
Der Freikolbenmotor
Eine Informationsschrift

Dr.-Ing. S. Rotthäuser
Dr.-Ing. T. Finke

Juni 1996

©Ingenieurgemeinschaft IgH Gesellschaft für Maschinen- und Energietechnik mbH, Essen
Dieser Bericht¹ geht aus Arbeiten zum Forschungsprojekt „Energiesparende und umweltschonende hydraulische Versorgung von Ladekränen und Tankaufliegern durch eine Freikolbenmaschine“, das von der Firma BREFA Bremsen- und Fahrzeugdienst GmbH mit Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung bearbeitet wird, hervor und wurde durch die Firma Ingenieurgemeinschaft IgH Gesellschaft für Maschinen- und Energietechnik mbH erstellt. Der Text ist auch in Teilen urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

BREFA Bremsen- und Fahrzeugdienst GmbH

Rurbenden 5-7

52382 Niederzier

Tel.: (02428) 80 43 13

Fax.: (02428) 80 43 00

INNAS BV

Nikkelstraat 15

4823 AE Breda

Niederlande

Tel.: *31-76-42 40 80

Fax.: *31-76-42 40 90

Ingenieurgemeinschaft IgH

Gesellschaft für Maschinen- und Energietechnik mbH

Heinz-Bäcker-Str. 34

45356 Essen

Tel.: (0201) 61 99 31

Fax.: (0201) 61 98 36

¹InfoFPU: Stand: 24. Mai 2000

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
1 Einleitung	3
2 Der Freikolbenmotor	4
2.1 Verbrennungsmotorischer Teil	5
2.2 Hydraulischer Teil	8
2.3 Regelung	8
2.4 Peripherie	11
3 Einsatzmöglichkeiten	11
4 Ausgesuchte Anwendungen	12
5 Beteiligte Firmen	16
6 Begriffe	16
7 Zusammenfassung	17
Literaturverzeichnis	17
Index	22

Abbildungsverzeichnis

1 Funktionsprinzip des Freikolbenmotors	5
2 Unstetige Schlagzahländerung	6
3 Hubverläufe im Vergleich	7
4 Kennfelder von Freikolbenmotor (oben) und Kurbelwellenmotor (unten) im Vergleich, indizierte Wirkungsgrade η_i	9
5 Versuchsaufbau Tankaufliegerversorgung	12
6 Wirkungsgrade der Heizölförderung	13
7 Schließen und Öffnen der Zapfpistole	14
8 Energiefluß, 150 bar Versorgungsdruck	15

1 Einleitung

Der Hubkolbenmotor ist dem Stand seiner technischen Entwicklung nach im allgemeinen als eine Maschine bekannt, welche die oszillierende Bewegung eines durch Gaskraft angetriebenen Kolbens mittels einer Kurbelwelle in drehende Bewegung umsetzt. Diese Drehbewegung ist für zahllose Antriebsaufgaben sehr geeignet und kann durch unterschiedlichste Übertragungen und Getriebe dem gewünschten Zweck entsprechend gewandelt werden. Dennoch blieb es der Traum vieler Ingenieure, den Hubkolbenmotor vom Zwanglauf, der ihm von der Kurbelwelle aufgeprägt wird, zu befreien. Dies bietet sich zunächst dort an, wo eine oszillierende Antriebsbewegung erwünscht ist. Dies ist grundsätzlich dort der Fall,

wo andere linear bewegte Verdrängermaschinen angetrieben werden sollen, wie zum Beispiel die Hydraulikpumpe. Es ist nicht einzusehen, warum erst mühsam das Auf und Ab des Kolbens in die Rotation einer Kurbelwelle übertragen werden soll und später wieder umgekehrt in die Hubbewegung des Pumpenkolbens, wenn diese Aufgabe auch direkt zu lösen ist.

Wie sich zeigt, besitzt der Hubkolbenmotor in seiner zwanglosen Form eine Reihe weiterer Eigenschaften, die sich sehr vorteilhaft nutzen lassen, er stellt jedoch auf der anderen Seite die diffizile Aufgabe, seine Bewegung zu kontrollieren.

Von den unterschiedlichen Ansätzen zur Konstruktion derartiger Motoren seien nur Newcomens atmosphärische Dampfmaschine und Ottos erste Gasmotoren erwähnt, weil die allermeisten jüngeren Versuche, insbesondere Maschinen nennenswerter Leistungsdichte zu entwickeln gescheitert sind. Dies hat sich mit dem Freikolbenmotor des niederländischen Entwicklers Peter Achten, der in Breda die Ingenieurfirma INNAS BV leitet, grundlegend geändert. Er konnte auf dem Aachener Fluidtechnischen Kolloquium 1994 erstmals der interessierten deutschen Öffentlichkeit von der Maschine berichten, die unter dem Namen **Free Piston Unit (FPU)** oder **Vrije Zuiger Aggregaat (VZA)** als erster funktionsfähiger Freikolbenmotor moderner Entwicklung hervorgebracht wurde. Für diese Entwicklungsleistung, die in der Dissertation [13] dokumentiert ist, erhielt Peter Achten im Januar 1996 die Doktorwürde der Universität Eindhoven.

Von dieser Maschine, ihrer Entwicklung, ihren Eigenschaften, ihren Einsatzmöglichkeiten und denen, die mit ihr befaßt sind, soll im folgenden die Rede sein.

2 Der Freikolbenmotor

Der Freikolbenmotor ist eine Kombination aus Zweitakt Dieselmotor und Plungerhydraulikpumpe. Zwischen beiden ist ein hydraulischer Kompressionsteil angebracht. Daneben existieren diverse Peripherieeinheiten. Diese Baugruppen und deren Funktionsweisen sollen im folgenden beschrieben werden.

Der Freikolbenmotor ist als Alternative zu einer Kombination aus konventionellem Kurbelwellenmotor mit angeflanschter Hydraulikpumpe, beispielsweise in Axialkolbenbauart, gedacht. Mit einer solchen Maschine soll der Freikolbenmotor verglichen werden.

Die technischen Daten der konkreten Maschine, die als Prototyp realisiert wurde, sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Technische Daten des Freikolbenmotors

Größe	Wert	Einheit
Bohrung	104	mm
Hub	165	mm
hydraulisches Nennschlagvolumen	37,6	cm ³
Nennleistung	30	kW

2.1 Verbrennungsmotorischer Teil

Der Freikolbenmotor besitzt keine Kurbelwelle und auch kein Schwungrad, das mittels Anlasser zu bewegen wäre. Lediglich der Kolben des Verbrennungsteils und in seiner Verlängerung der Plunger der Hydraulikpumpe, die er auf dem anderen Ende bildet, sind beweglich. Wie nun wird der Motor gestartet? Abbildung 1 verdeutlicht durch die prinzipartige Wiedergabe des Motors die Lösung des Problems.

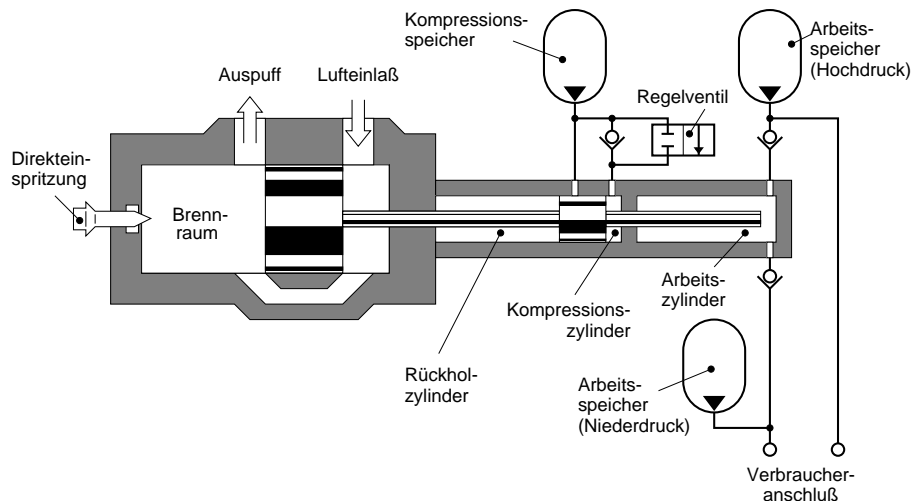


Abbildung 1: Funktionsprinzip des Freikolbenmotors

Auf der Kolbenstange befindet sich ein weiterer Kolben im sogenannten Kompressionszylinder, dessen Unterseite durch zwei Kanäle mit einem Speicher, dem Kompressionspeicher, verbunden ist. Mit „unten“ und „oben“ sind dabei diejenigen Richtungen gemeint, die der verbrennungsmotorischen Konvention entsprechen. Im unteren Totpunkt befindet sich der Kolben stets dann, wenn der Brennraum sein maximales Volumen erreicht hat. Dies ist auch die Startstellung für den Freikolbenmotor. Der Kompressionspeicher entlädt sich durch ein kleines aber schnelles Regelventil zunächst langsam in den Kompressionszylinder, bis der Kolben eine weitere Bohrung größeren Durchmessers freigibt und der Speicher sich schlagartig in den Kompressionszylinder entladen kann. Währenddessen strömt von der Niederdruckseite her Öl in den Arbeitszylinder nach.

Auf der Oberseite des Verbrennungsmotorkolbens wird nun die Luft schnell komprimiert, wobei sie sich stark erhitzt, so daß kurze Zeit vor Erreichen des Stillstands Dieselöl eingespritzt werden kann. In Ermangelung eines mechanischen Antriebs wird das Einspritzsystem elektromagnetisch betrieben und elektronisch angesteuert. Der Brennstoff verdampft und entzündet sich, und so wird bei hohem Druck sowohl der Kompressionspeicher wieder aufgeladen als auch Hydrauliköl aus dem Arbeitszylinder zur Hochdruckseite gepumpt. Durch den Verdichtungshub saugt der Raum unter dem Kolben Frischluft an. Die Spülung durch seitlich liegende Schlitze verdrängt das Abgas und lädt den Brennraum mit Luft. Am unteren Totpunkt verharrt der Kolben schließlich bis zur Anforderung des nächsten Arbeitsspiels.

Nach dieser Beschreibung eines Arbeitsspiels ist einleuchtend, daß der Freikolbenmotor sozusagen für jeden einzelnen Schlag gestartet werden muß. Er besitzt keine Trägheit, die dem Schwungrad entspräche. Dies erlaubt sehr ungewöhnliche Betriebszustände. Zum

einen sind extrem niedrige Schlagzahlen möglich. Muß der Freikolbenmotor seine Nebenaggregate selbst versorgen, dann ist die Mindestschlagzahl durch den Bedarf dieser Peripherie gegeben; sonst ist eine beliebig niedrige Schlagzahl erreichbar. Zum anderen sind un stetige Änderungen der Schlagzahl möglich, so daß Hubverläufe wie in Abbildung 2 gefahren werden können.

Jeder einzelne Schlag erfolgt für sich mit maximaler Geschwindigkeit. Der Freikolbenmotor befindet sich also während des Schlages sozusagen im Vollastzustand, während er zwischen den Schlägen schlicht steht. Der Teillastbetrieb wird durch mehr oder weniger lange Pausen zwischen den Schlägen realisiert. Daraus resultiert im Vergleich zum Kurbelwellenmotor ein sehr guter Teillastwirkungsgrad.

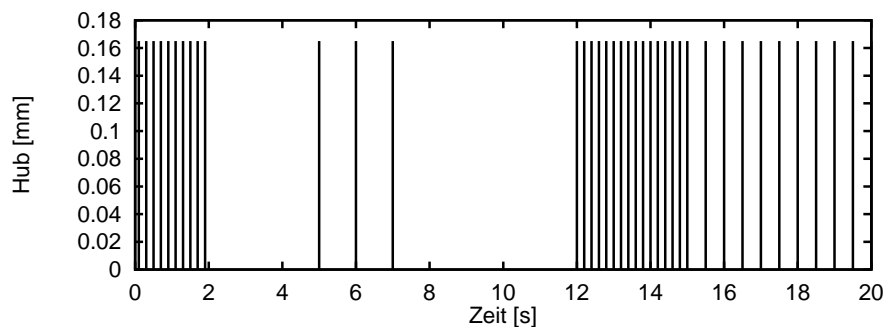


Abbildung 2: Unstetige Schlagzahländerung

Die Verdichtung ist nicht kinematisch, sondern nur durch den Gasdruck begrenzt. Dieser ergibt sich aus dem Kompressionsverlauf und der einsetzenden Verbrennung, die durch Einspritzung vor Erreichen des oberen Totpunktes noch während der Aufwärtsbewegung beginnt. Die Kompression wird damit dem Verbrennungsverlauf angepaßt. Wenn die Zündung früh nach der Einspritzung erfolgt und damit der Gasdruck schnell steigt, dann bleiben die Triebwerkslasten geringer als bei Zwanglauf. Da die Bewegung des Kolbens durch die Gaskräfte bestimmt wird, schafft sich der Motor selbst Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Druck, die einen geringen Zündverzug bewirken. In der Tat zeigt der Freikolbenmotor eine deutlich geringere Neigung zum Kaltstartnageln.

Der Hubverlauf des Kolbens unterscheidet sich zwischen Kurbelwellen- und Freikolbenmotor erheblich. Der Kurbelwellenmotor ist durch eine nahezu konstante Winkelgeschwindigkeit gekennzeichnet, weshalb die Kolbengeschwindigkeit von der Drehzahl abhängt. Der Hubverlauf des Freikolbenmotors dagegen erfolgt immer in der maximalen Geschwindigkeit. Die Hubverläufe sind in Abbildung 3 für eine hohe und eine niedrige Frequenz gegenübergestellt. Man erkennt, daß selbst bei höchsten Schlagzahlen die Verweilzeit in der Hochtemperaturphase beim Freikolbenmotor immer noch deutlich geringer ist als beim Kurbelwellenmotor, der mit entsprechender Drehzahl läuft. Die hohe Geschwindigkeit bewirkt beim Freikolbenmotor, daß der Anteil des Arbeitsspiels, in dem hohe Temperaturen herrschen, kurz bleibt und damit die Wandwärmeverluste verringert werden. Dies wiederum bedeutet einen unmittelbar günstigen Einfluß auf den Wirkungsgrad insbesondere im Teillastbereich, also bei niedrigen Schlagzahlen. Das ohnehin vorteilhafte Dieselprinzip wird hier noch weiter verbessert. Hinzu kommt, daß die kurze Hochtemperaturphase sich günstig auf die Stickoxidbildung auswirkt, die so schnell ihre Gleichgewichtslage nicht erreichen kann.

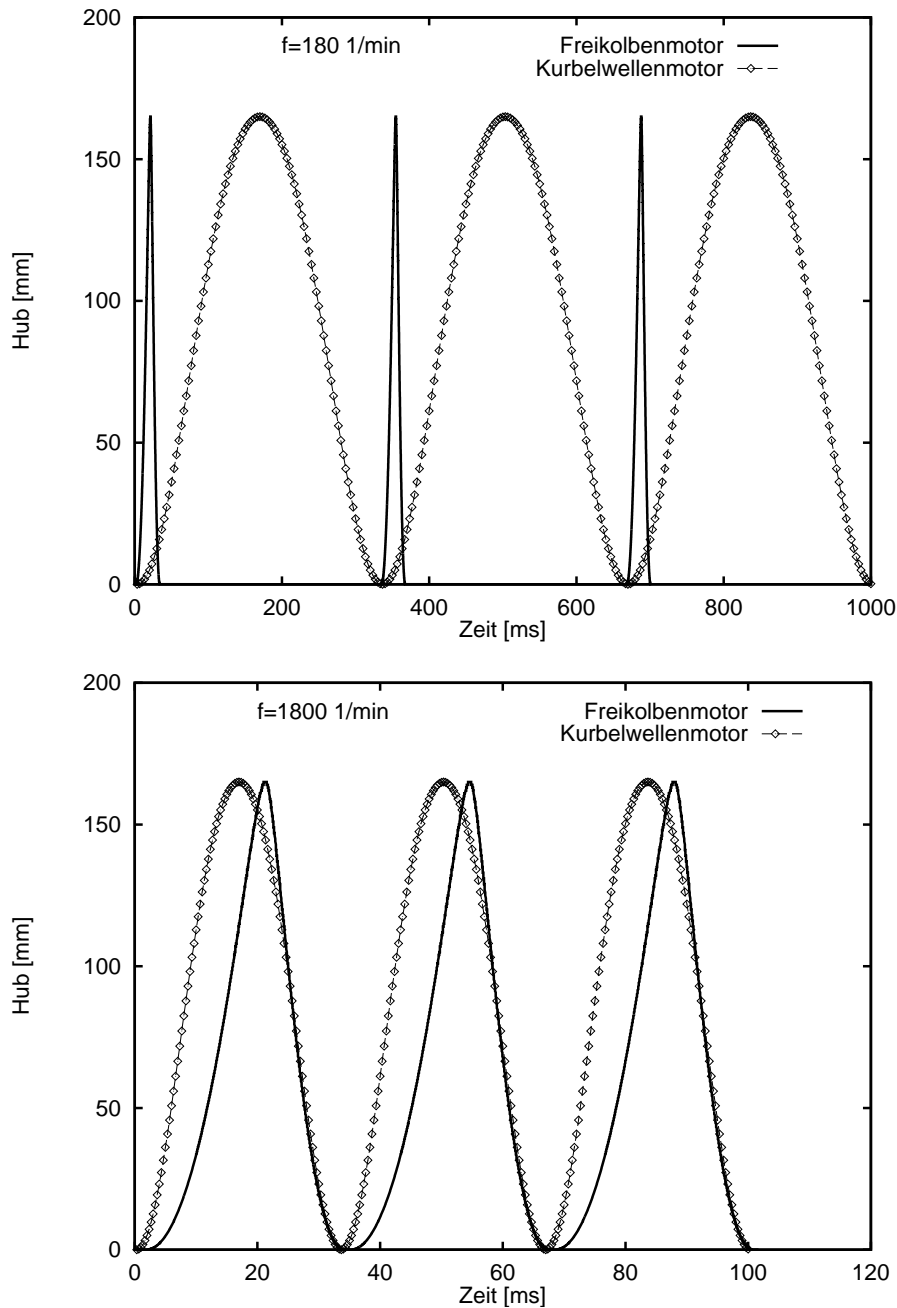


Abbildung 3: Hubverläufe im Vergleich

Die rein axiale Bewegung des Kolbens und der Kolbenstange bewirkt mehrere Vorteile gegenüber der Kurbelbewegung. Zunächst sind die Querkräfte, welche auf Kolben und Kolbenstange wirken verschwindend klein. Dies bezieht sich sowohl auf die Wirkung der Gas- wie auf die der Massenkräfte. Es gibt kein schrägstehendes Pleuel, das den Kolben kippen läßt beziehungsweise einseitig zur Anlage bringt, wobei hohe Reibkräfte auftreten, die Verschleiß und Wirkungsgradeinbußen mit sich bringen. Darüber hinaus ist der Unterkolbenraum problemlos abzudichten, was die Voraussetzung für eine Spülung durch die Kolbenunterseite ist. Schließlich ist die Schmierung des Freikolbenmotors unkritisch, weil keine Relativbewegungen unter hohen Belastungen erfolgen. Lager, die beim Kur-

belwellenmotor den höchsten Schmierungsbedarf haben, existieren nicht. Lediglich das Zylinderrohr und die Dichtungen benötigen geringe Mengen Schmierstoff.

2.2 Hydraulischer Teil

Die starre Verbindung des Plungers mit dem Kolben des Verbrennungsteils zwingt dem Pumpenteil einen entsprechenden Hubverlauf auf. Das Ansaugen erfolgt sehr schnell, so daß die Niederdruckseite zur Vermeidung von Kavitation vorgespannt wird. Im praktischen Betrieb wird entweder ein geschlossener Kreislauf oder aber eine separate Pumpe eingesetzt.

Mit jedem Abwärtshub wird durch den Plunger Hydrauliköl zur Hochdruckseite gefördert. Die Flußrichtung wird durch Rückschlagventile festgelegt. Zur Vermeidung starker Schwankungen bei Druck und Volumenstrom und zur Reduzierung von Leitungsverlusten wird auf Hoch- und Niederdruckseite je ein Hydrospeicher angebracht. Die Füllung dieser Speicher muß angepaßt sein. Am Niederdruckanschluß muß mindestens der Vorspanndruck des Niederdruckspeichers aufrechterhalten bleiben. Der Arbeitsdruck darf den Vorfülldruck im Hochdruckspeicher nicht unterschreiten, weil er sonst wirkungslos werden würde.

Ist aufgrund der angeschlossenen Verbraucher diese Bedingung nicht zu gewährleisten, dann ist, gegebenenfalls auch bei nur einem Verbraucher eine Minimaldrucksicherung durch ein Folgeventil vorzusehen.

Der Freikolbenmotor in der hier beschriebenen Anordnung sollte also an einem Netz mit weitgehend konstantem Druck betrieben werden. Für die Versorgung verschiedener Verbraucher ergeben sich daraus Konsequenzen, die aus derartigen bestehenden Systemen bekannt sind, [27, 30, 71].

- Rotationsantriebe werden durch Drosselung oder, energetisch günstiger, durch Sekundärregelung angesteuert.
- Linearantriebe sind durch Konstantdrucknetze nur bedingt wirtschaftlich zu versorgen, weil sie entweder über verlustreiche Drosselungen oder aber über Hydrotransformatoren, also hydraulische Motor-Pumpe-Kombinationen, angesteuert werden müssen.

Darüber hinaus ist der Freikolbenmotor als Versorgung in Load-Sensing-Systemen einsetzbar.

2.3 Regelung

Das Kennfeld eines Kurbelwellenmotors wird üblicherweise durch Drehmoment und Drehzahl aufgespannt. Die entsprechenden Freiheitsgrade beim Freikolbenmotor sind Schlagzahl und Arbeitsdruck. Abbildung 4 zeigt typische Kennfelder von Freikolbenmotor und Kurbelwellenmotor im schematischen Vergleich. Dort sind im Bereich innerhalb der Betriebsgrenzen Linien konstanten indizierten Wirkungsgrades aufgetragen. Zum einen unterscheiden sich die Betriebsgrenzen. Beim Freikolbenmotor sind diese bei niedrigen Schlagzahlen und hohen Arbeitsdrücken durch Leckagen bedingt. Die Betriebsgrenze bei

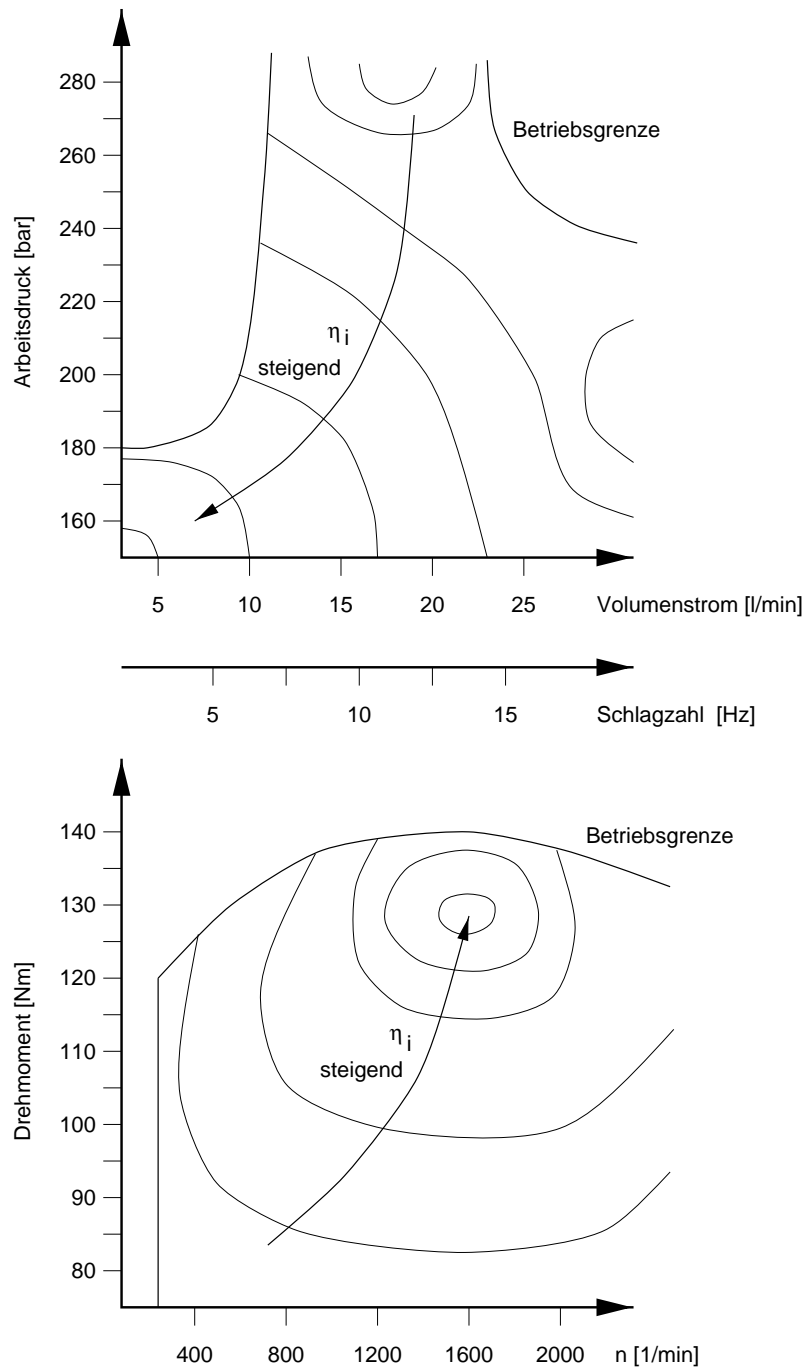


Abbildung 4: Kennfelder von Freikolbenmotor (oben) und Kurbelwellenmotor (unten) im Vergleich, indizierte Wirkungsgrade η_i

hohen Schlagzahlen wird durch die Hyperbel der Eckleistung definiert. Der Kurbelwellenmotor weist eine Betriebsgrenze bei niedriger Drehzahl auf. Der Grenzverlauf im Drehmoment ist bei gegebenem Hubraum durch das Durchlaßvermögen der Ladungswechselorgane bedingt. Interessant ist die Tatsache, daß der Freikolbenmotor seine besten Wirkungsgrade im Bereich der Teillast erreicht, wohingegen der Kurbelwellenmotor den wirtschaftlichsten Betriebspunkt relativ nahe der Nennleistung erreicht.

Anders als ein Kurbelwellenmotor erhöht der Freikolbenmotor bei Steigerung der Brennstoffzufuhr nicht etwa seine Schlagzahl. Eine Analogie zur Drehzahlregelung, wie sie bei Dieselmotoren allgemein verwendet wird, kommt also nicht in Betracht.

Die Strategie, die hier zum Einsatz kommt, basiert auf einer Energiebilanz, die für jedes Arbeitsspiel durchgeführt wird. Je nach Dosierung des Brennstoffs wird der Kolben mehr oder weniger weit hinab getrieben, wobei vereinfacht gesprochen der Weg ein Maß für die verrichtete Arbeit ist. Wird der Kolben zu tief hinabgetrieben, dann hat er mehr Arbeit als erforderlich geleistet. Die Einspritzmenge für den nächsten Schlag kann reduziert werden. Erreicht der Kolben nicht ganz die vorgesehene untere Totpunktslage, dann muß mehr Kraftstoff zugeteilt werden. Eine derartige Regelung reagiert prinzipbedingt nur auf hinreichend stetige Laständerungen korrekt. Sind plötzliche Lastschwankungen zu erwarten, dann sollte auch der Lastdruck zur Regelung der Einspritzmenge verwendet werden.

Durch unerwartete Einflüsse, beispielsweise das Anstoßen des Verbrauchers gegen einen Anschlag, kann es zu Arbeitsspielversagen kommen. Der Kolben wird nicht weit genug hinabgetrieben, um den Kompressionszylinder wiederaufzuladen und in eine Stellung zu gelangen, die den Start des nächsten Arbeitsspiels erlaubt. Für diesen Fall ist die Rückseite des Kompressionskolbens als Rückholkolben vorgesehen. Wenn nun von der Steuerung eine solche Störung erkannt wird, dann wird der Rückholzylinder mit Drucköl beaufschlagt, bis die untere Totpunktslage wieder erreicht ist. Danach schaltet die Steuerung wieder in den normalen Betrieb um.

Im Falle einer plötzlich wegfallenden Last wird der Kolben mit nun zu großer Gaskraft abwärts bewegt, wo die Gefahr des Anschlagens besteht, der mit einer Endlagendämpfung begegnet wird.

Die Steuerung arbeitet digitalelektronisch. Die Bewegung des Kolbens wird durch Näherungssensoren erfaßt und als Eingangsgröße verarbeitet. Ausgänge schalten das Startventil und versetzt das Einspritzventil.

Durch umfangreiche Experimente und Simulationsrechnungen konnten die Zusammenhänge zwischen den folgenden Parametern ermittelt und analysiert werden:

- Hubverlauf
- Kompressionsdruck
- Arbeitsdruck
- Einspritzzeitpunkt
- Schlagzahl
- Wirkungsgrad
- Emissionen

Die genaue Kenntnis dieser Zusammenhänge sind die Voraussetzung für die Beherrschung und Optimierung des Freikolbenmotors, wobei als Optimierungsziele der Wirkungsgrad und die Emissionen im Vordergrund stehen.

2.4 Peripherie

Der Freikolbenmotor bedarf wie auch der Kurbelwellenmotor einer Reihe von Nebenaggregaten. Der Start erfordert einen aufgeladenen Kompressionsspeicher. Zu diesem Zweck ist eine elektrisch betriebene Hydraulikpumpe vorgesehen. Zudem benötigen auch die Steuerung und das Einspritzsystem elektrischen Strom. Dieser kann durch eine Batterie oder durch Netzanschluß bereitgestellt werden.

Neben der hydraulischen Ladepumpe wird bei Betrieb eines offenen hydraulischen Kreises auch eine Vorspannpumpe benötigt, deren Antrieb zumindest zum Start ebenfalls elektrisch erfolgen muß.

Der Freikolbenmotor benötigt wie jeder andere Verbrennungsmotor eine Kühlung, die in diesem Falle als Wasserkühlung vorgesehen ist. Daher ist ein Kühlwasserkreislauf mit Umwälzpumpe, Thermostat und Kühler vorhanden. Zur Abfuhr der Wärme aus hydraulischen Verlusten ist ein Ölkühler notwendig.

Soll der Freikolbenmotor autonom arbeiten, dann muß er eine Batterie aufladen, was mittels hydraulisch angetriebener Lichtmaschine erfolgt.

3 Einsatzmöglichkeiten

Das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten für die Freikolbenmotoren ist groß. Zunächst kommt der gesamte Bereich der Mobilhydraulik in Betracht. Als Beispiele seien ohne Anspruch auf Vollständigkeit genannt:

- Bagger, Planiertrappen,
- Ackerschlepper, Mähdrescher,
- Gabelstapler,
- Stadtbusse, Müllsammelfahrzeuge,
- Taxis,
- Nutzfahrzeuge,
- fahrbare Arbeitsmaschinen.

In diesen Bereichen haben sich teilweise schon vollhydraulische Antriebe durchgesetzt, beispielsweise bei Baggern. Daneben besitzen die meisten straßengängigen Fahrzeuge einen konventionellen Fahrtrieb, der zusätzlich hydraulische Verbraucher versorgt. Viele Lastkraftwagen zählen zu dieser Kategorie. Interessant für die zukünftige Entwicklung sind aber auch die Anwendungen, in denen hydraulische Antriebe nur vereinzelt existieren, wie dies bei Fahrzeugen des öffentlichen Nahverkehrs der Fall ist. Insbesondere dort bietet die hydraulisch elegant realisierbare Bremsenergieerückgewinnung ein erhebliches Potential. Grundsätzlich ist der Freikolbenmotor überall dort interessant, wo hydraulische Antriebsleistung insbesondere auch mit erheblichen Teillastanteilen benötigt wird. Als Beispiele seien hier der Tankwagen und der Lastkraftwagen mit Ladekran genannt, die in Abschnitt 4 genauer beschrieben sind.

Der Einsatz des Freikolbenmotors in Kraft-Wärme-Kopplungssystemen ist wie bei jeder Verbrennungskraftmaschine erwägenswert, macht jedoch nur dann eindeutig Sinn, wenn nicht etwa elektrischer Strom sondern hydraulische Antriebsleistung benötigt wird.

4 Ausgesuchte Anwendungen

Diesem Bericht liegen Arbeiten zum Forschungsprojekt „Energiesparende und umweltschonende hydraulische Versorgung von Ladekränen und Tankaufliegern durch eine Freikolbenmaschine“ zugrunde, das von der Firma BREFA Bremsen- und Fahrzeugdienst GmbH mit Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung bearbeitet und durch die Ingenieurgesellschaft IgH Gesellschaft für Maschinen- und Energietechnik mbH wissenschaftlich begleitet wird. In diesen Bereichen verspricht der Freikolbenmotor seine spezifischen Eigenschaften und Vorzüge sehr gut zur Geltung zu bringen.

Beim Tankauflieger beherrscht gegenwärtig folgende Technik das Bild. Das Fahrzeug ist mit einer Antriebsmaschine ausgerüstet, die auf typische Leistungen im Lastverkehr ausgelegt ist, was etwa 200–400 kW entspricht. Diese Maschine treibt die Medienförderpumpen, zum Beispiel für Heizöl, über eine angeflanschte hydraulische Versorgung an, die Leistungen in der Größenordnung von 5–20 kW benötigt. Die Konsequenz ist, daß die Hauptmaschine bis zur Hälfte ihrer Betriebszeit in niederster Teillast arbeitet. Dort besitzt der Dieselmotor einen schlechten Wirkungsgrad, produziert unverhältnismäßig hohe Emissionen und erleidet starken Verschleiß. Es bietet sich also an, eine separate hydraulische Versorgung vorzusehen. Konventionell bestünde diese aus einem kleinen Dieselmotor, der eine Hydraulikpumpe antreibt. Daß diese zwei Maschinen durch einen Freikolbenmotor ersetzt werden können, leuchtet unmittelbar ein.

Zur Untersuchung des Betriebsverhaltens wurde der Prototyp des Freikolbenmotors zur Versorgung eines Tankaufliegers benutzt. Diese Versuche sind in [60, 61] dokumentiert. Die wichtigsten Ergebnisse werden hier kurz wiedergegeben. Mit dem Versuchsaufbau in Abbildung 5 wurde die Aufgabe der Heizölförderung in verschiedenen Betriebspunkten erprobt.

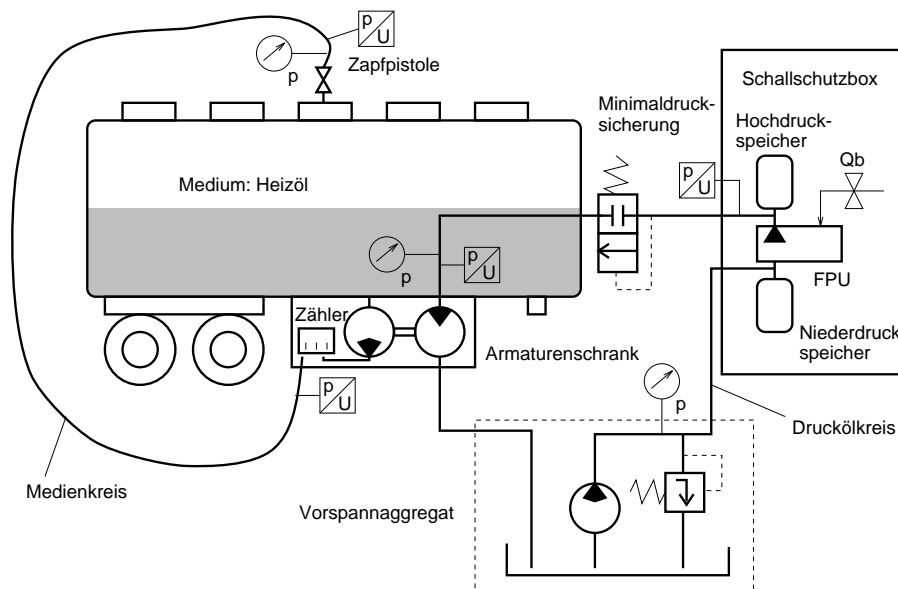


Abbildung 5: Versuchsaufbau Tankaufliegerversorgung

Im Tankauflieger arbeitet ein Zahnradmotor, dessen Volumenstromaufnahme mit dem Versorgungsdruck steigt. Am Freikolbenmotor wurde nun die Schlagzahl so eingestellt,

daß sich der jeweils gewünschte Versorgungsdruck einstellte. Zur Beurteilung der einzelnen Teilsysteme wurden dann deren Wirkungsgrade ermittelt:

- der effektive Wirkungsgrad des Freikolbenmotors als Verhältnis von abgegebener hydraulischer Arbeit zu zugeführter Brennstoffenergie,
- der Wirkungsgrad der Fördereinrichtung des Tankaufliegers,
- der Wirkungsgrad der hydraulischen Anschlußleitung, die versuchsbedingt sehr lang und damit von deutlichem Einfluß war.

Das Resultat ist in Abbildung 6 wiedergegeben. Man erkennt deutlich daß schon der Prototyp mit effektiven Wirkungsgraden von bis zu 30 % arbeitet, was durch eine konventionelle Kombination aus Kleindieselmotor und Hydraulikpumpe kaum realisierbar ist. Dabei fällt der Wirkungsgrad bei Teillast nur geringfügig ab. Dies ist umso beachtlicher als der untersuchte Freikolbenmotor bezüglich des Verbrauchers erheblich überdimensioniert war und ohnehin ständig mit weniger als 20 % seiner Nennleistung lief. Der Energiefluß in einem ausgesuchten Arbeitspunkt ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier wird auch der Anteil der Fremdenergieversorgung durch Elektrizität berücksichtigt.

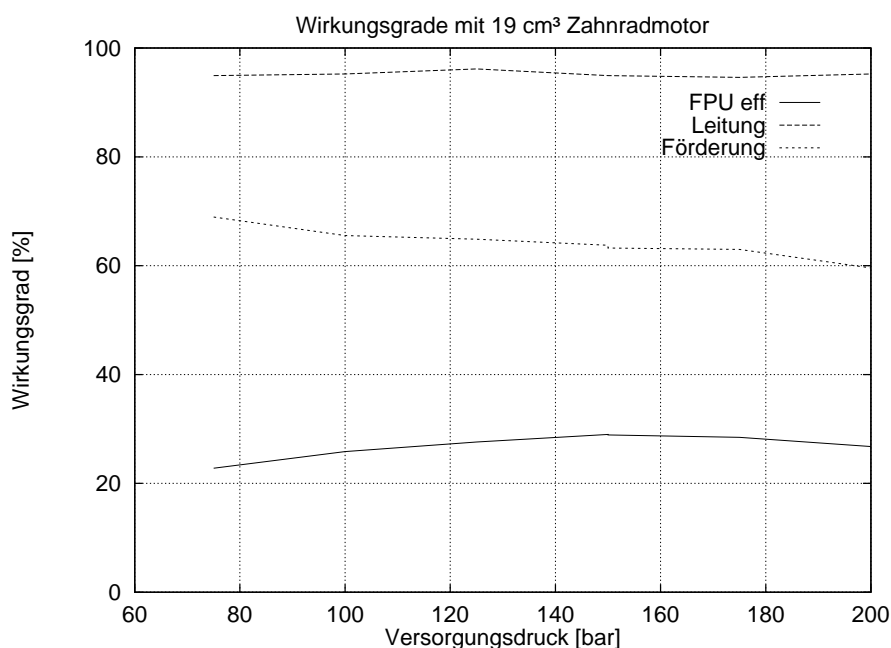


Abbildung 6: Wirkungsgrade der Heizölförderung

Zur Untersuchung der Empfindlichkeit des Freikolbenmotors gegen plötzliche Lastwechsel wurden die zeitlichen Druckverläufe bei Öffnen und Schließen der Zapfpistole auf der Hochdruckseite des Arbeitskreislaufs und an der Zapfpistole erfaßt. Sie sind in Abbildung 7 dargestellt. Der Lastsprung resultiert aus der Unterbrechung des Förderstroms bis zum Öffnen des Druckbegrenzungsventils im Heizölkreislauf. Der Arbeitsdruck steigt an, der Freikolbenmotor fördert anteilig in den Hochdruckspeicher. Nach Öffnen der Zapfpistole sinkt der Druck entsprechend ab. Der Freikolbenmotor kann auf solche Laständerungen also problemlos reagieren.

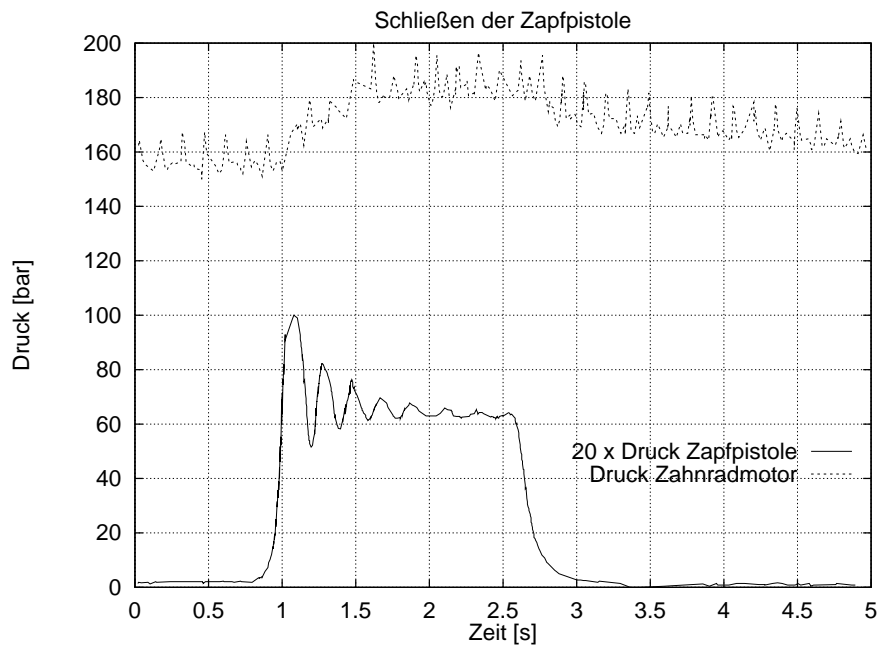


Abbildung 7: Schließen und Öffnen der Zapfpistole

Als zweiter Einsatzfall soll ein Lastkraftwagen mit Ladekran untersucht werden. Der Ladekran besteht aus mehreren Gliedern, die jeweils durch Hydraulikzylinder bewegt werden. Auch hier ist der Bedarf an hydraulischer Leistung verhältnismäßig gering, so daß auch hier der Freikolbenmotor vielversprechende Potentiale verspricht. Allerdings ist die Aufgabe deutlich anspruchsvoller, insofern gleich mehrere Linearantriebe zu versorgen sind, deren Arbeitsdruck untereinander und zeitlich stark schwanken kann. Ziel der Untersuchungen ist es, ein Betriebskonzept zu realisieren, durch das die energetischen und ökonomischen Vorzüge des Freikolbenmotors erhalten bleiben.

Energieflußbild, in kW

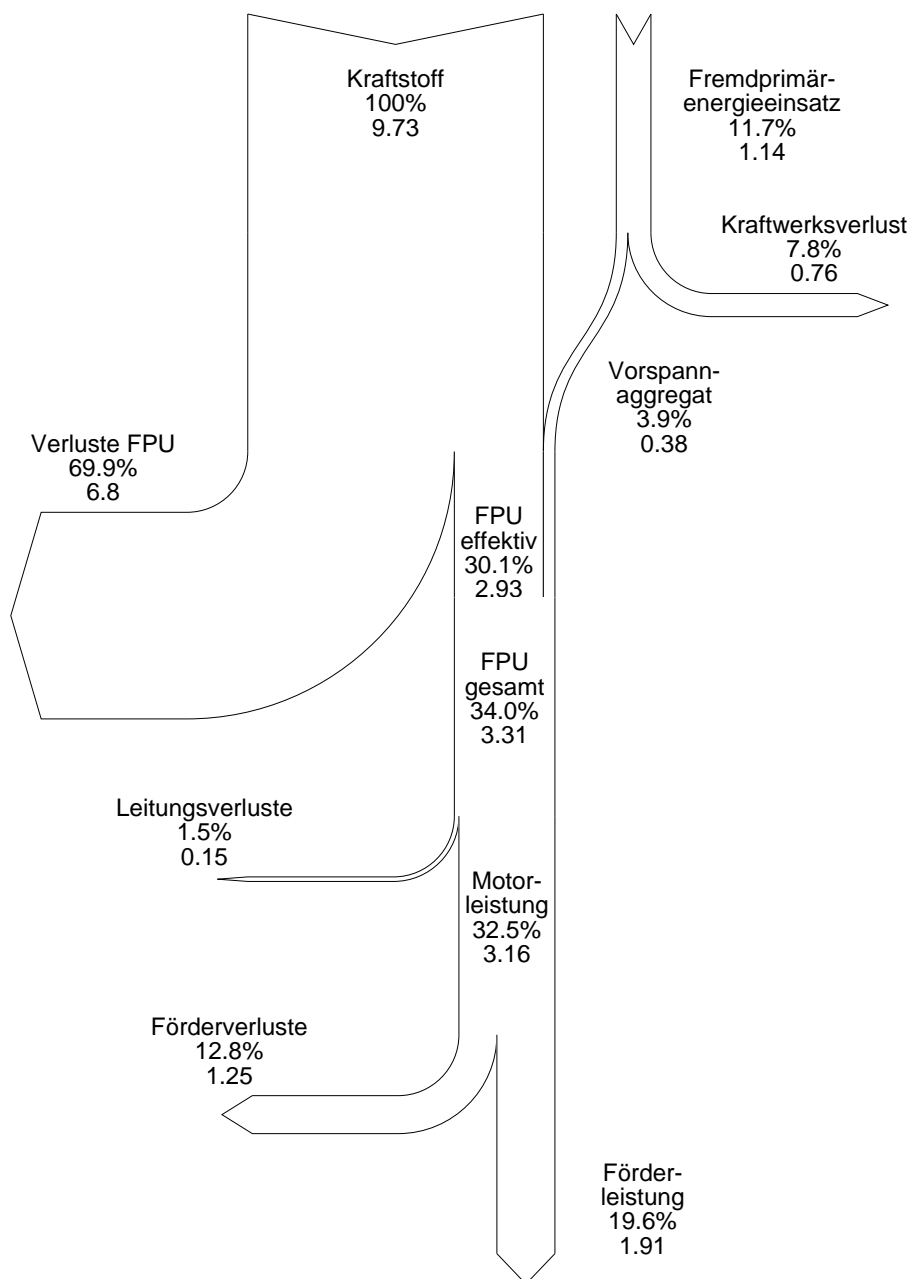


Abbildung 8: Energiefluß, 150 bar Versorgungsdruck

5 Beteiligte Firmen

An den Arbeiten zum Forschungsprojekt „Energiesparende und umweltschonende hydraulische Versorgung von Ladekränen und Tankaufliegern durch eine Freikolbenmaschine“, welche diesem Bericht zugrundeliegen, sind die folgenden Firmen beteiligt:

BREFA Bremsen- und Fahrzeugdienst GmbH *Rurbenden 5-7, 52382 Niederzier*

Die BREFA ist ein Unternehmen, das die Ausrüstung und Instandhaltung von Nutzfahrzeugen betreibt. Motivation für die Durchführung des Forschungsprojektes ist die Klärung der Frage, ob in Einsatzbereichen, über die im Unternehmen beträchtliches Know-How existiert, neuartige Lösungen mit energetischen, ökologischen und ökonomischen Vorteilen entwickelt werden können.

INNAS BV *Nikkelstraat 15, 4823 AE Breda, Niederlande*

Das Unternehmen des Entwicklers des Freikolbenmotors ist eine Ingenieurfirma, die sich der Entwicklung innovativer Technologien verschrieben hat. Mit Unterstützung des niederländischen Wirtschaftsministeriums gelang die Entwicklung erster Prototypen des Freikolbenmotors. Innas stellt für das Forschungsprojekt Prototypen als Versuchsträger und erhebliches Know-How zur Verfügung.

Ingenieurgemeinschaft IgH Gesellschaft für Maschinen- und Energietechnik mbH

Heinz-Bäcker-Str. 34, 45356 Essen Die IgH ist ein Ingenieurbüro, das an der Entwicklung unterschiedlicher Problemlösungen arbeitet. Neben Aufgaben aus dem Spezialmaschinenbau sind insbesondere theoretische und experimentelle Arbeiten ein Schwerpunkt. Die IgH zeichnet für die wissenschaftliche Begleitung des Forschungsprojektes verantwortlich.

6 Begriffe

Die neuartige Technik des Freikolbenmotors erfordert die Bestimmung und Abgrenzung der Begriffe, die der Beschreibung von Maschine und Verhalten dienen. Diese Begriffe werden im folgenden aufgeführt.

Verbrennungsteil: Der Verbrennungsteil des Freikolbenmotors besteht aus

- Verbrennungszyylinder,
- Kolben im Verbrennungszyylinder,
- Einlaßtrakt,
- Spülgehäuse,
- Auslaßtrakt,
- Einspritzsystem.

Kompressionsteil: Der Kompressionsteil umfaßt

- Kompressionsspeicher,
- Schnellschaltventil,

- Kompressionszylinder,
- Kompressionskolben,
- Rückholzylinder.

Arbeitsteil: Der Arbeitsteil ist zusammengesetzt aus

- Arbeitsplunger,
- Arbeitszylinder,
- Niederdruckspeicher,
- Hochdruckspeicher,
- Rückschlagventile.

Schlagzahl: Die Schlagzahl gibt die Zahl der Arbeitsspiele je Zeiteinheit wieder. Der Dimension nach ist die Schlagzahl eine Frequenz, die in 1/min oder in Hz angegeben wird.

Arbeitsdruck: Der Arbeitsdruck ist der Lastdruck auf der Hochdruckseite des Freikolbenmotors. Im engeren Sinne wird mit Rücksicht auf die Notwendigkeit der Vorspannung der Niederdruckseite auch die Druckdifferenz zwischen Hoch- und Niederdruckseite Arbeitsdruck genannt.

7 Zusammenfassung

Der Freikolbenmotor ist keine technische Utopie mehr. In der hier beschriebenen Form mit hydraulischer Leistungsabgabe hat der Prototyp erfolgreich seine Funktionsfähigkeit demonstriert. Er zeichnet sich durch hohe Wirkungsgrade, sehr gutes Teillastverhalten und günstige Emissionswerte aus. Nicht nur auf dem Prüfstand, sondern auch im realitätsnahen Einsatz hat er sich bewährt und verspricht, insbesondere im Bereich der mobilhydraulischen Anwendungen erhebliche Bedeutung zu erlangen.

Literatur

- [1] P. Achten. Prototype-onderzoek vrijezuigermotor: Ontwerpopzet. *CE, Delft*, 1985.
- [2] P.A.J. Achten. Prototype-onderzoek vrijezuigermotor: Ontwerpspecificaties. *CE, Delft*, 1985.
- [3] P.A.J. Achten. Bouw van het prototype vrijezuigeraggregaat. *Innas BV, Delft*, 1988.
- [4] P.A.J. Achten. Brandstofsysteem en vormgeving verbrandingsruimte. *Innas BV, Breda*, 1988.
- [5] P.A.J. Achten. Meetplan prototype-onderzoek VZA. *Innas BV, Delft*, 1988.
- [6] P.A.J. Achten. Voorbereidende beproevingen prototype VZA. *Innas BV, Delft*, 1989.
- [7] P.A.J. Achten. Fase 3 van het prototype-onderzoek vrijezuigeraggregaat: Optimalisatie. *Innas BV, Breda*, 1990.

- [8] P.A.J. Achten. Milieu-aspecten van het vrijezuigeraggregaat. *Innas BV, Breda*, 1990.
- [9] P.A.J. Achten. NO_x-vorming bij het VZA. *Innas BV, Breda*, 1990.
- [10] P.A.J. Achten. Het Vrijezuigeraggregaat. *Innas BV, Breda*, 1991.
- [11] P.A.J. Achten. Verslag van het bezoek aan Volvo-Flygmotor d.d. 16 december 1993. *IFP B.V. te Breda*, 1993.
- [12] P.A.J. Achten. Die Innas-Freikolbenmaschine. *proc. 11. AFK, IHP, Aachen*, 1994.
- [13] P.A.J. Achten. Het einde van een omwenteling. Dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, 1995.
- [14] P.A.J. Achten. The development of the Innas Free Piston Engine: The art of choosing the right moment. *Universiteit van Linköping, Zweden*, 1995.
- [15] Achten, P.A.J., Potma, T.G. De vrijezuigermotor: zijn werking, eigenschappen en vooruitzichten. *CE, Delft*, 1985.
- [16] Achten, P.A.J., Potma, T.G. Free-piston engine having a fluid pressure unit. *PCT/NL92/00211*, 1993.
- [17] Achten, P.A.J., Potma, T.G. Free-piston engine having a fluid pressure unit. *PCT/NL92/00212*, 1993.
- [18] Achten, P.A.J., Potma, T.G. Method for the cold start of a free-piston engine; and free-piston engine adapted for use of this method. *PCT/NL92/00208*, 1993.
- [19] Achten, P.A.J., Potma, T.G., Rutten, B.J.C.M. Haalbaarheidsonderzoek vrijezuigermotor. *CE, Delft*, 1983.
- [20] Achten, P.A.J., Potma, T.G., Rutten, B.J.C.M. Ontwerp prototype vrijezuigermotor. *CE, Delft*, 1986.
- [21] Achten, P.A.J., Engel, M., Somhorst, J. De bouw en beproeving van het VZA3 en Kennisoverdracht en industrialisatie van VZA-technologie. *Innas B.V.*, 1994.
- [22] Achten, P.A.J., Potma, T.G. Free-piston engine having a fluid energy unit. *PCT/NL92/00209*, 1993.
- [23] J. Baken. Prototype-onderzoek vrijezuigermotor: Meetspecificaties. *Centrum voor Energiebesparing, Delft*, 1985.
- [24] J. Biemond. De toepassing van het vrije-zuigeraggregaat in transportwerktuigen. *TU Delft, vakgroep transporttechnologie*, 1995.
- [25] R. Bisschops. Optimalisatie van de spoeling in tweetaktmotoren. *Innas / TU Eindhoven / afstudeeropdracht*, 1994.
- [26] R. Bisschops. Optimalisatie van de spoeling in tweetaktmotoren - Appendix. *Innas / TU Eindhoven / afstudeeropdracht*, 1994.

- [27] K. Dluczik. Entwicklung und Untersuchung energiesparender Schaltungskonzepte für Zylinderantriebe am Drucknetz. Dissertation, RWTH Aachen, 1989.
- [28] Engel, M.P., Achten, P.A.J. Stand van zaken vrijezuigeraggregaat september 1991. *Innas BV, Breda*, 1991.
- [29] M. Ganser. Die dritte Einspritzdüse für den Zweitaktmotor Meßergebnisse und Betriebsanleitung. *Ganser-Hydromag*, 1989.
- [30] H. J. Haas. Sekundärgeregelte hydrostatische Antriebe im Drehzahl- und Drehwinkelregelkreis. Dissertation, RWTH Aachen, 1989.
- [31] Heerens, W. Chr., W.F. Wedman. Sensor voor bepaling van de positie van een vrije zuiger. *Precapcon Presencon, Rijswijk*, 1988.
- [32] R.P. Heintz. Theory of operation of a free piston engine pump. *SAE 859316*, 1985.
- [33] A. Hibi. Hydraulic free piston internal combustion engine. *Hydraul. Pneum. Mech. Power*, 3/4 1984.
- [34] Hibi, A., Hu, Y. A prime mover consists of a free piston internal combustion hydraulic power generator and a hydraulic motor. *SAE 930313, Warrendale*, 1993.
- [35] Kumagi, S. Hibi, A. Hydraulic free piston internal combustion engine – test result. *Hydraul. Pneum. Mech. Power*, 9 1984.
- [36] A.W. Karel. Marktbeschouwing; toepassingsmogelijkheden. *Lang Energy Systems*, 1986.
- [37] K. Knip. De Vrije-zuigermotor. *NRC Handelsblad d.d. 30 december 1993*, 1993.
- [38] K. Knip. Nederlands bedrijf met heel nieuw type motor. *30/12/1993 NRC pag. 1*, 1993.
- [39] R. Kuss. Het controleren en kalibreren van het inspuitsysteem van Ganser. *Innas BV, Delft*, 1990.
- [40] Lanser, J.C., Weterkamp, R., Boerrigter, J.A.J.C. . Toepassingsorientatie: Vrijezuiger motor technologie. *Ingenieursbureau Arnhem Hengelo BV*, 1986.
- [41] Leijts, C.T.A., Schaik, M. van. Tricone aandrijving een motor/transmissie-keuze voor nu en voor later. *Innas BV, Breda i.o.v. Eurotool*, 1994.
- [42] R. van Malsen. De produktiekostprijs van het vrijezuigeraggregaat. *Innas BV, Breda*, 1990.
- [43] R. van Malsen. Interne notitie: concurrentie vrijezuigeraggregaat. Sterkten, zwakten en mogelijke kansen van en voor Innas. *Innas, Breda*, 1993.
- [44] R.A.H. van Malsen. Marktanalyse ten behoeve van de introductie van het vrijezuigeraggregaat. *Innas BV, Breda*, 1991.

- [45] A. Montagne. Onderzoek naar de realisatie van de elektronica voor de capacatieve verplaatsingsopnemer. *Product Partners, Delft*, 1989.
- [46] A. Montagne. Toepasbaarheid van een capacatieve verplaatsingsopnemer voor de positiebepaling van de zuiger in een vrije zuiger motor. *Product Partners, Delft*, 1989.
- [47] NN. Vrijezuigermotor niet alleen zuinig maar ook stil en degelijk. *Energiebeheer*, 1985.
- [48] NN. De markt voor de hydraulische vrije-zuiger motor. *Innovatie adviesburo Van der Meer & Van Tilburg*, 1986.
- [49] NN. Projecten overzicht Milieutechnologie juli 1991. *NOVEM, Min. van VROM*, 1991.
- [50] NN. Emissiemetingen prototype dieselmotor INNAS te Breda. *Instituut voor Milieu- en Energietechnologie TNO (IMET)*, 1993.
- [51] NN. De vinding - Motor zonder draaiende onderdelen. *Haagsche Courant d.d. 4 januari 1994*, 1994.
- [52] NN. Vinding van bedrijf in Breda 'Vrije-zuiger' motor schoner en zuiniger. *Eindhovens Dagblad 05-01-1994*, 1994.
- [53] NN. Vrije-zuigeraggregaat breekt door. *De Ingenieur nr. 2 feb. 1994*, 1994.
- [54] NN. Alt gedacht – neu gemacht – Erste Freikolbenmaschinen sind funktionstüchtig. *Fluidtechnik, 19-1-1995*, 1995.
- [55] T.G. Potma. Design of a freepiston hydraulic motorpump. *Selbstverlag*, 1968.
- [56] T.G. Potma. Pump and driving motor assembly. *United States patent nr 3 606 591*, 1969.
- [57] Th.G. Potma. Verbrandingmotorpomp met uit een compressievat aangedreven, met de motorzuiger verbonden terugbrengzuiger. *Octrooiraad Nederland patent nr 6 814 405*, 1968.
- [58] R.R.J. ter Rele. Ontwerp opzet prototype vrijezuigermotor. *IW-TNO, Delft*, 1985.
- [59] Rele, R.R.J. ter, Seppen, J.J. Meetspecificaties en meetprogramma prototype vrijezuigermotor. *IW-TNO, Delft*, 1985.
- [60] Finke, T. Rotthäuser, S. Innas FPU, Erprobung am Tankwagen. Zwischenbericht, Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, 1995.
- [61] Finke, T. Rotthäuser, S. Freikolben macht Druck - Tankwagenbetrieb mit Free Piston Unit. *Fluid*, 3 1996.
- [62] B. Rutten. Prototype-onderzoek vrijezuigermotor: Simulatiemodel. *Centrum voor Energiebesparing*, 1986.

- [63] J. Somhorst. Experimenteel onderzoek naar het gendiceerde rendement van een diesel-hydraulisch vrijezuigeraggregaat. *afstudeerrapport TU Eindhoven*, 1993.
- [64] J.H.E. Somhort. The combustion process in a di diesel hydraulic free piston engine. *SAE 960032*, 1996.
- [65] Stuyvenberg, P.F., De Rotterdamse Droogdok Maatschappij. Free-piston motor with hydraulic or pneumatic energy transmission. *European Patent Office Application No. 87201312.3*, 1987.
- [66] H.A.H. Wellink. Randapparatuur en frame voor prototype vrijezuigermotor. *Innas BV, Delft*, 1987.
- [67] D. van der Werf. Vrije-zuigermotor (2). *NRC 20-01-1994*, 1994.
- [68] D. van der Werf. Vrije-zuigermotor (ingezonden brief, reactie op artikel IFP-aggregaat). *NRC Handelsblad 20-1-94*, 1994.
- [69] Weterkamp, R., Lanser, J.C. Vrije-zuiger motor technologie. *Ingenieursbureau Arnhem BV*, 1986.
- [70] Wubs, K., Brinkman, W. Adviesrapportage aan NOVEM inzake het VZA-project van Innas b.v. *Wubs Technologie b.v., Helmond*, 1992.
- [71] B. Zähe. Energiesparende Schaltungen hydraulische Antriebe mit veränderlichem Versorgungsdruck und ihre Regelung. Dissertation, RWTH Aachen, 1993.

Index

- Antrieb
 - vollhydraulisch, 9
- Arbeitsspiel, 3
- Betriebsgrenze, 6
- Bremsenergieerückgewinnung, 9
- Dampfmaschine, 2
- Dieselmotor, 10
 - Zweitakt-, 2
- Drehzahlregelung, 7
- Einspritzmenge, 8
- Einspritzsystem, 3
- Endlagendämpfung, 8
- Energiebilanz, 8
- Fremdenergie, 11
- Hubverlauf, 4
- Hydraulikpumpe, 10
- Hydrotransformator, 6
- Kaltstart, 4
- Kavitation, 6
- Kennfeld, 6
- Kraft
 - Gas-, 5
 - Massen-, 5
 - Quer-, 5
- Kraft-Wärme-Kopplung, 9
- Kreislauf
 - geschlossener, 6
 - offener, 9
- Kühlung
 - Öl-, 9
 - Wasser-, 9
- Kurbelwelle, 3
- Ladekran, 9
- Ladepumpe, 9
- Last
 - schwankung, 8
- Lastwechsel, 11
- Linearantrieb, 6, 12
- Load-Sensing, 6
- Minimaldrucksicherung, 6
- Mobilhydraulik, 9
- Nebenaggregat, 9
- Nebenaggregate, 4
- Newcomen, 2
- Otto, 2
- Regelventil, 3
- Rotationsantrieb, 6
- Rückhol
 - kolben, 8
 - zylinder, 8
- Schlagzahl, 4
- Schmierung, 5
- Schwungrad, 3
- Sekundärregelung, 6
- Sensoren, 8
- Speicher
 - Kompressions-, 3
 - Vorspanndruck, 6
- Spülung, 3, 5
- Steuerung, 8
- Tankwagen, 9
- Teillast, 10
- Totpunkt
 - unterer, 3
- Verdichtung, 4
- Verlust
 - Reibungs-, 5
 - Wandwärme, 4
- Vorspannpumpe, 9
- Wirkungsgrad, 6
 - effektiv, 11
 - Teillast-, 4