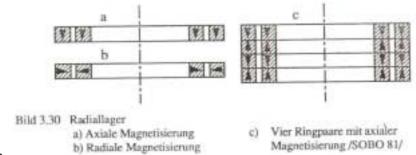
Graphik 8

Gegenläufiges Doppelschwungrad (GDSR) mit antiparallel gekoppelten Rotationsachse⁷² (GRAPHIK 8) und ansatzweise mit Luftlagerung⁷³.

⁷¹ Schweitzer/Traxler/Bleuler 87 Bild 3.31; vgl Kolk 24 Abbildung 3.3.

⁷² Broelmann 366 Abb VIII.11.

⁷³ Broelmann 368: "Sie implizierten Qualitätssprünge in der Fertigungstechnik und in Konzepten der Luftlagerung der Kreisel, die sich schließlich in klinisch sauberen «Kreisel-Hospitälern» vollziehen sollten.[...] Ähnlich wie der erfolglose Schiffskreisel als Katalysator für den Kreiselkompaß und das Kreiselpendel gedient hatte, lieferte die längst vergessene Einschienenbahn das Gedankengut für die Stabilisierung von Meßplattformen. Der Begriff des «Trägheitsrahmens» wurde als System von paarweise gegenläufigen Kreiseln in einem «Zwischenträger» bereits 1917 konzipiert und 1918 erstmals ausgesprochen. Möglicherweise kannte Boykow die Arbeiten Rosenbaums, der ebenfalls Kreisel paarweise in einem gemeinsamen Rahmen angeordnet hatte und dessen Demonstrationsgeräte in Berlin angeboten wurden, als Boykow dort die Schauspielschule besuchte." Vgl aaO 373; Bartz 4 ff; Riethmüller 75 ff; Eicher/Rigassi, in: http://vpe.ch/pdf/WKK_2003.pdf S 52.



Graphik 9

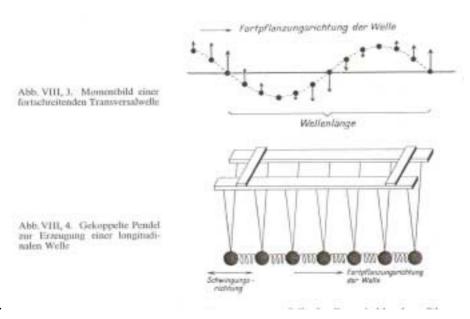
Zweilagiges Magnetlager⁷⁴, wo die ruhende Scheibe (Stator) – axial – zum zweiten Rotor im Sinne von GDSR umgebaut werden könnte (GRAPHIK 9).

-

 $^{^{74}}$ Schweitzer/Traxler/Bleuler 86 Bild 3.30; vgl Kolk 22 ff Abbildung 3.1 bis 3.4.

1. GDSR

Das gekoppelte gegenläufige⁷⁵ Doppelschwungrad⁷⁶ hat die technische Besonderheit, dass die Resonanzen bzw. Kreiseleffekte⁷⁷ – durch die simulierte Präzession – sich in den beiden gegenläufigen Schwungrädern bei konstant – fixiert – parallelen Rotationsachse gegenseitig aufheben⁷⁸ und damit den störungsfreien Turbobetrieb ermöglichen⁷⁹.



Graphik 10.

So weit die Funktion der gekoppelten Schwingungen etwa bei zwei miteinander verbundenen Pendeln⁸⁰ nach GRAPHIK 10 und 11, wo die gekoppelte Pendelschwingung in der Phase um 90° verschoben ist,

⁷⁶ Magnus 433 ff; vgl Fister II 11 f, 23, 26 ff, 37, 43 ff.

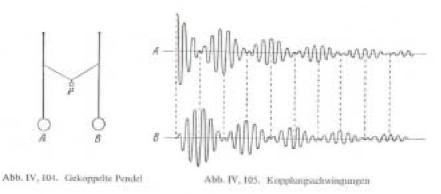
⁷⁷ Riethmüller 77 ff; Schweitzer/Traxler/Bleuler 151: "Bei Rotation stellen sich Kreiseleffekte ein, wie in Kapitel 5 ausführlich dargestellt. Sie bewirken die gyroskopische Koppelung der Verdrehungen α und β (Bild 6.1)."

⁷⁵ Luck/Modler 141 ff.

Magnus 434 f. "Als *Trägheitsrahmen* wird ein Zwei-Kreisel-Stabilisator bezeichnet, dessen Schema Abb. 14.7 zeigt. Geräte dieser Art können z. B. zum Stabilisieren von Plattformen auf schwankendem Schiff verwendet werden. Die beiden gleichartigen Kreisel sind hier in einem gemeinsamen Außenrahmen so eingebaut, daß die inneren Rahmenachsen parallel zueinander sind. Durch einen Hebelmechanismus (oder durch Zahnräder) sind die Rotorgehäuse so miteinander verbunden, dass sie sich nur gegensinnig mit $β^I = -β^{II}$ bewegen können. Die Rotoren haben entgegengesetzten Drehsinn, so dass in der Normalstellung der Gesamtdrall Hi = $H_i^{\ I} + H_i^{\ II} = 0$ ist. [...] Der Vorteil der Verwendung von zwei gegenläufigen Kreiseln ist darin zu sehen, daß sich der Trägheitsrahmen auf bewegten günstiger als der Stabilisator mit nur einem Rotor verhält. Dreht das Bezugssystem z. B. um die 2-Achse, dann folgt der Rahmen dieser Drehung, ohne daß eine Auswanderung in der 1-Achse auftritt. Die Momente H β beider Kreisel haben nämlich entgegengesetzte Richtung und heben sich gegenseitig auf; lediglich der Außenrahmen wird dadurch auf Torsion beansprucht. Bei Drehungen des Bezugssystems um die 3-Achse können bei ausgelenkten Kreiseln ebenfalls Kreiselmomente entstehen, durch die der gleichsinnig gedrehte Kreisel zur 3-Achse hin, der gegensinnig drehende aber von der 3-Achse fortgezogen werden. Auch diese Momente können sich nicht auswirken, da sie sich über die zwangsläufige Führung aufheben; sie müssen vom Außenrahmen oder vom Gestänge für die β-Bewegung aufgenommen werden."

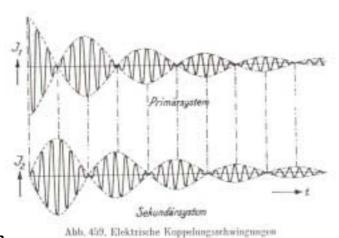
⁷⁹ Schweitzer/Traxler/Bleuler 17 f.

⁸⁰ Bergmann/Schäfer I (1975) 198 Abb IV 104-105; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 676 Abb 22.17; 680 Abb 22.21; 701 Abb 23.6; Traupel 293 ff.



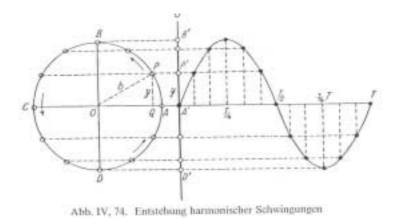
Graphik 11

aber auch bei gekoppelten elektromagnetischen Schwingungen⁸¹ bekannt sind (GRAPHIK 12), wo ebenfalls die gekoppelte Schwingung in der Phase um 90° verschoben ist⁸²,



Graphik 12

so leuchtet ein, dass ein analoges Phänomen bei den gekoppelten Kreisschwingungen (GRAPHIK 13, 22, 23) und folglich bei der Rotation überhaupt auftrete⁸³.



Graphik 13

_

⁸¹ Bergmann/Schäfer II (1971) 336 ff; Bergmann/Schäfer II (1971) 316 Abb 434; Raith, Elektromagnetismus, in: Bergmann/Schäfer II (1999) 294 Abb 5.16; Breitsameter I/2, in: Kuhn 5/II 8 f.

⁸² Bergmann/Schäfer II (1971) 316 f.

⁸³ Schweitzer/Traxler/Bleuler 116: "Im allgemeinen werde translatorischen Freiheitsgrade x_s, y_s und die Drehfreiheitsgrade α, β gekoppelt sein. Darüber hinaus sind infolge der Rotordrehung die Bewegungen in der $x_L z_L$ –Ebene mit denen der $y_L z_L$ – Ebene gekoppelt, falls $\Omega \neq 0$ ist." Vgl Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 621 Abb 20.25a.

Nachstehend soll theoretisch und praktisch der Koppelungseffekt bei Rotation – analog dem Pendel – erörtert werden, denn nach der Absorbierung – oder Ausschaltung – der fremderregten Bewegungen von außen es scheinbar zu einer Entkoppelung der (externen) Translation (Außenerregung) und Rotation kommt, d. h. der doppelte gegenläufig axial parallel gekoppelte Rotationskörper nicht mehr als Kreisel reagiere, auch wenn noch systemintern Resonanzen auftreten können⁸⁴. Der Test möge bestätigen oder widerlegen, ob die zwei gegenläufig gekoppelten Schwungräder im Turbobetrieb die Resonanzen⁸⁵ wirklich vollständig absorbieren.

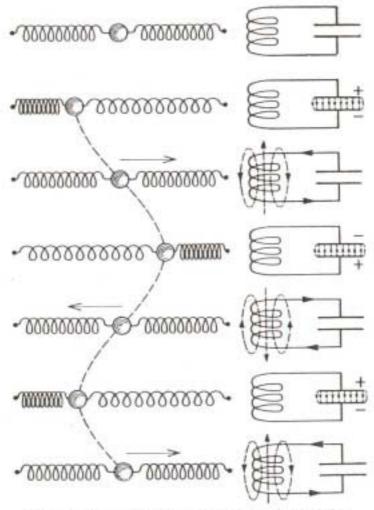


Abb. 434. Zustandekommen mechanischer und elektrischer Schwingungen

Graphik 1486

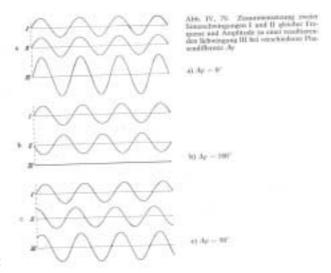
84 Schweitzer/Traxler/Bleuler 116 f, 126 ff.

⁸⁵ Traupel 295; Magnus 434 f; Schweitzer/Traxler/Bleuler 118 ff;.

⁸⁶ Bergmann/Schäfer II (1971) 316 Abb 434; Raith, Elektromagnetismus, in: Bergmann/Schäfer II (1999) 273 Abb 5.2.

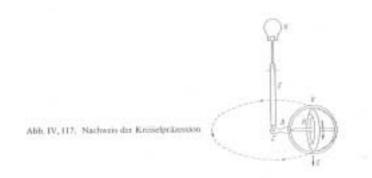
1.1 Koppelung

Gekoppelte Resonatoren bzw. Schwingkörper⁸⁷ – wie zB Pendel oder elektromagnetische Schwingungen (GRAPHIK 11, 14) – schwingen in der Regel (um 90°) phasenverschoben⁸⁸,



Graphik 15

doch im gleichen Rhythmus⁸⁹. Innerhalb eines harmonisch schwingenden Körpers sind die Bewegungen gewöhnlich in Phase, andernfalls sind sie um 90° verschoben (wenn eine punktuelle Bewegung in einem Festkörper einen Druck in eine Richtung erzeugt, so entsteht dazu senkrecht ein Zug⁹⁰, und umgekehrt) und wenn Schwingungen wechselwirken, dann sind sie gekoppelt⁹¹.



Graphik 16

 $^{^{87}}$ Traupel 293 ff; Bergmann/Schäfer I (1975) 444 ff Abb VIII 1-7

⁸⁸ Bergmann/Schäfer I (1975) 198 Abb IV 104; aaO II 316 ff, 336 ff; vgl Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 146 Abb 5.17; Traupel 293 ff; Breitsameter I/2, in: Kuhn 5/II 8 f

⁸⁹ Bergmann/Schäfer I (1975) 197 ff, 443 f., 90 Bergmann/Schäfer I (1975) 242; aaO II 17, 167 ff, 242 f.

⁹¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 242 ff; Traupel 293.

Bei der Rotation eines Kreisels gibt es von vornherein die Anomalie, dass ein Kreisel senkrecht⁹², also um 90° - oder $\pi/2$ – phasenverschoben reagiert (GRAPHIK 16), und wen die Theorie sich in der Praxis beim Testen bestätigte, so müssten in einem gekoppelten gegenläufigen Doppelrad – mit parallelen Rotationsachsen – alle Resonanzen⁹³ infolge äußerer Einwirkung – mit einer Phasenverschiebung von 2 x 90° =180° aufeinander bezogen – gleich Null sein⁹⁴ (GRAPHIK 15 b): d. h. der Kreisel, bzw. beide Kreisel in GDSR – im Hinblick auf Außeneinwirkungen – nutationsfrei bzw. resonanzfrei sein⁹⁵:

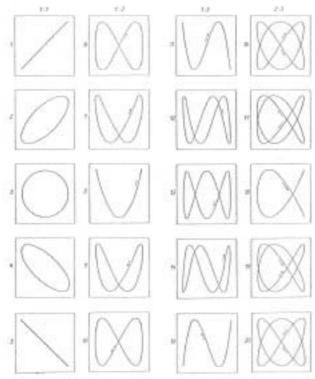


Abb. IV, 89. Lissajows-Kurven. In der ersten vertikalen Beilie ist das Verhältnis der beiden Frequesten 1.14, in der zweiten 1.15, in der drieten 1.15 und in der vierten 2.15, in der groon Borizonstaleribe beiden Schwingungen 0, in der zweiten 2/4, in der drieten 2/2, in der vierten 1.4/4 und in der füsften 2/2. In der

Graphik 17

In der Koppelung der beiden Kreisel bzw. Schwungräder – analog der gekoppelten Pendel (GRAPHIK 11) – kommt es einerseits zu einer axial oder parallel gekoppelten gegenläufigen Kreiselschwingung⁹⁶ und andererseits aufgrund der doppelten Phasenverschiebung

⁹² Bergmann/Schäfer I (1975) 206 ff.

⁹³ Bergmann/Schäfer I (1975) 196 f: "Die Resonanz spielt in der Physik und Technik eine außerordentlich große Rolle. Es ist sehr schwer, große Maschinen ideal auszuwuchten, so daß also die Masseverteilung vollkommen rotationssymmetrisch ist. Kommt dann die Drehzahl der Maschine mit der Eigenfrequenz des Fundamentes oder benachbarter Gebäudeteile in Resonanz, so vollführen diese Teile Resonanzschwingungen, die unter Umständen zu einem Bruch der betreffenden Teile infolge großer mechanischer Beanspruchung führen können. Man dies z. B. mit einem Elektromotor zeigen, an dessen Achse man ein kleines Stück Blech exzentrisch aufbringt. Steigert man die Drehzahl des auf dem Tisch stehenden Motors von Null an aufwärts, so findet bei bestimmter Drehzahl ein Mitschwingen der Tischplatte oder des ganzen Tisches statt."

⁹⁴ Magnus 434 f; vgl Bergmann/Schäfer I (1975) 176 ff Abb IV 79 b; 454 Abb VIII 10 c; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 661 Abb 22.2; 755 Abb 24.5; Kaußen, Mechanik (MEC) und Elektrodynamik (EDY), Kapitel 7 Wellen, in: http://www.fh-luh.de/physik/download/13welle_ba.doc>.

⁹⁵ Schweitzer/Traxler/Bleuler 116 f; Bergmann/Schäfer I (1975) 205.

⁹⁶ Schweitzer/Traxler/Bleuler 120 f.

(GRAPHIK 1, 2, 4) um je 90° in die Gegenrichtung (2 x 90° = 180°) der Eingangssignale – wegen der Gegenläufigkeit der beiden Rotationen des Doppelschwungrades – in der Koppelung zweier axial/parallel rotierenden Kreisel durch Interferenz⁹⁷ zur Nullschwingung (GRAPHIK 26 c) und alle von außen aufgetragenen Impulse bzw. Eingangssignale⁹⁸ werden – in Echtzeit – ausgelöscht, bzw. absorbiert⁹⁹. Man kann auch von einer Umkehrung der Koppelung sprechen, weil dort ein Pendel aktiv und ein Pendel passiv sind (GRAPHIK 11), während hier beide gekoppelten Kreisel aktiv sind. Innere Störungen des Systems infolge Kreiseleffekte¹⁰⁰ könnten zwar ebenfalls aufgehoben werden¹⁰¹, doch müsste es sich noch im Test zeigen, oder widerlegen, ob und wie weit nun dies ebenfalls absorbiert werden und ihre Selbstregulierung (GRAPHIK 37) verlieren.

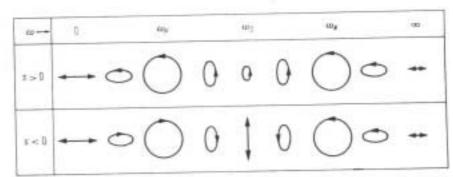


Abb. 3.41 Qualitativer Überblick über Schwingungsformen in verschiedenen Frequenxbereichen be Erregung längs einer Queruchee.

Graphik 18

Auszugehen ist von der experimentellen Tatsache, dass (innere) Systemstörungen wie Unwucht immer die gleiche Richtung haben wie die Kreiselbewegung¹⁰². Demgegenüber sind Resultate äußerer Störungen wie Nutation oder Präzession gegenläufig zur

⁹⁷ Kaußen, Mechanik (MEC) und Elektrodynamik (EDY), Kapitel 7 Wellen, in: < http://www.fh-luh.de/physik/download/13welle_ba.doc >; vgl Bergmann/Schäfer II (1971) 295: Eine Phasenverschiebung um 180° bedeutet eine entgegengesetzte Wirkung, doch während die Gleichpoligkeit der elektromagnetischen Kräfte sich dabei verdoppelt, bedingt die Gegenläufigkeit (als quasi Gegenpoligkeit) der Kreisel im GDSR das Auslöschen aller Außenwirkungen.

⁹⁸ Schweitzer/Traxler/Bleuler 118 ff; Aenis 3: "Die Schwingungsantwort (Ausgangssignale) eines rotierenden Systems wird zum einen vom Systemverhalten und zum anderen von den aufgetragenen Kräften (Eingangssignale) bestimmt."

⁹⁹ Magnus 434 f; Schweitzer/Traxler/Bleuler 119: "Der ursprüngliche Drehimpuls des Rotors ist $L_0 = I_{z0}\Omega$, wenn der Rotor mit der Drehgeschwindigkeit Ω um seine Hauptachse z_0 dreht. Dieser ursprüngliche Drehimpuls L_0 ändert also seine Größe und seine Richtung und geht infolge des Momentanstoßes über in L_1 . Die kleine Änderung seiner Größe bedeutet nur, daß sich die Drehzahl Ω des Rotors geringfügig ändert."

¹⁰⁰ Schweitzer/Traxler/Bleuler 115 ff, 151 ff.

¹⁰¹ Schweitzer/Traxler/Bleuler 1118 ff; Bergmann/Schäfer I (1975) 204 ff.

Schweitzer/Traxler/Bleuler 130 ff: "Der Wellenmittelpunkt W bewegt sich gleichläufig auf einer Kreisbahn [...] Und der Massenmittelpunkt S bewegt sich ebenfalls auf einer Kreisbahn [...] Das Bild 5.13 zeigt die Resonanzkurven und außerdem die Bahnkurven für W und S. Diese verdeutlichen des "Umklappen" vom unterkritischen zum überkritischen Drehzahlbereich. Für niedere Drehzahlen läuft S auf der äußeren Bahn um, und bei hoher Drehzahl dreht der Rotor um eine Achse durch S. Der Phasensprung erfolgt bei der kritischen Drehzahl. Dieses Prinzip der "Selbstzentrierung" erklärt auch, dass es wichtig ist, den Rotor auszuwuchten, d. h. W und S zusammenzulegen, wen in allen Drehzahlbereichen ein ruhiger Lauf angestrebt ist. [...] Die bei der Unwuchtanregung nicht angeregten gegenläufigen Eigenschwingungen können bei einer anders strukturierten harmonischen Anregung durchaus auch zu Resonanzen führen. Sie entstehen z. B. bei einer horizontalen Bewegung des Fundaments in x_1 -Richtung mit $x_{Ae}(t) = h \sin \Omega_e t$, oder wenn auf die Rotorspitze durch eine Werkzeugbelastung eine Wechselkraft $f_x = f_0 \sin \Omega_e t$ in x_1 -Richtung wirkt (Bild 5.14), oder wenn auf den Rotor Wechselkräfte durch magnetischen Zug vom Antriebsmotor her wirken. [...] Diese aus dieser Anregung resultierenden Resonanzkurven zeigen, daß die Bahnkurven eines Punktes auf der Rotorachse keine Kreise mehr sind, sondern Ellipsen."

Rotationsrichtung¹⁰³ des Kreisels (GRAPHIK 18, 19, 20): das macht plausibel, warum gekoppelte gegenläufige Kreisel mit paralleler Rotationsachse (GRAPHIK 2, 3, 5) alle Impulse von außen absorbieren¹⁰⁴.

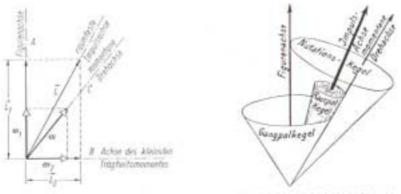


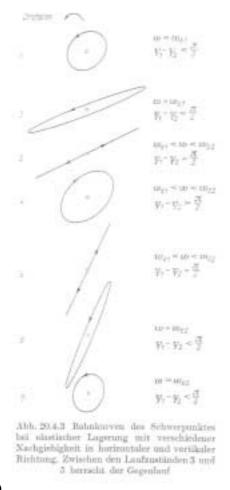
Abb. IV, 112. Festlegung der drei Kreiselachsen

Abb. IV, 113. Die drei Kreiselachsen

Graphik 19

Die Forschung ist bei Schwungräder insofern zu einem gegenteiligen Ergebnis gekommen, als dort einerseits die systeminterne Unwucht besonders in der Elastizität des Magnetlagers als lösbar – wenn nicht gelöst – gelte¹⁰⁵,

Schweitzer/Traxler/Bleuler 107, 116 ff.
 Magnus 434 f.
 Schweitzer/Traxler/Bleuler 157 f.



Graphik 20

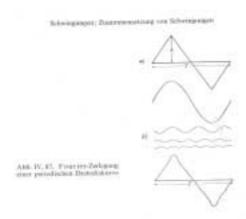
während andererseits die von außen aufgetragene Unwucht oder Präzession, wenn, dann nur mit einer komplexen Software und Messtechnik gekoppelt auszubalancieren möglich scheint¹⁰⁶, indem die Software überall dort und so dagegenhält, wie das bei den gekoppelt axial parallel gegenläufigen Kreiseln der Fall ist¹⁰⁷. Angesichts der eingestandenen mechanischen Ungelöstheit des Problems greift die Forschung einerseits aus Verlegenheit auf die Grundlagen zurück, und fordert andererseits hilfesuchend die interdisziplinäre Forschung zur Teilnahme an einer umfassenden Lösung auf¹⁰⁸, die irgendwo jenseits des fachlichen Horizonts vermutet werde. Neben der "Abkehr von der bisher üblichen Modellierung der Struktur durch den Elementarbaustein "einläufiger Schwinger' […] und es hätte den Vorteil,

¹⁰⁶ Schweitzer/Traxler/Bleuler 2 ff, 165 ff, 184 f, 195 ff.

¹⁰⁷ Magnus 434 f.

¹⁰⁸ Schweitzer/Traxler/Bleuler 185: "Es ist zu erwarten, daß in Zukunft bei der Regelungstechnik stufenweise vorgegangen wird. Die Abweichung der Rotorparameter von den theoretisch vorgegebenen Entwurfsparametern werden meßtechnisch ermittelt mit Methoden der regelungstechnischen Identifikation; gegebenenfalls werden dabei auch Korrekturen in der Modellierung des Strukturaufbaues selbst vorzunehmen sein, z. B. um "vergessene" oder nicht erkannte Freiheitsgrade noch zu berücksichtigen /BUCH 85/. Die Anwendung solcher Verfahren würde eine gewisse Abkehr von der bisher üblichen Modellierung der Struktur durch den Elementarbaustein "einläufiger Schwinger" bedeuten, eine Hinwendung zu regelungstechnisch bewährten Darstellung im Zustandsraum, und es hätte den Vorteil, daß bei dieser Modellierung auch die bisher nicht erfaßten Kreiselkräfte und nichtkonservativen Lagerkräfte zwanglos enthalten wären. Dazu existiert eine breite regelungstechnische Literatur; eine Umsetzung jedoch in meßtechnische Hilfsmittel wie sie in der experimentellen Modalanalyse für mechanische Strukturen in der Form von Schwingungsanalysatoren vorliegt, ist unseres Wissens noch nicht erfolgt. Bei einem Ausbau dieser Methoden vorstellbar, daß für die Feinanpassung der Regelung an die real vorhandene Struktur Automatismen entwickelt werden."

bei dieser Modellierung auch die bisher nicht erfassten Kreiselkräfte und daß nichtkonservativen Lagerkräfte zwanglos enthalten wären", so heißt es dort, kommt auch die "gezielte Koppelung vom einen Sensor zum anderen Lager" als "eine mögliche Abhilfe" in dieser Intention vor¹⁰⁹. Die im GDSR mit PR vorgeschlagene Lösung ist gewiss nicht so anspruchsvoll, doch nimmt sie eine gewisse Eleganz für sich in Anspruch¹¹⁰, so weit die Tests dies erlauben.



Graphik 21

Von einer anderen Seite her beleuchtet die Fourier-Zerlegung¹¹¹ (GRAPHIK 21), wenn man mit dem vorher zitierten Text man tatsächlich auf die Grundlagen zurückgreift, der Pendelschwingung den gleichen Zusammenhang¹¹² (GRAPHIK 17, 25). Von der Fourier-

109 Schweitzer/Traxler/Bleuler 197 f: "In diesem Fall wäre eine gezielte Koppelung vom einen Sensor zum anderen Lager eine mögliche Abhilfe. Diese Situation ist in /LARS 90/ aufgetreten. [...] Es wird also nicht versucht, einen unnötig großen vollständigen Zustandregler zu optimieren, sondern einen Regler, der nur die als notwendig erachteten Koppelungen enthält.[...] So sind denn auch noch keine Anwendungen solcher Regler auf Magnetlager bekannt, die eine Verbesserung der Reglergüte bei vertretbaren Aufwand belegen würden."

Bergmann/Schäfer I (1975) 182: "Ebenso wichtig wie die Zusammensetzung mehrerer harmonischer Schwingungen zu einer resultierenden Schwingung ist die Zerlegung einer gegebenen beliebigen periodischen Bewegung f(t) in eine Summe von harmonischen Teilschwingungen. Die ist, wie Fourier gezeigt hat, stets, und zwar nur auf eine Weise, möglich:

 $f(t) = A_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + A_3 \cos 3\omega t + ... + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t + ...,$

wobei $\omega = 2\pi/T$ die Kreisfrequenz, T die Schwingungsdauer des periodischen Vorganges ist. [...] Es sei bemerkt, daß man die Fourier-Analyse einer gegebenen periodischen Funktion auch auf rein mechanischem Wege vollziehen kann; solche Apparate heißen harmonische Analysatoren. Es ist interessant, daß das Ohr einen solchen harmonischen Analysator nach der Hörtheorie von Helmholtz besitzen soll, worauf wir in der Akustik näher einzugehen haben."

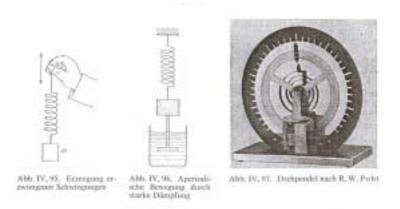
112 Bergmann/Schäfer I (1975) 185 f: "Zwei senkrecht zueinander erfolgende Schwingungen gleicher Frequenz, aber verschiedener Amplitude ergeben im allgemeinen eine elliptische Schwingung, die unter besonderen Umständen (Phasendifferenz $\varphi = 0$ oder $= \pi$) in eine geradlinige Schwingung ausartet. Mit der Phasendifferenz ändert sich sowohl die Richtung der großen Achse wie das Außenverhältnis der Ellipsen.

Wir wollen nunmehr weiter spezialisieren, indem wir noch die Amplituden beider Schwingungen gleich groß (=a) machen. Dann wird die allgemeine Ellipsengleichung:

 $x^2 + y^2 - 2xy\cos\varphi = a^2\sin^2\varphi.$

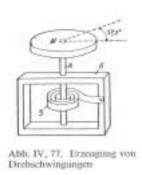
Für $\varphi = 0$ und $\varphi = \pi$ artet die Ellipse wieder in eine Gerade durch den 1. und 3. bzw. 2. und 4. Quadranten aus, die unter 45° bzw. – 45° gegen die Abszissenachse geneigt sind. Die Amplitude dieser geradlinigen Schwingungen ist a√2. Betrachtet man die Gerade wieder als entartete Ellipse, so kann man auch sagen, daß die große Achse der Ellipse ihren maximalen Wert $a\sqrt{2}$ die kleine den Minimalwert Null habe. Wächst φ von 0 an bis $\pi/2$, so nimmt die große Achse ab, die kleine zu, wobei aber die große Achse mit der x-Richtung jetzt dauernd den Winkel 45° bildet; bei $\varphi = \pi/2$ werden beide Achsen gleich groß, nämlich gleich a, d. h. die Ellipse wird ein Kreis vom Radius a, die Schwingung wird zirkulär. [...] Zwei senkrecht zueinander erfolgende Schwingungen gleicher Frequenz und Amplitude ergeben im allgemeinen eine elliptische Schwingung, die unter besonderen Umständen ($\varphi = \pi/2$ oder $3\pi/2$) in eine kreisförmige oder (für $\varphi = 0$ oder π) in eine geradlinige Schwingung ausarten kann. [...] Die bisher besprochenen Schwingungskurven kann man mit einem einfachen Pendel verwirklichen: Ein solches Pendel kann ja in allen möglichen Richtungen ebene Schwingungen ausführen. [...] Erteilt man dagegen der Pendelkugel den Stoß senkrecht zur Schwingungsrichtung, wenn sie sich gerade im Umkehrpunkt der

Zerlegung – als Ausgangsposition – her betrachtet kann einerseits über das sogenannte Drehpendel¹¹³ (GRAPHIK 22, 23) als logischen Zwischenschritt,



Graphik 22

das aus einer partiell rotierenden – d. h. pendelnde – Scheibe besteht, die in (pendelnde) Drehschwingungen versetzt werde¹¹⁴,



Graphik 23

und andererseits über die Phasenverschiebung um 90° der Schwingungen bei der Koppelung zweier Pendel¹¹⁵ (GRAPHIK 11) als zweiten Zwischenritt, die Koppelung unserer zwei axial parallel gegenläufig rotierenden Kreiseln¹¹⁶ (GDSR) angenähert und als zumindest als Analogie – wenn nicht als Entsprechung – angenommen werden. Insofern nämlich eine Kreisschwingung (GRAPHIK 13), bzw. ein Pendel (GRAPHIK 23) als partielle Rotation¹¹⁷

Schwingungsbewegung befindet, so entsteht als resultierende Schwingung eine Ellipse oder ein Kreis, je nach Stärke des

Stoßes." Vgl Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 665 Abb 22.7, 669 ff.

113 Bergmann/Schäfer I (1975) 192 Abb IV 97; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 604 Abb 20.10b; 652 Abb 21.23.

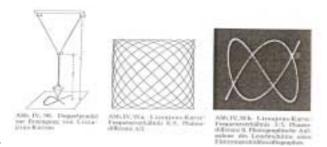
¹¹⁴ Bergmann/Schäfer I (1975) 175 Abb IV 77; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 604 Abb 20.10b.

115 Bergmann/Schäfer I (1975) 198 Abb IV 104 – 105.

¹¹⁶ Magnus 434 f.

¹¹⁷ Broelmann 45 ff: "Foucaults Gyroskop stellte das Resümee zweier Experimentalreihen dar – inhaltlich der Fall- und Pendelversuche, technisch der Demonstrationen Bohnenbergers und Johnsons. [...] Foucaults Überführung der Schwingung des Pendels in einen rotierenden Körper in Form des Torus verlief analog einem aus der künstlerischen «Anschauung» heraus entwickelten Gedankengang, den Paul Klee formulierte: «so tritt durch den Wegfall irdischer Gebundenheit [des Pendels] sofort die kosmische Bewegungsform ein: das Pendel schwingt im Kreis herum.» Vermutlich ohne die Physikalischen Begriffe dieser Instrumente zu kennen, beschrieb Klee sehr anschaulich den Übergang vom Pendel zum Kräftefreien Kreisel, dessen Achse auf den Fixsternhimmel ausgerichtet ist. Mit diesem Übergang zur schnellen Rotation reduzierte Foucault das unhandliche Pendel auf die Dimension einer Taschenuhr, was die Kompatibilität des Gyroskops förderte und die späte Verwendung in Fahrzeugen erleichterte. [...] Der Versuch zur Deviation verlief analog zum Pendelversuch. Er zeigte die Bewegung der Erde durch die Abweichung (Deviation) der Richtung der Rotationsachse von der Winkelveränderung der

zweidimensional für die Wechselwirkung der Rotation mit sog. Eingangssignalen stehen kann, etwa bei der seitlichen Verschiebung des Foucaultschen-Pendels infolge der Erdrotation¹¹⁸ (GRAPHIK 27, 29), was mit dem – ebenfalls auf die Erdrotation reagierenden – Kreiselkompass (GRAPHIK 28, 31) funktionell korrespondiere¹¹⁹, so können von der partiellen Kreisschwingung des Pendels – verallgemeinerungsfähige – Rückschlüsse auf die Rotation des Kreisels, nämlich auch im Hinblick auf die Koppelung, gezogen werden¹²⁰ (GRAPHIK 17, 24, 25).



Graphik 24

Denn die Interferenz zweier senkrecht zueinander erfolgenden Schwingungen des Pendels gleicher Frequenz und gleicher Amplitude eine Kreisbahn beschreiben¹²¹ (GRAPHIK 25), und so – durch Rückschluss – auch erklärt werden kann, warum die Kreisbahn des Kreisels bei Einganssignalen um 90° phasenverschoben reagiert¹²²: Die Kreisschwingung des Pendels und damit optisch bis zu einem gewissen Grad die Rotation, kann also scheinbar als die Überlagerung bzw. Interferenz zweier senkrechten Bewegungen aufgefasst werden.



Abb. IV, Rt. Zusammensetzung zweier aufeinander senkrechter Schwingungen gleicher Frequenz bei verschiedenen Phasendifferenzen v.
a) bei verschiedener Amplitude
b) bei gleicher Amplitude

Graphik 25

Bei gekoppelt parallel gegenläufigen Kreiseln vergrößert bzw. addiert sich die je 90° Phasenverschiebung zwischen den beiden gegenläufigen Rotationskörper auf 180°, d. h. umgangssprachlich, dass alle Resonanzen wie mit ihrem Spiegelbild, bzw. ein Fotonegativ

Erdoberfläche. Am anschaulichsten wird dieser Vorgang an den Polen, wo sich die Erde einmal in 24 Stunden unter der Pendelebene dreht. Da in der Navigation eine Richtung in der Horizontebene das Azimut genant wird, entsprach die Richtung der Pendelebene dem später danach benannten «Azimutkreisel». Das Pendel wurde daher auch gelegentlich zu dessen Beschreibung herangezogen."

¹¹⁸ Magnus 471 Abb 16.7; Bergmann/Schäfer I (1975) 215 f; Broelmann 43 Abb I.9; Riethmüller 77 ff.

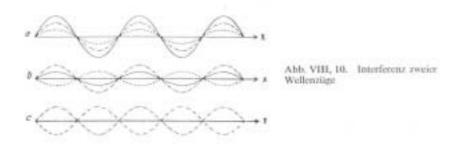
¹¹⁹ Magnus 399 ff; Bergmann/Schäfer I (1975) 218 f; Broelmann 45 ff, 140, 161 f, 203 ff, 227 f, 259.

¹²⁰ Broelmann 45 ff, 203 ff.

¹²¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 185 f.

Bergmann/Schäfer I (1975) 186: "Mit der Phasendifferenz zwischen beiden Schwingungen ändert sich das Achsenverhältnis der Ellipsen, während ihre großen Achsen gegen die x-Achse stets unter ±45° geneigt sind."

mit einem Positiv in Deckung gebracht wird, und alle Eingangssignale werden absorbiert¹²³. bzw. durch Interferenz – über die Koppelung der Kreisel – ausgelöscht¹²⁴ (GRAPHIK 26). Es muss allerdings der Dauertest unter Turbobedingungen zeigen¹²⁵, ob und wie weit auch die Ausgangssignale bzw. (internen) Systemstörungen durch die Koppelung, oder auf anderen Wegen neutralisiert werden¹²⁶.



Graphik 26

Insofern der technologische Fortschritt heute schon so weit ist, dass durch Wuchten oder Präzisionsarbeit störungsfreie Schwungräder für den Turbobetrieb zu bauen, so würde nach der – in dem Langzeit-Härtetest¹²⁷ noch nicht erprobte aber kurzfristig schon (mit Hilfe zwei mit dem Rücken zusammengebundenen gegenläufigen Schleifmaschinen, d. h. bei ca. 3.000 Umdrehungen in der Minute) grob überprüfte und funktionierende Theorie – also besagten, dass das parallel gegenläufige Doppelschwungrad (GDSR) infolge der Koppelung der gegenläufigen Schwungräder¹²⁸ mit paralleler Rotationsachse (GRAPHIK 3, 5) resonanzfrei

Kaußen, Mechanik (MEC) und Elektrodynamik (EDY), Kapitel 7 Wellen, in: < http://www.fhluh.de/physik/download/13welle ba.doc >; "Wellen überlagern sich additiv, ohne gegenseitige Beeinflussung der Einzelwellen: $u_{ges} = u_1 + u_2$ (Superposition).

Beispiel: Gleiche Wellen mit Phasenverschiebung (Interferenzen)

 $u_1 = u_0 \sin[\omega t - kx]$ und $u_2 = u_0 \sin[\omega t - kx + \varphi]$

 $u_{ges} = u_1 + u_2 = u_0 \sin[\omega t - kx] + u_0 \sin[\omega t - kx + \varphi] = u_0 \{\sin[\omega t - kx] + \sin[\omega t - kx + \varphi]\}$

Mit dem Zusammenhang $\sin(\alpha) + \sin(\beta) = 2\sin(\frac{\alpha + \beta}{2})\cos(\frac{\alpha - \beta}{2})$ folgt weiter:

 $u_{\text{ges}} = u_0 \{ sin[\omega t - kx] + sin[\omega t - kx + \phi] \} = 2u_0 sin(\frac{\omega t - kx + \omega t - kx + \phi}{2}) cos(\frac{\omega t - kx - \omega t + kx - \phi}{2})$

$$u_{ges} = 2u_0 \cos(\frac{\varphi}{2}) \sin(\omega t - kx + \frac{\varphi}{2})$$

 u_{ges} ist wieder eine harmonische Welle gleicher Frequenz. Amplitude und Phase hängen von φ ab. $2u_0\cos(\frac{\varphi}{2})$ ist die

Amplitude von uges

 $\phi = 0 \Rightarrow$ Amplitude $2u_0$ (konstruktive Interferenz, Verstärkung)

 $\varphi = \pi = 180^{\circ} \Rightarrow$ Amplitude 0 (destruktive Interferenz, Auslöschung)". Schweitzer/Traxler/Bleuler 116 ff.

¹²⁵ Fremerey 242 f.

¹²⁶ Schweitzer/Traxler/Bleuler 118 ff, 129 ff.

¹²⁷ Kolk 125 f, 129.

¹²⁸ Magnus 434 f; Bergmann/Schäfer I (1975) 176 Abb IV 79..

im Turbobetrieb laufe, weil zumindest alle äußeren Einwirkungen¹²⁹ - wie Präzession - in der (um 180° phasenverschobenen) Koppelung absorbiert werden und keinerlei Ablenkungen oder Resonanzen auf der Ebene des Kreiseleffekts¹³⁰ auftreten können, sondern faktisch alle Kreiselfunktionen durch die Koppelung der gegenläufigen Kreisel mit der parallelen Rotationsachse vollständig aufgehoben wurden ¹³¹.

Aenis 89 ff.
 Magnus 434 f; Schweitzer/Traxler/Bleuler 115 ff, 151 ff; Calotti 10 f; Kaußen, Mechanik (MEC) und Elektrodynamik (EDY), Kapitel 7 Wellen, in: http://www.fh-luh.de/physik/download/13welle_ba.doc
 Magnus 434 f; Schweitzer/Traxler/Bleuler 116 ff.

1.2 Absorption

Wenn zunächst aus dem einen Gesichtspunkt betrachtet diese Verdoppelung des Schwungrades optisch wie eine Halbierung der Leistung bei verdoppeltem Aufwand anmute, weil – in vielen Anwendungen – nur von dem einen Rad aus der einen Richtung die Leistung abgenommen werden könne, so erweist sich diese Optik als trügerisch, denn die zwei gegenläufigen Räder sind mit einem Differential verbunden¹³², bzw. gekoppelt, die extern gleiche Leistung bringen. Die interne Aufteilung des einen Rades auf zwei gegenläufigen Axialräder (oder Räder mit paralleler Achse) ist und bleibt (aufgrund der internen Koppelung) eine interne Angelegenheit (GRAPHIK 2), während nach außen (energetisch) nur ein Rad in Erscheinung tritt, und diese die Kraft beider repräsentiert¹³³.

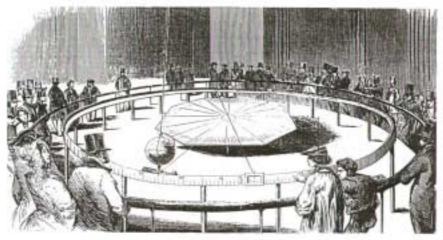


Abb. I.9: Foucaults Pendelversach vor «Zeugen der Wissenschaft» (L'Illustration, 5.4.1851, S. 713).

Graphik 27

Bei Resonanzen der Schwungräder¹³⁴ – besonders der Turboklasse – ist vom Foucaultschen Pendel¹³⁵ auszugehen, das nur eine partielle Rotation extrem niedriger Frequenz ist¹³⁶, aber eine Rotation, und durch die Erdrotation scheinbar trotzdem einen seitlichen Impuls – ähnlich dem Kreisel – erhält¹³⁷, also durch ein Außensignal aus seiner statischen Lage abgelenkt wird (GRAPHIK 27). Diese Ablenkung ist zumindest tagesperiodisch (GRAPHIK 34, 36), was bei

¹³² Luck/Modler 141 ff; Scherr-Thoss 38, 44: Für das GDSR hatte ich in einem Annäherungsversuch, der sich mit maximal 3000 U/m nicht dem eigentlichen Test eignet, aus einem Modellauto ein Differentialgetriebe mit drei Kegelzahnrädern ausund umgebaut, so dass die gegenläufigen Räder wie ein Rad nach außen reagieren: ähnlich wie die Hinterachse eines Autos, nur gegenläufig.

¹³³ Vgl Magnus 434 f.

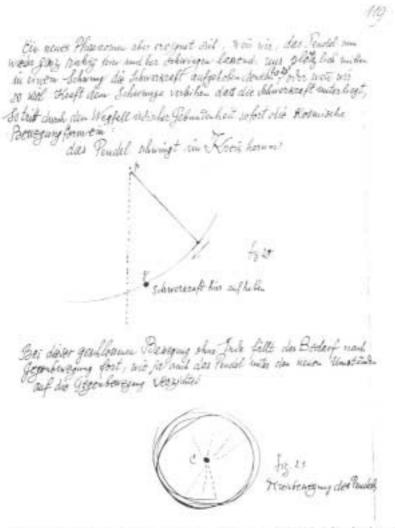
¹³⁴ Aenis 89 ff.

¹³⁵ Bergmann/Schäfer I (1975) 215 f; Broelmann 43 Abb I.9.

¹³⁶ Broelmann 45 ff.

¹³⁷ Magnus 471 Abb 16.7; Aenis 89 ff; Broelmann 45 ff, 203 ff, 225 ff; vgl Riethmüller 77 f.

einem größeren Energiespeicher¹³⁸ im Langzeitbetrieb zu Eigenschwingungen führen könnte¹³⁹.



Abil 1.13: Der Übergang vom Pendel zur Kotanonsbewegung in der kinnslenischen Anseltan entwickelt von Paul Klee (Klee 1979, 119).

Graphik 28

Von dort ist die Funktionsweise und Ablenkung des Kreiselkompasses¹⁴⁰ bei analoger Fremdeinwirkung von außen einsehbar (GRAPHIK 31, 35), und kann gezeigt werden, dass hier bei der vollen Rotation des Foucaultschen Kreisels (im Gegensatz zu der partiellen Rotation des Foucaultschen¹⁴¹ Pendels nach GRAPHIK 29) nicht nur eine scheinbare seitliche zweidimensionale Ablenkung im Hinblick auf die statische Position wie beim Pendel sich bemerkbar macht, sondern, aufgrund der schiefen Rotationsachse und anderer Anomalien der Erdbahn¹⁴² (GRAPHIK 30), wie die Drehung um die Sonne, der Kreiselkompass sich nicht

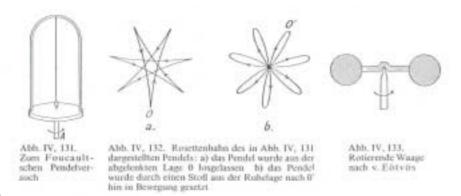
¹³⁸ Menz 1 ff, 6 ff, 110 ff.

¹³⁹ Broelmann 225 ff.

¹⁴⁰ Broelmann 45 ff, 122, 203 ff, 225 ff, 259, 314 ff; vgl Magnus 399 ff; Bergmann/Schäfer I (1975) 218 f; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 348 ff.

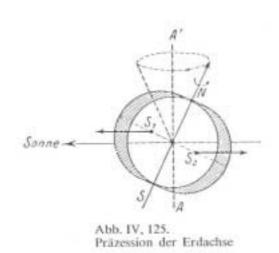
¹⁴¹ Broelmann 42 ff; Bergmann/Schäfer I (1975) 110 ff, 209; vgl Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 264 Abb 8.20. 142 Riethmüller 78 Bild 5.2.

nur zweidimensional, sondern dreidimensional (bezogen auf die statische Position) verschiebe¹⁴³.



Graphik 29

Auf dieses dreidimensional wirksame Phänomen beruht der Kreiselkompass¹⁴⁴, weil im Gegensatz zu der nur zweidimensionalen Ablenkung des Foucaultschen Pendels (GRAPHIK 29) in der partiellen Rotation, die volle Rotation des Foucaultschen Kreisels bzw. Kreiselkompasses (GRAPHIK 28, 32) dreidimensional reagiere¹⁴⁵.



Graphik 30

Aus der Funktion des Kreiselkompasses¹⁴⁶, der ja stationär ausschließlich mit Hilfe der Wirkung der Eingangssignale der Erdbewegungen auf das Schwungrad des Kreisels als Ablenkung reagiere¹⁴⁷, der Beweis der permanenten und periodischen Außensignale auf jedes Schwungrad im stationären Betrieb ableitbar¹⁴⁸.

¹⁴³ Broelmann 45 ff, 122 ff, 203 ff, 225 ff, 259, 314 ff, Magnus 399 ff, 471 Abb 16.7; Bergmann/Schäfer I (1975) 210 ff, Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 350 Abb 11.18.

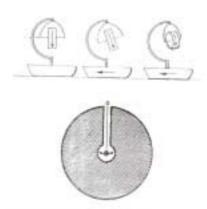
¹⁴⁴ Riethmüller 77 ff; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 348 ff.

¹⁴⁵ Magnus 399 ff, 471 ff; Broelmann 45 ff, 122 ff; Bergmann/Schäfer I (1975) 215 f, 218 f; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 352 Abb 11.20.

¹⁴⁶ Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 348 ff.

¹⁴⁷ Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 350 Abb 11.18.

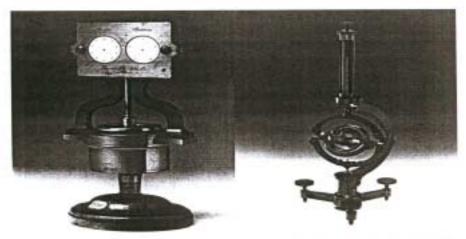
¹⁴⁸ Riethmüller 78 Bild 5.2; Broelmann 45 ff, 122, 203 ff, 225 ff, 259, 314 ff.



786, 1779. Der hallistische Fehler. Der Kreisel mit Schwerpunktrahsenkung erweist sich bei Beschleunigungen des Fahrzeuges als hallistisches Penald, was den skullistrichen Feliless hervorruft. (vgl. Abb. V.12, Skizae il. Vert.) Dieser Fehler wird nach Schuler dann vernueden, wenn die Schwingungsdauer des Kreiselpendels so-subgretinimt- ist, daß sie 84 Minuten heträgt. Ein Pendel berkömmlicher Art mit dieser Schwingungsdauer hat eine Pendellänge, die dem Erdradius emspricht. Es läßt sich daher im Enfortelpunkt ruhend veranschaulichen, wa es von den Beschleutigungen des Aufhängepunktes unbecinflufit bleibt (unten, nach Magnus 19731.

Graphik 31

Ablenkungen oder Resonanzen beim Kreisel im Turbobetrieb durch die Erdbewegung¹⁴⁹ (GRAPHIK 34, 36), aber auch die Eingangsignale im mobilen Betrieb¹⁵⁰ wie im Auto¹⁵¹, müssten sämtlich im gegenläufig gekoppelten Doppelschwungrad ausgelöscht, bzw. aufgehoben sein.



(SCINAM Inv. Nr. 6291, Fore Studio CNAM).

Abb. 1.10: Sinene des Cagniard de la Tour 1920 - Abb. 1.11: Lzinn Fouçaulta Gyroskop 1852; dan den Turbinenläufer der Sieene als Rotationskörper übernimmt. (© CNAM Inv. Nr. 7688/1, Form M. Pasquett.

Graphik 32

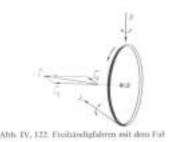
¹⁴⁹ Riethmüller 77 ff; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 350 Abb 11.18.

¹⁵⁰ Aenis 89 ff. Calotti 7, 10 f.

32

1.3 Rotationssymmetrie

Diese Theorie des GDSR mit axialer Koppelung oder mit paralleler Rotationsachse¹⁵² zweier gegenläufiger Kreisel wäre in der Erprobung natürlich nicht auf die Erdrotation angewiesen¹⁵³, sondern sollte zeigen, dass vergleichsweise die analoge Ablenkung des Lenkrades eines Fahrrades¹⁵⁴ (GRAPHIK 33),



Graphik 33

das durch den nämlichen Kreiseleffekt das Fahrzeug bei seitlicher Ablenkung in die Kurve legt, oder beim geradlinigen Fahren im Gleichgewicht hält, in Falle eines axial und/oder parallel gegenläufig gekoppelten Doppelrades (wenn das gegenläufig gekoppelte Doppelrad den Boden nicht berührt) nicht mehr lenkbar und fahrbar wäre, zumindest nicht in der herkömmlichen Form. Entsprechend wäre also auch ein Kreiselkompass¹⁵⁵ mit axial (oder parallel) gekoppelten gegenläufigen Doppelkreisel nicht arbeitsfähig und würde – in der starren Verankerung – nicht mehr auf die Erdrotation oder auf andere Ortsveränderungen reagieren¹⁵⁶.

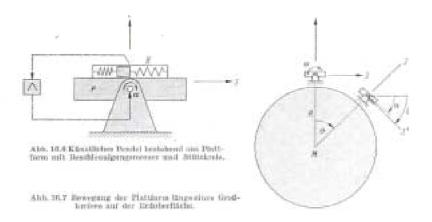
¹⁵² Magnus 434 f.

¹⁵³ Broelmann 122 ff; Vgl Bergmann/Schäfer I (1975) 216 Abb IV 131.

¹⁵⁴ Broelmann 125 ff, 164; Riethmüller 77 ff; Bergmann/Schäfer I (1975) 110 ff, 209; vgl Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 279 Abb 9.8b, 306 Abb 10.3, 312 Abb 10.9.

¹⁵⁵ Magnus 399 ff; Bergmann/Schäfer I (1975) 218 f; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 348

ff 156 Magnus 471 ff; Broelmann 45 ff, 203 ff, 225 ff.



Graphik 34 form aus der Horizontalen ein Meßeignal über einen Verstärker au einen

Auf dieser theoretischen Grundlage wäre in der Turbotechnologie¹⁵⁷ grundsätzlich zu prüfen, ob nicht sämtliche Rotationsköper, zumal im stationären Betrieb (GRAPHIK 34, 36), zumindest in der Turbotechnologie als axial – oder parallel – gegenläufige Doppelräder (GDSR) gebaut werden müssten¹⁵⁸. Das würde nicht nur alle Turbinen¹⁵⁹ und Kreiselpumpen (GRAPHIK 2, 7, 9, 87) betreffen¹⁶⁰, sondern theoretisch sämtliche Rotationskörper, sofern die Resonanzen nicht verschwindend gering wären¹⁶¹.

-

¹⁵⁷ Rueegg, in: < http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html >; Fister II 7: "Da das Laufrad wegen der Optimierung des Bauaufwandes im allgemeinen mit hoher Umlaufgeschwindigkeit rotiert, orientiert sich seine Formgebung außer an Strömungstechnischen Belangen vor allem an festigkeits- und fertigungstechnischen Gesichtspunkten."

¹⁵⁸ Magnus 434 f; Fister II 11 f: "Wie aus den Schnitten dieser beiden Verdichter hervorgeht, können die Laufräder auf einer Welle gleich- oder gegenläufig angeordnet werden. [...] Statische Druckdifferenzen und zeitliche Impulsänderungen erzeugen am Rotor Axialkräfte, die entweder durch Axiallager aufgenommen oder durch besondere Stufenanordnungen bzw. Druckausgleicheinrichtungen kompensiert werden müssen. So ist z. B. durch eine gegenläufige Anordnung der Laufräder der Axialschub zu (Bild 7.13 a, b).[...] Bei mehrstufigen, einwelligen und gleichläufigen Verdichtern oder Pumpen wird der Axialschub häufig nicht am einzelnen Laufrad, sondern mit einer besonderen Einrichtung für das gesamte Rotor ausgeglichen. Bei Pumpen werden sowohl Entlastungsscheiben mit Gegenscheiben unter Verzicht auf ein Axiallager (Bild 7.13f) als auch partielle Kompensationen mittels Entlastungskolben (Bild 7.13e) mit zusätzlichen Axiallagern und jeweiliger Rückführung der durch diese Entlastungseinrichtungen fließenden fließenden Leckströme in den Eintrittsstutzen der Maschine benutzt. Bei Verdichtern wird im allgemein der Entlastungskolben bevorzugt, wobei ein Axiallager zur Aufnahme des Restschubes nötig ist. Um ein instabiles axiales Pendeln des Rotors zu vermeiden, wird beim Ausgleich darauf geachtet, daß sich die Richtung der Axialkraft über den gesamten Betriebsbereich nicht ändert."

¹⁵⁹ Stachel 4 ff; Fister I 22; Rueegg, in: < http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html >. ¹⁶⁰ Käppeli 89 ff; Fister II 11 f, 23, 26 ff, 37, 43 ff.

¹⁶¹ Broelmann 123 f: "Auch im Schiffsbetrieb wurde um 1870 über Probleme mit Kräften berichtet, die Schwungräder als «enorme Gyroskope» bei den Bewegungen der Schiffe ausübten. [...] Ein Torpedo, 1884 von Hovell konstruiert, erhielt seine Antriebsenergie aus einem Schwungrad, das über eine externe Dampfturbine vor dem Abschuß auf eine hohe Drehzahl gebracht wurde. Als der Torpedo aber mit laufendem Schwungrad auf sein Ziel gerichtet werden sollte, war dies nur unter Aufbietung aller Kräfte möglich, bis man bemerkte, daß man stattdessen nur das Begleitschiff aus seiner Richtung gedreht hatte. [...] Die ungünstigeren Massenverhältnisse von Motoren der relativ leichten Fahrzeuge der Luftfahrt zeigten dagegen bald deren gyroskopische Wirkungen. Erste Hinweise in Luftschiffen 1898 wurden weiter diskutiert und für Flugzeuge fortgesetzt, besonders Rotations- und «Gyro»-Umlaufmotoren." Vgl aaO 146 f: "Schon Thompson bemängelte gegenüber Helmholtz: «a great shaking from the screw [...] almost prevents me from being able to write legibly». Außer einem nachteiligen Werbeeffekt waren Vibrationen schließlich auch Anlässe für Schäden. So verlor der Schnelldampfer «Deutschland» im Atlantik wichtige Teile wie Ruder und Hintersteven. Brüche von Propellerwellen bestätigten, daß «bisher nicht genügend erkannte Kraftwirkungen dynamischer Natur» am Werke waren."

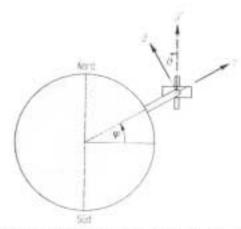
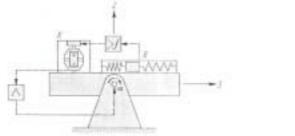


Abb. 13.3 Orientierung des Inklimationskreisels im eingeschwungenen Zustand.

Graphik 35

Im stationären Turbobetrieb entsteht etwa durch die Erdrotation¹⁶² schon binnen Minuten, ja binnen Sekunden eine Ablenkung (GRAPHIK 34, 36), was am Lauf der Sonne oder am Foucaultschen Pendel ablesbar wäre 163, und diese Ablenkung trägt auf jeden Rotationskörper von außen eine Spannung auf, die früher oder später – zumindest im Turbobetrieb – zu Resonanzen und ähnlichen Störungen führen müsse¹⁶⁴. Im mobilen Betrieb genügt es die Funktion des Kreiselkompass oder Fahrrades¹⁶⁵ (GRAPHIK 31, 33) zu vergegenwärtigen, um die Bedeutung der Außeneinwirkung auf die Rotation zu realisieren 166.



Abdi. 19.9 Hardoutlante Platiform und Folgeregelkreis mit Seschleunigungsroesser und Wendahreisel

Graphik 36

Eine Magnetlagerung würde infolge der Elastizität¹⁶⁷ der Lagerung die Resonanzen eher noch verstärken, wenn die Resonanzen bzw. Erregungen von außen nicht mit einem GDSR ausgeglichen bzw. immunisiert werden. Die Theorie würde allerdings einen störungsfreien Lauf von GDSR mit PR voraussagen, weil auch die systeminternen Erregungen (Unwuchten)

¹⁶² Magnus 471 Abb 16.7; Riethmüller 77 ff.

Bergmann/Schäfer I (1975) 215 f; Bergmann/Schäfer I (1975) 110 ff, 209; vgl Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 263 Abb 8.19; Broelmann 43 Abb I.9, 228 Abb V.12.

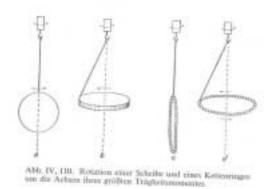
¹⁶⁴ Bergmann/Schäfer I (1975) 196 ff.

¹⁶⁵ Bergmann/Schäfer I (1975) 110 ff, 209; vgl Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 279 Abb 9.8b, 306 Abb 10.3, 312 Abb 10.9.

¹⁶⁶ Broelmann 123 ff, 164; Magnus 399 ff; Schweitzer/Traxler/Bleuler 116 ff; vgl Aenis 89 ff; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 350 Abb 11.18. ¹⁶⁷ Schweitzer/Traxler/Bleuler 165 ff.

bereits durch die nämliche Elastizität kontrollierbar sind¹⁶⁸, was sich im Test bestätigen oder widerlegen möchte¹⁶⁹.

Bei einem Test¹⁷⁰ im Turbobetrieb sollte berücksichtigt werden, dass herkömmliche Kreisel und Schwungräder, starr mit der Achse (GRAPHIK 44) verbunden sind¹⁷¹, selbst bei der herkömmlichen Magnetlagerung der Achse, die noch relativ elastisch ist, während bei der Magnetlagerung von GDSR, wo die virtuelle Achse als Linearmotor auf der Kreisbahn eigentlich ein relativ großer Ring ist, durch die Elastizität¹⁷² der Magnetlagerung zusätzliche Resonanzen zu erwarten sein werden¹⁷³, bzw. solche kalkuliert und allenfalls ausgeschlossen werden müssen, die an einem starren Kreisel nicht der Fall wären¹⁷⁴. Dies könnte auch einen positiven Effekt haben, insofern erstens der Kreisel etwa im Falle der Nutation¹⁷⁵ sich mit der Zeit selbst wieder gerade richtet¹⁷⁶ (GRAPHIK 19, 44), und zweitens gerade bei den elastischen oder beweglichen Vorrichtungen ein ähnlicher Effekt zu beobachten ist¹⁷⁷.



Graphik 37

Wenn man zB eine Scheibe aus festem Material auf eine Schnur so aufhängt, dass die Schnur nicht in der Mitte der runden Scheibe sondern am Rand befestigt ist, und die Schnur rotiert, wobei die daran befestigte Scheibe zunächst herunterhängt (GRAPHIK 37 a), so begibt sich die mit der Zeit mit der Schnur elastisch – um den Massenschwerpunkt – rotierende Scheibe gleichfalls auf eine Kreiselbahn (GRAPHIK 37 b) und hat trotz der seitlichen Aufhängung

¹⁶⁸ Schweitzer/Traxler/Bleuler 157 f.

¹⁶⁹ Kolk 125 f, 129; Schweitzer/Traxler/Bleuler 132: "Wir haben bisher stillschweigend angenommen, daß die Angriffspunkte der Lagerkräfte auf der geometrischen Symmetrieachse des Rotors liegen. Daß muss aber bei einer konkreten Lagerung keineswegs so sein, d. h., der Rotor kann krumm sein. Bei einer magnetischen Lagerung kommt zusätzlich hinzu, daß die "magnetische Achse" des Rotors, wo die Resultierenden der magnetischen Lagerkräfte hindurchgehen, ebenso von der geometrischen Achse abweichen kann wie die "Sensorachse". Das ist die Achse, deren Bewegung von den Sensoren gemessen wird, und wo das Messergebnis auch vom richtigen Einbau der Sensoren abhängt. Diese Abweichungen vom Idealzustand können alle zu Schwingungsanregungen des Rotors oder zu Verschiebungen seiner Drehachse führen. Modellierungen für diese Art von Anregungen fehlen noch weitgehend bei Magnetlagern."

¹⁷⁰ Kolk 125 f, 129; Fremerey 242 f.

¹⁷¹ Kolk 72 ff; vgl Rueegg, in: < http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html >.

¹⁷² Schweitzer/Traxler/Bleuler 165 ff.

¹⁷³ Schweitzer/Traxler/Bleuler 115 ff, 125, 133 ff, 151 ff.

¹⁷⁴ Schweitzer/Traxler/Bleuler 157 f.

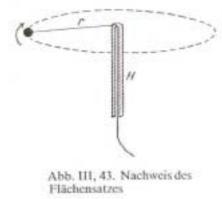
¹⁷⁵ Schweitzer/Traxler/Bleuler 117.

¹⁷⁶ Bergmann/Schäfer I (1975) 204 f, 208 Abb IV 119.

¹⁷⁷ Bergmann/Schäfer I (1975) 203; Schweitzer/Traxler/Bleuler 157 f.

(Unwucht) einen ruhigen Lauf als Rotation¹⁷⁸, wobei die Achse der – an einer Schnur mit rotierenden - Scheibe als Rotationsachse mit der Rotationsachse der Aufhängung der rotierenden Schnur (axial) zusammenfalle. Es gibt also in der – elastischen – Rotation systemintern so eine Art automatisches bzw. selbstregulierendes Gleichgewicht, dass bei der Magnetlagerung – mit einiger Vorsicht – angewendet werde ¹⁷⁹.

Analog der Unwucht der an einem Faden seitlich am Rand aufgehängten rotierenden Scheibe kann man eine Perlenkette an einem Punkt aufhängen (GRAPHIK 37 c) und beginnen die Aufhängung in Rotation zu versetzen, wobei sich die vorher lose herunterhängende Perlenkette trotz der seitlichen Aufhängung in der beginnenden Rotation so zu einem Kreisel bildet (GRAPHIK 37 d), wie zuvor die Scheibe, dass die Perlen kreisförmig symmetrisch um die Rotationsachse angeordnet sind, obwohl die Schnur von der rotierenden Achse nicht zur Mitte der Perlenkette sondern seitlich zu einem Punkt geht¹⁸⁰. In diesem Fall kann darüber hinaus von einem Idealfall der elastisch gekoppelten Kreisschwingung gesprochen werden, wenn jede einzelne Perle als quasi Pendel bzw. Rotationskörper¹⁸¹ in der Kreisschwingung so fungiert, dass nur eine einzige Perle in der Kette zur Kreisschwingung angeregt werde, und alle anderen lediglich mit dieser einzigen Perle (GRAPHIK 38) gekoppelt sind.



Graphik 38

¹⁷⁸ Bergmann/Schäfer I (1975) 203 Abb IV 110 a-b; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 356 Abb 11.25a.

179 Schweitzer/Traxler/Bleuler 157 f.

¹⁸⁰ Bergmann/Schäfer I (1975) 203 Abb IV 110 c-d; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 356 Abb 11.25b.

181 Magnus 251: "Wiederum andere Ergebnisse folgen für Kreisel, deren Hohlräume nur zum Teil mit Flüssigkeit gefüllt

sind. Das ist beispielsweise bei den Treibstoffbehältern drallender Raketen der Fall. Hier muß das Treibstoffschwappen berücksichtigt werden. Unter vereinfachenden Voraussetzungen hat STEWARTSON [51] zeigen können, daß instabiles Verhalten stets dann zu befürchten ist, wen die Frequenz irgendeiner der freien Eigenschwingungen der Flüssigkeit in der die Nähe der Nutationsfrequenz für den leeren Körper fällt. Da zweifach unendlich viele Eigenschwingungen der Flüssigkeit möglich sind, gibt es ebensoviele instabile Bereiche, von denen jedoch, wie Versuche gezeigt haben, nur den ersten eine praktische Bedeutung zukommen dürfte. Es kann angenommen werden, daß die stets vorhandene Dämpfung der Flüssigkeitseigenschwingungen durch innere Reibung die Instabilitätsbereiche höherer Ordnung zum Verschwinden bringt. Die Eigenschwingungen und damit auch die instabilen Bereiche hängen vom Füllungsgrad des Hohlraums ab." Vgl Bergmann/Schäfer I (1975) 112 Abb III 43; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 327 Abb 10.25.

In der analogen Anwendung auf Flüssigkeiten könnte das heißen¹⁸², was auch noch getestet bzw. im Experiment bestätigt oder wiederlegt werden müsste, dass eine Flüssigkeit in einem Schwungrad auf natürliche Weise das Rad quasi "wuchten" würde (GRAPHIK 39), bzw. die systeminterne Unwucht¹⁸³ würde verschwinden. So ähnlich wie das bei Magnetlager ebenfalls weitgehend analog festgestellt werden konnte¹⁸⁴.



Graphik 39

Der Unsicherheitsfaktor der Elastizität für starre Körper erweist sich also im Kreisel als Freiraum für eine Eigendynamik, damit sich der Kreisel bei Unwucht wieder gleichsam sich selbst regulierend einpendelt. Analog richtet sich ein seitlich angestoßener Kinderkreisel quasi elastisch wieder auf (GRAPHIK 40), wenn genug Freiraum für die Nutation vorhanden ist¹⁸⁵.

¹⁸² Magnus 246 ff.

Ganz anders ist die Situation bei Magnetlagern mit geringer dynamischer Steifigkeit. Hier wird das Lager schon bei kleiner dynamischer Störkraft, wie z. B. die drehfrequenten Unwuchtkräfte, "nachgeben". Der Rotor ist also frei, um seine Hauptträgheitsachse zu drehen. [...] Es kann gezeigt werden, daß Magnetlager sogar Unwuchten, wie sie beispielsweise beim Schaufelverlust einer Turbine entstehen, aufnehmen können /VIGG 90/.[...] Aktive Magnetlager ermöglichen es, solche periodische Störkräfte zum Verschwinden zu bringen. [...] Einige Magnetlager sind schon mit solchen Einrichtungen für kräftefreien Lauf ausgestattet. Sie werden oft "automatisches Auswuchtsystem" oder ähnlich genant. Da am Rotor selbst nichts geändert wird, sind solche Bezeichnungen vom mathematisch-physikalischen Standpunkt aus nicht korrekt. Zutreffender wäre es von "Unwuchtkompensation" zu sprechen."

¹⁸³ Magnus 250 f; Bergmann/Schäfer I (1975) 117 Abb IV 5; Schweitzer/Traxler/Bleuler 157 f: "Das Verhalten bei Unwucht kann sich bei einem magnetisch gelagerten Rotor wesentlich unterscheiden vom Verhalten eines konventionell gelagerten Motors. […] Dabei wird im allgemeinen die hohe Streifigkeit einer konventionellen Lagerung nicht erreicht. Dafür kann mit Leichtigkeit eine relativ geringe Steifigkeit erreicht werden, was sich oft als großer Vorteil erweist. Dies kann zu einem sogenannten "kräftefreien Lauf" führen. Durch eine integrierte Rückführung kann die Steifigkeit bezüglich einer statischen Last sehr hoch gemacht werden (s. Kapitel 2). Gleichzeitig kann bei der drehfrequenten Unwuchtkraft sehr geringe oder gar verschwindende Steifigkeit erzeugt werden. […] Da diese Rotations-Achse nie ganz genau mit der Hauptträgheitsachse zusammenfällt, entstehen Unwuchtkräfte proportional zum Quadrat der Drehzahl Ω, wie in Abschnitt 5.6 hergeleitet. Das führt dann als Reaktion zu hohen Lagerkräften, die als Rückgefälle auf das Maschinengehäuse oder das Fundament übertragen werden.

¹⁸⁴ Schweitzer/Traxler/Bleuler 157 f.

¹⁸⁵ Bergmann/Schäfer I (1975) 204 ff.

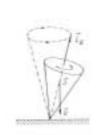


Abb. IV, 118. Präzession des Kinderkreisels



Abb. IV, 119. Präzession beim Kinderkreisel unter Berücksichtigung der Reibung

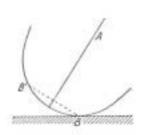


Abb. IV, 120. Aufrichtung eines rotierenden Kreisels

Es gilt nun im Test sicherzustellen, dass nicht etwa die Absorption im GDSR mit PR so weit gehe, dass auch die positiven Kreiseffekte der elastischen Selbstregulierung systemintern ebenfalls verschwunden seien. Von dem Ergebnis dieses Härtetest hinge es nun ab, ob und wie etwas umgebaut oder gar eine neue Dimension bekommen sollte¹⁸⁶. Wie die verschiedenen Antriebssysteme und Lagerungen – die in Frage kommen – zeigen, wäre weder der eine noch der andere Fall ein unlösbares Problem, doch gilt der Test¹⁸⁷ des axial/parallel gegenläufigen Doppelkreisels (GDSR) als die Voraussetzung dafür, ob und was im Turbobetrieb zum Einsatz kommen soll. Die Testergebnisse müssten also über den Modus des Weiterbaus näher bestimmen¹⁸⁸. Es wären dabei allenfalls auch größere Energiespeicher in vorstellbar, wo ein Schwungrad etwa die Größenordnung von Transrapid¹⁸⁹ (GRAPHIK 45, 50) hätte und in einer Kreisbahn¹⁹⁰ wie ein Fußballfeld so rotieren würde, dass die Zuglänge mit der Bahnlänge übereinstimmte. Und nach dem gleichen Prinzip könnte an Kreiselbatterien (Gyrobatterien) für Handys und Notebooks¹⁹¹ gedacht werden. Mit GDSR¹⁹² (und PR) wäre in einem Handy nicht spürbar, dass man eine Gyrobatterie habe, oder könnten Autos teils mit Schwungrad betrieben werden¹⁹³.

¹⁸⁶ Kolk 125 f, 129.

¹⁸⁷ Fremerey 242 f.

¹⁸⁸ Kolk 125 f, 129.

¹⁸⁹ Rathausky 13 ff. ¹⁹⁰ Bergmann/Schäfer I (1975) 83 Abb III 4.

< http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html >; Freeman/Dooher, http://www.heise.de/tr/leseprobe/pdfs/2005/energie1 tr1204.pdf >: "Andere Materialwissenschaftler und Ingenieure hatten bereits mit der Arbeit an neuen Methoden begonnen, stromproduzierende Maschinen so weit zu schrumpfen, dass sie Batterien ergänzen oder ersetzen können – ein neues Forschungsfeld namens "Power MEMs" entstand. Der verbreitetste Ansatz zielte auf das Verkleinern von Brennstoffzellen ab. Doch Epstein war davon überzeugt, dass Gasturbinen der bessere Ansatz seien, vor allem wegen ihrer unübertroffenen Fähigkeit, Energie aus Kohlenwasserstoff-Treibstoffen herauszuholen. Die Technologie ist noch attraktiver, wo die Minimierung von Gewicht und Volumen entscheidend ist, etwa bei tragbaren Geräten. Ein Düsen-Chip ist gerade mal halb so groß wie eine Mikro-Brennstoffzelle, die gleich viel Energie liefert. Eine Gasturbine sollte auch relativ einfach herzustellen sein, dachte Epstein, da man sie mit Standardmethoden komplett aus Silizium fertigen könnte. [...] Epsteins Zuversicht ist begründet in den grundsätzlichen Vorteilen, die er in den Turbinen sieht. Selbst Mikro-Brennstoffzellen sind größer, und sie sind viel heikler beim Treibstoff als ein Turbinenmotor. Und letztlich kommt alles auf die Leistung an. Die meisten Mikro-Brennstoffzellen stoßen mit Mühe ein oder zwei Watt aus, während Epsteins Prototypen 15 bis 20 Watt liefern können, mehr als genug, um ein energiehungriges tragbares Gerät zu betreiben."

¹⁹² Magnus 434 f; vgl Freeman/Dooher, < http://www.heise.de/tr/leseprobe/pdfs/2005/energie1 tr1204.pdf > 193 Kolk 131: "Mit dem Nachweis der Eignung von partiell passiven Magnetlagern für Schwungräder wird der Weg für weitere Entwicklungen hochtourigen Rotoren und mechanischer Energiespeicher geöffnet. Das permanentmagnetische

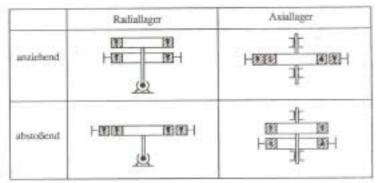
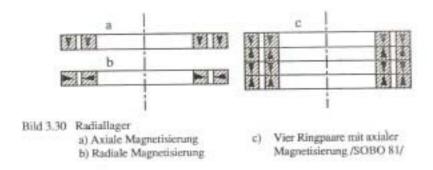


Bild 3.29 Systematik von Magnetlagern mit axial magnetisierten Ringen /SOBO 81/

Magnetlager mit zwei Ringen entweder parallel oder axial¹⁹⁴, die etwas modifiziert¹⁹⁵ ermöglichen würden (GRAPHIK 41, 42), dass der Außenring rotiert und sogar zwei gegenläufig rotierende Außenringe, wären in dieser Bauweise machbar.



Graphik 42

Im Gegensatz zum GDSR ist das einfache Schwungrad seit Menschengedenken – etwa als Spinnräder oder Töpferscheibe – im Einsatz¹⁹⁶. Seit der industriellen Revolution ist das Schwungrad etwa bei Dampfmaschinen und Verbrennungsmotoren unverzichtbar geworden¹⁹⁷. Später wurden unter anderem Lokomotiven, Stadtbusse, Straßenbahn und Untergrundbahnen im fahrplanmäßigen Einsatz mit Schwungrädern als einzige Energiequelle angetrieben und Schwungräder kamen als Speicher zB in der Raumfahrt im Erdschatten zum Einsatz¹⁹⁸. In den letzten Jahren sind aufgrund des technologischen Fortschritts auf dem Gebiet der Elektronik und Materialtechnik die Schwungräder wieder verstärkt zum Einsatz

Lagersystem wird in Licht- und Teilchenstrahlchoppern, Turbomolekularpumpen und anderen Maschinen benutzt und könnte vorteilhaft zusammen mit einer leistungsstarken Maschine außer in Schwungrädern unter anderem beispielsweise auch in Gasexpandern, Turbogebläsen, Hochgeschwindigkeitsgeneratoren und Analysezentrifugen eingesetzt werden."

¹⁹⁴ Schweitzer/Traxler/Bleuler 86 Bild 3.29; Kolk 23 Abbildung 3.2.

¹⁹⁵ Schweitzer/Traxler/Bleuler 86 Bild 3.30; Kolk 24 Abbildung 3.3.

¹⁹⁶ Menz 6.

¹⁹⁷ Menz 6 f; Strößenreuther; in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-geschi.htm >.

¹⁹⁸ Menz 7; Burg, in: < http://www.bine.info/pdf/infoplus/EinfhrenderArtikelPetervonBurg.pdf >.

gekommen¹⁹⁹. Die Leistungsfähigkeit im Turbobetrieb wird von den Materialeigenschaften des Rotors begrenzt²⁰⁰. Beim Nenndrehzahl von 40.000 UpM einer Schreibe von Kohlefaserverbundmaterial sind heute 853 m/s erreicht worden, dass sind 350.00fache Erdbeschleunigung²⁰¹, wobei eine gleich schnellt Rotierende Stahlkugel schon geborsten wäre²⁰². Es gibt Drehzahlen bei magnetisch gelagerten Schwungradspeicher für die Raumfahrt mit 80.000 UpM²⁰³ bis 100.000 UpM²⁰⁴. Diese Grenzwerte gelten allerdings für die axial gelagerten Rotoren, während ein radial gelagerter Linearmotor²⁰⁵ in der Kreisbahn die nämliche Zentrifugalkraft, die zum Bersten des axial gelagerten Schwungrades etwa über 900 m/s führt²⁰⁶, direkt entgegenwirkt und damit höhere Drehgeschwindigkeiten zulässt.

_

¹⁹⁹ Menz 7 ff; Guentensperger 1–2; Strößenreuther; in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-geschi.htm >; Burg, in: < http://www.bine.info/pdf/infoplus/EinfhrenderArtikelPetervonBurg.pdf >.

²⁰⁰ Kolk 113 ff; Fremerey 232.

²⁰¹ Kolk 75 f.

²⁰² Fremerey 232.

²⁰³ Strößenreuther; in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-geschi.htm >.

Strößenreuther; in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-zusfass.htm >.

²⁰⁵ Rathausky 14, 16 ff; vgl Calotti 35 Abbildung 3.6.

²⁰⁶ Burg, in: < http://www.bine.info/pdf/infoplus/EinfhrenderArtikelPetervonBurg.pdf >.

2. Magnetlager

Die eigentliche Zielvorgabe des Tests mit Magnetlager wäre die Ergebnisse der Rotationstests mit GDSR+PR als Absorber auf ihre Anwendbarkeit bei – elastischen – Magnetlagern (GRAPHIK 43) zu prüfen, bzw. überhaupt nach Wegen der Verbesserung der Rotationseigenschaften von elastischen Magnetlagern – wie etwa Luftantrieb²⁰⁷ – zu suchen.

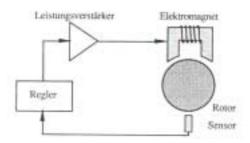
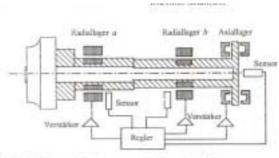


Bild 1.1 Funktionsprinzip der aktiven elektromagnetischen Lagerung

Graphik 43

Die derzeitigen Ergebnisse der Forschung bei Magnetlager verlangen nach elektronischer Steuerung beim Antrieb²⁰⁸, nicht jedoch bei der Lagerung allein. Und weil der Antrieb immer eine Einwirkung von Außen ist, könnte und sollte GDSR+PR die elektronische Steuerung zumindest teilweise ersetzen. Insofern einerseits die beim Linearmotor entwickelten Eigenschaften des Magnetlagers nun wiederum in der Rotation zur Anwendung kommen sollen, so wäre andererseits die Anwendbarkeit vom GDSR+PR beim Linearmotor zu prüfen.



3thl 1.3 Block/Eugraeus für die Lagenung eines Roson in einer Etwar

Graphik 44

20

²⁰⁷ Broelmann 46 Abb I.12, 227 f; Schmidt E. 365 ff; Schwate 164 ff.

²⁰⁸ Schweitzer/Traxler/Bleuler 5 f: "Kemper beantragte 1937 ein Patent /KEMP 37/ für eine "schwebende Aufhängung, eine Möglichkeit für eine grundsätzlich neue Fortbewegungsart". In /KEMP 38/ beschreibt er seinen Versuch, wo ein Elektromagnet mit einer Polfläche von 30 x 15 cm bei 0,5 Tesla und bei einer Leistung von 250 W eine Last von 210 kg im Abstand von 15 mm trägt. Für die Regelung verwendete er induktive oder kapazitive Sensoren und Röhrenverstärker. Dieser Versuch war der Vorgänger der späteren Magnetschwebefahrzeuge."

In der Turboanwendung der Magnetlagerung ist man von den anfänglichen Höhenflügen²⁰⁹ mitunter wieder auf bescheidenere Umdrehungsgeschwindigkeiten zurückgefallen²¹⁰, weil die hohen Drehzahlen im Turbobereich entweder nur schwer, oder nur mit ständiger Überwachung und digitaler Steuerung riskiert werden könne²¹¹. Schon allein aus diesem Grunde sollte die Luft zum Vergleich und optional als Lager und Antrieb²¹² ins Auge gefasst werden, weil sie leicht 100.000 U/m bis 200.000 und mehr²¹³ unbeschwert schafft bis 450.000 Umdrehungen in der Minute selbst als Serienprodukte²¹⁴.

Luft verteilt sich plasmaartig²¹⁵, bzw. zeigt ein Verhalten bei der Reibung, wie Plasma²¹⁶ – oder bei hohem Druck – beim elektrischen Widerstand und Leitfähigkeit²¹⁷, indem der Widerstand mit steigender Temperatur – und also bei steigender Drehzahl – eher abnimmt²¹⁸, oder nur geringfügig zunimmt²¹⁹. Der Luftantrieb und Luftlager²²⁰ sind allerdings ein eigenes Thema, zumal sich Luft auch als Energiespeicher eignet²²¹, und hier werde nur die

²⁰⁹ Schweitzer/Traxler/Bleuler 7 f: "Auch ein anderes, für die Anwendung des Elektromagneten interessantes Gebiet, der physikalische Apparatebau, erhielt im Jahre 1937 wesentliche Anstöße. Beams und Holmes arbeiteten an der University of Virginia an elektromagnetischen Aufhängungen für spezielle Rotoren /BEAM 37, HOLM 37/. Unter anderem waren es kleine Stahlkugeln, die Beams auf sehr hohe Drehzahlen brachte, um ihre Festigkeit zu prüfen. Dabei wurde die spektakuläre Drehzahl von 18 Millionen min⁻¹ (300 kHz) erreicht, um die Stahlkugeln in einem Zentrifugalfeld von 20 Millionen g zum Bersten zu bringen /BEAM 46/."

²¹⁰ Schweitzer/Traxler/Bleuler 4 f: "Die Idee, einen Körper mit Hilfe von magnetischen Kräften berührungsfrei schweben zu lassen, ist ein alter Wunschtraum des Menschen. Er ist allerdings nicht leicht zu erfüllen. Schon im Jahre 1842 wies Earnshaw /EARN 42/ nach, daß es mit Permanentmagneten nicht möglich ist, einen ferromagnetischen Körper in allen 6 Freiheitsgraden frei und stabil schweben zu lassen. Im Jahre 1939, als das Interesse an der technischen Verwertung der Magnetkräfte schon sehr aktuelle war, hat Braunbeck /BRAU 39/ diese Zusammenhänge weiter verdeutlicht. Nur wenn die verwendeten Materialien diamagnetische Eigenschaften aufweisen, lassen sich mit geeigneten Konfigurationen von Permanentmagneten Feldverteilungen für ein stabiles Schweben aufbauen /JUNG 88/. Allerdings waren bisher die diamagnetisch erzeugbaren Magnetkräfte zu klein, um von technischem Interesse zu sein. Das mag sich ändern, wenn einmal Hoch-Temperatur-Supraleiter mit ihnen diamagnetischen Eigenschaften zur Verfügung stehen.

Wenn man die ferromagnetisch erreichbaren großen Kräfte für ein stabiles, freies Schweben nutzen möchte, muß man das Magnetfeld dauernd dem Schwebezustand des Körpers anpassen. Das läßt sich mit geregelten Elektromagneten erreichen. Vgl AaO 138.

Fremerey 248; Schweitzer/Traxler/Bleuler 115 ff, 122 ff, 131 ff, 138 ff, 151 f; Rathausky 5; Aenis 1 f, 13 f, 55, 135 ff...

²¹² Fremerey 244 f; Riethmüller 75 ff; Schwate 164 ff; Bartz 4 ff; Broelmann 46 Abb I.12, 227 f; Schmidt E. 365 ff; vgl Eicher/Rigassi, in: < http://vpe.ch/pdf/WKK 2003.pdf > S 52.

²¹³ Schmidt J. 10 ff; Wiemer 247 ff, 259 ff.

²¹⁴ Schmidt J.17; Wiemer 267.

²¹⁵ Bergmann/Schäfer II (1971) 427 f; Raith, Elektromagnetismus, in: Bergmann/Schäfer II (1999) 654 ff.

Datenfahndung, in: GEOkompakt 3 - 05/06 - Das Abenteuer Uehlecke, Technik, http://www.geo.de/GEO/wissenschaft natur/technik/2005 06 GEO kompakt technik datenfahndung/index.html?linkref=ge ode pager >: "Anders aber als eine Plattenspielernadel, berührt der Kopf die unter ihm rotierende Scheibe nicht: Denn die Magnetscheibe dreht sich weitaus schneller als eine Schallplatte - derzeit bis zu 15 000 Mal pro Minute. Bei diesem Tempo entsteht ein Luftpolster, das den Kopf in einer Höhe von 1 bis 20 Nanometer schweben lässt - das ist etwa ein Zehntausendstel der Dicke eines menschlichen Haares." ²¹⁷ Bergmann/Schäfer II (1971) 472 ff.

Menz 68 f: "Das besondre Strömungsverhalten zwischen zwei konzentrisch rotierenden Zylindern wurde zuerst von G. I. Taylor untersucht. Von einer bestimmten Reynoldszahl an treten bei dieser Strömung regelmäßige, abwechselnd lins und rechts drehende Wirbel auf, mit Achsen längs der Umgangsrichtung. Bild 4.14 zeit ein schematisches Bild dieser Strömung. [...] Das Einsetzen der Wirbelbildung bedeutet nicht, dass die Strömung turbulent ist. Hiervon kann man erst bei Taylorzahlen Ta>400 sprechen."

²¹⁹ Bartz 4 ff; Bergmann/Schäfer II (1971) 480.

²²⁰ Bartz 1 ff; Riethmüller 75 ff; vgl Eicher/Rigassi, in: < http://vpe.ch/pdf/WKK_2003.pdf > S 52.

²²¹ Grote/Feldhausen R 91 f: "Analog zum Pumpspeicher Wasserkraftwerk werden entsprechend große, natürliche Speichervolumina (z. B. ausgelaugter Salzstock) mit Luft (bis 75 bar, mit 2,5 bar/h) aufgepumpt, wobei die Verdichter mit billigem Nachtstrom betrieben werden. Tagsüber wird zur Spitzenlastdeckung verdichtete Luft entnommen (von 75 auf 55

Hybridform von Magnetlager und Luftantrieb²²² als Zielvorstellung der Testabläufe arbeitshypothetisch in die Betrachtung einbezogen²²³, denn bei den Messungen wäre man auch bei Luftantrieb wohl auf Magnetlager angewiesen²²⁴.

Die Resonanzen bei Magnetlager herkömmlichen Typs²²⁵ (GRAPHIK 44) scheinen insbesondere daran zu liegen, dass diese durchwegs im herkömmlichen Elektromotor den Idealfall sehen und damit das Magnetlager innerhalb der Elektronik als Sekundärfunktion oder Nebeneffekt des Elektromotors ansehen. Das GDSR mit PR geht als Entwurf arbeitshypothetisch von dem Luftantrieb zum Magnetlager als Zielvorstellung – also von der Hybridform – aus und setzt das Magnetlager als Primärfunktion im elektromagnetischen Bereich voraus, so wie das hauptsächlich bei einigen Linearmotoren (GRAPHIK 45) der Magnetschwebetechnik der Fall ist²²⁶, weil dort infolge der Umwandlung des rotierenden Elektromotors in einen Linearelektromotor eine Reihe Neuerungen nötig waren²²⁷, die neue Maßstäbe setzten.

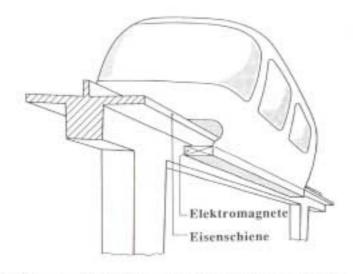


Bild 1.6 Schema eines MAGLEV Fahrzeugs auf einer aufgestlinderten Fahrhahn

Graphik 45

bar, mit 10 bar/h) und einem Gasturbinensatz zugeführt, dessen gesamte Turbinenleistung nunmehr als Nutzleistung verfügbar ist, weil der Verdichter dabei abgekoppelt ist." ²²² Menz 6 ff, 64 ff; Fremerey 244 f.

²²³ Broelmann 46 Abb I.12, 227 f.

²²⁴ Bartz 6.

²²⁵ Aenis 1 f, 13 f, 55, 135 ff.

²²⁶ Rathausky 18 f.

²²⁷ Rathausky 13 ff.

2.1 Linearmotor

Die zuvor – vor dem Linearmotor – stets ringförmig konzentrische Parallele von rotierenden Achse (Rotor) und statischer Ring (Stator) des rotierenden Elektromotors, wurde zunächst im Linearmotor zu einer linearen Parallele²²⁸ von magnetgelagertem Zug und Schiene, wobei noch offen blieb, ob der Zug oder die Schiene die Funktion der vormaligen Rotation übernehme²²⁹. Während beim rotierenden Elektromotor der Innenring (Rotor = Sekundärteil) kleiner als der parallele Außenring (Stator = Primärteil) war, so dass die Bahn auf der Kreislinie ebenfalls kürzer sein musste, ist beim linearen Motor möglich, dass der Rotor als Primärteil und der Stator als Sekundärteil fungiert²³⁰ (GRAPHIK 46). Man spricht so von zwei Typen von Linearmotoren:

- Kurzstator (Linearmotor)
- Langstator (rotierender Elektromotor)

Eine Übersicht zeigt d	e folgende Tabelle
------------------------	--------------------

	Linearmaschine		Rotierende Maschine
	Kurzstator	Langstator	
Ortsfester Teil	Sekundärteil	Primärteil	Primärteil (Stator)
Bewegter Teil	Primärteil	Sekundärteil	Sekundärteil (Rotor)

Graphik 46

Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass für Hochgeschwindigkeitszüge die bewährte Technologie des rotierenden Elektromotors, also den Langstator (GRAPHIK 47) eingesetzt wurde²³¹,

1.3 Day Magneslager in der Verkehrstechnik...

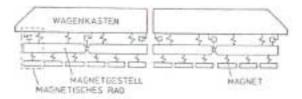


Bild 1.7 Prinzipskizze eines Fahrzeugs mit modularem Trag- und Führsystem, Zahlenbeispiel für das anwendungsnahe Versuchsfahrzeug Transrapid 06. Baujahr: 1982, Gewicht: 122 t, Geschwindigkeit: 400 km/h, Antrieb: Synchron-Langstatorlinearmotor, eisenbehaftet, Leistung ca 12 MW, Fahrweg: aufgeständert, Spannbeton, 25 m Feldlänge, Aufständerung: Zwillingsstützen aus Stahlbeton, 5 m Höhe

Graphik 47

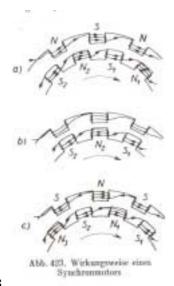
²²⁸ Rathausky 14 ff.

²³¹ Rathausky 18.

²²⁹ Kolk 61 ff.

²³⁰ Rathausky 14 ff; Kolk 61 ff.

weil man den Kurzstator bei diesen hohen Anforderungen noch nicht im Griff hatte, und so auf die erprobte Technologie der rotierenden Elektromotoren (GRAPHIK 48) in der linearen Anwendung zurückgegriffen hatte: aber es wird ebendort darauf verwiesen, dass sich die Kurzstator, die andere Eigenheiten und damit Vorzüge haben, sich für andere Anwendungen, die etwas kleiner dimensioniert sind, besser eignen²³².



Graphik 48

Demnach ist der Langstator (GRAPHIK 47) eine lineare Anwendung des rotierenden Elektromotors (GRAPHIK 48), während der Kurzstator räumlich eine quasi Umkehrung des Prinzips des rotierenden Elektromotors sei²³³. Und wen man das Prinzip des Kurzstators umkehrt, indem der Linearmotor des Typs Kurzstator im Kreis wieder kurzgeschlossen wird²³⁴, so ist das nur scheinbar ein rotierender Elektromotor – theoretisch – mit einer virtuellen (scheinbaren) Rotation, die aber – bezogen auf den rotierenden Elektromotor – keine wirkliche Rotation im ursprünglichen Sinne, sondern deren quasi Umkehrung, sozusagen ein inverser Elektromotor²³⁵.

Technisch wird das Paradoxon teils durch den Verzicht auf den Eisenkern (GRAPHIK 49) des Elektromagneten²³⁶ (Luftspule) und durch abgewinkelte Spulen gelöst²³⁷, teils wird die Funktionalität kombiniert und verändert²³⁸, und etwa auf der gleichen Achse Stator und Rotor so untergebracht,

²³² Rathausky 16 f, 19.

²³³ Rathausky 14 ff.

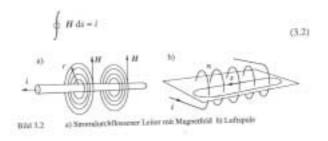
²³⁴ Calotti 4, 14, 35, 72, 114, 130; Kolk 61 ff.

²³⁵ Calotti 4

²³⁶ Calotti 4, 130 f.

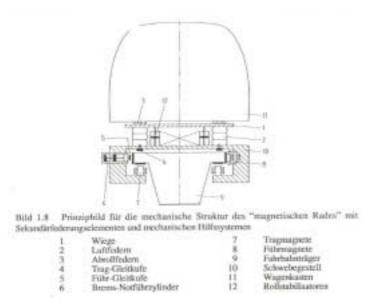
²³⁷ Calotti 4.

²³⁸ Kolk 61 ff.



Graphik 49

dass die zwei gegenteilige Prinzipien eine Welle antreiben²³⁹, und teils wird die komplexe Funktion auf zwei Achsen aufgeteilt²⁴⁰, und bietet so eine Möglichkeit für den Einsatz von GDSR+PR.



Graphik 50

Diese neue Art von Magnetlager konnte aus didaktischen Gründen wohl nur über den Umweg der Linearmotoren (GRAPHIK 50) adäquat erklärt werden²⁴¹, weil sie ansonsten optisch zum Verwechseln dem Elektromotor (GRAPHIK 51) ähnlich aussehen und in der Literatur daher auch so behandelt werden²⁴², aber im Prinzip deren Umkehrung bedeuten²⁴³. Nicht mehr die Achse des rotierenden Elektromotors dreht sich, sondern rotiert nunmehr der Elektromotor gleichsam als Schwungrad um die statische Achse²⁴⁴, so als würde der magnetisch schwebende Zug²⁴⁵ in der Größe einer Modelleisenbahn im Kreis fahren²⁴⁶ und sich dabei eingeholt haben.

²³⁹ Calotti 72 Abbildung 5.2.

²⁴⁰ Calotti 114.

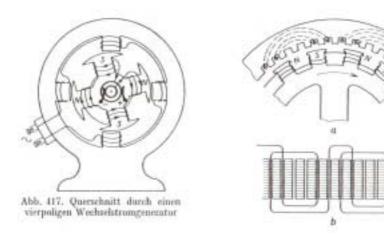
²⁴¹ Schweitzer/Traxler/Bleuler 5 ff.

²⁴² Kolk 61 ff.

²⁴³ Calotti 35 Abbildung 3.6.

²⁴⁴ Vgl Menz 8 ff..

²⁴⁵ Schweitzer/Traxler/Bleuler 5 ff.



Während also bei herkömmlichen Schwungrädern auf der Achse des Elektromotors ein Schwungrad rotiert und die Verlängerung der Achse des Schwungrades in die andere Richtung rotiert im Elektromotor²⁴⁷, wird hier (beim – dem Linearmotor entlehnten – rotierenden Kurzstator²⁴⁸) der Elektromotor in das Schwungrad – als bisher ungenützten Raum – verpflanzt, so dass der Umfang des Schwungrads (der nunmehr räumlich den Elektromotor in sich schließt) gleicher Leistung mindestens halbiert wurde, zumal wenn der Motor oft mehr Platz als das Schwungrad wegnimmt²⁴⁹: Sonach rotiert der als Schwungrad umfunktionierte Elektromotor um die statische Achse. Die Magnetlagerung mit einem Kurzstator²⁵⁰ hat also mit herkömmlichen Magnetlagern wenig bis gar nichts zu tun: Hier läuft auf einer ringförmigen Schiene ein Linearmotor im Kreis, wobei der Ring der Schiene so lang ist wie der Ring des "Zuges" (Modelleisenbahn) des Linearmotors²⁵¹.

²⁴⁶ Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 122 Abb 4.32; Bergmann/Schäfer I (1975) 83 Abb III

^{4. 247} Kolk 72 ff.

²⁴⁸ Calotti 4, 130.

²⁴⁹ Kolk 73; Calotti 8 Abb 1.1.

²⁵⁰ Calotti 4, 130.

²⁵¹ Rathausky 12 ff.

2.2 Rotationsmotor

So gut es klingt, dass dieser gleichsam nach außen gekehrter Magnetlager des Linearmotors etwas neues ist, so müsste dies doch mit den Erfahrungen mit Kreiseln und Schwungrädern abgestimmt werden²⁵²: Denn die Theorie, wonach ein axial oder parallel gegenläufiger Doppelkreisel die Resonanzen absorbiere²⁵³, ist nur für mechanische (nichtelastische) Kreisel so weit erprobt worden, und das auch nur bei relativ niederen Drehzahlen, nicht jedoch für die Magnetlager – die elastisch sind – und nicht für die Turbotechnologie. In der Turbotechnologie will man inzwischen deswegen Magnetlager einbauen, weil bei der hohen Beanspruchung immer wieder Schäden²⁵⁴ auftreten und man meint, dass mit dem Magnetlager die Resonanzen messen und nach außen anzeigen könne, so dass ein Vorbeugen - durch Steuerung - mitten im Betrieb möglich wäre, und das zugleich zur elektronischen Steuerung einlade, die mehr oder minder ausgereift wäre. Wenn jedoch beim parallel rotierenden gegenläufigen Doppelkreisel (GDSR+PR) trotz Magnetlagerung alle Resonanzen absorbiert werden, was unter Turbobedingungen noch erprobt und längerfristig getestet werden muss²⁵⁵, so könnte auch eine elektrische bzw. digitale Steuerung auf dieses System umsteigen und virtuell GDSR+PR simulieren, ohne den Einsatz von elektrischer Energie mechanisch die Störungen absorbieren. Könnte die Theorie auch im Dauer- und Turbobetrieb bestätigt werden, wonach ein gegenläufiger Doppelkreisel mit paralleler Achse alle Resonanzen restlos absorbiert²⁵⁶, wäre das wohl eine Revolution der Turbotechnologie, selbst wenn die Anwendung dann nicht mechanisch²⁵⁷, sondern virtuell mit elektrischer Energie erfolgen würde, indem eine Anregung von außen als Resonanz – über eine Schleife – um 180° umgepolt, quasi reflektiert (um 180° gedreht), und gegen sich selbst verwendet werde²⁵⁸.

_

²⁵² Kolk 125 f, 129.

²⁵³ Magnus 434 f.

²⁵⁴ Aenis 4 ff.

²⁵⁵ Rueegg, in: < http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html >.

²⁵⁶ Magnus 434 f.

²⁵⁷ Rueegg, in: < http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html >.

²⁵⁸ Kaußen, Mechanik (MEC) und Elektrodynamik (EDY), Kapitel 7 Wellen, in: < http://www.fh-luh.de/physik/download/13welle_ba.doc >; Schweitzer/Traxler/Bleuler 197 f: "Eine Kombination von Regeltheorie und eher pragmatischen Lösungsideen ist notwendig. In diese Kategorie gehört die dezentrale Regelung. Flexible und angepasste Lösungen sind notwendig, wie beispielsweise die Folgende: Falls ein Schwingungsknoten einer tiefen Biegeschwingung sich in einem Lager befindet, und falls diese Biegeschwingung nicht genügend gedämpft ist, so muß versucht werden, diese Dämpfung über das andere Radiallager zu erzeugen. Falls nun ungeschickterweise der Sensor dieses anderen Radiallagers ebenfalls in der Nähe eines Knotens dieser Biegeschwingung platziert ist, so kann dieser Schwingungsmode mit nur lokalen Rückführungen nicht mehr gedämpft werden. In diesem Fall wäre eine gezielte Koppelung vom einen Sensor zum anderen Lager eine mögliche Abhilfe. Diese Situation ist in /LARS 90/ aufgetreten. [...] Es wird also nicht versucht, einen unnötig großen vollständigen Zustandregler zu optimieren, sondern einen Regler, der nur die als notwendig erachteten Koppelungen



Graphik 52 Abh. 27th. Durch magnetische Abstinition in der Schwebe gehaltener Magnetistab

Die Technologie der Magnetlager ist von Anfang an durch die Einsicht von Earnshaw aus dem Jahre 1842 bestimmt, wonach es mit Permanentmagneten einen ferromagnetischen Körper in allen 6 Freiheitsgraden stabil zu lagern (GRAPHIK 52) nicht möglich sei²⁵⁹. Seither hielt sich zäh die mehr oder minder stillschweigend vorausgesetzte Annahme a priori, dass die

handhaben wäre²⁶⁰. Obwohl es sich inzwischen gezeigt hatte, dass sowohl bei Rotation wie auch bei Linearmotoren ein nicht als Antrieb zugleich eingesetztes Magnetlager – oder ein

äußerst effektive ferromagnetische Wirkung nur durch die elektrische Steuerung zu

Elektromotor im Leerlauf – faktisch verlustfrei funktioniere²⁶¹, sei es auch weil durch

Kunstgriffe bei der Raumordnung nicht alle 6 Freiheitsgrade benötigt werden, und für das

Magnetlager allein – außer im Turbobetrieb und bei hoher Beanspruchung – die elektrische Kontrolle oder Steuerung im Betrieb entbehrlich, ja die Magnetlagerung im Lehrlauf

eigenstabil und verlustfrei sei²⁶², doch wird kaum an einen Verzicht der elektrischen

Steuerung gedacht. Das Ideal eines Energiespeichers also nach dem derzeitigen Stand eine

Magnetlagerung mit Luftantrieb. Der in Zusammenhang mit der Kombinierung des

Magnetlagers mit elektromotorischem Antrieb auftretenden vermeidbaren Verluste, ladet also zumindest zur Kontrolle zum Vergleich mit dem Luftantrieb²⁶³ des Magnetlagers ein, wo

wiederum auch die Luftlagerung²⁶⁴ eine zu prüfende Option wäre, weil bei Magnetlager – die

enthält.[...] Die Reglerkoeffizienten sind nicht mehr nur Elemente einer Zustandrückführungsmatrix, sondern Koeffizienten von dynamischen Reglern. Das Verfahren ist von Anfang an auf digitale Regler ausgelegt, es kann also beispielsweise das digitale Äquivalent zu einem PD-Regler oder einem dezentralen Regler mit lokalem Beobachter optimiert werden. [...] So sind denn auch noch keine Anwendungen solcher Regler auf Magnetlager bekannt, die eine Verbesserung der Reglergüte bei vertretbarem Aufwand belegen würden. Eher pragmatische Methoden, allenfalls gewisse Arten adaptiver Regelung oder nichtlineare Methoden scheinen für Magnetlager eher angebracht."

²⁵⁹ Fleischer/Bodenstein/Thum 4 f; Rathausky 10..

²⁶⁰ Fleischer/Bodenstein/Thum 5 ff.

²⁶¹ Fleischer/Bodenstein/Thum 157 f; Calotti 3, 130 f; Rathausky 12..

²⁶² AaO.

²⁶³ Schmidt E. 365 ff.

²⁶⁴ Schmidt J. 7 ff; Bartz 4 ff; Riethmüller 75 ff; Eicher/Rigassi, in: < http://vpe.ch/pdf/WKK_2003.pdf > S 52.

bevorzugt im Vakuum²⁶⁵ betrieben werden – ausgerechnet die Lüftung bzw. Kühlung problematisch und zumindest aufwendig sei²⁶⁶.

Analog der Zweiteilung der Linearmotoren nach der Länge des Stators werden die herkömmlichen (rotierenden) Elektromotoren und daher auch Magnetlager in zwei Gruppen eingeteilt²⁶⁷. Hier steht allerdings als Kriterium der Unterscheidung die magnetischen Eigenheiten einerseits und elektrischen Eigenheiten andererseits (GRAPHIK 54), je nach dem, wie sich die magnetischen Kräfte besser greifbar zeigen. Beide der großen Hauptgruppen beinhalten je vier Untergruppen, was in der Summe 8 Typen von Magnetlager ergebe. Von denen ist je eines nur mit Supraleiter²⁶⁸ und je eines kaum brauchbar, so dass auf der einen Seite das klassische aktive Magnetlager (Reluktanzmaschine) als Typ 1 und auf der anderen Seite die Kombination des Magnetlagers mit einer Asynchronmaschine als Typ 7 und Synchronmaschine als Typ 8 gegenüberstehe²⁶⁹.

Im Versuchsmodell von Zürich stellt sich die Synchronmaschine als Ideal für das Schwungrad jenes Typs heraus, allerdings nur wenn sie eisenlos konstruiert wird²⁷⁰ und es zeigt sich sogleich die Auswahl und Entscheidungskriterien immer anwendungsorientiert sein müssen²⁷¹. Die Gegenüberstellung von Synchronmaschine und Reluktanzmaschine zeigt, dass die Reluktanzmaschine (Kurzstator) im Lehrlauf praktisch keine Verluste habe, aber bei der Leistung etwas schwächer sei²⁷². Das ladet zum Test mit Luftantrieb²⁷³ ein, wie das bereits weiter oben vorausgeschickt wurde.

²⁶⁵ Calotti 3 f, 15; Menz 6; Kolk 4, 71 f, 126; Strößenreuther; in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwunggrundlg.htm >.

²⁶⁶ Calotti 4; Guentensperger 4-26, 5-10, 6-18 ff; Kolk 72 ff; Diedrichsen 38...

²⁶⁷ Fleischer/Bodenstein/Thum 10 ff.

²⁶⁸ Lindmayer/Grundmann, in: < http://www.htee.tu-bs.de/forschung/veroeffentlichungen/LindmayerGrundmannWue05.pdf

>. ²⁶⁹ Fleischer/Bodenstein/Thum 10 ff; Menz 15 f.

²⁷⁰ Calotti 3.

²⁷¹ Calotti 15: "Aufgrund der Anforderungen an den Antrieb werden Kriterien für die Wahl des Maschinenkonzepts formuliert. Die verschiedenen Maschinentypen werden klassifiziert und einzeln vorgestellt. Es zeigt sich, dass kein Maschinentyp für alle Anwendungen die beste Wahl darstellt. Jedes Projekt hat seine besonderen Anforderungen, die auch zu unterschiedlichen Maschinen führen können."

²⁷² Calotti 130: "Die Wahl und der Entwurf des Antriebes eines kinetischen Energiespeichers hängen von der Art der Anwendung ab. Je nach Lade-Entladezyklus haben andere Kriterien Priorität. Bei Langzeitspeichern stehen die Leerlaufverluste im Vordergrund. Sie führen zu der Selbstentladung des Speichers. [...] Als Antrieb für einen Energiespeicher kommen in erster Linie die Reluktanz- und die mit Dauermagneten erregte Synchronmaschine (PMSM) in Frage. Die Reluktanzmaschine erzeugt im Leerlauf praktisch keine Verluste. Dafür hat sie einen nicht optimalen Leistungsfaktor. Bei der PMSM ist es genau umgekehrt. Sie hat einen optimalen Leistungsfaktor, dafür weist sie Ei[g]enverluste im Leerlauf auf." ²⁷³ Schmidt E. 365 ff.

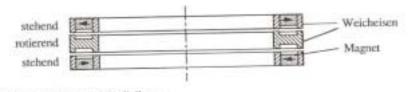


Bild 3.31 "Reluktanz"-Radiallager

Im Gegensatz zu den Vorgaben der bisherigen Modellversuche sollte die Wahl nicht zuletzt von den eingangs aufgezeigten baulichen Möglichkeiten²⁷⁴ als Primärfaktor der Entscheidung bestimmt werden, zumal sich neue Möglichkeiten anbieten (GRAPHIK 53).

Graphik 54

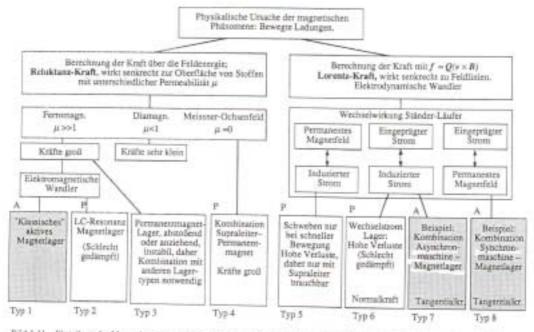
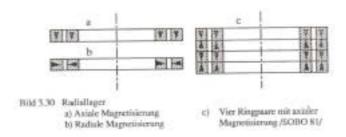


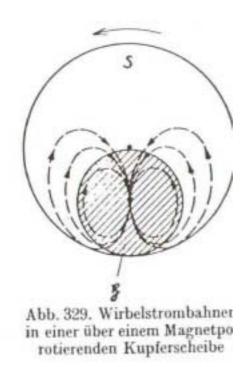
Bild 1.11 Elmeitung der Magnetlager is zwei Gruppen gemäß der Berechnungsart der Magnetkraft und in acht grundlegende Magnet-lagertypen, "A"kennzeichnet Systeme mit aktiver Stabilisterung (das heißt mit Regler), "P" kennzeichnet passive Systeme.

In der vorgegebenen Bauweise könnte durch Modifizierung ein axiales Doppelrad sowohl als Axiallager wie auch als Radiallager eingesetzt werden (GRAPHIK 53, 55), indem die zwei parallel gegenläufig rotierenden Lager zunächst jeweils axial²⁷⁵ abgestützt wären und dann radial gekoppelt. Das könnte, wenn bautechnisch lösbar und im Test bestätigt wird, in der Koppelung der gegenläufigen Räder als Energiespeicher scheinbar zu einer Verdoppelung der relativen Rotationsgeschwindigkeit führen.

²⁷⁴ Fleischer/Bodenstein/Thum 86 f Bild 3.29-31: "Passive Dauermagnete können als Radial- und als Axiallager verwendet werden, wobei beide Arten als anziehende oder als abstoßende Lager ausgeführt werden können (Bild 3.29). Mit einer Dauermagnetisierung läßt sich kein stabiler Gleichgewichtszustand erreichen. /BRAU 39/. Es verbleibt für mindestens eine Koordinate ein labiles Gleichgewicht. So muß immer mindestens eine Richtung mit einem mechanischen Lager oder mit einem aktiven elektromagnetischen Lager stabilisiert werden."
²⁷⁵ Fleischer/Bodenstein/Thum 86 f Bild 3.29-31: Oder eventuell an der jeweils abgewandten Seite radial nach Bild 3.30 c.



Wenn also zwei Außenscheiben stabil und die zwei Innenscheiben radial zur Rotation gebracht wären²⁷⁶, entstünde zwischen den beiden gegenläufig rotierenden Rädern die doppelte Relativgeschwindigkeit (GRAPHIK 55). Um aber die hier sich anbietenden weiteren Möglichkeiten auszuloten, müssten vorher Testläufe durchgeführt werden. Einige dieser Möglichkeiten, die der Testreihe eine Richtung geben kann, können nachstehend kurz aufgezeigt werden.



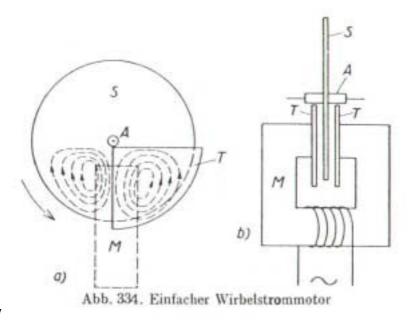
Graphik 56

• In einer rotierenden Kupferscheibe über einen Magnetpol (GRAPHIK 56) entstehen Wirbelströme²⁷⁷. "Das Auftreten von Wirbelströmen in einer Metallscheibe in einem magnetischen Wechselfeld kann auch zur Erzeugung einer Drehbewegung ausgenutzt werden. Befindet sich eine um eine Achse A drehbare Kupferscheibe zwischen den Polen eines Wechselstrommagneten M, dessen Polflächen zur Hälfte mit daraufgebrachten Kupferscheiben T bedeckt sind (Abb. 334), so werden sowohl in der

²⁷⁶ Fleischer/Bodenstein/Thum 86 Bild 3.30c.

²⁷⁷ Bergmann/Schäfer II (1971) 249 Abb 329.

Scheibe S wie auch in der Scheibe T Wirbelströme induziert (in der Abb. 334a durch die gestrichelten Linien angedeutet). In dem Teil der Scheibe S, der sich zwischen den Platten T befindet, entsteht dagegen keine Induktion, da für diesen Teil das magnetische Feld durch die Wirkung der Wirbelströme in den Platten T kompensiert (gewissermaßen abgeschirmt) wird. Weil die Ströme in S und T vom gleichen Feld herrühren und daher den gleichen parallelen Verlauf haben, ziehen sie sich gegenseitig an, und die Scheibe S erfährt eine fortlaufende Drehung des eingezeichneten Pfeils."²⁷⁸ (GRAPHIK 57)

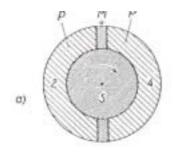


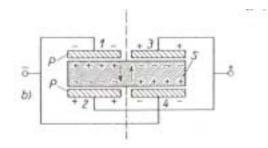
Graphik 57

• Eichenwald hat gezeigt, dass der Polarisationsstrom magnetische Wirkung ausübt²⁷⁹. Ein zwischen 4 paarweise halbkreisförmig angeordneten Kondensatoren rotierendes Dielektrikum wird je zur Hälfte entgegengesetzt polarisiert, und muss infolge der Rotation immer beim Übergang zur anderen Hälfte der Kondensatoren die Polarisationsrichtung ändern so dass dabei ein Polarisationsstrom entsteht, der sich auch magnetisch auswirkt²⁸⁰ (GRAPHIK 58).

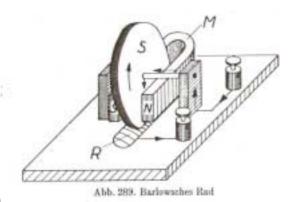
²⁷⁸ Bergmann/Schäfer II (1971) 251 f.

²⁷⁹ Bergmann/Schäfer II (1971) 233: "Eine runde Scheibe S aus einem Dielektrikum kann zwischen zwei Kondensatorplatten rotieren (Abb. 309). Diese in zwei in zwei voneinander isolierte halbkreisförmige Platten 1,2 und 3,4 geteilt, die in der gezeichneten Weise miteinander verbunden und aufgeladen sind. Dadurch werden die beiden Hälften des zwischen ihnen befindlichen Dielektrikums entgegengesetzt polarisiert. Rotiert das Dielektrikum zwischen den Platten, so muss es beim Übergang vom Plattenpaar 1,2 zu 3,4 seine Polarisationsrichtung umkehren. Dadurch entsteht ein Polarisationsstrom parallel der Rotationsachse, der sich durch die Ablenkung einer empfindlichen Magnetnadel M nachweisen läßt."
²⁸⁰ Bergmann/Schäfer II (1971) 233 Abb 309.





• Die in einem horizontal liegenden Hufeisenmagnet senkrecht eingesetzte Kupferscheibe mit einer senkrechten – horizontalen – Rotationsachse rotiert²⁸¹, wenn in die Drehachse ein Strom fließt und am Rand der Scheibe – durch einen Flüssigmetall-Kontakter aus Quecksilber der Strom wieder abfließen kann²⁸² (GRAPHIK 59).



Graphik 59

einfach durch Rotation magnetisch, und baut auch ein elektrisches Feld auf, wenn es in Rotation versetzt wird. Man spricht vom gyromagnetischen Effekt, weil jeder Rotationskörper in einem Rotationsfeld seine Achse parallel zur Rotationsachse auszurichten versucht. Das ist auch die Grundlage vom GDSR mit PR, dass man das vorwegnehmen und so Resonanzen vorbeugen kann. So wie sich bei der Magnetisierung die Rotationsachsen der Eisenatome infolge elektromagnetischer Einwirkung parallel zu der vom Feld induzierten Rotationsrichtung sich ausreichten, so werden sie im umgekehrten Fall durch mechanische Rotation magnetisch, indem sich die atomaren Rotationsachsen nach der Rotation des Eisenstücks bzw. dazu parallel ausrichten²⁸³.

²⁸¹ Bergmann/Schäfer II (1971) 220.

²⁸² Bergmann/Schäfer II (1971) 220 Abb 289.

²⁸³ Bergmann/Schäfer II (1971) 187 f: "Noch durch einen anderen Versuch läßt sich die Existenz der Molekularströme im Eisen beweisen. Dreht man einen rotierenden Kreisel um eine beliebige Achse, so versucht der Kreisel seine Achse parallel dieser letzteren Drehachse zu stellen (Prinzip des Kreiselkompasses, Bd. I Nr. 40). Bringt man ein unmagnetisiertes Eisenstäbchen, in dem die Achsen der einzelnen Kreisströme also ganz unorientiert liegen, in rasche Rotation um seine Längsachse, so müssen sich die Achsen der Kreisströme, die wir, wie oben auseinandergesetzt, als einzelne Kreisel betrachten können, parallel zu Stabachse stellen, d. h. im Eisenstäbchen muß eine magnetische Polarisation auftreten. Diese schon von Maxwell gesuchte Erscheinung wurde von S. J. Barnett (1914) experimentell mit Erfolg verwirklicht. Er versetzte

Die beim Magnetlager vorhandenen Magnete einerseits und die ebenfalls vorhandene Rotation in Wechselbeziehung mit anderen Komponenten andererseits, fordern alternative Konzepte um so mehr heraus, als der elektrische Antrieb in der konservativen Form sich – mit oder ohne Magnetlager – im Turbobetrieb als problematisch zeigt. Die hier gezeigten drei-vier berührungslose elektrischen Antriebe²⁸⁴, denn auch Quecksilber kann durch einen Kondensator ersetzt werden, sind alle drei rotationsspezifisch. Eine Testserie mit Weitblick sollte den Gleichstrom als erste Alternative in die Betrachtung einbeziehen²⁸⁵, denn im Gegensatz zum Wechselstrom sind der Rotationsgeschwindigkeit beim Gleichstrom kaum Grenzen gesetzt. In der Fachliteratur wird homogen tradiert, dass Gleichstrom angeblich berührungslos nicht zu handhaben wäre und daher ein Verlustgeschäft und auf jeden Fall nicht zeitgemäß sei²⁸⁶. Beim Magnetlager sind aber die meisten Grenzen durch den Wechselstrom gesetzt, so dass der Gleichstrom eine neue Dimension eröffnen könnte, so weit dies künftige Testläufe ermöglichten.

einen kleinen Eisenzylinder um seine Längsachse in sehr schnelle Rotation und konnte beobachten, daß bei einer Drehung im Sinne des Uhrzeigers auf der Vorderseite ein Nordpol entsteht; das bedeutet, daß die in den Molekülen kreisenden, die Magnetisierung erzeugenden Ladungen negatives Vorzeichen haben; deren Ladung und Masse ergeben wieder, daß es sich um Elektronen handelt."

²⁸⁴ Bergmann/Schäfer II (1971) 187 f, 220, 233, 249 Abb 329, 251 f.

²⁸⁵ Menz 10 f.

²⁸⁶ Menz 15 f.

3. Thermostrom

"Obwohl ein einzelnes Thermoelement nur eine sehr kleine Thermospannung liefert, kann man mit seiner Hilfe noch verhältnismäßig starke Ströme erzeugen, wenn man den Widerstand des ganzen Kreises nur klein genug macht. "287 (GRAPHIK 60). Wenn zB in dem Magnetlager im Vakuum die Spulen gekühlt werden müssen²⁸⁸, sollte die Wärme durch Thermostrom abgeleitet werden²⁸⁹. Besonders wenn der elektrische Antrieb um einen Thermostromkreislauf gehen müsste, würde sich bei größerer Hitze das im Vakuum magnetgelagerte Schwungrad eines Energiespeichers oder einer Turbopumpe²⁹⁰ schneller drehen und mehr Strom brauchen, was mit einer Kühlung einhergeht, statt mit Erhitzung, wenn die Wärme als Thermostrom abgeleitet werde²⁹¹. Im Vakuum kann also die Kühlung entweder durch einen Sekundärstrom (Thermostrom) so erfolgen, dass bei Erhitzung automatisch auf diesen Stromkreis umgeschaltet werde und der sich selbst abkühle, oder man nützt gleich den negativen Thomsoneffekt mit der Wahl eines Leiters, etwa aus Eisen (oder Zink, Platin, Nickel oder Konstantan), der um so kälter wird, desto mehr Strom man durchschickt²⁹². Man kann aber den Thermostrom als Kühlung auch parallel laufen lassen und

_

²⁸⁷ Bergmann/Schäfer II (1971) 316 Abb 434; Raith, Elektromagnetismus, in: Bergmann/Schäfer II (1999) 521 Abb 8.14; Bergmann/Schäfer II (1971) 159 f: "Biegt man z. B. einen 10 mm starken Kupferdraht A (Abb. 204) zu einer Schleife und schließt sie durch zwei kurze eingelötete Konstantanstücke B, so fließt in diesem Kreis ein Strom von etwa 40 Ampere, wenn man durch Eintauchen des rechtswinklig umgebogenen Drahtendes in ein Glas mit Eiswasser die eine Lötstelle auf etwa 0° abkühlt und gleichzeitig die andere Lötstelle auf etwa 100° erhitzt, indem man das freie andere Ende des Kupferdrahtes in eine Bunsenflamme bringt. Es besteht dann eine Thermospannung von etwa 4,2x10⁻³ Volt. Da der Widerstand des ganzen Kreises, der in der Hauptsache durch die beiden Konstantanstücke bestimmt wird, in der Größenordnung von 10⁻⁴ Ohm liegt, erhält man einen Thermostrom von 42 Ampere, der sich durch seine magnetische Wirkung nachweisen lässt. Zu diesem Zweck legt man die Kupferschleife zwischen zwei mit entsprechenden Rillen versehen gut aufeinander passende Eisenstücke C₁ und C₂, die dann durch das magnetische Feld der einen Stromwindung (s. hierzu S. 179) so fest zusammengehalten werden, daß man an C₂ ein Gewicht von mehreren Kilopond anhängen kann."

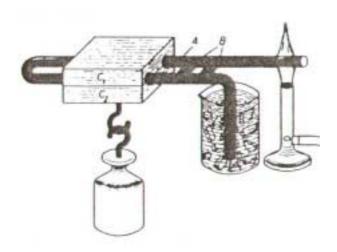
²⁸⁸ Calotti 3 f, 15; Kolk 4, 71 ff, 126; Guentensperger 4-26, 5-10, 6-18 ff.

²⁸⁹ Bergmann/Schäfer II (1971) 156 ff.

²⁹⁰ Diedrichsen 36, 38 f.

²⁹¹ Bergmann/Schäfer II (1971) 163: "Beim Peltier-Effekt erfolgt die Temperaturänderung stets in dem Sinne, daß der durch die Temperaturänderung hervorgerufene Thermostrom dem hineingeschickten Strom entgegengesetzt gerichtet ist. Der Peltier-Effekt ist also im gewissen Sinne die Umkehr des thermoelektrischen Effektes: Erwärmt man eine Lötstelle, so ergibt sich ein Thermostrom bestimmter Richtung. Schickt man aber durch die Lötstelle einen äußeren Strom in der gleichen Richtung, so kühlt sie sich ab. [...] Denn auf ihnen besteht von der wärmeren zur kälteren Lötstelle ein Temperaturgefälle. Thomson hat daraus geschlossen, daß nicht nur an den Lötstellen, d. h. den Orten chemischen Inhomogenität, eine eingeprägte elektromotorische Kraft auftritt, sondern auch an allen Stellen des thermisch-inhomogenen Leiters eine kontinuierlich verteilte elektromotorische Kraft vorhanden ist. Diese bewirkt bei Stromdurchgang einen an allen Stellen auftretenden Peltier-Effekt, der zu dem in den Lötstellen vorhandenen hinzutritt; man hat diese reversible Wärmeproduktion daher als Thompson-Effekt (Thomson-Wärme) bezeichnet. [...] Fließt ein elektrischer Strom in Richtung dieses Temperaturgefälles also vom heißen Ende des Drahtes zu dem kalten, so findet bei manchen Metallen (z. B. Kupfer, Kadmium, Silber, Gold, Wolfram) eine Verschiebung der Temperaturen im Sinne der Stromrichtung, bei anderen Metallen (z. B. Platin, Eisen, Zink, Nickel, Konstantan) in der umgekehrten Richtung statt. Bei den erstgenanten Metallen wird beim Übergang des Stromes vom wärmeren zum kälteren Teil Wärme entwickelt, bei den Metallen zweiter Art dagegen Wärme verbraucht. Man spricht daher auch von positivem und negativem Thompson-Effekt."

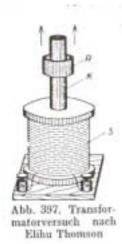
so den Wirkungsgrad erhöhen. Denn bei einem Energiespeicher ist sekundär, wie schnell aufgeladen wird, und mit der Rückführung der Erwärmung in den Stromkreislauf als Thermostrom hätte man eine automatische Kontrolle, und eine Rückgewinnung der Verluste.



Graphik 60

4. Aluminium

Der herkömmliche Magnetlager arbeitet nach dem Prinzip des Elektromotors²⁹³, weil naheliegend erscheint die Doppelfunktion des Magnetlagers zu nützen, doch zeigt sich in der Praxis, dass die Belastbarkeit der Leitungen mit Elektrizität nicht linear ansteige und der Elektromotor in der Kombination mit der Magnetlagerung einen unverhältnismäßigen Energiebedarf im Turbobetrieb habe, wenn schon nicht überhaupt überfordert ist. Der Energieverbrauch steigt in einer elektrischen Leitung nicht linear an, sondern in einem Bogen an, und weil die Magnetlagerung schon eine Belastung ist steigt der Energieverbrauch des Elektromotors bei gleichzeitiger Magnetlagerung.



Graphik 61

Das zum Test vorgeschlagene Aluminium (GRAPHIK 61) würde vor allem die Schwebeeigenschaften verbessern²⁹⁴, und es wäre möglich, dass so ein Freiraum auch für den Elektromotor geschaffen werde. Immerhin entfaltet Aluminium durch die Induktion²⁹⁵ die Abstoßung durch einen gegenläufigen Induktionsstrom und damit identischen Magnetpol, und das kann – im Gegensatz zu der magnetischen Levitation an Supraleitern²⁹⁶ – wohl nur in der Bewegung der Fall sein.

-

²⁹³ Rathausky 13 ff.

²⁹⁴ Kolk 31 ff, 132.

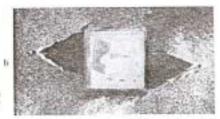
²⁹⁵ Rathausky 9, 12.

Rathausky 5 ff; Lindmayer/Grundmann, in: < http://www.htee.tu-bs.de/forschung/veroeffentlichungen/LindmayerGrundmannWue05.pdf>.

5. Turbomembranpumpe

Der sogenannte Helmholtzscher Resonator²⁹⁷ (GRAPHIK 66) wurde bereits als Membranpumpe eingesetzt²⁹⁸, ist aber dann ins Abseits geraten.





Abh. IX, 74. Von schwingenden Quareen ausgehende Luftströmungen, a) Länglicher Quare, b) Quadratischer Quare.

Graphik 62

Sind schon mit den Hohlkörpern des Helmholtzschen Resonators beachtliche Pumpleistungen erzielt worden, so ist bei den Quarzen eine Steigerung bzw. sogenannte Stoßwelle²⁹⁹, eine Art akustischer Laser-Effekt mit parallelen Wellen (GRAPHIK 62) zu beobachten³⁰⁰. Die zwei

²⁹⁷ Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 808 Abb 25.18.

²⁹⁸ Bergmann/Schäfer I (1975) 552 f: "Wird ein Helmholtzscher Resonator (Abb. IX, 42) durch eine vor die größere Öffnung gehaltene Stimmgabel zu kräftigen Resonanzschwingungen angeregt, so tritt aus der gegenüberliegenden engeren Öffnung ein Luftstrom aus, der unter umständen so stark ist, dass er eine Kerzenflamme auslöscht oder ein kleines Windrädchen in Rotation versetzt. [...] Bildet man die Bodenfläche eines zylindrischen Resonators als Telephonmembran aus und erregt das Telephon mit einem Wechselstrom von der Eigenfrequenz des Resonators, so tritt (obwohl hier die größte Öffnung verschlossen ist!) aus der der Bodenfläche gegenüberliegenden Öffnung ein kräftiger Luftstrom heraus. Nach diesem Prinzip sind neuerdings sogenannte Membranpumpen bebaut worden, die Überdrucke von 100 Torr und mehr liefern. Derartige Pumpen haben den Vorteil, daß sie keinerlei umlaufende Teile besitzen und direkt aus dem Wechselstromnetz betrieben werden können. Sie finden wegen ihres einfachen Aufbaues und ihrer Betriebssicherheit bei Laboratoriumsarbeiten mannigfache Anwendung."

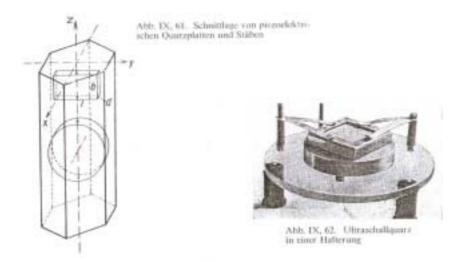
mannigfache Anwendung."

²⁹⁹ Bergmann/Schäfer I (1975) 493 f: "Wie bereits erwähnt, bleibt auch die Schallgeschwindigkeit in der Luft bei großen Amplituden nicht mehr konstant, sondern steigt mit wachsender Amplitude an. In der Nähe von Explosionen ergeben sich deshalb Schallgeschwindigkeit von 1000 m/s und mehr. Dieses Phänomen beruht darauf, daß bei großen Amplituden harmonische Schwingungen wie sie zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft vorausgesetzt wurden, nicht mehr möglich sind. [...] Geht dieses Anwachsen der Steilheit so weit, daß der Schalldruck unstetig vom Minimum zum Maximum springt, so spricht man von einer Stoßwelle. Derartige Wellen erzeugt man heute mit Hilfe einer bis zu einem Zentimeter (!) dicken Metallmembran, die sich in einem Rohr, dem sogenannten Stoßrohr, befindet. Der Druck auf der einen Seite der Membran wird so lange gesteigert, bis die Membran platzt. Die entstandene Stoßfront, d. i. die Diskontinuitätsfläche, schreitet längs des Rohres fort. Dabei werden große Energien frei, die zu erheblichen lokalen Erhitzungen führen und die Luft zum Glühen bringen können."

Bergmann/Schäfer I (1975) 553 f: "Sehr starke Luftströmungen gehen auch von dem Endflächen schwingender Quarzkristalle aus, wie sie zur Erzeugung von Ultraschall benutzt werden. Der schwingende Quarz stößt in der einen Phase beim Vorschwingen die vor ihm befindliche Luft weg, saugt aber in der nächsten Phase beim Zurückschwingen die weggestoßene Luft nicht wieder vollständig zurück, so daß von der Seite längs des ganzen Umfanges der schwingenden Fläche neue Luft in die entstandene Verdünnung einströmt, die in der darauffolgenden Halbschwingung vom Quarz wieder weggeschleudert wird. Das seitliche Einströmen frischer Luft läßt sich leicht mittels Rauch sichtbar machen. Legt man den schwingenden Quarz auf eine mit einem Pulver bestreute Glasplatte, so wird dieses in der Windrichtung fortgeblasen, und

hochfrequenten Schallsender - die in der Praxis vorkommen - basieren auf der sog. Magnetostriktion (GRAPHIK 56) einerseits und Piezoelektrizität (GRAPHIK 64) andererseits³⁰¹.

Bei der Magnetostriktion (GRAPHIK 77) verändert ein Stab aus Eisen oder Nickel die Länge in einer wechselstromdurchflossenen Spule und vibriert beim Wechselstrom im Rhythmus der Stromfrequenz: Der Stab erfährt periodische Längenveränderungen, und wird dabei zu elastischen Längsschwingungen angeregt³⁰².



Graphik 63

Mit piezoelektrischen Schallsendern (GRAPHIK 63) lassen "sich Frequenzen bis zu mehreren Millionen Herz erzeugen". Nach den Brüdern Curie lassen sich "bei Kristallen mit polaren Achsen (zB Turmalin, Quarz, Bariumtitanat, Zinkblende, Rohrzucker) durch Druck oder Dehnung in bestimmte Richtungen elektrische Ladungen an den Enden der polaren Achsen" erzeugen³⁰³. Die in der Natur vorgefundenen Kristalle aus Quarz sind zwar klein und müssen

man erhält so ein direktes Bild der Luftströmung (Abb. IX, 74a). [...] Wir wählen einen Ultraschallquarz von 1 cm Dicke, der bei einer Frequenz von 300 kHz eine Schallintensität I von 10 Watt/cm² = 108 erg/cm² * s liefert, und die Flüssigkeit Wasser mit der Schallgeschwindigkeit c=1484 m/s, in dem sich die Schallwellen ausbreiten. [...] Das ergibt eine Maximalbeschleunigung von rund $7*10^7$ cm/s², d. h. eine Beschleunigung, die 70000mal so groß ist die die Fallbeschleunigung und die sich sonst nur mittels einer Ultrazentrifuge erreichen läßt. Dabei ist noch zu beachten, daß die Beschleunigung in der Sekunde 2 v-mal ihre Richtung ändert. Daher werden in einer von Ultraschall durchsetzten Flüssigkeit feste Körper, z. B. kleine Metallstückehen, Kohleteilehen, zu feinstem Pulver verrieben."

³⁰¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 540 ff; Günther/Hansen/Veit 246 f; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer

I (1998) 834 Abb 25.47.

302 Bergmann/Schäfer I (1975) 540: "Die Amplitude der Stabschwingungen erreicht ein Maximum, wenn die Frequenz des elektrischen Wechselstromes mit einer mechanischen Eigenfrequenz des Stabes übereinstimmt, die durch die Stablänge, die Dichte und den Elastizitätsmodul gegeben ist. Da man Wechselstrom variabler Frequenz bequem erzeugen kann, lässt sich Resonanz zwischen elektrischer und Stabfrequenz leicht erreiche. Daher ist es möglich, sehr intensive Schallschwingungen unter Benutzung geeigneter Stäbe bis zu 60 kHz erzeugen. In diesem Fall beträgt die Länge eines in der Grundschwingung erregten Nickelstabes nur 4 cm; die Schallwellen werden von den Endflächen des schwingenden Stabes abgestrahlt."

Bergmann/Schäfer I (1975) 540: "Umgekehrt erfährt ein derartiger Kristall in einem elektrischen Feld, dessen Richtung mit der polaren Achse zusammenfällt, mechanische Deformationen (reziproker piezoelektrischer Effekt). Man schneidet zu diesem Zweck aus einem Quarzkristall, dessen drei zweizählige, zur optischen Achse senkrecht verlaufenden Achsen polar sind, Stäbe oder Platten entsprechend der in Abb. IX, 61 angegebenen Orientierung so heraus, daß ein Flächenpaar senkrecht zu einer polaren Achse (X in Abb. IX, 61) liegt. Versieht man dieses Flächenpaar mit Metallbelegungen und legt man diese an eine elektrische Wechselspannung, so wird das Kristallstück zu elastischen Schwingungen angeregt, deren Amplitude ein Maximum erreicht, wenn die elektrische Frequenz mit einer der mechanischen Eigenfrequenzen des Kristallstückes übereinstimmt."

speziell als Scheibe herausgeschnitten werden, lassen sich aber zu größeren Stücken kleben³⁰⁴ und zwischen zwei Stahlplatten als Elektroden (GRAPHIK 65) einspannen³⁰⁵.

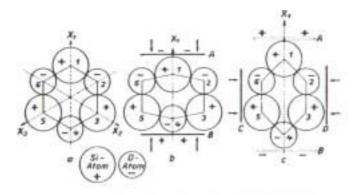
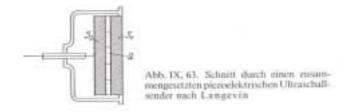


Abb. 102. Zur Entstehung der Piezoelektrizität

Graphik 64

Grob vereinfacht lässt sich ein Ultraschallsender als Membranpumpe – in der Gegenüberstellung mit herkömmlichen Membranpumpen³⁰⁶ – als Düsenantrieb im Vergleich mit Kolbenmotoren (GRAPHIK 67) bezeichnen³⁰⁷,



Graphik 65

bzw. ist der Ultraschallsender für die Membranpumpen ungefähr das, was der Düsenantrieb für Kolbenmotoren³⁰⁸.

³⁰⁴ Bergmann/Schäfer I (1975) 541 f.

Bergmann/Schäfer I (1975) 542: "Da es für großflächige Ultraschallsender im Frequenzbereich 20bis 30 kHz, wie sie für Unterwasserschallgeber (zB beim Echolot) Verwendung finden, schwierig ist, genügend große homogene Quarzplatten zu beschaffen, setzt man Platten aus kleineren Stücken mosaikartig zusammen und kittet sie zwischen Stahlplatten von mehreren Zentimeter Dicke. [...] Da Quarz und Stahl annähernd die gleiche Schallgeschwindigkeit haben, schwingt das ganze System wie eine einheitliche Platte von der Dicke 6,2 cm und erzeugt dementsprechend eine Schallfrequenz von 38 kHz. 306 Vetter G. 1 ff; Becker 1 ff, 22 ff, 41 ff.

³⁰⁷ Käppeli 123 ff; vgl Bergmann/Schäfer I (1975) 554: "Wir wählen einen Ultraschallquarz von 1 cm Dicke, der bei einer Frequenz von 300 kHz eine Schallintensität I von 10 Watt/cm² = 10⁸ erg/cm² * s liefert, und die Flüssigkeit Wasser mit der Schallgeschwindigkeit c = 1484 m/s, in dem sich die Schallwellen ausbreiten. [...] Das ergibt eine Maximalbeschleunigung von rund 7 * 10⁷ cm/s², d. h. eine Beschleunigung, die 70000mal so groß ist die die Fallbeschleunigung und die sich sonst nur mittels einer Ultrazentrifuge erreichen läßt." ³⁰⁸ Bräunling 71 Bild 3-1.

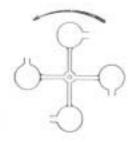


Abb. IX, 73. Akustisches Reaktionsrad

Es kann dahingestellt bleiben, ob bei 300 kHz im Wasser 70000fache Erdbeschleunigung mit einem 1 cm Dicken Quarz³⁰⁹ die Bezeichnung Düsenpumpe adäquat oder Exakt genug wäre, doch tatsächlich arbeiten alle auf dem Markt erhältlichen und in der technischen Wissenschaft beschriebenen herkömmlichen Membranpumpen³¹⁰ entweder mit Kolben oder wird der Kolben durch Hydraulik³¹¹ oder mit Elektromagneten³¹² so ersetzt, dass sich die Hydraulik oder Elektromagnet ausschließlich auf die Simulation der Kolbenbewegungen beschränkt³¹³, und daher in einem Frequenzbereich bleibt, wo ohne Ventile die Pumpe nicht arbeiten kann: Die Ultraschallpumpe arbeitet aber ohne Ventile³¹⁴ und gibt einen Strahl von sich wie ein Strahltriebwerk bzw. Düsentriebwerk³¹⁵.

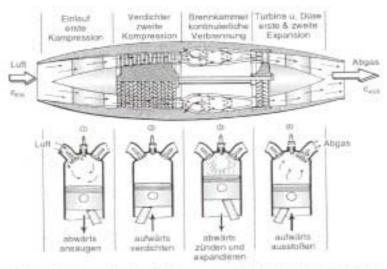


Bild J-E: Vergleich zwischen dem Administration einer Viertalt-Kolhennetons und dem vision kontinniellich arbeitenden Embejettriebwerke.

Graphik 67

Die herkömmliche Membranpumpe besteht aus einer Art Gummischeibe, die mit einem Kolben bewegt werde³¹⁶, und insofern bei Spezialanwendungen der elastische Gummi oder

³⁰⁹ Bergmann/Schäfer I (1975) 554.

³¹⁰ Becker 4 ff; Vetter G. 1 ff.

³¹¹ Vetter G. 6 ff.

³¹² Becker 7 ff.

³¹³ Becker 4 ff, 7 ff; Vetter G. 1 ff, 6 ff.

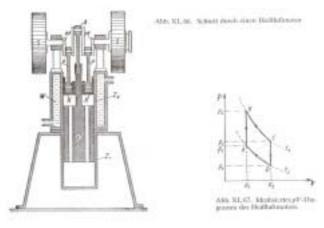
³¹⁴ Bergmann/Schäfer I (1975) 553.

³¹⁵ Bräunling 71 Bild 3-1; Schmidt E. 365 ff.

³¹⁶ Becker 4 ff.

Plastik durch Metall³¹⁷ verstärkt oder gar so gut wie ersetzt werde, die eingesetzte Verstärkung ist ein Manko³¹⁸. Die herkömmliche Membranpumpe kommt über das Prinzip der Kolbenpumpe nicht hinaus.

So weit die vom Ultraschallsender ausgehenden parallelen Luftstrahlen³¹⁹ (GRAPHIK 62) mit Laser vergleichbar sind, so könnte zwar auch dieser Vergleich hinken, doch immerhin zählt das Pulsen des Lasers³²⁰ zu dessen bevorzugten Eigenheiten, und zumindest in der Theorie ist die Identität eines elektromagnetischen Strahlungsfeldes mit einem Gasfeld³²¹ analog festgestellt, wie die dem Gasfeld entsrpechende Reaktion des Schallfeldes³²². Da es auch einen elektromagnetisch bewegten Kolben der Ultraschallsender als Membranpumpe gibt³²³ (GRAPHIK 72), die eher dem Freikolbenmotor (GRAPHIK 70) nachempfunden ist, aber dessen funktionelle Identität mit dem Drehkolben (GRAPHIK 68, 73) außer Frage stehe, so liegt es nahe, die Analogie zwischen Ultraschallsender und Membranpumpe (GRAPHIK 62, 72) über die Magnetostriktion³²⁴ (GRAPHIK 77) zu veranschaulichen, wo die Mechanik und Funktion analog ist³²⁵, und der Unterschied nur in der Pumpfrequenz besteht, welche die Stoßwelle erzeugt, die praktisch wie ein Düsenstrahl funktioniert³²⁶.



Graphik 68

Das Beispiel der Ultraschallsender als Membranpumpe³²⁷ zeigt, dass auf dem Gebiet der technischen Entwicklung nicht immer das technische Optimum sich gleich durchsetzt, ja diese oder jene Errungenschaft oft gar nicht erkannt wird, sondern das sozialökonomische Umfeld also oft die Bewusstseinsbildung und ein dadurch gefülterter Markt allein oder die

³¹⁷ Vetter G. 6.

³¹⁸ Becker 11 ff, 22 ff, 41 ff.

³¹⁹ Bergmann/Schäfer I (1975) 553.

³²⁰ Diedrichsen 28.

³²¹ Hahn, V. Kapitel. Strahlung und Photometrie, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 600 f.

³²² Bergmann/Schäfer I (1975) 530 ff, 553 f.

³²³ Becker 7 f.

³²⁴ Bergmann/Schäfer I (1975) 540 ff; vgl Günther/Hansen/Veit 246 f.

³²⁵ Vetter G. 1 ff, 6 ff.

³²⁶ Bergmann/Schäfer I (1975) 553 f.

³²⁷ Bergmann/Schäfer I (1975) 552 ff

Zeitumstände entscheiden³²⁸, ob der technische Fortschritt sich dann in der Anwendung und auf dem Markt durchsetze. So ähnlich wie die Brennstoffzelle³²⁹ bereits im 19. Jahrhundert entdeckt wurde, aber erst jetzt – auf dem Umweg für die Raumfahrt – wiederentdeckt werden musste³³⁰, so sind zahlreiche Erfindungen in Vergessenheit geraten, deren Zeit noch nicht gekommen ist oder überhaupt nicht kommen werde, obwohl sie technisch sehr wohl den heutigen und zukünftigen Anforderungen entsprächen.

Um den didaktischen Übergang vom Kolbenmotor zum Düsentriebwerk³³¹ aerodynamisch analog bei der hochfrequenten Membranpumpe (Ultraschall) zu bewerkstelligen, dürfte zunächst wohl die dem Verbrennungsmotor analoge Funktion des Stirlingmotors bzw. Heißluftmotors (GRAPHIK 68) – als eines anerkannten Hauptrepräsentanten der Wärmekraftmaschinen – zu vergegenwärtigen³³². Der Kolbenmotor von Stirling arbeitet ohne Ventile und ohne Explosion einfach durch die Gegenüberstellung der Ausdehnung der Gase bei Wärme und Kontraktion bei Kälte und liefert dabei - schon in der klassischen Version bis etwa 40 PS den Verbrennungsmotoren adäguate Leistung³³³, und unter Anwendung neueren Technologien für viele Anwendungen eine besser bis beste Leitung. Um die scheinbar relativ geringe Leistung und die Arbeitsweise nicht zu unterschätzen, ist auf den Kühlschrank³³⁴ zu verweisen, der in jedem Haushalt mit einem von der Firma Philips³³⁵ weiterentwickelten Stirlingmotor arbeitet.

³²⁸ Werdich/Kübler 146.

³²⁹ Vorberg, in: < http://members.aol.com/javorberg/FC_fr.htm >: "Der walisische Richter und Physiker Sir William Grove, der 1839 (22 Jahre vor Entdeckung des Vier-Takt Motors) das Prinzip entdeckte, nach dem sich aus Wasserstoff elektrischer Strom gewinnen läßt. Sein Pech, denn mit seiner Entdeckung weiß im Zeitalter der Dampfmaschine niemand etwas anzufangen. William Grove stirbt als unbekannter Mann. Erst 150 Jahre später beschäftigt das revolutionäre Konzept des Walisers eine Heerschar von Wissenschaftler und Ingenieuren. [...] Das Prinzip der Brennstoffzelle beruht auf der Umkehrung der Elektrolyse. Während bei der Elektrolyse Wasser mit Hilfe von elektrischem Strom in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten wird, so wird in der Brennstoffzelle aus Wasserstoff und Sauerstoff elektrischer Strom erzeugt. [...] Diese hocheffiziente elektrochemische Umsetzung hat als erster Wilhelm Ostwald auf der Gründerversammlung der Bunsengesellschaft 1897 zur ressourcenschonenden Elektroenergieerzeugung aus fossilen Brennstoffen empfohlen und als wichtigste Aufgabe der Elektrochemiker bezeichnet."

³³⁰ Hugh, in: < http://www.solarserver.de/solarmagazin/artikeloktober2000.html#top >: "Die Idee ist schon recht alt. Bereits 1839 erfand der Physiker William R. Grove eine Technik, die in den sechziger Jahren dieses Jahrhunderts in der Raumfahrt aufgegriffen wurde, als es galt, Wasser und Energie für die bemannten Raumflüge zu erzeugen: Die Brennstoffzelle."

³³¹ Bräunling 71 Bild 3-1.

Bergmann/Schäfer I (1975) 731 f; Basshuysen/Schäfer.1 ff, 9 ff, 852; Walzer 8 ff; Schleder 23 ff, 37 ff; Werdich/Kübler 6 ff, 18 ff; Schmidt E. 265 ff.

³³³ Bergmann/Schäfer I (1975) 731; vgl Chen, Untersuchungen zur Optimierung eines solaren Niedertemperatur-Stirlingmotors, in: < http://hsss.slub-dresden.de/pub2/dissertation/2005/maschinenwesen/1111049328086-3547/1111049328086-3547.pdf >, S. 5, ff, 62, 98.

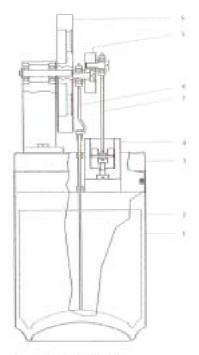
334 Bergmann/Schäfer I (1975) 731, 745 Abb XI 80.

³³⁵ Bergmann/Schäfer I (1975) 731, 756 ff, 757 Abb XII 8; Werdich/Kübler 8 f, 122 f.



Abb. 133 (oben): Getrlinkedosen-Stirling Photo: D. Viehach

Abb. 134 (rechts): Schnittbild durch den Getränkedosen-Stirling, der bereits mit Handwärme läuft. Ouelle: D. Viebach



- 1 Verdrängerzyfinder
- 2 Verdrängerkolben
- 3 Deckplatte 4 Arbeitskolben
- 5 Kurbelwange 6 Schwungrad
- 7 Arbeitskolbenpleuel
- 8 Verdrüngerkolbenpleuel

Graphik 69

Die Arbeitsweise der Stirlingmaschine als eine Art Zwischending zwischen Dampfmaschine und Verbrennungsmotor³³⁶ lässt die elegante Lösung elementarer Zusammenhänge (GRAPHIK 69) erkennen³³⁷, besonders in der Gegenüberstellung mit der Eintönigkeit bei Verbrennungsmotoren³³⁸. Der funktionellen Eintönigkeit der ausgereiften Technologie der Verbrennungsmotoren³³⁹ steht eine Vielfalt der Entwicklungen und Möglichkeiten bei Wärmekraftmaschinen wie der Stirling-Motor gegenüber³⁴⁰. Gewisse Schwerpunkte haben sich inzwischen auch bein dem Stirling-Motor herauskristallisiert, von denen hier nur jene selektiv herausgegriffen werden, die eine Querverbindung zum Ultraschallsender als Membranpumpe³⁴¹ haben.

³³⁶ Bergmann/Schäfer I (1975) 732 ff, 741 ff; Schmidt E. 270 ff.

³³⁷ Werdich/Kübler 139 Abb 133-134; Schleder 56: In einem Schaumodell von Viebach ist ein Kolben in eine Getränke-Dose, wo oben ein Schwungrad aufmontiert, dass sich zu drehen beginnt, wenn man die Dose in der Hand nimmt und die untere Hälfte hält und so mit der Hand erwärmt. Die einfache Temperaturdifferenz zwischen Hand und Umgebungsluft treibt also bereits den Kolben an man braucht nicht mehr als den Temperaturunterschied zwischen der unteren und oberen Hälfte der Dose, damit der Kolben beginnt auf und ab sich zu bewegen und das aufgesetzte Rad zu drehen.

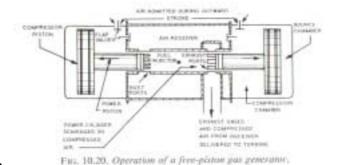
³³⁸ Werdich/Kübler 10 ff.

³³⁹ Basshuysen/Schäfer.1 ff.

³⁴⁰ Werdich/Kübler 10 ff

³⁴¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 553 f.

66



Graphik 70

• Der Freikolbenmotor (GRAPHIK 70) wird heute oft als eine der Weiterentwicklungen der Stirlingmaschine angesehen, wo zum Fehlen der Ventile auch ein Fehlen die Verbindung zur Kurbelwelle kommt³⁴² (daher der Name Freikolbenmotor). Der zweiseitig pendelnde bzw. oszillierende Kolben in einem Zylinder leistet die gleiche Arbeit, gibt aber die Energie nicht an eine Kurbelwelle ab, die bei Kolbenmotoren für gewöhnlich mit dem Kolben verbunden ist, sondern in der Form einer Pumpe, z. B. als Membran³⁴³, wird die Energie des Kolbens an einen hydraulischen Antrieb abgegeben.

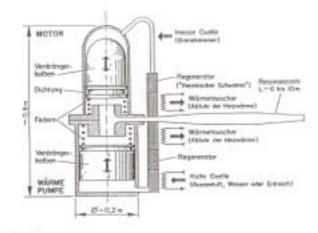


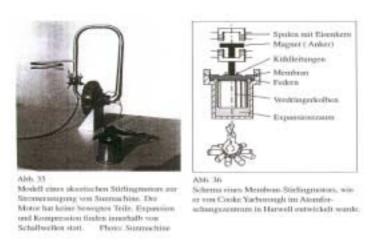
Abb. 34: Die Stelleg-Wärmepunge (Witzuschundiemsten) nach Budlinger. Das Ressouncerbs, das an die Stelle des Arbeitskolbsen teit, ist deutlich zu rekennen.

Graphik 71

³⁴² Werdich/Kübler 43 f. "Prinzipiell können alle Arten von Stirlingmotoren in Freikolbenmotoren umgewandelt werden, indem man das nach außen führende mechanische Element (z. B. Pleuel, Schubstange, Zugstange, o. ä.) durch ein inneres Feder-Dämpfungssystem ersetzt. [...] Aus einem labilen Gleichgewicht heraus beginnen die Kolben bei den kleinsten Temperaturveränderungen und der sich daraus ergebenden Druckänderung zu oszillieren, d. h. sie schaukeln sich gegenseitig auf. Für hohe Kolbengeschwindigkeiten sind externe Wärmeaustauscher notwendig. Trotzdem sind diese Maschinen wegen ihrer Einfachheit (nur zwei sich bewegende Teile und Fehlen von Seitenführungskräften auf die Kolben) und wegen der Umgehung aller Dichtprobleme sehr interessant und attraktiv."

³⁴³ Werdich/Kübler 43: "Bei Freikolbenmotoren bestehen keine mechanischen Verbindungen zwischen dem Arbeitskolben, dem Verdränger und der Umgebung. Beide Kolben können sich frei bewegen. Die umgewandelte Energie kann durch eine Membran (hydraulisch-mechanische Energie), durch einen Generator (elektrische Energie), durch Wärmeaustauscher (Wärme-, Kältetransport) oder durch eine beliebige Kombination dieser Elemente nach außen übertragen werden."

• Eine Steigerung des Freikolbenmotors ist es, den schwingenden Kolben durch eine schwingende Luftsäule (GRAPHIK 71) zu ersetzen³⁴⁴. Von dort ist ein kurzer Weg zum "akustischen Stirlingmotor", wo die Kompression und Expansion durch Schallwellen stattfindet³⁴⁵.



Graphik 72

• Der Membran-Freikolben-Stirlingmotor (Diaphragma) wird auch als thermomechanische Generatoren (TMG) bezeichnet (GRAPHIK 72). "Anstelle eines Arbeitskolbens besitzt diese Ausführung eine Metallmembran, an der ein Permanentmagnet befestigt ist. Der Verdränger ist mit einer oder mehreren Federn mit dem Zylinder verbunden. Durch Abstimmung der Feder und Massen der bewegten Teile lassen sich beliebige Frequenzen erreichen. Als Wärmequelle wurde am Hardwell-Institut zunächst ein radioaktives Isotop benutzt, heute werden die Brenner mit Propangas betrieben. Solche Anlagen wurden bereits gebaut, berechnet und getestet."³⁴⁶

Die hier genannten drei Schritte, erstens zum Freikolben als (nicht mechanisch verankerten sondern) hydraulischen Oszillator, zweitens zum Ersetzen des Freikolbens durch eine oszillierende Luftsäule und drittens das Ersetzen des Kolbens durch eine Membran im Stirlingmotor³⁴⁷, bringen uns in die Nähe der hydraulischen Membranpumpe³⁴⁸ mit drei

Daher suchte Herr Bullinger aus Genf nach einer Möglichkeit, den oszillierenden Arbeitskolben durch eine periodisch schwingende Gassäule zu ersetzen (Abb. 34). Die Länge und die Form des Resonanzrohrs bestimmen die Schwingungsformen. Eine Sinusschwingung der Luftsäule ist bereits erreicht worden."

³⁴⁴ Werdich/Kübler 46 f: "Die in Abb. 33 gezeigte Duplex-Stirling-Wärmepumpe ist eine reine Freikolben-Bauform mit drei freischwingenden Kolben. Der Nachteil dieser Maschine ist zum einen, dass der Arbeitskolben (befindet sich in der Mitte) periodisch hohen Druckdifferenzen ausgesetzt ist (und das bei Trockenschmierung), so dass eine solche Maschine nach einer konstanten Schwingung verlangt, damit die Reibung auch nach längerer Zeit noch gleich bleibt (nur wenig Dichtungsantrieb); zum anderen lässt sich diese Maschine relativ schwer starten oder im Teillastbereich fahren.

³⁴⁵ Werdich/Kübler 48: "Schwingende Gassäulen als Arbeitskolben oder als Verdränger werden auch beim sogenannten "akustischen Stirlingmotor" von Sunmachine (Abb. 35) verwendet. Hier findet die Kompression und die Expansion des Arbeitsgases in wandernden Schwingungsknoten und –bäuchen von Schallwellen statt. Die Schwingungsenergie wird über Schwingungsspulen (voice coils), d. h. umgekehrte Lautsprecher, abgeführt."

Werdich/Kübler 48.Werdich/Kübler 46 ff.

Schritten, wo der akustische Stirlingmotor als zweiter Schritt der entscheidende ist, wonach der Helmholtzscher Resonator³⁴⁹ und/oder ein Ultraschallerreger sich als Membranpumpe eignen³⁵⁰ und als ein Freikolben Stirlingmotor (mit hoher Frequenz) begriffen werden können³⁵¹.

Ist so weit der Freikolbenmotor als Erweiterung des Horizonts beim Stirlingmotor nachvollziehbar, so kann die Querverbindung zu den Verbrennungsmotoren in die Betrachtung einbezogen werden, denn der 1910 von Hugo Junkers erfundene Freikolbenmotor³⁵² ist ursprünglich für Verbrennungsmotoren entwickelt worden. "Der Freikolbenmaschine liegt der Gedanke zugrunde, den thermodynamischen Prozess, bestehend aus

- Arbeitsmittelaufbereitung und Verbrennung sowie
- Umwandlung der Wärme des Arbeitsmittels in mechanische Arbeit,

zu trennen und verschiedenen Maschinenarten zuzuweisen. Der erste Teil, Verdichtung und Verbrennung («Wärmezufuhr»), sollte im Dieselmotor stattfinden, der zweite Teil, Expandieren und Ausscheiden («Wärmeabfuhr») in einer Gasturbine. "353 Mit anderen Worten beruht die Idee des Freikolbenmotors auf die Zweiteilung des bisher mit der Kurbelwelle eine integrierende Einheit bildenden Kolbenmotors³⁵⁴ auf einen

- Kolbenteil ohne Kurbelwelle und
- auf eine Kurbelwelle,

die fortan hydraulisch angetrieben werde³⁵⁵. Das bedeutet dass die Zweiteilung des "Kolbenmotors der Wärmekraftmaschine mit integrierter Kurbelwelle" in einen "heißen Freikolben" einerseits und in eine "kalte Turbine" andererseits, der Umstellung der Kurbelwelle auf Hydraulik gleichkomme³⁵⁶.

Der mechanische Unterschied zwischen Freikolbenmotor und Stirlingmotor war, dass der Freikolbenmotor (1910) in der Grundausführung in einem Zylinder mit zwei gegenläufigen

³⁴⁸ Ruder, Supraflüssiges Helium als hochempfindliches Gyroskop zum Nachweis der Erdrotationsschwankungen, in: < http://www.uni-tuebingen.de/uni/qvf/py/py5/text/py5t26.html >.

³⁴⁹ Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 808 Abb 25.18.

³⁵⁰ Bergmann/Schäfer I (1975) 552 ff.

Bergmann/Schäfer I (1975) 634: "Auch das pneumatische Feuerzug (Abb. XI, 11) beruht auf adiabatischer Kompression. In einer meist einseitig geschlossenen, meist aus Glas bestehenden, dickwandigen Röhre R läßt sich ein luftdicht schließender Kolben K verschieben, der in einer Vertiefung seines Bodens ein Stück Feuerschwamm Z trägt. Stößt man den Kolben rasch in den Zylinder hinein, so tritt durch die plötzliche Verdichtung der Luft eine so starke Temperaturerhöhung ein, daß sich der Feuerschwamm entzündet."
³⁵² Zima 505 ff.

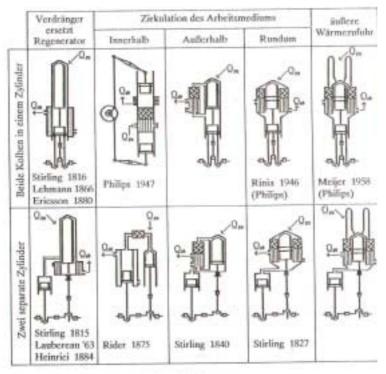
³⁵³ Zima 506.

³⁵⁴ Basshuysen/Schäfer.1 ff.

³⁵⁵ Zima 505 f.

³⁵⁶ Zima 505 f.

Kolben arbeitet³⁵⁷, während der Stirlingmotor (1816) in der Grundversion in zwei (unterschiedlich großen) Zylindern mit zwei (unterschiedlichen) Kolben³⁵⁸ (GRAPHIK 73). Die auf den Prototyp von Stirling folgenden Heißluftmaschinen³⁵⁹ aber schon ab 1860 in einem Zylinder – auf beiden Seiten des Zylinders – gegenläufige Vorgänge gleichsam spiegelverkehrt mit zwei Kolben so ausführen³⁶⁰, dass ein Kolben in dem halbseitig geschlossenen Zylinder beidseitig Arbeit geleistet hatte, und so den Freikolbenmotor bis auf den Verzicht auf die Kurbelwelle vorwegnahmen. Dies unterscheidet sie beide von den Verbrennungsmotoren, die bis heute mit einem Kolben in einem Zylinder einseitig arbeiten³⁶¹. Bezeichnend ist, dass in der neueren Literatur der Stirlingmotor nur mehr mit zwei gegenläufigen Kolben in einem Zylinder (GRAPHIK 74), als eine Art Kreuzung mit dem Freikolbenmotor, vorgestellt wird³⁶².



Abh. 48: Kurbeltriehwerke verschiedener Stirlingmotoren.

Graphik 73

Dies hervorzugeben – entgegen den in der Fachliteratur gesetzten Schwerpunkten – gilt aus praktischen Gründen deswegen, weil so die "kalte" Gasturbine als die bessere Hälfte des Freikolbenmotors u. a. bei Diesellokomotiven der Firma Renault in den 1940ern und 1850ern

³⁵⁷ Zima 506 Bild 11.61.

³⁵⁸ Fister I 24; Schmidt E. 265 ff.

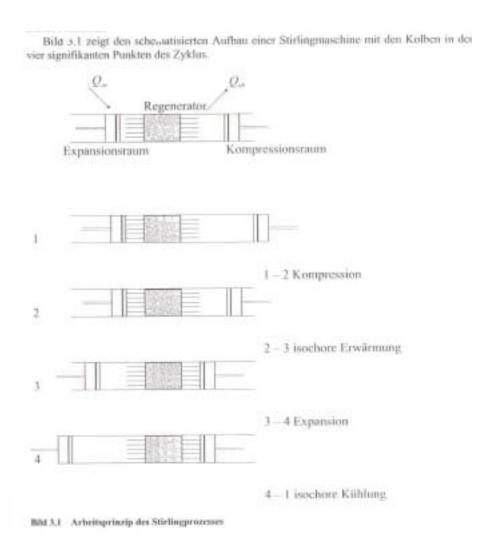
³⁵⁹ Fister I 25; Schmidt E. 270 ff.

³⁶⁰ Bergmann/Schäfer I (1975) 732 Abb XI 66.

³⁶¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 742 Abb XI 76-77; Basshuysen/Schäfer 1 ff.

³⁶² Schleder 23 Bild 3.1.

serienmäßig zum Einsatz kam³⁶³, und aus theoretischen Gründen deswegen, weil die Querverbindung des Freikolbenmotors zum Stirlingmotor darin bestand, dass infolge der vorgenannten Zweiteilung des vormaligen Kolbenmotors, in Freikolben einerseits und Gasturbine andererseits, in dem Kolben zwar eine heiße Verbrennung stattfand, aber die Turbine schon relativ abgekühlt – mit den Abgasen – angetrieben wurde³⁶⁴, also die Turbine (als die andere Hälfte des Freikolbenmotors) sich bei Temperaturen bewegte, die eigentlich die Domäne des Stirlingmotors waren und sind³⁶⁵.



Graphik 74

Als Stelzer Anfang der 1980er seinen dahingehend modifizierten Freikolbenmotor vorstellte³⁶⁶, dass er die bisher gegenläufig arbeitenden zwei "freien" Kolben in einem Zylinder mit einer innen hohlen Querstange verband (GRAPHIK 75) und in der Mitte einen dritten "Kolben" oder Dichtung einführte, der von den beiden anderen Kolben an den Enden

³⁶³ Zima 507 ff.

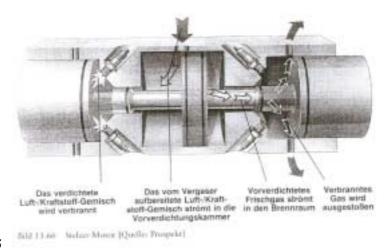
³⁶⁴ Zima 506 f.

³⁶⁵ Werdich/Kübler 18 ff.

³⁶⁶ Zima 509 ff.

der hohlen Querstange durch je eine Zwischenwand getrennt war, die für die beiden Kolben an den Enden der hohlen Querstange bildeten³⁶⁷ (und die zwei Verbrennungsräume und zwei Ansaugräume für den Viertaktmotor simulierten) und die hohle Querstange durch gut platzierte Öffnungen als durchgehender Verbindungskanal zwischen den Hohlräumen fungierte, um so mit den Abgasen "hydraulisch" bzw. "pneumatisch" eine außen angeschlossene Turbine anzutreiben³⁶⁸ (GRAPHIK 76), hatte er eigentlich einen Oszillator als Antrieb einer Turbine kreiert, indem die zu einem Stück querverbundenen Kolben in einem Zylinder oszillierten und an einem Ende die Abgase hydraulisch in die angeschlossene Turbine "pumpten".

Es kommt bei dieser Entwicklung nicht darauf an, ob und wie die Autoindustrie dieses Modell verwarft³⁶⁹, denn die marktökonomische Verwendbarkeit für die technologisch allzu einseitige Autoindustrie noch nichts über die technische Wertigkeit der Maschine selbst aussagt, sondern kommt es darauf an, dass ein Oszillator im Modell nach Stelzer die "kalte" Turbine "hydraulisch" antreibt³⁷⁰:



Graphik 75

Es wurde also eine Kolbenpumpe bzw. Oszillator als Motor des hydraulischen Antriebs eingesetzt (GRAPHIK 76).

³⁶⁷ Zima 510 Bild 11.66.

³⁶⁸ Zima 511 Bild 11.67.

³⁶⁹ Zima 510.

³⁷⁰ Zima 511 Bild 11.67.



Bild 11.67 Stelzer-Motor: Fiktion eines hydraulischen Antriebs [Quelle: Stelzer-Prospekt]

Die Vorstellung des Freikolbenmotors von Stelzer wäre hier zwar vielleicht überflüssig, wen man gleich von einer Kolbenpumpe³⁷¹ als Motor für eine kalte Turbine spricht, oder von einer Membranpumpe, die in der Regel mit Kolben angetrieben werde³⁷². Optisch könnte aber besonders die Magnetostriktion bei einem oszillierenden zylindrischen Stab³⁷³ (GRAPHIK 77) mit den – durch eine Querstange in einer Linie verbundenen – oszillierenden Kolben als Antrieb der Turbine verglichen werden³⁷⁴, wenn man Ultraschallsender als Membranpumpe veranschaulichen möchte.

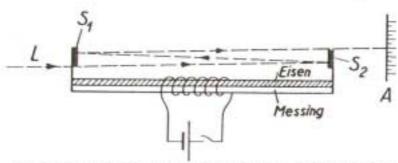


Abb. 280. Bimetallstreifen zum Nachweis der Magnetostriktion von Eisen

Graphik 77

Eine ähnliche Mechanik aus der Drucklufttechnik wird als Motor bezeichnet und arbeitet mit einer Membran (GRAPHIK 78), die allerdings nicht mehr hydraulisch sondern mechanisch ein Rad radial antreibe³⁷⁵, und die analogen Funktionsabläufe anschaulich zeige.

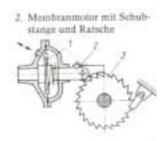
³⁷² Becker 4 ff, 41 ff.

³⁷¹ Vetter G. 8.

³⁷³ Bergmann/Schäfer I (1975) 540 ff; vgl Günther/Hansen/Veit 246 f.

³⁷⁴ Zima 511 Bild 11.67.

³⁷⁵ Schwate 168.



Der Grundgedanke bei kurbelwellenlosen Triebwerken war die Entkoppelung von Arbeitsspielfrequenz und Arbeitsdrehzahl³⁷⁶. Weil in Deutschland ursprünglich die hydrostatischen Antriebe als Einheit mit dem Freikolben weiter entwickelt wurden³⁷⁷, stand und fiel der hydraulische Antrieb mit dem Freikolben. So vermeinte man in den 1960ern aufgrund der projektbezogenen Entbehrlichkeit des Freikolbens auch auf den hydrostatischen Antrieb – wie schon in der ersten Hälfte des Jahrhunderst – verzichten zu können³⁷⁸, weil der Freikolbenmotor dem Konkurrenzdruck nicht gewachsen war.

Die Briten und Amerikaner hatten ganz andere Testprojekte gewählt³⁷⁹ (GRAPHIK 79), hatten so eine andere Perspektive und Herangehensweie, weil sie die Hydraulik vom Freikolben entkoppelt hatten. Beim Einsatz mit normalen Dieselmotoren hat sich der hydraulische Antrieb in einigen Gebieten durchgesetzt und wurde für einige Bereiche sogar unentbehrlich³⁸⁰.

_

³⁷⁶ Kienlin 103: "Der Föttinger-Transformator – der erste hydrodynamische Drehmomentwandler – dessen Grundpatente von Föttinger aus dem Jahre1905 stammen, kam erstmals im Juni 1909in Verbindung mit einem Schiffs-Dampfturbinenantrieb zur Anwendung. Bei den ersten praktischen Reisen konnte schon ein Wandelwirkungsgrad von 83 % nachgewiesen werden. Nach diesen guten Ergebnissen bestellte 1912 die HAPAG das Schiff 'Tirpiz' mit zwei hydrodynamischen Drehmomentwandlern von je 8000 PS, und später bestellte die Kaiserliche Marine von Schiffe mit Wandlern, die die beachtliche Leistung von je 35000 PS aufwiesen. Damals war es der Zweck, zwischen Dampfturbine und Propeller ein Glied einzuführen, das die verhältnismäßig schnellaufende Turbine auf die niedere Propellerdrehzahl herabsetzt." Vgl Zima 227: "Um die Vorteile beider Motorgattungen, die Einfachheit des Zweitakters mit Direktantrieb der Schraube (also ohne Getriebe) und die kleinen Abmessungen der Viertakt-Mittelschnellläufer miteinander zu kombinieren, entwickelten die Krupp Maschinenfabriken, Essen, der Fried, Krupp GmbH in den 1960er-Jahren das Konzept eines umkehrgespülten Zweitakt-Gegenkolben-Dieselmotors mit hydrostatischem Treibwerk (Bild 6.6162). Dieser Entwurf, Typ 8Hza66, sollte mit acht Zylindern 27 500 PS (20 220 kW) bei einer Abriebsdrehzahl von 90,5 min ⁻¹ leisten. Der Grundgedanke war der gleiche wie bei anderen kurbelwellenlosen Triebwerken, nämlich die Entkoppelung von Arbeitsfrequenz und Abtriebsdrehzahl."

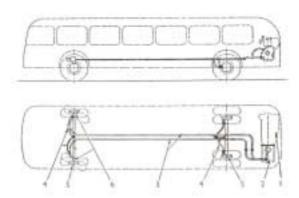
³⁷⁷ Kienlin 103: "Geeignete Zahnradgetriebe zwischen Dampfturbine und Propeller waren damals nicht vorhanden, sie werden erst in der darauffolgenden Zeit entwickelt, und zwar mit Untersetzungsverhältnissen bis 15:1 bei einem Wirkungsgrad von 98,5 %. Außer dem sehr viel höherem Wirkungsgrad erwies sich die Getriebe-Turboanlage insgesamt als wirtschaftlicher, da sie einfacher und billiger ist als eine Anlage mit hydrodynamischen Drehmomentwandlern. Auf Grund dieser Umstände gab es für den hydrodynamischen Drehmomentwandler im Schiffsantrieb in Verbindung mit einer Dampfturbine keine Zukunft mehr, so daß seine Anwendung nur auf einige Schiffe beschränkt blieb." Vgl Zima 227 ff, 230

³⁷⁸ Zima 228 f, 233.

³⁷⁹ Giles 10 ff, 201 ff, 303 ff.

³⁸⁰ Schräger 137; Hartmann 183.

Fig. 1.6. Klatte positive displacement hydraulie drive: (1) engine: (2) pump; (3) main fluid supply line; (4) individual wheel supply line; (5) hydraulic wheel motors; (6) steerable wheels,



Durch den Einsatz von herkömmlichen Verbrennungsmotoren (statt Freikolbenmotoren) und besonders durch die Abgasturbinen ist der hydraulische Antrieb wieder attraktiv geworden³⁸¹. Heute heißt es in Fachkreisen:

"Hydrostatische Antriebe gelten heute als Standard in einer Reihe von Mobilmaschinen der Bau- und Straßenbaumaschinen sowie bei Land- und Forstmaschinen."382

Oder:

"Im Schwerlastbereich werden heutzutage hydraulische Antriebe aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte eingesetzt. Vor allem die extrem hohe Leistungsdichte der Antriebskomponenten, kombiniert mit den Vorzügen eines stufenlosen hydrostatischen Getriebes machen dieses Antriebskonzept für viele Anwendungen unschlagbar."383

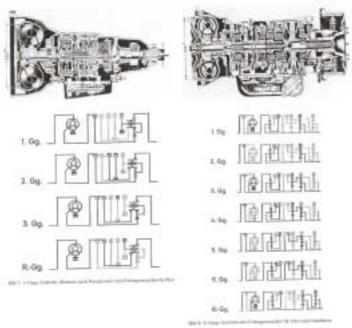
Es wird dabei offen von Fahrantriebpumpe gesprochen³⁸⁴. Unter den Extrembedingungen (Off-Road) hat sich gezeigt, dass zwar ein Differenzial beim Allradantrieb technisch gelöst ist, aber dezentral die Arbeit auf zwei Pumpen aufgeteilt Vorteile bringt und das System lässt sich beliebig erweitern und modifizieren³⁸⁵. Man könnte die sich anbietenden Entwicklungsmöglichkeiten so formulieren, dass es wohl – aus statistischen Gründen – leichter wäre etwas zu finden, was mit dieser Technik nicht möglich ist, als näher zu bestimmen, was alles möglich wäre³⁸⁶.

³⁸¹ Hartmann 184; Schräger 138, 147; Kienlin 103: "Mit Einführung der Dieselmotoren und besonders durch Abgasturbinen hochaufgeladenen Motoren im Schiffsbetrieb sind auch dort von der Motorenseite her Anforderungen an variable Umsetzungsverhältnisse zwischen Motor und Propeller entstanden." Vgl Ullmann 85: "Es kann heute mit Sicherheit gesagt werden, daß damals unabhängig voneinander von mehreren Firmen, insbesondere in Deutschland, begonnen wurde, hydraulisch angetriebene Universalbagger zu entwickeln. [...] Es wurde also die schon für das Arbeitsgerät eingesetzte Hydraulikanlage ausgebaut und zu weiterer Nutzung herangezogen. Der hydrostatische Fahrwerksantrieb war geboren." Schräger 137.

³⁸³ Hartmann 183.

³⁸⁴ Schräger 143 ff, Hartmann 184.

³⁸⁵ Hartmann 185 ff, 196 ff; Kienlin 104 f; Ullmann 85: "In den meisten Fällen handelt es sich um Einheiten, bestehend aus zweioffenen Kreisläufen, die in Summenleistungsregelung miteinander korrespondieren." Hartmann 188 ff, Ziebart 13.



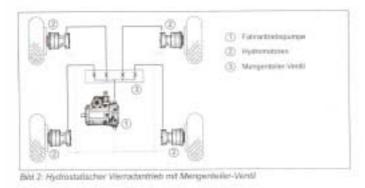
Die Emanzipierung des hydraulischen Antriebs ist nicht zuletzt dem hydraulischen Getriebe (GRAPHIK 80) zu verdanken³⁸⁷, das sich ebenfalls schon für sich betrachtet behauptet hatte und Anwendung mit der herkömmlichen Kardanwelle finde³⁸⁸, aber das volle Potential natürlich mit dem hydraulischen Antrieb in Verbindung entfalte.



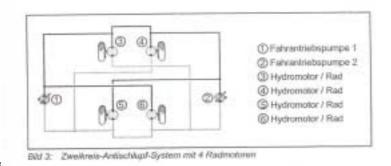
Graphik 81

Im Werkzeugbau (GRAPHIK 81) ist die Notwendigkeit eines Getriebes gering und kann bevorzugt elektromagnetisch ausgeführt werden, was entsprechend die Einsatzmöglichkeiten der Hydraulik als Antrieb steigert³⁸⁹.

³⁸⁷ Ziebart 5 ff. ³⁸⁸ Ziebart 11. ³⁸⁹ Schaller 95 ff.



Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass auch wenn sich der hydraulische Antrieb und die Turbine, als potentieller Einsatzgebiet der Ultraschallsender als Membranpumpe³⁹⁰, in Deutschland ursprünglich von der Teilung des Freikolbenmotors her entwickelt hatten³⁹¹, so haben sie sich inzwischen beide emanzipiert (GRAPHIK 82, 83). Sobald sich der hydraulische Antrieb für sich behauptet habe³⁹², kann und muss sich die Aufmerksamkeit dem pneumatischen Antrieb zuwenden, wo die Turbine sozusagen in ihrem Element sei³⁹³ und wahlweise mit Membranpumpe angetrieben werden kann. Insofern hier aus Gründen der Plausibilität für die bessere Nachvollziehbarkeit über den Freikolben-Stirling-Maschinen³⁹⁴ und insbesondere mit der oszillierenden Luftsäule als Kolben, Membran-Freikolben-Stirlingmotor und akustischen Stirlingmotor, auf die Pneumatik vorgegriffen wurde³⁹⁵, so doch in allen Fällen deswegen, um die Entwicklungslinie der oszillierend angetriebenen Gasturbine³⁹⁶ zurück zu verfolgen, die als Modell und Entwicklungslinie für den Ultraschallsender als Membranpumpe diente³⁹⁷.



Graphik 83

³⁹⁰ Ruder, Supraflüssiges Helium als hochempfindliches Gyroskop zum Nachweis der Erdrotationsschwankungen, in: http://www.uni-tuebingen.de/uni/qvf/py/py5/text/py5t26.html>.

³⁹¹Zima 505 ff.

³⁹² Hartmann 183 ff, Schräger 137 ff.

³⁹³ Schwate 15 ff; Kienlin 103 ff.

³⁹⁴ Werdich/Kübler 43 ff.

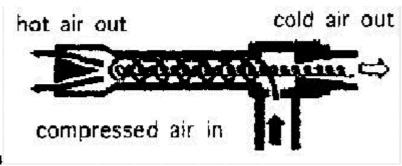
³⁹⁵ Werdich/Kübler 46 ff.

³⁹⁶ Kienlin 103 ff.

³⁹⁷ Bergmann/Schäfer I (1975) 553 f.

5.1 Das Wirbelrohr

Für Anwendung in Gasen müsste es analog wie für die Flüssigkeitshydraulik gelten, dass man leichter eine Möglichkeit einzeln ausschließen kann, als sich von den Grenzen der Möglichkeiten eine Vorstellung zu machen.



Graphik 84

Das sog. Wirbelrohr³⁹⁸ (GRAPHIK 84) ist ein Spezialgebiet mit zusätzlichen – noch unerforschten – Möglichkeiten³⁹⁹, die in unserem Zusammenhang auf die Grenzen ihrer Möglichkeiten getestet werden möchte, weil dazu ein Überdruck von mindestens 5-6 bar nötig ist, die durch eine Membranpumpe erzeugt werden kann.

In neuerer Zeit beschäftigt die Forschung die im Wirbelrohr festgestellten signifikanten Temperaturunterschiede, die sich zur industriellen Nutzung eignen⁴⁰⁰. Besonders vielversprechend scheinen die Versuche bei der Kühlung und Reinigung von CO₂ zu sein⁴⁰¹.

399 Rohling < http://fluidmotor.com/motor/wirbel2.shtml >: "Im Jahre 1933 hat Ranque eine interessante Anordnung beschrieben, die in einem druckluftbetriebenen "Wirbelrohr" die Luft in einen kalten und einen warmen Luftstrom teilt. [...] Druckluftstrom wird durch 6 Düsen stark beschleunigt in die Generatorkammer geschossen. Durch die tangentiale Einschußbahn entsteht in der runden Kammer ein Luftwirbel. Dieser wird durch die nachströmende Luft in das verengte Wirbelrohr gedrückt und dadurch stark beschleunigt (ca. 0,5 x 106 U/min.). Am Ende des Wirbelrohres erzeugt ein eingebautes Nadelventil einen gewissen Rückstandsdruck, d.h. es tritt nur eine einstellbare Luftmenge aus dem "heißen Ende" aus. Bedingt durch die Ausbildung dieser Austrittsöffnung tritt in erster Linie die periphere Luftschicht des Wirbels aus, d.h. die am stärksten erhitzte Luftschicht. Durch den Rückstandsdruck wird der andere Mengenanteil aus den inneren Luftschichten des Wirbels durch dessen Zentrum axial zurückgestoßen, wodurch eine sehr starke Abkühlung der Luftmoleküle erfolgt. Der Austritt dieser unterkühlten Luftmasse erfolgt aus dem entgegengesetzten "kalten Ende". Durch Öffnen oder Schließen des Nadelventils wird die Temperatur sehr fein variiert und kann über einen weiten Bereich eingestellt werden."

Keller, in: DPG < http://www.dpg-tagungen.de/archive/2002/ake_3.html >: "Bei der Entspannung von Gasen und Dämpfen im Wirbelrohr nach Ranque und Hilsch entstehen zwei Teilströme, deren Temperaturen über bzw. unter der Temperatur des Eingangsstromes liegen (Wirbelrohreffekt). Die Grundlagen des Wirbelrohreffektes werden dargelegt, eine einfache thermodynamische Berechnungsmethode der Austrittstemperaturen der Gasströme erläutert und an traditionelle Anwendungen des Wirbelrohrs erinnert." Vgl Keller/Göbel/Staudt, in: < http://141.99.140.157/d/ifft3/Forschung/WRGrundlagen111002.pdf >.

³⁹⁸ Mtalo 3 ff; Batel 31 ff; Siekmann 177 ff.

⁴⁰¹ Keller, in: DPG < http://www.dpg-tagungen.de/archive/2002/ake_3.html >: "Ergänzend werden verschiedene Beispiele für energie- und verfahrenstechnische Prozesse diskutiert, deren Wirkungsgrade durch den Ersatz traditioneller Entspannungsdrosseln durch Wirbelrohre erhöht werden können. Als Beispiele werden behandelt: Dampfkraftprozess nach Clausius und Rankine, Kompressionskälte- und Wärmepumpenprozesse und schliesslich Druckwechsel-Adsorptionsprozesse zur Luftzerlegung und Gasreinigung. In diesen Prozessen werden häufig nicht Gase oder Dämpfe, sondern komprimierte

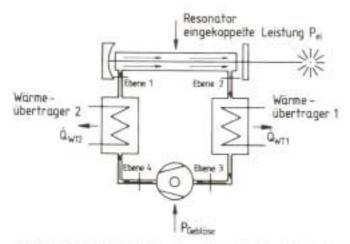


Bild 2.7: Schematischer Aufbau eines Lasers (Quelle: Gebr. Becker)

Da die CO₂-Laser (GRAPHIK 85, 86) als Anwendungsgebiet von CO₂ ist gleichsam existentiell auf ein Umwälzgebläse (GRAPHIK 87) angewiesen sind und mit diesem so eine integrierende Einheit bilden⁴⁰²,

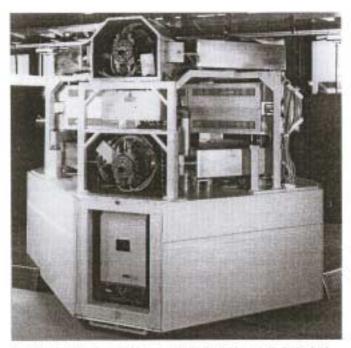


Bild 2.6; 30 kW-Laser im ILT, Aachen (Quelle: Trumpf Lasertechnik, Aachen)

Graphik 86

dass die Leistungsgrenze des Lasers allein von der Leistungsgrenze des Gebläses abhängt, oder bei Schneidedüsen ein mit dem Lichtstrahl koaxial austretender Gasstrom bis zu 60% der

Flüssigkeiten entspannt. Dies erfolgt traditionell isenthalp in einer einfachen Drossel, die in der Regel auch zur Steuerung der Leistung des Prozesses eingesetzt wird. Ersetzt man die Drossel durch eine (patentierte) Thermodrossel, die ein Wirbelrohr enthält, so ist die Entspannung der Flüssigkeit nichtisenthalp, d. h. unter Wärmeabgabe möglich. Dies führt insbesondere bei Kälte- und Wärmepumpenkreisläufen zu Erhöhungen der Leistungszahlen! Kältekreisprozesse mit Kohlendioxid (CO₂) als Arbeitsstoff bieten das grösste wirtschaftliche Verbesserungspotential. Auf die Möglichkeiten der Energieeinsparung in einem grossen Markt wird hingewiesen." Vgl Siekmann 177 ff; Keller/Göbel/Staudt, in: http://141.99.140.157/d/ifff3/Forschung/WRGrundlagen111002.pdf>.

eigentlichen Arbeit übernimmt⁴⁰³ und die Leistungsgrenze des Lasers von der Leistungsgrenze des koaxialen Gasstromes abhängt, empfehlt es sich die Anwendbarkeit des der Ultraschallsender als Membranpumpe und das Wirbelrohr im Umgang mit CO₂ an einem Laser, bzw. an einer Umwälzpumpe zu testen, weil hier bekanntlich ohnehin Entwicklungsbedarf bestehe⁴⁰⁴.

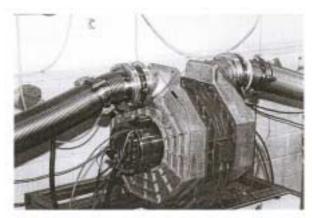
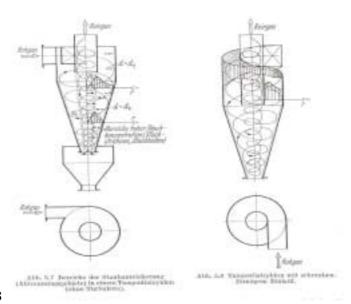


Bild 2.10 Geblies im Senerprofestand (Quelle: Euro Laser)

Graphik 87

Beim kleineren Wirbelrohr⁴⁰⁵ konzentriert sich die Aufmerksamkeit auf die nämlichen Temperaturunterschiede, zumal diese nicht erschöpfend erforscht sind, die ursprüngliche Funktion des Wirbelrohrs ist aber eine reinigende, und zwar sowohl im Wasser (GRAPHIK 89), wie auch in Gasen⁴⁰⁶ (GRAPHIK 88).



Graphik 88

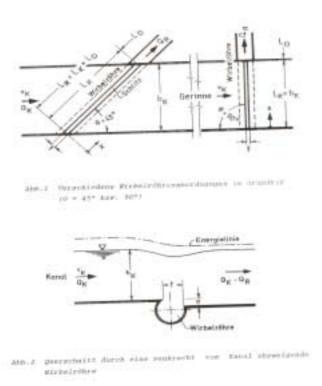
Diese Anwendungen des Wirbelrohres, nämlich durch strömungstechnische Anomalien oder durch das Hydrodynamische Paradoxon Reinigungseffekte zu erzielen, sind relativ gut

⁴⁰³ Bartholet/Stiegmann/Carlsson, in: Haferkamp/Bach 79; vgl Beyer 61 ff.

⁴⁰⁴ Bartholet/Stiegmann/Carlsson, in: Haferkamp/Bach 82; Diedrichsen 45 ff.

⁴⁰⁵ Keller/Göbel/Staudt, in: < http://141.99.140.157/d/ifft3/Forschung/WRGrundlagen111002.pdf >; Siekmann 177 ff; Rohling, in: < http://fluidmotor.com/motor/wirbel2.shtml >; Keller, in: DPG < http://www.dpgtagungen.de/archive/2002/ake_3.html >. 406 Batel 30 ff, Mtalo 3 ff.

erforscht, ähnlich wie bei der Zentrifuge, und es lassen sich hieraus auch auf die Temperaturanomalien⁴⁰⁷ beim kleinen Wirbelrohr Rückschlüsse ziehen.



Graphik 89

Die Laser-Technologie hat sich als ihre grundlegende Voraussetzung der praktischen Anwendung mit der Aerodynamik theoretisch auseinandergesetzt⁴⁰⁸, und dabei auch das Wirbelrohr betreffende Feststellungen getroffen⁴⁰⁹. Die typischen Anomalien bzw. Diskontinuitäten (Hydrodynamisches Paradoxon) treten beim Übergang zur - oder bei der Störung der – Überschallströmung auf⁴¹⁰. Diese Störungen breiten sich mit Schallgeschwindigkeit aus, so dass es zur Bildung einer stehenden Welle kommt, die wiederum die Strömungsparameter an dieser Wellenfront ändert⁴¹¹. Obwohl das beim Laser als Problem aufgefasste Phänomen des Hydrodynamischen Paradoxons - mit der Laval-Düse⁴¹² (GRAPHIK 90) – so weit als gelöst gilt⁴¹³,

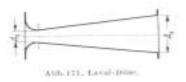
⁴⁰⁷ Beyer 71; Keller, in: DPG < http://www.dpg-tagungen.de/archive/2002/ake_3.html >...

⁴⁰⁸ Bartholet/Stiegmann/Carlsson, in: Haferkamp/Bach 79: "Um beim Schneiden gute Resultate zu erzielen, ist ein industrietauglicher Schneidekopf unabdingbar. Alle Teile des Kopfes müssen ausreichend gekühlt sein, um zum Beispiel auch einem Dreischichtenbetrieb ohne thermische Probleme standzuhalten. [...] Der Kopf ist wassergekühlt, verfügt über alle notwendigen Konstruktionsmerkmale und eignet sich bis zu einer Laserleistung von maximal ca. 3 kW."

⁴⁰⁹ Bever 61: "Der Fluß von Gasströmungen wird durch die Gas- oder Aerodynamik beschrieben. Im Gegensatz zu inkompressiblen Medien ist die Dichte entlang einer Bahn nicht konstant. Dies kann in einer Überschallströmung zu Diskontinuitäten führen, wodurch sich Druck, Dichte, Temperatur und Geschwindigkeit u. U. sprunghaft ändern. Diese Diskontinuitäten treten beim Übergang von Über- in Unterschallgeschwindigkeit sowie bei einer Störung der Überschallströmung, z. B. durch ein Hindernis, auf."

⁴¹⁰ Beyer 83: "Die konventionellen Laserschneidedüsen besitzen eine kreisförmige konische bzw. konvergente Bohrung, durch die der fokussierte Laserstrahl und der Schneidgasstrahl in koaxialer Anordnung auf das Werkstück treffen."

⁴¹¹ Beyer 64: "Einen speziellen Fall stellt der senkrechte Verdichtungsstoß dar; eine derartige Stoßfront verwirkt immer einen Übergang der Strömungsgeschwindigkeit vom Über- in den Unterschallbereich, die Strömungsrichtung ändert sich dabei nicht."
⁴¹² Bergmann/Schäfer I (1975) 736 ff; Schmidt E. 343 ff; Siekmann 130 f, 139 ff.



so doch nur unter gewissen Parameter der Gasströmung, die der Leistung des Lasers die Grenzen setzen⁴¹⁴. Es gibt zwei Laser-schneidverfahren, nämlich

- Schmelzschneiden (Hochdruckschneiden) und
- Oxidationsschneiden⁴¹⁵.

Für beide Schneideverfahren bedarf es eine sehr genaue Regelung des Gasdrucks⁴¹⁶. Einerseits kann mit der Vergrößerung des Gasdrucks oder Düsendurchmessers⁴¹⁷ die

⁴¹³ Beyer 95: "Der abgehobene Verdichtungsstoß, der sich oberhalb der Schnittfuge ausbildet (Bereich1), ist grundsätzlich nicht zu vermeiden und ändert bei konventionellen Schneiddüsen seine Form in Abhängigkeit von Düsendruck, -öffnungsdurchmesser und Abstand. Die Abstandsabhängigkeit ist bei der Verwendung einer druckangepaßten Parallelstrahldüse nicht zu beobachten, die aufgrund ihrer über Gasstrahlquerschnitt und -länge nahezu konstanten

Strömungseigenschaften stets einen geraden, senkrechten Verdichtungsstoß über der Schnittfuge erzeugt."

⁴¹⁵ Bartholet/Stiegmann/Carlsson, in: Haferkamp/Bach 76 ff.

- ist der Gasdruck zu gering, so wird weniger Energie in das Werkstück gebracht, und es ist nicht möglich, das Material zu trennen
- ist der Gasdruck zu hoch, werden die Schnittkanten verbrannt und ausgespült, die Schnittqualität verschlechtert sich.

Der Sauerstoffdruck beträgt 0,4 und 5 bar.

Für oxidfreie Schnitte in nichtrostendem Stahl oder Aluminium verwenden wir das Hochdruckschneiden. In diesem Fall wird die gesamte zum Schneiden benötigte Energie vom Laserstrahl geliefert. Als Schneidegas wird Stickstoff verwendet, um das geschmolzene Material aus der Schnittfuge auszubringen. Es wird mit einem Gasdruck bis zu 20 bar gearbeitet.

Unsere Maschine ist mit zwei getrennten Proportionalventilen zur Regelung des Gasdruckes ausgestattet, ein Ventil für Sauerstoff und eins für Stickstoff. Ein hochauflösender Drucksensor ermittelt den aktuellen Gasdruck. Die Gasregelung ist sehr dicht am Schneidekopf montiert. Daraus ergibt sich der Vorteil, sehr schnell zwischen den beiden Schneidegasen wechseln zu können. Dies ist beim Aluminiumschneiden erforderlich, hier erfolgt das Anstechen mit Sauerstoff und das Schneiden mit Stickstoff."

417 Beyer 66 f: "Eine weitere Beschleunigung des Gases auf Geschwindigkeiten oberhalb der Schallgeschwindigkeit durch

⁴¹⁷ Beyer 66 f: "Eine weitere Beschleunigung des Gases auf Geschwindigkeiten oberhalb der Schallgeschwindigkeit durch Steigerung des Vordrucks ist nur möglich, wenn dem Gas durch eine nachfolgende Vergrößerung des Querschnittes zu expandieren erlaubt wird. Ideal für eine homogene Ausbildung des Freistrahls und eine hohe Strömungsgeschwindigkeit ist eine im Anschluß an den engsten Querschnitt sich stetig erweiternde Öffnung, durch welche der statische Druck im Gas kontrolliert dem Umgebungsdruck angeglichen wird (Lavalerweiterung, druckangepaßter Freistrahl).[...] Durch eine kontrollierte Expansion des aus dem Druckraum strömenden Gases mittels einer lavalförmigen Erweiterung der Bohrung kann erreicht werden, daß der statische Druck des Gases dem Außendruck stetig bis zur Gleichheit angeglichen wird. Auf

⁴¹⁴ Beyer 71: "Trifft eine Überschallströmung auf eine ebene Platte, wird das Gas bis auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst, wobei in der Strömung ein senkrechter Verdichtungsstoß einige Zehntel Millimeter über der Platte entsteht. Hinter einem senkrechten Verdichtungsstoß ist immer Unterschallströmung anzutreffen. Die zu den Seiten hin abfließende Seitenströmung führt durch Sogwirkung u. U. sogar zu einem Unterdruck über der Platte, wodurch eine Wirbelkammer entsteht. Dies wird bezeichnet als Hydrodynamisches Paradoxon: die hohe Strömungsgeschwindigkeit im zentralen Bereich zwischen Düse und Werkstück erzeugt einen kleineren statischen Druck als die geringere Strömungsgeschwindigkeit im Randbereich (Niedrig, 1989). Diese Verhältnisse liegen beim Einstecken vor. Durch die Bildung der Wirbelkammer kann der schmelzflüssige bzw. verdampfte Werkstoff von der Oberfläche des Werkstücks in Richtung Düse bzw. der Fokussieroptik, also entgegen dem Gasstrom in der Düse beschleunigt werden. Die Spritzer werden dabei u. U. so stark beschleunigt, daß sie die Fokussieroptik erreichen und sich dort ablagern. Für eine transmissive Optik (Linse) bedeutet dies in den meisten Fällen die sofortige Zerstörung."

⁴¹⁶ Bartholet/Stiegmann/Carlsson, in: Haferkamp/Bach 79: Für beide Schneideverfahren bedarf es eine sehr genaue Regelung des Gasdrucks: "Beim Oxidationsschneiden wird Sauerstoff als Schneidegas verwendet. Ca. 40% der für das Schneiden des Werkstückes erforderlichen Energie wird vom Laserstrahl geliefert, die restlichen 60% resultieren aus der exothermen Reaktion des Sauerstoff. Das bedeutet:

Leistung des Lasers gesteigert werden⁴¹⁸, so kommt es aber andererseits ab einer Größenordnung zu Turbulenzen⁴¹⁹ (GRAPHIK 92) in der Gasströmung und zumindest zum Leistungsabfall beim Laser⁴²⁰, wenn nicht zur Zerstörung oder zu ernsthaften Schäden durch das Hydrodynamische Paradoxon.

Dadurch also, dass der Laser im Gas koaxial eingebettet ist⁴²¹ und der zylinderförmige Gasstrahl strömungstechnisch die Form eines Wirbelrohres annimmt, kann es bei Turbulenzen oder bei Überschallgeschwindigkeit (infolge überhöhnten Drucks oder überdehnten Düsenöffnung⁴²²) zum gleichen oder analogen Hydrodynamischen Paradoxon⁴²³ des implosiv – von der Werkstoffoberfläche – rückläufigen turbulenten Gasstrahls kommen wie im Wirbelrohr⁴²⁴, der hier beim Laser zur Zerstörung der Linse führt⁴²⁵.



Abb. 167 u. 168. Strahlformen, wenn Gegendrück über oder unter dem kritischen liegt

Graphik 91

Dieser Gefahr kann nur dadurch entegegengewirkt werden, dass das Gas mit Hilfe der Laval-Düse⁴²⁶ in die Unterschallgeschwindigkeit abgebremst werde, indem der Gasstrom beim Austritt aus der Düse zu einem Parallelstrahl der Laminarströmung verbreitet wird⁴²⁷. So kann zwar mit der Laval-Düse eine parallele Laminarströmung⁴²⁸ des Gases erreicht werden, wo ein ruhiger Gasstrom verlässlich für gute Schnittqualität mit dem Laser sorgt⁴²⁹, und die

diese Weise läßt sich ein homogener Gasstrahl erzeugen, in welchem alle Gaspartikel dieselbe Strömungsrichtung aufweisen (Parallelstrahl)."

⁴¹⁸ Beyer 97: "Die Schneidgaseffizienz wächst offensichtlich stetig mit dem Düsendruck und dem Düsendurchmesser. Die konventionellen Düsen zeigen außerdem einen deutlichen nicht-linearen Einfluß des Düsenabstandes, wogegen die Parallelstrahl-,Laval'-Düse (theoretischer Düsenvordruck 0,65 MPa) bis zu einem Druck von 0,6 MPa und in dem hier gemessenen Abstandsbereich zwischen 0,5 und 2 mm jede beliebige Abstandvariation ohne Beeinträchtigung der Schneidgaseinkoppelung zuläßt."

⁴¹⁹ Beyer 69: "Ein Parallelstrahl läßt sich mit einer derartigen Düse und einem Gas nur mit einem festgelegten Druck

⁴¹⁹ Beyer 69: "Ein Parallelstrahl läßt sich mit einer derartigen Düse und einem Gas nur mit einem festgelegten Druck erzeugen; andernfalls kommt es zu denselben wenn auch schwächer ausgeprägten Erscheinungen wie bei Freistrahlen aus Düsen mit zylindrischer oder konisch konvergenter Bohrung."

⁴²⁰ Beyer 87: "Im allgemeinen tritt aufgrund von Abstoßungseffekten und Überlagerung des Verdichtungsstoßes mit kontinuierlichen Wellen eine starke Krümmung der Stoßfronten auf, die bei weiterer Erhöhung des Düsendruckes frühzeitig in einen senkrechten Verdichtungsstoß auf der Strahlachse münden. Dann ist eine reguläre Reflexion im ersten Überlagerungsgebiet auf der Strahlachse nicht mehr möglich und das Strömungsbild wird komplizierter. Unterhalb des senkrechten Verdichtungsstoßes geht die Strömung in den Unterschallbereich über, während seitlich davon weiterhin Überschallströmung vorliegt. Bei dieser sogenannten Machreflexion entstehen Grenzflächen, die Unter- und Überschallbereiche trennen. In diesen Gebieten ist die Strömung nicht mehr rotationsfrei (vergleiche Bild 3-3 und 3-4b)."

⁴²¹ Beyer 83.

⁴²² Beyer 95.

⁴²³ Beyer 71.

⁴²⁴ Keller, in: DPG < http://www.dpg-tagungen.de/archive/2002/ake_3.html >.

⁴²⁵ Bever 71

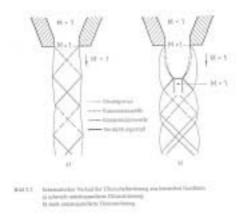
⁴²⁶ Schmidt E. 343 Abb 171; Siekmann 130 f, 139 ff.

⁴²⁷ Beyer 66 ff.

⁴²⁸ Bergmann/Schäfer I (1975) 321 ff, 327 f, 344 ff.

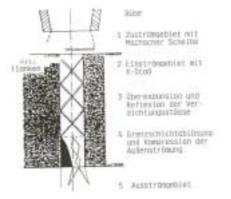
⁴²⁹ Beyer 67 ff, 95, 97 f.

Gefahr des Hydrodynamischen Paradoxons praktisch gebannt ist, doch dazu muss die gesamte Kapazität gedrosselt werden, einen Parallelstrahl des Gases bei Unterschallgeschwindigkeiten zu sichern⁴³⁰. Denn mit dem Zurückfahren der Gasintensität muss die – damit gekoppelte – Laserintensität ebenfalls entsprechend zurückgefahren bzw. gedrosselt werden.



Graphik 92

Der austretende Gasstrahl wird an der Schnittkante (Fugenkante) im Werkstück zu schrägen Verdichtungsstößen angeregt⁴³¹, kreuzt sich, wird mehrmals reflektiert und wieder gekreuzt (GRAPHIK 91, 92, 93), bis schließlich dieser bisher symmetrischer Verlauf asymmetrisch bzw. turbulent wird⁴³².



(NAI)-(1. Charakertoine)es Sinteraugeverlauf des Schweitgauer damb der Schwiefege (Black te Schwickstung)

Graphik 93

⁴³² Beyer 95 ff.

 ⁴³⁰ Beyer 67 f, 69; vgl Bergmann/Schäfer I (1975) 327 f.
 ⁴³¹ Beyer 84 ff; Schmidt E. 348 Abb 176, 350 ff, 354 Abb 180; Siekmann 132 ff.

5.2 Die Zonenplatte

Ausgehend von der koaxialen Anordnung des durch die Laval-Düse⁴³³ austretenden Laserstrahls und parallelen Gasstrahls⁴³⁴ einerseits und von der so gut wie direkten Abhängigkeit der Lasereffektivität von der Gaseffektivität⁴³⁵ andererseits, wäre im Testbetrieb ein Ultraschallsender als Membranpumpe⁴³⁶ mit einer (ko)axialen Bohrung für Laserstrahl und Gasstrahl⁴³⁷ zu prüfen (wobei das Gas auch andere Wege nehmen könnte und erst durch die Ultraschall-Membran gebündelt werden), denn durch das axiale Loch in der Membran würde Laserstrahl und Gasstrahl koaxial durch die Bohrung der Membran als Düse austreten, aber dann durch die Membranpumpe zu parallelen Stoßwellen angeregt⁴³⁸: In diesem Fall wären Turbulenzen zweitrangig und damit Überschallgeschwindigkeiten des Gases möglich, falls die Testläufe dem nicht widersprechen.

Im Gegensatz zur Laval-Düse⁴³⁹, wo die Parallelstrahlen nur durch Drosselung des Gasstrahls zu einer Laminarströmung im Unterschallbereich erreicht werden, wäre hier - genau umgekehrt - ein Hydrodynamisches Paradoxon⁴⁴⁰ durch den Überdruck der parallelen Stoßwellen⁴⁴¹ vorweg unmöglich. Der Unterschied der Ultraschallsender als Membranpumpe zu der normalen Membranpumpe wäre, dass dort durch die abgestrahlten Stoßwellen ein analoger Unterdruck seitlich von außen das gepumpte Gas ansaugt⁴⁴², während hier durch eine Mittelbohrung das Gas angesaugt wird und einen Rückfluss im Sinne des Hydrodynamischen Paradoxons verhindert. Und man könnte die Membranoberfläche – einem Hohlspiegel analog – konisch machen, bzw. mit einer Fresnelschen Zonenplatte (GRAPHIK 94) versehen⁴⁴³, und so dem Hydrodynamischen Paradoxon (durch Überdruck der Stoßwelle) vorbeugen.

⁴³³ Siekmann 130 f, 139 ff.

⁴³⁴ Beyer 83.

⁴³⁵ Beyer 97 f.

⁴³⁶ Bergmann/Schäfer I (1975) 540 ff, 553 f.

⁴³⁷ Beyer 83.

⁴³⁸ Bergmann/Schäfer I (1975) 553.

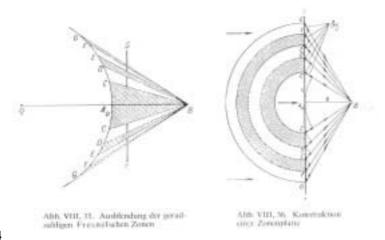
⁴³⁹ Schmidt E. 343 Abb 171; Siekmann 130 f, 139 ff.

⁴⁴⁰ Bever 71

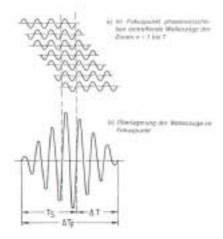
⁴⁴¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 553 Abb IX 74 a.

⁴⁴² AaO.

⁴⁴³ Römer 13 Abb 1/21-22.



Im Gegensatz zu der Laval-Düse⁴⁴⁴, wo ein gedrosselter Druck dem hydrodynamischen Paradoxon (virtuellem Wirbelrohreffekt) durch Parallelstrahlen des Gases vorbeugt⁴⁴⁵, weil die Funktion des Wirbelrohres analog dem Hydrodynamischen Paradoxon einen Überdruck und Überschallgeschwindigkeit voraussetzt, sorgt hier der fokussierte Überdruck für spitz zulaufenden Gasstrahlen (GRAPHIK 95), wenn die nachstehend noch näher beschriebenen Tests das so bestätigen wollen.



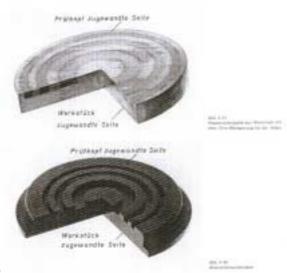
Graphik 95

Es wäre allenfalls zu testen, ob und wie weit mehrere ringförmig um das mittlere Loch (für den Laserstrahl) angeordnete Löcher in der Membranpumpe effektiver wären, oder die passiven Flächen einer Fresnelschen Zonenplatte als Löcher bzw. Eintrittsöffnungen für das Gas offen gelassen werden könnten.

 444 Siekmann 130 f, 139 ff. 445 Beyer 66 ff.



Im Gegensatz zum Parallelstrahl der Laval-Düse⁴⁴⁶, wo die Betriebsbedingungen für das Laser-Schneiden in der Drosselung des koaxialen Gasstroms⁴⁴⁷ bestehen und die Parallelität der Gasstrahl ein Maximum des Erreichbaren so darstellt, dass das Maximum des Gasstromes zugleich die Grenze des Lasers, bzw. dessen Einsetzbarkeit ist⁴⁴⁸; ließen sich die parallelen Stoßwellen des Ultraschallsenders als Membranpumpe (GRAPHIK 95, 97) fokussieren⁴⁴⁹. Es zeigt sich in der praktischen Anwendung, dass



Graphik 97

erstens sich eine Fresnelsche Zonenplatte (GRAPHIK 96) besser eigene als eine herkömmliche Linse⁴⁵⁰ (GRAPHIK 98), weil die eigentliche Wirkung von den dichteren Ringen der Zonenplatte am Rand ausgehen⁴⁵¹, so dass eine Bohrung in der Mitte für die koaxiale Führung des Laserstrahls⁴⁵² den Gasstrom nicht merklich schwächen würde⁴⁵³,

⁴⁴⁶ Siekmann 130 f, 139 ff.

⁴⁴⁷ Beyer 83.

⁴⁴⁸ Beyer 66 ff, 83 ff, 95 ff.

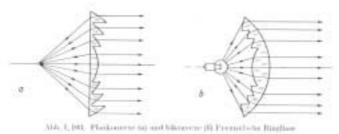
⁴⁴⁹ Römer 1 ff, 11 ff, 34 f.

⁴⁵⁰ Römer 2; Gobrecht, I. Kapitel, Geometrische Optik, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 101 Abb I 103.

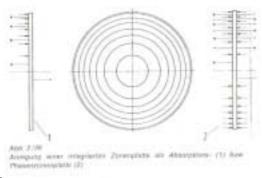
⁴⁵¹ Römer 2 f, 33 ff.

⁴⁵² Beyer 83.

⁴⁵³ Römer 2 f: Bei der Fresnelschen Zonenplatte haben alle Zonen die gleiche Fläche, so dass die als konzentrische Kreise bzw. Ringe angeordneten Zonen sich nach außen hin verjüngen, und so nach am äußeren Rand der Zonenplatte immer mehr Ringe Platz haben und so am Rand die Strahlungsmenge größer bzw. "dichter" wird. Sonach ist also die Strahlung in der Mitte der Zonenplatte – in Radien gemessen – am schwächten, zumindest für die bisher überprüften Frequenzen.



und zweitens durch die Änderung der Frequenz der Fokus des Schalls verstellt werden kann⁴⁵⁵.



Graphik 99

- Drittens bewirken die hohen Frequenzen des Ultraschalls dass viele Ringe (GRAPHIK 100) untergebracht werden können⁴⁵⁶ und die Strahlungsintensität zunimmt, und weil nachweislich jeder Ring immer die gleiche Fläche hat und sich die Ringe nach außen verjüngen, so sich außen eine größere Leistungsdichte zeige⁴⁵⁷, die aber durch die Fokussierung sich zur Mitte lenken lasse.
- Viertens kann für den Fall, wenn statt einer gewöhnlichen Linse die Fresnelsche Zonenplatte eingesetzt werde, jeder Ring einzeln phasenverschoben oder mit unterschiedlichen Frequenzen so angeregt werden, dass die unterschiedlichen Anregungen der Ringe zu einer je eigenen Fokussierung der Strahl führt⁴⁵⁸, und sonach nicht die Form der Linse, sondern die Form der Anregung der Schwingung die (dynamische) Fokussierung bewirke⁴⁵⁹.

⁴⁵⁷ Römer 2 f, 32 f.

⁴⁵⁹ Römer 1, 4.

⁴⁵⁴ Gobrecht, I. Kapitel, Geometrische Optik, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 101 Abb I 103.

⁴⁵⁵ Römer 1, 11 ff, 20 ff, 30 ff. 456 Römer 2.

⁴⁵⁸ Römer 1, 13 ff, 25 f, 34 f.



- Fünftens lässt sich die dynamische Brennweite mit der gleichen Anregungsmethode nicht nur der Weite nach, sondern auch seitlich verstellen (GRAPHIK 99) und sonach lässt sich die Brennweite dreidimensional lenken⁴⁶⁰: und zwar je Ring der Zonenplatte einzeln.
- Sechstens lässt sich die gegenteilige Wirkung zweier benachbarten Fresnelschen Zonen, die sich in der Wirkung in etwa aufheben⁴⁶¹, so dass bei einer zielgerichteten Wirkung der Zonenplatte scheinbar die Hälfte der Wirkung übrigbleibt, wen man diese negative Zonen schalldurchlässig macht, oder werden diese negative Zonen um 180° phasenverschoben gestaltet, so verdoppelt sich die Wirkung⁴⁶².
- Siebtens hat es sogar den Anschein, dass aufgrund der unterschiedlichen Anregbarkeit der einzelnen Zonen der Zonenplatte es möglich ist, nicht alle Ringe in der Abstrahlung in einem einzigen Fokus zu bündeln, sondern eine ganze Reihe von Brennpunkten zu generieren, theoretisch wohl so viele Ringe es gibt⁴⁶³, was etwa die Wirksamkeit des Laserschneidens um einiges verbessern könnte⁴⁶⁴. Und davon unabhängig kann noch, wie schon gesagt, der Fokusabstand jeweils dreidimensional verschoben werden⁴⁶⁵.
- Achtens scheint die Zahl der Zonen der Zonenplatte neben der Frequenz als Einflussfaktor auf den Fokus eine Rolle zu spielen, auch ohne Frequenzänderung, doch gibt es für die Zahl der Zonen nach außen ein Grenzwert, worüber hinaus keine merklichen Veränderungen mehr stattfinden⁴⁶⁶.

460 Römer 1 ff.

⁴⁶¹ Römer 3, 5.

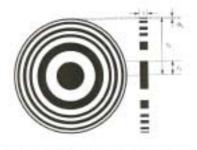
⁴⁶² Römer 3 ff, 20, 24 f, 32, 34.

⁴⁶³ Römer 1, 31, 34.

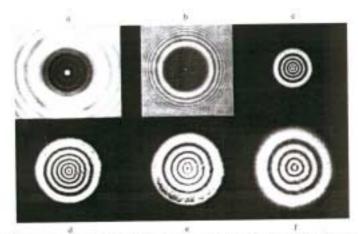
⁴⁶⁴ Beyer 66 ff, 83.

⁴⁶⁵ Römer 1, 11 ff, 20 ff, 30 ff.

⁴⁶⁶ Römer 33.



Weil die Linsen – auch als Zonenplatte – die größte Wirkung in der größten Nähe des Senders entfalten, werden Linsen entweder sehr nahe gesetzt oder aber bildet man das Profil des Schallsenders schon als Linse aus⁴⁶⁷. In dem Normalfall besteht der Ultraschallsender aus einem zylindrischen Stab oder aus einer runden Scheibe⁴⁶⁸, während hier mehrere Hohlstäbe oder Ringe konzentrisch ineinander geschoben und außerdem jeweils einzeln angeregt werden⁴⁶⁹. Vergleicht man die Bildröhre eines Computerbildschirms oder Television als die Beschreibung eines Brennpunktes auf einer zweidimensionalen Fläche des Bildschirms durch die Röhre⁴⁷⁰, so ist der Brennpunkt des so angeregten Ultraschalls dreidimensional, also "holografisch" lenkbar bzw. "dynamisch"⁴⁷¹. Darüber hinaus hat man je Ring der Zonenplatte einen individuell verstellbaren Fokus.



Abb, Vill, 31. Beagamphider verscheckner kreidremiger Scheiben (Kundir) und Öffnunger. a) Stocknadelkopf (Durchmesser 3 mm), Audblendung der ersten beiden Freisnelischen Zonen; ib Kunde) Öffnung, Durchmesser Jeweih 5 mm, Abblendung bew. Durchlaß bis zur 10. Freisnelischen Zone, d. e. f) Öffnung, Durchmesser Jemen, Durchlaß von 12. 10 haw. 5 Freisnelischen Zone, demel an ab und ihrte durche, in f) Minz half, die Form der Kinge in d), e) und f) in bediept durch die nacht ganz kreidfeinige Öffnung. Entferning der Lichtquelle vom Bespingsobjekt in allen Lätte 2 m, Entferning des Schienes vom Beugingsobjekt in al 6 m, brand e) 2 m, d), e) und f) 4 m, 3 m und

Graphik 102

Die Zonenplatte von Fresnel (GRAPHIK 101, 102, 103, 104) als Linse nützt die Beugung an einer Kante, eines Spaltes oder Lochs, die dem gleichen Gesetz folgt bzw. dem gleichen Muster wie die Zonenplatte ergibt.

⁴⁷¹ Römer 1.

⁴⁶⁷ Römer 1 ff, 30 ff.

⁴⁶⁸ Bergmann/Schäfer I (1975) 540 ff; vgl Günther/Hansen/Veit 246 f.

⁴⁶⁹ Römer 1 ff.

⁴⁷⁰ Bergmann/Schäfer II (1971) 452 f.

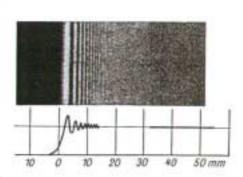


Abb. III, 49. Fresnelsche Beugung an einer Kante

Obwohl die hier aufgezeigten Zusammenhänge im Hinblick auf die für die Überprüfung notwendigen Testläufe in der Spezialwendung beim Laserschneiden⁴⁷³ – der Grundintention nach – unmittelbar einleuchten, wonach dem Schallfeld entsprechend das Gasfeld⁴⁷⁴ im Turbobetrieb (im Vergleich mit der Laval-Düse⁴⁷⁵) durch einen Ultraschallsender als Membranpumpe (GRAPHIK 106) besser gesteuert werden kann⁴⁷⁶ und dadurch die Leistung des Gasstroms – und folglich des Lasers – signifikant ansteige, empfehlt es sich zumindest für die notwendigen Testläufe die Zonenplatte als Linse als eine weitere Option und als Vergleichsgröße heranzuziehen⁴⁷⁷.

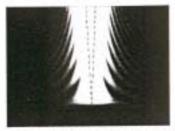
⁴⁷² Eichler, III. Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 354 Abb III 49; Eichler, 3 Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1993) 360 Abb III 49.

⁴⁷³ Bartholet/Stiegmann/Carlsson, in: Haferkamp/Bach 76 ff; vgl Beyer 61 ff, 83 ⁴⁷⁴ Bergmann/Schäfer I (1975) 530 ff, 553 f.

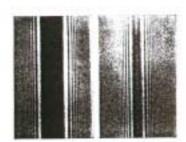
⁴⁷⁵ Beyer 66 ff; Schmidt E. 343 ff; Siekmann 130 f, 139 ff.

⁴⁷⁶ Hilkenbach 113: Die durch die Zonenplatte durchgehende Wellen sind – zumindest theoretisch – gekoppelt.

⁴⁷⁷ Römer 34 f.

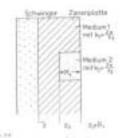


Abis, III, 47. Von sinem halförmigen Spalt mit monorbronatiischem Licht erangte Fresnerache Bespregssendeinung



a III, 48. Mit hansekennstischen Laht an Bribbin verschiebener State ermigte Freinelische Bespagnerschitungen

Aus der obigen Abhandlung geht hervor, dass ursprünglich und eigentlich der Ultraschallsender und die Zonenplatte als Linse zwar ihre maximale Wirksamkeit in der Zusammensetzung (GRAPHIK 105), in der größtmöglichen räumlichen Nähe entfalten, und daher die Linse möglichst in den Schallsender direkt eingebaut oder vorn aufgesetzt wird⁴⁷⁹, aber die zwei Einheiten auch jeweils für sich arbeiten können, und ab einer gewissen räumlichen Nähe macht es gar keinen Unterschied, ob die Linse für sich allein stehe oder im Ultraschallsender integriert ist⁴⁸⁰. Bisher wurde dem im Sender integrierten Linse das Wort geredet, um zunächst die Analogie zwischen Schallfeld und Gasfeld so zu vergegenwärtigen⁴⁸¹, dass das überlagerte Gasfeld vom Schallfeld her eingesehen werde. Nachstehend sollte die gleiche Überlagerung vom Gasfeld her betrachtet werden.



Graphik 105

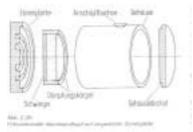
⁴⁷⁸ Eichler, III. Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 353 Abb III 47-48; Eichler, Joachim: 3 Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1993) 359 Abb III 47-48.

⁴⁷⁹ Römer 34 f.

⁴⁸⁰ Römer 33.

⁴⁸¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 530 ff, 553 f.

Aus dem hier weiter oben thematisierten Ultraschallsender als Membranpumpe⁴⁸² folgt die Überlagerung bis Identität der beiden Felder. Insofern also sich das Schallfeld besser kontrollieren und Handhaben lässt als das Gasfeld⁴⁸³, so liegt es nahe, aus der Überlagerung des Schallfeldes mit dem Gasfeld bei dem Ultraschallsender als Membranpumpe insofern einen industriellen Nutzen zu ziehen, als das Gasfeld durch das integrierte Schallfeld manipuliert werde⁴⁸⁴. Das im Ultraschallsender als Membranpumpe veranschaulichte Ineins von Gasfeld und Schallfeld⁴⁸⁵ eröffnet, wollte man optimistisch in die Testphase gehen, bei der industriellen Nutzung der Gase eine neue Dimension.



Graphik 106

Analog zeigte es sich, obwohl das für industrielle Nutzung vielleicht um noch eine Stufe weiter entfernt zu sein scheint, dass auch andere Wellenarten wie das Licht, Röntgenstrahlen (GRAPHIK 109), Elektronenstrahlen, insbesondere jedoch die sogenannten Materiewellen⁴⁸⁶, mit dem Gasfeld sich analog überlagern und eine integrierende Einheit bilden können wie das Schallfeld⁴⁸⁷. Es wurde als wissenschaftlicher Durchbruch gefeiert⁴⁸⁸, als die bisher

⁴⁸² AaO.

⁴⁸³ AaO I 536, 533.

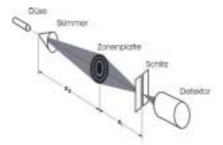
⁴⁸⁴ AaO.

⁴⁸⁵ AaO I 530 ff, 553 f.

Koenig, Pressemitteilungen der Ruhr-Uni Bochum vom 8. 11. 1999, in: < http://www.ruhr-uni-bochum.de/pressemitteilungen-1999/msg00320.html >: "Der herkömmlichen Mikroskopie sind enge Grenzen gesetzt: Lichtmikroskope können wegen der großen Wellenlänge des Lichts sehr kleine Objekte nicht sichtbar machen, andere Methoden, wie z. B. die Elektronenmikroskopie, können die Probe beschädigen. Die Lösung dieser Probleme bringt ein neues Verfahren, das Materiewellen für optische Geräte nutzt: RUB-Chemikern um Prof. Dr. Christof Wöll (Physikalische Chemie, Fakultät für Chemie der RUB) ist es in Zusammenarbeit mit dem Prof. Dr. J. P. Toennies (Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen), Prof. Dr. R. B. Doak (Arizona State University) und Prof. G. Schmahl (Universität Göttingen) erstmals gelungen, mit Hilfe einer Fresnel-Zonenplatte einen Heliumgasstrahl zu fokussieren. Seine Eigenschaften ermöglichen eine zerstörungsfreie Mikroskopie mit atomarer Auflösung. Über die in Physical Review Letters veröffentlichten Ergebnisse(22. November 1999) berichtet nun auch SCIENCE in der Ausgabe vom 3. Dezember."

⁴⁸⁷ Hahn, V. Kapitel. Strahlung und Photometrie, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 600 f: "Es ist durch Messungen bestätigt, und eine große grundsätzliche Bedeutung liegt in dem Beweis, daß man die Hauptsätze der Thermodynamik auf ein Strahlung erhaltendes Volumen in gleicher Weise anwenden kann wie auch ein gasgefülltes Volumen. [...] Charakteristisch für die Wiensche Ableitung, die hier im einzelnen nicht gebraucht werden kann, ist die Ähnlichkeit der in einem Hohlraum eingeschlossenen Strahlung mit einem idealen Gas in einem bestimmten Volumen." Vgl Wirsing: "Die herkömmliche Mikroskopie hat enge Grenzen - wegen der großen Wellenlänge des Lichts können sehr kleine Objekte mit einem optischen Mikroskop nicht sichtbar gemacht werden. Andere Methoden, wie z. B. die Elektronenmikroskopie, können die Probe beschädigen. Die Lösung dieses Problems bringt ein neues Verfahren, das Materiewellen für optische Geräte nutzt (Physical Review Letters, 22. November 1999, Band 83, S. 4229). Eine Arbeitsgruppe unter Leitung von Prof. Peter Toennies, Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, und Prof. Christof Wöll, Ruhr-Universität Bochum, ist es erstmals gelungen, einen Heliumgasstrahl mit Hilfe einer Fresnel-Zonenplatte zu fokussieren. Die Welleneigenschaften des Gasstrahls ermöglichen eine zerstörungsfreie Mikroskopie mit atomarer Auflösung, wie "Science" in seiner Ausgabe vom 3. Dezember hervorhebt. [...] Schon seit langem suchen Wissenschaftler deshalb nach Alternativen, und haben sie nun gefunden. Ihr Trick: Was für Lichtstrahlen gilt, gilt - nach den Gesetzen der Quantenmechanik - auch für Gasstrahlen. Betrachtet man also Atome und Moleküle eines Gases als Welle statt als Kügelchen als Wellen, müßte man sie auch optisch nutzen können. Für ihre

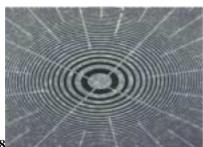
unzugänglichen – weil extrem niederfrequenten – Materiewellen aufgrund ihrer Integration im Gasfeld für die Mikroskopie entdeckt und nutzbar gemacht werden konnten⁴⁸⁹.

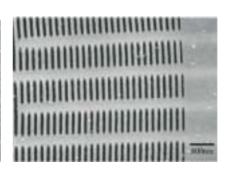


Graphik 107

Abb. 1: Schematischer Aufbau des Experiments zum Fokussieren von Gasstrahlen mittels Zonenplatten. Der Abstand zwischen Skimmer und Zonenplatte beträgt 1,069 Meter, der Abstand zwischen Zonenplatte und Schlitz 0,43 Meter.

Man verwendete dabei statt den bisher üblichen Licht-, Röntgen- (GRAPHIK 109) oder Elektronenstrahlen nunmehr einen Gasstrahl zum Abbilden, woraus dann die darin integrierten Materiewellen abgelesen werden konnten⁴⁹⁰.





Graphik 108

Experimente wählten die Wissenschaftler das Helium, da es sehr leicht ist und eine - verglichen mit anderen Atomen und Molekülen - große Wellenlänge hat."

⁴⁸⁸ Wirsing: "Ein wichtiges war die Fokussierung des Gases. Eine normale Linse eignet sich dafür nicht, da sie für Gas undurchlässig ist. Eine andere Möglichkeit wäre, die Wellen mit Hilfe eines Spiegels zu fokussieren. Doch dazu müßte ein Spiegel mit fast perfekter Oberfläche hergestellt werden. Die Wissenschaftler wählten deshalb einen einfacheren Weg – die sogenannte Fresnel-Zonenplatte. Diese "Linse" aus Silicium, die mittels Elektronenstrahllithographie am Institut für Röntgenphysik der Universität Göttingen hergestellt wurde, besteht aus mehreren tausend ineinander liegenden Ringen, die nur durch hauchdünne Streben wie Spinnweben miteinander verbunden sind. Die Abstände zwischen den Ringen werden von innen nach außen immer schmaler. Das ganze Gebilde hat einen Durchmesser von gerade einmal 0,27 Millimeter."

489 Koenig, Pressemitteilungen der Ruhr-Uni Bochum vom 8. 11. 1999, in: < http://www.ruhr-uni-bochum.de/pressemitteilungen-1999/msg00320.html >: "Viele optische Geräte, z. B. Fernrohre, Fotoapparate und Mikroskope, funktionieren durch die Fokussierung von Lichtstrahlen: Sie treffen auf die Linse auf, werden abgelenkt oder gebeugt, und treffen sich hinter der Linse in einem Punkt, dem Fokus. Für die Betrachtung sehr kleiner Proben unter dem Mikroskop eignet sich das Licht aber nicht, denn seine große Wellenlänge setzt der Detailgenauigkeit schnell Grenzen. Die Wissenschaftler suchten also nach Alternativen - und fanden sie: Was für Lichtstrahlen gilt, gilt nach den Gesetzen der Quantenmechanik auch für Gasstrahlen. Fasst man Atome und Moleküle des Gases statt als Kügelchen als Wellen auf, dann kann man sie theoretisch auch optisch nutzen. Für ihre Experimente wählten die Forscher das Helium, da es sehr leicht ist und eine - verglichen mit anderen Atomen und Molekülen – große Wellenlänge hat."

Koenig, Pressemitteilungen der Ruhr-Uni Bochum vom 8. 11. 1999, in: < http://www.ruhr-uni-bochum.de/pressemitteilungen-1999/msg00320.html >: "Ein Problem stellte die Fokussierung des Gases dar. Eine normale Linse eignet sich nicht, da sie für Gas undurchlässig ist. Eine andere Möglichkeit wäre, die Wellen mit Hilfe eines Spiegels zu fokussieren; die Oberfläche des Spiegels müsste aber so perfekt sein, dass seine Herstellung sehr kompliziert wäre. Die Wissenschaftler wählten also einen einfacheren Weg: Die Fresnel-Zonenplatte. Diese "Linse" aus Silicium, die mittels Elektronenstrahllithographie am Institut für Röntgenphysik der Universität Göttingen hergestellt wurde, besteht aus mehreren tausend ineinander liegenden Ringen, die nur durch Streben wie ein Spinnweben miteinander verbunden sind. Die Abstände zwischen den Ringen werden von innen nach außen hin immer kleiner. Das ganze Gebilde misst im Durchmesser nur 0,27 Millimeter."

Abb. links: Elektronenmikroskopische Aufnahmen der Zonenplatte (Gesamtdurchmesser 0,27 Millimeter). Deutlich zu sehen sind die freistehenden Zonenringe und die radialen Haltestege. Für eine 0,18 beträgt He-Atom-Wellenlänge von Nanometer die Brennweite Abb. rechts: Detailansicht der feinen Strukturen am Rand der Zonenplatte. Die äußerste Zone hat eine Breite von 100 Nanometer.

Möglich wurde das, indem eine Fresnelsche-Zonenplatte für Gase eingesetzt wurde, die den Gasstrahl fokussiert⁴⁹¹. Es wäre zunächst zu prüfen, ob die Zonenplatte als Linse für den Gasstrahl (GRAPHIK 107, 108) auch unter Überdruck bzw. bei Überschallgeschwindigkeit brauchbare Ergebnisse bringt, doch kann mit einiger Wahrscheinlichkeit damit gerechnet werden, dass sich etwa die Parallelstrahlen der Laval-Düse⁴⁹² fokussieren lassen. Bei dieser Fokussierung der Parallelstrahlen wird das Ergebnis der Ultraschallforschung zu berücksichtigen sein, dass der Fokus erstens dreidimensional beweglich ist und zweitens jeder Ring der Zonenplatte einen anderen Fokus haben kann drittens bei der 180° Phasenverschiebung bei den "Leerstellen" der Ringe (d. i. bei den negativen Zonen) die Wirkung der Linse verdoppelt werden kann⁴⁹³. Zumindest sollte diese Möglichkeit im Test gegebenenfalls ausgeschlossen – oder bestätigt – werden.

Auch für den Fall also, wenn der Ultraschallsender in dem Test ausfallen würde, kann und muss die Testserie mit der Gaslinse fortgesetzt werden. Aus diesem Gesichtspunkt wäre also zu erwägen, ob nicht zuerst die Linse getestet werde, und erst danach, nachdem man die Gaslinse im Griff habe, die Einsetzbarkeit von Ultraschallsender als Membranpumpe ebenfalls teste. Es heißt nämlich an einer Stelle, dass bei variablem Fokus eine in den Sender integrierte Linse verwendet werden müsse⁴⁹⁴, und das sollte heißen, dass die Zonenplatte als Linse ihre Wirksamkeit nur in der Einheit mit dem Ultraschallsender entfalten könne.

Koenig, Pressemitteilungen der Ruhr-Uni Bochum vom 8. 11. 1999, in: < http://www.ruhr-unibochum.de/pressemitteilungen-1999/msg00320.html >: "In einer speziellen Apparatur am Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, ließen die Forscher einen Heliumgasstrahl aus einer Düse durch einen Trichter auf die Zonenplatte strömen. Die Gaswellen, die auf die Ringe auftreffen, sollten zu einem Teil reflektiert, zu einem anderen Teil beim Hindurchfließen zwischen den Ringen gebeugt und so in einem Fokus gebündelt werden. Da das Gas anders als Licht unsichtbar ist, brauchten die Experten einen Detektor, um diese Theorie zu beweisen. Sie bewegten das Gerät hinter der Zonenplatte hin und her, um die Wirkungsweise der Zonenplatte zu testen. Und tatsächlich fanden sie das charakteristische Zeichen für einen Fokus: Eine sehr hohe Gaskonzentration an einen Punkt, die in der Umgebung stark abfällt. Gegenüber herkömmlichen Methoden der Mikroskopie, z. B. der Licht- und der Elektronenmikroskopie, hat die neue Methode große Vorteile: Die geringe Wellenlänge der Materiewellen erlaubt eine atomare Auflösung, ist also wesentlich empfindlicher als die Lichtmethode. Außerdem können die Heliumatome das Objekt nicht beschädigen, wie Abtastmethoden oder die sehr energiereichen Elektronen."

⁴⁹² Beyer 66 ff; Siekmann 130 f, 139 ff.

⁴⁹³ Römer 3 ff, 20, 24 f, 32, 34.

Römer 33: "Zusammenfassend ergibt sich, daß die Phasenzonenplatte erwartungsgemäß wesentlich besser für diese Art der Fokussierung geeignet ist, so daß die Vorgehensweise, nur noch Phasenzonenplatten zu untersuchen, gerechtfertigt wird. Da die Ultraschalleigenschaften von vorgesetzter und integrierter Zonenplatte nahezu gleich sind, sind für die Entscheidung über ihren Einsatz lediglich der Anwendungszweck und die Fertigungskosten ausschlaggebend. Während bei Variation des Fokusabstandes die integrierte Zonenplatte verwendet werden muß, ist die vorgesetzte Zonenplatte für die Prüfung mit konsistentem Fokusabstand wesentlich billiger."

Allerdings wäre dabei zu bedenken, dass die zitierten Testergebnisse bei einem Ultraschall-Prüfgerät gewonnen wurden, wo ein Echo, also Rückstrahlung als Primäraufgabe erforderlich ist, was beim Leserschneiden sogar unbedingt verhindert werden sollte, und daher die Ergebnisse nicht direkt übernommen werden können, sondern weitere Tests nötig werden.

Aufgrund der begründeten Befürchtung, dass die Zonenplatte als Gaslinse zumindest mit beweglichem Fokus nur zusammen mit dem Ultraschallsender als Membranpumpe arbeiten könne⁴⁹⁵, kann und muss die Gaslinse (Zonenplatte für Gase) zusammen mit dem Ultraschallsender getestet werden, und so gilt das Laserschneiden als ein Anwendungsgebiet und mögliches Testgebiet für die Membranpumpe⁴⁹⁶. Wenn also bei einer hochfrequenten Membranpumpe axial ein Loch für den Laserstrahl⁴⁹⁷ gebohrt wird, und in die als Pumpe schwingende Membranfläche eine Zonenplatte integriert werde, kann das Gas sowohl im zentralen Loch wie auch seitlich oder durch weitere Bohrungen⁴⁹⁸ angesaugt und fokussiert abgestrahlt werden⁴⁹⁹, was noch im Test ausgelotet werden müsse. Wird die zylindrische Membran nicht aus einem Stück gebaut, sondern jede Zone der Zonenplatte als ein eigener Ring⁵⁰⁰, der elektromagnetisch "autonom" angeregt werden kann, wenngleich wohl gekoppelt, so ist der Strahl und Fokus dreidimensional lenkbar, bzw. kann der Fokus zerlegt und entlang einer senkrechten Gerade angeordnet und außerdem seitlich bewegt werden.

_

⁴⁹⁵ Römer 33.

⁴⁹⁶ Bergmann/Schäfer I (1975) 553 f.

⁴⁹⁷ Beyer 83.

⁴⁹⁸ Vgl Riethmüller 81 Bild 5.3; Schmidt J. 9 Bild 2.1.

⁴⁹⁹ Bergmann/Schäfer I (1975) 553 f.

⁵⁰⁰ Hilkenbach 5 Abbildung 1.3, 33 Abbildung 3.4, 39 Abbildung 3.8..

96

5. 3 Ausblick

Auch wenn zahlreiche erwartete Testergebnisse viele Eventualitäten ausschließen, ist die Anzahl der verbleibenden Optionen immer noch zu groß, so dass zunächst die Möglichkeiten und Grenzen von Tests ausgelotet werden müssten, um den Themenkreis abzugrenzen oder in einigen Punkten zu erweitern⁵⁰¹.

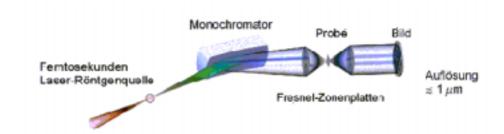


Abb. 4: Prinzip des Fresnel-Zonenplatten Mikroskops Graphik 109

Im letzten Abschnitt ist der Versuch unternommen worden, die Entdeckung der Fresnelschen Zonenplatte als Linse für Gase einerseits und die Entwicklung der Fresnelschen Zonenplatte als Linse für Ultraschallsender andererseits, synthetisch über die Ultraschallsender als Membranpumpe für Gase⁵⁰² auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen. Weil die Zonenplatte als Linse für Gase noch wenig bekannt und erforscht ist, sind zunächst die Fragen über den Einsatz der Zonenplatte beim Ultraschallsender als Orientierungshilfe herangezogen worden, um so die Möglichkeiten der Zonenplatte bei Gasen auszuloten, so weit die Identität von – oder Wechselwirkung bzw. Analogie zwischen – Gasfeld und Schallfeld vorausgesetzt werden kann⁵⁰³. Die Fortschritte beim Ultraschallsender mit Zonenplatte lassen erkennen, dass die Zonenplatte als Anwendungsgebiet für Gase ein Entwicklungspotential habe, zumal wenn sich die Forschungsergebnisse beim Ultraschall auf die Gase übertragen lassen. Dadurch allerdings, dass beim Ultraschall sich die Möglichkeit – wenn nicht Notwendigkeit – ergab, die ursprünglich als Linse gefasste Zonenplatte als eine integrierende Einheit mit der Membran des Ultraschallsenders zu bauen, ergab sich zunächst als ersten logischen Schritt die Perspektive, die Membrane überhaupt als Zonenplatte (GRAPHIK 109) zu bauen⁵⁰⁴.

-

Kutzner/Tsilimis, Mikroskopie mit Röntgenstrahlung, Münster, in: < http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Zach/deutsch/fs-Mikroskopie/main-mikroskopie.htm >.

 ⁵⁰² Bergmann/Schäfer I (1975) 553.
 503 Bergmann/Schäfer I (1975) 530 ff.

⁵⁰⁴ Hilkenbach 5 Abbildung 1.9.



Abbildung 1.3: Die "Sputtered Sliced Zone Plate". Eine Scheibe aus dem langen, beschichteten Draht ergibt eine Zonenplatte.

So wie bisher ein Ultraschallsender ein runder Stab (in der Spule) oder Scheibe – jeweils in einem Stück – sein konnte (GRAPHIK 109), wobei man Quarze zu diesem Zweck (als Scheibe) zu einem Stück zusammenklebte und zwischen zwei Stahlplatten als Sandwich befestigte⁵⁰⁵, so kann jetzt, nachdem man die Zonenplatte und Ultraschallsender als integrierende Einheit begriffen hatte⁵⁰⁶, statt der Stange eine aus konzentrisch angeordneten Röhren oder Ringen zusammengesetzte Einzeit, also im Grunde als Zonenplatte erkannt werden, und das müsste in dieser Perspektive bedeuten, dass die Fresnelsche-Zonenplatte als Linse für Gase sich zugleich als Membranpumpe auf Grundlage der Ultraschallsender einsetzen lassen müsse, wenn die bevorstehenden Tests nicht dagegen stehen. Hier die Grenzen und Möglichkeiten auszuloten, bedarf es eine Testserie.

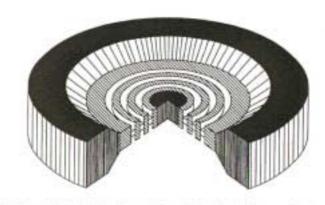


Abbildung I.S: Die fertige Zonenplatte mit den teshweise beruus präparierten Zonen

Graphik 111

 Das bekannte Prinzip der Ultraschallsender als Membranpumpe besagt, dass die oszillierende ebene Fläche der Ultraschallsender senkrecht zur Fläche parallele Strahlen in Form von Stoßwellen abstrahlt, und dadurch auf der ebenen Fläche des Schallsenders hinter der Stoßwelle ein Unterdruck bzw. Sog entstehe, und daher seitlich, also senkrecht zu den abgestrahlten Stoßwellen neues Gas angesaugt werde,

⁵⁰⁶ Römer 5 Abb 2/9, 13 Abb 1/21-22.

⁵⁰⁵ Bergmann/Schäfer I (1975) 540 ff; Günther/Hansen/Veit 246 f.

um erneut abgestrahlt zu werden, noch bevor der Ausschlag der vorigen Welle zurückschwingen könnte⁵⁰⁷.

- Die in der neueren Forschung bekannte Funktion der Ultraschallsender mit integrierter Zonenplatte als Linse zeigt, dass nur jede zweite Zone aktiv ist und das müsste heißen, dass zumindest flächenmäßig die Leistung halbiert wäre (GRAPHIK 110). In Wahrheit kommt aber durch die so halbierte Fläche die gleiche Leistung, besonders bei der Stoßwelle, und nicht nur das, sondern lässt sich die andere Hälfte durch Phasenverschiebung um 180° durch Rückkoppelung zurückgewinnen und so die Leistung mit der halbierten Fläche verdoppeln⁵⁰⁸.
- Es ist allerdings noch nicht getestet worden, ob diese Verdoppelung der Schallleistung durch die Zonenplatte als "dynamische" Linse auch auf Gase sich anwenden lasse. Man kann aber analoge Fälle der Rückkoppelung von Gasen heranziehen, wie zum Beispiel die Rückkoppelung einer schwingenden Luftschicht beim Elektroschweißen⁵⁰⁹. Eine andere, wenngleich noch wenig erforschte bzw. nicht hinrechend geklärte Wechselwirkung zwischen Lichtfeld und Schallfeld ist die sogenannte Sonolumineszenz.

Eines der interessantesten und zugleich vernachlässigten Gebiete der Physik sind die Kopplungen, obwohl jede Welle im Grunde eine gekoppelte Schwingung ist⁵¹⁰. Der unsere Kulturepoche gleichsam beherrschende Elektromagnetismus – wie Lichtphänomene – ist nichts anderes, als die (Rück)Koppelung der Elektrodynamik an den Magnetismus und umgekehrt⁵¹¹. Hier ist es bekannt, dass die elektrische Dynamik und magnetische Dynamik jeweils immer um 90° (phasen)verschoben sind⁵¹², so dass die Phasenverschiebung um 90° eines der elementarsten Grundgesetze in der Natur sei⁵¹³. Die ist um so bedeutender, als auf weiten Strecken die Theorie hinter dieser Einsicht her hinke. Dass die gekoppelten mechanischen Pendel ebenfalls in der Phase um 90° verschoben schwingen⁵¹⁴, ist bereits eingangs aufgezeigt worden. In der Atomphysik gilt es das elementare Gesetz stets vor Augen zu haben, dass zwei Kugelförmige Stoßpartner (wie Proton und Neutron) mit der gleichen

⁵⁰⁷ Bergmann/Schäfer I (1975) 553.

⁵⁰⁸ Römer 4 f.

⁵⁰⁹ Bergmann/Schäfer I (1975) 530: "Ein anderes Beispiel für einen Schallsender mit periodischer Kraft stellt der tönende Lichtbogen dar. Bereits bei einer Kohlenbogenlampe, die mit Wechselstrom betrieben wird, nimmt man einen Summton wahr, dessen Frequenz doppelt so groß ist wie die Frequenz des Wechselstroms. Das liegt daran, daß dessen positive wie negative Halbwerte die Temperatur des Lichtbogens periodisch erhöhen. Die Folge ist eine periodische Ausdehnung der umgebenden Luft."

⁵¹⁰ Bergmann/Schäfer I (1975) 443 ff.

⁵¹¹ Bergmann/Schäfer II (1971) 242 f.

⁵¹² Bergmann/Schäfer II (1971) 168, 174, 178, 242, 274.

⁵¹³ Bergmann/Schäfer I (1975) 260 f.

⁵¹⁴ Bergmann/Schäfer I (1975) 198 Abb IV 104-105.

Masse immer den Winkel von 90° einschließen⁵¹⁵. Analog grundlegende Bedeutung hat das Gesetz, wonach eine Resonanz erst immer bei 90° Verschiebung der Phase des Resonators zur Phase des Erregers eintritt⁵¹⁶: das korrespondiert mit der Phasenverschiebung um 90° bei der Koppelung⁵¹⁷.

Weniger bekannt ist allerdings und in der klassischen Physik wurde es immer wieder übersehen, dass analog dem immer um 90° phasenverschobene, also zueinander stets senkrechte Elektrizität und Magnetismus im Elektromagnetismus⁵¹⁸ (Photon), eine Phasenverschiebung um 90° zwischen Wärme und Schall (Phonon) gibt⁵¹⁹. So wie es kein veränderliches elektrisches Feld ohne Magnetismus oder kein veränderliches magnetisches Feld ohne Elektrizität gibt⁵²⁰, so gibt es kein veränderliches Schallfeld ohne die (um 90° phasenverschobene) Wärmewellen⁵²¹ und umgekehrt erzeugt jede Wärme eine Volumenveränderung also Gasdruck⁵²², d. h. Schall, der um 90° phasenverschoben ist. Am

515 Bergmann/Schäfer I (1975) 260 f; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 228 f Abb 7.19e.

⁵¹⁶ Bergmann/Schäfer I (1975) 192.

⁵¹⁷ Bergmann/Schäfer I (1975) 198 Abb IV 104-105.

⁵¹⁸ Bergmann/Schäfer II (1971) 242 f.

⁵¹⁹ Bergmann/Schäfer I (1975) 531 f: "Wird man in einem beiderseits offenen Rohr, etwa im unteren Viertel, etwas angebracht (Abb. IX, 51), so ertönt nach erwärmen des Geflechts das Rohr in seiner Resonanzfrequenz. Dreht man das Rohr um, so daß die Erwärmung am oberen Ende des Rohres eintritt, so wird die Schallerzeugung sofort unterbrochen. Das Experiment ist sehr einfach und kann mit geringen Mitteln durchgeführt werden. Das Drahtgeflecht kann z. B. mit einer Flamme erwärmt werden. An Hand dieses Experiment soll das Prinzip der Rückkoppelung und Gegenkoppelung erläutert werden. Rückkoppelung liegt vor, wenn der Schwingungsvorgang eine Energiezuführung so steuert, daß die Schwingungsphase dieser Anregung zu der Phase des steuernden Schwingungsvorganges etwa 90° Voreilung hat. In diesem Fall tritt eine Verstärkung der Schwingung ein. Wird die Phasenlage zwischen Anregung und Steuerung um 180 Grad gedreht, so liegt Gegenkopplung vor und die Schwingung wird gedämpft. Bei dem akustischen Wärmerohr wird Wärme in Schallenergie umgewandelt. Diese Umwandlung erfolgt durch periodische Erwärmung, d. h. periodische Ausdehnung der Luft. [...] Denkt man sich die Strömung nach dem Fourierschen Satz in Sinusschwingungen zerlegt, so werden diejenigen Frequenzen, die in der Nähe der Resonanzfrequenz des Rohres liegen, verstärkt, die übrigen Frequenzen dagegen geschwächt. [...] In einer stehenden Welle ist der Druck p gegenüber der Schnelle v um 90 Grad verschoben (Abb. IX, 51). [...] Die Wärmeanregung eilt also dem Schalldruck um 90 Grad voraus. Aus der Schwingungslehre weiß man aber, daß dieses die optimale Anregungsbedingung ist. Dreht man nun das Rohr um, so befindet sich die Wärmequelle am oberen Rohrende, wo in der betrachten Phasenlage die Schallschnelle mit der Gleichströmung gleichgerichtet ist. Hier wird also die Wärmeanregung in dieser Phasenlage minimal, d. h. die Phasendifferenz zwischen Anregung und Steuerung ist durch das Umdrehen des Rohres um 180 Grad gedreht worden. Deshalb wird die Schwingung nun durch Gegenkoppelung geschwächt. [...] Die Anregungsenergie (Wärme) erzeugt einen periodischen Vorgang (Schall), der rückwirkend die Flammengröße steuert. Die genaue Frequenz, in der das System schwingt, ist von der Phasendifferenz zwischen der Anregung und der Resonanzschwingung abhängig. Bei 90° Voreilung der Anregung vor der Resonatorschwingung wird genau die Resonatorfrequenz erzeugt."

⁵²⁰ Bergmann/Schäfer II (1971) 242 f.

⁵²¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 467: Als man mit der von Newton (1686) aufgestellten Gleichung $c=(K/\rho)^{1/2}$, wo das mit K bezeichnete Kompressionsmodul durch den Druck p wie folgte ersetzt werden kann, $c=(p/\rho)^{1/2}$, die Schallgeschwindigkeit berechnen wollte, bekam man 280 m/s, aber es zeigten sich grobe Abweichungen. Gemessen wurden 331 m/s. "Wie Laplace (1816) zeigte, liegt der Grund für diese Abweichung in Temperaturänderungen, die bei den Verdichtungen und Verdünnungen der Longitudinalwellen in Gasen auftreten. Da die Druckänderungen in der Schallwelle so schnell vor sich gehen, daß kein Temperaturausgleich mit der Umgebung erfolgen kann, und die Temperatur des Gases in der Verdichtungen und Verdünnungen verschiedene Werte annimmt, darf man für den Kompressionsmodul K nicht den 'isothermen' Wert p' sondern nur den 'adiabatischen' Wert pκ wählen, wobei κ der schon eingeführte Faktor ist, dessen wahre Natur erst in der Wärmelehre erkannt wird." Mit Laplace verändert sich die Gleichung von Newton zu $c=(pk/\rho)^{1/2}$, und man erhält 331 m/s. ⁵²² Bergmann/Schäfer I (1975) 269 f, 640 ff, 642 Abb XI 15.

wenigsten bekannt aber scheint zu sein, dass die Reibung auf Tangentialkräfte zurückgeht⁵²³. Der sogenannte hydrostatische Druck in Gasen und Flüssigkeiten verteilt sich nach Pascal (1659) in allen Richtungen gleichmäßig⁵²⁴ und wirkt – ähnlich der Zentrifugalkraft – radial⁵²⁵. Die tangential wirkende Reibung ist dazu – ähnlich der Corioliskraft⁵²⁶ – senkrecht, also um 90° phasenverschoben⁵²⁷.

Obwohl Laplace 1816 schon die Newtonsche Physik in diesem Punkt ergänzend berichtigt hatte⁵²⁸ (ähnlich wie schon Euler die Newtonsche Mechanik um den Begriff des Feldes ergänzend berichtigt hatte⁵²⁹, ohne dass die Änderung zum Allgemeingut gehört hätte, sondern erst mit der Übernahme der hydrodynamischen Gleichungen für die Elektrizität⁵³⁰ vorübergehend zur Ehren kamen, um dann wieder in die Versenkung zu verschwinden), ist es bis heute in der klassischen Wellenmechanik üblich geblieben, mit Newton gegen Laplace zu

Druck p = Kraft F / Fläche A

Es geht aus dieser Darlegung hervor, daß der Druck eine spezielle Form der elastischen Spannungen ist, die den Flüssigkeiten und Gasen eigentümlich ist: In einer idealen (reibungslosen Flüssigkeit existieren nur Normalspannungen, eben der Druck. Anders ist es in einer zähen Flüssigkeit; hier können auch Tangential- oder Schubspannungen infolge der Reibungskräfte auftreten, vgl. Nr. 55."

⁵²³ Bergmann/Schäfer I (1975) 296: "Wie schon zuvor erwähnt, ist die Reibung auf die Existenz von Tangentialkräften zurückzuführen. Wie bei elastischen Körpern kann man deshalb – wenn man den Druck p als Normalspannung betrachtet – die Zähigkeit η als Proportionalitätsfaktor der Tangential- oder Schubspannung definieren."

⁵²⁴ Bergmann/Schäfer I (1975) 267: "Ein auf eine Flüssigkeit ausgeübter Druck verteilt sich durch die ganze Flüssigkeit nach allen Seiten mit gleicher Stärke. [...] Man nennt ihn den hydrostatischen Druck. Dieser übt auf jede mit der Flüssigkeit in Berührung befindliche Fläche in senkrechter Richtung eine Kraft aus, die der gedrückten Fläche direkt proportional ist.

⁵²⁵ Bergmann/Schäfer I (1975) 268 Abb VI 3.

Bergmann/Schäfer I (1975) 213: "Daraus muß er notgedrungen schließen, daß außer der von ihm festgestellten Zentrifugalkraft, die als einzige Kraft wirksam ist, solange die Kugel relativ zur bewegten Scheibe ruht, noch eine zweite Kraft auftritt, wenn sich die Kugel bewegt. Die Kraft nennt man nach ihrem Entdecker die Corioliskraft; sie ist ebenso wie die Zentrifugalkraft eine Trägheitskraft. Infolge der Corioliskraft erfährt jeder Körper, der sich auf einem mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotierendem System mit der Geschwindigkeit v bewegt, eine Coriolisbeschleunigung a_v quer zu seiner Bahn".

⁵²⁷ Bergmann/Schäfer I (1975) 267 ff.

⁵²⁸ Bergmann/Schäfer I (1975) 467.

⁵²⁹ Bergmann/Schäfer I (1975) 301: "Es muß deshalb betont werden, daß Gl. (VI, 15) allgemein nicht den Zustand eines Teilchens längs seiner Bahn, sondern nur den Strömungszustand in einem speziellen Raumpunkt beschreibt. Gerade hierin liegt auch die Leistung Eulers, daß er in seinen Gln. (VI, 11) – entgegen den Vorstellungen der Newtonschen Mechanik eines diskreten Teilchens – jede Zuordnung zu einem bestimmten Teilchen aufgab und statt dessen den Begriff des Strömungsfeldes einführte."
530 Bergmann/Schäfer II (1971) 176 f: "Vergleichen wir nun die Abb. 228, die die Feldstärke in ihrer Abhängigkeit von ρ in

Innen- und Außenraum darstellt, mit der Abb. VI, 91 in Nr. 60 des I. Bandes, die die Verteilung der Geschwindigkeit v innerhalb und außerhalb eines geradlinigen Wirbels darstellt, so erkennt man völlige Identität beider Figuren. Was bei uns die Stromstärke J ist, ist dort die Geschwindigkeit v. Tatsächlich besteht zwischen beiden Vorgängen eine enge Analogie. [...] Das Magnetfeld im Außenraume entspricht der Zirkulationsströmung und gehorcht dem gleichen Abhängigkeitsgesetz von ρ; das Feld im Innenraum dagegen entspricht dem Flüssigkeitswirbel. In Übertragung der hydrodynamischen Bezeichnung nennt man das Feld im Inneren einen magnetischen Wirbel, der in dem stromführenden Teil des Leiters seinen Sitz hat. [...] Die oben betonte Analogie zwischen Flüssigkeitswirbeln und elektrischen Strömen (magnetischen Wirbeln) geht noch weiter. Wie Helmholtz bewiesen hat, müssen Flüssigkeitswirbel stets geschlossen sein, also Ringe (Wirbelringe) bilden (vgl. Nr. 60, Bd. I). Auch die stationären Ströme sind stets geschlossen, da der Strom auch durch das Innere des galvanischen oder thermoelektrischen Elements fließt; es gibt also - wenigstens für den statistischen Fall - auch nur ringförmig geschlossene Ströme. [...] Betrachten wird z. B. eine Kondensatorentladung, so beginnt der Leitungsstrom jedenfalls an der einen und endigt an der anderen Kondensatorplatte: der Leistungsstrom ist also sicher nicht geschlossen. Aber gestützt auf den Helmholtzschen Satz hat Maxwell die Hypothese gemacht, daß auch in diesem Falle der Strom tatsächlich geschlossen sei, indem im Inneren des den Kondensator ausfüllenden Dielektrikums noch eine andere Stromart, der sog. Verschiebungsstrom existiere, der zusammen mit dem Leitungsstrom wieder eine geschlossene Strombahn bilde. Diese kühne Hypothese, auf die wir später genau eingehen müssen, ist durch die Versuche von Heinrich Hertz vollkommen gerechtfertigt worden."

argumentieren⁵³¹. Es wird geradezu widersinnig immer wieder in der einschlägigen Fachliteratur tatsachenwidrig betont, dass es in Gasen und Flüssigkeiten angeblich keine Transversalwellen geben könne⁵³². Oder wird einerseits stets auf die Analogie zwischen Elektrizität und Hydrodynamik hingewiesen, auch und insbesondere im Zusammenhang mit dem Ohmschen Gesetz über den elektrischen Widerstand⁵³³, wo bekanntlich Elektrizität in Wärme umgewandelt werde, aber dann wird zwar etwa einerseits definitiv festgestellt, dass der Schallwiderstand rechnerisch exakt dem Ohmschen Widerstand bei der Elektrizität entspricht, um dann andererseits diese Tatsachenfeststellung aus dem Experiment mit der spekulativ tatsachenwidrigen Behauptung zu verwerfen, dass der Schein des Experiments und der Mathematik – beide – angeblich deswegen trügen würden, weil im Gegensatz zum Ohmschen Widerstand beim Schallwiderstand keine Wärme entstehe⁵³⁴. Die Newtonsche Mechanik behandelt nämlich Grundsätze, die in der Entfaltung und Ableitung nur ansatzweise etwas aussagen können, und diese Ansätze anhand der späteren Entwicklung bestätigt werden, auch und gerade wenn sie nachjustiert werden müssen, was etwas durch Euler, Fresnel und Laplace u. a., um bei den hier schon genannten zu bleiben, tatsächlich geschehen ist. Bezeichnend ist, dass Euler, Fresnel und Laplace u. a. ihre Korrekturen auf Grundlage der Newtonschen Mechanik so vorgenommen hatten, dass sie in den von ihnen jeweils vorgenommenen Korrekturen eine glänzende Bestätigung der Newtonschen Mechanik erkannt hatten. Mit dem Aufkommen einer angeblich neuen, sog. modernen Physik, wurden neue Grundlagen geschaffen⁵³⁵, indem unter Berufung auf Euler, Fresnel und Laplace u. a. die Nettonische Mechanik als angeblich unzulänglich mit der Begründung verworfen wurde⁵³⁶, ohne diese jeweils zu nennen, dass die angebliche Unmöglichkeit oder Unrichtigkeit der

_

⁵³¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 468: "Wie liegen die Verhältnisse bei Transversalwellen? Am Beispiel der Seilwellen erkennt man, dass Transversalwellen nur in solchen Körpern möglich sind, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung wirkende Kräfte aufnehmen können, und das sind die festen Körper. Für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Transversalwellen ist außer der Dichte ρ der Torsionsmodul G maßgebend. [...] Wenn in einem festen Körper eine beliebige Gleichgewichtsstörung erzeugt wird, so pflanzt sich diese im allgemeinen sowohl als Longitudinalwelle wie auch als Transversalwelle durch das Innere des Körpers fort, und zwar mit der diesen Wellen zukommenden Geschwindigkeit (VIII, 17a) bzw. (VIII, 21). Diese Tatsache wird z. B. regelmäßig bei der Beobachtung der Erdbebenwellen an den Seismographen festgestellt."

Bergmann/Schäfer I (1975) 492: "Abschließend sei noch einmal bemerkt, daß in Gasen und Flüssigkeiten nur Longitudinalwellen möglich sind, während in Festkörpern Longitudinal- und Transversalwellen und bei Stab- und Plattengestalt des Festkörpers auch Dehnungs- und Biegewellen auftreten können." Vgl AaO I 551.

Bergmann/Schäfer II (1971) 129: "Es ist nützlich, die bisher besprochenen elektrische Strömungserscheinungen mit Vorgängen des Fließens von Wasser durch eine Rohrleitung zu vergleichen."
 Bergmann/Schäfer I (1975) 544: "Gl. (IX, 27) stimmt formal mit dem Ohmschen Gesetz der Elektrizität überein [...];

Bergmann/Schäfer I (1975) 544: "Gl. (IX, 27) stimmt formal mit dem Ohmschen Gesetz der Elektrizität überein [...]; letztere wird daher als Schallwiderstand des betreffenden Mediums bezeichnet. [...]; die Einheit (g cm⁻² s⁻¹) wird auch als akustisches Ohm bezeichnet. Die Analogie der Gl. (IX, 27) mit dem Ohmschen Gesetz ist in der Ausdrucksweise sehr bequem; es ist indessen nicht zu übersehen, daß die als Schallwiderstand bezeichnete Größe ρc – im Gegensatz zum Ohmschen Widerstand – keine Energie in Wärme umwandelt."

⁵³⁵ Schoenebeck, Heinz: IX. Kapitel. Die Relativitätstheorie, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 918 ff.

⁵³⁶ Hahn, V. Kapitel. Strahlung und Photometrie, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 608 f.

Ergänzungen von Euler, Fresnel und Laplace u. a. die Unmöglichkeit und Unrichtigkeit der Newtonschen Mechanik bewiesen haben sollte⁵³⁷.

Indem also einerseits bei Laplace⁵³⁸ – im Gegensatz zu Newton – belegt ist, dass es keinen Schall ohne (transversalen) Wärmewellen gibt, und andererseits das Analoge zum Senkrechtem im Elektromagnetismus (Photon) auch zwischen Schall und Wärme eine Phasenverschiebung von 90° (Phonon) zeigt, wonach also Schall sowohl wie auch Wärme durch Phononen transportiert werde⁵³⁹, so wie das Photon Elektrizität und Magnetismus (analog) transportiere, hat man einen elektromagnetischen Zugang zum Schall, weil Wärme sich zwar auch diffus, d. h. mittelbar über die kinetische Energie der Moleküle, ausbreiten kann⁵⁴⁰, aber sie ist im Grunde eine elektromagnetische Welle⁵⁴¹. So ähnlich wie in der Elektrizität im Leiter von einem Strom die Rede ist und zwischen zwei Kondensatorplatten beim unterbrochenen Leiter von Strahlen oder Wellen, so kann zwar die Wärme auch als Strahlung übertragen werden, aber sie wechselwirkt zunächst über andere Wege der Wärmeübertragung⁵⁴².

 ⁵³⁷ Schoenebeck, Heinz: IX. Kapitel. Die Relativitätstheorie, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 918 ff, 947 ff.
 ⁵³⁸ Bergmann/Schäfer I (1975) 467.

⁵³⁹ Bergmann/Schäfer I (1975) 612: "Bei Zimmertemperatur wird in reinen Metallen fast die gesamte Wärmeleitung durch Elektronen getragen. Dagegen ist dieser Anteil in verunreinigten Metallen (z. B. rostfreier Stahl), Legierungen (z. B. Neusilber) und Halbleitern so klein, daß die Wärmeleitung durch Gitterwellen nicht mehr vernachlässigbar ist. In Isolatoren erfolgt die Übertragung der Wärme dagegen nur durch Gitterwellen. [...] Die bisher oft genannten Gitterwellen sind elastische Wellen und werden wegen ihrer hohen Frequenz auch "Hyperschallwellen" genannt. In Analogie zu der gequantelten Lichtwelle, dem Photon, wird das Quantum einer elastischen Gitterwelle als Schallquantum oder als "akustisches Phonon" bezeichnet. Der Abfall der spezifischen Wärmekapazität fester Körper bei tiefen Temperaturen läßt sich nämlich nur verstehen, wenn man annimmt daß auch Gitterschwingungen gequantelt sind. Die Streuung der Phononen ist

nämlich nur verstehen, wenn man annimmt, daß auch Gitterschwingungen gequantelt sind. Die Streuung der Phononen ist also maßgebend für die Wärmeleitung in elektrisch nichtleitenden Kristallen, während die Streuung der Elektronen bei ihrer Wärmebewegung für die Wärmeleitung in Metallen entscheidend ist."

Bergmann/Schäfer I (1975) 602 ff: "Man kann sich schnell durch kleine Experimente davon überzeugen, daß ein Vergleich der Wärmeleitfähigkeit mit der elektrischen Leitfähigkeit erstaunliche Übereinstimmung zeigt: [...] Man muß den Schluß ziehen, daß die freien Elektronen, die nur in den Metallen vorhanden sind und die gute elektrische Leitfähigkeit verursachen, auch für die gute Wärmeleitfähigkeit der Metalle verantwortlich gemacht werden müssen. [...] Die quantitative Beschreibung der Wärmeleitung hat große Ähnlichkeit mit der Diffusion. [...] Wie schon bei der Behandlung der Diffusionsvorgänge (Nr. 72), so ist auch bei der Wärmeleitung die vollständige Lösung erst gegeben, wenn die Temperatur des untersuchten Körpers in Abhängigkeit von Ort und Zeit bekannt ist. [...] Die Elektronen können sich frei bewegen wie die Teilchen eines Gases und können dadurch bei gerichteter Strömung einen elektrischen Strom bilden. Sie sind jedoch nicht nur Träger eines elektrischen, sondern auch eines Wärmestromes: Da sie mit dem Gitter in Wechselwirkung stehen werden die Elektronen in Gebieten mit höherer Temperatur auch eine höhere mittlere Energie besitzen. Diffundieren diese Elektronen in Gebiete niedriger Temperatur, so bringen sie eine zusätzliche Energie mit, und erhöhen dort die Temperatur."

Bergmann/Schäfer I (1975) 612 f. "Außer der Wärmeleitung und der Wärmekonvektion ist von sehr großer Bedeutung die dritte Art des Wärmetransportes: die Wärmestrahlung. Hier erfolgt der Wärmeausgleich zwischen Körpern mit unterschiedlichen Temperaturen auch dann, wenn zwischen den Körpern kein materieller Träger vorhanden ist, also auch durch das Vakuum (Beispiel: Strahlung der Sonne). Die Wärmestrahlung ist auch vorhanden, wenn zwischen den Körpern keine Temperaturdifferenz besteht. Dann emittiert und empfängt jeder Körper gleich viel Strahlungsenergie. Die Stärke der Energieabstrahlung richtet sich sehr nach der Temperatur des strahlenden Körpers. So wird Wärmestrahlung auch von solchen Körpern ausgehen, deren Temperatur niedriger als die Umgebung ist. Man hüte sich aber, von Kältestrahlung zu sprechen. Diese gibt es nicht. Ein Körper kühlt sich ab im Vakuum, wenn seine Emission größer ist als die Absorption von Strahlung. [...] Die Wärmestrahlung ist wie das Licht eine elektromagnetische Strahlung. [...] Zwischen dem sichtbaren und dem nahen infraroten Licht besteht kein wesentlicher Unterschied. Jedoch wird das mittlere und ferne Ultrarot im allgemeinen stark absorbiert und in Schwingungsenergie der Atome (= Wärme) umgewandelt. Herschel hat die Infrarotstrahlung zuerst nachgewiesen. Er zerlegte das Sonnenlicht spektral durch ein Prisma und fand, daß auf der roten Seite, jedoch außerhalb des sichtbaren Spektrums, eine Erwärmung stattfindet."

- Der Übergang zwischen den Varianten des Wärmetransportes zu messen ist mit Hilfe der sogenannten Thermosäule⁵⁴³, ein Effekt der Thermoelektrizität, möglich, die umkehrbar durch Temperaturunterschiede einen Strom in Leiter induziert⁵⁴⁴ und daher die Umwandlung von Elektrizität in Wärme – und umgekehrt – demonstriert. Noch direkter zeigt die Umwandlung von Wärme und Elektrizität der Thompsoneffekt an⁵⁴⁵, wobei – je nach Art des Leiters - eine Erwärmung oder Abkühlung der Leitung durch den elektrischen Strom demonstriert werde⁵⁴⁶.
- Durch die longitudinale Stoßwelle, wie sie auch durch den Ultraschallsender entsteht, sich anschaulich die gleichzeitige – gekoppelte – Wärmeentstehung demonstrieren⁵⁴⁷. Auffällig ist bei der experimentellen Erzeugung der Stoßwelle, dass eine zentimeterdicke Metallplatte als Membran dazu verwendet werde⁵⁴⁸. Solche Metallplatten werden sonst auf den Kolben der Membranpumpe aufmontiert⁵⁴⁹, aber solche Metallplatten kommen auch beim Ultraschallsender vor⁵⁵⁰, der sich sonach besonders für die Erzeugung der Stoßwellen beim Verdichtungsstoß eignet 551.
- Ein Verdichtungsstoß kann allerdings auch mit geringeren Mitteln erreicht und so ähnlich wie beim Elchtest gleichsam hochgeschaukelt werden, indem ein Ventil bei einem Luftschlauch rhythmisch – aber aperiodisch – geöffnet bzw. verschlossen werde⁵⁵². Die

⁵⁴³ Bergmann/Schäfer II (1971) 160 f

⁵⁴⁴ Bergmann/Schäfer I (1975) 613 f.

⁵⁴⁵ Bergmann/Schäfer II (1971) 162 ff.

⁵⁴⁶ Bergmann/Schäfer II (1971) 163.

⁵⁴⁷ Bergmann/Schäfer I (1975) 493 f: "Wie bereits erwähnt, bleibt auch die Schallgeschwindigkeit in der Luft bei großen Amplituden nicht mehr konstant, sondern steigt mit wachsender Amplitude an. In der Nähe von Explosionen ergeben sich deshalb Schallgeschwindigkeit von 1000 m/s und mehr. Dieses Phänomen beruht darauf, daß bei großen Amplituden harmonische Schwingungen wie sie zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft vorausgesetzt wurden, nicht mehr

⁵⁴⁸ Bergmann/Schäfer I (1975) 493 f: "Geht dieses Anwachsen der Steilheit so weit, daß der Schalldruck unstetig vom Minimum zum Maximum springt, so spricht man von einer Stoßwelle. Derartige Wellen erzeugt man heute mit Hilfe einer bis zu einem Zentimeter (!) dicken Metallmembran, die sich in einem Rohr, dem sogenannten Stoßrohr, befindet. Der Druck auf der einen Seite der Membran wird so lange gesteigert, bis die Membran platzt. Die entstandene Stoßfront, d. i. die Diskontinuitätsfläche, schreitet längs des Rohres fort. Dabei werden große Energien frei, die zu erheblichen lokalen Erhitzungen führen und die Luft zum Glühen bringen können."

⁵⁴⁹ Vetter G. 6; Becker 11 ff, 22 ff, 41 ff.

⁵⁵⁰ Bergmann/Schäfer I (1975) 542: "Da es für großflächige Ultraschallsender im Frequenzbereich 20bis 30 kHz, wie sie für Unterwasserschallgeber (zB beim Echolot) Verwendung finden, schwierig ist, genügend große homogene Quarzplatten zu beschaffen, setzt man Platten aus kleineren Stücken mosaikartig zusammen und kittet sie zwischen Stahlplatten von mehreren Zentimeter Dicke. [...] Da Quarz und Stahl annähernd die gleiche Schallgeschwindigkeit haben, schwingt das ganze System wie eine einheitliche Platte von der Dicke 6,2 cm und erzeugt dementsprechend eine Schallfrequenz von 38 kHz."
⁵⁵¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 553 f; vgl Schmidt E. 350 ff; Siekmann 132 ff.

⁵⁵² Bergmann/Schäfer I (1975) 494: "Die Entstehung einer Stoßfront läßt sich aber auch mit geringeren Mitteln vorführen: Man erzeugt in einem mindestens 10 m langen Schlauch, der der an die Druckluftleitung angeschlossen ist, durch kurzzeitiges Öffnen des Ventils eine aperiodische Störung mit so großer Druckamplitude, daß die beschriebenen nichtlinearen Erscheinungen auftreten. Die Geschwindigkeit, mit der die Störung im Schlauch fortschreitet, ist dann größer als die normale Schlauchgeschwindigkeit, und die vorderste Front des Druckstoßes wird zunehmend steiler, bis schließlich beim Eintreffen am anderen Schlauchende eine Stoßfront entsteht. Sie macht sich als Knall bemerkbar, wenn man am Schlauchende zur besseren Abstrahlung noch einen Trichter anbringt."

dabei entstehende nichtlineare Steilheit, eine Art Hydrodynamisches Paradoxon⁵⁵³, ist in jüngster Zeit in den Mittelpunkt des Interesses getreten⁵⁵⁴. Die dabei entstehende Paradoxie kann bis zu einem gewissen Grad mit dem Stoßrohr im Labor simuliert werden⁵⁵⁵. Es werden dabei technische Anforderungen gestellt, die es noch im Jahre 1993 mit sich brachten, dass außer in einer Versuchsanlage in Aachen in Ganz Europa die Extrembedingungen des Wiedereintritts von Raumgleitern in die Erdatmosphäre nicht simuliert werden konnte⁵⁵⁶. Selbst diese Simulation musste sich auf den einmaligen Schock einer einzigen Stoßwelle beschränken, auch wenn diese Singularität dann wiederholt werden konnte⁵⁵⁷, weil vergleichbare Anlagen mit einer kontinuierlichen Leistung über eine längere Zeitspanne hinweg nur ein Bruchteil der erforderlichen Leistung liefern⁵⁵⁸.

Die Wechselwirkung von Schallwellen und Materie ist zwar trivial⁵⁵⁹, denn im Vakuum kann sich kein Schall ausbreiten⁵⁶⁰, und trotzdem wird noch allzu streng zwischen Materiewellen

⁵⁵³ Thompson, Liquid-Vapor Adiabatic Phase Changes, in: Kluwick 198 ff.

⁵⁵⁴ Reinartz: "Pionierarbeit leistete schon vor gut hundert Jahren der große französische Mathematiker Henri Poincaré in mehreren Abhandlungen über das Dreikörperproblem in der Himmelsmechanik (1889-1899). Poincarés Arbeiten mündeten in nichts geringerem als der Konsequenz, die klassischen Grundlagen des Determinismus in der Newtonschen Mechanik in Frage zu stellen, ein seinerzeit unerhörter Vorgang. Es ist verständlich, daß Poincaré nicht bereit war, sämtliche Schlußfolgerungen zu ziehen, die sich aus seinen Arbeiten ergaben und weiter Ideen zu verfolgen, die in diametralem Gegensatz zur damals herrschenden Auffassung vom strengen Determinismus in der klassischen Mechanik standen (eine Situation, die in der Wissenschaft gar nicht so selten ist; man denke z.B. nur an C.F. Gauß und die Entdeckung der Nichteuklidischen Geometrie oder die Entdeckung des Irrationalen durch die Pythagoreer). Anfang der sechziger Jahre stieß dann der amerikanische Meteorologe E. Lorenz beim Versuch, auf dem Computer Wetterprognosen zu erzeugen, auf das verblüffende Resultat, daß winzige Änderungen der Anfangsbedingungen in seinem System von drei einfachen nichtlinearen Differentialgleichungen zu sprunghaften (also instabilen) Änderungen in den Lösungen, die einen gewissen Teilzustand des Wetters beschrieben, führten. Das Resultat war insofern verblüffend, weil aus zweifelsfrei deterministischen Gleichungen kein vorhersagbares bzw. berechenbares Ergebnis ableitbar war. Konkret bedeutete das: dem Wetter liegen physikalische Prozesse zugrunde, die prinzipiell unberechenbar sind, d.h. die Unmöglichkeit (auch mit potentiell denkbaren Supercomputern) Langfristprognosen für die Entwicklung der Atmosphäre zu erstellen, ist systembedingt und nicht kenntnisbedingt. Die Physiker nennen solche unberechenbaren Zustände an sich deterministischer Systeme Deterministisches Chaos, und man könnte vereinfachend sagen, daß ein deterministisches System chaotisch ist, wenn niemand vorhersagen kann, wie es sich über längere Zeit verhalten wird." Vgl Böhm, Einfluß der Dispersion auf die nichtlineare Ausbreitung von Lichtimpulsen, in: < http://www.physik.uni-rostock.de/optik/staff/michael/Dissertation druck.pdf >, S. 43 f: "In vielen Bereichen der Physik treten sogenannte solitäre Wellen und Solitonen auf [48, 109, 131]. Solitäre Wellen sind Wellenpakete, welche sich, obwohl sie sich in einem dispersiven Medium befinden und deswegen zerfließen müßten, aufgrund einer Nichtlinearität formstabil ausbreiten. Haben diese solitären Wellen zusätzlich die Eigenschaft, sogar bei einer Wechselwirkung untereinander nicht zu zerfließen, so nennt man sie Solitonen. [...] Solitonen werden durch nichtlineare Differentialgleichungen höherer Ordnung beschrieben. Eine bedeutende Differentialgleichungen, welche die Ausbildung von Solitonen erlaubt, ist die sog. nichtlineare Schrödinger-Gleichung NLSE (engl.: nonlinear Schrödinger equation). Die nichtlineare Schrödinger-Gleichung wird am häufigsten benutzt, um die Ausbreitung von Lichtimpulsen in Glasfasern zu studieren. Aufgrund dieser Gleichung sagten 1973 Hasegawa u. a. die Existenz von optischen Solitonen in Glasfasern voraus. Sie wurden experimentell erst 1980 von Mollenauer u. a. nachgewiesen [115], da man bis zu diesem Zeitpunkt keine Glasfasern mit ausreichend hoher Qualität herstellen konnte. Optische Solitonen sind im Gegensatz zu anderen Solitonenarten leicht zu untersuchen, und geben dadurch ein gutes Modellbeispiel für andere Solitonenarten, die durch die nichtlineare Schrödinger-Gleichung beschrieben werden. [...] NLSE (engl.: nonlinear Schrödinger equation) beschreiben. Dabei ist q = q(t,z) die Einhüllende einer Wellenfunktion. d ist ein Maß für die Dispersion der Gruppengeschwindigkeit. g hingegen ist ein Maß für die betrachtete Nichtlinearität. Eine ausführliche Beschreibung findet man in [109] und [171]."

⁵⁵⁵ Oertel 236 ff.

⁵⁵⁶ Vetter M. 1 ff.

⁵⁵⁷ Vetter M. 3 f.

⁵⁵⁸ Vetter M. 93 ff, Oertel 633 ff.

⁵⁵⁹ Bergmann/Schäfer I (1975) 487 ff.

und Schallwellen unterschieden, obwohl in jeder Schallwelle Materie sich zumindest partiell mit bewege⁵⁶¹. Es ist zwar richtig, dass ein vom Schall durchdrungenes Materiefeld vom Umfeld gleichen materiellen Eigenschaften abhebe⁵⁶², aber das beweist nur einerseits die Wirkung des Schalls und zugleich der Wärme auf Materie, und andererseits die Wirkung der Materie auf den Schall, der sich von Medium zu Medium ändere. Infolge der Wärme, die sowohl mit der Materie wie auch mit dem Schall periodisch wechselwirke⁵⁶³, kommt es zu einem Ineins bzw. Gleichklang von Schall und Materie in der Welle.

Dass Licht mit Ultraschall eine Wechselwirkung zeigt, ist bekannt. Eine Ultraschallwelle kann für das Licht auch als Linse fungieren⁵⁶⁴. Die Wechselwirkung von Schall und Licht ist auch in der sogenannten Sonolumineszenz⁵⁶⁵ zu beobachten. In turbulenten Strömungen etwa hinter einem Propeller oder in einer Turbine bildet sich die Kavitation⁵⁶⁶. Das sind zunächst Dampfbläschen, die auch mit Ultraschall erzeugt werden können⁵⁶⁷. Anfänglich wird das Bläschen immer größer und die beiden Gase dehnen sich aus, aber dann kommt es zur Reaktion und die Blase implodiert⁵⁶⁸.

--

⁵⁶⁰ Bergmann/Schäfer I (1975) 487.

⁵⁶¹ Bergmann/Schäfer I (1975) 488 ff.

⁵⁶² Crighton, Nonlinear Acoustic of Dubbly Liquids, in: Kluwick 45 ff.

Bergmann/Schäfer I (1975) 504: "Versuche insbesondere bei höheren Freuquenzen haben ergeben, daß die Schallabsorption in Gasen wesentlich größer ist, als sie die erwähnte Theorie von von Stockes und Kirchhoff liefert. Nach Untersuchungen von Kneser liegt der Grund hierfür in molekularen Prozessen, durch die eine weitere Umwandlung von Schallenergie in Wärme stattfindet. Diese Vorgänge hängen eng mit der oben erwähnten Schallabsorption in Gasen zusammen. Eine Druckerhöhung, wie sich in der Überdruckphase einer Schallwelle entsteht, ist nichts anderes als eine Erhöhung der Translationsenergie der Moleküle."

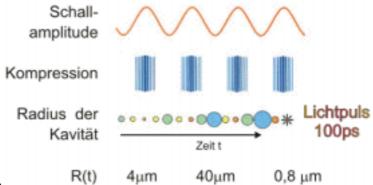
⁵⁶⁴ Eichler, III. Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 382 ff; Eichler, 3 Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1993) 389 ff.

⁵⁶⁵ Lemmens, Sonolumineszenz, in: http://www-public.tu-bs.de:8080/~plemmens/sonolumi.htm ,,Sonolumineszenz ist ein faszinierendes Phänomen, das bei der Kavitation von Bläschen in Flüssigkeiten (meistens Wasser) beobachtet werden kann. Die schockartige Implosion führt zu einer extrem nichtlinearen Bewegung der Bläschenwand, die einen Lichtpuls und eine Schockwelle aussendet."

⁵⁶⁶ Bergmann/Schäfer I (1975) 311, 410 f.

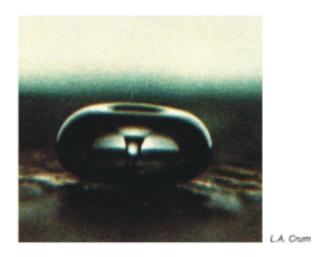
⁵⁶⁷ Bergmann/Schäfer I (1975) 311, 410 f.

⁵⁶⁸ Lemmens, Sonolumineszenz, in: < http://www-public.tu-bs.de:8080/~plemmens/sonolumi.htm >: "Kavitation kann durch Schallfelder hoher Intensität oder gepulste Laser ausgelöst werden. Für kontrollierte Experimente hat sich besonders die Untersuchung der **Einzelblasen-Sonolumineszenz** bewährt. Hierbei werden Gasbläschen in einem stehenden Schallfeld gefangen (Bjerknes-Kraft) und dort über viele Zyklen periodisch komprimiert und dekomprimiert. Die Vielblasensonolumineszenz spielt allerdings eine größere Rolle in der Sonochemie und Materialbearbeitung. Im Verlauf des Vortags wurde die Bjeknes-Kraft in einem Versuchsaufbau demonstriert."



Graphik 112569

Mit einer Schallwelle kann die Dampfblase künstlich aufrecht erhalten werden. Ohne Schall löst sich die Dampfblase auf und implodiert⁵⁷⁰.



Graphik 113571 implodierende Kavität, Jet mit v ≈ 1200 m/s.

Beim Kollaps oder Implosion der Blase entstehen bis zu 25.000 K Hitze und 10.000 bar Druck⁵⁷².



Graphik 114573

 $^{^{569} \} Lemmens, Sonolumineszenz, in: < http://www-public.tu-bs.de: 8080/\sim plemmens/sonolumi.htm>.$

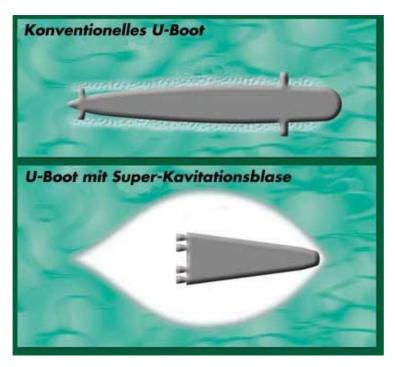
Lemmens, Sonolumineszenz, in: < http://www-public.tu-bs.de:8080/~plemmens/sonolumi.htm >.

Lemmens, Sonolumineszenz, in: http://www-public.tu-bs.de:8080/~plemmens/sonolumi.htm>.

⁵⁷² Lemmens, Sonolumineszenz, in: < http://www-public.tu-bs.de:8080/~plemmens/sonolumi.htm >.

⁵⁷³ Lange, Highspeed in der Tiefe, in: < http://www.morgenwelt.de/609.html >: "Das Wort "Kavitation" ist vom lateinischen Wort cavus - hohl – abgeleitet. Gemeint ist damit die Bildung von Blasen in einer Flüssigkeit. Solche Blasen entstehen nicht nur, wenn man eine Flüssigkeit erwärmt (etwa im Kochtopf), sondern auch, wenn der Druck in einer Flüssigkeit stark

Der bei der Sonolumineszenz statisch im Labor genutzte Effekt kommt neuerdings dynamisch bei Torpedos und später bei U-Booten zum Einsatz, weil sich ab 180 km/h um den Schwimmkörper unter Wasser eine Kavitationsblase bildet, die dem Schwimmkörper in dieser Gasblase nunmehr Flugeigenschaften mit Überschallgeschwindigkeit um 500 bis 800 km/h verleiht⁵⁷⁴.



Graphik 115⁵⁷⁵

absinkt. Dann werden die Moleküle nicht mehr zusammengehalten und fliegen auseinander. Damit entstehen auch große und kleine Dampfblasen. Steigt der Druck wieder an, fallen diese Blasen schlagartig in sich zusammen – sie implodieren. Dabei können Druckspitzen bis 1000 bar und hohe Temperaturen bis 5500°C entstehen. [...]Die langjährige Tüftelei hat sich ausgezahlt. Der "Barracuda" hat bereits eine ganze Reihe erfolgreicher Tests hinter sich gebracht. Und ganz nebenbei konnte man auch noch einen neuen Geschwindigkeitsrekord aufstellen. Mit bis zu 800 Stundenkilometer kann der "Unterwasserflugkörper" made in Germany durch das Wasser schießen und dank seiner Lenkbarkeit sogar einen "Shkval" abfangen."

Lange, Highspeed in der Tiefe, in: < http://www.morgenwelt.de/609.html >; Schabel, Superkavitation, in: < http://www.igu-austria.org/index.php?option=com_content&task=view&id=57&Itemid=59 >; Simon, Der Widerstand des Wassers, in: < http://www.heise.de/tp/r4/artikel/8/8428/1.html >: "Anfang der Sechziger aber hatte Mikhail Merkulov am Institut für Hydrodynamik in Kiev eine Erleuchtung: dass nämlich die Lösung in einem Phänomen liegt, das man als Kavitation bezeichnet. Eine gewagte Idee, denn normalerweise ist die Kavitation mehr Fluch als Segen. [...] Unter bestimmten Bedingungen (z.B. einer Mindestgeschwindigkeit von 180km/h) kann eine einzelne Kavitationsblase gebildet werden, welche das sich bewegende Objekt fast vollständig umschließt. Newton hat 1687 in seinen Principia Mathematica die Grundprinzipien der Superkavitation bereits verstanden, aber die praktische Umsetzung ist schwer. "

⁵⁷⁵ Simon, Der Widerstand des Wassers, in: < http://www.heise.de/tp/r4/artikel/8/8428/1.html >: "Als im August 2000 das russische U-Boot Kursk auf den Grund der arktischen Barentsee sank, riss es über einhundert Menschen in den Tod. Das russische Militär reagierte prompt: Die Bergung der "Kursk" sei "eine militärische, keine zivile Operation", betonte der Sprecher der Nordmeerflotte, die Geheimhaltungsregeln würden bei den Aktionen "strikt eingehalten". Man lehne deshalb jegliche Hilfe aus dem Ausland strikt ab. Schon bald gab es erste Gerüchte, an Bord habe sich eine gewaltige Explosion ereignet: Ein Torpedo mit einer neuen Technologie sei an Bord gewesen und vorzeitig explodiert."

Das alltägliche Phänomen der Kavitation verleiht also einem Schwimmköper Flügel. Nachdem die Kavitation ursprünglich und eigentlich um Rotationskörper herum auftrat⁵⁷⁶, und von diese von der Rotation her bekannte Phänomen beim Linearflug unter Wasser eingesetzt wurde, erhebt sich die Frage, ob und wie weit Wasserturbinen die Superkavitation zur Turbogeschwindigkeit nutzen können⁵⁷⁷.



Graphik 116578

Die Sonolumineszenz zeigt, dass die Superkavitation durch Ultraschall künstlich aufrecht erhalten werden kann⁵⁷⁹. Die Superkavitation um Torpedos zeigt, dass diese durch hohe Geschwindigkeit unter Wasser aufrecht erhalten werden kann⁵⁸⁰. Es wäre also zu prüfen, ob und weit eine Wasserturbine mit Hilfe der Kavitation beflügelt werden könne, denn es gibt schon Ansätze der Nutzung der Superkavitation bei Propellern⁵⁸¹.

Schabel, Superkavitation, http://www.iguaustria.org/index.php?option=com_content&task=view&id=57&Itemid=59 >.

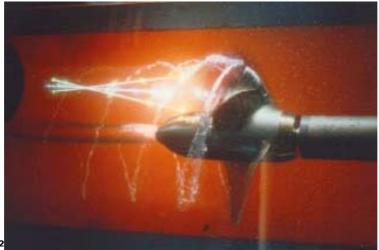
577 Lange, Highspeed in der Tiefe, in: < http://www.morgenwelt.de/609.html >; Simon, Der Widerstand des Wassers, in: <

http://www.heise.de/tp/r4/artikel/8/8428/1.html >. 578 Simon, Der Widerstand des Wassers, in: < http://www.heise.de/tp/r4/artikel/8/8428/1.html >:

Lemmens, Sonolumineszenz, in: < http://www-public.tu-bs.de:8080/~plemmens/sonolumi.htm >.

Lange, Highspeed in der Tiefe, in: < http://www.morgenwelt.de/609.html >; Simon, Der Widerstand des Wassers, in: < http://www.heise.de/tp/r4/artikel/8/8428/1.html >:

[&]quot;Shkval-Torpedo": Superkavitation ist ein Schlupfloch Codename http://www.nachlese.at/superkavitation.htm >: "An weitaus Bodenständigerem rund um die Kavitation forscht man in der österreichischen Schiffsbautechnischen Versuchsanstalt. Dr. Gerhard Strasser, Professor an der Technischen Universität, ein Hydrodynamiker, den man seinerzeit für die erfolgreiche Lucona-Suche zu Rate zog: "Superkavitation ist nicht nur in solchen militärischen Bereichen als Anwendung hochinteressant. Für schnelle Tragflügelboote hat man schon spezielle Propeller entwickelt, die so gebaut sind, dass die unerwünschten Dampfblasen erst hinter der Schraube in sich zusammenbrechen können und so keinen Schaden mehr anrichten." Um solche und andere Propeller zu optimieren, steht am Wiener Donaukanal eine Millionenteure Versuchsanlage, mit der die teuflischen Dampfbläschen sichtbar gemacht und ihre Wirkung untersucht werden kann."



Graphik 117582

Die von der US Raumfahrbehörde NASA entwickelten Überschallflugzeuge X-15 bis X43A fliegen mit 10facher Schallgeschwindigkeit in einer plasmaartigen⁵⁸³ Luftblase und der zweite Flug am 27. März 2004 ist neuer Geschwindigkeitsrekord gewesen⁵⁸⁴.



Graphik 118⁵⁸⁵

Micke, Codename "Shkval-Torpedo": Superkavitation ist ein Schlupfloch der Physik, in: http://www.nachlese.at/superkavitation.htm>.

⁵⁸³ Raith, Elektromagnetismus, in: Bergmann/Schäfer II (1999) 654 ff: "In einer Brennkammer wird heißes, elektrisch leitendes Gas erzeugt, das unter einer Düse mit hoher Geschwindigkeit ausstömt. In einem transversalem Magnetfeld werden die Ladungsträger unterschiedlichen Vorzeichens in entgegengesetzte Richtungen abgelenkt."

⁵⁸⁴ Creech, X-43A Scramjet Primed for Mach 10, in < http://www.nasa.gov/missions/research/x43A_captive-carry.html >: ,, Plans for the X-43A's free-flight calls for the vehicle to fly at Mach 10, or 10 times the speed of sound. The second X-43A flight, on March 27, 2004, reached nearly Mach 7, landing the aircraft in the Guinness Book of World Records for the world's fastest air-breathing flight."

⁵⁸⁵ Creech, X-43A Scramjet Primed for Mach 10, in < http://www.nasa.gov/missions/research/x43A_captive-carry.html >: "Image left: NASA's B-52B lifts off with the X-43A, which remained mated to the B-52 throughout the mission. NASA photo by Tom Tschida." Vgl Lange, Highspeed in der Tiefe, in: < http://www.morgenwelt.de/609.html >: "Das Wort "Kavitation" ist vom lateinischen Wort cavus - hohl – abgeleitet. Gemeint ist damit die Bildung von Blasen in einer Flüssigkeit. Solche Blasen entstehen nicht nur, wenn man eine Flüssigkeit erwärmt (etwa im Kochtopf), sondern auch, wenn der Druck in einer Flüssigkeit stark absinkt. Dann werden die Moleküle nicht mehr zusammengehalten und fliegen auseinander. Damit entstehen auch große und kleine Dampfblasen. Steigt der Druck wieder an, fallen diese Blasen schlagartig in sich zusammen – sie implodieren. Dabei können Druckspitzen bis 1000 bar und hohe Temperaturen bis 5500°C entstehen. [...]Die langjährige Tüftelei hat sich ausgezahlt. Der "Barracuda" hat bereits eine ganze Reihe erfolgreicher Tests hinter sich gebracht. Und ganz nebenbei konnte man auch noch einen neuen Geschwindigkeitsrekord aufstellen. Mit bis zu 800 Stundenkilometer kann der "Unterwasserflugkörper" made in Germany durch das Wasser schießen und dank seiner Lenkbarkeit sogar einen "Shkval" abfangen."

LITERATURVERZEICHNIS:

- Aenis, Martin: Einsatz aktiver Magnetlager zur modellbasierten Fehlerdiagnose in einer Kreiselpumpe, Diss., Darmstatt 2002.
- Bartholet, H.-B. / Stiegmann, D. / Carlsson, S.: Laserschneiden großformatiger Bleche, Large panel laser cutting, in: Haferkampf/Bach 75-82.
- Bartz, Wilfried J., Hrsg.: Luftlagerungen, Grundlagen und Anwendungen, Ehningen bei Döblingen 1993.
- Bartz, Wilfried J.: Kraftübertragung durch Lagerungen, insbesondere Luftlager, in: Bartz 1-6.
- Basshuysen, Richard / Schäfer, Fred, Hrsg.: Handbuch Verbrennungsmotor, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven, Braunschweig 2002.
- Batel, Wilhelm: Entstaubungstechnik, Grundlagen, Verfahren, Meßwesen, Berlin 1972.
- Becker, Erich: Membranpumpen mit mechanischem Membranantrieb für Gase, Essen 1998.
- Bergmann/Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, zum Gebrauch bei akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium, Band I III, Berlin 1971-1975 (Band I: Mechanik, Akustik, Wärme, mit einem Anhang über die Weltraumfahrt, Hrsg. von Heinrich Gobrecht, Berlin 1975; Band II: Elektrizität und Magnetismus, Hrsg. von Heinrich Gobrecht, Berlin 1971; Band III: Optik, Autoren: Hans Joachim Eisler u. a., Hrsg. von Heinrich Gobrecht, Berlin 1974).
- Bergmann/Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, zum Gebrauch bei akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium, Band I VIII, Berlin 1992-2001 (Band 1, Mechanik, Relativität, Wärme, Autoren: Thomas Dorfmüller, Wilhelm T. Hering, Klaus Stierstadt unter Mitwirkung von Günther Fischer, 11., völlig neubearbeitete Auflage, Berlin 1998; Band 2, Elektromagnetismus, Autor: Wilhelm Raith, 8., völlig neubearbeitete Auflage, Berlin 1999; Band 3, Optik, Herausgeber: Heinz Niedrig, Berlin 1993; Band IV: Teilchen, Autoren: Manfred Fink u. a., Hrsg. Wilhelm Raith, Berlin 1992; Band V: Vielteilchen-Systeme, Autoren: Christian Bahr u. a., Hrsg. Wilhelm Raith, Berlin 1992; Band VII: Festkörper, Autoren: Herbert Freyrath u. a., Hrsg. Wilhelm Raith, Berlin 1992; Band VII: Erde und Planeten, Autoren: Siegfried J. Bauer u. a., Hrsg. Wilhelm Raith, Berlin 2001; Band VIII: Sterne und Weltraum, Autoren: Hans Joachim Blome u. a., Hrsg. Wilhelm Raith, Berlin 1997).

- Beyer, Eckhard, u. a.: Schneiden mit CO₂ Lasern, Herausgegeben vom VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1993.
- Böhm, Ernst-Michael: Einfluß der Dispersion auf die nichtlineare Ausbreitung von Lichtimpulsen, Dissertation, Rostok 2003, in: < http://www.physik.uni-rostock.de/optik/staff/michael/Dissertation_druck.pdf >.
- Bräunling, Willy J. G.: Flugzeugtriebwerke, Grundlagen, Aero-Thermodynamik, Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten und Emissionen, Berlin 2004.
- Breitsameter, Josef: Elektrizitätslehre I/2, Elektromagnetische Schwingungen und Wellen, Ultraschall, in: Kuhn 5/II.
- Broelmann, Jobst: Intuition und Wissenschaft in der Kreiseltechnik 1750 bis 1930, München 2002.
- Burg, Peter: Moderne Schwungmassenspeicher eine alte Technik in neuem Aufschwung, in: < http://www.bine.info/pdf/infoplus/EinfhrenderArtikelPetervonBurg.pdf >, Zürich 2003.
- Calotti, Alberto: Permanenterregte Synchronmaschinen für Schwungradspeicher, Diss., Zürich 1998.
- Chen, Dejin: Untersuchungen zur Optimierung eines solaren Niedertemperatur-Stirlingmotors, Disserstation, Dresden 2004, in: < http://hsss.slubdresden.de/pub2/dissertation/2005/maschinenwesen/1111049328086-3547/1111049328086-3547.pdf >.
- Creech, Gray: X-43A Scramjet Primed for Mach 10, in: National Aeronatics and Space Administration, NASA's Dryden Flight Research Center, MISSIONS NEWS 09.27.04 http://www.nasa.gov/missions/research/x43A captive-carry.html >.
- Crighton, D. G.: Nonlinear Acoustic of Dubbly Liquids, in: Kluwick 45-68.
- Diedrichsen, F.: Radiale Turbomaschinen in CO₂-Hochleistungslasern Stand der Technik und Zukunft, in: Rautenberg 26-50.
- DPG: < http://www.dpg-tagungen.de/archive/2002/ake_3.html >: Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG) WWW-Server für Frühjahrstagungen und E-Verhandlungen, E-Verhandlungen 2002, Programm und Abstracts der Sitzung AKE 3, Energietechnik.
- Edmonds, Alan: The Ranque-Hilsch Effect, in: The Newsletter of the Philosophical Discussion Group of British Mensa, Number 104, December 2000, in: http://website.lineone.net/~theotodman/c10404.htm>.

- Eicher, Hanspeter / Rigassi, Reto: Zukünftige Marktbedeutung von WKK-Anlagen mit 1-1000 kW elektrischer Leistung, in: Bundesamt für Energie BFE, Bern, Dezember 2003 < http://vpe.ch/pdf/WKK_2003.pdf >.
- Eichler, Joachim: III. Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 295-438.
- Eichler, Joachim: 3 Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1993) 301-453.
- Fister, Werner: Fluidenergiemaschinen, Band 1: Physikalische Voraussetzungen, Kenngrößen, Elementarstufen der Strömungs- und Verdrängermaschinen, Berlin 1984; Band 2: Auslegung, Gestaltung, Betriebsverhalten ausgewählter Verdichter und Pumpenbauarten, Berlin 1986.
- Fleischer, Gerd / Bodenstein, Otto / Thum, Heinz: Hydrodynamisch geschmierte Gleitlager Tragfähigkeit und Schmierstoffbedarf.
- Freeman, David / Dooher, Katleen: Die Liliput-Maschinen, Winzige Gasturbinenmotoren können bald den Strom für tragbare elektronische Geräte liefern und irgendwann Batterien komplett überflüssig machen, (Boston 2001) in: Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG < http://www.heise.de/tr/leseprobe/pdfs/2005/energie1_tr1204.pdf >, Technolgy Review, December 2004.
- Fremerey, J. K.: Berührungslose permanentmagnetische Lager, in: Bartz 232-259.
- Giles, J. G.: Automatic and Fluid Transmissions, London 1961.
- Gobrecht, Heinrich: I. Kapitel, Geometrische Optik, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 1-184.
- Grote, K.-H. / Feldhusen, J., Hrsg.: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Einundzwanzigste, neubearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin 2005.
- Guentensperger, Walter: Schnellaufende Permanentmagnet-Synchronmaschine mit kleinen Leerlaufverlusten für kinetische Energiespeicher, Diss., Zürich 1984.
- Gülich, Johann Friedrich: Kreiselpumpen, Handbuch für Entwicklung, Anlageplanung und Betrieb, Berlin 2004.
- Günther, Bodo C. / Hansen, Karl H. / Veit, Ivar: Technische Akustik Ausgewählte Kapitel, Grundlagen, aktuelle Probleme und Meßtechnik, Renningen ⁶2000.
- Haferkampf, Heinz / Bach, Friedrich-Wilhelm, Hrsg.: Internationale schneidetechnische Tagung: Vorträge und Posterbeiträge der gleichnamigen internationalen DVS-Tagung in Hannover vom 5. bis 6. März 1997, Düsseldorf 1997.
- Hahn, Dietrich: V. Kapitel. Strahlung und Photometrie, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 583-638.

- Hartmann, B.: Verlustarme Antriebssysteme für Off-Road Fahrzeuge mit hydrostatischem Antrieb, in: VDI-Berichte Nr. 1592, S. 183-201.
- Hilkenbach, Roland: Aufbau und Charakterisierung einer Sputteranlage zur Erzeugung von Mehrfachschichten aus Nickel und Germanium für Optiker im Bereich weicher Röntgenstrahlung, Aachen 1995.
- Hug, Rolf: Brennstoffzelle und solarer Wasserstoff ein Kraftpaket für die Zukunft? 16. 10. 2000, in: http://www.solarserver.de/solarmagazin/artikeloktober2000.html#top>.
- Käppeli, Ernst: Strömungsmaschinen an Beispielen, Frankfurt am Main 1994.
- Kaußen, Franz: Mechanik (MEC) und Elektrodynamik (EDY), Lemgo 2005 < http://www.fh-luh.de/physik/download/01einl_ba.doc >, Kapitel 7 Wellen, in: < http://www.fh-luh.de/physik/download/13welle ba.doc >.
- Keller, Jürgen: Das Wirbelrohr: Grundlagen und neue energietechnische Anwendungen, in: DPG < http://www.dpg-tagungen.de/archive/2002/ake_3.html >.
- Keller, J. U. / Göbel, M. U. / Staudt, R.: Wirbelrohr, Bemerkungen zu den Grundlagen und neuen energietechnischen Anwendungen, in: < http://141.99.140.157/d/ifft3/Forschung/WRGrundlagen111002.pdf >.
- Kienlin, M.: Hydrodynamische Schiffshauptantriebe, in: VDI-Berichte NR. 138, S. 103-107.
- Kluwick, A., Hrsg.: Nonlinear Wawes in Real Fluids, Wien 1991.
- Koenig, Josef: SCIENCE Berichtet: Erstmals Gasstrahl fokussiert, Bochum 8. 11. 1999, in: http://www.ruhr-uni-bochum.de/pressemitteilungen-1999/msg00320.html >, Ruhr-Uni Bochum, Pressemitteilungen, Nr. 311.
- Kolk, Michael: Ein Schwungrad-Energiespeicher mit permanentmagnetischer Lagerung, Diss., Jülich 1997.
- Kuhn, Wilfried, Hrsg.: Handbuch der experimentellen Physik, Sekundarbereich II, Ausbildung Unterricht Fortbildung, Band 5/II, Köln 1995.
- Kutzner, Jörg / Tsilimis, Grigorios: Mikroskopie mit Röntgenstrahlung, Münster, in: < http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Zach/deutsch/fs-Mikroskopie/main-mikroskopie.htm >.
- Lange, Volker: Highspeed in der Tiefe, in: morgenwelt vom 23. 6. 2005, Berlin < http://www.morgenwelt.de/609.html >
- Lemmens, P.: Sonolumineszenz: Aus Schall wird Licht, Habilitationskoloquium, Aachen 1999, in: http://www-public.tu-bs.de:8080/~plemmens/sonolumi.htm>.
- Lindmayer, Manfred / Grundmann, Jörn: Hochtemperatur-Supraleiter in Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik Stand der Forschung, in: ETG-Tagung Technische Innovationen

- in Verteilungsnetzen, Würzburg 01.-02.03.2005, < http://www.htee.tu-bs.de/forschung/veroeffentlichungen/LindmayerGrundmannWue05.pdf >.
- Löwy, Arthur: Dampfgeschwindigkeit, Wirkungsgrad und Gestaltung der Dampfturbine, Diss., Wien 1926.
- Luck, K. / Modler, K.-H.: Getriebetechnik, Analyse, Synthese, Optimierung, Berlin 1995.
- Magnus, Kurt: Kreisel, Theorie und Anwendungen, Berlin 1971.
- Menz, Uwe: Einsatz von Schwungradspeichern in Straßenbahnnetzen, Aachen 2002.
- Micke, T.: Codename "Shkval-Torpedo": Superkavitation ist ein Schlupfloch der Physik, in: Die Nachlese vom 06-10-02 < http://www.nachlese.at/superkavitation.htm >.
- Mtalo, Felix: Geschiebeabzug aus Kanälen mit Hilfe von Wirbelströmen, Diss., München 1998.
- MVP Versuchs- und Planungsgesellschaft für Magnetbahnsysteme mbH: Transrapid Entwicklungsgeschichte, in: < http://www.mvp.de/>.
- Oertel, Herbert: Stoßrohre, Shock Tubes, Tubes á chock, Theorie Praxis Anwendungen, Mit einer Einführung in die Physik der Gase, Wien 1966.
- Raith, Wilhelm: Elektromagnetismus, in: Bergmann/Schäfer II (1999) 1-926.
- Rathausky, Stefan: Einsatzmöglichkeiten alternativer Schwebe und Antriebssysteme in der Schienenfahrzeugtechnik, Dipl., Wien 2002.
- Rautenberg, Manfred, Hrsg.: Radiale Turbomaschinen, Neue Entwicklungen und Zukunftstrends, Renningen-Malmsheim 1996.
- Reinartz, E.: Nichtlineare Dynamik und Chaos, Materialien für eine mathem. Unterrichtseinheit für die Jahrgangsstufe 10, < http://jan-wellem.rz.uni-duesseldorf.de/leibniz-gymn/chaos/chaos.htm >, Düsseldorf 1997.
- Riethmüller, Heinz: Hydrostatische Gaslagerungen in der Kreiseltechnik, in: Bartz 75-89.
- Rohling, Lothar: Vom Wirbel zum reversiblen Thermodynamik, 2004, in: < http://fluidmotor.com/motor/wirbel2.shtml >.
- Römer, Manfred, Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten, Diss., Berlin 1983.
- Ruder, Hanns: Supraflüssiges Helium als hochempfindliches Gyroskop zum Nachweis der Erdrotationsschwankungen, Forschungsbericht 1990-1992 der Universität Tübingen, in: http://www.uni-tuebingen.de/uni/qvf/py/py5/text/py5t26.html>.
- Rueegg, Peter: Kraftwerk in Zündholzschachtel, in: Die tägliche Web-Zeitung der ETH Zürich vom 23. 2. 2006 < http://www.ethlife.ethz.ch/articles/news/neuerantrieb.html >.

- Schabel, Markus: Superkavitation, in: Interessengemeinschaft Modell-U-Boote Austria, 24.

 Mai 2005 < http://www.iguaustria.org/index.php?option=com_content&task=view&id=57&Itemid=59 >.
- Schaller W.: Arbeits- und Stellhydraulik bei Werkzeugmaschinen, in: VDI-Berichte NR. 138, S. 95-102.
- Scherr-Thoss, H.-Chr.: Die Entwicklung der Zahnradtechnik, Zahnformen und Tragfähigkeitsberechnung, Berlin 1965.
- Schmidt, E.: Technische Thermodynamik, Grundlagen und Anwendungen, Elfte neubearbeitete Auflage, K. Stephan, F. Mayinger, Band 1 Einstoffsysteme, Berlin 1975.
- Schmidt, J.: Grundlagen und Stand der Technik der Luftlagerungen, in: Bartz 7-25.
- Schoenebeck, Heinz: IX. Kapitel. Die Relativitätstheorie, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 905-956.
- Schräger, K.: Systemintegration von hydraulischen Komponenten und elektronischen Steuerungen am Beispiel mobiler Arbeitsmaschinen, in: VDI-Berichte Nr. 1592, S. 137-152.
- Schwab, O. / Krauß, S.: Hydrodynamische Antriebe für Straßenfahrzeuge, in: VDI-Berichte NR. 138, S. 77-84.
- Schwate, Werner u. a.: Handbuch der Drucklufttechnik, Leipzig 1992.
- Schweitzer, G. / Traxler, A. / Bleuler, H.: Magnetlager, Grundlagen, Eigenschaften und Anwendungen berührungsfreier, elektromagnetischer Lager, Berlin 1993.
- Schleder, Frank: Stirlingmotoren, Thermodynamische Grundlagen, Kreisprozessrechnung und Niedertemperaturmotoren, Würzburg 2004.
- Siekmann, Helmut E.: Strömungslehre, Grundlagen, Berlin 2000.
- Simon, Michaela: Der Widerstand des Wassers, Das Militär entwickelte ein U-Boot, das schneller fahren soll als die Concorde, in: heise.online vom 24. 7. 2000, Hamburg < http://www.heise.de/tp/r4/artikel/8/8428/1.html >.
- Stachel, Klaus: Die Kombianlage im Rahmen der thermodynamischen Heizung, Dipl., Wien 1992.
- Stierstadt, Klaus / Fischer, Günther: Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 21-876.
- Strößenreuther; Florian: Machbarkeitsstudie und Konzept einer stationären Schwungradanlage dezentralen. verbraucherorientierten zur Aachen 1996. Energiespeicherung, Diplomarbeit, in: < http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-formal.htm http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-diplom.htm

http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-readme.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-einleit.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-geschi.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-entwcklg.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-grundlg.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-schwung.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-alterntv.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-einsatz.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-entwurfl.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-entwurfl.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-bewertng.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-literatr.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-literatr.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-anhang.htm
http://de.geocities.com/infotaxi/schwung-formal.htm >.

Thompson, P. A.: Liquid-Vapor Adiabatic Phase Changes, in: Kluwick 147-213.

Traupel, Walter: Thermische Turbomaschinen, Berlin 1960.

- Trummel, Martin: "Möglichkeiten und Grenzen des Energiespeichers Kondensator in der künftigen Energiewirtschaft, insbesondere im Hinblick auf den Einsatz in Elektrofahrzeugen und Solaranlagen." Aachen 1993.
- Uehlecke, Jens: Datenfahndung, in: GEOkompakt 3 05/06 Das Abenteuer Technik, < http://www.geo.de/GEO/wissenschaft_natur/technik/2005_06_GEO_kompakt_technik_ datenfahndung/index.html?linkref=geode_pager >, GEO.de 06/2005...
- Ullmann, K. H.: Hydrostatitsche Antriebe in Baumaschinen, in: VDI-Berichte NR. 138, S. 85-87.
- VDI-Berichte NR. 138: Hydraulische Antriebstechnik, Energieübertragung mit hydraulischen und hydrostatischen Getrieben, Vorträge der VDI-Tagung Mannheim 1968, Düsseldorf 1969.
- VDI-Berichte Nr. 1592: Hydraulische Leistungsübertragung, Hydrodynamische und hydrostatische Systeme im Wettbewerb, Tagung Kassel, 29. und 30. März 2001, Düsseldorf 2001.
- Vetter, Gerhard, Hrsg.: Leckfreie Pumpen, Verdichter und Vakuumpumpen, Mit Beiträgen von M. Dehner u. a., Essen 1988.
- Vetter, Martin: Hyperschallströmung von Modellen im Stoßwellenkanal, Aachen 1993.

Vezzini, Andrea Francesco: Optimierung des elektrischen Antriebssystems für ein Hybrid-Fahrzeug, Diss., Zürich 1996.

Vorberg, Jörg A.: Versorgungstechnik, in: < http://members.aol.com/javorberg/FC_fr.htm >.

Walzer, Peter: Die Fahrzeuggasturbine, Düsseldorf 1991.

Werdich, Martin / Kübler, Kuno: Stirling-Maschinen, Grundlagen - Technik - Anwendungen, Staufern bei Freiburg 2003.

Wiemer, Arthur: Luftlagerung, Berlin 1967.

Wirsing, Bernd: Zerstörungsfreie Mikroskopie mit atomarer Auflösung, in: http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/1999/pri76_99. http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/1999/pri76_99. http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/1999/pri76_99. http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/1999/pri76_99.

Ziebart, E.: Grundlagen der Hydrodynamischen und hydrostatischen Antriebe, in: VDI-Berichte NR. 138, S. 5-13.

Zima, Stefan: Ungewöhnliche Motoren, Würzburg 2005.

Graphiken

Luck/Modler 141 ff Bild 3.84 und 3.86; Grote/Feldhusen G 124; Scherr-Thoss 38, 44 Schmidt E. 365 ff; Schwate 164 ff; Broelmann 46 Abb I.12, 227 f; Riethmüller 75 ff Gülich 510; Fister II 11 f, 23, 26 ff, 37, 43 ff

Bergmann/Schäfer I (1975) 704 ff, 712 ff, 730 ff, 737; Löwy 1 ff; Stachel 4 ff, 74 ff

- 1. Broelmann 46 Abb I.12.
- 2. Bergmann/Schäfer I (1975) 737 Abb XI 72.
- 3. Luck/Modler 141 ff Bild 3.86.
- 4. Fister II 31 Bild 7.43.
- 5. Schweitzer/Traxler/Bleuler 86 Bild 3.30.
- 6. Magus 434 Abb 14.7.
- 7. Käppeli 89 Bild 6.2.
- 8. Broelmann 366 Abb VIII.11.
- 9. Schweitzer/Traxler/Bleuler 87 Bild 3.30.
- 10. Bergmann/Schäfer I (1975) 445 Abb VIII 3-4.
- 11. Bergmann/Schäfer I (1975) 198 Abb IV 104-105.
- 12. Bergmann/Schäfer II (1971) 337 Abb 459.
- 13. Bergmann/Schäfer I (1975) 171 Abb IV 74.
- 14. Bergmann/Schäfer II (1971) 316 Abb 434; Raith, Elektromagnetismus, in: Bergmann/Schäfer II (1999) 273 Abb 5.2.
- 15. Bergmann/Schäfer I (1975) 176 Abb IV 79.
- 16. Bergmann/Schäfer I (1975) 207 Abb IV 117.
- 17. Bergmann/Schäfer I (1975) 186 Abb IV 89.
- 18. Magnus 167 Abb 3.41.
- 19. Bergmann/Schäfer I (1975) 205 Abb IV 112-113.
- 20. Traupel 358 Abb 20.4.3.
- 21. Bergmann/Schäfer I (1975) 183 Abb IV 87.
- 22. Bergmann/Schäfer I (1975) 192 Abb IV 95-97.
- 23. Bergmann/Schäfer I (1975) 175 Abb IV 77; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 604 Abb 20.10b.

- 24. Bergmann/Schäfer I (1975) 187 Abb IV 90.
- 25. Bergmann/Schäfer I (1975) 185 Abb IV 88.
- 26. Bergmann/Schäfer I (1975) 454 Abb IV 10.
- 27. Broelmann 43 Abb I.9.
- 28. Broelmann 47 Abb I.13.
- Bergmann/Schäfer I (1975) 216 Abb IV 131-133; Bergmann/Schäfer I (1975) 110 ff,
 vgl Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 264 Abb
 8.20.
- 30. Bergmann/Schäfer I (1975) 212 Abb IV 125.
- 31. Broelmann 253 Abb V.19.
- 32. Broelmann 44 Abb I.10-11.
- 33. Bergmann/Schäfer I (1975) 209 Abb IV 122.
- 34. Magus 471 Abb 16.6-7.
- 35. Magus 401 Abb 13.3.
- 36. Magus 474 Abb 16.9.
- 37. Bergmann/Schäfer I (1975) 203 Abb IV 110; Stierstadt/Fischer, Teil I Mechanik, in: Bergmann/Schäfer I (1998) 356 Abb 11.25.
- 38. Bergmann/Schäfer I (1975) 112 Abb III 43.
- 39. Bergmann/Schäfer I (1975) 117 Abb IV 3.
- 40. Bergmann/Schäfer I (1975) 208 Abb IV 118-120.
- 41. Schweitzer/Traxler/Bleuler 86 Bild 3.29.
- 42. Schweitzer/Traxler/Bleuler 86 Bild 3.30.
- 43. Schweitzer/Traxler/Bleuler 1 Bild 1.1.
- 44. Schweitzer/Traxler/Bleuler 2 Bild 1.3.
- 45. Schweitzer/Traxler/Bleuler 6 Bild 1.6.
- 46. Rathausky 14 Tabelle 1-3.
- 47. Schweitzer/Traxler/Bleuler 7 Bild 1.7.
- 48. Bergmann/Schäfer II (1971) 309 Abb 423.
- 49. Schweitzer/Traxler/Bleuler 52 Bild 3.2.
- 50. Schweitzer/Traxler/Bleuler 7 Bild 1.8.
- 51. Bergmann/Schäfer II (1971) 304 Abb 417-418.
- 52. Bergmann/Schäfer II (1971) 213 Abb 275.
- 53. Schweitzer/Traxler/Bleuler 87 Bild 3.31.
- 54. Schweitzer/Traxler/Bleuler 11 Bild 1.11.

- 55. Schweitzer/Traxler/Bleuler 86 Bild 3.30.
- 56. Bergmann/Schäfer II (1971) 249 Abb 329.
- 57. Bergmann/Schäfer II (1971) 252 Abb 334.
- 58. Bergmann/Schäfer II (1971) 233 Abb 309.
- 59. Bergmann/Schäfer II (1971) 220 Abb 289.
- 60. Bergmann/Schäfer II (1971) 159 Abb 204; Raith, Wilhelm: Elektromagnetismus, in: Bergmann/Schäfer II (1999) 521 Abb 8.14.
- 61. Bergmann/Schäfer II (1971) 295 Abb 397.
- 62. Bergmann/Schäfer I (1975) 553 Abb IX 74.
- 63. Bergmann/Schäfer I (1975) 541 Abb IX 61-62.
- 64. Bergmann/Schäfer II (1971) 74 Abb 102.
- 65. Bergmann/Schäfer I (1975) 542 Abb IX 63.
- 66. Bergmann/Schäfer I (1975) 553 Abb IX 73.
- 67. Bräunling 71 Bild 3-1.
- 68. Bergmann/Schäfer I (1975) 732 Abb XI 66-67.
- 69. Werdich/Kübler 139 Abb 133-134.
- 70. Giles 317 Fig. 10.20.
- 71. Werdich/Kübler 47 Abb 34.
- 72. Werdich/Kübler 48 Abb 35-36.
- 73. Werdich/Kübler 57 Abb 48.
- 74. Schleder 23 Bild 3.1.
- 75. Zima 510 Bild 11.66.
- 76. Zima 511 Bild 11.67.
- 77. Bergmann/Schäfer II (1971) 215 Abb 280.
- 78. Schwate 168.
- 79. Giles 13 Fig. 1.6.
- 80. Schwab/Krauß 81 Bild 7-8.
- 81. Schaller 99 Bild 7.
- 82. Hartmann 185 Bild 2.
- 83. Hartmann 187 Bild 3.
- 84. Edmonds.
- 85. Diedrichsen 34 Bild 2.7
- 86. Diedrichsen 33 Bild 2.6.
- 87. Diedrichsen 38 Bild 2.10.

- 88. Batel 40 Abb 5.7 und 5.8.
- 89. Mtalo 5 Abb 2.
- 90. Schmidt 343 Abb 171.
- 91. Schmidt 342 Abb 167 und 168.
- 92. Beyer 85 Bild 3-3.
- 93. Beyer 95 Bild 3-11.
- 94. Bergmann/Schäfer I (1975) 477 Abb VIII 35-36.
- 95. Römer 23 Abb 4/4.
- 96. Bergmann/Schäfer I (1975) 478 Abb VIII 37.
- 97. Römer 13 Abb 1/21-22.
- 98. Gobrecht, Heinrich: I. Kapitel, Geometrische Optik, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 101 Abb I 103.
- 99. Römer 14 Abb 2/26.
- 100. Römer 26 Abb 4/13.
- 101. Hilkenbach 9 Abbildung 2.1.
- 102. Bergmann/Schäfer I (1975) 475 Abb VIII 33.
- 103. Eichler, Joachim: III. Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 354 Abb III 49; Eichler, 3 Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1993) 360 Abb III 49.
- 104. Eichler, Joachim: III. Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1974) 353 Abb III 47-48; Eichler, 3 Kapitel. Interferenz und Beugung, in: Bergmann/Schäfer III (1993) 359 Abb III 47-48.
- 105. Römer 5 Abb 2/9.
- 106. Römer 14 Abb 2/25.
- 107. Wirsing, Presseinformation der Max-Planck-Gesellschaft, in: < http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilunge n/1999/pri76_99.htm >, PRI C 18/99 (76), München 1999.
- 108. Koenig, Pressemitteilungen der Ruhr-Uni Bochum vom 8. 11. 1999, in: < http://www.ruhr-uni-bochum.de/pressemitteilungen-1999/msg00320.html >.
- 109. Kutzner/Tsilimis, Mikroskopie mit Röntgenstrahlung, Münster, in: < http://www.unimuenster.de/Physik/Pl/Zach/deutsch/fs-Mikroskopie/main-mikroskopie.htm >.
- 110. Hilkenbach 5 Abbildung 1.9.
- 111. Hilkenbach 39 Abbildung 3.8.

- 112. Lemmens, Sonolumineszenz, in: < http://www-public.tu-bs.de:8080/~plemmens/sonolumi.htm >.
- 113. Lemmens, Sonolumineszenz, in: < http://www-public.tu-bs.de:8080/~plemmens/sonolumi.htm >.
- 114. Lange, Highspeed in der Tiefe, in: < http://www.morgenwelt.de/609.html >.
- 115. Simon, Der Widerstand des Wassers, in: < http://www.heise.de/tp/r4/artikel/8/8428/1.html >.
- 116. Simon, Der Widerstand des Wassers, in: < http://www.heise.de/tp/r4/artikel/8/8428/1.html >.
- 117. Micke, Codename "Shkval-Torpedo": Superkavitation ist ein Schlupfloch der Physik, in: < http://www.nachlese.at/superkavitation.htm >.