

Technologiebericht

1.4 Solare Wärme und Kälte

innerhalb des Forschungsprojekts

TF_Energiewende

Federico Giovannetti

Oliver Kastner

Carsten Lampe

Rolf Reineke-Koch

Sunah Park

Jan Steinweg

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Disclaimer:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Giovanetti, F.; Kastner, O.; Lampe, C.; Reineke-Koch, R.; Park, S.; Steinweg, J. (2018): Technologiebericht 1.4 Solare Wärme und Kälte. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Hinweis:

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Kontakt:

Oliver Kastner

Tel.: +49 5151 / 999 – 525

Fax: +49 5151 / 999 – 500

E-Mail: kastner@isfh.de

Institut für Solarenergieforschung Hameln gGmbH

Am Ohrberg 1

31860 Emmerthal

Review durch:

Gerhard Stryi-Hipp (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	5
Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
Zusammenfassung (Steckbrief)	10
1 Beschreibung des Technologiefeldes	12
1.1 Einleitung	12
1.2 Technologien	14
1.2.1 <i>Thermische Kollektoren</i>	14
1.2.2 <i>Wärme- und Kältespeicher</i>	15
1.2.3 <i>Systemtechnik</i>	17
1.3 Anwendungsbereiche	17
1.3.1 <i>Dezentrale Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung</i>	17
1.3.2 <i>Netzgekoppelte Wärmeerzeugung</i>	18
1.3.3 <i>Prozesswärme</i>	18
1.3.4 <i>Kälteerzeugung</i>	19
1.4 Sektorkopplung	20
2 Stand F&E in Deutschland	21
2.1 Einleitung	21
2.2 Entwicklungsstand und Forschungsbedarf nach Technologien	21
2.2.1 <i>Thermische Kollektoren</i>	21
2.2.2 <i>Wärme- und Kältespeicher</i>	22
2.2.3 <i>Systemtechnik</i>	23
2.3 Entwicklungsstand und Forschungsbedarf nach Anwendungen	24
2.3.1 <i>Dezentrale Raumheizung und Trinkwarmwassererwärmung</i>	24
2.3.2 <i>Prozesswärme</i>	25
2.3.3 <i>Kälteerzeugung</i>	26
2.3.4 <i>Netzgekoppelte Wärmeerzeugung</i>	27
2.4 Technologie- und anwendungsübergreifender Forschungsbedarf	28
3 Bewertung der Relevanz der öffentlichen Forschungs-förderung	29
3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	29
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	31
4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes	34
4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	34
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionszielen	39
4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energieeffizienz	40
4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz	41
4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	42

4.6	Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	44
4.7	Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	49
4.8	Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	51
4.9	Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	52
4.10	Kriterium 12: Systemkompatibilität	54
5	F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand	56
5.1	Zusammenfassende Bewertung	56
5.2	Empfehlung der Ausrichtung der F&E	57
	Literaturverzeichnis	59

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

AMS	Aktuelle-Maßnahmen-Szenario
B.A.U.	Business-as-usual
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSW	Bundesverband Solarwirtschaft e.V.
CAGR	Compound annual growth rate
DSTTP	Deutsche Solarthermie Technologie-Plattform
EE	Erneuerbare Energien
ESTTP	European Solar Thermal Technology Platform
FH	Flächenheizung
FK	Flachkollektor
FVEE	Forschungsverbund Erneuerbare Energien e.V.
IEA	International Energy Agency
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KN	Kaltwärmenetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
MAP	Marktanreizprogramm
ON GT	Oberflächennahe Geothermie
PtH	Power to Heat
PV	Photovoltaik
PVT	Photovoltaisch-thermisch
RH	Rauheizung
SHC	Solar Heating and Cooling
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level
TWW	Trinkwarmwasser
UK	Unabgedeckter Kollektor
VRK	Vakuumröhrenkollektor
WISC	Wind und Infra-red Sensitive Collector

Einheiten und Symbole

%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
Wh	Wattstunde
W_{th}	Watt thermisch
A	Jahr
m^2	Quadratmeter
J	Joule
ΔT	Temperaturdifferenz
t	Tonne

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Wichtigste techno-ökonomische Kenndaten für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ -----	13
Tab. 3-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von dezentralen Solaranlagen zur Raumheizung und Trinkwarmwasser mit einem solaren Deckungsanteil < 50 %-----	29
Tab. 3-2	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von dezentralen Solaranlagen für Raumheizung und Trinkwarmwasser mit einem solaren Deckungsanteil > 50 %-----	30
Tab. 3-3	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Solaranlagen im Bereich Prozesswärme-----	30
Tab. 3-4	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Solaranlagen im Bereich Kälteerzeugung-----	30
Tab. 3-5	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von netzgebundenen Solaranlagen mit einem solaren Deckungsanteil < 30 % -----	30
Tab. 3-6	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von netzgebundenen Solaranlagen im mit einem solaren Deckungsanteil > 30 % -----	31
Tab. 3-7	Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“ -----	32
Tab. 3-8	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ -----	33
Tab. 4-1	Globaler Technologieeinsatz für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr) -----	34
Tab. 4-2	Globales Marktpotenzial für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“-----	35
Tab. 4-3	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr) -----	39
Tab. 4-4	Nationales Marktpotenzial für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ -----	39
Tab. 4-5	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall-----	40
Tab. 4-6	Jährlich vermiedene SO ₂ -Emissionen durch das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	40
Tab. 4-7	Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	41
Tab. 4-8	Jährliche direkte und indirekte Kosteneinsparpotenziale durch das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf das Basisjahr 2015) -----	42
Tab. 4-9	Analyse des bisherigen Marktanteils für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“-----	43
Tab. 4-10	Globales und nationales Zubaupotenzial für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“-----	44
Tab. 4-11	Inländische Wertschöpfung im Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ hinsichtlich des globalen und des nationalen Absatzmarktes -----	44
Tab. 4-12	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“-----	44
Tab. 4-13	Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ – Input-Orientierung -----	46
Tab. 4-14	Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ – Output-Orientierung -----	49
Tab. 4-15	Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld „Solare Wärme und Kälte“ zum Status Quo (2015)-----	51
Tab. 4-16	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“ für dezentrale Einzelanlagen-----	52

Tab. 4-17	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“ für netzgebundene Anlagen-----	52
Tab. 4-18	Abhängigkeit von Infrastrukturen des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“ für netzgebundene Anlagen-----	53
Tab. 4-19	Abhängigkeit von Infrastrukturen des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“ für dezentrale Einzelanlagen-----	53

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Arbeitstemperaturen etablierter Solarkollektoren und ihrer Anwendungssysteme-----	12
Abb. 1-2	Tagesmitteltemperatur, Heizgrenze und Wärmeertrag eines Flachkollektors am Beispiel des Standorts Potsdam -----	16
Abb. 4-1	Referenzszenarien für die Schätzung des nationalen Marktpotenzials -----	36
Abb. 4-2	Nationales Marktpotenzial für solarthermische Anlagen nach den Klimaszenarien zur Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen bis zu 80 % -----	37
Abb. 4-3	Nationales Marktpotenzial für solarthermische netzgebundene Anlagen nach den Klimaszenarien zur Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen bis zu 80 % -----	37
Abb. 4-4	Nationales Marktpotenzial für solarthermische Anlagen nach den Klimaszenarien zur Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen bis zu 95 % -----	38
Abb. 4-5	Nationales Marktpotenzial für solarthermische netzgebundene Anlagen nach den Klimaszenarien zur Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen bis zu 95 % -----	38
Abb. 4-6	Kostenentwicklung für dezentrale und netzgekoppelte solarthermische Anlagen -----	41
Abb. 4-7	Endkunden Systempreise einer Solarwärmeanlage nach BSW Fahrplan -----	43
Abb. 4-8	Auswertung der Publikationsrecherche auf dem Gebiet für den Zeitraum 2005 – 2014 für Deutschland und weitere relevanten Länder-----	47
Abb.4-9	Auswertung der Patentrecherche auf dem Gebiet im Zeitraum 2005 bis 2014 – Anzahl der Anmeldungen aus Deutschland und weiteren relevanten Ländern-----	48
Abb. 4-10	Auswertung der Patentrecherche auf dem Gebiet im Zeitraum 2005 bis 2014 - Anteil am weltweiten Aufkommen für Deutschland und weitere relevanten Länder -----	48

Zusammenfassung (Steckbrief)

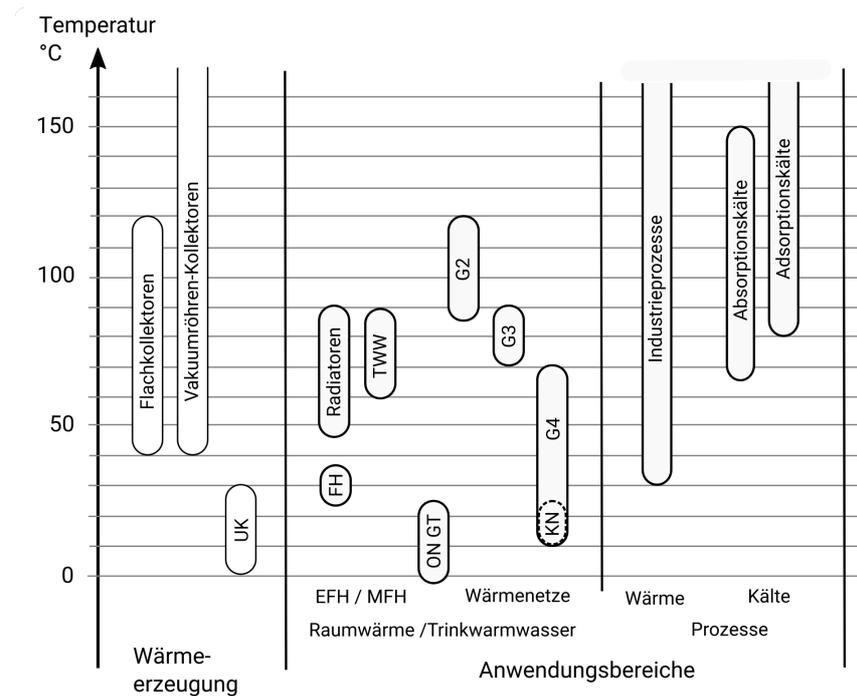
Technologiefeld Nr. 1.4 Solare Wärme & Kälte																																																
A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&E-Bedarf																																																
Beschreibung des Technologiefeldes																																																
Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ bestehend aus den Technologien Kollektoren (A), Wärme- und Kältespeicher (B) und Systemtechnik (C) mit den Anwendungen dezentrale Raumheizung und TWW-Bereitstellung, Prozesswärme, Kühlung und netzgebundene Wärmeversorgung																																																
Technologische Reife: Kollektoren TRL 2 (z. B. neue Kollektorkonzepte) bis 9; Wärme- und Kältespeicher TRL 1 (z. B. thermochemische Speicher) bis 9, Systemtechnik TRL 3 bis 9																																																
Kritische Aspekte: Zunehmende Systemkomplexität bei hohen wirtschaftlichen Anforderungen																																																
Entwicklungsziele																																																
<ul style="list-style-type: none"> – Kollektoren: Systemorientierte Entwicklung zur Senkung der Anlagenkosten, Steigerung der Effizienz für neue Anwendungsbereiche (z. B. Wärmenetze, Prozesswärme) und Gebäudeintegration – Wärme-/Kältespeicher: Reduktion der Wärmeverluste, Erhöhung der Energiedichte, optimierte Be- und Entladestrategien, marktaugliche Lösungen für Langzeit- und Mitteltemperaturspeicher – Systemtechnik: Kostensenkung, zuverlässige Systeme mit solarem oder erneuerbarem (z. B. Wärmepumpe und Geothermie) Deckungsanteil bis zu 100 %, multimodale Energieversorgungssysteme 																																																
Technologiefeld-Entwicklung																																																
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;"></th> <th style="width: 10%;">Einheit</th> <th style="width: 10%;">2014</th> <th style="width: 10%;">2020</th> <th style="width: 10%;">2030</th> <th style="width: 10%;">2040</th> <th style="width: 10%;">2050</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Marktpotenzial Deutschland (installierte Leistung, min – max)</td> <td>TWh/a</td> <td>7,4</td> <td>11,5 - 26,4</td> <td>31,0 - 60,8</td> <td>58,6 - 83,9</td> <td>68,3 - 96,1</td> </tr> <tr> <td>GW_{th}</td> <td>12,9</td> <td>20,1 - 46,2</td> <td>54, 2 - 106,5</td> <td>102,6 - 146,8</td> <td>119,5 - 168,2</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Marktpotenzial International (installierte Leistung, min - max)</td> <td>TWh/a</td> <td>385</td> <td>743</td> <td>3607 - 3609</td> <td>7140 - 7195</td> <td>8716 - 9013</td> </tr> <tr> <td>GW_{th}</td> <td>410</td> <td>749</td> <td>3418 - 3421</td> <td>6640 - 6700</td> <td>7931 - 8190</td> </tr> <tr> <td>Lebensdauer</td> <td>A</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>>30</td> <td>>30</td> <td>>30</td> </tr> <tr> <td>Investitionen (dezentral / zentral)</td> <td>€/kW_{th}</td> <td>1029 / 557</td> <td>786 / 414</td> <td>571 / 329</td> <td>500 / 286</td> <td>443 / 271</td> </tr> </tbody> </table>		Einheit	2014	2020	2030	2040	2050	Marktpotenzial Deutschland (installierte Leistung, min – max)	TWh/a	7,4	11,5 - 26,4	31,0 - 60,8	58,6 - 83,9	68,3 - 96,1	GW _{th}	12,9	20,1 - 46,2	54, 2 - 106,5	102,6 - 146,8	119,5 - 168,2	Marktpotenzial International (installierte Leistung, min - max)	TWh/a	385	743	3607 - 3609	7140 - 7195	8716 - 9013	GW _{th}	410	749	3418 - 3421	6640 - 6700	7931 - 8190	Lebensdauer	A	25	30	>30	>30	>30	Investitionen (dezentral / zentral)	€/kW _{th}	1029 / 557	786 / 414	571 / 329	500 / 286	443 / 271
	Einheit	2014	2020	2030	2040	2050																																										
Marktpotenzial Deutschland (installierte Leistung, min – max)	TWh/a	7,4	11,5 - 26,4	31,0 - 60,8	58,6 - 83,9	68,3 - 96,1																																										
	GW _{th}	12,9	20,1 - 46,2	54, 2 - 106,5	102,6 - 146,8	119,5 - 168,2																																										
Marktpotenzial International (installierte Leistung, min - max)	TWh/a	385	743	3607 - 3609	7140 - 7195	8716 - 9013																																										
	GW _{th}	410	749	3418 - 3421	6640 - 6700	7931 - 8190																																										
Lebensdauer	A	25	30	>30	>30	>30																																										
Investitionen (dezentral / zentral)	€/kW _{th}	1029 / 557	786 / 414	571 / 329	500 / 286	443 / 271																																										
F&E-Bedarf																																																
<ul style="list-style-type: none"> – Kollektoren: Neue und optimierte Konzepte für neue Anwendungsgebiete (Wärmenetze, Prozesswärme, kombinierte Wärme- und Stromerzeugung, Gebäudeintegration), zum sicheren Systembetrieb und zur Senkung der Systemkosten – Wärme- und Kältespeicher: Material- und Systemforschung an Phasenwechsel- und thermochemischen Speichern, Systemforschung an großen saisonalen Speichern sowie Mitteltemperaturspeichern für Prozesswärme (100 – 250 °C) – Systemtechnik: Standardisierung, Konzepte und Untersuchungen zur Integration in flexible Strom-Wärmesystemen, neue und optimierte Regel- und Betriebsführungskonzepte, umfangreiche Demonstration und Monitoring, neue Ansätze zur Qualitätssicherung unter Berücksichtigung von LCA 																																																

B) Multikriterielle Bewertung
Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen
Gegenüber den Referenztechnologien Einsparung von CO ₂ -Emissionen bis zu 52 Mio. t (2020 – 2050), sowie von allen weiteren Luftschadstoffen (SO ₂ , CO, NMVOC).
Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz
– Gegenüber den Referenztechnologien Einsparung von Primärenergie bis zu 855 PJ (2020 – 2050) – Kein Verbrauch kritischer Rohstoffe nach DERA-Definition
Kosteneffizienz
– Hohes Kostensenkungspotenzial vorhanden, vor allem im System (Standardisierung, Installation) – Gegenüber den Referenztechnologien Einsparungen erst nach 2030 und bis zu 7 Mrd. €/a (2050)
Inländische Wertschöpfung
Inländische Wertschöpfung steigt bis auf 15,4 Mrd. € in 2030, reduziert sich auf 7,5 Mrd. € in 2050
Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich
– Wettbewerbsfähigkeit weltweit bzw. führende Position europaweit im gesamten Technologiefeld – F&E Budget: 7,5 Mio. € (0,9 % vom gesamten F&E-Budget) in 2014, Trend 2005-2014 +0,26 Mio./a – Output 2014: 10 % der wiss. Publikationen und 8 % der Patente am weltweiten Aufkommen – Output Trend 2005 – 2014: - 0,4 %/a bei Publikationen, - 2 %/a bei Patenten, steigende Konkurrenz
Gesellschaftliche Akzeptanz
– Sehr hohe sozio-politische Akzeptanz – Sehr hohe lokale Akzeptanz bei dezentralen Anlagen, niedrigere bei zentralen Anlagen – Niedrige Marktakzeptanz (fehlende Wirtschaftlichkeit und Bereitschaft der Wärmenetzbetreiber)
Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit
– Bei dezentralen Anlagen: Sehr geringe Pfadabhängigkeit und hohe Reaktionsfähigkeit – Bei zentralen Anlagen: Höhere Pfadabhängigkeit und niedrigere Reaktionsfähigkeit, dabei aber Flexibilität und Hybridisierungsoptionen (Einsatz von KWK, Biomasse, Geothermie, etc.) der Netze
Abhängigkeit von Infrastrukturen
– Bei dezentralen Anlagen: Keine Infrastruktur erforderlich – Bei zentralen Anlagen: Neue bzw. modernisierte Wärmenetze notwendig. Für Anlagen mit hohen solaren Deckungsgraden sind zudem saisonale Speicher erforderlich
Systemkompatibilität
– Hohe Systemkompatibilität und Effizienzsteigerung in Kombination mit Heiz- und KWK-Systemen und große Synergien in Kombination mit Wärmepumpen und Geothermie – Möglichkeit zur Entlastung der Stromnetze durch zusätzliche thermische Speicherkapazität und alternierende Betriebsweise in Kombination mit KWK

1 Beschreibung des Technologiefeldes

1.1 Einleitung

Im vorliegenden Bericht wird mit „Solare Wärme und Kälte“ die traditionelle Wärme- und Kälteerzeugung mit Hilfe solarthermischer Anlagen im Temperaturbereich bis zu ca. 200 °C beschrieben und analysiert. Abb. 1-1 gibt einen Überblick über die Temperaturen und die betrachteten Anwendungen. Der Fokus wird dabei auf Deutschland gelegt. Die Nutzung photovoltaischer Anlagen zu diesem Zweck wird dagegen nicht behandelt.



Abkürzungen: UK – unabgedeckte Kollektoren, FH – Flächenheizungen, Rad. – Radiatorenheizung, TWW – Trinkwarmwasser, ON GT – oberflächennahe Geothermie, G2/3/4 – Wärmenetze der 2./3./4. Generation, KN – Kaltwärmenetz.

Abb. 1-1 Arbeitstemperaturen etablierter Solarkollektoren und ihrer Anwendungssysteme

Die starke Kostenregression der PV-Module, die Senkung der Einspeisungsvergütung, die einfachere Installation und die attraktive Option, mit einer einzigen Technologie sowohl Strom als auch Wärme zu produzieren, hat dazu geführt, dass seit einiger Zeit photovoltaische Anlagen eine wirtschaftlich denkbare Alternative zur Solarthermie darstellen. Ihre tatsächliche Rolle in der nachhaltigen Transformation des Wärmebereiches hängt sehr stark von der Entwicklung des gesamten Energieversorgungssystems in Deutschland ab und lässt sich heute schwer vorhersehen. Bisher beschränkt sich ihr Einsatz auf Einzelfälle im Wohnungsbau und die thermische Nutzung in großem Maßstab kann sich nur in einer fortgeschrittenen Ausbauphase ergeben, da Stromverbraucher (Haushalt, Gewerbe, Industrie und Mobilität) mit höherer Priorität bedient werden müssen. Erst wenn durch netzgekoppelte PV-Anlagen so viel Strom erzeugt wird, dass dieser aus technologischen Gründen nicht vollständig für lokale und regionale Stromanwendungen verwendet werden kann, ist es sinnvoll der vorhandene Überschussstrom in Wärme umzuwandeln und zur Deckung des Wärmebedarfs zu verwenden. Für die Intensivierung der Nutzung des von PV-Anlagen erzeugten Stroms für Stromanwendungen ist u. a. die Entwicklung von ent-

sprechenden Marktmodellen erforderlich. Die Erzeugung von Wärme aus Strom, der mittels fossiler Energien erzeugt wurde, ist grundsätzlich zu vermeiden. Im Gegensatz zu durch PV unterstützten Wärmepumpensystemen weisen solarthermisch unterstützte Systeme erhebliche saisonale Vorteile bezüglich der Netzdienlichkeit auf, was zu einer ganzen Reihe volkswirtschaftlicher Vorteile führt.

Für detaillierte Informationen über den Stand und die Entwicklung der Photovoltaik sowie über ihre Rolle im Wärmebereich wird an dieser Stelle auf die Beschreibung des *Technologiefeldes 1.3: Photovoltaik* verwiesen.

Die Solarthermie ist eine schon lange am Markt etablierte Technologie, die auf eine Tradition von über 40 Jahren zurückblickt. Nach Schätzungen des Bundesverbandes Solarwirtschaft (BSW) waren in Deutschland Ende 2016 über zwei Mio. solarthermische Anlagen mit einer Fläche von 20 Mio. m² und einer installierten thermischen Leistung von 13,9 GW_{th} in Betrieb. Damit wurden im gleichen Jahr insgesamt 7,5 TWh Solarwärme produziert und ca. 2 Mio. Tonnen CO₂-Emissionen vermieden (BSW 2017).

Tab. 1-1 Wichtigste techno-ökonomische Kenndaten für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“

	Einheit	2014	2020	2030	2040	2050
Marktpotenzial Deutschland (installierte Leistung, min – max)	TWh/a	7,4	11,5 - 26,4	31,0 - 60,8	58,6 - 83,9	68,3 - 96,1
	GW _{th}	12,9	20,1 - 46,2	54,2 - 106,5	102,6 - 146,8	119,5 - 168,2
Marktpotenzial International (installierte Leistung, min - max)	TWh/a	385	743	3.607–3.609	7.140–71.95	8.716–9.013
	GW _{th}	410	749	3.418–3.421	6.640–6.700	7.931–8.190
Lebensdauer	A	25	30	>30	>30	>30
Investitionen (dezentral / zentral)	€/kW _{th}	1029 / 557	786 / 414	571 / 329	500 / 286	443 / 271

Mit einem Anteil am gesamten Wärmebedarf von ca. 0,6 % bleibt aber die Solarthermie noch weit entfernt von ihrem großen Potenzial. Bezogen auf das gesamte deutsche Staatsgebiet und unter Berücksichtigung einer mittleren jährlichen Einstrahlungssumme von knapp über 1.000 kWh/m² ergibt sich ein theoretisches heimisches Energiepotenzial, das etwas dem 290-fachen der für die jährliche Wärmeproduktion aufgewendete Endenergie in Deutschland entspricht.

Unter Berücksichtigung von technischen und wirtschaftlichen Bedingungen rechnen Zukunftsszenarien immerhin mit einer Steigerung der Wärmeproduktion von den heutigen 7,5 TWh (2016) bis auf fast 100 TWh im Jahr 2050. Damit könnten solarthermische Anlagen ca. 12 % des gesamten Wärmebedarfs abdecken und einen signifikanten Beitrag zum Erfolg der Energiewende liefern. Die wesentlichen techno-ökonomischen Kenndaten auf dem Weg dahin, die aus der detaillierten Analyse des Technologiefeldes vom Kapitel 4 resultieren, sind in Tab. 1-1 zusammengefasst. Diesen anspruchsvollen Zielen steht die Marktentwicklung der letzten Jahre entgegen, die wie bei den meisten erneuerbaren Technologien im Wärmebereich eine schwache Ausbau- bzw. rückläufige Dynamik zeigt. Diese Situation verdeutlicht die Notwen-

digkeit von neuen Ansätzen und wirksameren Strategien, die gemeinsam von allen am Projekt Wärmewende beteiligten Akteuren erarbeitet und umgesetzt werden müssen. Unter diesen Voraussetzungen besteht eine wesentliche Aufgabe der Forschung darin, neue technische Lösungen zu entwickeln und zu untersuchen, um die Wirtschaftlichkeit der Solaranlagen signifikant zu verbessern, neue Marktsegmente zu erschließen, diese Technologie einfacher in die Energiesysteme zu integrieren und allgemein ihre Akzeptanz zu erhöhen.

Im Rahmen dieser Studie wird das Technologiefeld „Solare Wärme und Kälte“ in die generischen Technologien „Thermische Kollektoren“, „Wärme- und Kältespeicher“ und „Systemtechnik“ untergliedert. Die Kälteerzeugung aus solarthermischer Antriebsenergie, die im Vorgängerbericht (Wietschel et al. 2010) als eigenständige Technologie betrachtet wurde, ist hier dem Bereich „Systemintegration“ zugeordnet. Die Beschreibung des Technologiefeldes erfolgt sowohl nach den genannten Technologien als auch nach Anwendungsbereichen.

1.2 Technologien

1.2.1 Thermische Kollektoren

Thermische Kollektoren sind in Solaranlagen für die direkte Gewinnung von Wärme aus Strahlungsenergie verantwortlich. Die absorbierte Wärme wird anschließend an ein Wärmeübertragungsmedium abgegeben, das im Solarkreis zirkuliert und eine entsprechende Wärmesenke bedient.

Unter den geografischen und meteorologischen Bedingungen Mitteleuropas haben sich in Deutschland fest installierte, nicht oder schwach konzentrierende Systeme etabliert, die für eine Produktion von Wärme bei Temperaturen bis zu ca. 120 °C optimiert sind. Diese Kollektoren nutzen den direkten sowie den diffusen Strahlungsanteil und ihre Effizienz fällt aufgrund der zunehmenden Wärmeverluste mit steigender Arbeitstemperatur.

Die am Markt erhältlichen Produkte können nach ihrer Konstruktion in drei Kategorien klassifiziert werden: unabgedeckte Kollektoren, Flachkollektoren und Vakuumröhren-Kollektoren. Die drei Typen unterscheiden sich im Wesentlichen durch den baulichen Aufwand, der zur thermischen Isolierung des Absorbers betrieben wird.

Bei unabgedeckten Kollektoren (auch WISC: Wind and Infra-red Sensitive Collector) wird auf eine thermische Isolierung verzichtet. Dadurch ist der Wirkungsgrad sehr stark von den Umgebungsbedingungen (Himmel- und Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit) abhängig. Diese Kollektoren liefern typischerweise Nutzwärme mit gutem Wirkungsgrad bei Arbeitstemperaturen bis zu ca. 30 °C. Da die Kollektoren ungedämmt sind, können sie nicht nur durch Einstrahlung, sondern auch konduktiv/konvektiv Umweltwärme aufnehmen. Unabgedeckte Kollektoren sind sehr kostengünstig und lassen sich baulich leicht in Gebäudestrukturen integrieren. Typische Anwendungen sind die Beheizung von Schwimmbädern oder die Unterstützung von Wärmepumpensystemen.

Flachkollektoren schützen dagegen den Solarabsorber durch ein Gehäuse gegen Umwelteinflüsse. Das Gehäuse erlaubt durch eine transparente Scheibe den Strahlungseintritt. Durch die Wahl geeigneter Materialien und Beschichtungen wird die

Strahlungsbilanz optimiert. Weitere konstruktive Maßnahmen (Mehrfachscheiben, interne Konvektionsbarrieren, Dämmung) können den Wärmeverlust an die Umgebung weiter reduzieren. Je nach baulichem Aufwand fällt die Effizienzkurve als Funktion der Außentemperatur moderat, während die Herstellungskosten proportional zum baulichen Aufwand steigen. Typische Arbeitstemperaturen von Flachkollektoren liegen zwischen 40 und 80 °C. Die Stagnationstemperaturen liegen bei 180-210 °C. Bei hocheffizienten Produkten erweitert sich der Einsatzbereich auf bis zu ca. 120 °, wobei die Stagnationstemperatur auf über 250 °C steigt.

Wärmeverluste können weiter minimiert werden, wenn der Strahlungsabsorber in einem evakuierten Gehäuse platziert wird. Die am häufigsten gewählte Bauform ist die Röhrenform, aber auch andere Bauformen sind möglich. Vakuumröhrenkollektoren liefern bis weit in die Heizperiode hinein hohe solare Gewinne bei typischen Arbeitstemperaturen bis zu ca. 160 °C. Durch die gute thermische Isolierung ergeben sich dabei weit höhere Stagnationstemperaturen, die je nach Bauweise zwischen 250-320 °C liegen.

Höhere Arbeitstemperaturen bis über 200 °C lassen sich nur mit konzentrierenden Kollektorsystemen erzielen. Am meisten verbreitet sind hier linienfokussierende Systeme wie die Fresnel-Reflektoren oder die Parabolrinnen-Kollektoren. Obwohl diese Technologien auch in Deutschland produziert werden, sind sie vor allem für den Einsatz in Regionen mit einem hohen Anteil direkter Einstrahlung geeignet und damit für den Exportmarkt prädestiniert.

1.2.2 Wärme- und Kältespeicher

Wegen der täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen des solaren Energiedargebots implizieren solarthermische Anlagen starke Zeitabhängigkeiten. Diese werden besonders im Bereich der Raumwärme wirksam. Ca. 60 % des möglichen solaren Ertrags entfallen in die heizfreie Sommerperiode und ohne Speicher würden heutige Systeme nur ca. 5 % des Bedarfs an Raumwärme und Trinkwarmwasser eines Gebäudes abdecken können (siehe Abb. 1-2). Thermische Speichersysteme sind daher Schlüsselkomponenten für eine bedarfsorientierte Nutzung der Solarthermie in der Trinkwarmwasserbereitung und der Gebäudebeheizung. Darüber hinaus werden Speicher mit unterschiedlichsten Anforderungen u. a. für solare Nahwärmanwendungen, industrielle Prozesswärmeerzeugung und Gebäudeklimatisierung benötigt. Speicher für solare Wärme sollen idealerweise kostengünstig, verlustarm, kleinvolumig (d.h. mit hoher Speicherdichte) und leicht be- und entladbar sein.

Unterschieden werden Kurzzeit-Wärmespeicher und Langzeitspeicher. Kurzzeit-Wärmespeicher dienen dem Ausgleich von solarem Dargebot und Wärmenachfrage auf (Mehr-)Tagesbasis. Unter Verwendung von Kurzzeitwärmespeichern werden typische Deckungsanteile zwischen 10 und 30 % am Brauchwasser- und Raumwärmebedarf erzielt; „Sonnenhäuser“ mit erweiterten Speicherkapazitäten können Deckungsanteile von über 50 % erreichen. Trotz dieser signifikanten Deckungsraten benötigt die Solarthermie in Mitteleuropa in der Regel immer eine Zusatzwärmequelle zur Versorgung in der strahlungsarmen Zeit.

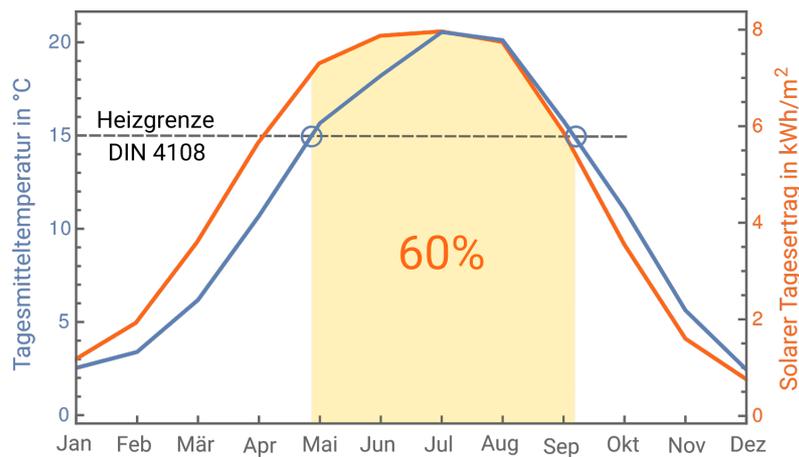


Abb. 1-2 Tagesmitteltemperatur, Heizgrenze und Wärmeertrag eines Flachkollektors am Beispiel des Standorts Potsdam

Das verbreitetste Speichermedium für sensible Wärme ist derzeit Wasser. Zusätzlich werden Feststoffe wie Kies und Erdreich eingesetzt, vor allem beim Bedarf nach großen Speicherkapazitäten auf geringem Temperaturniveau, z. B. bei Verbindung von Solarwärme und Wärmepumpen. Besonders in Wohn- und Bürogebäuden, aber auch in Industrieanlagen und Hallen können ohnehin vorhandene Bauteilmassen als Speicherkapazität erschlossen werden.

Latentwärmespeicher nutzen auch Schmelz- und Verdampfungswärme und können so spezielle Temperaturbereiche effizienter und verlustärmer bedienen als Wasserspeicher. Thermochemische Speicher haben das größte Potenzial hinsichtlich der Erhöhung der Speicherdichte und der Minimierung thermischer Verluste, vor allem bei der Langzeitspeicherung. Ihre Erforschung steht aber noch am Anfang, weshalb grundlegende Fragen zu geeigneten Reaktionen und Materialwahl beantwortet werden müssen. Insbesondere der Life-Cycle-Analyse der eingesetzten Materialien kommt hier eine Schlüsselrolle in der Bewertung zu, wenn latent- oder thermochemische Speicher genutzt werden sollen. Besonders bei saisonaler Speicherung scheiden hier zahlreiche Materialien aufgrund der Herstellungsenergie aus.

Im Gegensatz zu Kurzzeitspeichern ermöglichen Langzeitspeicher einen Ausgleich von Bedarf und Angebot über mehrere Wochen und Monate. Im Bereich der Langzeitspeicherung stellen die Solarthermie und die Geothermie ideal-komplementäre Subsysteme dar: Das solare Energiepotenzial liefert adäquate Energieflussdichten, besonders im Sommer, benötigt jedoch große Speicherkapazität. Die geothermische Energieflussdichte ist um vier Größenordnungen kleiner als die solare, jedoch bietet der geologische Raum aufgrund seiner günstigen thermischen Eigenschaften Optionen für die benötigte Wärmespeicherung. Im Bereich der Quartiersversorgung liefern Erdbeckenspeicher, Erdwärmesonden und Aquiferspeicher die geringsten spezifischen (d. h. auf das Speichervolumen bezogenen) Speicherkosten im Vergleich zu anderen Technologien (Mangold et al. 2012). Besonders Aquiferspeicher stellen wegen ihres geringen obertägigen Platzbedarfs eine interessante Technologie für die Bereitstellung von saisonalem Speichervolumen in Ballungsgebieten dar. In Deutschland liegt hierzu jedoch vergleichsweise wenig Erfahrung vor, insbesondere im Zusammenhang mit der Solarthermie.

1.2.3 Systemtechnik

Die Systemtechnik umfasst in der hier benutzten Systematik alle Komponenten und Schnittstellen einer Solaranlage außer dem Kollektor und dem Speicher sowie deren Wechselwirkung. Zentrale Aufgabe der Systemtechnik ist die Steuerung und Regelung der Anlage, wobei hier auch die entsprechende Funktions- und Ertragskontrolle zu berücksichtigen ist. Somit ist sie für den abgestimmten und technisch sowie wirtschaftlich effizienten Betrieb des Gesamtsystems maßgeblich verantwortlich.

Die Art, der Umfang und die Komplexität der Systemtechnik unterscheiden sich stark je nach betrachteten Systemen und Anwendungen. Da Solaranlagen in der Regel in Kombination mit anderen Wärmeerzeugern eingesetzt werden, sind unter Systemtechnik auch alle Aspekte der Systemintegration solarer Wärme in die übergeordneten Versorgungsstrukturen zu verstehen. Dieses Thema hat schon in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen und wird in einem zukünftig hochgradig integrierten und flexiblen zu erwartenden Energieversorgungssystem eine noch wichtigere Rolle spielen.

1.3 Anwendungsbereiche

1.3.1 Dezentrale Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung

Die dezentrale Raumheizung und Trinkwarmwassererwärmung stellen das traditionelle und schon lange am Markt etablierte Einsatzgebiet für solarthermische Anlagen dar. Über 90 % der heutigen Installationen betreffen ausschließlich Ein- und Zweifamilienhäuser, während für größere Wohn- und Nichtwohngebäude die solare Wärmeversorgung noch keine wirtschaftlich attraktive Lösung bietet. Vor allem im Mietwohnungsbereich stellt das Nutznießer-Investor-Dilemma eine große Hürde dar.

Solaranlagen substituieren fossil-basierte Wärme, daher müssen sich die Systeme an Randbedingungen orientieren, die historisch durch die konventionelle Technologie bestimmt wurden. Dies betrifft vor allem das Temperaturniveau von Heizsystemen. In Wohngebäuden kann Solarthermie eine wesentliche Maßnahme zur Emissionsvermeidung im Wärmebereich darstellen, da sie problemlos 60 % und mehr des Energiebedarfs zur Trinkwassererwärmung decken kann. Konventionelle Radiatoren-Heizungen und Trinkwarmwasser-Versorgungen sind für Temperaturen zwischen 45 und 80 °C (vorlaufseitig) ausgelegt. Flach- und Vakuumröhren-Kollektoren können diese Zieltemperaturen liefern. Damit kann auch die Raumwärmebereitstellung konventioneller Heizsysteme unterstützt werden. Hier werden bei typischen Installationen solare Deckungsanteile von 10 bis 30 % erreicht. Im günstigen Fall (z. B. Neubau) kann das Heizsystem für die Versorgung mit niedrigeren Temperaturen ausgelegt werden. Flächenheizungen (Fußboden-, Decken- oder Wandheizungen) erlauben Versorgungstemperaturen von 25-35 °C. Sogenannte Sonnenhäuser nutzen diese Möglichkeiten und können in Kombination mit größeren Kollektorfeldern und Wärmespeichern solare Deckungsanteile über 50 % des Gesamtwärmebedarfs erzielen. Wärme bei noch niedrigeren Temperaturen lässt sich schließlich durch die Integration in Wärmepumpe-basierte Versorgungssysteme effizient einsetzen. Hier können günstigere unabgedeckte thermische oder sowohl Strom als auch Wärme er-

zeugende photovoltaisch-thermische Kollektoren verwendet werden. Neben Passivhäusern bieten diese letzten Konzepte vielversprechende Lösungswege für die von der EU bis 2021 für den Neubau geforderten Niedrigenergiestandard.

1.3.2 Netzgekoppelte Wärmeerzeugung

Zusätzlich zur Versorgung von einzelnen Gebäuden oder Prozessen kann Solarthermie auch in Nah- und Fernwärmenetze integriert werden. Bestehende Heißwasser-netze der zweiten Generation liefern in der Heizperiode Wärme bei Vorlauftemperaturen oberhalb von 100 °C und Rücklauftemperaturen zwischen 60 und 80 °C; in der Sommerzeit wird das Temperaturniveau in der Regel abgesenkt. Ein alternatives Design wurde seit den 1980er Jahre in Skandinavien entwickelt. Die Versorgungstemperaturen wurden hier auf unter 100 °C gesenkt, was leichtere Bauweisen ermöglicht, die effizient industriell vorgefertigt werden können und direkt und ohne Fundamentierung in den Untergrund verlegt werden. Diese Entwicklungslinie bildet die dritte Generation der Fernwärmenetze. Wärmenetze der kommenden vierten Generation zielen auf einen Wärmetransport bei weiter abgesenkten Temperaturen, um den Anforderungen regenerativer Niedrigtemperatur-Wärme einerseits und sinkenden Wärmeanforderungen infolge besserer Dämmstandards andererseits entsprechen zu können. Es geht dabei um eine weitere Anpassung der Infrastruktur an den Bedarf im Quartier, eine Effizienzsteigerung durch Niedertemperatur-Anwendungen und die Integration in regenerative Erzeugerstrukturen durch smartes Lastmanagement (Lund et al. 2014; Kastner et al. 2016)

Solarthermische Anlagen können Fernwärme auf einem durchschnittlichen Temperaturniveau zwischen 80 und 120 °C liefern. Geringere Temperaturen im Solarkreis bedeuten dabei höhere solare Gewinne, da die Effizienz der Kollektoren monoton mit dem Temperaturunterschied des Wärmeträgers zur Umgebungstemperatur abnimmt. Je nach lokaler Gegebenheit werden verschiedene Einspeisekonzepte verwendet, wie Rücklauf-Vorlauf aber auch Rücklauf-Rücklauf Einspeisung.

Langjährige Erfahrungen für die solarthermische Unterstützung von konventioneller Fernwärme liegen z. B. in Dänemark und in Österreich vor. In Deutschland gibt es einzelne Beispiele; die derzeit größte heimische solarthermische Anlage zur Fernwärmeunterstützung wurde 2016 im brandenburgischen Senftenberg in Betrieb genommen. Sie umfasst eine 8.300 m² Vakuumröhren-Kollektorfläche und soll jährlich 4 Gigawattstunden in das Fernwärmenetz der 25.000-Einwohner-Stadt einspeisen.

1.3.3 Prozesswärme

Ein im Wesentlichen noch zu erschließendes Marktsegment stellt die solare Wärmeerzeugung zur Unterstützung von industriellen Prozessen dar. Im Vergleich zur konventionellen Raumheizung besteht in vielen Fällen eine günstigere zeitliche Übereinstimmung von Wärmebedarf und solarer Einstrahlung. Herausforderungen sind die Komplexität und Heterogenität der Branche und der entsprechenden Prozessabläufe und vor allem die sehr hohen wirtschaftlichen Erwartungen der Investoren.

Solare Wärme wird sowohl in die übergreifende Versorgungsebene als auch in die einzelnen Teilprozesse eingespeist. Neben der typischen Einbindung des flüssigen

Wärmeträgermediums in Warm – oder Heißwassernetze spielen hier auch die Luftherwärmung sowie die Dampferzeugung eine wichtige Rolle.

Wesentliches Auswahlkriterium für eine erfolgreiche solarthermische Unterstützung ist das benötigte Temperaturniveau. Prädestiniert sind hier vor allem Anwendungen bei Temperaturen unter 100 °C, die von marktüblichen Flach- und Vakuumröhrenkollektoren gut und wirtschaftlich bedient werden können. Beispiele dafür sind das Aufwärmen von Kesselspeise- oder Kesselzusatzwasser (Versorgungsebene) sowie das Waschen, Reinigen oder Trocknen (Prozessebene). Ein weiterer signifikanter Teil des Niedertemperaturwärmebedarfs ist auf raumlufttechnische Anlagen zur Gewährleistung der erforderlichen Produktionsbedingungen zurückzuführen. Als Branchen wurden vor allem die Lebensmittelindustrie und der Maschinenbau als sehr gut geeignet identifiziert. Unter Berücksichtigung des Wärmebedarfs für Industrie, Handel und Dienstleistung wurde in diesem Temperaturbereich eine potenzielle jährliche Solarwärmeproduktion von ca. 50 TWh/a geschätzt (BINE 2017).

Zur Erschließung des vorhandenen Marktpotenzials wurde im Rahmen der Novellierung des Marktanreizprogrammes (MAP) im August 2012 explizit die Installation solarer Prozesswärmeanlagen im industriellen und gewerblichen Bereich mit einer erhöhten Förderquote aufgenommen. Die Einführung dieser neuen Förderung hat das Interesse der Investoren geweckt und zu einer gewissen Ausbaudynamik geführt. Ende 2016 waren in Deutschland über 200 Solaranlagen installiert, die Prozesswärme bereitstellen, vor allem in Gewerbe und Landwirtschaft (BINE 2017).

1.3.4 Kälteerzeugung

Diese Anwendung adressiert die Nutzung solarer Wärme für den thermischen Antrieb von Kältemaschinen. Der Einsatzbereich dieser Technologie ist breit und umfasst die klassische Gebäudekühlung und -klimatisierung, die Prozesskältebereitstellung für den gewerblichen und industriellen Bereich sowie die Möglichkeit der Unterstützung von Kältenetzen. Die solare Kühlung wird vor allem als deutsches Exportprodukt für die Märkte in Asien und im Nahen Osten gesehen. Bei steigendem Kältebedarf wird sie aber selbst in Deutschland und in Mitteleuropa sowohl für den Nicht-Wohnungsbau als auch für den Komfortwohnungsbau zunehmend an Bedeutung gewinnen. Vorteilhaft bei dieser Technologie ist die hohe Korrelation zwischen Solarangebot, Umgebungstemperatur und Bedarf sowie die Möglichkeit sie flexibel mit anderen Wärmeerzeugern zu kombinieren (z. B. Abwärme, Kraft-Wärme-Kopplung). Kritisch bleibt bisher aufgrund der Komplexität der Anlagen die Wirtschaftlichkeit.

Technisch unterscheiden sich die Systeme vor allem nach dem physikalischen Prinzip der Kältemaschine: Adsorptionskältemaschinen nutzen physikalisch/chemische Bindungsenergien von Gasen oder Flüssigkeiten an Festkörperoberflächen zur Kälteerzeugung aus. Bei Absorptionsprozessen kommt es dagegen zum Eindringen der Stoffe in Flüssigkeiten oder Feststoffe mit volumetrischer Vermischung der Stoffphasen. Auch in diesem Fall werden physikalisch/chemische Bindungsenergien zur Kälteerzeugung genutzt. Die Wahl des Stoffsystems legt dabei den thermischen Arbeitsbereich auf der kalten sowie auf der warmen Seite weitgehend fest. Im Bereich der solarthermischen Kühlung eignen sich Stoffsysteme, deren benötigte Antriebswär-

me-Temperaturen zu den Erzeugungstemperaturen passen (typische Antriebstemperaturen werden in Abb. 1-1 dargestellt). Für Temperaturen unter 100 °C können marktübliche Flach- oder Vakuumröhrenkollektoren verwendet werden, für höhere Temperaturbereiche ist der Einsatz von aufwendigeren, konzentrierenden Systemen mit Nachführung erforderlich.

Anlagen zur Raumklimatisierung können zudem nach Art des verwendeten Verfahrens unterschieden werden: Geschlossene Verfahren stellen Kaltwasser bereit, das beispielsweise für Kühldecken eingesetzt werden kann. Offene Verfahren dienen dagegen der direkten Luftkonditionierung (Temperaturabsenkung und Entfeuchtung).

Trotz der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und der in den letzten Jahren nachgewiesenen Funktionsfähigkeit sowie günstiger Umweltbilanzen hat die solarthermische Kälteerzeugung in Deutschland noch keine nennenswerte Verbreitung erreicht. Nach der letzten Schätzung wurden bis 2014 ca. 1.200 Anlagen weltweit installiert (BINE 2016). Ursachen dafür sind die noch sehr hohen Investitionskosten, der Planungs- und Installationsaufwand sowie die starke Konkurrenz der elektrischen (auch photovoltaisch betriebenen) Kompressionskältetechnik und, im industriellen/gewerblichen Bereich, von energiesparenden Ersatzmaßnahmen. Insbesondere in Fällen, wo ausschließlich Kälte und nicht zeitweise auch Wärme benötigt wird, kann die photovoltaisch betriebene Kompressionskälte die der solarthermischen Kälteerzeugung überlegene Variante darstellen.

1.4 **Sektorkopplung**

Langzeitspeicher bieten auch eine konzeptionelle Basis zur Kopplung zwischen dem Strom- und Wärmesektor unter Verwendung der Wärmepumpentechnologie. Ein viel referenzierter Modellfall für eine multi-modal gekoppelte Energieversorgung stellt das Versorgungssystem der Kommune Braedstrup in Mitteldänemark dar. Das System umfasst neben einem 18.000 Quadratmeter großen Flachkollektoren-Feld und dem zugehörigen Tagesspeicher auch eine konventionelle KWK Anlage, einen geologischen Langzeitspeicher, eine Wärmepumpenanlage und einen Elektrokessel zur direkten Stromheizung. Die hochflexible Anlage wird nach dem Börsen-Strompreis gefahren: Bei Strombedarf im Netz und hohen Börsenstrompreisen produziert die Anlage Strom im Blockheizkraftwerk und speist die Abwärme in das Versorgungsnetz ein. Bei geringen und sogar negativen Börsenstrompreisen wird Strom aus dem Netz entnommen und mit der Wärmepumpe der Langzeitspeicher entladen. Die Solaranlage unterstützt die Fernwärmeversorgung und dient auch zur Beladung des Geospeichers in den Sommermonaten. Voraussetzung für die effektive Verknüpfung zwischen Wärme- und Strompfad ist das Wärmenetz und der daran angeschlossene Wärmespeicher.

Vergleichbare Systeme werden auch für Ein- und Mehrfamilienhäuser konzipiert. Auch hier liefern (flache) geothermische Anwendungen die Speicherkapazität zur Aufnahme von solarer Wärme (z. B. Erdkollektoren). Die Entnahme erfolgt durch stromgetriebene Wärmepumpen. Die kombinierte Bereitstellung von PV-Strom und Wärme kann hier z. B. durch PVT Kollektoren erfolgen. In solchen innovativen Systemen wird die Solarwärme als thermische Niedertemperatur-Wärmequelle zur Regeneration des geothermischen Systems aufgefasst.

2 Stand F&E in Deutschland

2.1 Einleitung

Bezugnehmend auf die Entwicklungen der letzten Jahre wird in diesem Kapitel ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand der F&E-Aktivitäten in Deutschland auf dem Gebiet wiedergegeben und der zukünftige F&E-Bedarf definiert. Die Analyse erfolgt auch hier sowohl nach Technologien als auch nach Anwendungsbereichen.

2.2 Entwicklungsstand und Forschungsbedarf nach Technologien

2.2.1 Thermische Kollektoren

Thermische Kollektoren weisen heute einen fortgeschrittenen technologischen Entwicklungsstand vor allem in Hinblick auf die traditionellen Anwendungen dezentraler Raumheizung und Trinkwarmwassererwärmung auf. In den letzten Jahren hat sich die Forschung auf die weitere Senkung der Kosten durch die Rationalisierung der Fertigung und die Identifizierung günstigerer Ersatzmaterialien für Kupfer und Aluminium fokussiert. Hierzu wurden erste Lösungen aus Kunststoff oder Stahl erarbeitet, wobei die bisherigen Ergebnisse keine deutlichen Vorteile gegenüber den traditionellen Materialien aufgewiesen haben. Weitere Schwerpunkte waren die Entwicklung von effizienten Lösungen für den Einsatz bei höheren Temperaturen (solare Prozesswärme, etc.) und die Steigerung der Betriebssicherheit durch Erarbeitung von Maßnahmen zur Senkung der Stagnationstemperatur. Schließlich wurden zunehmend vielversprechende Konzepte für die Gebäudeintegration entwickelt und untersucht.

Bei heutigen Herstellungskosten zwischen 60 und 70 €/m² haben die Kollektoren eine sehr erfolgreiche Kostendegression erfahren. Auch wenn eine weitere wirtschaftliche Optimierung dieser Komponente anzustreben ist, sollen sich zukünftige F&E-Aktivitäten im Kollektorbereich vor allem auf die Senkung der Kosten sowie auf die Steigerung der Effizienz und der Zuverlässigkeit im System fokussieren. Sowohl systemorientierte als auch anwendungsspezifische Entwicklungen sind zu unterstützen. Die folgenden zentralen Entwicklungsthemen werden identifiziert:

- Entwicklung standardisierter Montage- und Leitungssysteme zur Reduzierung des Installationsaufwands der Kollektorfelder
- Entwicklung neuer Lösungen für die Integration in die Gebäudehülle bzw. Entwicklung von solaraktivierten Gebäudekomponenten (für Fassaden und Dächer), um die architektonische Akzeptanz zu erhöhen und die Installationskosten zu reduzieren. Hier sind neue Ansätze für die Nutzung im Neubau und im Gebäudebestand notwendig, wobei letztere auch den Aspekt Denkmalschutz bzw. Stadtbild zu berücksichtigen haben
- Weiterentwicklung und Erprobung von Kollektorkonzepten zur Begrenzung der Stagnationstemperatur im System und Gewährleistung eines sicheren und wartungsarmen Betriebs der Solaranlagen in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen

- Weiterentwicklung von photovoltaisch-thermischen Kollektoren zur flächensparenden gleichzeitigen Wärme- und Stromversorgung, mit Schwerpunkt auf Gebrauchstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit
- Kosten- und effizienzoptimierte Konzepte für den Einsatz bei Temperaturen über 80 °C im Prozesswärmebereich und in netzgebundenen Anlagen
- Neue und optimierte Kollekturlösungen für den Betrieb in Wärmepumpensystemen.

2.2.2 Wärme- und Kältespeicher

Wärmespeicher wurden in der Vorgängerstudie als einer der vier wesentlichen Forschungsschwerpunkte für das Technologiefeld identifiziert. Mit dem übergeordneten Ziel, die Substitution fossiler Brennstoffe durch solarthermische Anlagen deutlich zu steigern, haben sich die F&E-Aktivitäten der letzten Jahre unterschiedlichen Bereichen gewidmet. Bei den Wasserspeichern wurde der Fokus vor allem auf die Realisierung von kostengünstigeren, modular skalierbaren Lösungen, auf die Erhöhung der Wärmedämmung und der Systemeffizienz durch den Einsatz geeigneter Hochleistungsmaterialien und konstruktiver Maßnahmen gelegt. Bei den Latentwärmespeichern wurden umfangreiche auch anwendungsorientierte Untersuchungen durchgeführt: Während für die Gebäudeheizung in der Gesamtbetrachtung bisher kein Vorteil gegenüber Wasser nachgewiesen wurde, haben die Entwicklungen im Bereich Klimatisierung bis zur Marktreife einiger Konzepte geführt. Bei den vielversprechenden thermochemischen Speichern erfolgten im Wesentlichen grundlegende Arbeiten zur Identifizierung geeigneter Stoffe und zum Verständnis von deren Wärme- und Stofftransportmechanismen. Die Erforschung steht hier noch am Anfang. Schließlich wurde anhand von Pilotanlagen mit großen saisonalen Wasserspeichern bewiesen, dass solare Deckungsanteile über 50 % erreichbar sind. Hierzu sind aber noch Anstrengungen in Bezug auf technische und vor allem wirtschaftliche Optimierung erforderlich. Bei der saisonalen Speicherung ist vor allem eine kritische Life-cycle-Analyse der eingesetzten Materialien durchzuführen.

Basierend auf den erreichten Erfolgen sowie auf den noch offenen Fragestellungen in allen genannten Bereichen werden folgende spezifische Forschungs- und Entwicklungsaufgaben für die kommenden Jahre identifiziert:

- Verminderung der Wärmeverluste, z. B. durch Vakuumdämmung, verwechslungssichere Anschlussysteme mit Siphonelementen u. ä. oder durch thermochemische Speicherkonzepte
- Erhöhung der Speicherdichte und Optimierung des Wärmeein- und -austrags durch verstärkte Material- und Systemforschung an Phasenwechsel- und thermochemischen Speichern
- Schichterhaltende Be- und Entladesysteme zur Wahrung der Temperaturschichtung und Optimierung der Arbeitstemperaturbereiche in Wasserspeichern
- Optimierung großer saisonaler Speicher hinsichtlich Wärmeverluste und Kosteneffizienz

- Speicherkonzepte für Solarwärme in Massivbauteilen zur Beheizung von Gebäuden und im Erdreich zur Optimierung und Effizienzsteigerung von Wärmepumpenquellen
- Systemintegration mit geothermischen Speicherlösungen (Bohrlochspeicher, Aquiferspeicher)
- Entwicklung effizienter Speicherlösungen für den Temperaturbereich über 100 °C
- Allgemeine Standardisierung von Speichersystemen und –komponenten.

2.2.3 Systemtechnik

Wenngleich viele Komponenten eines Gesamtsystems bereits ein hohes Maß an Effizienz zeigen, besteht häufig Verbesserungspotenzial bei deren dynamischer Wechselwirkung, wie die Untersuchungen der letzten Jahre bewiesen haben. Bei Nachrüstung von solarthermischen Anlagen mindern häufig hohe Rücklauftemperaturen, Konkurrenzsituationen bei der Wärmebereitstellung durch mangelnde Abstimmung des Steuerungs- und Regelungskonzepts und hohe Wärmeverluste im Verteilsystem die Systemeffizienz.

Funktions- und Ertragskontrollverfahren für Wärmeversorgungssysteme können durch Rückmeldung bei festgestellten Missständen Abhilfe verschaffen - wie weitere F&E-Aktivitäten gezeigt haben – sind diese jedoch weder flächendeckend etabliert noch optimiert. Gleiches gilt für LowEx- Systeme, die von der Erzeugung bis zur Nutzung auf geringstmöglichem Temperaturniveau betrieben werden. Insbesondere bei der Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe, die zunehmend in vergangenen Projekten untersucht wurde, verspricht dieses Konzept Erfolg (Hadorn 2015).

Es besteht daher ein umfassender F&E-Bedarf zur Untersuchung systemtechnischer Fragestellungen: Mögliche nachhaltige Strom-/Wärme-/Kälte-Systeme, die gegenseitigen Abhängigkeiten ihrer Komponenten und Sektoren sowie die notwendigen Steuer- und Regelstrategien der komplexer werdenden und weitergehend integrierten Systeme. Hierzu müssen Methoden zur Systementwicklung und -optimierung, zur Variantenbewertung sowie zur Beschreibung und Darstellung der komplexen Systeme erarbeitet und angewendet werden.

Forschungsbedarf wird vor allem in den folgenden Punkten identifiziert:

- Entwicklung standardisierter hydraulischer, mechanischer und elektrischer Schnittstellen
- Entwicklung einfacher, praxisnaher Planungswerkzeuge zur standardisierten Auslegung großer solarthermischer Anlagen für Gebäude und Prozesse
- Verbesserung des Zusammenwirkens von Solarthermie und anderen Wärmeerzeugern im Systemkontext, insbesondere der Wärmepumpe, durch Feldstudien und Systemtests
- Weiterentwicklung von Systemreglern und Verfahren zur kontinuierlichen und kostengünstigen Funktionsüberwachung und Ertragskontrolle in (solarthermisch unterstützten) Wärmeversorgungssystemen

- Weiterentwicklung von Gebäuden mit solarthermischen Deckungsanteilen über 50 % („Sonnenhäuser“), für Neu- und Bestandsbau mit dem Ziel der Kostensenkung und verbesserter Integration in das Gesamtsystem Gebäude unter Berücksichtigung aller bautechnischen Anforderungen
- Weiterentwicklung von Hybridsystemen aus Solarwärme und Wärmepumpen, dazu Erarbeitung adäquater Auslegungsregeln und optimierter Regelung sowie Abschätzung des Marktpotenzials.
- Entwicklung von optimierten Systemreglern, u. a. durch die Integration neu entwickelter Prognoseverfahren

2.3 Entwicklungsstand und Forschungsbedarf nach Anwendungen

2.3.1 Dezentrale Raumheizung und Trinkwarmwassererwärmung

Solarthermische Wärme wird für die Trinkwarmwasserbereitung und die Unterstützung der Raumwärmeversorgung vor allem im Wohngebäudebereich schon lange eingesetzt. Wenngleich einige Objekte mit einer solaren Deckung von 100 % erfolgreich betrieben werden und ohne Nachheizung auskommen, liegen typische Werte im Bereich 10 % bis 30 % für kleine Trinkwarmwasser- und Raumheizungsanlagen und entsprechen dem derzeitigen Stand der Technik. Die Forschungsaktivitäten der letzten Jahre haben sich somit auf neue und optimierte Konzepte mit solaren Deckungsanteilen von über 50 % in Ein- und Mehrfamilienhäusern konzentriert und erfolgreiche Ergebnisse erzielt (HeizSolar 2015).

Bei diesen Anlagen gestaltet sich die Wirtschaftlichkeit als schwierig. Lösungen mit wenig anlagentechnischem Aufwand, die insbesondere in der Heizperiode hohe solarthermische Deckungen erzielen, sind noch nicht verbreitet. Hier hilft eine konsequente Reduzierung des Nutztemperaturniveaus auf das minimal Mögliche.

Insbesondere im Mehrfamilienhausbereich werden wegen des hohen Wirtschaftlichkeitsdrucks derzeit nur wenige und in der Regel kleine Anlagen installiert. Dies ist von Nachteil, denn Solarwärme hat das Potenzial, einen großen Anteil der insbesondere auch in sanierten Objekten noch signifikanten Wärmeverteilverluste zu decken. Die mögliche Abschaltung des Nachheizwärmeerzeugers während sonst ineffizienter Teillastphasen erhöht die Energieeinsparung deutlich.

Vor allem die Kombination mit der Wärmepumpe als Nachheizung bietet schließlich ein hohes Effizienzpotenzial und großen synergetischen Nutzen. Solarwärme kann sowohl auf der Quellen- als auch auf der Senkenseite der Wärmepumpe eingesetzt werden. Dort erhöht sie die Effizienz der Wärmepumpe oder kann deren Betrieb gänzlich vermeiden. Das geringe Quelltemperaturniveau sorgt für hohe solarthermische Erträge, kann als Stagnationsschutz fungieren und ermöglicht den Einsatz kostengünstiger ungedeckter Kollektoren, z. B. Schwimmbadabsorber oder PVT-Module. Hierzu haben F&E-Projekte der vergangenen Jahre vielversprechende Ergebnisse gezeigt (Hadorn 2015).

Forschungsbedarf wird deshalb vor allem in folgenden Punkten gesehen:

- Identifikation von kosteneffizienten Systemlösungen mit hoher solarthermischer Deckung über 50 %, wobei ein Fokus insbesondere auf die Erreichung hoher Deckungsraten während der Heizsaison zu legen ist
- Reduktion von Systemverlusten durch Optimierung von Verteilsystemen und Temperaturniveaus, vor allem in großen Anlagen und Mehrfamilienhäusern, LowEx Systeme
- Optimierte Einbindung in konventionelle und regenerative Wärme- und Energieversorgungssysteme, vor allem in Kombination mit Umweltwärmenutzung über die Wärmepumpe, zur Steigerung der Gesamteffizienz
- Vereinfachung der Installation und Montage von Solaranlagen durch die Entwicklung vorgefertigter Baugruppen und standardisierter Schnittstellen als prioritäre Maßnahme zur Kostensenkung und Vermeidung von Installationsfehlern.

2.3.2 Prozesswärme

Die F&E-Aktivitäten im Bereich solarer Prozesswärme haben sich seit dem letzten Technologiebericht sowohl auf nationalem als auch auf internationalem Niveau deutlich intensiviert. Eine wesentliche Rolle hat dabei die Einführung des begleitenden Marktanreizprogramms (MAP) im Jahr 2012 gespielt, welches mit günstigen Förderbedingungen das Interesse potentieller Investoren geweckt hat.

In den vergangenen Projekten wurden unterschiedliche Ziele verfolgt: Als erster Schritt sind Potenzialstudien für den gesamten Niedertemperatur-Industriebereich sowie für ausgewählte, als besonderes geeignet identifizierte Branchen erarbeitet worden. Im Rahmen zahlreicher Pilot- und Demonstrationsanlagen wurden anschließend die spezifischen Einzelprozesse detailliert analysiert, entsprechende Lösungen für die effiziente Einbindung solarer Wärme erarbeitet und Komponenten neu entwickelt oder angepasst (z. B. Kollektoren und Speicher für den Betrieb bei höheren Temperaturen). Dabei wurden die Funktionsweise und die technischen Vorteile der solaren Unterstützung erfolgreich nachgewiesen. Aufgrund der ausgeprägten Homogenität und Komplexität dieses Marktsegmentes und vor allem der sehr hohen wirtschaftlichen Anforderungen bzw. Erwartungen der Investoren sind hierzu noch F&E-Aktivitäten erforderlich, die auf eine deutliche Senkung der Kosten und der Komplexität der Integration von Solarwärme in industrielle Prozesse zielen.

F&E-Bedarf wird in folgenden Punkten identifiziert:

- Maßnahmen zur Standardisierung von Integration und Regelung abhängig von der zu versorgenden Wärmesenke
- Untersuchung und Demonstration solarer Prozesswärme in Kombination mit anderen Wärmeerzeugern und Effizienztechnologien wie Wärmepumpe, KWK und Wärmerückgewinnung
- Maßnahmen zur Stagnationsvermeidung bei nicht vorhandenem Wärmebedarf in der einstrahlungsreichen Zeit (z. B. Betriebsferien im Sommer)

- Entwicklung geeigneter Konzepte zur Erhöhung der solaren Deckungsrate bei industriellem Wärmebedarf mit erhöhter Außentemperaturabhängigkeit
- Entwicklung einfacher und anschaulicher Hilfsmittel (z. B. Computerprogramme) zur Planung und Auslegung von Prozesswärmeanlagen
- Entwicklung angepasster Geschäftsmodelle und Unterstützung der Überwindung von nicht-technischen Hürden (Bankability, rechtliche Rahmenbedingungen, Förderkonzepte etc.) für Prozesswärmeanlagen
- Entwicklung geeigneter Verfahren, Montagematerialien und Installationshilfen zur kosten- und zeiteffizienten Installation großer thermischer Solaranlagen
- Entwicklung und Einsatz einer kostengünstiger Minimalmesstechnik zur Bewertung des Anlagenbetriebes umgesetzter Anlagen
- Entwicklung einer Strategie mit entsprechenden Maßnahmen zur flächendeckenden CO₂-armen Prozesswärmebereitstellung in 2050.

2.3.3 Kälteerzeugung

Auch die solarthermische Erzeugung von Kälte zur Kühlung von Gebäuden und Maschinen wurde in der Vorgängerstudie als einer der vier zentralen Forschungsschwerpunkte für das Technologiefeld identifiziert. In den letzten Jahren wurden erste Prototypen zu marktreifen Produkten entwickelt, sodass heute eine Vielzahl von Kältemaschinen im kleinen und mittleren Leistungsbereich kommerziell verfügbar ist. Der Fokus lag zudem auf der Demonstration der Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Anlagen in den sehr unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Neben den technischen Erfolgen zeigen die Ergebnisse, dass die Wirtschaftlichkeit eine sehr große Herausforderung für die kommerzielle Verbreitung bleibt. Die Deutsche Solarthermie-Technologieplattform (DSTTP) sieht gegenwärtig relativ geringe Marktchancen in Deutschland und Mitteleuropa für diese Anwendung, hervorgerufen besonders durch die Konkurrenz zur (marktbeherrschenden) elektrischen Kompressionskältetechnik. Es wird daher empfohlen, im Rahmen der Forschungsförderung nur solche Systemansätze zu unterstützen, die absehbare wettbewerbsfähige Kostenperspektiven aufweisen (DSTTP 2016). Unter dieser Voraussetzung werden folgende zentrale Themen für zukünftige F&E-Aktivitäten identifiziert (FVEE 2015):

- Weitere Standardisierung und Vorkonfektionierung von thermischen Heiz- und Kühlsystemen unter Einhaltung einer genormten primärenergetischen Mindesteffizienz
- Steigerung der Umwandlungseffizienz derartiger Systeme, um die Kosten zu senken
- Feldtests in Anlagen mit hohem Kühlbedarf und hohem Brauchwarmwasserbedarf zur systemtechnischen Standardisierung
- Minimierung des Sekundärenergiebedarfs (v.a. Strom) von thermischen Heiz- und Kühlsystemen
- Fokussierung der Entwicklung auf gasbetriebene Sorptionswärmepumpen für hohe Temperaturhübe (Ersatz von Bestandsheizung) und für niedertemperierte

Umweltwärmequellen (Luft), um die Anwendungsbreite und Gesamtjahreseffizienz stark zu erhöhen

- In der Ersatzmaßnahme Fernkälte aus Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) kann auch der Einsatz solarthermischer Kälteerzeugung im Kältenetz zu Spitzenlastzeiten sinnvoll sein und sollte im Zusammenhang mit geeigneten Kältespeichertechniken untersucht werden.

2.3.4 Netzgekoppelte Wärmeerzeugung

Erfahrungen mit Konzeption und Betrieb solarthermischer Anlagen zur netzgekoppelten Wärmeversorgung werden in Deutschland seit über 20 Jahren hauptsächlich im Rahmen von einzelnen F&E-Projekten gesammelt. Durch die Konkretisierung der Klimaziele der Bundesregierung und die erfolgreichen Beispiele aus Skandinavien ist in den letzten Jahren das Interesse der Marktakteure gewachsen und die Forschungsaktivitäten wurden intensiviert.

Aufgrund der Komplexität der Thematik war die Bandbreite der Untersuchungen sehr hoch. Neben der Bearbeitung von technischen Fragestellungen, die sich auf die Realisierung von neuen Typologien und auf die Optimierung der solarthermischen Einbindung konzentriert haben, wurden intensiv die rechtlichen, politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen analysiert, mit dem Ziel die vorhandenen Hemmnisse abzubauen. Potenzialstudien haben gezeigt, dass selbst in Deutschland Wärmegebungskosten ohne Förderung von 50 €/MWh und darunter erreichbar sind und die solarthermisch unterstützte, netzgekoppelte Wärmeversorgung somit eine wirtschaftlich konkurrenzfähige Alternative werden kann. Der F&E-Bedarf ist aber sowohl in der Konzeption als auch in der Umsetzung und Demonstration noch hoch. Hier gilt es vor allem folgende Aspekte zu erarbeiten:

- Einbindung von Solarthermie-Großanlagen in die Erzeugerstrukturen der Fern- und Nahwärmenetze, einschließlich der Kombination mit KWK-Technologien und EE-Stromerzeugung
- Entwicklung von Konzepten zur CO₂-neutralen Energieversorgung von Quartieren und ganzen Städten. Hierzu ist die Systemintegration von Solarthermie unabdingbar
- Entwicklung von Strategien zur Absenkung der Systemtemperaturen und insbesondere der Rücklauftemperaturen in Wärmenetzen
- Entwicklung von neuen, zukunftsfähigen Systemkonzepten sowohl für hochverdichtete Siedlungen als auch für den ländlichen Raum, hier insbesondere in Kombination mit biomassebasierten Erzeugern
- Simulationswerkzeuge zur Vorausberechnung und zum prognosebasierten Betrieb von Wärmenetzen mit einer zunehmenden Anzahl dezentraler Wärmeeinspeiser in Kombination mit zentralen oder dezentralen Speichern inkl. Identifikation der optimalen Betriebsführung
- Entwicklung von effizienten Monitoring-Verfahren zur Gewährleistung der Qualität von Installation und Betrieb der Anlagen

- Entwicklung standardisierter, multifunktionaler Übergabestationen (Bezug und Einspeisung), die sowohl für die Einspeisung von volatilen Solarthermieerträgen als auch für andere Wärmeüberschüsse (dezentrale KWK etc.) geeignet sind
- Verbesserung nicht-technischer Randbedingungen (Bankability, rechtliche Rahmenbedingungen, Förderkonzepte, kommunale Wärmepläne etc.) für neue Wärmenetze auch außerhalb von Ballungsräumen
- Entwicklung von optimierten Transformationspfaden für solarthermische Anwendungen in bestehenden und neuen Fernwärmenetzen unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Randbedingungen. Dazu Potenzialanalyse zur solarthermischen Unterstützung vorhandener Nah- und Fernwärmesysteme und Analyse der Akzeptanz in Verbindung mit großen solarthermischen Freiflächenanlagen
- Entwicklung einer Technologie- und Umsetzungsroadmap zur Erschließung dieses Marktsegmentes.

2.4 Technologie- und anwendungsübergreifender Forschungsbedarf

Ergänzend zu dem für die einzelnen Technologien und Anwendungssegmente genannten F&E-Bedarf sind insbesondere folgende bereichsübergreifende Forschungsthemen zu nennen, die von der Deutschen Solarthermie-Technologieplattform identifiziert wurden (DSTTP 2016):

- Entwicklung branchenweiter Lösungen zur Integration der Solarthermie in Strom-Wärme-Gesamtsysteme und Berücksichtigung von smart-home Systemen
- Verstärkte Durchführung von Felduntersuchungen zur umfassenden Evaluation der Qualität ausgeführter Anlagen in Bezug auf Funktion, Ertrag und Endenergieeinsparung unter Berücksichtigung von Hilfsenergie
- Monitoring / Anlagenüberwachung / Funktionskontrolle / Fehlerdetektion, dezentral und/oder online, perspektivisch auch als Voraussetzung für Emissionshandel oder Nachweisführung
- Wissenstransfer von und an das Installationshandwerk und die Anlagenbetreiber, insbesondere mit inter- und transdisziplinären Ansätzen
- Weiterentwicklung, Vereinfachung und Vereinheitlichung europa- und weltweit gültiger Prüf- und Zulassungsverfahren sowie baurechtlicher Genehmigungs- und Zertifizierungsverfahren
- Entwicklung von Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsberechnung und Primärenergiebewertung unter Berücksichtigung der Prognoseunsicherheit z. B. zukünftiger Kosten fossiler Energieträger sowie zeitlich variabler Anteile erneuerbarer Energien
- Marktanalyse und Entwicklung innovativer solarthermie-spezifischer Vermarktungsstrategien
- Erarbeitung neuer Geschäftsmodelle wie z. B. Solarthermie-Contracting, für industrielle Prozesswärme oder Mieterwärmemodelle für die Mietwohnungsbranche

3 Bewertung der Relevanz der öffentlichen Forschungs-förderung

3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Die Dauer von der Erforschung und Entwicklung neuer Lösungen bis zur Inbetriebnahme erster kommerzieller Anlagen hängt von unterschiedlichen Randbedingungen ab: Unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten sind für das betrachtete Technologiefeld sowohl der prozentuale Anteil des durch Solarenergie gedeckten Wärmebedarfs als auch der spezifische Anwendungsbereich ausschlaggebend. Hohe solare Deckungsanteile setzen prinzipiell aufwendigere Lösungen zur Wärmespeicherung und/oder eine komplexere Systemtechnik voraus. Diese führen sowohl zu höheren spezifischen Kosten als auch zu niedrigeren spezifischen Erträgen und damit zu einer allgemeinen Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit. Jeder Anwendungsbereich adressiert andererseits Märkte mit unterschiedlichen wirtschaftlichen Erwartungen und Tradition sowie Systeme mit unterschiedlicher Komplexität. Dezentrale Anlagen zur Raumheizung oder Bereitstellung von Trinkwarmwasser in Gebäuden werden seit über 40 Jahre installiert, während die solare Erzeugung von Prozesswärme und –Kälte oder die Solarisierung von Wärmenetzen jüngere Forschungsgebiete darstellen.

Schließlich können für die Definition der Vorlaufzeiten die klimapolitischen Strategien sowie die förderpolitischen Rahmenbedingungen entscheidend sein, weil dadurch die Marktpenetration bestimmter Technologien beschleunigt werden kann. Die Analyse der langfristigen Energieszenarien (siehe Kriterium 3) zeigt aber in diesem Fall, dass eine 95 %ige Reduktion der Treibhausgase zu keinem deutlichen Marktanzreiz für die Solarthermie im Vergleich zu einer 80 %igen Reduktion führt. Somit unterscheiden sich die geschätzten Vorlaufzeiten in den zwei Entwicklungspfaden nicht. Für die Bewertung wird eine generelle öffentliche Förderung angenommen. Ohne kompensierende Unterstützung durch legislative, fiskalische oder direkte finanzielle Fördermaßnahmen ist daher mit längeren Vorlaufzeiten zu rechnen.

Unter Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten und Annahmen sind die Ergebnisse der Bewertung in den Tab. 3-1 bis 3-6 dargestellt.

Tab. 3-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von dezentralen Solaranlagen zur Raumheizung und Trinkwarmwasser mit einem solaren Deckungsanteil < 50 %

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2030 <input type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2030 <input type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>

Tab. 3-2 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von dezentralen Solaranlagen für Raumheizung und Trinkwarmwasser mit einem solaren Deckungsanteil > 50 %

Abhängig von den verschiedenen Szenarientwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Tab. 3-3 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Solaranlagen im Bereich Prozesswärme

Abhängig von den verschiedenen Szenarientwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Tab. 3-4 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Solaranlagen im Bereich Kälteerzeugung

Abhängig von den verschiedenen Szenarientwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Tab. 3-5 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von netzgebundenen Solaranlagen mit einem solaren Deckungsanteil < 30 %

Abhängig von den verschiedenen Szenarientwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Tab. 3-6 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von netzgebundenen Solaranlagen mit einem solaren Deckungsanteil > 30 %

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Das Entwicklungsstadium des Technologiefeldes „Solare Wärme und Kälte“, das die Basis für die Bewertung der Forschungs- und Entwicklungsrisiken darstellt, unterscheidet sich sehr stark selbst innerhalb der einzelnen betrachteten Technologien, wie aus Kapitel 1 und 2 zu entnehmen ist und schon im vorherigen Bericht festgestellt wurde. Tab. 3-7 fasst den aktuellen Stand zusammen.

Solarthermische Kollektoren verschiedener Bauarten und Leistungen sind schon lange kommerziell erhältlich (TRL 9). Um eine notwendige Verbesserung der Marktdurchdringung zu ermöglichen, werden technisch anspruchsvolle Entwicklungen durchgeführt (z. B. schaltende Kollektoren für stagnationssichere Anlagen) sowie neue vielversprechende Konzepte erarbeitet (z. B. durchströmte Bauteile aus Beton oder Glas für die thermische Aktivierung von Komponenten der Gebäudehülle), die sich in einem deutlich früheren Stadium befinden (TRL 2 bis 4) oder deren Funktion noch umfangreich demonstriert werden soll (TRL 5 bis 8).

Bei Wärme- und Kältespeichern sind ebenso unterschiedliche Produkte schon lange am Markt vorhanden (TRL 9). Erforderliche Arbeiten zur Steigerung deren Effizienz und Senkung deren Kosten (z. B. Materialforschung zu thermochemischen Speichern, zu Stoffsystemen für Adsorption- und Absorptionsprozesse oder zu geologischen Speichern) weisen andererseits noch Grundlagencharakter (TRL 1) auf. Weitere, schon bekannte Konzepte, wie optimierte Schichtungen, Be- und Entladungsstrategien, thermische Aktivierung der Gebäudemasse sollen zudem weiterentwickelt (TRL 2 bis 4) und demonstriert werden (TRL 5-8).

Bei der Systemtechnik sind sowohl kommerzielle Lösungen vorhanden (TRL 9) als auch neue Lösungen mit unterschiedlichem Reifegrad in der Entwicklung. Zu erwähnen sind beispielsweise effiziente Systemschaltungen und entsprechende Regelungsstrategien bei Gebäuden mit solarem Deckungsanteil des Wärmebedarfes bis zu 100 % oder noch komplexere multimodale Systeme in Kombination mit weiteren erneuerbaren Technologien zur Gesamtenergieversorgung (Wärme- und Strom) von Gebäuden oder Quartieren, die noch entwickelt (TRL 3-4) und in ihrer Wirksamkeit demonstriert werden müssen (TRL 5- 8).

Angesichts der sehr differenzierten Entwicklungsstadien der betrachteten Technologien sind auch die Risiken bei den entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten unterschiedlich hoch. In Tab. 3-8 wird trotzdem das gesamte Technologiefeld bewertet. Dabei wird berücksichtigt, dass ein überwiegender Teil der notwen-

digen Arbeiten kein Grundlagencharakter hat und damit ein eher geringes technisches Risiko aufweist. Das wirtschaftliche Risiko wird dagegen als hoch eingestuft.

Tab. 3-7 Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	T1	T2	T3
Grundlagenforschung				
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Demonstration		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kommerzialisierung				
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

TRL= Technology Readiness Level

T1 = Thermische Kollektoren, T2 = Wärme- und Kältespeicher, T3 = Systemtechnik

Für die Bewertung ist es zudem erforderlich, die Marktstruktur und -entwicklung des Technologiefeldes zu analysieren. Nach einem sehr positiven Verlauf von 1990 bis 2008, ist der Markt der solarthermischen Anlagen seit 2009 rückläufig oder stagnierend. Wie aus aktuellen Studien zu entnehmen ist (Nitsch 2014, 2015, 2016), können jedoch die in den verschiedenen Klimaszenarien definierten Ausbauziele der Solarthermie bei Fortschreibung des aktuellen Zubauniveaus bei weitem nicht erreicht werden. Für die Erschließung des großen Potenzials ist somit die öffentliche Förderung nicht nur in Form von Marktanzreizprogrammen, sondern auch im F&E-Bereich unerlässlich, um die technologischen Fortschritte zu erzielen, die für einen deutlichen Marktausbau Voraussetzung sind. Das gilt vor allem aufgrund der Struktur des Marktes: Die Branche besteht nicht nur aus großen und kapitalstarken Unternehmen wie Vaillant, Bosch und Viessmann, sondern auch aus vielen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), die sich umfangreiche F&E-Aktivitäten finanziell nicht leis-

ten können, insbesondere für Projekte die mit hohen wirtschaftlichen Risiken verbunden sind und lange Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung aufweisen.

Die öffentliche Unterstützung von F&E-Aktivitäten ist zusammenfassend aus klimapolitischen und wirtschaftlichen Gründen zwingend erforderlich: Für die Marktpenetration von innovativen Lösungen und Systemen, die signifikant dazu beitragen können, die anspruchsvollen Klimaziele zu erreichen. Für eine langfristige Sicherstellung der noch vorhandenen Technologieführerschaft Deutschlands auf dem Gebiet.

Tab. 3-8 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“

	sehr gering	Gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Bewertung der Rohstoffrisiken für das Technologiefeld erfolgt basierend auf den Materialien, die heute für die entsprechenden Technologien verwendet werden. Unter dieser konservativen Annahme werden in dieser Studie keine Rohstoffe identifiziert, die nach Länderkonzentration (HHI) und gewichtetem Länderrisiko (GLR) von der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit hohem Risiko klassifiziert werden (DERA 2014). Die Bewertung lässt sich bei solarthermischen Kollektoren mit hoher Wahrscheinlichkeit auch auf zukünftige Entwicklungen übertragen, da hier im Vergleich zum aktuellen Stand nur mit zusätzlichen Materialien aus der Baubranche (Beton, Glas, Stahl etc.) für die gebäudeintegrierten Produkte oder eventuell zunehmend mit Kunststoffen zu rechnen ist, die schon bekannt und in Bezug auf die Umweltauswirkungen nicht kritisch sind. Im Bereich der Wärme- und Kältespeicherung laufen dagegen grundlegende Aktivitäten in der Materialforschung und damit ist zum heutigen Zeitpunkt nicht möglich die Gesamtheit der Rohstoffe zu bestimmen, die in den nächsten Jahrzehnten zum Einsatz kommen könnte. Der wesentliche Aspekt der Rohstoffrisiken wird aber bei der F&E-Arbeiten mitberücksichtigt.

4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Teilkriterium 3.1 Globales Marktpotenzial

Die Bewertung des Marktpotenzials unterscheidet sich stark von den Abschätzungen des vorherigen Berichtes (Wietschel et al. 2010), die auf Basis von Branchen-Szenarien (der europäischen und deutschen Solarthermie-Technologie-Plattform, ESTTP und DSTTP) erarbeitet wurden. Die Begründung liegt zum Teil an der heute umfangreicheren zur Verfügung stehenden Literatur und zum Teil an der wirtschaftlichen Entwicklung der letzten Jahre.

Referenzgröße für die Berechnung ist allgemein die installierte Kollektorfläche in m². Die Umrechnung in Leistung erfolgt auf Basis einer international festgelegten spezifischen Nennleistung von 0,7 kW_{th}/m² (IEA 2004). Die Umrechnung in Wärmeerzeugung hängt dagegen sehr stark von den angenommenen flächenbezogenen Systemerträgen ab und variiert in Abhängigkeit vom Standort sowie betrachteten System. Sie kann beispielsweise ca. 250 kWh/m²a in einer Anlage zur Schwimmbaderwärmung in Finnland und über 1.000 kWh/m²a in einer Anlage zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser in Israel betragen (Mauthner et al. 2016). Im internationalen Bereich werden von der Referenzstudie sowohl die installierte Leistung als auch die Wärmeerzeugung angegeben. Im nationalen Bereich dagegen fehlt oft die installierte Leistung. Für die Umrechnung wird einheitlich eine über die Jahre konstante spezifische Produktion von 400 kWh/m² verwendet. In erster Näherung wird dabei angenommen, dass die steigende Effizienz in Folge von Komponenten- und Systemoptimierungen die sinkenden Erträge durch erwartete höhere solare Deckungsanteile oder Betriebstemperaturen sich gegenseitig aufheben.

Tab. 4-1 Globaler Technologieeinsatz für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)

Jahr	Referenz (BAU)	Szenarienbereich INT_2 °C	Szenarienbereich INT_besser_2 °C
Einheit	GW _{th} / TWh	GW _{th} / TWh	GW _{th} / TWh
2020	401 / 385	749 / 743	749 / 743
2030	604 / 585	3.418 / 3.607	31421 / 3.609
2040	810 / 790	6.640 / 7.140	61700 / 7.195
2050	1.088 / 1.067	7.931 / 8.716	81190 / 9.013

Im internationalen Bereich wurde in der vorherigen Studie aufgrund fehlender belastbarer Daten die europäische und nicht die weltweite Marktdurchdringung betrachtet. Die aktuelle vorliegende Schätzung basiert dagegen auf einer Analyse des globalen Markts (Greenpeace et al. 2015), wodurch eine deutlich höhere Anzahl von solarthermischen Installationen ermittelt wurde: Für die Jahre 2030 und 2050 wird beispielsweise eine jährliche Wärmeerzeugung von 3.609 und 9.013 TWh anstatt

1.400 und 2.400 TWh prognostiziert. Tab. 4-1 fasst die Ergebnisse der Studie für das Referenz Szenario (BAU) und zwei verschiedene Klimaszenarien zusammen.

In der Studie wird eine optimistische Steigerung der spezifischen Wärmeproduktion von 665 kWh/m² im Jahr 2012 auf 779 kWh/m² im Jahr 2050 angenommen. Die Werte für das Jahr 2014 für die Ermittlung des in Tab. 4-2 dargestellten Potenzials sind den aktuellen Erhebungen der IEA Solar Heating and Cooling entnommen worden (Mauthner et al. 2016). Das auffällige negative bzw. sehr niedrige Wachstum in Leistung und Wärmeproduktion für den Zeitraum 2014-2020 ist durch die höhere Anzahl der tatsächlich installierten Solaranlagen im Vergleich zu den Schätzungen von Greenpeace et al. (2015) sowie durch die unterschiedlichen Annahmen für die flächenspezifische Wärmeproduktion (572 kWh/m² anstatt 667 kWh/m²) zu begründen.

Tab. 4-2 Globales Marktpotenzial für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“

Jahr	Referenz (BAU)	Szenarienbereich INT_2 °C	Szenarienbereich INT_besser_2 °C
Einheit	GW _{th} / TWh	GW _{th} / TWh	GW _{th} / TWh
2014 - 2020	-9 / 50	339 / 408	339 / 408
2021 - 2030	203 / 200	2.669 / 2.864	2.672 / 2.866
2031 - 2040	206 / 205	3.222 / 3.533	3.279 / 3.585
2041 - 2050	278 / 277	1.291 / 1.576	1.490 / 1.818

Mit einer mittleren jährlichen Wachstumsrate CAGR von 10,1 % für den Zeitraum 2014 – 2050 liegt die geschätzte Marktpenetration im plausiblen Bereich.

Teilkriterium 3.2 Nationales Marktpotenzial

Im nationalen Bereich sind aufgrund der von der Bundesregierung beschlossenen Klimaziele seit 2010 zahlreiche Studien veröffentlicht worden, die auch umfangreiche Informationen über die Entwicklung des Solarthermie-Marktes enthalten (DLR et al. 2012; Henning et al. 2015; Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015; Prognos 2015; Nitsch 2014a; Nitsch 2014b; Nitsch 2015; Nitsch 2016). Abb. 4-1 bis 4-5 geben einen Überblick der erarbeiteten Szenarien.

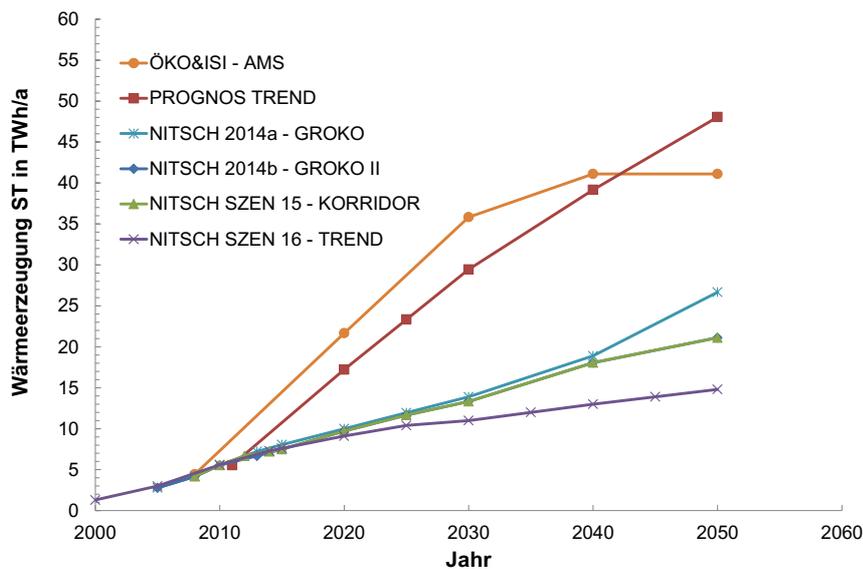


Abb. 4-1 Referenzszenarien für die Schätzung des nationalen Marktpotenzials

Bei den betrachteten Referenzszenarien (siehe Abb. 4-1) ist die große Bandbreite auffällig: Prognos et al. (2015) sowie Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015) rechnen mit einer optimistischeren Marktentwicklung und liegen im Jahr 2016 deutlich höher als der tatsächliche Stand. Nitsch basiert seine Berechnungen auf aktuelleren Daten und berücksichtigt dabei die sich verändernden politischen Rahmenbedingungen. Bei den Klimaszenarien kommen dagegen die Schätzungen der unterschiedlichen Studien auf vergleichbare Ergebnisse. Danach könnten solarthermische Anlagen im Jahr 2050 bis zu 96 TWh/m² Wärme erzeugen und damit ca. 25 % der gesamten Produktion von erneuerbarer Wärme übernehmen. Eine Studie, die Energieszenarien für das Zieljahr 2050 untersucht hat und nicht auf Wachstumsszenarien beruht (Henning et al. 2015), kommt für ein 85 % Minderungsszenario der CO₂ Emissionen mit 79 TWh für die Solarthermie zu einem ähnlichen Ergebnis. Hier wurde nicht eine singuläre Technologie, sondern ein kostenoptimaler Umbau des gesamten Energiesystems unter Berücksichtigung der Interaktionen aller verfügbaren Technologien betrachtet.

Eine verstärkte Reduktion der THG-Emissionen von 80 % auf 95 % führt generell zu minimalen Abweichungen in der Zubaurate. Alle Szenarien stimmen darin überein, dass die letzten THG-Einsparungen maßgeblich durch den Einsatz erneuerbaren Stroms erzielt werden. Mit einer mittleren jährlichen Wachstumsrate CAGR von 7,5 % für den Zeitraum 2014 – 2050 liegt die geschätzte Marktpenetration auch auf nationaler Ebene im plausiblen Bereich.

Da für die Bewertung des Technologiefeldes zentrale und dezentrale Solaranlagen unterschiedlich betrachtet werden sollen, wird in Abb. 4-3 und Abb. 4-5 die spezifische Entwicklung von netzgebundenen Anlagen dargestellt. Wie bei den Referenzszenarien lässt sich auch hier eine deutliche Diskrepanz zwischen den Studien von DLR et al. (2012) und Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015) und den Analysen von Henning (2015) und von Nitsch feststellen.

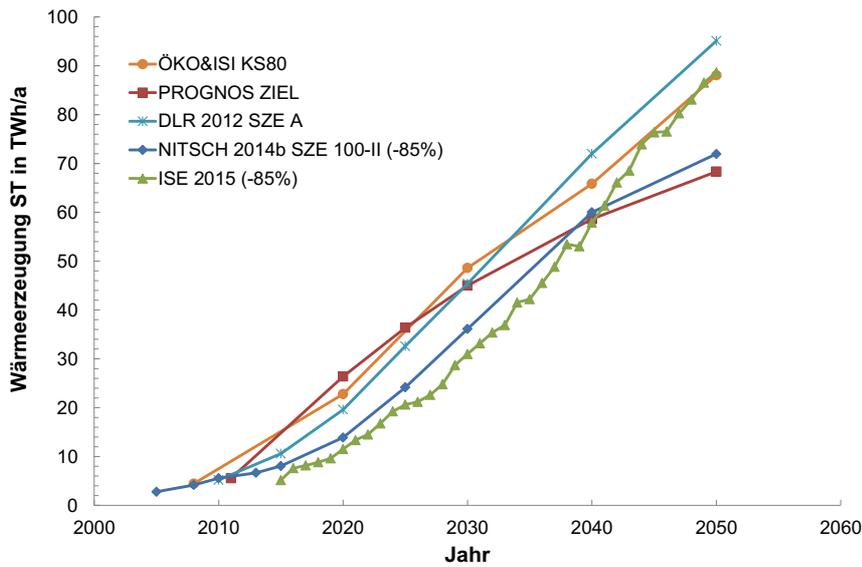


Abb. 4-2 Nationales Marktpotenzial für solarthermische Anlagen nach den Klimaszenarien zur Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen bis zu 80 %

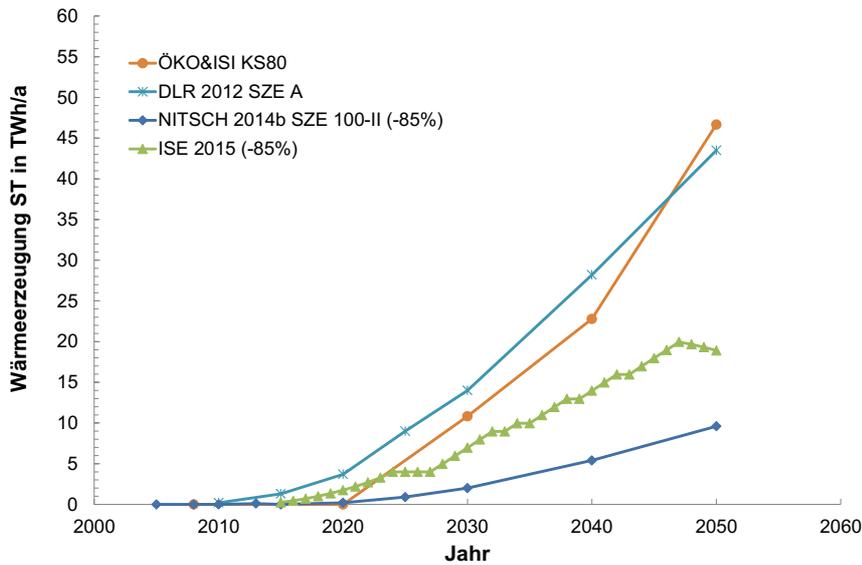


Abb. 4-3 Nationales Marktpotenzial für solarthermische netzgebundene Anlagen nach den Klimaszenarien zur Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen bis zu 80 %

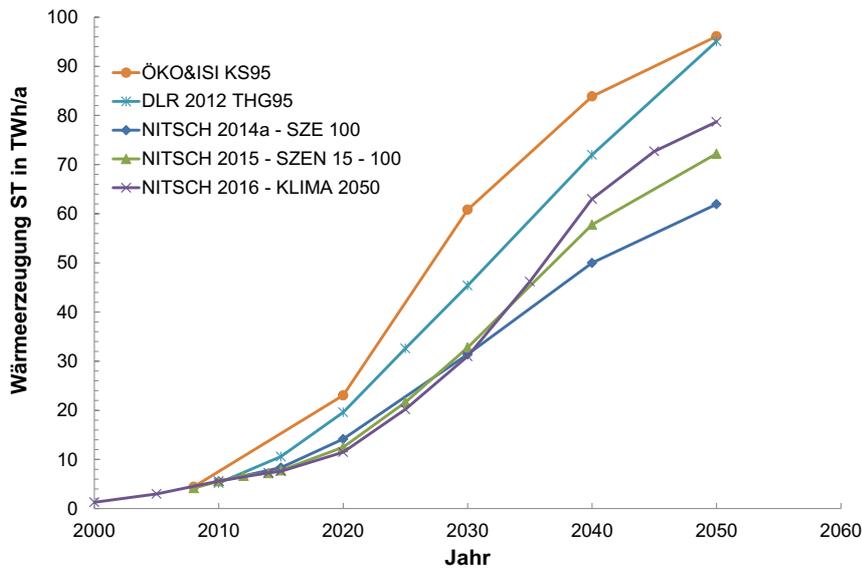


Abb. 4-4 Nationales Marktpotenzial für solarthermische Anlagen nach den Klimaszenarien zur Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen bis zu 95 %

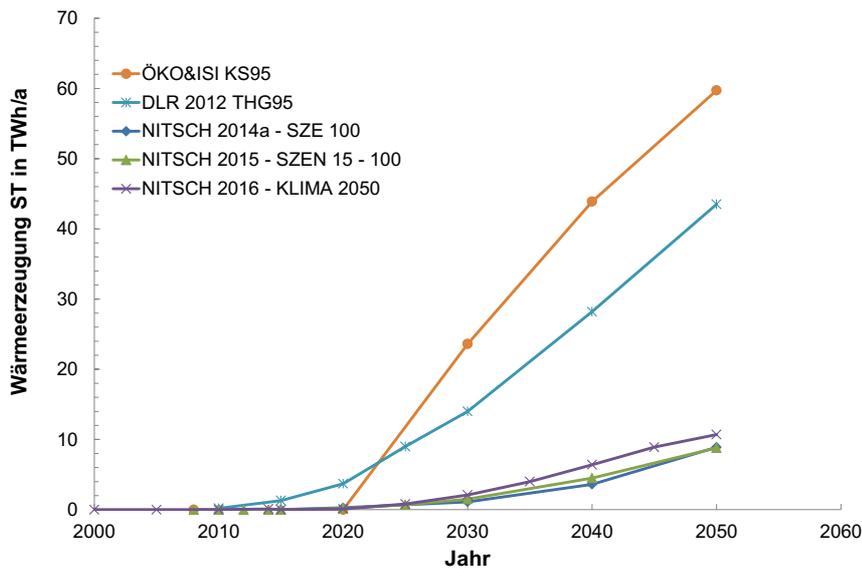


Abb. 4-5 Nationales Marktpotenzial für solarthermische netzgebundene Anlagen nach den Klimaszenarien zur Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen bis zu 95 %

Die Schätzungen der Vorgängerstudie liegen mit einer Wärmeproduktion von 256 TWh/a bzw. mit einer insgesamt installierten Leistung von 448 GW_{th} im Jahr 2050 deutlich höher als die aktuellen Zahlen. Dabei soll berücksichtigt werden, dass die damaligen Berechnungen auf dem starken Wachstum bis zum Jahr 2008 basierten und dass sich der Markt seitdem noch nicht erholt hat.

Tab. 4-3 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)

Jahr	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	GW _{th} / TWh		GW _{th} / TWh		GW _{th} / TWh	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	15,9 / 9,1	37,9 / 21,7	34,3 / 19,6	46,2 / 26,4	20,1 / 11,5	40,3 / 23,1
2030	19,3 / 11,0	62,7 / 35,8	78,8 / 45,0	85,1 / 48,6	54,3 / 31,0	106,5 / 60,8
2040	22,8 / 13,0	71,9 / 41,1	102,6 / 58,6	126,0 / 72,0	110,2 / 63,0	146,8 / 83,9
2050	25,9 / 14,8	84,1 / 48,1	119,5 / 68,3	166,4 / 95,1	137,7 / 78,7	168,2 / 96,1

Tab. 4-4 Nationales Marktpotenzial für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“

Jahr	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	GW _{th} / TWh		GW _{th} / TWh		GW _{th} / TWh	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014 - 2020	3,0 / 1,7	25,0 / 14,3	21,4 / 12,2	33,3 / 19,0	7,2 / 4,1	27,2 / 15,7
2021 - 2030	3,3 / 1,9	24,8 / 14,2	44,5 / 25,4	38,9 / 22,2	34,1 / 19,5	66,1 / 37,8
2031 - 2040	3,5 / 2,0	9,2 / 5,3	23,8 / 13,6	40,9 / 23,4	55,9 / 32,0	40,3 / 23,1
2041 - 2050	3,2 / 1,8	12,2 / 6,9	17,0 / 9,7	40,4 / 23,1	11,7 / 6,7	21,4 / 12,2

4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionszielen

Für die Bewertung des Beitrages zur Vermeidung von Treibhausgasen sowie von weiteren schädlichen Emissionen werden die Auswirkungen im Vergleich zu einer geeigneten Referenztechnologie geschätzt. Da Solaranlagen auch in Zukunft maßgeblich zur Raumheizung und Bereitstellung von Trinkwarmwasser für Wohngebäude eingesetzt werden, wird als Referenz der Technologiemitmix in privaten Haushalten aus dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (AMS) von Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015) gewählt. Als fossile Energieträger werden dabei aber nur Heizöl und Erdgas berücksichtigt, während Stromheizung und Fernwärme Referenz-Energiemitmix vernachlässigt werden.

Die Berechnung basiert auf dem in Kapitel 4.1 definierten nationalen Marktpotenzial. Die spezifischen Emissionen für fossile und erneuerbare Energieträger mit Einbeziehung der Vorkette werden nach dem Verfahren vom Umweltbundesamt ermittelt (UBA 2014a). Die Ergebnisse sind in Tab. 4-5 und Tab. 4-6 zusammengefasst und zeigen, dass im Hinblick auf versauernd wirkende Luftschadstoffe die solarthermische Wärmebereitstellung durch ihren emissionsfreien Betrieb erheblich zur Entlas-

tung beiträgt. Dies gilt nicht nur für Treibhausgase sondern auch für weitere Luftschadstoffe wie Kohlenmonoxid und flüchtige organische Verbindungen. Lediglich bezüglich der Staubemissionen fällt die Bilanz durch die Emissionen bei der Gewinnung der Rohstoffe und bei der Herstellung leicht negativ aus. Die Ergebnisse für CO_{2-äq}- und SO_{2-äq}-Emissionen sind in Tab. 4-5 und Tab. 4-6 dargestellt. Die negativen Minima für die Jahre 2020 und 2030 ergeben sich wie bei der Bewertung der Energie- und der Kosteneffizienz (Kriterien 5 und 6) aus den ausgewählten Szenarien: Das geschätzte Marktpotenzial nach den aktuelleren Klimaszenarien von Nitsch (2016) zeigt nämlich niedrigere Werte als diejenige, die in den Referenzszenarien von Prognos (2015) sowie Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015) angenommen werden.

Tab. 4-5 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Mio. t CO _{2-äq} /a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	- 0,5 – 4,2	- 2,5 – 3,4
2030	2,2 – 9,1	- 1,2 – 12,2
2040	4,2 – 14,1	5,2 – 16,9
2050	4,8 – 18,9	7,2 – 19,2

Grau hinterlegte Felder: negative Werte (szenarienbedingt)

Tab. 4-6 Jährlich vermiedene SO_{2-äq}-Emissionen durch das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Name des Schadstoffs:		
kt SO _{2-äq} /a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	- 0,4 – 3,1	- 1,8 – 2,5
2030	1,6 – 6,4	- 0,8 – 8,5
2040	2,6 – 8,8	3,2 – 10,5
2050	2,7 – 10,6	4,0 – 10,7

Grau hinterlegte Felder: negative Werte (szenarienbedingt)

4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energieeffizienz

Für die Bewertung des Beitrages zur Energieeffizienz wird der vermiedene Primärenergieeinsatz durch solarthermische Anlagen im Vergleich zu den festgelegten und schon erwähnten Referenztechnologien ermittelt. Die Berechnung erfolgt unter den Annahmen einer spezifischen Wärmeproduktion (Endenergie) der Anlagen von 400 kWh/m²a sowie eines Primärenergiefaktors von 1,1 für die konventionellen Energie-

träger (Erdgas und Öl) und mit Berücksichtigung des geschätzten nationalen Marktpotenzials aus Tab. 4-3. Die Ergebnisse sind für die Bandbreite der betrachteten Szenarien in Tab. 4-7 zusammengefasst und zeigen, dass im Jahr 2050 bis zu 322 PJ/a Energie eingespart werden kann.

Tab. 4-7 Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

PJ/a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	- 8,2 – 68,5	- 40,3 – 55,3
2030	36,5 – 148,9	- 19,1 – 197,3
2040	69,3 – 233,6	86,7 – 280,7
2050	80,2 – 318,0	121,4 – 321,9

Grau hinterlegte Felder: negative Werte (szenarienbedingt)

4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Die Bewertung der Kosteneffizienz erfolgt durch den Vergleich zwischen den Investitionen für die Errichtung, Betrieb und Wartung der in den Klimaszenarien zusätzlich installierten solarthermischen Anlagen und den Kosten für die durch dieselben Anlagen eingesparte Primärenergie, die beim Einsatz der Referenztechnologien bzw. beim Verbrauch entsprechender fossiler Brennstoffe entstehen würden. Kosten für vermiedene neue Installationen oder reduzierten Wartungsaufwand bei den Referenztechnologien sind dabei nicht enthalten. In den Berechnungen wird die zeitliche Entwicklung der techno-ökonomischen Parameter bis zum Jahr 2050 berücksichtigt.

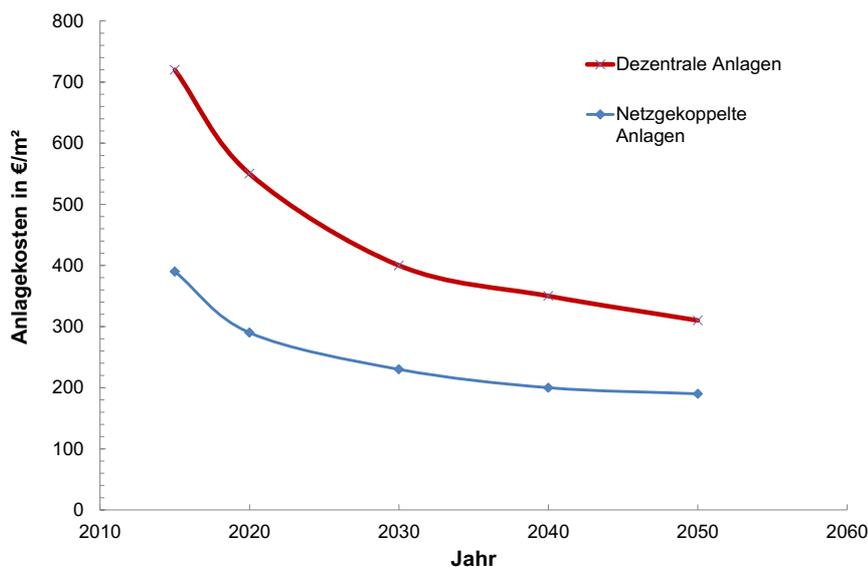


Abb. 4-6 Kostenentwicklung für dezentrale und netzgekoppelte solarthermische Anlagen

Quelle: DLR et al. (2012)

Die Kostenentwicklung von solarthermischen Anlagen wird aus der Studie von DLR et al. (2012) entnommen und ist in Abb. 4-6 dargestellt. Vergleichbare Regressionen können der Analyse von Henning et al. (2015) entnommen werden, wobei hier Kollektoren und Speicher separat behandelt werden. Die Schätzungen für dezentrale Einzelanlagen werden aufgrund der guten Übereinstimmung mit der im Rahmen der letzten Evaluierung des Marktanzreizprogramms durchgeführten Datenerhebung (Fichter et al. 2016) auch für das Jahr 2015 ohne Anpassung verwendet. Die Schätzungen für netzgebundene Anlagen für das Jahr 2015 werden ebenso als Referenz angenommen, wobei hier keine vergleichbar belastbare Datenbasis vorliegt. Die Kostenentwicklung für Gas und Öl wird dagegen aus der Studie von Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015) übernommen.

Zusätzlich zu den Kosten für Errichtung, Betrieb und Wartung der Solaranlagen werden die Kosten für CO₂-Einsparungen berücksichtigt. Die Entwicklung der CO₂-Zertifikatspreise bezieht sich ebenso auf die Studie von Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015).

Die Ergebnisse sind in Tab. 4-8 dargestellt: Bedingt durch die sich verbesserte Wirtschaftlichkeit von Solaranlagen und die steigenden Preise für fossile Brennstoffe sowie für CO₂-Zertifikate können im Jahr 2050 bis zu ca. 7 Mrd. € eingespart werden. Aufgrund der Bandbreite der betrachteten Szenarien und der verwendeten Berechnungsmethodik schwanken die erwarteten Kosteneinsparungen sehr stark.

Die sogenannte „Gas-Parity“ wird somit nach einigen Studien schon im Jahr 2020, nach anderen erst nach 2030 erreicht.

Tab. 4-8 Jährliche direkte und indirekte Kosteneinsparpotenziale durch das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf das Basisjahr 2015)

Mrd. € _{2015/a}	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	- 1,74 – 0,46	- 1,38 – 1,01
2030	- 2,05 – - 0,16	- 1,49 – 0,67
2040	- 0,45 – 0,95	- 0,42 – 1,91
2050	0,90 – 4,78	0,58 – 6,97

Grau hinterlegte Felder: negative Werte (Mehrkosten, szenarienbedingt)

4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

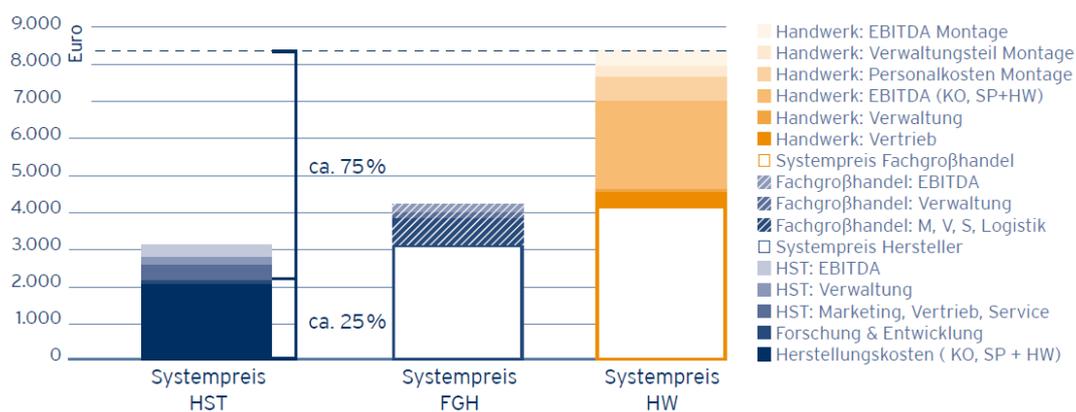
Für die inländische Wertschöpfung gibt das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung für 2012 einen Wert von 678 Mio. € an direkter und indirekter Wertschöpfung an (Hirschl et al. 2015). Dieser Wertschöpfung ist im gleichen Jahr ein Branchenumsatz in Deutschland ansässiger Unternehmen von 1.010 Mio. € gegenübergestellt (Böhmer et al. 2015), was einer Quote von 67 % entspricht. Diese Wertschöpfung wird durch inländische Herstellung von Komponenten zur in- und ausländischen Installation und durch inländischen Handel/Installation und Wartung erreicht. Tab. 4-9 gibt die Marktanteile der Komponenten zur Nutzung von Solarther-

mie aus inländischer Herstellung an. Für die Betrachtung der künftigen Wertschöpfung wurde damit ein gleichbleibender Anteil von 89 % Marktanteil am inländischen und 20 % am internationalen Markt angesetzt. Die Daten für den Zeitraum 2000 bis 2010 sind aus der Literatur entnommen (DIW 2011).

Tab. 4-9 Analyse des bisherigen Marktanteils für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“

	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
%-Anteil an TWh (Deutschland)	85,4	87,4	89,0	89	89	89	89
%-Anteil an TWh (International)	19,3	21,9	20,5	20	20	20	20

Die Aufteilung von Anlagenkosten wird gemäß Abb. 4-7 auf 37 % Komponentenkosten (Systempreis HST komplett) und 63 % weitere Kosten abgeschätzt. Diese weiteren Kosten können für alle im Betrachtungsjahr im Inland installierten Anlagen angesetzt werden, jedoch nicht für die internationale Betrachtung.



HST = Hersteller, FGH = Fachgroßhandel, HW = Handwerk, KO = Kollektor, SP+HW = Speicher und sonst. HW, MO = Montagekosten, HK = Herstellungskosten, SK + EBITDA = Sonstige Kosten und operatives Ergebnis (Berechnung auf Basis Vollkosten, nicht auf Basis Differenzinvestment Speicher), 11 m² Kombi-Anlage Flachkollektor, Netto-Preise, Quellen: BAFA, ITW, Technomar

Abb. 4-7 Endkunden Systempreise einer Solarwärmanlage nach BSW Fahrplan

Die Abschätzung der Marktpotenziale in Abschnitt 4.1 geht mit den in Tab. 4-10 aufgeführten Zubauraten einher.

Quelle: BSW 2012

Das nationale Marktpotenzial in Deutschland für die Komponentenherstellung ergibt sich durch die Berücksichtigung der in Tab. 4-9 aufgeführten Marktanteile. Mit einer Anlagenkostenentwicklung, wie sie in Tab. 1-1 für zentrale bzw. dezentrale Anlagen aufgeführt ist, und einer Aufteilung in zentrale und dezentrale Anlagen gemäß den herangezogenen Studien ergibt sich schließlich die in Tab. 4-11 dargestellte inländische Wertschöpfung. Die Begriffe „Min“ und „Max“ beziehen sich hier auf die gesamte Installation von Solaranlagen in den entsprechenden Szenarien. Aufgrund der unterschiedlichen Entwicklung von Kosten und Zubauraten bei dezentralen und netzgebundenen Anlagen in den betrachteten nationalen Studien werden in einigen Fällen niedrigere Wertschöpfungen bei höheren Installationen erreicht.

Tab. 4-10 Globales und nationales Zubaupotenzial für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“

Jahr	International		National				
	Szenarienbereich INT_2 °C	Szenarienbereich INT_besser_2 °C	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %		
	TWh	TWh	TWh		TWh		
		Min	Max	Min	Max		
2020	66,6	66,6	2,40	3,76	0,78	3,09	
2030	286,4	286,6	2,54	2,22	1,95	3,78	
2040	353,3	358,6	1,37	2,34	3,20	2,31	
2050	157,6	181,8	0,97	2,31	1,57	1,58	

Tab. 4-11 Inländische Wertschöpfung im Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ hinsichtlich des globalen und des nationalen Absatzmarktes

Jahr	International		National				
	Szenarienbereich INT_2 °C	Szenarienbereich INT_besser_2 °C	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %		
	Mrd. € _{2015/a}	Mrd. € _{2015/a}	Mrd. € _{2015/a}		Mrd. € _{2015/a}		
		Min	Max	Min	Max		
2020	4,48	4,51	1,82	3,33	0,68	2,74	
2030	13,62	13,63	1,64	1,13	1,20	1,79	
2040	14,50	14,72	0,71	0,90	1,70	0,81	
2050	5,76	6,65	0,42	0,86	0,70	0,48	

4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Die deutsche Industrie ist seit Jahrzehnten führend im betrachteten Technologiefeld, wie der Markt für solarthermische Anlagen und vor allem die Exportaktivitäten der letzten Jahren beweisen (Mauthner et al. 2016; DIW 2011).

Tab. 4-12 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefeldes weltweit?

- Technologiefeld Technologieführerschaft wettbewerbsfähig
 nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig abgeschlagen

Eine quantitative Bewertung der F&E-Aktivitäten erfolgt im vorliegenden Bericht anhand einer vergleichenden Betrachtung des erbrachten Aufwandes (Input-Orientierung) und der daraus resultierenden Aktivitäten (Output-Orientierung). Der Status quo wird für das Jahr 2014 analysiert und eine Analyse der zeitlichen Trends erfolgt für das Zeitintervall 2005 – 2014.

Für die Inputs-Betrachtung wird die Entwicklung öffentlicher F&E-Budgets im entsprechenden Technologiefeld aufgezeigt. Die Angaben sind aus der Datenbank der International Energy Agency (IEA) entnommen und beziehen sich auf den RD&D-Bereich (Research, Development & Demonstration) für das spezifische Feld „Solar Heating and Cooling“ (IEA 2017). Berücksichtigt werden dabei ausschließlich die Bundesförderungen durch das sechste Energieforschungsprogramm, nicht dagegen die ebenso relevanten Förderungen durch die Bundesländer sowie durch die Europäische Kommission.

Mangelhafte bzw. fehlende Dokumentation für Länder wie China oder die USA sowie für viele Länder der Europäischen Union erschwert einen aussagekräftigen internationalen Vergleich. Zur Orientierung werden daher die Daten für Österreich betrachtet, ein sehr aktives Land mit langer solarthermischer Tradition und mit der weltweit höchsten installierten Leistung pro Einwohner. Tab. 4-13 weist für den Zeitraum 2005-2014 im Mittel eine geringe positive Förderrate für das Technologiefeld in Deutschland auf. Im Verhältnis zu den öffentlichen F&E-Investitionen für den gesamten Energiebereich sinkt dagegen das Budget im zeitlichen Trend um 0,06 % pro Jahr. Österreich weist eine nahezu vergleichbare Entwicklung der Förderungen auf, wobei hier der Anteil am gesamten F&E-Budget für die Energietechnologien in den letzten Jahren steigt und vor allem die Investitionen pro Kapital deutlich höher sind (0,6 gegen 0,07 Mio. € / Mio. Einwohner im Jahr 2014).

Tab. 4-13 Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ – Input-Orientierung

	Einheit	Wert
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene im jeweiligen Technologiefeld – Deutschland		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2014)	Mio. €	7,5
Zeitlicher Trend (2005 – 2014)	+ Mio. €/a	0,26
Zeitlicher Trend (2005 – 2014)	+ %/a	3,5
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2014)	Mio. €	835
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2014)	%	0,9
Zeitlicher Trend (2005 - 2014)	+ %/a	- 0,06
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene im jeweiligen Technologiefeld – Internationaler Vergleich mit Österreich		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2014)	Mio. €	5,1
Zeitlicher Trend (2005 - 2014)	+ €/a	0,38
Zeitlicher Trend (2005 – 2014)	+ %/a	7,4
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2014)	Mio. €	145,8
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA	%	3,5
Zeitlicher Trend (2005 - 2014)	+ %/a	0,06 %

Für die Output-Betrachtung werden für die akademische Forschung die Publikationen durch deutsche Universitäten oder Forschungsinstitute und für die anwendungsnähere Entwicklung die von deutschen Privatpersonen, Firmen oder Institutionen angemeldeten Patente analysiert.

Die Publikationsanalyse wurde mit dem Tool Web of Science Analytics (Clarivate Analytics 2017) durchgeführt. Die Software stellt die umfangreichste Quelle für Forschungsarbeiten weltweit dar, bezieht sich auf über 33.000 Zeitschriften und ermöglicht eine detaillierte Recherche über Autoren, entsprechende Institutionen und Länder. Als Suchkriterium hat sich die einfache Kombination der Schlagworte „Solar“ AND „Thermal“ als zielführend erwiesen. Die Suchergebnisse wurden anschließend nach Fachzeitschriften gefiltert. Die zeitliche Entwicklung im Vergleich zu den auf dem Gebiet stärksten Ländern ist in Abb. 4-8 dargestellt, die Ergebnisse der Untersuchung in Tab. 4-14. Es zeigt sich, dass der Output zwischen 2005 und 2014 absolut gestiegen ist. Relativ beträgt der Anteil der Publikationen am weltweiten Aufkommen für das Referenzjahr 2014 9,7 %, wobei ein negativer linearer Trend von - 0,4 % pro Jahr anzuzeigen ist. Der zeitliche Verlauf entspricht dem von anderen Europäischen Ländern. Die USA und vor allem China weisen dagegen in den letzten 10 Jahren ein stärkeres Wachstum auf.

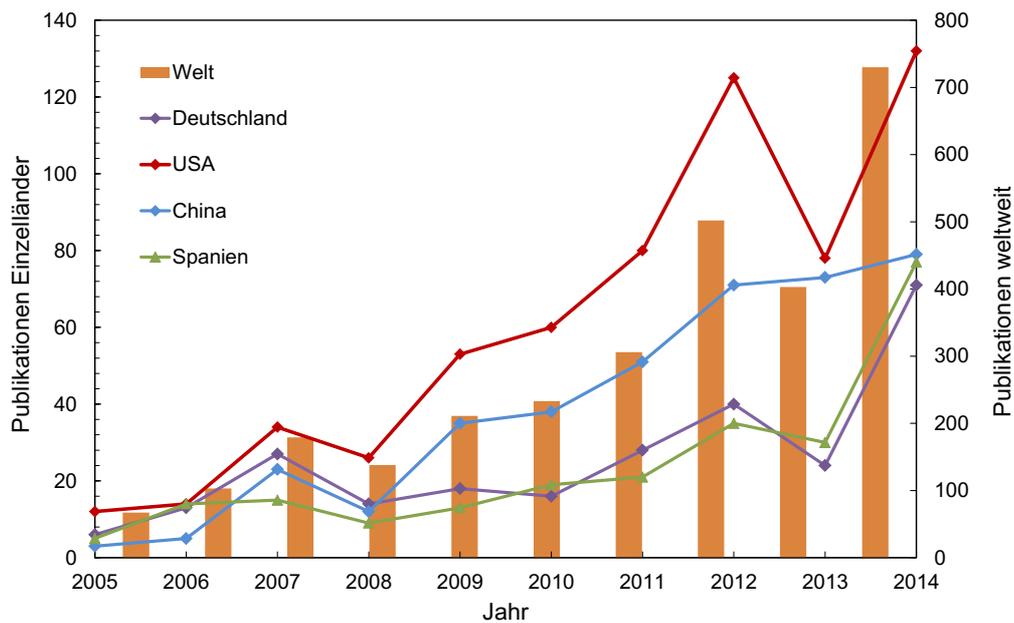


Abb. 4-8 Auswertung der Publikationsrecherche auf dem Gebiet für den Zeitraum 2005 – 2014 für Deutschland und weitere relevanten Länder

Die Patentanalyse wurde in Kooperation mit dem Patentinformationszentrum (PIZ) in Dresden durchgeführt. Dafür wurde in der Datenbank FAMPAT vom Tool Questel-Orbit (Questel 2017) recherchiert, deren Datensätze komplette, sogenannte „enge Patentfamilien“ umfassen, also Gruppen von Patentanmeldungen, die über eine gleiche Priorität direkt miteinander verbunden und aus einer gemeinsamen Ursprungsanmeldung hervorgegangen sind. FAMPAT ist die einzige bekannte Datenbank, die im Unterschied zu allen anderen freien sowie kommerziellen Patent-Datenbanken vom engen Familien-Begriff ausgeht. Für den Anmeldezeitraum 2005 bis 2014 wurden insgesamt 54.445 Patent-Familien weltweit ermittelt. Anschließend wurde eine zusätzliche Recherche im Datenbestand von FAMPAT und in den Questel-Volltext-Datenbanken mittels spezifischer Suchbegriffe durchgeführt, um die Ergebnisse zu verfeinern. Die Suche erfolgte in den Abstracts, Titeln, allen Ansprüchen bzw. in den Volltexten.

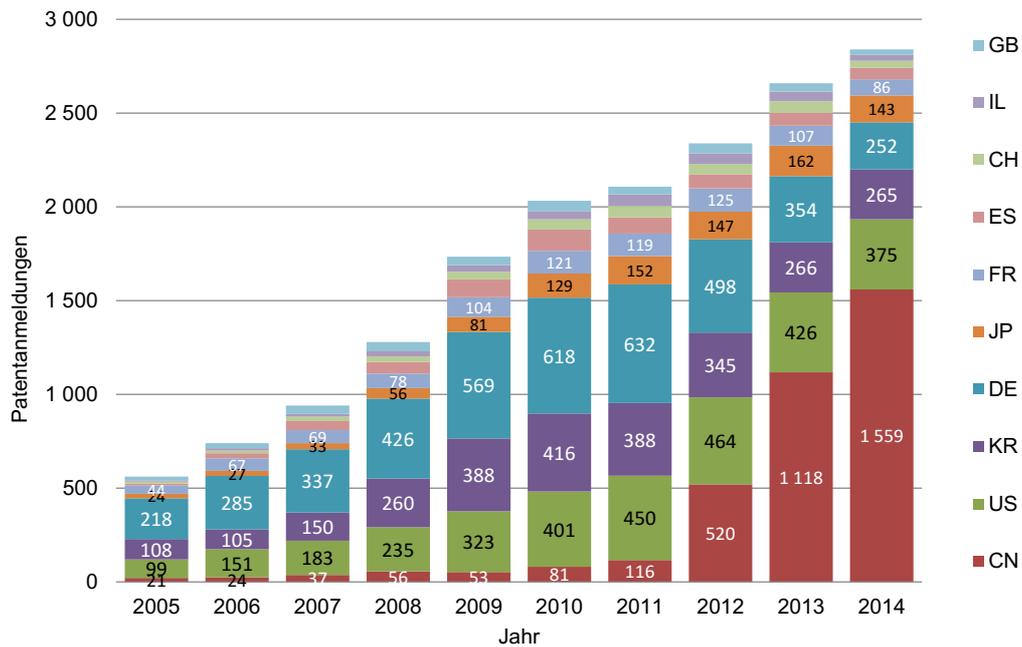


Abb.4-9 Auswertung der Patentrecherche auf dem Gebiet im Zeitraum 2005 bis 2014 – Anzahl der Anmeldungen aus Deutschland und weiteren relevanten Ländern

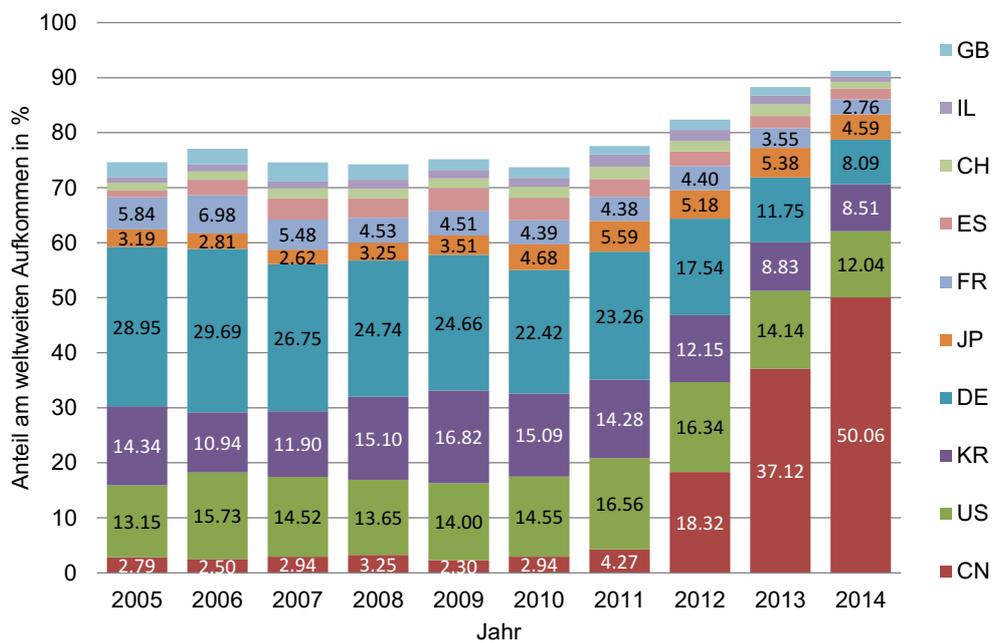


Abb. 4-10 Auswertung der Patentrecherche auf dem Gebiet im Zeitraum 2005 bis 2014 - Anteil am weltweiten Aufkommen für Deutschland und weitere relevante Länder

Die Ergebnisse zeigen die klar führende Position Deutschlands bis zum Jahr 2011, mit einer kontinuierlich steigenden Anzahl von Patentanmeldungen. Die letzten Jahre sind dagegen durch eine negative Tendenz (im gesamten europäischen und nicht europäischen Markt mit unterschiedlicher Ausprägung erkennbar) sowie eine stark wachsende Konkurrenz vor allem aus China, aber auch aus USA und Korea gekennzeichnet. Diese drei Länder belegen im Jahr 2014 jeweils Platz 1, 2 und 3. Der Anteil

von deutschen Patenten am weltweiten Aufkommen sinkt im betrachteten Zeitraum von 29 % (2005) auf 8 % (2014) deutlich.

Tab. 4-14 Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld „Solare Wärme & Kälte“ – Output-Orientierung

	Einheit	Wert
Akademische Publikationen als Forschungsindikator		
Relativer Anteil der in Deutschland geschriebenen Publikationen am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2014)	%	9,7
Zeitlicher Trend 2005 - 2014	%/a	- 0,4
Patente als Entwicklungsindikator		
Relativer Anteil der von deutschen Firmen/Privatpersonen und Institutionen eingereichten Patente am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2014)	%	8
Zeitlicher Trend 2005 – 2014	%/a	- 2,0

4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

Nach dem Institut für Demoskopie in Allensbach halten 71 % der Bevölkerung eine Umstellung von Kernenergie zu regenerativen Energien bis zum Jahr 2020 für richtig (Institut für Demoskopie 2015). 80 % der Befragten erwarten und 85 % wünschen, dass Solarenergie einen hohen Anteil an der Energieversorgung haben wird. Über Jahre wiederholte Umfragen zeigen, dass die Ängste vor einer unsicheren Energieversorgung in der Bevölkerung sinken und man den regenerativen Energietechnologien die Substitution von Öl, Gas, Kohle und Kernenergie zutraut. Erkennbar ist jedoch auch eine Verschiebung der Motivation, solartechnische Anlagen zu installieren: Während in den Jahren bis zur Jahrtausendwende vornehmlich bei Ein- und Zweifamilienhaus-Eigentümern idealistische Gedanken, wie etwas für die Umwelt oder die eigene energetische Unabhängigkeit tun zu können, sehr verbreitet waren, dominiert aktuell die Erwartung, dass sich energetische Sanierungen finanziell rechnen müssen. Nur 30 % der Bevölkerung würden höhere Preise akzeptieren, 53 % lehnen dies ab. Die Amortisationszeit für solarthermische Anlagen, die ein Kunde erwartet, ist vom Gebäudetyp und damit vom Investor abhängig. Bei Investitionen für Mehrfamilienhäuser und Nicht-Wohngebäude wird ein Zeitraum von 5 bis deutlich unter 10 Jahren erwartet (Bundesverband Solarwirtschaft e.V. 2011), bei gewerblichen und industriellen Investoren zwischen 3 und 5 Jahren. Die Diskrepanz dieser Erwartung zu den tatsächlichen, aktuellen Amortisationszeiten solarthermischer Anlagen wird ohne gezielte Gegenmaßnahmen die gewünschte Entwicklung absehbar gefährden. Aktuelle und insbesondere von den Energiekosten fossiler Energieträger abhängige erwartete Amortisationszeiten für Systeme und einzelne Komponenten wurden vom BSW berechnet und können für die Bemessung von Fördermaßnahmen herangezogen werden.

Seitens der Hersteller und des Vertriebs sind vor allem Maßnahmen erforderlich, die Systemkosten senken. Dazu beitragen kann eine fortschreitende Standardisierung

durch europäische und internationale Normung, die Reduktion von Planungskosten durch Komplett-Angebote bewährter Systeme seitens der Hersteller oder des Großhandels, öffentliche Qualitätskontrolle von Systemlösungen sowie die Unterstützung der überwiegend kleinen Handwerksbetriebe bei der Planung, Montage, Inbetriebnahme sowie bei Vertrieb der zunehmend komplexeren Systeme und bei deren Fortbildung.

Fördermodelle sollten in dem Maße bemessen und rechtliche Rahmenbedingungen so entwickelt werden, dass für Investoren solarthermischer Anlagen eine Amortisationszeit von 5 bis 7 Jahren und für Mieter in Mehrfamilienhäusern eine Senkung der Nebenkosten erreicht werden kann.

Auch wenn eine Reihe von solarenergetischen Studien solarthermische und photovoltaische Energiegewinnung nicht unterscheiden, so können sie für beide Technologiefelder gleichermaßen herangezogen werden, wenn es um die Akzeptanz des Aufstellungsortes hinsichtlich Landschaftsbild, Denkmalschutz oder Ästhetik bzw. architektonische Aspekte der Fassaden- oder Dachintegration geht.

Wenn bisher die Installation solarthermischer Anlagen fast ausschließlich Ein- und Zweifamilienhäuser betroffen hat, rechnen die betrachteten Klimaszenarien mit einem signifikant höheren Einsatz in weiteren Anwendungsbereichen wie Mehrfamilienhäuser, industrielle Prozesswärme (bis 100 °C), Nicht-Wohngebäude, Nah- und Fernwärmeunterstützung und Klimatisierung für die kommenden Jahrzehnten. Diese notwendige Ausweitung und die damit verbundene Verschiebung des solarthermischen Marktes erfordern sowohl vorbereitende technische als auch rechtliche, planerische und Produktgestaltungsmaßnahmen, sodass die aktuell hohe Akzeptanz der Bevölkerung erhalten bleibt.

Technische Entwicklungen wären zum Beispiel optisch ansprechende Fassadenkomponenten für Mehrfamilienhäuser sowie für Nicht-Wohngebäude in Metropolen und Gewerbegebieten und angepasste Lösungen für Siedlungen mit historisch bedeutenden Gebäuden sowie für die Freiflächenaufstellung.

Rauh (2012) stellt anhand von Fallstudien fehlende, differenzierte Informationen bei Planungsstellen über die solare Energienutzung in den Gemeinden fest, die für eine Regional- und Bauleitplanung notwendig wären. Darüber seien „weitere Möglichkeiten der Regionalplanung insbesondere unter Anwendung weicher Instrumente der Beratung und des Monitorings einer nachhaltigen Nutzung von dezentraler Solarenergiegewinnung noch wenig fortgeschritten.“

Tab. 4-15 Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld „Solare Wärme und Kälte“ zum Status Quo (2015)

Technologien	Ebene Markt		Ebene Gesellschaft		Lokale Ebene	
	Marktakzeptanz		Sozialpol. Akzeptanz		Lokale Akzeptanz	
	Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktakteure?		Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung / Diskurse; Image		Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie	
	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)
Dezentrale Wärmeversorgung	Niedrige Akzeptanz	Lange Amortisationszeiten	Hohe Akzeptanz	Institut für Demoskopie (IFD) 2015	Hohe Akzeptanz	40 Jahre Erfahrung der Branche
Netzgebundene Wärmeversorgung (Freiflächen)	Niedrige Akzeptanz	Markt ist nicht entwickelt. Gestaltungsfreiraum ist technisch nicht entwickelt.	Hohe Akzeptanz	Erfolgreiche Beispiele aus Skandinavien	Mittlere Akzeptanz	Frage der Flächenkonkurrenz

Bewertung mittels 5-stufiger Skala: Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)

Erfahrungen bei der baulichen Sanierung von Mehrfamilienhäusern und Siedlungen zeigen, dass allgemein positiv bewertete Wärmeschutzmaßnahmen in Ablehnung und Widerstand der Mieter umschlagen oder zu einer Verdrängung der ärmeren Bevölkerung führen können, wenn nach der Maßnahme mit einer Erhöhung der Warmmiete zu rechnen ist. Fördermaßnahmen und Mieterrechte sollten diesen Gegebenheiten idealerweise angepasst und (finanzielle) Beteiligungskonzepte für Mieter entwickelt werden, um diesen für den städtischen Bereich zukünftig wichtigen Markt nachhaltig zu gestalten. Die rechtlichen Rahmenbedingungen müssen so gestaltet werden, dass energetische Sanierungsmaßnahmen einschließlich der solarthermischen, zu einer Senkung der Nebenkosten führen. Durch Partizipation aller Nutzer, einschließlich derer, die sich nicht selbst durch Investitionen beteiligen können, kann sich in städtischen Siedlungen die notwendige Dynamik entwickeln, um die Energiewende zu erreichen.

4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Die Bewertung der unternehmerisch-technischen Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit erfolgt nicht für das gesamte Technologiefeld, sondern verlangt eine Unterscheidung zwischen dezentralen Einzelanlagen oder netzgebundenen Anlagen.

Gemeinsam sind beiden Arten der Anlagen die wirtschaftliche Nutzungsdauer, die sich von den heutigen 25 Jahren auf über 30 Jahre ab 2030 erhöhen soll, in Anlehnung an die Erwartungen der vorherigen Studie. Planungs- und Bauzeiten sind dage-

gen stark differenziert, da die Einbindung in ein Wärmenetz ein komplexerer Prozess ist, der mehrere Akteure involviert und einen deutlich höheren Aufwand mit sich bringt. Die Bauzeit ist zudem vom solaren Deckungsanteil bzw. von der Notwendigkeit eines großen saisonalen Wärmespeichers abhängig. Ebenso unterschiedlich sind die spezifischen Investitionen. Wie für die Bewertung der Kosteneffizienz (Kriterium 6) werden auch hier die Werte aus der Studie von DLR et al. (2012) verwendet.

Zusammengefasst weist die Nutzung von dezentralen Einzelanlagen eine sehr niedrige Pfadabhängigkeit und eine entsprechend sehr hohe Reaktionsfähigkeit auf. Im Vergleich dazu beeinflusst der Einsatz von großen netzgebundenen Anlagen die Strukturen der Energieversorgung deutlich stärker. Dabei soll aber die Flexibilität der Wärmenetze und die Möglichkeit zur Hybridisierung mit alternativen Quellen (Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmepumpen, PtH, Biomasse, etc.) mitberücksichtigt werden.

Tab. 4-16 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“ für dezentrale Einzelanlagen

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	1	1	1	0,8	0,5
Bauzeit	Monate	1	1	1	0,8	0,7
Heute übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer	Jahre	25	30	30	35	35
Spezifische Investition	€ ₂₀₁₅ /m ²	720	550	400	350	310

Tab. 4-17 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“ für netzgebundene Anlagen

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	18	15	13	12	12
Bauzeit	Monate	24	20	16	14	12
Heute übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer	Jahre	25	30	>30	>30	>30
Spezifische Investition	€ ₂₀₁₅ /m ²	390	290	230	200	190

4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Die Abhängigkeit des Technologiefelds von den Infrastrukturen unterscheidet sich ebenso je nachdem, ob die Nutzung von Niedertemperatur-Solarwärme durch dezentrale Einzelanlagen oder durch netzgebundene Anlagen erfolgt. Der zukünftige Anteil beider Typologien variiert sehr stark in den verschiedenen betrachteten Studien (siehe Abb. 4-3 und Abb. 4-5): Entsprechend der Studien von DLR et al. (2012) und Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015) wird der Anteil beider Nutzungsvarianten im Jahr 2050 etwa gleich groß sein. Nach den Analysen von Hennings et al. (2015) und von Nitsch werden dagegen die netzgebundenen Anlagen maximal 14 % der gesamten Installationen betragen.

Für die Nutzung mittels Einzelanlagen ist prinzipiell keine Infrastruktur erforderlich, da die Gewinnung der Solarwärme, ihre Speicherung sowie ihr Verbrauch, unabhängig von der Höhe des solaren Deckungsanteils, direkt vor Ort erfolgt. Für die Nutzung von Solarwärme mittels Nahwärmenetzen müssen die entsprechenden Netze verfügbar sein. Hierzu ist zum einen ein Neubau bzw. eine Erweiterung vorhandener Netze erforderlich. Zum anderen ist es notwendig, die bereits vorhandenen Netze zu sanieren und an den durch die bessere Wärmedämmung der Gebäude deutlich reduzierten Wärmebedarf anzupassen. In Zusammenhang mit der Sanierung der Wärmenetze kommt sowohl der Verbesserung der Wärmedämmung der Rohrleitungen als auch der Senkung des Temperaturniveaus eine entscheidende Bedeutung zu. Die Senkung des Betriebstemperaturniveaus in den Netzen ist notwendig, um die Wärmeverluste zu verringern und die Wirkungsgrade der solarthermischen Kollektoren zu verbessern.

Um die Abhängigkeit von der Infrastruktur möglichst objektiv bewerten zu können, werden die beiden Nutzungsvarianten netzgebundene Anlagen (Tab. 4-18) und dezentrale Einzelanlagen (Tab. 4-19) separat bewertet.

Tab. 4-18 Abhängigkeit von Infrastrukturen des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“ für netzgebundene Anlagen

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tab. 4-19 Abhängigkeit von Infrastrukturen des Technologiefeldes „Solare Wärme & Kälte“ für dezentrale Einzelanlagen

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Die Niedertemperatur-Solarthermie ist eine grundlegend unkomplizierte Technologie, die durch ihren überwiegend dezentralen Einsatz ein großes Maß an Systemkompatibilität bietet. Ihr Einsatz als verbrauchssenkende Effizienztechnologie impliziert die gute Integrierbarkeit in andere Wärmeerzeugungssysteme. Sie kann dadurch einen signifikanten Anteil des Wärmebedarfs im Versorgungsbereich decken, ohne dabei negative Wechselwirkungen mit anderen Technologien hervorzurufen oder vorhandene Infrastrukturen zu belasten bzw. zu schwächen. Andere effiziente Wärmeerzeuger wie Biomassekessel oder Wärmepumpen profitieren von der Kombination mit Solarthermie durch Wirkungsgradsteigerungen z. B. infolge der Vermeidung ineffizienter Teillastbetriebszustände.

Teilkriterium 12.1 Rückwirkungen

Die Solarthermie ist bei der Betrachtung als Einzelanlage außer bei 100 % Deckungsanteil auf eine zusätzliche Wärmequelle angewiesen. In Abhängigkeit von der Dimensionierung (Kollektorfeld- und Speichergröße) und der Anwendung (Ein- oder Mehrfamilienhaus, Industrielle Prozesswärme, Nahwärmenetze) in einem bestehenden System ergänzt sie in der Regel (vorhandene) Erzeugungsstrukturen. Rückwirkungen zu anderen Technologien sind dadurch vorhanden, aber in ihren Auswirkungen gering. Dies gilt besonders für dezentrale Einzelanlagen ohne Anbindung an ein größeres Verteilnetz. Externe Rückwirkungen bestehen durch nicht vorhandene Ankopplung an größere Versorgungsnetze nicht. Große Solarthermieanlagen mit hoher solarer Deckung (oder gar 100 %) verhalten sich durch den dezentralen Ansatz und ihre maximale Autarkie ebenfalls neutral in Bezug auf Rückwirkungen.

In Nah- und Fernwärmesystemen können sich interne Rückwirkungen auf die Netzinfrastruktur oder die Netzbetriebsweise (z. B. Einspeiseprioritäten, Netzfahrweisen, dezentrale Einspeisepunkte) sowie auf andere Erzeuger (z. B. Grundlastkraftwerke oder Abwärmenutzung) im Netz ergeben.

Bei großem Anlagenbestand können externe Rückwirkungen zu anderen erneuerbaren Energiequellen der Wärmeerzeugung außerhalb der Systemstrukturen entstehen, die beispielsweise bei entsprechendem Strahlungsangebot durch die Niedertemperatur-Solarthermie zweitweise verdrängt werden. Da der Technologieeinsatz weitestgehend dezentral oder in geringfügig zentralisierten Strukturen (z. B. Quartieren) erfolgt, sollten diese Rückwirkungen jedoch gering und zumeist dezentral steuerbar sein.

Teilkriterium 12.2 Anpassungsbedarf

Bei solaren Deckungen unter 100 % ist stets ein Backup durch eine Nachheizwärmequelle notwendig, die ggf. die volle Wärmeversorgung sichert. Da solarthermische Systeme also auf mehrvalente Betriebsweisen ausgelegt werden, ist naturgemäß eine sehr hohe Verträglichkeit mit anderen Systemen gegeben. Als Nachheizsysteme kommen im Sinne einer maximalen Effizienz des Gesamtsystems besonders effizienter und regenerativer Technologien (z. B. Wärmepumpen oder Biomassefeuerung) in Betracht.

Soll 100 % solare Deckung erreicht werden, ist der Einsatz von wirkungsvollen Wärmespeichertechnologien zum zeitlichen Ausgleich von Angebot und Nachfrage auch über lange Zeiträume zwingend erforderlich. Je nach Anwendungsgebiet kann der Einsatz sensibler (auch geologischer) Speicher, Phasenwechselfpeicher, thermochemischer Speicher oder eine Kombination dieser Technologien zielführend sein. Anlagenstrukturen, z. B. der Wärmeverteilung, müssen maximal effizient und mit geringstmöglichen Wärmeverlusten arbeiten.

Teilkriterium 12.3 Wechselwirkungen

Synergetische Wechselwirkungen

Die Kombination von fossilen Wärmeerzeugern mit der Solarthermie erhöht die Systemeffizienz während die Effektivität des fossilen Erzeugers dabei nicht leidet oder gar profitiert (Jagnow 2012). Die Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe, sowohl quellen- als auch senkenseitig, steigert die Effizienz beider Technologien signifikant (Bertram 2014).

Konkurrierende Wechselwirkungen

Im Hinblick auf das Energiemanagement bei der voranschreitenden Sektorenkopplung der Bereiche Strom- und Wärme könnte solarthermische Wärme - infolge der Gleichzeitigkeit der Erzeugung - photovoltaische Energie verdrängen, die z. B. zur Netzentlastung im Wärmebereich untergebracht werden muss. Wegen der Hochwertigkeit der Energieform Strom und des zukünftig wahrscheinlich stark zunehmenden Bedarfs an Strom für E-Mobilität und Wärmepumpe ist jedoch der direkte oder indirekte Einsatz von Strom (z. B. mittels Wärmepumpe ohne solarthermische Unterstützung) zur Wärmeerzeugung zu minimieren. Die Nutzung von Wärme für Wärmeanwendungen hat Priorität vor der Nutzung von Strom für Wärmeanwendungen..

Die dynamische, wetter- und saisonabhängige Wärmeerzeugung der Solarthermie kann zu Interessens- und Priorisierungskonflikten bei der Kombination mit Kraftwärmekopplungsanwendungen als Grundlastanwendung führen. Es sind aber auch Synergien zwischen KWK und ST denkbar, wenn zum Beispiel KWK wegen Überschussstrom aus PV nicht wirtschaftlich betrieben werden kann und Solarthermie dann die Wärmeerzeugung übernimmt.

5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

5.1 Zusammenfassende Bewertung

Solarthermische Anlagen ermöglichen eine emissionsfreie Wärmeerzeugung durch die direkte Umwandlung von Solarstrahlung. Dabei weisen sie den höchsten flächenspezifischen Ertrag unter den erneuerbaren Wärmeerzeugern auf und sparen weitgehend ohne aufwendige infrastrukturelle Investitionen (Stromnetze oder umfassende Baumaßnahmen) fossile Brennstoffe und Biomasse ein.

Eine erfolgreiche Verbreitung finden solarthermische Anlagen zurzeit vor allem in der Raumheizung und Trinkwarmwassererwärmung von Ein- und Zweifamilienhäusern, sowohl im Neubau als auch im Bestand. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass die Installation von Solaranlagen die wirksamste Einzelmaßnahme zur Endenergieeinsparung in der Gebäudesanierung sind, da die erzeugte Solarwärme direkt andere in der Regel fossile Energieträger ersetzt, aber auch die Effizienz konventioneller Wärmeerzeuger und der gesamten Wärmeversorgungsanlage insb. durch die primäre Leistungsübernahme in den Übergangszeiten und Teillastphasen außerhalb der Heizperiode steigern kann. Weitere, noch nicht etablierte Anwendungsbereiche wie die netzgebundene Wärmeversorgung oder die industrielle Prozesswärmeerzeugung können ebenso sehr vorteilhaft durch solarthermische Anlagen unterstützt werden.

Hinsichtlich der zukünftigen Konfiguration des Energieversorgungssystems und der zu erwartenden starken Sektorkopplung zeigt die Solarthermie eine hohe Integrationsfähigkeit und Kompatibilität mit anderen fossilen und erneuerbaren Wärme- und Stromerzeugern. Beispiele dafür sind die Nutzung in Systemen mit multifunktionalen Langzeitspeichern, die Kombination mit oberflächennaher und tiefer Geothermie sowie mit der strombetriebenen Wärmepumpe.

Ende 2016 waren in Deutschland 2,2 Mio. Solaranlagen mit einer installierten Leistung von 14 GW_{th} in Betrieb. Damit wurden 7,5 TWh Wärme erzeugt und über 2 Mio. Tonnen CO₂-Emissionen vermieden.

Das vorhandene Potenzial ist aber bislang nur in geringem Umfang erschlossen, wie die Analyse der betrachteten Klimaszenarien zeigt. Hiernach könnten Solaranlagen ihre jährliche Wärmeproduktion bis auf fast 100 TWh im Jahr 2050 steigern und mit einem Deckungsanteil des gesamten Wärmebedarfes von 12 % signifikant zur Umsetzung der Energiewende beitragen. Das entspricht einer jährlichen Vermeidung von 19 Mio. Tonnen CO₂-äq-Emissionen gegenüber einer Fortschreibung des aktuellen Trends. Weitere Schadgasemissionen wie SO₂ würden ebenfalls vermieden. Unter dem wirtschaftlichen Aspekt lässt sich dadurch eine Kosteneinsparung von 7 Mrd. € und vor allem, bei gleich bleibenden Anteilen der deutschen Produktion am heimischen und internationalen Markt eine inländische Wertschöpfung von über 7 Mrd. € schätzen.

Die Zubauzahlen der letzten Jahre liegen hinter den Erwartungen zurückliegender Entwicklungsszenarien. Die Marktsituation verdeutlicht die Komplexität der Energiewende im Wärmebereich und dass das große Potenzial der Solarthermie ohne öffentliche Unterstützung in Form von geeigneten gesetzlichen Instrumenten und Marktanreizprogrammen aber auch durch eine kontinuierliche Förderung der F&E-Aktivitäten nicht zu erschließen ist. Die Solarthermie-Branche besteht nicht nur aus

starken Herstellern aus dem Heizungsbereich, sondern auch aus klein- und mittelständischen Unternehmen, die ohne eine Förderung die erforderlichen F&E-Arbeiten nicht leisten können.

Die Forschungsergebnisse der vergangenen Jahre zeigen viel versprechende Lösungen auf dem Weg zu einem nachhaltigen Energieversorgungssystem. Beispiele dafür sind Gebäude die ihren Wärmebedarf vorwiegend mit Solarenergie abdecken können und damit ein sinnvolles alternatives Modell zu Passivhäusern für die zukünftigen Baustandards darstellen. Oder auch große netzgekoppelte Solaranlagen die in Kombination mit weiteren erneuerbaren Quellen signifikant zur erneuerbaren Wärmeversorgung von gesamten Dörfern, Quartieren und Stadtteilen beitragen können.

Für die weitere Entwicklung dieser Lösungen und für die Erarbeitung neuer Konzepte sowie für deren erfolgreiche Marktpenetration ist die öffentliche Förderung unerlässlich. Gleiches gilt für die langfristige Sicherstellung der noch vorhandenen Technologieführerschaft der deutschen Industrie auf dem Gebiet.

5.2 Empfehlung der Ausrichtung der F&E

Basierend auf erzielten Ergebnissen und Defizits der bisherigen F&E-Aktivitäten sind für die Definition des zukünftigen Bedarfs die folgenden zentralen Ziele zu berücksichtigen (DSTTP 2016; FVEE 2015):

- Senkung der Gestehungskosten für solare Wärme (System, Komponenten, Installation, Wartung und Vertrieb)
- Erhöhung des Substitutionsgrades von fossilen Brennstoffen durch Solarwärme bei der Wärmeversorgung von Gebäuden
- Effiziente Integration der Solarthermie in CO₂-neutrale Wärme- und Energieversorgungssysteme
- Erschließung der Marktsegmente Mehrfamilienhäuser, netzgebundene Wärmeerzeugung, industrielle Prozesswärme und Kälteerzeugung

Daraus ergeben sich spezifische F&E-Ausrichtungen für die einzelnen Technologien und Anwendungsbereiche, die im Folgenden zusammengefasst werden.

- *Thermische Kollektoren:* Die F&E-Aktivitäten sollen hier vor allem systemorientiert vorangetrieben werden. Wesentliche Themen sind dabei Lösungen zur Reduzierung des Installationsaufwands, neue Konzepte für die Integration in die Gebäudehülle, die Weiterentwicklung und Erprobung von stagnationssicheren Kollektoren, optimierte Konzepte für photovoltaisch-thermische Kollektoren sowie für den Einsatz bei Temperaturen über 80 °C und für den Betrieb im Wärmepumpensystemen. Die Erforschung alternativer, günstigerer Materialien bleibt zudem ein Thema, dessen Relevanz aber mit Bezug auf das Gesamtsystem betrachtet werden soll.
- *Wärme- und Kältespeicher:* Erforderlich sind hier grundlegende Material- und Systemforschung an Phasenwechsel- und thermochemischen Speichern, an großen saisonalen Speichern sowie Mitteltemperaturspeichern für Prozesswärme (> 100 °C). Zudem erforderlich sind die Weiterentwicklung von Maßnahmen zur Verminderung der Wärmeverluste, von schichterhaltenden Be- und Entladesys-

temen, von Konzepten zur Nutzung der Gebäudemasse und zum effizienten Betrieb von Wärmepumpensystemen. Die allgemeine Standardisierung von Systemen und Komponenten bleibt schließlich ein zentrales Thema.

- *Systemtechnik*: Hier soll einerseits die Vereinfachung und Standardisierung von Schnittstellen, Planung und Installation verfolgt werden, andererseits die Erarbeitung optimierter Konzepte und Regelungsstrategien für eine Steigerung des solaren Deckungsanteils und für einen effizienten Betrieb von hybriden Systemen (Wärmepumpen, Wärmenetze, etc.). Zudem sollen Systeme zu Funktions- und Ertragskontrolle inkl. Prognoseverfahren weiterentwickelt werden.
- *Dezentrale Raumheizung und Trinkwarmwassererwärmung*: Der Fokus richtet sich auf die Entwicklung vorgefertigter Baugruppen zur Vereinfachung von Montage und Installation der Anlagen, auf kosteneffiziente Lösungen mit solaren Deckungsanteilen über 50 % und auf die Erschließung der Marktsegmente Mehrfamilienhäuser und Nicht-Wohngebäude. Hierbei wird vor allem die Reduzierung der Systemverluste sowie die Konzeption und Erprobung von Low-Ex-Systemen verfolgt. Zu berücksichtigen sind Neu- und insbesondere Bestandsbau.
- *Netzgebundene Wärmeversorgung*: Übergeordnetes Ziel ist hier die effiziente Einbindung in die Erzeugerstrukturen der Fern- und Nahwärmenetze. Dabei sollen Konzepte sowohl für die CO₂-neutrale Energieversorgung von Quartieren und Städten als auch für Siedlungen und ländlichen Raum erarbeitet werden. Unter dem technischen Aspekt sollen Strategien zur Absenkung der Systemtemperaturen (vor allem der Rücklauftemperatur), Simulationswerkzeuge zur Auslegung und prognosebasierten Betrieb von multimodalen Netzen sowie standardisierte, multifunktionale Übergabestationen erarbeitet werden. Parallel dazu sollen die nicht-technischen Randbedingungen analysiert und verbessert werden.
- *Prozesswärme*: Zentrales Ziel ist hier die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der solarthermischen Unterstützung. Wesentliche Themen sind standardisierte Lösungen für die Integration und die Regelung der Anlagen, vereinfachte Planungs- und Auslegungswerkzeuge, Konzepte für kosten- und zeiteffiziente Installation großer Anlagen, Untersuchungen und Demonstration an/von hybriden Systemen (z. B. Wärmepumpen, Abwärme, KWK), kostengünstige Minimalmesstechnik zur Anlagebewertung, angepasste Betreibermodelle und eine Strategie zur flächendeckenden CO₂-armen Prozesswärmeerzeugung.
- *Kälteerzeugung*: Die Entwicklung soll sich hier auf neuartige Systemansätze mit absehbarer wettbewerbsfähiger Kostenperspektive konzentrieren. Bei der Gebäudeklimatisierung sollen beispielsweise Anwendungen, die Kühl- und Warmwasserbedarf kombinieren bevorzugt werden. Wesentliche Themen sind die Standardisierung von thermischen Heiz- und Kühlsystemen, die Steigerung ihrer Umwandlungseffizienz sowie die Minimierung ihres Sekundärenergiebedarfs, die Entwicklung von gasbetriebenen Sorptionswärmepumpen für hohe Temperaturhübe und niedertemperierte Umweltwärmequellen sowie der Einsatz in Kältenetzen zu Spitzenlastenzeiten.

Literaturverzeichnis

- Bertram, E. (2014): Heat Pump Systems with Vertical Borehole Heat Exchanger and Uncovered Solar Thermal Collectors, Doktorarbeit im Bereich Architektur Gebäudetechnik, Leibniz Universität Hannover.
- BINE (2016): Mit solarer Wärme kühlen – Konzepte und Methodologien für die Klimatisierung von Gebäuden. ThemenInfo III/2016, Energieforschung kompakt.
- BINE (2017): Solare Prozesswärme - Mit Solarthermie Abläufe in Industrie und Gewerbe unterstützen. ThemenInfo II/2017, Energieforschung kompakt.
- Böhmer, M.; Kirchner, A.; Hobohm, J.; Weiß, J.; Piegsa, A. (2015): Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte der Energiewirtschaft. Schlussbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. München/Basel/Berlin.
- Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW) (2017): Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie), Februar 2017, <https://www.solarwirtschaft.de/>. Letzter Zugriff: 24.04.2017.
- Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW) (2011): Fahrplan Solarwärme, Strategie und Maßnahmen der Solarwärme-Branche für ein beschleunigtes Marktwachstum bis 2030.
- Clarivate (2017): Web of Science analytics, <http://clarivate.com/?product=web-of-science>. Letzter Zugriff: 24.04.2017.
- Deutsche Solarthermie-Technologieplattform (2016): DSTTP Solarwärmestrategie 2020+, <http://www.solarthermietechologie.de/dsttp/>. Letzter Zugang 24.04.2017.
- DLR; Fraunhofer IWES; IfnE (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht an das BMU vom 29.03.2012. FKZ 03MAP146.
- Fichtner; DLR; IdE; TFZ; DBI-Gas- und Umwelttechnik; TUHH – IUE; COMPARE Consulting (2016): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2012 bis 2014.
- Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) (2015): Erneuerbare Energien im Wärmesektor – Aufgaben, Empfehlungen und Perspektiven.
- Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) (2016): Forschungsziele 2017 - Gemeinsam forschen für die Energie der Zukunft, Berlin.
- Greenpeace International; Global Wind Energy Council; SolarPowerEurope (2015): Energy [R]evolution - A sustainable World Energy Outlook 2015. <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/Campaign-reports/Climate-Reports/Energy-Revolution-2015/>. Letzter Zugriff: 02.03.2017.

- Hadorn, J.-C. (2015): Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Henning, H.-M.; Palzer, A. (2015): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE.
- Hirschl, B.; Heinbach, K.; Prahl, A.; Salecki, S.; Schröder, A.; Aretz, A.; Weiß, J. (2015): Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien. Ermittlung der Effekte auf Länder- und Bundesebene. Schriftenreihe des IÖW 210/15.
- Institut für Demoskopie Allensbach (IfD) (2015): Energie- und Klimapolitik im Spiegel der öffentlichen Meinung. Allensbach, 2015 (Berichte für das Bundespresseamt).
- Jagnow, K.; Wolff, D. (2012): Integration von Heizkesseln in Wärmeverbundsysteme, Projektabschlussbericht, Wolfenbüttel.
- Kastner, O.; Lenz, V.; Sperber, E.; Ruch, O.; Weidlich I.; Herkel, S.; Tänzer, G.; Wern, B.; Seidler, D.; Krellenberg, K.; Vienken, T. (2016): Integration von EE-Wärme in Infrastrukturen zur Versorgung von Quartieren. Forschung für die Energiewende – Die Gestaltung des Energiesystems. Tagungsband zur FVEE-Jahreskonferenz.
- Lund, H.; Werner, S.; Wiltshire, R.; Svendsen, S.; Thorsen, J. E.; Hvelplund, F.; Vad Mathiesen, B. (2014): 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems, Energy 68.
- Mangold, D.; Miedaner, O.; Tziggili, E. Primoudi; Schmidt, T.; Unterberger, M.; Zeh, B. (2012): Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung, Schlussbericht zum BMU-Forschungsvorhaben 0329607N.
- Mauthner, F.; Weiss, W.; Spörk-Dür, M. (2016): Solar Heat Worldwide – Market and Contribution to the Energy Supply 2014. IEA Solar Heating & Cooling Program.
- Nitsch, J. (2014a): Szenarien der deutschen Energieversorgung vor dem Hintergrund der Vereinbarungen der Großen Koalition. Kurzexpertise für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.
- Nitsch, J. (2014b): GROKO II - Szenarien der deutschen Energieversorgung auf der Basis des EEG-Gesetzentwurfs - insbesondere Auswirkungen auf den Wärmesektor. Kurzexpertise für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.
- Nitsch, J. (2015): SZEN 15 -Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung unter Berücksichtigung der Eckdaten des Jahres 2014. Kurzexpertise für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.
- Nitsch, J. (2016): Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung. Kurzexpertise für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.

- Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T. et. al. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Projektschlussbericht, Stuttgart.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin, Karlsruhe.
- Oliva, A.; Stryi-Hipp, G.; Kobelt, S.; Bastenlehner, D.; Druck, H.; Müller, M.; Bühl, J.; Dasch, G.; Kersch, C. (2016): HeizSolar, Schlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben 0325971.
- Prognos; EWI; GWS (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie; Projekt Nr. 57/12; Basel/Köln, Osnabrück.
- Questel (2017): Software Orbit, <https://www.questel.com/software/orbit-at-a-glance/>. Letzter Zugriff: 24.04.2017.
- Rauh, J. (2012): Solarenergetische Dachanlagen: Verbreitung, Akzeptanz, Nutzungspotenziale und Handlungsoptionen der räumlichen Planung.
- SHC (2014): Converting solar thermal collector area into installed capacity (m_2 to kW_{th}) – Technical note.
- Stryi-Hipp, G.; Druck, H.; Wittwer, V.; Zörner, W. (2010): Forschungsstrategie Niedertemperatur-Solarthermie 2030, Deutsche Solarthermie-Technologie Plattform (DSTTP), Berlin.
- UBA (2014a): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA (2014b): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Climate Change 07/2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Wietschel, Martin; Arens, Marlene; Dötsch, Christian; Herkel, Sebastian; Krewitt, Wolfram; Markewitz, Peter; Möst, Dominik; Scheufen, Martin (2010): Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. ISI-Schriftenreihe Innovationspotentiale. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
<https://www.energietechnologien2050.de>