



EFFIZIENTER LINEARGENERATOR / LINEARMOTOR FÜR KOLBENMASCHINE

Jahresbericht 2007

Autor und Koautoren	Markus Lindegger dipl.el.Ing HTL
beauftragte Institution	Circle Motor AG
Adresse	Tannackerstr. 25
Telefon, E-mail, Internetadresse	031 952 52 52, info@circlemotor.ch , www.circlemotor.com
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100915 / 152732
BFE-Projektleiter	Roland Brüniger
Dauer des Projekts (von – bis)	10.6.07 bis 31.5.08
Datum	29.11.07

ZUSAMMENFASSUNG

Arbeitet ein Kolben mit einer el. Maschine zusammen, liegt es eigentlich nahe, die el. Maschine auch linear auszuführen und die Nachteile eines Kurbeltriebs zu umgehen. Die Idee einen Lineargenerator / Linearmotor für eine Kolbenmaschine zu entwerfen, entstand aus einem Auftrag zu einem Stirling Freikolbenmotor. Als Anwendungen dieser linearen Systeme sehen wir: - Linearantriebe für Wärmepumpen – Druckluftkompressoren - Blockheizkraftwerke mit regenerativen Energien, vorzugsweise Stirling Freikolbensysteme.

Der Auftrag im 2007 besteht in der Berechnung, Herstellung eines 1.5kW Lineargenerators, dem Einbau in die Stirlinganlage und der Inbetriebnahme. Hauptanforderungen sind dabei eine kompakte, einfache Bauweise, sowie ein hoher Wirkungsgrad für die Umwandlung mechanischer in elektrische Energie.

Mit der gewählten Konstruktion des Lineargenerators / Linearmotors wurde beim Stator eine kompakte Formgebung erreicht. Die Wicklung ist so gestaltet, dass keine Wicklungsköpfe entstehen und ein hoher Anteil des Kupfers im Eisen eingebettet ist, was effizienzbezogene Vorteile nach sich zieht. Positiv ist auch der grössere Füllfaktor der Nut mit Kupfer, der höher liegt, als der angenommene Erfahrungswert.

Bei der ersten Inbetriebnahme des Lineargenerators in der Stirlinganlage lösten sich zwei der 18 Statorstege, was die Zerstörung der Wicklung nach sich zog. Der neu gewickelte Stator musste deshalb mit Epoxy Harz vergossen werden um eine Unempfindlichkeit gegen Erschütterungen zu erreichen. Nach der erneuten Inbetriebnahme Ende November erreichte der Generator in der Stirlinganlage eine el. Leistungsabgabe von 1000W bei 50Hz .

Beim Lineargenerator unterstützen berührungsfreie, magnetische Federn, das auf 50Hz eingestellte Masse-Federsystems des Stirling. Die Wirtschaftlichkeit und die Aspekte der Ökologie müssen bezüglich den magnetischen Federn geprüft werden. Die magnetischen Federn benötigen dreimal mehr Magnetmaterial, als die Generatormagnete. Zudem wird beim Verzicht auf die magnetischen Federn, das Gewicht des eingesetzten Elektroblechs halbiert.

Einleitung

Bei Kolbenmaschinen, wie Pumpen, Kompressoren oder Verbrennungsmaschinen muss der Kolben, bei seiner oszillierenden Bewegung, jeweils mechanische Beschleunigungsarbeit aufnehmen oder abgeben. Die Schwungmasse eines Kurbeltriebs dient in eleganter Weise als Zwischenspeicher dieser Beschleunigungsarbeit. Der Kurbeltrieb ist aber an rotierende Systeme gebunden. Nachteilig für lange, wartungsfreie Betriebszeiten, sind die auftretenden Seitenkräfte beim Kurbeltrieb und die Reibung an Dichtungsringen und in den Lagern. Bei bestimmten Anwendungen führen die Schmierstoffe (Fette, Öle) zu Nachteilen oder zu konstruktivem Mehraufwand.

Arbeitet ein Kolben mit einer el. Maschine zusammen, liegt es eigentlich nahe, die el. Maschine auch linear auszuführen und die beschriebenen Nachteile des Kurbeltriebs zu umgehen.

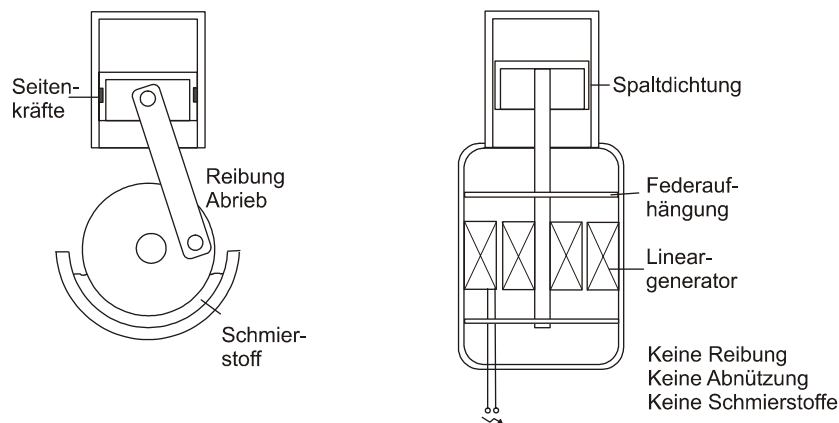


Abb1 Kurbeltrieb

Abb2 lineares System

Beim linearen System ersetzt eine Federaufhängung die mech. Lager des Kurbeltriebs. Die axiale Federkraft lässt den Kolben und den Läufer des Lineargenerators mit einem bestimmten Hub oszillieren. Der grosse Vorteil des linearen Systems liegt im Fehlen von Seitenkräften, keiner Abnutzung und einer berührungsfrei arbeitenden Spaltdichtung beim Kolben. Somit kann auch auf Schmierstoffe verzichtet werden. Ebenfalls können die linearen Systeme auch hermetisch gekapselt sein.

Aus dem Bereich der el. Maschinen ist bekannt, dass sich mit den Magnetwerkstoffen aus Seltenerdmetallen, vor allem *Neodym-Eisen-Bor*, in el. Maschinen starke Magnetfelder aufbauen lassen. Deshalb ist bei el. Maschinen, mit Permanent-Magneten eine hohe Effizienz gegeben. NdFeB Magnete sind zudem preiswert erhältlich. Beachten Sie dazu auch die BFE Studie „ Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren“. [1]

Bereits ausgeführte Berechnungen des Magnetkreises und ein erstes gebautes Funktionsmuster zeigten, dass sich mit diesen NdFeB Magneten auch hohe Federkräfte erzeugen lassen, wenn sich die Magnete relativ zueinander bewegen. Mit berührungsfreien magn. Federn werden die mech. Federn reduziert. Zudem lassen sich die Feldlinien der magn. Federn auch zur Stromerzeugung nutzen.

Als Anwendungen dieser linearen Systeme sehen wir:

- **Linearantriebe für Wärmepumpen mit der Möglichkeit eines ölfreien Betriebs, variable Leistung, Einzelpulse.**
- **Druckluftkompressoren**
- **Blockheizkraftwerke mit regenerativen Energien. Vorzugsweise Stirling Freikolbensysteme.**

Ausgangslage

Die Idee einen Lineargenerator / Linearmotor zu entwerfen, entstand in einem Auftrag zu einem Stirling Freikolbenmotor. Der untersuchte **Resonanzstirling** stellt eine thermodynamische Maschine extrem einfachen und preiswerten Aufbaus dar. Er umfasst einen einzigen mech. Kolben, der das Arbeitsgas periodisch zwischen dem heissen und kalten Volumen durch den Regenerator verschiebt. Infolge der unterschiedlichen Temperaturen in den beiden Volumen entstehen Druckänderungen, die phasengleich mit der Volumenänderung erfolgt. Durch diesen Antrieb wird in einem, am kalten Volumen angeschlossenes Resonanzrohr eine stehende Druckwelle aufgebaut, die der primären Druckwelle um 90° nachläuft. Diese stehende Druckwelle wirkt sich ebenfalls auf das Arbeitsgas im Stirlingteil aus. Da diese zur Volumenänderung orthogonal steht wird ein Arbeitsumsatz ermöglicht. Der Arbeitsprozess entspricht somit jenem des traditionellen Stirling-Zyklus. Dieses Konzept wurde in wichtigen Ländern zum Patent angemeldet. Vertiefte technische Beschreibungen liegen in Publikationen vor [2 /3].

Die gebaute **Freikolben-Stirlinganlage** ist auf 1500W el. Leistung dimensioniert. Überrascht hat uns der stabile, einwandfreie und leise Betrieb dieser Anlage. Ein gekaufter amerikanischer 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. Es zeigte sich bald, dass mech. Federn alleine recht grosse Abmessungen erreichen. Auf der Suche nach Lösungsansätzen fanden wir die „magnetische Feder“.

In Gesprächen mit Personen, die am Stirlingmotor interessiert sind, wurde oft vorgeschlagen, den Lineargenerator auch als Linearmotor für den Antrieb von Wärmepumpen zu testen. Die nächste Entwicklungsphase beim Stirling-Freikolbenmotor bietet die ideale Gelegenheit auch lineare el. Maschinen vertieft zu untersuchen.

Bedeutung des Projekts

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

Effiziente el. Antriebe für Wärmepumpen und Druckluftkompressoren gehören zum Forschungskonzept des BFE. **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.

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 die mech. Energie in Netzspannung 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 Abnützung 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 der Hochspannungsleitungen verbrauchen ca 5% des zu transportierenden Stroms)

Projektziele

Das Projekt des Baus 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 Aufgabe im 2007, im laufenden BFE 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, sowie ein hoher Wirkungsgrad für die Umwandlung mechanischer in elektrische Energie.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die Berechnung und Optimierung des Lineargenerators erfolgte in einem finiten Element Programm. (FEMAG). Die Daten dazu sind im Anhang aufgeführt. [9/10/11]

Aus den Vorarbeiten der letzten 2 Jahren zeigte sich, dass eine **konzentrische Anordnung der Spulen und der Permanent-Magnete** für den Bau des Lineargenerators, bezüglich der Herstellung sinnvoll ist. Der Lineargenerator wird von innen nach aussen montiert. Ein zentrales Aluteil trägt 18 Statorstege mit 6 Nuten. Vorteilhaft ist die Fertigung der Wicklung durch einfaches einwickeln der Kupferdrähte in die Nuten. Ebenfalls entstehen keine Wicklungsköpfe und ein hoher Anteil des im Eisen eingebetteten Kupfer, was effizienzbezogene Vorteile nach sich zieht.



Abb 3: Kompakter Stator mit Wicklung



Abb 4: Stator in Epoxyd vergossen

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

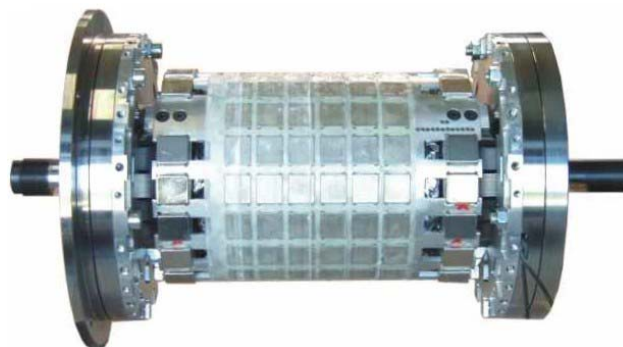


Abb 5: Läufer aus Aluminium mit eingelegten Magneten und den beiden Tellerfedern an jedem Ende

Über diesen 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. Ganz aussen schliessen weitere 18 Stege den magnetischen Kreis.(Abb 6)



Abb 6: Lineargenerator auf dem Prüfstand angetrieben über ein Rhomben-Zahnriemengetriebe.

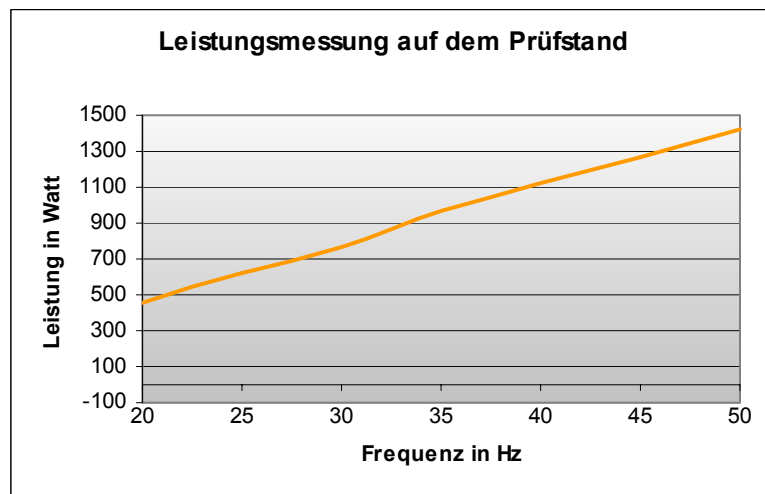


Abb 7: Abgabeleistung des Lineargenerators. Ab 40 Hz sind die Punkte berechnet, da der Prüfstand durch Unwucht, verursacht durch das Getriebe, stark schwingte.

Zur Bestimmung der umgesetzten Leistung aus dem *P-V Diagramm* des Stirlingmotors muss ein **Wegmesssensor** am Lineargenerator angebracht sein. Ein Laser - Wegmesser, angebracht im Druckraum der Anlage, hielt dem Druck nicht stand. Realisiert wurde ein linearer Encoder, wie auch rotativ bekannt, mit Index zum Lesen der Nullstellung und einem A und B Kanal. Der Encoder ist mit kleinen Stabmagneten, eingelegt in den Läufer aufgebaut. Hallsensoren tasten die Stabmagnete ab und wandeln die Positionssignale in el. Impulse um.

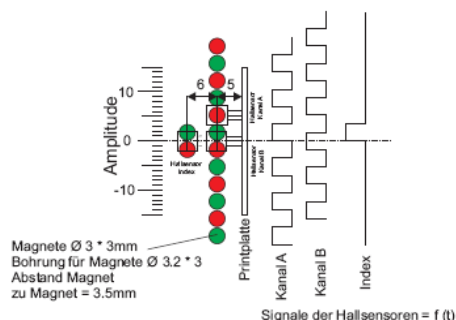


Abb 8: Darstellung des Wegmesssystem des Lineargenerators, eingebaut im Druckraum

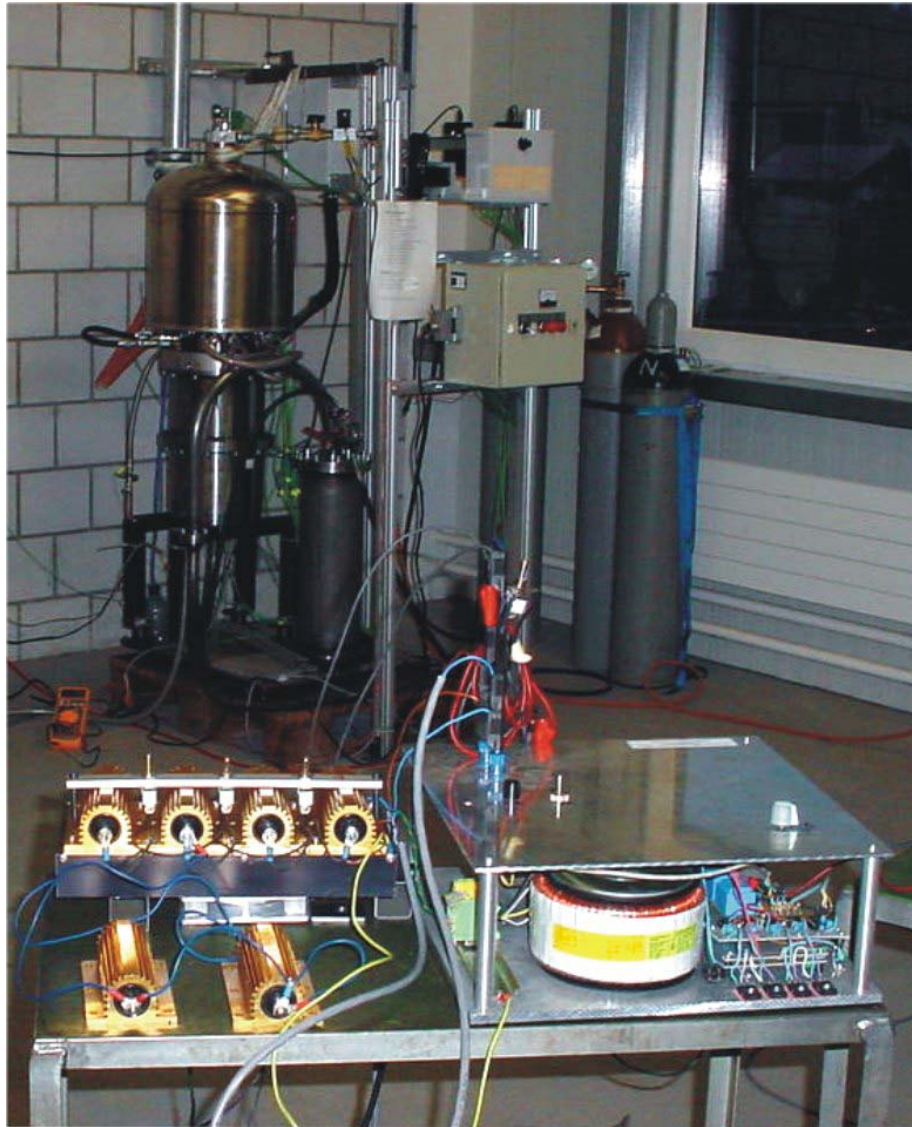


Abb 8: zeigt die gesamte Stirlinganlage.

Im Vordergrund ist die Anrege-Elektronik abgebildet, welche zum einstellen der **Resonanzfrequenz** beim starten benötigt wird. Die Lastwiderstände nehmen die abgegebene Leistung des Lineargenerators auf. Der Lineargenerator ist im Druckgefäß eingebaut. (Abb 8: Hintergrund Mitte links, kleiner Durchmesser des Druckgefäß)

Gewichtstabelle des Lineargenerators

Elektroblech der 18 Statorbleche	13.4	kg
Elektroblech der 18 Jochstege	13	kg
Alu Zentralkörper	1.3	kg
Alu Läufer	0.52	kg
Kupfer der Wicklung	2.1	kg
Magnetmaterial Federn	2	kg
Magnetmaterial Generator	0.65	kg

Nationale Zusammenarbeit

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.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Mit der gewählten Konstruktion des Lineargenerators / Linearmotors wurde beim Stator eine **kompakte Formgebung** erreicht. Die Wicklung ist so gestaltet, dass **keine Wicklungsköpfe** entstehen und ein hoher Anteil des Kupfers im Eisen eingebettet ist, was **effizienzbezogene Vorteile** nach sich zieht. Positiv ist auch der **grössere Füllfaktor** der Nut mit Kupfer, der höher liegt als der angenommene Erfahrungswert.

Bei der ersten Inbetriebnahme des Lineargenerators in der Stirlinganlage lösten sich zwei der 18 Statorstege, was die Zerstörung der Wicklung nach sich zog. Der **neu gewickelte Stator** wurde deshalb mit **Epoxy Harz vergossen** um eine Unempfindlichkeit gegen Erschütterungen zu erreichen. Nach der erneuten Inbetriebnahme Ende November erreichte der Generator in der Stirlinganlage eine el. **Leistungsabgabe von 1000W bei 50Hz**.

Die **Wirtschaftlichkeit und die Aspekte der Ökologie** müssen bezüglich **den magnetischen Federn geprüft** werden. Die magnetischen Federn benötigen dreimal mehr Magnetmaterial, als die Generatormagnete. Zudem wird beim Verzicht auf die magnetischen Federn, das Gewicht des eingesetzten Elektrolechs halbiert.

Im nächsten Jahr werden Versuchsreihen gefahren, um die abgegebene Leistung zu erhöhen. Ebenfalls stehen die bereits, für 2008, geplanten Entwicklungsarbeiten an: den Wirkungsgrad des Lineargenerators zu bestimmen. An Hand der gemessenen Daten und der Anpassung des Maschinenmodells im *FEMAG* theoretische Untersuchungen zum Motorbetrieb durchzuführen. Die Daten des Linearmotors mit bereits vorhandenen Daten zu rotierenden el. Maschinen zu vergleichen und zu bewerten.

Referenzen

- [1] BFE Studie: „**Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren**“. Erstellt durch Circle Motor AG, Fachhochschulen 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

Alle Abbildungen und Fotos stammen von den Projektpartnern

Anhang

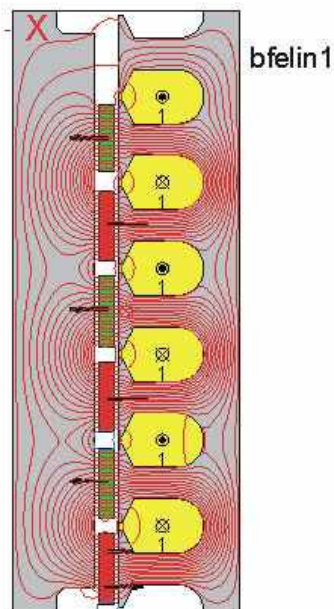


Abb 9: Feldlinienbild im Generatorteil

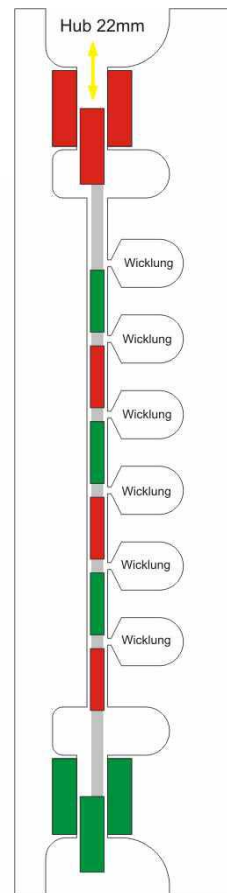


Abb 10: Schnitt durch den aktiven Teil

Speed.....	[m/s]	2	Ld.....	[H]	0.012
Force.....	[N]	-814.0	Lq.....	[H]	0.039
Term. Voltage.....	[V]	174.9	No-Load flux.....	[Vs]	0.645
Mach. Voltage.....	[V]	174.9	Resistance Ra.....	[Ohm]	2
Current.....	[A]	-8.49			
Power.....	[kW]	-1.48			
cos phi.....		1.000			
Angle I vs. Up.....	[Degr]	285			

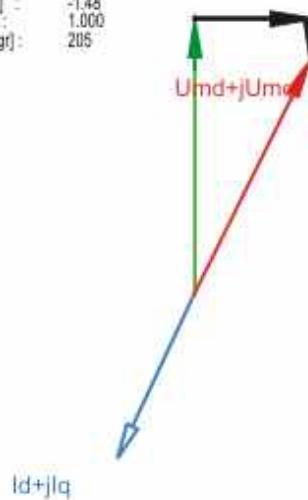


Abb 11: Daten zum Lineargenerator bei Nennlast, im FEMAG berechnet. Bei Nennlast wird ein Wirkungsgrad von 82%, der max Wirkungsgrad wird mit 85% erwartet.