

Janis Sebastian Godzieba; Wolfgang Schulz-Nigmann

Wirtschaftlichkeitsuntersuchung eines thermomagnetischen Generators

Potentialanalyse einer in der Forschung befindlichen Technologie zur Verstromung von Abwärme



WI-[Reports]

– Arbeitspapiere des Fachbereichs Wirtschaftsingenieurwesen –

Nr. 006

ISSN: 2568-0803

Impressum

Reihe: WI-[Reports] – Arbeitspapiere Wirtschaftsingenieurwesen

Herausgeber: Fachbereich 14 der THM

vertreten durch den

Herausgeberbeirat: Prof. Dr. rer. oec. Claus Hüselmann
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schulz-Nigmann
THM Technische Hochschule Mittelhessen
Fachbereich 14 Wirtschaftsingenieurwesen
Wilhelm-Leuschner-Straße 13
61169 Friedberg
<https://www.thm.de/wi/>

Die Arbeitspapiere der Reihe WI-[Reports] sind einschließlich aller Abbildungen urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urhebergesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmung, Einspeicherung sowie Be- und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Copyright FB 14 THM

WI-[Report] Nr. 006

- Autoren:** Janis Sebastian Godzieba; Wolfgang Schulz-Nigmann
- Titel:** Wirtschaftlichkeitsuntersuchung eines thermomagnetischen Generators
Potentialanalyse einer in der Forschung befindlichen Technologie zur Verstromung von Abwärme
- Zitation:** Godzieba, J. S.; Schulz-Nigmann, W. (2019): Wirtschaftlichkeitsuntersuchung eines thermomagnetischen Generators. Potentialanalyse einer in der Forschung befindlichen Technologie zur Verstromung von Abwärme, WI-[Report] Nr. 006, Friedberg, THM 2019, ISSN 2568-0803
- Kurzfassung [dt.]:** Dieser Bericht hatte zum Ziel, die Wirtschaftlichkeit einer thermomagnetischen Kraftmaschine zu beurteilen. Die Kraftmaschine funktioniert mittels des thermomagnetischen Effekts, wobei sich das Rotor material je nach Temperatur ferro- oder paramagnetisch verhält. Durch gezieltes Ummagnetisieren kann in einem Magnetfeld ein Drehmoment erzeugt werden, welches zur Erzeugung von Strom genutzt wird. Das Gerät soll die Wärme aus dem Abgas eines Gas-Brennwertkessels beziehen. Um die Wirtschaftlichkeit zu beurteilen, wurde mittels der Tageslastgänge der VDI 4655 die Wärmemenge berechnet, die dem Gerät aus dem Abgas zur Verfügung steht. Daraus wurde unter Annahme verschiedener Wirkungsgrade der finanzielle Rückfluss der Investition berechnet. Als Ergebnis wurde mit diesen Daten ein wirtschaftlicher Höchstpreis ermittelt, den die Maschine maximal aufweisen darf, um sich für den Anwender zu lohnen. Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen des Zielmarktes und zukünftiger Preisentwicklungen lautet das Ergebnis, dass die Technologie selbst bei einer Ausbeute des Carnot-Wirkungsgrades von 50% für die untersuchte Anwendung nicht marktfähig ist. Grund dafür ist die geringe zugeführte Wärmemenge und der schlechte Carnot-Wirkungsgrad aufgrund geringer Abgastemperaturen.
-

Kurzfassung [en]: The paper should analyze the economic efficiency of a thermomagnetic machine. The working principle is based on the thermomagnetic effect which is used to change the magnetic properties of the rotor by heating it up or cooling it down at certain points around a specific temperature. The effect causes the rotor to spin and the torsional moment is used to produce electricity. The heat for this generator is provided by a condensing gas boiler. The machine uses only the exhaust fumes of the condensing boiler. The heat that these exhaust fumes can provide is evaluated by using the VDI 4655 with its reference load profiles. With the assumption of different efficiency factors for the machine, the financial gain is evaluated. The result is a peak price which refers to the price that a customer would pay at the maximum. Under consideration of the circumstances at the target market and future price trends the result is clear: The thermomagnetic motor is not efficient enough to compete at the target market. Even with an electric output of 50% of the Carnot coefficient there is not enough output in the analyzed application. The main reason for this result is the low energy that the boiler provides through the exhaust and the relatively low temperatures which cause a low Carnot coefficient.

Schlagwörter (dt.): **themomagnetischer Generator, Brennwerttechnik, Abwärmee-nutzung, erneuerbare Energie**

Schlagwörter (en.): **themomagnetic generator, condensing technology, waste heat recovery, renewable energy**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	v
Einleitung.....	1
Berechnungsmodell.....	2
Wirkungsgrad des thermomagnetischen Generators.....	4
Technische Szenarien und Ergebnisse.....	5
Wirtschaftlichkeitsuntersuchung.....	6
Marktanalyse.....	7
Fazit.....	9
Ausblick.....	10
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	11

Einleitung

Der Klimawandel und die damit verbunden Energiewende mit dem Ziel, die CO₂-Emissionen zu reduzieren, führt in der Wissenschaft häufig zu Diskussionen, wie die bereitgestellte Energie unter anderem noch effizienter genutzt werden kann.

Im Bereich der Brennwertnutzung wird die eingesetzte chemische Energie aus Erdgas oder Heizöl bereits weitgehend in nutzbare Wärme überführt. Untersuchungen von Wolff et. al. haben Jahresnutzungsgrade in Feldtests von bis zu 97,55 %¹ bezogen auf den Brennwert H_S des Brennstoffes ergeben. Allerdings hat diese Untersuchung auch gezeigt, dass die durchschnittlichen jährlichen Nutzungsgrade nur bei 86,17 %² der eingesetzten Brennstoffenergie bezogen auf den Brennwert des Brennstoffes geliefert haben.

Die verbleibende Energie geht ungenutzt über den Abgasweg verloren. Hier wurden nun Überlegungen angestellt, diese Energie durch das Prinzip der magnetokalorischen Energiewandlung ebenfalls nutzbar zu machen.

Dieses Prinzip der Energiewandlung geht auf den Ettinghausen-Nernst-Effekt zurück, bei dem das Einwirken eines Magnetfeldes auf einen Wärmestrom in einem elektrischen Leiter eine elektrische Spannung erzeugt.

Eine alternative Technologie stellt der thermoelektrische Generator dar, bei dem durch die Verbindung zweier unterschiedlicher metallischer Leiter bei einem vorhandenen Temperaturunterschied eine Spannung erzeugt wird. Man spricht dabei vom thermoelektrischen Effekt.

Ein erster Ansatz eines thermomagnetischen Generators wird derzeit durch die Swiss Blue Energy in der Schweiz verfolgt, die mit einem Prototyp bereits erste Erfolge vorweisen kann.³

Aufgrund der niedrigen Abgastemperaturen ist das noch nutzbare Potential an Energie durch den Carnot'schen Wirkungsgrad begrenzt, um aus der verbleibenden Energie Exergie zu generieren. Aber die Aussicht, die verbleibende Abwärme in hochwertige Energie in Form von Exergie zu wandeln, ließ den Entschluss reifen, das mögliche Potential in einer Master-Thesis im Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen der Technischen Hochschule Mittelhessen an Hand einer Parameterstudie genauer zu beleuchten und das wirtschaftliche Potential abzuschätzen.

Bei dem zuvor erwähnten Prototypen wird ein Wirkungsgrad von 10 % des Carnot'schen Wirkungsgrades bzw. 0,75 % des thermischen Gesamtwirkungsgrades genannt.⁴ Es wäre daher interessant zu wissen, ob bei besseren Wirkungsgraden ausreichende Exergie bzw. elektrischer Strom für einen wirtschaftlichen Betrieb geliefert werden können.

Dazu ist es zunächst erforderlich die Energie in Form von Abwärme für die unterschiedlichen Betriebssituationen mit Hilfe eines vereinfachten thermodynamischen Berechnungsmodelles unter Beachtung einer geeigneten Variationsbreite der zu erwartenden Wirkungsgrade zu bestimmen, um anschließend die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchführen zu können. Mit einer Marktanalyse wird zusätzlich das Marktpotential ermittelt.

¹ vgl. Wolff, et. al., 2004, S. 30

² vgl. Wolff, et. al., 2004, S. 30

³ vgl. Helbling, et. al., 2014, S. 6

⁴ vgl. Helbling, et. al., 2014, S. 6

Berechnungsmodell

Die Datenbasis der Parameterstudie stellen die Referenzlastprofile nach VDI 4655 dar. Die VDI 4655 ist eine Richtlinie zur Bestimmung des Normnutzungsgrades für eine KWK-Anlage. Die Richtlinie liefert Daten zur Berechnung des Wärmebedarfs für Heizwärme und Trinkwassererwärmung sowie den Strombedarf. Die Daten sind in Form von Lastprofilen für sogenannte Typtage vorhanden. Es existieren 10 verschiedene Typtage, welche sich durch die Durchschnittstemperatur, den Bedeckungsgrad und nach Wochentag bzw. Sonn- und Feiertag unterscheiden.⁵ Mittels der Lastprofile wurde für ein Referenzjahr der Gesamtwärmebedarf sowie ein detailliertes Auslastungsprofil für ein Einfamilienhaus in Oberhausen ermittelt. Für das Referenzjahr wurde der Zeitraum 01.04.2002 – 31.03.2003 gewählt, da dieser Zeitraum sich größtenteils mit der Zeitspanne der Datenerfassung der VDI 4655 deckt.⁶

Zur Ermittlung des für den Generator zur Verfügung stehenden Wärmestroms, wurde der erste Hauptsatz der Thermodynamik herangezogen. Demnach sind die zwei wichtigsten Berechnungsgrößen der Abgasmassenstrom und die Abgastemperatur. Für den Abgasmassenstrom wurde auf ein eigens erstelltes Berechnungsmodell zurückgegriffen, welches später erläutert wird. Die Berechnung der zur Verfügung stehenden Abgastemperatur erfolgte über die Auslastung des Kessels. Zur Ermittlung der Auslastung wurden zwei verschiedene Ansätze herangezogen:

Im Auslastungsansatz wurden die von der VDI 4655 zur Verfügung gestellten Minutenwerte in 5-Minutenwerte zusammengefasst und auf die Gesamtleistung des Kessels bezogen. Da in diesem Ansatz keine Wetterdaten verwendet wurden, richtet sich die Anzahl der jeweiligen Typtage nach den Standardangaben aus der Norm für die jeweilige Klimazone.

Im Gegensatz dazu wurden Wetterdaten für den sog. Wetteransatz verwendet. Ausgehend von den Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes wurde für den Betrachtungszeitraum jedem Tag ein Typtag – und somit ein Referenzlastprofil – zugordnet. Die stündlich vorhandenen Temperaturwerte dienten als Berechnungsgrundlage für die Vorlauftemperatur, aus welcher dann die Auslastung errechnet wurde.

Mit Hilfe der Auslastung konnte mittels eines Abgastemperatur-Auslastungs-Diagramms die Abgastemperatur errechnet werden. Neben der Auslastung sind jedoch auch noch der Modulationsgrad und die Laufzeit des Brenners für die Bestimmung der Wärmemenge entscheidend. Diese wurde durch die Verrechnung der Auslastung mit dem Wärmebedarf ermittelt. Es wurde unterstellt, dass der Kessel abschaltet, sobald der Wärmebedarf im niedrigsten Modulationsgrad mit der jeweiligen Auslastung erreicht wurde. Es wurde kein Pufferspeicher in der Betrachtung berücksichtigt.

Das zuvor angesprochene Modell zur Ermittlung des Abgas-Massenstroms basiert auf der im Kessel ablaufenden Verbrennungsreaktion von Erdgas. Zur Vereinfachung wurde als Brennstoff Methan angenommen, da Erdgas hauptsächlich aus Methan besteht.⁷

Die folgende Reaktionsgleichung diene als Berechnungsbasis:



⁵ vgl. VDI 4655, Mai 2008, S. 13

⁶ vgl. VDI 4655, Mai 2008, Excel Beiwerk

⁷ vgl. van Basshuysen, et al., 2015, S. 51

Zudem wurde eine leicht überstöchiometrische Verbrennung mit einem Luftüberschuss von 10 % bzw. einer Luftzahl $\lambda = 1,1$ unterstellt. Mit der Annahme, dass die Menge an Luft für eine stöchiometrische Verbrennung um den Faktor 4,774 größer ist, als die Menge an Sauerstoff,⁸ konnte die nötige Luftmenge bestimmt werden.

Da in dem Abgastrakt eines Brennwertkessels ein Teil des Wassers auskondensiert, darf dieser Teil in der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Mittels der Kondensationszahl konnte hier die entsprechende Wassermenge, welche noch dampfförmig im Abgas vorhanden ist, bestimmt werden.

Über die Molmassen der einzelnen Bestandteile wurde die Zusammensetzung des Abgases in Bezug auf einen Teil Erdgas bestimmt. Somit kann das Modell für jeden Betriebszustand eingesetzt werden. Die jeweiligen Massenstromanteile sind der untenstehenden Grafik zu entnehmen:

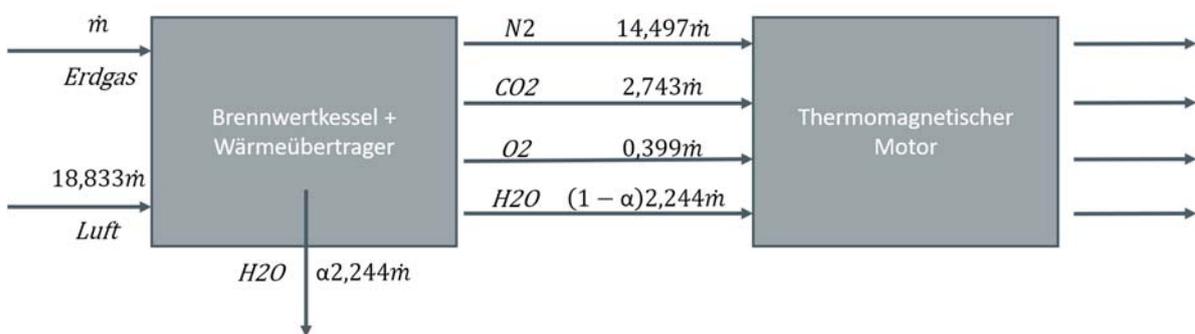


Abbildung 1 - Abgaszusammensetzung des Berechnungsmodells
Quelle: Godzieba, 2018, S. 41

Für die energetische Gleichung des Abgases ergibt sich die noch im Abgas enthaltene Wärmeleistung zu:

$$\dot{Q} = 14,497 \cdot \dot{m} \cdot \Delta h_{N_2} + 2,743 \cdot \dot{m} \cdot \Delta h_{CO_2} + 0,399 \cdot \dot{m} \cdot \Delta h_{O_2} + (1 - \alpha) \cdot 2,244 \cdot \dot{m}_{WD} \cdot \Delta h_{WD}$$

$\alpha = \text{Kondensationszahl}$ ⁹

Die energetische Betrachtung erfolgte für die trockenen Anteile des Abgases unter der Prämisse, dass es sich um ideale Gase handelt. Der Wasserdampfanteil wurde differenzierter betrachtet und auf die Menge des trockenen Abgases bezogen. Nach Vereinfachung ergab sich für die in den Generator einströmende Wasserbeladung:

$$x_{s,ein} = \frac{(1 - \alpha) \cdot 2,244 \cdot \dot{m}}{19,833 \cdot \dot{m} - 2,244 \cdot \dot{m}} = (1 - \alpha) \cdot 0,12757 \frac{kg_{H_2O}}{kg_{Abgas,tr}}$$

Die Berechnung des Massenstromes erfolgte unter Zuhilfenahme des Normnutzungsgrades mit folgender Gleichung:

⁸ vgl. Herwig, et al., 2016, S. 294

⁹ vgl. Viessmann Deutschland GmbH (Hrsg.), o.J., S. 22

$$B = \frac{Q_h + Q_{tw}}{\eta_N \cdot H_o} \quad ^{10}$$

Bzgl. des Normnutzungsgrades wurde eine Studie von Jagnow und Wolff herangezogen, die das reale Verhalten von Nutzungsgraden auf den Brennwert untersucht.

Wirkungsgrad des thermomagnetischen Generators

In der Einleitung wurde bereits angesprochen, dass für den thermomagnetischen Generator 10% des Carnot-Wirkungsgrades angegeben werden. Der Wirkungsgrad des Generators ist ein kritischer Faktor in der Berechnung, denn er hat direkten Einfluss auf das Ergebnis. Da bisher keine belastbare Aussage über den Wirkungsgrad existiert, wurden vergleichbare Technologien herangezogen, um eine Abschätzung treffen zu können. Die Auswahl fiel dabei auf Materialien mit dem thermoelektrischen Effekt. Zudem wurde die Effizienz von Wärmepumpen betrachtet, um eine bereits etablierte Technologie zum Vergleich heranziehen zu können.

Für die thermoelektrischen Elemente wurde mittels gängiger Temperaturbereiche für die bekannten Werkstoffe der maximale Wirkungsgrad berechnet. Aufgrund der breiten Streuung der Ergebnisse und des hohen Temperaturbereichs, in denen diese Materialpaarungen eingesetzt werden, wurde darauf verzichtet, aus diesen Daten ein Szenario abzuleiten.

Die Untersuchung der Leistungsziffern bei Wärmepumpen hat gezeigt, dass moderne Sole-Wasser-Wärmepumpen B0W35 eine Leistungsziffer von durchschnittlich 0,5 der Carnot'schen Leistungsziffer erreichen. Dieser Wert wurde als höchstmöglicher Wirkungsgrad für den thermomagnetischen Generator angenommen.

¹⁰ vgl. Tiator, 2006, S. 167

Technische Szenarien und Ergebnisse

Neben den bereits erläuterten Ansätzen werden für das Modell noch zwei zusätzlich Fälle unterschieden. Das Gas-Brennwert-Gerät des Referenzhauses hat einen Modulationsbereich von 36,17 % bis 100 %.¹¹ Moderne Brennwertgeräte können jedoch zwischen 10 % und 100 % ihrer maximalen Leistung modulieren.¹² Der Unterschied für das Datenmodell liegt darin, dass dann die Laufzeit des Brenners pro Intervall steigt und somit auch die Laufzeit des thermomagnetischen Generators.

Für den Anteil des durch den thermomagnetischen Generator umgewandelten Energie durch Abwärme in Strom werden drei verschiedene Werte vom Carnot'schen Wirkungsgrad angenommen: 50%, 25% und 10%. Während ein Anteil von 50% das evtl. zu erwartende Maximum darstellt, sind 10% ein nach derzeitigem Kenntnisstand als realistisch einzuschätzender Anteil. Für eine breitere Datenbasis wurde auch noch ein Anteil von 25% in die Betrachtung mit einbezogen.

Die Ergebnisse der Wärmemengen für die entsprechenden Ansätze und Modulationsbereiche lauten wie folgt:

	Wetteransatz	Auslastungsansatz
Modulationsbereich 36% - 100%	410,90 kWh	1076,85 kWh
Modulationsbereich 10% - 100%	412,39 kWh	1082,05 kWh

Tabelle 1 - Eingebrachte Wärmemenge in den TMM
Quelle: Godzieba, 2018

Der große Unterschied zwischen den Wärmemengen ist in der unterschiedlichen Zuordnung von Typtagen begründet. In dem Auslastungsansatz ist die Zahl der Wintertage signifikant höher als in dem Wetteransatz, was zu einem erhöhten Heizenergiebedarf führt. Für die produzierten Strommengen, die durch den thermomagnetischen Generator bereitgestellt werden kann, bedeutet das:

	10% von η_c	25% von η_c	50% von η_c
Modulationsbereich 36% - 100%	3,75 kWh	9,38 kWh	18,75 kWh
Modulationsbereich 10% - 100%	3,51 kWh	8,77 kWh	17,55 kWh

Tabelle 2 - Jahresstrommengen Wetteransatz
Quelle: Godzieba, 2018

¹¹ vgl. VDI 4655, 2008, Excel Beiwerk

¹² vgl. Eppler, 2017, S. 38

	10% von η_c	25% von η_c	50% von η_c
Modulationsbereich 36% - 100%	10,55 kWh	26,37 kWh	52,74 kWh
Modulationsbereich 10% - 100%	9,38 kWh	23,45 kWh	46,89 kWh

Tabelle 3 - Jahresstrommengen Auslastungsansatz
Quelle: Godzieba, 2018

Die Ursache für die geringere Stromausbeute bei der höheren Modulationsfähigkeit (10%) liegt in der niedrigeren durchschnittlichen Abgastemperatur begründet, da das Gas-Brennwert-Gerät bei einer längeren Laufzeit des Brenners eine niedrigere Auslastung aufweist.

Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Im Anschluss an die Ermittlung der zu erwartenden Energiemenge in Form von elektrischem Strom wurde die daraus resultierende Wirtschaftlichkeit untersucht. Dabei wurde die Kapitalwertmethode zur Bestimmung eines Maximalpreises herangezogen. Der Maximalpreis ist der Preis, den das Gerät kosten darf, um nach der betrachteten Nutzungsdauer einen neutralen Kapitalwert zu erhalten. Es handelt sich deshalb um einen Maximalpreis, da der Investor keinen positiven Kapitalwert am Ende der Nutzungsperiode erhält, wenn er diesen Preis bezahlt.

Für das Kapitalwertmodell wurden folgende Eingangsgrößen herangezogen:

Eingangsgröße	Wert / Berechnung
Anschaffungszahlung	Variable
Diskontierungszinssatz	4,12%
Einzahlungen	Strommenge * 0,294€
Wartungskosten	Anschaffungszahlung * 1,29%
Nutzungsdauer	25 Jahre

Tabelle 4 - Eingangsgröße zu Berechnung des Maximalpreises
Quelle: Godzieba, 2018

Der Diskontierungszinssatz richtet sich nach dem Zinssatz für Verzugszinsen.¹³ Die Einzahlungen in diesem Modell stellt die vom thermomagnetischen Generator produzierte Strommenge multipliziert mit dem Strompreis für Privatleute¹⁴ dar, da der Nutzer diese Strommenge nicht vom Netzbetreiber bezieht, sondern selbst erzeugt. Die Wartungskosten orientieren sich an den Wartungsvertragsmodellen für Brennstoffzellen wie sie die Firma Viessmann anbietet. Viessmann bietet einen Wartungsvertrag für die Vitovalor PT-2 für 300 € pro Jahr an. bei einem Kaufpreis von 23.200 € sind das ca. 1,29% des Preises.¹⁵ Die maximale Nutzungsdauer für Gas-Brennwertanlagen liegt bei 25 Jahren.¹⁶

Das Kapitalwertmodell wurde für zwei verschiedene Szenarien betrachtet: Einmal werden die Wartungskosten mit in die Berechnung einbezogen, ein zweites Mal nicht. Es ist durchaus

¹³ vgl. Thomas Gottfried, 2018

¹⁴ vgl. Heidjann GmbH (Hrsg.), 2018

¹⁵ vgl. BHKW-Forum e.V. (Hrsg.), 2015

¹⁶ vgl. Adolf et al., 2013, S. 57

denkbar, dass ein solches Gerät über die gesamte Nutzungsdauer wartungsfrei betrieben werden kann.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sind in den nächsten beiden Tabellen dargestellt. Hierbei handelt es sich um die für den jeweiligen Fall errechnete Anfangsinvestition bzw. den zuvor angesprochenen Maximalpreis:

	Wetteransatz 36% Modulation	Wetteransatz 10% Modulation	Auslastungsansatz 36% Modulation	Auslastungsansatz 10% Modulation
10% η_c	13,81€	12,92€	38,85€	34,54€
25% η_c	34,53€	32,31€	97,12€	86,36€
50% η_c	69,07€	64,62€	194,23€	172,71€

Tabelle 5 - Anfangsinvestition bei Betrachtung der Wartungskosten
Quelle: Godzieba, 2018

	Wetteransatz 36% Modulation	Wetteransatz 10% Modulation	Auslastungsansatz 36% Modulation	Auslastungsansatz 10% Modulation
10% η_c	17,01€	15,91€	47,83€	42,53€
25% η_c	42,52€	39,78€	119,58€	106,33€
50% η_c	85,05€	79,57€	239,17€	212,67€

Tabelle 6 - Anfangsinvestition ohne Betrachtung der Wartungskosten
Quelle: Godzieba, 2018

Es ist bei den gewählten Randbedingungen zu erkennen, dass der Maximalpreis bestenfalls bei ca. 239 € liegen dürfte. Zudem ist es fraglich, ob der zugrunde liegende Wirkungsgrad mit dieser Technologie überhaupt erreicht werden kann.

Laut Rollik würde das magnetokalorische Material für einen thermomagnetischen Motor bzw. Generator bereits ca. 300 € pro Gerät kosten.¹⁷ Unter Beachtung dieses Gesichtspunktes wäre ein thermomagnetischer Generator im hier untersuchten Anwendungsfall selbst unter der Annahme der günstigsten Randbedingungen nicht wirtschaftlich zu betreiben.

Marktanalyse

Trotz des negativen Ergebnisses der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurde der Zielmarkt in Hinblick auf die Gas-Brennwert-Technologie und den Preisverfall von neuen Technologien zur Energiewandlung untersucht. Die Untersuchung bezieht sich auf deutsche Privathaushalte.

Bezüglich der Entwicklung des Gas-Brennwert-Geräte-Marktes gab es anhand der eingesetzten Statistik keinen Trend zu erkennen. Allerdings konnte auch kein Rückgang prognostiziert werden. Der Zielmarkt wurde mit 5,8 Millionen Gas-Brennwertanlagen in 2017¹⁸ quantifiziert.

Anhand der Preisentwicklung von Photovoltaikanlagen wurde eine mögliche Preisentwicklung des thermomagnetischen Generators simuliert. Ausgehend von einem Preis von 2000€, welcher als realistisch für dieses Gerät eingeschätzt wird, wurde der gleiche Preisverfall wie

¹⁷ vgl. Rollik, 2018

¹⁸ vgl. Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks (Hrsg.), 2017

bei Solaranlagen unterstellt.¹⁹ Für die thermomagnetische Kraftmaschine ergab sich damit folgender Preisverlauf:

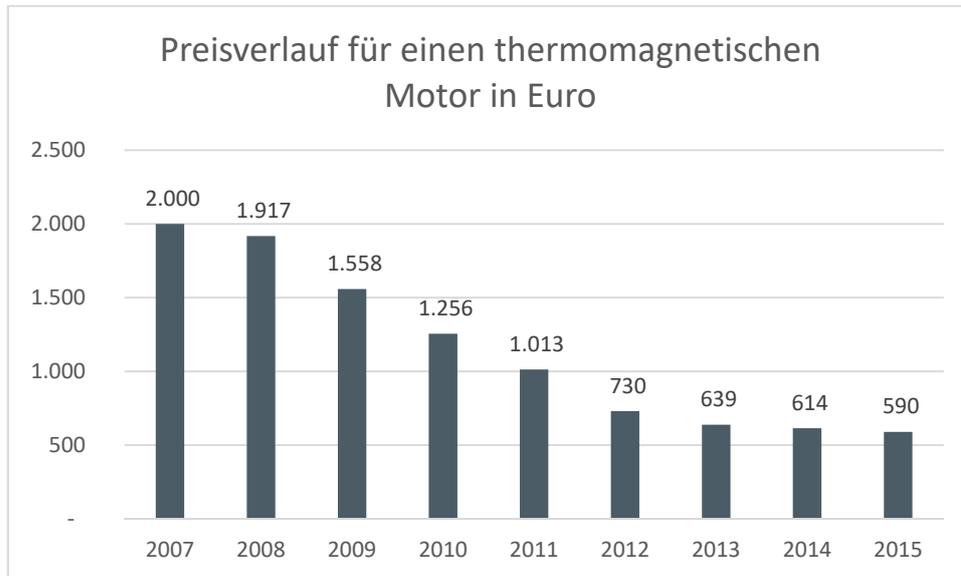


Abbildung 2 - Preisverlauf des thermomagnetischen Generators in Euro
Quelle: Godzieba, 2018

Nach 8 Jahren würde der Preis somit noch 590 € betragen. Dies ist mehr als doppelt so viel als in dem Best-Case-Szenario des Berechnungsmodells.

Als Konkurrenztechnologie des thermomagnetischen Generators wurde die Brennstoffzelle identifiziert. Eine Absatzrecherche ergab, dass Stand 2018 ca. 2000 Brennstoffzellen in deutschen Privathaushalten in Betrieb waren. In diesem Jahr sollen es laut Initiative Brennstoffzelle 9000 Stück sein. (Urbansky)²⁰ Zudem sind erste Heizungsbauer wie Vaillant aus dem Brennstoffzellen-Markt ausgestiegen. (Grund-Ludwig/Thole)²¹

Trotz der wesentlich besseren Effizienz der Brennstoffzelle gibt es bei der flächendeckenden Markteinführung Probleme. Deshalb wurde eine Markteinführung des thermomagnetischen Generators für den Betrieb in einer Gas-Brennwertanlage als unrealistisch eingestuft.

¹⁹ vgl. Statista GmbH u. a. (Hrsg.), 2016

²⁰ vgl. Urbansky, 2018

²¹ vgl. Grund-Ludwig, et al., 2017

Fazit

Auf Basis der hier vorgenommenen Betrachtungen war es möglich, ein thermodynamisches Berechnungsmodell zu erstellen und in Abhängigkeit der Auslastung und der Außentemperatur das Abwärmepotential für einen magnetokalorischen Generator zu bestimmen und die zu erwartende elektrische Energie aufgrund von Wirkungsgradannahmen abzuschätzen.

Darüber hinaus erfolgte eine Marktanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, um eine Prognose zu ermöglichen.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass der Einsatz eines thermomagnetischen Generators im Abgasstrom eines Gas-Brennwert-Kessels im kleinen Leistungsbereich nicht wirtschaftlich ist.

Ursachen dafür sind zum einen die bereits hohe Ausnutzung der chemischen Energie durch die Brennwertnutzung, dem geringen Verstromungsgrad des thermomagnetischen Generators verbunden mit den niedrigen Abgastemperaturen und den kostenintensiven spezialmagnetischen Werkstoffen.

Ein wirtschaftlicher Preis wäre bei etwa 239 € zu erwarten, um eine Amortisation zu erreichen.

Außerdem ist es fraglich, ob die im Szenario angenommene Ausbeute überhaupt erreicht werden kann. Würde man einen idealen Verstromungswirkungsgrad von 100 % annehmen, so wäre ein Preis von ca. 470 EUR möglich. Das ist aber unter realen Bedingungen unmöglich, da technische Prozesse niemals Wirkungsgrade von 100 % erreichen können.

Derzeit ist also nicht davon auszugehen, dass aufgrund der vorliegenden Ergebnisse auch unter den optimistisch angenommenen Randbedingungen ein wirtschaftlicher Betrieb erreicht werden kann.

Dies könnte bei einer industriellen Anwendung ggf. anders aussehen.

Ein Marktpotential ist aber vorhanden, da die Brennwerttechnik in Deutschland eine weite Verbreitung hat.

Ausblick

Das Modell auf Basis des Witterungsansatzes bietet die Möglichkeit mit realen Witterungsdaten den individuellen jährlichen Ertrag zu berechnen.

Dies könnte für Optimierungsansätze und eine Optimierung der Betriebsweise hilfreich sein.

Nach einer Studie der Fachhochschule Nordwestschweiz wird ein Marktpotential für thermomagnetische Generatoren in industriellen Anwendungen gesehen. Dabei wird von einem Zielpreis in Höhe von 4.500 bis 8.100 CHF/kW ausgegangen bei einer Ausbeute von 40 % des Carnot'schen Wirkungsgrades.²² Diese Preisspanne wäre vergleichbar mit 3985 bis 7174 EUR/kW bei derzeitigen Wechselkursen.

Aufgrund der noch vorliegenden Probleme, ein geeignetes Material zur magnetokalorischen Stromerzeugung zu entwickeln sowie dem hohen Aufwand, ein geeignetes Magnetfeld zu erzeugen, muss derzeit allerdings davon ausgegangen werden, dass auf Basis des magnetokalorischen Prinzips in naher Zukunft keine nutzbare Technologie zur Energiewandlung zur Verfügung steht.

²² vgl. Helbling, et. al., 2014, S. 20

Literatur- und Quellenverzeichnis

Adolf, Jörg u. a. (Mai 2013): Shell BDH Hauswärme-Studie: Klimaschutz im Wohnungssektor - Wie heizen wir morgen?, Hamburg, Köln, Mai 2013, http://www.hwwi.org/fileadmin/hwwi/Publikationen/Studien/Shell_BDH_Hauswaerme_Studie_II.pdf

BHKW-Forum e.V. (Hrsg.) (2015): ISH15: Preisrutsch der Viessmann Brennstoffzelle Vitovalor 300-P und Markteinführung der Hexis Galileo 1000 N, Neuendorf, 2015, <https://www.bhkw-infothek.de/nachrichten/22418/2015-03-23-ish15-preisrutsch-der-viessmann-brennstoffzelle-vitovalor-300-p-und-markteinfuehrung-der-hexis-galileo-1000-n/>, 23.08.2018

Eppler, Marc (2017): Modulation ist nicht alles: Aktuelle Untersuchung zum Modulationsgrad bei Gas-Brennwertgeräten, in: IKZ Haustechnik, v. 09/2017, S. 38–40, <https://www.ikz.de/uploads/media/924--Heizungstechnik.pdf>, 16.08.2018

Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks (Hrsg.) (2017): Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks zum Anlagenbestand in Deutschland 2017, Sankt Augustin, 2017, <https://www.schornsteinfeger.de/erhebungen.aspx>

Grund-Ludwig, Pia/Thole, Silke (15.03.2017): Vaillant steigt bei Brennstoffzellen-KWK aus, Geislingen/Steige, 15.03.2017, <https://www.enbausa.de/heizung/aktuelles/artikel/vaillant-steigt-bei-brennstoffzellen-kwk-aus-5252.html>, 03.09.2018

Helbling, et. al. Magnetokalorische Kraftmaschine zur Stromerzeugung – Marktchancen- und Potenzialanalyse. BFE Schlussbericht, Dezember 2014

Heidjann GmbH (Hrsg.) (2018): Strompreise in Deutschland: Fakten zum Strompreis pro kWh für Verbraucher, Stand 2018, Harsewinkel, 2018, <https://www.stromauskunft.de/strompreise/>, 23.08.2018

Herwig, Heinz/Kautz, Christian H./Moschallski, Andreas (2016): Technische Thermodynamik: Grundlagen und Anleitung zum Lösen von Aufgaben, 2. überarbeitete Auflage, Wiesbaden, 2016, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-11888-4>

Thomas Gottfried EDV (Hrsg.) (2018): Verzugszinsrechner, 2018, <https://www.zinsen-berechnen.de/verzugszinsrechner.php>, 23.08.2018

Tiator, Ingolf (2006): Heizungsanlagen, 3. Aufl., Sanitär - Heizung - Klima, s.l., 2006, <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=859059>

Rollik, Denis (2018): Eigenschaften von magnetokalorischen Materialien der Vakuum-schmelze GmbH & Co. KG, Niddatal

Statista GmbH u. a. (Hrsg.) (Oktober 2016): Preisentwicklung für eine fertig installierte Solaranlage in Deutschland in den Jahren 2007 bis 2015 (in Euro pro Kilowattpeak), Hamburg, Oktober 2016, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156490/umfrage/preis-fuer-eine-fertig-installierte-solaranlage-in-deutschland/>

Urbansky, Frank (23.03.2018): Brennstoffzelle oder Motor: Diese KWK-Varianten bietet der Markt, Stuttgart, 23.03.2018, <https://www.haustec.de/heizung/waermeerzeugung/brennstoffzelle-oder-motor-diese-kwk-varianten-bietet-der-markt>, 03.09.2018

van Basshuysen, Richard u. a. (Hrsg.), 2015, Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb: Wege zur klimaneutralen Mobilität, Wiesbaden

VDI 4655 (2008): Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, Ausgabe: Mai 2008

Viessmann Deutschland GmbH (Hrsg.) (o.J.): Brennwertechnik: Brennwertechnik für Wirtschaftlichkeit und Umweltschonung, Allendorf (Eder), o.J.

Wolff, Dieter u. a. (April 2004): Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwerteckeln, Wolfenbüttel, April 2004,
<https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-14133.pdf>

Über die Autoren

Janis Sebastian Godzieba, M.Sc.

studierte Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Maschinenbau an der THM in Friedberg (B. Sc.). Anschließend erwarb er den Master of Science in Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Produkt- und Prozessmanagement. Er ist nun als Projektmanager für die Heraeus Noblelight GmbH tätig.

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schulz-Nigmann

ist Professor für Thermodynamik und Energietechnik an der Technischen Hochschule Mittelhessen, Campus Friedberg. Er befasst sich in der Forschung und Lehre mit Fragen zur Energieoptimierung in der Energieversorgung von Gebäuden und deren Anlagen sowie Fragestellungen der Energiewirtschaft.

Der vorliegende Arbeitsbericht fußt auf einer Master-Thesis welche im Wintersemester 2018/2019 am Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen der THM, Fachgebiet für Thermodynamik und Energietechnik entstanden ist.

Zu den WI-[Reports]

Die WI-[Reports] entstehen aus Forschungs-, Abschluss-, Studien- und Projektarbeiten im Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen der THM am Campus Friedberg.

Als Zielgruppen der WI-[Reports] werden Forschende, Lehrende und Lernende sowie Praktiker der Disziplin Wirtschaftsingenieurwesen gesehen.

Die Arbeitspapiere befassen sich tiefergehend mit ausgewählten, speziellen WI-Themenbereichen. Ziel ist die verständliche Vermittlung theoretischer Grundlagen und deren Transfer in praxisorientiertes Wissen.

Bitte wenden Sie sich mit Anregungen und Kritik zu den WI-[Reports] an den Herausgeberbeirat. Dies gilt insbesondere, wenn Sie selbst ein Arbeitspapier in der Reihe veröffentlichen wollen (Kontaktdata auf Seite 2).

Informationen über die bisher erschienenen WI-[Reports] erhalten Sie unter der Adresse http://digdok.bib.thm.de/schriftenreihen_ebene2.php?sr_id=3&la=de.