

Berechnen der Größe von Wasserspeichern zum saisonalen
Speichern von Wärme bei der ausschließlichen
Wärmeversorgung von Häusern mit Solarkollektoren

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur Dr.-Ing.

Vorgelegt

von Dipl.-Ing. Mohammad Al-Addous

geboren am 05.03.1971

in Jumha/Jordanien

Gutachter: Prof. Dr. W. Pötke, Freiberg
Prof. Dr. E. Specht, Magdeburg
Dr.- Ing. H.- G. Bittner, Hildesheim

Freiberg, den 19.07.2006

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde während meines Promotionsstudiums am Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. W. Pötke für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, seine ständige Diskussionsbereitschaft sowie für die freundliche Unterstützung bei der Bearbeitung des Themas.

Herrn Dr.-Ing. H.-G. Bittner, Herrn Prof. Dr. E. Specht danke ich für die Übernahme der Korreferate und für das Interesse, das meiner Arbeit entgegengebracht wurde.

Ich bedanke mich bei Herrn Dr. R. Shinaq von der Yarmouk University und Herrn Dr. Al-Karabshe Salleh von der Hashemite University in Jordanien für ihr Interesse und ihre Unterstützung sowie bei meinem Freund Herrn Dipl.Ing. Al-Kasawneh Yakub.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen möchte ich mich für die freundliche Aufnahme am Institut und für das angenehme Betriebsklima bedanken.

Ich danke meiner Frau und meinen Kindern für Ihre ständige Unterstützung. Dank gilt auch meiner Familie in Jordanien und meinem Bruder, die mich während meines Aufenthaltes in Deutschland ständig unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Motivation	3
3. Stand der Technik zur saisonalen Wärmespeicherung ..	8
3.1 Saisonale Heißwasserspeicher	9
3.2 Saisonale Kies - Wasser- Wärmespeicher	10
3.3 Saisonale Aquifer - Wärmespeicher	10
3.4 Saisonale Erdsonden – und Kavernenwärmespeicher	11
3.5 Speicherbaukosten	13
3.6 Latentwärmespeicher	13
3.7 Thermochemische Wärmespeicherung	15
4. Eigene Untersuchungen	17
4.1 Experimentelle Untersuchungen über den Gesamtwärmeverbrauch eines Hauses, über die Sonneneinstrahlung und über den Solarkollektorertrag	17
4.2 Theoretische Betrachtungen an einem Haus mit 115m ² Wohnfläche und einem spezifischen Gesamtwärmebedarf von 176,2 kWh/(m ² .Jahr)	20
4.2.1 Erhöhen der Fläche der Solarkollektoren zum Steigern der solaren Überschussenergie und zum Vermindern einer Zusatzheizung.....	20
4.2.2 Einfluß einer Wärmeisolierung des Hauses auf Wärmeverbrauch und Größe der Solarkollektorfläche.....	21
4.2.3 Größe der Wasserspeicher.....	24
4.3 Berechnungen für Hausgrößen bis zu 200 m ² Wohnfläche.	31

4.4	Experimentelle Untersuchungen zur Wärmespeicherfähigkeit von Basalt und von Paraffin	34
5.	Zusammenfassung	39
6.	Ausblick	41
7.	Tabelleverzeichnis	43
8.	Abbildungsverzeichnis	48
9.	Literaturverzeichnis	53
10.	Anhang	57

Symbolverzeichnis

Q_h	kWh	Heizwärmebedarf
Q_w	kWh	Warmwasserbedarf
G	kWh/m ² .a	Sonneneinstrahlung pro Jahr
s	cm	Isolationsdicke
A_k	m ²	Kollektorfläche
A_w	m ²	Wohnfläche
V_s	l	Volumen des Speichers
E_{glob}	W/m ²	Globalstrahlung
A_{Nutz}	W/h	Nutzfläche
Q_{SP}	W/h	sensible Wärmemenge
c_p	kJ/kg K.	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
Q	kWh	Wärmeaufnahme
m	Kg	Masse
t_A	°C	Arbeitstemperatur
T_{max}	°C	Maximale Temperatur
V_N	€/m ³	Nutzvolumenbezogene Baukosten
L	m	Länge
B	m	Breite
V_k	m ³	Volumen des Kieswassers
t_{ein}	°C	Eintrittstemperatur
t_{aus}	°C	Austrittstemperatur
K_{Real}	€	reale Kosten
K_{Bas}	€	Basiskosten
\dot{m}	l/s	Massenstrom
t	h	Zeit
q	%	Transmissionsgrad
ρ	%	Reflektionsgrad
n	Jahre	Amortisationsdauer
C	W/(m ² .K ⁴)	Strahlungskoeffizient
Q_{Fk}	kWh/m ² .a	Solarkollektorsertrag pro Jahr
α	W/m ² .K	Wärmeübergangskoeffizient
η_s	%	Speichernutzungsgrad
λ	W/m.K	Wärmeleitfähigkeit
ΔT	K	Temperaturdifferenz
Δh_s	kJ/kg	Schmelzenthalpie

Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
DLR	Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt
DWD	Deutscher Wetter Dienst
PCM	Phase Changing Materials
TCS	Thermochemische Speicherung
HDPE	Polyäthylen hoher Dichte Folie
BHKW	Blockheizkraftwerk
KWK	Kraft Wärme Kopplung
WP	Wärmepumpe
NRW	Nordrhein Westfalen
Be	Benladung
En	Entladung
VL	Vorlauftemperatur
RL	Rucklauftemperatur
RT 58	Paraffine
T_{Ein}	Eintritttemperatur
$T_{\text{Auß}}$	Austritttemperatur
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ISO	International Standardization Organization
Jan	Januar
Jul	Juli
Jun	Juni
min	Minimum
max	Maximum
Mrz	März
Nov	November
Apr	April
Dez	Dezember
Okt	Oktober
Feb	Februar
KW	Kaltwasser
WW	Warmwasser
Aug	August
Sep	September

1. Einleitung

Dem Kapitel Motivation zur Erläuterung der Gesichtspunkte, die zum Abfassen dieser Dissertation geführt haben, sei eine kurze Einleitung vorangestellt, um zunächst die im Thema genannten Schlagworte näher zu erläutern.

Wärmeversorgung von Gebäuden bedeutet zum einen Versorgung der Häuser mit Wärme zum Beheizen der Räume, gewöhnlich in Form von Warmwasser, das durch Heizkörper oder durch im Fußboden verlegte Rohre strömt, zum anderen Versorgung mit warmem sogenannten Brauchwasser, das im wesentlichen zum Duschen, zum Baden und in der Küche benötigt wird.

Bei der Heizung mittels Heizkörper wird heutzutage eine solche Heizkörperfläche installiert oder die Häuser sind so gut wärmeisoliert, dass es genügt, zur Aufrechterhaltung einer Raumtemperatur von 20°C das Warmwasser mit der sog. Vorlauftemperatur von 55°C bis 50°C in die Heizkörper einströmen zu lassen. Die Austrittstemperatur des Heizungswassers aus den Heizkörpern - die sog. Rücklauftemperatur - liegt dann bei 45°C bis 40°C.

Die Fußbodenheizung benötigt geringere Temperaturen. Die Vorlauftemperatur liegt bei 30°C bis 35°C, die Rücklauftemperatur bei 25°C bis 30°C.

Das Brauchwasser muß mit einer Temperatur von 60°C bereitgestellt werden, um eventuellen Lungenentzündungen durch Legionellen – Bakterien, die bei 60°C absterben, vorzubeugen.

Die Wärme zur Wärmeversorgung von Häusern wird heutzutage in Europa im wesentlichen durch Verbrennen von Erdgas oder Öl und zu einem relativ geringen Teil durch Holzverbrennung und durch Fernwärme, d.h durch die Abwärme von Prozessen, bereitgestellt.

Schritt für Schritt werden die Gebäude in zunehmendem Maße aber auch mit Wärme versorgt, die in sog. Solarkollektoren aus der Strahlung der Sonne gewonnen wird.

Die Sonnenstrahlung ist aber insbesondere in Mittel - und Nordeuropa im Winter so gering, dass in dieser Zeit, in der besonders viel Wärme zum Beheizen der Häuser benötigt wird, die Wärmeversorgung weiterhin mittels Verbrennen von Erdgas, Öl oder Holz abzusichern ist.

Eine ausschließliche Wärmeversorgung von Gebäuden durch Solarkollektoren ist möglich, wenn aus der Sonne gewonnene Wärme, die im Sommer im Überschuß zur Verfügung steht, weil dann nur eine relativ geringe Menge an Heizungsenergie benötigt wird, in der Saison Sommer in ein Medium eingespeichert wird und in der Saison Winter aus dem Medium ausgespeichert wird. Dies wird als saisonale Wärmespeicherung bezeichnet.

Da bislang vom Preis und von der Anwendungstechnik her nur Wasser als saisonales Wärmespeichermedium zur Verfügung steht, wird in dieser Arbeit letztendes die Größe von Wasserspeichern zur saisonalen Wärmespeicherung berechnet.

2. Motivation

Es ist unbestritten, dass die Vorräte der Energiequellen, mit deren Hilfe der Energiebedarf der Welt momentan im wesentlichen gedeckt wird, geringer werden. Diese Energiequellen bzw. Energierohstoffe sind vor allem Erdöl, Erdgas, die Kohlen und Uran.

Energierohstoffe werden dabei für die vier Bereiche

- elektrische Energie (elektrischer Strom),
- Fahrzeugantriebe,
- Beheizen von Industrieöfen und
- Wärmeversorgung von Gebäuden mit Heizungswärme und mit Brauchwasser (Duschwasser)

benötigt.

Die elektrische Energie ist als eigener Schwerpunkt genannt, weil sie übergreifend in allen Lebensbereichen benötigt wird. Sie ist dabei aber nur ein Zwischenprodukt in der Erzeugungskette vom Energierohstoff zum Endprodukt oder zur Endanwendung. So wird elektrische Energie auch eingesetzt, um Fahrzeuge anzutreiben, um Industrieöfen zu beheizen oder um Gebäude mit Wärme zu versorgen[1].

Die geringer werdenden Vorräte der genannten Energierohstoffe führen zwangsläufig zu höheren Preisen und eines Tages auch zum vollständigen Verschwinden dieser Energiequellen. Dieser Effekt wird noch verstärkt durch die weiter wachsende Weltbevölkerung und durch die Motorisierung Chinas und Indiens. Unbekannt ist dabei, in welchem Maße die an Wassereis gebundenen Methanhydrate an den Kontinentalabhängen der Ozeane und am Ozeanboden, die Ölsande und Ölschiefer, „Schnelle Brüter“ und Nukleare Fusionsreaktoren die Menge der bislang eingesetzten Energierohstoffe strecken können.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Grundstoffe Erdöl, Erdgas, Kohlen und höchstwahrscheinlich auch Uran laufend teurer werden. Und damit sind

auch bei der Anwendung dieser Stoffe in den Bereichen elektrische Energie, Fahrzeugantriebe, Beheizen von Industrieöfen und Wärmeversorgung von Gebäuden entsprechende Preissteigerungen unvermeidlich[2].

Es ist deshalb erforderlich, nach alternativen Energiequellen zu suchen und sich auch mit Alternativen zu den heutigen Anwendungstechniken in den genannten vier Bereichen zu beschäftigen. Insbesondere sind solche Quellen zu bevorzugen, deren Produkte - beispielsweise Benzin oder Erdgas - nicht dem Prinzip von Angebot und Nachfrage unterliegen und deren Produktpreise wie die des genannten Benzins oder Erdgases nicht von Gesellschaften festgelegt werden.

Diese alternativen Energiequellen, auch regenerative Energiequellen genannt, weil sie unerschöpflich sind und die auch schon größtenteils seit längerer Zeit vor der Industrialisierung der Welt genutzt wurden, sind

- die Sonne,
- der Wind,
- das Laufwasser der Flüsse und Bäche,
- die Gezeiten der Meere,
- die Wellen der Meere,
- die in den Oberflächenschichten der Erde bis etwa 5000m Tiefe steckende geothermische Energie,
- die Biomasse sowie die organischen Abfälle und
- generell das Wasser (H_2O).

Das Wasser (H_2O) wird hier genannt, weil bei Bedarf an dem H_2O durch Elektrolyse Wasserstoff (H_2) gewonnen werden kann, der gegebenenfalls als Treibstoff, Brennstoff oder Reduktionsmittel benötigt wird.

Bei der Biomasse interessiert in besonderem Maße die Gewinnung von Benzin, Diesel und Methan (CH_4) über die Zwischenprodukte H_2 und CO der Vergasung, die Produktion von CH_4 bei der Fermentation zu Biogas, die direkte

Äthanol (C₂H₅OH)-Gewinnung sowie die Bereitstellung von Holzpellets, von Stückholz und von geschreddertem Holz zur Wärmeversorgung von Gebäuden.

Die regenerativen Energiequellen erfüllen auch zum Großteil die Forderung, dass die in den Quellen steckende Energie nicht der preislichen Gestaltung durch Gesellschaften unterliegt, wie es – wie schon erwähnt - beim Erdöl, beim Erdgas, bei den Kohlen und beim Uran der Fall ist. Nur bei der Biomasse und insbesondere beim Holz ist zu befürchten, dass die Preise denen des Öls folgen werden. Die bei den weiteren regenerativen Energiequellen nutzbare Energie steht grundsätzlich kostenlos zur Verfügung[3].

Für Deutschland sind von besonderem Interesse die Nutzung der kostenlosen Sonnenenergie und Anwendungstechniken hinsichtlich der kostenlosen Windenergie. Das Biomassepotential ist in Deutschland leider relativ gering.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Teilproblematik zu dem Problemkreis „Wärmeversorgung von Gebäuden mit Hilfe der Sonnenenergie“ behandelt. Es wird bei der Nutzung der Sonnenenergie für Gebäude unterschieden zwischen der sog. passiven Anwendungspraxis durch große Süd- und Westfenster und durch Wintergärten und dem Verwenden der Sonnenenergie zum Aufheizen von Flüssigkeiten – üblicherweise Wasser-Glykol-Gemischen - in Solarkollektoren. Diese erwärmten Wasser-Glykol-Gemische geben ihre Wärme über Wärmetauscher an Wasser in Speichertanks mit augenblicklich bis zu 2m³ Wasserinhalt ab, von denen aus die Gebäude dann mit Heizungswasser und mit Brauchwasser versorgt werden.

Für die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit werden Solarkollektoren zur Wärmeversorgung der Häuser eingesetzt. Die passive Sonnenenergienutzung wird nicht mit in Betracht gezogen.

Leider tendieren – wie schon ausgeführt – in Mitteleuropa die monatlichen Werte für den Wärmeverbrauch von Gebäuden und die gewonnene Sonnenenergie in entgegengesetzte Richtungen. Im Winter wird viel Wärme

benötigt, aber die Sonne scheint nur in relativ geringem Ausmaß. Im Sommer ist es umgekehrt.

Quantitativ wird dies in Abbildung1 beispielhaft für ein Haus von 115m² Wohnfläche, auf dessen Dach 20m² Solarkollektoren mit einem Winkel zur Horizontalen von 45° und nach Süden ausgerichtet angebracht sind, veranschaulicht.

Angegeben ist für jeden Monat eines Jahres als grüne Kurve der Gesamtwärmeverbrauch (Heizung + Brauchwasser) des Hauses in kWh. Die rote Kurve zeigt die Sonneneinstrahlung G auf 20m² Kollektorfläche in kWh/(20m² Kollektorfläche) und die blaue den für die Wärmeversorgung des Hauses zur Verfügung stehenden Ertrag der Kollektoren ebenfalls in kWh/(20m² Kollektorfläche). Für die einzelnen Monate sind entsprechende Zahlenwerte angegeben und weiterhin die Prozentzahlen des Flachkollektorertrags im Verhältnis zur Sonneneinstrahlung G. Der Ertrag der Kollektoren liegt im Jahresmittel bei etwa 51 % der Sonneneinstrahlung.

Die von Mai bis September produzierte solare Überschussenergie von 5941 kWh, die nicht genutzt werden kann, würde die Energiebilanz des Hauses in relativ hohem Maße verbessern. Diese im Sommer gewonnene Sonnenenergie muss nur durch eine entsprechende Speichertechnik in den Winter transportiert werden.

Grundlage der Speicherung von Wärme für Anwendungen in Gebäuden, wobei der Temperaturbereich unter 100°C liegt, ist das Speichern von Wärme in Wasser.

Bislang scheiterte die Verwendung von Großtanks mit mehr als 2m³ Wasserinhalt zur saisonalen Speicherung von Wärme in dem Speicherwasser dieser Tanks daran, dass in den Monaten vom Sommer in den Winter diese Tanks auch bei guter Isolierung durch Wärmeverluste durch die Tankwände hindurch zuviel von ihrer Enthalpie an die Umgebung verloren.

Es ist nicht zu ermitteln, wer als erster auf die Idee kam, diese Warmwasserspeicher in die Wohnräume des Hauses mit zu integrieren, das heißt den Warmwassertank mitten in das Haus zu setzen und die Wohnräume um den Tank herum anzuordnen in der gleichen Weise wie zu früheren Zeiten in Bäckereien der stets warme aus Schamotte gemauerte Backofen mitten im Haus stand und die Wohnräume, die den Backofen quasi ringförmig umgaben, auch durch die Wärmeverluste des Backofens mit beheizt wurden. Vom Schrifttum her kann auf zwei Literatur verwiesen werden, zum einem auf das von Josef Jenni [4] „Sonnenenergieanlagen mit hohem solarem Deckungsgrad für Warmwasser und Heizung“, und zum andrem auf das Solartechnik Paul Bauer [5].

Das Grundprinzip dieser Anordnung der Warmwasserspeicher ist bestechend. Die Verlustwärme geht nicht verloren, sondern sie wird als Nutzwärme zum Beheizen der Wohnräume genutzt. Damit hat die saisonale Wärmespeicherung einen großen Schritt nach vorn getätigt.

Es wurden deshalb im Rahmen dieser Arbeit die Größen von Wasserspeichern berechnet, die nötig sind, um Gebäude auch im Winter mit Wärme aus Sonnenenergie zu versorgen.

Es wird weiterhin untersucht, wie sich Basalt und wie sich Paraffin bei der Wärmespeicherung im Vergleich zu Wasser verhalten. Beim Paraffin wird die Wärme im wesentlichen beim Schmelzen des Paraffins gespeichert. Beim Erstarren des Paraffins wird die gespeicherte Wärme rückgewonnen. Der Schmelzpunkt bzw. der Erstarrungspunkt des verwendeten Paraffins lag bei 58°C , die Schmelzenthalpie bzw. Erstarrungsenthalpie bei 181 kJ/kg . Die Speicherkapazität des Wassers bei Temperaturänderungen beträgt $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ bzw. $4172 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, die von Basalt $1,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ bzw. $3236,4 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ und die des Paraffins sowohl im festen als auch im flüssigen Zustand $2,1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Näher wird auf die Wärmespeicherung im Paraffin und im Basalt im Kapitel 4.4 eingegangen.

3. Stand der Technik zur saisonalen Wärmespeicherung

Wärme wird bislang saisonal in Wassertanks von 300 m³ bis 12000 m³ Inhalt, in Kies-Wasser-Mischungen, in unterirdischen Wasserreservoirs, den Aquiferen, im Erdreich und in sog. aus Felsgestein bestehenden Kavernen gespeichert.

Grundprinzip dieser Speichertechnik ist die Wärmespeicherung infolge einer Temperaturerhöhung von Stoffen, wobei es sich in den oben genannten Anwendungsfällen um die Temperaturerhöhung von Wasser, von Kies, von Erdreich und von Felsgestein handelt.

Wärmespeicherung durch Temperaturerhöhung wird sensible (fühlbare) Speicherung genannt. Darüber hinaus gibt es noch die latente und die thermochemische Wärmespeicherung.

Latent wird Wärme bei Schmelz- und bei Verdampfungsvorgängen gespeichert. Beim Erstarren und beim Kondensieren wird die eingesetzte Energie zurückgewonnen. Die Verdampfungsenthalpie von Wasser beträgt bei 1 bar beispielsweise 2256,5 kJ/kg und die Schmelzenthalpie von Wassereis zu Wasser 333,5 kJ/kg. Das sind Zahlenwerte, die beträchtlich über den 4,18 kJ/(kg·K) für die sensible Wärmespeicherung in flüssigem Wasser liegen.

Bei der thermochemischen Wärmespeicherung wird üblicherweise Wasser (H₂O) durch Wärmezufuhr von der Oberfläche oder aus dem gesamten Volumen von Feststoffen entfernt und damit Wärme eingespeichert. Durch eine Befeuchtung der Körper mit Wasser wird die Wärme dann wieder nach außen abgegeben [7].

Auf die latente und die thermochemische Wärmespeicherung wird weiter unten eingegangen. Zunächst wird die sensible Wärmespeicherung behandelt.

Die spezifischen auf das kg bezogenen und die volumetrischen auf den m³ bezogenen Wärmekapazitäten der interessantesten Stoffe sind in Tabelle 1

zusammengestellt. Die Werte für Wasser sind allgemein bekannt, die Zahlenwerte für Kies werden für das Erdreich und für Kies-Wasser-Schüttungen benötigt, wobei eine Kies-Wasser-Schüttung mit 37 Vol% Wasser in der drittletzten Zeile in Tabelle 1 explizit aufgeführt ist. Die Werte für Sand sind in gleicher Weise wie die für Kies dem Erdreich, die Werte für Granit dem Felsgestein in Kavernen zuzuordnen. Eine umfangreiche Anwendung der künstlichen Stoffe Beton, Ziegel und Eisen ist nicht bekannt. Wärmeträgeröl wird in Solaranlagen mit konzentrierenden Parabolrinnenkollektoren, aber auch in Kombination mit dem Latentspeicherstoff Natriumacetat eingesetzt. Salzschnmelzen und flüssiges Natrium werden bei Solarturmkraftwerken als Wärmeträger und als Speichermedium verwendet und hier in gleicher Weise wie auch das Wärmeträgeröl nicht mit in die Betrachtungen einbezogen [8].

Ergänzend zu Tabelle 1 seien als Materialien zur sensiblen Wärmespeicherung noch Basalt mit einer spezifischen Wärmekapazität von $1,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, einer Dichte von $2697 \text{ kg}/\text{m}^3$ und einer volumetrischen Wärmekapazität von $3236 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ sowie Kieselsteine mit einer spezifischen Wärmekapazität von $0,86 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ genannt. Diese Stoffwerte wurden an der Hashemite – Universität in Zarqa/Amman in Jordanien ermittelt.

3.1 Saisonale Heißwasserspeicher

In Tabelle 2 sind die in Deutschland in Rottweil, in Friedrichshafen, in Hamburg, in Ilmenau und in Hannover gebauten saisonalen Wasserspeicher aufgeführt. Angegeben sind auch die Baukosten und die auf das Nutzvolumen bezogenen spezifischen Baukosten. Diese aus Stahl, Beton oder Kunststoff gefertigten großen Wassertanks werden üblicherweise wenigstens zum Teil in das Erdreich eingegraben. Die Speicher werden drucklos im Temperaturintervall von 30 bis 90°C betrieben [9].

3.2 Saisonale Kies - Wasser- Wärmespeicher

Kies - Wasser - Wärmespeicher benötigen im Gegensatz zu reinen Wasserspeichern keine tragende Deckenkonstruktion, da der Kies auf dem Speicher ruhende Lasten trägt. Sie arbeiten ebenfalls im Temperaturbereich bis 90 °C.

Um die gleiche Wärmemenge wie in einem Heißwasser-Wärmespeicher speichern zu können, muss das Speichervolumen aufgrund der geringeren Wärmekapazität des Kies - Wasser - Gemisches im Vergleich zu Wasser um 50% vergrößert werden. Speicher diesen Typs werden in Augsburg, Chemnitz, Steinfurt - Borghorst und Stuttgart betrieben. In Tabelle 3 werden die Kosten der Kies - Wasser - Speicher in Chemnitz und Steinfurt aufgezeigt [10].

Die Baukosten werden in DM/m³WÄ angegeben. Der Index WÄ bedeutet dabei Wasseräquivalent, d.h. die m³ Kies werden von ihrer Speicherfähigkeit her in m³ Wasser umgerechnet.

Die Grunddaten des Kies – Wasser – Wärmespeichers in Steinfurt - Borghorst sind in Tabelle 4 zusammengestellt [11].

3.3 Saisonale Aquifer - Wärmespeicher

Aquifer-Wärmespeicher nutzen zur Wärmespeicherung natürlich vorkommende, nach unten und oben abgeschlossene Grundwasserschichten. Die Wärme wird dabei über Brunnenbohrungen eingebracht und entnommen. Eine Wärmedämmung ist nicht möglich, da sich die geeigneten Schichten in Tiefen von 100m und mehr unter der Erdoberfläche befinden. Die hierbei auftretenden relativ großen Wärmeverluste rechtfertigen demzufolge nur Speichervolumen von geringstenfalls 100.000 m³.

Aquifere müssen eine mittlere bis hohe hydraulische Leitfähigkeit und Transmissivität, hohe Porosität und keinen bzw. einen geringen Grundwasserfluss aufweisen. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist der Wasserchemismus aufgrund der

Temperaturänderungen. Daraus können Belagsbildung, Verstopfung, Korrosion und Lösungserscheinungen resultieren.

Als Beispiel für Aquifer – Wärmespeicher seien die Anlagen in Rostock, in Berlin und in Gouda in den Niederlanden genannt. Tabelle 5 zeigt die Baukosten des Aquiferspeichers in Rostock [11].

Bei den Aquiferspeichern für das Hospital „Hooge Burch“ in Gouda und für den Reichstag und weitere Büros in Berlin wird die Abwärme eines Blockheizkraftwerks (BHKW) eingespeist, es wird mit maximalen Temperaturen von 90°C (Gouda) und 70°C (Berlin) gearbeitet. In Berlin werden zusätzlich im Sommer die Räume bei Bedarf mit kaltem Wasser, das aus einer Tiefe von etwa 60m gefördert wird, klimatisiert.

3.4 Saisonale Erdsonden – und Kavernenwärmespeicher

Als Speichermedien für Erdsonden – Wärmespeicher dienen Erdreich oder Felsgestein. Bei der Nutzung von Felsgestein spricht man von Kavernenwärmespeichern.

Das Ein – und Ausspeichern der Wärme erfolgt über sogenannte koaxiale U – Rohrsonden, welche in die Bohrlöcher eingebracht werden. Koaxiale Rohre bedeutet, dass zwei Rohre ineinander gesteckt sind. Beim Einspeichern fließt das heiße Medium im Spalt zwischen Innen – und Außenrohr in den Speicher ein und der abgekühlte Stoff im Innenrohr zurück. Beim Ausspeichern von Wärme strömt das kalte Fluid im Spalt zwischen Innen – und Außenrohr und das erwärmte Fluid im Innenrohr. Sind die Rohre zudem noch zu einem U gebogen, wird von U – Rohren gesprochen.

Die typischen Bohrlochtiefen liegen zwischen 20 und 100m, der Bohrlochabstand beträgt dabei 1,5 bis 3m. Innerhalb des Speichers erfolgt der Transport der Wärme über Wärmeleitung. Die Wärmedämmung kann nur zur Oberfläche hin erfolgen. Daher sind solche Speicher nur für größere

Speichervolumina geeignet. Die maximale Speichertemperatur beträgt 80°C. Auf diesbezügliche einfache Erweiterbarkeit des Speichers sei hingewiesen.

Wichtige Parameter dieser Wärmespeicherausführung sind eine hohe spezifische Wärmekapazität der Erde oder des Felsgesteins und eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit der Speichermaterialien. Es darf kein Grundwasserfluss auftreten. Felsschichten dürfen von Wasser nicht auszulaugen sein und müssen eine hohe Stabilität aufweisen [12].

Folgende Gesteine eignen sich besonders gut für die Einrichtung eines Kavernenspeichers:

- Sedimentgesteine wie Tonschiefer, Mergel, Ton, Sandstein u.ä.
- Magmatische Gesteine wie Granit, Gabbro, ebenso einige metamorphe Gesteine wie Gneis.

Erdsondenspeicher müssen zum einen wegen der relativ geringen spezifischen Wärmekapazität gegenüber Wasser und zum anderen wegen der geringeren Temperaturspreizung zum Einspeichern der gleichen Wärme ein 3 - bis 5 - faches Volumen gegenüber Wasserspeichern aufweisen. Die Vorteile eines Erdsonden - Wärmespeichers im Vergleich zum Wasserspeicher sind der geringere Bauaufwand und der modulare Aufbau mit Anpassung der Speichergröße an den Baufortschritt eines Wohngebietes.

In Neckarsulm wird ein solcher Speicher betrieben. Er wurde 2001 auf ein Volumen von 63 360 m³ ausgebaut. Tabelle 6 gibt die Baukosten der 1.Ausbaustufe für ein Speichervolumen von 20160 m³ wieder. Dieser Erdsondenspeicher wird mit einer maximalen Temperatur von 70°C betrieben. Die Wärme wurde in der ersten Ausbaustufe mit Hilfe von 36 Erdwärmesonden eingespeichert [13].

In Tabelle 7 sind schließlich zur Information noch Versuchs - und Demonstrationsanlagen zur saisonalen Speicherung von Wärme im Temperaturbereich von 43°C bis 150°C aufgeführt. Es wird hier nicht näher auf diesbezügliche Versuchsergebnisse eingegangen.

3.5 Speicherbaukosten

In Abbildung 2 sind auf den m^3 Wasser bezogene Speicherbaukosten in EUR/m^3 Wasser in Abhängigkeit von wasseräquivalenten Speichervolumen in m^3 zusammengestellt. Berücksichtigt werden Heißwasserspeicher, Aquiferspeicher, Kies - Wasser-Speicher sowie Erdsondenspeicher. Bei Kies - Wasser - und bei Erdsondenspeichern werden die Speicherfähigkeit des Kieses und der Erde in Wasseräquivalente umgerechnet. Die Kosten für die Planung der Anlagen wurden nicht mit berücksichtigt.

Das Speichervolumen reichte von 300m^3 für Ilmenau bis zu etwa 40000m^3 für Potsdam, wobei letztere Anlage bislang nur als Studie vorgestellt wurde.

Die Baukosten nehmen von etwa $470\text{ EUR}/\text{m}^3$ Wasser für die relativ kleine Anlage in Ilmenau bis zu ca. $50\text{ EUR}/\text{m}^3$ für die größeren Anlagen in Rostock und in Potsdam ab. Der auf $20\,000\text{ m}^3$ Speicherraum erweiterte Aquiferspeicher in Rostock gemäß Tabelle 5 ist hier noch nicht berücksichtigt [14].

Es kann abschließend zu diesem Kapitel entsprechend den Angaben im Schrifttum gefolgert werden, dass alle bisher errichteten saisonalen Wärmespeicher den Nachweis ihrer Wirtschaftlichkeit nicht erbracht haben.

Erst die Möglichkeit, saisonale Wärmespeicher in die Gebäude mit zu integrieren, um die Wärmeverluste dieser saisonalen Speicher als Heizungsenergie zu nutzen, eröffnet der saisonalen Wärmespeicherung wohl neue Gestaltungsmöglichkeiten.

3.6 Latentwärmespeicher

Es wurde einleitend bereits darauf hingewiesen, dass Wärme nicht nur sensibel (fühlbar) durch eine Temperaturerhöhung in Materialien eingespeichert werden kann, sondern auch latent bei den Phasenänderungen fest / flüssig und

flüssig / dampfförmig sowie thermochemisch durch Desorption von Wasser, das in Materialien enthalten ist oder an der Oberfläche von Speicherstoffen adsorbiert ist.

Es wird zunächst die latente Wärmespeicherung behandelt, bei der wegen der besseren Handhabung und auch aufgrund des benötigten Temperaturbereichs von 70 bis 100°C das System fest/flüssig und nicht die Kombination flüssig/dampfförmig im Vordergrund steht.

Der Abbildung 3 sind zunächst die Schmelzpunkte in °C und die Schmelzenthalpien in kJ/l einer Reihe von Stoffen zu entnehmen. Die beiden Materialien, die schon in der praktischen Anwendung stehen, sind Paraffin und Natriumacetat. In Abbildung 3 sind zwei Paraffine mit Schmelztemperaturen von etwa 25°C und 62°C aufgeführt. Bei den eigenen Versuchen, auf die noch weiter unten eingegangen wird, wurde ein Paraffin mit einer Schmelztemperatur von 58°C, einer Schmelzenthalpie von 181 kJ/kg, einer Dichte in festem Zustand von 0,9 kg/l, einer Dichte für die flüssige Phase von 0,78 kg/l, einer spezifischen Wärmekapazität von 2,1 kJ/(kg · K) für die sensible Wärmespeicherung durch Temperaturerhöhung und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,2 W/(m · K) verwendet.

Daß es legitim ist, sich mit der Wärmespeicherung mit Hilfe von Paraffin zu beschäftigen, zeigen die folgenden zwei Rechnungen:

Bei einer Erwärmung von 15°C auf 58°C werden bei dieser Temperaturspreizung von 43 K in das Paraffin sensibel $2,1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 43 \text{ K} = 90,3 \text{ kJ}/\text{kg}$ eingespeichert. Zusammen mit der Schmelzenthalpie von 181 kJ/kg ergeben sich als Summe 271,3 kJ/kg an gespeicherter Wärme. Bei einer Dichte des Paraffins von $900 \text{ kg}/\text{m}^3$ folgt für die volumenbezogene Speicherung $244170 \text{ kJ}/\text{m}^3$.

Bei gleicher Temperaturspreizung von 43 K nimmt Wasser hingegen nur $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 43 \text{ K} = 179,7 \text{ kJ}/\text{kg}$ und volumenbezogen bei einer Wasserdichte von $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ $179700 \text{ kJ}/\text{m}^3$ auf, also bedeutend weniger als Paraffin mit 271,3 kJ/kg bzw. $244170 \text{ kJ}/\text{m}^3$.

Für eine Erwärmung der Speicherstoffe von 15°C auf 95°C speichert Wasser 334,4 kJ/kg bzw. 334400 kJ/m³ und Paraffin 349 kJ/kg bzw. 314100 kJ/m³. Je höher die Maximaltemperaturen, umso ungünstiger schneidet Paraffin im Vergleich zu Wasser aufgrund der mit 2,1 kJ/(kg · K) für Paraffin gegenüber den 4,18 kJ/(kg · K) für Wasser um etwa 50 % geringeren spezifischen Wärmekapazität ab [15].

Die große technische Schwierigkeit beim Phasenübergang flüssig – fest besteht darin, dass die Flüssigkeit nicht zu kleinen Einzelpraktiken von etwa 2 bis 3 mm Durchmesser erstarrt, sondern kompakt zu einem ganzen Körper. Entsprechend schwierig gestaltet sich die Wärmeabfuhr aus dem erstarrenden Paraffin und die Wärmezufuhr zu dem schmelzenden Paraffin.

Für Natriumacetat wurde zu Lösung dieses Problems eine Mischung von Natriumacetat mit Wärmeträgeröl entwickelt. Das laufend umgepumpte Wärmeträgeröl, das sich nicht mit Natriumacetat mischt, überträgt die Wärme an das Natriumacetat und nimmt beim Phasenwechsel flüssig – fest des Natriumacetats auch die Erstarrungswärme des Natriumacetats auf.

Weiterhin sorgt das stets strömende Wärmeträgeröl dafür, dass sich beim Erstarren kein kompakter Natriumacetatkörper, sondern nur relativ kleine Partikel bilden.

Warum dieser Natriumacetat - Wärmeträgeröl-Speicher nicht wirtschaftlich oder nicht zufriedenstellend arbeitet, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden.

3.7 Thermochemische Wärmespeicherung

Thermochemische Speichermaterialien enthalten entweder im ganzen Körper verteilt oder wenigstens an der Oberfläche Wasser. Wasser enthaltende Stoffe sind beispielsweise Na₂S · xH₂O, MgCl₂ · 6 H₂O oder CaCl₂ · 6 H₂O. Produkte, die Wasser an ihren Oberflächen anlagern, sind z.B. Silikagel und Zeolithe.

Das bekannteste System zur thermochemischen Wärmespeicherung ist die Kombination Zeolith - Wasser. In den Abbildungen 4 und 5 wird die Verfahrensweise zum Einspeichern und zum Ausspeichern von Wärme vorgestellt [16].

Im Abbildung 4 wird in den Zeolithspeicher Wärme eingespeichert. Aus einem Fernwärmenetz wird im vorliegenden Fall mit Hilfe von Wasserdampf Wärme in einem Wärmetauscher an Luft übertragen. Der Luftstrom - hier als relativ dicke schwarze Linie dargestellt - wird von einem Gebläse umgewälzt und erwärmt sich in dem genannten Wärmetauscher auf 130°C. Mit diesen 130°C tritt der Luftstrom in den mit Wasser beladenen Zeolithen ein. Das Wasser des Zeolithen verdampft, die Luft verläßt mit 40°C den getrockneten Zeolithen. Der trockne Zeolithkörper hat jetzt Wärme gespeichert. Die Restenthalpie der Luft kann noch genutzt werden, um über einen weiteren Wärmeübertrager dem Gebäude Wärme mit einer Temperatur von 35°C zuzuführen. Die Buchstaben TCS in der Abbildung bedeuten Thermochemische Speicherung.

Die Abbildung 5 gibt den Vorgang der Entspeicherung der Zeolithe wieder. Durch das Gebläse wird jetzt feuchte Luft mit einer Temperatur von 25°C in den Zeolithspeicher engeblasen. Die feuchte Luft gibt Wasser an den Zeolithen ab, dieser erwärmt sich durch die Wasseraufnahme auf eine solche Temperatur, daß die Luft auf 100°C aufgeheizt wird. Die Luft tritt mit diesen 100°C in einen Wärmeübertrager ein, von dem ein Medium Wärme mit einer Temperatur von 65°C in das Gebäude transportiert. Aus diesem 65°C warmen Medium ist ohne Schwierigkeiten Brauchwasser von 60°C und auch Heizungswasser für eine Heizkörperheizung zu gewinnen, ganz zu schweigen von Heizungswasser für eine Fußbodenheizung.

Leider muß gemäß Abbildung 4 der Zeolith von Luft mit einer Temperatur von 130°C getrocknet werden. Diese 130°C sind mit normalen nicht konzentrierenden Solarkollektoren in Deutschland gewöhnlich nicht zu erreichen. Damit ist das vorgestellte System Zeolith - Wasser in Deutschland für die Nutzung der Sonnenenergie nicht zu verwenden.

4. Eigene Untersuchungen

4.1 Experimentelle Untersuchungen über den Gesamtwärmeverbrauch eines Hauses, über die Sonneneinstrahlung und über den Solarkollektorertrag

Wie schon ausgeführt, wurden im Rahmen eigener Berechnungen die Größen von Wasserspeichern ermittelt, die saisonal Wärme von Sommer in den Winter transportieren und damit dafür sorgen, dass die Häuser auch im Winter mit Wärme aus Sonnenenergie versorgt werden.

Zuvor musste jedoch die Höhe der mit Hilfe der Sonneneinstrahlung zu gewinnenden Wärme experimentell ermittelt werden. Dafür muß auch der Umfang der Solarstrahlung bekannt sein.

Weiterhin ist der Gesamtwärmebedarf des Hauses zu ermitteln, aufgeschlüsselt nach Wärmeversorgung durch Sonnenenergie und durch Zusatzheizung.

Die Messungen wurden an einem nicht unterkellerten Einfamilienhaus in der Nähe von Freiberg mit den Abmessungen 9,37m x 8,12m und einer Wohnfläche von 115m² gewonnen. Die Wohnräume des Hauses befinden sich im Erdgeschoss und im Dachgeschoss. Eine Ansicht des Hauses zeigt Abbildung 6. Auf dem Dach waren mit einer Neigung von 45° zur Horizontalen und nach Süden ausgerichtet 20m² Solarkollektoren angebracht. Die Fläche der gesamten nach Süden zeigenden halben Dachfläche des Hauses liegt dabei gemäß Abbildung 7 bei 53,8m². Wird an der Schräge ein Dachüberstand von 0,5m und an der Längsseite von 9,37m an beiden Dachenden ebenfalls ein Dachüberstand von je 0,5m genutzt, so könnten auf dem Dach maximal etwa 60m² Solarkollektorfläche installiert werden.

Ermittelt wurden mittels Wärmemengenzähler der tägliche Gesamtwärmeverbrauch des Hauses, die Kollektorerträge sowie die Erdgasverbräuche.

Die Abbildung 8 zeigt zunächst im Jahresablauf den täglichen Gesamtverbrauch für Heizung und Brauchwasser des Hauses mit der genannten Wohnfläche von 115m^2 . Es handelt sich dabei in gleicher Weise wie für die folgenden Abbildungen um Mittelwerte für die Jahre 2002 bis 2004.

In der Abbildung 9 wird in Ergänzung zu den Messwerten der Abbildung 8 die tägliche Sonneneinstrahlung und der tägliche Solarkollektorsertrag für 20m^2 Kollektorfläche, in Abbildung 10 die tägliche Sonneneinstrahlung und der tägliche Solarkollektorsertrag für 1m^2 Kollektorfläche angegeben.

In den Abbildungen 11 bis 22 werden nun der tägliche Gesamtwärmeverbrauch des Hauses in kWh/Tag und der tägliche Solarkollektorsertrag für 20m^2 Solarkollektoren in kWh/(20m^2 .Tag) monatsweise aufgeschlüsselt. Die Solarkollektorserträge sind als gelbe Balken, die Gesamtverbräuche als blaue Kurven mit den zugehörigen Zahlenwerten für jeden Tag wiedergegeben. Die fehlende Wärmemenge zwischen Gesamtwärmebedarf und Solarertrag wird bei dem betrachteten Haus durch Erdgas gedeckt. Angegeben sind weiterhin jeweils für jeden Monat der Gesamtwärmeverbrauch und der gesamte monatliche Kollektorsertrag für die 20m^2 Solarkollektoren. Der monatliche Brauchwasserbedarf für vier Personen betrug in etwa konstant 169 kWh/Monat und damit 2028 kWh/Jahr .

Den Abbildungen ist bereits zu entnehmen, dass der spezifische Gesamtwärmeverbrauch des Hauses, der Heizung und Brauchwasser einschließt, mit $176,2\text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{Jahr})$ relativ hoch ist.

Ergänzt wurden die Messungen am angegebenen Haus durch Messungen an der Solarkollektoranlage des Instituts für Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg. Diese Kollektoren sind ebenfalls unter einem Winkel von 45° zur Horizontalen nach Süden ausgerichtet und besitzen eine Gesamtfläche von $11,36\text{m}^2$. Ermittelt wurden hier die Sonneneinstrahlung und die Erträge der Kollektoren. Die Werte für die solare Einstrahlung sind beispielhaft in Abbildung 1 wiedergegeben, die Erträge für die Kollektoren decken sich mit denen, die an dem zur Verfügung stehenden oben beschriebenen Wohnhaus gemessen wurden.

Ergänzend zu Abbildung 1 werden in Abbildung 23 zusätzlich die auf 1m^2 Kollektorfläche bezogenen Monatswerte für die Sonneneinstrahlung und den Ertrag der Solarkollektoren in $\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{Monat})$ aufgeführt. Angegeben ist weiterhin als Wirkungsgrad in % das Verhältnis zwischen Solarkollektorertrag und Sonneneinstrahlung.

Bei der Neigung der Solarkollektoren von 45° zur Horizontalen ergeben sich in den Wintermonaten November bis Februar erwartungsgemäß relativ geringe Wirkungsgrade von 26,1 % bis 38,5%. Die Solarkollektoren müssten im Winter bei der relativ tief stehenden Sonne einen größeren Winkel zur Horizontalen aufweisen. Von Mai bis September werden hingegen 54,3% bis 60,9% (im August) der Sonneneinstrahlung im Solarkollektor in nutzbare Wärme umgesetzt.

Die Messwerte der Abbildungen 11 bis 22 sind zur besseren Handhabung in Abbildung 24 als Monatswerte zusammengefasst. Die schwarze Kurve gibt mit den angegebenen Zahlenwerten die monatlichen Gesamtwärmeverbräuche des Hauses in kWh/Monat wieder. Im Januar werden beispielsweise 3162 kWh verbraucht, im Juli 256 kWh und im Dezember 3313 kWh. Für jeden Monat wird als grüner Balken der erforderliche Erdgaseinsatz aufgezeigt. Im Januar waren das 2714 kWh. Auch im Juni, im Juli und im August mussten 25, 20 bzw. 12 kWh Erdgas verbrannt werden, da an einzelnen Tagen die Sonne nicht in ausreichendem Maße schien.

Als gelbe Balken sind in Abbildung 24 auf die grünen Balken die Solarerträge bzw. die genutzten Solarerträge aufgesetzt. Im Januar werden dabei z.B. 448 kWh der benötigten 3162 kWh durch die Sonne bereitgestellt.

Die roten Balken geben schließlich die solare Überschussenergie an, die hier nicht genutzt wird. Von Mai bis September sammeln sich dabei – wie bereits im Abbildung 1 gezeigt - insgesamt 5941 kWh Überschussenergie an. Das ist die Wärme, die in ein Medium eingespeichert werden müsste, um hier bis in den Dezember hinein 43,1% des jährlichen Erdgaseinsatzes von 13790 kWh zu ersetzen.

4.2 Theoretische Betrachtungen an einem Haus mit 115m² Wohnfläche und einem spezifischen Gesamtwärmebedarf von 176,2 kWh/(m².Jahr)

4.2.1 Erhöhen der Fläche der Solarkollektoren zum Steigern der solaren Überschussenergie und zum Vermindern einer Zusatzheizung

Um den Erdgasverbrauch auf Null zu drücken, muß bei sonst gleichbleibenden Bedingungen die Kollektorfläche erhöht werden.

Entsprechende Berechnungen ergeben, dass im vorliegenden Fall bei einer Kollektorfläche von 32,5m² die solare Überschussenergie den Erdgasverbrauch des Jahres ersetzt. Das Ergebnis dieser Berechnungen zeigt die Abbildung 25. Der Jahresverbrauch des Hauses von 20263 kWh/Jahr bleibt gleich, die Abdeckung dieses Jahresverbrauchs direkt durch die Solarenergie steigt jetzt bei 32,5m² Kollektorfläche auf 9379 kWh/Jahr, was einer solaren Deckungsrate von 46,3% entspricht. Die Sonneneinstrahlung auf die 32,5m² Kollektorfläche beträgt 39518 kWh/(32,5m².Jahr), der Flachkollektorertrag 20175 kWh/(32,5m².Jahr). Der Erdgasverbrauch des Hauses von 10884 kWh/Jahr wird durch die solare Überschussenergie von 10794 kWh/Jahr abgedeckt, wenn der Fehlbetrag von 90 kWh außer acht gelassen wird. Die solare Überschussenergie muß allerdings saisonal gespeichert werden.

In der Abbildung 26 sind die Ergebnisse der Berechnungen für das Haus mit einer Wohnfläche von 115m² und einem spezifischen Wärmeverbrauch von 176,2 kWh/(m².Jahr) zusammengefasst. In Abhängigkeit von der Kollektorfläche sind als blaue Kurve die solare Überschussenergie und als rote Kurve der Erdgasverbrauch des Hauses angegeben. Die grüne Gerade charakterisiert den konstant bleibenden Gesamtwärmeverbrauch des Hauses von 20263 kWh/Jahr.

Bei einer Kollektorfläche von $32,5\text{m}^2$ deckt hiernach eine solare Überschussenergie von 10840 kWh/Jahr den Erdgasverbrauch des Hauses von 10840 kWh/Jahr ab. Diese Zahlenwerte unterscheiden sich von den oben angegebenen 10884 kWh/Jahr für den Erdgasverbrauch und den 10794 kWh/Jahr für die solare Überschussenergie, da in der Abbildung 26 die Mittelwerte zwischen Erdgaseinsatz und solarem Überschuss gebildet werden.

Die Abbildung 26 zeigt weiterhin, dass selbst bei einer Kollektorfläche von 100m^2 im Winter nicht genügend Sonnenenergie durch die 100m^2 Kollektorfläche in Nutzwärme für das Haus umgewandelt werden kann, sondern daß auch in diesem Fall ein Erdgaseinsatz nicht zu vermeiden ist. Bei 100m^2 Kollektorfläche ist der Erdgasverbrauch mit etwa 4200 kWh/Jahr , was $20,7\%$ des Gesamtwärmebedarfs der 20263 kWh/Jahr entspricht, weiterhin relativ hoch. Der Erdgasverbrauch läßt sich nur durch saisonale Wärmespeicherung auf Null absenken.

Unter den vorliegenden Bedingungen - Haus mit 115m^2 Wohnfläche und einem spezifischen Wärmeverbrauch von $176,2\text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{Jahr})$ - muß aber mindestens - wie schon oben erläutert - eine Kollektorfläche von $32,5\text{ m}^2$ gewählt werden. Aus Sicherheitsgründen ist selbstverständlich eine um etwa 10% höhere Quadratmeterzahl an Kollektorfläche zu verwenden.

4.2.2 Einfluß einer Wärmeisolierung des Hauses auf Wärmeverbrauch und Größe der Solarkollektorfläche

Die beste Vorgehensweise, den Wärmebedarf von Gebäuden zu senken, ist nach wie vor das Warmisolieren der Gebäude in möglichst großen Umfang.

Bei dem betrachteten Haus mit einer Wohnfläche von 115m^2 und einem spezifischen Energieverbrauch von $176,2\text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{Jahr})$ wird gedanklich durch eine entsprechende Hausisolierung der spez. Gesamtwärmebedarf auf $50\text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{Jahr})$ gesenkt. Diese $50\text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{Jahr})$ entsprechen den heutigen Zielvorstellungen für ein sog. Niedrigenergiehaus.

Der Gesamtwärmebedarf des Hauses sinkt jetzt von 20263 kWh/Jahr auf 5750 kWh/Jahr. Die Kollektorfläche bleibt mit 20m² konstant.

Da durch die Wärmeisolierung nur der Bedarf an Heizungswärme abgesenkt wird, die 169 kWh/Monat für das benötigte Brauchwasser jedoch konstant bleiben, ist eine kleine Zwischenrechnung vonnöten.

In Tabelle 8 sind hierzu in der obersten Zeile für die Monate Januar bis Dezember die gemessenen Gesamtwärmeverbräuche in kWh/Monat für einen spezifischen Wärmeverbrauch von 176,2 kWh/(m²·Jahr) aufgetragen. Als Jahressumme ergeben sich die schon öfter genannten 20263 kWh. Bei jedem Monat werden die 169 kWh/Monat für das Brauchwasser abgezogen. Im Jahr werden zur Brauchwasserversorgung damit 2028 kWh benötigt. Es ergeben sich dann die in der dritten Zeile aufgeführten Zahlenwerte für die Heizwärme von 2993 kWh im Januar über 72 kWh im August bis zu 3144 kWh im Dezember. Als Jahressumme stehen für die Heizwärme 18236 kWh zu Buche. Das entspricht einem spez. Bedarf von 158,6 kWh/(m²·Jahr) für die Heizung und von 17,6 kWh/(m²·Jahr) für das Brauchwasser.

Angegeben sind dann in der vierten Zeile für jeden Monat die Prozente vom Jahresheizwärmebedarf, die in dem betreffenden Monat benötigt werden. Das sind im Januar 16,4 %, im Februar 13,4 %, im März 13,2 %, im April 8,6 %, im Mai 4,2 %, im Juni 1,8 %, im Juli 0,5 %, im August 0,4 %, im September 3,0 %, im Oktober 7,9 %, im November 13,5 % und im Dezember 17,2 %.

Diese Prozentwerte, die auch in der unteren Teildarstellung der Abbildung 27 wiedergegeben werden, zeigen eine gute Übereinstimmung mit den monatlichen Prozentzahlen entsprechend der DIN - Standardjahresganglinie für den Heizwärmebedarf in Deutschland, wie sie in der oberen Teilabbildung der Abbildung 27 aufgeführt sind.

Liegt der spezifische Gesamtwärmebedarf des Hauses bei 50 kWh/(m²·Jahr) statt bei 176,2 kWh/(m²·Jahr), beträgt der Gesamtwärmeverbrauch des Hauses- wie bereits erwähnt- nur noch 5750 kWh/Jahr statt zuvor

20263 kWh/Jahr. Diese Summe von 5750 kWh/Jahr ist in Tabelle 8 auch der letzten Zeile auf der rechten Seite zu entnehmen. Von diesen 5750 kWh Gesamtwärmeverbrauch werden die konstant gebliebenen 2028 kWh für das Brauchwasser abgezogen, so dass für die Heizung im Jahr noch 3722 kWh zur Verfügung stehen. Mit den angegebenen monatlichen Prozentzahlen werden diese 3722 kWh auf die Monate aufgeteilt. Für das Heizen errechnen sich dann für den Januar 610 kWh, für den Februar 499 kWh usw. bis zu den 640 kWh für den Dezember. Spezifisch gesehen ergeben sich jetzt 32,4 kWh/(m²·Jahr) für die Heizung und 17,6 kWh/(m²·Jahr) für das Brauchwasser.

Zu den Monatswerten für die Heizung werden die monatlichen 169 kWh für das Brauchwasser zuaddiert, so dass der letzten Zeile der Tabelle 8 die monatlichen Gesamtwärmeverbräuche in kWh/Monat bei einem spezifischen Jahreswärmeverbrauch von 50 kWh/(m²·Jahr) zu entnehmen sind.

Grafisch dargestellt ist dieser Verlauf des Gesamtwärmeverbrauchs von Monat zu Monat als schwarze Kurve in Abbildung 28. An Erdgas (grüne Balken) werden noch 1423 kWh/Jahr benötigt. Die solare Überschussenergie liegt relativ hoch bei 8085 kWh/Jahr. Es wird also bedeutend mehr solare Überschussenergie produziert als zur Deckung des Erdgasbedarfs benötigt wird.

Um einen Erdgaseinsatz durch saisonale Wärmespeicherung von solarer Wärme zu vermeiden, kann gemäß Abbildung 29 die Kollektorfläche bei einem spezifischen Wärmebedarf des Gebäudes von 50 kWh/(m²·Jahr) sogar bis auf 9,5 m² abgesenkt werden. Die Erdgasverfeuerung (grüne Balken) liegt dann bei 2517 kWh Erdgas/Jahr, die solare Überschusswärme (rote Balken) bei 2661 kWh/Jahr.

Diese Möglichkeit zur Verringerung der Kollektorfläche auf den relativ geringen Wert von 9,5 m² bei den vorliegenden Bedingungen muss in einer ersten Schlussfolgerung als erfreulich bezeichnet werden. Es wird jedoch im nächsten Kapitel aufgezeigt werden, dass dann der Warmwasserspeicher beträchtlich vergrößert werden muss, was weniger erfreulich ist. Dies ist darauf

zurückzuführen, dass mit der kleineren Kollektorfläche im Winter auch entsprechend weniger solare Wärme gewonnen wird.

Die berechneten Daten werden entsprechend der Abbildung 26 für einen spezifischen Wärmebedarf eines Hauses von $176,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$ jetzt für den spezifischen Wärmebedarf von $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$ in der Abbildung 30 zusammengefasst. Die Kollektorfläche wird von 5 bis 100 m^2 gesteigert. Die grüne Gerade charakterisiert den konstanten Gesamtwärmeverbrauch des Hauses von $5750 \text{ kWh}/\text{Jahr}$, die blaue Kurve den solaren Überschuss in kWh/Jahr und die rote Kurve den Erdgasverbrauch des Hause ebenfalls in kWh/Jahr . Dass bei einer Kollektorfläche von $9,5 \text{ m}^2$ der solare Überschuss den Erdgasverbrauch vollständig ersetzt, darauf war bereits hingewiesen worden. Die in der Abbildung 30 genannten $2603 \text{ kWh}/\text{Jahr}$ für diesen Punkt sind ein Mittelwert für die der Abbildung 29 zu entnehmende solare Überschusswärme von $2661 \text{ kWh}/\text{Jahr}$ und den Erdgasverbrauch von $2517 \text{ kWh}/\text{Jahr}$.

Bei 60 m^2 Kollektorfläche sind nach Abbildung 30 nur noch 393 kWh Erdgas/Jahr zu ersetzen. Es errechnet sich trotz dieser unbedeutend erscheinenden $393 \text{ kWh}/\text{Jahr}$ folgendes Speichervolumen für das Wasser:

Für eine spezifische Speicherfähigkeit des Wassers von $4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, die Umrechnungsgröße $1000 \text{ kg Wasser}/\text{m}^3 \text{ Wasser}$, eine Temperaturspreizung im Speicher zwischen heiß und kalt von 60 K folgt für $1 \text{ kJ} = 1 \text{ kW} \cdot \text{s}$: $4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 60 \text{ K} = 70 \text{ kWh}/\text{m}^3 \text{ Wasser}$. Zur Speicherung von 393 kWh wären dann $5,6 \text{ m}^3$ Wasser nötig mit der entsprechenden nicht zu vernachlässigenden Speichergöße.

4.2.3 Größe der Wasserspeicher

Mit den Rechnungen zum „Beladen“ des zunächst mit Wasser von 15°C gefüllten Speichers wird in einem Monat begonnen, in dem mehr Energie durch die Sonne zur Verfügung gestellt wird als verbraucht wird. Dazu bietet sich entsprechend Abbildung 16 der Juni an. Am 01.Juni erbringen die Solarkollektoren bei 20 m^2 Kollektorfläche $40,6 \text{ kWh}$. Verbraucht werden

hingegen nur 12,4 kWh, der Rest von 40,6 kWh – 12,4 kWh = 28,2 kWh wird eingespeichert. So werden monatsweise die Daten für den Gesamtwärmeverbrauch des Hauses und für die solare Überschussenergie ermittelt. Im Juni liegt der Gesamtwärmebedarf des Hauses für Heizung und Brauchwasser bei 502 kWh (siehe auch Abbildung 24), der Solarverbrauch des Hauses bei 477 kWh und die solare Überschussenergie bei 968 kWh (Abbildung 24). Am 07. und 08. Juni wird entsprechend Abbildung 16 im Haus mehr Wärme verbraucht als die Sonne liefert. Diese in Summe 24,9 kWh werden fiktiv zunächst so behandelt, als wenn sie durch eine Erdgasheizung abgedeckt werden müssten, obwohl die vom 01. Juni bis zum 06. Juni anstehende solare Überschussenergie von 260,7 kWh diese 24,9 kWh leicht ersetzen würden.

Im Rahmen einer Jahresbetrachtung werden dann diese zunächst fiktiven Erdgasverbräuche durch die solare Überschussenergie ersetzt. Entsprechend Abbildung 24 beträgt für das Haus mit 115 m² Wohnfläche, einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch von 176,2 kWh/(m²·Jahr) und einer Kollektorfläche von 20 m² die gesamte solare Überschussenergie 5941 kWh. Davon abgedeckt werden dann die zunächst dem Erdgasverbrauch zugeschlagenen 25 kWh des Juni, die 20 kWh des Juli, die 12 kWh des August, die 280 kWh des September, die 470 kWh des Oktober, die 2310 kWh des November und im Dezember 2824 kWh. Die im Dezember dann noch benötigten 3131 kWh - 2824 kWh = 307 kWh müssen dann tatsächlich im hier vorliegenden Fall durch eine Erdgasheizung zur Verfügung gestellt werden, weiterhin auch die 2714 kWh im Januar, die 2054 kWh im Februar, die 1718 kWh im März, die 801 kWh im April und die 235 kWh im Mai. Da im Mai der solare Überschuss mit 871 kWh über dem „Erdgasverbrauch“ von 255 kWh liegt, werden natürlich im Rahmen einer Jahresnutzung auch schon die 255 kWh des Mai durch die im Überschuss gewonnene Sonnenenergie ersetzt.

Die Abbildung 24 gilt für eine Kollektorfläche von 20 m². Es war schon bei der Erläuterung der Abbildung 25 darauf hingewiesen worden, dass erst bei einer Kollektorfläche von 32,5 m² die Wärme, die ansonsten durch Erdgas, Öl oder

Holz bereitzustellen ist, vollständig durch die solare Überschussenergie ausgeglichen wird.

Diese Mindestkollektorflächen, die erforderlich sind, um die Häuser vollständig über das ganze Jahr hinweg mit Sonnenwärme zu versorgen, werden jetzt herangezogen, um für das Haus mit 115 m² Wohnfläche bei unterschiedlichen spezifischen Wärmeverbräuchen von 175 kWh/(m²·Jahr) bis 50 kWh/(m²·Jahr) die erforderlichen Volumina der Wasserspeicher zu berechnen. Das Ergebnis dieser Berechnungen zeigt die Abbildung 31. Die obere rote Kurve mit den Dreiecken gilt für einen spezifischen Gesamtwärmeverbrauch des Hauses von 175 kWh/(m²·Jahr), die grüne Kurve für 100 kWh/(m²·Jahr), die dunkelrote Kurve mit den Quadraten für 75 kWh/(m²·Jahr) und die blaue Kurve für 50 kWh/(m²·Jahr). Zur vollständigen Abdeckung des Wärmebedarfs des Hauses ist im ersten Fall, wie schon angeführt, eine Kollektorfläche von 32,5 m² erforderlich. Der Wasserspeicher muss dann ein Volumen von 158 m³ besitzen. Wird der spezifische Wärmebedarf des Hauses auf 100 kWh/(m²·Jahr) abgesenkt, sind noch 20 m² Kollektorfläche mit einem Wasserspeicher von 84 m³ vonnöten. Bei 75 kWh/(m²·Jahr) liegt die zu installierende Kollektorfläche bei 15 m² und der Wasserspeicher bei 64 m³. Für die 50 kWh/(m²·Jahr) bei einem Niedrigenergiehaus brauchen nur noch die schon genannten 9,5m² Kollektorfläche angebracht zu werden bei einem Speicher - Wassertank von 37,6 m³.

Diese Wasserspeicher wären bei einem Haus mit 115 m² Wohnfläche indiskutabel groß. Die Abbildung 31 veranschaulicht, dass unter sonst gleich bleibenden Bedingungen die Speichergröße nur durch das Erhöhen der Kollektorfläche verringert wird. Auf einer Dachhälfte eines Hauses mit Erdgeschoss und Dachgeschoss und 115 m² Wohnfläche können gemäß Abbildung 7 maximal 60 m² Kollektorfläche installiert werden. Der Speicher hätte für 50 kWh/(m²·Jahr) entsprechend Abbildung 31 dann eine Größe von 5,7 m³. Das wäre noch erträglich.

Diese Zahlen der Abbildung 31 gelten für einen Speicherwirkungsgrad von 100 %, das heißt, der Wärmespeicher weist keine Verluste an die Umgebung

auf. In diesem Fall ist der Wasserspeicher in die Wohnräume integriert, die durch die Isolierung von etwa 0,5 m Dicke nach außen abgegebene Wärme heizt die Wohnräume mit auf und geht nicht zur Umgebung hin verloren. An den Sommertagen, an denen keine Heizungsenergie benötigt wird, wird dann aber doch gespeicherte Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben.

Um auch verlustbehaftete Wasserspeicher mit in die Betrachtungen einzubeziehen, sind in der Abbildung 32 Rechercheergebnisse wiedergegeben, die auch Speicherwirkungsgrade von 90 % und von 80 % mit berücksichtigen. Die oberen roten Kurven gelten wiederum bei 115 m² Wohnfläche für einen spezifischen Wärmeverbrauch des Hauses von 175 kWh/(m²·Jahr), die grünen Kurven für 100 kWh/(m²·Jahr), die dunkelroten Kurven für 75 kWh/(m²·Jahr) und die blauen für 50 kWh/(m²·Jahr). Diskutiert seien hier nur die allein interessierenden Werte für einen spezifischen Wärmebedarf des Hauses von 50 kWh/(m²·Jahr).

Für die Mindestkollektorgröße von 9,5 m² steigt die Wasserspeichergröße von 37,6 m³ für einen Speicherwirkungsgrad von 100 % auf 41,4 m³ für 90 % und auf 45,1 m³ für 80 % Speicherwirkungsgrad an. Bei der maximalen Kollektorgröße von 60 m² verändern sich die Speichervolumina nur relativ geringfügig von 5,7 m³ für 100 % Speicherwirkungsgrad über 6,3 m³ für 90 % auf 6,8 m³ für 80 % Speicherwirkungsgrad. Bis zu einem Speicherwirkungsgrad von 80 % steigt demnach die Speichergröße um die gleiche Prozentzahl, mit der der Speicherwirkungsgrad ausgehend von 100 % abnimmt. Bei 60 m² Kollektorfläche sind 6,8 m³ Speicher bei 80 % Speicherwirkungsgrad etwa um 20 % größer als der 5,7 m³ - Speicher bei 100 % Speicherwirkungsgrad.

Die Ergebnisse der Abbildungen 31 und 32 gelten weiterhin für den Fall, dass das Wasser im Speicher um 60 K erwärmt wird. Dazu bedarf es einiger Erläuterungen.

Die Abbildung 33 gibt einen Speicher wieder, der Wärme für das Brauchwasser und das Heizungswasser eines Hauses zur Verfügung stellt.

Durch einen Pfeil von oben nach unten wird in Abbildung 33 angedeutet, dass der Speicher durch die Solaranlage oder auch durch eine Erdgas-, Öl- oder Holzheizung mit Wärme versorgt wird. Das Speicherwasser habe ursprünglich eine Temperatur von 15°C. Die heutige Speichertechnik stellt sicher, dass sich von unten nach oben eine Schichtung des Wassers von den genannten 15°C unten bis zu den eingezeichneten 95°C oben einstellt. Diese 95°C oben sind natürlich nur zu verwirklichen, wenn auch Wärme von 95°C oben in den Speichertank eingespeichert wird.

Diese Temperaturschichtung des Wassers wird beim Einspeichern aufrechterhalten, indem beim direkten Einbringen des Speicherwassers das zugeführte warme Wasser an den Stellen in den Tank eingedüst wird, die der augenblicklichen Temperatur des zugeführten Wassers entsprechen. Entnommen zur Nutzung der Solarwärme oder der Wärme aus einer Erdgas-, Öl- oder Holzverbrennung wird das Speicherwasser stets unten im kältesten Bereich, der hier in Abbildung 33 bei 15°C liegt.

Das Speicherwasser kann auch indirekt über Wärmetauscher, die im Speicherwasser angeordnet sind, mit Wärme versorgt werden. Auch hier wird das warme Wasser-Glykol-Gemisch vom Kollektor oder das Wasser vom Kessel der Erdgas-, Öl- oder Holzverbrennung in diejenigen Wärmetauscher geleitet, die gemäß den Temperaturen der Wasserschichtung und den Temperaturen der ankommenden Wärmeträger die Wärme im optimalen Temperaturbereich an das Speicherwasser weitergeben.

Die obige Teildarstellung der Abbildung 33 zeigt die Wärmeversorgung eines Hauses mit Brauchwasser und mit Heizungswasser für eine Heizkörperheizung. In hier außerhalb des Speichers liegenden Wärmetauschern wird auf der linken Seite Brauchwasser von den 10°C des aus dem Wasserhahn austretenden Kaltwassers auf die zum Duschen, Baden oder zur Küchennutzung erforderlichen 60°C aufgeheizt. Zur Vermeidung von eventuellen Lungenentzündungen durch Legionellen - Bakterien ist eine Temperatur von 60°C erforderlich, weil bei 60°C diese Legionellen abgetötet werden. Zur Erwärmung des Brauchwassers im Wärmetauscher wird dem Speicher oben

Speicherwasser mit der hier vorliegenden Maximaltemperatur von 95°C entnommen. Im Wärmetauscher kühlt dieses Speicherwasser von 95°C auf 15°C ab und wird mit diesen 15°C dem Speicher wieder zugeführt. Dieses Speicherwasser von 15°C wird dann im Speicher wieder auf 95°C erwärmt, erneut entnommen usw. Die sogenannte Temperaturspreizung zwischen unten kalt und oben warm liegt im vorliegenden Fall bei 80 K. Das Speicherwasser kann somit eine Enthalpie speichern, die diesen 80 K Temperaturdifferenz zwischen warm und kalt entspricht.

Heizkörper zum Beheizen der Räume eines Hauses haben heutzutage schon solche Flächen oder die Häuser sind so gut wärmeisoliert, dass die Vorlauftemperatur des in die Heizkörper eintretenden Heizungswassers – wie in Abbildung 29 oben rechts wiedergegeben - 55°C und gegebenenfalls sogar auch nur 50°C beträgt. Die Rücklauftemperatur des aus den Heizkörpern abfließenden und in den betreffenden Wärmetauscher eintretenden Heizungswassers liegt dabei bei 45°C bzw. 40°C. Bei diesen Temperaturen des Heizungswassers tritt das Speicherwasser günstigenfalls mit 50°C bzw. 45°C aus dem Wärmetauscher aus und in den Speicher ein. Die Temperaturspreizung im Speicher liegt jetzt nur bei 95°C - 50°C = 45 K oder bei 95°C - 45°C = 50 K, das abgekühlte Speicherwasser kann weniger Wärme als bei einer Temperaturspreizung von 80 K aufnehmen. Der Speicher speichert jetzt einen geringeren Wärmebetrag.

Günstigere Bedingungen stellen sich beim Gebrauch einer Fußbodenheizung ein, wie der rechte Teil der unteren Abbildungshälfte veranschaulicht. Auf der linken Seite dieser unteren Teildarstellung ist wieder in gleicher Weise wie im oberen Teilabbildung die Brauchwassererwärmung erläutert.

Bei der Fußbodenheizung liegt die Vorlauftemperatur des Heizungswassers bei 35°C und die Rücklauftemperatur bei 25°C. Aus dem Wärmetauscher tritt dann das zum Erwärmen des Heizungswassers dienende Speicherwasser im günstigsten Fall mit einer Temperatur von 30°C aus und mit diesen 30°C in den Speicher ein. Die Temperaturdifferenz zu der Maximaltemperatur von 95°C beträgt jetzt 95°C - 30°C = 65 K. Die entsprechende Enthalpieerhöhung

gestaltet jetzt eine höhere Aufnahme von Wärme im Speicher als für den Fall der Heizkörperheizung, bei der die Temperaturspreizung im Speicher zwischen kalt und warm bei 45 K und günstigenfalls bei 50 K lag.

Es sei im übrigen darauf hingewiesen, dass Speicher nicht unbedingt mit außen liegenden Wärmetauschern zur Wärmeversorgung der Häuser ausgerüstet sein müssen, es können auch Wärmetauscher im Speichertankinneren verwendet werden.

Aus den obigen Ausführungen ist ersichtlich, dass es unter Berücksichtigung gewisser Sicherheitsabschläge gestattet ist, mit einer Temperaturdifferenz im Wasserspeicher von 60 K zwischen unten eintretendem kaltem Speicherwasser und oben entnommenem heißen Speicherwasser zu rechnen.

Ergänzend zu den Ergebnissen der Abbildung 27 wird zum Abschluss dieses Kapitels noch in Abbildung 34 aufgezeigt, wie sich die Speicher vergrößern, wenn das Speicherwasser bei einem Speicherwirkungsgrad von 100 % nicht um 60 K, sondern nur um 50 K erwärmt wird. Die oberen roten Kurven gelten wiederum für den spezifischen Wärmeverbrauch des Hauses mit 115 m² Wohnfläche von 175 kWh/(m²·Jahr), die grünen Kurven für 100 kWh/(m²·Jahr), die dunkelroten für 75 kWh/(m²·Jahr) und die blauen für 50 kWh/(m²·Jahr). Wiederum seien nur die Ergebnisse für 50 kWh/(m²·Jahr) diskutiert. Bei der minimal benötigten Kollektorfläche von 9,5 m² steigt die Größe des Wasserspeichers doch relativ stark von 37,6 m³ auf 43,6 m³. Auch bei der maximal möglichen Kollektorfläche von 60 m² muss das Speichervolumen von 5,7 m³ auf 6,9 m³ um über 20% erhöht werden.

Es sollte darauf geachtet werden, die Temperaturspreizung im Speicher zwischen kaltem Bereich unten und dem heißen Bereich oben möglichst groß zu halten. Eine Fußbodenheizung verbessert dabei – wie oben geschildert – gegenüber einer Heizkörperheizung die Bedingungen im Speicher beträchtlich. Bei einer Fußbodenheizung kann gegenüber einer Heizkörperheizung das Speichervolumen nennenswert verkleinert werden.

4.3 Berechnungen für Hausgrößen bis zu 200 m² Wohnfläche.

In die Betrachtungen werden jetzt zusätzlich zu dem Haus mit 115 m² Wohnfläche, also einem Haus mit relativ geringer Wohnfläche, noch ein Haus mit 150m² Wohnfläche, also einem Haus mit normaler Wohnfläche und ein Haus mit 200m² Wohnfläche als Beispiel für Häuser mit relativ hoher Wohnfläche mit einbezogen.

Der Grundriß dieser Häuser mit der Berechnung der halben Dachfläche ohne und mit Dachüberstand ist den Abbildungen 35 und 36 zu entnehmen. Für das Haus mit 150m² Wohnfläche errechnet sich bei Dachüberstand eine halbe Dachfläche von 89,6m² und für das Haus mit 200m² Wohnfläche ebenfalls bei Dachüberstand eine halbe Dachfläche von 120,1m². Von entsprechender Größe können die maximalen Solarkollektorflächen auf dem Dach dieser Häuser sein.

Es werden wiederum wie für das Haus mit einer Wohnfläche von 115m² die benötigten Wasserspeicher für eine Wärmeversorgung der Häuser ausschließlich mit Sonnenenergie berechnet. Die Darstellung der Ergebnisse gestaltet sich schwieriger als bei der Vorgabe einer bestimmten Wohnfläche von z.B. 115m², wie sie den Abbildungen 31, 32 und 34 zugrunde liegt. Jetzt sind drei Parameter zu berücksichtigen, die Kollektorfläche, der spezifische Gesamtwärmebedarf der Häuser und die Wohnfläche.

Um eine dreidimensionale Darstellung, bei der nur relativ schwierig genaue Zahlenwerte abgelesen werden können, zu vermeiden, muß die Anzahl der Abbildungen erhöht werden, aus denen gegebenenfalls mit Hilfe von Iteration für die Wohnfläche, den spezifischen Gesamtwärmebedarf, die Kollektorfläche und die Temperaturspreizung im Speicher die erforderliche Wasserspeichergröße abzulesen ist.

Analog zu den Abbildungen 31, 32 und 34, die für ein Haus von 115m² Wohnfläche gelten, werden jetzt in den Abbildungen 37 und 38 benötigte

Größen von Wasserspeichern in Abhängigkeit von der Kollektorfläche für ein Haus mit 150m² Wohnfläche und in den Abbildungen 39 und 40 für ein Haus mit 200m² Wohnfläche wiedergegeben. Parameter in allen Abbildungen ist der spezifische Gesamtwärmebedarf der Häuser, der von 100 kWh/(m².Jahr) bis zu 50 kWh/(m².Jahr) verändert wurde. Die Abbildungen 37 und 39 gelten für eine Temperaturspreizung im Speicher von 60K, die Abbildungen 38 und 40 für eine Temperaturspreizung von 50K.

In Abbildung 41 wird in gleicher Weise wie in Abbildung 32 der Einfluss unterschiedlicher Speicherwirkungsgrade, die von 100% über 90% auf 80% verringert wurden, beispielhaft herausgestellt. Aufgetragen ist die erforderliche Wärmespeichergröße in Abhängigkeit von der Wohnfläche. Parameter ist wiederum die Kollektorfläche.

Die Kurvenverläufe dieser Abbildung gelten jedoch nur für einem spez. Gesamtwärmeverbrauch der Häuser von 50 kWh/(m². Jahr).

Um den Einfluß des spezifischen Wärmebedarfs der Häuser über einen größeren Bereich von 50 bis 175 kWh/(m². Jahr) dokumentieren zu können, ist in den Abbildungen 42 und 43 die errechnete Wärmespeichergröße als Funktion dieses spez. Gesamtwärmebedarfs der Häuser aufgetragen. Parameter sind die Kollektorflächen von 20 bis 100m² sowie die drei Wohnflächen von 115m², 150m² und 200m². Abbildung 42 gilt für 60K Temperaturspreizung im Speicher, Abbildung 43 für 50 K Temperaturspreizung.

In den Abbildungen 44 bis 49 wird abschließend der Einfluß der Wohnfläche herausgehoben, nicht nur für einen spez. Wärmebedarf der Häuser von 50 kWh/(m². Jahr) wie in Abbildung 41, sondern jetzt auch für spezifische Wärmeverbräuche von 75 kWh/(m². Jahr) (Abbildungen 45 und 48) und 100 kWh/(m². Jahr) (Abbildungen 46 und 49). Die Abbildungen 44 und 46 gelten wie Abbildung 41 für 50 kWh/(m². Jahr), Abbildung 44 für eine Temperaturspreizung im Speicher von 60 K, Abbildung 47 für eine solche von 50K. Auch den Abbildungen 45 und 46 liegt eine Temperaturspreizung im Speicher von 60K zugrunde, den Abbildungen 47 und 48 eine solche von 50K

Parameter ist in allen Abbildungen die Kollektorfläche, die von 20 bis 100m² verändert wurde.

Es ist nicht notwendig, die Ergebnisse sämtlicher Abbildungen in allen Einzelheiten zu diskutieren. Qualitativ kann schon vorab ohne Berechnungen gefolgert werden, daß die erforderliche Wasserspeichergröße für eine saisonale Wärmespeicherung umso kleiner ist je kleiner die Wohnfläche ist, je geringer der spez. Wärmebedarf der Häuser ist, je größer die Kollektorfläche ist, je größer die Temperaturspreizung im Speicher ist und je höher der Speicherwirkungsgrad ist. Den Abbildungen 37 bis 49 sind dann entsprechend den jeweiligen Konfigurationen die erforderlichen Wasserspeichergrößen quantitativ zu entnehmen, wobei gegebenenfalls iteriert werden muss.

4.4 Experimentelle Untersuchungen zur Wärmespeicherfähigkeit von Basalt und von Paraffin

Zunächst seien relevante Stoffwerte zusammengestellt.

Für Wasser gilt:

Spez. Speicherkapazität: $4,1816 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$

Dichte: 1000 kg/m^3

Volumenbezogene Speicherkapazität: $4182 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

Für Basalt gilt:

Spez. Speicherkapazität: $1,2 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$

Dichte: 2697 kg/m^3

Volumenbezogene Speicherkapazität: $3236,4 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

Wärmeleitfähigkeit: $2,9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Für Paraffin (Schmelzpunkt von 58°C) gilt:

Spez. Speicherkapazität: $2,1 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$

Schmelzpunkt: 58°C

Schmelzenthalpie bei 58°C : 181 kJ/kg

Dichte fest: $0,9 \text{ kg/l}$

Dichte flüssig: $0,78 \text{ kg/l}$

Wärmeleitfähigkeit: $0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

In ersten Versuchen wurde überprüft, wie Basalt und Paraffin bei einer Zugabe zum Wasser die Wärmespeicherfähigkeit des Wassers beeinflussen. Diese Versuche wurden an der Hashemite - Universität in Zarqa /Amman in Jordanien durchgeführt. Es ist beabsichtigt, im Rahmen eines umfangreichen Forschungsvorhaben diese ersten informellen Untersuchungen zu vertiefen.

Abbildung 50 zeigt schematisch den Aufbau der Versuchsanlage in Amman. Die Solarkollektoren besaßen eine Fläche von 2m^2 , der Speicher hatte ein

Volumen von $0,214\text{m}^3$ bei einer Höhe von 90cm und einem Durchmesser von 55cm. Bei der Entnahme von Brauchwasser – in Abbildung 50 Warmwasser genannt – aus dem Speicher waren die Ventile in der Leitung zum Heizkörper hin und vom Heizkörper weg geschlossen. Wurde dem Speicher Heizungswasser entnommen, wurde die Kaltwasserzufuhr durch ein Ventil abgesperrt.

In Jordanien wird zunächst keine saisonale Wärmespeicherung, sondern eine Tageswärmespeicherung gewünscht. Selbst an kühlen oder kalten Wintertagen scheint die Sonne relativ stark, so dass auch im Winter tagsüber Sonnenenergie gespeichert werden kann, die dann abends in Form von erhitztem Wasser für eine Nutzung als Brauchwasser oder als Heizungswasser zur Verfügung steht.

Eine entsprechende Verfahrensweise verdeutlicht Abbildung 51. Aufgetragen sind die Temperaturverläufe des aus dem Kollektor austretenden Wassers als grüne Kurve, die Wassertemperatur im Speicher oben als schwarze Kurve und die Wassertemperatur in der Mitte des Speichers als rote Kurve.

Morgens um 7 Uhr beginnt der Flachkollektor Sonnenenergie in Wärmeenergie umzuwandeln. Die Austrittstemperatur des Wassers aus dem Flachkollektor steigt dann am ersten hier zugrundegelegten Tag von etwa 35°C um 7 Uhr auf $73,6^\circ\text{C}$ um ca. 13 Uhr. Die Wassertemperatur im Speicher nimmt bis 14 Uhr von ungefähr 25°C um 7 Uhr auf 67°C im oberen Speicherbereich und auf ca. $62,5^\circ\text{C}$ im mittleren Speicherbereich zu. Bis 18 Uhr behält das Wasser im Speicher noch eine Temperatur von ca. 60°C . Höhere Temperaturen stellen sich nicht ein, weil der Flachkollektor aufgrund seiner Kennlinie kein Wasser höherer Temperatur liefert. Von 18 Uhr wird bis 19 Uhr dem Speicher Brauchwasser zum Duschen entnommen. Das 60°C warme Wasser wird dabei in entsprechender Weise durch Kaltwasser ersetzt.

Um 18 Uhr besitzt das Speicherwasser noch ein Temperatur von etwa 35°C . Bis zum nächsten Morgen um 7Uhr wird dann das Speicherwasser als Heizungswasser benutzt. Mit dem dann 25°C warmen Speicherwasser beginnt

der nächste Tageszyklus u.s.w. Aufgrund der solaren Strahlungsverhältnisse erreicht das Wasser im Flachkollektor – wie die grüne Kurve verdeutlicht – am zweiten Tag nur maximal $67,2^{\circ}\text{C}$, am dritten Tag jedoch $78,6^{\circ}\text{C}$. Stets wird von 18Uhr bis 19Uhr Brauchwasser entnommen, dann das Speicherwasser zum Beheizen eines Raumes verwendet.

Um zu überprüfen, wie sich Basalt in Kombination mit Wasser als Speichermaterial verhält, werden entsprechend der rechten Teildarstellung der Abbildung 52 in zwei Etagen insgesamt 38 kg Basalt in Form von relativ kleinen Stücken mit einem Durchmesser von etwa 15 mm in den Speicher eingebracht. Der Speicher enthält jetzt neben den 38 kg Basalt noch 150 kg Wasser.

Die Ergebnisse des Versuches gibt die Abbildung 53 wieder. Als Temperaturen sind aufgetragen die Wassertemperaturen oben und in der Mitte im Speicher als violette bzw. als hellblaue durchgezogene Kurve und die Temperaturen eines Basaltteilchens im oberen und im mittleren Speicherbereich als gestrichelte schwarze bzw. orange Kurven. Wasser- und Basalttemperaturen weichen nicht voneinander ab. Die Basaltstücke mit einem Durchmesser von ca. 15 mm besitzen bei ihrer relativ guten Wärmeleitfähigkeit von $2,9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ eine so geringe Größe, dass Wärme vom Wasser aus ohne große Zeitverzögerungen in die Basaltteilchen geleitet und den Basaltkörpern auch wieder entnommen wird.

In Abbildung 54 wurden die Wassertemperaturen oben und in der Mitte des Speichers miteinander verglichen für den Fall, dass sich nur 210 kg Wasser im Speicher befinden (schwarze bzw. rote Kurve) und für den zweiten Fall, dass neben 150 kg Wasser noch 38 kg Basalt als Speicherstoff verwendet werden (violette bzw. blaue Kurve).

Die Wassertemperaturen unter dem Einfluss der Basaltkörper sind geringer gegenüber den Wassertemperaturen ohne Verwendung von Basalt. Da Basalt eine geringere spezifische Wärmespeicherfähigkeit besitzt als Wasser, müsste unter Basalteinfluss die Wassertemperatur steigen. Dieser Problempunkt kann momentan nicht geklärt werden.

Als weiteren Zusatzstoff zum Wasser im Speicher wurden 46 zylindrische Behälter aus Stahl, die Paraffin enthielten, in den Speicher gegeben. Die Stahlzylinder hatten eine Wanddicke von 0,5 mm und entsprechend der linken Teildarstellung der Abbildung 52 einen Durchmesser von 50 mm (5 cm) und eine Höhe von 180 mm (18 cm). Ihr Innenvolumen betrug $353,4 \text{ cm}^3$ bzw. 0,353l. Die Speicher enthielten in diesem Fall 150 kg Wasser, 15,74 kg Paraffin und 6,26 kg Stahl.

Abbildung 55 zeigt wiederum wie schon Abbildung 53 beim Basalt den Verlauf der Temperaturen des Stoffes Paraffin selbst oben und in der Mitte des Speichers als schwarze und rote gepunktete Kurven und die zugehörigen Wassertemperaturen als blaue durchgezogene Kurve für das Wasser oben im Speicher und als grüne Kurve für das Wasser in der Speichermitte. Es ist festzustellen, dass das Paraffin nicht so schnell abkühlt wie das Wasser. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass Paraffin mehr Wärme eingespeichert hat als das Wasser. Dass Wärme während der Abkühlung relativ schlecht aus dem Zylinderinneren an die Zylinderwand transportiert wird, wird dadurch widerlegt, dass die Paraffintemperatur während des Aufheizens des Speicherinhalts von ca. 8 Uhr bis etwa 14 Uhr nicht hinter der Wassertemperatur zurückbleibt. Immerhin dauert der Abkühlvorgang von 17 Uhr bis 8 Uhr am nächsten Morgen. In diesen 15 Stunden müssten sich die Temperaturen von Wasser und Paraffin angeglichen haben, wenn das Paraffin nicht von einer höheren eingespeicherten Energie zehren könnte. Weitere klärende Versuche sind erforderlich.

Die Abbildung 56 veranschaulicht darüber hinaus, dass während des Abkühlvorganges auch die Wassertemperaturen unter dem Einfluss des Paraffins (blaue und grüne Kurven) in geringerem Maße absinken als die Wassertemperaturen beim Versuchsbetrieb ohne Paraffin (schwarze und rote Kurven).

Die Abbildung 57 fasst schließlich die Ergebnisse der Abbildungen 51, 54 und 56 zusammen. Auf mögliche Erkenntnisse, die aus den Temperaturverläufen

gezogen werden können, wurde bereits während der Erläuterung der genannten Abbildungen eingegangen.

5. Zusammenfassung

Aufgrund stets weiter steigender Preise für Erdgas und Öl besteht der Wunsch, Häuser ganzjährig mit Hilfe der Sonnenenergie zu beheizen. Die Sonnenenergie wird dabei in Solarkollektoren in Wärme zum Gebrauch als Heizungswasser und als Brauchwasser umgewandelt.

In Deutschland muss hierzu jedoch Sonnenenergie durch Einspeichern in ein Medium saisonal von der Saison Sommer in die Saison Winter transportiert werden. Im Winter wäre ansonsten das Angebot an Solarstrahlung zu gering.

Als Speichermedium steht bislang nur Wasser zur Verfügung.

Bei einer neu entwickelten Speichertechnik werden die Wasserspeicher, deren Größe in der Anwendung bislang zwischen 28 m^3 und 220 m^3 variiert, mitten in das Haus gestellt. Die von den Speicherwänden abgegebene Wärme fließt nicht als Verlustwärme in die Umgebung, sondern heizt die Wohnräume, die den Speicher ringförmig umgeben, auf. Die Verlustwärme der Speicher wird zur Nutzwärme. Dieses Prinzip wurde schon früher in Bäckereien angewandt, in denen der stets warme aus Schamotte gemauerte Backofen mitten im Haus stand. Die Verlustwärme des Backofens war die Wärme, die die Räume der Bäckerei heizte.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Größe von saisonalen Wärmespeichern berechnet, die erforderlich ist, um Häuser mit Wohnflächen von 115 m^2 bis 200 m^2 ausschließlich mit Hilfe der Sonnenenergie ganzjährig mit Wärme für das Heizen und die Brauchwasserbereitung zu versorgen. Parameter sind die Fläche der Solarkollektoren, der spezifische Gesamtwärmebedarf des Hauses in $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$, die Temperaturdifferenz im Wasserspeicher zwischen wärmsten und kältesten Punkt, die sog. Temperaturspreizung und der Speicherwirkungsgrad. Die Fläche der Kollektoren wurde von 20 bis 100 m^2 verändert, der spezifische Wärmebedarf der Häuser von 50 bis

175 kWh/(m²·Jahr), die Temperaturspreizung im Speicher von 60 K bis 50 K und der Speicherwirkungsgrad von 100% bis 80%.

Auf der halben Dachfläche von Häusern mit Wohnräumen im Erdgeschoss und im Dachgeschoss und Wohnflächen von 115 m², 150 m² und 200 m² können bei Nutzung eines Dachüberstandes maximal 60 m², 85 bis 90 m² bzw. 120 m² Solarkollektoren installiert werden.

Die Größe der Wasserspeicher ist umso geringer, je geringer die Wohnfläche, je größer die Fläche der Solarkollektoren, je geringer der spezifische Gesamtwärmebedarf der Häuser, je höher die Temperaturspreizung im Speicher ist und je höher natürlich der Speicherwirkungsgrad sind.

Eine Fußbodenheizung bietet Vorteile gegenüber einer Heizkörperheizung, da sie die Temperaturspreizung im Wasserspeicher erhöht.

Die geringste Speichergröße wurde für ein Haus mit 115 m² Wohnfläche, der maximal zu installierenden Kollektorfläche von 60 m², dem niedrigsten hier berücksichtigten spezifischen Gesamtwärmebedarf des Hauses von 50 kWh/(m²·Jahr), der höchsten hier betrachteten Temperaturspreizung im Speicher von 60 K und einem Speicherwirkungsgrad von 100 % zu 5,7 m³ ermittelt. Für ein Haus mit 150 m² Wohnfläche errechnet sich mit der maximal möglichen Kollektorfläche von 85 bis 90 m² und unter den weitererenbereits genannten Bedingungen ein Wasser-Wärmespeicher von 6,5 bis 6 m³, für ein Haus mit 200 m² Wohnfläche und einer maximal anzubringenden Solarkollektorfläche von 120 m² ein Wasserspeicher von 8 m³.

6. Ausblick

An der Hashemite - Universität in Zarqa in Jordanien wurden darüber hinaus bereits erste Versuche zum Speichern von Wärme im Paraffin und im Basalt durchgeführt. Basaltstücke mit einem Durchmesser von etwa 15 mm zeigten kein vom Wasser abweichendes Wärmespeicherverhalten.

Erste Versuchsergebnisse mit Paraffin könnten, ohne dass hier eine Festlegung erfolgen soll, darauf hinweisen, dass im Paraffin aufgrund der mit zu berücksichtigenden Schmelzenthalpie wenigstens im Temperaturbereich von 25°C bis 60°C mehr Wärme eingespeichert wird als im Wasser. Das zeigen auch theoretische Berechnungen.

Diese Versuche standen im Zusammenhang mit der Suche nach einem bezüglich des Wassers alternativen Wärmespeichermedium. Die Versuche mit Paraffin werden fortgesetzt werden.

Da die Wasserspeichergröße nur entscheidend verkleinert werden kann, wenn die Fläche der Solarkollektoren in relativ hohem Ausmaß vergrößert wird, muss noch ermittelt werden, wie sich die Kosten für ein Vergrößern der Solarkollektorfläche zu den eingesparten Kosten bei einer entsprechenden Wasserspeicherverkleinerung verhalten.

Es sei darauf hingewiesen, dass augenblicklich Häuser mit relativ großen saisonalen Wasserwärmespeichern für Sonnenenergie, die entsprechend der geschilderten Technik mitten in die Häuser gesetzt werden, gebaut werden.

Abbildung 58 zeigt ein solches Solarhaus mit saisonaler Wärmespeicherung von Sonnenenergie, das in Freiberg errichtet wird. Es besitzt eine Wohnfläche von 140 m² und eine Kollektorfläche von 69 m². Die Kollektoren stehen zur besseren Nutzung der Solarenergie im Winter mit einem Winkel von 68° bis 70°

zur Horizontalen. Der Wasserspeicher besitzt ein Volumen von 28 m^3 bei einer Höhe von 7,7 m und einem Durchmesser von 2,16 m.

Die Ergebnisse von Messungen an diesen Häusern sind von besonderem Interesse.

7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifische und volumetrische Wärmekapazität von Wärmespeicher- materialien bei 20°C.....	44
Tabelle 2: Baukosten von Heißwasser-Wärmespeichern (ohne Planung und MwSt).....	44
Tabelle 3: Baukosten von Kies - Wasser - Wärmespeichern (ohne Planung und (MwSt) [21].....	44
Tabelle 4: Parameter des Kies - Wasser - Wärmespeichers in Steinfurt - Borghorst [17].....	45
Tabelle 5: Die Baukosten des Aquifer - Wärmespeichers in Rostock. (ohne Planung und MwSt).....	45
Tabelle 6: Die Baukosten des Erdsonden - Wärmespeichers in Nekarsulm (1. Ausbaustufe).....	45
Tabelle 7: Versuchs - und Demonstrationsanlagen zur thermischen Untergrund- speicherung mit hoher Temperatur.....	46
Tabelle 8: Monatliche Aufteilung des Gesamtwärmeverbrauchs eines Hauses auf Wärme für Heizung und Brauchwasser für spez. Gesamt- verbräuche von 176,2 kWh/(m ² .Jahr) und 50kWh/(m ² .Jahr).....	47

Tabelle 1: Spezifische und volumetrische Wärmekapazität von Wärmespeichermaterialien bei 20°C [32].

Medium	Temperaturbereich	Spezifische Wärmekapazität c	Volumetrische Wärmekapazität c'	Dichte ρ
	°C	kJ/kgK	kJ/m ³ K	kg/m ³
Wasser	0-100	4,18	4172	998
Kies, Sand	0-800	0,71	1278	1800-2000
Granit	0-800	0,75	2062	2750
Beton	0-500	0,88	1672-2074	1900-2300
Ziegelstein	0-1000	0,84	1176-1596	1400-1900
Eisen	0-800	0,47	3655	7860
Wärmeträgeröl	0-400	1,6-1,8	1360-1620	850-900
Kies-Wasser-Schüttung (37Vol.% Wasser)	0-100	1,32	2904	2200
Salzschmelze (53KNO ₃ +40NaNO ₃ +7NaNO ₃)	150-450	1,3	1970-1725	2561-2243
Natrium	100-800	1,3	925-750	1203-975

Tabelle 2: Baukosten von Heißwasser-Wärmespeichern (ohne Planung und MwSt)[33].

Projekt	Speicher Volumen [m ³]	Baukosten [DM]	Auf das Nutzvolumen bezogene Baukosten
Rottweil 95	600m ³	531871 DM	886 DM/m ³
Friedrichshafen 96	12000m ³	2.643.582 DM	220 DM/m ³
Hamburg	4500m ³	1.878.500 DM	417 DM/m ³
Ilmenau97/98	300m ³	274.500 DM	915 DM/m ³
Hannover	2750m ³	1.300.000 DM	473 DM/m ³

Tabelle 3: Baukosten von Kies-Wasser-Wärmespeichern (ohne Planung und MwSt) [34].

Projekt	Speicher Volumen [m ³]	Baukosten [DM]	Auf das Nutzvolumen bezogene Baukosten
Chemnitz 1997	8000 m ³	1.230.408 DM	230 DM/m ³ _{WÄ}
Steinfurt 1999	1500 m ³	794.358 DM	794 DM/m ³ _{WÄ}

Tabelle 4: Parameter des Kies-Wasser-Wärmespeichers in Steinfurt-Borghorst [35].

Baujahr	1998/99 im Rahmen des Förderprogramms "50 Solarsiedlungen in NRW"
Siedlung	42 Wohneinheiten mit ca. 3.800 m ² Gesamtwohnfläche
Gebäude	unterschiedliche Wärmedämmstandards (Niedrig- und Niedrigstenergiehaus)
Gesamtwärmebedarf	ca. 325 MWh, davon etwa 34 % durch Solaranlage mit Langzeitspeicher
Kollektorfläche	510 m ² (großflächige Module_direkt in Dachhaut)
Vorlauftemperatur	48 °C
Raditorentemperaturen	40/30 °C
Fußbodenheizungstemperaturen	35/25 °C
Kies-Wasser Speicher-Volumen	1.500m ³
Kies-Wasser-Speicher	unterirdischer (Erddeckung ca.1 m) umgedrehter Pyramidenstumpf, allseitige Wärmedämmung (Boden: Schaumglasplatten, Wände und Decke: Blähglasgranulat)
Be-/Entladung	indirekt über 6 Ebenen parallel angeordnete Wärmeübertragerrohre (Polyethylenrohre) von ca. 7.000 m Länge
Wassermenge	540 m ³
Wasseräquivalentes Speichervolumen	ca. 1.000 m ³

Tabelle 5: Die Baukosten des Aquifer - Wärmespeichers in Rostock. (ohne Planung und (MwSt) [36.]

Projekt	Speicher Volumen [m ³]	Baukosten [DM]	Auf das Nutzvolumen bezogene Baukosten
Rostock 1999	20.000	335.260	66 DM/m ³ WÄ

Tabelle 6: Die Baukosten des Erdsonden - Wärmespeichers in Nekarsulm (1. Ausbaustufe)[37].

Projekt	Speicher Volumen [m ³]	Baukosten [DM]	Auf das Nutzvolumen bezogene Baukosten
Nekarsulm 1997/1998	20.160 m ³	908.369 DM	182 DM/m ³ WÄ

Tabelle 7: Versuchs- und Demonstrationsanlagen zur thermischen Untergrundspeicherung mit hoher Temperatur.

Jahr	Name/ort	Maximale Temperatur	Bemerkungen	Quelle
1976	Auburn University, Mobile Al., USA	55°C	Aquiferspeicher, Versuch, abgeschlossen	Molz et al. (1979)
1982	SPEOS, Lausanne (Dorigny), CH	69°C	Abwärme, Aquiferspeicher, stillgelegt	Saugy et al. (1988)
1982	Hørsholm, Dänemark	100°C	Abwärme aus Müllverbrennung, Aquiferspeicher	Schleisner et al. (1991)
1982	University of Minnesota, St. Paul, USA	115°C 150°C	Aquiferspeicher, Aquifer in ca. 180-240 m Tiefe, Versuch, abgeschlossen	Walton (1986)
1982	Fernwärmenetz Avesta, Schweden	115°C	Felskaverne 15,000 m ³ Kurzzeitspeicher (3 Tage)	Hellström (1997)
1983	Autobahnmeist., Vaulruz, Schweiz	53°C	Solarwärme, horizontale Rohre im Boden	Dalenbäck (1990)
1983	Luleå TU, Luleå, Schweden	65°C	Industrieabwärme, 121 Bohrlöcher, stillgelegt	Nordell (1990)
1983	CSHPSS, Lyckebo, Schweden	75°C	Sonnenwärme, Felskaverne 105,000 m ³	Dalenbäck (1990)
1984	CSHPSS, Gro-ningen, NL	50°C	Sonnenwärme, 360 Erdwärmesonden	Wijmsman et al. (1988)
1986	Rümlang, Schweiz	43°C	7 Erdwärmesonden, Versuch, abgeschlossen	EWI (1987)
1987	Plaisir, Thiverval-Grignon, Frankr.	180°C	Aquiferspeicher ca. 500 m tief, Versuch, abgeschlossen	Pfiffer et al. (1991)
1988	Oxelösund, Schweden	95°C	Felskaverne, 200,000 m ³ , stillgelegt	Hellström (1997)
1991	de Uithof, Utrecht University, NL	90 °C	Abwärme von BHKW's, Aquiferspeicher	Van Loon & Paul (1991)
1992	SIG, Linköping, Schweden	70 °C	Versuche mit vertikalen Rohren in Ton, abg.	Gabrielsson et al. (1997)

Tabelle 8: Monatliche Aufteilung des Gesamtwärmeverbrauchs eines Hauses auf Wärme für Heizung und Brauchwasser für spez. Gesamtverbräuche von 176,2 kWh/(m².Jahr) und 50kWh/(m².Jahr).

115m ² Wohnfläche; Gesamtverbrauch 176,2 kWh/(m ² .Jahr); 169 kWh/Monat für Brauchwasser (Messungen)													
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
Gesamtverbrauch	3162	2612	2569	1728	936	502	256	241	715	1604	2626	3313	20263
Brauchwasser	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	2028
Heizung	2993	2443	2400	1559	767	333	87	72	546	1435	2457	3144	18236
Jahresanteil des Heizungsbedarfs	16,4%	13,4%	13,2%	8,6%	4,2%	1,8%	0,5%	0,4%	3%	7,9%	13,5%	17,2%	
115m ² Wohnfläche; Gesamtverbrauch 50 kWh/(m ² .Jahr); 169 kWh/Monat für Brauchwasser (Rechnung)													
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
Heizung	610	499	491	320	153	67	19	15	112	294	502	640	3722
Brauchwasser	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	2028
Gesamtverbrauch	779	668	660	489	322	236	188	184	281	463	671	809	5750

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Monatswerte für den Gesamtwärmeverbrauch eines Hauses mit 115m ² Wohnfläche, für die Sonneneinstrahlung G auf 20m ² Kollektorfläche und für den Solarkollektorsertrag durch 20m ² Kollektorfläche. Charakterisierung der Überschussenergie. Solarkollektoren mit einem Winkel von 45° zur Horizontalen nach Süden ausgerichtet.....	58
Abbildung 2: Volumenbezogene Baukosten von realisierten Wärmespeichern (ohne Kosten für Planung)	59
Abbildung 3: Ausgewählte Latentspeichermaterialien	60
Abbildung 4: Der Zeolithspeicher wird nachts mit Fernwärme beladen	61
Abbildung 5: Nutzung der durch Kondensation und Adsorption freiwerdenden Energie für Heizzwecke	61
Abbildung 6: Ansicht des Hauses, an dem die experimentellen Untersuchungen durchgeführt wurden.....	62
Abbildung 7: Grundriß des Hauses, an dem die experimentellen Untersuchungen durchgeführt wurden.....	63
Abbildung 8: Täglicher Verbrauch an Wärme für Heizung und Brauchwasser für ein Haus mit 115m ² Wohnfläche und einen spez. Jahresverbrauch von 176,2 kWh/(m ² .Jahr).....	64
Abbildung 9: Tägliche Sonneneinstrahlung und täglicher Solarkollektorsertrag für 20m ² Kollektorfläche in kWh/(20m ² .Tag). Kollektoren unter einem Winkel von 45° zur Horizontalen nach Süden ausgerichtet.....	65
Abbildung 10: Tägliche Sonneneinstrahlung und täglicher Solarkollektorsertrag für 1m ² Kollektorfläche in kWh/(m ² .Tag). Kollektoren unter einem Winkel von 45° zur Horizontalen nach Süden ausgerichtet.....	66
Abbildung 11: Der Flachkollektorsertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Januar bei 20 m ² Kollektorfläche	67
Abbildung 12: Der Flachkollektorsertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Februar bei 20 m ² Kollektorfläche	68
Abbildung 13: Der Flachkollektorsertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im März bei 20 m ² Kollektorfläche.....	69
Abbildung 14: Der Flachkollektorsertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im April bei 20 m ² Kollektorfläche	70

Abbildung 15: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Mai bei 20 m ² Kollektorfläche.....	71
Abbildung 16: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Juni bei 20 m ² Kollektorfläche	72
Abbildung 17: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Juli bei 20 m ² Kollektorfläche	73
Abbildung 18: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im August bei 20 m ² Kollektorfläche	74
Abbildung 19: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im September bei 20 m ² Kollektorfläche	75
Abbildung 20: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Oktober bei 20 m ² Kollektorfläche	76
Abbildung 21: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im November bei 20 m ² Kollektorfläche	77
Abbildung 22: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Dezember bei 20 m ² Kollektorfläche.....	78
Abbildung 23: Sonneneinstrahlung und Solarkollektorertrag pro m ² Kollektorfläche für die Monate Januar bis Dezember.....	79
Abbildung 24 (Grundfall): Monatsverbräuche des Hauses mit 20m ² Kollektorfläche, mit 115 m ² Wohnfläche und einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch von 176,2 kWh/(m ² .Jahr) sowie Angabe der solaren Überschussenergie.....	80
Abbildung 25: (32,5m ² Solarkollektoren statt 20m ² wie beim Grundfall): Monatsverbräuche eines Hauses mit 32,5 m ² Kollektorfläche, mit 115 m ² Wohnfläche und einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch von 176,2 kWh/(m ² .Jahr) sowie Angabe der solaren Überschussenergie.....	81
Abbildung 26: Überschußenergie durch die Sonne im Sommer und benötigte Erdgasenergie in Abhängigkeit von der Kollektorfläche bei einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch des Hauses von 176,2 kWh/(m ² .Jahr) und bei einer Wohnfläche von 115m ²	82
Abbildung 27: Jahresganglinie für den Heizwärmebedarf ohne Warmwasser .	83
Abbildung 28 (Spez. Gesamtwärmeverbrauch von 50 kWh/(m ² .Jahr) statt 176,2 kWh/(m ² .Jahr) wie beim Grundfall): Monatsverbräuche eines Hauses mit einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch von 50 kWh/(m ² .Jahr), einer Wohnfläche von 115 m ² und einer	

Kollektorfläche von 20m ² sowie Angabe der solaren Überschussenergie.....	84
Abbildung 29: (Gegenüber Grundfall 9,5m ² Kollektorfläche und spez. Gesamtverbrauch von 50 kWh/(m ² .Jahr): Monatsverbräuche eines Hauses mit einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch von 50 kWh/(m ² .Jahr), einer Wohnfläche von 115 m ² und einer Kollektorfläche von 9,5m ² sowie Angabe der solaren Überschussenergie.....	85
Abbildung 30: Überschußenergie durch die Sonne im Sommer und benötigte Erdgasenergie in Abhängigkeit von der Kollektorfläche bei einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch des Hauses von 50 kWh/(m ² .Jahr) und bei einer Wohnfläche von 115m ²	86.
Abbildung 31: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 115m ² Wohnfläche bei spez. Gesamtwärmeverbräuche des Hauses von 175 bis 50 kWh/(m ² .Jahr) in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und einer Temperaturdifferenz von kältestr zu wärmstr Stelle (Temperaturspreizung) im Speicher von 60 K.....	87
Abbildung 32 (Berücksichtigen auch von Speicherwirkungsgraden von 90% von 80%): Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 115m ² Wohnfläche bei spez.Gesamtwärmeverbräuchen des Hauses von 175 bis 50 kWh/(m ² .Jahr) in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei Speicherwirkungsgraden von 100%, 90% und 80% und einer Temperaturdifferenz von kältester zu wärmster Stelle (Temperaturspreizung) im Speicher von 60 K...88	88
Abbildung 33: Versorgung eines Hauses mit Brauchwasser und mit Heizungswasser für eine Heizkörperheizung oder eine Fußbodenheizung mittels eines Speichers.....	89
Abbildung 34 (Neben 60K auch Berücksichtigung einer Temperaturdifferenz von 50K zwischen kältester und wärmster Stelle [Temperaturspreizung]im Speicher): Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 115m ² Wohnfläche bei spez.Gesamtwärmeverbräuchen des Hauses von 175 bis 50 kWh/(m ² .Jahr) in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und Temperaturdifferenzen von kältester zu wärmster Stelle (Temperaturspreizung) im Speicher außer von 60 K auch von 50K.....	90
Abbildung 35: Haus mit 150 m ² Wohnfläche.....	91
Abbildung 36: Haus mit 200 m ² Wohnfläche.....	92

- Abbildung 37: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 150 m^2 Wohnfläche bei spez. Gesamtwärmeverbräuchen von 100 bis 50 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$ in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K.....93
- Abbildung 38: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 150 m^2 Wohnfläche bei spez. Gesamtwärmeverbräuchen von 100 bis 50 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$ in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K.....94
- Abbildung 39: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 200 m^2 Wohnfläche bei spez. Gesamtwärmeverbräuchen von 100 bis 50 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$ in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K.....95
- Abbildung 40: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 200 m^2 Wohnfläche bei spez. Gesamtwärmeverbräuchen von 100 bis 50 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$ in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K.....96
- Abbildung 41: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche für Kollektorflächen von 20 bis 100 m^2 Speicherwirkungsgrad von 100%, 90%, 80%, einem spez. Gesamtwärmeverbrauch von 50 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$ und einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K.....97
- Abbildung 42: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von spezifischen Gesamtwärmebedarf für Wohnflächen von 115 m^2 , 150 m^2 , 200 m^2 , Kollektorgrößen von 20 bis 100 m^2 und einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K.....98
- Abbildung 43: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von spezifischen Gesamtwärmebedarf für Wohnflächen von 115 m^2 , 150 m^2 , 200 m^2 , Kollektorgrößen von 20 bis 100 m^2 und einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K.....99
- Abbildung 44: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m^2 , einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 50 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$100
- Abbildung 45: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m^2 , einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 50 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$101

- Abbildung 46: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m², einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 100 kWh/(m². Jahr).....102
- Abbildung 47: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m², einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 50 kWh/(m². Jahr).....103
- Abbildung 48: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m², einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 75 kWh/(m². Jahr).....104
- Abbildung 49: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m², einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 100 kWh/(m² Jahr).....105
- Abbildung 50: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage zur Untersuchung der Speicherfähigkeit von Basalt und von Paraffin in Amman in Jordanien.....106
- Abbildung 51: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser des nur Wasser (210kg) gefüllten Warmwasserspeichers.....107
- Abbildung 52: Wasserspeicher mit Paraffineinsatz und mit Basalteinsatz.....108
- Abbildung 53: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser und in den Basaltkörpern des mit Wasser (150kg) und mit Basalt (38kg) gefüllten Warmwasserspeichers.....109
- Abbildung 54: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser ohne und mit Basalteinsatz.....110
- Abbildung 55: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser und im Paraffin des mit Wasser (150kg) und mit Paraffin (15,74kg) gefüllten Warmwasserspeichers.....111
- Abbildung 56: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser ohne und mit Paraffineinsatz.....112
- Abbildung 57: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser und im Paraffin des nur mit Wasser gefüllten Warmwasserspeichers sowie bei Basalt- und Paraffineinsatz.....113
- Abbildung 58: Solarhaus in Freiberg mit saisonaler Wärmespeicherung von Sonnenenergie.....114

9. Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt.: Umweltdaten Deutschland Online. Energieverbrauch nach Verbrauchergruppen. Online im Internet: URL: <http://www.env-it.de/umweltdaten/jsp/index.jsp>.
- [2] Heinloth K.: Energie und Umwelt, Klimaverträgliche Nutzung von Energie. Stuttgart, 1993. ISBN 3-519-03657-6.
- [3] Eder M., Fink C., Streicher W., Themeßl, Weiß W.: Hiezen mit der Sonne, Handbuch zu Planung und Ausführung von solaren Heizungssystemen, Gleisdorf, 1977.
- [4] Solartechnik Paul Bauer: Das Sonnenhaus. Online im Internet: URL: http://www.solar-bauer.de/Das_Sonnenhaus/das_sonnenhaus.html/.
- [5] Jenni, Josef: Sonnenenergieanlagen mit hohem solarem Deckungsgrad für Warmwasser und Heizung, 2. Auflage. Oberburg (CH), 1996. ISBN 3-906558-03-7.
- [6] Weitere Information unter Online im Internet: URL: <http://www.rubitherm.de>
- [7] Beste, D. Kälke, M. (Hrsg.): Erneuerbare Energien, warum wir sie dringend brauchen kaum nutzen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [8] Henning, H. -M.: Wärmespeicher mit Phasenwechselmaterialien und Thermoche Systeme, Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, Workshop Dezentrale Energiespeicherung - Schlüssel zur wirtschaftlichen Entfaltung Erneuerbarer Energien 08.04.2002 in Wuppertal.
- [9] Weitere Information unter <http://www.ea-nrw.de/database/data/datainfo/fopool/Tagung/Bodmann.pdf> (20.09.2005)
- [10] Weitere Information unter Online im Internet: URL http://www.fv-sonnenenergie.de/-publikationen/ws012-3_01.pdf .
- [11] Weitere Information unter Online im Internet: URL: <http://www.bine.info.de>

- [12] Weitere Information unter <http://www.geothermie.de/oberflaechennahel-thermische-untergrundspeicherung.htm>
- [13] Weitere Information unter <http://www.ea-nrw.de/database/data/datain-/Tagung/Bodmann.pdf>
- [13] Weitere Information unter http://www.fv-sonnenenergie.de/publikationen/ws012-3_01.pdf
- [14] Solarspeicher: Sensible, Latent, thermochemisch: Solartechnik, TGA Fachplaner 12-2005.
- [15] Weitere Information unter <http://www.alfredschneider.de>
- [16] Weitere Information unter <http://www.ZAE-Bayern.de>
- [17] BMWA Verbundvorhaben „Temperatur- und druckstabile Proessedamp-Speicherung und – Erzeugung durch neuartige Latentmaterial-Dampfspeichertechnik“ FKZ 0327360.
- [18] Bösmann A.: Ionische Flüssigkeiten als neue Wärmeträgermedien. Tagungsband 13. Symposium Thermische Solarenergie OTTI,S. 174-178, 2003.
- [19] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Themen von A bis Z. Kurzinfo Klimaschutz. Online im Internet: URL:
- [20] EU Projekt, Energy Storage for Direct Steam Solar Power Plants“, SES6-CT-2003-503526, Weitere Informationen unter www.dlr.de/tt/institut/
- [21] Friedrich, R.: Energieeinsparung in der Gebäudetechnik, Baukörper und technische Systeme der Energieverwendung, 1. Auflage. Würzburg: Vogel-Verlag, 1994. ISBN 3-8023-1502-2.
- [22] Geiger B., Nickel M., Wittke F.: Energieverbrauch in Deutschland – Daten, Fakten, Kommentare. BWK, Bd. 57 (2005) Nr.1/2. S.48-56.
- [23] Hausner H., Fink C.: Stagnation behavior of solar thermal systems. Download unter http://www.iea-sch.org/outputs/task26/A_Hausner_Stagnation.Pdf.
- [24] Henning H.-M. (Ed.): Solar Assisted Air-Conditioning in Buildings. A Handbook for Planners. Springer Wien New York. 2004.
- [25] Hermann M.: Entwicklung des Flat-Plate-Therm-Absorbers- Simulation und Experimente. Tagungsband 15. Symposium Thermische Solarenergie OTTI,S. 94-99, 2005.

- [26] Weiter Information unter <http://www.bmu.de/de/1024/js/sachthemen/-klimaschutz/>
- [27] Im Zentrum steht die Sonne: Mit Kombianlagen gewinnt die Solarwärmetechnik an Bedeutung: in *Sonnenenergie*, Mai 2005.
- [28] Leibfried U.: Kombispeicher mit Thermosiphon-Wärmetauscher für Warmwasser: Vergleich unterschiedlicher Konzepte, Tagungsband zum achten Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Mai 1998.
- [29] Luboschik K., Peuser V. F., Meyer (Hrsg.): *Sonnenenergie zur Warmwasserbereitung und Raumheizung*, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Verlag TÜV Rheinland, 1995. ISBN 3-8249-0202-8.
- [30] Martin, Kaltschmitt, Andreas Wiese (Hrsg.): *Erneuerbare Energien, Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Springer Verlag, Berlin, 1997. ISBN 3-540-63219-0.
- [31] Nitsch J., Fishedick M., Reinhardt G. u.a.: „Ökologisch optimierter Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland,“ Studie der arbeitgemeinschaft DLR/IFEU/WI im Auftrag des BMU, Stuttgart, Berlin 2004.
- [32] Pfluger R., Feist W., *Kostengünstiger Passivhaus-Geschosswohnungsbau in Kassel-Marbacherhöhe*, Endbericht, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 15 und 16, 2001, Passivhaus-Institut Darmstadt
- [33] Weiter Information unter <http://www.geothermie.de/oberflaechennahel-thermische-untergrundspeicherung.htm>
- [34] Weiter Information unter http://www.fv-sonnenenergie.de/publikationen/ws012-3_01.pdf
- [35] <http://www.ea-nrw.de/database/data/datainfopool/Tagung/Bodmann.pdf>
- [36] *Solarthermische Langzeit-Wärmespeicherung*; Dipl.-Ing. M. Bodmann, Prof. Dr.-Ing. M. Fisch; Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS), TU Braunschweig.
- [37] Weiter Information unter <http://www.ea-nrw.de/database/data/datainfopool/Tagung.pdf>
- [38] Mehling, H.: *Latentwärmespeicherung: "Neue Materialien und Materialkonzepte"*, Forschungsvorbund Sonnenenergie, Workshop Wärmespeicherung, 28.-29.05.2001 in Köln.
- [39] Weiter Information unter <http://www.ZAE-Bayern.de>

-
- [40] Norm DIN V 4108-6: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Vornorm, Berlin: Beuth-Verlag, 2000.
- [41] Energetikhaus 100, das Ganzjahressolarhaus, Weiter Information unter URL:[http:// www. Energetikhaus 100.de/das haus](http://www.Energetikhaus100.de/das_haus).

10. Anhang

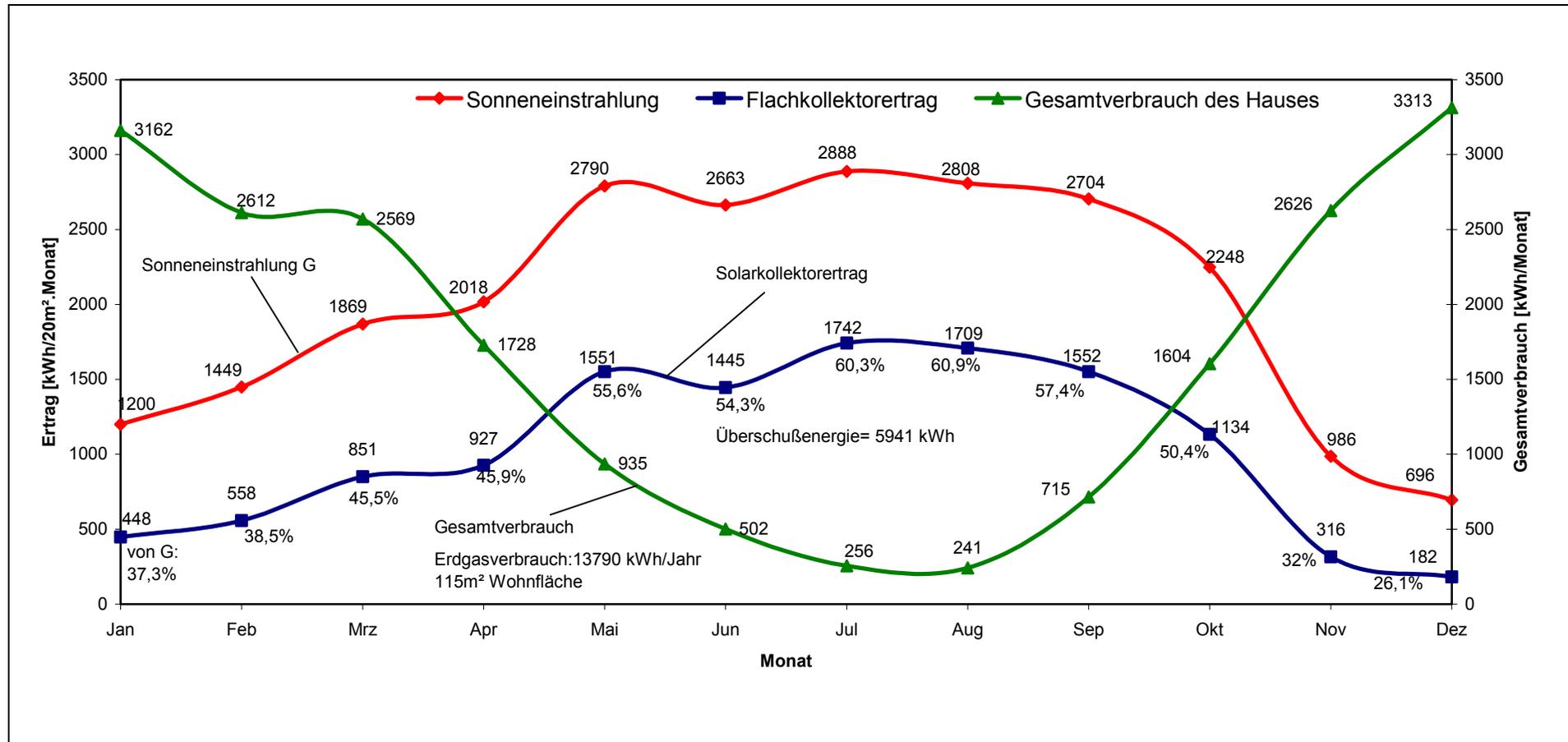


Abbildung 1: Monatswerte für den Gesamtwärmeverbrauch eines Hauses mit 115 m² Wohnfläche, für die Sonneneinstrahlung G auf 20m² Kollektorfläche und für den Solarkollektorertrag durch 20m² Kollektorfläche. Charakterisierung der Überschussenergie. Solarkollektoren mit einem Winkel von 45° zur Horizontalen nach Süden ausgerichtet.

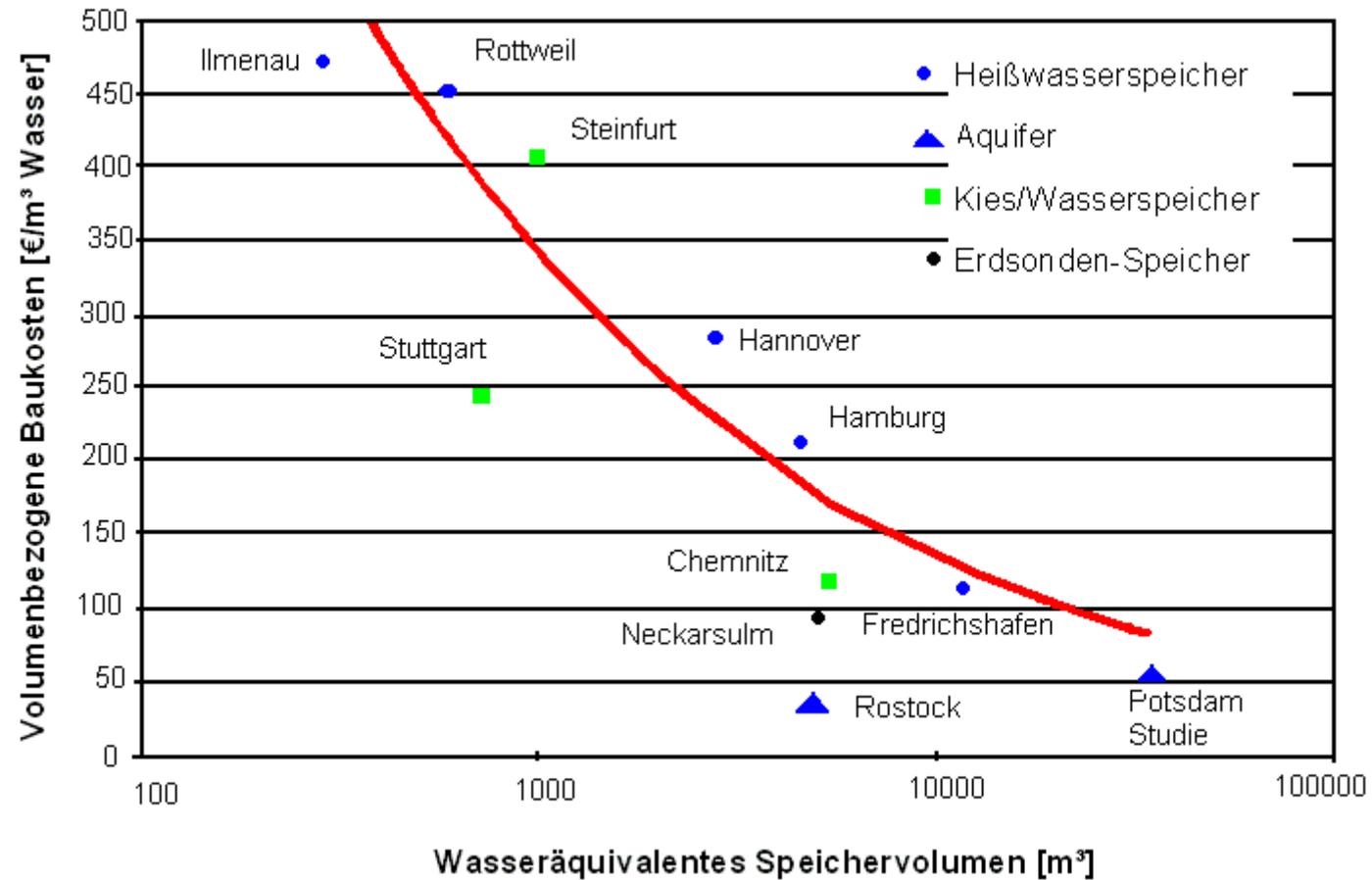


Abbildung 2: Volumenbezogene Baukosten von realisierten Wärmespeichern (ohne Kosten für Planung) [37].

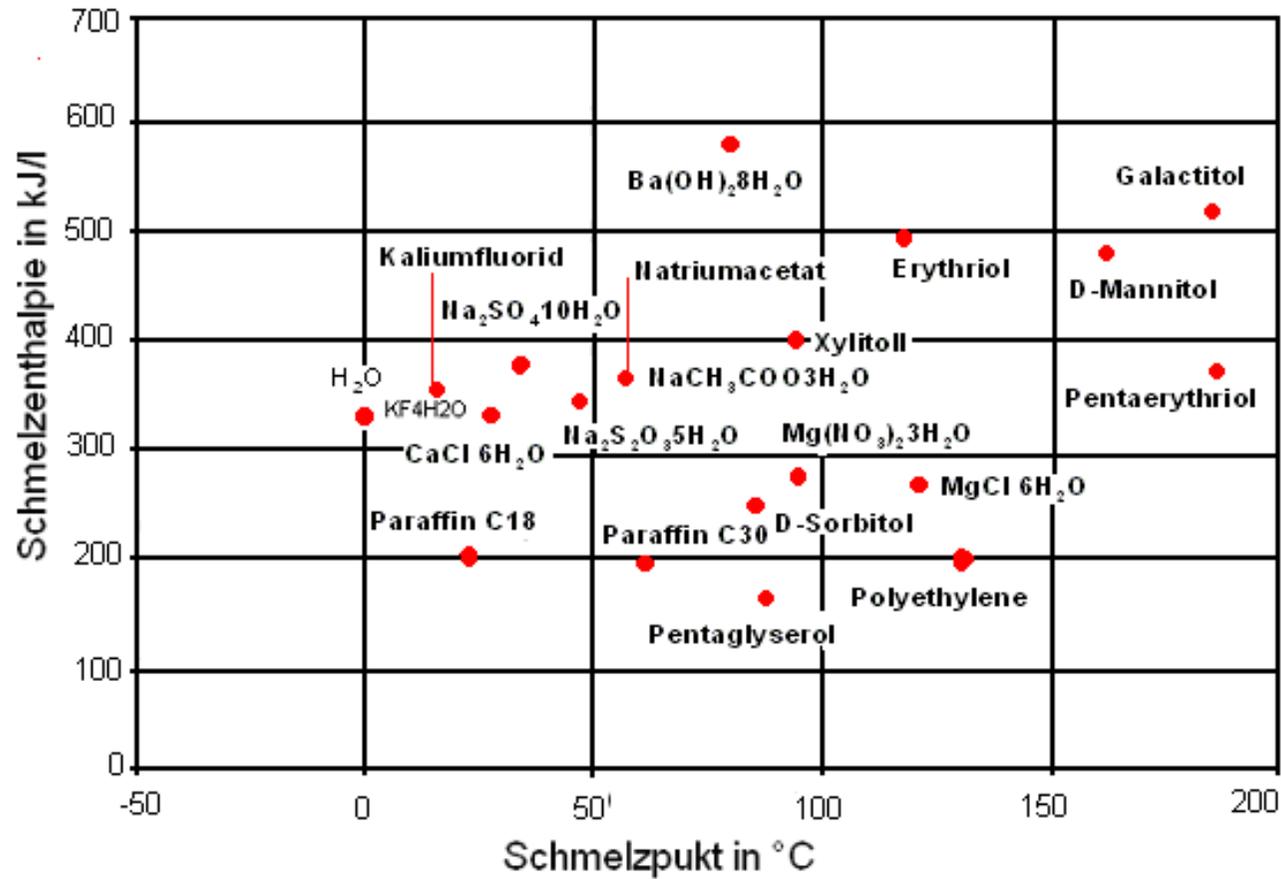


Abbildung 3: Ausgewählte Latentspeichermaterialien [38].

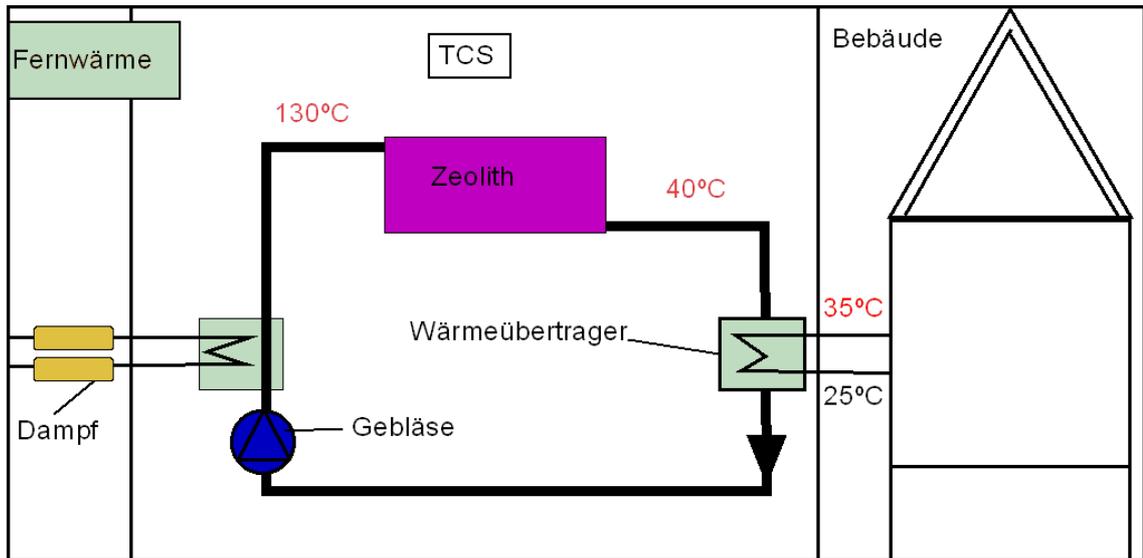


Abbildung 4: Der Zeolithspeicher wird nachts mit Fernwärme beladen [39].

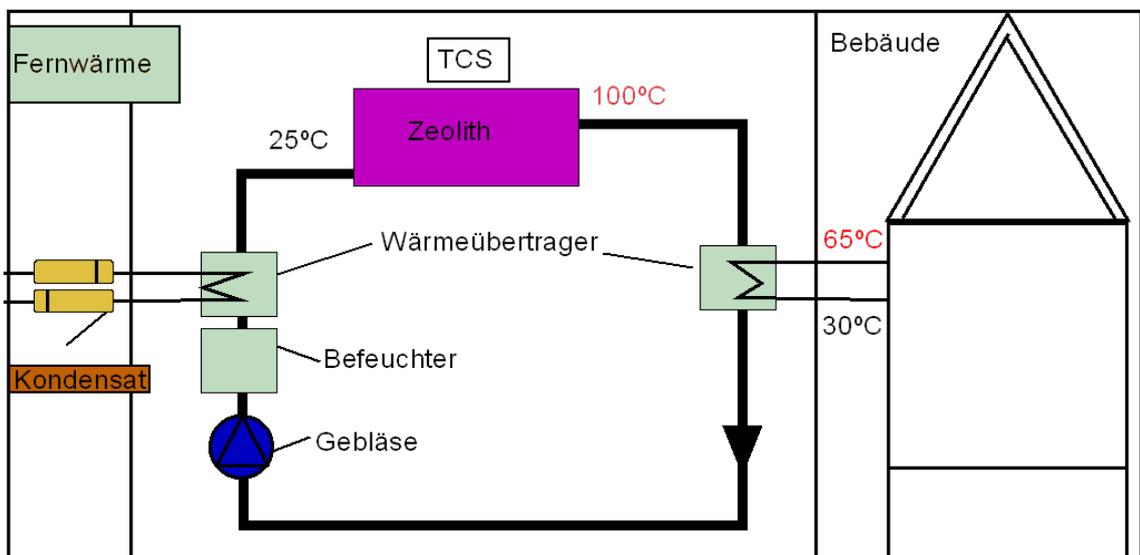


Abbildung 5: Nutzung der durch Kondensation und Adsorption freiwerdenden Energie für Heizzwecke [39].



Abbildung 6: Ansicht des Hauses, an dem die Experimentellen Untersuchungen durchgeführt wurden.

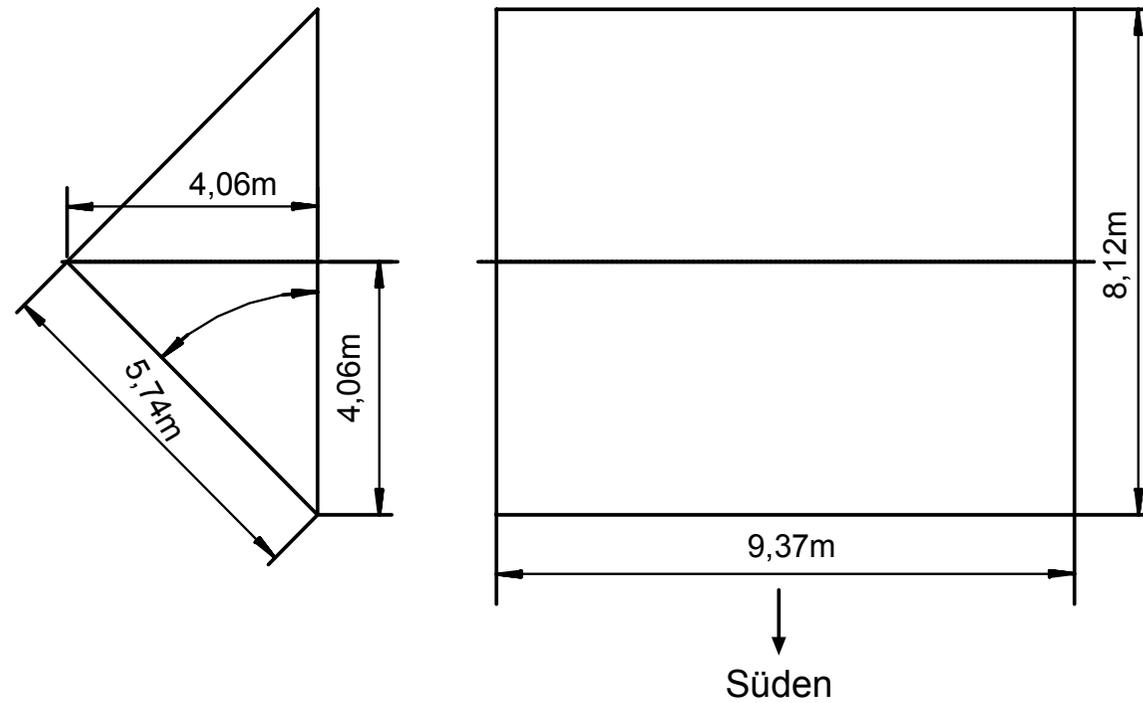
Grundfläche des Hauses: 9,37m * 8,12m.

Wohnfläche des Hauses: 115m².

Erdgeschoß und Dachgeschoß.

Nicht unterkellert.

Solarkollektoren: 20m² Fläche mit 45° Neigung zur Horizontalen und nach Ausrichtung nach Süden.



Wohnfläche des Hauses: 115 m²
halbe Dachfläche: 5,74m * 9,37m = 53,8m²
halbe Dachfläche mit Dachüberstand:
6,24m * 10,37m = 64,7m²

Abbildung 7: Grundriß des Hauses, an dem die experimentellen Untersuchungen durchgeführt wurden.

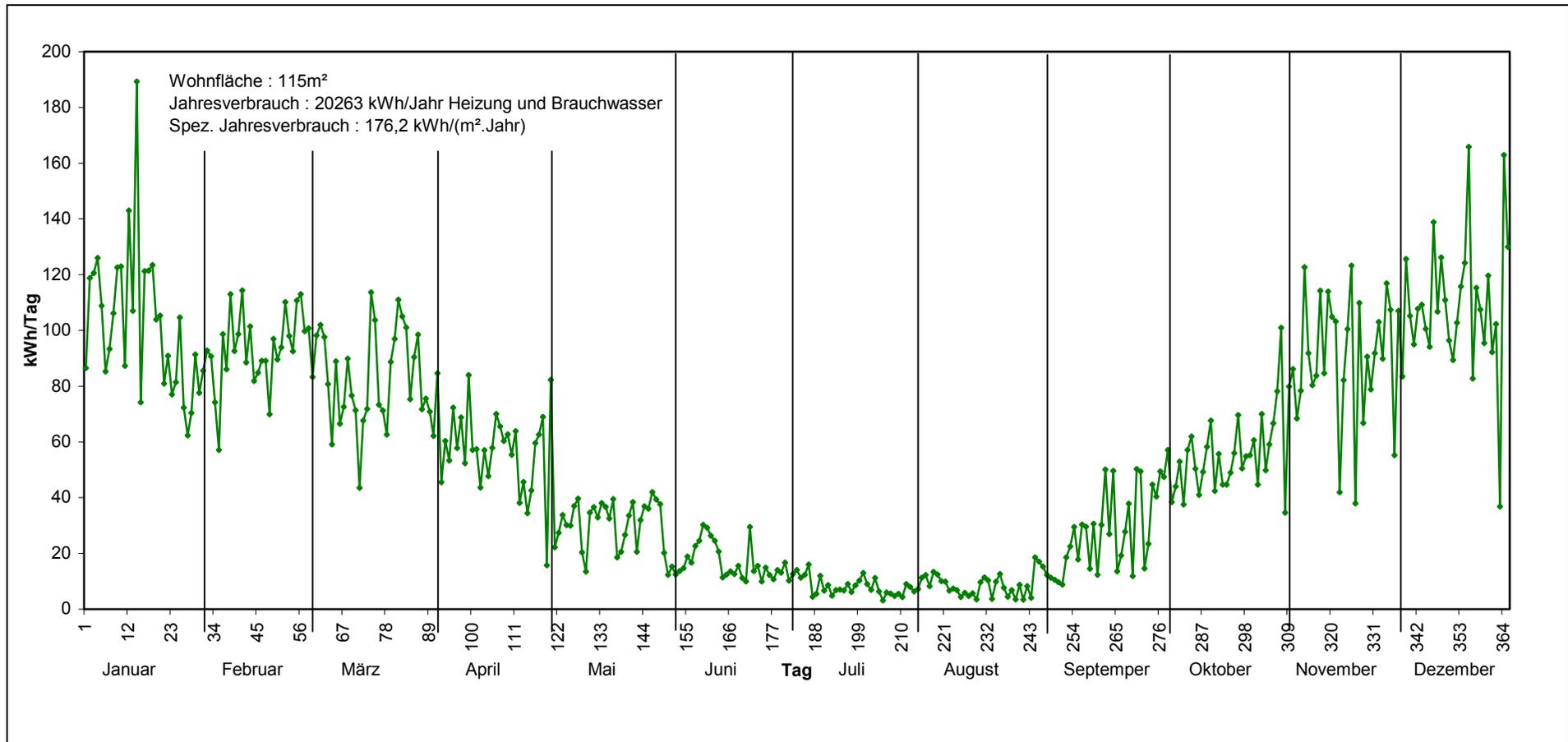


Abbildung 8: Täglicher Verbrauch an Wärme für Heizung und Brauchwasser für ein Haus mit 115 m² Wohnfläche und einem spez. Jahresverbrauch von 176,2 kWh/(m².Jahr).

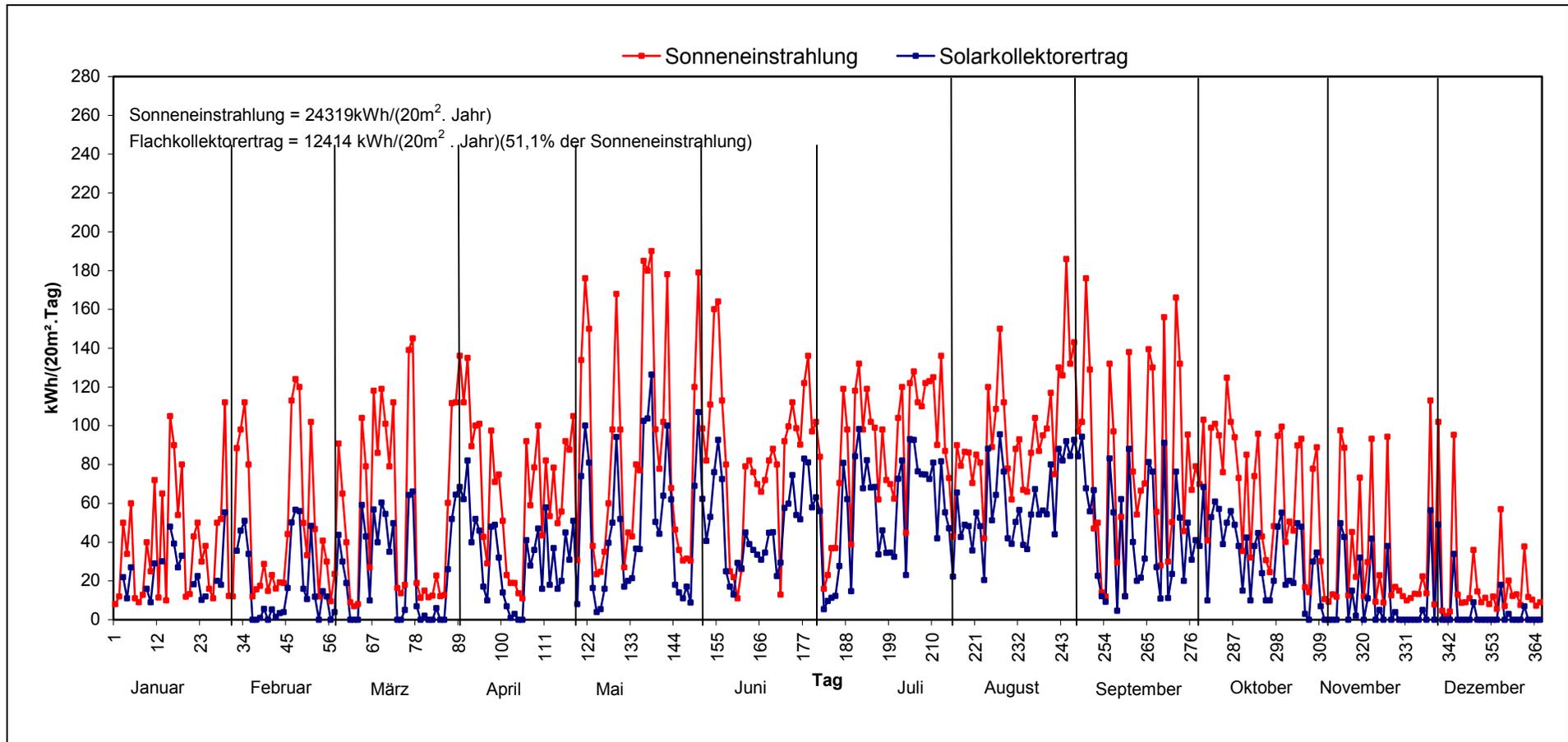


Abbildung 9: Tägliche Sonneneinstrahlung und täglicher Solarkollektorertrag für 20m² Kollektorfläche in kWh/(20m².Tag). Kollektoren unter einem Winkel von 45° zur Horizontalen nach Süden ausgerichtet

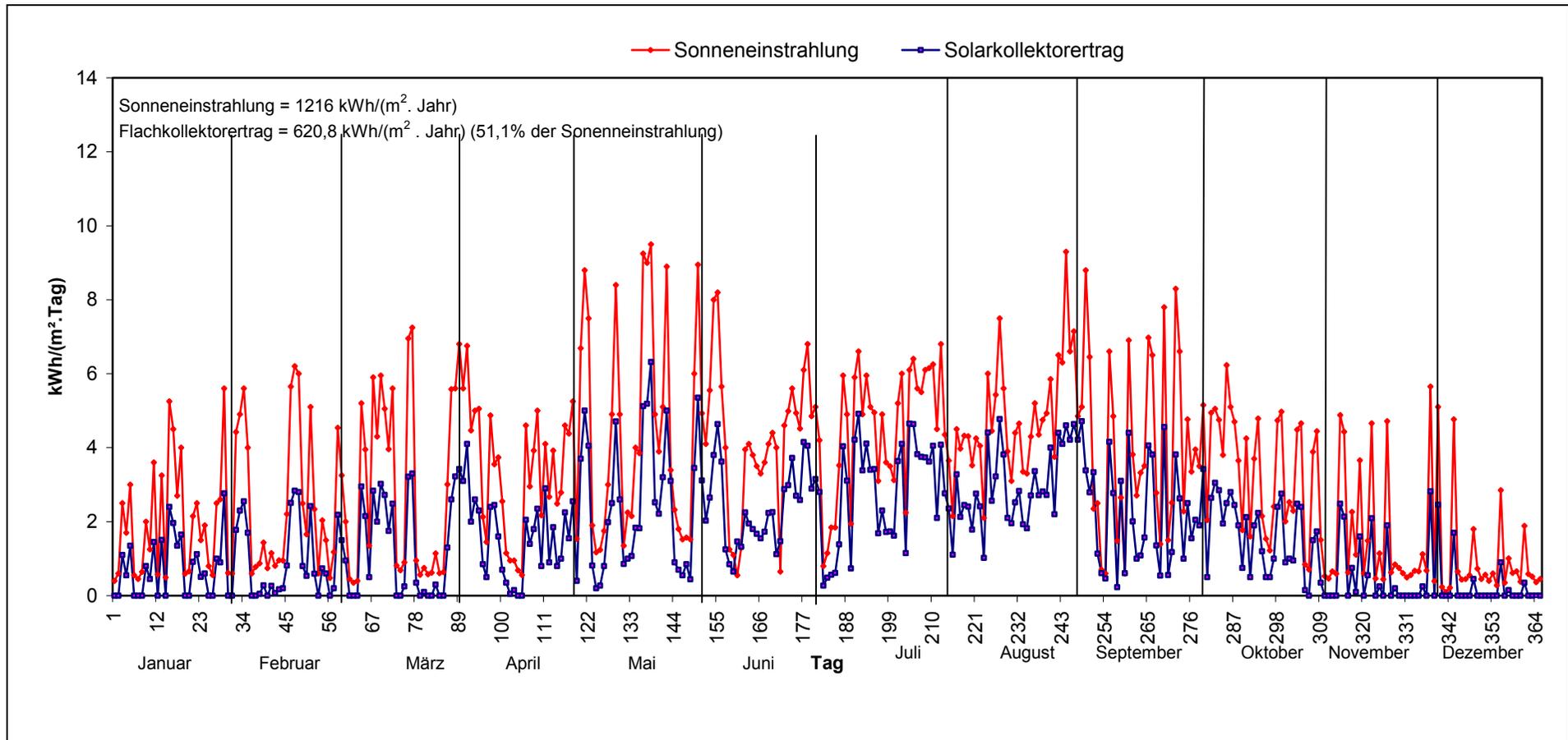
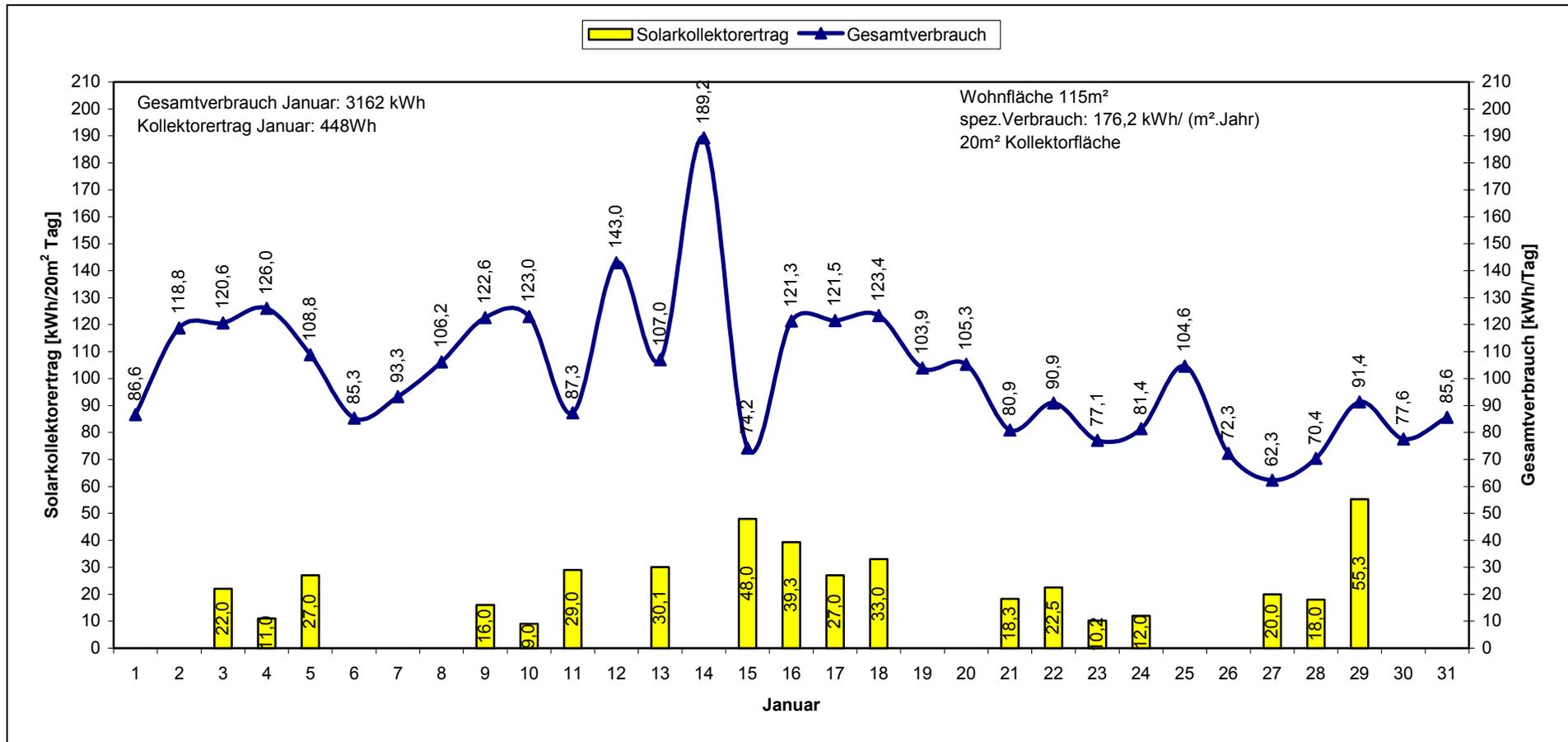


Abbildung 10: Tägliche Sonneneinstrahlung und täglicher Solarkollektorertrag für 1m² Kollektorfläche in kWh/(m²·Tag). Kollektoren unter einem Winkel von 45° zur Horizontalen nach Süden ausgerichtet

Abbildung 11: Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Januar bei 20 m² Kollektorfläche

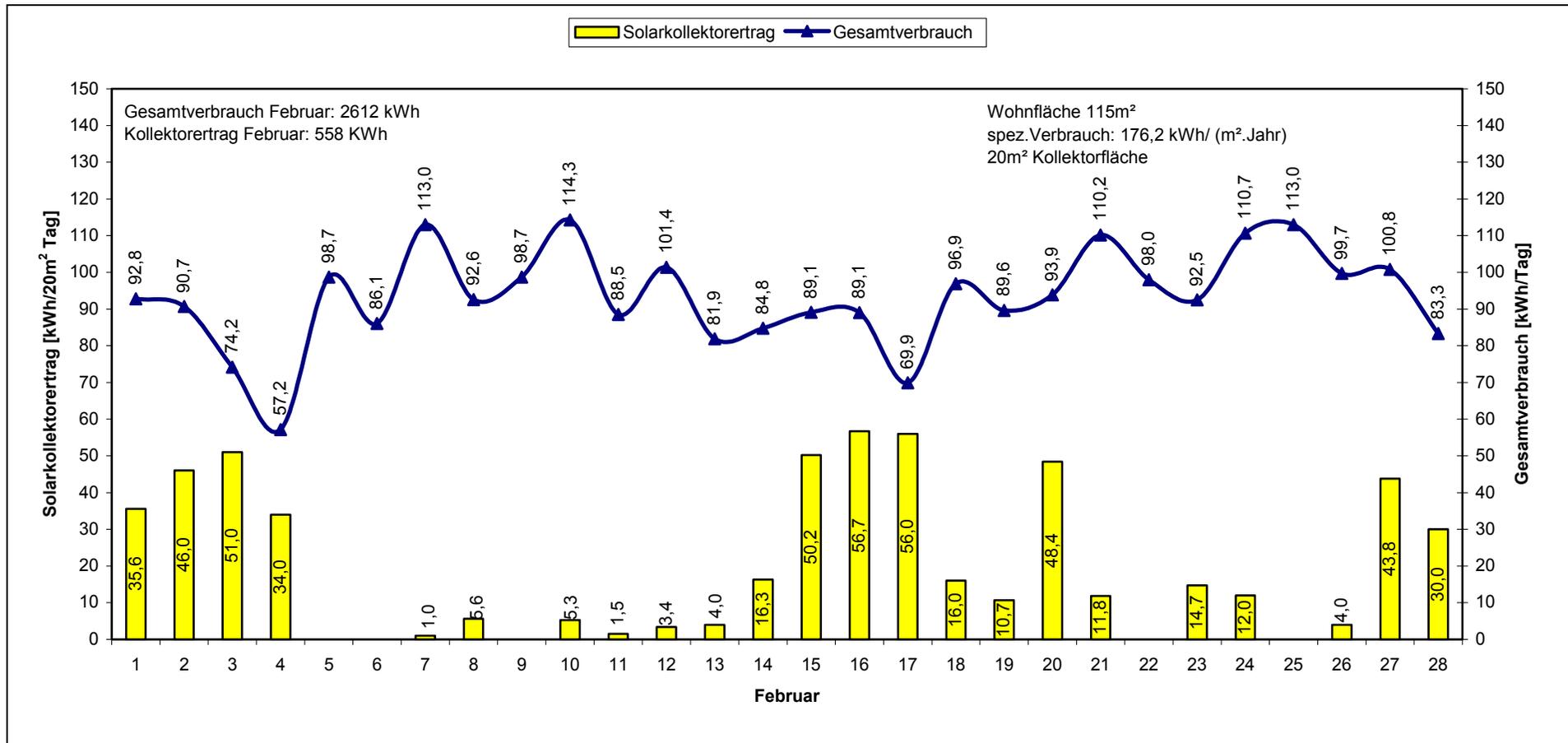


Abbildung 12: Der Flachkollektoretrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Februar bei 20 m² Kollektorfläche

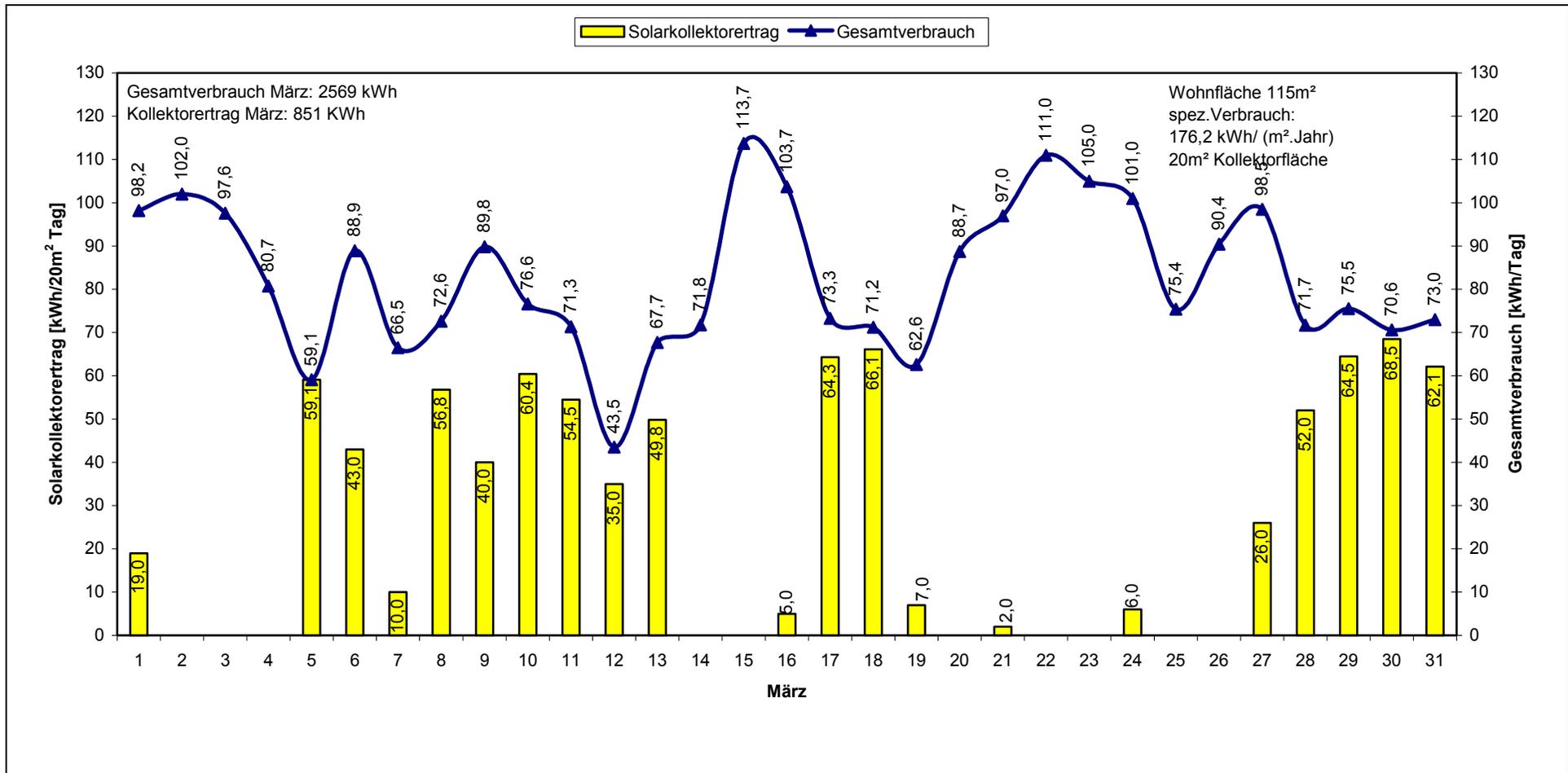


Abbildung 13: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im März bei 20 m² Kollektorfläche

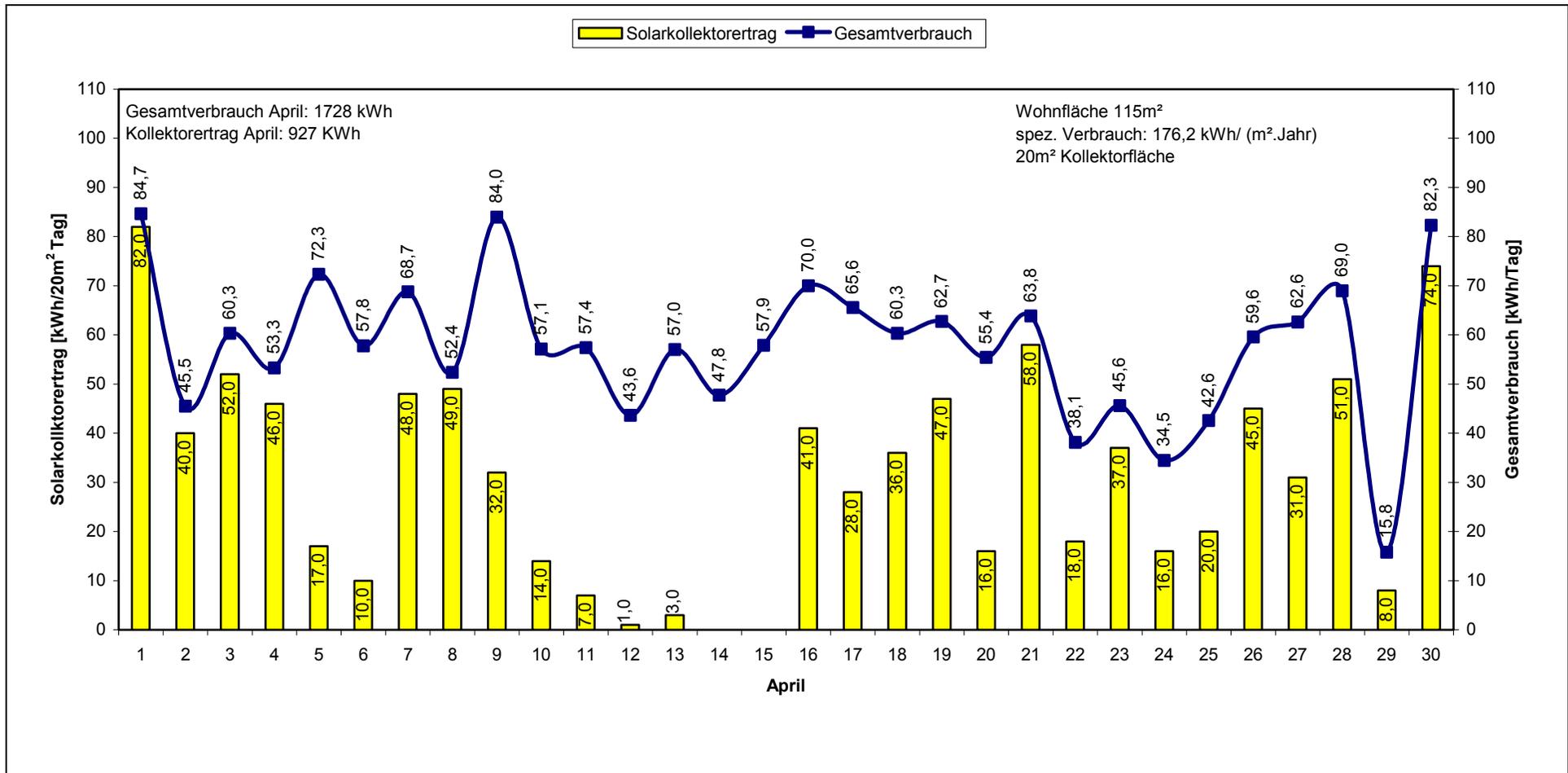


Abbildung 14: Der Flachkollektor ertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im April bei 20 m² Kollektorfläche

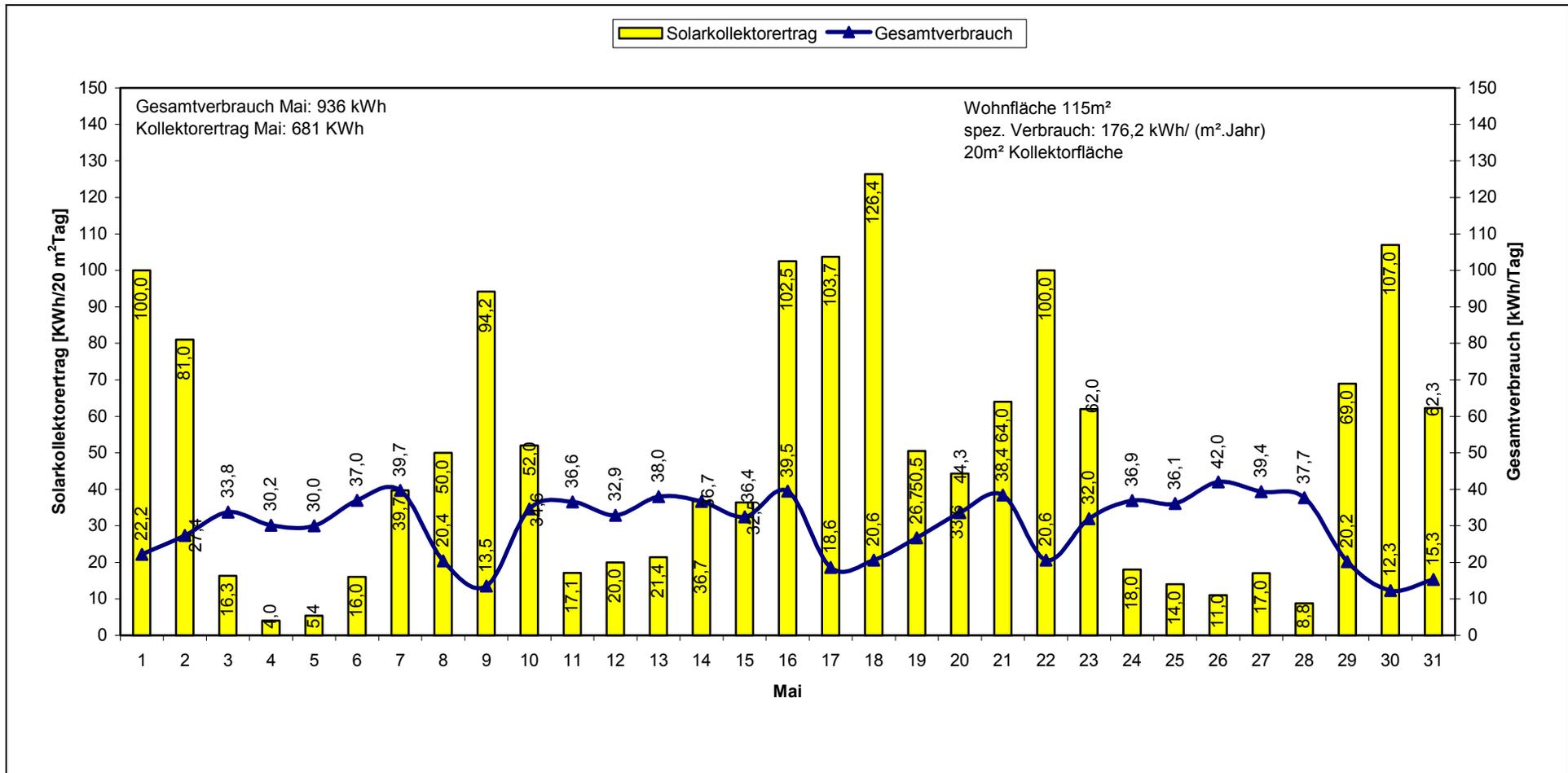
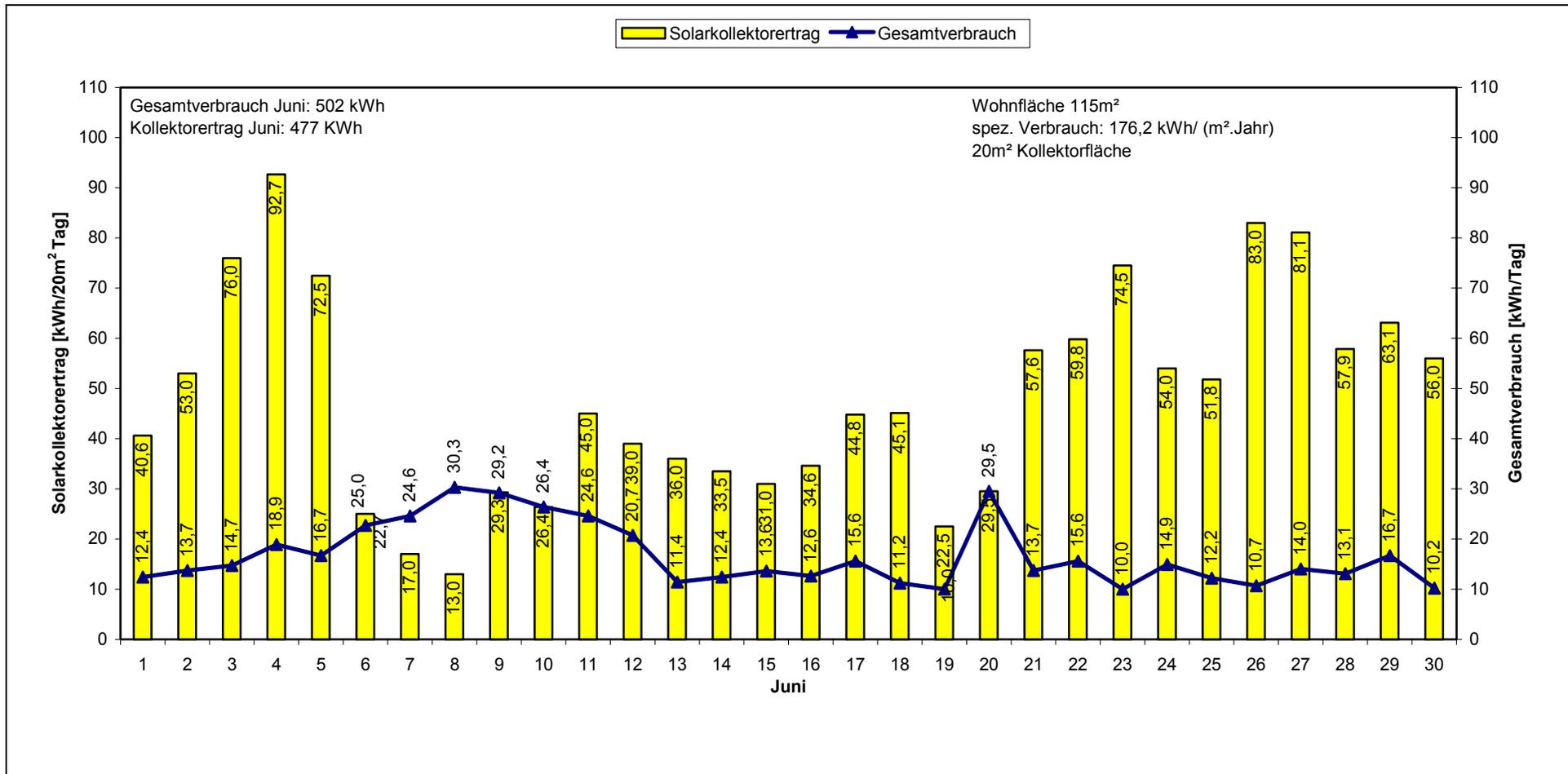


Abbildung 15: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Mai bei 20 m² Kollektorfläche

Abbildung 16: Der Flachkollektorsertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Juni bei 20 m² Kollektorfläche

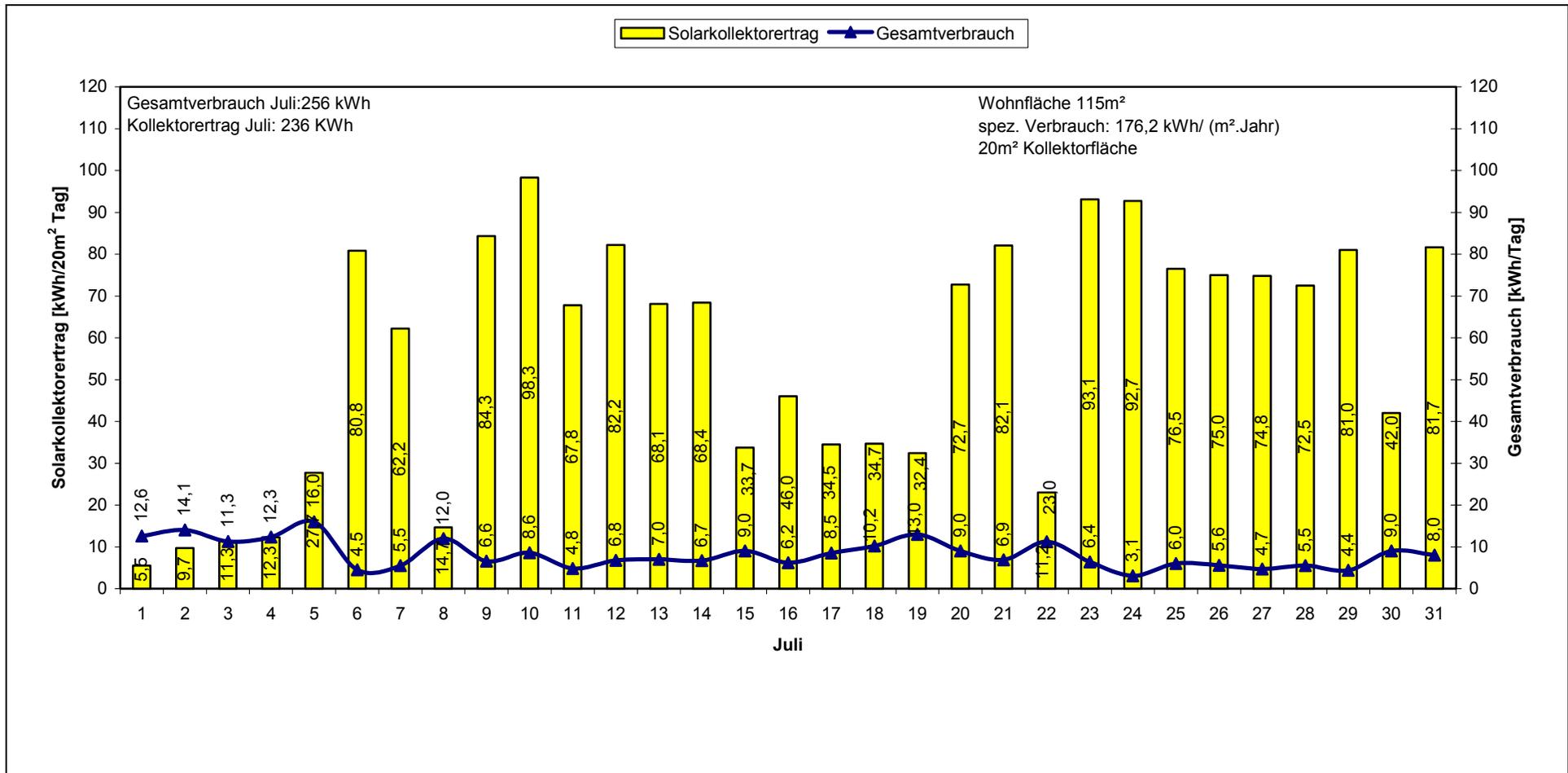
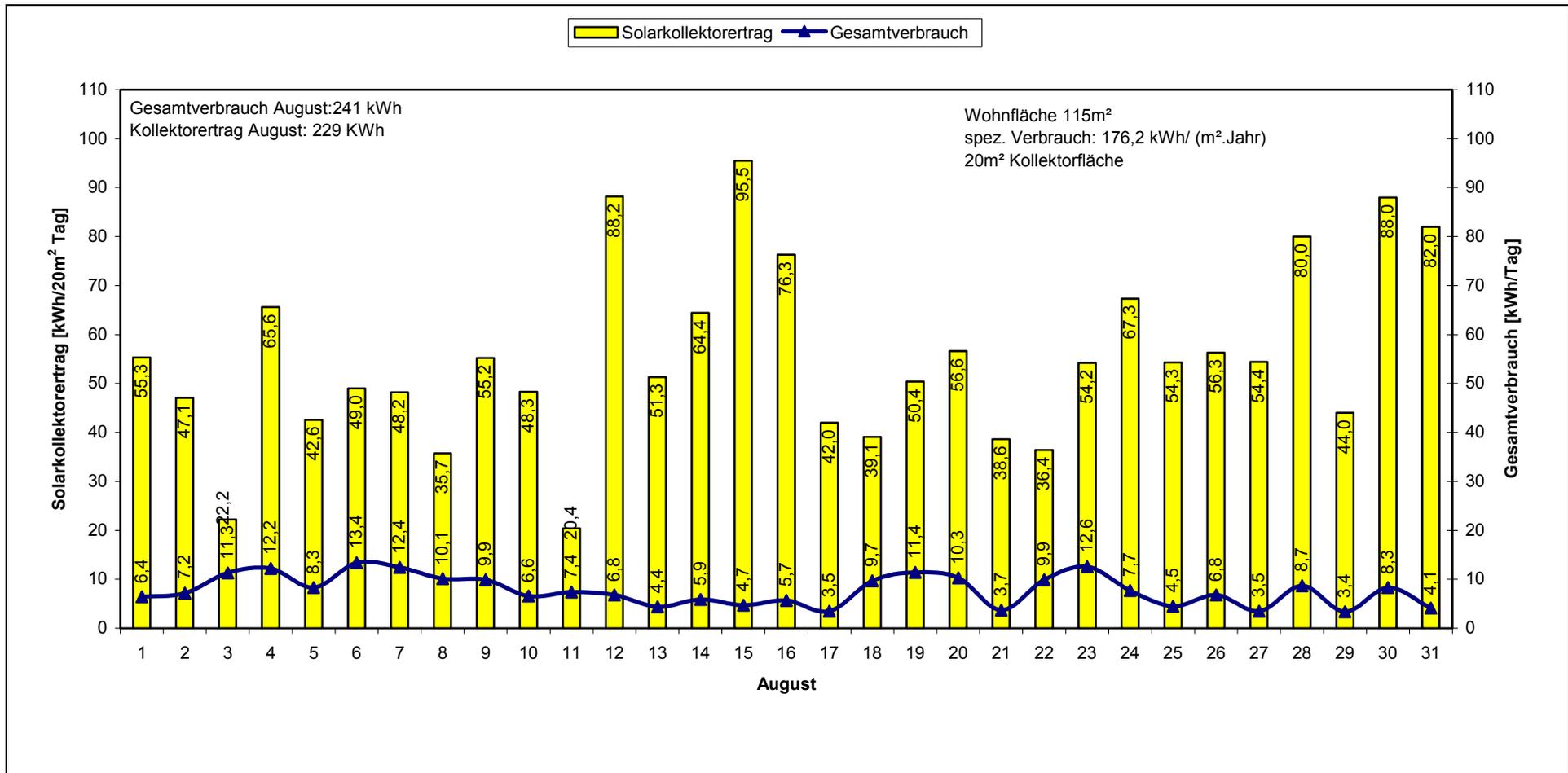
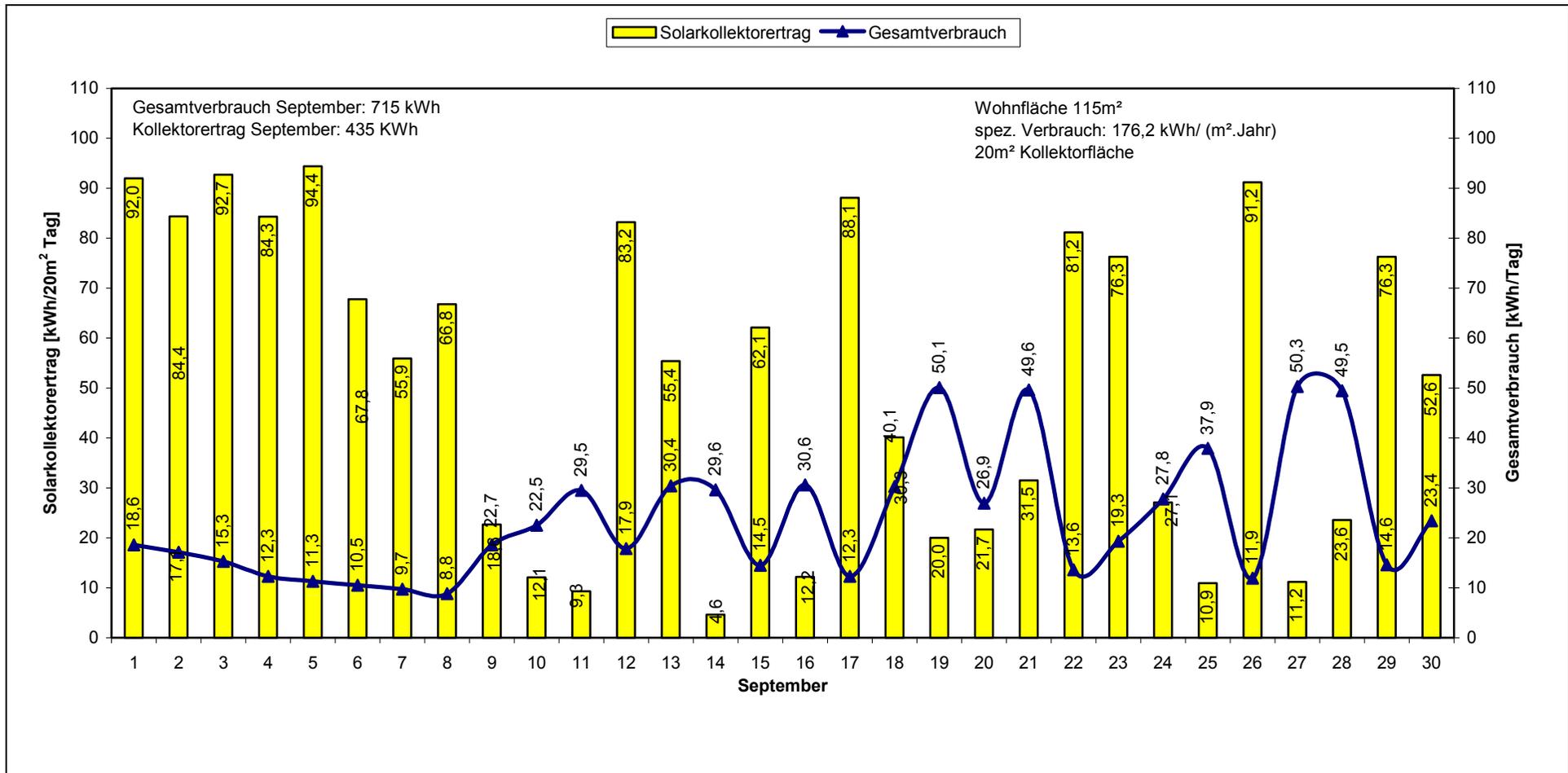
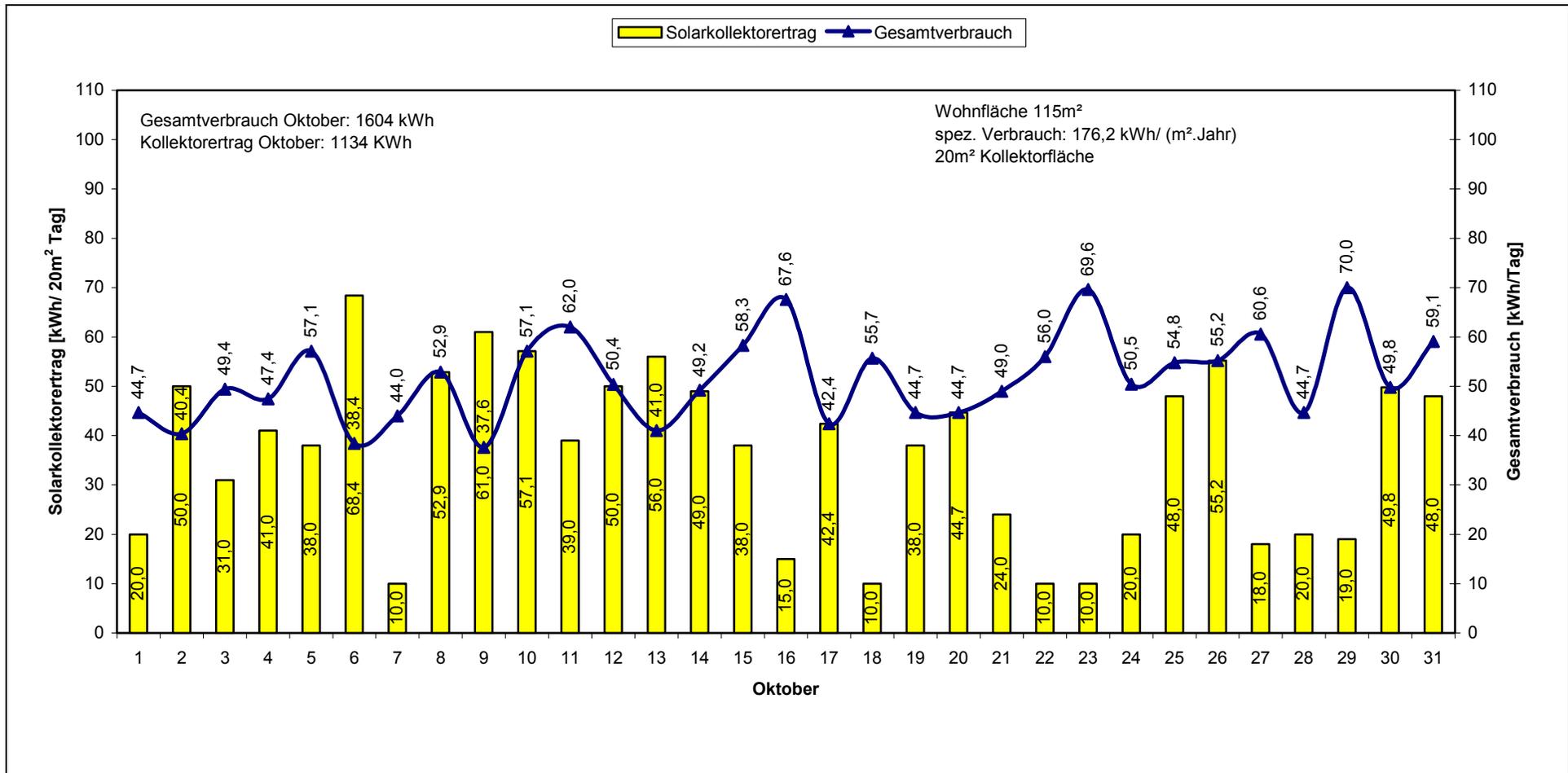
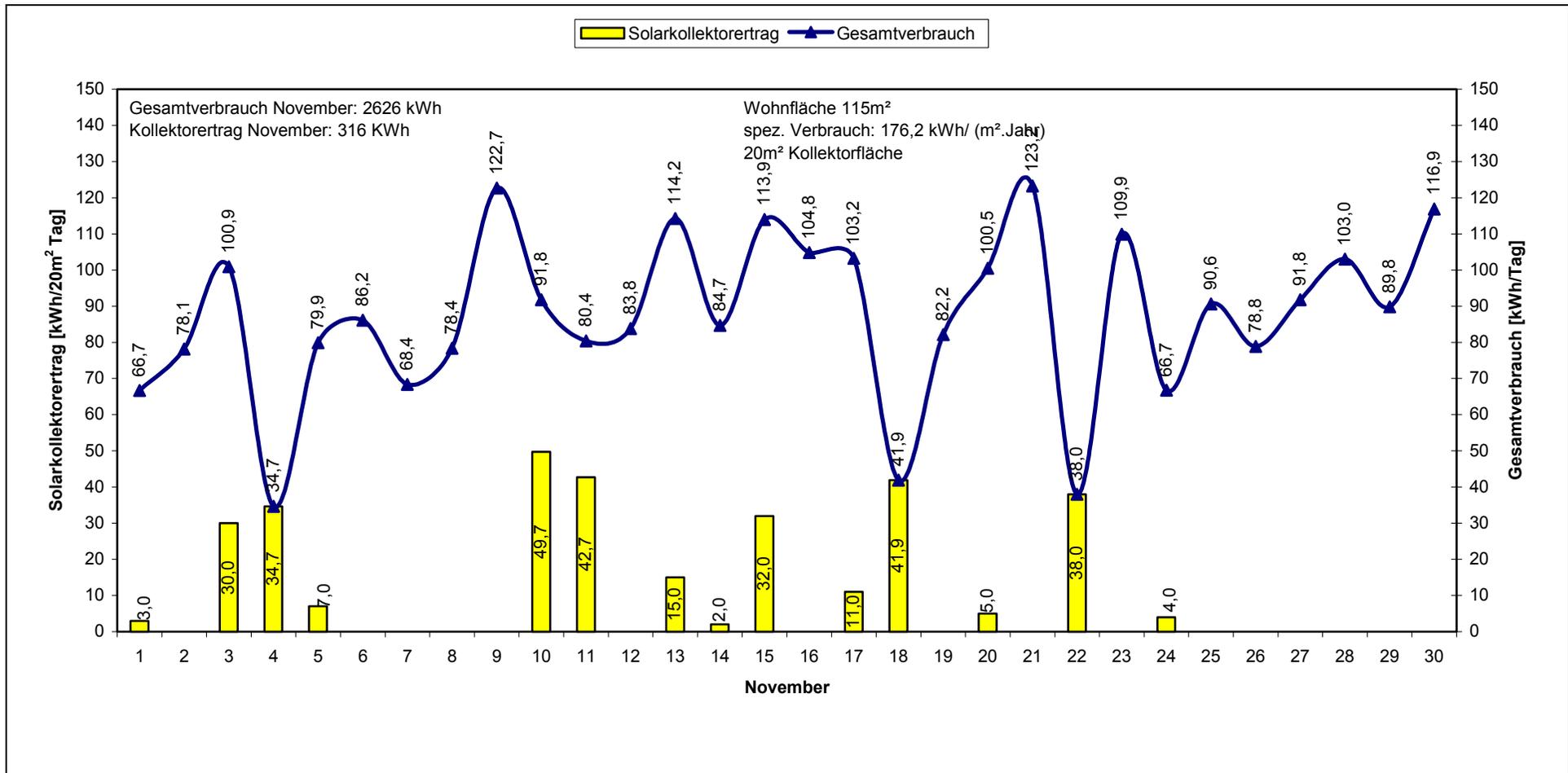


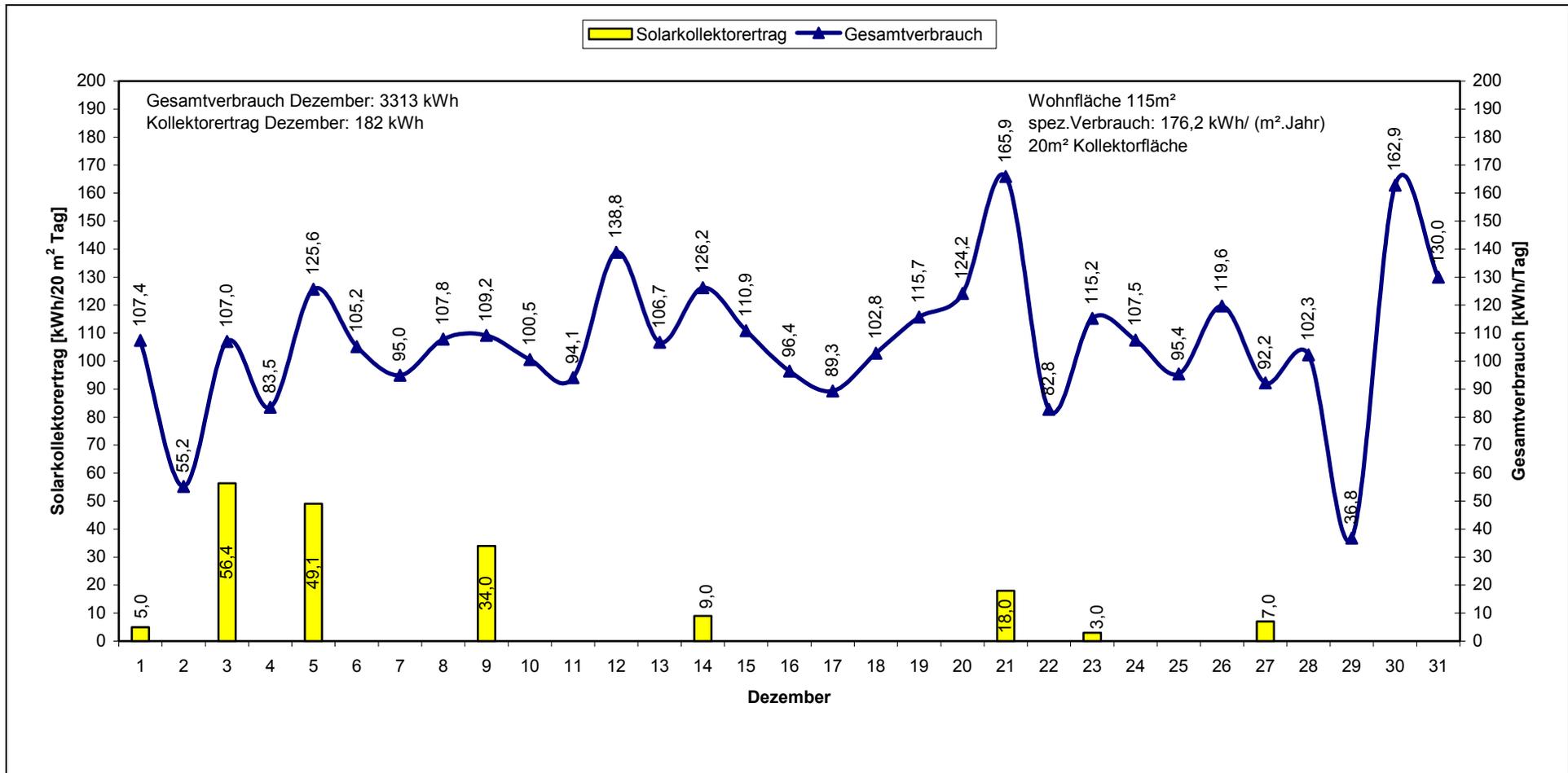
Abbildung 17: Der Flachkollektorsertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Juli bei 20 m² Kollektorfläche

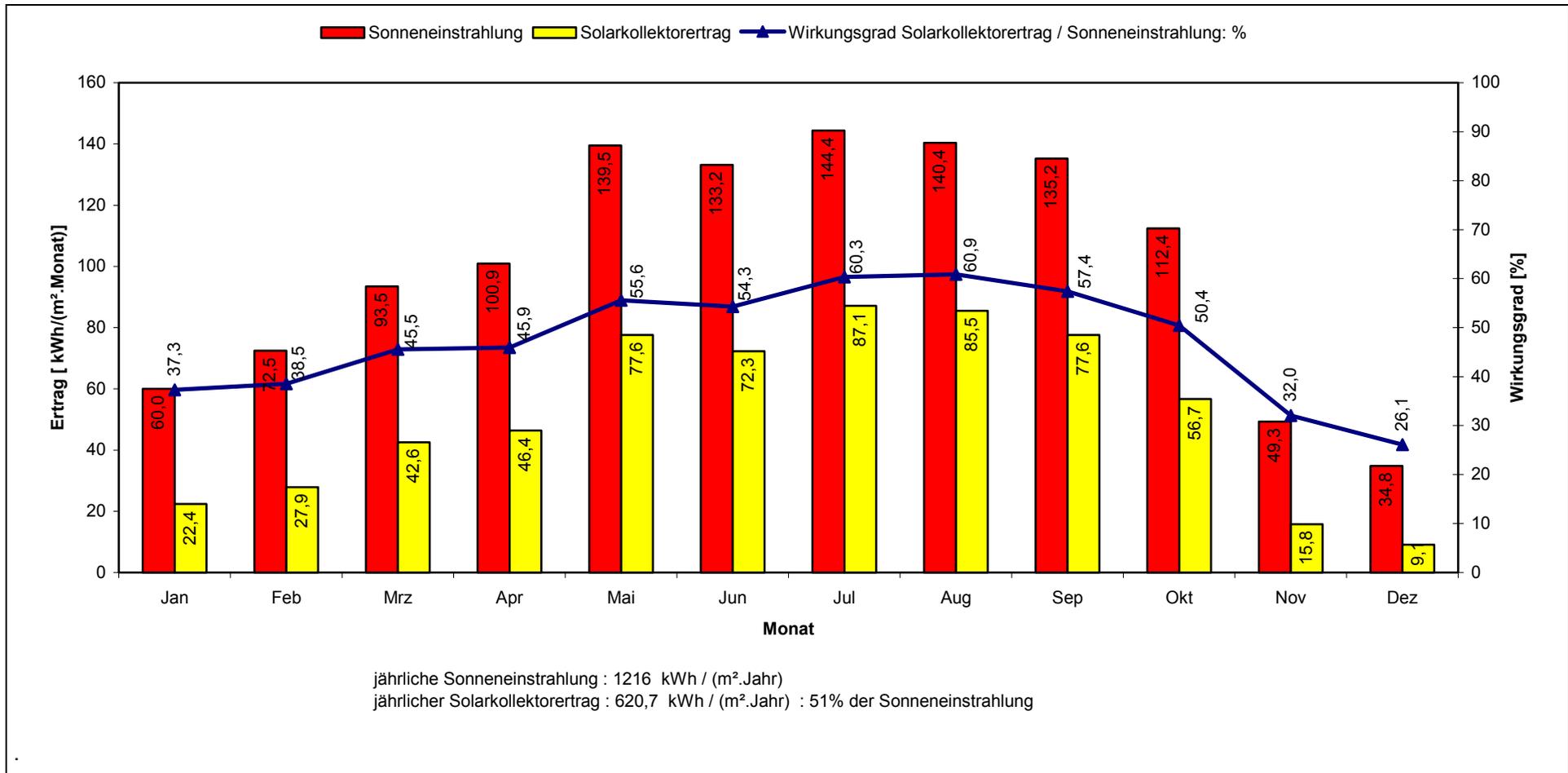
Abbildung 18: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im August bei 20 m² Kollektorfläche

Abbildung 19: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im September bei 20 m² Kollektorfläche

Abbildung 20: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Oktober bei 20 m² Kollektorfläche

Abbildung 21: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im November bei 20 m² Kollektorfläche

Abbildung 22: Der Flachkollektorertrag und der Gesamtverbrauch des Hauses im Dezember bei 20 m² Kollektorfläche

Abbildung 23: Sonneneinstrahlung und Solarkollektorertrag pro m² Kollektorfläche für die Monate Januar bis Dezember

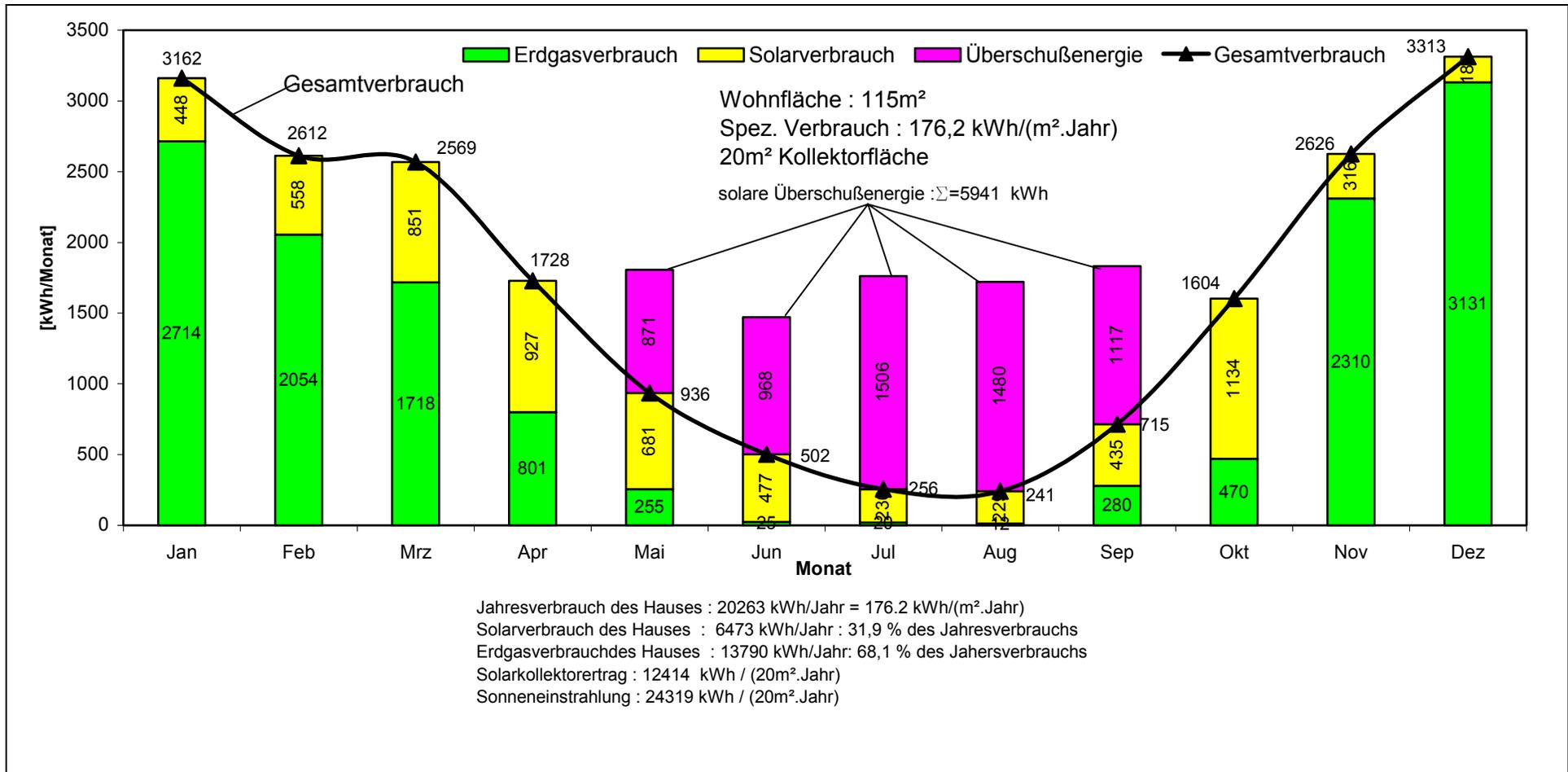


Abbildung 24 (Grundfall): Monatsverbräuche des Hauses mit 20m² Kollektorfläche, mit 115 m² Wohnfläche und einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch von 176,2 kWh/(m².Jahr) sowie Angabe der solaren Überschussenergie.

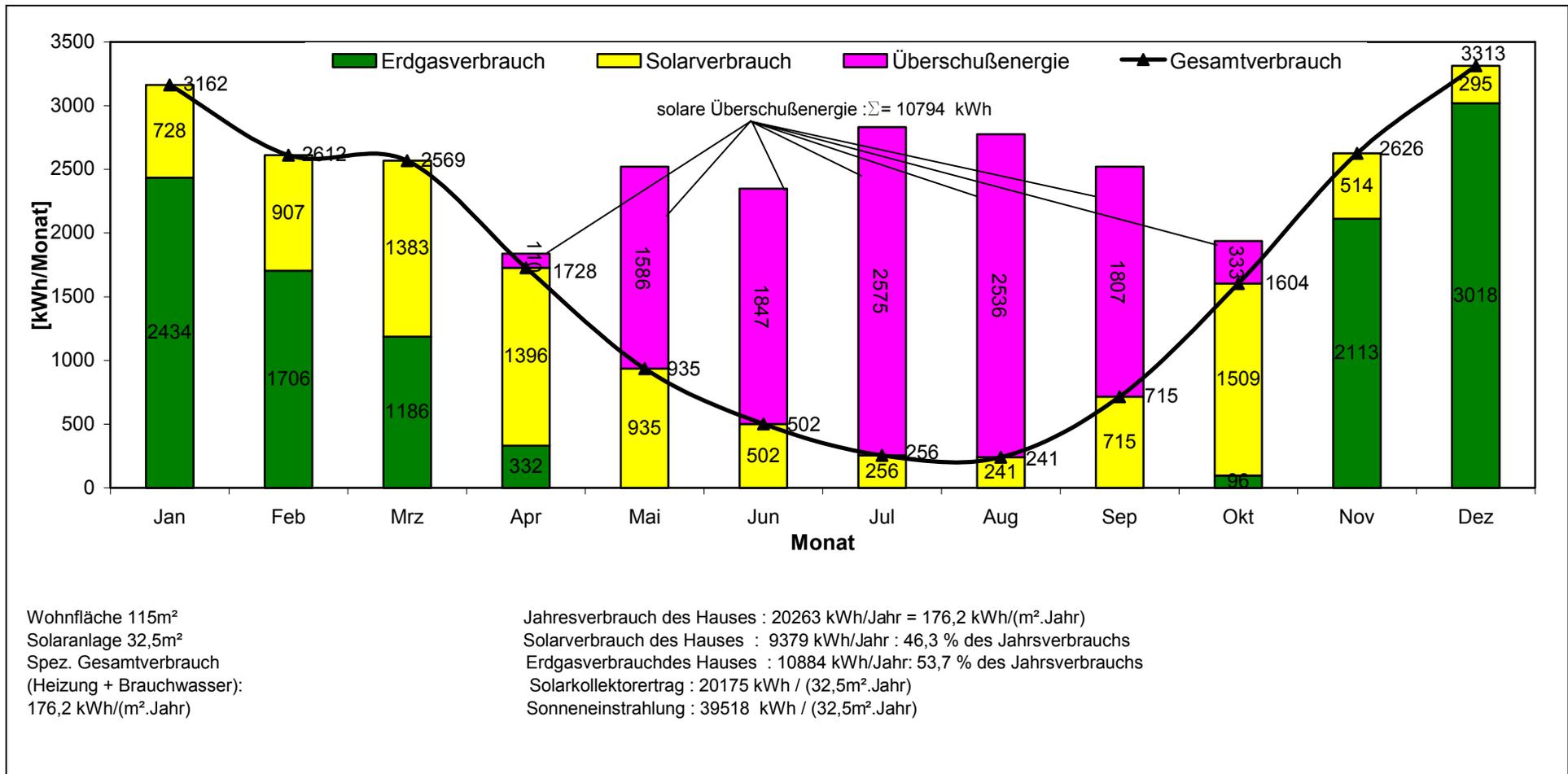


Abbildung 25 (32,5 m² Solarkollektoren statt 20m² wie beim Grundfall): Monatsverbräuche eines Hauses mit 32,5 m² Kollektorfläche, mit 115 m² Wohnfläche und einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch von 176,2 kWh/(m².Jahr) sowie Angabe der solaren Überschußenergie

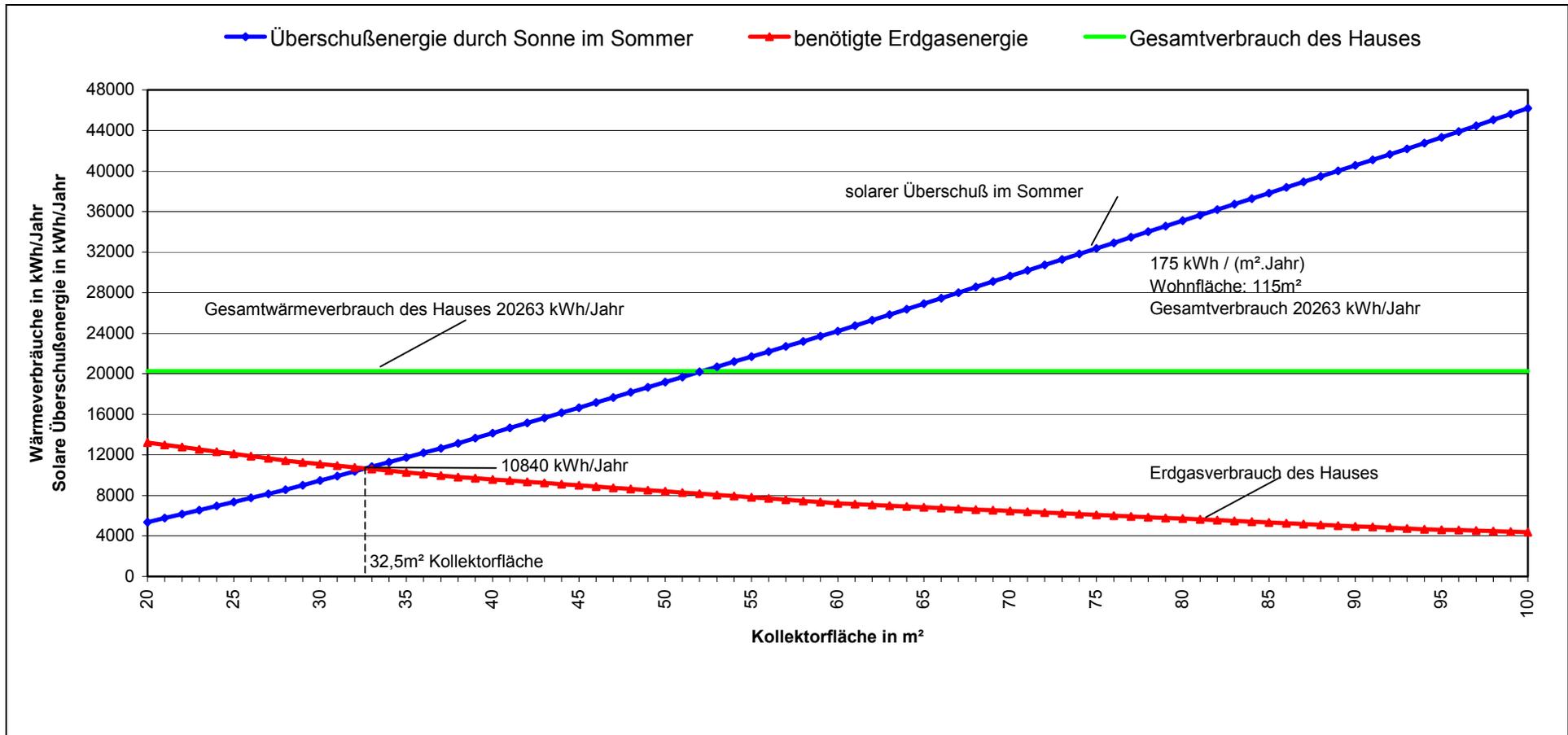
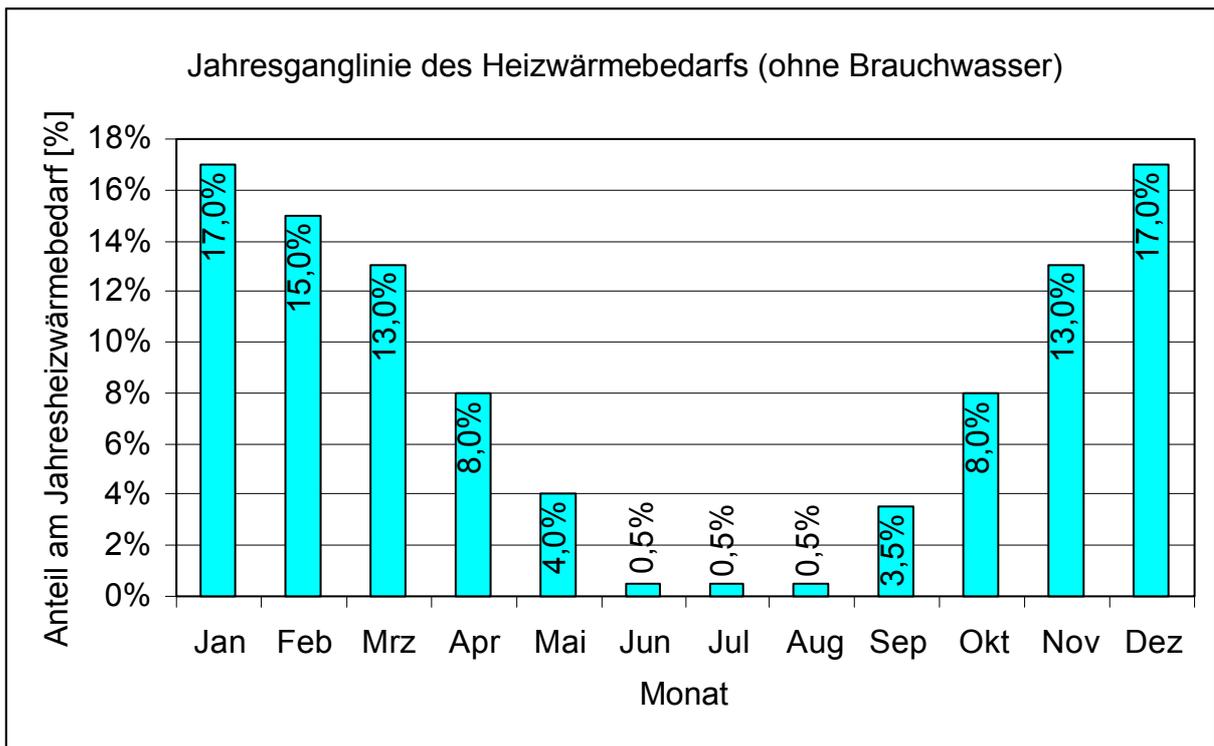


Abbildung 26: Überschussenergie durch die Sonne im Sommer und benötigte Erdgasenergie in Abhängigkeit von der Kollektorfläche bei einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch des Hauses von 176,2 kWh/(m²·Jahr) und bei einer Wohnfläche von 115m².



Standardjahresganglinie

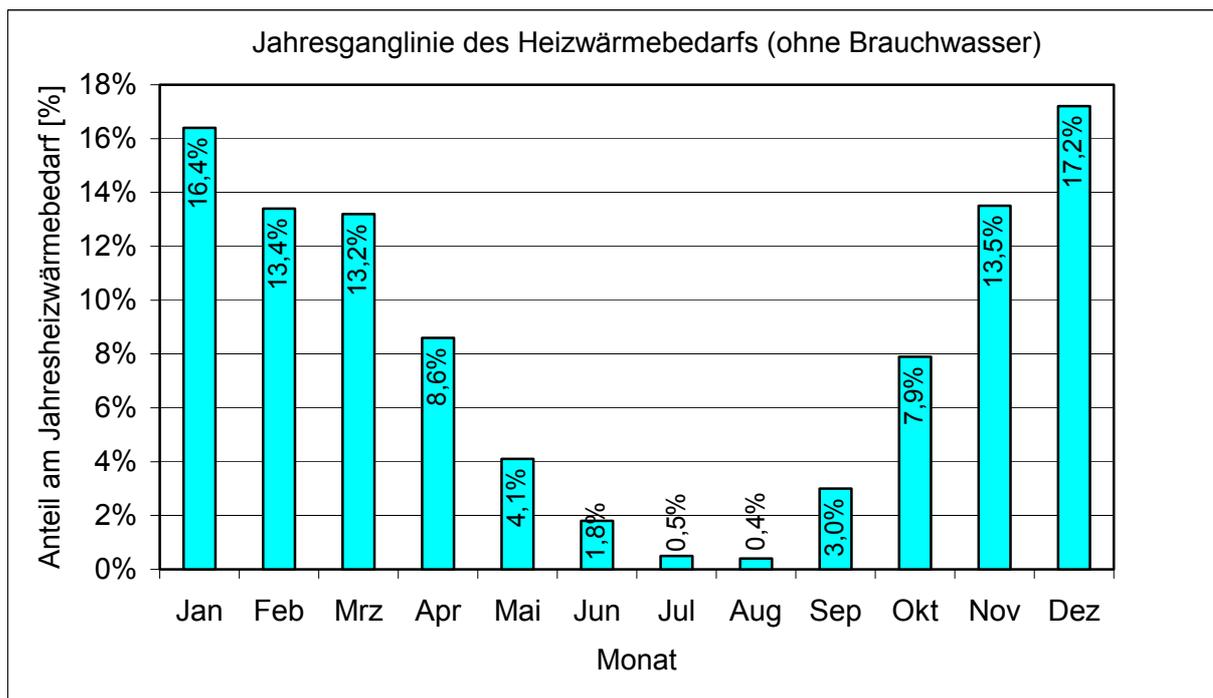
Experimentell an dem Haus mit 115m² Wohnfläche ermittelte Jahresganglinie für den Heizwärmebedarf

Abbildung 27: Jahresganglinie für den Heizwärmebedarf ohne Brauchwasser

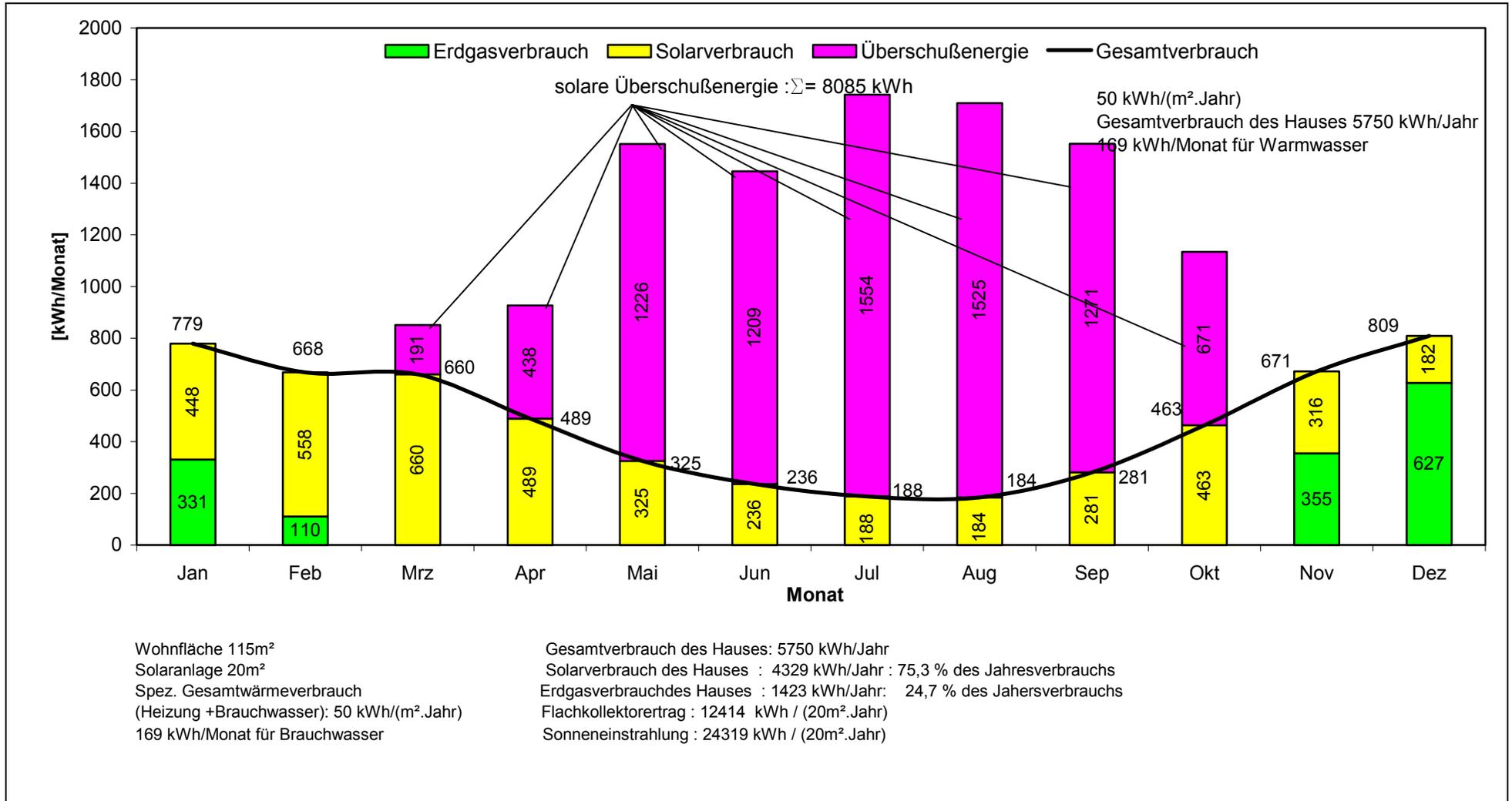


Abbildung 28: (Spez. Gesamtwärmeverbrauch von 50 kWh/(m².Jahr) statt 176,2 kWh/(m².Jahr) wie beim Grundfall): Monatsverbräuche eines Hauses mit einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch von 50 kWh/(m².Jahr), einer Wohnfläche von 115 m² und einer Kollektor Kollektorfläche von 20m² sowie Angabe der solaren Überschussenergie

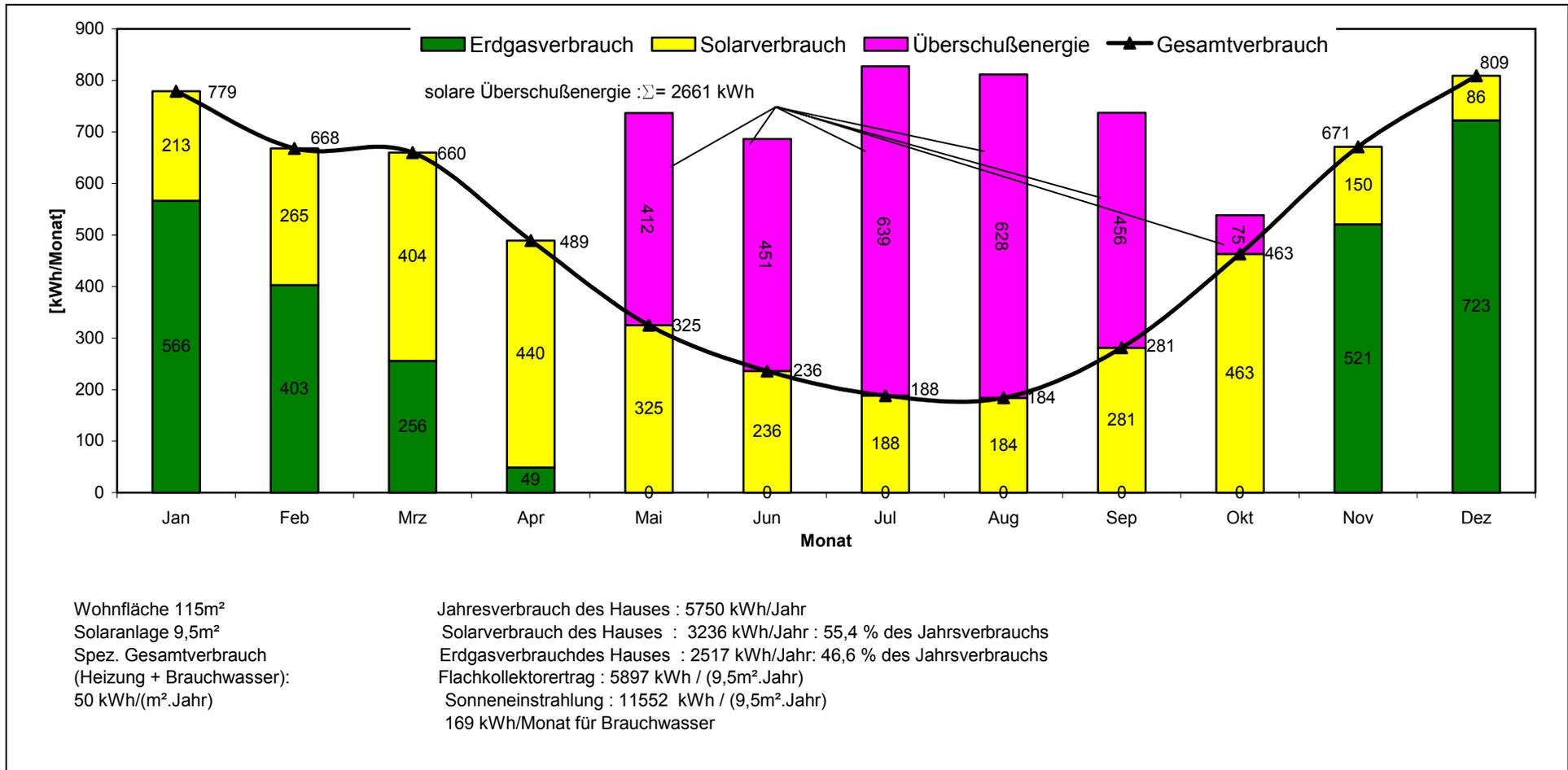


Abbildung 29 (Gegenüber Grundfall 9,5m² Kollektorfläche und spez. Gesamtverbrauch von 50 kWh/(m².Jahr): Monatsverbräuche eines Hauses mit einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch von 50 kWh/(m².Jahr), einer Wohnfläche von 115 m² und einer Kollektorfläche von 9,5m² sowie Angabe der solaren Überschussenergie.

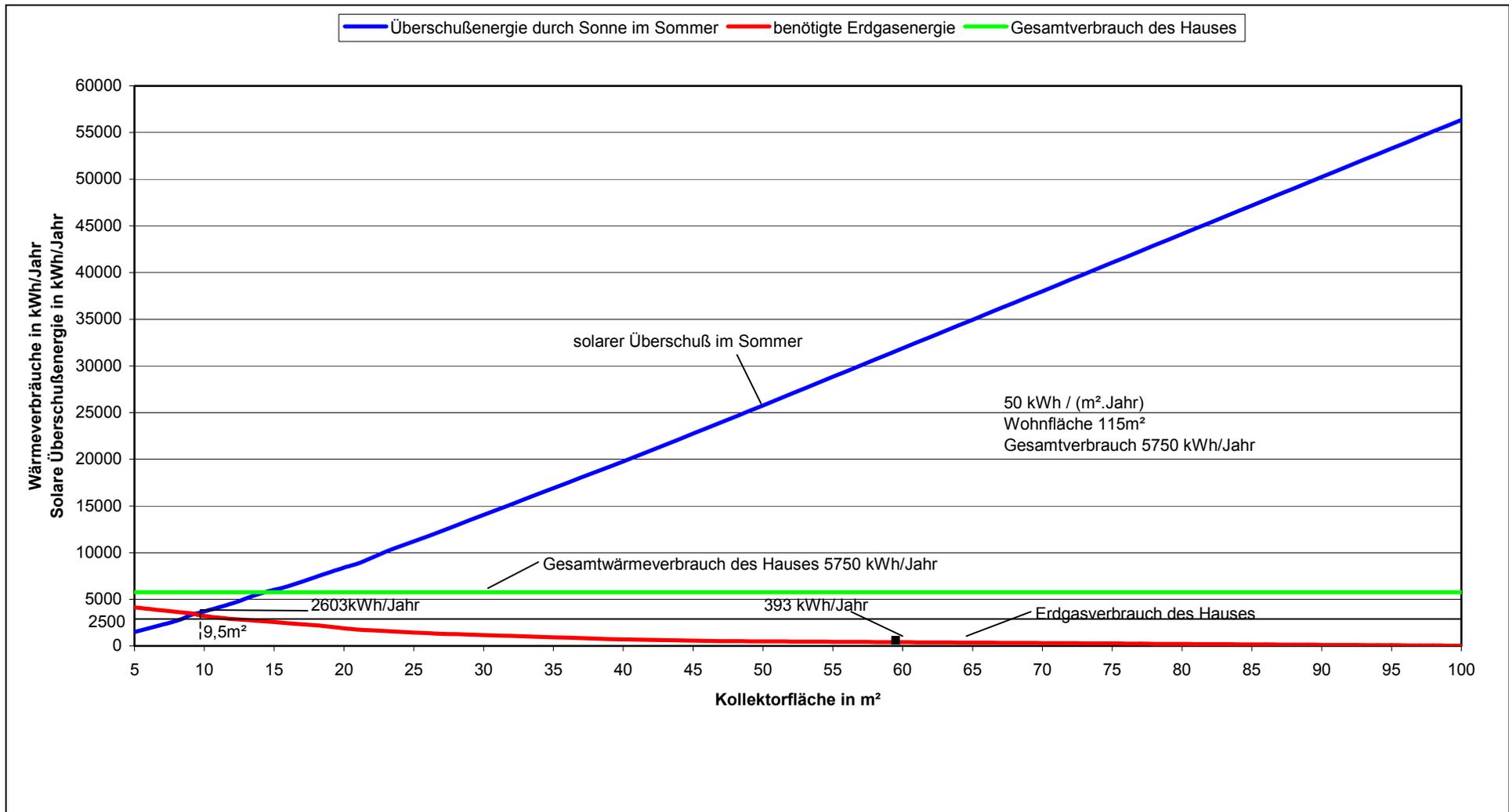


Abbildung 30: Überschussenergie durch die Sonne im Sommer und benötigte Erdgasenergie in Abhängigkeit von der Kollektorfläche bei einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch des Hauses von 50 kWh/(m².Jahr) und bei einer Wohnfläche von 115m².

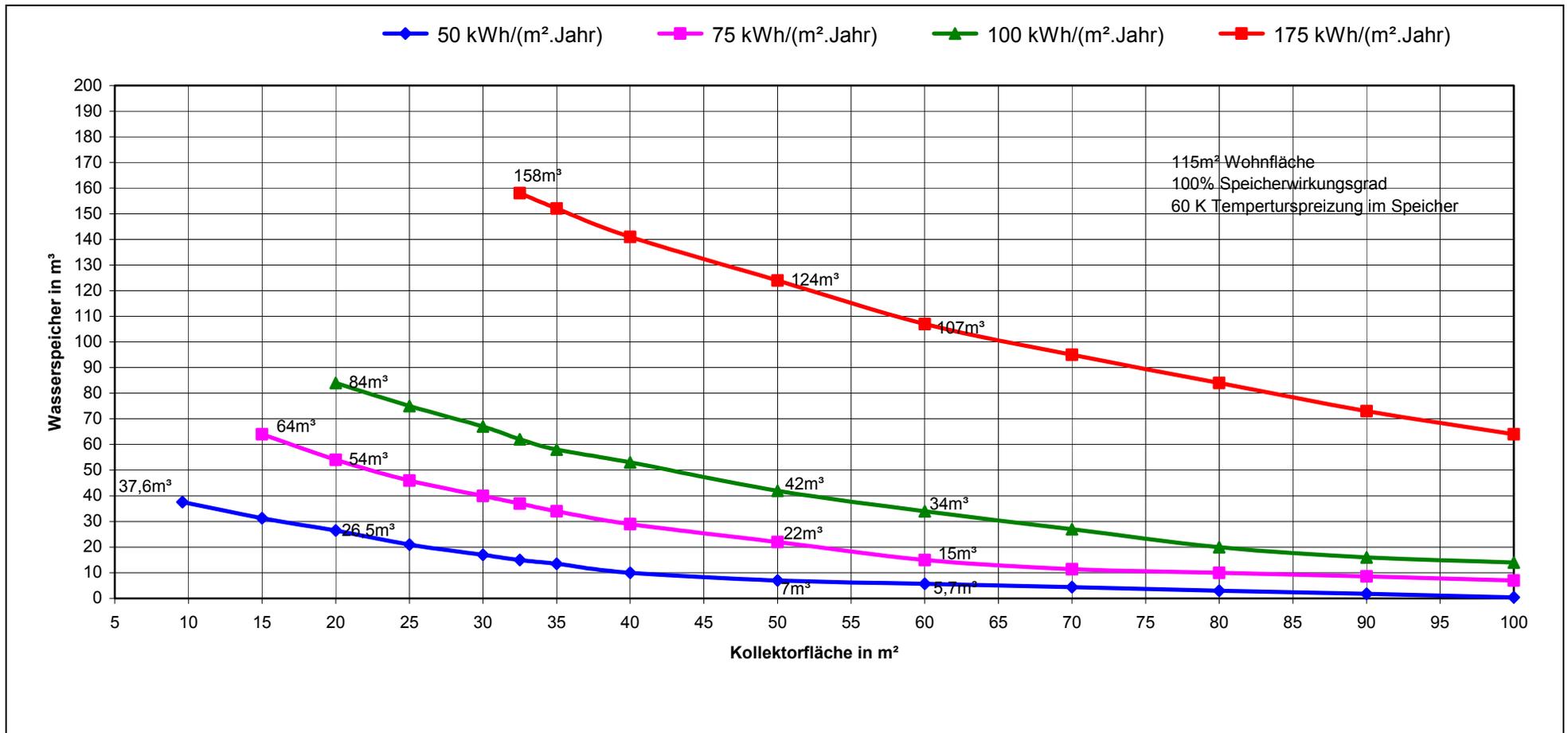


Abbildung 31: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 115m² Wohnfläche bei spez. Gesamtwärmeverbräuchen des Hauses von 175 bis 50 kWh/(m²·Jahr) in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und einer Temperaturdifferenz von kältester zu wärmster Stelle (Temperaturspreizung) im Speicher von 60 K.

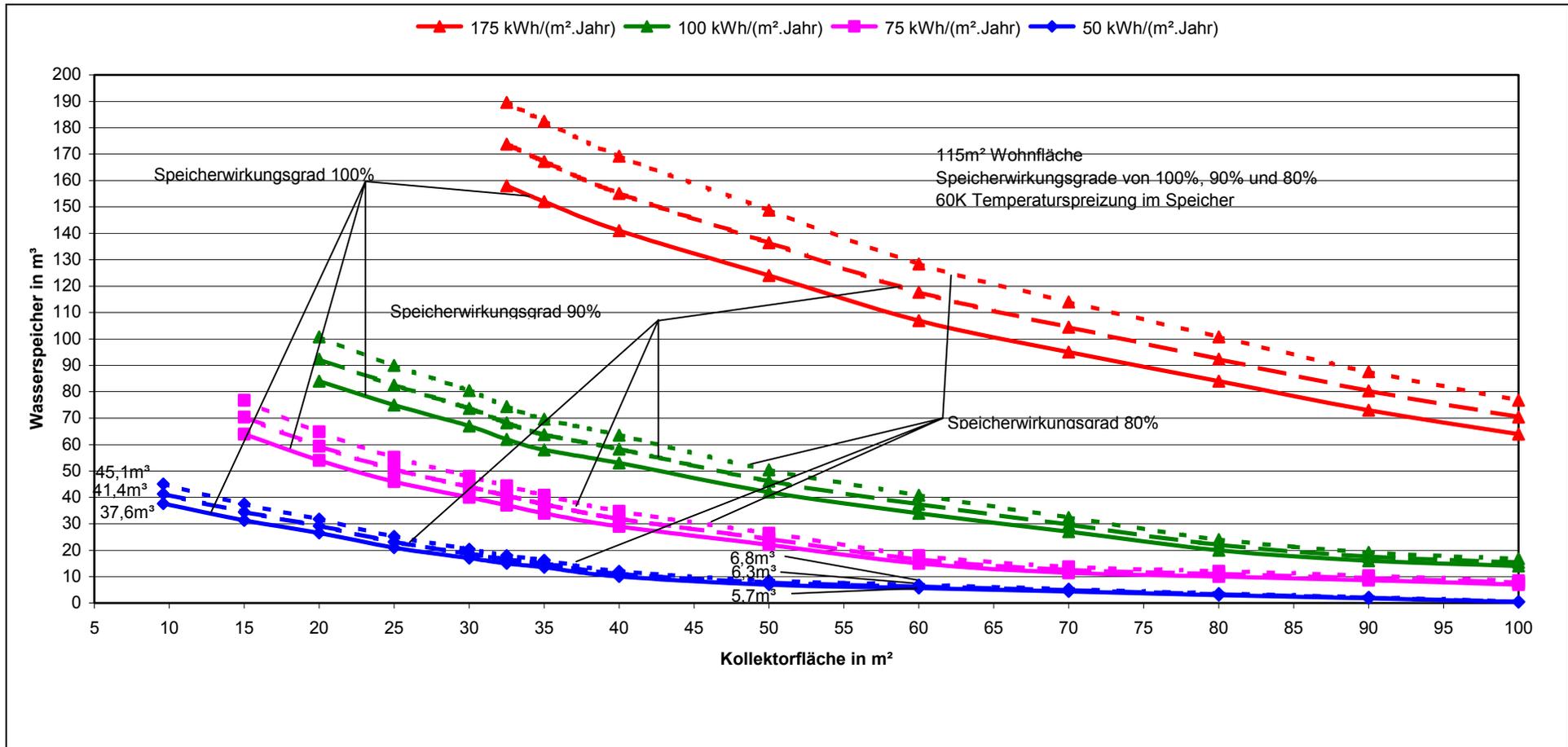


Abbildung 32: (Berücksichtigen auch von Speicherwirkungsgraden von 90% von 80%): Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 115m² Wohnfläche bei spez.Gesamtwärmeverbräuchen des Hauses von 175 bis 50 kWh/(m².Jahr) in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei Speicherwirkungsgraden von 100%, 90% und 80% und einer Temperaturdifferenz von kältester zu wärmster Stelle (Temperaturspreizung) im Speicher von 60 K.

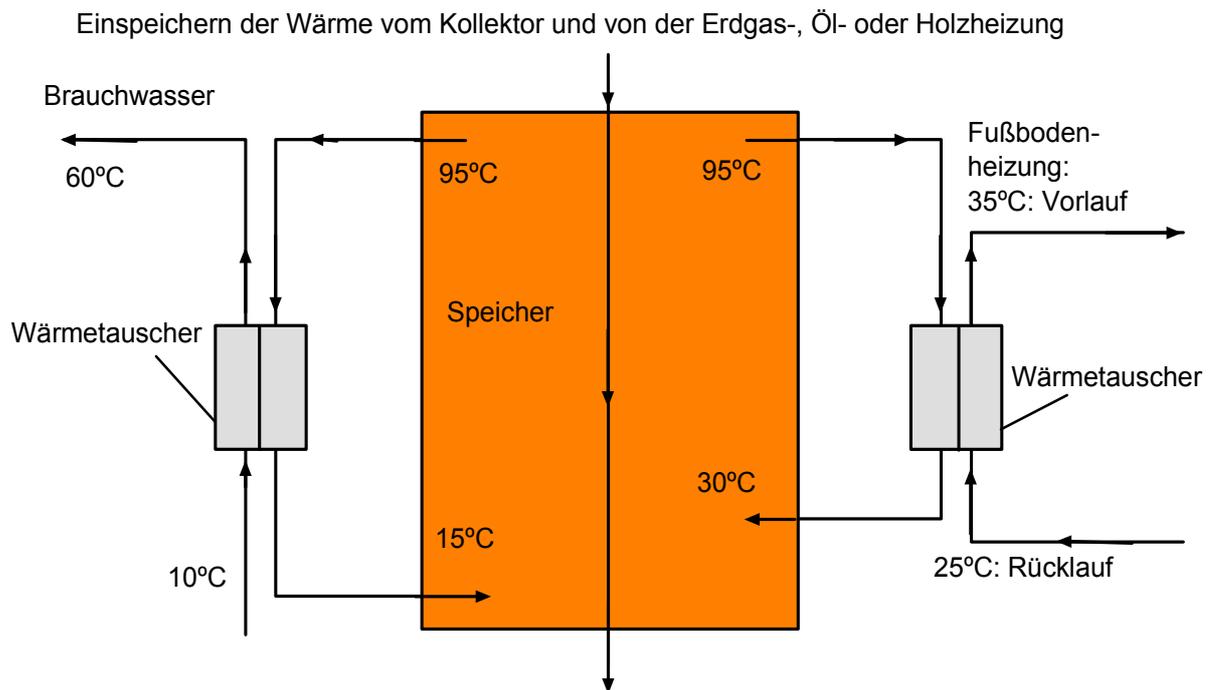
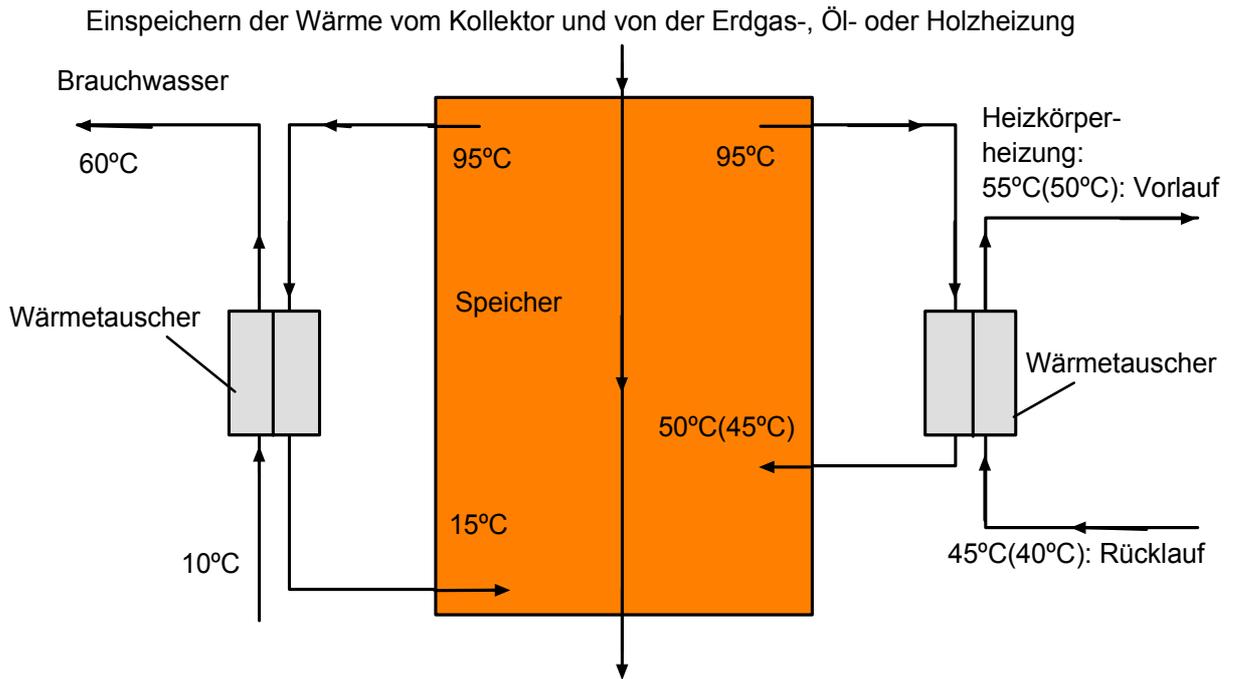


Abbildung 33: Versorgung eines Hauses mit Brauchwasser und mit Heizungswasser für eine Heizkörperheizung oder eine Fußbodenheizung mittels eines Speichers

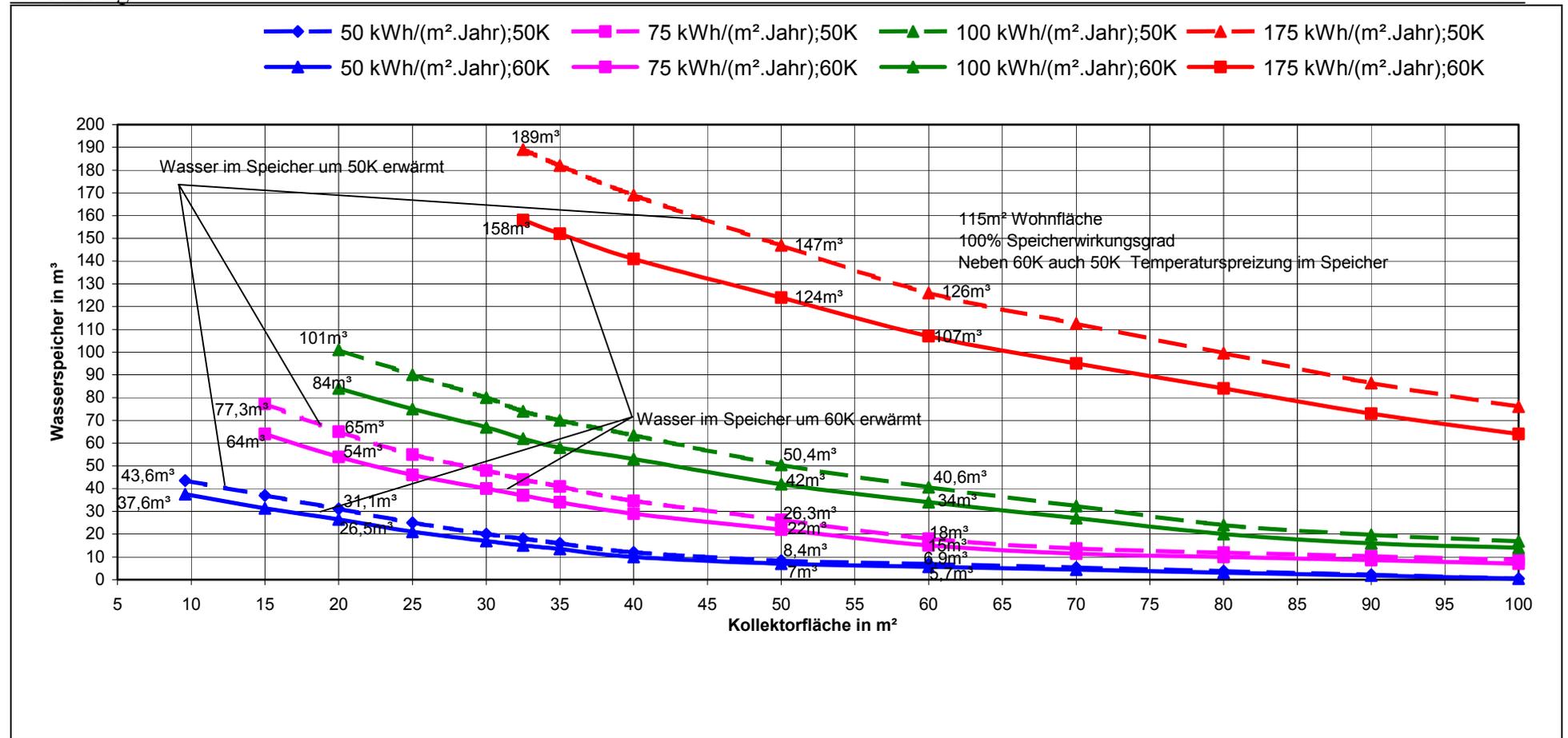
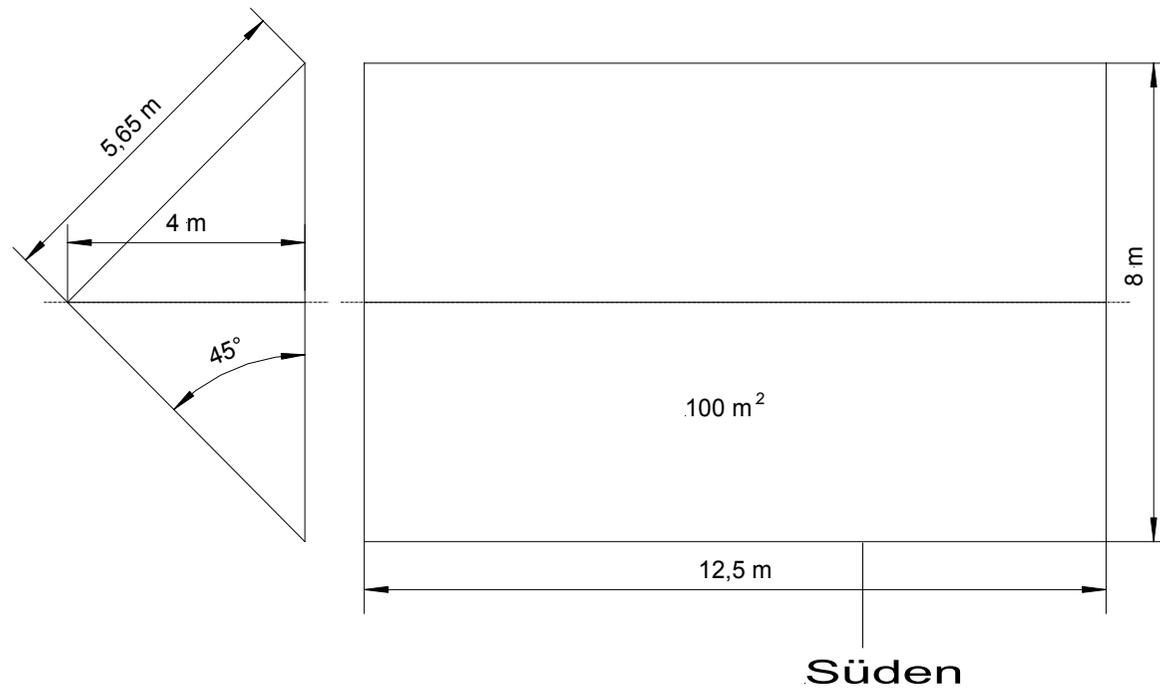


Abbildung 34 (Neben 60K auch Berücksichtigung einer Temperaturdifferenz von 50K zwischen kältester und wärmster Stelle [Temperaturspreizung] im Speicher):
 Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 115m² Wohnfläche bei spez.Gesamtwärmeverbräuchen des Hauses von 175 bis
 50 kWh/(m².Jahr) in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und Temperaturdifferenzen von kältester
 zu wärmster Stelle (Temperaturspreizung) im Speicher außer von 60 K auch von 50K.



Wohnfläche des Hauses: 150m²

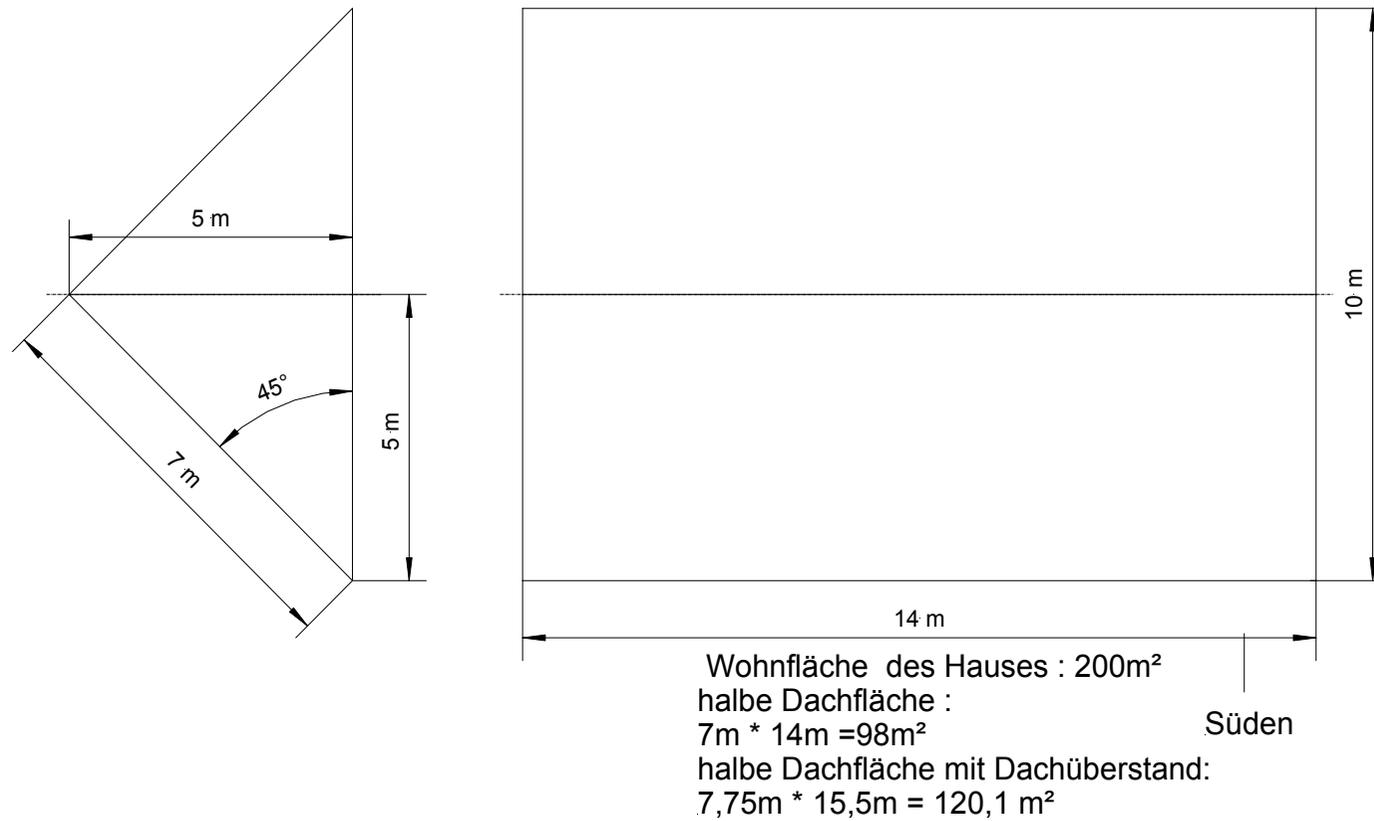
halbe Dachfläche:

$$5,65 \text{ m} \cdot 12,5 \text{ m} = 70,7 \text{ m}^2$$

halbe Dachfläche mit Dachüberstand::

$$6,4 \text{ m} \cdot 14 \text{ m} = 89,6 \text{ m}^2$$

Abbildung 35: Haus mit 150m² Wohnfläche

200 m² WohnflächeAbbildung 36: Haus mit 200m² Wohnfläche

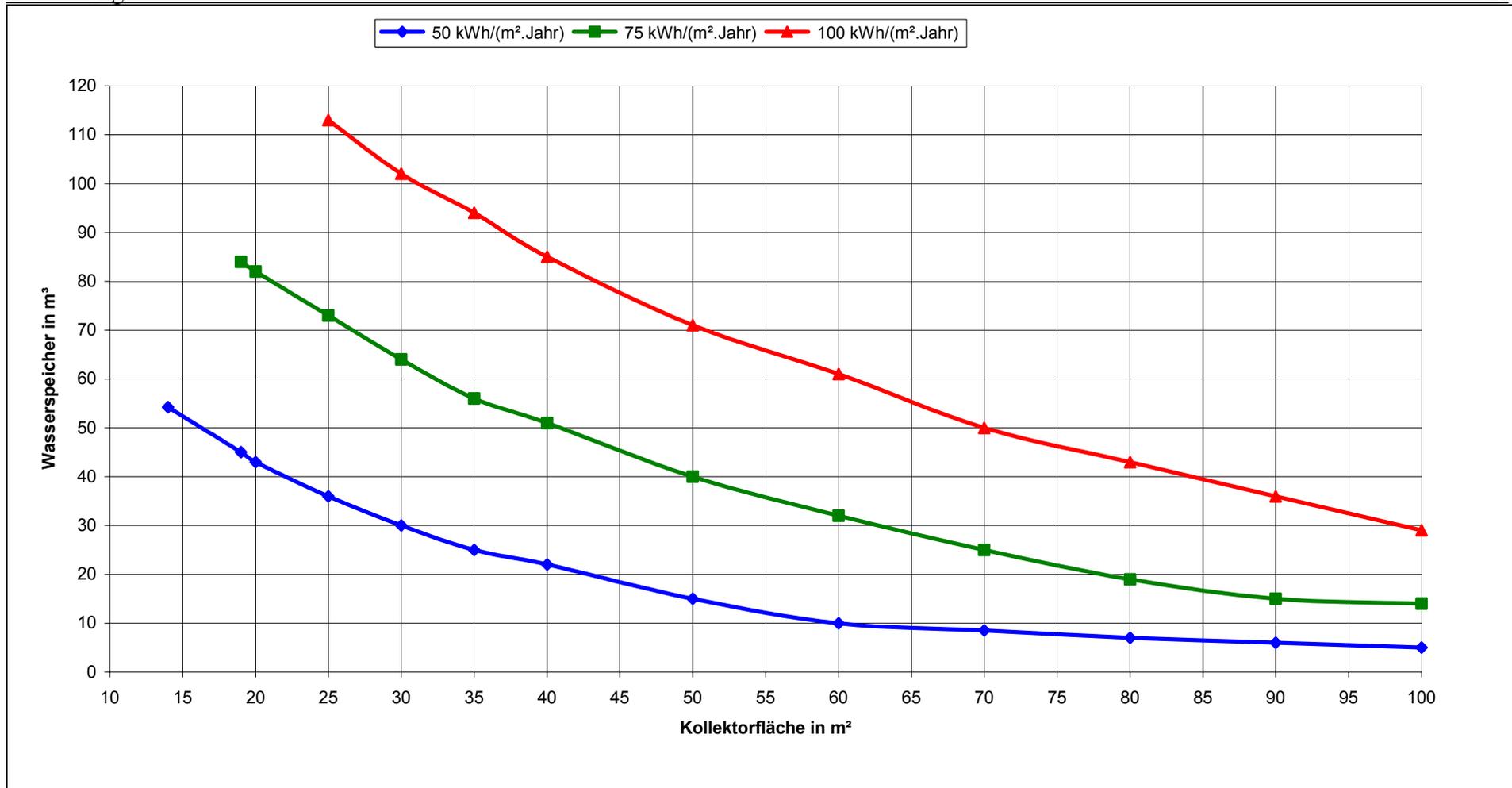


Abbildung 37: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 150 m² Wohnfläche bei spez. Gesamtwärmeverbräuchen von 100 bis 50 kWh/(m². Jahr) in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K

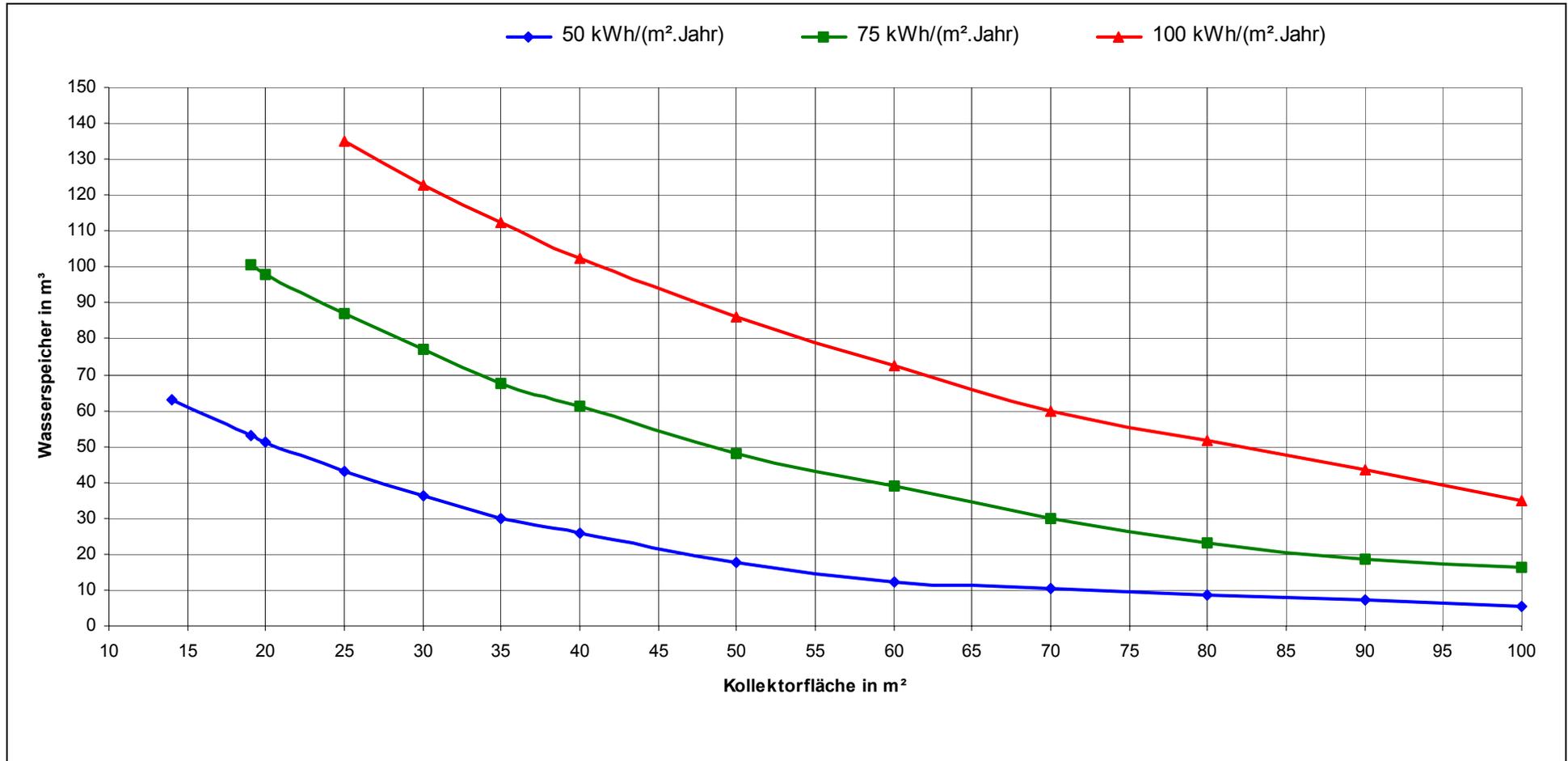


Abbildung 38: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 150 m² Wohnfläche bei spez. Gesamtwärmeverbräuchen von 100 bis 50 kWh/(m².Jahr) in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und einer und einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K

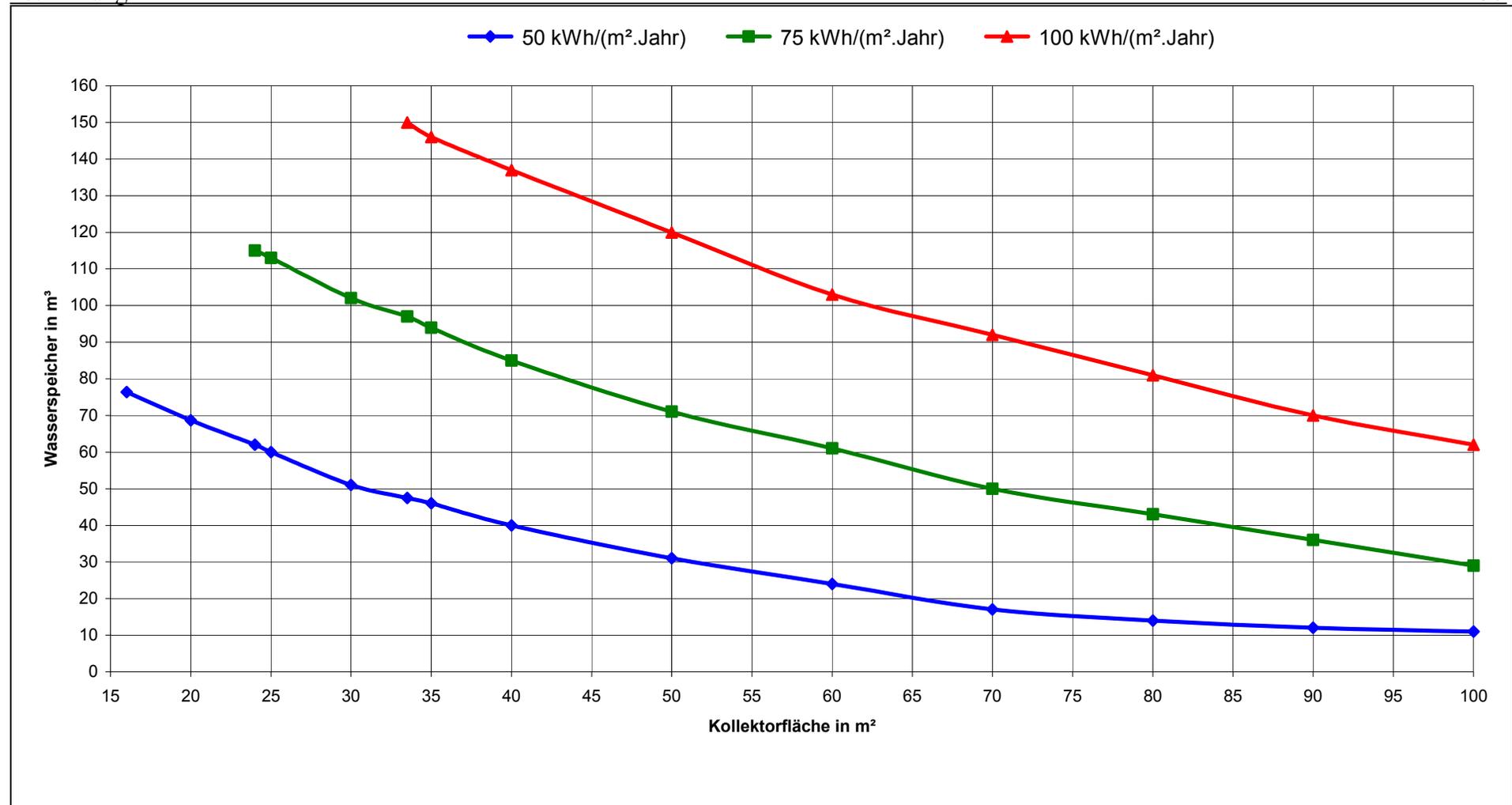


Abbildung 39: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 200 m² Wohnfläche bei spez. Gesamtwärmeverbräuchen von 100 bis 50 kWh/(m²·Jahr) in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K.

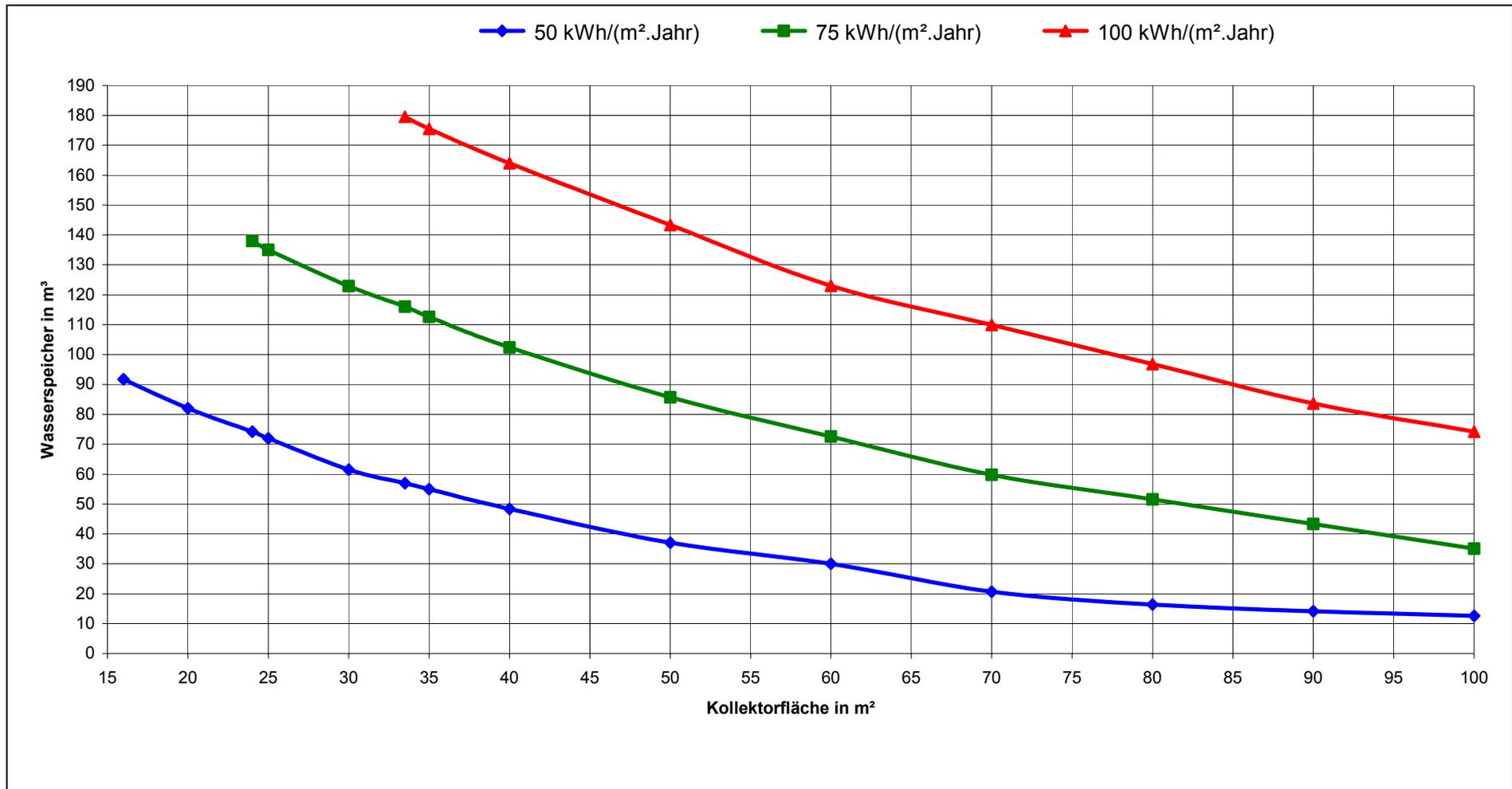


Abbildung 40: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher für ein Haus mit 200 m² Wohnfläche bei spez. Gesamtwärmeverbräuchen von 100 bis 50 kWh/(m²·Jahr) in Abhängigkeit von der Solarkollektorfläche bei einem Speicherwirkungsgrad von 100% und einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K.

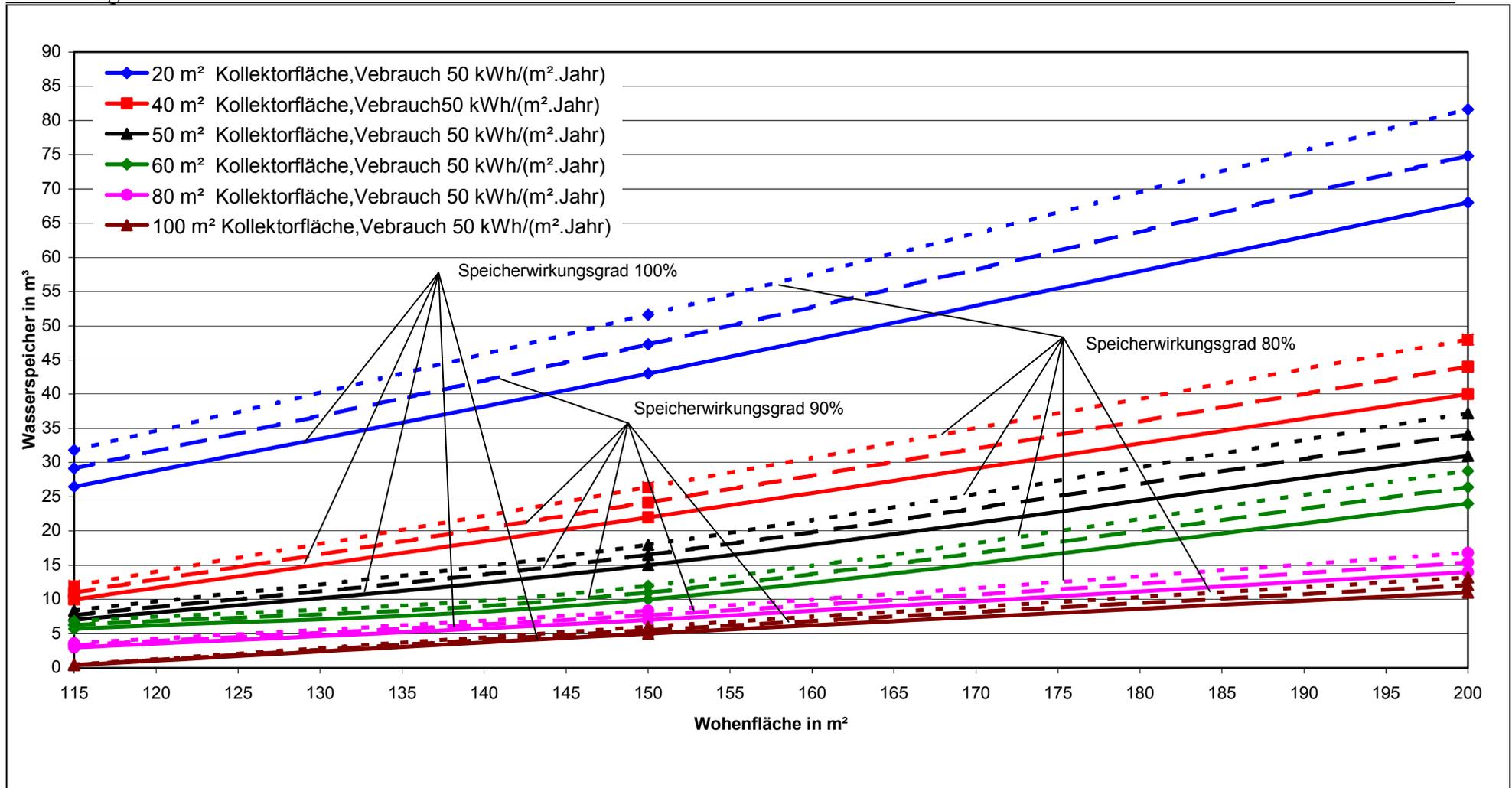


Abbildung 41: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche für Kollektorflächen von 20 bis 100 m² Speicherwirkungsgrad von 100%, 90%, 80%, einem spez. Gesamtwärmeverbrauch von 50 kWh/(m².Jahr) und einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K.

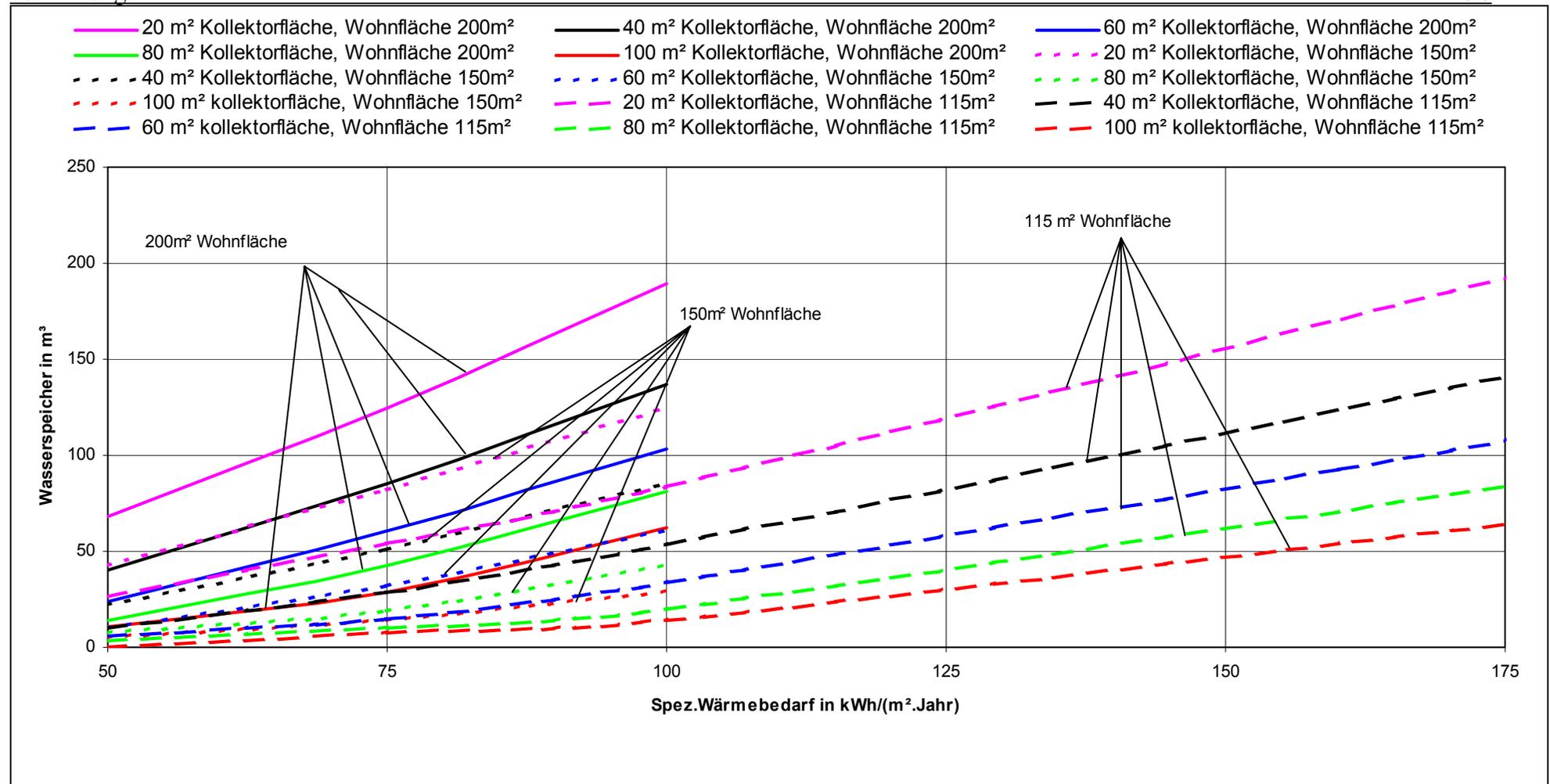


Abbildung 42: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von spezifischen Gesamtwärmebedarf für Wohnflächen von 115 m², 150 m², 200 m², Kollektorgrößen von 20 bis 100 m² und einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K

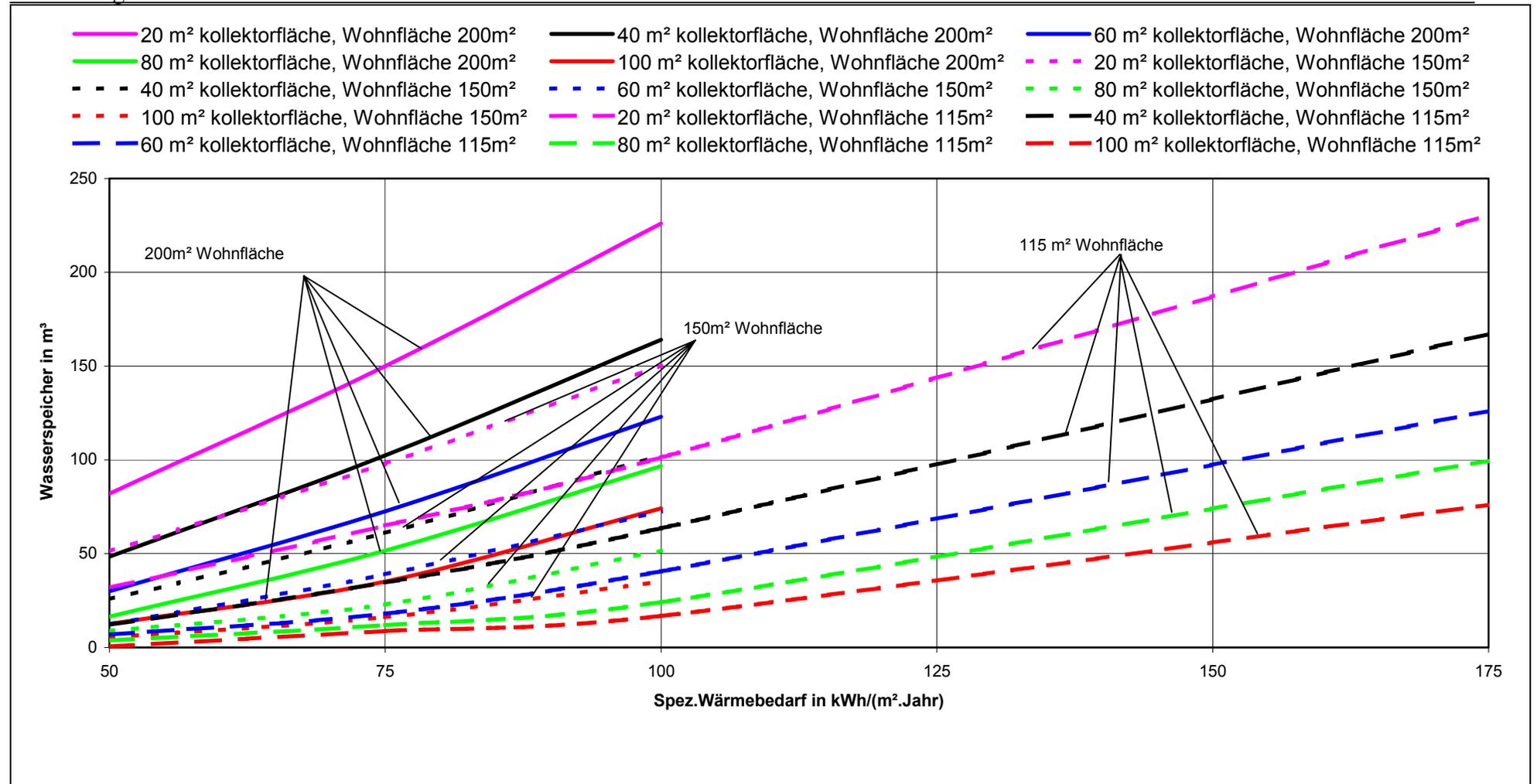


Abbildung 43: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von spezifischen Gesamtwärmebedarf für Wohnflächen von 115 m², 150 m², 200 m², Kollektorgrößen von 20 bis 100 m² und einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K

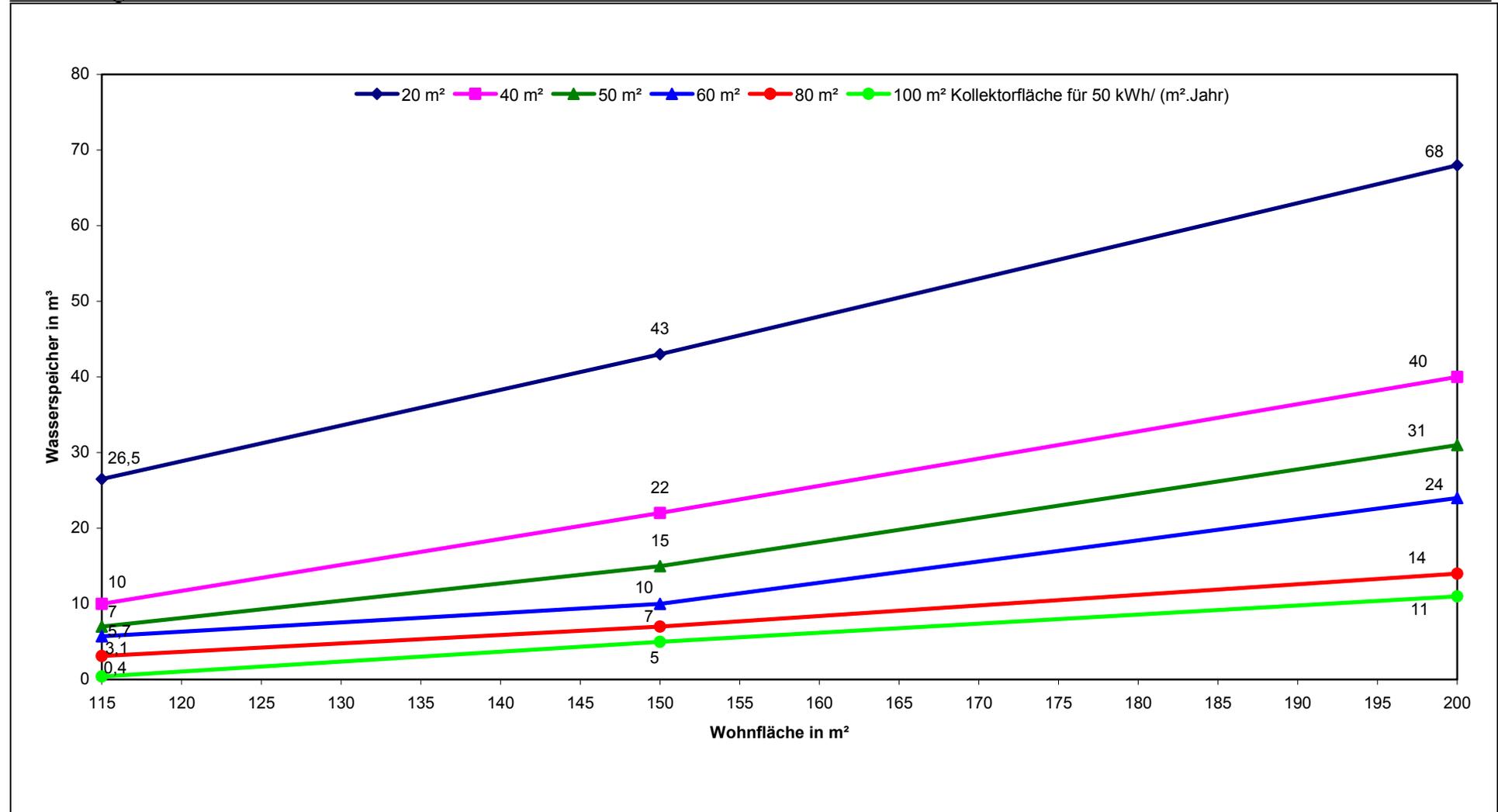


Abbildung 44: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m², einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 50 kWh/ (m². Jahr)

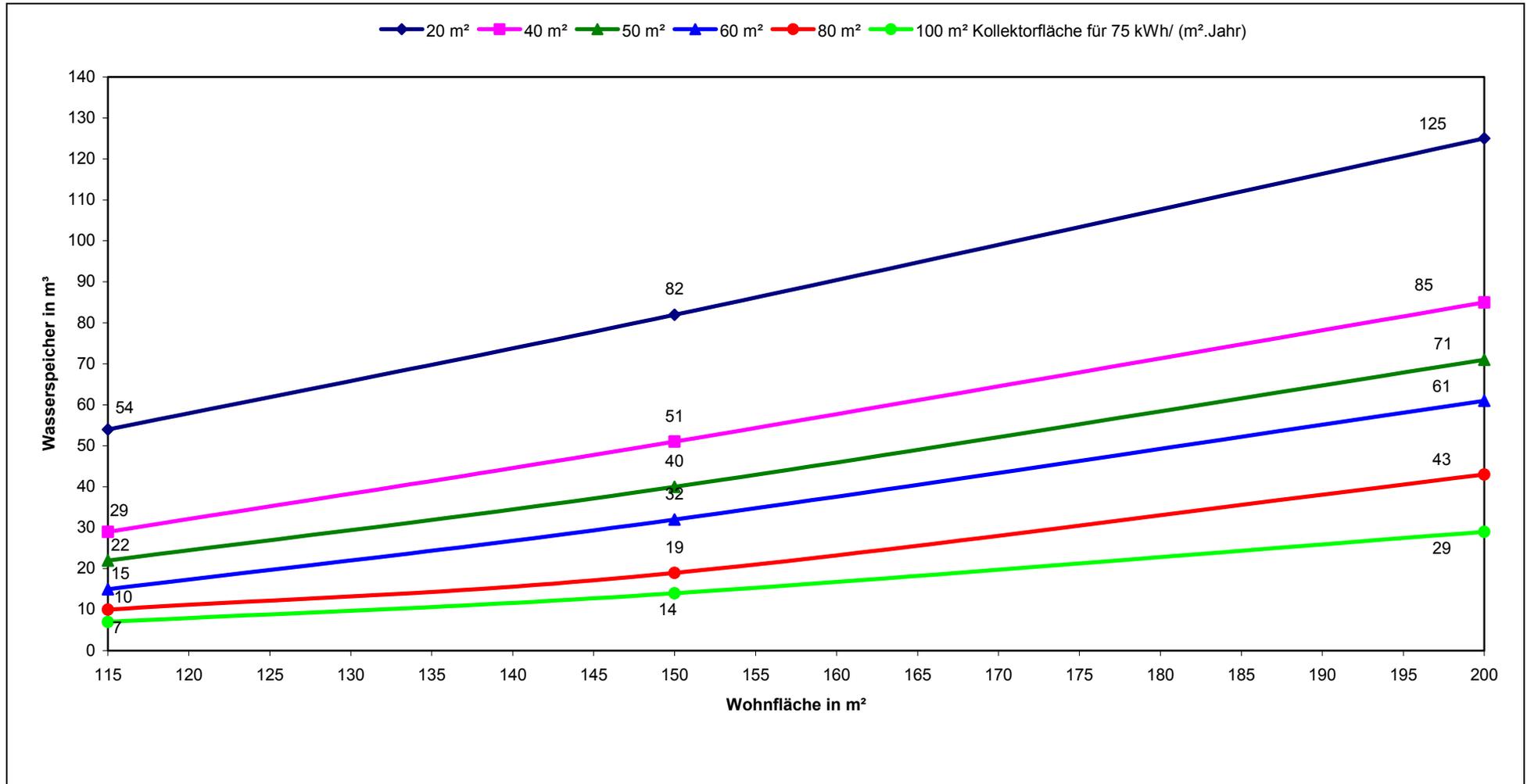


Abbildung 45: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m², einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 75 kWh/ (m². Jahr)

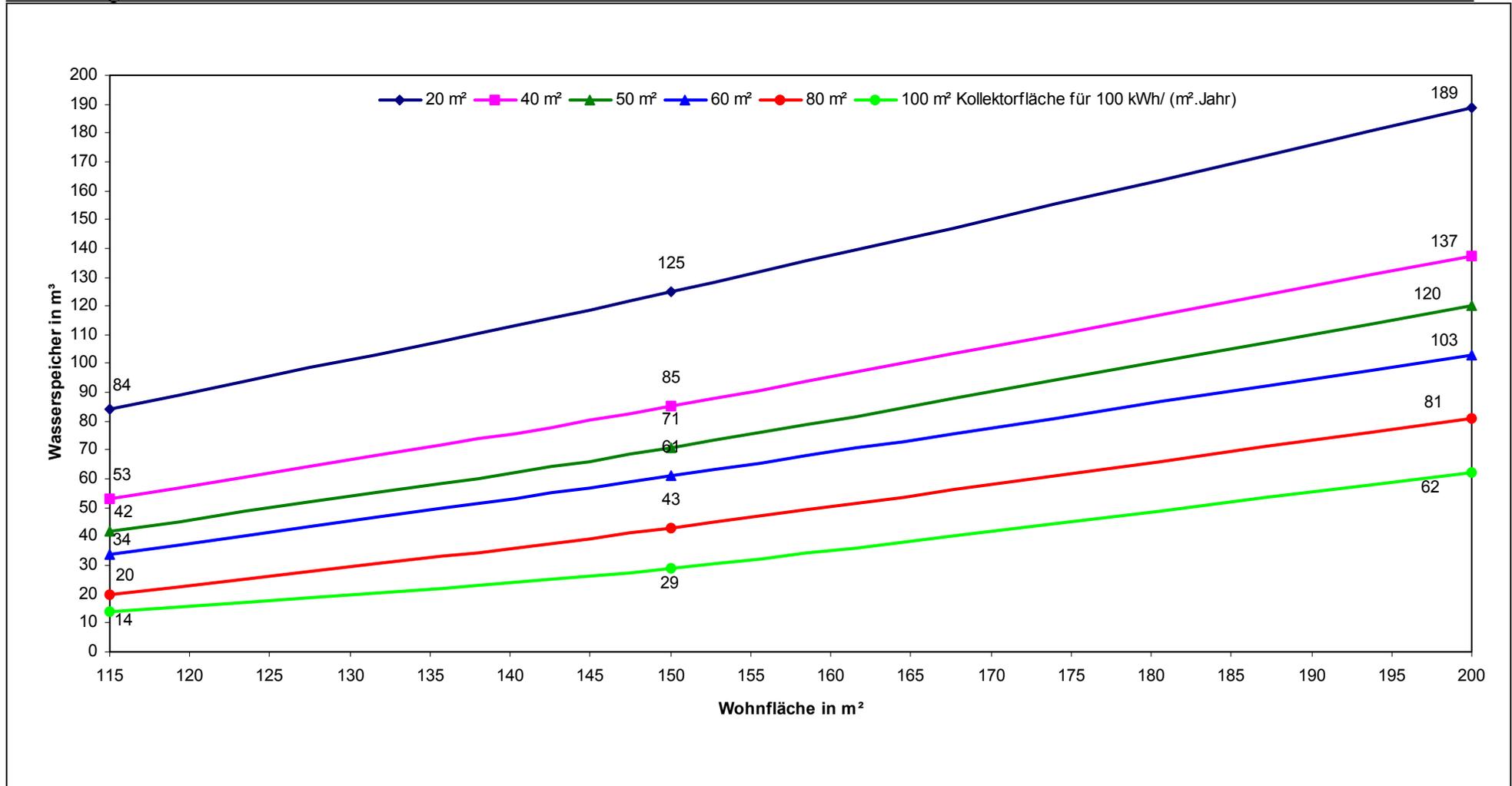


Abbildung 46: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m², einer Temperaturspreizung im Speicher von 60K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 100 kWh/ (m². Jahr).

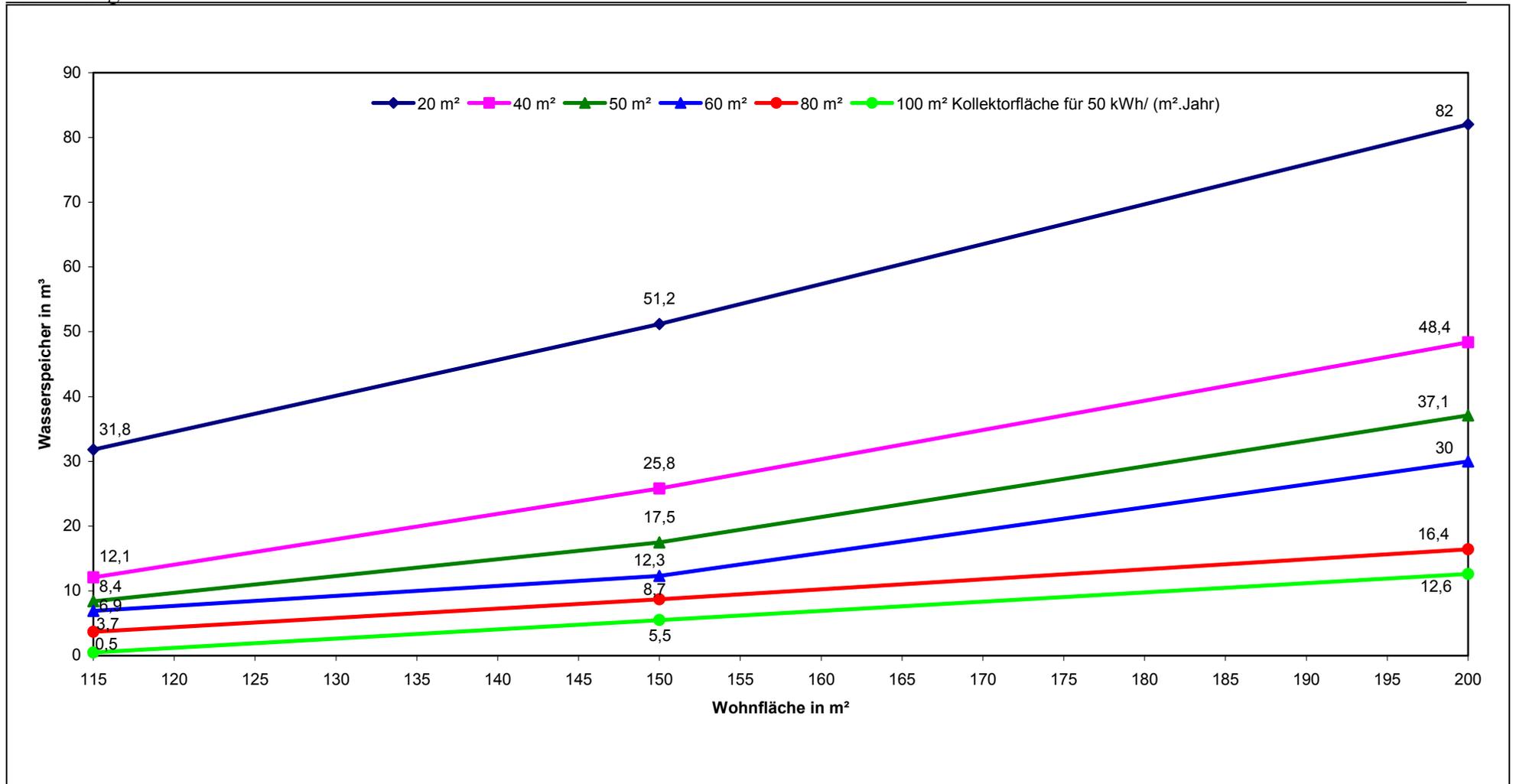


Abbildung 47: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m², einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 50 kWh/ (m². Jahr).

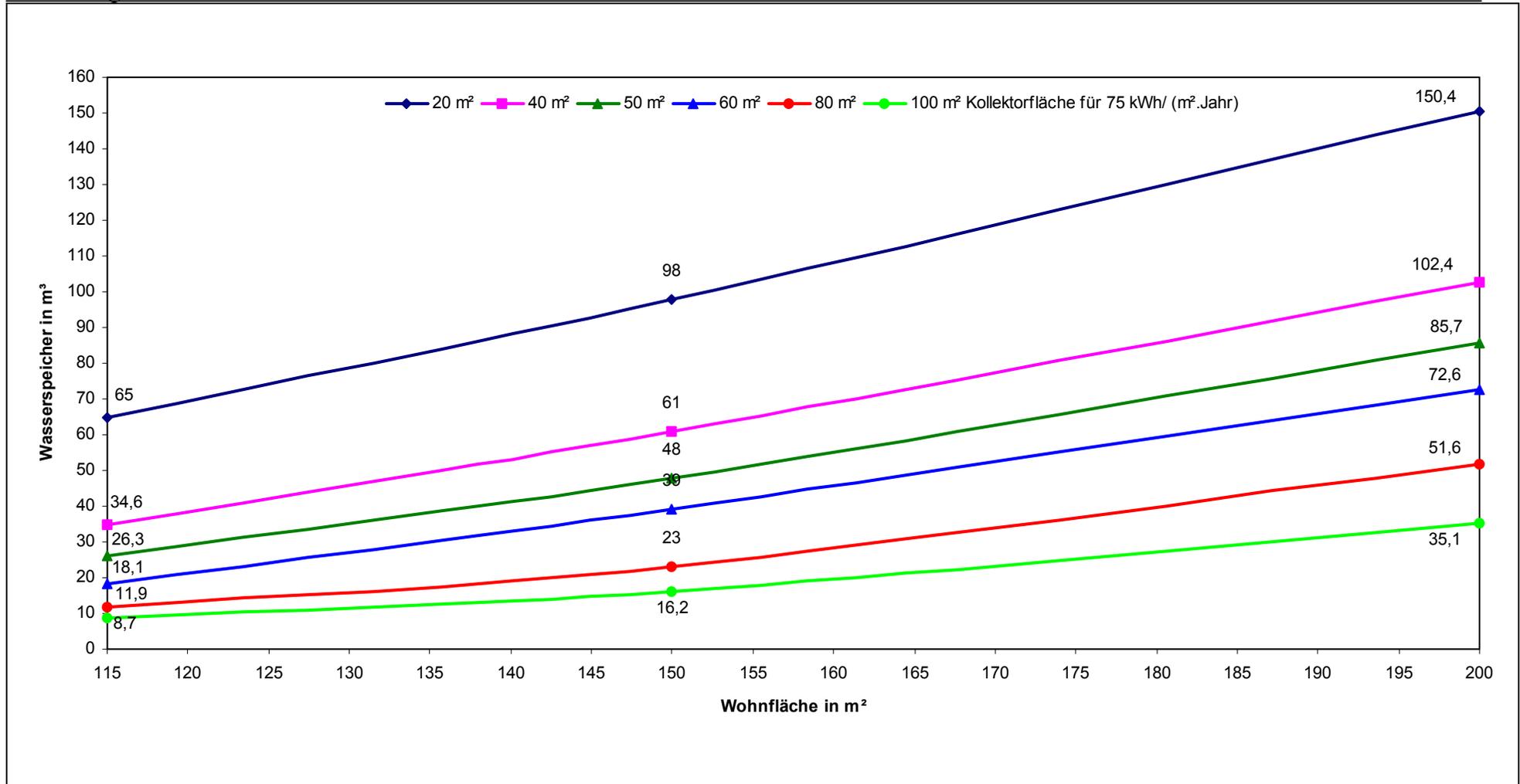


Abbildung 48: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m², einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 75 kWh/ (m². Jahr).

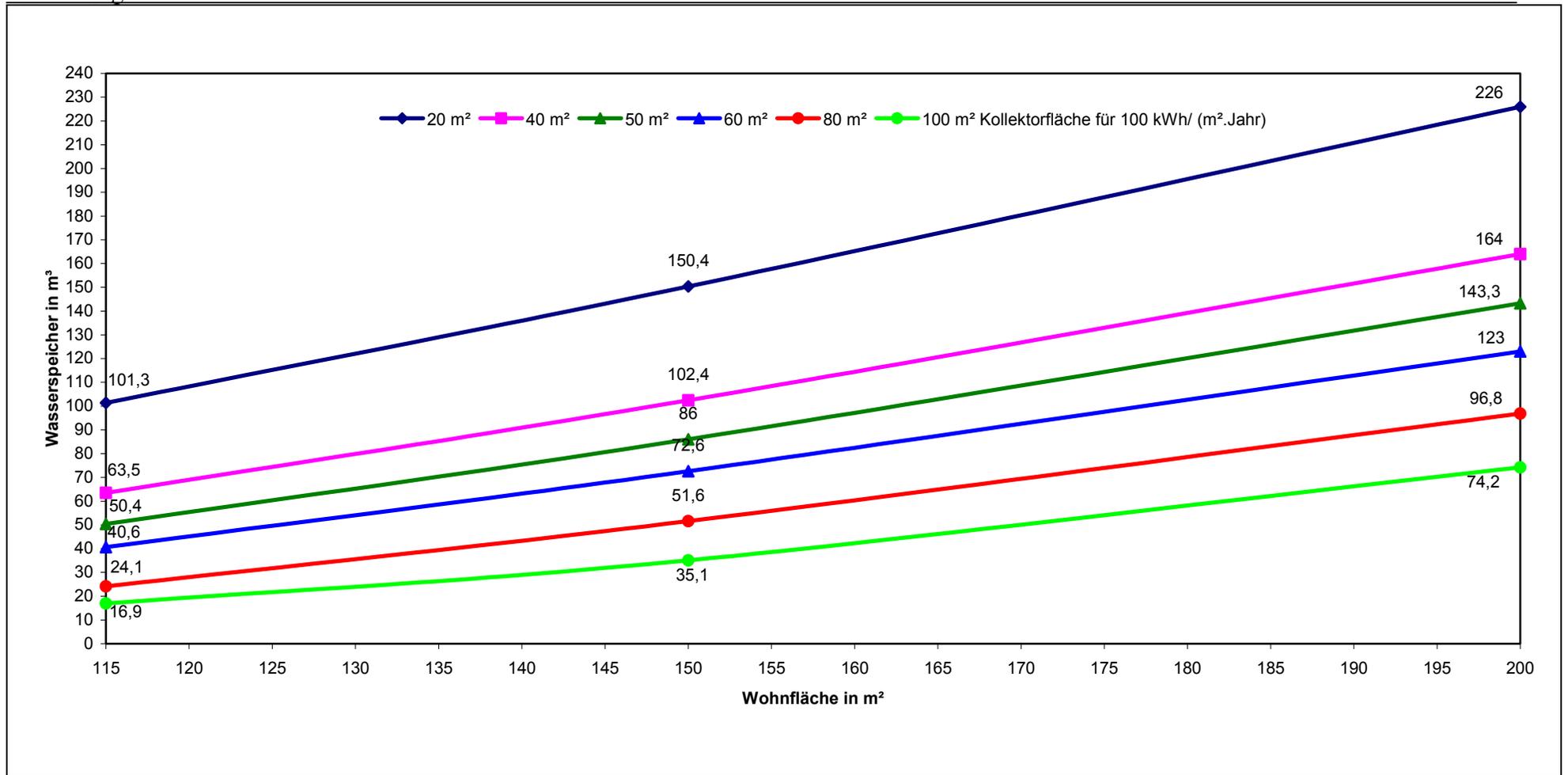


Abbildung 49: Erforderliche Größe der Warmwasserspeicher in Abhängigkeit von der Wohnfläche bei Kollektorflächen von 20 bis 100 m², einer Temperaturspreizung im Speicher von 50K und einem spez. Gesamtwärmebedarf von 100 kWh/(m².Jahr).

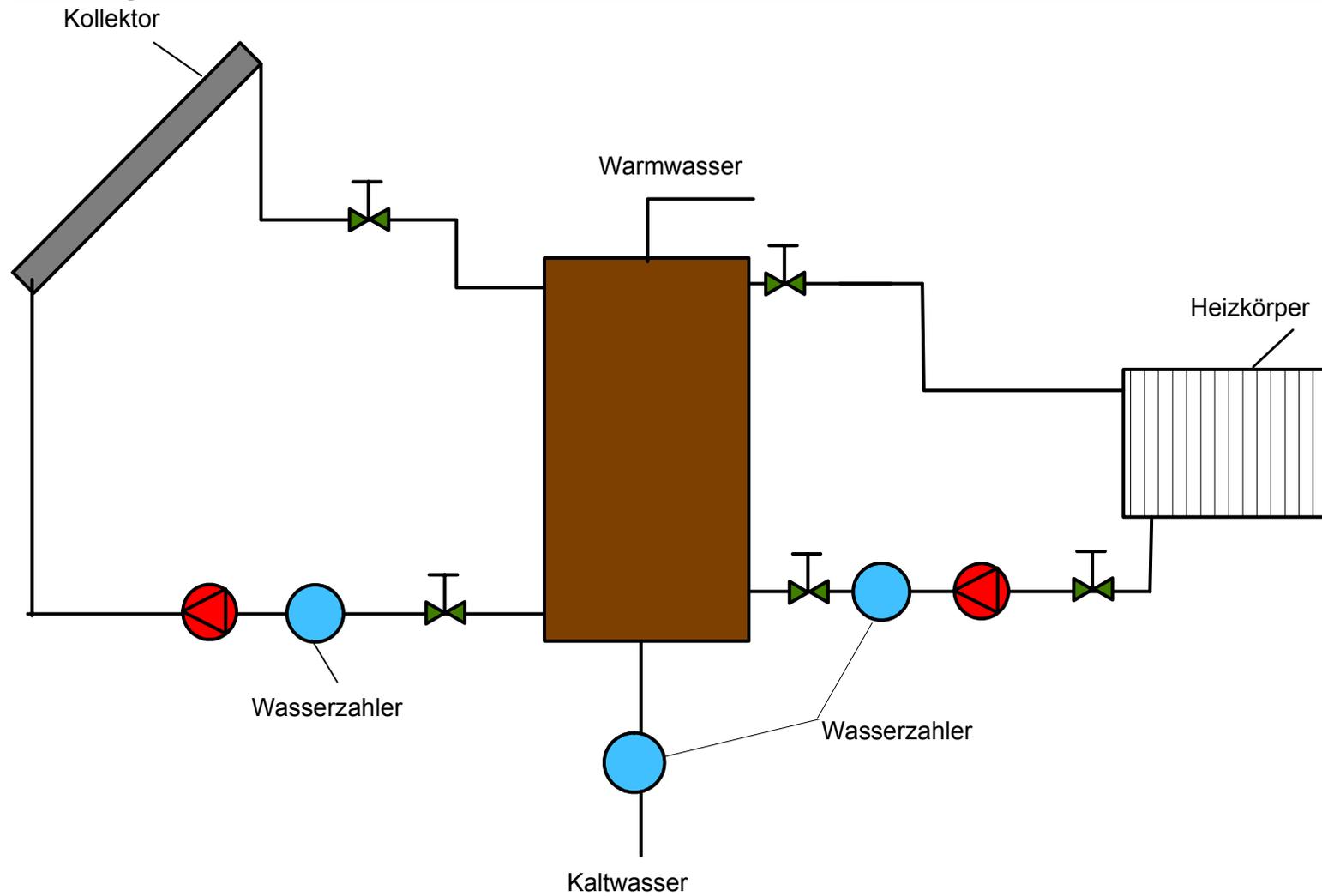


Abbildung 50: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage zur Untersuchung der Speicherfähigkeit von Basalt und von Paraffin in Jordanien.

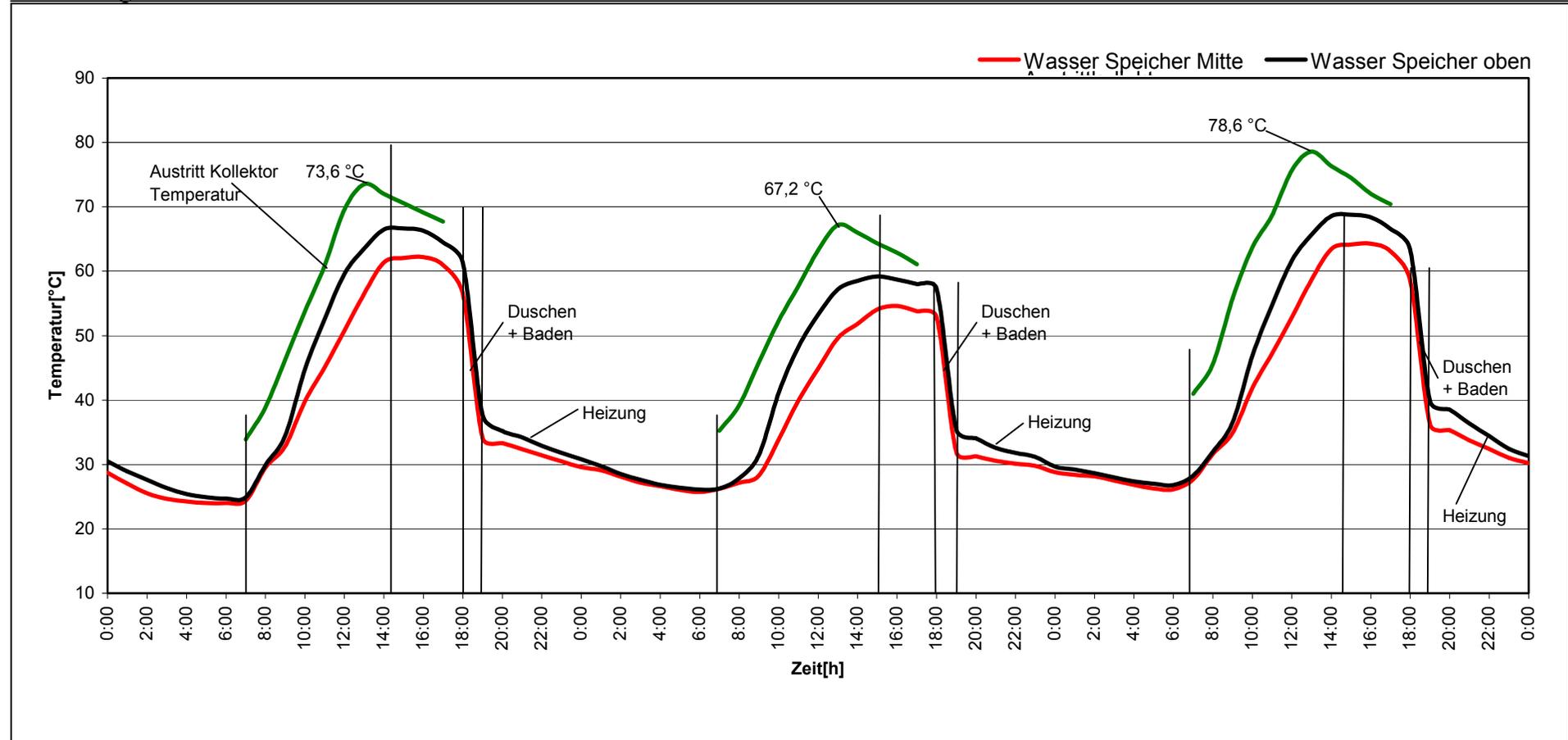


Abbildung 51: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser des nur mit Wasser (210kg) gefüllten Warmwasserspeichers.

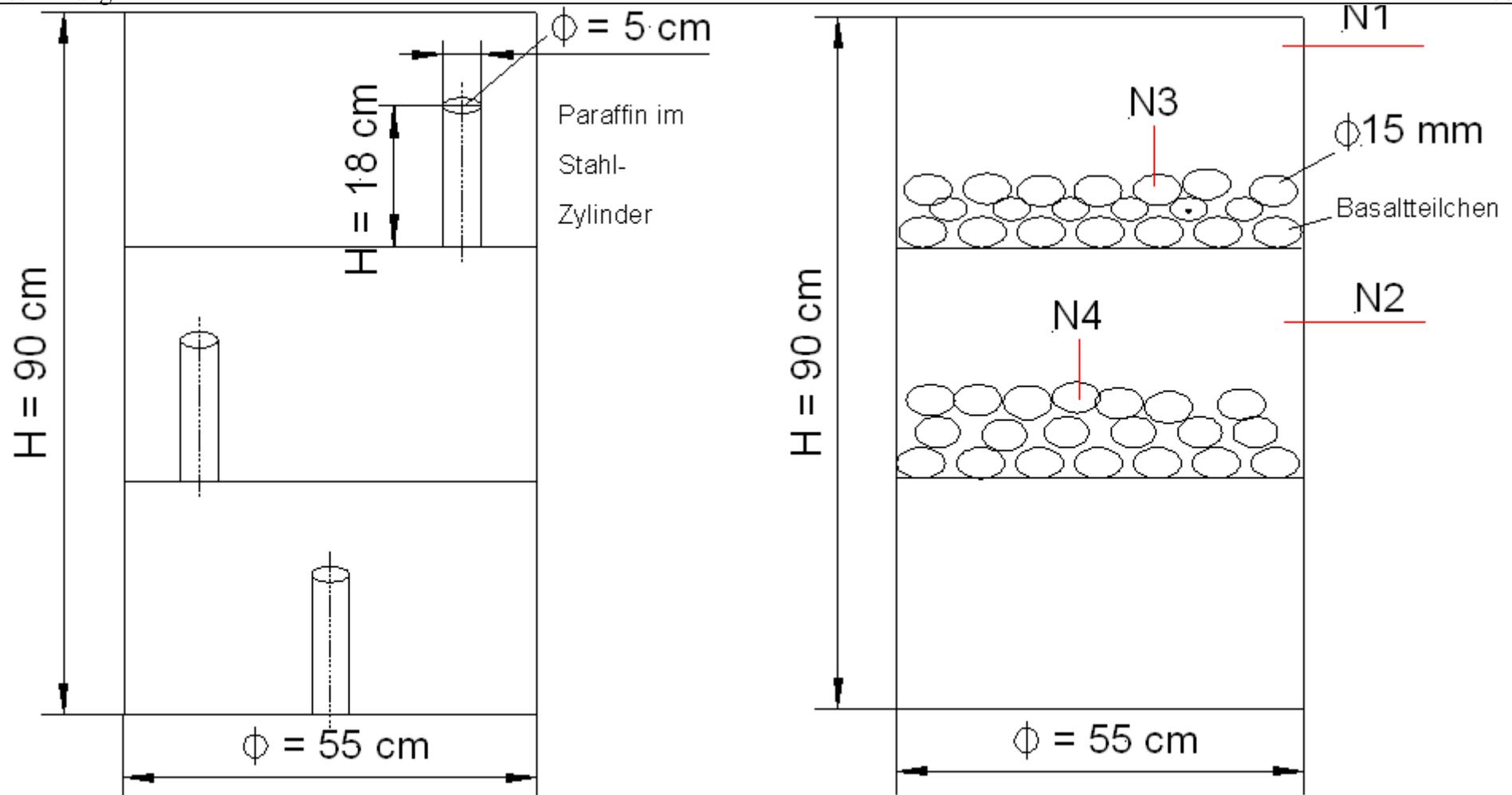


Abbildung 52: Wasserspeicher mit Paraffineinsatz und mit Basalteinsatz.

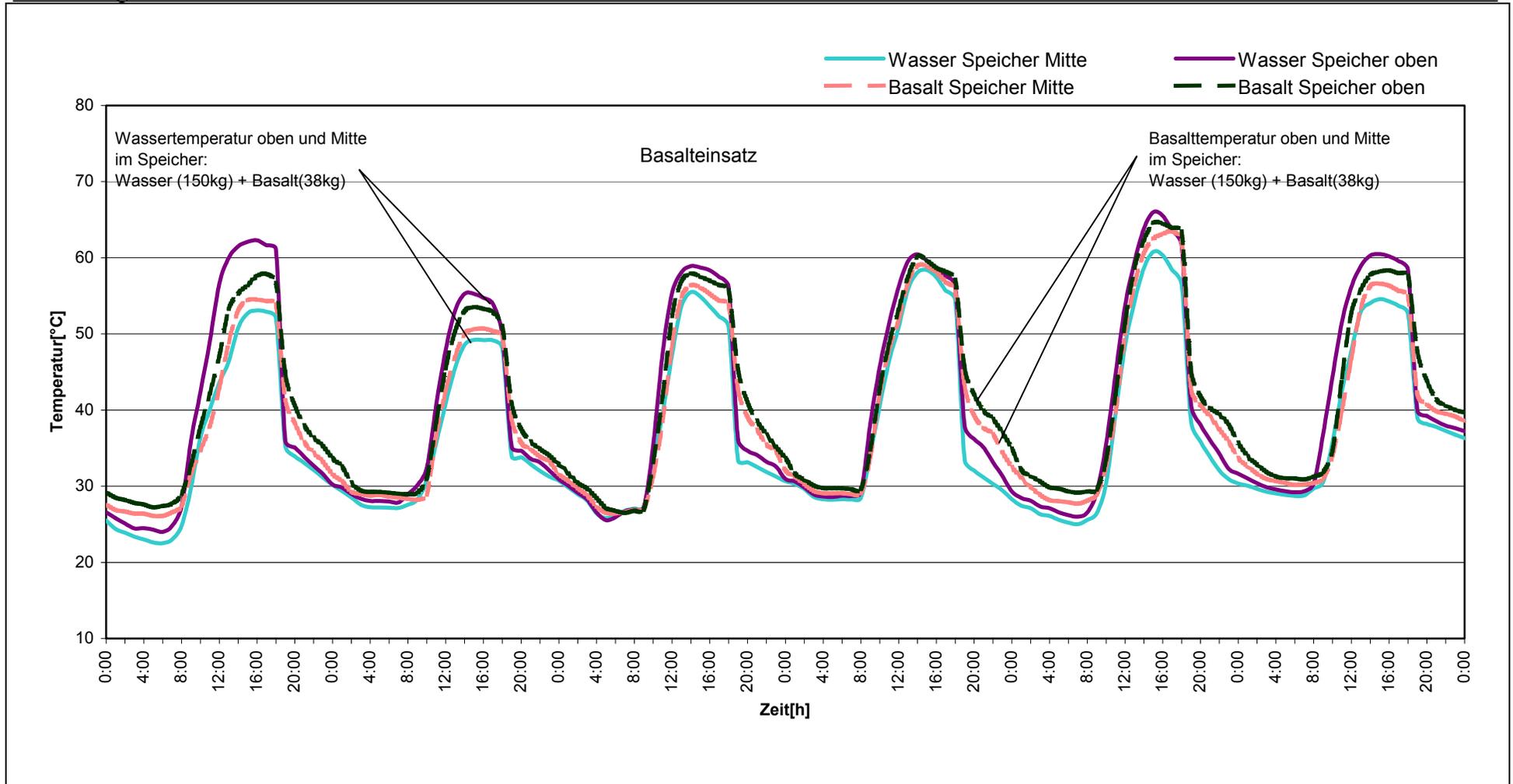


Abbildung 53: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser und in den Basaltkörpern des mit Wasser (150kg) und mit Basalt (38kg) gefüllten Warmwasserspeichers.

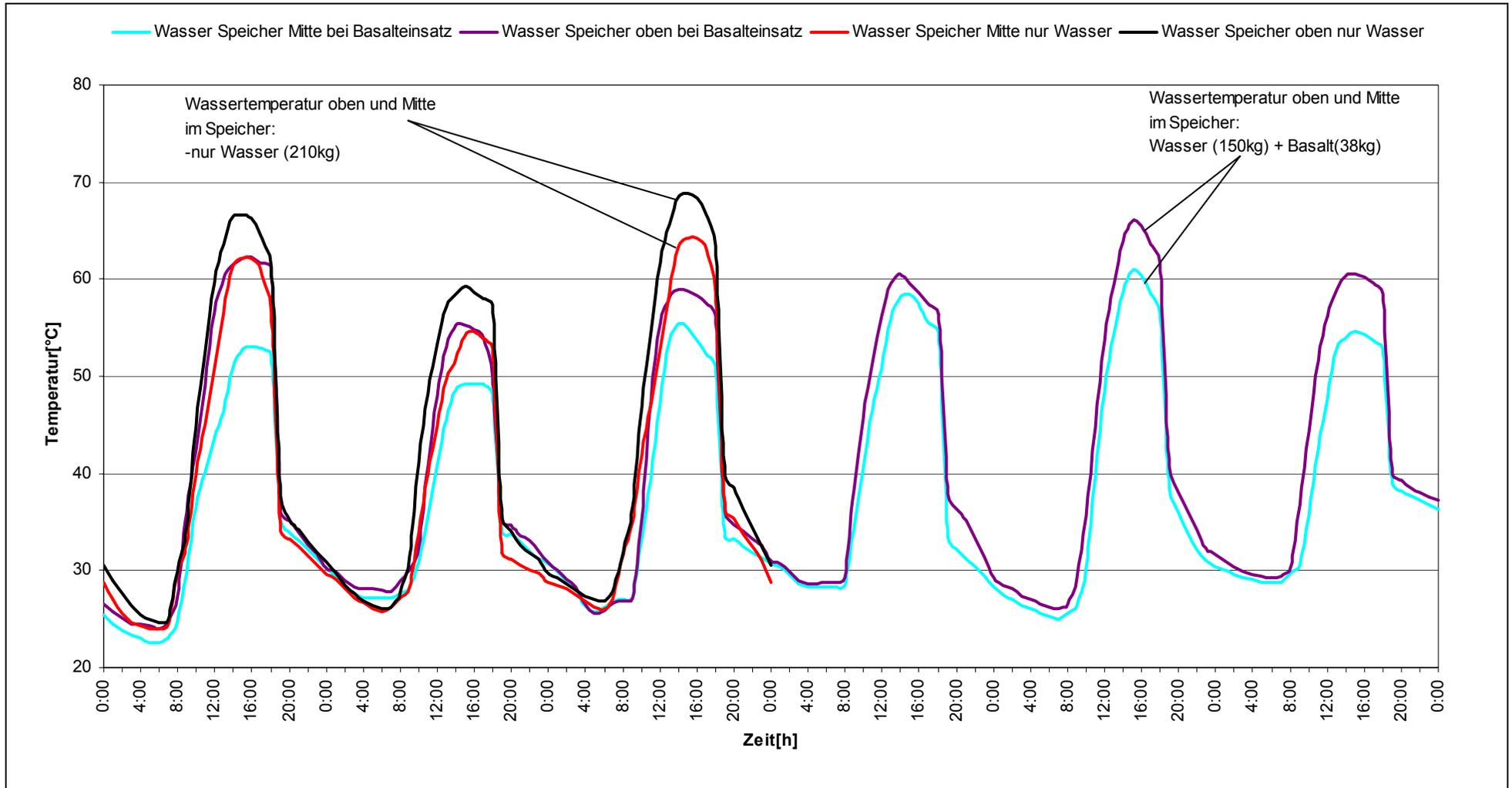


Abbildung 54: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser ohne und mit Basalteinsatz.

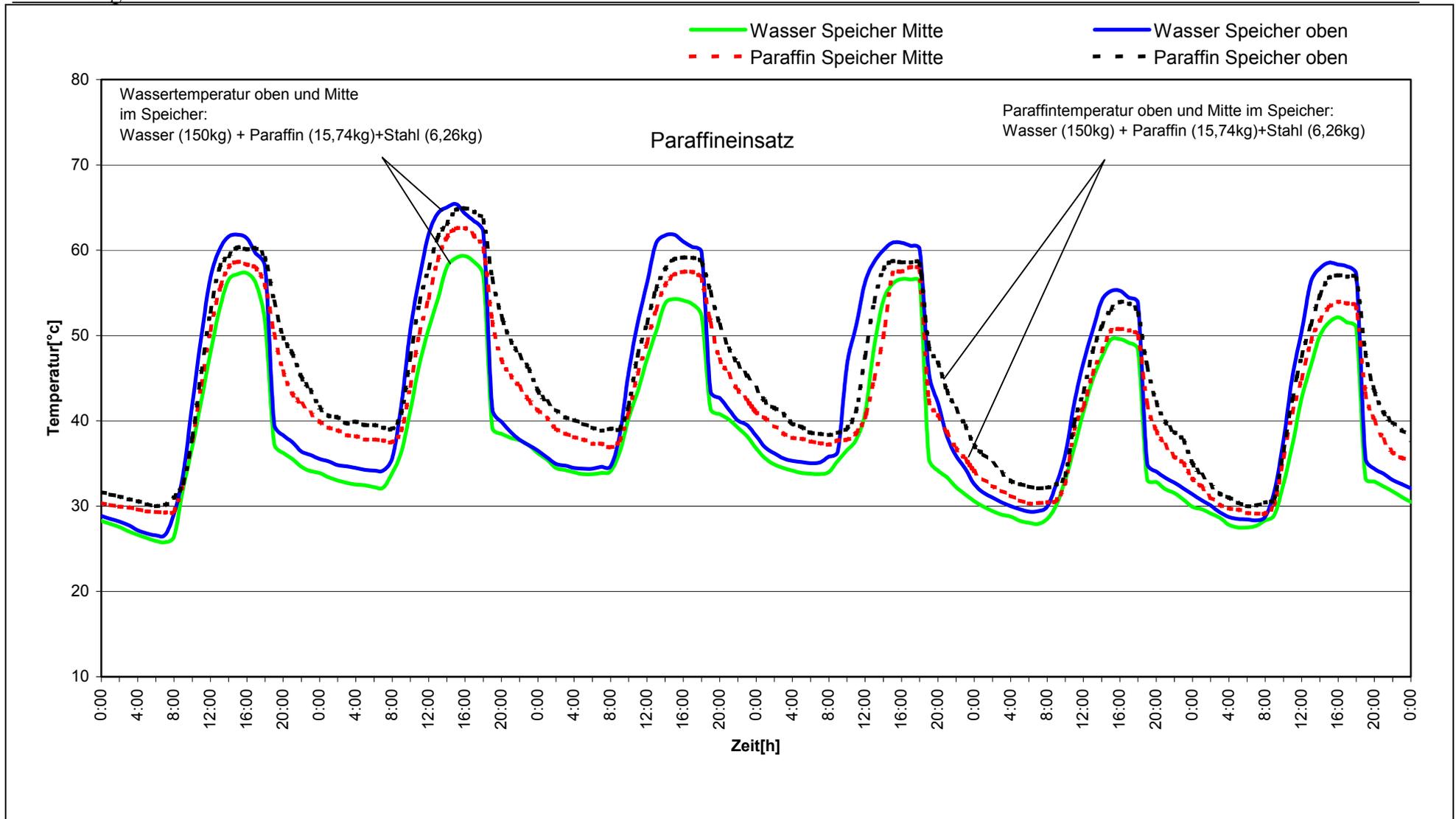


Abbildung 55: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser und im Paraffin des mit Wasser (150kg) und mit Paraffin (15,74kg) gefüllten Warmwasserspeichers.

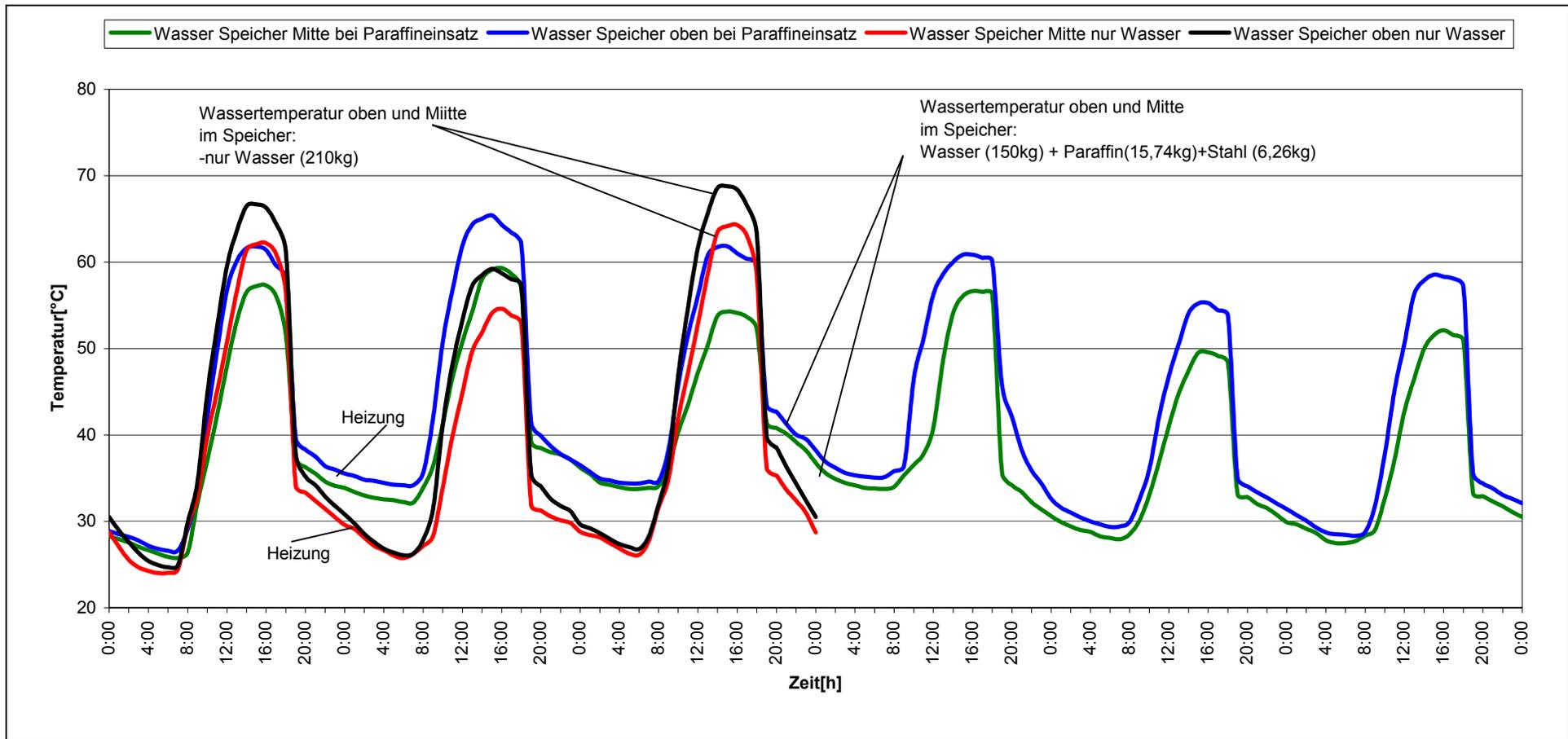


Abbildung 56: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser ohne und mit Paraffineinsatz.

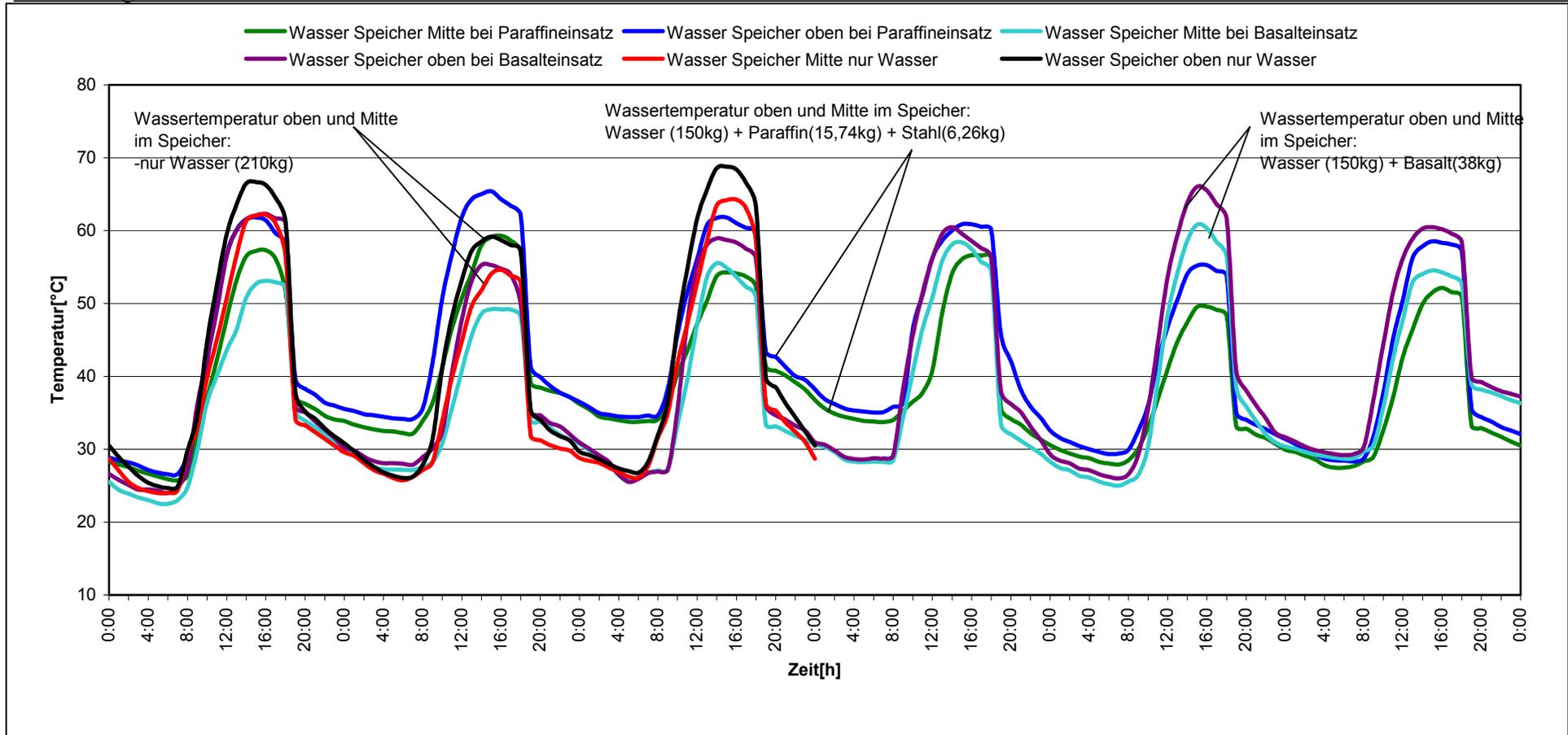


Abbildung 57: Zeitliche Temperaturverläufe im Speicherwasser des nur mit Wasser gefüllten Warmwasserspeichers sowie bei Basalt- und Paraffineinsatz.

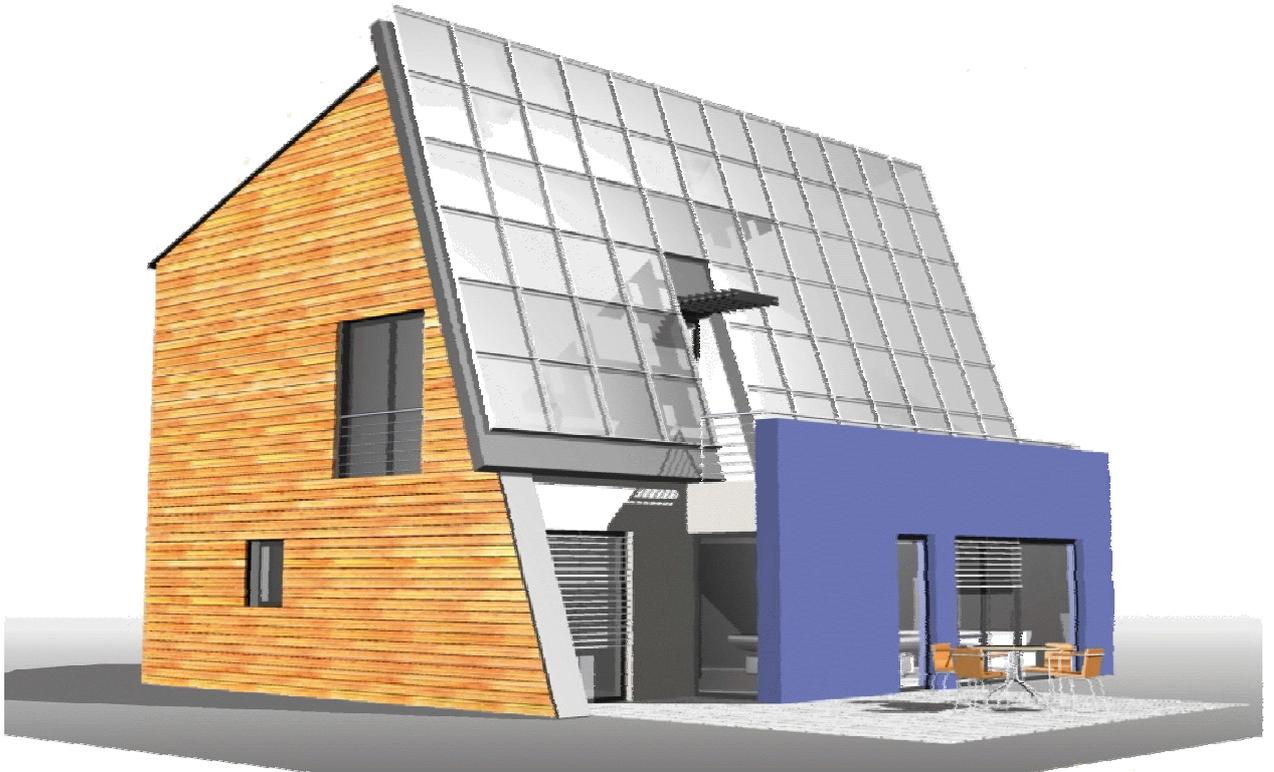


Abbildung 58: Solarhaus in Freiberg mit saisonaler Wärmespeicherung von Sonnenenergie[41].

