

Energetische Sanierung von Mehrfamilienhäusern mit PVT-Hybridsystem und Messdienst-basierten Energiemanagement

Ulrich Leibfried¹⁾, Thomas Bernard²⁾, Simon Stürtz³⁾

¹⁾ Consolar Solare Energiesysteme, Gewerbestr. 7, D-79539 Lörrach

²⁾ Fraunhofer IOSB, Fraunhoferstr. 1, D-76131 Karlsruhe

³⁾ Comgy GmbH, Köpenicker Straße 154A, D-10997 Berlin

Einleitung, Hintergrund, Motivation

Gemäß Pariser Klimaabkommen ist für Deutschland Klimaneutralität bis 2035 erforderlich¹. In Deutschland entfallen rund 35 % des Energieverbrauchs auf Gebäude und Quartiere, davon wiederum über 90 % für das Bereitstellen von Wärme². Um in diesem Bereich das Klimaziel zu erreichen, ist v. a. eine deutlich größere und konsequentere Sanierungsrate erforderlich. Auch die Europäische Kommission hat am 14. Oktober 2020 ihre Renovierungswellenstrategie zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden veröffentlicht³. Demnach können grundlegende Renovierungen die Effizienz um 60 % verbessern. Dabei geht es zum einen um das Ersetzen fossil betriebener Wärmeerzeuger, zum anderen um die Dämmung der Gebäudehülle. Oftmals scheitert der Umstieg auf ein effizientes Niedertemperatur-Heizsystem mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien aber daran, dass hierzu erst das Gebäude saniert werden müsste, um den Wärmebedarf und das Temperaturniveau des Heizkreises zu reduzieren.

In diesem Beitrag wird ein Sanierungskonzept insbesondere für Mehrfamilienhäuser vorgestellt, bei dem die beiden Sanierungsmaßnahmen zeitlich entkoppelt sind. Das Heizsystem basiert auf einem Hybridsystem mit PVT-betriebener Wärmepumpe und einem Energiemanagement, das den dynamisch optimierten Einsatz der unterschiedlichen Energieträger gewährleistet im Sinne minimierter CO₂-Emissionen und Kosten.

Hybridsystem SOLINK-Wärmepumpe mit Spitzenlast-Gaskessel

Neben der Problematik fehlender Niedertemperatur-Heizungen scheitert der Einsatz von Wärmepumpen v. a. im dicht bebauten Stadtgebiet oft daran, dass Erdsonden oder Erdreich-Wärmetauscher nicht möglich oder gewünscht sind, während Luftwärmepumpen aufgrund der Geräuschemissionen und/oder des hohen Stromverbrauchs nicht zielführend sind.

SOLINK-PVT-Wärmepumpenkollektoren⁴ können aufgrund ihres hohen Wärmeübertragungsvermögens zur Umgebungsluft als alleinige, effiziente und lautlose Wärmequelle für Wärmepumpen eingesetzt werden. Gleichzeitig produzieren sie elektrischen Strom – durch die Kühlung auf der Rückseite mit höherem Ertrag als reine PV-Module.

Das Sanierungskonzept besteht darin, im ersten Schritt einen vorhandenen Gaskessel zu ersetzen (oder zu ergänzen) durch eine Wärmepumpe mit SOLINK-Kollektoren. Bei einer typischen Dimensionierung liegt die Wärmepumpenleistung bei 50 % der max. Heizleistung, liefert aber – teilweise im Parallelbetrieb – über das Jahr ca. 80 % der Heizenergie. Wird im zweiten Schritt die Gebäudehülle saniert, kann der Anteil des Gaskessels bis auf Null reduziert werden.

Eine solche stufenweise Sanierung wird in dem neuen Effizienzhausförderung des BEG besonders unterstützt: Ab dem 1. Juli 2021 soll im Bereich der Effizienzhaussanierungen ein

individueller Sanierungsfahrplan (iSFP) über 15 Jahre mit einem 5-prozentigen Bonus gefördert werden.

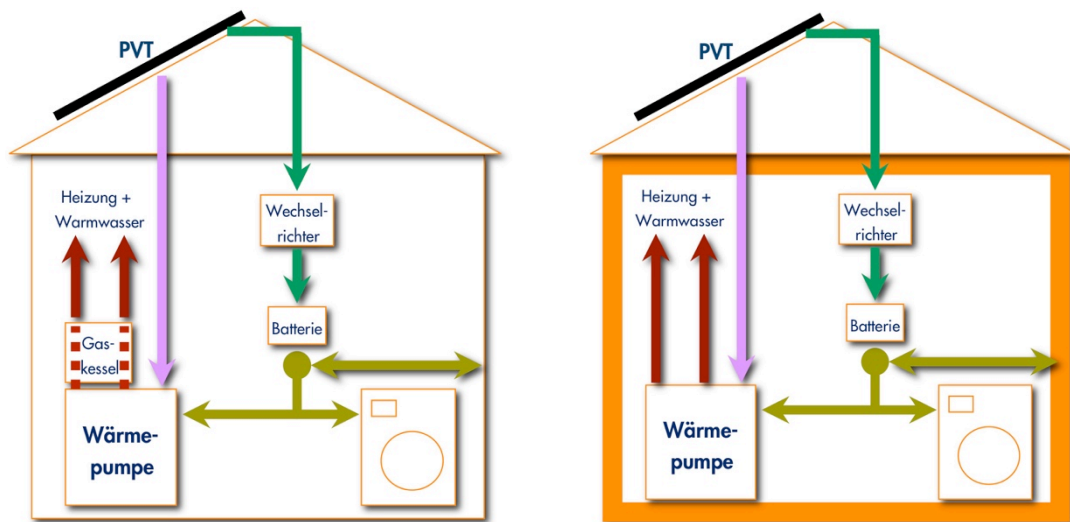


Abbildung 1: Zweistufige Sanierung: links: unsanierte Gebäudehülle, SOLINK-Wärmepumpe kombiniert mit Spitzenlast-Gaskessel; rechts: gedämmtes Gebäude, Vollversorgung mit SOLINK

SOLINK-Wärmepumpen stellen eine dritte, mittlerweile in über 300 Anlagen erprobte Klasse von Wärmepumpensystemen neben Erdreich-/Grundwasser-gekoppelten Wärmepumpen und Luftwärmepumpen dar. SOLINK-Systeme sorgen dafür, dass bei der Dekarbonisierung der Heiztechnik gleichzeitig der dafür notwendige Zubau an regenerativer Stromproduktion sicher gestellt ist.

Im Rahmen des von der DBU geförderten SOLINK-Projekts⁵ wurde gezeigt, dass mit SOLINK-Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern eine vergleichbare, teilweise bessere Wirtschaftlichkeit wie mit Luft- oder Erdsonden-Wärmepumpen kombiniert mit einer PV-Anlage erreicht wird⁶. Die Wirtschaftlichkeit kann bei Nutzung des Eigenstroms auch für Haushalte/Mieter noch weiter verbessert werden. Voraussetzung für eine breite und unkomplizierte Nutzung dieser Option ist, dass die Bundesregierung ihrer Pflicht nachkommt, bis Ende Juni 2021 das EEG diesbezüglich konform zum Europarecht anzupassen.

Optimierung durch prädiktiven Energiemanager

Die PVT-Kollektoren produzieren bei typischer Dimensionierung im Jahr die elektrische Energie, die das System verbraucht. Zwar wird der Strom zum größeren Teil dann produziert, wenn kein Heiz- aber Warmwasserbedarf besteht, bei entsprechendem Lastmanagement mit Wärme- und Batteriespeicher kann der Strombedarf dennoch zu 50 % und mehr direkt gedeckt werden⁷.

Bei dem mit Förderung des BMWi im Projekt dynOpt-En entwickelten Energiemanager geht es um die Gesamtoptimierung dieser Multierzeugeranlage: Zum einen soll der selbst produzierte Strom durch Speicherung in Form von Wärme oder elektrischer Energie maximal lokal genutzt werden, zum anderen soll der Betrieb von Wärmepumpe und Spitzenlastkessel so erfolgen, dass die Emissionen und Kosten minimiert werden. Dies ist insbesondere in Zeiten, in denen die Wärmepumpe vom Netz versorgt wird, wichtig.

Der dynOpt-En-Energiemanager (www.dynopt.de) optimiert per Prädiktions-Algorithmus die Wärmeerzeugung in Gebäuden und Quartieren. Die Optimierungssoftware errechnet dafür aus den für die Energieabrechnung vorhandenen Zählerdaten in Kombination mit Wettervorhersagen und weiteren Sensordaten fortlaufend Prognosen. Diese werden genutzt, um verschiedene Wärmeerzeuger optimiert aufeinander abzustimmen, neben Wärmepumpen und Gasthermen auch BHKWs, jeweils kombiniert mit PV- oder Solarwärme-Anlagen.

Das Besondere am dynOpt-En-Energiemanager sind die Algorithmen für Prädiktion und Optimierung, die ohne aufwändige individuelle Programmierung und mit einer geringen Anzahl von Sensoren auskommen. Durch das konsequente Design des Energiemanagers als Onlineservice sind daher kaum Installationen vor Ort nötig. Alle Daten sind per Datenschnittstelle (Web-API) verfügbar. Über ein Gateway werden die Daten der für die Verbrauchsabrechnung bereits vorhandenen Zähler in 15-Minuten-Auflösung an den Energiemanager, der auf einem externen Server läuft, übergeben. Über das Gateway und dafür vorgesehene Schnittstellen, wie zum Beispiel die SG-Ready-Schnittstelle einer Wärmepumpe werden auch die Betriebsanforderung für die Wärmeerzeuger gesetzt. Dafür können entweder neu im Projekt entwickelte Gateways als Plug-and-Play-Lösung eingesetzt oder bereits installierte Datensammler und Steuerungen integriert werden. Das Energiemanagement kann somit als Dienstleistung des Messdienstes angeboten werden. Als weiterer Service kann die Überwachung des Energieverbrauchs und der Kosten erfolgen mit einem Vergleich der realen Werte mit den für die jeweiligen Wetterbedingungen erwarteten.

Im Projekt wird aktuell die Funktionalität des Energiemanagers anhand von 3 Liegenschaften erprobt. Abbildung 2 zeigt Messdaten und Ergebnisse des Energiemanagers eines der Demonstratoren im Zeitraum 17. – 23.3.21 (gewerblich genutzte Liegenschaft in Lörrach). Es ist zu erkennen, dass der Energiemanager den Einsatz der Wärmepumpe so steuert, dass diese bevorzugt zu Zeiten mit hohem Solarertrag aktiviert wird. Außerdem aktiviert der prädiktive Energiemanager die Wärmepumpe jeweils so lange, dass die Speichertemperatur am nächsten Morgen noch hoch genug ist, um die erneute Aktivierung bis zur Mittagszeit abwarten zu können. Abbildung 3 zeigt Tages-Mittelwerte der Kosten und CO₂-Emissionen pro kWh thermische Energie beim Einsatzes des dynOpt-Energiemanagers in der Demonstrator-Liegenschaft (Zeitraum 11. – 24.3.2021). Es ersichtlich, dass von den gezeigten 14 Tagen an 6 Tagen keine elektrische Energie aus dem Netz bezogen werden muss, der Wärmepumpen-Betrieb also an 6 Tagen kosten- und CO₂-emissionsfrei erfolgt.

Die Güte des dynOpt-Energiemanagers wurde anhand einer Simulations-Studie mit einem vereinfachten Energiemanager verglichen. Der vereinfachte Energiemanager bewertet auch den verfügbaren Solarertrag, hat jedoch nur einen Kurzfrist-Prädiktionshorizont von 2 Stunden (der dynOpt-Energiemanager hingegen prädiziert 36 Stunden). Es wurden reale Klimadaten und die Verbrauchsdaten der Demonstrator-Liegenschaft in Lörrach verwendet (Zeitraum 1.9. – 31.12.2020). Anhand der Simulationsergebnisse wurden die in Tabelle 1 gezeigten Kennzahlen hinsichtlich Kosten, CO₂-Emissionen und Eigenverbrauchsanteil berechnet.

Zusammenfassend lässt sich anhand der gemessenen Ergebnisse aus der Demonstrator-Liegenschaft und den Simulationsergebnissen feststellen, dass der dynOpt-Energiemanager Kosten und CO₂-Emissionen signifikant reduziert und den Eigenverbrauchsanteil deutlich steigert.

	einfacher Energiemanager	dynOpt-Energiemanager	Relativer Unterschied
Kosten/(thermische Energie)	3.5 Cent/kWh	3.1 Cent/kWh	13%
CO2-Emissionen/(thermische Energie)	59 gCO2/kWh	52 gCO2/kWh	13%
Eigenverbrauchsanteil (*)	42%	51%	21%

(*) (PV-Energie für Betrieb Wärmepumpe)/(gesamte elektrische Wärmepumpenenergie)

Tabelle 1: Kennzahlen anhand einer Simulationsstudie

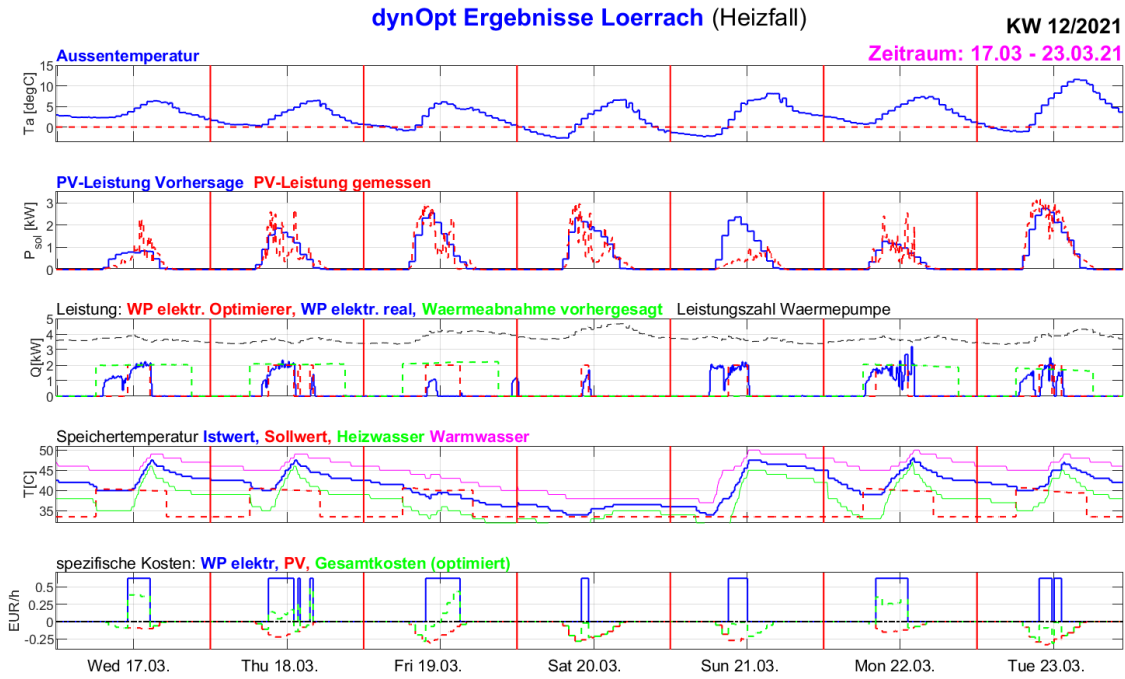


Abbildung 2: Ergebnis des Einsatzes des dynOpt-Energiemanagers in einer Demonsrator Liegenschaft

Kosten und CO₂-Emissionen pro thermische Energie (Täglich)

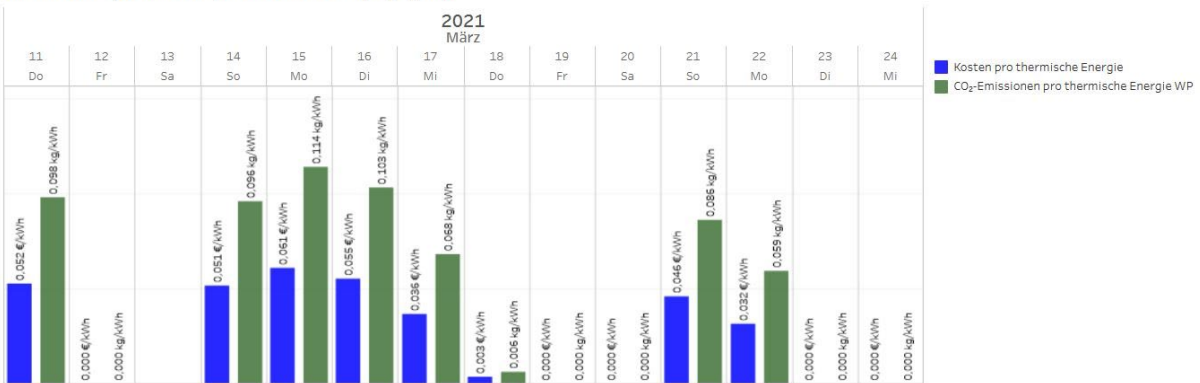


Abbildung 3: Tages-Mittelwerte der Kosten und CO₂-Emissionen pro kWh thermische Energie beim Einsatzes des dynOpt-Energiemanagers in einer Demonstrator-Liegenschaft (Zeitraum 11. – 24.3.2021)

Simulation einer stufenweisen Sanierung

In einer Simulationsstudie wurde ein typischer Sanierungsablauf eines Mehrfamilienhauses in zwei Schritten abgebildet. *Tabelle 1* zeigt die der Simulationsstudie zugrunde gelegten Randbedingungen.

Tabelle 2: Umgebungsbedingungen, Gebäude und Wärmeerzeuger für Simulationsstudie

Sanierungsstufe		unsaniert	Hybridsystem	Saniertes Gebäude ohne Gas
Standort		Würzburg	Würzburg	Würzburg
beheizte Wohnfläche	m ²	800	800	800
Heiz-Wärmebedarf	kWh/a	54400	54400	27750
	kWh/(m ² a)	68	68	35
WW-Entnahme	l/d	1450	1450	1450
WW-Wärmebedarf	kWh/a	22080	22080	22080
Ausrichtung / Neigung Kollektorfeld		-	Süd / 40°	Süd / 40°
Allgemeinstrom (nutzt PV-Ertrag)	kWh/a	6000	6000	6000
Warmwasser-Bereitung		Zentrale WW-Bereitung, 60°C Zirkulation	Vierleiternetz, dezent. FriWa, 50 °C Zirkulation	Vierleiternetz, dezent. FriWa, 50 °C Zirkulation
Heizkreis-Temperaturen VL/RL	°C	60/50	60/50	40/35
Leistung Gaskessel	kW	28	-	-
Leistung Wärmepumpe (zweistufig) bei B0/W35 / B-15/W35	kW	-	21 / 14	21 / 14
Fläche SOLINK-PVT-Kollektoren	m ²	-	55	55

In der vollsanierten Stufe 3 wird von einer Reduktion des Heizwärmebedarfs auf die Hälfte ausgegangen. Die vorhandene Heizfläche muss dann nur noch die halbe Leistung übertragen, wodurch sich die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen reduzieren.

Die Simulationen wurden mit Polysun durchgeführt. *Abbildung 3* und *Abbildung 4* zeigen die jeweils modellierten Hydrauliken.

In allen drei Fällen ist jeweils ein 1000 l Pufferspeicher für den Heizkreis und ein weiterer für die Warmwasserbereitung vorgesehen.

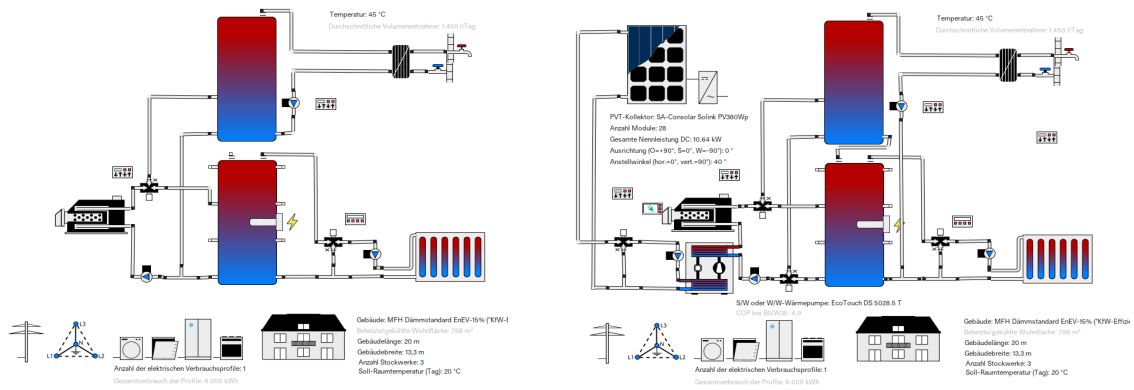


Abbildung 4: In Simulation abgebildete Hydraulikschemata: links unsaniert mit Gaskessel, rechts mit Hybridsystem: Wärmepumpe mit SOLINK-PVT-Kollektoren und Gaskessel in Reihe geschaltet.

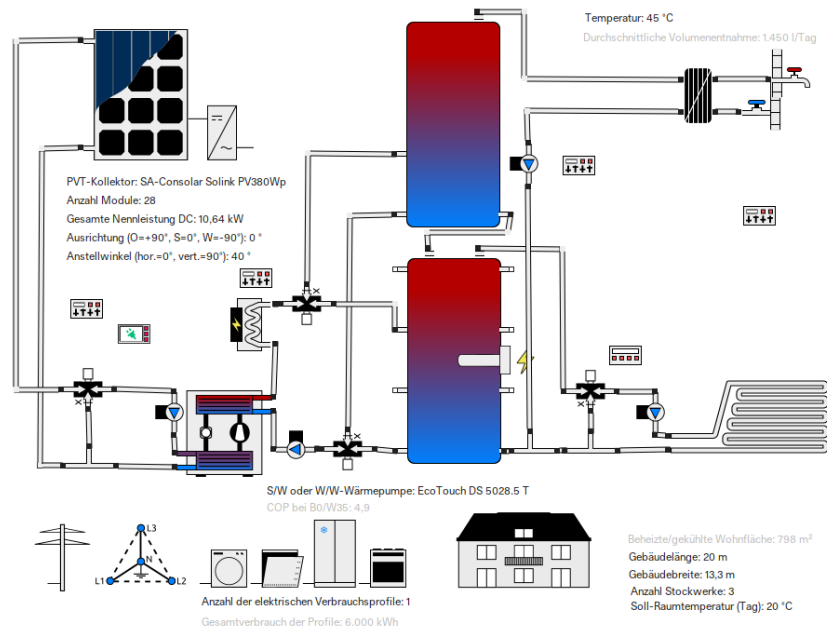


Abbildung 5: Hydraulik der zweiten Sanierungsstufe für monoenergetischen Wärmepumpenbetrieb. Der Rücklauf der Zirkulationsleitung für die Warmwasserbereitung ist am Heizungspufferspeicher unten angeschlossen. Durch diese optimierte Anbindung kann der Heizungspufferspeicher auch im sommerlichen reinen Warmwasserbetrieb für Energiemanagement, d. h. Vorratsbeheizung bei PV-Überschuss genutzt werden.

Mit Jahressimulationen wurden die Reduktionen der Verbrauchskosten und der durch das Heizsystem verursachten CO₂-Emissionen berechnet. Dabei wurden folgende Annahmen angesetzt:

- Energiepreis Wärmeerzeuger (Gas): 6 Cent/kWh
- Energiepreis Wärmeerzeuger (Strom): 22 Cent/kWh
- Energiepreis Hilfsenergie (Strom): 29,2 Cent/kWh
- Einspeisevergütung: 9,03 Cent/kWh
- CO₂-Faktor Strom: 537 kg CO₂eq/kWh
- CO₂-Faktor Gas: 202 kg CO₂eq/kWh

Bei der Berechnung der Kosten wurde die Einspeisevergütung von den Verbrauchskosten abgezogen. Bei den CO₂-Emissionen wurde dagegen die CO₂-Gutschrift durch PV-Einspeisung *nicht* berücksichtigt.

Abbildung 5 zeigt die jährlichen CO₂-Emissionen und Betriebskosten der drei Stufen. Durch die erste Sanierungsstufe werden die CO₂-Emissionen um 40 % reduziert, durch die zweite um 65 % gegenüber der Ausgangsbasis. Dabei nicht berücksichtigt ist die CO₂-Vermeidung durch Einspeisung von PV-Strom in das Netz. Die Kosteneinsparung – hier unter Berücksichtigung der Einspeisevergütung – ist sehr ähnlich: 41 % in der erste Stufe, 65 % in der zweite Stufe. Dies entspricht CO₂-Emissionen von 8,75 kg CO₂ pro m² Wohnfläche und erreicht damit den Zielwert von ≤ 9 kg CO₂/m² für Wohngebäude für Neubau der mit dem Ziel der maximalen Erderwärmung von 1,5 °C korrespondiert⁸.

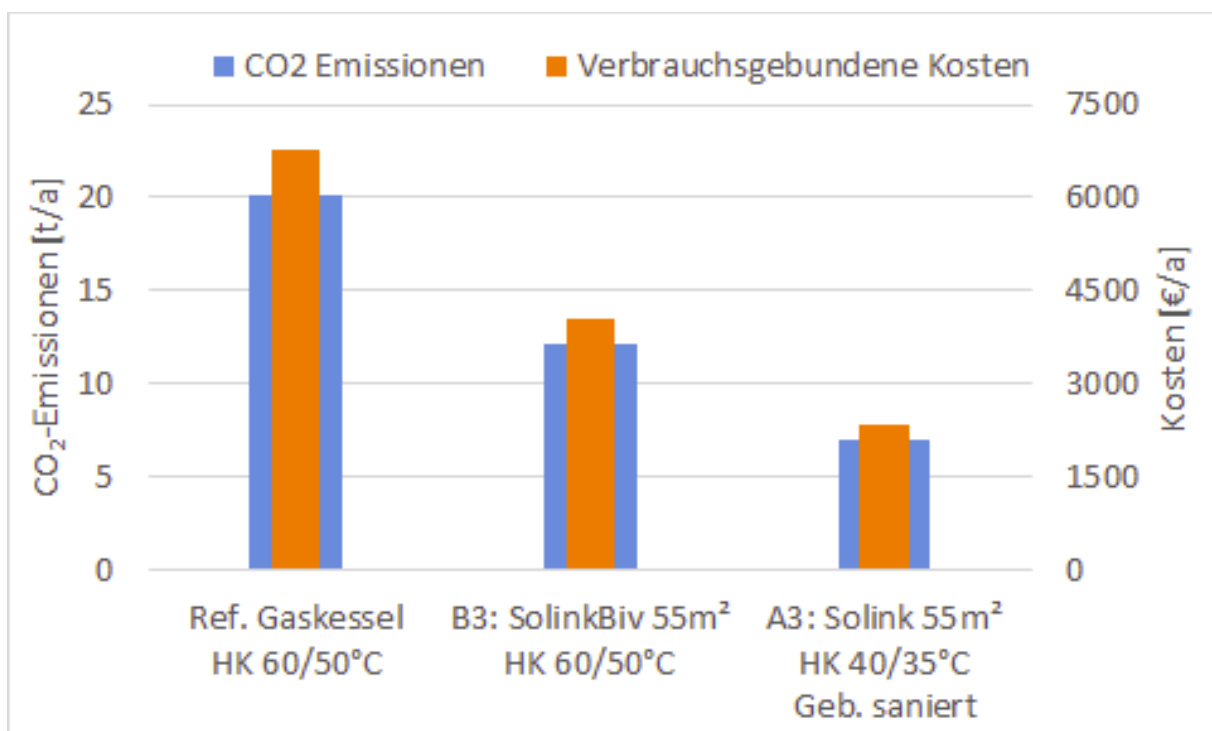


Abbildung 6: Kosten und CO₂-Emissionen des Ausgangszustands und der beiden Sanierungsstufen

In der ersten Sanierungsstufe liefert der Gaskessel nur noch 20 % des Jahreswärmebedarfs, 80 % kommen von der SOLINK-Wärmepumpe. Die Ursache, dass die Kosten und Emissionen in der vollsanierten Stufe nicht weiter sinken liegt darin, dass der Gesamtwärmebedarf nicht halbiert wird, sondern immer noch 65 % des Verbrauchs der ersten Sanierungsstufe ausmacht. Der Heizwärmeverbrauch sinkt zwar auf 50 %, aber der Warmwasserverbrauch bleibt gleich. Auch führt die bessere Wärmedämmung dazu, dass der Heizbetrieb in der Übergangszeit reduziert wird - also die Zeiten, die auch sehr effizient mit Wärmepumpe und PVT versorgt werden könnten.

Abbildung 6 zeigt die Energiebezüge der drei Varianten im Detail sowie wichtige Kennzahlen. Der Eigenverbrauchsanteil von Stufe 2 und 3 liegt bei jeweils 50 %, d. h. die von den SOLINK-Kollektoren produzierte elektrische Energie wird zur Hälfte direkt für das Heizsystem oder den Allgemeinstrom genutzt. Bei direkter Nutzung des PV-Ertrags auch für die Haushalte könnte dieser Anteil und damit auch die Wirtschaftlichkeit noch weiter gesteigert

werden. Voraussetzung, dass dies auch in der Praxis umgesetzt wird, ist eine Anpassung der deutschen Gesetzgebung an die europäischen Vorgaben dahingehend, dass in einem Gebäude produzierter Strom ohne bürokratischer Hürden und Abgaben direkt genutzt werden kann.

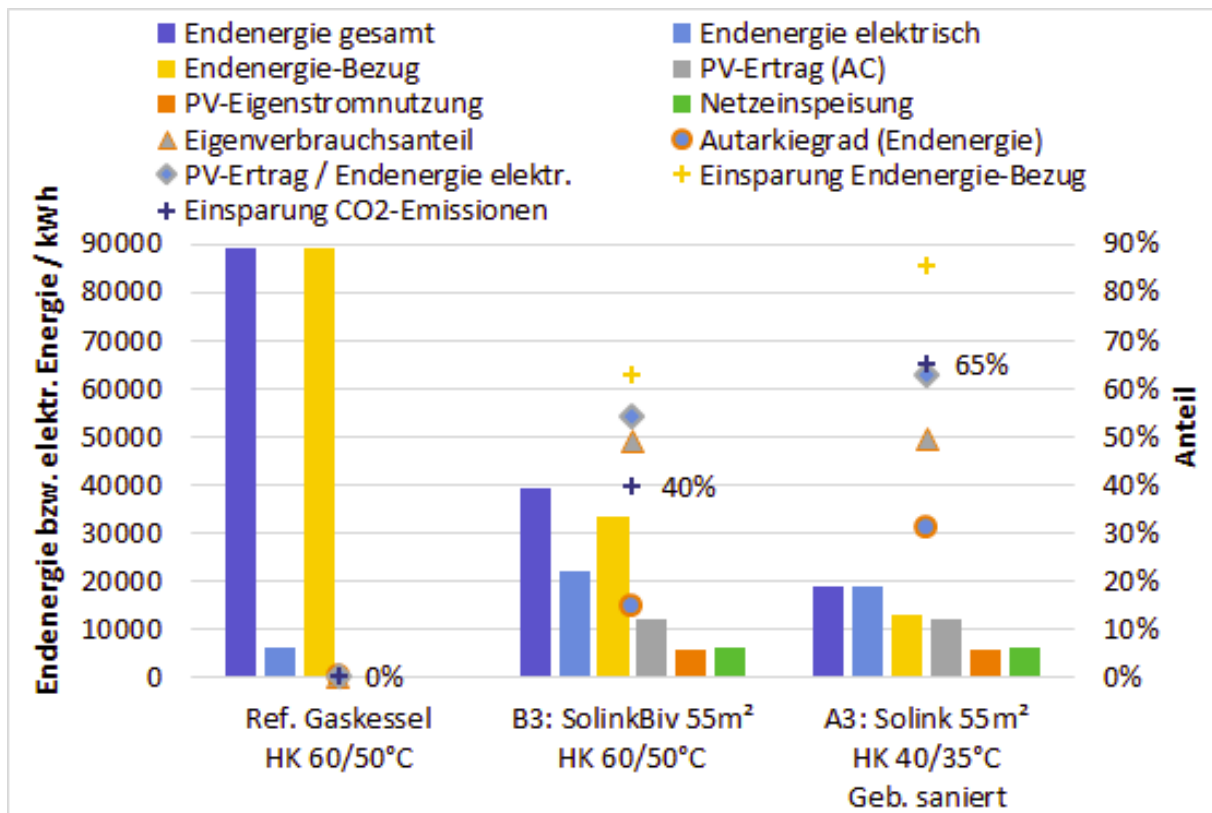


Abbildung 7: Energiebezüge und Kennzahlen der drei Varianten

Das Ergebnis von bivalenten Systemen, hier der teilsanierten Variante B3, hängt in Bezug auf Kosten- und CO₂-Einsparung stark vom Regelkonzept ab. Hier wurde ein von der Außentemperatur abhängiger Bivalenzpunkt mit Parallelbetrieb angesetzt: der Kessel wird nur unter 0 °C Umgebungstemperatur zusätzlich zur Wärmepumpe freigegeben. Weiterhin ist ein einfaches nicht prädiktives Energiemanagement implementiert: Übersteigt die PV-Netzeinspeisung einen Schwellwert, so wird die Soll-Temperatur der Wärmepumpe, mit der sie den Pufferspeicher beheizt, angehoben.

Der oben vorgestellte prädiktive dynamische Energiemanager ist hier noch nicht integriert. Er könnte z. B. in Abhängigkeit vom aktuellen CO₂-Mix des Netzstroms insbesondere beim Hybridsystem die Gesamt-CO₂-Emissionen noch weiter reduzieren. Ohne größere Anpassungen kann der Energiemanager dann in der zweiten Sanierungsstufe weiter für einen optimierten Betrieb der Wärmepumpe sorgen im Zusammenspiel mit Wärmebedarf, Wärmespeicher, ggf. Batteriespeicher, Solarangebot und CO₂-Netzmix.

Reale Anwendung

Die Wärmeversorgung eines Mehrfamilienhauses der Volkswohnung Karlsruhe, das in 1963 errichtet und in den 80er und 90er-Jahren saniert wurde, wurde in 2020 mit einer SOLINK-Wärmepumpe sowie einem Spitzenlast-Gaskessel saniert. Die Sole-Wärmepumpe hat eine Leistung von 43 kW_{th} (B0/W35), der Spitzenlastgaskessel eine Leistung von 60 kW_{th}, das SOLINK-Kollektorfeld hat eine Fläche von 200 m².

Die Inbetriebnahme ist für Frühjahr 2021 geplant, und das System wird vom Fraunhofer ISE im Rahmen des Projekts *Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach (SQ-Durlach)* messtechnisch betreut.



Abbildung 8: Transport der SOLINK-Kollektoren auf das Dach des Mehrfamilienhauses



Abbildung 9: Auf dem Dach installierte SOLINK-Kollektoren (eine Dach- und Feldhälfte)

Zusammenfassung und Fazit

SOLINK-PVT-Wärmepumpensysteme ermöglichen auch im dicht bebauten Stadtgebiet den Einsatz von effizienten Wärmepumpen. Entscheidende Vorteile gegenüber einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit PV-Anlage sind die höhere Systemeffizienz und die nicht vorhandene Lärmbelastung. Gegenüber Erdreich-Wärmepumpen entfallen Einschränkungen durch Platzbedarf bzw. geologische Voraussetzungen für Bohrungen. In Verbindung mit einer zeitlich entkoppelter Sanierung von Heiztechnik und Gebäudehülle eröffnen Sie neue Möglichkeiten der energetischen Sanierung des Gebäudebestands.

Da es sich um ein System mit mehreren Energieerzeugern und -verbrauchern handelt – PVT, Wärmepumpe, Spitzenlastgaskessel – ist ein gut abgestimmter Betrieb Voraussetzung für eine hohe Effizienz und CO₂-Vermeidung. Der prädiktive Energiemanager dynOpt-En ermöglicht bei geringem Zusatzaufwand für Installation und Betrieb insbesondere für Mehrfamilienhäuser eine optimierte Betriebsführung.

Das Konzept der stufenweisen Sanierung mit SOLINK-Wärmepumpensystemen und dem dynOpt-En-Energiemanager kann einen wertvollen Baustein für den Umbau des Gebäudebestands zur Klimaneutralität bilden.

Literatur

¹ Stefan Rahmstorf, Potsdam Institut, <https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/wie-viel-co2-kann-deutschland-noch-ausstossen/> (Stand 29.05.2020)

² <https://www.energieforschung.de/energieforschungspolitik/energieforschungsprogramm/foerderschwerpunkte/#guq>

³ https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en

⁴ Ulrich Leibfried, Stephan Fischer, Sebastian Asenbeck: PVT-Wärmepumpensystem SOLINK – Systemvalidierung und zwei Jahre Praxiserfahrung, Symposium Thermische Solarenergie 2019, Bad Staffelstein, 21. – 23.06.2019

⁵ Hocheffiziente, auf intelligenter Verknüpfung von PVT- und Wärmepumpentechnik basierende Wärmeversorgung für Gebäudebestand und Neubau, DBU-Förderprojekt 2016 - 2020

⁶ Sebastian Asenbeck, Ulrich Leibfried, Hans Stork, Stephan Fischer: SOLINK-PVT-Wärmepumpen-System: Bilanziell CO₂-neutrales und wirtschaftliches Heizsystem für Mehrfamilienhäuser, Fachveröffentlichung in Vorbereitung (März 2021)

⁷ Ulrich Leibfried, Andreas Wagner, Amar Abdul-Zahra: Hocheffiziente, auf intelligenter Verknüpfung von PVT- und Wärmepumpentechnik basierende Wärmeversorgung für Gebäudebestand und Neubau, Teil 1, Abschlussbericht DBU-Projekt 33226/01, 4. August 2017

⁸ Jörg Ortjohann, ReConGeb I REFERENZ-CONTROLLING-GEBÄUDE Endbericht zur Vorstudie der energy-check Stiftung Energieeffizienz gGmbH, gefördert mit progres Mitteln des Landes NRW, Köln, 2018