

Effizienzsteigerung von Heizgeräten im Gebäudebestand durch Absenkung der Heizkreistemperaturen mit Hilfe von Heizkörpern mit thermoelektrisch angetriebenen Ventilatoren

Wolfgang Eisenmann, Sascha Bruder, Dirk Wössner,
Vladimir Skworzow, Ömer Agirman, Jonas Henn

Hochschule Mannheim, Fakultät für Verfahrens- und Chemietechnik,
Institut für Prozessmesstechnik und innovative Energiesysteme

w.eisenmann@hs-mannheim.de; 0621-292-6196

Abstract

Erzwungene Konvektion an Heizkörperoberflächen senkt die Heizkreistemperaturen und bewirkt hierdurch eine Effizienzsteigerung von CO₂-armen Wärmeerzeugern wie Gas-Brennwertkessel, Wärmepumpe, thermische Solaranlage oder Fernwärme. Besonders im Gebäudebestand erscheint dies attraktiv, da eine Umrüstung ohne große Umbauarbeiten möglich ist. Die elektrische Leistung zum Betrieb der Ventilatoren soll durch einen thermoelektrischen Generator (TEG) erzeugt werden, welcher durch Abwärme des Heizkörpers selbst betrieben wird.

In einer Machbarkeitsstudie haben wir Experimente und Systemsimulationsrechnungen mit der Toolbox CARNOT unter Matlab/Simulink durchgeführt. In einem Wärmepumpensystem (Luft-Wasser) in einem Einfamilienhaus (140 m², Heizbedarf 131 kWh/m²a) lassen sich Stromkostensparnisse von etwa 86 €/a erzielen; bei einem Gasbrennwertkessel mit Solaranlage sind die Einsparungen wesentlich niedriger. Es werden auch Ergebnisse für Häuser mit 210 und 60 kWh/m²a vorgestellt.

1. Einleitung

28% des Endenergieverbrauchs in Deutschland wurden 2016 für Raumwärme aufgewendet [3]. Insofern ist die Verwendung hocheffizienter Heizsysteme für die Gebäudebeheizung aus Sicht des Klimaschutzes von hoher Relevanz. Durch die Erzeugung einer Zwangskonvektion innerhalb eines Heizkörpers mit Hilfe von Ventilatoren kann der Wärmeübergang von der Heizkörperoberfläche an die Luft verbessert werden. Hierdurch kann über den Heizkörper dieselbe Heizleistung wie beim Vergleichsheizkörper ohne Ventilatoren bei niedrigeren Heizkreistemperaturen übertragen werden. Dies bedeutet eine Erhöhung der Effizienz von zukunftssträchtigen, CO₂-armen Wärmeerzeugern wie Wärmepumpe (WP), thermische Solaranlage, Gas-Brennwertkessel (BWK), aber auch Fernwärme.

Die Effizienzsteigerung wird durch folgende Effekte verursacht. Beim Brennwertkessel wird durch die Absenkung der Heizkreistemperaturen mehr Wasserdampf im Abgas auskondensiert, d.h. der Kesselwirkungsgrad steigt. Bei der Solaranlage sinkt die Betriebstemperatur der Kollektoren, dadurch sinken die Wärmeverluste an die Umgebung, somit steigt der Kollektorwirkungsgrad und damit auch der solare Deckungsanteil. Bei der Wärmepumpe bewirkt der kleiner werdende Temperaturhub zwischen Wärmequelle und -senke eine Steigerung der Leistungs- und somit auch der Jahresarbeitszahl. Bei der Fernwärme können die Vor- und Rücklaufemperaturen des Netzes gesenkt werden, was die Wärmeverluste des Netzes senkt und bei Versorgung aus Kraft-Wärme-Kopplung darüber hinaus den Kraftwerkswirkungsgrad steigert.

Besonders im Gebäudebestand, bei dem die Hemmschwelle zum Einbau einer Fußbodenheizung wesentlich höher ist als im Neubau, ist es attraktiv, auf die genannte Weise die Heizkreistemperaturen ohne große Umbauarbeiten absenken zu können. Die elektrische Leistung zum Betrieb der Ventilatoren kann durch einen thermoelektrischen Generator (TEG), welcher auf dem Heizkörper aufgebracht wird, erzeugt werden. Dieser erzeugt über den Seebeck-Effekt aus der Temperaturdifferenz zwischen

Heizkörper und Raumluft eine elektrische Spannung. Bei Verwendung eines TEG braucht kein elektrischer Netzanschluss für die Ventilatoren verlegt zu werden. Dies spart Installationskosten und ermöglicht ästhetisch vorteilhafte Lösungen. Der (gegenwärtig noch teure) thermoelektrische Generator kann jedoch wegen des geringen Temperaturgefälles zwischen Heizkörper und Umgebung nur niedrige elektrische Leistungen zur Verfügung stellen. Deshalb sind hocheffiziente Ventilatoren erforderlich.

Die vom TEG lieferbare elektrische Antriebsleistung für die Ventilatoren ist bei höherer Heizkörpertemperatur größer und bewirkt eine stärkere Temperaturabsenkung als bei von vornherein niedrigerer Heizkörpertemperatur. Diese selbstregelnde Eigenschaft ist grundsätzlich von Vorteil, schränkt die Anwendung aber andererseits auf Fälle mit höheren Heizkreistemperaturen ein.

In den im Folgenden vorgestellten Machbarkeitsuntersuchungen haben wir experimentell den Zusammenhang zwischen der benötigten Ventilatorleistung und der erzielten Temperaturabsenkung an einem Heizkörper (bei konstant gehaltener Heizleistung) bestimmt. Die Auswirkungen der Absenkung der Heizkreistemperaturen auf die Effizienz verschiedener Wärmeerzeuger wurden in energiesystemtechnischen Simulationen mit der Toolbox CARNOT in Matlab/Simulink untersucht. Es wurden ein Heizsystem 1 (Gas-Brennwertkessel mit Solaranlage) und ein Heizsystem 2 (Luft-Wasser-Wärmepumpe) simuliert, jeweils für drei Einfamilienhäuser EFH1, EFH2 und EFH3 mit unterschiedlichem Dämmstandard.

Die Simulationen liefern Ergebnisse zur jährlichen Heizenergieeinsparung durch die per TEG ventilierten Heizkörper. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurden Berechnungen zur Heizkosteneinsparung durchgeführt. Diese erlauben wichtige Rückschlüsse zur wirtschaftlichen Machbarkeit der Idee.

2. Funktionsweise thermoelektrischer Generatoren

Beim Seebeck-Effekt oder thermoelektrischen Effekt wird in geeigneten Materialpaarungen eine Temperaturdifferenz in eine elektrische Spannung umgewandelt. Bei Hintereinanderschaltung einer ausreichend großen Zahl solcher Thermoelemente ist die entstehende Spannung groß genug, um als elektrischer Generator dienen zu können. Man spricht von einem thermoelektrischen Generator (TEG). Der Wirkungsgrad von TEG lässt sich gemäß folgender Gleichung berechnen [2]:

$$\eta_{TEG} = \eta_C \cdot \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+\frac{T_r}{T_{VL}}} = \frac{T_{VL}-T_r}{T_{VL}} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+\frac{T_r}{T_{VL}}} \quad (1)$$

Dabei ist η_C der Carnot-Faktor (zu bilden mit der treibenden Temperaturdifferenz, die über dem TEG abfällt, hier Heizungsvorlauftemperatur T_{VL} minus Raumtemperatur T_r). ZT ist die Gütezahl der thermoelektrischen Materialpaarung:

$$ZT = \frac{\alpha_{AB} \cdot \sigma_{el}}{\lambda} \cdot T \quad (2)$$

Hier ist α_{AB} der Seebeck-Koeffizient, σ_{el} die elektrische Leitfähigkeit und λ die Wärmeleitfähigkeit des thermoelektrischen Materials und T die absolute Temperatur. Derzeitige TEG-Materialien erreichen Gütezahlen im Bereich von 0,5 bis 0,8 [2]. Wegen der voranschreitenden technischen Entwicklung wird in den Simulationen mit einer Gütezahl von 1 gerechnet.

Hieraus lässt sich die verfügbare Antriebsleistung des TEG berechnen:

$$P_{TEG} = \eta_{TEG} \cdot \dot{Q}_{TEG} = \eta_{TEG} \cdot (kA)_{TEG} \cdot (T_{VL} - T_r) \quad (3)$$

Der (kA) -Wert des TEG wurde so gewählt, dass sich bei einer treibenden Temperaturdifferenz von 15 K eine TEG-Leistung von 0,5 W einstellt. Die Messergebnisse und erste Simulationsrechnungen (s.u.) zeigten, dass eine Leistung ungefähr in diesem Bereich erforderlich ist, um eine deutliche Absenkung der Heizkörpertemperaturen zu erreichen.

Aus den Gleichungen (1) bis (3) ergibt sich somit ein näherungsweise quadratischer Anstieg der TEG-Leistung als Funktion der Temperaturdifferenz, siehe Abbildung 1.

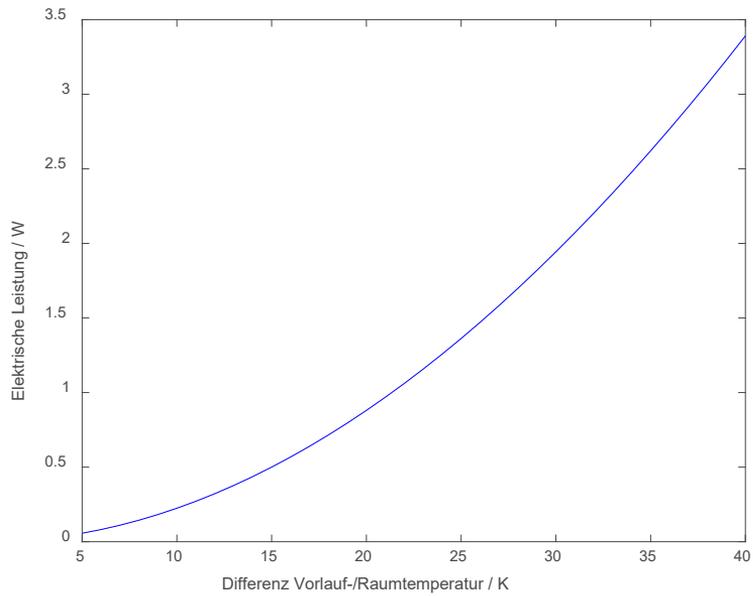


Abbildung 1: Theoretisch zu erwartende elektrische Leistung der TEG bei einer Gütezahl von 1 als Funktion der treibenden Temperaturdifferenz [5]

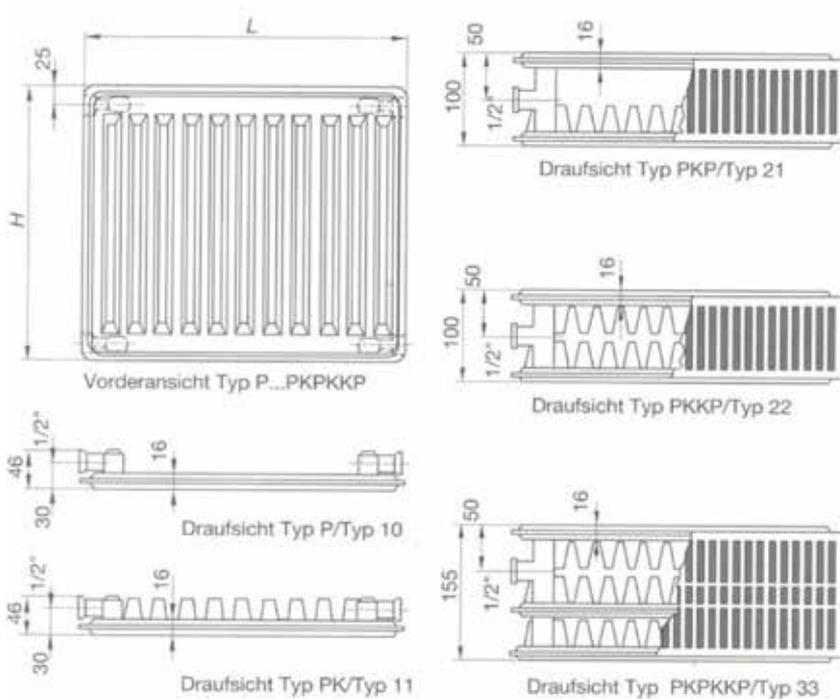


Abbildung 2: Bezeichnungen für Plattenheizkörper I71

3. Experimentelle Untersuchungen

Ein Plattenheizkörper vom Typ 22 (zu den gängigen Typenbezeichnungen siehe Abbildung 2, B x H x T = 1000 mm x 600 mm x 104 mm) wurde in einen thermostatisierten Wasserkreislauf mit regelbarer Vorlauftemperatur eingebaut. Der Heizkörper besteht aus zwei gegenüberliegenden, parallelen und profilierten Platten, welche mit Wasser durchströmt werden. Auf den Innenseiten der beiden Platten befinden sich Konvektionsbleche, welche die zur Wärmeübertragung verfügbare Oberfläche vergrößern.

Auf der Unterseite des Heizkörpers wurden elf Axialventilatoren vom Typ Arctic F8 PWM (siehe Abbildung 3, Maße 80 mm x 80 mm x 25 mm, Hersteller: ebm papst) montiert. Diese hatten in Vorversuchen die besten Wirkungsgrade marktverfügbarer preiswerter Ventilatoren gezeigt [1].



Abbildung 3: Ansicht des vermessenen Heizkörpers von unten mit Ventilatoren [5]

In der Versuchsreihe wurde die Wärmeleistung des Heizkörpers bei verschiedenen Werten der arithmetischen Heizmittelübertemperatur

$$\Delta T_m = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_r \quad (4)$$

und bei verschiedenen Leistungen der Ventilatoren gemessen. Zusätzlich wurde eine Messreihe bei freier Konvektion aufgenommen; hierfür wurden die Ventilatoren demontiert, um die Luftströmung nicht zu behindern. Die Ventilatoren wurden hier nicht durch einen thermoelektrischen Generator, sondern durch ein Netzteil mit Strom versorgt.

Neben den abgeführten Wärmeströmen, der Vor- und Rücklauftemperatur des Heizungswassers und einigen lokalen Temperaturen wurde das Strömungsgeschwindigkeitsfeld zwischen den Heizkörperplatten detailliert mit einem Hitzdrahtanemometer gemessen.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe sind in Abbildung 4 dargestellt. Der Effekt, dass bei fester Heizleistung mit zunehmender Ventilatorleistung die Heizmitteltemperatur abnimmt, ist deutlich zu erkennen.

Abbildung 4 ist zugleich das Kennfeld für den Betriebspunkt des (virtuellen) TEG-Heizkörpers. Nimmt man den funktionellen Zusammenhang zwischen der Vorlauftemperatur und der vom TEG gelieferten elektrischen Antriebsleistung gemäß Abbildung 1 hinzu, ergibt sich aus Interpolationen zwischen den Kurven in Abbildung 4 das Kennfeld (also der Betriebsbereich) des Subsystems TEG + Heizkörper.

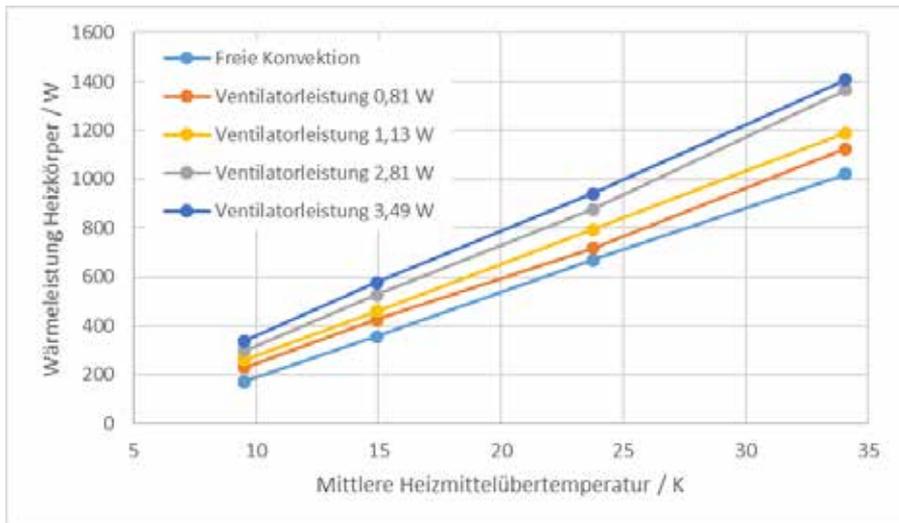


Abbildung 4: Gemessene Wärmeleistung des Heizkörpers als Funktion der Heizmittelübertemperatur bei verschiedenen Ventilatorleistungen [5]

4. Simulationsstudie

Mit der Toolbox Simulink lassen sich in Matlab komplexe technische Abläufe in einer grafischen Umgebung abbilden und simulieren. Das kostenlos verfügbare Blockset CARNOT stellt hierfür Blöcke (d.h. Bausteine, die das Verhalten von Subsystemen oder Komponenten abbilden) aus dem Bereich der Gebäude- und Heiztechnik zur Verfügung.

Wir haben zu unserer Fragestellung energiesystemtechnische Simulationen mit CARNOT unter Matlab/Simulink durchgeführt. Dabei wurde das Gebäudemodell *Simple House* von CARNOT verwendet. Hierbei handelt es sich um ein Gebäude mit einem einzigen Temperaturknoten. Das Modell umfasst auch Wärmegewinne durch Fenster, interne Wärmegewinne und einen definierten Luftwechsel.

Das Gebäude ist in unserem Fall ein Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 140 m² auf zwei Stockwerken und einer Raumhöhe von 2,60 m.

Es wurden drei verschiedene Dämmstandards des Gebäudes definiert: EFH1 (ungedämmtes Bestandsgebäude) mit einem Heizwärmebedarf von rund 200 kWh/m²a, EFH2 (teilgedämmtes Bestandsgebäude) mit rund 130 kWh/m²a und EFH3 (Niedrigenergiehaus) mit rund 60 kWh/m²a. Zur Erreichung dieser Wärmebedarfe wurden passende k-Werte für Wände, Dach, Boden und Fenster festgelegt (geringfügig angepasste Überschlagswerte aus [8], siehe Tabelle 1).

Es wurde berücksichtigt, dass mit besser werdendem Dämmstandard der Gebäude die benötigte Heizkörperfläche kleiner wird. Aus simulationstechnischen Gründen wurde dies durch Festlegung der Zahl der Heizkörper (elf in EFH1, neun in EFH2 und sieben in EFH3) realisiert.

Tabelle 1: Wärmedurchgangskoeffizienten des Gebäudes in den drei Dämmvarianten

	Heizwärmebedarf / (kWh/m ² a)	Wände/Dach k / (W/m ² K)	Boden k / (W/m ² K)	Fenster k / (W/m ² K)
EFH1	ca. 200	1	1	2,7
EFH2	ca. 130	0,6	0,6	2
EFH3	ca. 60	0,3	0,3	0,7

Als Wetterdatensatz wurde das Testreferenzjahr (TRY) 2010 für die Region 12 (Mannheim) des Deutschen Wetterdienstes verwendet [6].

Bei der Festlegung des Warmwasserbedarfs wird von einem 4-Personen-Haushalt ausgegangen. Der Verbrauch von 200 l/d bei 45°C wird um 7 Uhr, 12 Uhr und 19 Uhr entnommen (40/20/40%). Der Wärmebedarf für Warmwasser liegt (bei einer jahreszeitlichen Schwankung der Kaltwassertemperatur zwischen 7 und 13°C) bei etwa 2970 kWh/a.

Mit Hilfe des Gebäudemodells und der Wetterdaten wird aus den Kennfelddaten des Heizkörpers (siehe Abbildung 4) und aus der Leistungskurve des TEG gemäß Abbildung 1 berechnet, welche Heizkreisvorlauftemperatur zur Deckung der Wärmeverluste des Gebäudes benötigt wird.

Hieraus resultieren Heizkennlinien für die verwendete außentemperaturgeführte Heizungsregelung, die in Abbildung 5 dargestellt sind und die in den Simulationen verwendet werden. Diese enthalten sowohl die Abhängigkeit der TEG-Leistung von der treibenden Temperaturdifferenz als auch die hieraus resultierenden Ventilator- und Heizkörperleistungen.

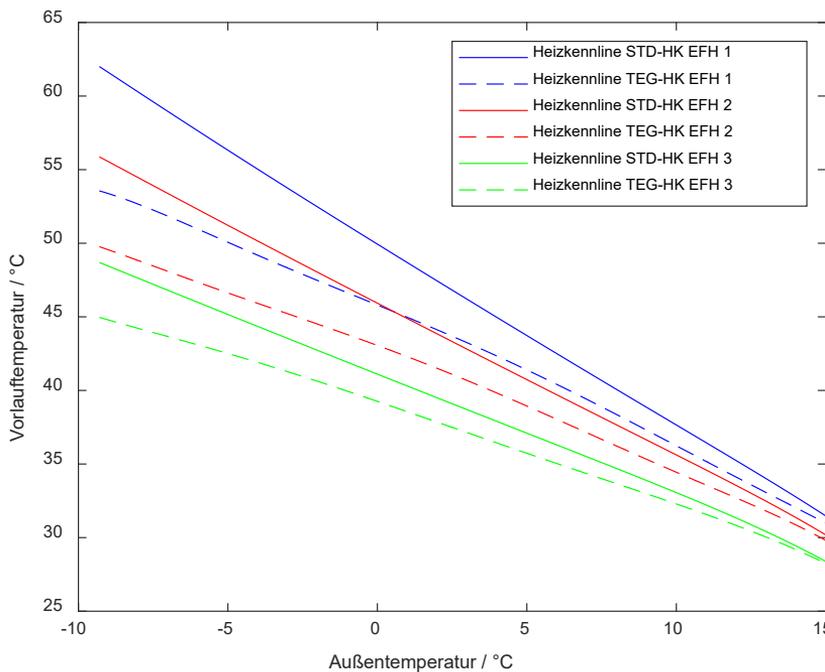


Abbildung 5: Heizkennlinien für den Heizkörper ohne Ventilatoren (STD) und den Heizkörper mit TEG und Ventilatoren für die drei Gebäudetypen [5]

Man erkennt, dass die Ventilatoren die benötigte Vorlauftemperatur gegenüber Standardheizkörpern um bis zu 8 K absenken und dass dieser Effekt mit sinkender Außentemperatur, also mit zunehmender Heizleistung, zunimmt. Weiterhin erkennt man auch, dass die Heizkennlinien mit zunehmender Wärmedämmung des Gebäudes flacher verlaufen und dass der temperatursenkende Effekt der Ventilatoren mit besser werdender Wärmedämmung abnimmt.

4.1 Betrachtete Heizsysteme

Es werden zwei verschiedene Heizsysteme untersucht. Heizsystem 1 besteht aus einem Gas-Brennwertkessel (BWK, 15 kW Spitzenleistung, modulierend), der durch eine solarthermische Kombianlage ergänzt wird (12 m² Kollektorfläche, Südausrichtung, 45° Neigung; Kombispeicher mit 750 Liter).

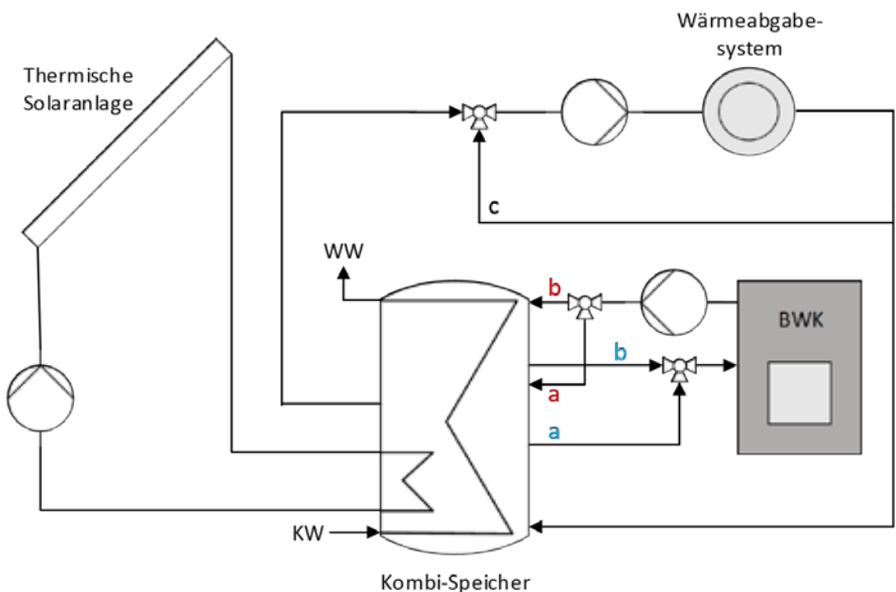


Abbildung 6: Heizsystem 1: Gas-Brennwertkessel (BWK) mit thermischer Solaranlage und Kombispeicher. Nachheizung für die Raumheizung (a) und für die Warmwasserbereitung (b). Die Vorlauftemperatur der Heizkörper wird über eine Rücklaufbeimischung geregelt (c) [5]

Der Wirkungsgrad des Brennwertkessels hängt von der Abgastemperatur ab. Diese wiederum ist über den Wärmeübertrager mit der Heizungs-Rücklauf­temperatur gekoppelt. Zudem steigt mit steigender Leistung des Kessels der Abgasvolumenstrom, was die Austrittstemp­eratur des Abgases ansteigen lässt. Dadurch wird bei zunehmenden Kesselleistungen ein sinkender (relativer und absoluter) Anteil des Wasserdampfs im Abgas kondensiert, folglich sinkt der Wirkungsgrad mit zunehmender Kesselleistung. Die Abhängigkeiten des BWK-Wirkungsgrades von der Abgastemperatur und von der Kesselleistung werden gemäß den in der nachstehenden Tabelle 2 dargestellten Werten modelliert; für Zwischenwerte wird interpoliert. In Tabelle 2 ist der auf den Heizwert bezogene Kesselwirkungsgrad dargestellt; für die Berechnung der Endenergieeinsparung im Ergebnisteil wird der Brennwert herangezogen.

Tabelle 2: Wirkungsgrad des Gas-Brennwertkessels als Funktion von Kesselwassertemperatur und Kesselleistung

Kesselwirkungsgrad (Bezug: Heizwert)		Mittlere Kesselwassertemperatur / °C		
		20	40	70
Relative Leistung	0,001	1,108	1,05	1
	0,25	1,108	1,05	0,95
	1	1	1	0,9

Im Heizsystem 2 ist der Wärmeerzeuger eine Außenluft-Wärmepumpe. Diese wird monoenergetisch bivalent betrieben, d.h. unterhalb einer bestimmten Außentemperatur wird die benötigte Wärme durch einen Durchlauferhitzer bereitgestellt. Die Wärmepumpe arbeitet nicht-modulierend, daher werden ein Heizungspufferspeicher (400 Liter) und ein separater Warmwasserspeicher (300 Liter) verwendet.

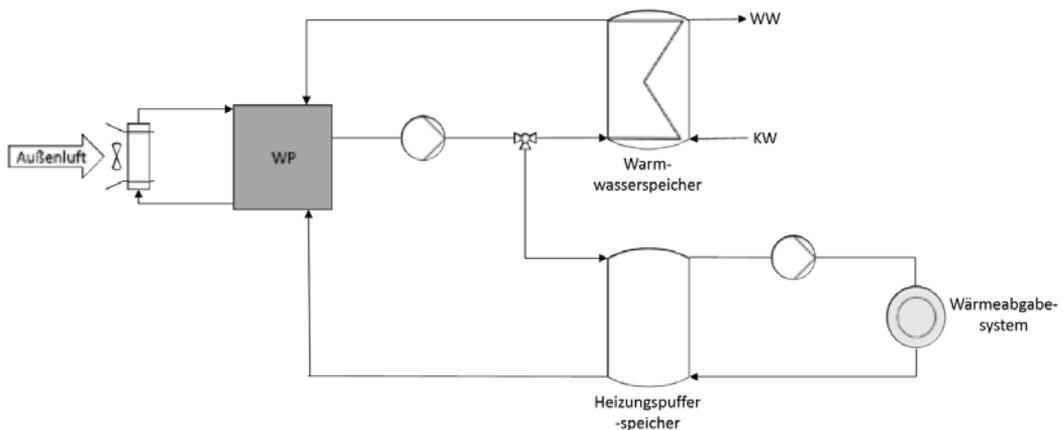


Abbildung 7: Heizsystem 2: Wärmepumpe mit Außenluft als Wärmequelle [5]

Es werden gemessene Leistungsdaten der Wärmepumpe Besst 4/12 verwendet [4], die in Tabelle 3 aufgelistet sind. Hierbei steht A für die Temperatur der Außenluft und W für die Temperatur des Vorlaufs auf der Heizkreisseite der Wärmepumpe.

Tabelle 3: Verwendete Leistungsdaten der Wärmepumpe

Betriebspunkt	Heizleistung	Quellenseitige Entzugsleistung	Elektrische Leistungsaufnahme	COP
	kW	kW	kW	
A0W35	13,00	9,33	3,67	3,54
A0W45	12,60	8,00	4,60	2,74
A7W35	15,00	11,39	3,61	4,16
A7W45	14,40	9,91	4,49	3,21

Aus diesen Leistungsdaten wurden durch Fehlerquadratminimierung neun Parameter des Wärmepumpenmodells in CARNOT bestimmt, mit Hilfe derer das Betriebsverhalten der Wärmepumpe nachgebildet wird.

4.2 Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse für Heizsystem 1 sind in Tabelle 4 dargestellt, die Ergebnisse für Heizsystem 2 befinden sich in Tabelle 5. Für die drei Dämmstandards EFH1, EFH2 und EFH3 sind vergleichend die Ergebnisse „STD“ für Heizkörper mit freier Konvektion (d.h. ohne Ventilatoren) und die Ergebnisse „TEG“ für Heizkörper mit durch TEG angetriebenen Ventilatoren aufgeführt.

In den Ergebnissen ist eine geringe Abhängigkeit des Heizwärmeverbrauchs vom Heizkörpertyp zu erkennen. Dies liegt darin begründet, dass der TEG-Heizkörper ein günstigeres Regelungsverhalten aufweist als der Standardheizkörper. Dadurch kommt es im Standardsystem häufiger zu Überschwingern der Raumtemperatur.

Die Energieeinsparung durch die TEG-Heizkörper nimmt bei beiden Heizsystemen mit zunehmendem Dämmstandard von EFH1 zu EFH3 immer weiter ab. Dies liegt daran, dass schon durch die Dämmung die Heizkreistemperaturen deutlich abnehmen (vgl. Abbildung 5); damit arbeiten Brennwertkessel, Solaranlage und Wärmepumpe ohnehin mit hoher Effizienz; der Zusatzeffekt durch die TEG ist dann klein.

Beim Heizsystem 1 entsteht die Endenergieeinsparung bei allen drei Haustypen überwiegend durch eine Steigerung des Brennwertkesselwirkungsgrades und nur zu einem kleineren Teil durch eine Steigerung des Solarertrags bzw. des solaren Deckungsgrades.

Das wichtigste Größe ist die Heizkosteneinsparung, die für Heizsystem 1 mit Gas-Brennstoffkosten von 6 ct/kWh berechnet wurde. Die erzielbaren Heizkosteneinsparungen liegen bei EFH1 bei rund 48 €/a, bei EFH2 bei etwa 22 €/a und bei EFH3 bei nur etwa 5 €/a.

Tabelle 4: Simulationsergebnisse für das Heizsystem 1: Gas-BWK + Solaranlage

Gebäudestandard	Heizkörper	EFH 1		EFH 2		EFH 3	
		STD	TEG	STD	TEG	STD	TEG
Anzahl Heizkörper		11		9		7	
Heizwärmeverbrauch	kWh/m ² a	210	208	131	131	63	63
Wärmebereitstellung durch Solaranlage	kWh/a	4423	4573	3911	4023	3390	3416
Endenergieverbrauch	kWh/a	33071	32274	20753	20390	10452	10363
Endenergieeinsparung	kWh/a	797		363		89	
Heizkosteneinsparung (bei 6 ct/kWh)	€/a	47,82		21,78		5,34	
Solarer Deckungsanteil		0,137	0,143	0,184	0,190	0,287	0,290
Mittlerer Kesselwirkungsgrad (energetisch gewichtet)		1,015	1,024	1,029	1,035	1,038	1,041

Bei Heizsystem 2 wird nur im ungedämmten Bestandsgebäude EFH1 der Bivalenzpunkt gelegentlich unterschritten, so dass der Elektroheizstab in Betrieb geht. Die Jahresarbeitszahl JAZ als energetisch gewichtetes Jahresmittel der Leistungszahl wird hier wie folgt berechnet:

$$JAZ = \frac{\text{Heizenergie WP} + \text{Heizenergie Heizstab}}{\text{Stromverbrauch WP} + \text{Stromverbrauch Heizstab}} \quad (5)$$

Dabei wurde der Stromverbrauch des Heizstabs mit der von ihm gelieferten Heizenergie gleichgesetzt. Die Heizkosteneinsparungen wurden hier mit einem Strompreis von 22 ct/kWh berechnet. Sie fallen für alle drei untersuchten Dämmstandards deutlich höher aus als bei Heizsystem 1. Sie liegen bei EFH1 bei rund 169 €/a, bei EFH2 bei etwa 86 €/a und bei EFH3 bei etwa 29 €/a.

Tabelle 5: Simulationsergebnisse für das Heizsystem 2: Luft-Wasser-Wärmepumpe

Gebäudestandard	Heizkörper	EFH 1		EFH 2		EFH 3	
		STD	TEG	STD	TEG	STD	TEG
Anzahl Heizkörper		11		9		7	
Heizwärmeverbrauch	kWh/m²a	212	211	131	131	63	63
Heizenergie Wärmepumpe	kWh/a	33036	32990	21812	21768	12176	12162
Heizenergie Elektroheizstab	kWh/a	86	44	0	0	0	0
Stromverbrauch Wärmepumpe	kWh/a	12098	11328	7627	7238	3995	3862
Stromersparnis	kWh/a	770		390		133	
Heizkosteneinsparung (bei 22 ct/kWh)	€/a	169,40		85,73		29,15	
JAZ		2,718	2,905	2,860	3,008	3,048	3,149
Δ JAZ		0,187		0,148		0,101	

5. Diskussion, Fazit und Ausblick

Für eine fundierte Bewertung der Ergebnisse müssen die berechneten Heizkosteneinsparungen in einer Investitionsrechnung untersucht werden. Diese steht gegenwärtig noch aus. Dennoch lassen sich bereits einige Erkenntnisse ableiten.

Für beide untersuchte Heizsysteme gilt als zentrales Ergebnis: Eine Wärmedämmung des Gebäudes erzielt zum einen viel höhere Einsparungen beim Energieverbrauch als das hier vorgeschlagene Konzept und ist deswegen aus Sicht des Klimaschutzes um ein Vielfaches wichtiger. Zum anderen bewirkt die Wärmedämmung bereits eine so deutliche Absenkung der Heizkreistemperaturen, dass der zusätzliche Effekt der TEG-Ventilator-Heizkörper mit zunehmendem Dämmstandard immer kleiner und immer unwirtschaftlicher wird.

Weiterhin erscheinen die Einsparungen für das Heizsystem 1 (Gas-Brennwertkessel plus Solaranlage) auch bei EFH1 mit rund 1000 € über eine angenommene Lebensdauer des TEG-Systems von 20 Jahren grenzwertig niedrig für eine Wirtschaftlichkeit; bei EFH2 und EFH3 kann man schon jetzt davon ausgehen, dass das Konzept eine Wirtschaftlichkeit kaum erreichen kann.

Deutlich positiver sind die Ergebnisse für das Wärmepumpen-Heizsystem zu bewerten. Hier lassen sich auch beim gut gedämmten EFH3 noch nennenswerte Heizkosteneinsparungen durch das TEG-System erzielen.

Für Fernwärmesysteme erscheint das TEG-System grundsätzlich interessant und auch von der Wirtschaftlichkeit her attraktiver, denn bei Fernwärme ist es entscheidend, für denjenigen Verbraucher, der die höchste Anforderung an die Netzvorlauftemperatur hat, technische Möglichkeiten zur Temperaturabsenkung zu finden.

Für alle genannten Systeme gibt es allerdings immer die konkurrierende Lösung, die vorhandene Heizkörperfläche zu vergrößern, beispielsweise indem man 22er Heizkörper durch 33er Heizkörper

ersetzt. Dies dürfte auch bei beschränktem Platz in der Heizkörperschleife in den meisten Fällen möglich sein.

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchungen sind durch große systematische Unsicherheiten in drei Bereichen beeinflusst. Zum einen sind die heutigen Kosten von TEG nur eine Momentaufnahme bei einer Technologie, die sich mit steigender Geschwindigkeit weiterentwickelt. Zum zweiten zeigen erste Messungen mit TEG, die wir durchgeführt haben, dass auch bei Verwendung eines ventilierten Kühlkörpers über dem TEG bei weitem nicht die volle Temperaturdifferenz zwischen Heizkreisvorlauf und Umgebungstemperatur anliegt, was auf Grund der starken Abhängigkeit der elektrischen Leistung der TEG von der antreibenden Temperaturdifferenz (vgl. Abbildung 1) einen großen ungünstigen Einfluss hat. Zum dritten zeigen unsere Messungen der Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Innenraum des Heizkörpers, dass bei einer Leistungsaufnahme der Ventilatoren im Bereich der von uns vermessenen Betriebspunkte von etwa 0,5 bis 2 W die Luft nur mit rund 0,3 bis 0,7 m/s strömt, was bei einem 22er Heizkörper mit 1000 mm Breite und einem Spaltabstand von rund 72 mm einem kinetischen Energiestrom von nur 1 bis 15 mW entspricht. Da der Strömungsdruckverlust vernachlässigbar klein ist, sollte aber die mechanische Leistung der Ventilatoren nahezu vollständig in kinetische Energie des Luftstroms umgewandelt werden. Daher zeigt schon diese grobe Abschätzung große Verbesserungspotenziale beim Ventilatorwirkungsgrad auf. Weiterhin zeigten sich bei Infrarotaufnahmen der Ventilatoren im Betrieb heiße Stellen im Bereich der Elektronik, was die vorhandenen Potenziale bei der Ventilatoreffizienz auf andere Weise sichtbar macht.

Die genannten Unsicherheiten müssen bei den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen mittels einer Sensitivitätsanalyse abgebildet werden. Im Ergebnis werden sich voraussichtlich Bereiche von TEG-Kosten und Ventilatorwirkungsgraden angeben lassen, für welche das Konzept von ventilierten Heizkörpern mit thermoelektrischem Antrieb wirtschaftlich interessant wird.

Die Autoren danken der Karl-Völker-Stiftung an der Hochschule Mannheim für die Förderung des Projektes.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Agirman Ö.: *Experimente zum Wärmeübergangskoeffizient an Heizkörpern mit Ventilatoren*. Masterprojektarbeit, Fakultät Verfahrens- und Chemietechnik, Hochschule Mannheim 2018
- [2] BINE Informationsdienst (Hrsg.): *Thermoelektrik: Strom aus Abwärme*. Themeninfo I/2016. Bonn 2016
- [3] BMWi (Hrsg.): *Zahlen und Fakten – Energiedaten*. Stand 14.08.2018; Quelle: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>, abgerufen am 10.12.2018
- [4] Bonin J.: *Handbuch Wärmepumpen – Planung und Projektierung*. 2. Auflage. Berlin: Beuth Verlag 2012
- [5] Bruder S.: *Energiesystemsimulationen mit Matlab Simulink und dem CARNOT-Blockset zur Effizienzsteigerung von Heizgeräten bei Absenkung der Heizkreistemperaturen*. Masterarbeit, Fakultät Verfahrens- und Chemietechnik, Hochschule Mannheim 2018
- [6] Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): *Handbuch Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse*. Offenbach 2014
- [7] Tiator I.: *Heizungsanlagen mit der neuen EnEV 2014*. 4. Auflage. Wiesbaden: Vogel Business Media 2016
- [8] Wesselak V., Schabbach T., Link T., Fischer J.: *Handbuch Regenerative Energietechnik*. 3. Auflage. Berlin: Springer 2017