



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

EFFIZIENTER LINEARGENERATOR / LINEARMOTOR FÜR KOLBENMASCHINE

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Markus Lindegger, dipl. el. Ing. HTL, CIRCLE MOTOR AG

Tannackerstrasse 25, CH-3073 Gümligen

info@circlemotor.ch, www.circlemotor.ch



Impressum

Datum: 30. Juni 2008

Im Auftrag des Bundesamt für Energie

Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien und -Anwendungen

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Bereichsleiter, rolf.schmitz@bfe.admin.ch

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152732 / 100915

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch / www.electricity-research.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Resumé, Abstract.....	4
1. Ausgangslage.....	5
2. Ziel der Arbeit.....	6
3. Methode.....	7
3.1 Bau eines Lineargenerators für eine Stirling Freikolbenanlage.....	7
3.1.1 Gewähltes Konzept.....	7
3.1.2 Wegmesssystem.....	8
3.1.3 Messungen zum Wirkungsgrad.....	10
3.1.4 Weiterführung des Projekts „Stirling-Freikolbenanlage“.....	11
3.2 theoretische Arbeit zur Effizienz von Linearmotoren für Kompressoren.....	11
3.2.1 Kinematik der Kolbenbewegung.....	11
3.2.2 Theoretische Grundlagen zur Berechnung der linearen el. Maschinen.....	14
4. Ergebnisse.....	15
4.1 Die Berechnungsmodelle der untersuchten Maschinen.....	15
4.2 Daten der el. Maschinen in IEC Baugrösse 56.....	15
4.3 Daten der el. Maschinen bei einer Leistung von 1.5kW.....	17
4.4 Daten der el. Maschinen bei einer Leistung von 3kW.....	19
4.5 Zusammenzug der Daten in einer Tabelle.....	21
5. Diskussion.....	22
6. Schlussfolgerung.....	25
Symbolverzeichnis.....	27
Referenzen.....	27
Anhang.....	

Zusammenfassung

Arbeitet ein Kolben mit einer el. Maschine zusammen, liegt es nahe, die el. Maschine auch linear auszuführen und die Nachteile des Kurbeltriebs zu umgehen. Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zwei Phasen mit dem **Bau eines effizienten Lineargenerators für eine Stirling Freikolbenanlage** und **theoretischen Arbeiten zur Effizienz von Linearmotoren für den Antrieb von Kompressoren**.

Die Stirlinganlage im **kontinuierlichen Betrieb** leistet mit dem **gebauten Lineargenerator 1.3kW_{el}**. Mit thermischer Spitzenleistung werden die geforderten 1.5kW_{el} erreicht. **Das Projekt „Stirling-Freikolben-Anlage“ für die Wärme-Kraftkopplung wird weitergeführt.**

Kleinere Permanent-Magnet-Linearmotoren arbeiten ohne Elektronik am Einphasen-Stromnetz.

Die theoretische Arbeit zeigt auf, wie Linearmotoren durch die Verknüpfung des el. Vektordiagramms mit dem Druck-Volumendiagramm des Kompressors zu dimensionieren sind. Erreichen Linearmotoren Leistungen über einige kW, so ist der Wechsel zu einem Dreiphasen-System mit einer Antriebselektronik angezeigt. Die Schwingfrequenz ist verstellbar und kleiner als 50Hz.

Die Wirkungsgrade der berechneten Linearmotoren liegen im Bereiche der Effizienzklasse EFF1 von Normmotoren. Die sehr hohen Wirkungsgrade der rotierenden Permanent-Magnet-Motoren werden aber nicht erreicht.

Das Zusammenspiel des Linearmotors mit einem optimierten Prozess auf der thermischen Seite gibt grosse Effizienzvorteile. Wird mit linear angetriebenen Wärmepumpen ein Öl-freier Betrieb möglich, so sinken die Verluste in den Wärmetauschern. Vom Kompetenzzentrum thermische Energiesysteme der Hochschule Luzern besteht grosses Interesse eine lineare Niedrighub-Wärmepumpe weiter zu verfolgen.

Resumé

Il est évident de réaliser une machine électrique dans la forme d'un moteur linéaire dans le cas où cette machine entraîne un piston. Ceci permet de contourner les inconvénients de l'entraînement à manivelle. Ce travail contient deux phases : une première phase porte sur la construction d'un moteur linéaire à rendement élevé pour un système avec un moteur Stirling piston libre. La deuxième phase contient des travaux théoriques concernant l'efficacité des moteurs linéaires pour l'entraînement de compresseurs.

Le système à moteur Stirling avec la génératrice linéaire réalisée fournit la puissance électrique de 1.3kW en régime continue. La puissance thermique de pointe permet d'atteindre la puissance électrique demandée de 1.5kW. Le projet concernant le système Stirling piston libre pour le couplage chaleur force se poursuit.

Des petits moteurs linéaires à aimant permanent connectés au réseau électrique monophasé fonctionnent sans circuits électroniques. Le travail théorique montre le dimensionnement des moteurs linéaires à l'aide de la fusion du diagramme vectorielle électrique et du diagramme concernant pression-volume du compresseur. Si la puissance des moteurs linéaires dépasse quelques kW, il est avantageux de changer vers un système d'alimentation triphasée avec une électronique de commande. La fréquence d'oscillation est réglable et plus petite que 50Hz.

L'efficacité des moteurs linéaires calculés se situe dans la gamme de la classe EFF1 des moteurs normalisés. Mais le rendement très élevé des machines tournantes à aimant permanent n'est pas atteint.

L'association du moteur linéaire avec un processus thermique optimal donne le gain d'efficacité. Le fonctionnement sans huile des pompes à chaleur, entraînés par des moteurs linéaires, diminue les pertes dans les échangeurs de chaleur. Le centre de compétences machines thermiques de la HES Lucerne montre un grand intérêt pour la poursuite des projets dans le domaine des pompes à chaleur avec vérin à petite course.

Abstract

When an oscillating piston interacts with an electrical generator or motor, it is obvious that the electrical machine should also have linear motion, eliminating the disadvantage of a crankshaft. This work has two parts: construction of an efficient linear generator for a Stirling engine with a free piston and a theoretical study of the efficiency of linear motors for driving compressors.

The Stirling engine and the linear generator have a continuous power of 1.3 kWel. With thermal peak power the planned 1.5 kWel are attained. The Project "Stirling Free Piston Generator" for cogeneration will continue.

Smaller linear motors with permanent magnets function without electronic control from single-phase AC net. The theoretical study shows how linear motors can be layed out by linking the electric vector diagram with the pressure-volume diagram of the compressor. At a power level exeeding a few kW, a three-phase system with power electronics is more suitable. The frequency of oscillation is variable and lower than 50 Hz.

The efficiency of the simulated linear motors are in the range of efficiency class EFF1 of standard motors. The very high efficiencies of rotating motors with permanent magnets are not attained.

The combination of the linear motor with an optimised thermal process leads to advantages with the efficiency. If a heat pump with linear drive system can operate without lubricating oil the losses in the heat exchangers are reduced. The Competence Center for Thermal Machines at Lucerne University of Applied Sciences and Arts shows great interest to persue a linear heat pump for small temperature difference.

Die gebaute **Freikolben-Stirlinganlage** ist auf 1500W el. Leistung dimensioniert und arbeitet mit einem gekauften amerikanischen Lineargenerator. Dieser Lineargenerator vermag den Stirlingmotor nicht genügend zu bremsen, obwohl mehr mech. Leistung zur Verfügung stehen würde. Deshalb befassten wir uns mit den Grundlagen eines eigenen Lineargenerators und den zugehörigen Federn.

In Gesprächen über den Lineargenerator für die Stirling-Freikolbenanlage, wurde oft vorgeschlagen, auch Linearmotoren für den Antrieb von Wärmepumpen zu untersuchen.

2. Ziel der Arbeit

Das Projekt **effizienter Lineargenerator/Linearmotor für Kolbenmaschine** gliedert sich in **zwei Phasen** mit dem **Bau eines Lineargenerators für eine Stirling Freikolbenanlage** (2007) und **theoretischen Arbeiten für die Eignung des Linearmotors in Wärmepumpen und Druckluftkompressoren** (2008).

Energieerzeugung aus regenerativen Energien mit einem Lineargenerator.

Der Resonanz Stirling ist eine Mikro-Anlage für **Wärme-Kraftkopplung (Mikro-KWK)**, die den **Energieverbrauch gegenüber einer getrennten Bereitstellung senkt** und die schädlichen Emissionen reduziert. Der Stirling-Motor wird von aussen in einem Brenner mit fossilen oder regenerativen Energien beheizt. Ein Lineargenerator setzt mechanische in elektrische Energie um. Der Stirling ist ein völlig ungeschmierter, in einem hermetisch dichten Gehäuse angeordneter Freikolbenmotor mit einem einzigen Kolben, der den Läufer eines Lineargenerators antreibt. **Mit seiner Federaufhängung ist er keiner Abnutzung ausgesetzt und kann während langen Betriebszeiten wartungsfrei funktionieren.** Die Anlage wird dem Wärmebedarf des Haushalts entsprechend betrieben. Sollte diese einmal mehr Strom erzeugen als der Haushalt gerade verbraucht, wird der überschüssige Strom an das öffentliche Netz geliefert. Ein zusätzlicher Warmwasserspeicher erlaubt eine rationelle Bewirtschaftung der Anlage, sodass diese vorwiegend während el. Spitzenbedarfszeiten betrieben werden kann. **In der beschriebenen Anlage wird die freigesetzte Wärme mit einem Gesamt-Wirkungsgrad von über 90% genutzt.** Der flexible Betrieb erlaubt **Wärme im Bereich von 5 bis 15kW** freizusetzen und gleichzeitig eine **el. Leistung von 0.75 bis 1.5kW** zu erzeugen. Dank der doppelten Energienutzung kann der CO₂-Ausstoss eines mittleren Haushalts – gegenüber einer getrennten, fossilen Bereitstellung von Strom und Wärme – um rund 1.5t/Jahr gesenkt werden. Je nach örtlichen Bedingungen können die Energiekosten eines Haushalts um 300 bis 800Fr/Jahr reduziert werden. **Die dezentrale Stromversorgung erzeugt keine Überland-Leitungsverluste.** (Die Verluste durch Transformatoren und Übertragung auf den Hochspannungsleitungen verbrauchen ca 5% des zu transportierenden Stroms).

Das Projekt mit dem Bau eines Stirling-Freikolbenmotors mit Resonanzrohr wurde während zweier Jahre auf rein privater Basis getragen. Dies erlaubte, einen einfachen Stirling-Motor zu bauen und erfolgreich zu testen. Die elektrische Umwandlung erfolgt bisher mit einem gekauften Linearmotor, welcher als Antrieb von Kältemaschinen konzipiert ist, den Anforderungen als Lineargenerator aber nur teilweise genügt. Die Weiterführung des Stirling-Freikolben-Projekts mit diesem Auftrag besteht in der **Berechnung, Herstellung eines 1.5kW Lineargenerators, dem Einbau in die Stirlinganlage und in der Inbetriebnahme.** Hauptanforderungen sind dabei eine kompakte einfache Bauweise des Lineargenerators, sowie ein hoher Wirkungsgrad für die Umwandlung mechanischer in elektrische Energie.

Linearmotor für den Antrieb von Wärmepumpen und Druckluftkompressoren, Sparpotential in der Schweiz.

Effiziente el. Antriebe für Wärmepumpen und Druckluftkompressoren gehören zum Forschungskonzept des Bundesamts für Energie. **Die el. Antriebe von Pumpen, Kompressoren und Ventilatoren benötigt rund 30% des schweizerischen Stromverbrauchs.** Es ist deshalb sinnvoll die beste Antriebsart für diese el. Verbraucher zu finden. Linearmotoren für den Antrieb von Wärmepumpen und Druckluftkompressoren haben konstruktive und prozesstechnische Vorteile gegenüber rotierenden Elektromotoren. Zeigt sich durch die vorgeschlagene Arbeit eine höhere Effizienz zu Gunsten des Linearmotors, ist ein signifikantes Sparpotential an el. Energie vorhanden.

3. Methode

3.1 Bau eines Lineargenerators für eine Stirling Freikolbenanlage

3.1.1 Gewähltes Konzept

Die Berechnung und Optimierung des Lineargenerators erfolgte in einem finiten Element Programm. (*FEMAG*). Die Ausführung dazu ist in den Seiten 12,13,17,18 beschrieben.

Aus den Vorarbeiten der letzten 2 Jahre zeigte sich, dass eine konzentrische Anordnung der Spulen und der Permanent-Magnete für die Herstellung des Lineargenerators sinnvoll ist. Der Lineargenerator kann so vorteilhaft, in Fertigungsschritten von innen nach aussen, montiert werden. Ein zentrales Aluminiumteil trägt 18 Statorstege mit 6 Nuten. Vorteilhaft ist die Fertigung der Wicklung durch einfaches einwickeln der Kupferdrähte in die Nuten, durch drehen des gesamten Statorkörpers. Ebenfalls entstehen keine auskragenden Wicklungsköpfe und ein hoher Anteil des im Eisen eingebetteten Kupfers ist gegeben, was Effizienz bezogene Vorteile nach sich zieht.



Abb 3: Kompakter Stator mit Wicklung



Abb 4: Stator in Epoxyd gegossen

An beiden Enden des Lineargenerators sind *NdFeB* Magnete angebracht, die eine berührungsfreie magnetische Feder bilden.

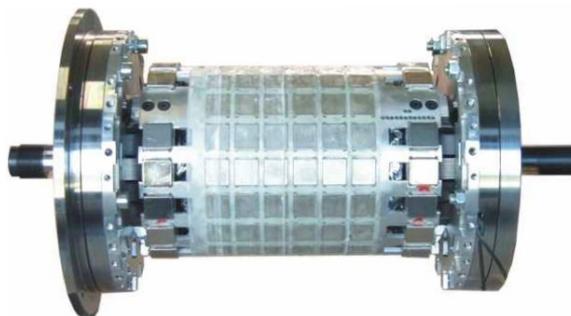


Abb 5: Läufer aus Aluminium mit eingelegten Magneten und den beiden Tellerfedern an jedem Ende.

Über den zentralen Statorkörper (Abb 3/4) ist der **zylindrische Läufer aus Aluminium** gelegt, mit Aussparungen zum einlegen der Permanent-Magnete (Abb 5). Der Läufer ist mit zwei Tellerfedern mechanisch gehalten, welche das Schwingen des Läufers erlauben.



Abb 6: zeigt die gesamte Stirlinganlage.

In der grossen Glocke in Abb 6 links befindet sich der Erhitzerkopf des Stirlingmotors und der Brenner. Im Druckgefäss unterhalb der Glocke ist der Lineargenerator eingebaut.

3.1.2 Wegmesssystem

Zur Bestimmung der umgesetzten Leistung des Stirlingmotors aus dem *P-V Diagramm* im Hubraum (Druck-Volumen) sind ein Druck- und ein Wegsensor nötig. Das Wegsignal ist proportional zum Volumen, da die Fläche des Kolbens eine unveränderbare Grösse ist. Eine echte Herausforderung stellte der Wegmesssensor dar. Eine erste Idee zum Messen des Wegs bestand im Abtasten des Läufers des Lineargenerators im Druckraum mit einem Laserstrahl. Der Lasersensor hielt dem Druck von 30 bar nicht stand. Der erste funktionierende Sensor besteht aus einem, am Läufer des Lineargenerators befestigten Magnetstab, der sich innerhalb eines Druckrohrs bewegt. Aussen zugänglich sind in einer Reihe im Abstand von 2.5mm Hallsensoren angeordnet. Dieser Wegmesssensor liefert ein Signal mit Stufen. Die gekauften Hallsensoren funktionieren ebenfalls, wenn diese mit einem Druck von 30 bar beaufschlagt werden.

Eine nächste Anordnung sollte die Empfindlichkeit des Signals erhöhen und die Stufe des Ausgangssignals auf 1.25 mm reduzieren. Mit drei Hallsensoren und Stabmagneten, eingeklebt in den bewegten Aluminiumteil des Lineargenerators, wurde ein lineares Wegmesssystem gebaut nach der gleichen Arbeitsweise, wie die bekannten Encoder bei rotierenden Antrieben. Die Ausgangssignale sind, ein A und B Kanal mit Versetzung und ein Indexsignal für die Mittelstellung. Dieses System (Abb7) arbeitete nicht zufrieden stellend, da sich die Magnetfelder der Magnete des Generators mit den Stabmagneten des Wegmesssystems zu stark beeinflussten.

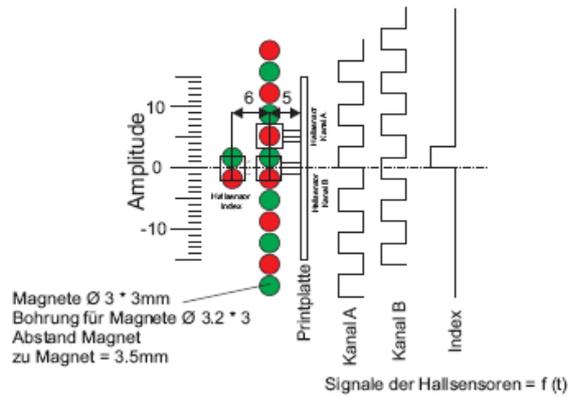


Abb 7: Darstellung des Wegmesssystem im Lineargenerator aufgebaut mit Hallensoren.

Zurückgekehrt zur ersten Lösung mit dem Druckrohr wurden die Hallensoren durch ein Spulensystem ersetzt. Ein Statorkörper, aufgebaut aus kleinen Elektroblechen, erzeugt über der zu messenden Wegstrecke zusammen mit dem bewegbaren Magnetstab ein homogenes Magnetfeld (Abb 8). Die in der Messspule hervorgerufene elektrische Spannung ist nach dem Induktionsgesetz der Geschwindigkeit proportional, mit der sich der Magnetstab im Statorkörper linear bewegt. Das Wegsignal berechnet sich aus dem Integral der Geschwindigkeit.



Abb 8: Teile des druckfesten induktiven Gebers, schwingender Magnetstab und Statorkörper.

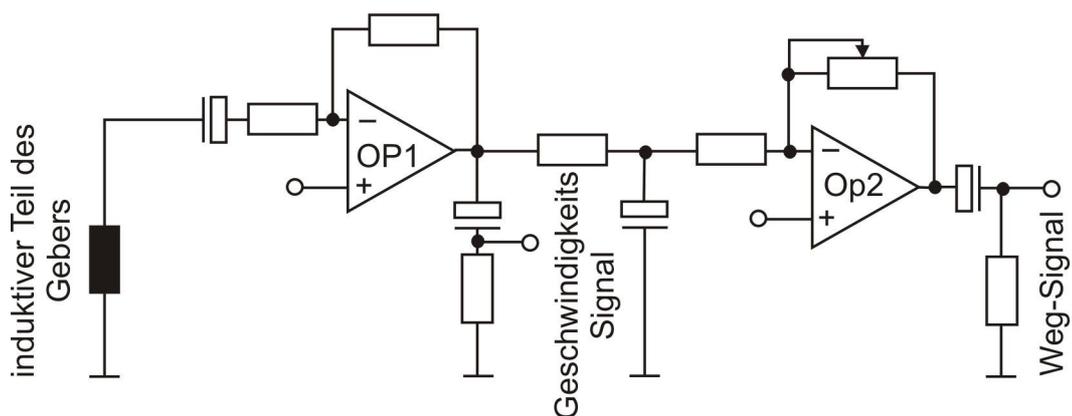


Abb 9 zeigt das Schema des funktionierenden Wegmesssystems mit dem induktiven Geber und der Elektronik zur Darstellung des Wegs und der Geschwindigkeit, mit welcher der Kolben in der Stirlinganlage oszilliert.

3.1.3 Messungen zum Wirkungsgrad

Die mechanische Eingangsleistung des Lineargenerators wird aus dem P-V Diagramm im Hubraum des Stirlingmotors bestimmt. Die Fläche des geschlossenen Linienzugs im P-V Diagramm ist der mechanischen Leistung proportional, die der Stirling-Prozess erzeugt. Das Druck- und Wegsignal wird einem Oszillograph, im Anzeigemodus der x,y Ebene zugeführt. Der Bildschirm zeigt das P-V Diagramm als Lissajous-Figur an. Der Wirkungsgrad für die Umwandlung der mechanischen zur elektrischen Leistung berechnet sich aus der Eingangsleistung bestimmt aus der Fläche der Lissajous-Figur und der mit einem Wattmeter gemessenen Ausgangsleistung am Lineargenerator. Die mechanische Verlustleistung setzt sich aus den Verlusten des Stirlingmotors und des Lineargenerators zusammen. Die mechanischen Verluste beim Stirlingmotor sind die Reibung des noch vorhandenen Kolbenrings und der Gasströmung im Druckraum. Die Verluste des Lineargenerators sind die Stromwärmeverluste im Stator und die Verluste durch ummagnetisieren des aktiven Eisens. Die Verluste des Lineargenerators lassen sich aus dem *FEMAG* Modell berechnen, somit sind auch die mechanischen Verluste des Stirlingmotors bestimmbar.

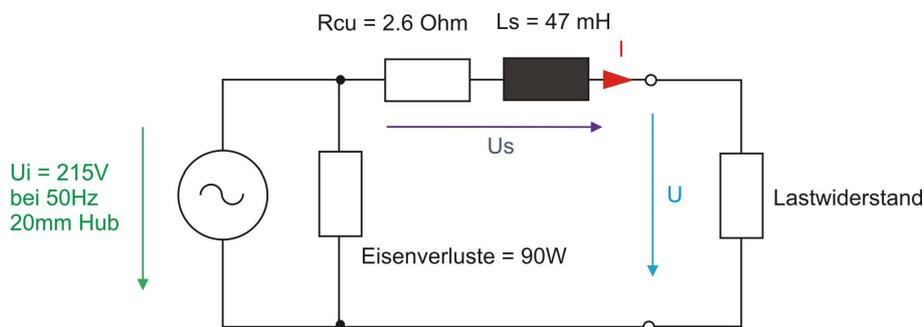


Abb10: Ersatzschaltbild des gebauten Lineargenerators, siehe auch Symbolverzeichnis.

Aus Gründen der Sicherheit beim experimentieren mit der Stirling-Freikolbenanlage erfolgte noch nicht das Zusammenschalten des Lineargenerators mit dem Stromnetz. Die abgegebene elektrische Leistung wurde ohmschen Lastwiderständen zugeführt. Die Art der Belastung des Lineargenerators hat Einfluss auf den Wirkungsgrad, der bei ohmscher Belastung ($\cos \varphi = 1$) kleiner ist, als wenn Blindleistung beim Netzanschluss zugelassen wird. Siehe dazu auch die Ausführungen im Kapitel 3.2.2. Die gemessenen Daten gemäss dem Ersatzschaltbild (Abb10) können nun in die bestehenden Programme für Synchronmaschinen eingegeben werden und damit die mech. Eingangs- und die el. Ausgangsleistung, sowie den Wirkungsgrad bestimmt werden. Das Programm *FEMAG* berechnete die Eisenverluste zum Ersatzschaltbild (Abb10). Die gemessenen und berechneten Daten können nun verglichen werden und stimmen mit einer Genauigkeit von kleiner 10% auch überein. Die Verluste der Stirling Freikolbenanlage setzen sich aus den Verlusten des Brenners, der Umwandlung der thermischen in mechanische Leistung, in Strömungsverluste im Resonanzrohr, in mech. Reibung der Dichtungen und den Verlusten des Lineargenerators zusammen. Da der Wirkungsgrad des Lineargenerators bekannt ist, kann auch der Wirkungsgrad des Stirlingmotors zusammen mit dem Brenner angegeben werden. Für den gemessenen Betriebspunkt an ohmscher Last, mit 134V, 8A und 1250W ermittelte sich ein Gesamtwirkungsgrad vom Brennstoff zur el. Abgabe von 13.1%. Gemäss Tabelle 40 im Anhang ist der Wirkungsgrad des Lineargenerators in diesem Betriebspunkts 79% und des Stirlingmotors mit dem Brenner 16.5%. Der berechnete Wirkungsgrad bei Netzankopplung ist für die gesamte Anlage 14% und für den Lineargenerator 85%, wie aus der Tabelle 41 im Anhang zu entnehmen ist.

3.1.4 Weiterführung des Projekts Stirling-Freikolbenanlage für Kraft-Wärmekopplung

Das Projekt Stirling-Freikolbenanlage wird auf privater Basis, mit einem Prüfstand zur Grundlagenforschung am luftgelagerten Kolben, zur Lebensdauerberechnung der Tellerfedern und zur Steigerung des Wirkungsgrads weitergeführt.

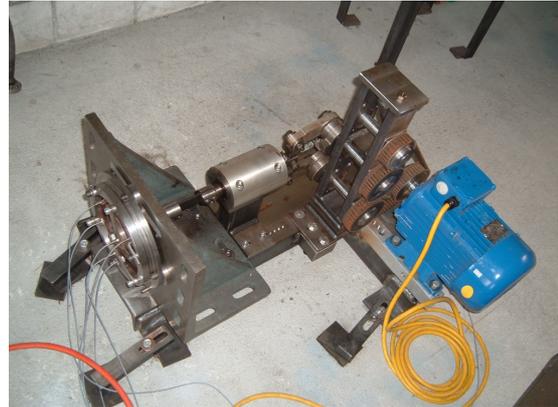
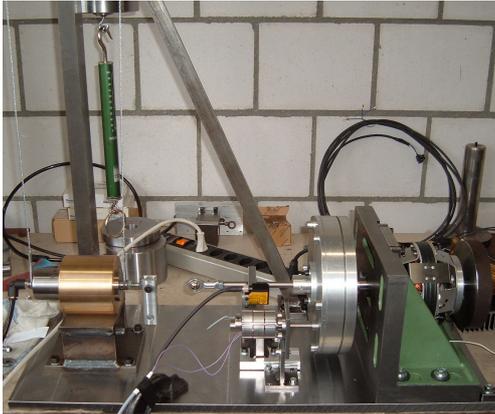


Abb 11: Prüfstand für luftgelagerten Kolben und Lebensdauertests der mech. Federn.

Im linken Bild in der Mitte sind die beiden Wegmesssysteme abgebildet. Der Prüfstand erlaubt auch auf einfache Weise das Eichen des induktiven, druckfesten Weggebers durch das Lasersystem.

3.2 Theoretische Arbeiten zur Effizienz von Linearmotoren für Kompressoren

3.2.1 Kinematik der Kolbenbewegung

In den Endpositionen des Hubs steht der Kolben still und in der Mitte des Hubs ist die Geschwindigkeit maximal. Der oszillierende Kolben muss somit innerhalb eines Hubs linear beschleunigt und wieder gebremst werden. Dazu sind entsprechende Kräfte nötig. Die bewegte Masse mit den Kräften stellt aus physikalischer Sicht ein Masse-Feder-Pendel dar. Greifen keine weiteren Kräfte ein, so schwingt das Pendel sinusförmig. Die Kenntnis dieser Kinematik der Kolbenbewegung bestimmt das nötige Federsystem um den Kolben mit einer bestimmten Frequenz und Amplitude oszillieren zu lassen und der Verlauf der Kolbengeschwindigkeit bildet die Grundlage für die Auslegung des Lineargenerators / Linearmotors. Für diese Auslegung ist es deshalb in einem ersten Schritt nötig, die Federkraft und die zugehörigen Bewegungsabläufe zu kennen. Dazu wurde ein Berechnungsblatt im Excel programmiert.

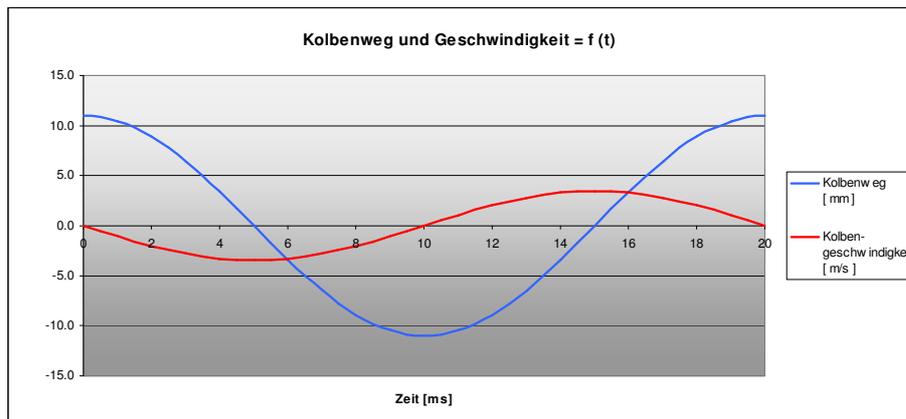


Abb 12: Kolbenweg und Kolbengeschwindigkeit bei 50Hz Schwingfrequenz.

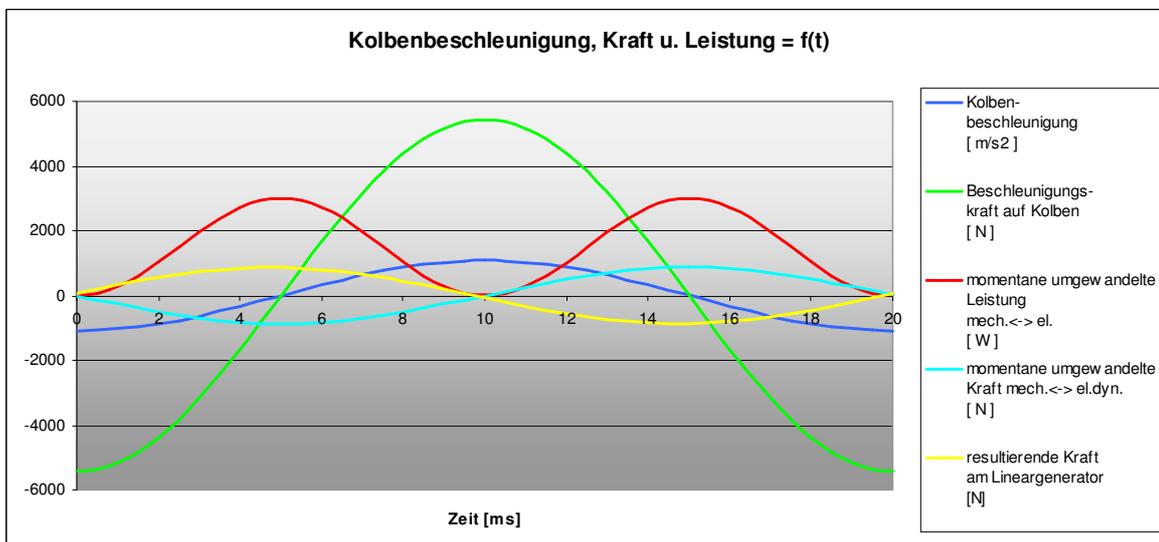


Abb 13 zeigt die physikalischen Größen der gesamten schwingenden Masse von 5kg, in der Stirling-Freikolben-Anlage bei 50Hz.

Diagramm 12 und 13 bilden die Grundlage für die Auslegung des 1.5kW Lineargenerators zur Stirling-Freikolbenanlage. Die schwingende Masse liegt bei 5kg. Die Gewichts bestimmenden Teile sind der Kolben des Stirlingmotors und der Läufer des Lineargenerators. Der Hub beträgt 22mm. Da direkte Netzeinspeisung mit einer elektrischen Leistung von 1,5kW in eine Phase festgelegt wurde, liegt die Schwingfrequenz bei 50Hz.

Das Excel-Berechnungsblatt, welches die Diagramme 12 und 13 liefert, zeigt dass zum oszillieren des Kolbens mit den vorgegebenen Daten eine hohe Federkraft mit einer Konstanten von 500'000 N/m nötig ist. Die hohe Federkraft bestimmt zwei konstruktive Auslegungsfelder. Einerseits muss die schwingende Masse möglichst klein gehalten werden. Die unterste Grenze bildet die Konstruktion des Läufers mit einem leichten Aluminiumzylinder und eingeklebten Permanent-Magneten. Andererseits wird mit den Permanent-Magneten an beiden Enden des Lineargenerators eine magnetische Feder realisiert, die einen bedeutenden Teil der schwingenden Masse abfedert.

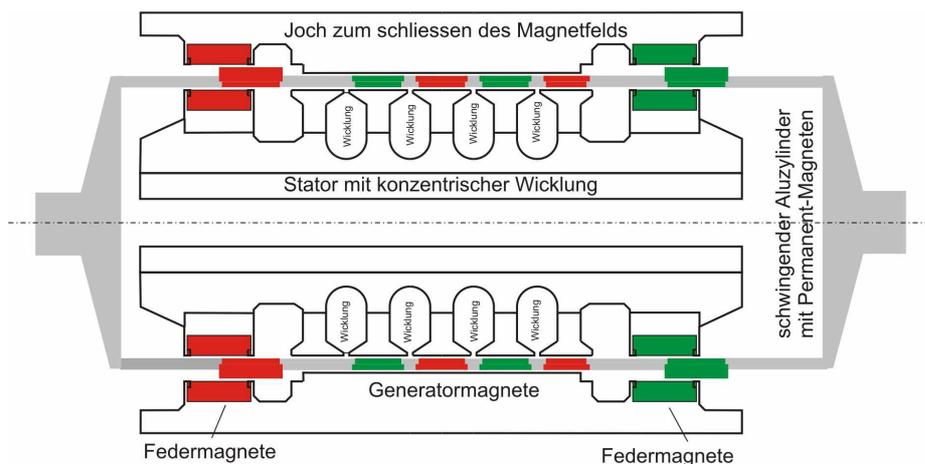


Abb 14: Schnittzeichnung durch den 1.5kW Lineargenerator

Abb 14 zeigt die gewählte Konstruktion des 1.5kW Lineargenerators mit dem innen liegenden Stator, dem Aluminiumläufer mit den eingeklebten Permanent-Magneten. Aussen ist das magnetische Feld mit einem Joch geschlossen.

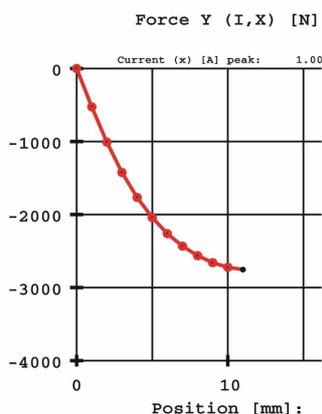


Abb 15: Kennlinie der magnetischen Feder

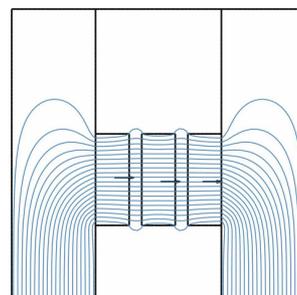


Abb 16: Feldlinienbild der magn. Feder

Das FEMAG Modell der magn. Feder (Abb16) bewegt den Magnet im Läufer in kleinen Schritten bis zum Amplitudenwert von 11mm und zeichnet die Federkraft in Funktion der Auslenkung auf (Abb 15). Der freiliegende Magnet in der Mitte des Modells (Abb16) ist der schwingende Magnet des Läufers. Die maximale Federkraft beträgt 2750N. Die Federkonstante der magn. Feder berechnet sich mit rund 250'000N/m und ist über die Auslenkung nicht ganz linear. Die 250'000N/m ist die Hälfte der nötigen Federkonstante für das Masse-Federsystems des 1.5kW Lineargenerators. Der andere Teil wird mit mechanischen und pneumatischen Federn realisiert. Es sei noch aufgeführt, dass magnetische Federn auch mit Permanent-Magneten kombiniert mit Teilen aus Weicheisen, die sich relativ zueinander bewegen, möglich sind. Die erreichten Federkonstanten sind aber bedeutend kleiner.

3.2.2 Theoretische Grundlagen zur Berechnung der linearen el. Maschinen

Dieser Abschnitt führt die theoretischen Berechnungsgrundlagen zu den untersuchten el. Maschinen auf und zeigt die Vorgehensweise. Der erste Schritt bei der Berechnung von linearen Maschinen besteht im Festlegen der Schwingfrequenz des Kolbens und des zugehörigen Hubs. Dazu ist jeweils das Diagramm der Kolbenbewegung, gemäss Abb13 aufgeführt. Bei den rotierenden Maschinen ist die Frequenz an der Welle gleich gewählt, wie die Schwingfrequenz des entsprechenden linearen Systems, ausgenommen bei der Leistungsgrösse 3kW. Weiter ist für jede untersuchte Maschine ein FEMAG-Modell abgebildet. Das FEMAG-Modell, oder bereits hergestellte Maschinen liefern die Grunddaten, für die Bestimmung der Leistung und des Wirkungsgrads, mittels bestehenden Programmen für Permanent-Magnet-Motoren und Generatoren. Die Grunddaten sind die induzierte Spannung bei der festgelegten Schwingfrequenz, der ohmsche und induktive Widerstand der Statorwicklung und die Ummagnetisierungsverluste des Stator Eisens. Der Wirkungsgrad und die zugehörige Leistung in der motorischen und generatorischen Betriebsart sind in Funktion des Winkels Θ aufgeführt. Θ beschreibt den Winkel zwischen der Klemmenspannung und der induzierten el. Spannung in den Spulen, hervorgerufen durch die bewegten Magnete. Sind die Vektoren der Klemmenspannung und der induzierten Spannung im Betrag gleich und der Winkel $\Theta = 0$ so wird keine Leistung erzeugt (Abb 17).

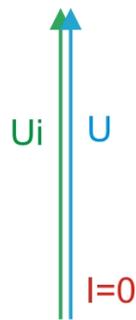


Abb 17: Vektordiagramm im Leerlauf

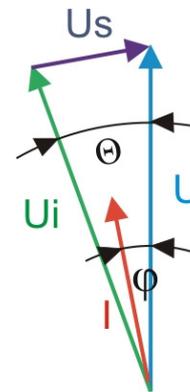


Abb 18: Vektordiagramm unter Last (Generator)

Wird die Permanent-Magnet-Maschine belastet, so öffnet sich der Winkel Θ . Zum schliessen des Vektordreiecks Abb 18 entsteht der Spannungsvektor U_s , der in der Statorwicklung anliegt und einen el. Strom durch die Windungen treibt. Durch kontinuierliches Verschieben des Winkels Θ aus seiner Nulllage lässt sich in den folgenden Diagrammen 20,23,25,28,30,33 der Verlauf des Wirkungsgrads, die el. und die mech. Leistung sehr schön darstellen. Grundsätzlich könnte der Vektor U im Betrag zu U_i unterschiedlich sein. Es ist bekannt, dass effiziente, synchrone Maschinen so ausgelegt werden, dass die Vektoren U und U_i im Betrag etwa gleich sind. Der Strom läuft dann mit kleinem Winkel ϕ aus dem Leerlauf, sodass ein hoher Blindlastanteil, der signifikant den Wirkungsgrad reduziert, erst im Überlast Bereich entsteht.

Zerlegt man den Stromvektor trigonometrisch so, dass eine Komponente parallel zum Vektor der induzierten Spannung liegt, so ist dieser Stromvektor multipliziert mit dem Vektor der induzierten Spannung gleich der umgesetzten mechanischen Leistung. Zerlegt man den Stromvektor trigonometrisch so, dass eine Komponente parallel zum Vektor der Klemmenspannung liegt, so ist dieser Stromvektor multipliziert mit dem Vektor der Klemmenspannung gleich der vom Netz bezogenen (Motor) bzw. ans Netz abgegebenen (Generator) Leistung.

4. Ergebnisse

4.1 Die Berechnungsmodelle der untersuchten Maschinen

Die Modelle gliedern sich in drei Klassen. Pro Klasse ist jeweils eine lineare und rotierenden el. Maschine berechnet. Die Klasse der kleinsten Maschine ist die genormte Baugröße IEC 56. Die weiteren Klassen sind die Ausgangs-Leistungen von 1.5kW und 3kW. Diese Auswahlkriterien werden später im Kapitel 5 diskutiert und sind so gewählt, dass ein guter Vergleich der linearen zu den rotierenden Systemen möglich ist.

4.2 Daten der el. Maschinen in IEC Baugröße 56

Rotierende Maschine

Daten:

Umdrehungszahl an der Welle	3000 U/min
Polzahl	6
Phasenzahl	3
Klemmen- und induzierte Spannung (eine Phase)	95V _{eff} (gemessen)
Kupferwiderstand (eine Phase)	9.1 Ohm (gemessen)
Induktivität des Stators (eine Phase)	17mH (gemessen)
Eisen- und Zusatzverluste	20W
Berechneter max. Wirkungsgrad, tritt bei Nennlast auf	82%

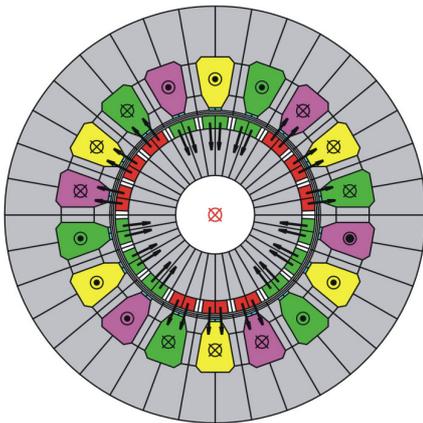


Abb 19: FEMAG Modell

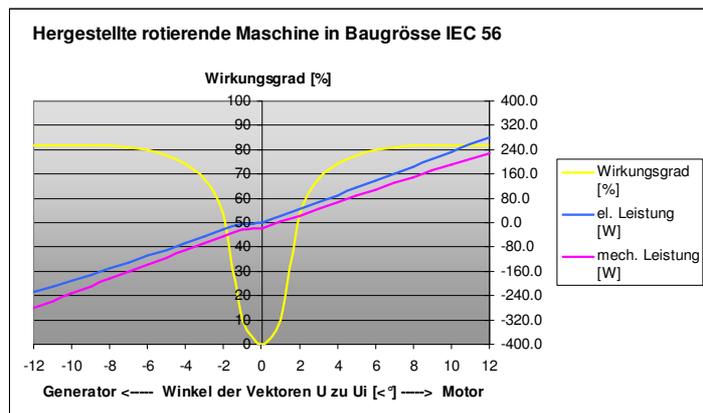


Abb 20: Diagramm mit Wirkungsgrad und Leistung.

Lineare Maschine gemäss Baugröße IEC 56

Daten:

Schwingfrequenz des Kolbens, Läufer	50 Hz
Hub	35mm
Polzahl	2
Phasenzahl	1
Klemmen- und induzierte Spannung	145Veff
Kupferwiderstand	25 Ohm
Induktivität des Stators	150 mH
Eisen- und Zusatzverluste	15W
Wirkungsgrad bei Nennlast	68%
Berechneter max. Wirkungsgrad	72%

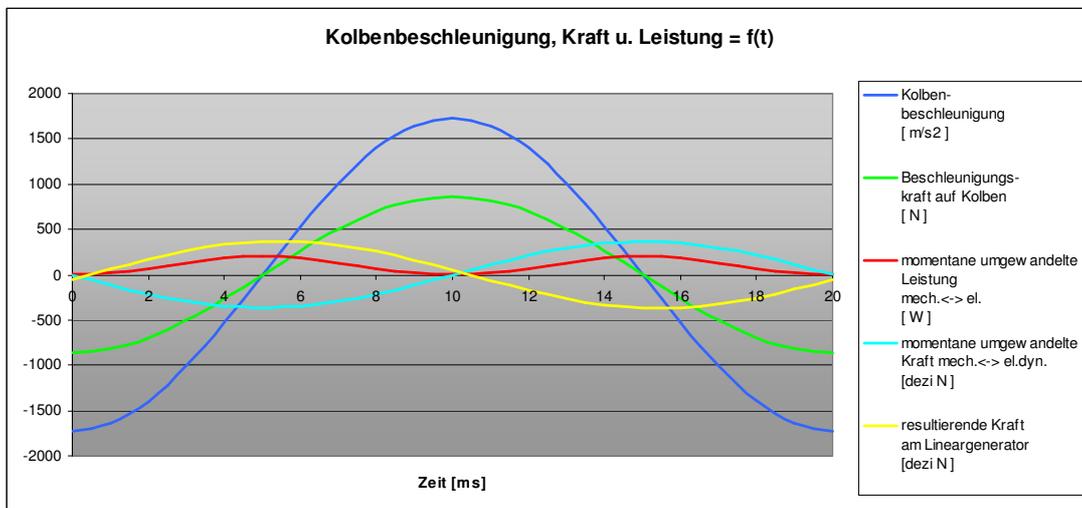


Diagramm 21: Die Kinematik der Kolbenbewegung beim Lineargenerator.

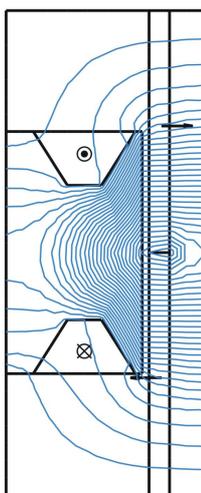


Abb 22: Feldlinienbild

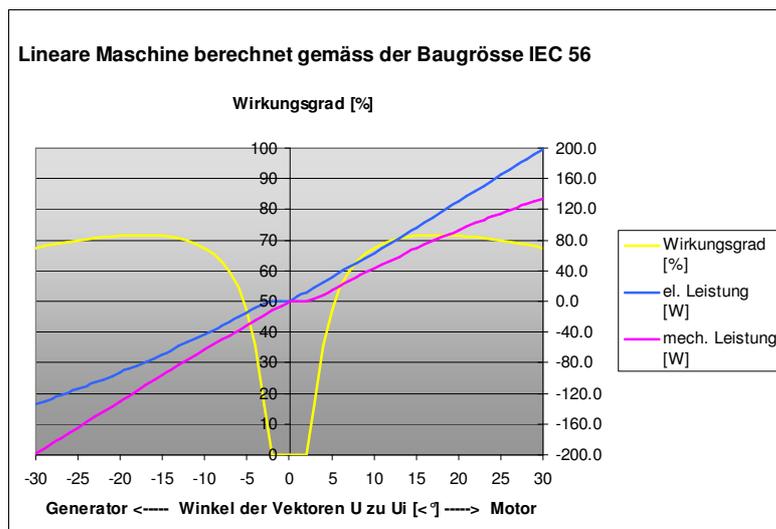


Abb 23: Diagramm mit Wirkungsgrad und Leistung.

4.3 Daten der el. Maschinen bei einer Leistung von 1.5kW

Rotierende Maschine

Daten:

Umdrehungszahl an der Welle	3000 U/min
Polzahl	4
Phasenzahl	3
Klemmen- und induzierte Spannung (eine Phase)	135.5Veff
Kupferwiderstand (eine Phase)	3 Ohm
Induktivität des Stators (eine Phase)	12 mH
Eisen- und Zusatzverluste	50W
Berechneter max. Wirkungsgrad	89%
Wirkungsgrad bei Nennlast	87%

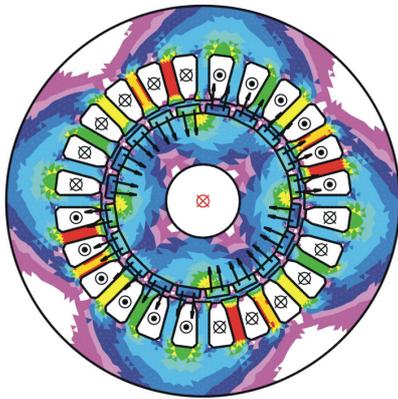


Abb 24: Bild der magn. Induktion

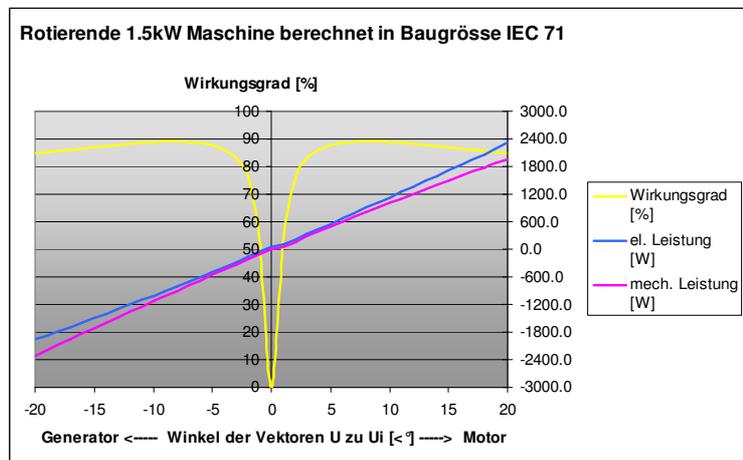


Abb 25: Diagramm mit Wirkungsgrad und Leistung

Lineare Maschine 1.5kW

Daten:

Schwingfrequenz des Kolbens, Läufer	50 Hz
Hub	gebaut für 22mm, betrieben mit 20mm
Polzahl	6
Phasenzahl	1
Klemmen- und induzierte Spannung bei 20mm Hub	215Veff
Kupferwiderstand	2.6 Ohm
Induktivität des Stators	47 mH
Eisen- und Zusatzverluste	90W
Berechneter max. Wirkungsgrad	86%
Wirkungsgrad generatorisch bei 1500W Abgabeleistung u. 20mm Hub	85%

Berechnet mit einer schwingenden Masse des Läufers von 2.5kg, ohne die Masse des Kolbens und den Federn.

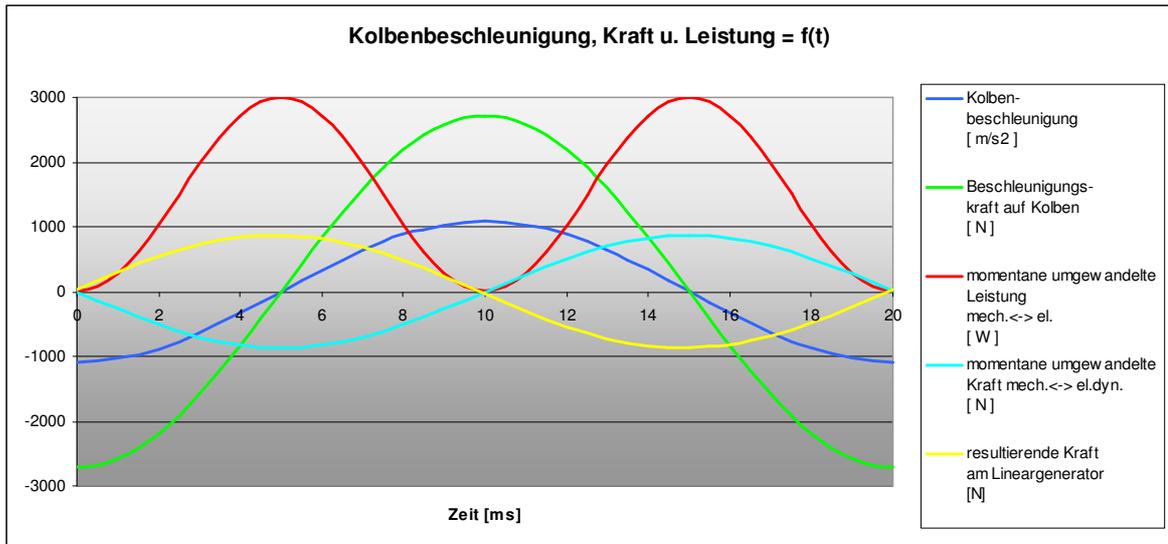


Diagramm 26: Die Kinematik der Kolbenbewegung beim 1.5kW Lineargenerator ohne die schwingende Masse des Kolbens.

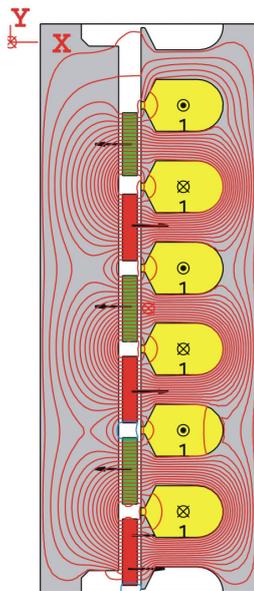


Abb 27: Modell mit Feldlinien

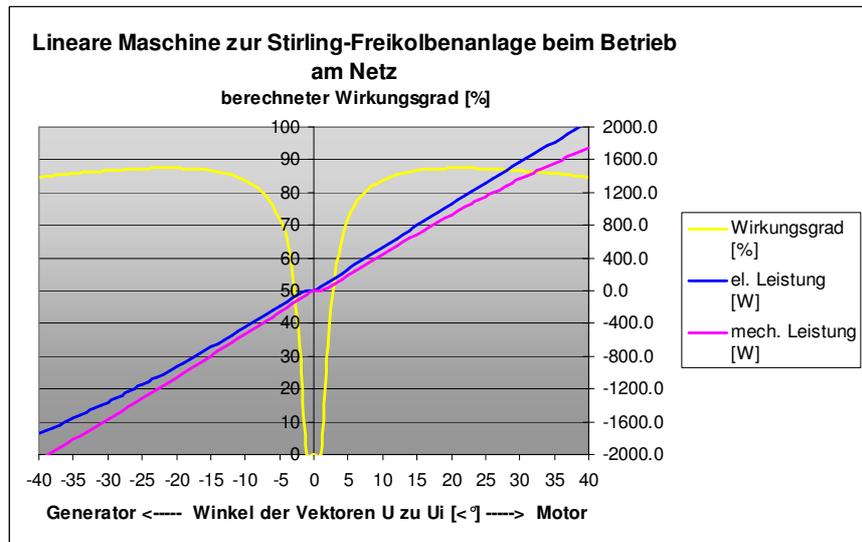


Abb 28: Diagramm mit Wirkungsgrad und Leistung

4.4 Daten der el. Maschinen bei einer Leistung von 3kW

Rotierende Maschine

Hergestellt im BFE Auftrag „Effizienter IEC Permanent-Magnet-Motor 3kW“ [4]

Daten:

Umdrehungszahl an der Welle	3000 U/min
Polzahl	6
Phasenzahl	3
Klemmen- und induzierte Spannung (eine Phase)	118Veff
Kupferwiderstand (eine Phase)	0.43 Ohm
Induktivität des Stators (eine Phase)	3.9 mH
Eisen- und Zusatzverluste	79W
Berechneter max. Wirkungsgrad, tritt bei Nennlast auf	94%

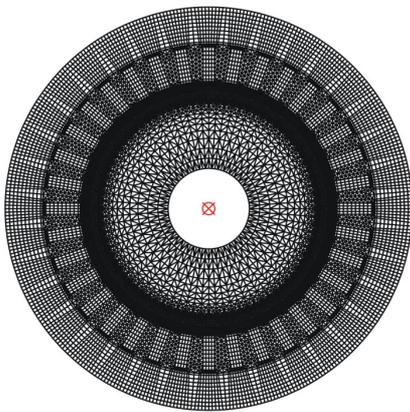


Abb 29: Finites Netz von FEMAG

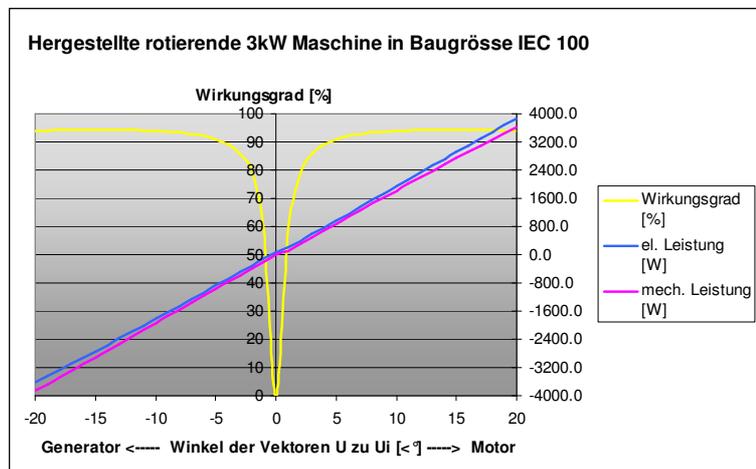


Abb 30: Diagramm mit Wirkungsgrad und Leistung

Lineare Maschine 3kW

Daten:

Schwingfrequenz des Kolbens, Läufer	17 Hz
Hub	100mm
Polzahl	10
Phasenzahl	3
Klemmen- und induzierte Spannung bei 100mm Hub (eine Phase)	203Veff
Kupferwiderstand (eine Phase)	3.2 Ohm
Induktivität des Stators (eine Phase)	15 mH
Eisen- und Zusatzverluste	105W
Berechneter max. Wirkungsgrad	87%
Wirkungsgrad bei 3000W	86%

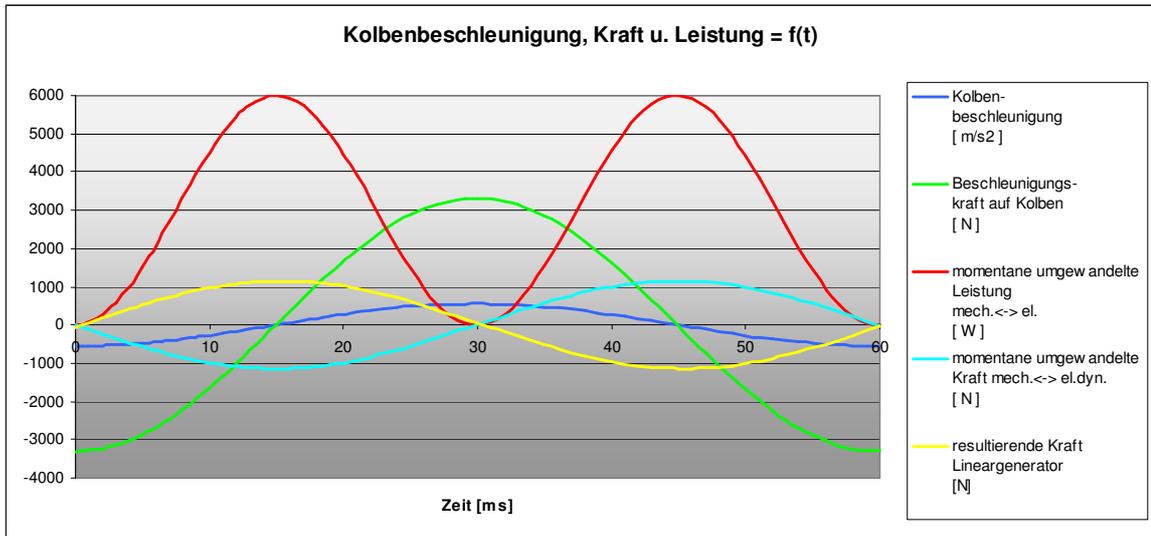


Diagramm 31: Die Kinematik der Kolbenbewegung beim 3kW Lineargenerator

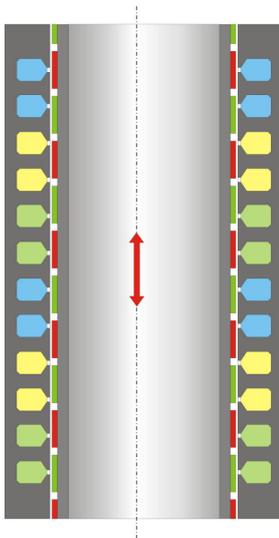


Abb 32: Schnittzeichnung

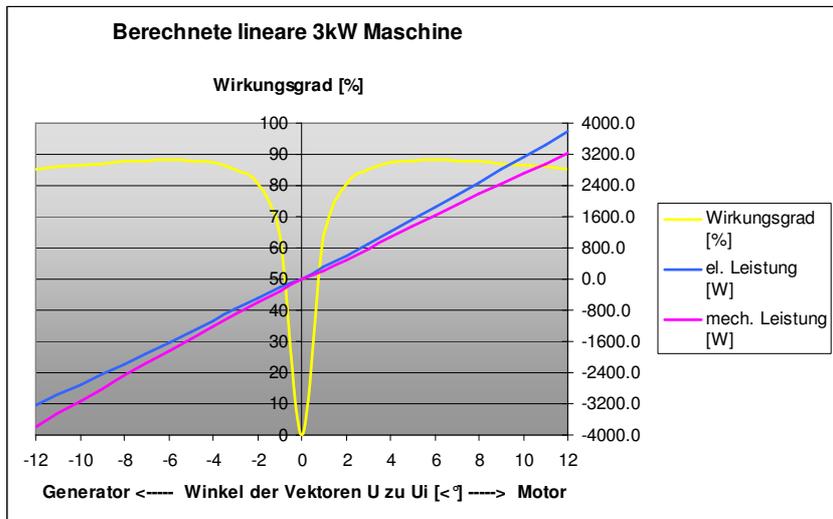


Abb 33: Diagramm mit Wirkungsgrad und Leistung

4.5 Zusammenzug aller Daten

Einteilung Art der el. Maschinen	entsprechen Baugröße IEC 56			Leistungsgröße 1.5kW			Leistungsgröße 3kW		
	rotierend PMM	linear PMM	ASM 51B	rotierend PMM	linear PMM	ASM	rotierend PMM	linear PMM	ASM
Max Wirkungsgrad [%]	82	72		89	86		94	88	
Wirkungsgrad bei Nennlast [%]	82	68	67.2	87	85	85.9	94	86	87.6
Abgabeleistung Motor [W]	230	130	120	1500	1500	1500	3000	3000	3000
Eisen Stator [kg]	0.614	0.614		2.63	13		4.3	24.6	
Eisen Rotor/Läufer [kg]	0.183	0.366		0.962			1.9	3.9	
Kupfer [kg]	0.187	0.24		1.0	2.1		1.7	4.8	
Magnet NdFeB [kg]	0.063	0.126		0.14	0.65		0.295	2.15	
Aluminium [kg]					1.82				
Gesamtgewicht [kg]	1.05	1.35	2.3	4.73	17.57	11.5	8.20	35.45	18.5
Davon schwingende Masse [kg]		0.49			2.47			6.05	
nötige Federkonstante [N/m]		50'000			250'000			65'000	
Aussendurchmesser Stator [mm]	80	80	80	106.5	200	135	150	180	150
Länge über Rotor/Läufer [mm]	35	70		70	150		70	360	
Hub [mm]		35			22			100	
el. Frequenz [Hz]	150	50	50	100	50	50	150	56	50
Schwingungen/Drehzahl [U/min]	3000	3000	2825	3000	3000	2880	3000	1000	2910
el. Phasenzahl	3	1	3	3	1	3	3	3	3
Direkter Betrieb am Stromnetz	nein	ja	ja	nein	ja	ja	nein	nein	ja
Hergestellt	ja	nein		ja	ja		ja	nein	

Hinweise: PMM -> Permanent-Magnet-Maschine

ASM -> rotierende Asynchronmaschine (Normmotor)

Die Quelle der Daten bei den PMM sind die Berechnungen in dieser Arbeit, bei den ASM Katalogdaten.

Die Gewichte aller Maschinen verstehen sich ohne Gehäuse, auch beim ASM, sowie bei den linearen Maschinen ohne Kolben und Federn.

Für den Vergleich sind die schwingenden Massen bei den linearen Maschinen ohne Kolben und Federn angegeben.

Tabelle 34: Zusammenzug aller Daten

5. Diskussion

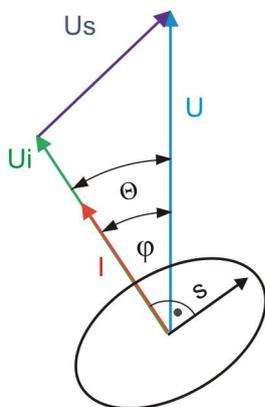
Die Modelle bei der theoretischen Untersuchung gliedern sich in drei Klassen. Die Wahl der ersten Klasse fiel auf eine Leistungsgrösse von 100 – 250W. Der Anstoss bildete ein Kühlschranksmodell bei der Hochschule Luzern mit einem aufgeschnittenen Kompressor. In diesem Kompressor befand sich ein rotierender Asynchron-Kondensator-Motor. Aus Erfahrung liegt der Wirkungsgrad beim vorliegenden Asynchron-Kondensator-Motor bei rund 60%. Ein Vergleich mit einem Linearmotor in Permanent-Magnet-Technik ist deshalb interessant. Ebenfalls ist ein rotierender Permanent-Magnet-Motor in der Baugrösse IEC 56 vorhanden und die gemessenen Daten können in die Untersuchung einfließen. Um eine Aussage zum Materialaufwand zu erhalten, ist das Gewicht des Statoreisens beim Linearmotor gleich gewählt, wie beim rotierenden Permanent-Magnet-Motor. Begründet in der gleichen magnetischen Flussänderung pro Umdrehung, bzw. Hub muss die axiale Länge des Läufers beim untersuchten Linearmotor doppelt so lang ausgeführt sein, wie der Rotor beim Permanent-Magnet-Motor.

Die Ergebnisse zeigen, dass der rotierende Permanent-Magnet-Motor mit 82% Wirkungsgrad, 230W Wellenleistung und 1kg Gewicht die besten Werte erreicht, gefolgt vom Linearmotor mit einem Wirkungsgrad von 68%, 130W Abgabeleistung und 1.35kg Gewicht. Der rotierende dreiphasige Asynchronmotor ist bezüglich Leistung und Wirkungsgrad dem Linearmotor gleichwertig, aber deutlich schwerer. Nachteilig beim rotierenden Permanent-Magnet-Motor ist die Notwendigkeit einer Elektronik für den Netzbetrieb. Der rotierende dreiphasige Asynchronmotor ist an das Drehstromnetz anzuschliessen, was für einen Kleinmotor eher nachteilig ist. Der untersuchte Linearmotor und der Asynchron-Kondensator-Motor starten und laufen am Einphasen-Stromnetz, jedoch ist die Umdrehungszahl, bzw. die Schwingfrequenz auf 50Hz fixiert.

Die zweite gewählte Klasse bezieht sich auf eine el. Abgabeleistung von 1.5kW und entstand aus der Forderung beim Stirling-Freikolben-Projekt. Die Wirkungsgrade zwischen den untersuchten Maschinen differieren nur um wenige Prozent, zu Gunsten des rotierenden Permanent-Magnet-Motors. Das Gewicht des Permanent-Magnet-Motors ist signifikant kleiner als bei den Vergleichsmaschinen. Das Diagramm 13 zeigt die Kinematik der Kolbenbewegung bei einer Schwingfrequenz von 50Hz, 22mm Hub und mit einer schwingenden Masse von 5kg, wie diese beim hergestellten Stirlingmotor zusammen mit dem Lineargenerator vorliegt. Dabei muss das Federsystem in den Endpositionen des Hubs eine hohe Kraft von 5500N aufnehmen. Die Federkonstante beträgt dann 500'000N/m. Die Hälfte der Federkonstante bringt eine magnetische Feder auf (Siehe Abb 14 und 15), mit dem Nachteil, dass für die magnetische Feder gleich viel Elektroblech und sogar die dreifache Menge an Magnetmaterial, wie für den eigentlichen Generator benötigt wird.

Bei der dritten, 3kW Klasse wurde das Argument des direkten Netzbetriebs verlassen. Der Grundgedanke dieses Schritts besteht in einer geringeren Baugrösse der Feder und der konstruktiven Vereinfachungen, wenn die Beschleunigungskräfte der schwingenden Masse abnehmen. Quadratisch mit der Reduktion der Schwingfrequenz verkleinert sich die Federkonstante. Das untersuchte Modell des Lineargenerators arbeitet mit 17Hz Schwingfrequenz, 100mm Hub und benötigt eine Federkonstante von nur noch 65'000 N/m um den Läufer bestehend aus den Magneten mit dem mitschwingenden Rückschluss abzufedern. Die Grösse der Federkonstante liegt im Bereich des kleinen untersuchten 130W Linearmotors, der jedoch mit 50 Hz schwingt. Der 3kW Linearmotor benötigt für den Betrieb zwingend eine Vektor-kontrollierte Elektronik. Die Elektronik ist im Leistungsbereich von einigen kW wirtschaftlich vertretbar und erlaubt die Verstellung der Schwingfrequenz und des Hubs. Der Linearmotor ist mit 10 Magnetpolen, zwei halben Abschlussmagneten und 12 Elektropolen (modulare Maschine) aufgebaut und wird von der Elektronik mit Drehstrom versorgt. Die Magnete sind auf ein Stahlrohr aufgeklebt, was eine einfachere Konstruktion ergibt, als der schwingende Aluminiumzylinder beim 1.5kW Linearmotor. Das Gesamtgewicht des 3kW Linearmotors ist deutlich grösser als bei den Vergleichsmotoren. Im Wirkungsgrad hebt sich mit 94% der hergestellte rotierende Permanent-Magnet-Motor [4] signifikant ab.

Der Schwerpunkt der theoretischen Untersuchungen zu den Linearmotoren, ausgeführt in Permanent-Magnet-Technik bezieht sich auf Kompressoren für Wärmepumpen und Druckluft. Es ist deshalb nötig die Arbeitsweise der beiden Komponenten zu kennen und die energetisch besten Parameter beim Zusammenspiel des Linearmotors mit dem Kompressor zu finden. Die Grundlage für den Linearmotor ist das elektrische Vektordiagramm und bei den Kompressoren das Druck-Volumen Diagramm. Das Kompetenzzentrum thermische Energiesystem & Verfahrenstechnik der Hochschule Luzern stellte umfangreiches Material zu den Kompressoren zur Verfügung. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Linearmotoren für den Betrieb am Einphasen-Stromnetz. Diese Gruppe zeigt die besten technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften für eine Realisierung am Markt. Ein direkter Netzbetrieb, ohne zusätzliche Elektronik und das Beherrschen der Konstruktionen für 50Hz mit einem Hub von einigen cm, sind bis in den Bereich um 1kW gegeben. Für die energetische Abstimmung muss der Hub einer Polteilung beim Linearmotor entsprechen und ein abgestimmtes Feder-Masse-System wie in den Diagrammen 21 u. 26 dargestellt, vorliegen. Der Läufer schwingt dann mit einer Sinusfunktion, das ist nötig, da auch die el. Vektoren des Netzes mit einer Sinusfunktion in Takt von 50Hz schwingen. Die Vektoren des Phasenstroms I und der Weg s des Läufers zeichnen in der x-y Darstellung eine Ellipse auf.



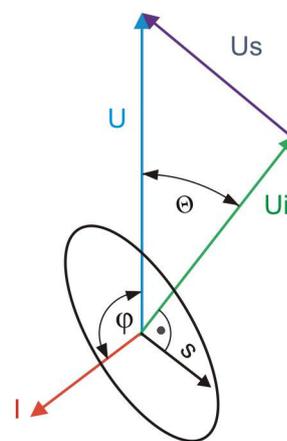
$$P = F \cdot A$$

$$F = \sum |c_u \cdot I \cdot B$$

$$U_i = \sum |c_u \cdot v \cdot B$$

$$\dot{s} = v$$

$$V = s \cdot A$$



Vektordiagramm 35: des Lineargenerators

Vektordiagramm 36: des Linearmotors

In der Mitte der beiden Diagramme sind die Formeln angegeben, welche die physikalischen Verknüpfungen des elektrischen zum thermischen System angeben. Die Bedeutung der Formelzeichen ist im Kapitel Symbole angegeben.

Abbildung 35 zeigt das Vektordiagramm des Lineargenerators (untererregter Synchrongenerator). Diese Arbeitsweise entspricht dem Betriebszustand der Stirling-Freikolbenanlage mit Resonanzrohr. Das P-V Diagramm ist ebenfalls eine Ellipse, deren Achsen orthogonal zueinander und zu den Achsen des P-V Diagramms parallel liegen. Dabei wird die maximale mechanische Leistung ins elektrische System übertragen, weil die Vektoren U_i und I phasengleich sind.

Abbildung 36 zeigt das Vektordiagramm des Linearmotors (untererregter Synchronmotor). Diese Arbeitsweise entspricht dem Betriebszustand mit einem Kompressor. Das P-V Diagramm weicht von einer Ellipse ab. Die Ellipse des elektrischen Systems kann aber durch Verändern der Größe der Achsen und des Winkels zu den Achsen in das P-V Diagramm, bzw. F-s Diagramm eingepasst werden. Es ist weiter zu achten, dass die nicht überlappenden Flächen symmetrisch und klein bleiben. Die nicht überlappenden Flächen bremsen oder beschleunigen den Kolben und führen auf der el. Seite zu unerwünschten Oberwellen, sofern die Massenträgheit des Kolbens diesen Vorgang nicht genügend glättet. Damit kann die Aussage gewagt werden, dass ein doppelt wirkender Kolbenkompressor ideal mit einem Linearmotor zusammenwirkt, nicht aber ein einfach wirkender.

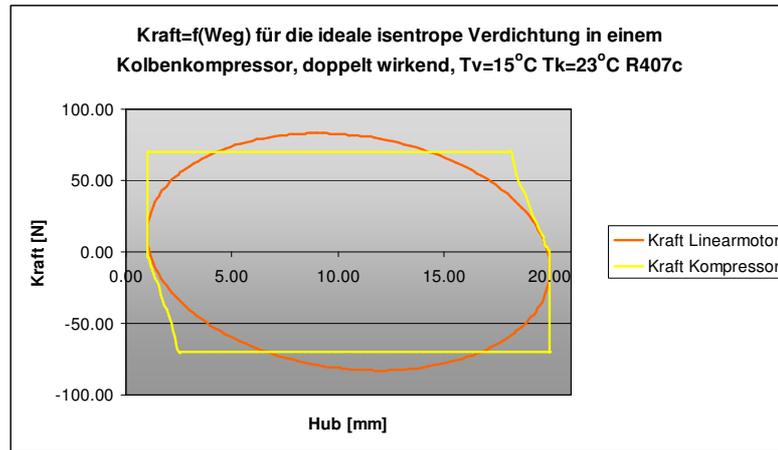


Diagramm 37 zeigt die Bahnkurve der Kraft des Linearmotors und des Kompressors einer Niedrighub-Wärmepumpe

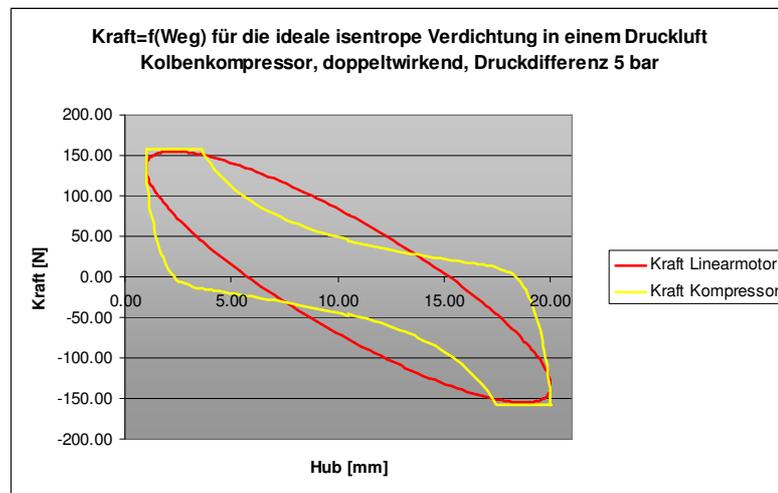


Diagramm 38 zeigt die Bahnkurve der Kraft des Linearmotors und des Druckluftkompressors.

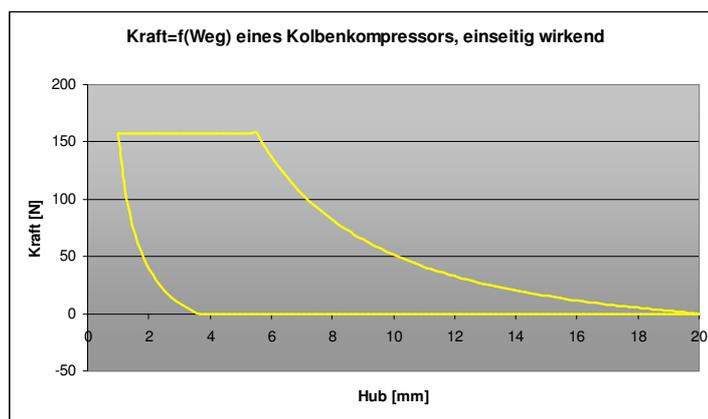


Diagramm 39: Bahnkurve eines einseitig wirkenden Kolbenkompressors. Hier lässt sich keine Symmetrie erkennen.

Die Diagramme 35 bis 38 beziehen sich auf Nennlast bei Netzbetrieb mit einer Frequenz von 50Hz. Ein Verstellen der Schwingfrequenz bei Netzbetrieb ist nicht möglich.

Bei der Stirling-Freikolbenanlage sind die starken Vibrationen noch ein Problem, welche durch einen schwingenden Kolben verursacht werden. Zum Verhindern der starken Vibrationen wäre ein Zweikolbensystem mit gegenläufigen Kolben angezeigt. Da bei Kompressoren eher einfachere Teile vorkommen, sollte dieser Vorschlag studiert werden. Der Montageaufwand der Magnete bleibt gleich. Mehraufwand entsteht bei der Herstellung der Statorwicklung. Eine Ausarbeitung eines kompletten Stators für die automatische Fertigung wäre aber angezeigt. Beim Zweikolbensystem halbiert sich die Federkonstante eines einzelnen Linearmotors bei gleich bleibendem Gesamthub im aktiven Volumen. Die sogenannte „synchronisierende Kraft der Synchronmaschine“ wirkt einem vor oder nacheilenden Kolben in einem Zweikolbensystem, bei dem beide Statorwicklungen an die gleiche Spannungsquelle angeschlossen sind, entgegen.

6. Schlussfolgerungen

Die Stirlinganlage im **kontinuierlichen Betrieb** leistet mit dem **gebauten Lineargenerator 1.3kW_{el}**. Mit thermischer Spitzenleistung werden die geforderten 1.5kW_{el} erreicht. **Der gemessene Wirkungsgrad**, vom Brennstoff zur elektrischen Abgabe **beträgt 13%**. Der Lineargenerator ist konzentrisch und kompakt aufgebaut. Die Wicklung ist so gestaltet, dass keine Wicklungsköpfe entstehen und ein hoher Anteil des Kupfers, mit hohem Füllfaktor im Eisen des Stators eingebettet ist, was Effizienz bezogen vorteilhaft ist. Die Wirtschaftlichkeit und die Aspekte der Ökologie müssen für **die magnetischen Federn** geprüft werden. Die magnetischen Federn benötigen dreimal mehr Magnetmaterial, als die Generatormagnete. Beim Verzicht der magnetischen Federn reduziert sich das Gewicht des eingesetzten Elektroblechs um die Hälfte.

In der Stirling Freikolbenanlage schwingt ein einziger Kolben. Die damit verbundenen Vibrationen führen zu unerwünschten Geräuschen. Massnahmen zur Dämpfung der Vibrationen sind angezeigt.

Das Projekt Stirling-Freikolbenanlage wird auf privater Basis, mit einem Prüfstand zur Grundlagenforschung am luftgelagerten Kolben, zur Lebensdauerberechnung der Tellerfedern, und zur Steigerung des Wirkungsgrads **weitergeführt**.

Die theoretischen Arbeiten zu den Linearmotoren für den Antrieb von Wärmepumpen und Druckluftkompressoren zeigen, dass el. Leistungen bis in den Bereich von einem kW sinnvoll sind. **Ein direkter Netzbetrieb** ohne zusätzliche Elektronik, das Beherrschen der Konstruktionen mit 50 Hz Schwingfrequenz und einem Hub von einigen cm, sind bis in den Bereich um 1kW gegeben Diese Gruppe zeigt die besten technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften für eine Realisierung am Markt. Der direkte Netzbetrieb eines Linearmotors in Permanent-Magnet-Technik ist stark zu bewerten. Rotierende Permanent-Magnet-Motoren benötigen eine Antriebselektronik. Im kleinen Leistungsbereich unter 1kW wirken sich die Kosten einer Antriebselektronik eher negativer aus als bei hohen Leistungen.

Der berechnete kleine Linearmotor mit einer el. Abgabeleistung von 130W erreicht einen Wirkungsgrad bei Nennlast von 68%, ist damit leicht besser als der drei Phasen Asynchronmotor und rund 5% besser als ein Asynchron-Kondensator-Motor. Eine signifikante Energieeinsparung bei Kühlschränken mit einem Linearantrieb ist nicht gegeben, wohl aber mit dem rotierenden Permanent-Magnet-Motor.

Der untersuchte 1.5kW Linearmotor erreicht mit 85% einem Wirkungsgrad gemäss der Effizienzklasse EFF1 bei den Normmotoren, ist aber rund 6kg schwerer als der Vergleichs-Normmotor Klasse EFF1.

Die Berechnungen beim **3kW Linearmotor** zeigen, dass ein direkter Netzbetrieb, begründet in den grossen schwingenden Massen kaum mehr zu beherrschen ist. **Eine Abweichung von der Netzfrequenz ist gegeben.** Erreichen Linearmotoren Leistungen über einige kW, so ist der Wechsel zu einem Dreiphasen-System mit einer Antriebselektronik angezeigt. Die Schwingfrequenz ist verstellbar und kleiner als 50Hz.

Die sehr hohen Wirkungsgrade der rotierenden Permanent-Magnet-Motoren werden bei allen geprüften Einheiten nicht erreicht.

Diese Arbeit beschreibt die **Grundlagen**, wie ein **Linearmotor für den direkten Netzbetrieb** elektrisch auszulegen ist und **optimal mit dem Druck-Volumen-Diagramm des Kompressors abgestimmt wird.** Diese Grundlagen erlauben auch die energetischen Berechnungen und somit die Optimierung auf beste Effizienz. Sie zeigen auf, dass doppelnd wirkende Kompressoren einzusetzen sind, nicht aber einfach wirkende. Die beschriebenen Grundlagen mit den Vektordiagrammen zu den Linearmotoren beziehen sich auf den Netzbetrieb bei Nennlast. In einer weiterführenden Arbeit müsste der Teillastbereich geklärt werden. Wie ist der Verlauf der Effizienz bei Teillast? Kann der Linearmotor so ausgelegt werden, dass bei wechselnder Last der Hub konstant bleibt. Gibt es dabei die Möglichkeit einer Selbstregelung, also würde sich mit zunehmendem Kompressordruck das P-V Diagramm mit eingezeichneter elektrischer Ellipse symmetrisch verschieben? Welche Massnahmen sind für das Starten am Stromnetz zu treffen und welche in Störfall z.B. unerwünschter Netzuunterbruch?

Die konstruktiven Vorschläge beinhalten das **Dämpfen der Vibrationen** mit einem Zweikolbensystem mit gegenläufigen Kolben. Die Ausarbeitung eines berührungsfreien Kolbens mit Spaltdichtung, ein pneumatisches Volumen zum Masse-Feder-System und die **hermetische Kapselung** des Läufers, nach der bewährten Technik bei den Heizungspumpen mit einem Spaltrohr werden ebenfalls vorgeschlagen.

Das Heizen und Kühlen von Gebäuden sind Prozesse mit hohem Exergieverbrauch. Insbesondere die Bedeutung der Gebäudekühlung wird in Zukunft massiv zunehmen. Effizienzsteigerungen beim Heizen und Kühlen dürfen jedoch keine Verschlechterung der Behaglichkeit zur Folge haben; es ist deshalb eine ganzheitlich optimale Lösung bestehend aus Architektur, Bauphysik und Gebäudetechnik anzustreben. Die Leistungszahl (Coefficient of System Performance, COSP) bzw. Jahresarbeitszahl (JAZ) von Wärmepumpen und Kältemaschinen ist stark vom inneren Temperaturhub abhängig (Temperaturdifferenz zwischen Verdampfung und Kondensation). Für die Gebäudeheizung genügt in vielen Anwendungen ein Temperaturhub von 20–30 K. Bei der Gebäudekühlung mit optimierten Gesamtsystemen wird ein Hub über 15 K nie überschritten. Das Potenzial für hocheffiziente Heiz- und Kühlsysteme kann heute nicht genutzt werden, da Standard-Anlagen und die verwendeten Kompressoren für Temperaturhübe von 30–60 K gebaut sind. In Standard-Anlagen findet eine radikale Exergievernichtung statt. Die äusseren Exergieverluste aufgrund eines unnötig grossen Hubes sind dabei oftmals grösser als die inneren Exergieverluste der Wärmepumpe bzw. Kältemaschine. Eine unabdingbare Voraussetzung für kleine innere Temperaturhübe sind Heiz- und Kühlsysteme mit Temperaturniveaus nahe an der Raumtemperatur (Pumpenwarmwasser < 28 °C, Pumpenkaltwasser > 18 °C). Speziell bei der Kühlung können durch Kombination von Niedrighub-Kältemaschinen mit optimierten Free-Cooling-Prozessen sehr hohe System Jahresarbeitszahlen (JAZ > 20) erreicht werden [5]. **Mit der Entwicklung von Niedrighub-Wärmepumpen und -Kältemaschinen kann das Potenzial des vorhandenen kleinen Temperaturhubes ausgenutzt und eine markante Effizienzsteigerung erreicht werden.** Zurzeit stehen keine geeigneten Anlagen und insbesondere keine Kompressoren für einen kleinen Temperaturhub bzw. für ein kleines Druckverhältnis zur Verfügung (eine Ausnahme bilden dabei die Turbokompressoren, die jedoch nur für grössere Leistungen einsetzbar sind). **Mit der Entwicklung von linear angetriebenen Kompressoren kann dieses Problem überwunden und das Effizienzsteigerungspotenzial ausgeschöpft werden.** [5]

In einer **weiterführenden Arbeit** wird **vorgeschlagen**, eine **linear angetriebene Niedrighub-Wärmepumpe zu realisieren**, die **Funktion** und die **Effizienz nachzuweisen**, wobei die konstruktiven Vorschläge mit dem Schwerpunkt der Dämpfung der Vibrationen und die Klärung der offenen Punkte zum Netzbetrieb einfließen sollen.

Symbolverzeichnis, Begriffe, Formelzeichen

Asynchronmotor und Normmotor sind gleich bedeutend.

NdFeB Magnete sind Permanent-Magnete hergestellt aus den Elementen Neodym / Eisen / Bor.

FEMAG ist ein Berechnungsprogramm nach der finiten Element Methode für el. Maschinen entwickelt an der ETH Zürich.

P-V Diagramm ist die Darstellung des Drucks und des Volumens im Hubraum des Kolbenkompressors.

F-s Diagramm ist die Darstellung der Kolbenkraft und des vom Kolben zurückgelegten Wegs im Hubraum des Kolbenkompressors.

U_i : Die el. Spannung, welche durch die bewegten Magnete in der Spule entsteht	[V]
U : El. Klemmenspannung an die der Linearmotor / Lineargenerator angeschlossen ist	[V]
U_s : Spannungsvektor zwischen U und U_i	[V]
I : Phasenstrom	[A]
Θ : Winkel zwischen U_i und U	[°]
φ : Winkel zwischen U und I	[°]
B : Magnetische Induktion	[T]
$\sum l_{cu}$: Länge des Kupferdrahts der Statorwicklung, der in Magnetfeld mit der Induktion B liegt	[m]
P : Druck	[N/m ²]
F : Kraft	[N]
A : Kolbenfläche	[m ²]
V : Volumen	[m ³]
v : Geschwindigkeit des Kolbens	[m/s]
t : Zeit	[s]
s : Vom Kolben zurückgelegter Weg	[m]
$\dot{s} = \frac{ds}{dt} = v$	

Referenzen

- [1] BFE Studie: „**Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren**“. Erstellt durch Circle Motor AG, Hochschulen Luzern und Wallis. www.electricity-research.ch
- [2] J.P.Budliger: „**Einfacher Stirling-Motor für die Kraft-Wärme-Kopplung in kleinen Wohngebäuden**“ ; Proceedings des Europäischen Stirling-Forums, Osnabrück.
- [3] J.B. Budliger: „**Supercharged Stirling engine with one single mechanical piston**“; Conference Proceeding of the 10th International Stirling Engine Conference, Osnabrück
- [4] BFE Arbeit: „**Effizienter IEC Permanent-Magnet-Motor 3kW**“. Erstellt durch Circle Motor AG, Hochschulen Luzern und Wallis. www.electricity-research.ch
- [5] B. Wellig, B. Kegel, M. Meier: Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Klimakälteanlagen durch Ausnützung eines kleinen Temperaturhubes. BFE-Forschungsbericht, Mai 2006.

Abbildungen und Fotos 1 – 36 / 40 u. 41 stammen von CIRCLE MOTOR AG.

Abbildungen und Fotos 37 – 39 stammen von Kompetenzzentrum Thermische Energiesystem & Verfahrenstechnik der Hochschule Luzern.

Zusammenarbeit im Stirling-Freikolben-Projekt:

Rudolf Schmid AG, Maschinenbau, Thörishaus, Rolf Schmid dipl. Masch. Ing. HTL

U.K. Steiner dipl. Arch. Zollikerberg

Stiftung Esmog, J. Peter dipl. El. Ing. HTL Effretikon

J.P. Budliger dipl. Masch. Ing.

Anhang

Berechnete Belastung und Wirkungsgrad des 1.5 kW Lineargenerators

an ohmscher Last. induzierte Spannung > Klemmenspannung

Hub	20 mm	
Elektrische Frequenz	50.00 Hz	
Werte einphasig:		
Klemmenspannung	138.00 V	
Induzierte Spannung	215.00 V	
Kupferwiderstand	2.60 Ohm	
Induktivität	0.04 H	
Verluste	90.00 W	Eisen = 70W und Zusatzverluste 20W
Induktiver Widerstand	13.51 Ohm	
synchrone Reaktanz	13.76 Ohm	
Hilfswert	1.38	

rad	Winkel Θ [$^\circ$]	el. Ausgangs- leistung [W]	mech. Eingangs- Leistung [W]	Wirkungsgrad [%]	Strom [A]	
-0.86	-49	-1514.3	-1966.3	77	11.8	
-0.84	-48	-1495.2	-1936.5	77	11.6	
-0.82	-47	-1475.4	-1906.2	77	11.4	
-0.80	-46	-1455.2	-1875.6	78	11.3	
-0.79	-45	-1434.3	-1844.6	78	11.1	
-0.77	-44	-1413.0	-1813.3	78	10.9	
-0.75	-43	-1391.0	-1781.6	78	10.8	
-0.73	-42	-1368.6	-1749.5	78	10.6	
-0.72	-41	-1345.6	-1717.1	78	10.4	
-0.70	-40	-1322.1	-1684.4	78	10.2	
-0.68	-39	-1298.1	-1651.3	79	10.1	
-0.66	-38	-1273.6	-1618.0	79	9.9	
-0.65	-37	-1248.6	-1584.3	79	9.7	entspricht gemessenem Punkt
-0.63	-36	-1223.2	-1550.4	79	9.6	
-0.61	-35	-1197.2	-1516.1	79	9.4	
-0.59	-34	-1170.8	-1481.6	79	9.2	
-0.58	-33	-1143.9	-1446.9	79	9.1	
-0.56	-32	-1116.5	-1411.9	79	8.9	
-0.54	-31	-1088.7	-1376.6	79	8.7	
-0.52	-30	-1060.5	-1341.2	79	8.6	
-0.51	-29	-1031.8	-1305.5	79	8.4	
-0.49	-28	-1002.7	-1269.6	79	8.2	

Tabelle 40: Auszug aus dem Berechnungsprogramm

Berechnete Belastung und Wirkungsgrad des 1.5 kW Lineargenerators

Bei Netzkoppelung: induzierte Spannung wenig kleiner als Klemmenspannung

Hub	20 mm	
Elektrische Frequenz	50.00 Hz	
Werte einphasig:		
Klemmenspannung	230.00 V	
Induzierte Spannung	215.00 V	
Kupferwiderstand	2.60 Ohm	
Induktivität	0.04 H	
Verluste	90.00 W	Eisen = 70W und Zusatzverluste 20W
Induktiver Widerstand	13.51 Ohm	
synchrone Reaktanz	13.76 Ohm	
Hilfswert	1.38	

rad	Winkel Θ [$^{\circ}$]	el. Ausgangs- leistung [W]	mech.Eingangs- Leistung [W]	Wirkungsgrad [%]	Strom [A]	
-0.52	-30	-1536.7	-1811.9	85	8.4	Nennlast
-0.51	-29	-1488.9	-1752.4	85	8.2	
-0.49	-28	-1440.4	-1692.6	85	7.9	
-0.47	-27	-1391.3	-1632.5	85	7.6	
-0.45	-26	-1341.4	-1572.1	85	7.4	
-0.44	-25	-1290.9	-1511.3	85	7.1	
-0.42	-24	-1239.8	-1450.4	85	6.8	
-0.40	-23	-1188.0	-1389.1	86	6.5	
-0.38	-22	-1135.6	-1327.7	86	6.3	
-0.37	-21	-1082.6	-1266.0	86	6.0	
-0.35	-20	-1029.1	-1204.1	85	5.7	

Tabelle 41: Auszug aus dem Berechnungsprogramm