



TAG4-EW-0805-E01

# **Bestimmung der Kollektorfläche von Solarthermieanlagen nach dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz**

**Auftraggeber: Bundesministerium für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit**

Schlussbericht

Freiburg, 9. Mai 2008

Edo Wiemken, Hans-Martin Henning, Sebastian Herkel, Florian Kagerer,  
Doreen Kalz, Alexander Morgenstern

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg

Telefon: 0761 4588 –5412  
Fax: 0761 4588 –9000  
e-mail: [edo.wiemken@ise.fraunhofer.de](mailto:edo.wiemken@ise.fraunhofer.de)



---

Dr. Hans-Martin Henning,  
Abteilungsleiter Thermische Anlagen  
und Gebäudetechnik (TAG)

---

Edo Wiemken,  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Definition der Gebäude</b>	<b>8</b>
2.1	Definition der Energiestandards entsprechend EnEV	8
2.2	Einfamilienhaus	9
2.3	Mehrfamilienhaus	10
2.4	Bürogebäude	10
2.5	Sportanlage (nur Warmwasserprofil)	11
<b>3</b>	<b>Definition der Solaranlagen</b>	<b>12</b>
3.1	Trinkwarmwasseranlage	12
3.1.1	Für das Einfamilienhaus	13
3.1.2	Für das Mehrfamilienhaus und für die Sportanlage	13
3.2	Heizungsunterstützung und Trinkwassererwärmung (Kombianlage)	14
3.2.1	Für das Einfamilienhaus	14
3.2.2	Für das Mehrfamilienhaus	15
3.3	Anlage zum Heizen und Kühlen für Bürogebäude	15
<b>4</b>	<b>Durchführung der Parameterstudie</b>	<b>18</b>
4.1	Definition von Gesamtsystemen	18
4.2	Parameterstudie: Methodik	19
4.3	Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen: Methodik	23
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>24</b>
5.1	Kollektorflächen zur Einsparung von 15% des Wärmebedarfs in Neubauten	24
5.1.1	Einfamilienhaus	24
5.1.2	Mehrfamilienhaus	27
5.1.3	Nichtwohngebäude – Bürogebäude	30
5.1.4	Nichtwohngebäude – Sportstätte	32
5.2	Technisch und wirtschaftlich angemessene Kollektorflächen	33
5.2.1	Solarthermische Trinkwassererwärmung	33
5.2.2	Kombisysteme	36
5.2.3	Solarthermische Heizungsunterstützung	37
5.2.4	Solarthermische Heizungsunterstützung und Kühlung	37
5.3	Abschätzung der Investitionskosten und der Brennstoffeinsparung	38
5.3.1	Einfamilienhaus	38
5.3.2	Mehrfamilienhaus	40
5.3.3	Bürogebäude	42
5.3.4	Sportstätte	44

5.3.5	Veränderter Flächenbezug: Wärmebedarf	45
5.3.6	Veränderter Flächenbezug: Beheizte Fläche	48
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen, Empfehlungen</b>	<b>52</b>
	<b>Literatur</b>	<b>55</b>
	<b>ANHÄNGE</b>	<b>57</b>
A1	Ergänzungen zu den Ergebnissen der Parameterstudie	58
A2	Modellgebäude	73
A3	Profile des Trinkwarmwasserverbrauchs	85
A4	Standortauswahl	91
A5	Modellannahmen zu Systemen der solarthermischen Wärmeversorgung	93
A6	Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsabschätzung	108

# 1 Einführung

Im Zusammenhang mit der geplanten Einführung des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz in 2009 sollen in der vorliegenden Studie Fragen zur Anwendung solarthermischer Kollektorsysteme in Wohn- und Nichtwohngebäuden behandelt werden, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

1. Welche Kollektorfläche ist erforderlich, um den Wärmeenergiebedarf von Neubauten (Wohn-/Nichtwohngebäude) zu 15% zu decken?
2. Welche Kollektorfläche ist unter technischen Gesichtspunkten angemessen
  - für eine ausschließliche Nutzung zur Trinkwassererwärmung und
  - für eine heizungsunterstützende Nutzung, und welcher Bedarfsdeckungsanteil wird hiermit erreicht?
3. Welche Investitionskosten und welche Einsparungen an Brennstoffen verursachen die unter 1. und 2. benannten Kollektoranlagen über die durchschnittliche Lebensdauer?

Zur Bearbeitung dieser Fragestellungen werden zwei Wohn- und zwei Nichtwohngebäude in maximal zwei unterschiedlichen Baustandards definiert und der Wärmebedarf der Gebäude für diese Baustandards ermittelt. Anschließend erfolgt eine Berechnung der Einsparung des Wärmebedarfs durch eine zusätzliche Wärmebereitstellung solarthermischer Kollektoren. Unterschiedliche Nutzungsarten der Kollektorsysteme, etwa ausschließliche Unterstützung der Trinkwassererwärmung sowie zusätzliche Heizungsunterstützung finden Berücksichtigung. Für ein Bürogebäude mit Kühlbedarf wird exemplarisch auch eine solarthermische Kühlung diskutiert.

Die Ergebnisse der Berechnungen werden anhand der oben aufgeführten Fragestellungen in energetischer und wirtschaftlicher Hinsicht im Kapitel 5 der Studie dargestellt.

Durch den vieldimensionalen Parameterraum, den die unterschiedlichen zur Modellierung gelangten Anwendungen (Gebäude), Nutzungsarten und Systemvarianten aufspannen, ist eine Verallgemeinerung der Ergebnisse schwierig; Schlussfolgerungen und Empfehlungen werden in den abschließenden Kapiteln 6 und 7 diskutiert.

Zu Beginn der Studie werden in den folgenden Kapiteln die unterschiedlichen Gebäudetypen definiert, für die der Wärmebedarf ermittelt wird. Dies sind im einzelnen

- ein Einfamilienhaus (EFH)
- ein Mehrfamilienhaus (MFH)
- ein Bürogebäude
- eine Sportstätte.

Mit Ausnahme des Bürogebäudes und der Sportstätte wird der Wärmebedarf für je zwei unterschiedliche Primärenergie-Standards (ENEV 2009, ENEV 2012) berechnet. Anschließend folgt eine Übersicht über die Solarkollektorsysteme, mit denen der Wärmebedarf anteilig gedeckt wird.

Technische Details zu den einzelnen Gebäuden und den Kollektorsystemen, zu Detailergebnissen und zu den Eckdaten der Wirtschaftlichkeitsabschätzung finden sich in den Anhängen.

## 2 Definition der Gebäude

### 2.1 Definition der Energiestandards entsprechend EnEV

Wohngebäude und Nichtwohngebäude mit unterschiedlichen Nutzungen unterscheiden sich sowohl hinsichtlich

- des Verhältnisses Warmwasserbedarf zu Heizwärmebedarf,
- des Verhältnisses Wärme zu Strombedarf
- der in den gesetzlichen (EnEV) Regeln definierten Rechenverfahren

Insbesondere der letzte Punkt ist zu beachten, wenn im Rahmen der Studie eine Definition der Anforderungen EnEV, EnEV 2009 und EnEV 2012 erfolgt. Wohngebäude werden entsprechend der DIN 4108, Teil 6 und DIN 4701, Teil 10 berechnet. Darin ist festgelegt, das

- Der Bilanzraum Heizwärme und Trinkwarmwasser einschließlich der Hilfsenergien für diese Energiedienstleistung umfasst (also ohne Beleuchtung, Lüftung im Sommer, ..);
- der zulässige Primärenergiebedarf als Funktion des A/V-Verhältnisses definiert wird und
- der Flächenbezug aus dem Volumen ermittelt wird (und damit nicht der in der Heizkostenberechnungsverordnung entspricht).

Nichtwohngebäude werden nach dem in der DIN 18599 definierten Verfahren berechnet. Darin ist festgelegt, das

- Der Bilanzraum mit Ausnahme der Arbeitshilfen alle Energiedienstleistungen umfasst;
- der zulässige Primärenergiebedarf durch eine Referenzgebäude definiert wird. D.h. es gibt keinen einheitlichen, flächenbezogenen Zielwert für den Primärenergiebedarf.
- der Flächenbezug die Nettogrundfläche aller Gebäudezonen umfasst, die mit einer Energiedienstleistung versorgt sind (z.B. auch eine beleuchtete Tiefgarage).

Aufgrund der unterschiedlichen Verfahren ist Vergleichbarkeit methodisch nicht möglich. Eine Verallgemeinerung ist nur für die Wohngebäude möglich, auch wenn der in der EnEV definierte Flächenbezug methodisch ungeeignet ist.

Da sowohl bei Wohngebäuden als auch bei Nichtwohngebäuden eine Reduzierung des Primärenergiebedarfs um jeweils 30% auch durch Maßnahmen erreicht werden können, die den Wärmebedarf nur wenig tangieren (z.B. im Nichtwohnungsbau der Einsatz einer energieeffizienten Beleuchtung und Lüftung oder die Umstellung auf eine Holzhackschnitzelfeuerung) wurden im folgenden die Reduktionsstufen der EnEV weitgehend durch eine Reduktion des Heizwärmebedarfs erreicht (mit Ausnahme des Bürogebäudes und der Sportstätte), um den Einfluss auf eine solarthermische Versorgung darstellen zu können.

Modellvorlage für ein Einfamilienwohngebäude (EFH) und für ein Mehrfamilienwohngebäude (MFH) sind existierende Wohngebäude. Mit den entsprechenden Gebäudegeometrien wurden in Simulationsrechnungen die Heiz-

lasten für zwei Standorte berechnet. Diese Zeitreihen der Heizlasten sind eine der Grundlagen für die Systemsimulation der Anlagen zur solarthermisch unterstützten Trinkwassererwärmung bzw. Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung.

Für die Nichtwohngebäude wurde ein in der Planung befindlicher Bürobau gewählt, nach DIN 18599 bewertet und mit den Ergebnissen der Gebäudelastsimulation abgeglichen. Als weiterer Gebäudetypus wurde die Warmwasserversorgung einer Sportanlage gewählt, da hier auch im Nichtwohnungsbau ein Warmwasserbedarf für das Duschen besteht.

In den Gebäudemodellen wurden die Wandaufbauten (Dicke der Isolierung usw.) sowie die Lüftungstechnischen Maßnahmen dahingehend zweistufig modifiziert, dass die folgenden Vorgaben eingehalten werden:

- a) Die Vorgaben bezüglich des Primärenergiebedarfs liegen 30% unterhalb der Vorgaben nach ENEC 2007; diese Variante wird im folgenden als **ENEV 2009** bezeichnet;
- b) der Primärenergiebedarf liegt nochmals um 30% unterhalb des Primärenergiebedarfs nach ENEC 2009; diese Variante wird im folgenden ungeachtet der noch nicht erfolgten Präzisierung der zukünftigen ENEC als **ENEV 2012** bezeichnet.

Als Klimazonen wurden die Standorte Passau und Essen gewählt und die Wetterdaten der entsprechenden Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes [DWD 2004] genutzt:

i Passau

Jahresmittelwert der Umgebungstemperatur:	8.3°C;
jährliche Einstrahlungssumme global horizontal:	1102 kWh/m <sup>2</sup>

ii Essen

Jahresmittelwert der Umgebungstemperatur:	9.4°C;
jährliche Einstrahlungssumme global horizontal:	897 kWh/m <sup>2</sup>

## 2.2 Einfamilienhaus

Modellvorlage: Solar-Nullenergiehaus in Emmendingen, Baden-Württemberg. Die beheizte Wohnfläche beträgt 160 m<sup>2</sup>, die Belegung wird mit vier Personen angenommen. Damit entspricht die Wohnfläche dem statistischen Mittel nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (Wohngebäude: ca. 40 m<sup>2</sup> pro Person). Die Nutzfläche nach ENEC beträgt **A<sub>N</sub> = 200 m<sup>2</sup>**; dies ist die Bezugsgröße für die Darstellung der Ergebnisse. Als Heizsystem wird von Flächenheizsystemen ausgegangen; entsprechend niedrig ist die erforderliche Vorlauftemperatur im Heizkreis (40°C).

Aus der dynamischen Gebäudesimulation resultiert der folgende jährliche Heizwärmebedarf:

Wetterdaten Passau

ENEV 2009	15020 kWh; entspricht 75.1 kWh/m <sup>2</sup>
ENEV 2012	6840 kWh; entspricht 34.2 kWh/m <sup>2</sup>

Wetterdaten Essen

ENEV 2009	13540 kWh; entspricht 67.7 kWh/m <sup>2</sup>
ENEV 2012	6330 kWh; entspricht 31.6 kWh/m <sup>2</sup>

Details zum Gebäudemodell finden sich in Anhang A2.

## 2.3 Mehrfamilienhaus

Als Modellvorlage dient ein Mehrfamilienhaus der Blauen Heimat in Heidelberg, Baden-Württemberg. Die beheizte Wohnfläche beträgt 3374 m<sup>2</sup>, die Belegung wird mit 90 Personen angenommen. Die Nutzfläche **A<sub>N</sub>** nach ENEC beträgt **4280 m<sup>2</sup>**; dies ist die Bezugsgröße für die Darstellung der Ergebnisse. Für das Heizsystem wird eine Vorlauftemperatur von 55°C angenommen.

Aus der dynamischen Gebäudesimulation resultiert der folgende jährliche Heizwärmebedarf:

### Wetterdaten Passau

ENEV 2009 142480 kWh; entspricht 33.3 kWh/m<sup>2</sup>

ENEV 2012 98030 kWh; entspricht 22.9 kWh/m<sup>2</sup>

### Wetterdaten Essen

ENEV 2009 125380 kWh; entspricht 29.3 kWh/m<sup>2</sup>

ENEV 2012 84440 kWh; entspricht 19.7 kWh/m<sup>2</sup>

Details zum Gebäudemodell finden sich in Anhang A2.

## 2.4 Bürogebäude

Als Modellvorlage für ein großes Bürogebäude wurde das derzeit im Bau befindliche Bürogebäude der Dachser AG in Kempten herangezogen. Es handelt sich um ein viergeschossiges Gebäude mit **A<sub>netto</sub> = 10717 m<sup>2</sup>** Netto-Grundfläche; dies ist die Bezugsfläche in der Darstellung der Ergebnisse. Die Bürofläche des Gebäudes beträgt ca. 4530 m<sup>2</sup>; ein Seminarraum mit 137 m<sup>2</sup> ist darin enthalten.

Das Gebäude wird beheizt und in Teilbereichen gekühlt. Aus der dynamischen Gebäudemodellierung ergibt sich ein Nutzenergiebedarf für Heizung bzw. sommerliche Kühlung in Höhe von

### Wetterdaten Passau

ENEV 2009: Heizbedarf 303300 kWh; entspricht 28.2 kWh/m<sup>2</sup>  
Kühlbedarf 64400 kWh; entspricht 14.2 kWh/m<sup>2</sup>\*  
\*Bezugsfläche Kühlen: Hauptnutzungsfläche 4530 m<sup>2</sup>

### Wetterdaten Essen

ENEV 2009: Heizbedarf 259270 kWh; entspricht 24.2 kWh/m<sup>2</sup>  
Kühlbedarf 49850 kWh; entspricht 11.0 kWh/m<sup>2</sup>  
\*Bezugsfläche Kühlen: Hauptnutzungsfläche 4530 m<sup>2</sup>

Die Gebäudehülle und das Lüftungssystem sind mit der Anpassung an die ENEV 2009 bereits weitgehend optimiert; eine weitere Verringerung des Primärenergiebedarfs kann im wesentlichen nur über veränderte Primärenergiekennziffern des Versorgungssystems erreicht werden, beispielsweise durch Fernwärmebezug statt Gaskessel, Kraft-Wärme-Kopplung, usw. Eine deutliche Verringerung des Heizwärmebedarfs ist hingegen nicht mehr mit plausiblen Annahmen innerhalb der DIN V 18599 zu erreichen. Für das Bürogebäude wurde die Einsparung des Wärmebedarfs durch solarthermische Kollektoren nur für die ENEV 2009 berechnet.

Details zum Gebäudemodell finden sich in Anhang A2.

## 2.5 Sportanlage (nur Warmwasserprofil)

Als relevanter Typus von Nichtwohngebäuden in Bezug auf den Warmwasserbedarf werden in dem Rechenverfahren für die EnEV – der DIN 18599 – Schulen mit Turnhallen bzw. Sportanlagen mit einem täglichen Warmwasserbedarf von 1,5 kWh/Person angegeben. Detaillierte Untersuchungen im Rahmen von Forschungsprojekten zeigen aber dabei, dass nur dort, wo auch Erwachsene die Turnhalle im Rahmen von Freizeitaktivitäten nutzen, dieser Bedarf auch in der Praxis auftritt.

Daten der Sportanlage:

Dreifeld Sporthalle mit den Feldmaßen 3 x 27m x 15m = 1215 m<sup>2</sup>, einer Höhe von 7 m und einer Nutzfläche von **1704 m<sup>2</sup>**. Belegung: 6 Gruppen a 15 Personen / Tag.

Für die Sporthalle wurde der folgende Heizwärmebedarf berechnet:

ENEV 2009            209600 kWh; entspricht 123.0 kWh/m<sup>2</sup>

Für den Standort Passau wird dieser Wert übernommen; für den Standort Essen entsprechend den Ergebnissen aus den anderen Gebäudemodellierungen angepasst:

### Wetterdaten Passau

ENEV 2009            209600 kWh; entspricht 123.0 kWh/m<sup>2</sup>

### Wetterdaten Essen

ENEV 2009            184400 kWh; entspricht 108.2 kWh/m<sup>2</sup>

Setzt man zusätzlich zu dem hohen Wärmedämmstandard der EnEV 2009 noch eine Lüftungsanlage mit WRG ein, so läßt sich gemäß den derzeit gültigen Annahmen in der DIN V 18599 keine weitere Minderung erreichen. Somit ist für diesen Nutzungstyp eine weitere Reduktion um 30% auf den Standard EnEV 2012 nicht zu erreichen. Realisierte Projekte wie die in Anhang A2 referenzierte Sporthalle in Hannover zeigen jedoch, dass deutlich niedrigere Energieverbrauchswerte in der Praxis bereits heute realisiert werden.

Details zum Gebäudemodell finden sich in Anhang A2.

### 3 Definition der Solaranlagen

Die Anzahl möglicher Systemkonzepte zur Nutzung solarer Wärme ist sehr hoch. Im folgenden werden einige ausgewählte Systemschemata für die jeweilige Nutzungsart kurz vorgestellt. Sie dienen als Modellvorlage für den Aufbau der Simulationsmodelle, mit denen die nutzbaren Wärmeerträge des Kollektorsystems berechnet werden und letztendlich die Einsparung des Wärmebedarfs bestimmt wird.

Berechnet wurden ausschließlich Kollektorsysteme mit flüssigen Wärmeträgern (Wasser-Glykol); Anlagen mit Solarluftkollektoren konnten nicht mit in die Studie einbezogen werden.

#### 3.1 Trinkwarmwasseranlage

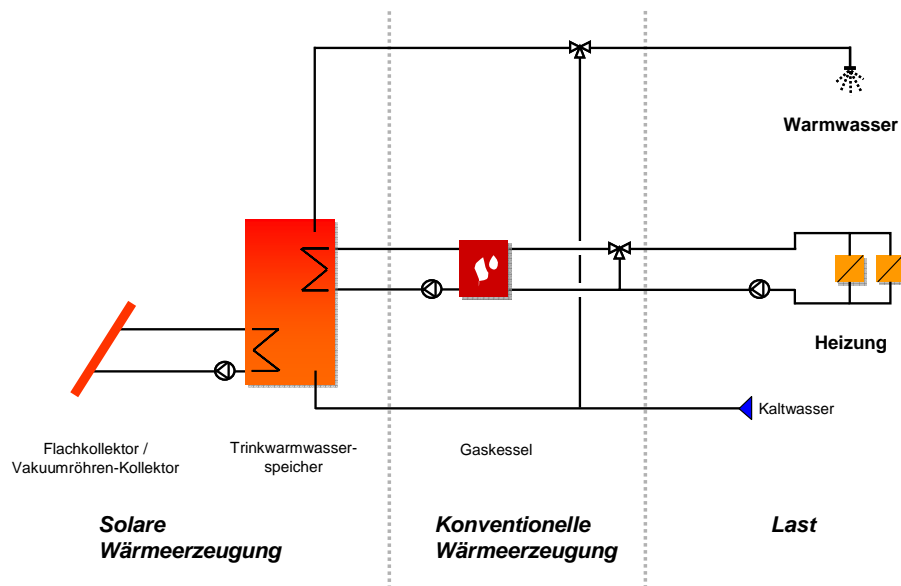
Trinkwassererwärmung mit wärmetechnischer Unterstützung durch Sonnenkollektoren ist die häufigste Anwendung in der Solarthermie. Die überwiegende Anzahl solcher Systeme findet sich im Gebäudesegment der Ein- und Zweifamilienwohneinheiten; bei diesen Anlagen dominiert mittlerweile der Verkauf von Systempaketen, also der Verkauf kompletter Systeme mit Kollektor, Speicher, Regelung, usw., deren Komponenten in Technik und Dimensionierung aufeinander abgestimmt sind. Dennoch existiert eine Vielzahl von Systempaketen mit unterschiedlichen hydraulischen Konzepten.

In der Dimensionierung der Solaranlage muss stets ein Kompromiss eingegangen werden: einerseits sind die Solarerträge im Winter zu niedrig, um hohe Wärmebeiträge zur Trinkwassererwärmung zu leisten, dem ließe sich durch große Kollektorflächen entgegenwirken. Andererseits steigen dann die Überschüsse aus dem Kollektorfeld im Sommer, die nicht mehr zur Trinkwassererwärmung verwendet werden können. Zu große Kollektorflächen führen daher nicht mehr zu einer nennenswerten Effizienzsteigerung des Systems. Typische Kollektorgrößen liegen daher im Bereich zwischen 4 m<sup>2</sup> bis 6 m<sup>2</sup> Kollektorflächen für einen Einfamilienhaushalt. Die Systemanbieter geben häufig unter bestimmten Rahmenbedingungen eine Deckung des jährlichen Wärmebedarfs für die Trinkwasserbereitung aus dem Solarkollektorsystem von mehr als 50% an, wenn ein passendes Systempaket gewählt wurde. Anlagentests scheinen dies zu bestätigen [Warentest 03/2008]

Aber auch Anlagen für größere Wohneinheiten wurden und werden beispielsweise im Rahmen des Förderprogramms Solarthermie 2000 und dessen Nachfolgeprogramm Solarthermie 2000plus [Solarthermie 2000plus] aufgebaut und untersucht. Eine Standardisierung ist hier noch nicht so weit fortgeschritten; für große Anlagen ist daher noch Planungsaufwand erforderlich. Richtlinien und Schemata für den Aufbau der Systeme finden sich z.B. in [VDI 6002 09/2004] und in [DGS Leitfaden Solarthermie].

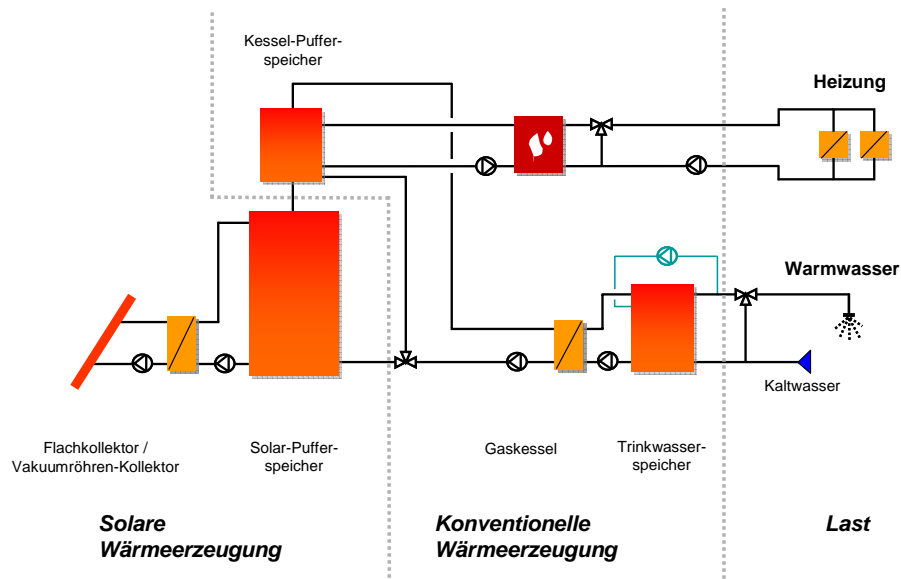
Aus den zahlreichen Varianten der Anlagen in unterschiedlichen Leistungsbereichen wurde für diese Studie jeweils eine Variante für jede Anwendung und Nutzungsart ausgewählt und als Vorlage für das Rechenmodell zur Berechnung der Energieerträge genutzt. Diese Auswahl wird im folgenden kurz dargestellt.

### 3.1.1 Für das Einfamilienhaus



**Abbildung 3.1** Einfaches solarthermisches System zur Trinkwassererwärmung. Mittels Wärmeübertrager wird ein Trinkwasserspeicher sowohl von einem Solarkollektor als auch über einen externen Gaskessel beheizt (bivalenter Speicher). Die Gebäudebeheizung wird ausschließlich vom Gaskessel bewerkstelligt. Weitere Details finden sich in Anhang A5.

### 3.1.2 Für das Mehrfamilienhaus und für die Sportanlage



**Abbildung 3.2** Für Anwendungen im größeren Leistungsbereich ist die Systemtechnik komplexer als die solare Trinkwassererwärmung für Einfamilienhäuser. Dies ist bedingt durch eine höhere Dynamik im Zapfprofil und durch die Notwendigkeit einer kontinuierlich thermischen Desinfektion des großen Trinkwasserspeichers (Legionellenschutz; am Ausgang zur Zapfstelle werden 60°C gefordert). Ein Zirkulationssystem verhindert einen zu starken Temperaturabfall in der Leitung. Durch einen Wärmeübertrager ist der Trinkwasserspeicher vom restlichen System abgekoppelt. Der Solarpufferspeicher wird nur solarthermisch beladen (monovalent): ist die Eintrittstemperatur aus dem Rücklauf des Trinkwasser-Wärmeübertragers höher als die Temperatur im Solarpufferspeicher wird der Rücklauf durch Umschaltung des 3-Wege-Ven-

tils in den Kesselpufferspeicher geleitet. Die Gebäudebeheizung erfolgt ausschließlich über den Gaskessel. In der solaren Trinkwassererwärmung für die Sporthalle wird auf den Kesselpufferspeicher verzichtet. Weitere Details finden sich in Anhang A5.

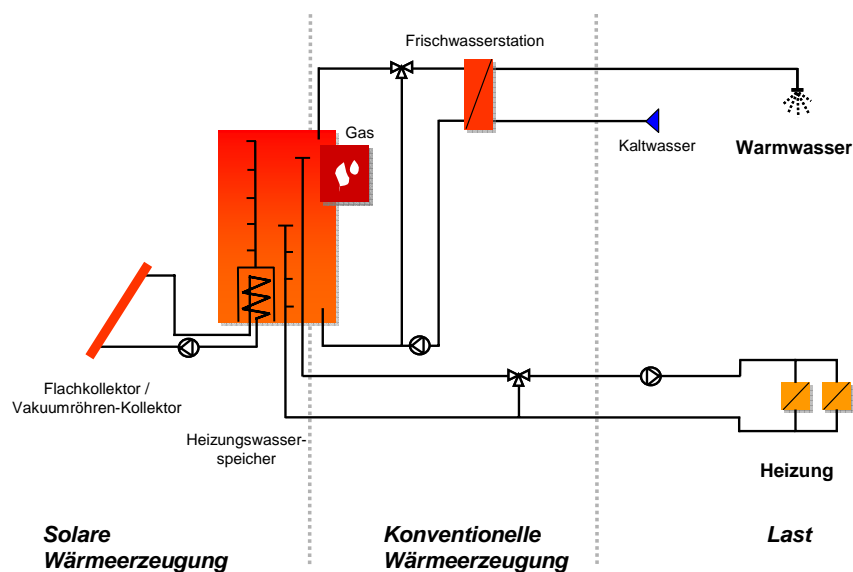
### 3.2 Heizungsunterstützung und Trinkwassererwärmung (Kombianlage)

Als Kombianlage wird ein System bezeichnet, dass zusätzlich zur Trinkwassererwärmung die solare Wärme auch zur Heizungsunterstützung verwendet. Auch diese Systeme sind in zahlreichen Varianten als Systempakete für Einfamilienhäuser und –Wohnungen am Markt erhältlich. Wegen der sehr unterschiedlichen Aufwendungen für den Heizwärmebedarf in Gebäuden sind globale Aussagen über die Einsparung an Heizwärme aus fossilen Quellen schwierig. An den verkauften solarthermischen Systemen für den Einfamilienwohnungsbereich stellen Kombisysteme inzwischen einen hohen Marktanteil von mehr als 30%. Wie bei den Systemen zur Trinkwassererwärmung werden am häufigsten Flachkollektoren eingesetzt; Vakuurröhren-Kollektoren haben derzeit einen Marktanteil an neu errichteten solarthermischen Anlagen von ca. 10%.

Kollektorfelder für Kombisysteme sind größer als für Systeme zur ausschließlichen Trinkwassererwärmung: im wesentlichen wird der Effekt genutzt, dass in den Übergangszeiträumen im Frühjahr und im Herbst mehr Solarenergie für die gemeinsame Nutzung zur Trinkwassererwärmung und Heizung verwertet werden kann. Bei gleicher Größe wie bei einer Trinkwassererwärmung ergeben sich kaum Vorteile in der Ausnutzung des Kollektorsystems.

Kombisysteme wurden im Rahmen des Solar Heating and Cooling Programmes (SHC) der Internationalen Energieagentur IEA im Task 26 – Solar Combi-systems ausgewertet [IEA SHC Task 26]. Eine Analyse und Evaluierung großer Kombianlagen ist in [SWT/ZfS 11/2007] enthalten.

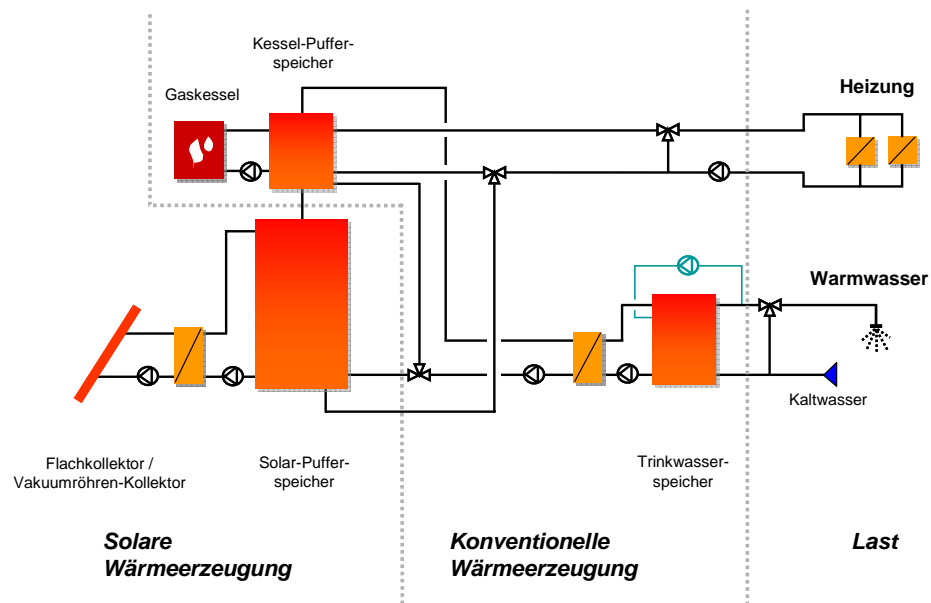
#### 3.2.1 Für das Einfamilienhaus



**Abbildung 3.3** Kompaktes Kombisystem für den Einfamilienhausbereich. Ein Speicher enthält alle wesentlichen Be- und Entladeeinrichtungen für den Kollektorkreis, den Heizkreis aus der Zusatzwärmeversorgung (Gaskessel, hier in den Speicher integriert), für die Gebäudebeheizung und für die Trinkwassererwärmung. Letztere

wird über einen externen Wärmeübertrager (Frischwasserstation) durchgeführt; damit enthält der Speicher kein Trinkwasser. Weitere Details finden sich in Anhang A5.

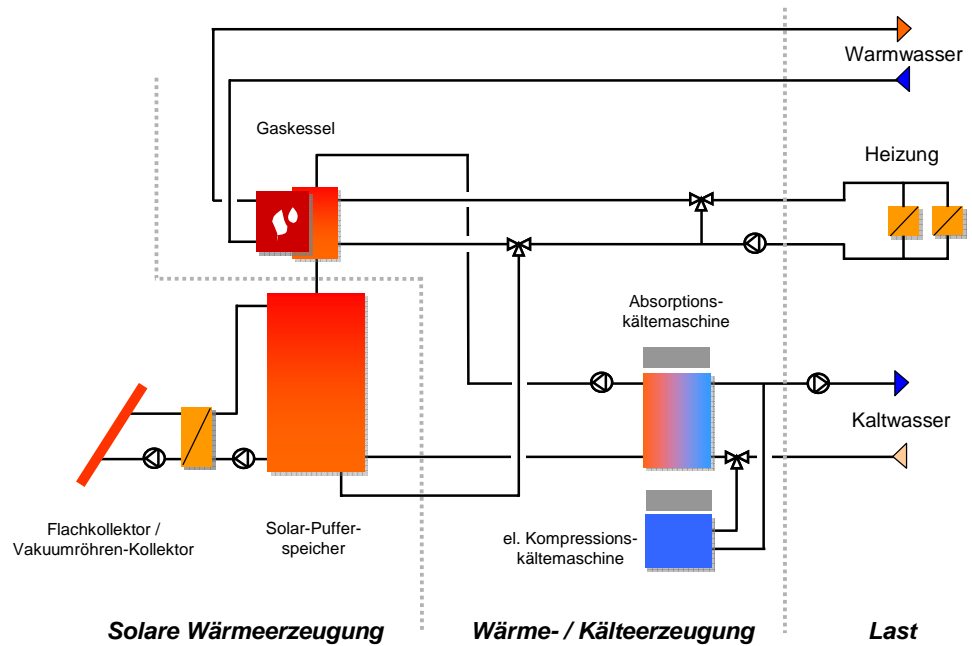
### 3.2.2 Für das Mehrfamilienhaus



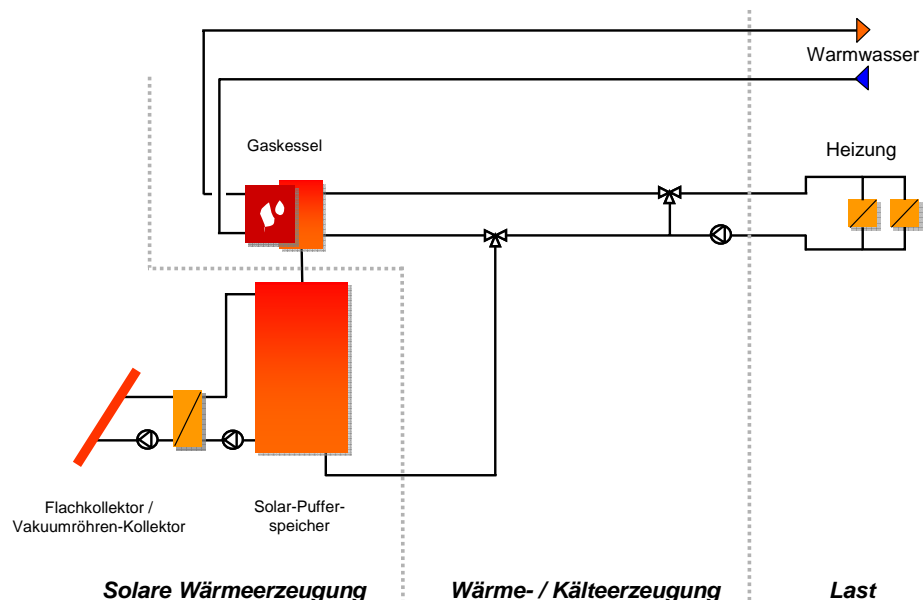
**Abbildung 3.4** Der Aufbau ist ähnlich wie im System für die Trinkwassererwärmung im Mehrfamilienhaus. Zusätzlich ist jedoch die Gebäudeheizung in das Speichersystem eingebunden: der Rücklauf aus der Heizung erfolgt entweder – je nach Temperaturniveau – über den Solarpuffer zur Aufnahme solarer Wärme oder führt direkt in den Kessel-Pufferspeicher. Weitere Beschreibung wie in 3.1.2 und in Anhang A5.

### 3.3 Anlage zum Heizen und Kühlen für Bürogebäude

Bei Bürogebäuden mit einem sommerlichen Kühlbedarf zur Einhaltung der Raumtemperaturen nach der Arbeitsstättenrichtlinie kann solarthermische Kühlung eingesetzt werden, dadurch wird das Kollektorsystem im Sommer gut genutzt. Solarthermische Kühlung existiert derzeit im wesentlichen noch im Bereich von Demonstrationssystemen, eine Entwicklung von Systempaketen zeichnet sich derzeit im Bereich kleiner Anlagen mit Nennkälteleistungen  $< 15$  kW ab. Für große Systeme gibt es noch keine standardisierten Schemata. Für die Untersuchung in dieser Studie wurde eine Kaltwassererzeugung entsprechend dem Schema in Abbildung 3.5 in ein Rechenmodell umgesetzt. Es handelt sich dabei um eine solarthermische Kühlung mit einer parallel angeordneten konventionellen Kälteversorgung aus einer elektrisch angetriebenen Kompressionskältemaschine (KKM).



**Abbildung 3.5** Solarthermische Kühlung und Heizungsunterstützung für das Bürogebäude. Der Rücklauf aus der Heizung erfolgt entweder – je nach Temperaturniveau – über den Solarpuffer zur Aufnahme solarer Wärme oder führt direkt in den Kessel-Pufferspeicher. Der Kessel wird bei Bedarf nur für die Trinkwassererwärmung und für die Heizung aktiviert; die Absorptionskältemaschine wird ausschließlich solarthermisch betrieben.



**Abbildung 3.6** Solare Heizungsunterstützung für das Bürogebäude. Die Kälteversorgung wird hier nicht berücksichtigt.

Die solarthermische Kühlung nutzt eine thermisch angetriebene Ab- oder Adsorptionskältemaschine (AKM) zur Kaltwassererzeugung. Wenn solar erzeugte Wärme auf ausreichend hohem Antriebstemperaturniveau für die Kältemaschine zur Verfügung steht, erfolgt die Kälteversorgung des Kaltwassernetzes im Gebäude über die AKM. Im anderen Falle übernimmt die KKM

die Kälteversorgung, eine parallele Einspeisung von Kälte in das Netz ist ebenfalls möglich. Die solare Kühlung arbeitet somit als „fuel saver“ und spart Strom zum Betrieb der KKM. In dieser Verschaltung ist wichtig, dass der Gaskessel nicht zur Wärmeversorgung der AKM aktiviert wird, da sonst der primärenergetische Vorteil des Systems beeinträchtigt wird. Der Gaskessel übernimmt lediglich die Nachheizung zur Wärme- und Warmwasserversorgung auf niedrigerem Temperaturniveau.

Zusätzlich wurde eine nur solare Heizungsunterstützung betrachtet (vergl. Abbildung 3.6).

## 4 Durchführung der Parameterstudie

### 4.1 Definition von Gesamtsystemen

Tabelle 4.1 zeigt die Matrix mit den untersuchten Systemen. Die dort gekennzeichneten Konfigurationen werden jeweils analysiert für die Standorte

- Passau
- Essen,

sowie jeweils für die Versionen der Energieeinsparverordnung

- ENEC 2009
- ENEC 2012 (nicht für das Bürogebäude und für die Sportstätte).

Innerhalb jeder Analyse wird die Systemgröße variiert, um den Einfluss der Kollektorfläche auf die solare Deckung des Wärmebedarfs aufzuzeigen.

Die Konfiguration „Solares Heizen und Kühlen“ (Kapitel 3.3) wird für das Bürogebäude untersucht; solare Trinkwassererwärmung wird dort nicht betrachtet.

In der letzten Gebäudeart Sportstätte wird lediglich die solarthermische Trinkwassererwärmung untersucht.

Gebäude	EFH		MFH		Büro		Sportanlage	
	ENEV 2009 ENEV 2012		ENEV 2009 ENEV 2012		ENEV 2009		ENEV 2009	
Nutzung	Kollektor	Konfiguration	Kollektor	Konfiguration	Kollektor	Konfiguration	Kollektor	Konfiguration
Trinkwassererwärmung	FK	✓	FK	✓	FK	—	FK	✓
	VRK	✓	VRK	✓	VRK	—	VRK	✓
Kombisystem	FK	✓	FK	✓	FK		FK	—
	VRK	✓	VRK	✓	VRK		VRK	—
Solare Heizungsunterstützung	FK	—	FK	—	FK	✓	FK	—
	VRK	—	VRK	—	VRK	✓	VRK	—
Solare Kühlung und Heizungsunterstützung	FK	—	FK	—	FK <sub>plus</sub>	✓	FK	—
	VRK	—	VRK	—	VRK <sub>plus</sub>	✓	VRK	—

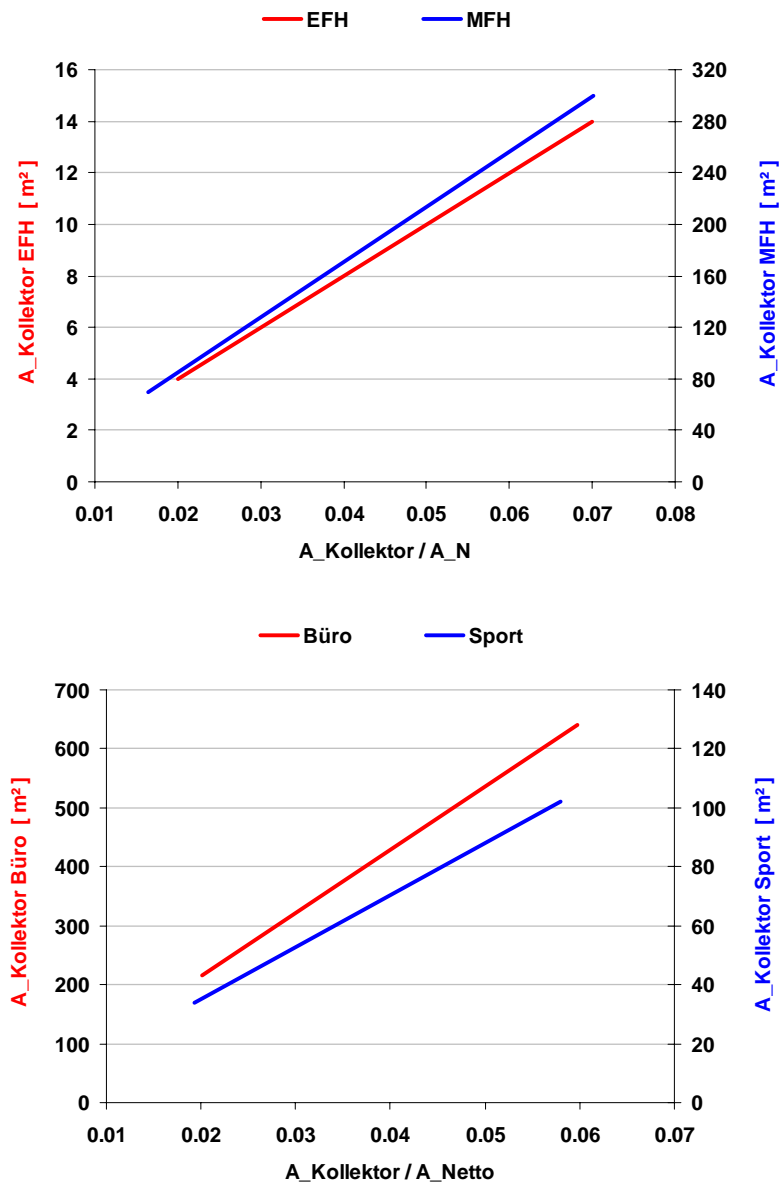
**Tabelle 4.1** Systemkonfigurationen, die im Rahmen dieser Studie untersucht werden. Die Rechnungen in der Tabelle werden ausgeführt jeweils für zwei Standorte (Passau und Essen), zwei Energieeinsparverordnungen (ENEV 2009 und 2012) sowie jeweils für eine Bandbreite der Systemgröße (Kollektorfläche, Speichergöße).  
Nomenklatur:

EFH	Einfamilienhaus
MFH	Mehrfamilienhaus
FK, FKplus	Flachkollektor (plus: verringerte Wärmeverluste)
VRK, VRKplus	Vakuumröhrenkollektor (plus: verringerte Wärmeverl.)
Trinkwassererwärmung	Solarthermisches System zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung
Kombisystem	Solarthermisches System zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung und des Heizbedarfs
Solare Heizungsunterstützung	Solarthermisches System nur zur Unterstützung des Heizwärmebedarfs
Solar Kühlung und Heizungsunterstützung	Solarthermisches System zur Unterstützung des Raumheizbedarfs und der thermisch angetriebenen Raumkühlung

## 4.2 Parameterstudie: Methodik

In Kapitel 3 wurden die verschiedenen Solarsysteme gezeigt, die als Modellvorbild für die Untersuchungen in dieser Studie dienen. Tabelle 4.2 fasst die berechneten Systemkonfigurationen bezüglich Kollektortyp, Kollektorfläche und Speichergröße zusammen.

Die Kollektorfläche wird im folgenden nicht mehr explizit, sondern auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$  bzw. auf die Netto-Grundfläche  $A_{\text{Netto}}$  bezogen dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Kollektorfläche und dem Flächenverhältnis  $A_{\text{Kollektor}} / A_N$  bzw.  $A_{\text{Kollektor}} / A_{\text{Netto}}$  kann daher der Abbildung 4.1 entnommen werden.



**Abbildung 4.1** Identifizierung der zugehörigen Kollektorflächen zu den Flächenverhältnissen Kollektorfläche / Bezugsfläche für die unterschiedlichen Gebäudearten und Kollektorflächen.

	Gebäude	EFH	MFH	Büro	Sport
Nutzung	Kollektor	$A_{\text{Kollektor}}$ $V_{\text{Speicher}}$	$A_{\text{Kollektor}}$ $V_{\text{Speicher}}$	$A_{\text{Kollektor}}$ $V_{\text{Speicher}}$	$A_{\text{Kollektor}}$ $V_{\text{Speicher}}$
Trinkwasser- erwärmung	FK	4 - 5.5 m <sup>2</sup> ; 0.3 m <sup>3</sup>	70 - 300 m <sup>2</sup> ; 50 l / m <sup>2</sup>	-	34 - 102 m <sup>2</sup> ; 75 l / m <sup>2</sup>
	FK	5.5 - 12 m <sup>2</sup> ; 0.5 m <sup>3</sup>	-	-	-
	VRK direkt	5 - 12 m <sup>2</sup> ; 0.5 m <sup>3</sup>	70 - 300 m <sup>2</sup> ; 50 l / m <sup>2</sup>	-	34 - 102 m <sup>2</sup> ; 75 l / m <sup>2</sup>
	VRK heat pipe	5 - 12 m <sup>2</sup> ; 0.5 m <sup>3</sup>	-	-	-
Kombisystem	FK	6 - 12 m <sup>2</sup> ; 0.7 m <sup>3</sup>	90 - 300 m <sup>2</sup> ; 75 l / m <sup>2</sup>	-	-
	FK	8 - 14 m <sup>2</sup> ; 1.0 m <sup>3</sup>	-	-	-
	VRK direkt	6 - 12 m <sup>2</sup> ; 0.7 m <sup>3</sup>	90 - 300 m <sup>2</sup> ; 75 l / m <sup>2</sup>	-	-
	VRK direkt	8 - 14 m <sup>2</sup> ; 1.0 m <sup>3</sup>	-	-	-
Solare Heizungs- unterstützung	FK	-	-	215 - 640 m <sup>2</sup> ; 50 l / m <sup>2</sup>	-
	VRK	-	-	215 - 640 m <sup>2</sup> ; 75 l / m <sup>2</sup>	-
Solare Kühlung und Heizungs- unterstützung	FKplus	-	-	215 - 640 m <sup>2</sup> ; 50 l / m <sup>2</sup>	-
	VRKplus	-	-	215 - 640 m <sup>2</sup> ; 75 l / m <sup>2</sup>	-

**Tabelle 4.2** Variation von Kollektorflächen und Volumen des Solar-Pufferspeichers. Auf die unterschiedlichen Kollektortypen wird in Anhang A5.4 näher eingegangen.

Gemäß der Fragenstellungen zu dieser Studie wird primär die Einsparung des Wärmebedarfs für die Gebäudeversorgung durch den Einsatz solarthermischer Anlagen berechnet; primärenergetische Betrachtungen stehen nicht im Vordergrund. Die Einsparung des Wärmebedarfs ist wie folgt definiert:

#### Definition „Einsparung des Wärmebedarfs“

Für jede Anwendung wurde ein Referenzsystem ohne solarthermische Wärmeengewinnung definiert (vergl. Anhang A5). Für dieses System wurde der Wärmebedarf ermittelt, der zur Deckung der benötigten Wärme für die Gebäudebeheizung und für die Trinkwassererwärmung erforderlich ist. Dieser Wärmeeintrag aus einem (Gas-)Kessel wird als Wärmeeintrag Kessel bezeichnet und setzt sich definitionsgemäß zusammen aus

#### Wärmeeintrag Kessel

$$= (\text{Wärmebedarf für Gebäudeheizung} \\ + \text{Wärmebedarf für Trinkwassererwärmung} \\ + \text{Wärmeverluste im System})$$

Die Nutzung solarer Wärme in einer entsprechend aufgebauten Anlage verringert den Wärmeeintrag aus dem Kessel. Dieser verringerte Wärmeeintrag aus dem Kessel in der solaren Variante wird verglichen mit dem Wärmeeintrag des Kessels im Referenzsystem. Die Einsparung an Wärme aus einem konventionellem Kessel zur Wärmeversorgung des Gebäudes ist damit definiert zu

#### Einsparung Wärmebedarf

$$= \left( 1 - \frac{\text{Wärmeeintrag Kessel, solare Variante}}{\text{Wärmeeintrag Kessel, Referenz}} \right) * 100 \quad [\%].$$

Dargestellt sind im Folgenden die *jährlichen* Einsparungen bzw. Kenngrößen auf Basis *jährlicher* Bilanzwerte. Die Berechnungen berücksichtigen Wärmeverluste im Speicher und in den Leitungen; Kesselwandlungs-Wirkungsgrade sind hier nicht berücksichtigt. Zusätzlicher Strombedarf in den Solaranlagen durch Kollektorkreislaufpumpen ist in der Einsparung des Wärmebedarfs ebenfalls nicht enthalten; dieser zusätzliche Strombedarf wird in der Wirtschaftlichkeitsabschätzung berücksichtigt.

Die Definition der Einsparung des Wärmebedarfs wird für die solare Kühlung und Heizungsunterstützung im Bürogebäude erweitert um den Betrag der Nutzkältebereitstellung aus konventioneller elektrisch angetriebener Kompressionskältetechnik (KKM):

#### Einsparung Wärme- und Kältebedarf

$$= \left( 1 - \frac{\text{Wärmeeintrag Kessel, solare Variante} + \text{Nutzkälte\_KKM, solare Variante}}{\text{Wärmeeintrag Kessel} + \text{Nutzkälte\_KKM, Referenz}} \right) * 100 \quad [\%].$$

In der Variante der solaren Kühlung verringert sich der Beitrag der Nutzkälte aus KKM, damit steigt die Einsparung an Wärme-/Kältebedarf aus konventioneller Wärme-/Kältetechnik.

### 4.3 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen: Methodik

In der Wirtschaftlichkeitsabschätzung werden Mehrkosten der Investition berücksichtigt, die durch die Erweiterung der Wärmeversorgung vom konventionellen System zum solar unterstützten System entstehen. Die Investitionskosten des Solarsystems werden daher gegebenenfalls vermindert um eingesparte Kosten gegenüber dem Referenzsystem: Beispiel: der Trinkwasserspeicher im Paketsystem Trinkwassererwärmung für das Einfamilienhaus ersetzt den (einfacheren) Trinkwasserspeicher im Referenzsystem. Die Berechnung der Investitionskosten und der Jahreskosten folgt den Empfehlungen in der VDI 6002. Die Jahreskosten der Solaranlage umfassen die annuisierte Investition, Wartungskosten und Betriebskosten (Mehraufwand Strom).

Energiepreise, Investitionskosten und weitere Randbedingungen für die Kostenberechnung sind in Anhang A6 enthalten.

Neben den Investitionskosten und den eingesparten Brennstoffkosten wird als Beurteilungsgröße das Maß *Kosten der eingesparten Wärme* benutzt. Dieser Wert ist definiert durch

$$\text{Kosten der eingesparten Wärme} = (K_{a,\text{solar}} - K_{a,\text{Betrieb}}) / (E_{a,\text{Wärme}}) \quad [\text{€kWh}]$$

mit

$K_{a,\text{solar}}$  = Jahreskosten Solarsystem

$K_{a,\text{Betrieb}}$  = jährlich eingesparte Brennstoffkosten

$E_{a,\text{Wärme}}$  = jährliche Einsparung Wärmebedarf (gemäß Def. Kapitel 5.1).

Die Kosten der eingesparten Wärme beziffern somit die jährlichen Mehrkosten durch die Erweiterung zum Solarsystem, mit Berücksichtigung der jährlichen Einsparungen, pro kWh des eingesparten Wärmebedarfs.

In Kapitel 5.3 sind in tabellarischer Form auch auszugsweise statische Amortisationszeiten angegeben. Diese sind hier auf einfache Weise definiert zu Investitionskosten / jährliche Einsparung Brennstoffkosten; Mehraufwendungen bzw. Einsparungen durch erhöhten / verminderten Strombedarf sind nicht darin berücksichtigt.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Kollektorflächen zur Einsparung von 15% des Wärmebedarfs in Neubauten

In diesem Abschnitt werden die erforderlichen Kollektorflächen für die unterschiedlichen Anwendungen (Gebäude) und Nutzungsarten (Trinkwassererwärmung, Kombisystem) aufgezeigt, die zur Erreichung der Zielvorgabe - 15% Einsparung des Wärmebedarfs in Neubauten – notwendig sind. Diese Angaben implizieren nicht, dass die jeweilige erforderliche Kollektorfläche zu der sinnvollsten Systemauslegung führt. Die technisch und wirtschaftlich sinnvollen Kollektorflächen werden in Abschnitt 5.2 diskutiert.

#### 5.1.1 Einfamilienhaus

##### Solare Trinkwassererwärmung

Mit dem Heizwärmebedarf nach ENEC 2009 werden an beiden Standorten die angestrebten Einsparungen des Wärmebedarfs in Höhe von 15% nicht erreicht. Untersucht wurde der Bereich bis zu einem Flächenverhältnis  $A_{\text{Kollektor}}/A_{\text{N}}$  ( $A_{\text{K}}/A_{\text{N}}$ ) = 0.06. Auch mit sehr effizienten Kollektoren (direkt-durchströmte Vakuumröhren-Kollektoren) erreichen die Einsparungen des Wärmebedarfs max. knapp 13 %.

Unter den Vorgaben der ENEC 2012 werden die Einsparziele problemlos erreicht. Am Standort Passau ist dies bereits mit einem Flächenverhältnis von 0.02 möglich, während am Standort Essen ein etwas höheres Flächenverhältnis von 0.03 ausreichend ist.

Tabelle 5.1 enthält die folgenden Konfigurationen:

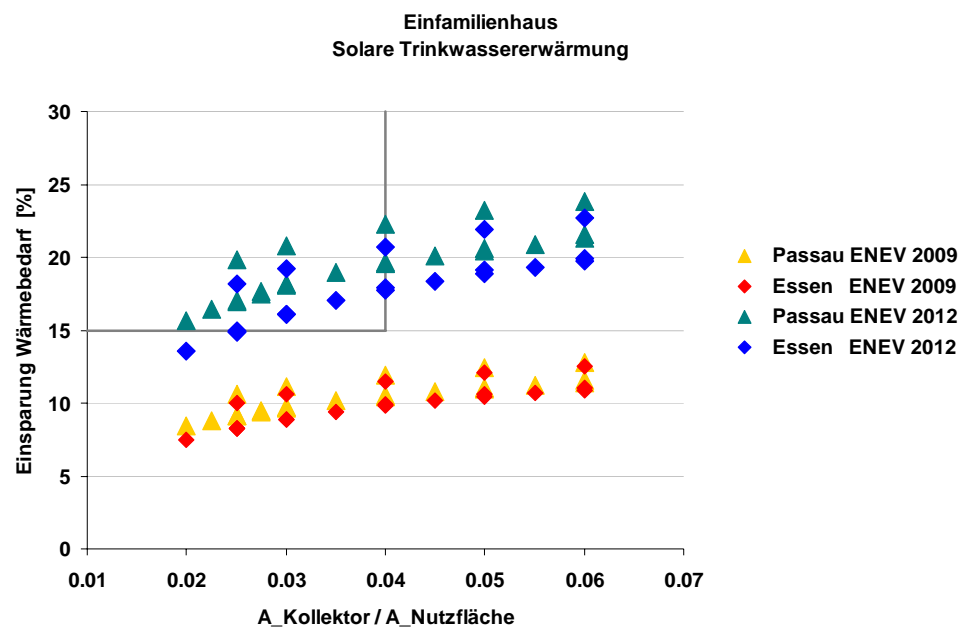
- das jeweils kleinste Flächenverhältnis  $A_{\text{K}}/A_{\text{N}}$ , mit dem das Einsparziel erreicht wird;
- die erreichbare Einsparung des Wärmebedarfs bei einem Flächenverhältnis  $A_{\text{K}}/A_{\text{N}}$  von 0.04;
- wird das Einsparziel für ENEC 2009 oder 2012 nicht erreicht, wird die höchste erreichbare Einsparung im Bereich der untersuchten Flächenverhältnisse angegeben.

Zusätzlich zeigt Abbildung 5.1 den Ergebnisraum der Einsparung des Wärmebedarfs über  $A_{\text{K}}/A_{\text{N}}$  für alle Rechenergebnisse.

Standort	ENEV	Konfiguration	Flächenverhältnis $A_{\text{Kollektor}}/A_{\text{N}}$	Einsparung Wärmebedarf [%]
Passau	2009	VRK_direkt	0.06	<b>12.7</b>
Passau	2009	VRK_direkt	<b>0.04</b>	<b>11.9</b>
Essen	2009	VRK_dirket	0.06	<b>12.5</b>
Essen	2009	VRK_direkt	<b>0.04</b>	<b>11.5</b>
Passau	2012	FK_300	0.02	<b>15.7</b>
Passau	2012	FK_500	<b>0.04</b>	<b>19.5</b>
Essen	2012	FK_500	0.03	<b>16.1</b>
Essen	2012	FK_500	<b>0.04</b>	<b>17.8</b>

**Tabelle 5.1** Auszug aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen für die solare Trinkwassererwärmung im Einfamilienhaus. In die Tabelle wurden auch jeweils die Ergebnisse für ein Flächenverhältnis 0.04 eingetragen.

Nomenklatur: VRK\_direkt = Anlage mit direktdurchströmten Vakuumröhren-Kollektoren; FK\_300 / 500 = Flachkollektor mit 300 bzw. 500 Liter Trinkwasserspeicher



**Abbildung 5.1** Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die solare Trinkwassererwärmung im Einfamilienhaus. Datenpunkte unterhalb eines Flächenverhältnisses von 0.04 und oberhalb einer Einsparung des Wärmebedarfs von 15 % liegen im markierten Bereich.

## Kombisystem

Nach ENEC 2009 sind prinzipiell an beiden Standorten Einsparungen im Wärmebedarf in Höhe von 15 % erreichbar. Am Standort Passau ist bei Verwendung von Vakuumröhren-Kollektoren ein Mindest-Flächenverhältnis von 0.04 notwendig, bei Verwendung eines Flachkollektors wird das Einsparziel bei einem Flächenverhältnis von 0.06 erreicht. Am Standort Essen wird das Einsparziel mit einem Vakuumröhren-Kollektorsystem bei einem Flächenverhältnis von 0.05 erreicht.

In der Anwendung der ENEC 2012 ist an beiden Standorten die angestrebte Einsparung des Wärmebedarfs bereits bei einem Flächenverhältnis von 0.03 und bei Anwendung von Flachkollektoren erreichbar.

Tabelle 5.2 enthält die folgenden Konfigurationen:

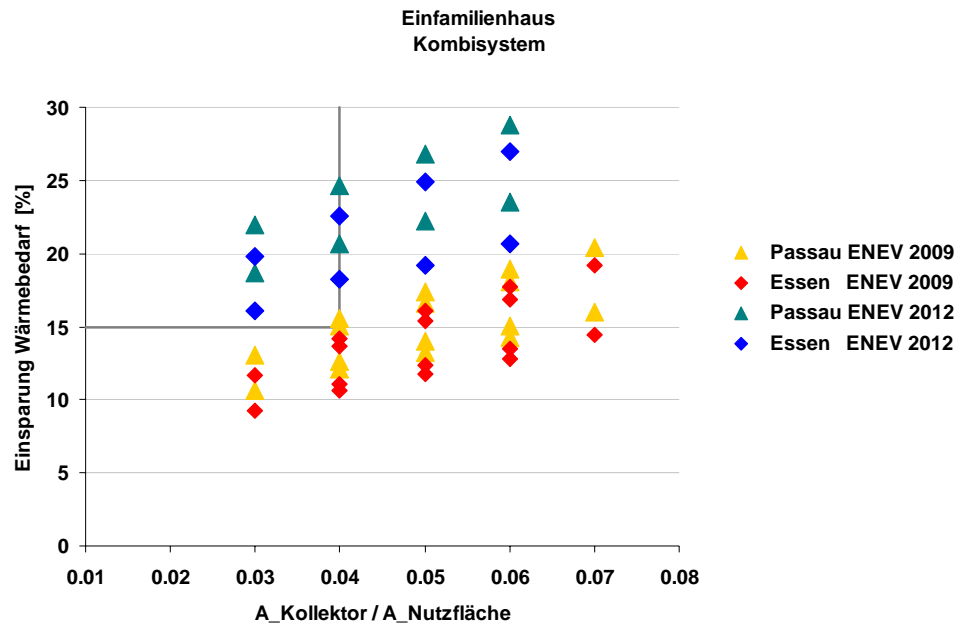
- das jeweils kleinste Flächenverhältnis  $A_K/A_N$ , mit dem das Einsparziel erreicht wird. Kann das Ziel auch mit einem Flachkollektor-System erreicht werden, ist diese Konfiguration ebenfalls in die Tabelle eingetragen;
- die erreichbare Einsparung des Wärmebedarfs bei einem Flächenverhältnis  $A_K/A_N$  von 0.04;

Zusätzlich zeigt Abbildung 5.2 den Ergebnisraum der Einsparung des Wärmebedarfs über  $A_K/A_N$  für alle Rechenergebnisse.

Standort	ENEV	Konfiguration	Flächenverhältnis $A_{\text{Kollektor}}/A_N$	Einsparung Wärmebedarf [%]
Passau	2009	FK_1000	0.06	15.0
Passau	2009	VRK_direkt_700	<b>0.04</b>	15.0
Essen	2009	VRK_direkt_700	0.05	15.4
Essen	2009	VRK_direkt_1000	<b>0.04</b>	14.2
Passau	2012	FK_700	0.03	18.6
Passau	2012	FK_700	<b>0.04</b>	20.7
Essen	2012	FK_700	0.03	16.1
Essen	2012	FK_700	<b>0.04</b>	18.3

**Tabelle 5.2** Auszug aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen für das Kombisystem im Einfamilienhaus. In die Tabelle wurden auch jeweils die Ergebnisse für ein Flächenverhältnis 0.04 eingetragen.

Nomenklatur: VRK\_direkt\_700 / 1000 = Anlage mit direktdurchströmten Vakuumröhren-Kollektoren und 700 bzw. 1000 Liter Kombispeicher;  
FK\_700 / 1000 = Flachkollektor mit 700 bzw. 1000 Liter Kombispeicher



**Abbildung 5.2** Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die solare Trinkwassererwärmung im Einfamilienhaus. Datenpunkte unterhalb eines Flächenverhältnisses von 0.04 und oberhalb einer Einsparung des Wärmebedarfs von 15 % liegen im markierten Bereich.

## 5.1.2 Mehrfamilienhaus

### Solare Trinkwassererwärmung

Eine Einsparung des Wärmebedarfs in Höhe von 15 % ist bei  $A_K/A_N \leq 0.04$  an beiden Standorten und in der Anwendung beider ENEV möglich.

Mit einem Vakuumröhren-Kollektorsystem kann dies bereits in Passau und in der ENEV 2009 mit einem  $A_K/A_N$  von 0.016 erreicht werden; bei Anwendung von Flachkollektoren ist ein Flächenverhältnis von 0.04 erforderlich. Am Standort Essen ist ein höherer Wert des Flächenverhältnisses notwendig (0.021 für Vakuumröhren-Kollektoren und 0.07 für Flachkollektoren).

In der ENEV 2012 sind die Zielvorgaben der Wärmeeinsparung bei Flächenverhältnissen  $\leq 0.04$  an beiden Standorten mit Flachkollektoren erreichbar.

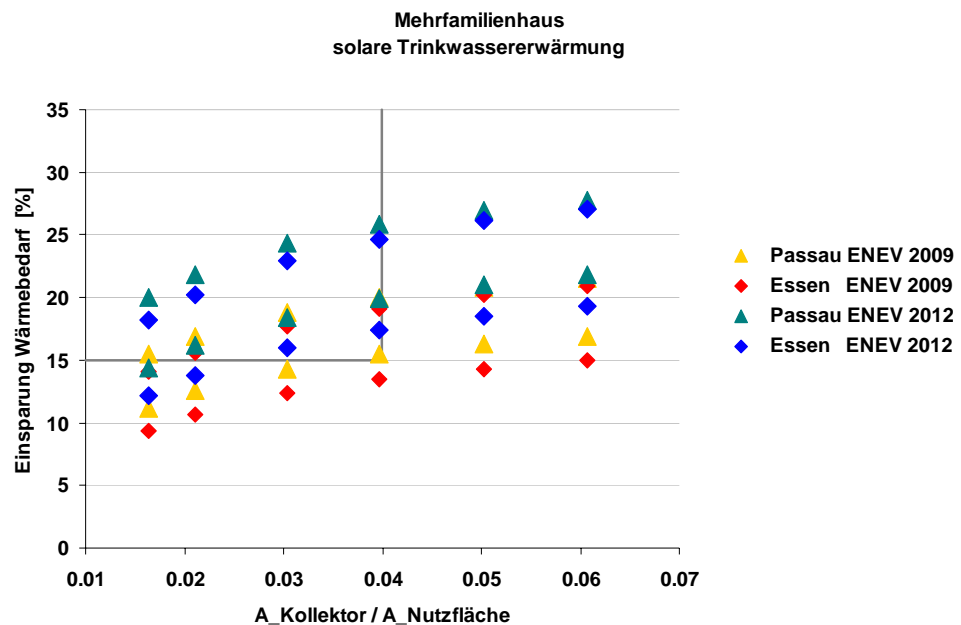
Tabelle 5.3 enthält daher die folgenden Konfigurationen:

- das jeweils kleinste Flächenverhältnis  $A_K/A_N$ , mit dem das Einsparziel erreicht wird. Kann das Ziel auch mit einem Flachkollektor-System erreicht werden, ist diese Konfiguration ebenfalls in die Tabelle eingetragen;
- die erreichbare Einsparung des Wärmebedarfs bei einem Flächenverhältnis  $A_K/A_N$  von 0.04;

Zusätzlich zeigt Abbildung 5.3 den Ergebnisraum der Einsparung des Wärmebedarfs über  $A_K/A_N$  für alle Rechenergebnisse.

Standort	ENEV	Konfiguration	Flächenverhältnis $A_{\text{Kollektor}}/A_{\text{N}}$	Einsparung Wärmebedarf [%]
Passau	2009	VRK_direkt	0.016	15.5
Passau	2009	FK	0.04	15.5
Essen	2009	FK	0.07	15.4
Essen	2009	VRK_direkt	0.021	15.6
Essen	2009	VRK_direkt	0.04	19.1
Passau	2012	FK	0.021	16.2
Passau	2012	FK	0.04	19.9
Essen	2012	FK	0.03	16.0
Essen	2012	FK	0.04	17.4

**Tabelle 5.3** Auszug aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen für die solare Trinkwassererwärmung im Mehrfamilienhaus. In die Tabelle wurden auch jeweils die Ergebnisse für ein Flächenverhältnis 0.04 eingetragen.  
Nomenklatur: VRK\_direkt = Anlage mit direktdurchströmten Vakuumröhren-Kollektoren; FK = Flachkollektor



**Abbildung 5.3** Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die solare Trinkwassererwärmung im Mehrfamilienhaus. Datenpunkte unterhalb eines Flächenverhältnisses von 0.04 und oberhalb einer Einsparung des Wärmebedarfs von 15 % liegen im markierten Bereich.

## Kombisystem

Bei Anwendung der ENEC 2009 sind hier ebenfalls bei den kleinsten untersuchten Flächenverhältnissen von 0.021 Einsparungen des Wärmebedarfs von mehr als 15 % erreichbar, dazu sind Anlagen mit Vakuumröhren-Kollektoren erforderlich. Bei höheren  $A_K/A_N$  (0.03 in Passau, 0.05 in Essen) kann das Einsparziel mit Flachkollektoren erreicht werden.

Die Rechnungen für die ENEC 2012 zeigen, dass die Einsparung des Wärmebedarfs von 15 % prinzipiell an beiden Standorten mit Flachkollektoren bereits mit Flächenverhältnissen unterhalb von 0.04 erzielbar ist.

Tabelle 5.4 enthält daher die folgenden Konfigurationen:

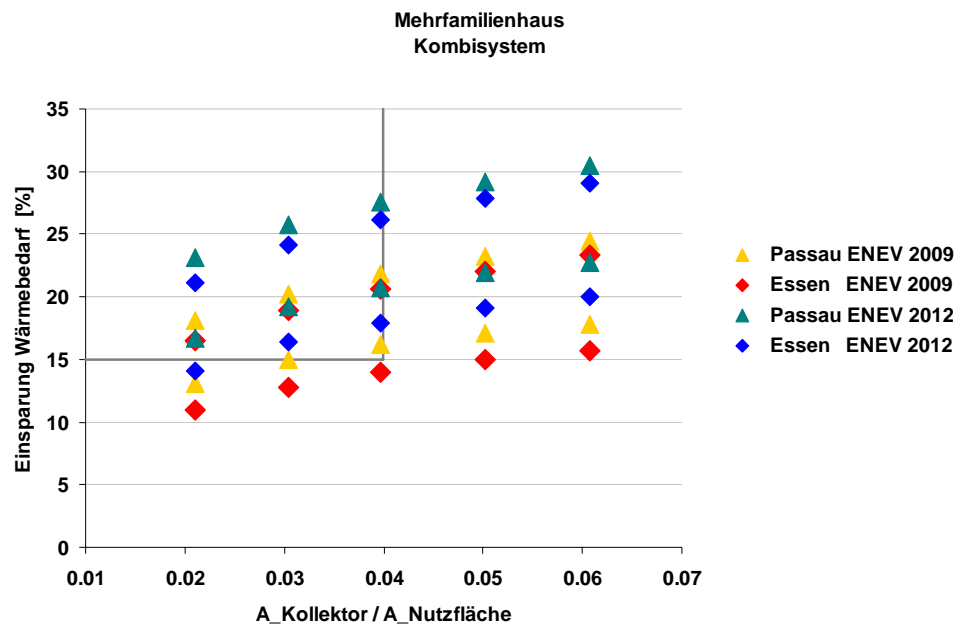
- das jeweils kleinste Flächenverhältnis  $A_K/A_N$ , mit dem das Einsparziel erreicht wird. Kann das Ziel auch mit einem Flachkollektor-System erreicht werden, ist diese Konfiguration ebenfalls in die Tabelle eingetragen;
- die erreichbare Einsparung des Wärmebedarfs bei einem Flächenverhältnis  $A_K/A_N$  von 0.04;

Zusätzlich zeigt Abbildung 5.4 den Ergebnisraum der Einsparung des Wärmebedarfs über  $A_K/A_N$  für alle Rechenergebnisse.

Standort	ENEV	Konfiguration	Flächenverhältnis $A_{\text{Kollektor}}/A_N$	Einsparung Wärmebedarf [%]
Passau	2009	VRK_direkt	0.021	<b>18.1</b>
Passau	2009	FK	0.03	<b>15.0</b>
Passau	2009	FK	<b>0.04</b>	<b>16.2</b>
Essen	2009	VRK_direkt	0.021	<b>16.5</b>
Essen	2009	FK	0.05	<b>15.0</b>
Essen	2009	VRK_direkt	<b>0.04</b>	<b>20.6</b>
Passau	2012	FK	0.021	<b>16.7</b>
Passau	2012	FK	<b>0.04</b>	<b>20.8</b>
Essen	2012	FK	0.03	<b>16.4</b>
Essen	2012	FK	<b>0.04</b>	<b>17.9</b>

**Tabelle 5.4** Auszug aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen für das Kombisystem im Mehrfamilienhaus. In die Tabelle wurden auch jeweils die Ergebnisse für ein Flächenverhältnis 0.04 eingetragen.

Nomenklatur: VRK\_direkt = Anlage mit direktdurchströmten Vakuumröhren-Kollektoren; FK = Flachkollektor



**Abbildung 5.4** Ergebnisse der Simulationsrechnungen für das Kombisystem im Mehrfamilienhaus. Datenpunkte unterhalb eines Flächenverhältnisses von 0.04 und oberhalb einer Einsparung des Wärmebedarfs von 15 % liegen im markierten Bereich.

### 5.1.3 Nichtwohngebäude – Bürogebäude

#### Solare Heizungsunterstützung

Der Trinkwarmwasserbedarf in Bürogebäuden ohne Verpflegungsbereich ist normalerweise gering, darüberhinaus wird Warmwasser häufig dezentral aufbereitet. Daher wurde zunächst nur eine solare Heizungsunterstützung betrachtet. Allerdings zeigen die Ergebnisse in der Einsparung des Wärmebedarfs (Nutzenergie Kühlung hier nicht mit einbezogen), dass die ausschließliche solarthermische Heizungsunterstützung im Bürogebäude nur geringe Beiträge leisten kann. Auch mit größeren Kollektorflächen ist eine Einsparung von 15% des Wärmebedarfs nicht erreichbar.

Standort	ENEV	Konfiguration	Flächenverhältnis $A_{\text{Kollektor}}/A_{\text{Netto}}$	Einsparung Wärmebedarf [%]
Passau	2009	VRK_direkt	<b>0.04</b>	<b>9.6</b>
Essen	2009	VRK_direkt	<b>0.04</b>	<b>8.1</b>

**Tabelle 5.5** Auszug aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen für die solare Heizungsunterstützung im Bürogebäude.

Nomenklatur: VRK\_direkt = Anlage mit direktdurchströmten Vakuumröhren-Kollektoren

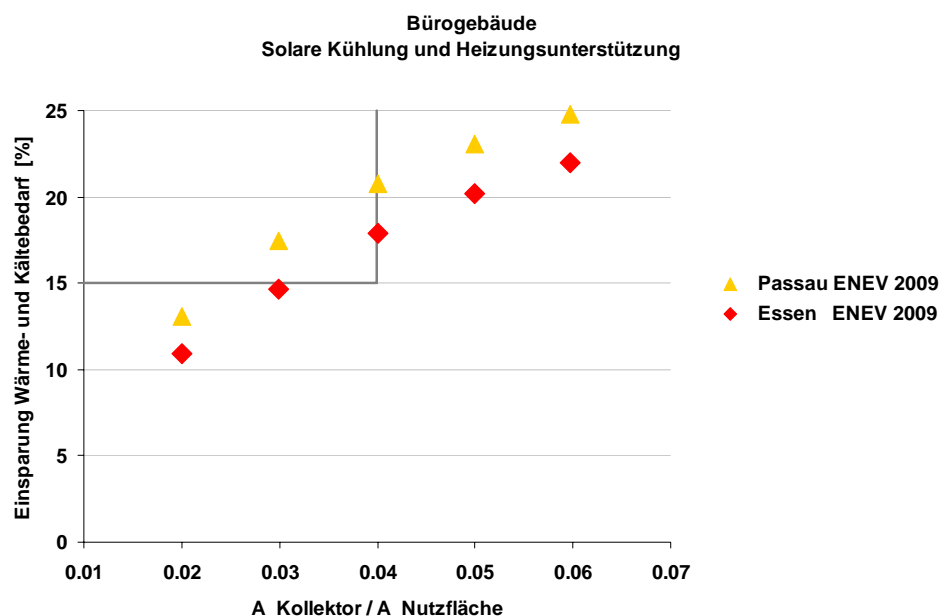
## Solare Kühlung und Heizungsunterstützung

In dieser Anwendung wird das Kollektorsystem deutlich besser ausgenutzt als in der ausschließlichen Heizungsunterstützung. In die Einsparung wird der Nutzkältebedarf des Gebäudes einbezogen. Zu beachten ist, dass der Flächenbezug hier anhand der Nettogrundfläche des Gebäudes erfolgt, der gekühlte Bereich aber nur der Hauptnutzungsfläche entspricht (42% der Nettogrundfläche).

Für die Nutzungsart „solare Kühlung“ ergeben sich an beiden Standorten für  $A_K/A_{\text{Netto}} = 0.04$  Einsparungen im Wärme- und Kältebedarf > 15%, allerdings nur für die Vakuumröhrenkollektoren. Mit Flachkollektoren wird das Einsparziel deutlich nicht erreicht. Übliche Flachkollektoren sind auch aus technischer Sicht für diesen Anwendungszweck weniger geeignet. In den Berechnungen wurde auch ein verbesserter Flachkollektor (Fk-plus) untersucht, der jedoch für diesen Anwendungszweck noch nicht zufriedenstellende Ergebnisse hinsichtlich der Wärmebereitstellung aufzeigte.

Standort	ENEV	Konfiguration	Flächenverhältnis $A_{\text{Kollektor}}/A_{\text{Netto}}$	Einsparung Wärme- und Kältebedarf [%]
Passau	2009	VRK_plus	0.03	17.5
Passau	2009	VRK_plus	<b>0.04</b>	<b>20.7</b>
Essen	2009	VRK_plus	<b>0.04</b>	<b>17.9</b>

**Tabelle 5.6** Auszug aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen für das System Solare Kühlung und Heizungsunterstützung im Bürogebäude.  
Nomenklatur: VRK\_plus = Anlage mit direkt durchströmten Vakuumröhren-Kollektoren mit verringerten Wärmeverlusten



**Abbildung 5.5** Ergebnisse der Simulationsrechnungen (nur für die Vakuumröhren-Kollektoren) für das System Solare Kühlung und Heizungsunterstützung im Bürogebäude. Datenpunkte unterhalb eines Flächenverhältnisses von 0.04 und oberhalb einer Einsparung des Wärmebedarfs von 15 % liegen im markierten Bereich.

## 5.1.4 Nichtwohngebäude – Sportstätte

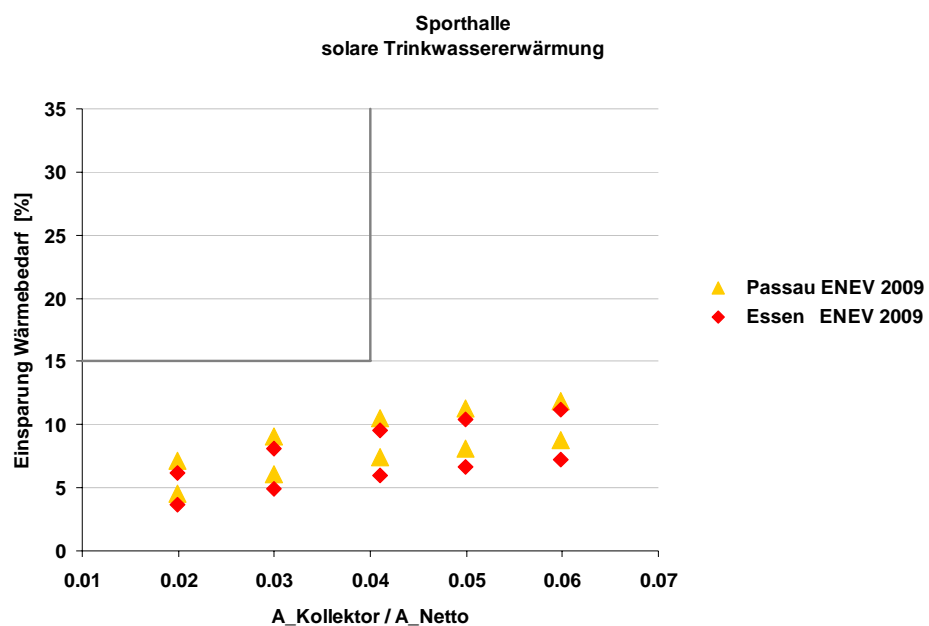
### Solare Trinkwassererwärmung

Die Zielvorgabe einer Einsparung des Wärmebedarfs in Höhe von 15% wird deutlich nicht erreicht; mit Vakuumröhren-Kollektoren lassen sich ca. 10% des Wärmebedarfs bei einem Flächenverhältnis  $A_K/A_{\text{Netto}} = 0.04$  erzielen. Eine größere Kollektorfläche führt nicht zu nennenswerter Erhöhung der Einsparung. Dies ist eine Folge des hohen Heizwärmebedarfs im Gebäude. Eine solare Trinkwassererwärmung ist dennoch in energetischer und wirtschaftlicher Hinsicht sinnvoll.

Tabelle 5.7 zeigt auszugsweise einige Ergebnisse der Berechnungen und Abbildung 5.6 stellt den Ergebnisraum der Einsparung des Wärmebedarfs über  $A_K/A_{\text{Netto}}$  für alle Rechenergebnisse dar.

Standort	ENEV	Konfiguration	Flächenverhältnis $A_{\text{Kollektor}}/A_{\text{N}}$	Einsparung Wärmebedarf [%]
Passau	2009	FK VRK_direkt	<b>0.04</b>	<b>10.5</b>
Essen	2009	F VRK_direkt K	<b>0.04</b>	<b>9.6</b>

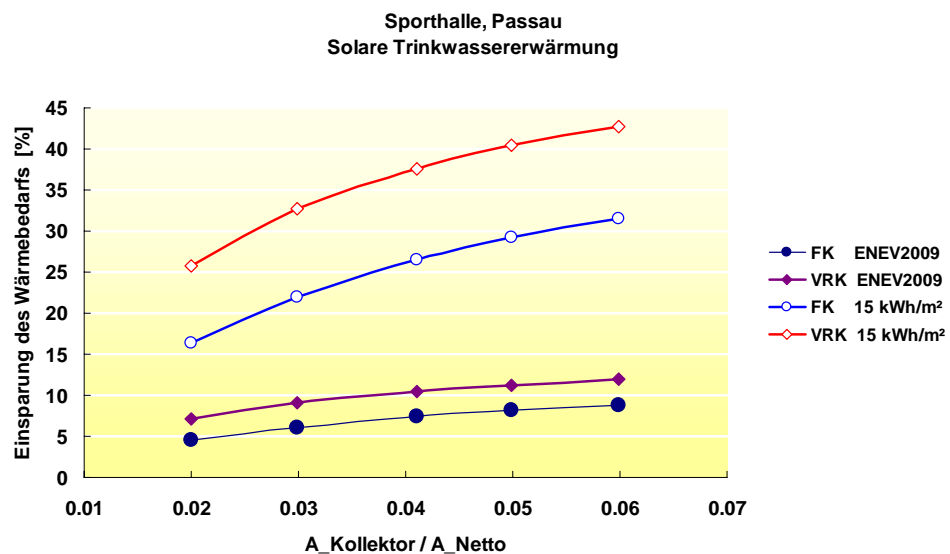
**Tabelle 5.7** Auszug aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen für das System solare Trinkwassererwärmung in der Sporthalle.  
Nomenklatur: FK = Flachkollektor; VRK\_direkt = Anlage mit direkt durchströmten Vakuumröhren-Kollektoren.



**Abbildung 5.6** Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die solare Trinkwassererwärmung in der Sporthalle.

Im Gegensatz zum Bewegungsspielraum innerhalb der DIN V 18599 zur Definition des Referenzgebäudes ist es in mehreren Realisierungen gelungen, Sporthallen mit einem dem Passivhausstandard entsprechend geringen Heizwärmebedarf zu errichten; in Anhang A2 wird darauf hingewiesen. Abbildung 5.7 zeigt daher exemplarisch die Einsparung des Wärmebedarfs, wenn von einem Heizwärmebedarf von  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  ausgegangen wird. Die Darstellung erfolgt für den Standort Passau. Eine Einsparung des Wärmebedarfs in Höhe von 15% wird weit überschritten. Die Abbildung zeigt damit das Einsparpotenzial, das Anwendungen im Nicht-Wohnbereich unter Umständen enthalten können.

Zum Vergleich enthält die Abbildung auch die Einsparung im Wärmebedarf aus den Berechnungen nach den Anforderungen der ENEV 2009.



**Abbildung 5.7** Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die solare Trinkwassererwärmung in der Sporthalle, Standort Passau. Eingezeichnet sind die Rechenwerte nach ENEV 2009 (unterer Kurvensatz) und für die Annahme eines Heizwärmebedarfs von  $15 \text{ kWh}/\text{m}^2$  und Jahr (oberer Kurvensatz).

## 5.2 Technisch und wirtschaftlich angemessene Kollektorflächen

### 5.2.1 Solarthermische Trinkwassererwärmung

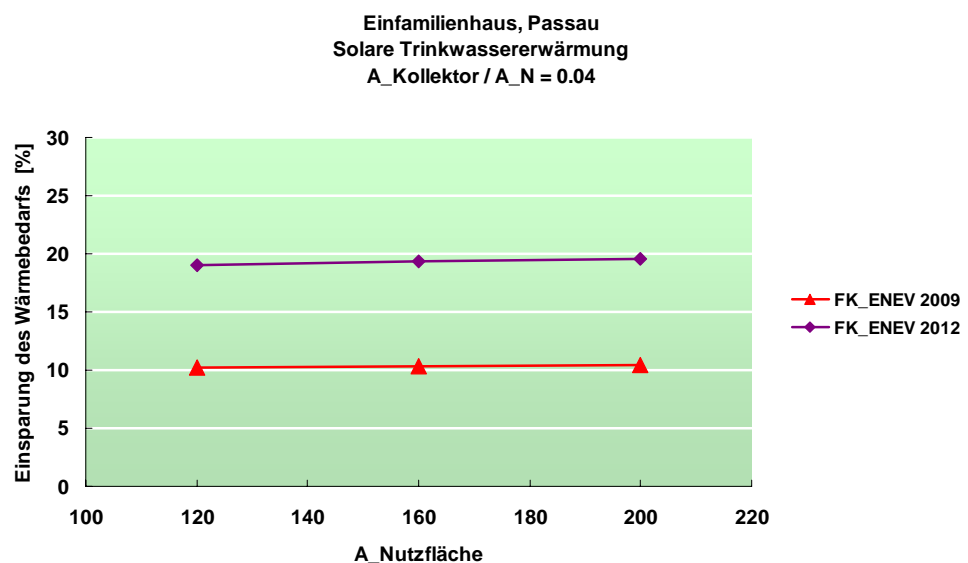
#### Einfamilienhaus

Die meisten der angebotenen Systempakete für die Trinkwassererwärmung in Einfamilienhäusern weisen Kollektorflächen zwischen  $4 \text{ m}^2$  und  $6 \text{ m}^2$  auf mit einem Speichervolumen (meistens Trinkwasserspeicher) von 300 Litern. Etwas größere Systeme für erhöhten Warmwasserbedarf werden mit Kollektorflächen von  $6 \text{ m}^2$  bis  $8 \text{ m}^2$  und einem Speichervolumen von 400 Litern angeboten. Speichervolumen oberhalb von 400 Litern für den Einfamilienhaushalt sind zwar auch erhältlich, wegen der dann notwendigen zusätzlichen hygienischen Maßnahmen zum Schutz vor Legionellen aber nicht dominierend.

Die häufigste Systemgröße mit Kollektorflächen zwischen 4 und 6 m<sup>2</sup> entspricht einem Flächenverhältnis  $A_K/A_N$  im Bereich von 0.02 bis 0.03. In dieser Systemgröße erreichen die Kollektoren Jahreserträge zwischen ca. 350 kWh/m<sup>2</sup> und 500 kWh/m<sup>2</sup> (Passau) bzw. zwischen 300 kWh/m<sup>2</sup> und 400 kWh/m<sup>2</sup> (Essen). Diese vergleichsweise gute Ausnutzung der Kollektoren führt zu solaren Deckungsraten nur bezogen auf den Wärmeaufwand für Trinkwarmwasserbereitung zwischen 50% und 70%. Das Angebot der Systempakete am Markt für Einfamilienhäuser spiegelt daher prinzipiell eine sinnvolle Anlagengröße wieder.

Größere Kollektorflächen, die einem Wert von  $A_K/A_N = 0.04$  entsprechen, sind für den Nutzungszweck solare Trinkwassererwärmung wegen der sinkenden Ausnutzung des Kollektorfeldes kritisch zu betrachten. Zwar können mit hocheffizienten Kollektoren auch hier noch gute Kollektorerträge erreicht werden, aber der Vorteil der solaren Trinkwassersysteme liegt gerade in der überwiegenden Anwendung kostengünstiger Flachkollektoren. Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung zeigen dennoch relativ günstige Ergebnisse für diesen Flächenbereich, allerdings ist die Datengrundlage für die Ermittlung der Systemkosten hier geringer. Der Wert  $A_K/A_N = 0.04$  kann daher als Grenzwert für eine gute Anlagengröße der größeren Systeme angesehen werden.

Für die Anwendung der ENEC 2009 ist auch mit größeren Systemen keine Einsparung des Wärmebedarfs in Höhe von 15% erreichbar. Damit ergibt sich die Frage nach dem Einfluss der Gebäudenutzfläche  $A_N$ . Die beheizte Wohnfläche des Modell-Einfamilienhauses liegt mit 160 m<sup>2</sup> für vier Personen im statistischen Mittel für Wohngebäude in Deutschland. Dennoch wurden zur Diskussion des Einflusses der Nutzfläche stichprobenweise weitere Modellrechnungen mit vereinfachten Annahmen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 5.8 dargestellt sind. Mit den dort getroffenen Annahmen zeigt sich, dass für das konstante Flächenverhältnis  $A_K/A_N = 0.04$  keine gravierenden Veränderungen in der Einsparung des Wärmebedarfs erzielbar sind. Von Vorteil ist, dass bei kleineren Werten der Nutzfläche  $A_N$  das Verhältnis  $A_K/A_N = 0.04$  auf marktgängige und sinnvolle Kollektorflächen für Systempakete hinzielt.



**Abbildung 5.8** Einfluss der Nutzfläche  $A_N$  auf die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die solare Trinkwassererwärmung im Einfamilienhaus. Annahmen:

- dass Verhältnis  $A/V_e$  des modellierten Einfamilienhauses bleibt konstant, es wird  $V_e$  reduziert, damit wird linear  $A_N$  reduziert (in zwei Schritten von 200 m<sup>2</sup> auf 160 m<sup>2</sup> und auf 120 m<sup>2</sup>);
- unter der Annahme, dass die Heizlast näherungsweise linear mit der Verringerung der Gebäudehülle und daher mit  $A_N$  abnimmt, wurde die Heizlast ebenfalls linear zu  $A_N$  reduziert. Mit verkleinertem  $A_N$  reduziert sich auch der an die Nutzfläche gekoppelte Wärmeverbrauch für die Trinkwasserbereitung (trotz bestehender Grundannahme eines 4-Personen-Haushaltes);
- Systemsimulation für die solare Trinkwassererwärmung Einfamilienhaus, Passau, für das Flächenverhältnis  $A_K/A_N = 0.04$ . Dies entspricht Kollektorflächen von
 

$A_N = 200 \text{ m}^2$ :	8 m <sup>2</sup> (Ausgangspunkt)
$A_N = 160 \text{ m}^2$ :	6.4 m <sup>2</sup>
$A_N = 120 \text{ m}^2$ :	4.8 m <sup>2</sup>

Das Ergebnis verdeutlicht im Wesentlichen den linearen Zusammenhang der Randbedingungen Nutzfläche und Heizlast, Kollektorgröße und Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung. Wesentliche Veränderungen in der Einsparung des Heizwärmebedarfs sind daraus nicht zu erwarten.

Bei Anwendung der ENEC 2012 sind für sonnenreiche Standorte wie Passau bereits mit Flachkollektor-Systemen in der marktüblichen Größenordnung zwischen 4 m<sup>2</sup> und 6 m<sup>2</sup> Kollektorfläche Einsparungen des Wärmebedarfs knapp oberhalb von 15% möglich. Dies ist eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Anwendung. Für weniger sonnenreiche Standorte (Essen) ist dies mit Flachkollektoren ab ca. 5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche erreichbar.

### **Mehrfamilienhaus**

Große solarthermische Anlagen unterliegen in der Regel einer individuellen, auf das Gebäude und den Bedarf abgestimmten Planung. Allgemeine Auslegungskriterien sind beispielsweise in der VDI 6002 enthalten. Auch hier zeigt sich ein sinnvoller Kollektorflächenbereich im Bereich von  $< 0.02$  bis  $0.025 A_K/A_N$ , in dem gute Kollektorerträge erwartet werden können. Das Ziel einer Einsparung von 15% des Wärmebedarfs wird dann in der ENEC 2009 nur bei Verwendung hocheffizienter Kollektoren, etwa Vakuumröhren-Kollektoren, erreicht. Das Flächenverhältnis  $A_K/A_N = 0.04$  führt zu relativ niedrigen Kollektorerträgen, die Wirtschaftlichkeitsabschätzung weist daher auch nahezu mit der Kollektorfläche steigende spezifische Kosten des eingesparten Wärmebedarfs auf.

Unter Vorgabe der ENEC 2012 ist das Einsparziel im Bereich günstiger Kollektorflächen  $< 0.03 A_K/A_N$  mit Flachkollektoren an beiden Standorten zu erreichen (etwas knapp an sonnenärmeren Gegenden wie Essen).

### **Sportstätte**

In dieser Anwendung im Nicht-Wohngebäudebereich erfolgt eine effiziente Nutzung des Kollektorsystems, dies ist auch eine Folge der starken Konzentration im Warmwasserverbrauch auf die Nachmittags- und Abendstunden. Das Kollektorsystem kann dadurch relativ ungestört ein nutzbares Temperaturniveau im Speicher aufbauen.

Der kostengünstigste Bereich und der Bereich hoher Kollektorerträge liegt bei einem Flächenverhältnis  $A_K/A_{\text{Netto}} \leq 0.03$ , aber insbesondere an sonnenreicheren Standorten ist ein Wert von 0.04 noch vertretbar. Unter den Vorgaben

der DIN V 18599 und der ENEV kann eine Einsparung des Wärmebedarfs in Höhe von 15% unabhängig vom Flächenverhältnis  $A_K/A_{\text{Netto}}$  nicht erreicht werden.

### **Zwischenfazit**

Die Anwendung der durchschnittlichen Wohngebäudeflächen in der Untersuchung zeigt, dass für Anlagen der solaren Trinkwassererwärmung das Flächenverhältnis  $A_K/A_N = 0.04$  teilweise hoch ist, um eine technisch und energetisch günstige Auslastung des Kollektorsystems zu gewährleisten. In der ENEV 2012 kann das Einsparziel -15% des Wärmebedarfs in der Regel mit kleineren Flächenverhältnissen erreicht werden, in der ENEV 2009 ist dies nur sehr bedingt gegeben (Mehrfamilienhaus, hocheffiziente Kollektoren).

Im Nicht-Wohnbereich zeigt das Beispiel der solaren Trinkwassererwärmung in einer Sporthalle, dass hier günstige Voraussetzungen für eine Solarthermie-Anlage gegeben sind. Auch hier ist aber das Flächenverhältnis  $A_K/A_N = 0.04$  als oberer Wert zu sehen.

## **5.2.2 Kombisysteme**

Kombianlagen werden größer dimensioniert als Systeme nur zur solaren Trinkwassererwärmung. Typische Anlagengrößen für Einfamilienhäuser sind Kollektorflächen 8 m<sup>2</sup> bis 10 m<sup>2</sup>, dies korreliert gut mit dem Flächenverhältnis  $A_K/A_N = 0.04$  im betrachteten Einfamilienhaus (= 8 m<sup>2</sup> Kollektorfläche). Die Wirtschaftlichkeitsabschätzung zeigt einen Vorteil für eher größere Systeme mit ca. 12 m<sup>2</sup> Kollektorfläche ( $A_K/A_N = 0.06$ ).

ENEV 2009:

Eine Einsparung des Wärmebedarfs in Höhe von 15% ist in dieser Systemgröße mit sehr effizienten Kollektoren im Einfamilienhaus sehr knapp, im Mehrfamilienhaus gut erreichbar. Mit Flachkollektoren wird die angestrebte Einsparung nur im Mehrfamilienhaus, Standort Passau erreicht. Auch eine Erhöhung des Flächenverhältnisses auf  $A_K/A_N = 0.05$  – für das Einfamilienhaus noch im Bereich sinnvoller Anlagengröße – führt im Einfamilienhaus zu Einsparungen von 12 bis 13% mit Flachkollektoren.

Im großen System des Mehrfamilienhauses ist die Ausnutzung des Kollektorfeldes deutlich geringer als im Einfamilienhaus. Dies ist eine Folge insgesamt höherer erforderlicher Temperaturen im System und des komplexeren Systemaufbaus. Hier ist ein Flächenverhältnis  $A_K/A_N > 0.04$  auch wirtschaftlich nicht mehr attraktiv.

ENEV 2012:

Im Einfamilienhaus und im Mehrfamilienhaus wird das Einsparziel bei  $A_K/A_N = 0.04$  auch mit Flachkollektoren überschritten. Das Flächenverhältnis 0.04 ist für das Einfamilienhaus angemessen, für das Mehrfamilienhaus gerade noch angemessen.

### **Zwischenfazit**

Das Flächenverhältnis  $A_K/A_N = 0.04$  für solare Kombisysteme führt im untersuchten Einfamilienhaus zu eher knapper Auslegung, während im Mehr-

familiengebäude dieser Wert aufgrund steigender Kosten die maximale Systemgröße markiert. Bei Anwendung der marktdominierenden Flachkollektoren können jedoch in der Regel mit dem Wärmebedarf nach ENEV 2009 keine Einsparungen im Wärmebedarf von 15% erwartet werden; die Einsparung liegt hier je nach Standort etwa zwischen 11% und 16%. Eine Erhöhung des Flächenverhältnisses führt, insbesondere bei dem großen System des Mehrfamilienhauses, zu ungünstig niedriger Kollektorausnutzung.

In der ENEV 2012 wird mit dem gleichen angemessenen Flächenverhältnis das Einsparziel bereits mit Flachkollektoren erreicht.

### 5.2.3 Solarthermische Heizungsunterstützung

Die solarthermische Heizungsunterstützung ohne Trinkwassererwärmung wurde für das Bürogebäude berechnet und erscheint energetisch und wirtschaftliche ungünstig. In der gesamten sonnenreichen Jahresmitte wird das Kollektorsystem nicht genutzt. Auch in der Heizsaison wird an den Wochenenden keine oder kaum Heizwärme benötigt, dies ist ein Merkmal energieeffizienter Gebäude. Damit ist die Ausnutzung des Kollektorsystems extrem niedrig. Eine energetisch sinnvolle Kollektorfläche kann nicht angegeben werden. Unter diesen Randbedingungen ist die Nutzung solarer Wärme mittels flüssiger Wärmeträger im Kollektor fragwürdig. Eine Alternative könnten preiswerte Systeme mit Luftkollektoren zur Unterstützung einer luftgeführten Gebäudeheizung darstellen.

### 5.2.4 Solarthermische Heizungsunterstützung und Kühlung

Die Kombination solarer Heizungsunterstützung mit solarer Kühlung führt zu einer angemessenen Auslastung des Kollektorsystems über das Jahr. Eine Herabsetzung der Kollektorerträge wird jedoch durch folgende Randbedingungen verursacht:

- es gibt eine Lücke im Wärmebedarf in den Übergangszeiträumen (nur noch geringer Heizbedarf, noch kaum Kühlbedarf)
- kein Heiz- und Kühlbedarf an den Wochenenden; in diesen Zeiträumen kann solare Wärme bei hohen Einstrahlungen nicht verwertet werden.

In der hier betrachteten Variante, in der die solare Kühlung parallel zur konventionellen Kühlung mit einer Kompressionskältemaschine betrieben wird, sind keine strengen Mindestanforderungen an die Kollektorgröße und Leistung der thermisch angetriebenen Kältemaschine (AKM) gegeben, da eine Einsparung von Primärenergie auch mit kleinen Deckungsanteilen der solaren Kühlung am Gesamtkältebedarf erreicht wird. In der technischen Realisierung muss aber auf eine angemessene Relation zwischen Kollektorgröße und Wärmebedarf der AKM geachtet werden, um einen quasi-kontinuierlichen Betrieb der Anlage zu gewährleisten. In der hier betrachteten Konfiguration ist ein Flächenverhältnis von  $A_K/A_{\text{Netto}} = 0.04$  für hocheffiziente Kollektoren angemessen. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse sehr stark von den Flächenverhältnissen zwischen Netto-Grundflächen, beheizter Fläche und gekühlter Fläche abhängen. Es ist kennzeichnend für moderne energieeffiziente Gebäude, dass eine Vollklimatisierung (Heizen und Kühlen) nur noch auf die Hauptnutzungsflächen angewendet wird.

Werden Flachkollektoren eingesetzt, sind unter Umständen erheblich größere Flächen notwendig. Wegen des Antriebstemperaturniveaus der AKM (80°C

bis 95°C) sind durchschnittlich gute Flachkollektoren hier nicht ausreichend. Es sollten vielmehr Flachkollektoren mit zusätzlichen Maßnahmen zur Verringerung der Wärmeverluste eingesetzt werden (stärkere Wärmedämmung, Konvektionssperren, Antireflex-Beschichtung, etc.). In den Berechnungen dieser Studie wurden bereits für die solare Kühlung verbesserte Flachkollektoren eingesetzt, die jedoch in energetischer und wirtschaftlicher Hinsicht zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen führten. Erst die Nutzung von Vakuumröhren-Kollektoren mit verringerten Wärmeverlusten (VRK-plus) führte zu günstigen Ergebnissen.

### **Zwischenfazit**

Mit der solaren Kühlung und Heizungsunterstützung ist eine gute Nutzung des Kollektorsystems in den sonnenreichen Monaten möglich. Voraussetzung ist die Anwendung geeigneter Kollektoren. Die Einsparziele wurden zwar in den Berechnungen dieser Studie erreicht, allerdings sind die erreichbaren Einsparungen stärker von den Randbedingungen Gebäudeaufteilung, Nutzung und Kältetechnik abhängig als bei Systemen zur Trinkwassererwärmung oder bei Kombisystemen.

## **5.3 Abschätzung der Investitionskosten und der Brennstoffeinsparung**

### **5.3.1 Einfamilienhaus**

Tabelle 5.8 zeigt exemplarisch Investitionskosten, eingesparte Brennstoffkosten sowie die spezifischen Kosten der eingesparten Wärme (s. Anhang A6) jeweils für das Flächenverhältnis  $A_K/A_N = 0.04$  und für weitere Flächenverhältnisse mit niedrigeren spezifischen Kosten.

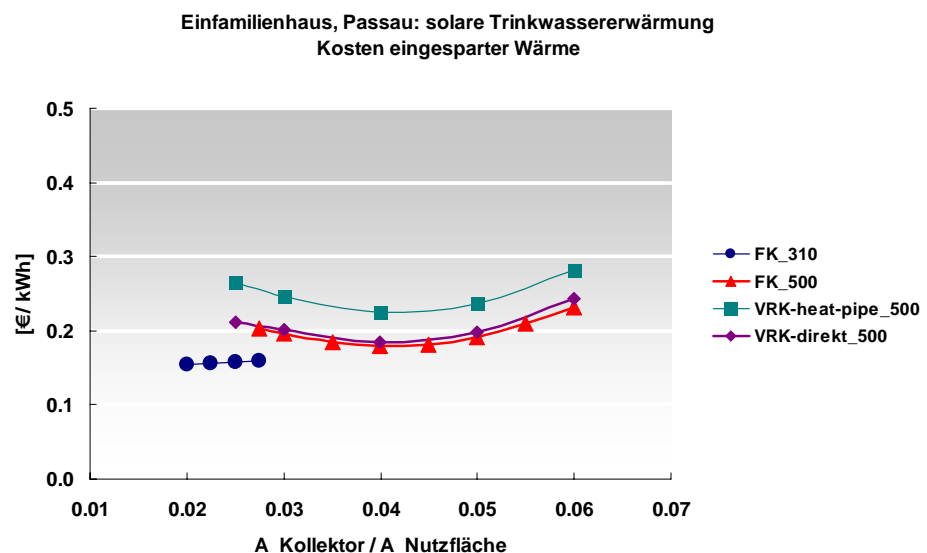
Zu den niedrigsten Kosten führen Systeme zur Trinkwassererwärmung mit Flachkollektoren und kleinem Speicher, die im Bereich eines Flächenverhältnisses von  $A_K/A_N = 0.02$  bis  $0.03$  liegen. Dies ist sicher auch auf den höheren Marktanteil und auf dadurch bedingte niedrigere spezifische Marktpreise zurückzuführen, aber auch auf die gute Ausnutzung dieser Systeme. Größere Systeme zur Trinkwassererwärmung zeigen ein schwach ausgeprägtes Kostenminimum zwischen bei  $A_K/A_N = 0.03$  bis  $0.05$ . Im günstigen Kostenbereich betragen die Kosten der eingesparten Wärme zwischen  $0.15$  €/kWh und  $0.20$  €/kWh (Passau); am Standort Essen zwischen  $0.20$  €/kWh und  $0.25$  €/kWh. Die Einsparung der Brennstoffkosten beträgt bei den kleinen Anlagen ca.  $130$  € bis  $150$  €/a, bei Anlagen mit  $A_K/A_N = 0.04$  bis ca.  $200$  €/a.

Bei den Kombisystemen zeigen sich etwas höhere spezifische Kosten. Zusätzlich verschiebt sich das Kostenminimum in Richtung größere Kollektorsysteme ( $A_K/A_N$  ca.  $0.06$ ); günstigste Kostenwerte liegen hier bei ca.  $0.19$  €/kWh (Standort Passau, ENEV 2009).

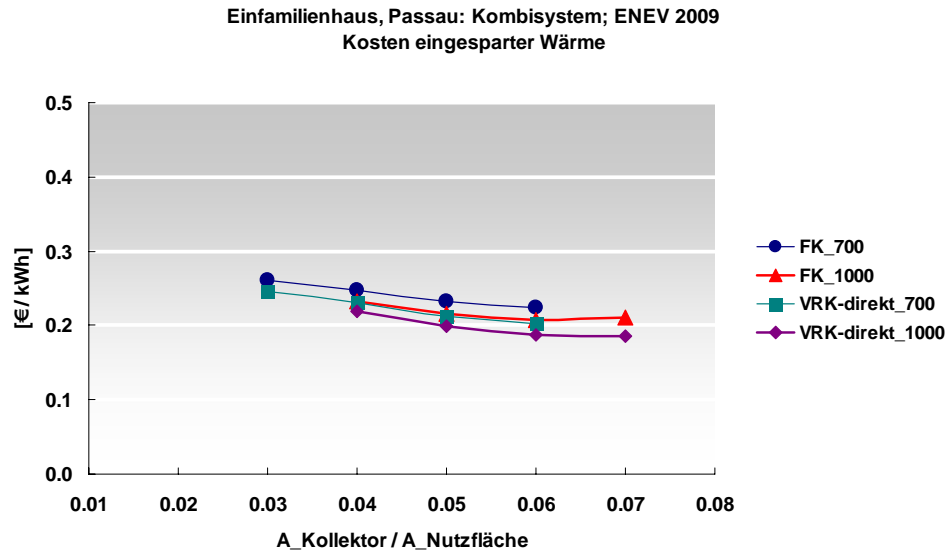
Auffallend ist, dass die spezifischen Kosten der eingesparten Wärme bei Anwendung der ENEV 2012 um ca.  $20\%$  bis  $25\%$  steigen; dies wird durch eine Veränderung im Profil des Heizwärmebedarfs mit daraus resultierender geringerer Ausnutzung des Kollektors verursacht. Je nach Standort und ENEV werden zwischen  $200$  €/a (Essen, ENEV 2012) und  $330$  €/a (Passau, ENEV 2009) Brennstoffkosten eingespart.

A_Koll / A_N	Konfiguration	Investitions-kosten	Einsparung Wärmebedarf	Einsparung Brennstoff	Jahres-kosten Solarsystem	Kosten der eingesparten Wärme	statische Amortisationszeit
		€	%	€/a	€/a	€/kWh	a
<b>Einfamilienhaus, solare Trinkwassererwärmung</b>							
<b>Standort Passau</b>							
0.02	FK_300	3644	8 (ENEV 2009) 16 (ENEV 2012)	145	373	0.15	25
0.04	FK_500	5022	11 (ENEV 2009) 20 (ENEV 2012)	181	512	0.18	28
0.04	VRK_500	5886	12 (ENEV 2009) 22 (ENEV 2012)	206	594	0.18	29
<b>Standort Essen</b>							
0.025	FK_300	4022	8 (ENEV 2009) 15 (ENEV 2012)	131	410	0.21	31
0.04	VRK_500	5886	12 (ENEV 2009) 21 (ENEV 2012)	182	594	0.22	32
<b>Einfamilienhaus, Kombisystem</b>							
<b>Standort Passau</b>							
<b>ENEV 2009</b>							
0.04	VRK_direkt_1000	8647	16	270	870	0.22	32
0.06	VRK_direkt_1000	9484	19	328	954	0.19	29
0.06	FK_1000	8052	15	260	810	0.21	31
<b>ENEV 2012</b>							
0.04	VRK_direkt_700	8647	25	228	869	0.28	38
0.06	VRK_direkt_700	9484	29	267	953	0.25	36
<b>Standort Essen</b>							
<b>ENEV 2009</b>							
0.04	VRK_direkt_1000	8647	14	225	870	0.28	38
0.06	VRK_direkt_1000	9484	18	281	954	0.24	34
0.06	FK_1000	8052	13	213	811	0.27	38
<b>ENEV 2012</b>							
0.04	VRK_direkt_700	8647	23	198	869	0.33	44
0.06	VRK_direkt_700	9484	27	236	953	0.30	40

**Tabelle 5.8** Einzelergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsabschätzung für das Einfamilienhaus.



**Abbildung 5.9** Kosten der eingesparten Wärme für die solare Trinkwassererwärmung im Einfamilienhaus, Standort Passau.



**Abbildung 5.10** Kosten der eingesparten Wärme für das Kombisystem im Einfamilienhaus, Standort Passau, ENEV 2009.

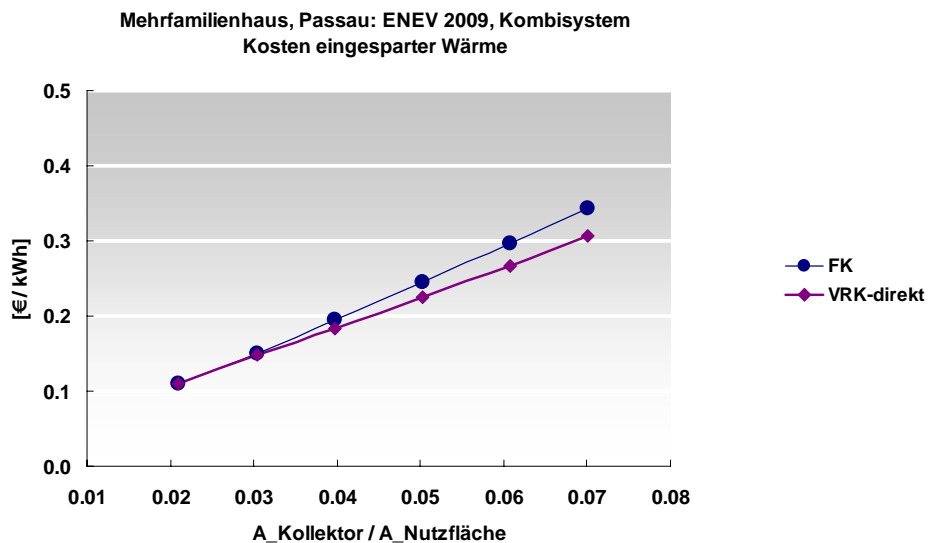
### 5.3.2 Mehrfamilienhaus

Sehr abweichend von den Ergebnissen zum Einfamilienhaus stellt sich die Kostensituation für große solarthermische Anlagen dar: sowohl für die solare Trinkwasserbereitung als auch im Kombisystem steigen die Kosten der eingesparten Wärme fast linear mit der Systemgröße an (Abbildung 5.11), ein Minimum kann nicht identifiziert werden. Zwei Gründe lassen sich im wesentlichen dafür nennen:

1. im untersuchten Größenbereich der Kollektoren (70 bis 300 m<sup>2</sup>) und Speicher gibt es kaum noch eine Kostendegression. Die Abnahme der spezifischen Kollektorerträge, die immer bei einer Vergrößerung des Kollektorfeldes auftritt, kann nicht mehr durch sinkende spezifische Kosten kompensiert werden;
2. in beiden Nutzungsarten – Trinkwassererwärmung und Kombisystem – ist mit steigender Kollektorfläche  $A_K/A_N > 0.04$  der Anstieg des Beitrags zur Wärmedeckung schwächer ausgeprägt als bei den Systemen im Einfamilienhaus.

Bei  $A_K/A_N = 0.04$  lassen sich in der Trinkwassererwärmung in Passau mit einem hocheffizienten Kollektor 3900 €/a Brennstoffkosten einsparen, am Standort Essen 3400 €/a. Im Kombisystem sind die Einsparungen ca. 10% höher, aber durch die höheren Investitionskosten sind die Kosten der eingesparten Wärme etwa gleich hoch (0.19 €/kWh in Passau; 0.23 €/kWh in Essen). Signifikante Veränderungen zwischen ENEV 2009 und 2012 lassen sich hier nicht erkennen.

Einzelergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 5.9 enthalten.



**Abbildung 5.11** Kosten der eingesparten Wärme für das Kombisystem im Mehrfamilienhaus, Standort Passau, ENEV 2009.

A_Koll / A_N	Konfiguration	Investitions-kosten €	Einsparung Wärmebedarf %	Einsparung Brennstoff €/ a	Jahres- kosten Solarsystem €/ a	Kosten der eingesparten Wärme €/ kWh	statische Amorti- sationszeit a
<b>Mehrfamilienhaus, solare Trinkwassererwärmung</b>							
<b>Standort Passau</b>							
0.021	FK	49064	13 (ENEV 2009) 16 (ENEV 2012)	2434	5035	0.10	20
0.04	FK	86490	16 (ENEV 2009) 20 (ENEV 2012)	3000	8787	0.19	29
0.04	VRK	114537	20 (ENEV 2009) 26 (ENEV 2012)	3887	11584	0.19	29
<b>Standort Essen</b>							
0.021	VRK	70085	16 (ENEV 2009) 20 (ENEV 2012)	2773	7126	0.15	25
0.04	VRK	114537	19 (ENEV 2009) 25 (ENEV 2012)	3385	11581	0.24	34
<b>Mehrfamilienhaus, Kombisystem</b>							
<b>Standort Passau</b>							
<b>ENEV 2009</b>							
0.02	VRK	73179	18	3515	7458	0.11	21
0.04	VRK	120381	22	4241	12185	0.18	28
0.04	FK	92334	16	3151	12185	0.19	29
<b>ENEV 2012</b>							
0.02	FK	52158	17	2523	5366	0.11	21
0.04	VRK	120381	28	4162	12184	0.19	29
<b>Standort Essen</b>							
<b>ENEV 2009</b>							
0.02	VRK	73179	17	2935	7457	0.15	25
0.04	VRK	120381	21	3662	12190	0.23	33
<b>ENEV 2012</b>							
0.02	VRK	73179	21	2906	7456	0.15	25
0.04	FK	92334	18	2464	9396	0.28	37

**Tabelle 5.9** Einzelergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsabschätzung für das Mehrfamilienhaus.

### 5.3.3 Bürogebäude

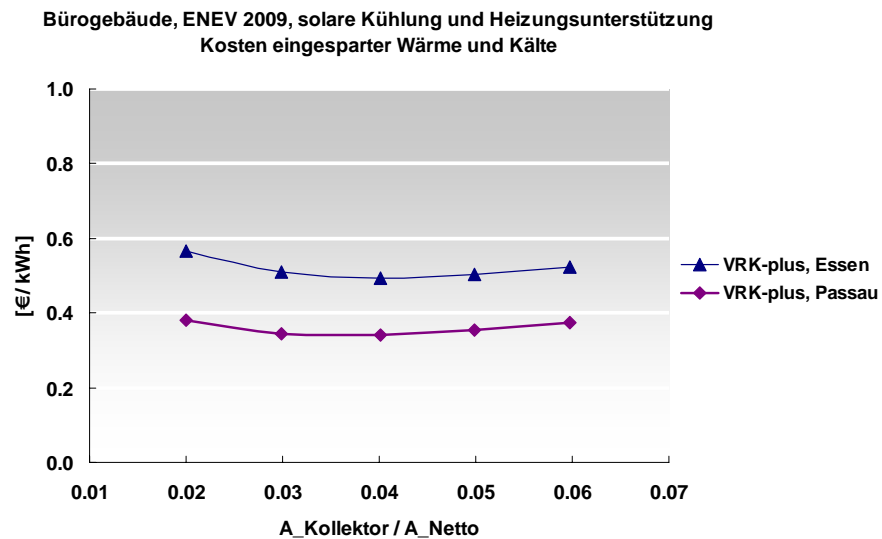
Der Einsatz von Solarthermie in Bürogebäuden unterliegt speziellen Randbedingungen: einerseits ist der Trinkwarmwasserbedarf gering (Ausnahme: große Bürogebäude mit Küchenbereich/Verpflegungseinrichtung) und wird darüber hinaus dezentral organisiert, so dass eine solare Trinkwassererwärmung nicht sinnvoll erscheint; andererseits wird auch kein durchgehender Wärmebedarf in der Heizsaison benötigt (Solltemperatur-Absenkung am Wochenende). Entsprechend zeigen auch die Rechenergebnisse für eine ausschließliche solarthermische Heizungsunterstützung ernüchternde Ergebnisse. In Tabelle 5.10 sind die Ergebnisse zur solaren Heizungsunterstützung für den Standort Passau eingetragen (unterste Zeile). Auch bei Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Kostenermittlung ist diese Anwendung wirtschaftlich nicht attraktiv.

Deutlich positiver ist Anwendung „solare Kühlung und Heizungsunterstützung, wenn entsprechend geeignete Kollektoren eingesetzt werden. Abbildung 5.12 zeigt, das am Standort Passau ein Minimum der spezifischen Kosten der eingesparten Wärme und Kälte im Bereich  $A_K/A_{\text{Netto}}$  zwischen 0.03 und 0.04 existiert (Vakuumröhren-Kollektor). In diesem Bereich werden bis zu 4000 €/a Brennstoffkosten und bis zu 2000 €/a Stromkosten (Arbeit) eingespart. Das Einsparziel Wärme- und Kältebedarf -15% wird überschritten. Am Standort Passau sind die Einsparungen an Brennstoff und Strom geringer, die Kosten liegen auf höherem Niveau. Tabelle 5.10 enthält die wichtigsten Daten.

Die Ergebnisse sind stark abhängig von den Randbedingungen in der Anwendung, z.B. dem Flächenanteil des vollklimatisierten Bereichs und der anteiligen Nennleistung der thermisch angetriebenen Kälteversorgung am Spitzenkühlbedarf.

Nachteilig sind die gegenwärtig noch hohen Kosten der solaren Kühlung. In dieser Berechnung liegen die minimalen Kosten des eingesparten Wärme- und Kältebedarfs bei 0.34 €/kWh. Die Kostenreduzierung dieser Technologie ist Gegenstand mehrerer nationaler und internationaler Pilot- und Demonstrationsvorhaben und kann erreicht werden unter anderem durch

- Effizienzsteigerung der thermisch angetriebenen Kältemaschinen insbesondere im Teillastbereich; dies führt zu weniger benötigter Wärme und damit zu kleineren Kollektorfeldern;
- Optimierungen im Rückkühlsystem und Nutzung der Niedertemperaturwärme der Rückkühlung
- Kostenreduktion durch größere Produktionzahlen der Kältemaschinen.



**Abbildung 5.12** Kosten der eingesparten Wärme und Kälte durch die solare Kühlung und Heizungsunterstützung im Bürogebäude, Passau und Essen, ENEV 2009. Sinnvoll ist hier die Anwendung der Vakuumröhren-Kollektoren bzw. gleichartiger Kollektoren mit stark verringerten Wärmeverlusten im hohen Temperaturbereich. Die spezifischen Kosten der Einsparung weisen ein flaches Minimum auf; die Ergebnisse für ein Flächenverhältnis  $A_K/A_{Netto}$  zwischen 0.03 und 0.05 sind gleichwertig.

A <sub>Koll</sub> / A <sub>N</sub>	Konfiguration	Investitions-kosten	Einsparung Wärme- und Kältebedarf	Einsparung Brennstoff	Einsparung Elektrizität	Jahres-kosten Solarsystem	Kosten der eingesparten Wärme und Kälte	statische Amorti-sationszeit
		€	%	€/ a	€/a	€/ a	€/ kWh	a
<b>Bürogebäude, solares Kühlen und Heizungsunterstützung</b>								
<b>ENEV 2009</b>								
<b>Standort Passau</b>								
0.02	FK-plus	198779	7	1443	549	19267	0.60	-
0.03	VRK-plus	293210	17	3318	1750	27478	0.34	-
0.04	VRK-plus	347901	21	4035	2078	32603	0.34	-
<b>Standort Essen</b>								
0.04	VRK-plus	347901	18	2965	1264	33416	0.49	-
<b>Bürogebäude, solare Heizungsunterstützung</b>								
<b>Standort Passau</b>								
<b>ENEV 2009</b>								
0.04	VRK	263168	10	3191	-	26526	0.72	-

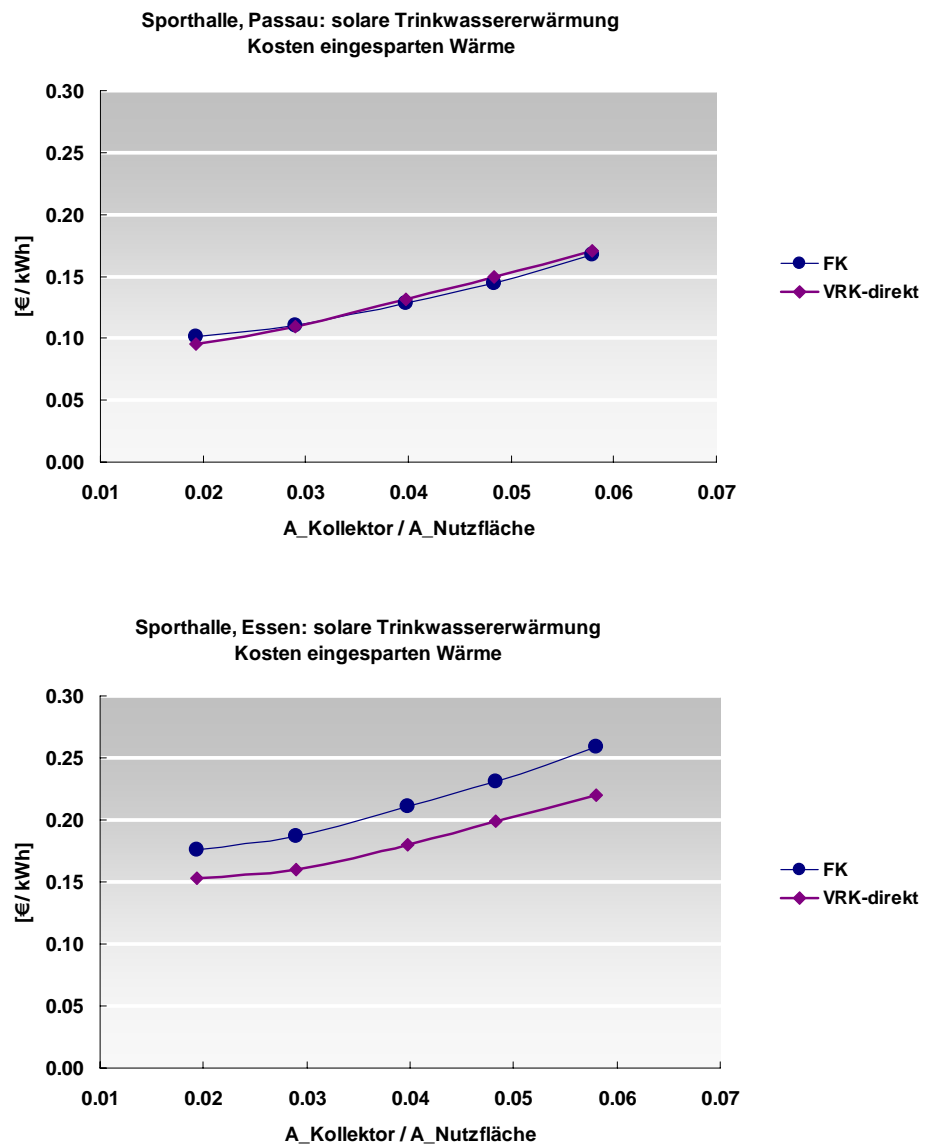
**Tabelle 5.10** Einzelergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsabschätzung für das Bürogebäude. Die statischen Amortisationszeiten überschreiten teilweise 50 Jahre und sind daher nicht eingetragen.

### 5.3.4 Sportstätte

In der solaren Trinkwassererwärmung für die Sporthalle zeichnet sich ein Minimum der Kosten pro eingesparter kWh im Wärmebedarf bei Flächenverhältnissen  $A_K/A_{\text{Netto}} \leq 0.03$  ab; die Kosten der Einsparung liegen dort bei ca. 0.11 €/kWh (Passau) bzw. bei ca. 0.16 €/kWh (Essen). Wirtschaftlich und energetisch sind aber Anlagengrößen bis  $A_K/A_{\text{Netto}} = 0.04$  noch vertretbar.

Die spezifischen Kosten der eingesparten Wärme sind für Systeme mit Flachkollektoren und mit Vakuumröhren-Kollektoren in Passau etwa gleich hoch; am Standort Essen führen Flachkollektoren zu spürbar höheren spezifischen Kosten.

Abbildung 5.13 zeigt den Verlauf der spezifischen Kosten der eingesparten Wärme für die Standorte Passau und Essen. Tabelle 5.11 enthält auszugsweise die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsabschätzung.



**Abbildung 5.13** Kosten der eingesparten Wärme und Kälte durch die solare Trinkwassererwärmung für die Sporthalle in Passau (oben) und Essen (unten).

A_Koll / A_N	Konfiguration	Investitions-kosten	Einsparung Wärmebedarf	Einsparung Brennstoff	Jahres-kosten Solarsystem	Kosten der eingesparten Wärme	statische Amortisationszeit
		€	%	€/a	€/a	€/ kWh	a
<b>Sportstätte, solare Trinkwassererwärmung</b>							
<b>ENEV 2009</b>							
<b>Standort Passau</b>							
0.04	FK	41855	7.39	1852	4266	0.13	23
0.04	VRK	60408	10.5	2622	6125	0.13	23
<b>Standort Essen</b>							
0.04	FK	41855	6.0	1353	4261	0.21	31
0.04	VRK	60408	9.6	2165	6130	0.18	28

**Tabelle 5.11** Einzelergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsabschätzung für die Sportstätte. Bei einem Flächenverhältnis von 0.04 erreicht das System noch vergleichsweise günstige Ergebnisse.

### 5.3.5 Veränderter Flächenbezug: Wärmebedarf

In den untersuchten Wohngebäuden nehmen die optimalen Flächenverhältnisse Kollektorfläche / Bezugsfläche in den verschiedenen Anwendungen unterschiedliche Werte an. Ergänzend zu den vorherigen Darstellungen werden die Ergebnisse – Einsparung des Wärmebedarfs und Kosten der eingesparten Wärme für das Ein- und Mehrfamilienhaus – in diesem Abschnitt in einem veränderten Bezug gezeigt: Die Darstellung erfolgt über der Kollektorfläche, normiert auf den Wärmebedarf des Gebäudes (Nutzwärme für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung).

Neuer Bezug auf:

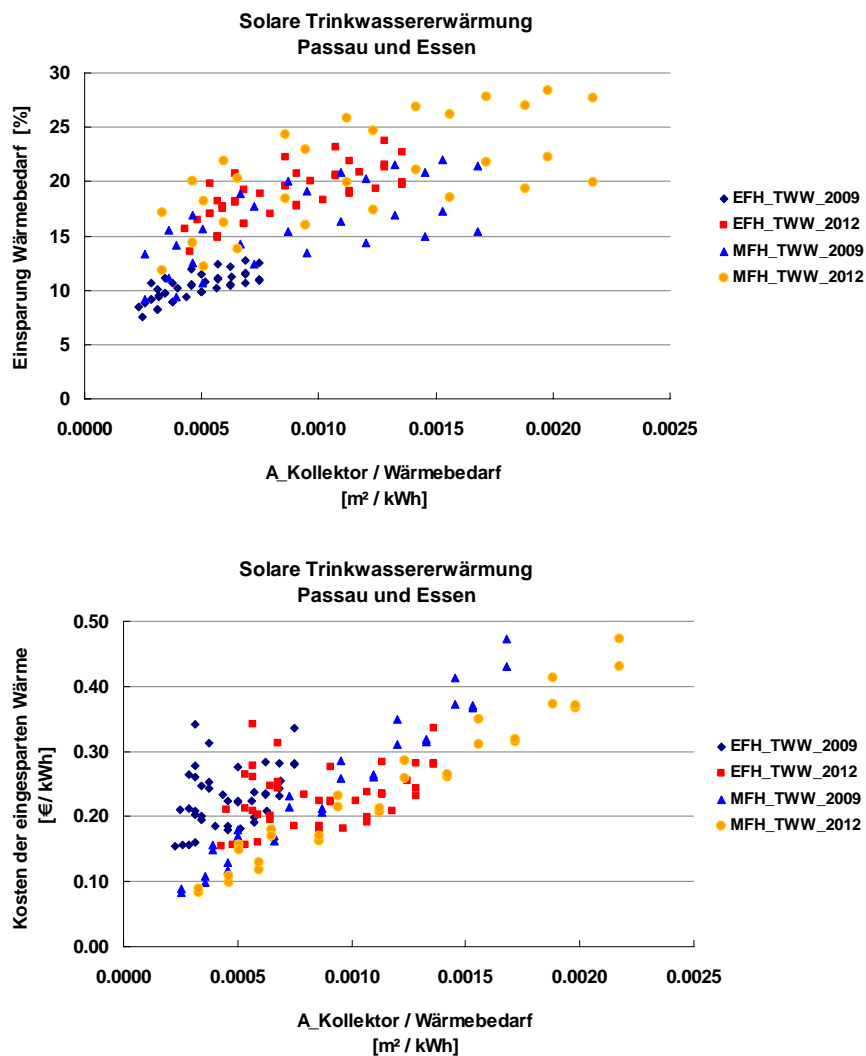
$$A_{\text{Kollektor}} / \text{Wärmebedarf (Heizen und Warmwasser)} \text{ [m}^2\text{/kWh]}$$

Die Darstellung hat den Nachteil, dass bei reiner solarer Trinkwassererwärmung der Bezug auf den gesamten Wärmebedarf eigentlich nicht maßgebend ist, da die Systemauslegung hier nur nach Trinkwarmwasserbedarf erfolgt. Eine zusätzliche Aufteilung des Wärmebedarfs in Gesamtwärmebedarf und Wärmebedarf nur für Warmwasserbereitung würde aber die Übersichtlichkeit der Darstellung erheblich komplexer gestalten.

#### I Solare Trinkwassererwärmung

Die zusammenfassende Darstellung in Abbildung 5.14 zeigt

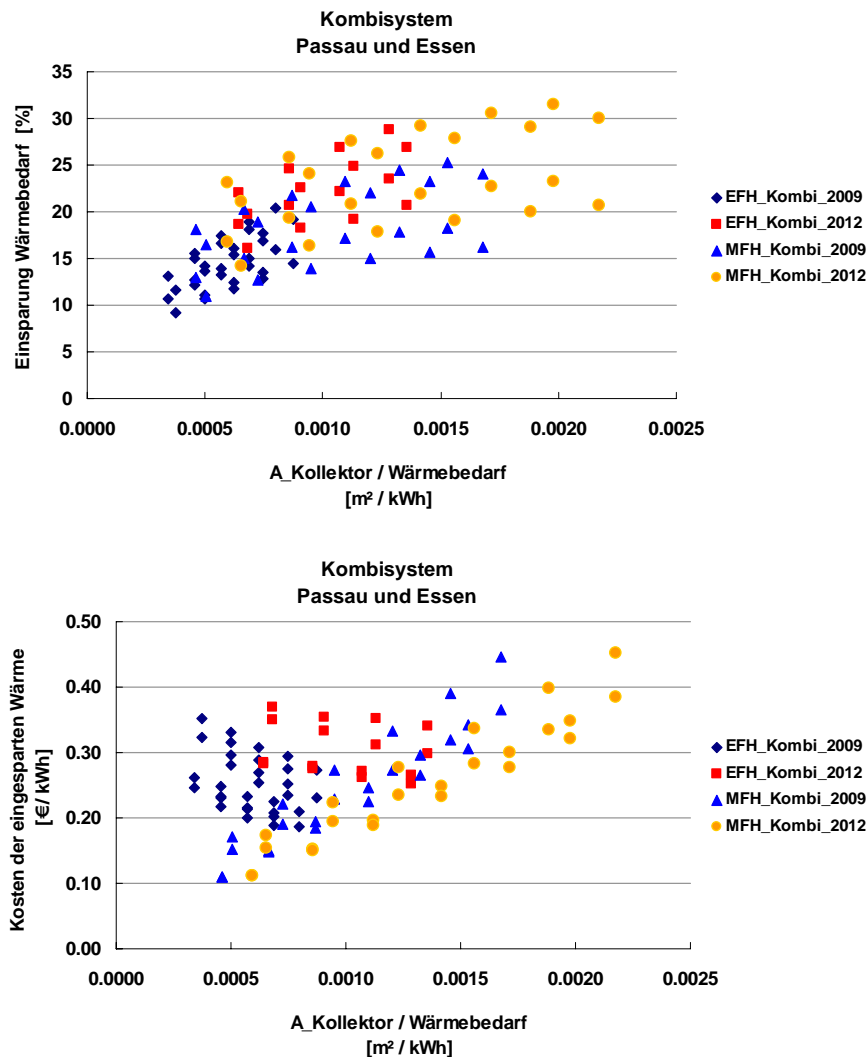
- ein Kostenminimum für alle Systeme ist für  $A_{\text{Kollektor}}/\text{Wärmebedarf}$  zwischen 0.006 bis ca. 0.010 erkennbar;
- in diesem Gebiet wird eine Einsparung des Wärmebedarfs von > 15% in der ENEV 2009 nur von wenigen Systemen erreicht, in der ENEV 2012 von fast allen Systemen;
- allerdings geht in dieser Darstellung unter, dass die kostengünstigsten kleinen Systeme mit Kollektorflächen bis 6 m<sup>2</sup> im Bereich  $A_{\text{Kollektor}}/\text{Wärmebedarf} = 0.00023$  bis 0.00031 (ENEV 2009) bzw. zwischen 0.00043 bis 0.00059 (ENEV 2012) liegen.



**Abbildung 5.14** Oben: Einsparung des Wärmebedarfs, unten: Kosten der eingesparten Wärme für alle untersuchten Systeme zur solaren Trinkwassererwärmung im Ein- und Mehrfamilienhaus. Die Datenpunkte sind sortiert nach Einfamilienhaus (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) und nach ENEV 2009 und ENEV 2012.

## II Kombisysteme

In der Summe der Systeme ist ein generelles Kostenminimum im Bereich  $A_{\text{Kollektor}}/\text{Wärmebedarf} = 0.0005$  bis  $0.001$  m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro kWh Wärmebedarf erkennbar (Abbildung 5.15). Ohne weitere Aufschlüsselung in Standort und Kollektorart übersteigen bereits in ENEV 2009 einige Konfigurationen eine Einsparung von 15% des Wärmebedarfs.

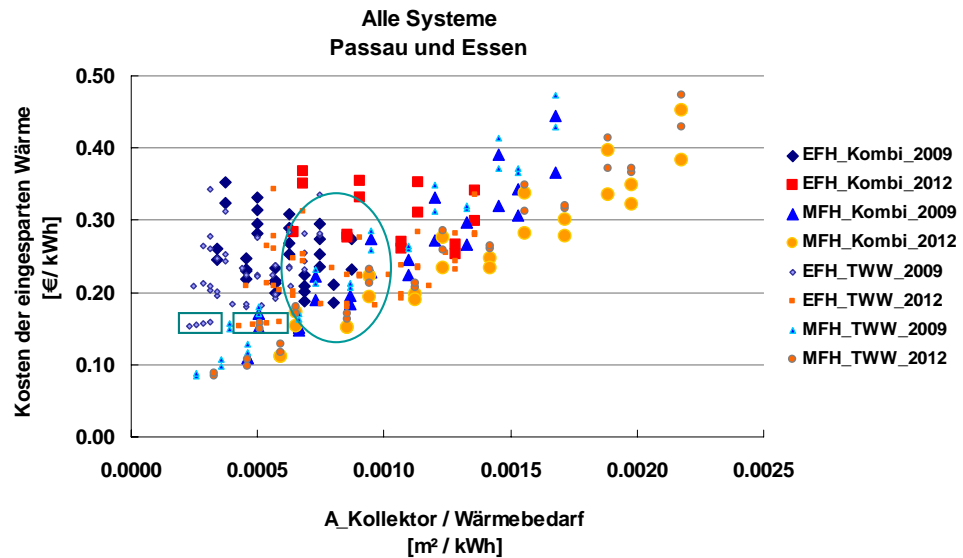


**Abbildung 5.15** Oben: Einsparung des Wärmebedarfs, unten: Kosten der eingesparten Wärme für alle untersuchten Kombisysteme im Ein- und Mehrfamilienhaus. Die Datenpunkte sind sortiert nach Einfamilienhaus (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) und nach ENEV 2009 und ENEV 2012.

### III Alle Systeme

Alle untersuchten Konfigurationen (solare Trinkwassererwärmung und Kombisysteme) für das Ein- und Mehrfamilienhaus sind in Abbildung 5.16 zusammenfassend dargestellt. Für die Mehrheit der Systeme kann ein allgemeines Kostenminimum im oval gekennzeichneten Bereich gesehen werden; für kleine kostengünstige Systeme der solaren Trinkwassererwärmung (für EFH) liegt die normierte Fläche unterhalb 0.0005 (ENEV 2009) bzw. unterhalb von 0.0006 (ENEV 2012). Diese Bereiche sind durch das Rechteck markiert.

Die Angabe von Mittelwerten des eingesparten Wärmebedarfs oder der mittleren Kosten ist hier nicht stichhaltig, da dazu die Dichte und Verteilung der berechneten Konfigurationen nach statistischen Merkmalen aufgebaut sein müssten.



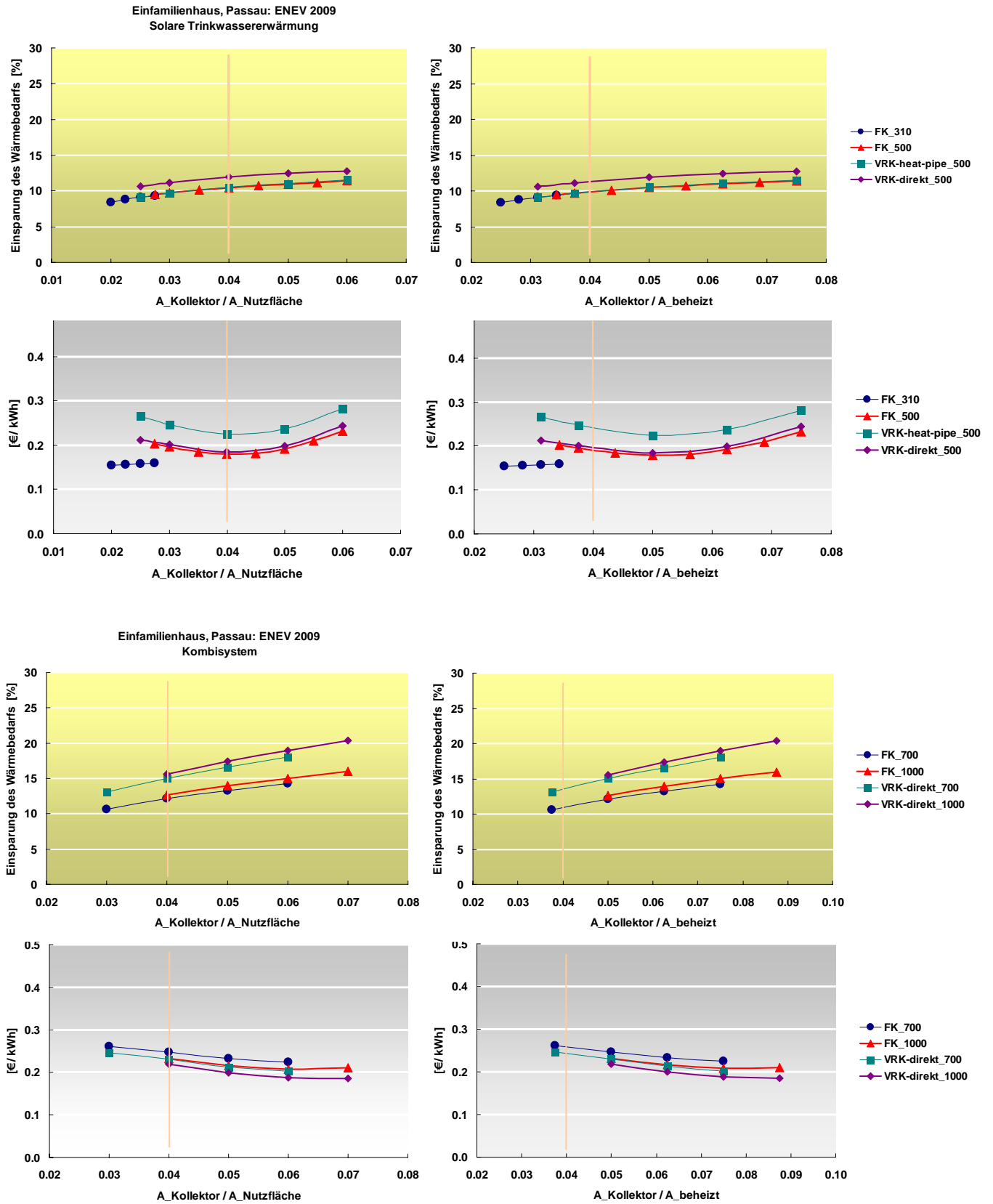
**Abbildung 5.16** Kosten der eingesparten Wärme für alle untersuchten Systeme im Ein- und Mehrfamilienhaus. Die Datenpunkte sind sortiert nach Einfamilienhaus (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) und nach ENEV 2009 und ENEV 2012. TWW: Systeme zur solaren Trinkwassererwärmung; Kombi: Kombisysteme.

### 5.3.6 Veränderter Flächenbezug: Beheizte Fläche

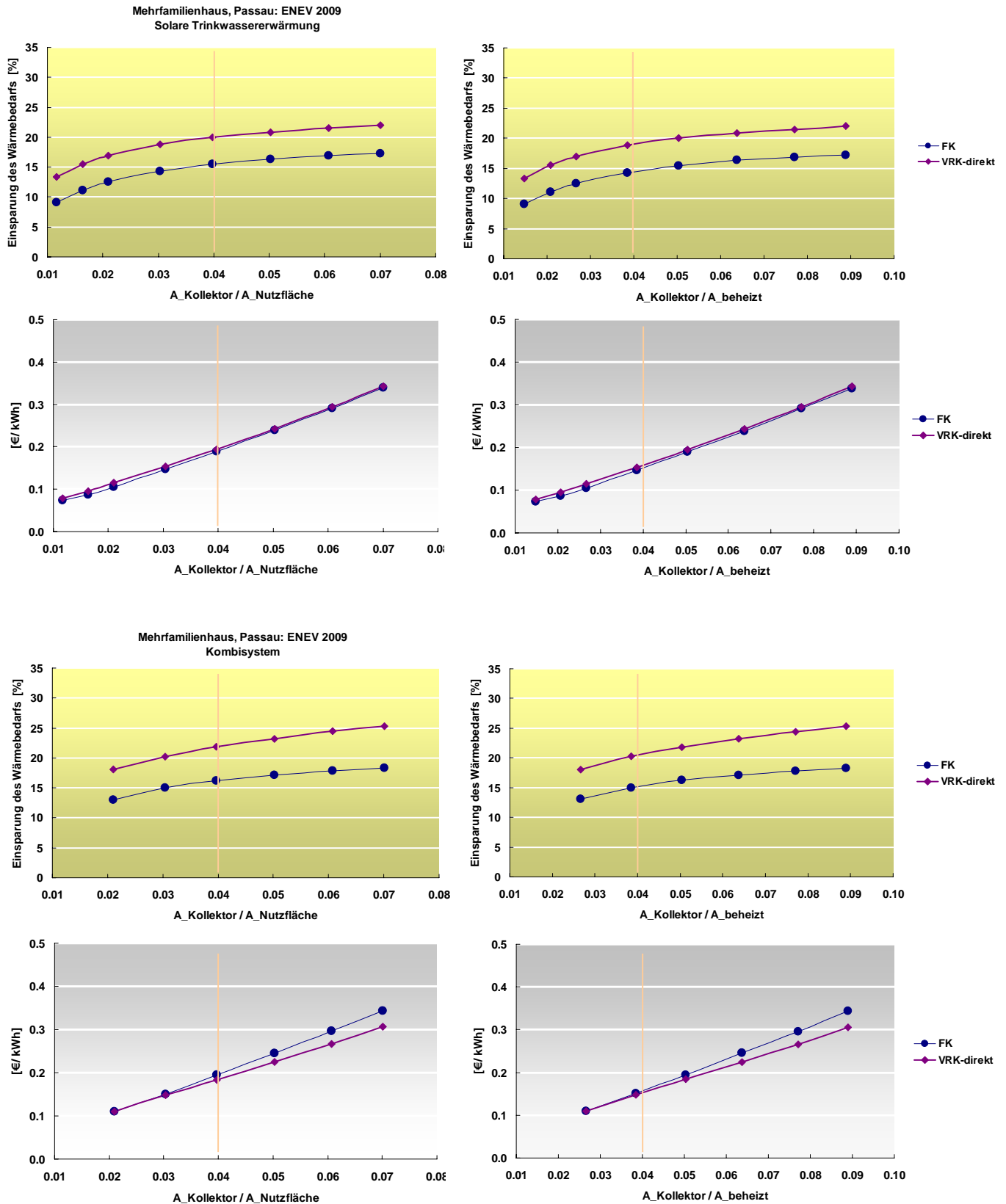
Ergänzend zu den vorherigen Darstellungen werden die Ergebnisse – Einsparung des Wärmebedarfs und Kosten der eingesparten Wärme für das Ein- und Mehrfamilienhaus – in diesem Abschnitt auf die beheizte Gebäudefläche  $A_{\text{beheizt}}$  statt auf die Nutzfläche  $A_N$  bezogen. Sowohl im Einfamilienhaus als auch im Mehrfamilienhaus liegt die beheizte Fläche ca. 20% unterhalb der Nutzfläche nach ENEV.

Der neue Flächenbezug ändert lediglich die Skala der Abzisse in den Darstellungen. Zur Verdeutlichung sind in den folgenden Abbildungen 5.17 und 5.18 die Ergebnisse mit dem Bezug auf die Nutzfläche und auf die beheizte Fläche nebeneinander gestellt.

Vorteilhaft ist, dass durch den neuen Flächenbezug bei der solaren Trinkwassererwärmung im Einfamilienhaus näher an den Rand der marktgängigen kleinen Systeme heranrückt.



**Abbildung 5.17** Einsparung des Wärmebedarfs und Kosten der eingesparten Wärme im Einfamilienhaus, Passau. Links: Bezug auf die Nutzfläche  $A_N$ ; rechts: Bezug auf die beheizte Fläche. Das Flächenverhältnis 0.04 ist jeweils durch die vertikale Linie markiert.



**Abbildung 5.18** Einsparung des Wärmebedarfs und Kosten der eingesparten Wärme im Mehrfamilienhaus, Passau. Links: Bezug auf die Nutzfläche  $A_N$ ; rechts: Bezug auf die beheizte Fläche. Das Flächenverhältnis 0.04 ist jeweils durch die vertikale Linie markiert.

## 6 Zusammenfassung

Die Anforderungen hinsichtlich der Primärenergieeinsparungen im Gebäudebereich können zu starken Veränderungen im Wärmebedarf zwischen den Gebäudearten und zwischen ENEV 2009 und 2012 führen, wenn beispielsweise durch zusätzliche Lüftungsgeräte der verbleibende Wärmebedarf weiter eingeschränkt werden muss. Die Nichtlinearität zwischen dem Wärmebedarf nach ENEV 2009 und 2012 und zwischen verschiedenen Gebäudetypen erschwert einfache, verallgemeinerte Aussagen über die Einsparung des Wärmebedarfs durch solarthermische Anlagen.

- Kleine solarthermische Systeme zur Trinkwassererwärmung sind effizient und im Vergleich zu allen anderen untersuchten Systemen am kostengünstigsten, erreichen aber unter den Randbedingungen der ENEV 2009 nicht die vorgesehene Einsparung im Wärmebedarf von 15%. Eine Vorgabe des Flächenverhältnisses  $A_K/A_N = 0.04$  könnte – entsprechend den durchschnittlichen Nutzflächen im Wohngebäudebereich – eine Marktverschiebung in Richtung größerer Systeme nach sich ziehen, die gerade noch energetisch günstig sind. Auch hier wird aber das Ziel einer Deckung von 15% des Wärmebedarfs durch solarthermische Anlagen für die ENEV 2009 nicht erreicht.
- Große solarthermische Systeme zur Trinkwassererwärmung sind im untersuchten Mehrfamilienhaus eher im kleineren Flächenbereich von  $A_K/A_N < 0.03$  wirtschaftlich attraktiv; die vorgegebene Einsparung im Wärmebedarf wird in dieser Auslegung aber in der ENEV 2009 nur mit hocheffizienten Kollektoren erreicht.
- Kleine Kombisysteme für den Einfamiliengebäudebereich sind wirtschaftlich für  $A_K/A_N > 0.06$  attraktiv, hier werden auch in der ENEV 2009 knapp 15% Einsparung des Wärmebedarfs bereits mit kostengünstiger Kollektortechnik erreicht. Die spezifischen Kosten des eingesparten Wärmebedarfs liegen geringfügig höher als bei den kleinen Systemen zur Trinkwasserbereitung. Der Unterschied liegt jedoch im Bereich der Unsicherheiten in der Kostenermittlung.
- Große Kombisysteme für Mehrfamilienhäuser verhalten sich in energetischer und wirtschaftlicher Hinsicht analog zu den Systemen zur Trinkwassererwärmung: das günstigste Flächenverhältnis liegt bei  $A_K/A_N < 0.03$ , max. 0.04. Die Einsparung im Wärmebedarf von 15% kann an sonnenigen Standorten knapp mit Flachkollektoren erreicht werden. Die Systeme erreichen vergleichbare spezifische Kosten wie große Systeme zur Trinkwassererwärmung.
- Im Nichtwohnbereich „Bürogebäude“ mit sommerlichem Kühlbedarf ist die Anwendung solarer Kühlung mit wärmegetriebenen Kälteprozessen und Heizungsunterstützung eine energetisch sinnvolle Methode, um das Kollektorfeld auch im Sommer gut auszunutzen. Allerdings liegen die spezifischen Kosten der Einsparung des Wärme- und Kältebedarfs derzeit noch über den Kosten in der Einsparung des Wärmebedarfs im Wohngebäudebereich. Die Höhe der erreichten Einsparungen ist stark von Gebäudetechnischen Randbedingungen (gekühlter Flächenanteil, Kältetechnik, usw.) abhängig. Eine Flächenvorgabe von  $A_K/A_N \geq 0.04 \text{ m}^2/\text{m}^2$  ist hier wegen der Vielfalt der Einflussparameter nicht allgemein begründbar.

- Eine nur solarthermische Heizungsunterstützung mit den untersuchten Systemen ist nicht sinnvoll. Hierzu könnten unter Umständen preiswertere Systeme etwa auf Basis von Solarluftkollektortechnik herangezogen werden, die aber vermutlich nicht zu der gewünschten Einsparung im Wärmebedarf führen.

## 7 Schlussfolgerungen, Empfehlungen

Die Ergebnisse der Parameterstudie zeigen, dass unter den Randbedingungen der ENEC 2009 für die Anwendungen und Systeme insbesondere im Einfamiliengebäudebereich eine Einsparung von 15% des Wärmebedarfs mit einer spezifischen Kollektorfläche von 0.04 m<sup>2</sup> pro Flächeneinheit Nutzfläche nicht erreicht wird. Für die Randbedingungen der ENEC 2012 ist dagegen in nahezu allen untersuchten Fällen bereits eine spezifische Kollektorfläche von unterhalb 0.04 m<sup>2</sup> pro Flächeneinheit Nutzfläche für eine Deckung von mindestens 15% des Wärmebedarfs durch solarthermische Anlagen ausreichend.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass eine spezifische Kollektorfläche von 0.04 m<sup>2</sup> pro Flächeneinheit Nutzfläche einerseits vielfach nicht im Einklang mit den marktgängigen Systemen steht und andererseits nicht immer mit der wirtschaftlich günstigsten Lösung (definiert über die niedrigsten spezifischen Kosten zur Einsparung von nicht-regenerativ bereitgestellter Wärme) übereinstimmt.

Folgende Gesichtspunkte sollten nach unserer Einschätzung bei der Formulierung der endgültigen Vorgaben Berücksichtigung finden:

- Im Sinne des Ansatzes „Fordern und Fördern“ sollten solche Systeme als Mindestanforderung gefordert werden, die einerseits eine hohe technische Reife erlangt haben und andererseits wirtschaftlich die vergleichsweise günstigsten Werte erzielen. Dies ist heute für Anlagen zur Trinkwassererwärmung sowohl im EFH als auch im MFH und für Kombianlagen zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung im Wesentlichen im EFH und allenfalls mit Einschränkungen im MFH der Fall.
- Die Vorgaben sollten so gestaltet sein, dass sie weder zur Förderung noch zum Ausschluss bestimmter Systemtechnologien führen. So werden für eine gegebene Anwendung (z.B. Trinkwassererwärmung im EFH) die gleichen Einsparungen beispielsweise mit einer 6 m<sup>2</sup> großen Flachkollektoranlage und einer 4 m<sup>2</sup> großen Vakuumröhrenkollektoranlage erreicht, sofern ein entsprechend effizienter Vakuum-Röhrenkollektor ausgewählt wird.

Wir sehen verschiedene Ansätze für Modifikationen zur Vorgabe der Mindestkollektorfläche, die alternativ oder parallel Anwendung finden könnten, bei denen einerseits oben genannte Aspekte Berücksichtigung finden und die andererseits dennoch keine zu große Komplexität in der Durchführung bedeuten.

- eine generelle Absenkung des Flächenschlüssels von 0.04 auf beispielsweise 0.03. Damit wird bei Systemen der solaren Trinkwassererwärmung eine Überdimensionierung vermieden.

- Eine Differenzierung zwischen Systemen zur solaren Trinkwasserbereitung (Mindestforderung) und Kombisystemen. Für erstere könnte ein Flächenschlüssel von mindestens 0.03 – wie oben vorgeschlagen – gelten, für Kombisysteme  $\geq 0.04$ . Damit wäre für Kombi-Anlagen weiterhin eine Förderung durch das MAP möglich.
- Eine Differenzierung zwischen Systemen in EFH und MFH. Für MFH könnte der Flächenschlüssel niedriger gewählt werden (z.B. 0.025) als im EFH, da auf Grund des niedrigeren flächenbezogenen Heizwärmebedarfs bei gleichem Gebäudestandard die gleiche Einsparung wie im EFH mit kleinerer spezifischer Kollektorfläche erreicht wird.
- Bezugswchsel (a): die Kollektorfläche wird bei Wohngebäuden nicht mehr auf  $A_N$  bezogen, sondern auf die beheizte Grundfläche. In den betrachteten Gebäuden würde dies zu ca. 20% geringeren Kollektorflächen führen. In diesem Fall könnte der „alte“ Wert von 0.04 für EFH bestehen bleiben und eine Absenkung wäre nur für MFH erforderlich.
- Bezugswchsel (b): die Kollektorfläche wird auf den Wärmebedarf des Gebäudes bezogen (Kapitel 5.3.5). Für die Mehrheit der untersuchten Konfigurationen lässt sich hier eine vorteilhafte Anwendung im normierten Flächenbereich zwischen 0.0006 und 0.001  $\text{m}^2/(\text{kWh/a})$  erkennen; allerdings liegt der optimale Bereich für kleine Systeme zur solaren Trinkwasserbereitung etwa bei der Hälfte dieser Werte. Hierbei ist außerdem zu bedenken, dass die Größe weniger einfach handhabbar und kommunizierbar ist als ein Flächenschlüssel.

In Nichtwohngebäudebereich ist eine allgemeine Empfehlung zum Einsatz solarthermischer Systeme schwierig. In Bürogebäuden ohne Küchenbereich ist die solare Trinkwassererwärmung durch geringe Trinkwarmwassernutzung (häufig dezentral aufbereitet) wenig attraktiv; ebenso sind Solaranlagen zur ausschließlichen Heizungsunterstützung nicht angemessen. Eine Ausnahme sind eventuell preiswerte Solarluftkollektorsysteme zur Heizungsunterstützung, die in dieser Studie nicht betrachtet wurden.

Für gewerbliche Gebäude mit Kühlbedarf kann die solarthermische Kühlung und Klimatisierung zusammen mit Heizungsunterstützung zu einer signifikanten Einsparung von Strom und Brennstoffen führen. Zielvorgaben in dieser Hinsicht sind jedoch schwierig, weil

1. die entsprechenden Systemtechniken noch nicht allgemeine Marktreife erlangt haben und auch unter Kostenbetrachtungen noch Gegenstand von Förderprogrammen sind;
2. der Anteil der gekühlten Gebäudefläche häufig nicht mit den definierten Bezugsflächen zur Gebäudebeheizung übereinstimmt und daher zusätzliche Parameter für Einsparvorgaben berücksichtigt werden müssen.

Eine Vorgabe für die Anwendung solarthermischer Systeme erscheint im Nichtwohngebäudebereich sinnvoll für Anwendungen mit erhöhtem Warmwasserbedarf und mit Prozesswärmebedarf (auf niedrigem Temperaturniveau  $< 100^\circ\text{C}$ ). Die Ergebnisse der solaren Warmwasserbereitung für die Sportstätte (mit den Randannahmen Nutzung durch Erwachsenensport / Vereinsport) weisen in diese Richtung, auch wenn die angestrebte Einsparung im Wärmebedarf nach den Vorgaben zur Berechnung der Gebäudeheizlast in diesem Beispiel nicht erreicht werden.

Der Einsatz solarthermischer Systeme erscheint zusammenfassend im Nichtwohngebäudebereich sinnvoll für Anwendungen mit erhöhtem Warmwasserbedarf und mit Prozeßwärmebedarf (auf niedrigem Temperaturniveau < 100°C) sowie Anwendungen mit Heiz- und Kühlbedarf.

Unsere zusammenfassende Empfehlung für Nichtwohngebäude: Im Sinne einer einfachen Durchführbarkeit sollte bei Nichtwohngebäuden der gleiche Flächenschlüssel wie bei MFH zur Anwendung gelangen. Da in der Planung neuer Nichtwohngebäude in der Regel ein Fachplaner eingebunden ist, ist die Installation einer „unsinnigen“ Solarthermie-Anlage unwahrscheinlich und es wird zur Einhaltung der Vorgaben des EEWG die technisch sinnvollste Lösung ermittelt. Beispielsweise wird in einem Bürogebäude ohne wesentlichen Trinkwarmwasserbedarf und ohne nachweislichen sommerlichen Kühlbedarf Solarthermie nicht der Weg der Wahl zur Erfüllung des EEWG darstellen. Auf Grund der geringen Marktdurchdringung sollte sicher gestellt werden, dass Anlagen, die über eine reine Brauchwassererwärmung hinaus gehen – also z.B. Anlagen zum solaren Heizen und Kühlen – auch zukünftig durch das MAP förderfähig bleiben.

## Literatur

[Warentest 03/2008]

Stiftung Warentest – Test: Solaranlagen für Warmwasser. Ausgabe März 2008, S 70 ff.

[DWD 2004]

J. Christoffer et al., Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a. Main, 2004. ISBN 3-88148-398-5

[Jordan 2001]

U. Jordan, K. Vajen, Realistic Domestic Hot-Water Profiles in Different Time Scales. Methodische Beschreibung zur Generierung von Warmwasser-Zapfprofilen, durchgeführt innerhalb des Task 26: Solar Combisystems der Internationalen Energieagentur IEA im Rahmen des Solar Heating & Cooling Programme (SHC), 2006. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/trnlib/iea-shc-task26/iea-shc-task26-load-profiles-description-jordan.pdf> (Sichtdatum: März 2008)

[DHWcalc 2003]

U. Jordan, K. Vajen, Handbuch DHWcalc – Werkzeug zur Generierung von Trinkwasser-Zapfprofilen auf statistischer Basis. Version 1.10, 2003. Unter der unten angegebenen Internet-Adresse ist auch das Generierungsprogramm erhältlich. [www.uni-kassel.de/~solar](http://www.uni-kassel.de/~solar) (Sichtdatum: März 2008)

[TRNSYS]

TRNSYS – A Transient System Simulation Program. Entwickelt am Solar Energy Laboratory SEL, Universität Wisconsin, Madison, USA. Dieses Programm wird weltweit zur Gebäudesimulation und zur Simulation hydraulischer Systeme, z.B. solarthermischer Systeme, genutzt. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>; In Deutschland: [www.transsolar.com](http://www.transsolar.com) (Sichtdatum: März 2008)

[SWW 2/08]

Marktübersicht der Systemanbieter für Paketsysteme (Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung) in: Sonne Wind & Wärme, Ausgabe 2/2008, S.78/79. BVA Bielefelder Verlag GmbH & Co.KG.

[VDI 6002 09/2004]

Blatt 1: VDI-Richtlinie Solar Trinkwassererwärmung – Allgemeine Grundlagen, Systemtechnik und Anwendung im Wohnungsbau. Ausgabe September 2004.

[Solarthermie 2000plus]

Förderung von Pilot- und Demonstrationsanlagen im Bereich großer solarthermischer Systeme. Fördermaßnahme des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung. Aktuelle Informationen: [www.solarthermie2000plus.de](http://www.solarthermie2000plus.de) (Sichtdatum: April 2008)

[DGS Leitfaden Solarthermie]

Leitfaden Solarthermische Anlagen. 7. Auflage. Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.

[IEA SHC Task 26]

Task 26: Solar Combisystems. Durchgeführt im Rahmen des Solar Heating & Cooling Programmes der Internationalen Energieagentur IEA. Operating Agent: Werner Weiss, Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energien - AEE, Gleisdorf, Österreich. Laufzeit: 1998 bis 2002. [www.iea-shc.org/task26](http://www.iea-shc.org/task26) (Sichtdatum: März 2008)

[SWT/zfS 11/2007]

A. Schenke, H. Drück (SWT - Solar und Wärmetechnik, Stuttgart) und R. Croy, H. P. Wirth (zfS – Rationelle Energietechnik GmbH, Hilden). Verbundprojekt: Systemuntersuchung großer solarthermischer Anlagen – Analyse und Evaluierung großer Kombianlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung. Abschlussbericht zum BMU Vorhaben, Förderkennzeichen 0329268B. Teil 1 und Teil 2, November 2007.

[Nitsch Leitstudie 2007]

J. Nitsch: Leitstudie 2007 „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“, Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und reaktorsicherheit (BMU), Februar 2007

[Destatis 2008]

Statistisches Bundesamt, Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis Februar 2008

[U. Eicker 2006]

Ursula Eicker: Entwicklungstendenzen und Wirtschaftlichkeit solarthermischer Kühlung. Tagungsband Viertes Symposium „Solares Kühlen in der Praxis“, HfT Stuttgart, 2006

[Henning 2007]

Hans-Martin Henning: Solar assisted air-conditioning of buildings – an overview. Applied Thermal Engineering Vol. 27 (2007), 1734-1749.

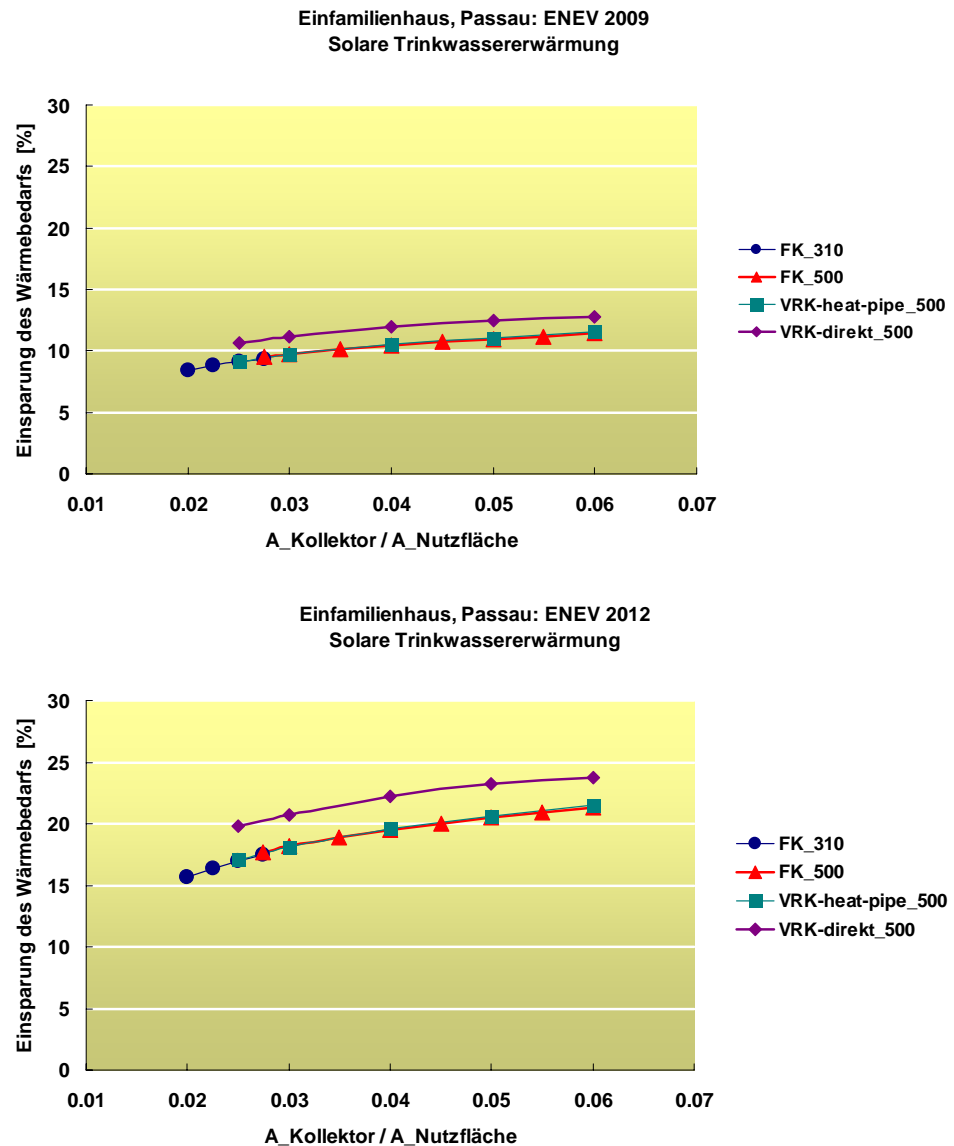
## **ANHÄNGE**

Literaturverweise in den Anhängen sind im Literaturverzeichnis des Hauptteils enthalten.

## A1

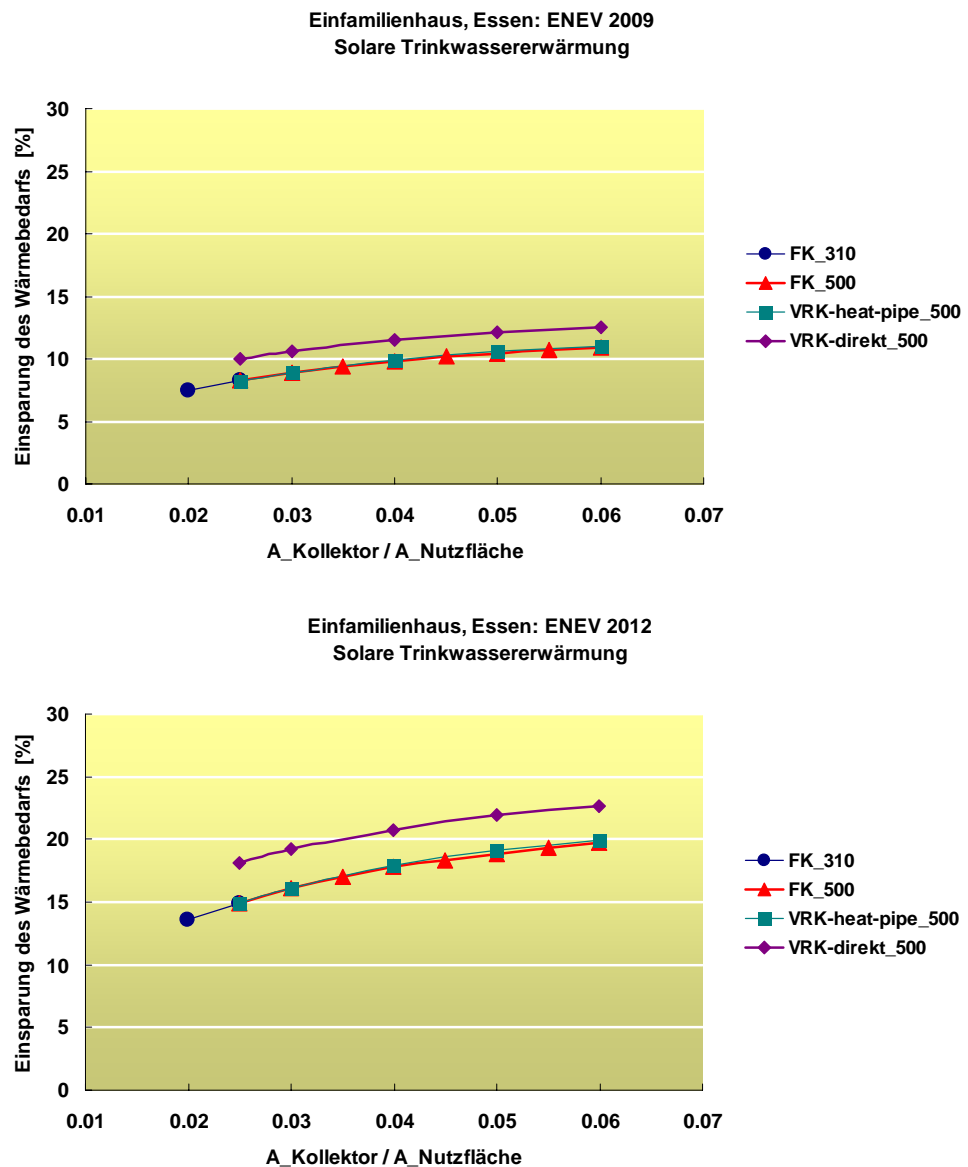
## Ergänzungen zu den Ergebnissen der Parameterstudie

## A1.1 Einfamilienhaus



**Abbildung A1.1** Einfamilienhaus, **Passau**, ENEV 2009 (oben) und 2012 (unten): Anlage zur solaren Trinkwassererwärmung. Gezeigt ist die Einsparung des Wärmebedarfs als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_N$ . Die verschiedenen Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:

FK_310	Flachkollektor mit Trinkwasserspeicher 310 Liter
FK_500	Flachkollektor mit Trinkwasserspeicher 500 Liter
VRK_heat-pipe_500	Vakuurröhren-Kollektor (heat-pipe-Prinzip) mit 500 Liter Trinkwasserspeicher
VRK_direkt_500	Vakuurröhren-Kollektor (direkt durchströmt) mit 500 Liter Trinkwasserspeicher

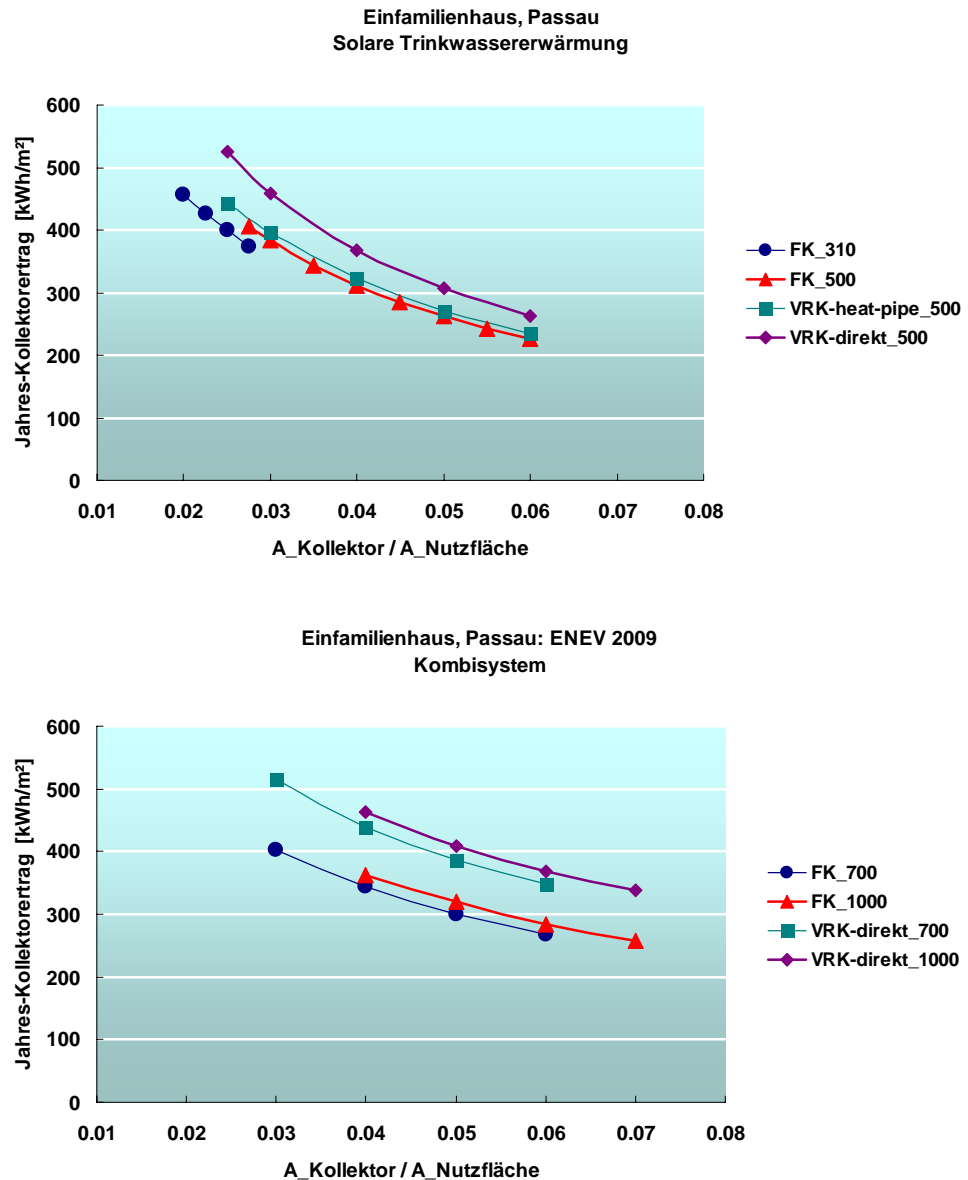


**Abbildung A1.2** Einfamilienhaus, **Essen**, ENEV 2009 (oben) und 2012 (unten): Anlage zur solaren Trinkwassererwärmung. Gezeigt ist die Einsparung des Wärmebedarfs als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_N$ . Die verschiedenen Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:

FK_310	Flachkollektor mit Trinkwasserspeicher 310 Liter
FK_500	Flachkollektor mit Trinkwasserspeicher 500 Liter
VRK_heat-pipe_500	Vakuurröhren-Kollektor (heat-pipe-Prinzip) mit 500 Liter Trinkwasserspeicher
VRK_direkt_500	Vakuurröhren-Kollektor (direkt durchströmt) mit 500 Liter Trinkwasserspeicher





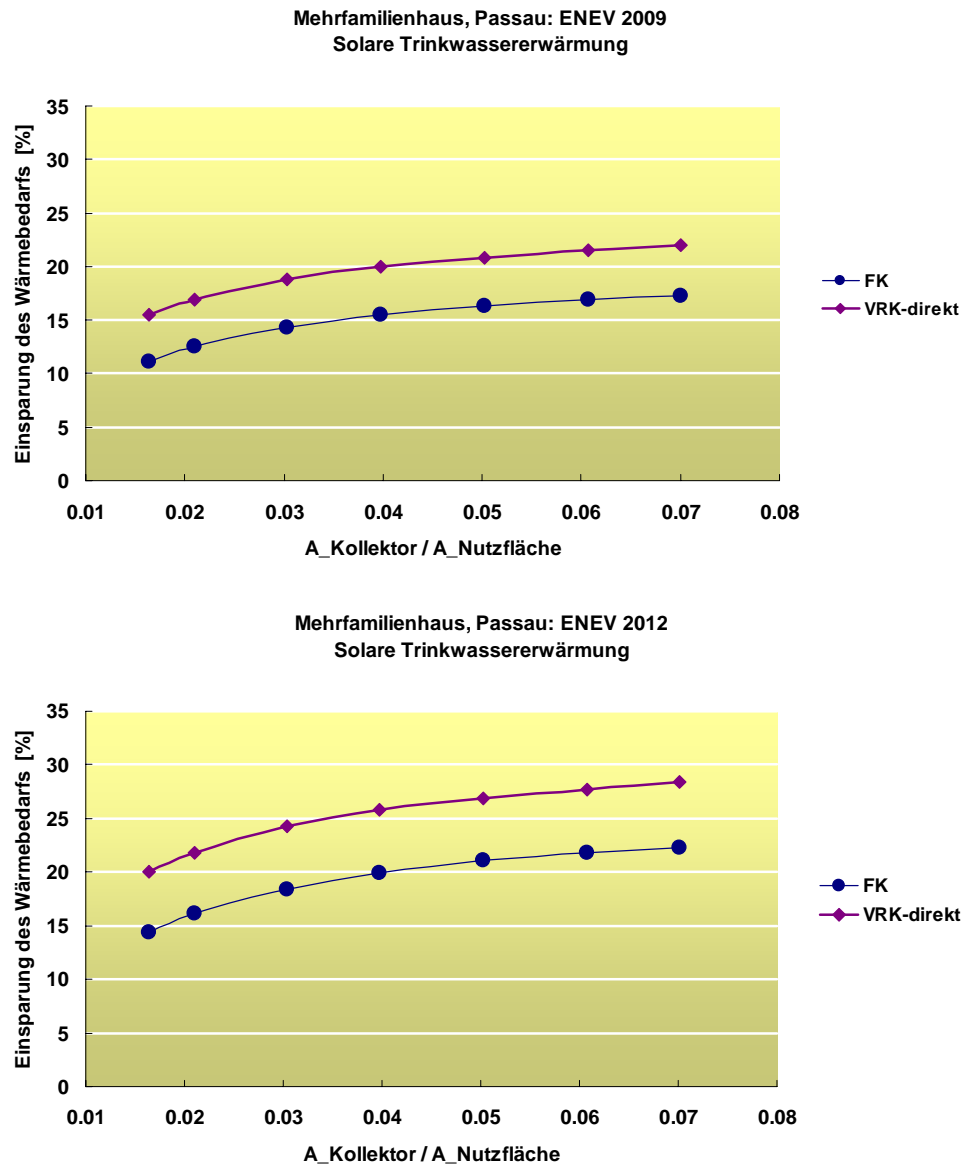


**Abbildung A1.4** Einfamilienhaus, Passau. Jahreskollektorbeitrag pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_N$ . Die obere Abbildung zeigt die spezifischen Erträge für die Nutzungsart solare Trinkwassererwärmung, unten sind die Kollektorbeiträge für das Kombisystem dargestellt. Die verschiedenen Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:

- FK\_xxx Flachkollektor mit xxx Liter Speichervolumen
- VRK\_heat-pipe\_xxx Vakuumröhren-Kollektor (heat-pipe-Prinzip) mit xxx Liter Volumen des solar erwärmten Speichers
- VRK\_direkt\_xxx Vakuumröhren-Kollektor (direkt durchströmt) mit xxx Liter Volumen des solar erwärmten Speichers

Insbesondere bei höheren Flächenverhältnissen zeigt sich der zusätzliche Vorteil bei dem Kombisystem. Der Kollektorbeitrag der Variante FK\_1000 liegt bei  $A_K/A_N = 0.04$  um knapp 17% oberhalb des Ertrages der Variante FK\_500 für die Trinkwassererwärmung für das gleiche Flächenverhältnis. Wegen der unterschiedlichen Systemtechniken für die beiden Nutzungsarten muss zusätzlich auf die Wirtschaftlichkeitsabschätzung verwiesen werden.

## A1.2 Mehrfamilienhaus



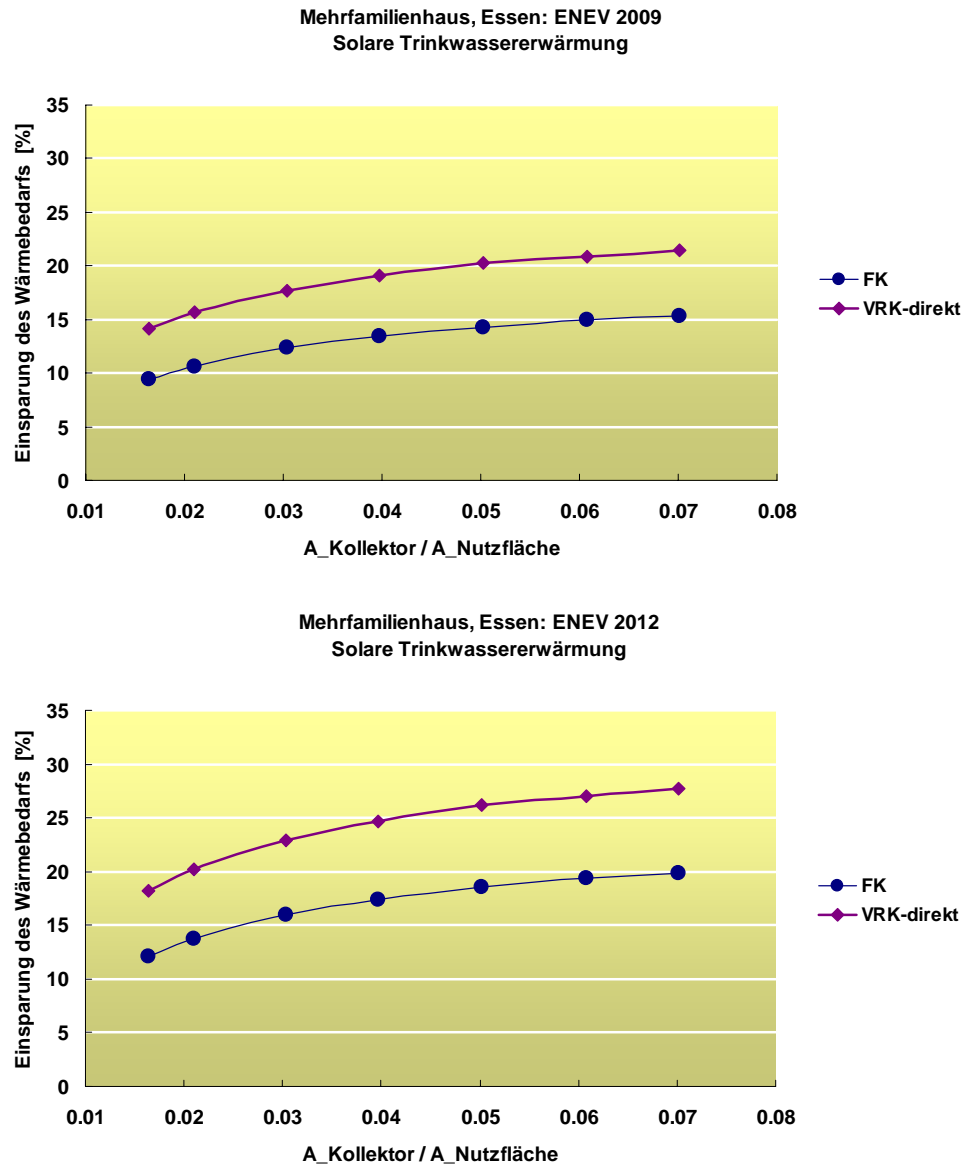
**Abbildung A1.5** Mehrfamilienhaus, **Passau**, ENEV 2009 (oben) und 2012 (unten):

Anlage zur solaren Trinkwassererwärmung. Gezeigt ist die Einsparung des Wärmebedarfs als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_N$ . Die verschiedenen Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:

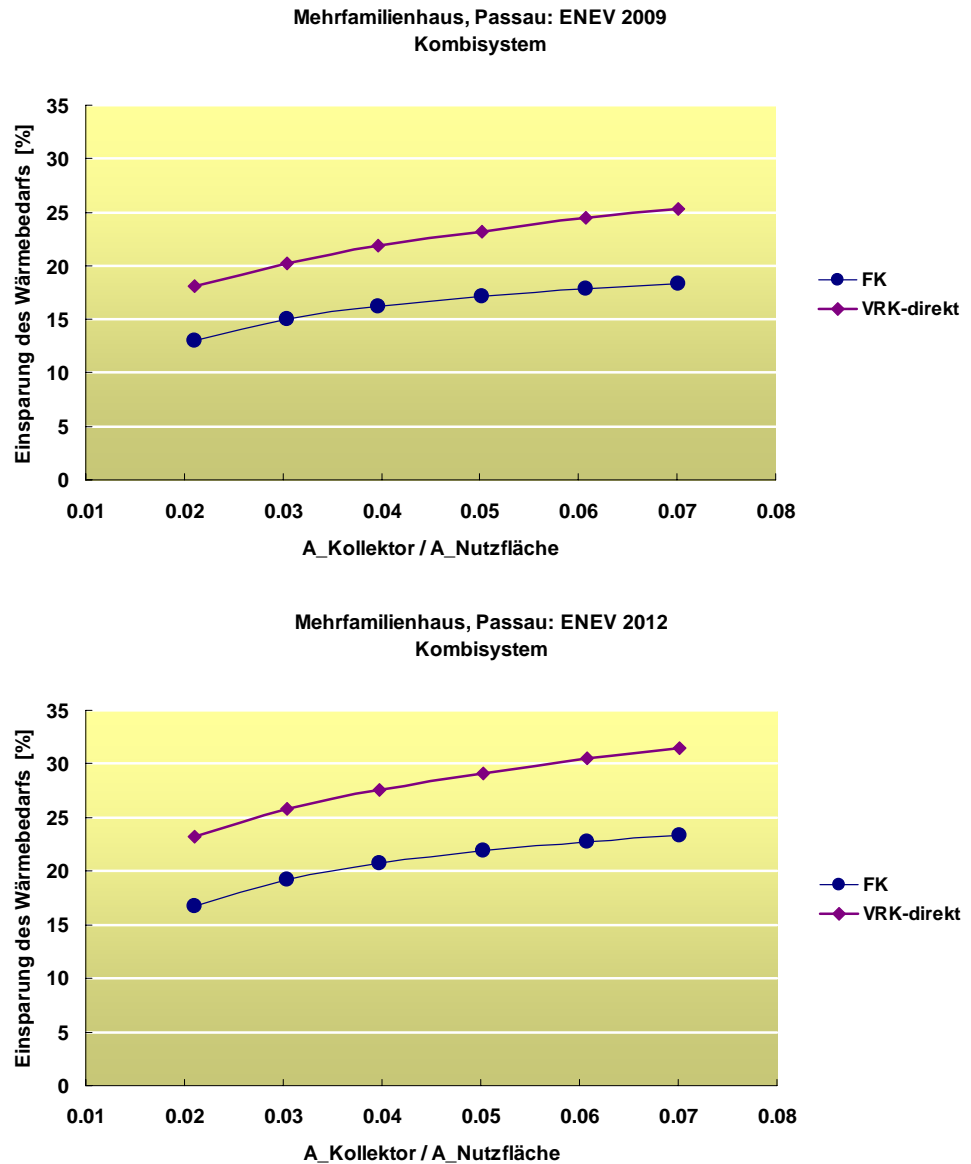
FK                                      Flachkollektor

VRK\_direkt                            Vakuumröhren-Kollektor (direkt durchströmt).

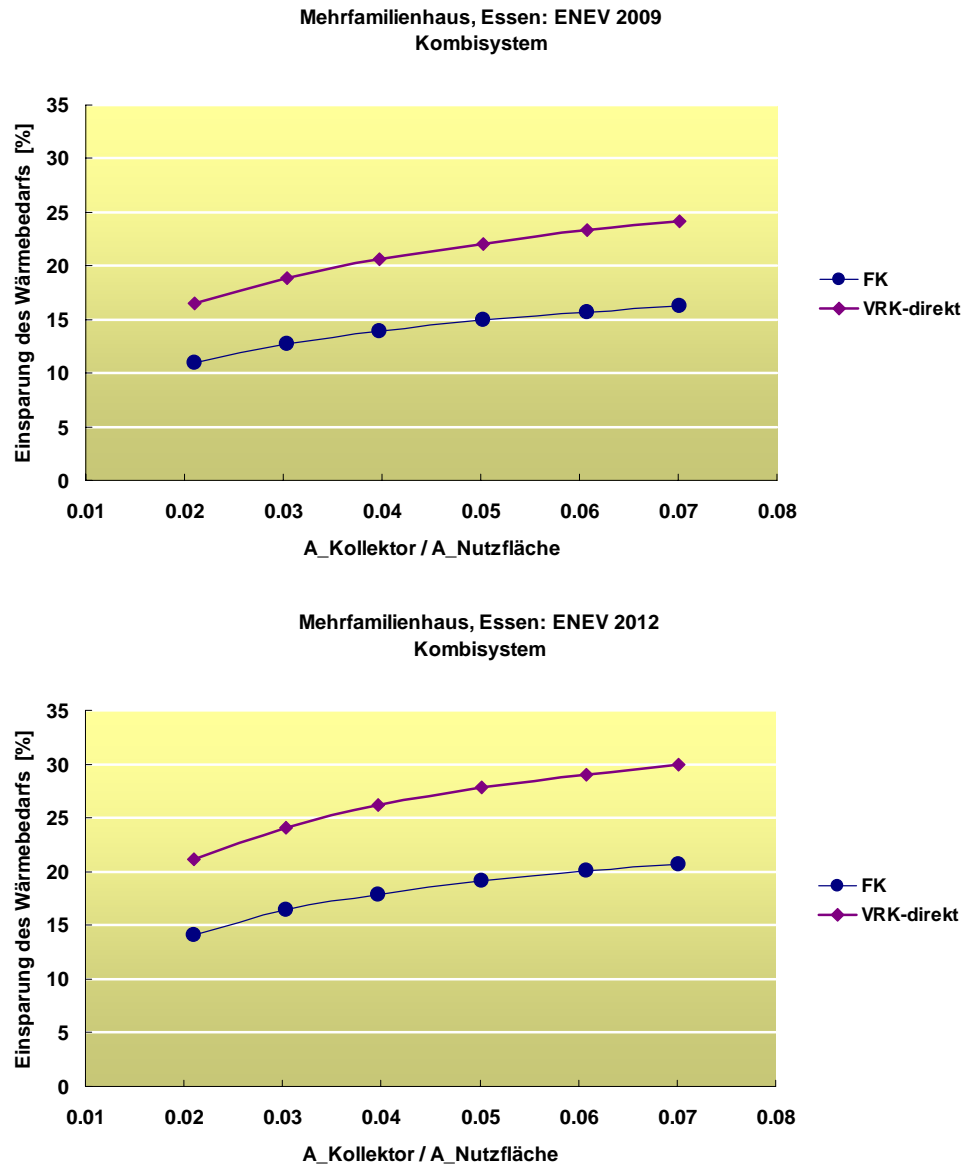
Das Volumen des solaren Pufferspeichers steigt linear mit der Kollektorfläche (s. Anhang A5).



**Abbildung A1.6** Mehrfamilienhaus, **Essen**, ENEV 2009 (oben) und 2012 (unten): Anlage zur solaren Trinkwassererwärmung. Gezeigt ist die Einsparung des Wärmebedarfs als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_N$ . Die verschiedenen Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:  
 FK Flachkollektor  
 VRK\_direkt Vakuumröhren-Kollektor (direktdurchströmt).  
 Das Volumen des solaren Pufferspeichers steigt linear mit der Kollektorfläche (s. Anhang A5).



**Abbildung A1.7** Mehrfamilienhaus, **Passau**, ENEV 2009 (oben) und 2012 (unten):  
Kombisystem. Gezeigt ist die Einsparung des Wärmebedarfs als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_N$ . Die verschiedenen Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:  
FK                                      Flachkollektor  
VRK\_direkt                              Vakuumröhren-Kollektor (direkt durchströmt).  
Das Volumen des solaren Pufferspeichers steigt linear mit der Kollektorfläche (s. Anhang A5).

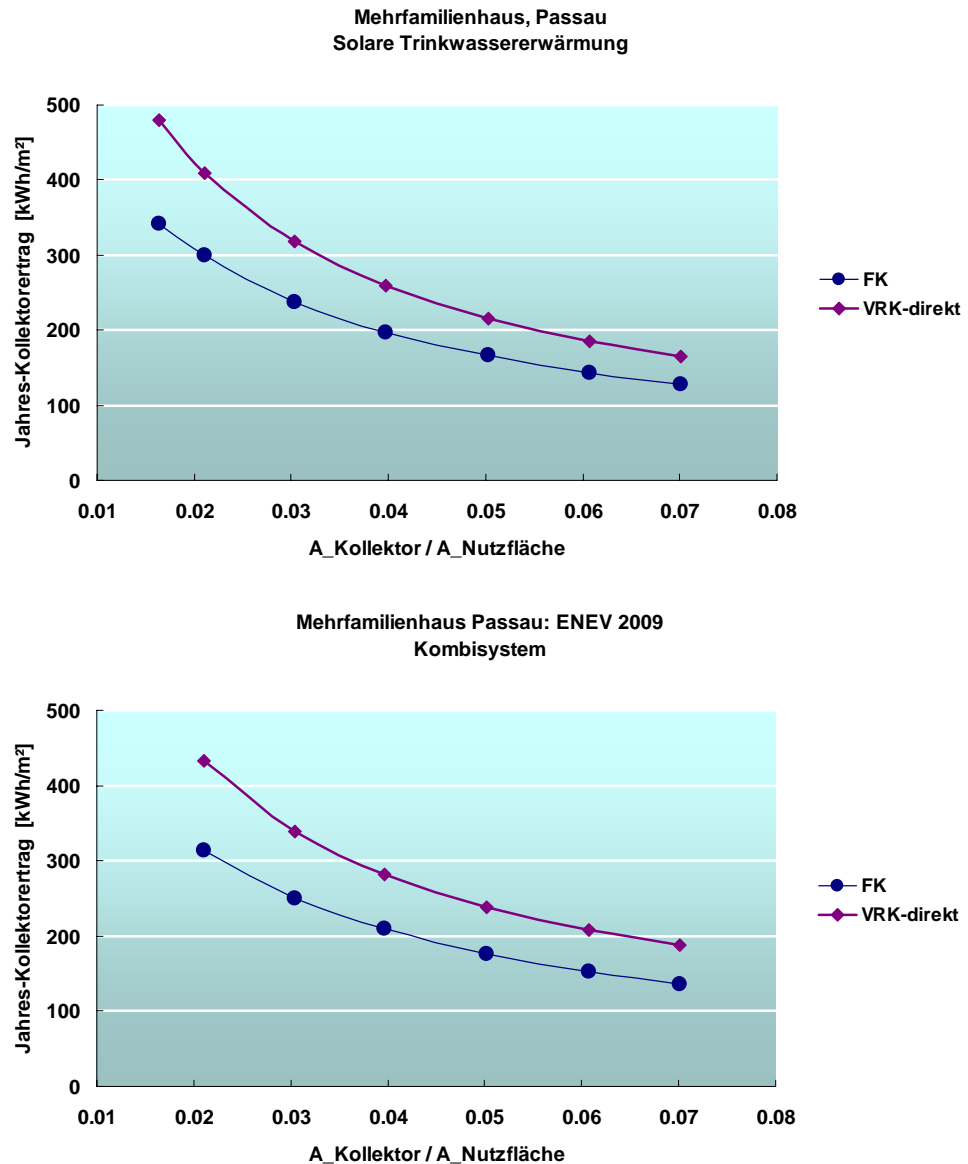


**Abbildung A1.8** Mehrfamilienhaus, **Essen**, ENEV 2009 (oben) und 2012 (unten): Kombisystem. Gezeigt ist die Einsparung des Wärmebedarfs als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_N$ . Die verschiedenen Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:

FK                                      Flachkollektor

VRK\_direkt                              Vakuumröhren-Kollektor (direkt durchströmt).

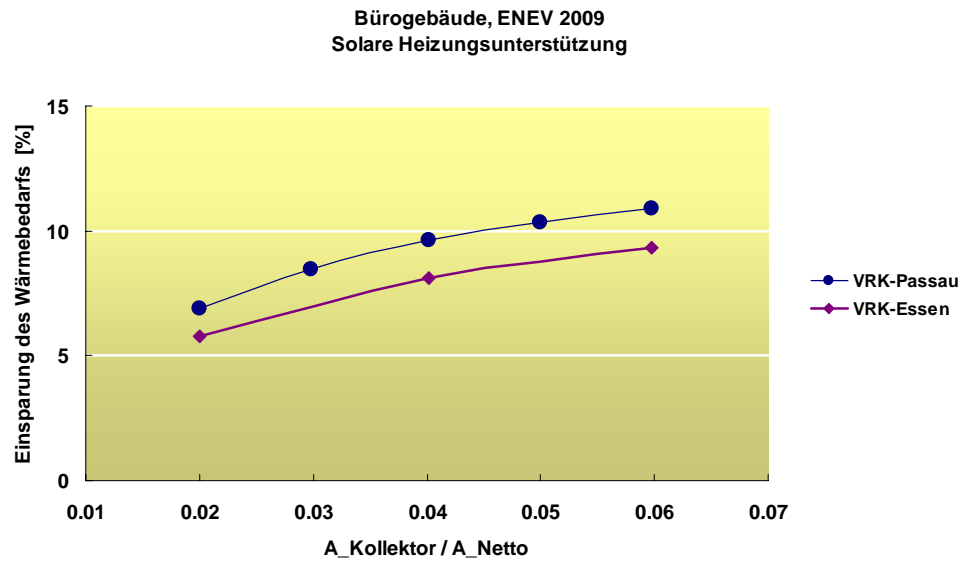
Das Volumen des solaren Pufferspeichers steigt linear mit der Kollektorfläche (s. Anhang A5).



**Abbildung A1.9** Mehrfamilienhaus, Passau. Jahreskollektorertrag pro  $\text{m}^2$  Kollektorfläche als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_N$ . Die obere Abbildung zeigt die spezifischen Erträge für die Nutzungsart solare Trinkwassererwärmung, unten sind die Kollektorerträge für das Kombisystem dargestellt. Die verschiedenen Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:  
 FK                                      Flachkollektor  
 VRK\_direkt                              Vakuumröhren-Kollektor (direkt durchströmt)

Zwischen beiden Anwendungen sind die Unterschiede im Kollektorertrag nicht so stark ausgeprägt wie im Vergleich der Nutzungen für das Einfamilienhaus. Bei einem Flächenverhältnis von 0.04 erbringt der Vakuumröhren-Kollektor einen ca. 8.5% höheren Ertrag im Kombisystem als nur zur Nutzung der Trinkwassererwärmung. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass bei dem gewählten Systemaufbau zwischen Trinkwassererwärmung und Kombisystem kein gravierender technischer Unterschied besteht (vergl. Anhang A5.2) und die Erweiterung zum Kombisystem daher keine hohen zusätzlichen Kosten durch bewirkt.

### A1.3 Bürogebäude



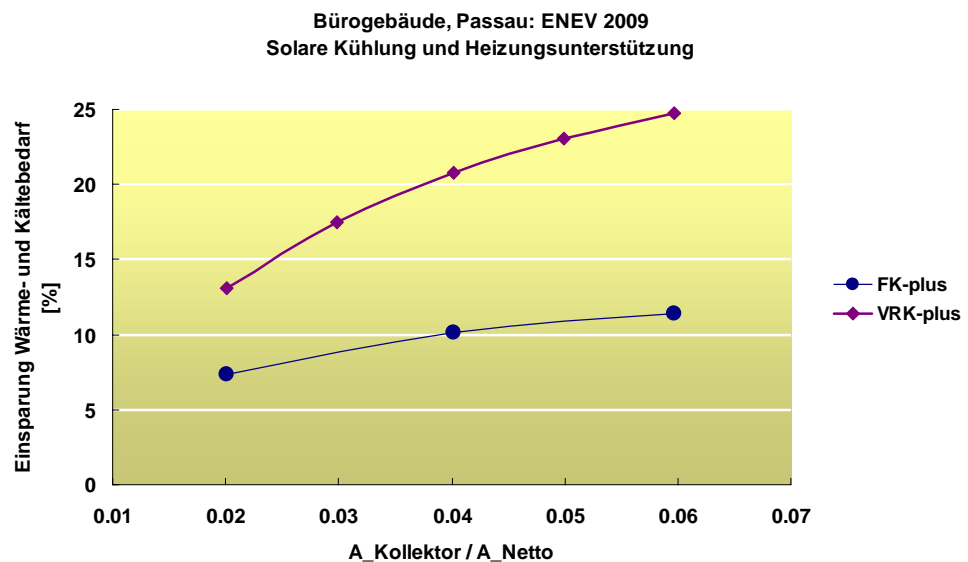
**Abbildung A1.10** Solare Heizungsunterstützung im Bürogebäude, **Passau** und **Essen**, ENEV 2009:

Gezeigt ist die Einsparung des Wärmebedarfs als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_{\text{Netto}}$ . Anlagenkonfigurationen:

VRK\_direkt Vakuumpfähren-Kollektor (direktdurchströmt).

Bereits hier ist die Nutzung des Kollektorsystems sehr ungünstig; die Ergebnisse für ein System mit Flachkollektoren sind daher nicht mehr angeführt.

Das Volumen des solaren Pufferspeichers steigt linear mit der Kollektorfläche (s. Anhang A5).



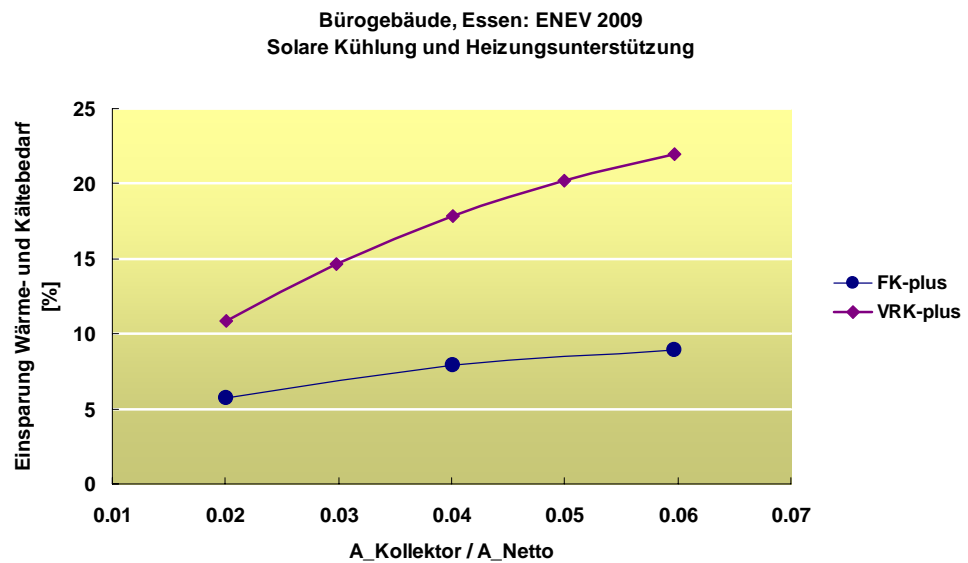
**Abbildung A1.11** Solare Kühlung und Heizungsunterstützung im Bürogebäude, **Passau**, ENEV 2009:

Gezeigt ist die Einsparung des Wärme- und Kältebedarfs als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_{\text{Netto}}$ . Anlagenkonfigurationen:

FK\_plus Flachkollektor, verringerte Wärmeverluste

VRK\_plus Vakuumpfähren-Kollektor (direktdurchströmt).

Das Volumen des solaren Pufferspeichers steigt linear mit der Kollektorfläche (s. Anhang A5).



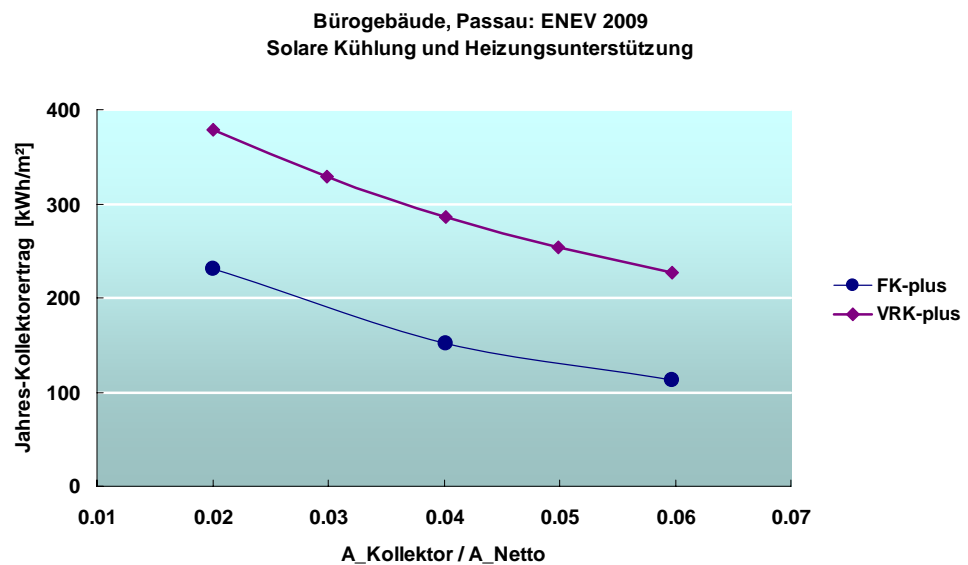
**Abbildung A1.12** Solare Kühlung und Heizungsunterstützung im Bürogebäude, Essen, ENEV 2009:

Gezeigt ist die Einsparung des Wärme- und Kältebedarfs als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_{\text{Netto}}$ . Anlagenkonfigurationen:

FK\_plus                    Flachkollektor, verringerte Wärmeverluste

VRK\_plus                 Vakuumröhren-Kollektor (direktdurchströmt).

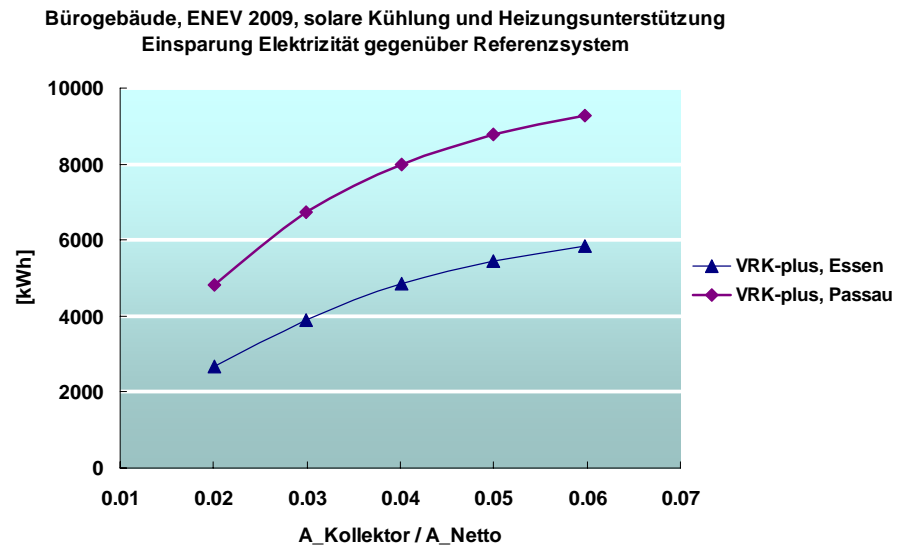
Das Volumen des solaren Pufferspeichers steigt linear mit der Kollektorfläche (s. Anhang A5).



**Abbildung A1.13** Bürogebäude, Passau. Jahreskollektorertrag pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_{\text{Netto}}$ . Die Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:

FK\_plus                    Flachkollektor, verringerte Wärmeverluste

VRK\_plus                 Vakuumröhren-Kollektor (direktdurchströmt)



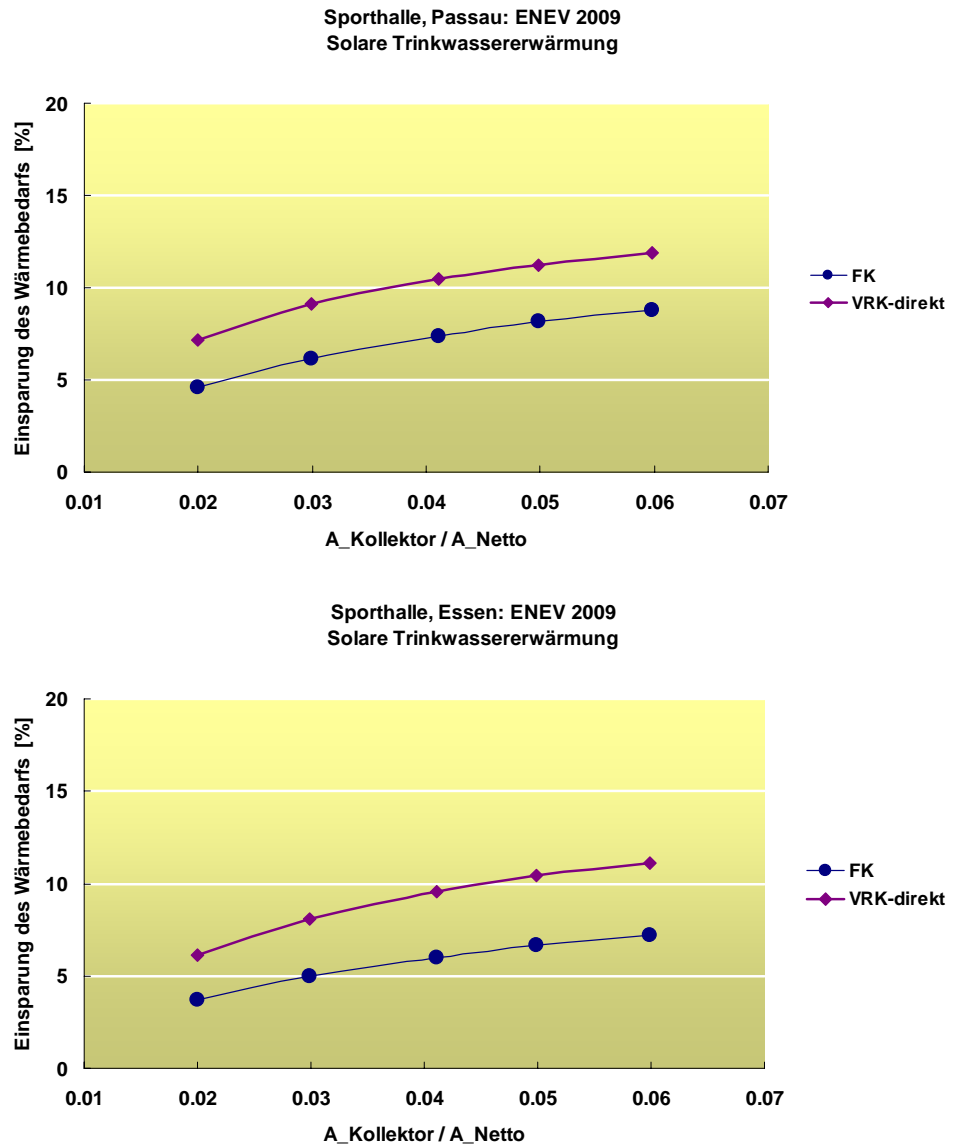
**Abbildung A1.14** Bürogebäude, Passau. Jährliche Elektrizitätseinsparung der solaren Kühlung und Heizungsunterstützung als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_{\text{Netto}}$ . Die Stromeinsparung setzt sich zusammen aus Mehraufwand für Solarkreis-pumpen, Strombedarf für Antrieb und Rückkühlung der thermisch angetriebenen Kältemaschinen abzüglich der Stromeinsparung im Betrieb der Kompressionskältemaschine im Vergleich zum Referenzsystem.

Die Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:

FK_plus	Flachkollektor, verringerte Wärmeverluste
VRK_plus	Vakuumröhren-Kollektor (direkt durchströmt)

## A1.4 Sportstätte

Der Heizwärmebedarf für die Sportstätte wurde im Gegensatz zu den Wohngebäuden nur für die ENEV 2009 berechnet (s. Anhang A2).

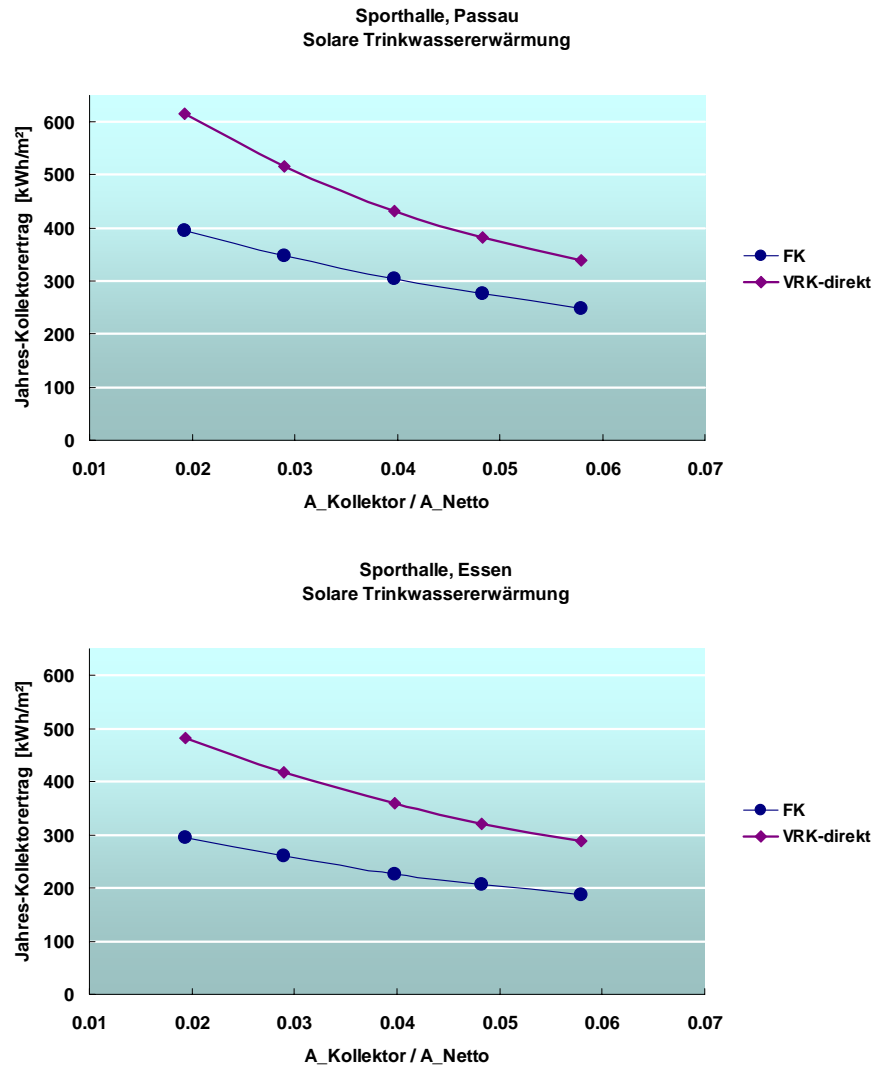


**Abbildung A1.15** Sporthalle, **Passau** (oben) und **Essen** (unten), jeweils ENEV2009: Einsparung des Wärmebedarfs als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_{Netto}$  für die solare Trinkwassererwärmung. Die Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:

FK Flachkollektor

VRK\_direkt Vakuumröhren-Kollektor (direktdurchströmt).

Das Volumen des solaren Pufferspeichers steigt linear mit der Kollektorfläche (s. Anhang A5).



**Abbildung A1.9** Sporthalle, Standorte Passau (oben) und Essen (unten). Jahreskollektorertrag pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche als Funktion des Flächenverhältnisses  $A_K/A_{\text{Netto}}$ . Die Kurven repräsentieren unterschiedliche Anlagenkonfigurationen:  
 FK Flachkollektor  
 VRK\_direkt Vakuumröhren-Kollektor (direktdurchströmt)

## A2 Modellgebäude

### A2.1 Einfamilienhaus

Modellvorlage: Solar-Nullenergiehaus in Emmendingen, Baden-Württemberg. Die beheizte Wohnfläche beträgt 160 m<sup>2</sup>, die Belegung wird mit vier Personen angenommen. Damit entspricht die Wohnfläche dem statistischen Mittel nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (Wohngebäude: 40 m<sup>2</sup> pro Person). Die Nutzfläche **A<sub>N</sub>** nach ENEV beträgt **200 m<sup>2</sup>**; dies ist die Bezugsgröße für die Darstellung der Ergebnisse. Als Heizsystem wird von Flächenheizsystemen ausgegangen; entsprechend niedrig ist die erforderliche Vorlauftemperatur im Heizkreis (40°C).

Weitere Gebäudedaten:

Umbautes Volumen:	626m <sup>3</sup>
A/V-Verhältnis:	0.75 1/m
Transmissionswärmeverlustkoeffizient H <sub>t</sub> '(2009):	0.34 W/m <sup>2</sup> K
Anlagenaufwandszahl ohne Solar (2009) e <sub>p</sub> :	1.43 (ohne WRG)
Transmissionswärmeverlustkoeffizient H <sub>t</sub> '(2012):	0.31 W/m <sup>2</sup> K
Anlagenaufwandszahl ohne Solar (2012) e <sub>p</sub> :	1.08 (WRG=80%)

Jährlicher Heizwärmebedarf aus dynamischer Gebäudesimulation:

#### Wetterdaten Passau

ENEV 2009	15023 kWh; entspricht 75.1 kWh/m <sup>2</sup>
ENEV 2012	6842 kWh; entspricht 34.2 kWh/m <sup>2</sup>

#### Wetterdaten Essen

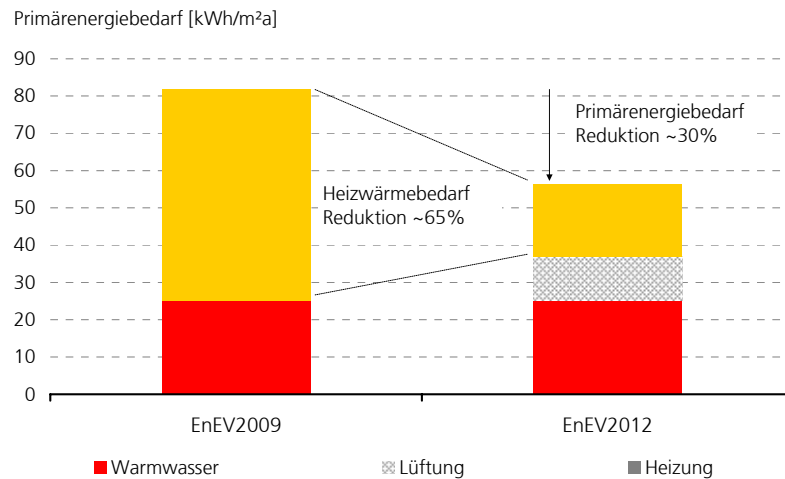
ENEV 2009	13540 kWh; entspricht 67.7 kWh/m <sup>2</sup>
ENEV 2012	6329 kWh; entspricht 31.6 kWh/m <sup>2</sup>



**Abbildung A2.1** Modellvorlage für das Einfamilienhaus: Solar-Nullenergiehaus Emmendingen (Baden-Württemberg).

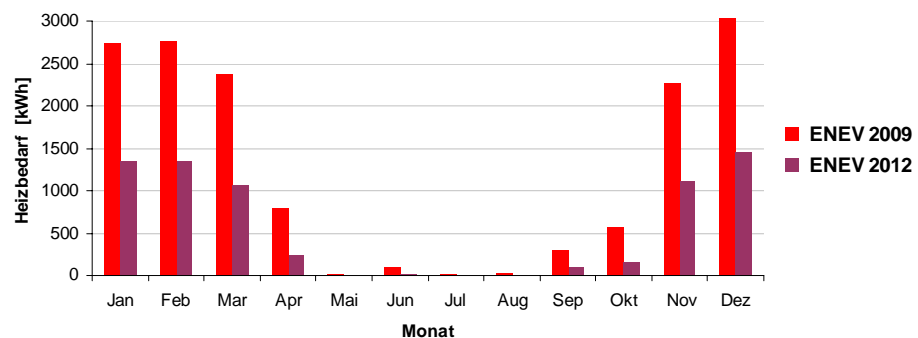
Abbildung A2.2 verdeutlicht die Ursache für die überproportionale Abnahme des Heizwärmebedarfs, verglichen mit den Anforderungen der ENEV 2009 und 2012. In beiden ENEV ist der Wärmeaufwand für die Warmwasserbereitung konstant geblieben, da der Warmwasserbedarf nicht modifiziert wird. Für die ENEV 2012 ist zusätzlich ein qualitativer Sprung in der Gebäude-

ausrüstung in Form eines Lüftungssystems mit Wärmerückgewinnung notwendig, da die Zielvorgabe der Primärenergieeinsparung nicht mehr ausschließlich mit Wärmedämmmaßnahmen sinnvoll erreicht werden kann. Beides, Primärenergieaufwand für den konstanten Warmwasserbedarf, und der Primärenergieaufwand für das Lüftungssystem, bedingen einen deutlich reduzierten Heizwärmebedarf.

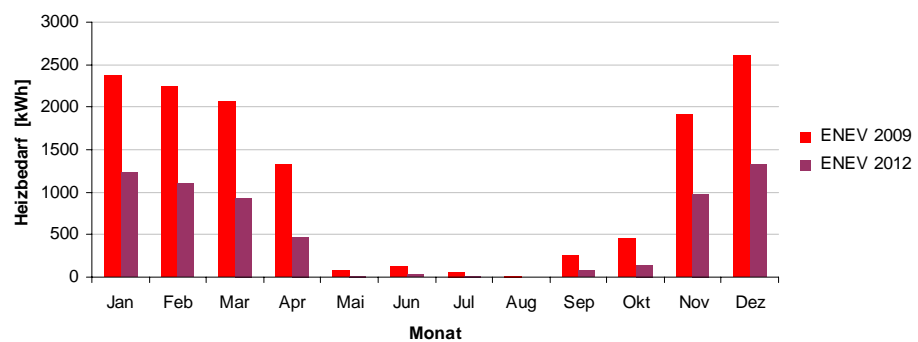


**Abbildung A2.2** Anteile des Primärenergieaufwandes für die Wärmeversorgung des Einfamilienhauses.

#### Einfamilienhaus, Passau

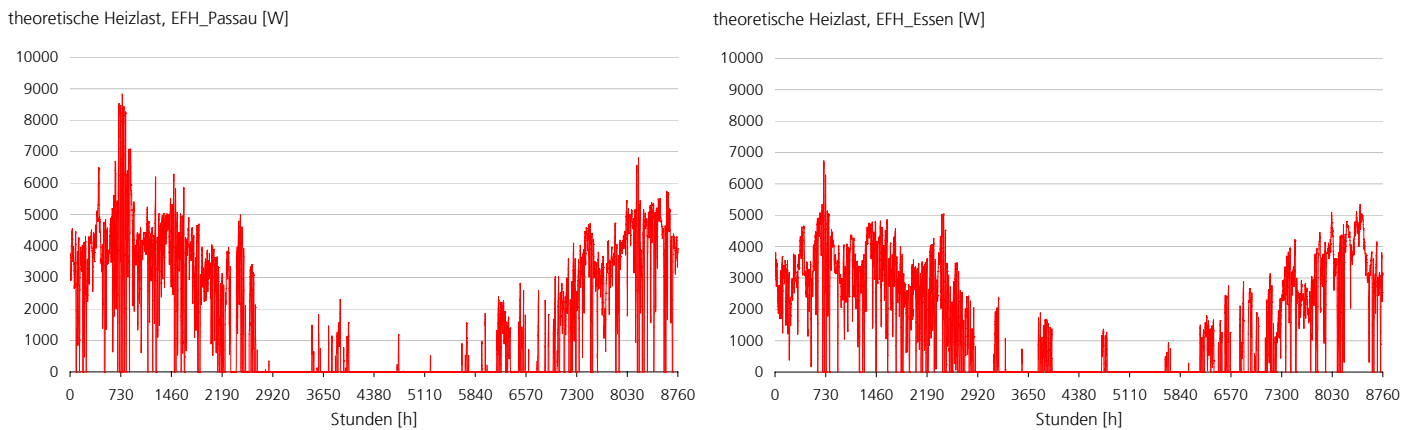


#### Einfamilienhaus, Essen

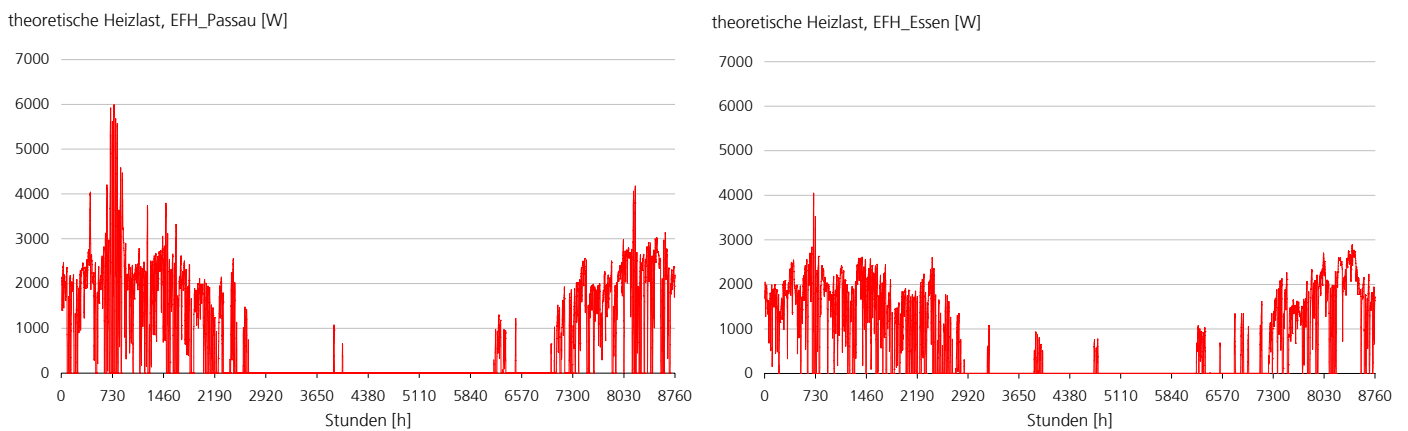


**Abbildung A2.3** Monatliche Heizlasten im Einfamilienhaus in Passau (oben) und Essen (unten); jeweils für die Annahmen in der ENEV 2009 und ENEV 2012.

Die monatlichen Heizlasten für beide Standorte sind in Abbildung A2.3 enthalten; die Abbildungen A2.4 und A2.5 zeigen die Jahreszeitreihe der Heizlast für die ENEV 2009 und ENEV 2012, jeweils für die Standorte Passau und Essen.



**Abbildung A2.4** Zeitreihe der Heizlast für das Modellgebäude Einfamilienhaus, berechnet für die **ENEV 2009**. Links: Standort Passau, rechts: Standort Essen.



**Abbildung A2.5** Zeitreihe der Heizlast für das Modellgebäude Einfamilienhaus, berechnet für die **ENEV 2012**. Links: Standort Passau, rechts: Standort Essen.

## A2.2 Mehrfamilienhaus

Modellvorlage: Mehrfamilienhaus der Blauen Heimat, Heidelberg, Baden-Württemberg. Die beheizte Wohnfläche beträgt 3374 m<sup>2</sup>, die Belegung wird mit 90 Personen angenommen. Die Nutzfläche **A<sub>N</sub>** nach ENEV beträgt **4280 m<sup>2</sup>**; dies ist die Bezugsgröße für die Darstellung der Ergebnisse. Für das Heizsystem wird eine Vorlauftemperatur von 55°C angenommen.

Weitere Gebäudedaten:

Umbautes Volumen:	13370m <sup>3</sup>
A/V-Verhältnis:	0.39 1/m
Transmissionswärmeverlustkoeffizient Ht'(2009):	0.48 W/m <sup>2</sup> K
Anlagenaufwandszahl ohne Solar (2009) e <sub>p</sub> :	0.96 (WRG=65%)
Transmissionswärmeverlustkoeffizient Ht'(2012):	0.38 W/m <sup>2</sup> K
Anlagenaufwandszahl ohne Solar (2012) e <sub>p</sub> :	0.83 (WRG=75%)

Jährlicher Heizwärmebedarf aus dynamischer Gebäudesimulation:

### Wetterdaten Passau

ENEV 2009: 142476 kWh; entspricht 33.3 kWh/m<sup>2</sup>

ENEV 2012: 98029 kWh; entspricht 22.9 kWh/m<sup>2</sup>

### Wetterdaten Essen

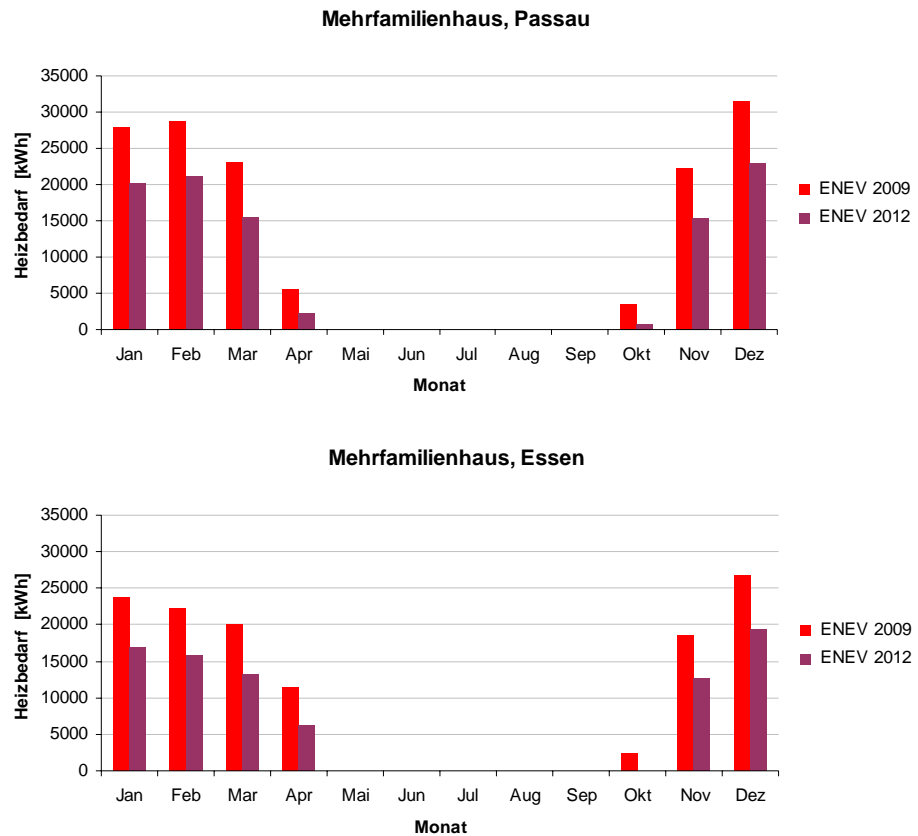
ENEV 2009: 125376 kWh; entspricht 29.3 kWh/m<sup>2</sup>

ENEV 2012: 84441 kWh; entspricht 19.7 kWh/m<sup>2</sup>



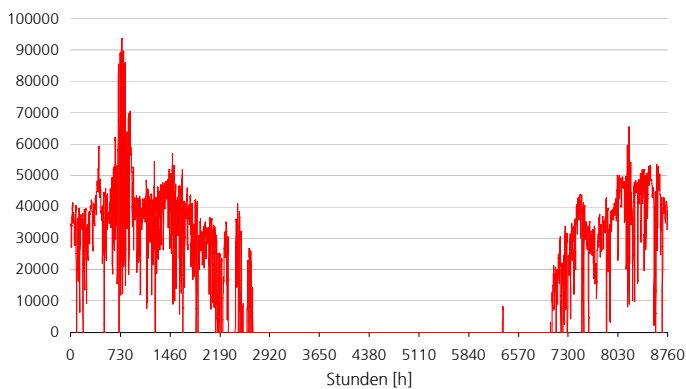
**Abbildung A2.6** Modellvorlage für das Mehrfamilienhaus: Gebäude der blauen Heimat, Heidelberg.

Die monatlichen Heizlasten für das Mehrfamilienhaus sind in Abbildung A2.7 enthalten; die Abbildungen A2.8 und A2.9 zeigen die Jahreszeitreihe der Heizlast für die ENEV 2009 und ENEV 2012, jeweils für die Standorte Passau und Essen.

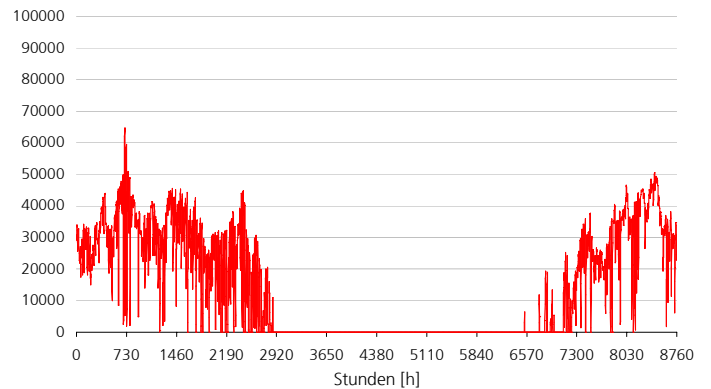


**Abbildung A2.7** Monatliche Heizlasten im Mehrfamilienhaus in Passau (oben) und Essen (unten); jeweils für die Annahmen in der ENEV 2009 und ENEV 2012.

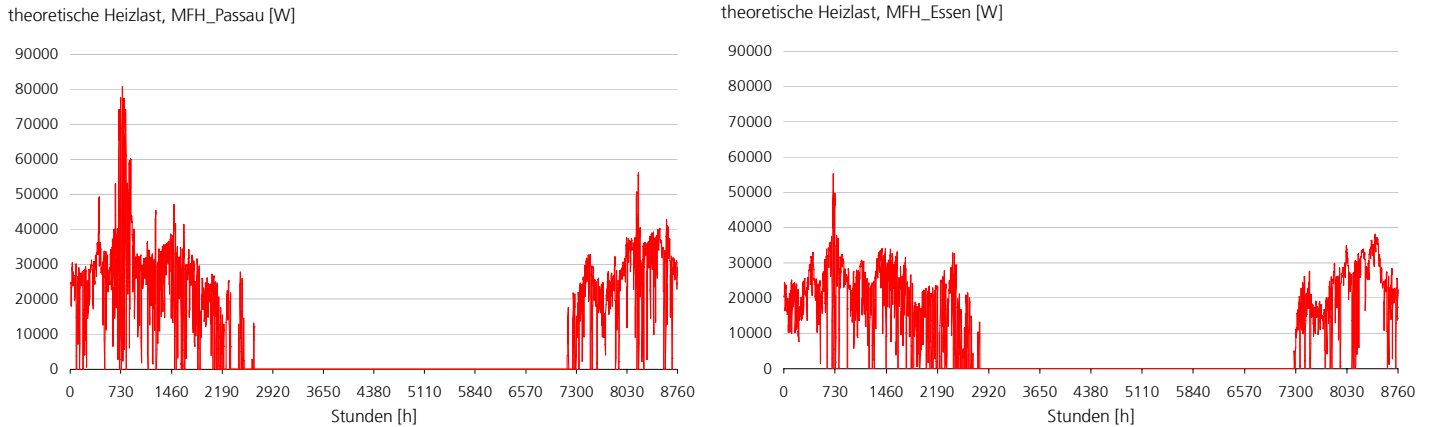
theoretische Heizlast, MFH\_Passau [W]



theoretische Heizlast, MFH\_Essen [W]



**Abbildung A2.8** Zeitreihe der Heizlast für das Modellgebäude Mehrfamilienhaus, berechnet für die **ENEV 2009**. Links: Standort Passau, rechts: Standort Essen.



**Abbildung A2.9** Zeitreihe der Heizlast für das Modellgebäude Mehrfamilienhaus, berechnet für die **ENEV 2012**. Oben: Standort Passau, unten: Standort Essen.

### A2.3 Bürogebäude

Als Modellvorlage für ein großes Bürogebäude wurde das derzeit im Bau befindliche Bürogebäude der Dachser AG in Kempten herangezogen. Es handelt sich um ein viergeschossiges Gebäude mit **10717 m<sup>2</sup>** Netto-Grundfläche; dies ist die Bezugsfläche in der Darstellung der Ergebnisse. Die Bürofläche des Gebäudes beträgt ca. 4400 m<sup>2</sup>; ein Seminarraum mit 137 m<sup>2</sup> ist ebenfalls vorhanden. Zusätzlich ist das Gebäude mit einer Kantine und zugehörigem Küchenbereich ausgestattet.

Die Berechnung des Heizwärme- und Kühlbedarfs des Gebäudes erfolgt mittels dynamischer Gebäudesimulation ESP-r, Version 11.3 vom April 2007. In der Simulation wurde ein Mehrzonenmodell aufgebaut. Die geometrischen und bauphysikalischen Verhältnisse sind 1:1 im Modell abgebildet.

Nach Planung erfüllt das Gebäude bereits jetzt nahezu die Anforderungen der ENEV 2009 bezüglich des Primärenergiebedarfs. Die Gebäudehülle wurde in den Modellrechnungen weiter modifiziert, um für die ENEV 2009 den Primärenergiebedarf von -30% gegenüber ENEV 2007 vollständig zu erreichen.

Eine weitere deutliche Absenkung des Primärenergiebedarfs für die ENEV 2012 ist nur noch durch veränderte primärenergetische Kennziffern zu erreichen, die eine Umstellung der Energieversorgung des Gebäudes beinhalten (z.B. von Gas auf Fernwärme, Kraft-Wärme-Kopplung, usw.). Der Heizbedarf wird sich dadurch nicht weiter verringern, da die hierzu nötigen Maßnahmen in der Gebäudehülle und in der Lüftungstechnik nicht mehr im plausiblen Bereich liegen würden. Die Anpassung des Gebäudestandards an die ENEV 2012 ergibt daher keine Veränderungen bezüglich der Einsparung des Wärmebedarfs gegenüber ENEV 2009, wenn solare Wärme eingesetzt wird. Die solarthermische Wärmeversorgung für das Bürogebäude wird daher nur für die ENEV 2009 berechnet.

Für die Berechnung des jährlichen Heizwärme- und Kühlbedarfs werden folgende Annahmen getroffen:

Heizwärmebedarf: Aufrechterhalten einer operativen Raumtemperatur von 20°C während der Anwesenheitszeit von 7:00 bis 18:00 Uhr und Nachtabsenkung auf 16°C außerhalb der Anwesenheitszeit.

Kühlbedarf: Gekühlt werden die Büro- und Seminarraumflächen (4530 m<sup>2</sup>). Begrenzung der maximalen operativen Raumtemperatur von 25°C während der Anwesenheitszeit der Nutzer (DIN EN ISO 7730:2003-10). Ein Nachtlüftungskonzept bzw. Stoßlüftung in den Morgenstunden finden keine Berücksichtigung. Der Sommerfall wird unter Verwendung einer manuellen Regelstrategie eines außen liegenden Sonnenschutzsystems bewertet. Dabei wird angenommen, dass der Sonnenschutz bei einer Solarstrahlung auf die Fassade von 200 W/m<sup>2</sup> geschlossen wird. Das entspricht gängiger Planungspraxis und Erfahrungen aus realisierten Projekten.

#### Wetterdaten Passau

ENEV 2009: Heizbedarf 303300 kWh; entspricht 28.2 kWh/m<sup>2</sup>  
 Kühlbedarf 64400 kWh; entspricht 14.2 kWh/m<sup>2</sup>\*  
 \*Bezugsfläche Kühlen: Hauptnutzungsfläche 4530 m<sup>2</sup>

#### Wetterdaten Essen

ENEV 2009: Heizbedarf 259270 kWh; entspricht 24.2 kWh/m<sup>2</sup>  
 Kühlbedarf 49850 kWh; entspricht 11.0 kWh/m<sup>2</sup>\*  
 \*Bezugsfläche Kühlen: Hauptnutzungsfläche 4530 m<sup>2</sup>

Weitere Angaben zum Gebäude:

Wärmeübertragende Hüllfläche A	9589 m <sup>2</sup>
Volumen	45930 m <sup>3</sup>
A / V	0.21

Flächenangaben

Gruppen- und Großraumbüros	4396 m <sup>2</sup>
Besprechungsräume	137 m <sup>2</sup>
Kantine/Küche	545 m <sup>2</sup>
Verkehrs- und Nebenflächen	5640 m <sup>2</sup>

Standard- und Nutzungsprofile der Büroräume

Die internen Wärmelasten in den Büros entsprechen den typischen Wärmelasten und dem Zeitprofil für Gruppen- und Großraumbüros. Die tägliche Nutzungszeit der Büroräume beträgt 11 h von 7:00 bis 18:00 Uhr, wobei ein „Vollbetriebsfaktor“ für Personen und Geräte von 6 h pro Tag bestimmt wurde. Es wird von einer Belegung von 400 Personen ausgegangen, dass entspricht rund 11 m<sup>2</sup> Bürofläche pro Nutzer.

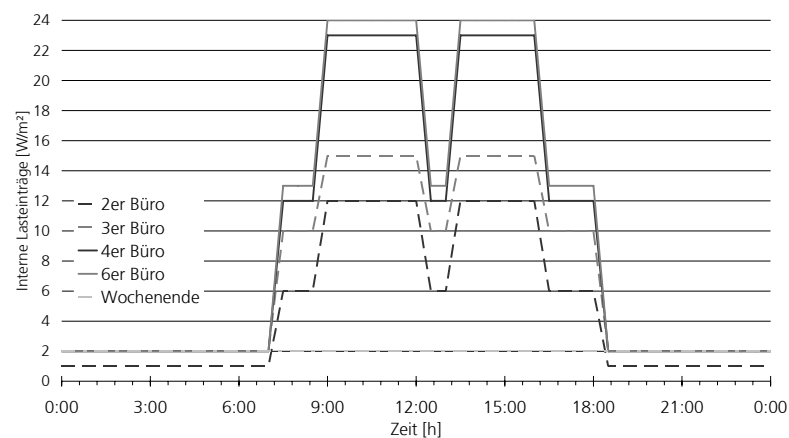
Interne Wärmelasten

Drei wesentliche Quellen für interne Wärmequellen sind in Büroräumen zu unterscheiden, nämlich die Wärmeabgabe durch Personen, durch Arbeitshilfen (EDV Ausstattung) und durch elektrische Beleuchtung. Eine Erhöhung der internen Wärmelasten führt unmittelbar zu einem Anstieg der Raumtemperaturen. Ihre Begrenzung ist also Voraussetzung dafür, die Kühllast zu minimieren. Die latente Wärmeabgabe durch Verdunstung wird nicht berücksichtigt, da sie zu keiner spürbaren Temperaturer-

höhung führt. Das Verhältnis von konvektiver zu strahlungsgebundener Wärme wird von 50% zu 50% angenommen.

Angaben zu internen Wärmelasten findet man in der DIN 4208 und detaillierter in der VDI 2078 und in den Schweizer Normen zur Kühllastberechnung SIA 382. Die elektrischen Arbeitshilfen mit einem Anteil von 70% gefolgt von der Abwärme der Personen mit etwa 20% dominieren die internen Wärmelasten in tageslichtorientierten Räumen. In den Zeiten, in denen die Büroräume nicht genutzt werden, wird eine interne Last von  $1 \text{ W/m}^2$  für das Büro mit 2 Arbeitsplätzen und  $2 \text{ W/m}^2$  für die übrigen Bürotypen zugrunde gelegt. An den Wochenenden beträgt die interne Last  $1 \text{ W/m}^2$  für das Büro mit 2 Arbeitsplätzen und  $2 \text{ W/m}^2$  für die übrigen Bürotypen.

Die mittleren internen Wärmeeinträge bezogen auf die Nettogrundfläche der betrachteten Büroräume in Nord- und Südausrichtung ergeben sich gemäß folgendem Lastprofil:



**Abbildung A2.10** Interne Wärmeeinträge in  $[\text{W/m}^2]$  der jeweiligen Gruppen- und Großraumbüros für einen Werktag und für das Wochenende.

### Hygienischer Frischluftwechsel und Grundluftwechsel des Gebäudes

Gebäudeundichtigkeiten werden mit einem Infiltrationsluftwechsel von 0,1 pro Stunden berücksichtigt. Während der Anwesenheit der Nutzer (7:00 bis 18:00 Uhr) wird durchgängig ein hygienisch notwendiger Luftwechsel von  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  und Person (Arbeitsstättenrichtlinie 5) zur Verfügung gestellt.

Im Heizfall wird der Frischluftwechsel mittels einer Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Wärmerückgewinnungsgrad von 75%) bereitgestellt.

Im Kühlfall wird der Frischluftwechsel zu 100% mittels einer Zu- und Abluftanlage bereitgestellt. Eine Konditionierung der Zuluft wird nicht berücksichtigt.

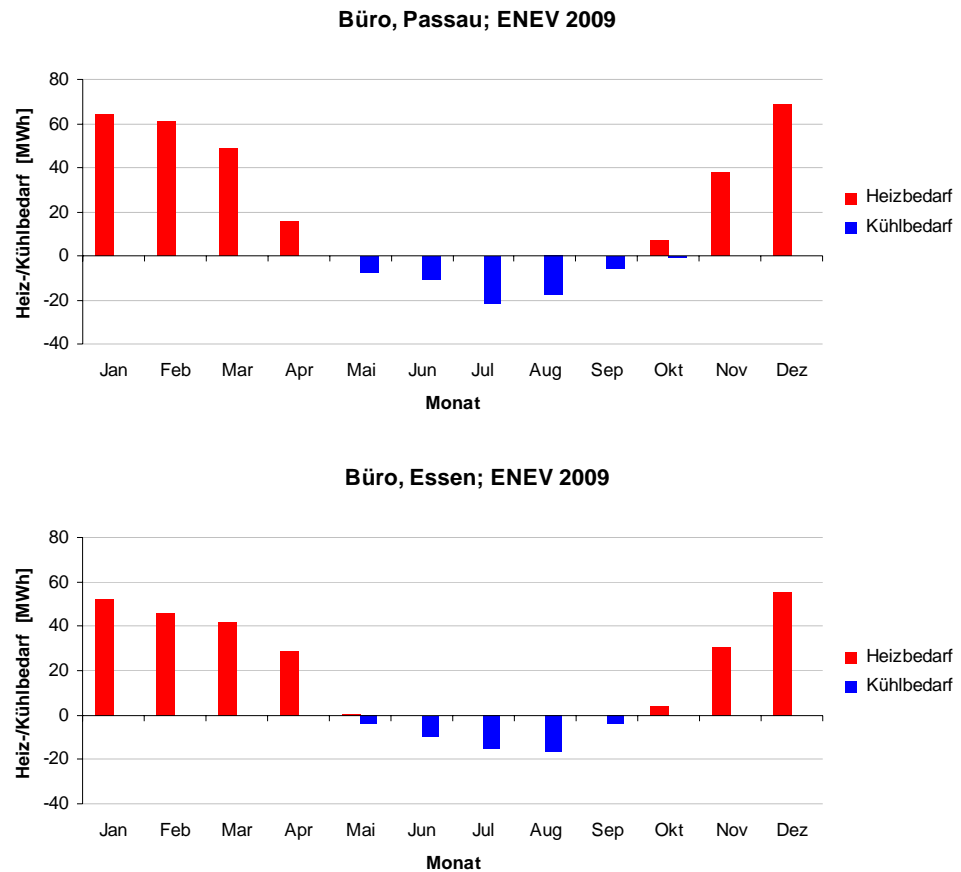
### Energetische Bewertung

Nutzenergien: Der Nutzenergiewärmebedarf für die Trinkwasserbereitung berechnet sich entsprechend DIN 18599 zu  $34000 \text{ kWh/a}$ . Der Heizwärmebedarf des Gebäudes liegt bei  $32,7 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ .

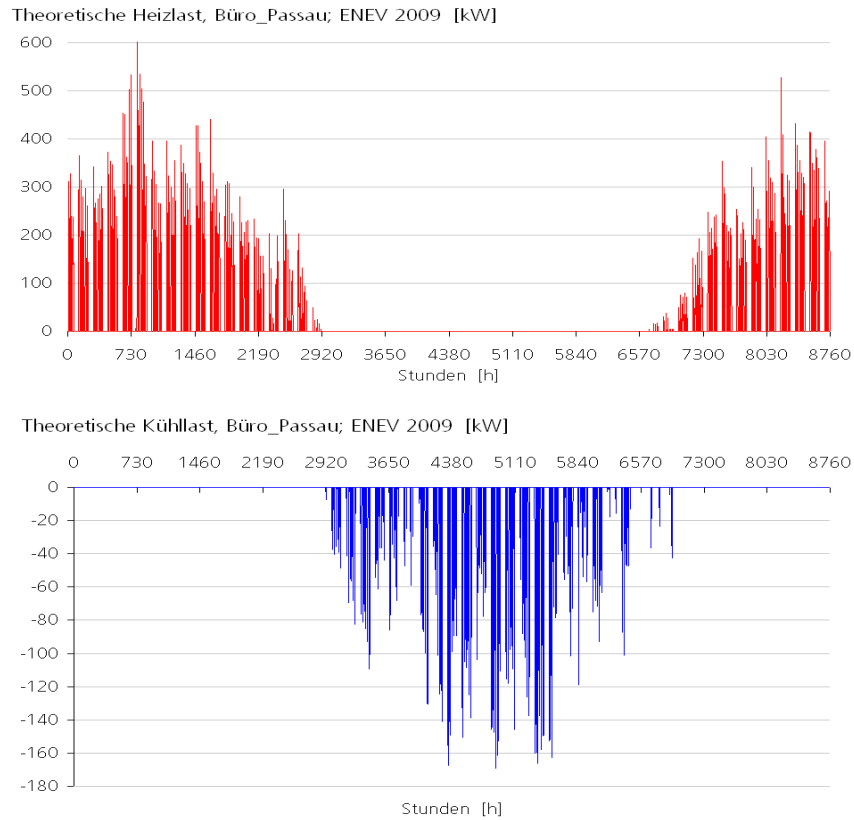
Endenergien für die einzelnen Bereiche ergeben sich wie folgt

Heizung: 43,1 kWh/m<sup>2</sup>a, Beleuchtung: 12,7 kWh/m<sup>2</sup>a und  
Lüftung: 9,6 kWh/m<sup>2</sup>a

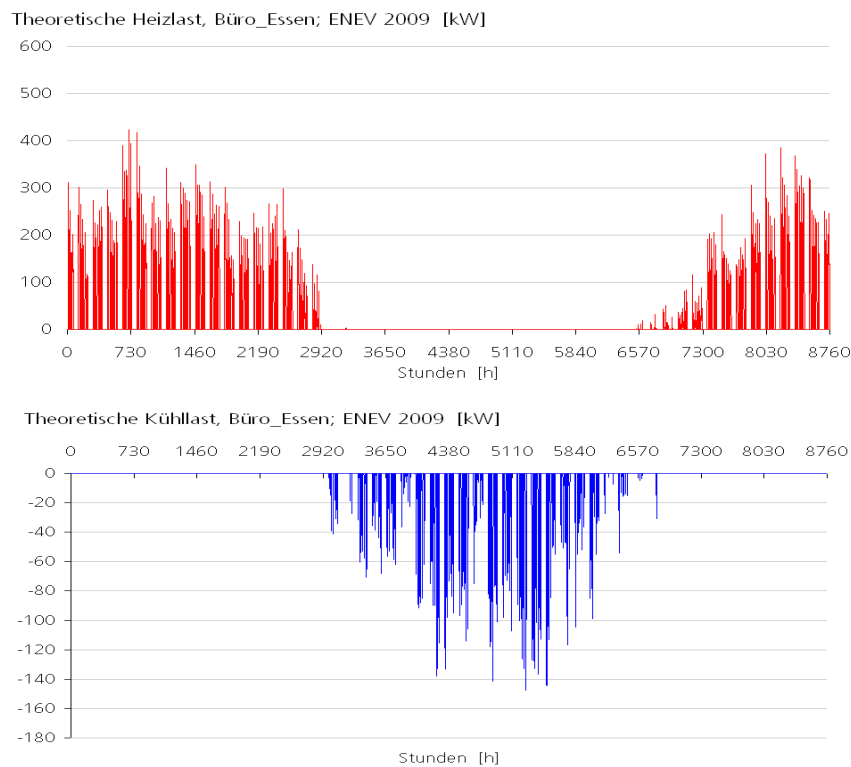
Abbildung A2.11 zeigt die monatlichen Heiz- und Kühllasten; die entsprechenden Jahreszeitreihen für die Standorte Passau und Essen sind in den Abbildungen A2.12 und A2.13 dargestellt.



**Abbildung A2.11** Monatliche Heiz- und Kühllasten im Bürogebäude in Passau (oben) und Essen (unten); jeweils für die Annahmen in der ENEV 2009.



**Abbildung A2.12** Zeitreihe der Heizlast (oben) und der Kühllast (unten) für das Modellgebäude Büro am Standort Passau, berechnet für die **ENEV 2009**.



**Abbildung A2.13** Zeitreihe der Heizlast (oben) und der Kühllast (unten) für das Modellgebäude Büro am Standort Essen, berechnet für die **ENEV 2009**.

## A2.4 Sportanlage

Modellvorbild:

für eine Gesamtschule in Hannover wurde eine Drei-Feld-Sporthalle im Passivhausstandard realisiert.



**Abbildung A2.10** Sporthalle der Gesamtschule Hannover. Quelle: AB C. Grobe, [www.passivhaus.de](http://www.passivhaus.de)

Bauherr: Stadt Laatzen

Bauzeit: 05/2005 - 12/2005

Planung: Stadt Laatzen

Gebäudedaten der Sporthalle Gesamtschule Hannover:

Energiebezugsfläche	1.760 m <sup>2</sup>
Umbautes Volumen	16.249 m <sup>3</sup>
Hüllfläche	5.476 m <sup>2</sup>
Fensterfläche	110 m <sup>2</sup>
A/Ve Verhältnis	0,34
Heizwärmebedarf (berechnet)	15,0 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Primärenergie-Kennwert (PHPP)	79 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Heizlast	8,8 W/m <sup>2</sup>

Energetische Kennwerte der Sporthalle Gesamtschule Hannover:

Die Endenergieeinsparung für Raumwärme beträgt beim Sporthallenneubau etwa 75% gegenüber den Anforderungen nach EnEV. Die Turnhalle hat absolut betrachtet einen geringeren Heizwärmeverbrauch pro Jahr als ein herkömmliches Einfamilienhaus. Der Energieverbrauch (nicht witterungsbereinigt) betrug im Jahr 2006 9 kWh/(m<sup>2</sup>a) und somit 1/20 einer herkömmlichen Sporthalle im Bestand.

Gebäudedaten der Modell-Sporthalle in der Studie:

Energiebezugsfläche	1.704 m <sup>2</sup>
Umbautes Volumen	12.784 m <sup>3</sup>
Hüllfläche	4.660 m <sup>2</sup>
A/Ve Verhältnis	0,36

Die den Rechnungen zugrunde gelegte Sporthalle hat gemäß EnEV 2007 einen Heizwärmebedarf von 200 kWh/m<sup>2</sup>. Eine Reduktion der Primärenergie von 30% auf den geplanten Standard EnEV 2009 resultiert in einer Verringerung des Heizwärmebedarfs auf 123 kWh/m<sup>2</sup>/a, was einer Minderung des Heizwärmebedarfs von 38% entspricht. Setzt man zusätzlich zu dem hohen Wärmedämmstandard der EnEV 2009 noch eine Lüftungsanlage mit WRG ein, so läßt sich gemäß den derzeit gültigen Annahmen in der DIN V 18599 keine weitere Minderung erreichen. Somit ist für diesen Nutzungstyp eine weitere Reduktion um 30% auf den Standard EnEV 2012 nicht zu erreichen. Realisierte Projekte wie die oben referenzierte Sporthalle in Hannover zeigen jedoch, das deutlich niedrigere Energieverbrauchswerte in der Praxis bereits heute realisiert werden (weiteres Beispiel: Sporthalle der Kurpfalzschule Heidelberg; ca. 15 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) Heizwärmebedarf).

Für die Untersuchungen in dieser Studie wird der folgende Heizwärmebedarf zugrunde gelegt:

Wetterdaten Passau

ENEV 2009            209600 kWh; entspricht 123.0 kWh/m<sup>2</sup>

Wetterdaten Essen

ENEV 2009            184400 kWh; entspricht 108.2 kWh/m<sup>2</sup>

## A3 Profile des Trinkwarmwasserverbrauchs

Bundesweit setzt sich das Trinkwasser zu ca. 64% aus Grundwasser relativ niedriger Temperatur zusammen, die anderen Anteile stammen aus Oberflächenwasser (27%) und aus Quellwasser. Lokal und saisonal kann dabei die Trinkwassertemperatur des fließenden Mediums in der Leitung stark schwanken.

Nach DIN 2000 soll die Trinkwassertemperatur im Bereich von 5°C und 15°C liegen, kurzzeitige Schwankungen sind nicht erwünscht. Für die Modellrechnungen wurde eine Temperatur an der Versorgungsstelle von 10°C gewählt.

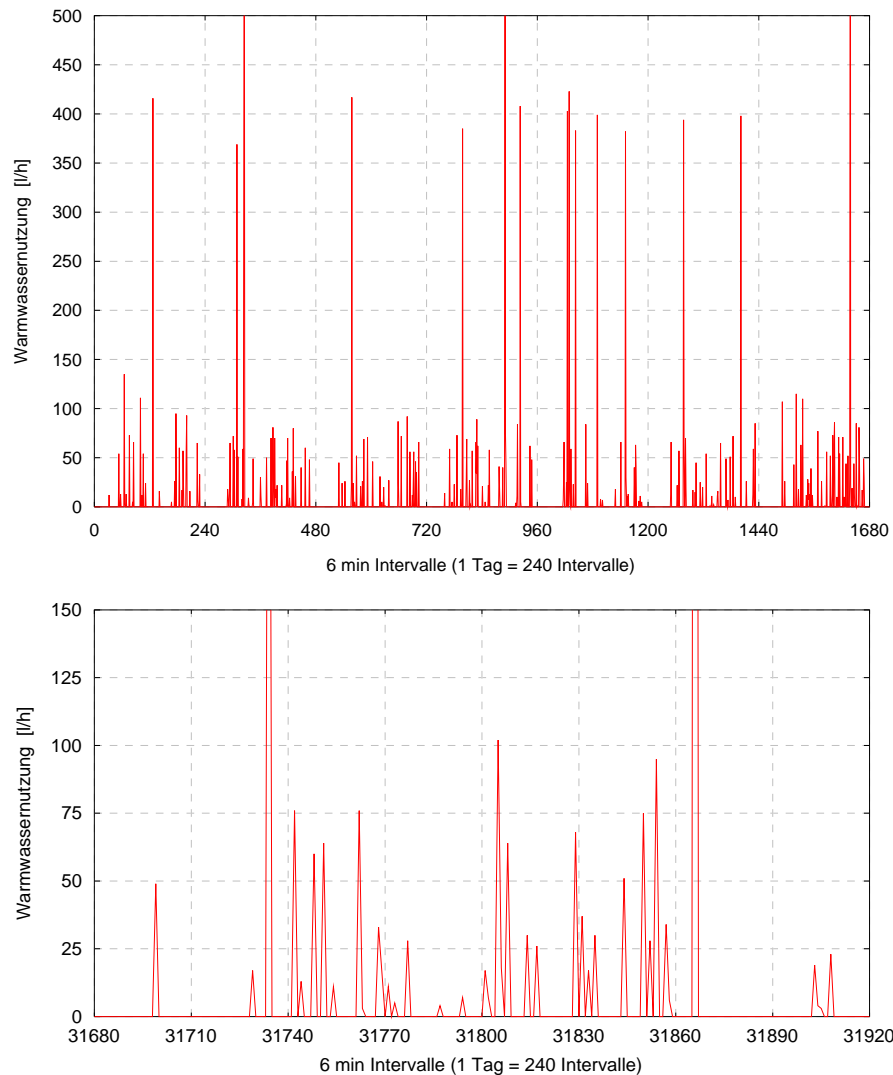
Der Tagesverlauf der Warmwasserzapfung (Zapfprofil) beeinflusst die Effektivität des Gesamtsystems der solaren Trinkwarmwasserbereitung. Den Modellrechnungen werden häufig feste Tagesprofile zugrunde gelegt, die beispielsweise der [VDI 6002] entnommen werden können. Dabei wird zwischen Profilen an Werktagen und an Wochenenden unterschieden, desweiteren wird das Tagesprofil von einer saisonalen Variation überlagert. Da in diesen Annahmen dennoch das starre Tagesprofil dominiert, wurde in den hier durchgeführten Untersuchungen auf Trinkwarmwasserprofile zurückgegriffen, die auf statistischer Basis generiert wurden. Das Verfahren wurde im Rahmen des Task 26 ‚Solar Combisystems‘ im Solar Heating & Cooling Programmes (SHC) der Internationalen Energieagentur IEA an der Universität Marburg entwickelt [Jordan 2001]; das daraus entstandene Programm wird gegenwärtig von der Universität Kassel angeboten [DHWcalc 2003].

Ein bedeutender Vorteil des Verfahrens ist die realitätsnähere Dynamik der einzelnen Zapfereignisse, die mit dem Programm abgebildet wird. Für die Modellrechnungen dieser Studie wurden Zapfprofile mit einer Zeitauflösung von 6 Minuten generiert. Das Zapfprofile wurde so skaliert, dass die Vorgaben gemäß ENEC bezüglich des flächenbezogenen Wärmeaufwandes zur Trinkwarmwasserbereitung eingehalten wurden. Entnommen wird das Trinkwarmwasser bei 45°C Wassertemperatur; da im Versorgungssystem in der Regel ein höheres Temperaturniveau vorliegt, wird die Zapftemperatur durch Beimischung mit Frischwasser eingestellt.

### A3.1 Einfamilienhaus

Abbildung A3.1 zeigt Profilausschnitte aus der Zeitreihe des Trinkwarmwasserverbrauchs für das Einfamilienhaus. Die Gesamtwärmemenge des entzogenen Trinkwarmwassers beträgt 2500 kWh/a, bezogen auf die Temperaturdifferenz (45-10)K. An 26 Tagen, verteilt über drei Zeiträume im Jahr, wird kein Trinkwasser entnommen (Ferien, Abwesenheit).

Grundeinstellungen zur Erzeugung des Trinkwarmwasserprofils im Programm DHWcalc sind unten angegeben.



**Abbildung A3.1** Oben: Wochenprofil des Trinkwarmwasserverbrauchs für das Einfamilienhaus (Winterwoche). Die Spitzen der Zapfleistung betragen ca. 1000 l/h. Im Simulationsprogramm erfolgt noch eine geringe Skalierung der Zapfleistungen, um in der Jahressumme einen Wärmeverbrauch für die Warmwasserbereitung von 12.5 kWh pro m<sup>2</sup> Nutzfläche gemäß den Vorgaben der ENEC 2007 / Wohngebäude zu erhalten. Unten: Tagesprofil der Trinkwarmwasserzapfung im Frühjahr.

Grundeinstellung zur Generierung der Zeitreihe des Trinkwarmwasserverbrauchs für das Einfamilienhaus in DHWcalc:

LOGFILE DHWEFH01\_log.txt  
for a single family house

Total duration: 365 days  
Start day : 1. day of the year  
Mean daily draw-off vol.: 170 l/day  
No. of categories: 4  
Time step duration: 6 min

#### FLOW RATE SETTINGS

Categories:	1	2	3	4
Mean flow Rate:	10	60	1200	400 l/h

Duration of draw-off: 6 6 6 6 min  
 portion: 14 36 10 40 %  
 sigma: 20 20 20 20 l/h  
 min. flow rate: 1 l/h  
 max. flow rate: 1200 l/h

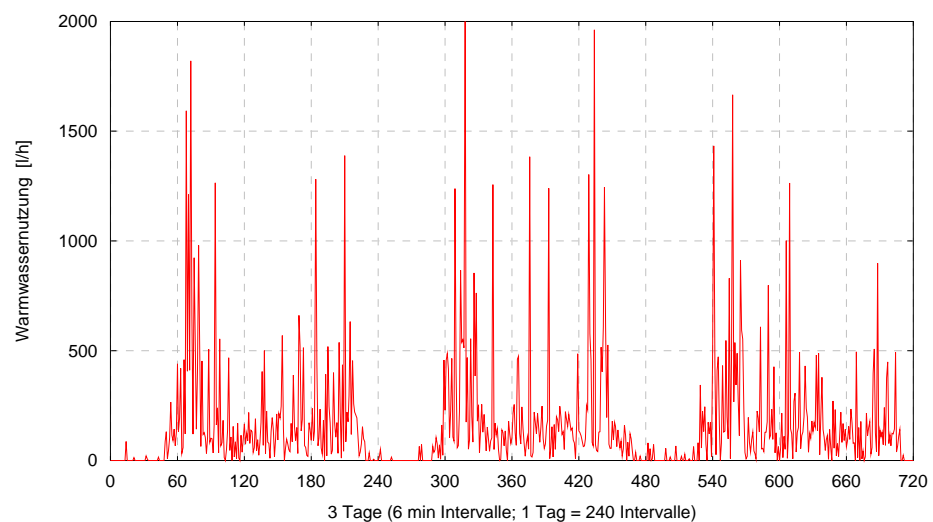
#### PROBABILITY FUNCTION SETTINGS

Standard probability distribution  
 Ratio of the mean daily draw-off volume tapped  
 on weekend-days/on weekdays: 120 %  
 Seasonal Variations:  
 Sine amplitude: 10 %  
 Day of sine maximum: 45  
 Holiday Periods:  
 Period 1: 10.5.-15.5.  
 Period 2: 15.7.-29.7.  
 Period 3: 22.12.-27.12.  
 Relative consumption during holiday periods: 0 %

### A3.2 Mehrfamilienhaus

Abbildung A3.2 zeigt ein als Ausschnitt aus der Zeitreihe ein Drei-Tages Profil des Trinkwarmwasserverbrauchs für das Mehrfamilienhaus. Die Gesamtwärmemenge des entzogenen Trinkwarmwassers beträgt 53500 kWh/a, bezogen auf die Temperaturdifferenz (45-10)K. Für jeden Haushalt werden 14 Tage Abwesenheit im Zeitraum Juli / August angenommen. Durch eine Verteilung der Ferienzeiträume der einzelnen Haushalte innerhalb dieser Periode kommt es nur zu einer Reduzierung des Trinkwasserbedarfs in diesem Zeitraum.

Grundeinstellungen zur Erzeugung des Trinkwarmwasserprofils im Programm DHWcalc sind unten angegeben.



**Abbildung A3.2** 3-Tagesprofil der Trinkwarmwasserzapfung für das Mehrfamilienhaus.

Grundeinstellung zur Generierung der Zeitreihe des Trinkwarmwasserverbrauchs für das Mehrfamilienhaus in DHWcalc:

LOGFILE DHWMFH4\_log.txt

for a multi-family house with 40 households

Total duration: 365 days  
 Start day : 1. day of the year  
 Mean daily draw-off vol.: 3600 l/day  
 No. of categories: 4  
 Time step duration: 6 min

#### FLOW RATE SETTINGS

Categories:	1	2	3	4
Mean flow Rate:	10	60	1200	400 l/h
Duration of draw-off:	6	6	6	6 min
portion:	14	36	10	40 %
sigma:	20	20	20	20 l/h
min. flow rate:	6 l/h			
max. flow rate:	36000 l/h			

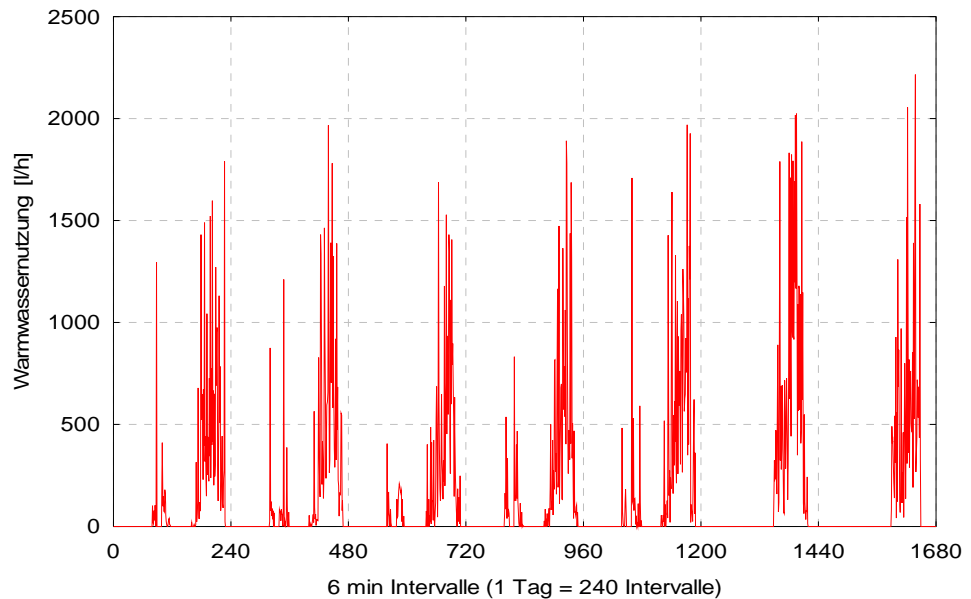
#### PROBABILITY FUNCTION SETTINGS

Standard probability distribution  
 Ratio of the mean daily draw-off volume tapped  
 on weekend-days/on weekdays: 120 %  
 Seasonal Variations:  
 Sine amplitude: 10 %  
 Day of sine maximum: 45  
 Holiday Periods: 14 days per household  
 Relative consumption during holiday periods: 0 %

### A3.3 Sporthalle

Die Warmwassernutzung in der Sporthalle erfolgt überwiegend in den Nachmittags- und Abendstunden. Eine geringe Warmwassernutzung ist wochentags in den Vormittagsstunden gegeben, am Wochenende erst Nachmittags.

Für die Ermittlung des Nutzwärmebedarfs wird von einer Nutzung von sechs Gruppen mit je 15 Personen pro Tag (= 90 Personen pro Tag) ausgegangen. Die Hauptnutzungszeit liegt zwischen 17:00 Uhr und 22:00 Uhr. Die Sporthalle ist geschlossen vom 15.-22. Mai, 21. Juli – 14. August und vom 22. – 27. Dezember. Der Nutzwärmebedarf für die Warmwasserbereitung beträgt nach DIN 18599 1.5 kWh pro Person und Tag; daraus berechnet sich ein Gesamtnutzwärmebedarf von 44010 kWh/a (3350 Liter Warmwasser pro Tag).



**Abbildung A3.3** Wochenprofil des Trinkwarmwasserbedarfs für die Sporthalle. Ausschnitt aus der Jahreszeitreihe, generiert mit DHWcalc.

Grundeinstellung zur Generierung der Zeitreihe des Trinkwarmwasserverbrauchs für die Sporthalle in DHWcalc:

LOGFILE SPORT02\_log.txt

for a single family house or functional building

Total duration: 365 days  
 Start day : 1. day of the year  
 Mean daily draw-off vol.: 3350 l/day  
 No. of categories: 4  
 Time step duration: 6 min

#### FLOW RATE SETTINGS

Categories:	1	2	3	4
Mean flow Rate:	10	60	1200	400 l/h
Duration of draw-off:	6	6	6	6 min
portion:	14	36	10	40 %
sigma:	20	20	20	20 l/h
min. flow rate:	1 l/h			
max. flow rate:	27600 l/h			

#### PROBABILITY FUNCTION SETTINGS

Step function probability distribution for each day of the week

Mean DHW-volume tapped during each hour:

Hour; monday tuesday wednesd thursday friday saturday sunday

1;	0	0	0	0	0	0	0
2;	0	0	0	0	0	0	0
3;	0	0	0	0	0	0	0
4;	0	0	0	0	0	0	0
5;	0	0	0	0	0	0	0
6;	0	0	0	0	0	0	0
7;	0	0	0	0	0	0	0

8; 0 0 0 0 0 0 0  
9; 151.96 151.96 151.96 151.96 151.96 0 0  
10; 0 0 0 0 0 0 0  
11; 202.62 202.62 202.62 202.62 202.62 0 0  
12; 50.66 50.66 50.66 50.66 50.66 0 0  
13; 0 0 0 0 0 0 0  
14; 0 0 0 0 0 0 0  
15; 0 0 0 0 0 0 0  
16; 50.55 50.55 50.55 50.55 50.55 253.26 253.26  
17; 151.64 151.64 151.64 151.64 151.64 303.92 303.92  
18; 151.96 151.96 151.96 151.96 151.96 303.92 303.92  
19; 506.54 506.54 506.54 506.54 557.2 810.46 810.46  
20; 506.54 506.54 506.54 506.54 607.84 911.76 759.8  
21; 759.8 759.8 759.8 759.8 810.46 759.8 506.54  
22; 759.8 759.8 759.8 759.8 810.46 202.62 0  
23; 50.55 50.55 50.55 50.55 50.55 0 0  
24; 0 0 0 0 0 0 0  
Ratio of the mean daily draw-off volume tapped  
on weekend-days/on weekdays: 115 %  
Seasonal Variations:  
Sine amplitude: 10 %  
Day of sine maximum: 45  
Holiday Periods:  
Period 1: 15.5.-22.5.  
Period 2: 21.7.-14.8.  
Period 3: 22.12.-27.12.  
Relative consumption during holiday periods: 0 %

## A4 Standortauswahl

Nach wie vor wird häufig das alte Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes DWD für Würzburg als Standard- Klimadatensatz für die Abschätzung der Erträge solarthermischer Anlagen herangezogen. Seit 2004 sind allerdings neue Testreferenzjahre verfügbar; das Bundesgebiet wurde dabei um drei Regionen auf 15 Regionen erweitert, für die es entsprechende Testreferenzjahre mit einer Datenauflösung von jeweils einer Stunde gibt [DWD 2004]. Der Testreferenzstandort Würzburg wurde ersetzt durch den Referenzstandort Passau in der gleichern Region.

In den Modellrechnungen in dieser Studie wurden zwei Standorte ausgewählt und die Wetterdaten der entsprechenden Testreferenzjahre genutzt, um den klimabedingten Einfluss auf die Wärmebeiträge des Kollektorsystems am Gesamtwärmebedarf auszuloten:

- i **Passau** TRY-Region 13 des DWD. Charakterisierung: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland; kühle Winter und gemäßigt bis warme Sommer. Die Region schließt das Gebiet der ehemaligen Testreferenz-Region Würzburg mit ein. Weitere Gebietscharakterisierung: Südthüringen, Werratal, Franken (ohne Spessart, Rhön, Frankenwald und Fichtelgebirge), Gebiete an Tauber, Jagst, Kocher, Murr und Rems, Oberpfalz (ohne Oberpfälzer Wald), Donauniederungen, Oberschwaben, Bodenseegebiet, Alpenvorland (bis 700m).

Position: 48°35' Nord, 13°28' Ost

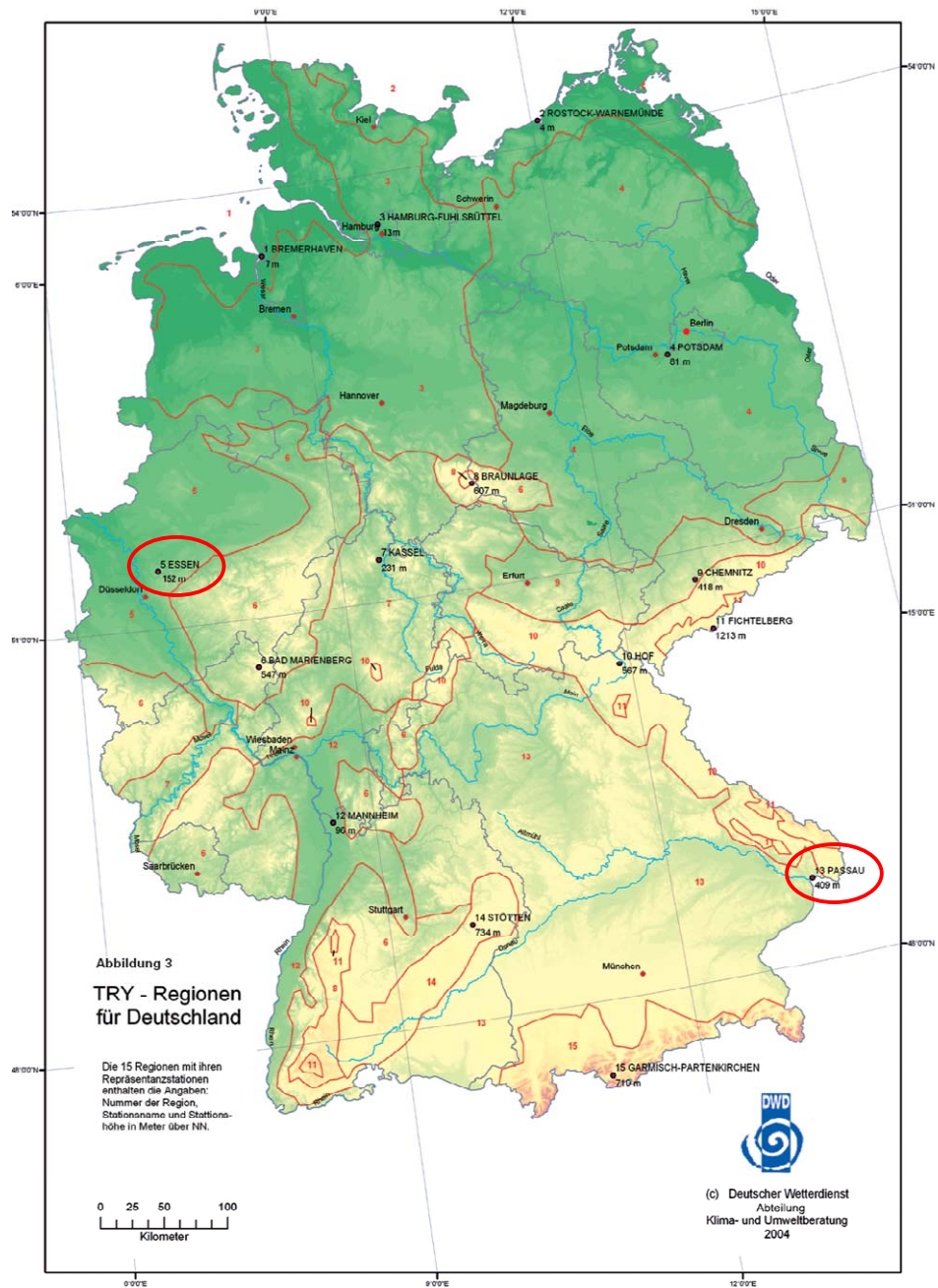
Jahresmittelwert der Umgebungstemperatur: 8.3°C;  
jährliche Einstrahlungssumme global horizontal: 1102 kWh/m<sup>2</sup>

- ii **Essen** TRY-Region 5 des DWD. Charakterisierung: Nordrhein-westfälische Bucht und Emsland; warme Winter und gemäßigte Sommer. Weitere Gebietscharakterisierung: Emsland, Dümmer, Geestniederung, Ravensberger Mulde, Münsterland, Ruhrgebiet, Niederrheinische Bucht, unterer Mittelrhein, Neuwieder Becken.

Position: 51°24' Nord, 06°58' Ost.

Jahresmittelwert der Umgebungstemperatur: 9.4°C;  
jährliche Einstrahlungssumme global horizontal: 897 kWh/m<sup>2</sup>

Die entsprechenden Testreferenzjahre wurden sowohl für die Berechnung der Heizlasten als auch für die Simulation der Solarsysteme angewendet. Abbildung A4.1 zeigt die Lage der Testreferenzstationen.



**Abbildung A4.1** Lage der Testreferenzstationen des Deutschen Wetterdienstes DWD. Die Position der hier verwendeten Datensätze Passau (TRY 13) und Essen (TRY 5) ist rot eingekreist. Bildquelle: DWD.

## A5 Modellannahmen zu Systemen der solarthermischen Wärmeversorgung

Die Umsetzung der im Folgenden gezeigten Modellvorlagen für die unterschiedlichen Nutzungen solarer Wärme in das Rechenmodell erfolgte im Simulationsprogramm [TRNSYS]. Für die Modellierungen wurden die Versionen 15 und 16.1 angewendet. Die erstellten Programme lesen einen Jahresdatensatz Heizwärmebedarf, Brauchwasserbedarf sowie Einstrahlungs- und Umgebungstemperaturdaten für die jeweilige Systemkonfiguration, Gebäudeart und für den Standort ein. Die Zeitauflösung der Wetterdaten und der Heizlastdaten beträgt eine Stunde; die Zeitauflösung der Brauchwasserdaten 6 Minuten. Die Simulationsrechnungen erfolgten in einer Zeitschrittweite von 3 Minuten.

### A5.1 Einfamilienhaus

#### A5.1.1 Einfamilienhaus - Solare Trinkwassererwärmung

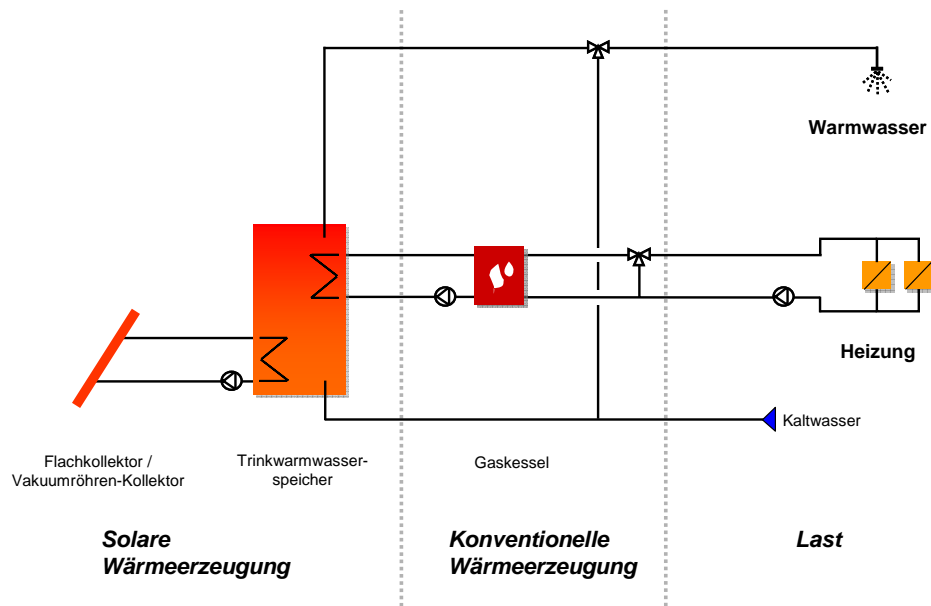
Zur Modellierung des Systems der solaren Trinkwarmwasserversorgung wurden Systemschemata verwendet, die sich an marktverfügbaren Systempaketen orientieren.

Für Einfamilienwohngebäude wird häufig ein Trinkwarmwasserspeicher verwendet, der über innenliegende Wärmeübertrager sowohl mit Wärme aus dem Solarkollektorfeld als auch aus einem externen konventionellen Gaskessel versorgt wird. Die Gebäudebeheizung erfolgt ausschließlich über den Gaskessel. Die Abbildungen A5.1 und A5.2 zeigen das Schema für die Modellierung des Systems und den Bilanzraum. Die Mehrzahl der eingesetzten Systeme enthält Trinkwasserspeicher im Volumenbereich zwischen 300 bis 500 Litern; typische Kollektorflächen sind dabei ca. 4 m<sup>2</sup> bis 6 m<sup>2</sup> für Speicher mit 300 Litern, und 6 m<sup>2</sup> bis 10 m<sup>2</sup> für Anlagen mit einem 600 Liter Speicher. Dominierend sind zwar Systeme mit Flachkollektoren, aber Vakuumröhrenkollektoren sind durchaus von Bedeutung. Einen Überblick über typische Systemgrößen gibt [SWW 2/08].

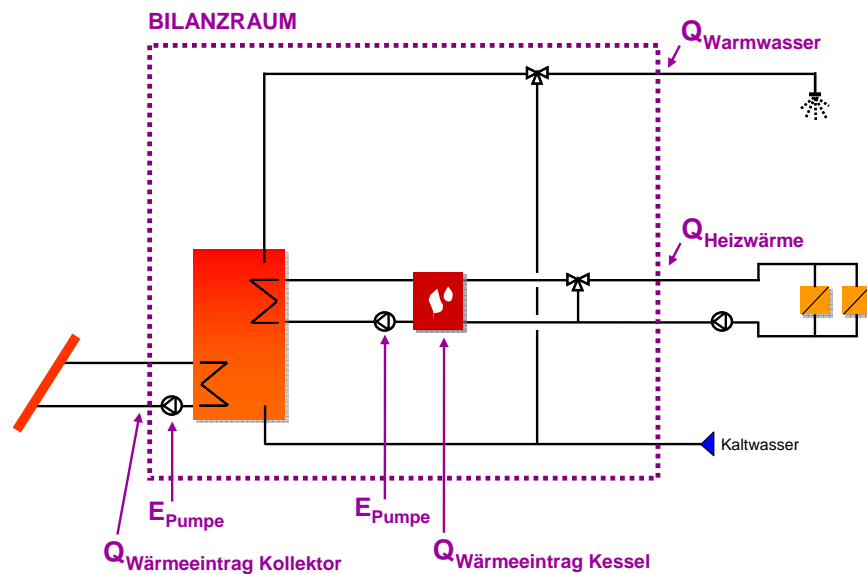
In den Modellrechnungen wurden folgende Systemkonstellationen untersucht:

- Trinkwasserspeicher 300 Liter; Flachkollektor 4 – 5.5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche
- Trinkwasserspeicher 500 Liter; Flachkollektor 5.5 – 12 m<sup>2</sup> Kollektorfläche
- Trinkwasserspeicher 500 Liter; Vakuumröhrenkollektor (Heat-pipe) 5 – 12 m<sup>2</sup> Kollektorfläche
- Trinkwasserspeicher 500 Liter; Vakuumröhrenkollektor (direkt durchströmt) 5 – 12 m<sup>2</sup> Kollektorfläche

Die Kollektorflächenangaben beziehen sich jeweils auf die *Aperturfläche* des Kollektors (Lichteintrittsfläche). Insbesondere bei Vakuumröhren-Kollektoren kann die Bruttofläche des Kollektors bauartbedingt deutlich davon abweichen.



**Abbildung A5.1** Modellschema der solarthermisch unterstützten Trinkwassererwärmung für das Einfamilienhaus.

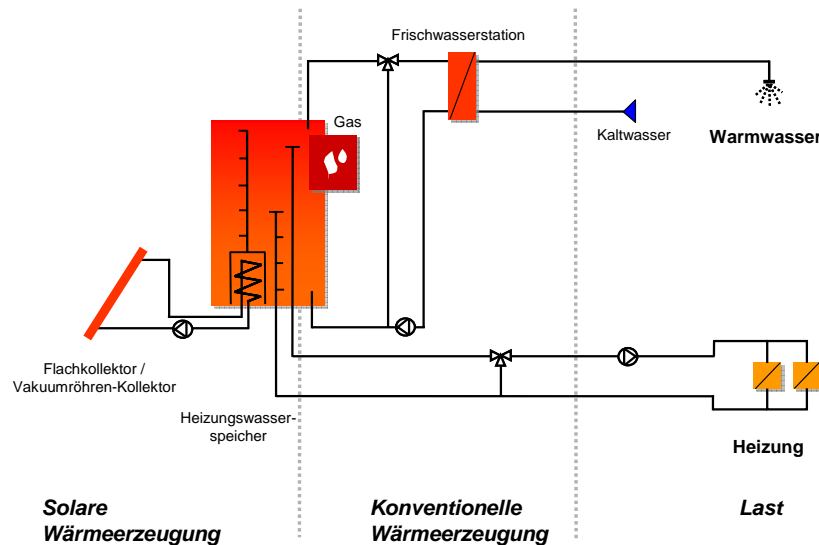


**Abbildung A5.2** Bilanzraum für die solarthermisch unterstützten Trinkwassererwärmung. Je nach nutzbarem Wärmeeintrag des Kollektors und nach Größe der Systemverluste verringert sich der benötigte Wärmeeintrag aus dem Kessel gegenüber dem Referenzsystem.

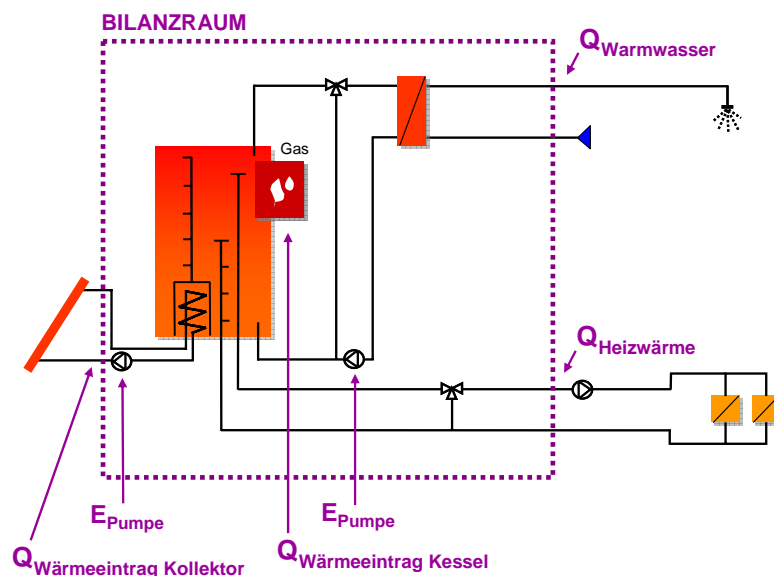
### A5.1.2 Einfamilienhaus - Kombianlage

Auch für die Heizungsunterstützung sind für Anwendungen im Ein- oder Zweifamilienhaus Paketsysteme erhältlich. Übliche Speichergrößen liegen hier zwischen 700 Litern und 1000 Litern, ein Schwerpunkt der Kollektorflächen liegt zwischen 10 m<sup>2</sup> und 14 m<sup>2</sup>. Die Abbildungen A5.3 und A5.4 zeigen das Schema einer der angebotenen Systemvarianten; dieses wurde näherungsweise in der Modellierung umgesetzt. Der Speicher enthält Heizungswasser und wird mit Schichtladevorrichtungen beladen. Trinkwarmwasser wird über eine Frischwasserstation mittels Wärme aus dem Speicher zubereitet; diese

Systemtechnik gewinnt derzeit an Bedeutung. Ein Gasbrenner ist in den oberen Speicherbereich integriert. Durch eine sorgfältige Auslegung der Schichtladevorrichtungen und der Speichergeometrie soll eine zu starke Beeinflussung des Kollektorertrages durch den integrierten Kessel vermieden werden.



**Abbildung A5.3** Modellschema des Kombisystems für das Einfamilienhaus.



**Abbildung A5.4** Bilanzraum für das Kombisystem im Einfamilienhaus. Je nach nutzbarem Wärmeeintrag des Kollektors und nach Größe der Systemverluste verringert sich der benötigte Wärmeeintrag aus dem Kessel gegenüber dem Referenzsystem.

In den Simulationsrechnungen wurden die folgenden Systemgrößen analysiert:

- Heizungsspeicher 700 Liter; Flachkollektor 6 – 12 m<sup>2</sup> Kollektorfläche
- Heizungsspeicher 1000 Liter; Flachkollektor 8 – 14 m<sup>2</sup> Kollektorfläche
- Heizungsspeicher 700 Liter; Vakuumröhren-Kollektor 6 – 12 m<sup>2</sup> Kollektorfläche

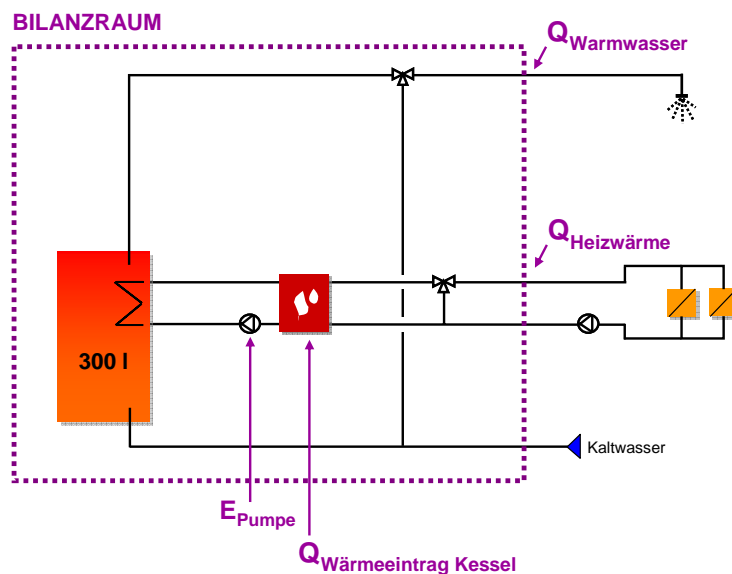
- Heizungsspeicher 1000 Liter; Vakuumröhren-Kollektor 8 – 14 m<sup>2</sup> Kollektorfläche.

Wegen der vergleichsweise geringen Unterschiede zwischen den Energieerträgen des verwendeten Flachkollektors und des Vakuumröhren-Kollektors mit heat pipes wurde nur der direkt durchströmte Vakuumröhren-Kollektor hier berücksichtigt.

In der Anwendung der ENEC 2012 zeigen sich generell hohe solare Deckungs-raten; die Variante mit dem 1000 Liter Heizungsspeicher wurde daher hier nicht angewendet.

### A5.1.3 Einfamilienhaus - Referenzsystem

Das Referenzsystem besteht aus einem Gaskessel, der direkt die Heizlasten zur Gebäudebeheizung versorgt und zusätzlich einen Trinkwarmwasserspeicher von 300 l Volumen auf der benötigten Temperatur zur Entnahme von Warmwasser (Zapftemperatur: 45°C) hält. Bilanziert wird der Wärmeeinsatz zu diesem Zweck; Kesselwandlungswirkungsgrade sind daher nicht berücksichtigt. Abbildung A5.5 zeigt den Bilanzraum für das Referenzsystem.



**Abbildung A5.5** Bilanzraum für das Referenzsystem der Wärmeversorgung (Einfamilienhaus). Der Wärmeeintrag des Kessels umfasst  $Q_{\text{Warmwasser}}$ ,  $Q_{\text{Heizwärme}}$  sowie zusätzliche Wärmeverluste im Speicher und in den Leitungen.

## A5.2 Mehrfamilienhaus

### A5.2.1 Mehrfamilienhaus - Solare Trinkwassererwärmung

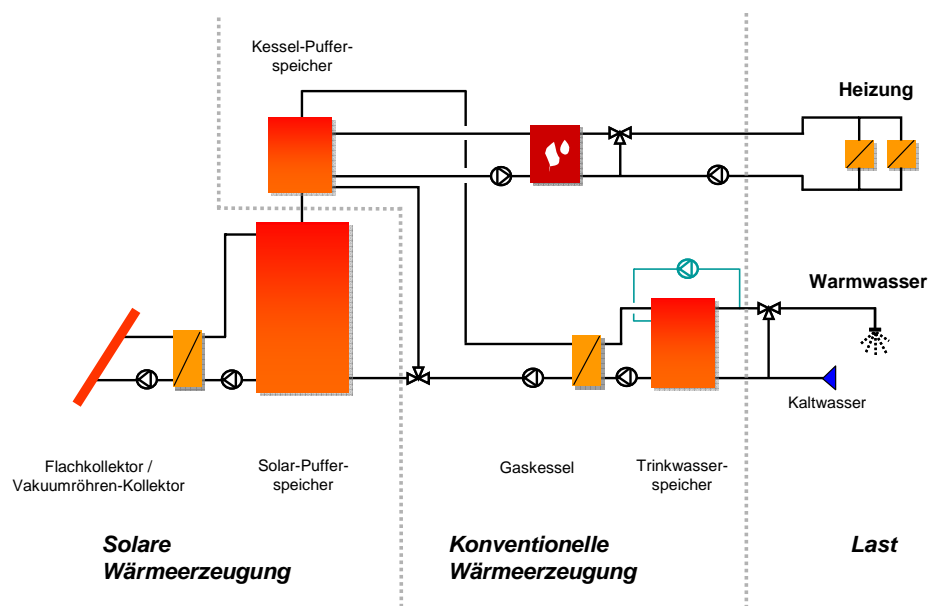
Abbildung A5.6 zeigt das Modellschema für eine große Anlage zur solaren Trinkwassererwärmung. Solare Wärme durchläuft einen Kessel-Pufferspeicher und einen Wärmeübertrager zur Aufheizung des Trinkwasserspeichers. Der Rücklauf erfolgt je nach Temperatur entweder über den Solarpufferspeicher zur Aufnahme solarer Wärme, oder über den Kessel-Pufferspeicher zur Ver-

meidung von Wärmeabgabe an den Solarpuffer. Die Heizung ist direkt an den Gaskessel gekoppelt; Heizwärme beeinflusst daher nicht die Bilanz des Solar-systems. Aus hygienischen Gründen ist die Temperatur im Trinkwasserspeicher auf 60°C zu halten (Legionellenschutz in Systemen mit Trinkwasserspeichervolumina > 400 l); diese Maßnahme verringert etwas die Gesamteffizienz des Kollektorsystems. Eine Zirkulation (grüne Leitung in Abb. 5.6) verhindert einen zu starken Temperaturabfall im Leitungssystem.

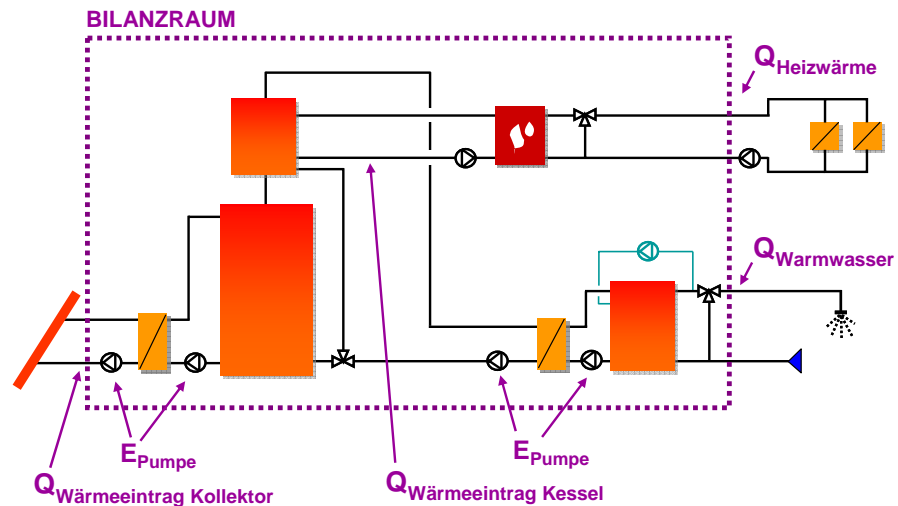
In der VDI 6002 finden sich Richtwerte für die Anlagendimensionierung; für die Größe des Solarpufferspeichers wird von einer günstigen Relation von ca. 50 l pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche ausgegangen. Diese Relation wurde in der Modellierung umgesetzt (47 l pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche). Der Kessel-Pufferspeicher und der Trinkwasserspeicher wurden konstant mit 1.0 m<sup>3</sup> Speichervolumen angesetzt.

In den Simulationsrechnungen wurden die folgenden Systemgrößen analysiert:

- Solarer Pufferspeicher 47 l pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche; Flachkollektor variiert von 70 bis 300 m<sup>2</sup>
- Solarer Pufferspeicher 47 l pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche; Vakuum-Röhrenkollektor (direktdurchströmt), variiert von 70 bis 300 m<sup>2</sup>



**Abbildung 5.6** Modellschema einer solaren Trinkwassererwärmung für große Anwendungen, hier für das Mehrfamilienhaus. Der Solarpufferspeicher wird nur solarthermisch beladen (monovalent): ist die Eintrittstemperatur aus dem Rücklauf des Trinkwasser-Wärmeübertragers höher als die Temperatur im Solarpufferspeicher wird der Rücklauf durch Umschaltung des 3-Wege-Ventils in den Kesselpufferspeicher geleitet. Die Gebäudebeheizung erfolgt ausschließlich über den Gaskessel.



**Abbildung A5.7** Bilanzraum für die solare Trinkwassererwärmung im Mehrfamilienhaus. Je nach nutzbarem Wärmeeintrag des Kollektors und nach Größe der Systemverluste verringert sich der benötigte Wärmeeintrag aus dem Kessel gegenüber dem Referenzsystem.

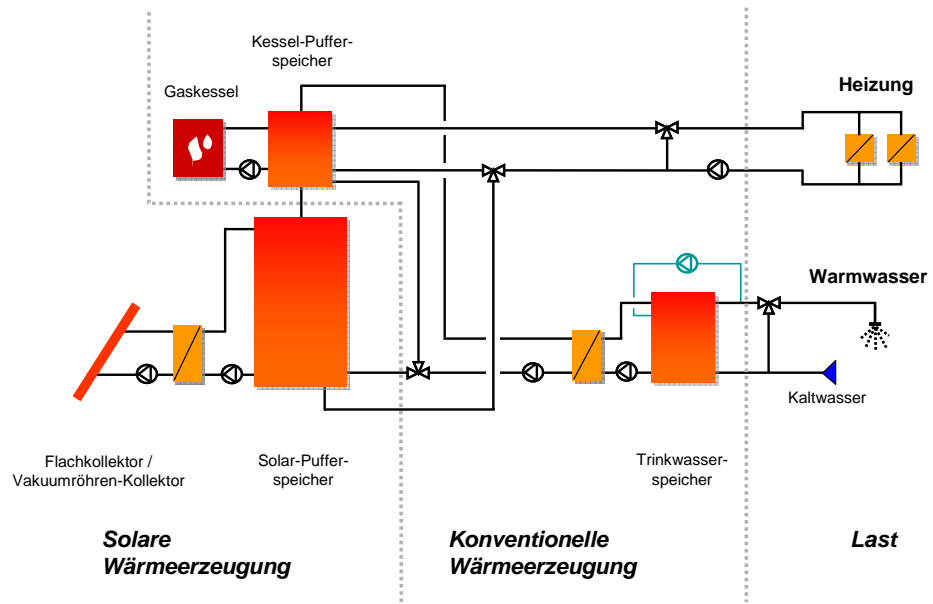
### A5.2.2 Mehrfamilienhaus - Kombisystem

Das Anlagenschema des Systems der solaren Trinkwassererwärmung wurde dahingehend modifiziert, dass nun auch die Heizung in das Speichersystem eingebunden ist. Analog zur Versorgung des Trinkwasserspeichers wird dem Rücklauf über den wärmeren Solarpuffer Wärme zugeführt, andernfalls erfolgt der Rücklauf direkt über den Kessel-Pufferspeicher. Dadurch wird auch hier der Solarpufferspeicher nur solarthermisch beladen.

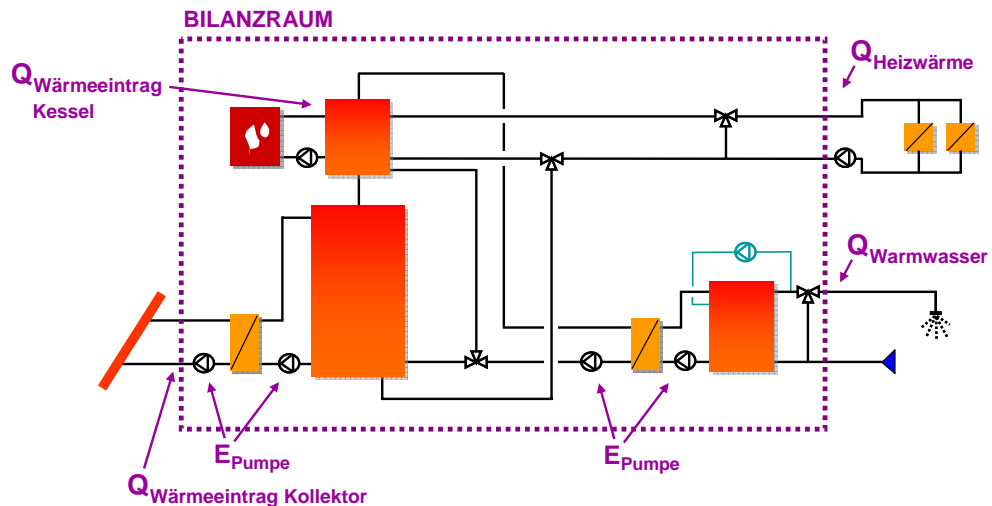
In Kombisystemen ist das spezifische Speichervolumen in der Regel größer als bei solarer Trinkwassererwärmung. In den Modellrechnungen wurde die Speichergröße mit einer konstanten Relation von ca. 75 l pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche angesetzt. Der Kessel-Pufferspeicher und der Trinkwasserspeicher wurden jeweils konstant auf 1.0 m<sup>3</sup> Speichervolumen gehalten.

In den Simulationsrechnungen wurden die folgenden Systemgrößen analysiert:

- Solarer Pufferspeicher 75 l pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche;  
Flachkollektor variiert von 70 bis 300 m<sup>2</sup>
- Solarer Pufferspeicher 75 l pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche;  
Vakuum-Röhrenkollektor (direktdurchströmt), variiert von 70 bis 300 m<sup>2</sup>



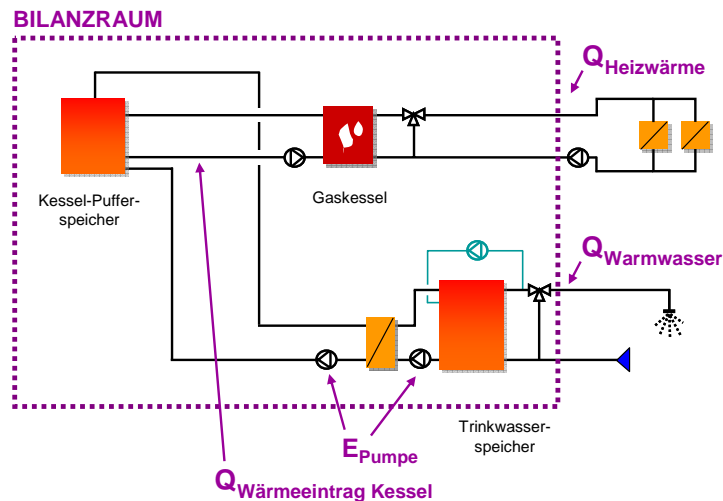
**Abbildung 5.8** Modellschema der Kombianlage für das Mehrfamilienhaus.



**Abbildung A5.9** Bilanzraum für das Kombisystem im Mehrfamilienhaus. Je nach nutzbarem Wärmeeintrag des Kollektors und nach Größe der Systemverluste verringert sich der benötigte Wärmeeintrag aus dem Kessel gegenüber dem Referenzsystem.

### A5.2.3 Mehrfamilienhaus - Referenzsystem

Abbildung A5.10 zeigt das Referenzsystemmodell, mit dem der Wärmebedarf zu Vergleichszwecken mit einem nicht-solarem Heizsystem berechnet wurde. Kessel-Pufferspeicher und Trinkwasserspeicher haben jeweils ein Volumen von  $1.0 \text{ m}^3$ .



**Abbildung A5.10** Bilanzraum für das Referenzsystem der Wärmeversorgung (Mehrfamilienhaus). Der Wärmeeintrag des Kessels umfasst  $Q_{\text{Warmwasser}}$ ,  $Q_{\text{Heizwärme}}$  sowie zusätzliche Wärmeverluste im Speicher und in den Leitungen.

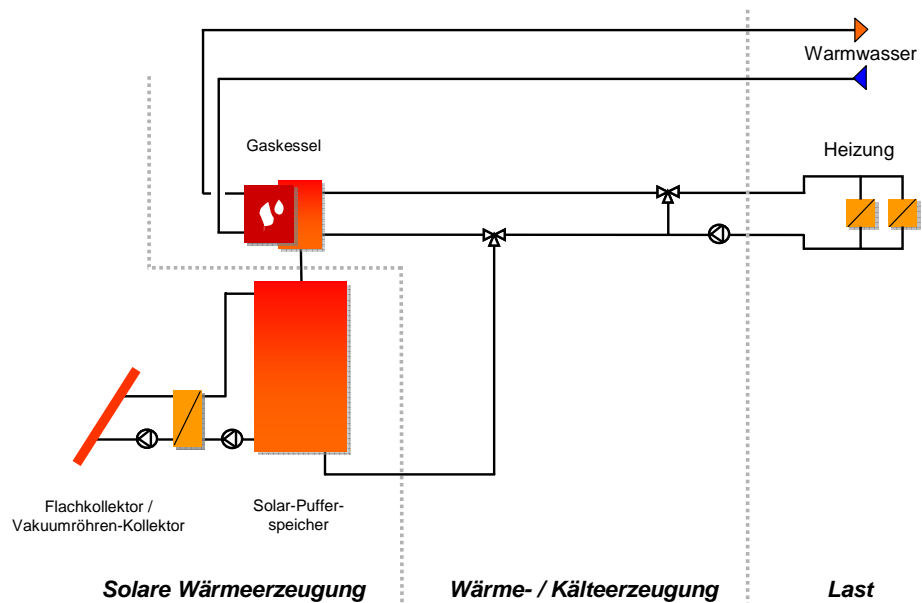
### A5.3 Bürogebäude

Im Bürogebäude werden zwei Konfigurationen berechnet:

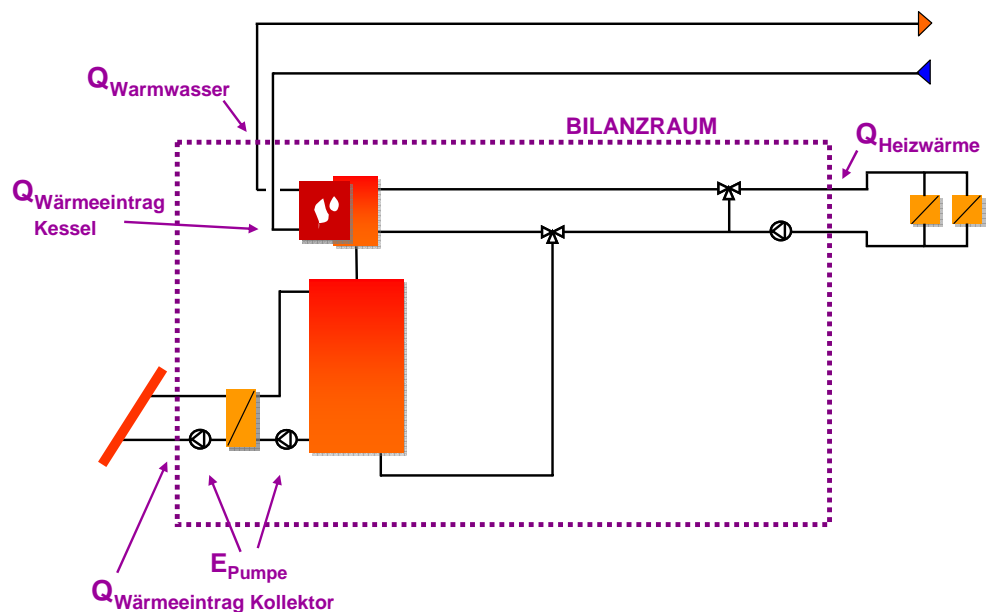
1. Solare Heizungsunterstützung - hier werden die Ergebnisse wie in den anderen Gebäuden auf den Wärmebedarf Heizen und Warmwasser bezogen. Der Kältebedarf für die sommerliche Kühlung bleibt unberücksichtigt;
2. Solare Kühlung – hier wird der Nutzkältebedarf zur Temperaturbegrenzung im Bereich der Büro- und Seminarflächen auf 26°C (sommerliche Kühlung) mit in den Wärmebedarf einbezogen.

#### A5.3.1 Solare Heizungsunterstützung

In dieser Variante wird lediglich die Gebäudeheizung solarthermisch unterstützt; Trinkwarmwassererbereitung erfährt keine solare Unterstützung. Das Anlagenmodell ist entsprechend Abbildung A5.11 aufgebaut.



**Abbildung A5.11** Solare Heizungsunterstützung im Bürogebäude. Heizungswasser kann solar erwärmt und, falls erforderlich, im Gaskessel auf das erforderliche Heizungstemperaturniveau (55°C) nachgeheizt werden. Die Trinkwassererwärmung erfolgt ausschließlich über den Gaskessel.



**Abbildung A5.12** Bilanzraum für die solare Heizungsunterstützung im Bürogebäude. Je nach nutzbarem Wärmeeintrag des Kollektors und nach Größe der Systemverluste verringert sich der benötigte Wärmeeintrag aus dem Kessel gegenüber dem Referenzsystem.

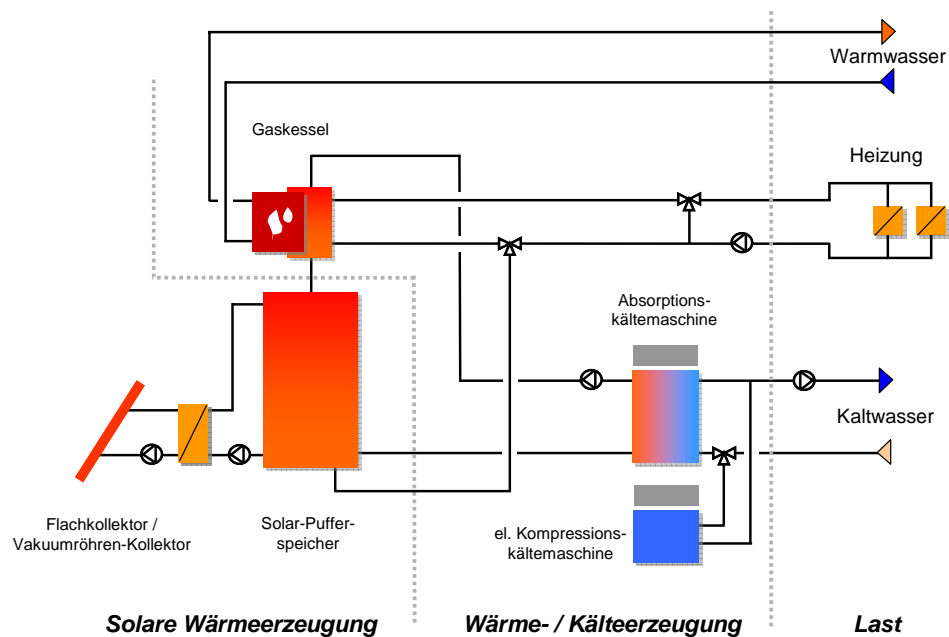
In den Simulationsrechnungen wurden die folgenden Systemgrößen analysiert:

- Solarer Pufferspeicher 50 l pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche; Flachkollektor variiert von 200 bis 600 m<sup>2</sup>
- Solarer Pufferspeicher 75 l pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche; Vakuum-Röhrenkollektor (direktdurchströmt), variiert von 70 bis 300 m<sup>2</sup>

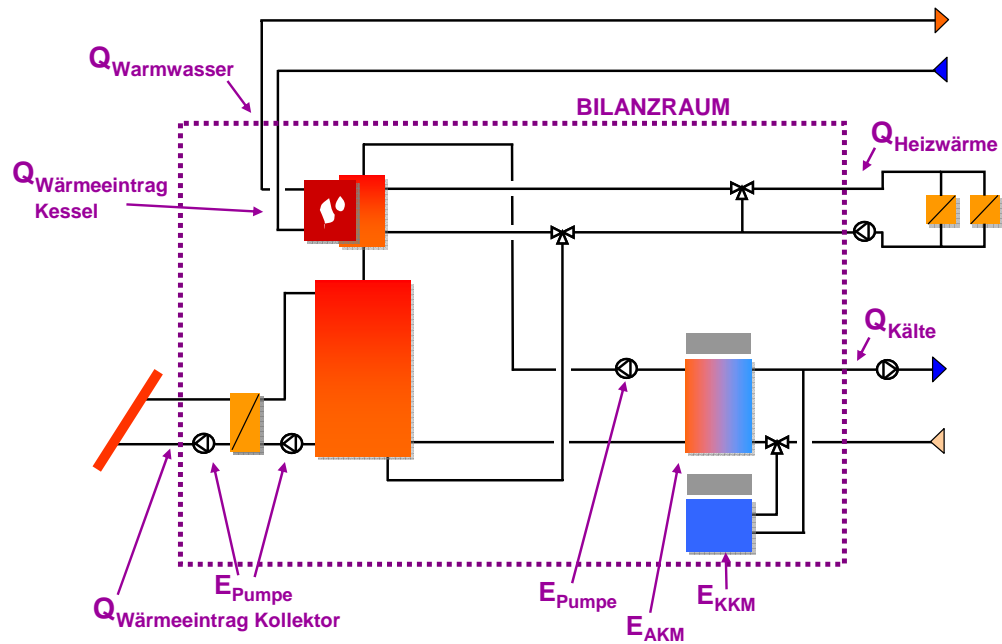
### A5.3.2 Solare Kühlung und Heizungsunterstützung

Das Schema der Anlage zeigt Abbildung A5.13. Das System enthält zwei Kälteerzeuger: eine thermisch angetriebene Absorptionskältemaschine (oder Adsorptionskältemaschine) AKM und eine konventionelle elektrisch angetriebene Kompressionskältemaschine KKM. Die thermisch angetriebene Kältemaschine ist bei Kälteanforderung in Betrieb, sobald der Solarspeicher über Wärme auf ausreichend hohem Temperaturniveau zum Antrieb der AKM verfügt ( $> 80^{\circ}\text{C}$ ). Ist dies nicht der Fall und es besteht weiterhin Kältebedarf, nimmt die KKM den Betrieb auf. Aus dem Gaskessel wird keine Wärme zum Betrieb der AKM entnommen; fossil erzeugte Wärme wird nur zur Gebäudeheizung eingesetzt. Der Gaskessel operiert nur auf dem Heizungstemperaturniveau.

Die Kühlastprofile in den Lastzeitreihen des Bürogebäudes weisen Spitzenlasten bis 160 kW (Passau) bzw. 140 kW (Essen) auf, allerdings nur in wenigen Zeiträumen der Kühltage. Es ist nicht sinnvoll, beide Kälteerzeugungseinrichtungen auf die Spitzenlast auszulegen. In den Modellrechnungen wurde eine Nennleistung der thermisch angetriebenen Kältemaschine von 80 kW angesetzt; zur Spitzenlastversorgung müssen dann beide Kältemaschinen eingesetzt werden. Durch diese Begrenzung kann in der Praxis ein effizienterer Betrieb der AKM erreicht werden (geringerer Teillastbetrieb).



**Abbildung A5.13** Schema der Anlage zum solaren Kühlen und zur Heizungsunterstützung im Bürogebäude.

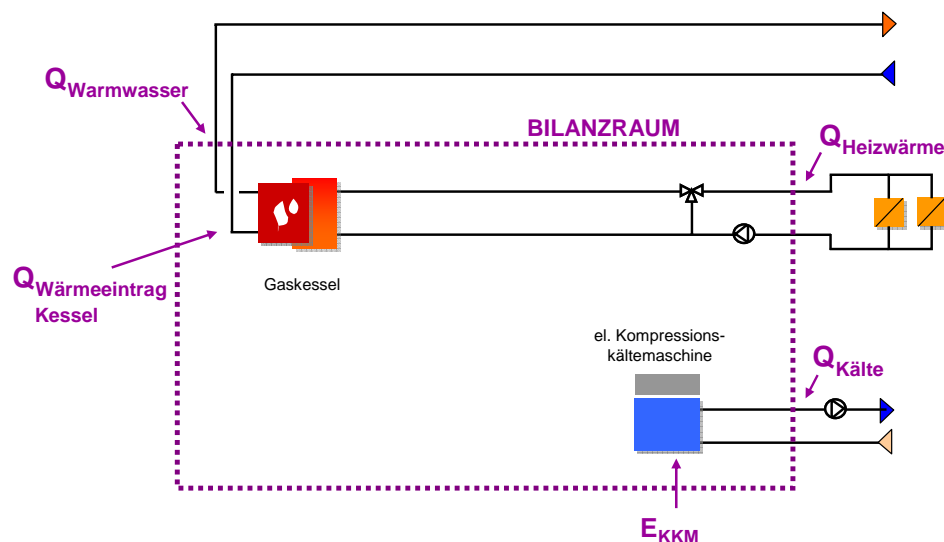


**Abbildung A5.14** Bilanzraum für die solare Kühlung und Heizungsunterstützung im Bürogebäude.

Aufgrund des höheren Temperaturniveaus für den Antrieb der Absorptionskältemaschine können solche Systeme nur mit hochwertigen Kollektoren mit verringerten Wärmeverlusten im Temperaturbereich zwischen 80°C und 95° betrieben werden (FK-plus bzw. VRK-plus; s. Anhang A5.4).

### A5.3.3 Bürogebäude - Referenzsystem

Abbildung A5.14 zeigt das Referenzsystemmodell, mit dem der Wärmebedarf für Heizen und Warmwasser sowie der Strombedarf zu Vergleichszwecken mit einem nicht-solarem Heizsystem berechnet wurde.

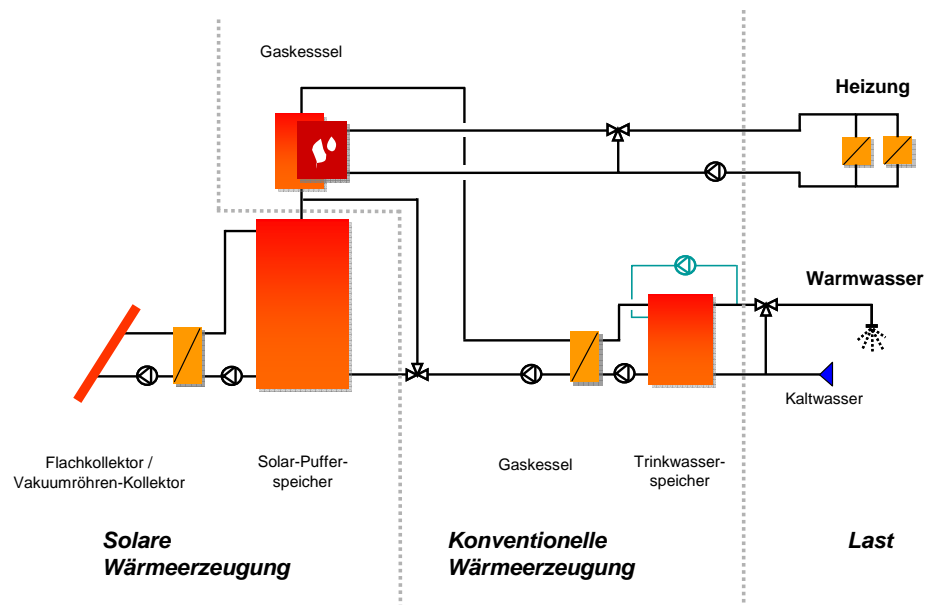


**Abbildung A5.15** Bilanzraum für das Referenzsystem zur Wärme- und Kälteversorgung für das Bürogebäude. In der ausschließlichen Heizungsunterstützung wird der Kältebedarf nicht in die Bilanz aufgenommen.

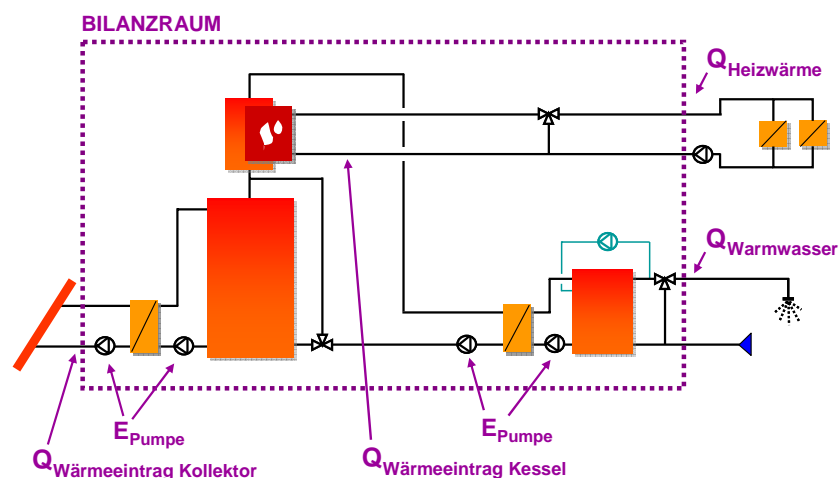
## A5.4 Sportanlage

Für die Sportanlage wird lediglich die solare Trinkwassererwärmung betrachtet. Das System ist ähnlich der Solaranlage im Mehrfamilienhaus aufgebaut, ein Kesselpufferspeicher wurde nicht berücksichtigt. Die Gebäudeheizung erfolgt ausschließlich über den Gaskessel.

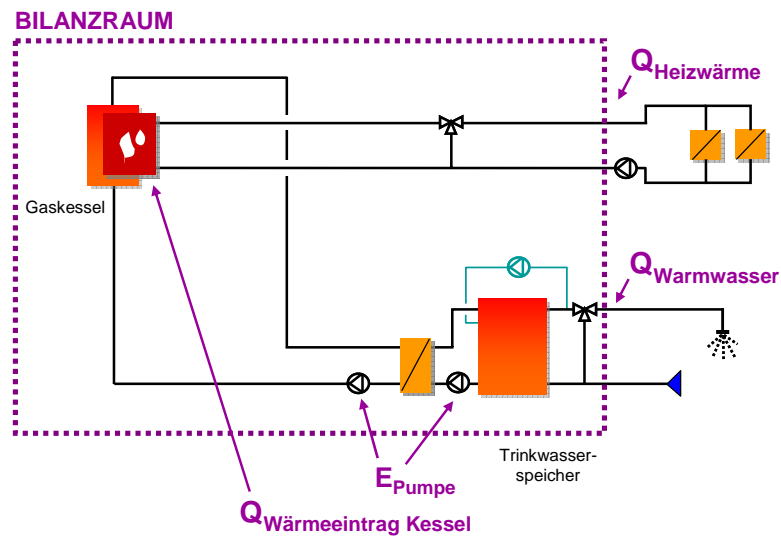
Wegen des Zeitversatzes zwischen solarer Wärmeerzeugung und Wärmenutzung (nachmittages bis abends) wurde der Solar-Pufferspeicher mit 75 l pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche etwas größer als üblich dimensioniert; dadurch konnte eine deutliche höhere Ausnutzung des Kollektorsystems erzielt werden. Stichprobenrechnungen mit einer weiteren Vergrößerung auf 100 k/m<sup>2</sup> zeigten keine signifikanten Leistungssteigerung des Kollektorsystems mehr.



**Abbildung 5.16** Modellschema einer solaren Trinkwassererwärmung für große Anwendungen, hier für die Sporthalle. Der Solarpufferspeicher wird nur solarthermisch beladen (monovalent): ist die Eintrittstemperatur aus dem Rücklauf des Trinkwasser-Wärmeübertragers höher als die Temperatur im Solarpufferspeicher wird der Rücklauf durch Umschaltung des 3-Wege-Ventils in den Gaskessel geleitet. Die Gebäudebeheizung erfolgt ausschließlich über den Gaskessel.



**Abbildung A5.17** Bilanzraum für die solare Trinkwassererwärmung der Sporthalle. Je nach Wärmeeintrag des Kollektors und nach Größe der Systemverluste verringert sich der benötigte Wärmeeintrag aus dem Kessel gegenüber dem Referenzsystem.



**Abbildung A5.18** Bilanzraum für das Referenzsystem der Wärmeversorgung für die Sporthalle. Der Wärmeeintrag des Kessels umfasst  $Q_{\text{Warmwasser}}$ ,  $Q_{\text{Heizwärme}}$  sowie zusätzliche Wärmeverluste im Speicher und in den Leitungen zur Warmwasserversorgung.

#### A5.4 Modellparameter

Grundsätzlich wurden die Modellrechnungen für zwei verschiedene Kollektortypen durchgeführt, um die Spannweite der Wärmeeinsparungen durch Solaranlagen hervorzuheben: Flachkollektoren (FK) und Vakuumröhren-Kollektoren (VRK).

Flachkollektoren werden insbesondere in Systemen zur solaren Trinkwassererwärmung überwiegend eingesetzt, diese Kollektoren sind vergleichsweise kostengünstig. Vakuumröhren-Kollektoren sind teurer, es lassen sich jedoch teilweise deutlich höhere Kollektorerträge erzielen. Allerdings ist hier die Bandbreite in der technischen Ausführung in den angebotenen Fabrikaten hoch.

Unter den Vakuumröhrenkollektoren ist der am häufigsten eingesetzte Kollektor der direkt-durchströmte Kollektor (VRK-direkt), d.h., das Kollektorfluid durchströmt auch den gesamten Kollektorkreis. Eine andere Variante nutzt in der evakuierten Röhre eine heat-pipe mit separatem Wärmeträgerkreis, der über einen Wärmeübertrager an das Fluid im restlichen Kollektorkreis angekoppelt ist (VRK-heat-pipe). Als Vorteil dieser Technik wird insbesondere von Anbietern eine erhöhte Stillstandsicherheit erwähnt, der ansonsten bei Vakuumröhren-Kollektoren besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. In einigen Modellrechnungen zum Einfamilienhaus wurden auch Parameter eines VRK-heat-pipe verwendet.

Die verwendeten Parametersätze, mit denen die Kollektoren in den Modellen beschrieben werden, repräsentieren durchschnittliche bis gute Qualitäten des jeweiligen Kollektortyps.

Die Kollektorflächenangaben in dieser Studie beziehen sich jeweils auf die **Aperturfläche** des Kollektors (Lichteintrittsfläche). Insbesondere bei Vakuum-

röhren-Kollektoren kann die Bruttofläche des Kollektors bauartbedingt deutlich davon abweichen.

In der Nutzungsart „solare Kühlung und Heizungsunterstützung“ im Bürogebäude wurden Kollektortypen mit verringerten Wärmeverlusten eingesetzt; dies wird in der Ergebnisdarstellung durch FK-plus bzw. VRK-plus gekennzeichnet. Bei dem Flachkollektor handelt es sich dabei exemplarisch um einen Ein-Scheibenkollektor mit Anti-reflex-Beschichtung; bei dem Vakuumröhrenkollektor um eine Bauart nach dem Sydney-Prinzip mit außenliegendem CPC-Spiegel.

Orientierung der Kollektorfelder: in allen Berechnungen Süd-Ausrichtung mit 40° Anstellwinkel; keine Abschattung.

Tabelle A5.1 enthält die verwendeten Parameter für das Kollektormodell.

	<b>C0</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>IAM<sub>long,50°</sub></b>	<b>IAM<sub>trans,50°</sub></b>
<b>Kollektor</b>	-	W/(m <sup>2</sup> *K)	W/(m <sup>2</sup> *K <sup>2</sup> )	-	-
FK	0.78	3.8	0.012	0.93	0.93
VRK-direkt	0.779	2.103	0.0107	0.98	1.45
VRK-heat-pipe	0.573	2.085	0.0083	0.96	1.37
FK-plus	0.854	3.37	0.0104	0.93	0.93
VRK-plus	0.675	0.697	0.003	0.93	1.08

**Tabelle A5.1.** Parameter für die Kollektormodelle. Der Winkelkorrekturfaktor (IAM) wird im Modell über mehrere Stützpunkte des Einfallswinkels der Direktstrahlung eingelesen, hier sind nur die Werte für jeweils 50° longitudinal bzw. transversal angegeben.

Wärmedämmung:

Für die Isolierung der Rohrleitungen und Speicher wurde generell eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0.03 \text{ W/(m}^* \text{K)}$  angesetzt. Für die Dämmstärke des Isoliermaterials gilt bei Rohrleitungen:

$$d_{\text{Isolierung}} = \text{maximum (Nennweite DN, 30) [mm]}.$$

Die Nennweite der Rohrleitungen im Kollektorkreis ergeben sich aus einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 0.5 m/s.

In den Solarspeichern bis 1000 l Speichervolumen wird eine Dämmstärke von 110 mm angenommen; darüberhinaus beträgt die Dämmstärke 150 mm.

Wärmeträger:

Im frostgefährdeten primär-Kollektorkreis: Wasser - Propylen-Glykol; sonst Wasser.

Solarkreisumpen:

Die Stromaufnahme der Pumpen wurde durch eine grobe Abschätzung der Druckverluste im Solarkreis und durch Kenndaten handelsüblicher Solarpumpen ermittelt. Im Rechenmodell wird die Solarkreispumpe massenstromgeregelt im Bereich von 40% bis 100% des Nennmassenstroms.

Annahmen für das System „solare Kühlung“:

Die Modellierung des System zur solaren Kühlung im Bürogebäude wurde auf kältetechnischer Seite vereinfacht durchgeführt. Thermisch angetriebene Kühlung operiert mit drei Temperaturniveaus: der Antriebstemperatur (im Generator bzw. Austreiber), der Kaltwassertemperatur (im Verdampfer) sowie der Rückkühltemperatur (im Kondensator) auf mittlerem Temperaturniveau. Prinzipiell sind die Wärmeaufnahme und die Kälteleistung einer thermisch angetriebenen Kältemaschine von allen drei Temperaturniveaus abhängig. Für einen idealen Kreisprozess lässt sich ein ideales Wärmeverhältnis COP (Coefficient of Performance  $COP = \text{Kälteleistung} / \text{Antriebswärmeleistung}$ ) herleiten [Henning 2007]:

$$COP_{ideal} = \frac{T_C}{T_H} \cdot \frac{T_H - T_M}{T_M - T_C} \quad [-],$$

mit  $T_C$  = Kaltwassertemperatur,  $T_H$  = Antriebstemperatur und  $T_M$  = Rückkühltemperatur (in Kelvin).

Marktgängige Ad –oder einstufige Absorptionskältemaschinen erreichen in der Regel unter Nennbetriebsbedingungen COP-Werte zwischen 0.6 und 0.8 und sind einerseits damit weit vom idealen Wärmeverhältnis entfernt, andererseits zeigen die reellen Werte deutlich weniger Dynamik in der Abhängigkeit von Kaltwasser- und Rückkühltemperatur. Mit Einschränkungen kann der ideale COP dennoch als Modellansatz verwendet werden, wenn die Kaltwassertemperatur und Rückkühltemperatur nahezu konstant gehalten werden. In der Modellrechnung wurden folgende Randbedingungen gesetzt:

$T_{\text{Kaltwasser}}$ :	konstant 12°C
$T_{\text{Rückkühlung}}$ :	maximum (28°C, $T_{\text{Feuchtkugel}} + 10 \text{ K}$ )
COP:	minimum ( $f \cdot COP_{ideal}$ , 0.8); $f = 0.23$
$P_{\text{Kälte}}$ :	$P_{\text{Kälte,Nennleistung}} / 100 * (-125 + 2.5 \cdot T_H)$ [kW].
$P_{\text{el, Rückkühlung}}$ :	0.035 kWh <sub>el</sub> pro kWh thermische Rückkühlwärme

Die Modellwerte orientieren sich an den Leistungsdaten einer markverfügbaren Absorptionskältemaschine mit ca. 80 kW Nennleistung. Mit den angegebenen Modellparametern werden Jahreswerte des COP zwischen 0.62 und 0.68 in Abhängigkeit von Standort und Kollektorfläche erreicht.

Für die Kompressionskältemaschine wurde ein linearer Zusammenhang zwischen der Arbeitszahl (Kälteleistung / elektrischer Energieeinsatz für Kompressor und Rückkühlung) gewählt:

$$\text{Arbeitszahl:} \quad 3.85 - 0.0825 \cdot (T_{\text{Umgebung}} - T_{\text{Kaltwasser}}) \quad [\text{kW}_{\text{Kälte}} / \text{kW}_{\text{el}}];$$

Mit diesem Ansatz ergeben sich Jahres-Arbeitszahlen zwischen 2.8 und 3.1, je nach Standort und Einsatzhäufigkeit der Kompressionskältemaschine (im Referenzsystem, Passau: 3.0).

In den Modellrechnungen wird die Stromeinsparung durch die solare Kühlung bilanziert, sie setzt sich zusammen aus Mehraufwand für Solarkreisumpen, Strombedarf für Antrieb und Rückkühlung der thermisch angetriebenen Kältemaschinen abzüglich der Stromeinsparung im Betrieb der Kompressionskältemaschine im Vergleich zum Referenzsystem.

## A6 Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsabschätzung

### A6.1 Grundannahmen

In der Wirtschaftlichkeitsabschätzung werden Mehrkosten der Investition berücksichtigt, die durch die Erweiterung der Wärmeversorgung vom konventionellen System zum solar unterstützten System entstehen. Die Investitionskosten des Solarsystems werden daher gegebenenfalls vermindert um eingesparte Kosten gegenüber dem Referenzsystem: Beispiel: der Trinkwasserspeicher im Paketsystem Trinkwassererwärmung für das Einfamilienhaus ersetzt den (einfacheren) Trinkwasserspeicher im Referenzsystem. Die Berechnung der Investitionskosten und der Jahreskosten folgt den Empfehlungen in der VDI 6002. Die Investitionskosten umfassen somit die Erstanschaffung, vermiedene Kosten, Planungs- und Installationskosten. Planungskosten werden nicht für die Systempakete im Einfamilienhaus angerechnet. Es wird keine Förderung der Solaranlage berücksichtigt.

Tabelle 6.1 enthält die Randbedingungen für die Kostenberechnung.

Die Jahreskosten  $K_{a,solar}$  der Solaranlage setzen sich zusammen aus den annuisierten Investitionskosten, den jährlichen Wartungskosten sowie den gegenüber dem Referenzsystem erhöhten Stromkosten (Summe aus Stromverbrauch Solarkreispumpen unter Berücksichtigung des evtl. niedrigeren Stromverbrauchs im konventionellen Heizkreis gegenüber dem Referenzsystem). Bei der Anlage „solares Kühlen“ im Bürogebäude werden die Jahreskosten durch die Einsparungen im Stromverbrauch (weniger Stromaufnahme der elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschine) verringert. In den Stromkosten wird jeweils der Arbeitspreis berechnet; Leistungspreise bleiben unberücksichtigt.

Neben den Investitionskosten und den eingesparten Brennstoffkosten wird als Beurteilungsgröße das Maß *Kosten der eingesparten Wärme* benutzt. Dieser Wert ist definiert durch

$$\text{Kosten der eingesparten Wärme} = (K_{a,solar} - K_{a,Betrieb}) / (E_{a,Wärme}) \quad [€kWh]$$

mit

$K_{a,solar}$  = Jahreskosten Solarsystem

$K_{a,Betrieb}$  = jährlich eingesparte Brennstoffkosten

$E_{a,Wärme}$  = jährliche Einsparung Wärmebedarf (gemäß Def. Kapitel 5.1).

Die Kosten der eingesparten Wärme beziffern somit die jährlichen Mehrkosten durch die Erweiterung zum Solarsystem, mit Berücksichtigung der jährlichen Einsparungen, pro kWh des eingesparten Wärmebedarfs. Die Kosten der eingesparten Wärme sind niedriger als die in VDI 6002 definierten solaren Wärmegegestehungskosten, da in die Berechnung der Wärmegegestehungskosten nicht die eingesparten Brennstoffkosten eingehen.

Kapitalzins	6	%
Betrachtungszeitraum (alle Komponenten)	20	a
Installationskosten solarthermisches System Ein- und Mehrfamilienhaus	25	% der Solarsystemkosten
Installationskosten solarthermisches System Bürogebäude	20	% der Solarsystemkosten
Installationskosten thermische Kühlung	15	% der Kosten Absorptions- Kältemaschine
Planungskosten, Abschätzung nach HOAI (nicht bei EFH)	10	% der Investition
Wartung	1.25	%/a der Investition
Mittelwert Strompreis	0.26	€/kWh <sub>el</sub>
Mittelwert Brennstoffpreis	0.0913	€/kWh <sub>th</sub>

**Tabelle A6.1** Eckdaten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung. Planungskosten wurden nicht bei den Paketsystemen im Einfamilienhaus angesetzt.

## A6.2 Strom- und Brennstoffkosten

Energiepreise:

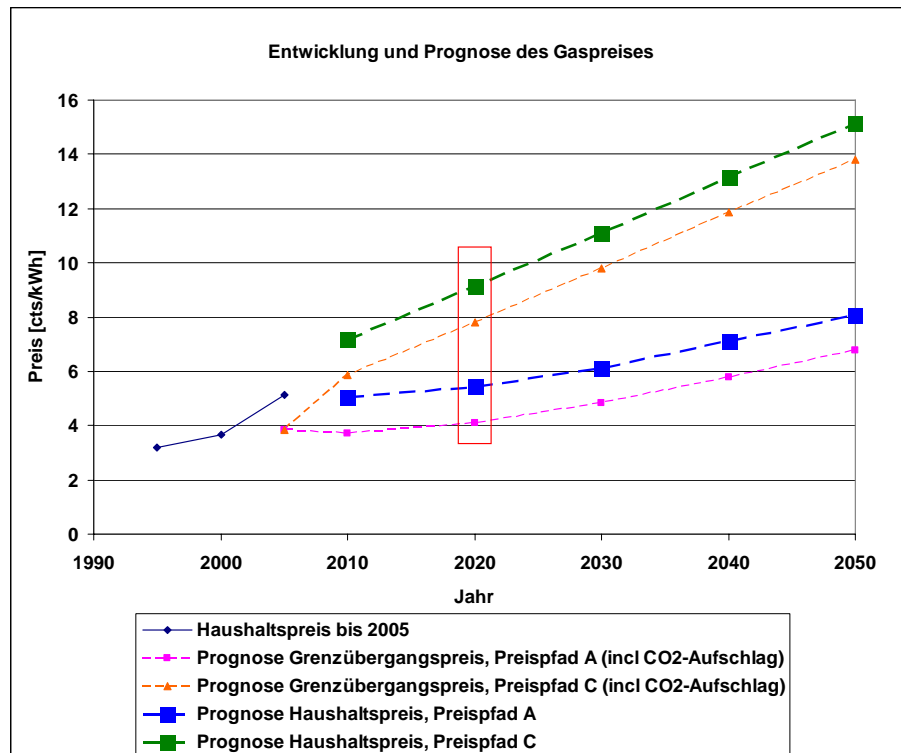
Zur Berechnung der Strom- und Brennstoffkosten (Erdgas) wurden sowohl die bisherigen als auch die zu erwartenden Energiekosten betrachtet. Als Betriebsdauer der Anlagen wurde ein Zeitraum von 20 Jahren angenommen, mit gleichzeitiger Annahme der Inbetriebnahme im Jahre 2010 (aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit wurde keine Veränderung in den Energiepreisen zwischen ENEC 2009 und 2012 vorgenommen). Auf Grund der annähernd linearen Preisprognose für diesen Zeitraum, die sowohl für den Gas- und den Elektroenergiepreis gilt, wurden für die Berechnungen die für das Jahr 2020 prognostizierten Preise angenommen.

Gaspreis:

Als Datengrundlage für die Prognose des Gaspreises wurden die in [Nitsch Leitstudie 2007] aufgeführten Daten genutzt. Hierin sind sowohl die Entwicklung des Importpreises und Haushaltspreises für Erdgas für den Zeitraum von 1995 – 2005 dokumentiert als auch die Prognose des Grenzübergangspreises incl. CO<sub>2</sub>-Aufschlag für den Zeitraum von 2005 – 2050 angegeben. Außerdem wird in den Prognosen noch zwischen 3 Preispfaden unterschieden: Preispfad A „Niedriges Niveau“, Preispfad B „Mäßiger Anstieg“ und Preispfad C „Deutlicher Anstieg“. In den Berechnungen der aus der Wärmeeinsparung resultierenden Kosteneinsparungen wird der Preispfad C betrachtet.

Die in [Nitsch Leitstudie 2007] angegebenen Gaspreise als auch die daraus prognostizierten Haushaltspreise sind in der Abb. A6.1 dargestellt. Die Differenz

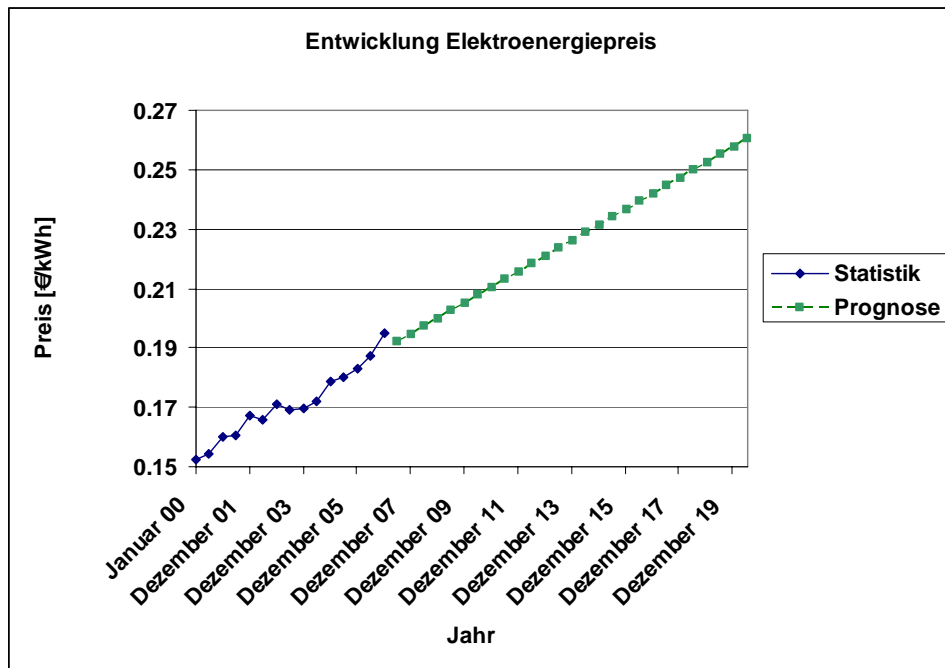
zwischen dem Haushaltspreis Haushaltspreis aus dem Jahr 2005 und dem zu diesem Zeitpunkt gültigen Grenzübergangspreis wurde in der Preisprognose berücksichtigt. Damit ergibt sich im Jahr 2020 für den Preispfad C ein Haushaltspreis von **9,13 €-ct/kWh**.



**Abbildung A6.1** Prognose des Gaspreises auf Datengrundlage der Leitstudie 2007 „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“.

Preis für Elektroenergie:

Als Datengrundlage für die Prognose des Elektroenergiepreises wurden die in [Destatis 2008] verfügbaren Daten für den Zeitraum von 2000 – 2007 genutzt und daraus die Preisentwicklung bis 2020 abgeleitet. Hierbei erfolgte aus der annähernd linearen Preistendenz der vergangenen Jahre eine ebenfalls lineare Preisprognose. Dies erscheint auch im Vergleich mit der in [Nitsch Leitstudie 2007] angegebenen Prognose des Gaspreises zulässig. Damit ergibt sich entsprechend der Abb. A6.2 für das Jahr 2020 ein Preis von **26 €-ct/kWh**.

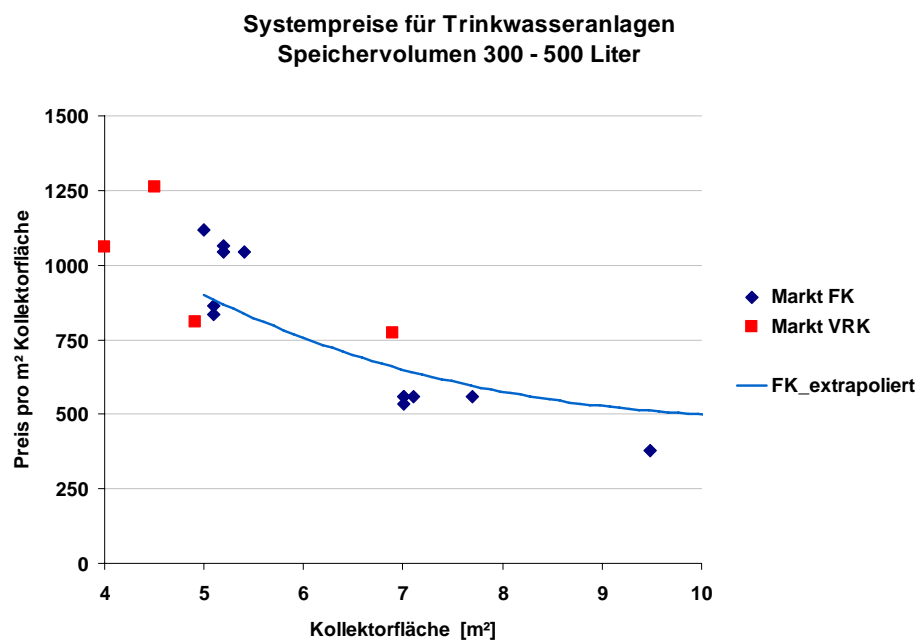
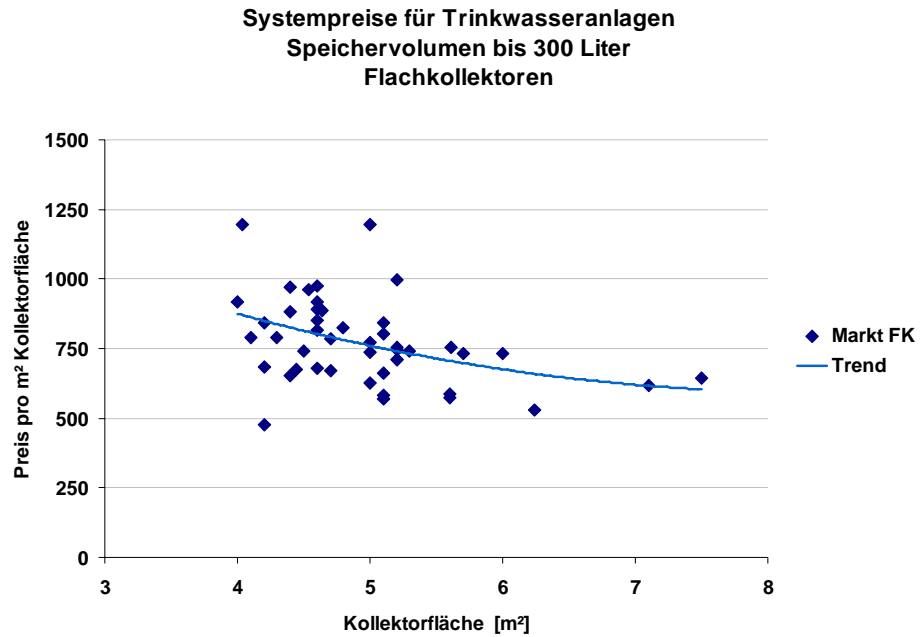


**Abbildung A6.2** Prognose des Strompreises auf Datengrundlage des Statistischen Bundesamtes und durch Datenextrapolation.

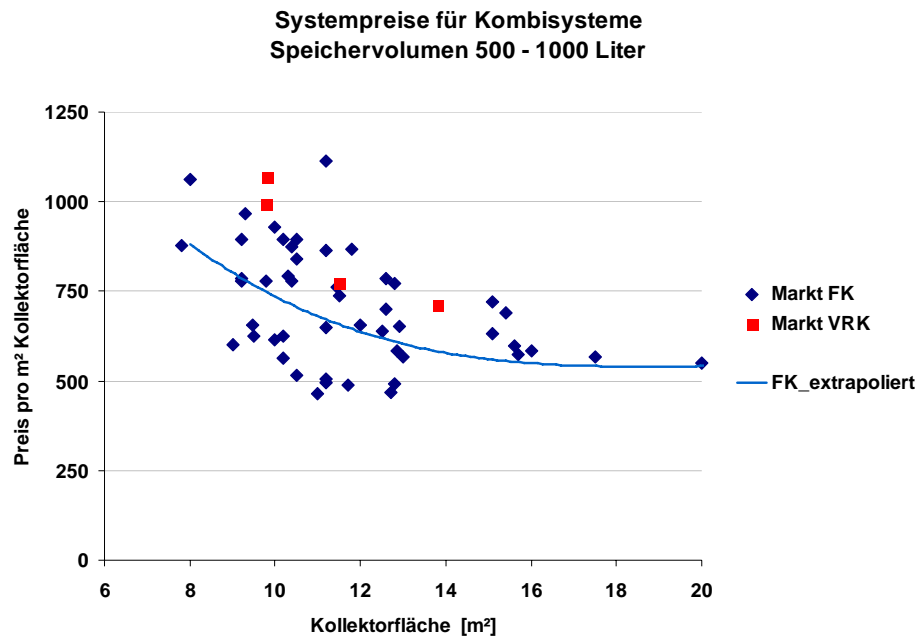
### A6.3 Datenbasis Kosten solarthermischer Systeme - Paketsysteme Trinkwassererwärmung und Kombisysteme

Die Preise für Paketsysteme der solaren Trinkwassererwärmung und Kombisysteme für kleine Anwendungen (Einfamilienhaus) wurden Marktübersichten und Anbieterangaben [SWW 02/2008], [Warentest 03/2008] sowie internen Quellen entnommen. Die Abbildungen A6.3 und A6.4 enthalten einen Überblick über die spezifischen Preise pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche. Für die Wirtschaftlichkeitsabschätzung in der Studie wurde jeweils ein Preistrend abgeleitet.

Für Vakuumröhren-Kollektoren ist die verfügbare Datenmenge gering; in der Kostenabschätzung wurde daher der Preis für Systeme mit Flachkollektoren genutzt und pauschal um 15% erhöht.



**Abbildung A6.3** Systempreise (ohne Installation) für kleine solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung, getrennt nach Größe des Trinkwasserspeichers. Datenbasis: Zusammenfassung mehrerer Mrktübersichten und Quellen. FK: Systeme mit Flachkollektor; VRK: Systeme mit Vakuumröhren-Kollektor. Für die Kostenabschätzung in der Studie wurde die Trendkurve eingesetzt.



**Abbildung A6.4** Systempreise (ohne Installation) für kleine Kombisysteme. Datenbasis: Zusammenfassung mehrerer Marktübersichten und Quellen. FK: Systeme mit Flachkollektor; VRK: Systeme mit Vakuumröhren-Kollektor. Für die Kostenabschätzung in der Studie wurde die Trendkurve eingesetzt.

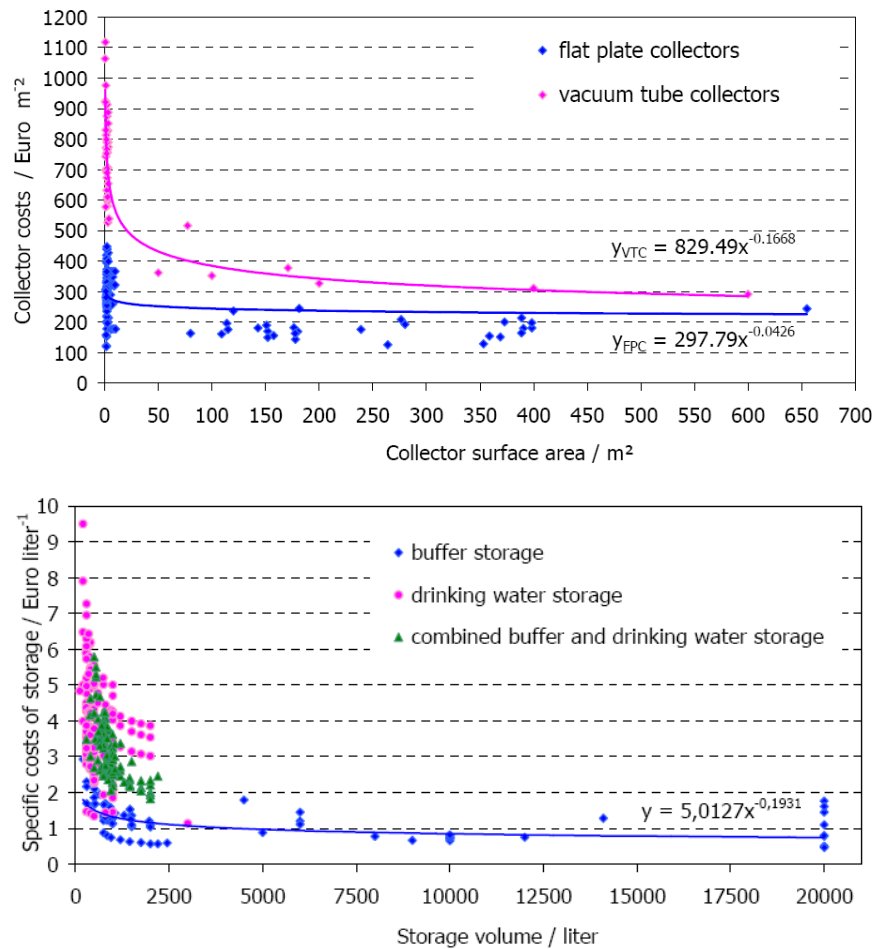
#### A6.4 Datenbasis Kosten solarthermischer Systeme - Große Anlagen zur Trinkwassererwärmung und Kombisysteme, solare Kühlung

Für diese Anlagen existieren wenige Quellen, z.B. Kostenabschätzungen aus dem Solarthermie 2000 Programm [SWT/ZfS 11/2007]. Allerdings sind die Kosten in hohem Maße abhängig von der jeweils betrachteten Systemkonfiguration und beinhalten auch die Kosten der Grundinstallationen, die auch im Referenzsystem erforderlich sind.

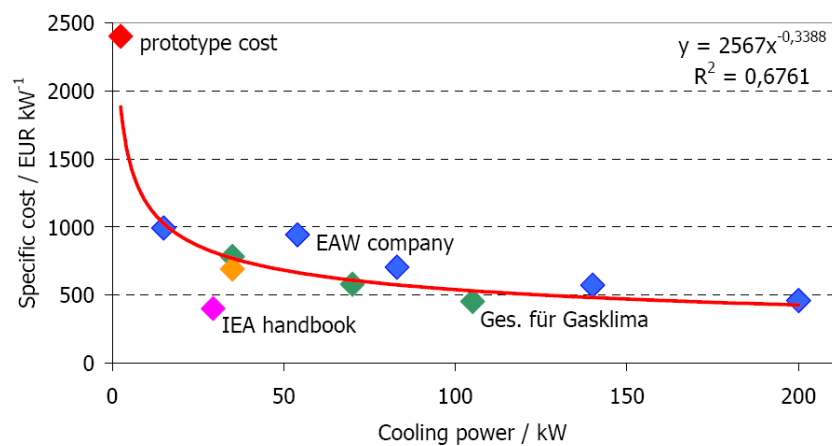
Für die Kostenermittlung in dieser Studie wurden daher die Preise der Einzelkomponenten, die über das Referenzsystem hinaus notwendig sind, einzeln abgeschätzt und so die Mehrkosten der solaren Erweiterung ermittelt. Die Hauptkosten entstehen dabei durch das Kollektorsystem und durch den solaren Pufferspeicher; dazu wurden Kostendregressionskurven aus [U.Eicker 2006] entnommen (s. Abbildung A6.5).

Weitere abgeschätzte Kosten für Aufständigung und hydraulischen Komponenten wie Rohrleitungen, Pumpen, Wärmeübertrager, Isolierungen usw. wurden addiert.

Für das System der solaren Kühlung im Bürogebäude sind die Investitionskosten der Absorptionskältemaschine entsprechend Abbildung 6.6 angenommen. Bei einer Nennkälteleistung von 80 kW in der Modellierung sind dies ca. 650 €/kW<sub>Nennkälte</sub>.



**Abbildung A6.5** Kostenfunktionen solarthermischer Kollektoren (oben) und Pufferspeicher (unten) für große solarthermische Systeme. Ohne Kosten der Aufständering und Installationskosten. Bildquelle: [U.Eicker 2006].



**Abbildung A6.6** Kostenfunktionen für thermisch angetriebene Kältemaschinen. Ohne Kosten des Rückkühlwerkes und ohne Installationskosten. Bildquelle: [U.Eicker 2006].