



Crashkurs Wärmewende

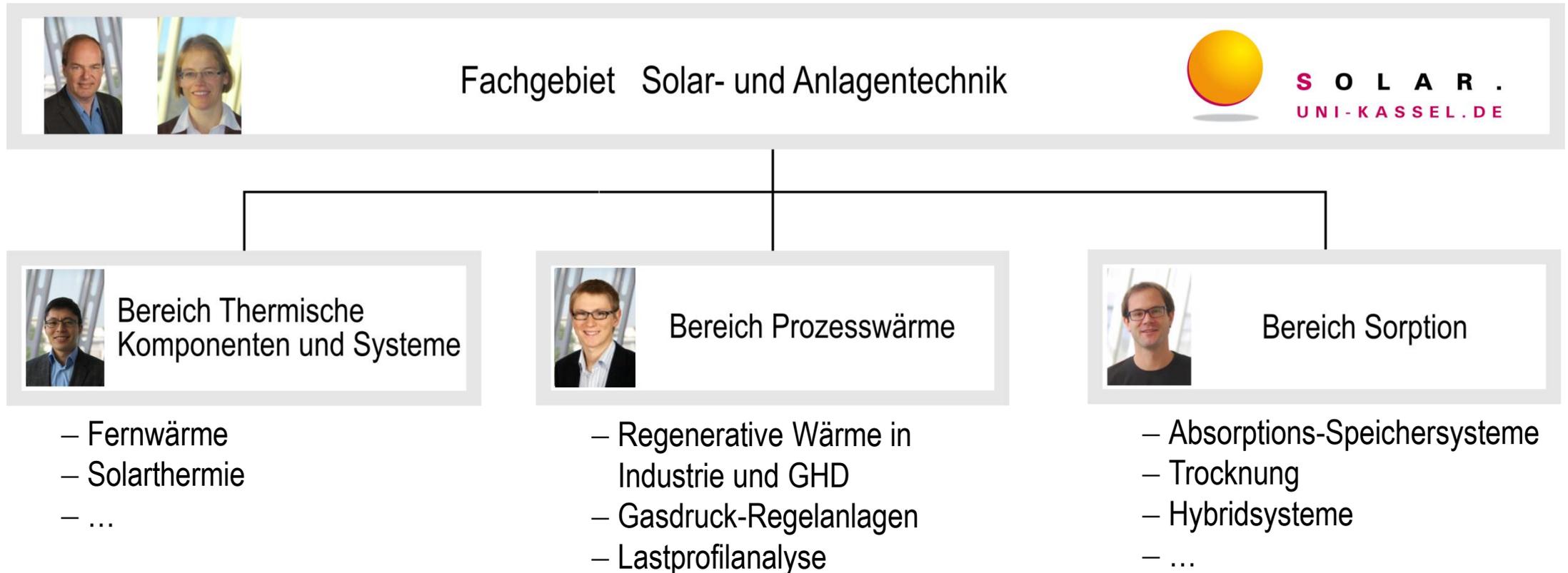
Solarthermie

Technik, Herausforderungen & Perspektiven



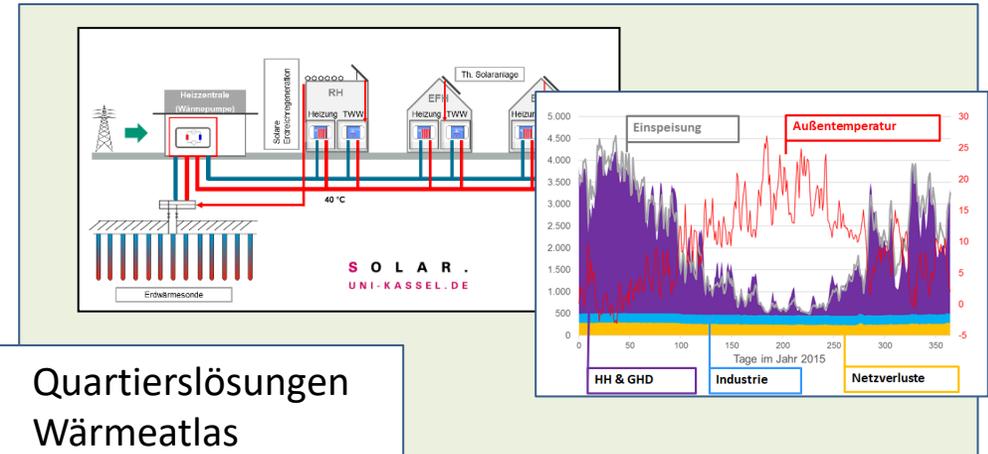
*Web-Seminar am 21.10.2020
Scientists for Future*

- Angewandte F&E zu thermischen Energiesystemen
- ≈ 25 MitarbeiterInnen + HiWis + DiplomandInnen + Ausgründungen
- Koordinierung Masterstudiengang RE², Projektstudium Solarcampus



- Solarthermie: Komponenten & Systeme
- Wärmeversorgung:
Fernwärme & Quartiere
- Industrielle Prozesswärme
- Sorptionstechnologien

Strategische Entwicklung der Fernwärme Kassel



- Quartierslösungen
- Wärmeatlas
- Wärmenetze

Bilder: SOLAR.UNI-KASSEL.DE



- Heat Map
- Potentiale
- Wärmeversorgungskonzepte



Bild: Enersolve GmbH

Solarthermie: Scientific Community & Umfeld

Universitäten (DE & AT)



Uni Kassel



Uni Stuttgart



Uni Innsbruck

TUs Berlin, Braunschweig, Chemnitz, Dresden, Ilmenau, ..
 FHs: Berlin, Ingolstadt, Jülich, Nordhausen, Offenburg, Stuttgart, Düsseldorf, ...

Solarthermie, Quartierskonzepte, WP, KWK, FW, th. Speicher, ..

Akkreditierte Testinstitute



Foto: SPF Solartechnik, Rapperswil, CH

- ISF Hameln
- FH Jülich
- FH Saarbrücken
- Uni Stuttgart
- AIT Wien (AT)
- FhG-ISE Freiburg
- SPF Rapperswil (CH), ..

Internationale Energieagentur



Implementing agreements



Solar Heating and Cooling



Speicher

Forschungsinstitute



Institut für Solarenergieforschung Hameln



Zentrum für Angewandte Energieforschung, ZAE



Freiburg



Austrian Institute of Technology (3)



Konzentr. Systeme, Hochtemp.-Solarthermie



Solartechnik Prüfung Forschung (SPF) CH-Rapperswil



AG Ern. Energien (AEE-INTEC) AT



EURAC, IT-Bozen

Vereine

- Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) ca. 3.000 Mitglieder
- International Solar Energy Society (ISES) ca. 15.000 Mitglieder



Konferenzen

- Symposien Thermische Solarenergie und innovative Wärmesysteme (Otti, Conexio)
- EuroSun (ISES-Europe)
- Solar World Congress (ISES)



I. Technik

Anlagentypen, Markt & Kosten

II. Herausforderungen der Wärmeversorgung

Strukturelle & politische Hemmnisse, Förderpolitik

III. Technologie- / Konzeptvergleich

- Randbedingungen
- Vergleich Solarthermie mit PV+WP

IV. Fazit

Anlagentypen (1)

Trinkwarmwasser

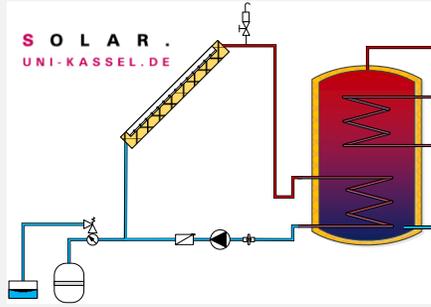


Bild: SOLAR.UNI-KASSEL.DE

- $A_{KOl} \approx 5 \text{ m}^2$; $V_{Sp} \approx 300 \text{ l}$
- $\sim 350 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

$\sim 5..10 \text{ Ct/kWh}$

Kombianlagen

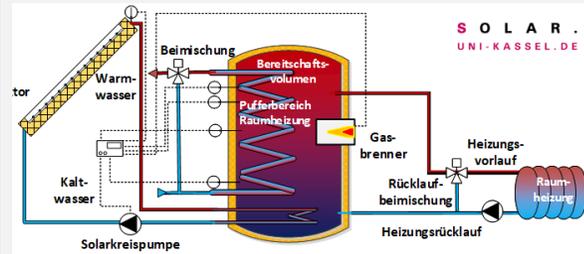


Bild: SOLAR.UNI-KASSEL.DE

- $A_{KOl} \approx 15 \text{ m}^2$; $V_{Sp} \approx 1000 \text{ l}$
- $\sim 250 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Mittelgroße Anlagen



(Quelle: www.enersolve.de)

- MFH, Wohnheime, Krankenhäuser, ..
- $\sim 350..400 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

$\sim 5..10 \text{ Ct/kWh}$

Hohe Deckungsraten



(Quelle: www.enersolve.de)

- Sonnenhäuser:
 $A_{KOl} \approx 30 \text{ m}^2$; $V = 5..9 \text{ m}^3$

Industrielle Prozesswärme



Bild: SOLAR.UNI-KASSEL.DE

- 800 Anlagen global
- $\sim 400 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

$\sim 4..5 \text{ Ct/kWh}$

Wärmenetze



(Quelle: Erik Christensen, Wikipedia)

- 400 Anlagen, $\dot{Q} > 350 \text{ kW}_{th}$
- $\sim 400..500 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

$\sim 2,5..3,5 \text{ Ct/kWh}$

Thermosyphon-Systeme



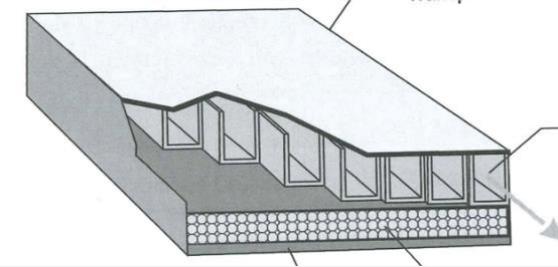
- Griechenland
- Türkei
- Süd-Afrika
- China
- ..

- GR: $f_{sav} = 80..90\%$
- Wachstum!

Kleinanlagen:
60% der
installierten
Leistung global

Anlagentypen (2)

Luftkollektor-Anlagen



(Quelle: Wesselak und Schabbach 2009)

- z.B. Heizungsunterstützung in Industriebauten
- weltweit: 1GW_{th}

Parabolrinnen



(Quelle: Industrial Solar)

neue Anlage in China:
 93.000 m^2

Fresnelkollektor



Quelle: sunwindenergy.com

Schwimmbadabsorber



(Quelle: Speed Solar Sun LDPE)

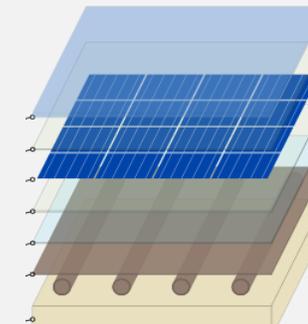
- Rohrmatten, $T < 30^\circ\text{C}$
- Europa: 32 % inst. Leistung (?)

Glashaus-Anlagen



(<https://www.thermo-system.com/de>)

PVT-Anlagen



(Quelle: Manual Lämmle)

- Markt: +9% global
- ca. $600\text{ MW}_{\text{th}}$

Trinkwassererwärmung



(Bild: Bosch-Thermotechnik)

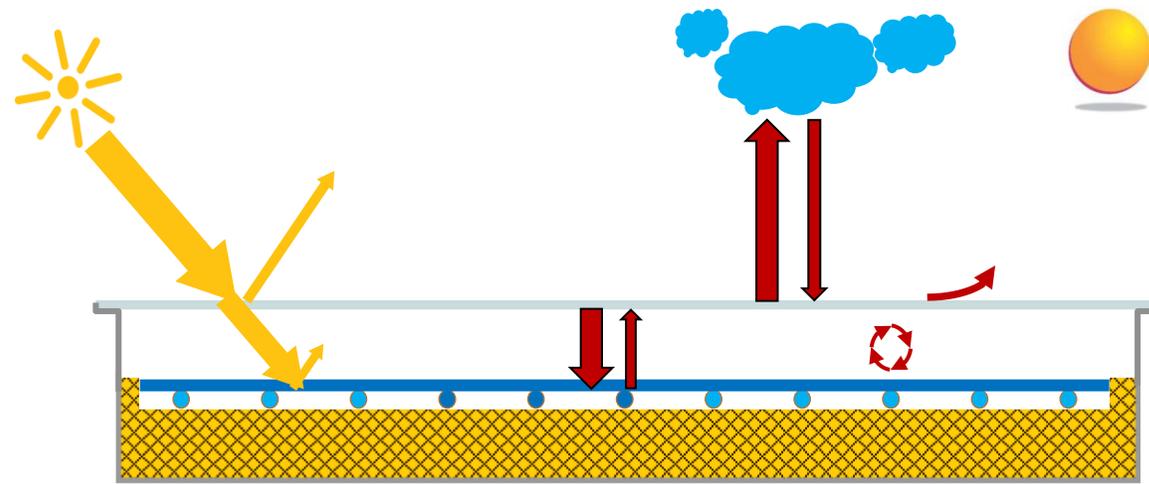


Bild: SOLAR.UNI-KASSEL.DE

- Antireflex-Beschichtungen
- selektive Schichten

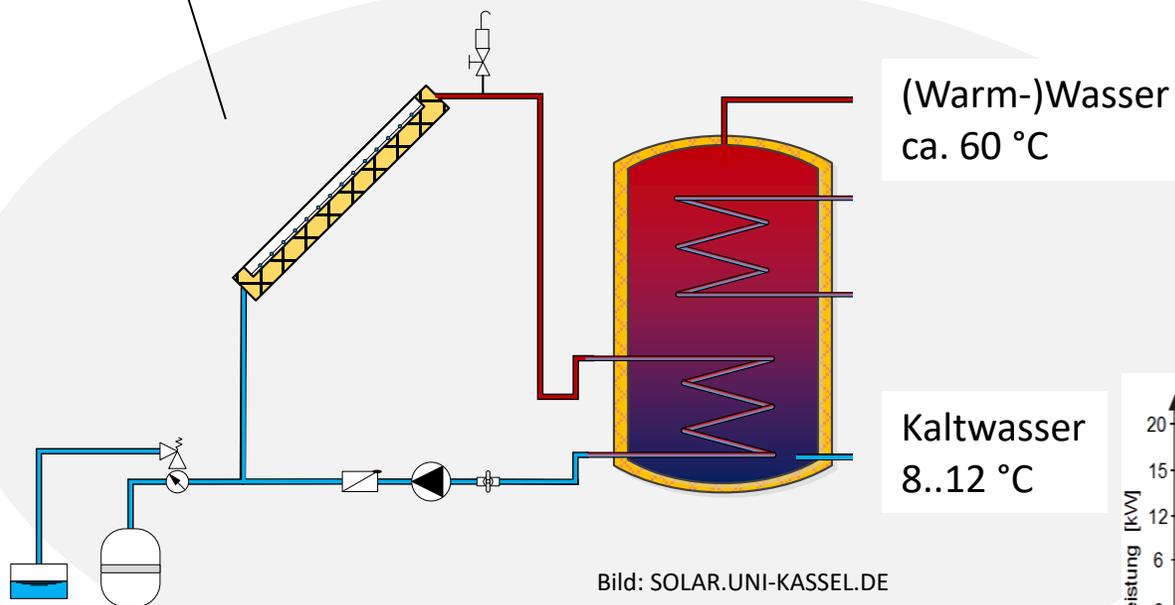
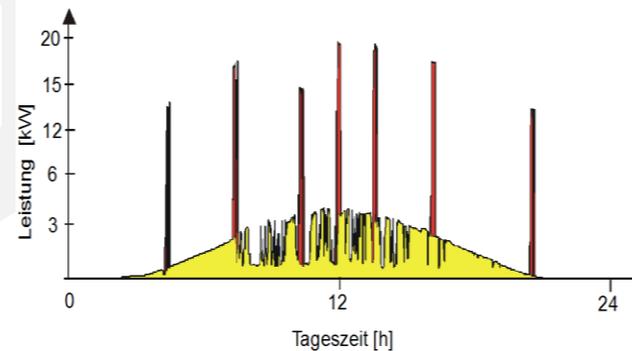


Bild: SOLAR.UNI-KASSEL.DE



Diagr.: H. Drück, Uni Stuttgart.

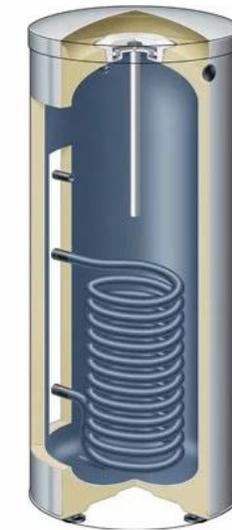


Bild: Wagner & Co.

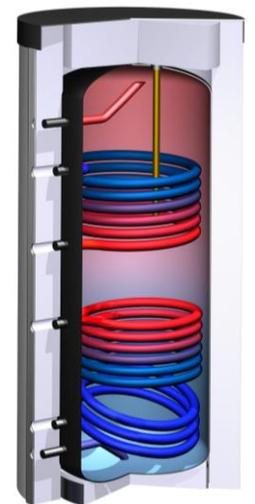


Bild: Viessmann

- typ. Deckungsgrad $f \approx 60\%$ (vom TWW)

Kombianlagen

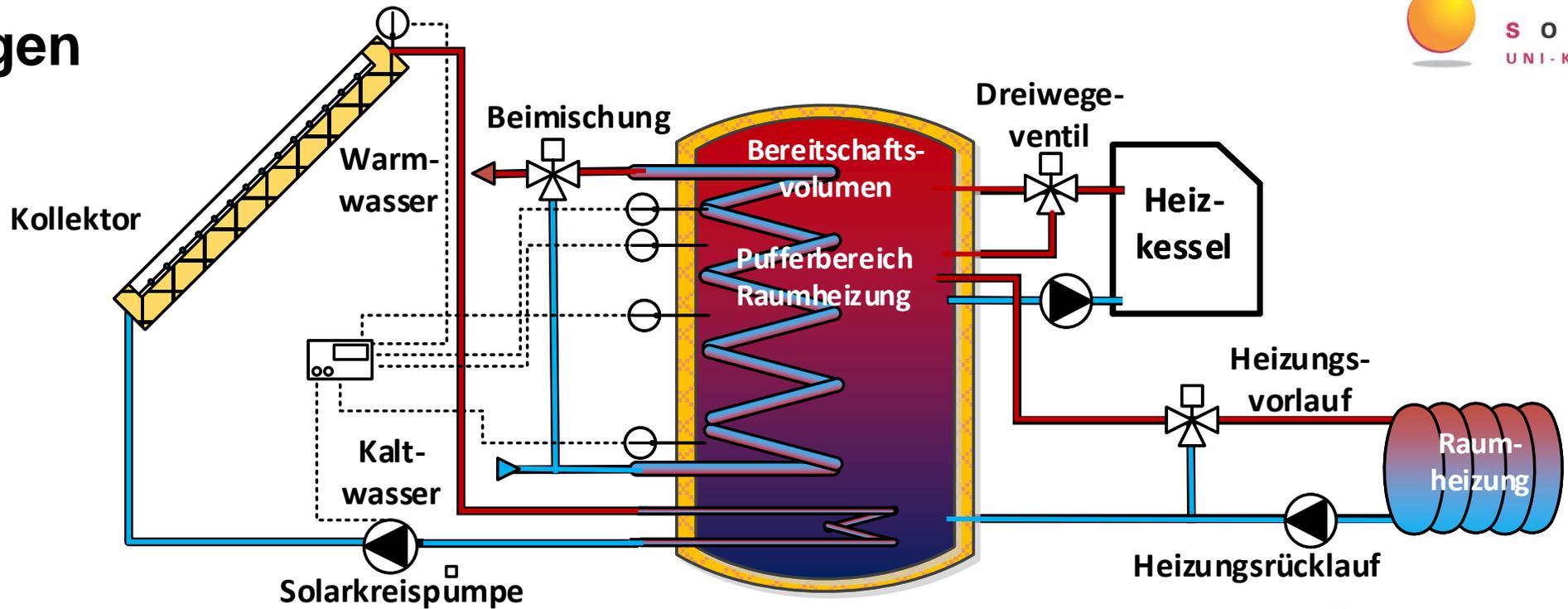


Bild: SOLAR.UNI-KASSEL.DE

- Speicher größer, RH-Wasser
- in Verbindung mit Niedertemperaturheizung
- typ. Deckungsgrad $f \approx 25\%$
- Anteil neu installierter Solaranlagen in DE (2017):
 - 66 % TWW-Systeme, 34 % Kombi-Systeme (Quelle: BMWi)

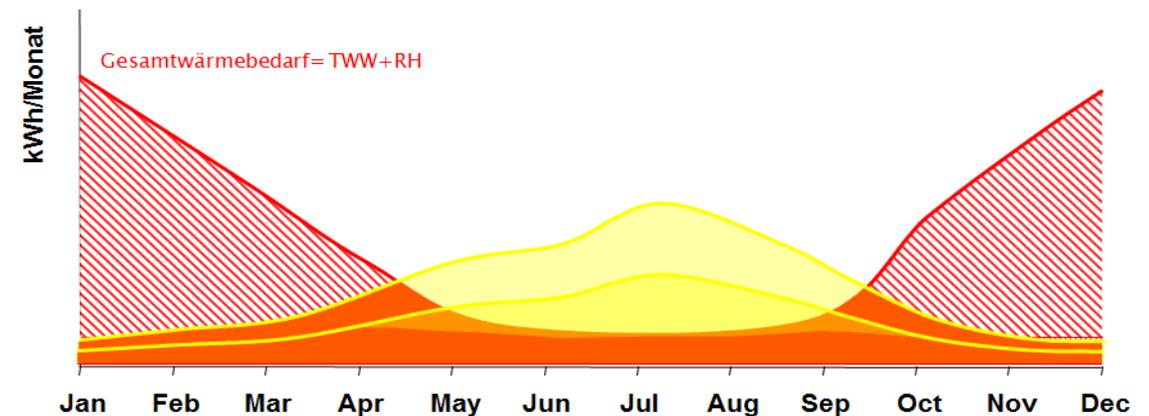


Bild: SOLAR.UNI-KASSEL.DE

Mittelgroße Solaranlagen

- Mehrfamilienhäuser, Wohnheime, Krankenhäuser, Gewerbegebäude, ...
- in der Regel nur Trinkwarmwasser, keine Heizungsunterstützung
- Kollektorfläche: ab 20 m² (bis mehrere hundert m²)

Beispiel:

- $A_{kol} = 35 \text{ m}^2$
- $V_{Sp} = 2,2 \text{ m}^3$

→ Versorgung von
20 Wohneinheiten
mit TWW



(Quelle: www.enersolve.de)

⇒ viele Systemvarianten
(TWW, Zirkulation, RH)

Konzept Sonnenhaus

- spez. Jahres-Primärenergiebedarf (inkl. TWW und Hilfsenergien)

$$q_{\text{Primär}} = 5..15 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ a}}$$

- Südliches Dach mit Solarthermie ($A_{\text{Koll}} \approx 30..70 \text{ m}^2$), ergänzt durch PV, $f_{\text{sav}} > 50\%$
- großer, im Gebäude integrierter Wärmespeicher (typisch: $5..9 \text{ m}^3$)
- gute, wärmebrückenfreie, luftdichte Dämmung, $H'_T \rightarrow -15\%$ (EnEV-Ref) (aber: weniger als im Passivhaus)
- Fußbodenheizung
- solarthermische Bauteilaktivierung
⇒ Verminderung von V_{Sp} auf $1,5..3 \text{ m}^3$

„... südseitigen Flächen zur Bestückung mit Solarmodulen nutzen. Etwa die **Hälfte bis zwei Drittel dieser Solarfläche** sollte für die solare Wärmeerzeugung eingeplant werden; dies hat sich auch **am Wirtschaftlichsten** erwiesen.“



www.sonnenhaus-institut.de

Mehrfamilienhäuser

- ca. 70 – 80% energieautark
- Mehrinvest 6 WE: 380 €/m²

Nachbargebäude
Bestand ohne Solar

Südansicht

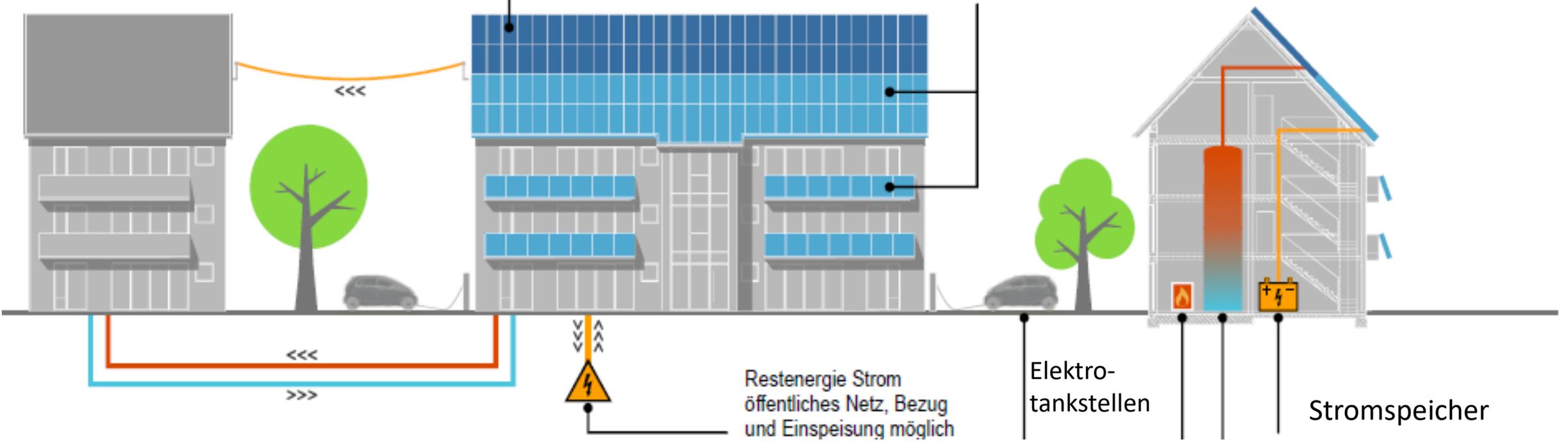
Neuartiges Finanzierungs- und Vermietungsmodell

- Pauschalmieten und Energie-Flatrate (10a)
- EVU als Dienstleister
- kalkulatorischer Anteil der Energie verrechnet

Vernetzung der Gebäude

Solarthermie

PV



Restenergie Strom
öffentliches Netz, Bezug
und Einspeisung möglich

Langzeitwärmespeicher, vernetzt mit EVU
Erdgas, Holzpellets, WP, Nah-/Fernwärme

www.timoleukefeld.de/autarkes-wohnen/
(Leukefeld 2019)

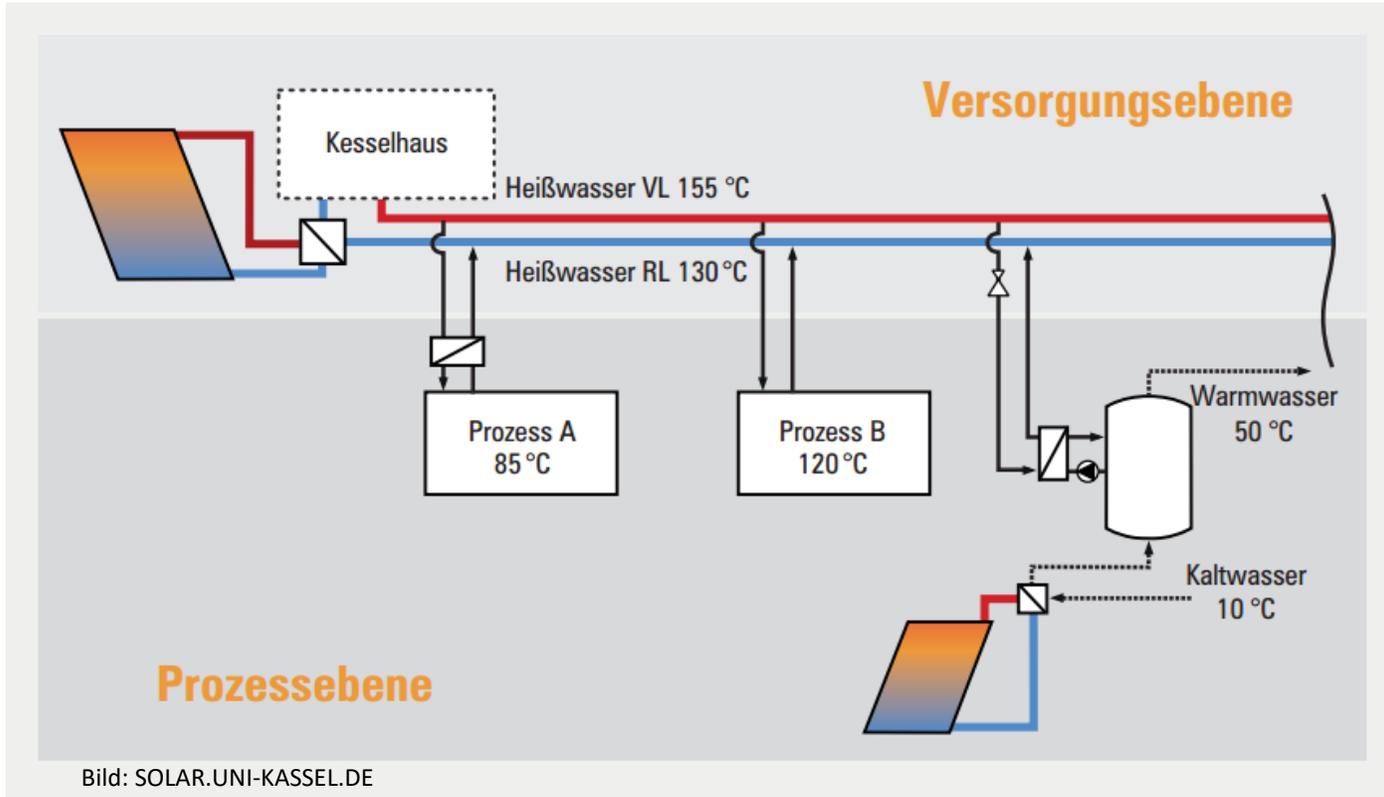


Bild: SOLAR.UNI-KASSEL.DE

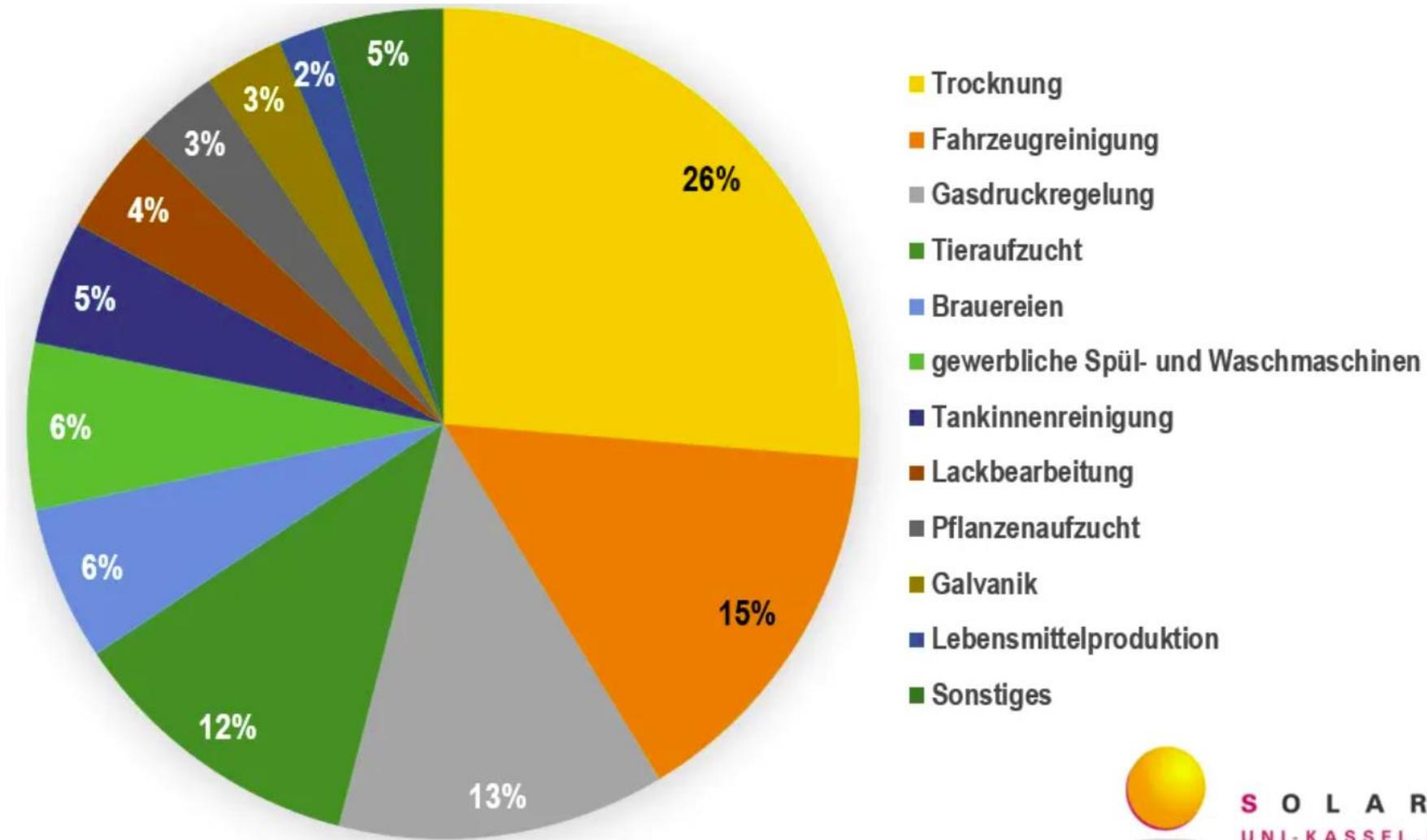
Deutschland

- 33 Anlagen, $A_{Koi} \approx 7800 \text{ m}^2$ neu in 2019
- MAP & KfW (Energieeffizienz in der Industrie): $A_{Koi} \approx 33.000 \text{ m}^2$
- 12% konzentrierende Systeme

weltweit

- 635 Anlagen
 - ca. 300 Anlagen mit $A_{Koi} > 50 \text{ m}^2$
- $\Rightarrow A_{Koi} \approx 900.000 \text{ m}^2$, 440 MW_{th}

Markt - Anwendungen solare Prozesswärme DE



Solar Heat for Industrial Processes (SHIP)

Endenergiebedarf

Gesamtbedarf 2017: 2590 TWh

- Gewerbe, Handel, Dienstleistung
- Haushalt
- Verkehr
- Industrie (mechanisch)
- Industrie (Sonstige)
- Industrie (Prozesswärme)

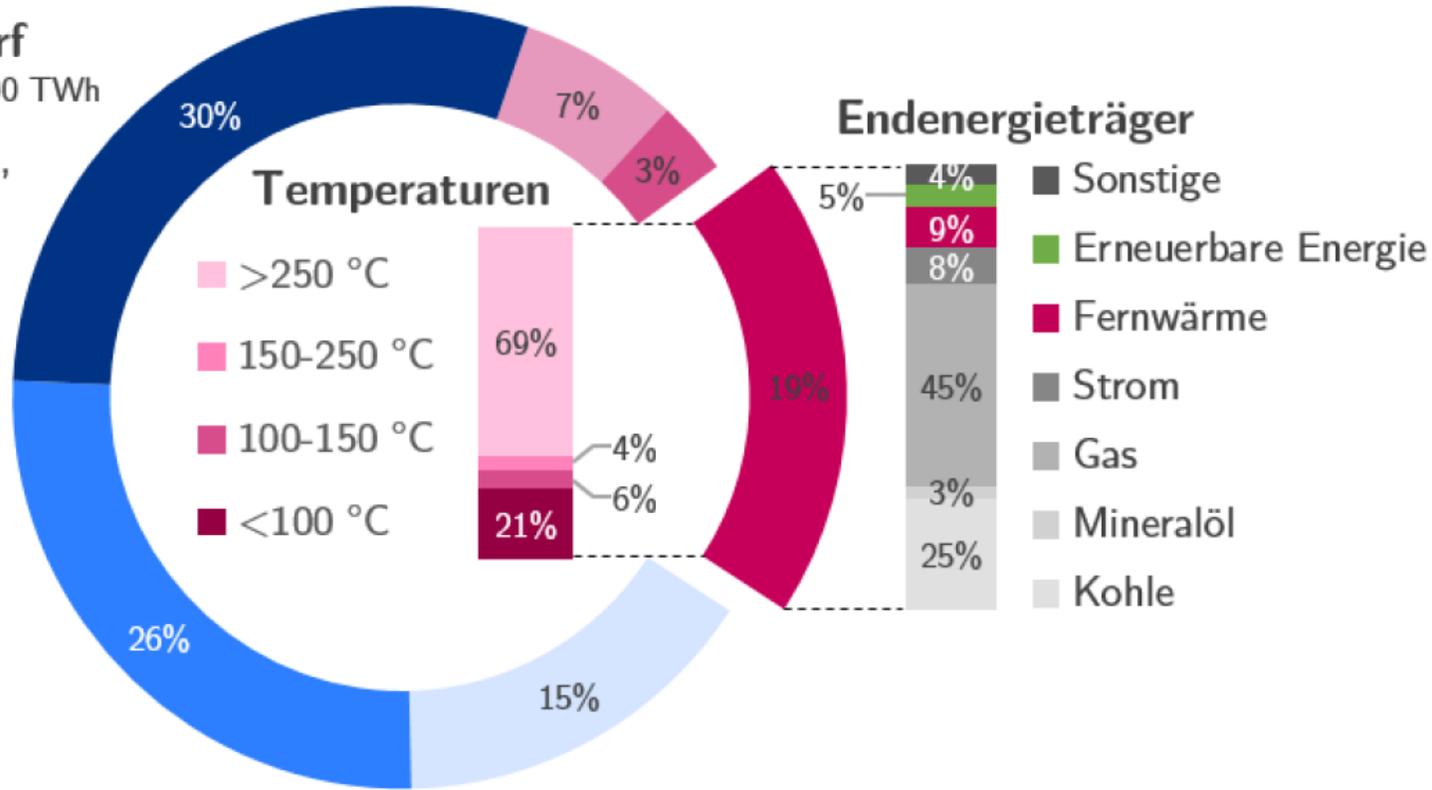


Abbildung 1-1: Industrieller Endenergiebedarf 2017 nach Sektoren, Anwendungstemperatur et al. 2019, S. 2) und Endenergieträgern (vgl. AGE B 2019)

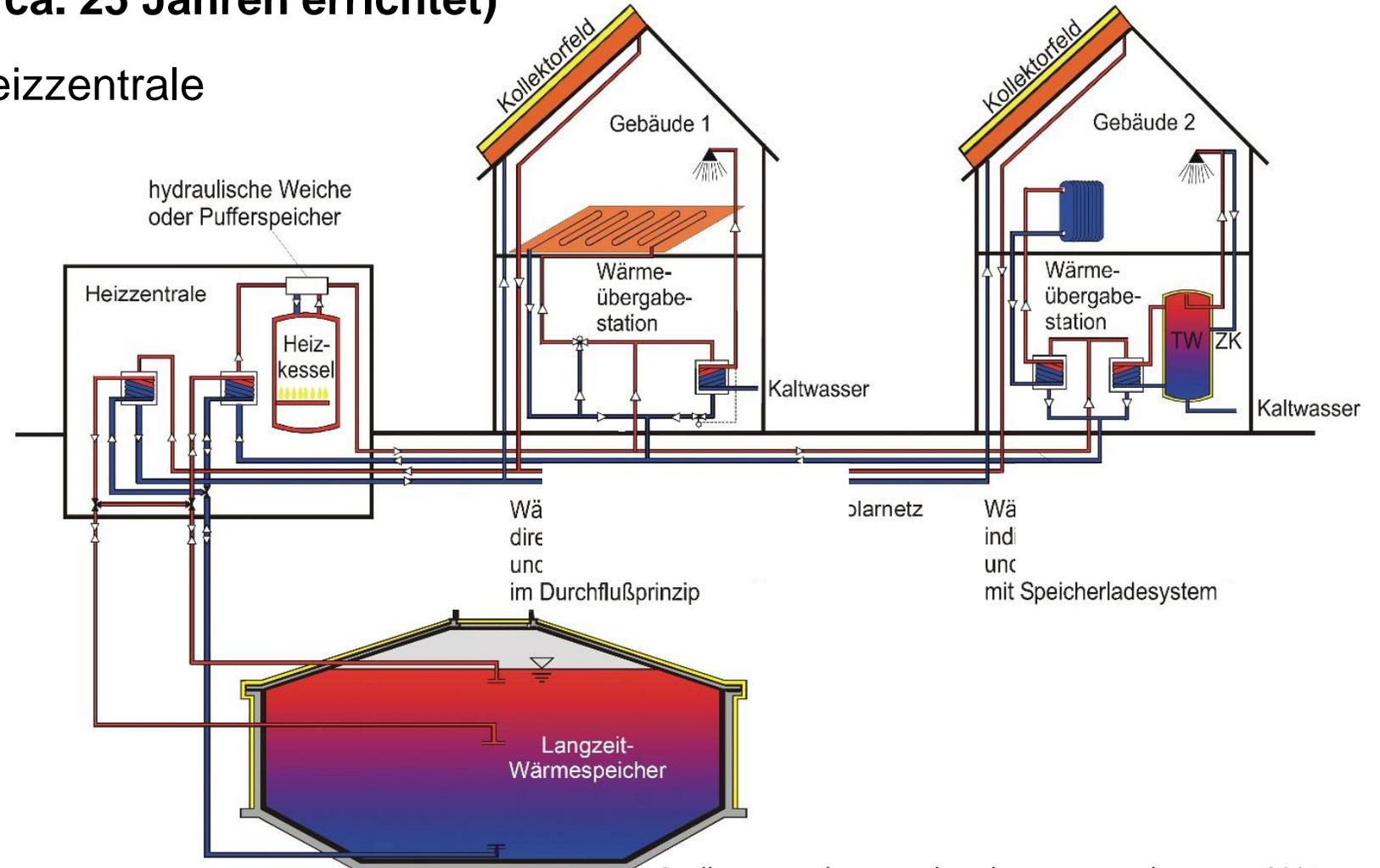
**Technisches Potential Solar: ca. 3,6% (inkl. Betrachtung Dachfläche usw.)
 ⇒ 20 TWh für Industrie (+ 40 TWh Gewerbe)**

Solare Fernwärme

Eine der ersten Anlagen (vor ca. 25 Jahren errichtet)

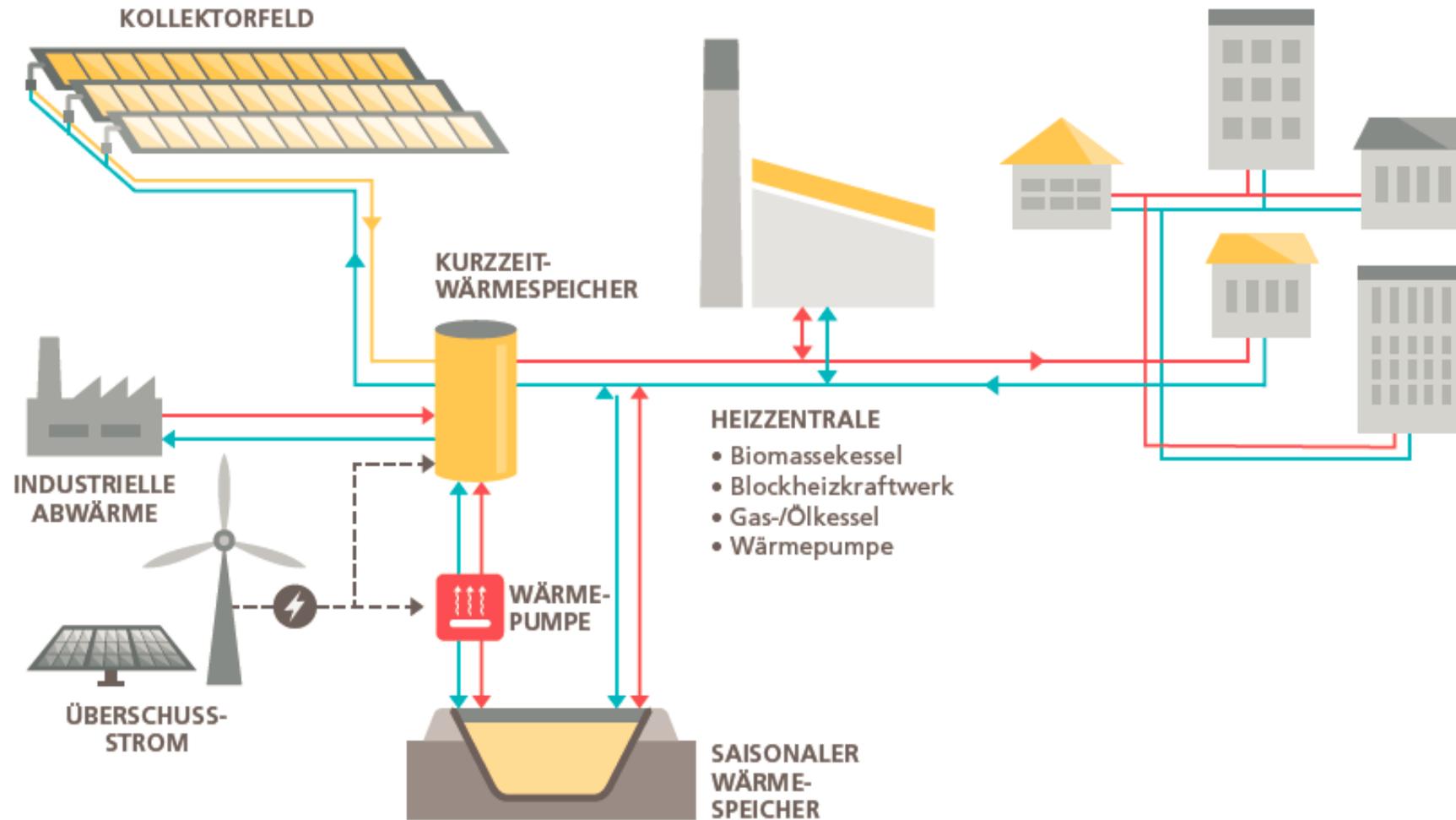
- Saisonaler Speicher plus Heizzentrale
- Wärmeübergabestationen

Bsp.: Hamburg-Bramfeld: $V = 3000 \text{ m}^3$



Quelle: www.solarserver.de/solarmagazin/anlagejanuar2001

Solare Fernwärme



IEA SHC TASK 55

Solare Fernwärme

- Bei Auslegung auf die Sommerlast bis zu 20 % solare Deckungsrate
- Solare Deckungsraten $> 20\%$ \Rightarrow saisonaler Speicher benötigt

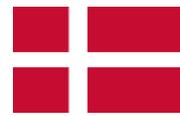
Dänemark (2019)

- 120 Solar-FW-Systeme
- mittlere Werte: $\overline{f_{sav}}$: 20%; $\overline{A_{kol}} = 13.000 \text{ m}^2$
- +170% Marktwachstum
- 35% der global neu installierten Koll. in FW-Systemen

China (2019)

- Marktanteil global: 73%
- 47 neue FW-Systeme





Vojens 50 MW_{th}

Marstal 52 MW_{th}

Marstal

- Kollektorfläche > 40 000 m²
- Speicher: 85 000 m³
- Wärmepumpe (500 kW)
- Holzhackschnitzel (4000 kW)

Quelle: de.arcon-sunmark.com/referenzen

Quelle: Erik Christensen

Silkeborg, DK

(44.000 Einw.)

2016

Größte Solaranlage
der Welt

75 GWh/a ⇔ 4400 HH

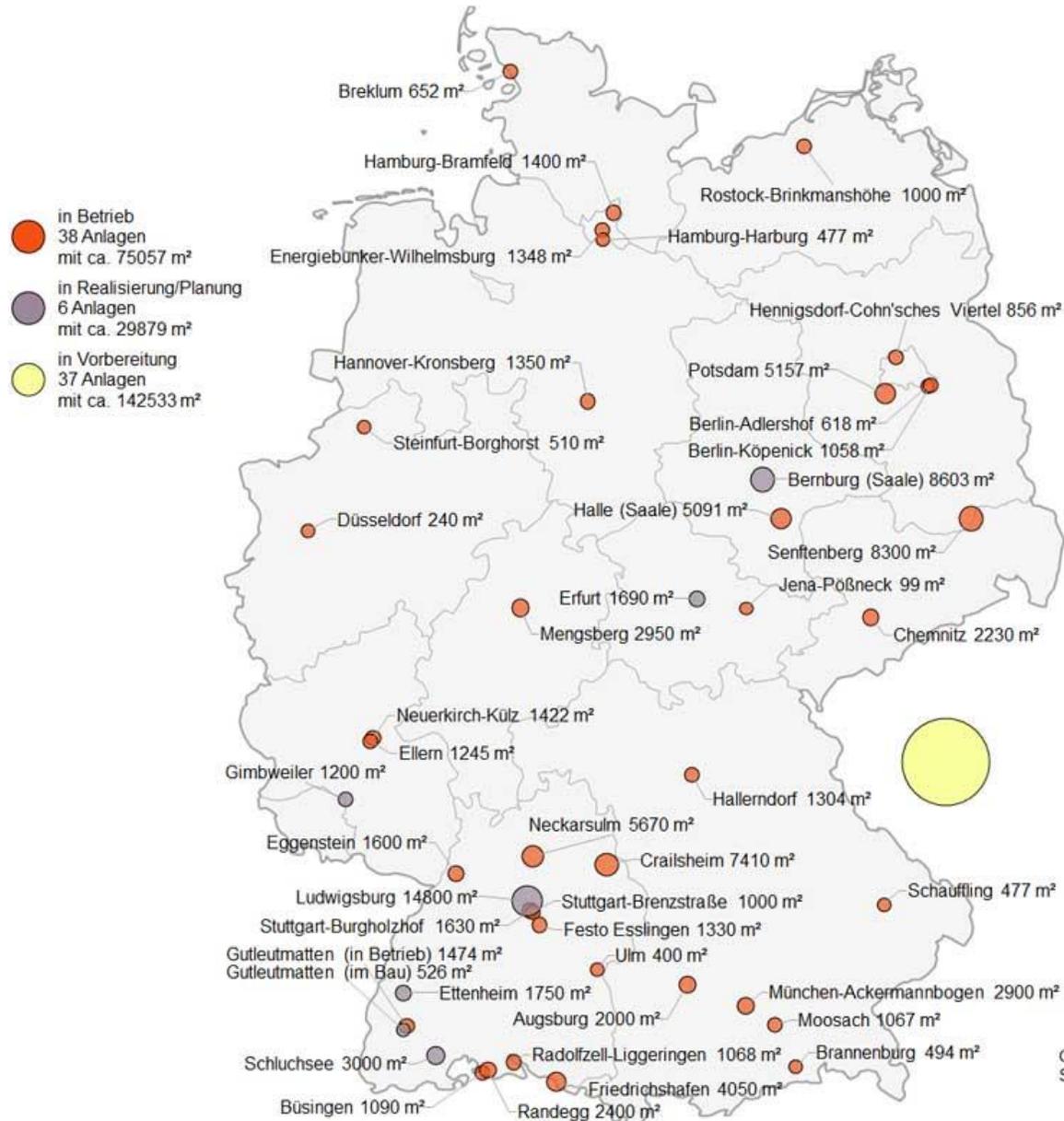
⇔ ca. 12.000 Pers (HH-Sektor in DE)

Silkeborg, DK:

Solarsystem: 110 MW, 156.694 m² Aperturfläche
Jährlicher Ertrag: 75.000 MWh (19% solare Deckung)
CO₂-Einsparung: 15.000 ton/Jahr
Netz-Haushalte: 11.000
Netz-Bedarf: 395 GWh

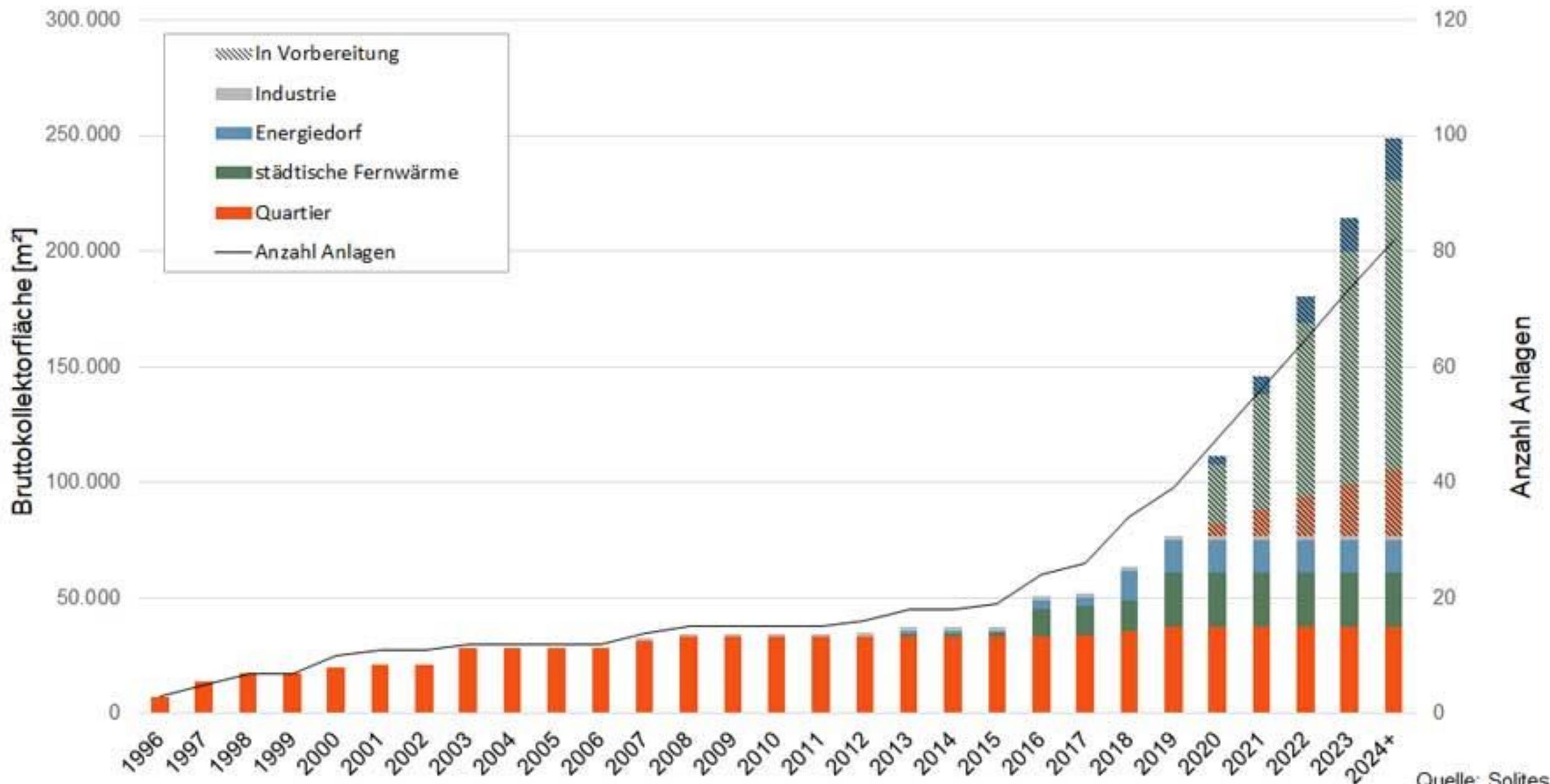
<http://solar-district-heating.eu/>

Solare Fernwärme in Deutschland



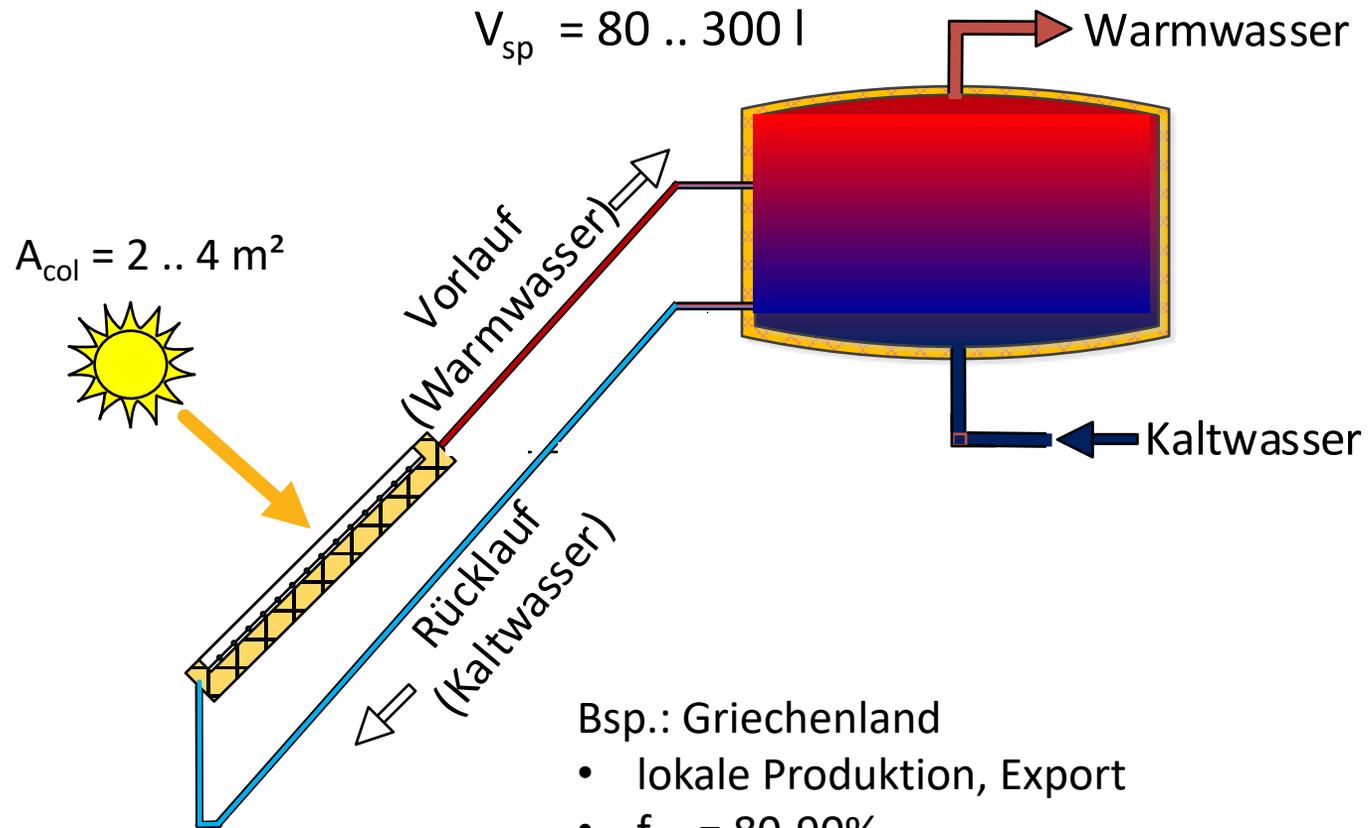
Deutschland (Stand 02/2020)

- 38 Anlagen, $\Sigma \approx 75.000 \text{ m}^2$
ca. 50 % der Leistung in 2019
- größte Anlage: ca. 15.000 m² (Mai 2020)
- 6 Anlagen in Planung, $\Sigma = 30.000 \text{ m}^2$
- 37 Anlagen in Vorbereitung, $\Sigma = 140.000 \text{ m}^2$



Quelle: Solites
Status: Februar 2020

Thermosyphon-Systeme



Geschlossener Syphonkreis

Bsp.: Griechenland

- lokale Produktion, Export
- $f_{sol} = 80-90\%$
- Building Regulation Code: $f_{sol} > 60\%$
- Zuschüsse

Europa: 41 % der Systeme

Quelle: (Solar heat worldwide, SHC 2020)



(Quelle: Vassiliki Drosou, CRSES)

Thermosyphon-Systeme in Griechenland

Thermosiphonanlagen

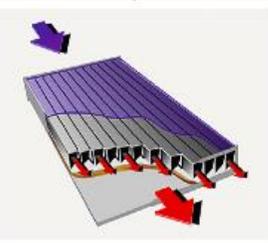
Insbesondere im Mittelmeerraum,
asiatischen Ländern und Australien etabliert



Solarkollektoren



Flachkollektoren



Parabolrinnen- oder Fresnelkollektoren



Vakuurröhren-/CPC Kollektoren



Schwimmbad-
absorber

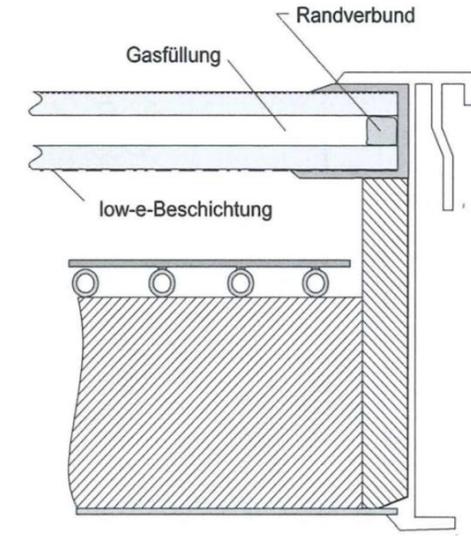


PVT-
Kollektoren

Flachkollektoren: links © Grammer Solar GmbH; rechts © Wagner Solar GmbH
 Vakuurröhren / CPC Kollektoren: links © Viessmann Group; rechts © www.andyschroder.com
 Parabolrinnen- oder Fresnelkollektoren: links © NEP SOLAR Pty Ltd; rechts © Industrial Solar GmbH

Mitteltemperatur-
Flachkollektoren

- doppelte Abdeckung
- Abdeckungen mit Edelgasfüllungen
- Antireflex- und Low-e (geringe Emissionen) Beschichtung



Quelle: (Wesselak und Schabbach 2009)

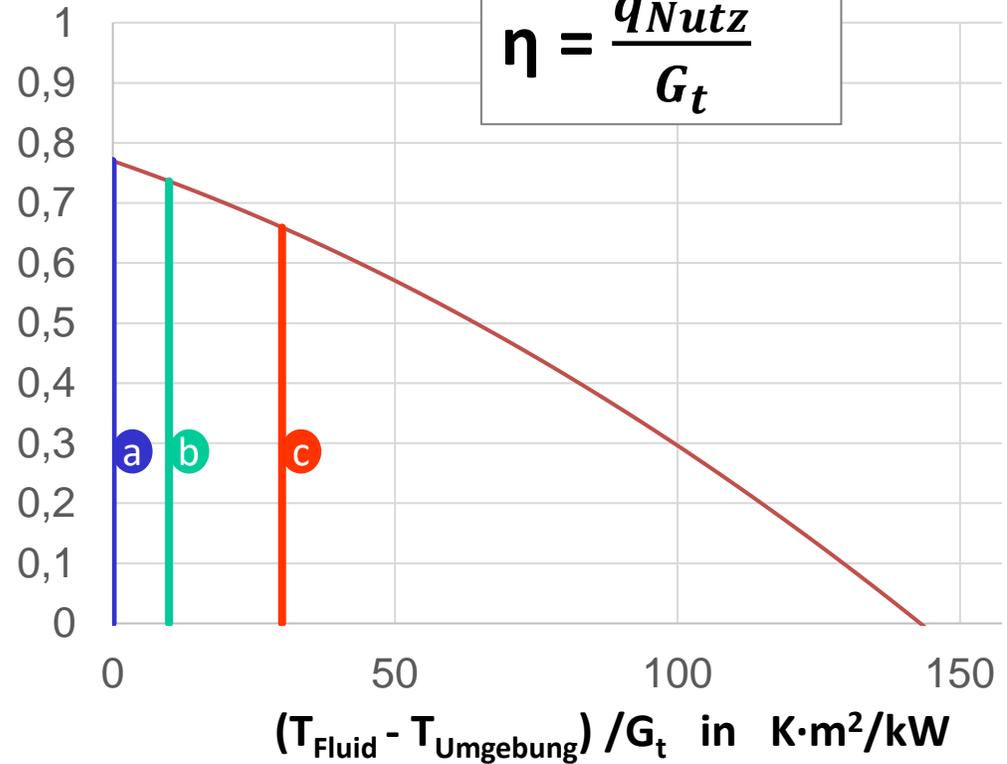
Neuere Entwicklungen:
Vakuum-Flachkollektor

Schwimmbadabsorber © Roth Werke

Kollektorkennlinie

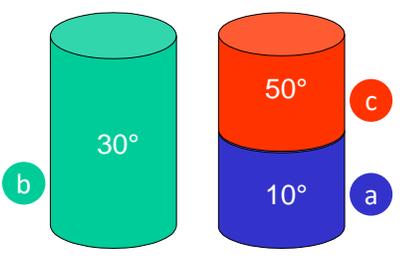
Kollektorwirkungsgrad

$$\eta = \frac{\dot{q}_{Nutz}}{G_t}$$

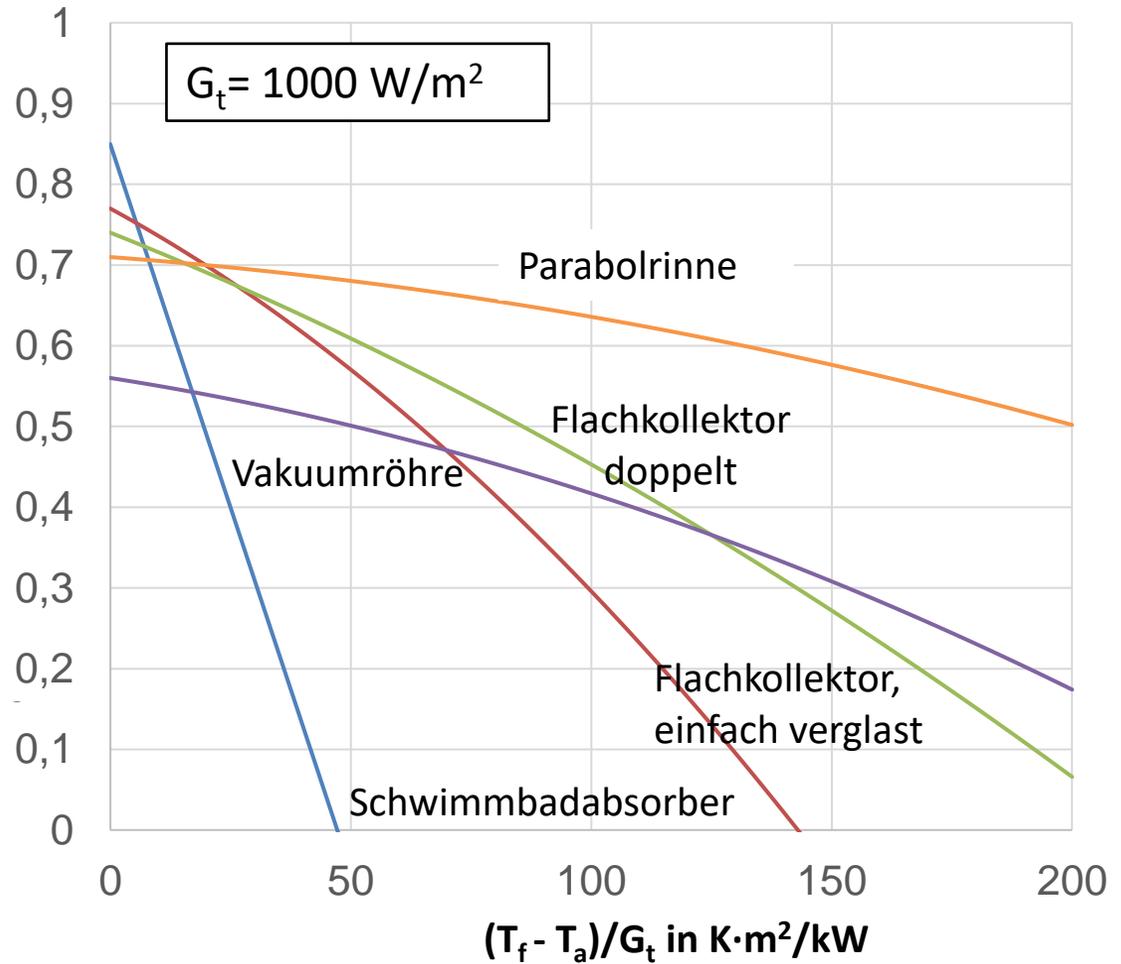


Diagr: SOLAR.UNI-KASSEL.DE

Beispiel:
ohne WÜT
 $T_a = 20^\circ\text{C}$
 $T_{ziel} = 50^\circ\text{C}$
 $G_t = 1000 \text{ W/m}^2$



Kollektorwirkungsgrad

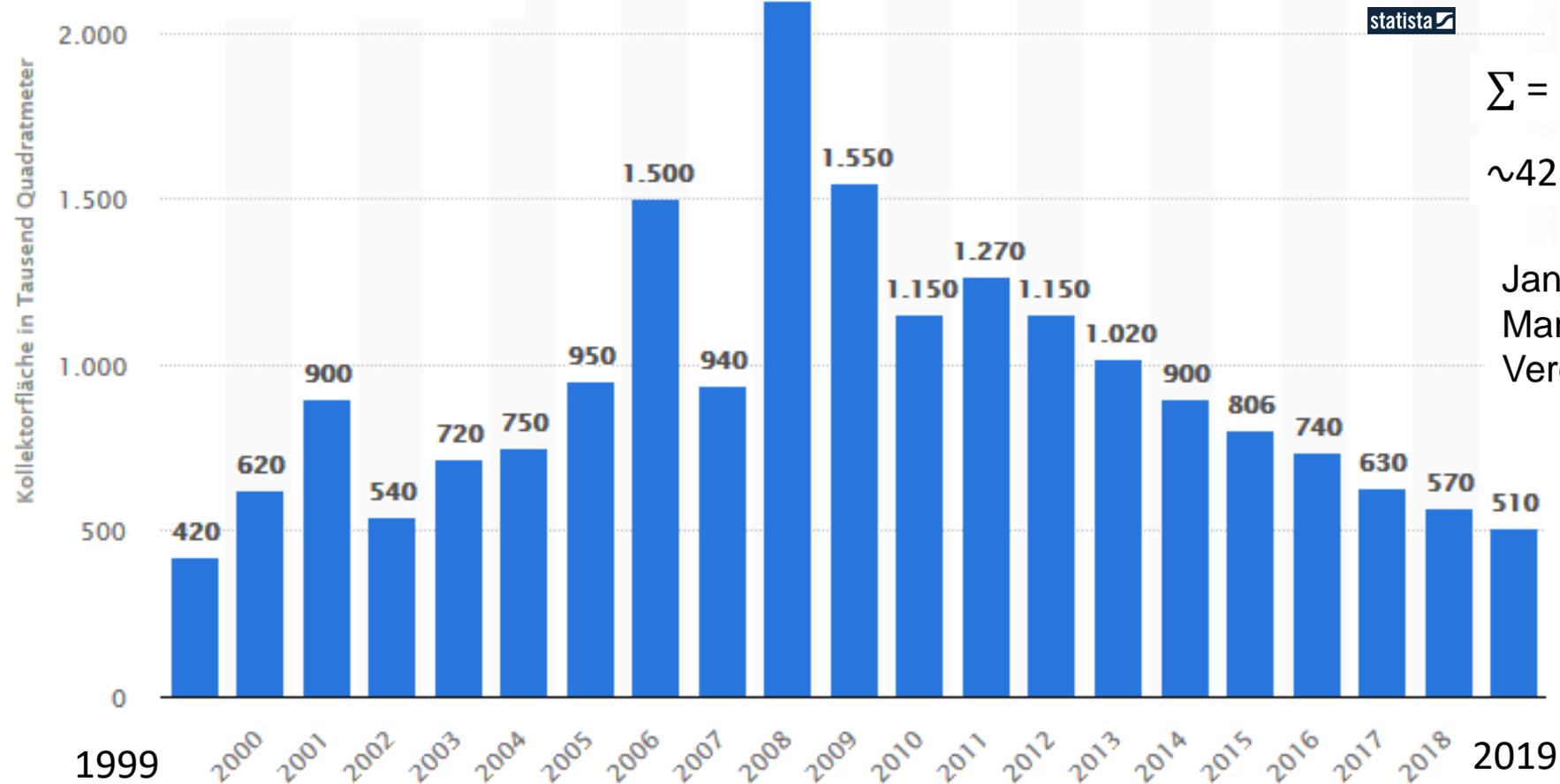


Diagr: SOLAR.UNI-KASSEL.DE

$$\eta = \frac{\dot{q}_u}{G_t} = \eta_0 - c_1 \frac{(T_f - T_a)}{G_t} - c_2 \frac{(T_f - T_a)^2}{G_t}$$

Installierte Anlagen DE

Kollektorfläche in 1000 m²



$\Sigma = 2,4$ Mio. Anlagen (DE, 2019)

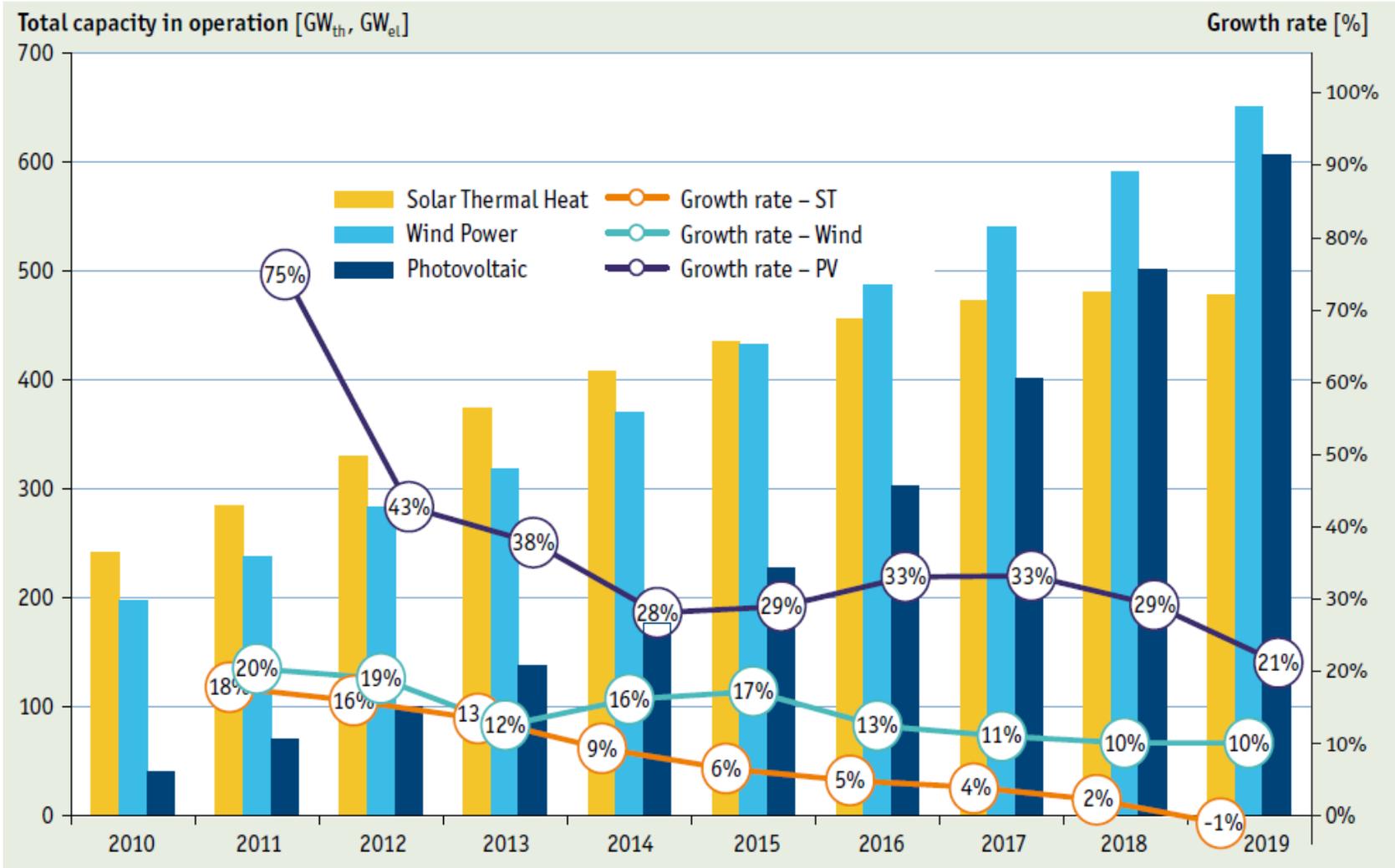
~ 42 Mio. HH \Rightarrow ca. 6%

Jan.- Aug. 2020:
Marktwachstum um 20% im
Vergleich zum Vorjahreszeitraum

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13630/umfrage/neuinstallation-von-solarthermie-anlagen-seit-1999/>

- \Rightarrow Marktrückgang um durchschnittlich mehr als 10 % im Jahr seit 2008!
- \Rightarrow Weitreichende Innovationen und Kostensenkungen sind bei diesen Bedingungen schwer möglich.

Installierte Leistung weltweit



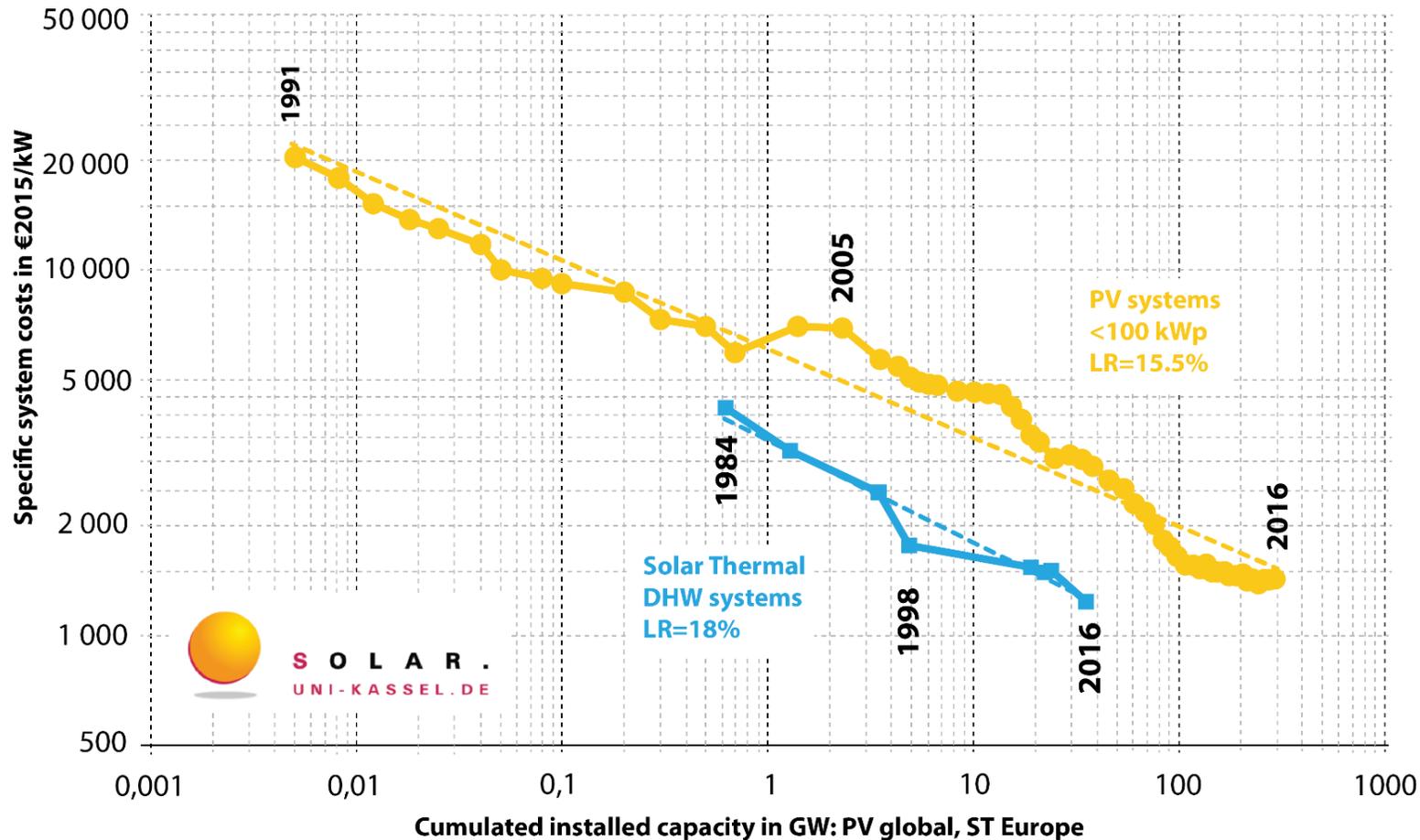
Wachstumsraten:
 PV: 75 % .. 21 %
 Wind: 20 % .. 10 %
 Thermie: 18 % .. -1 %



Quelle: (Solar heat worldwide, SHC 2020)

Aufgrund deutlich höherer Förderung: Weit höhere Wachstumsraten der PV in den letzten 10 Jahren.

Learning curves of PV and solar thermal systems in Germany



The turnkey system costs without subsidies and VAT show similar learning rates for PV and Solar Thermal. The stronger market development of PV lead, however, to larger absolute price reductions. Credits: University of Kassel 2017

Erfahrungskurve

- Doppellogarithmisch
- Verdoppelung der Produktionszahlen \Rightarrow Kostendegradation um LR

\Rightarrow Die Kostendegression solarthermischer Anlagen ist bezogen auf die installierte Leistung vergleichbar (oder sogar etwas höher) als die von PV-Anlagen!

I. Technik

Anlagentypen, Markt & Kosten

II. Herausforderungen der Wärmeversorgung

Strukturelle & politische Randbedingungen, Förderpolitik

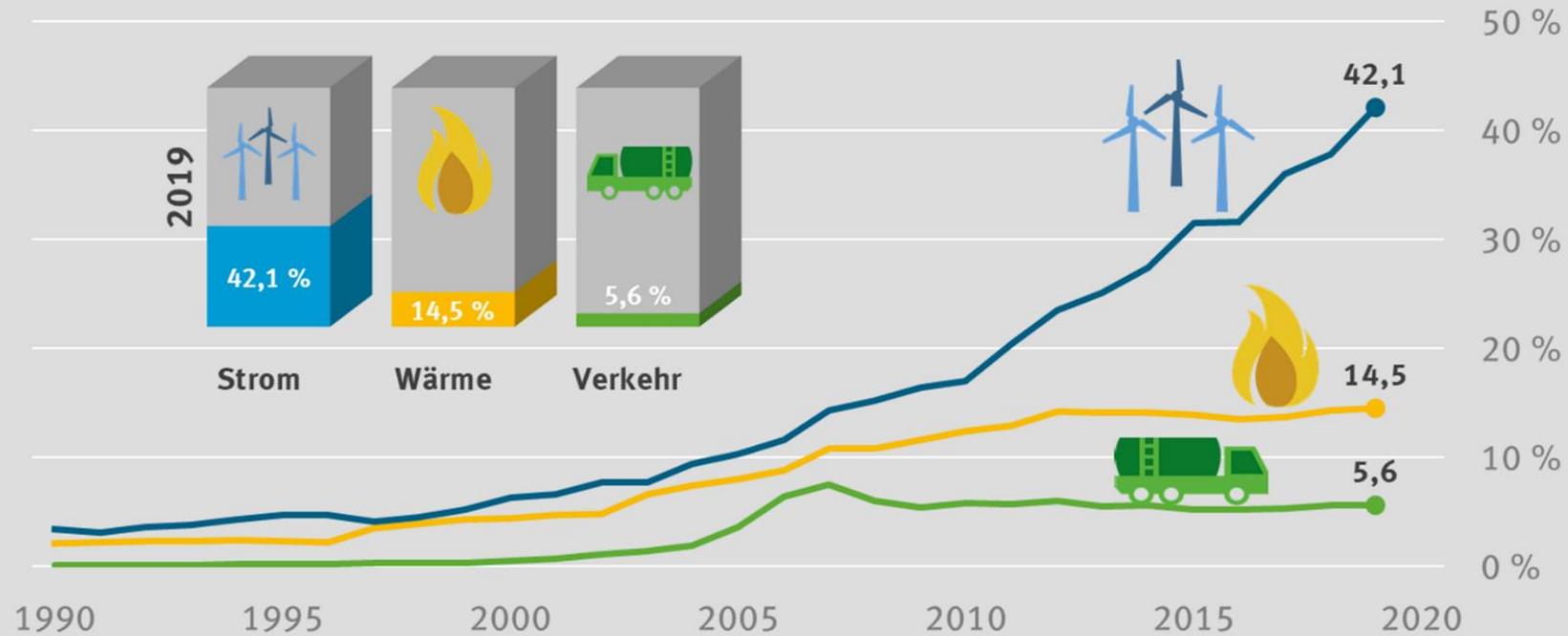
III. Konzeptvergleich

- Randbedingungen
- Vergleich Solarthermie mit PV+WP

IV. Fazit

Herausforderungen der Wärmeversorgung

Erneuerbare Energien: Anteile in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr

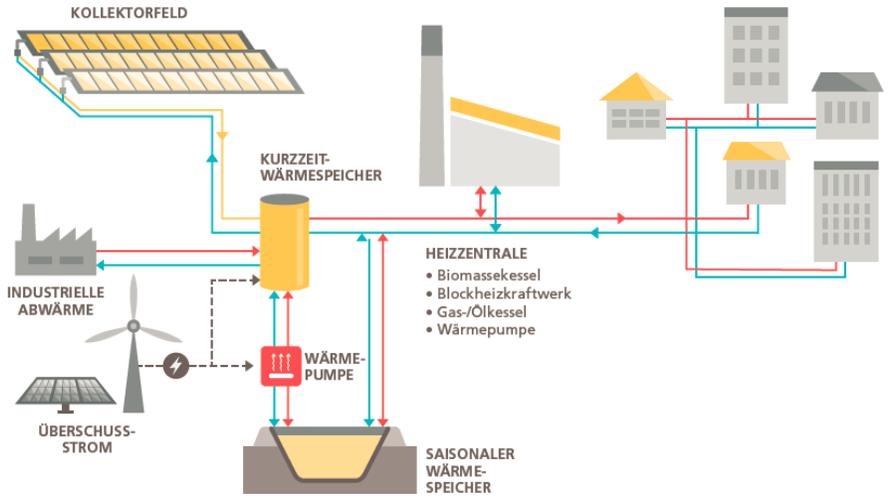


© Stiftung Energieeffizienz 2015, Daten im Sektor Strom nach FhG-ISE

Der Anteil erneuerbarer Energien im Wärmesektor ist seit ca. 8 Jahren nahezu konstant bei ca. 14 %.

Strukturelle Rahmenbedingungen

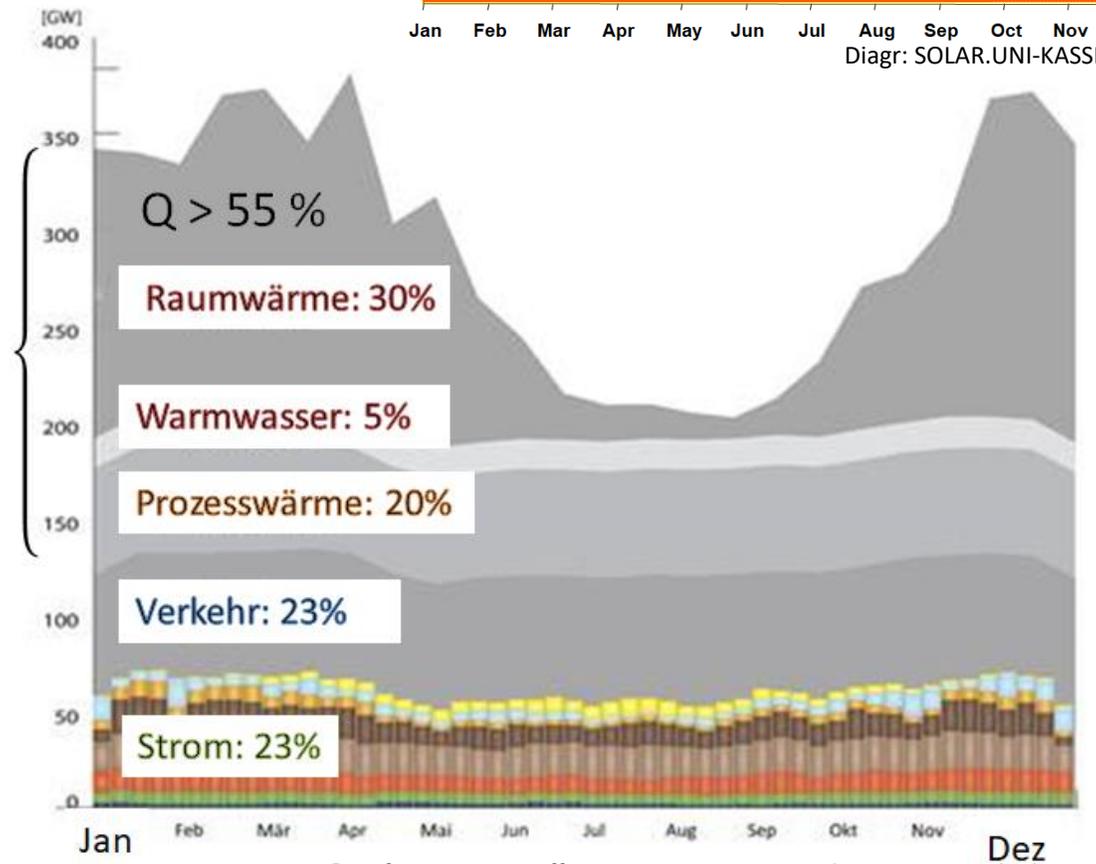
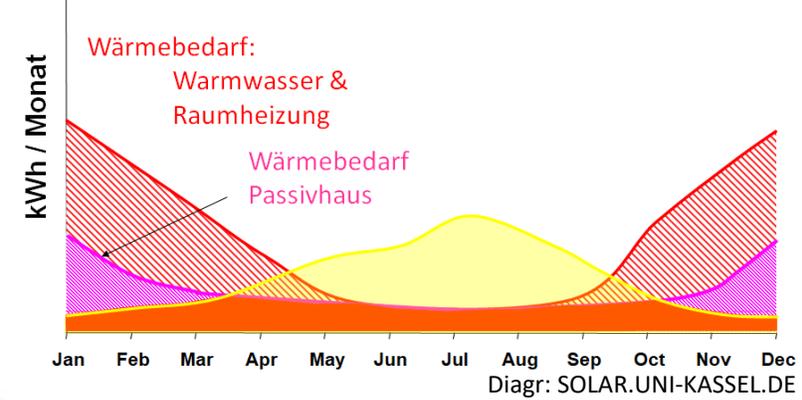
2. Netze / Speicher



3. Temperaturen

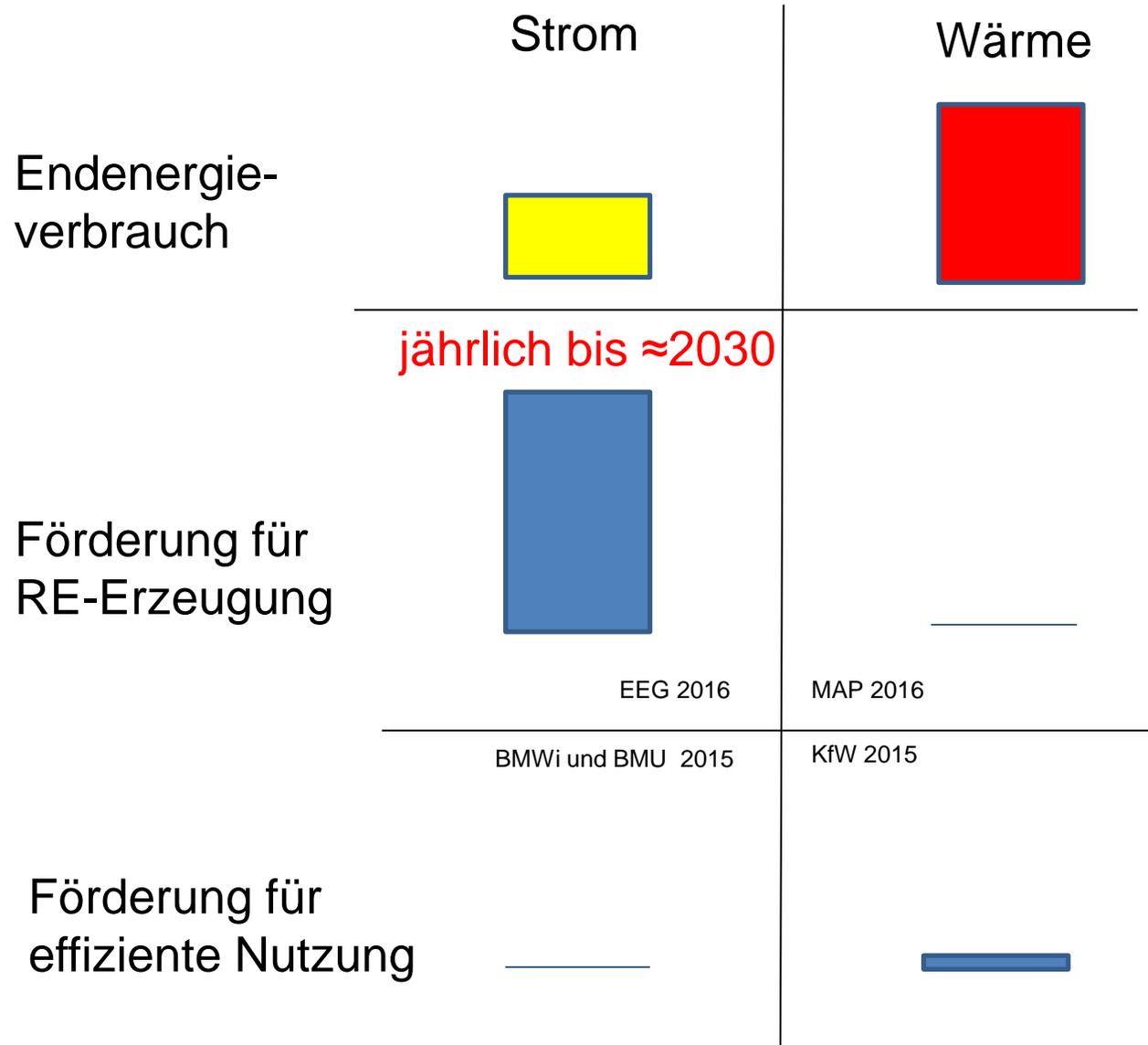
- Eingriff ins Wohnumfeld (Gebäudesanierung, Heizungsanlagen)

1. Saisonale Verteilung



© Stiftung Energieeffizienz 2015, Daten im Sektor Strom nach FhG-ISE

Förderung



RE und Effizienz: Förderung in DE

⇒ Die Förderung erneuerbarer Energien ist erzeugungsorientiert und elektrophil!

- Anreizsysteme
- Verordnungen
- Forschungsgelder

- Bürger-Energiegenossenschaften
- Tradition



Rahmenbedingungen:

- 67% Fernwärme
- > 50 % **Windstrom**
- Steuern auf fossile Energien

Zubau-Verbot von Öl- und Gasheizung

- seit 2013 in **neuen** Privathäusern
- ab 2016 in bestehenden Gebäuden,
wenn FW-Anschluss möglich

I. Technik

Anlagentypen, Markt & Kosten

II. Herausforderungen der Wärmeversorgung

Strukturelle & politische Randbedingungen, Förderpolitik

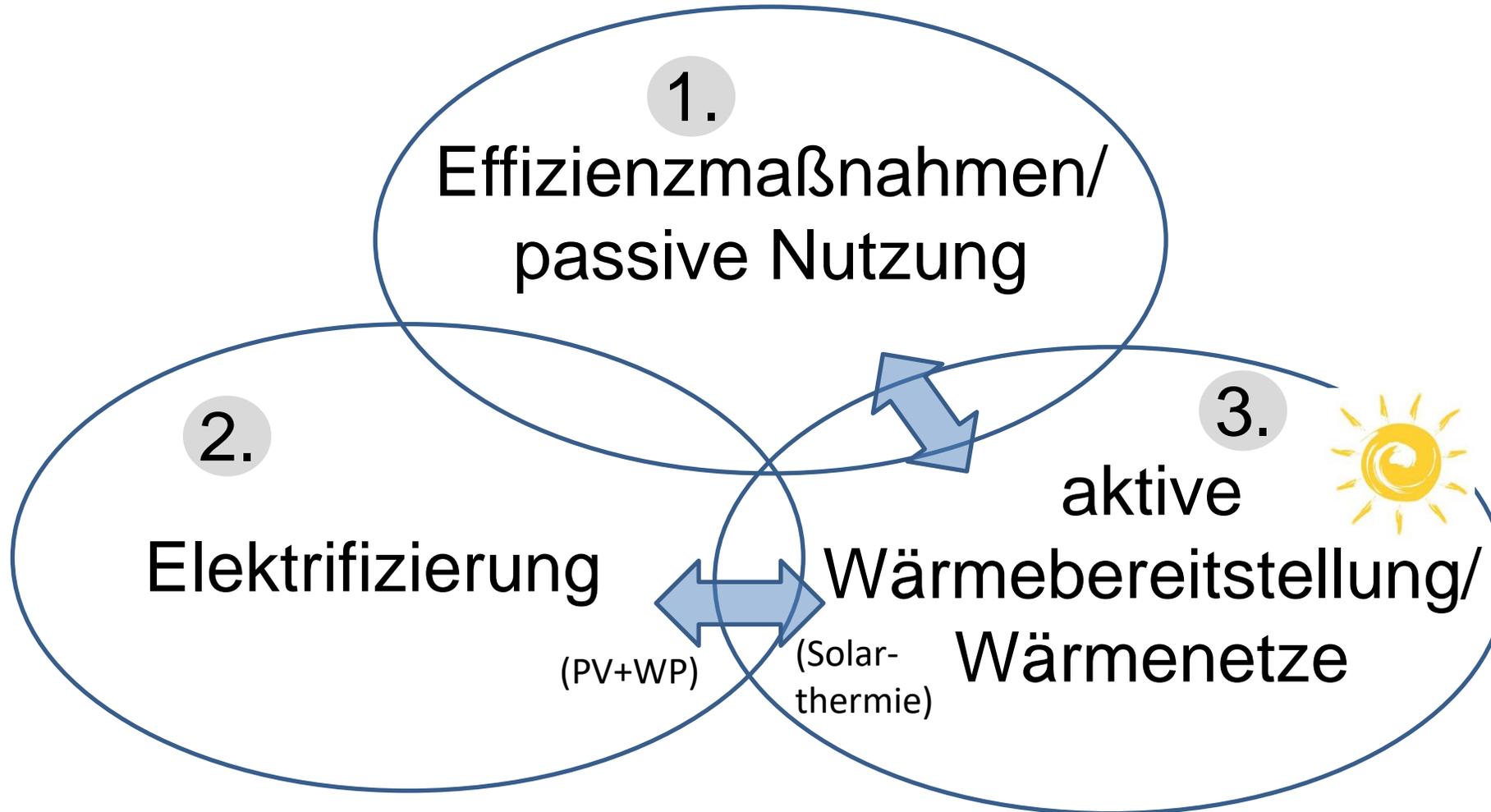
III. Konzeptvergleich

- Randbedingungen
- Vergleich Solarthermie mit PV+WP

IV. Fazit

Beitrag der Solarthermie (?)

Wir verfolgen drei grundlegende Konzepte/Ansätze:



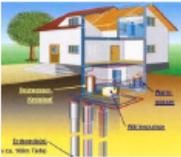
... ergänzen sich, schließen sich aber teilweise auch aus

Vergleich verschiedener Technologien

Primärenergetische Effizienzbewertung neuer Wärmepumpen

Große Unterschiede zwischen

- Nennwert / Mittelwert
(performance ratio, ε bzw. JAZ)
- Komponenten- & Systemwirkungsgraden
- alt/neu
- Entwicklungsgrad

		Fußboden- heizung	Heiz- körper
			
Erdreich (Sonden, Flächenkollektor, Grundwasser)		3,2 - 3,9 - 4,7	2,6 - 3,3 - 4,2
Außenluft		2,5 - 2,9 - 3,4	2,2 - 2,6 - 3,3

Quelle: Zwischenergebnisse zum Feldtest Wärmepumpen-Effizienz des Fraunhoferinstitut Solare Energiesysteme

Leistungsverhältnis (performance ratio)

Berücksichtigung Verschattung, Verschmutzung, Leitungs- & Wechselrichterverluste, ..

Studie Innsbruck: Solarthermie ↔ PV+WP

2 MFHs, Innsbruck, Austria



2019

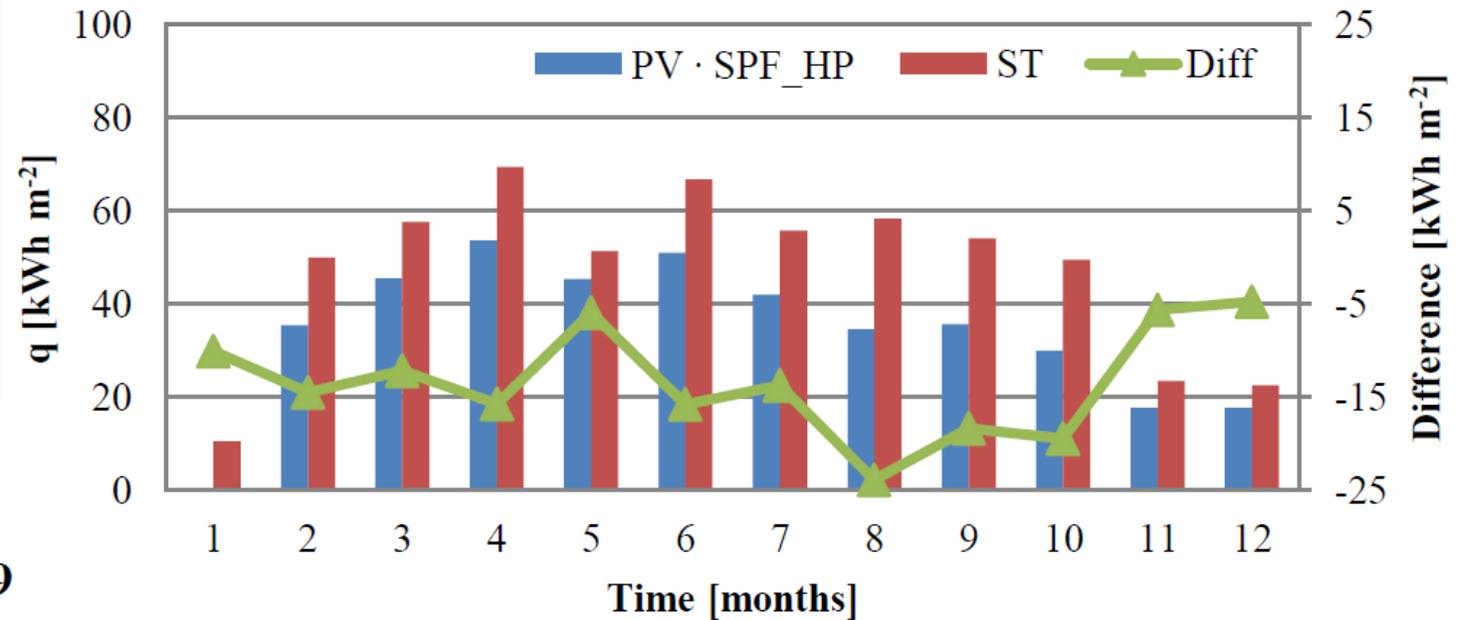
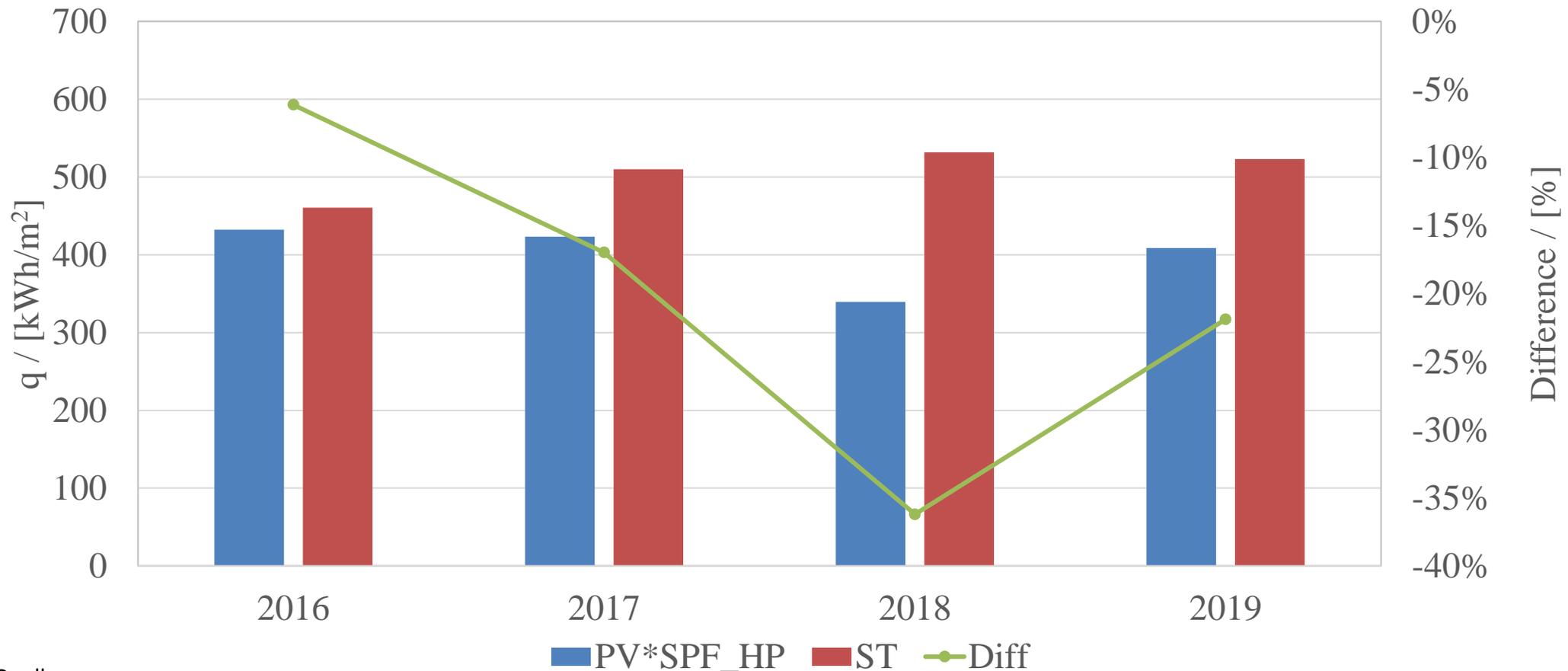


Fig. 2: Thermal energy supplied by PV driven HP and ST per installed square meter of each system (PV and ST). The produced electricity from PV is multiplied with the monthly SPF of the heat pump (including the HP related pumps)

Quelle:
G. Dermentzis et al.,
University of Innsbruck,
EuroSun Conference 2020

Solar thermal vs PV driven heat pump



Quelle:
G. Dermentzis et al.,
University of Innsbruck,
EuroSun Conference 2020

Lohnt sich Solarthermie im Vgl. zu PV+WP in Industrieprozessen ?

→ abh. von Standort, Prozesstemp. & PV-Preise

auch abh. von: Lebensdauer, ΔT (Prozess), Material, techn. Kennwerte (η_0 , U-Werte, ..), Finanzierungskosten, Anlagengröße ..

Bsp. für Zürich:

$T_{\text{prozess,m}} = 70^\circ\text{C}$ (60→80 °C)

$T_{\text{amb,day}} = 10^\circ\text{C}$

$H = 1.000 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

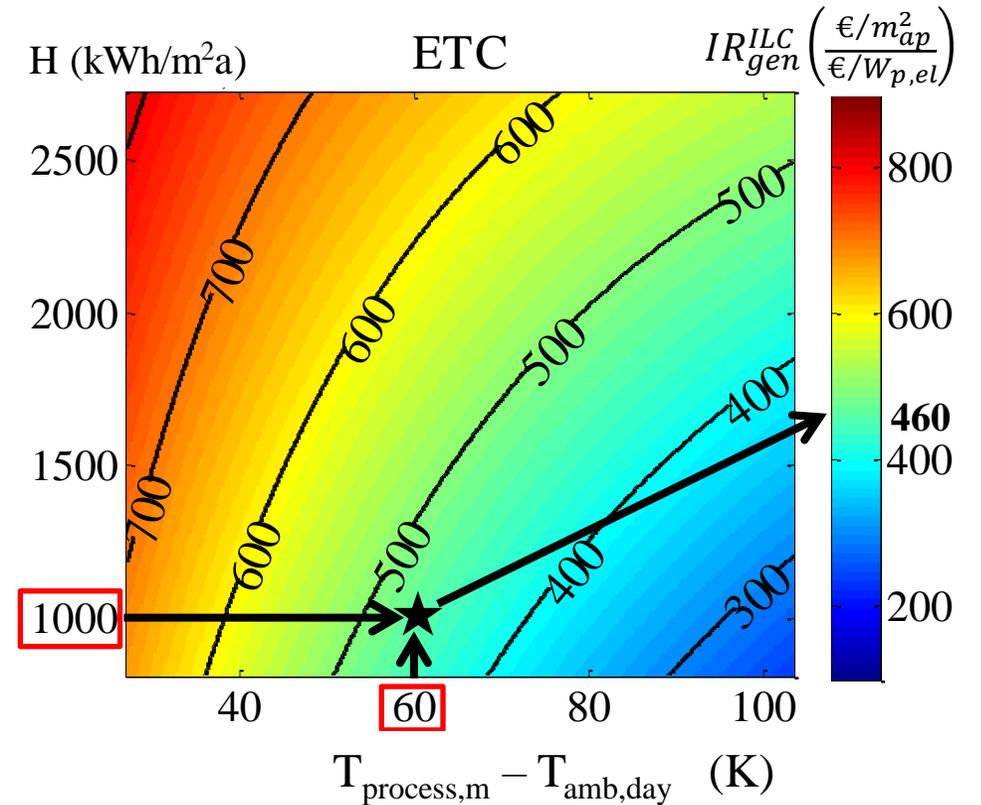
$I_{ST,max} = 460 \text{ €/m}^2_{ap}$ (für $I_{PV} := 1 \text{ €/W}_p$)

$$I_{ST} = IR * F * I_{PVWP}$$

Korrekturfaktor

- je geringer die Anzahl der Betriebsstunden, desto günstiger ist die Solarthermie
- bei höherer Einstrahlung ist tendentiell die Solarthermie im Vorteil

Kostenverhältnis Thermie/PV
in Abh. von Einstrahlung und Prozesstemp. ($\Delta T_{Pr-Umg.}$)



Steven Meyers, Univ. Kassel
SOLAR.UNI-KASSEL.DE

I. Technik

Anlagentypen, Markt & Kosten

II. Herausforderungen der Wärmeversorgung

Strukturelle & politische Randbedingungen, Förderpolitik

III. Konzeptvergleich

- Randbedingungen
- Vergleich Solarthermie mit PV+WP

IV. Fazit

- Es gibt eine große Vielfalt an Anlagentypen für verschiedene Anwendungen
- Starke Kostendegression mit steigender Anlagengröße
- Marktrückgang seit 2008
- die Erfahrungskurven für PV und Solarthermie verlaufen nahezu parallel
- Vergleich mit PV+WP: Standort- und Prozessabhängig (Temp., Lastprofile)
- Herausforderungen
 - niedriges Temperaturniveau
 - Wärmeverbrauch im Winter
 - Nachheizung erforderlich (z.B. Biomasse)

Erfolgreiche Umsetzungen

- Großanlagen & Wärmenetze
- Industrielle Prozesse
- Mittelgroße Anlagen
- Sonnenhäuser
- kleine TWW-Anlagen, Kombianlagen

- Die Solarthermie sollte einen zwar kleinen aber **wichtigen Beitrag** zur zukünftigen defossilisierten Wärmeversorgung leisten.
 - Dieser könnte bei einem Fernwärmeanteil von 40% **im Sektor Privathaushalte** gleichen solaren Deckungsraten wie in DK ($f_{sol} = 20\%$) **bei ca. 8% liegen**.
 - Studie zum technische Potential für die Nutzung solarer Prozesswärme in DE: ca. **3,6 %** des industriellen Wärmebedarfs
- Weichenstellungen in Infrastrukturmaßnahmen (Wärmenetze, Sanierung, ..), die Förderungen der Technologien und Abschaffung falscher Anreize wichtig! Dafür erscheint ein Masterplan notwendig.
- Beim Vergleich **Solarthermie mit PV+WP** sind die Ergebnisse stark von Parametern wie Prozesstemperatur, Betriebszeiten und Einstrahlung abhängig. Beide Technologien können je nach Randbedingungen klar im Vorteil sein.

Vielen Dank an das Fachgebiet Solar- und
Anlagentechnik der Universität Kassel
für die Unterstützung bei den
Vorbereitungen für diesen Vortrag
insbesondere an Prof. Dr. Klaus Vajen,
Isabelle Best, Felix Pag und Mateo Jesper!