



Low Carbon
District Heat

LOW CARBON DISTRICT HEAT

Großwärmepumpen in der Fernwärmeversorgung

Synergien schaffen: Ein Leitfaden für nachhaltige Wärmenetze mit Großwärmepumpen im Zentrum.

ZEITRAUM	01.05.2023 – 01.03.2024
FÖRDERKENNZEICHEN	03EN4041C – DME-Consult (KMU, Rosenheim)
ERSTELLT DURCH	Julian Henkel (Projektleitung DME, DME Consult)



ILK
DRESDEN



Der härteste und wichtigste Kampf des
21. Jahrhunderts wird ohne Waffen geführt.
Die Werkzeuge dieses Kampfes heißen:
Energieeffizienz, Energie sparen und
erneuerbare Energien.

- Franz Alt

INHALT

01	Einleitung	5
01.01	Motivation.....	5
01.02	Zielstellung und Aufbau	6
02	Fernwärmenetze	8
02.01	Technische Betrachtung der Fernwärme.....	8
02.01.01	Dimensionierung der Erzeuger / Gleichzeitigkeit.....	8
02.01.02	Wärmeverluste.....	10
02.01.03	Umwelttechnische Gesichtspunkte und Synergien	12
02.01.04	Resümee	14
02.02	Vorteile von Fernwärme aus Verbrauchersicht	15
02.03	Vorteile der Multivalenz	15
02.03.01	Abdeckung von Bedarfsspitzen.....	15
02.03.02	Substitution kritischer Erzeuger	16
02.03.03	Effizienter Betrieb.....	17
02.03.04	Geringere Abhängigkeit von Bezugskosten	18
02.03.05	Einbindung von Standortvorteilen / Synergien.....	18
02.03.06	Resümee	19
02.04	Entwicklungsprognose Fernwärme	20
03	Herausforderungen der Wärmepumpentechnologie	22
03.01	Das Kältemittel	22
03.02	Effizienz der Wärmeerzeugung	23
03.03	Praxisbeispiele	25
04	Optionen der erneuerbaren Energieerzeugung.....	26
04.01	Mögliche erneuerbare Erzeuger	26
04.02	Einstufung solarer Energieerzeugung	27
04.02.01	Synergien bei der Flächennutzung	28
04.02.02	Autarkie und Preisstabilität	28
04.02.03	Vergleich der Energieerzeuger	29
04.02.04	Wärmeerzeugung: Solarthermie vs. Photovoltaik plus Wärmepumpe	32
04.02.05	Resümee	35
04.03	Saisonal-Wärmespeicher.....	37
04.04	Einstufung biogener Energieträger.....	41
04.04.01	Umwelttechnische Kritik an der Nutzung von Holz	41
04.04.02	Umwelttechnische Kritik an der Nutzung von Energiepflanzen	43
04.04.03	Hinweis zum Ausbau biogener Energieträger	43
04.04.04	Flächeneffizienz.....	45

04.04.05	Resümee	45
04.05	Einstufung von Wasserstoff	48
04.06	Abwärme (Industrie, Tiefengeothermie und KWK)	51
05	<i>Ausblick und Fazit.....</i>	<i>54</i>
05.01	Ausblick	54
05.01.01	Nutzung in Kältenetzen	54
05.01.02	Nutzung in kalten Fernwärmenetzen	57
05.01.03	Exkurs Prosumer.....	59
05.01.04	Synergien im Bereich der Sektorkopplung.....	59
05.01.05	Resümee	61
05.02	Fazit	61
	<i>Literaturverzeichnis</i>	<i>I</i>
	<i>Softwareverzeichnis</i>	<i>XI</i>
	<i>Rechtsquellenverzeichnis.....</i>	<i>XII</i>
	<i>Glossar und Abkürzungsverzeichnis</i>	<i>XIII</i>
	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	<i>XIV</i>
	<i>Tabellenverzeichnis.....</i>	<i>XV</i>
	<i>Anhang.....</i>	<i>XVI</i>

01 EINLEITUNG

Folgende Arbeit ist Teil des Projekts „Low Carbon District Heat - Groß-Wärmepumpe für Wärmenetz 4.0“ oder kurz „LoCarDi“. Ziel des Projektes ist die innovative Konzeption von Großwärmepumpen für die Transformation der Wärmeversorgung von bestehenden Quartieren und Gebäuden. Wärmenetze 4.0 beschreiben hierbei die vierte Generation von Fernwärmenetzen (vgl. Kapitel 02.04).

Im Folgenden soll die Motivation dieser Arbeit sowie deren Zielstellung und Aufbau beschrieben werden.

01.01 Motivation

Die technischen Grundprinzipien und einzelnen Komponenten von Wärmepumpen sind seit langem etabliert und haben sich auf dem Markt bewährt. Aktuell erleben Wärmepumpen jedoch als Mittel der Wahl zur Beheizung des deutschen Wohnungsbestandes sowie -neubaus eine Renaissance. Die Nachfrage übersteigt das Angebot bei weitem, weshalb in einschlägigen Medien sogar von einem regelrechten „Hype“ gesprochen wird¹. Die Gründe hierfür sind vielseitig, wobei u. a. Förderanreize im Rahmen der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) und die Vorschrift zur (Teil-)Nutzung erneuerbarer Energien im Gebäudeenergiegesetz (GEG) stark dazu beigetragen haben. Auch signifikante Preisschwankungen fossiler Energieträger sowie die sich verschlechterten internationalen Beziehungen zu vielen Herkunftsländern von Öl und Gas sind ein wesentlicher Faktor hierfür. Zusätzlich wird vielen Deutschen Klimaschutz zunehmend zu einem persönlichen Anliegen.

Nach Erhebungen des „Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft“ (BDEW) sollten Neubauten im Jahr 2022 erstmals zu mehr als der Hälfte mit Wärmepumpen ausgestattet werden (2013 waren es lediglich 22,5 %). Zeitgleich nutzen immerhin bereits 3 % des Wohnungsbestandes eine Wärmepumpe². Bei der Zusammensetzung der Erzeugerstruktur von Fernwärmenetzen zeichnet sich aktuell jedoch ein anderes Bild. Im Jahr 2020 lag der Anteil von Wärmepumpen in Fernwärmenetzen bei weniger als 1 % und das, obwohl das „Umweltbundesamt“ davon ausgeht, dass 2030 zwischen 8 % und 10 % der erzeugten Fernwärme aus Wärmepumpen stammen könnten³. Etwas optimistischer sieht diesen Sachverhalt der „Bundesverband Erneuerbare Energie“ (rund 14 % bis 2030) und prognostiziert sogar bis 2045 einen Wärmepumpenanteil von über 20 %⁴ (Abbildung 01-1 linke Seite). Das „Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung“ geht sogar von 58 % im Jahr 2030 und rund 70 % 2045 aus⁵ (Abbildung 01-1 rechte Seite).

¹ Vgl. Capital (Hrsg.), 2022.

² Vgl. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (Hrsg.), 2023a, S. 50f.

³ Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.), 2021a, S. 186 (Analyse auf Basis von Daten der Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES gmbH)).

⁴ Vgl. Bundesverband Erneuerbare Energie (Hrsg.), 2022, S. 12.

⁵ Vgl. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (Hrsg.), 2022a. (Im Szenario T45-Strom, welches auf eine starke Elektrifizierung des Energiesystems setzt, um Treibhausgasneutralität zu erreichen. In den anderen Szenarien weichen die Prozentsätze leicht ab.)

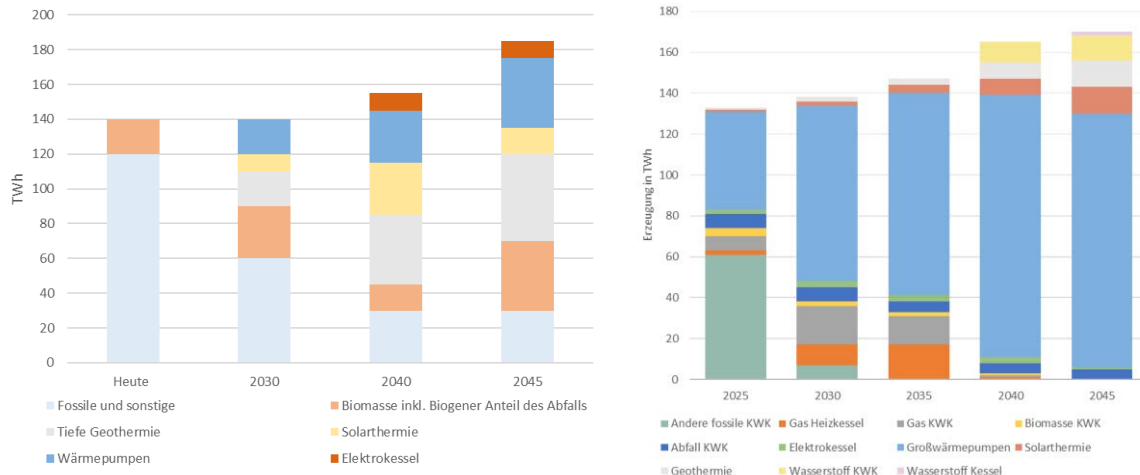


Abbildung 01-1: Prognosen zum Anteil von Großwärmepumpen an der Wärmeproduktion⁶

Auch wenn die Prognosen voneinander abweichen, der Trend hin zu mehr Wärmepumpen in Fernwärmenetzen ist unverkennbar, unabhängig davon, welche Einschätzung man teilt. Entsprechend soll an dieser Stelle, die im Rahmen dieser Arbeit zu beweisende These formuliert werden:

„Großwärmepumpen werden u. a. aufgrund ihres hohen Potenzials positive Synergien zu schaffen, in Zukunft vor allem in Fernwärmenetzen einen signifikanten Einfluss auf die Energiewende und die Umsetzbarkeit von Fernwärmeprojekten nehmen“

01.02 Zielstellung und Aufbau

Ziel dieser Arbeit ist es, Anwendungsbereiche für Großwärmepumpen zu identifizieren, wobei ein Fokus auf die Integration in Fernwärmenetz-Strukturen gelegt wird. Chancen und Hemmnisse von Großwärmepumpen aus umwelt- und effizienztechnischer Sicht werden aus dem direkten Vergleich zu alternativen Wärmeerzeugern erarbeitet. Auch werden mögliche Synergieeffekte, welche einerseits aus der Kombination mit erneuerbaren Energieerzeugern und andererseits im Bereich der Kopplung des Wärme- und Stromsektors entstehen können, aufgezeigt. Sämtliche Betrachtungen werden vor dem Hintergrund sinkender Vorlauftemperaturen basierend auf dem steigenden Sanierungsgrad von Gebäuden („Niedertemperatur-Readiness“) durchgeführt.

Diese Arbeit soll als wissenschaftlich fundierter Leitfaden für Wärmenetzbetreibende verstanden werden, welcher zur Konzeption für den Anwendungsfall optimierter Einsatzszenarios genutzt werden kann. Zudem soll sie dem Wärmenetzbetreibenden die bereits hohe und künftig steigende Relevanz von Großwärmepumpen vor Augen führen und als interne Entscheidungsgrundlage für die Transformation bestehender Wärmenetze hin zur klimaneutralen Wärmeversorgung dienen.

Der Leitfaden untergliedert sich in mehrere Bereiche. Zuerst schafft er eine Basis für das Verständnis der grundlegenden Inhalte, indem er Potenziale von Fernwärmenetzen darlegt und begründet, weshalb multivalente Erzeugerstrukturen, also die Kombination mehrerer Wärmeerzeuger, häufig monovalenten Varianten vorzuziehen sind.

⁶ Linke Grafik in enger Anlehnung an: Bundesverband Erneuerbare Energie (Hrsg.), 2022, S. 12; Rechte Grafik: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (Hrsg.), 2022a.

Anschließend betrachtet er die Herausforderungen der Wärmepumpentechnologie näher. Auf dieser Grundlage werden erneuerbare Alternativen zur Wärmepumpe aufgelistet und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile analysiert. Zudem werden im Rahmen eines Zukunftsausblicks weitere Einsatzmöglichkeiten von Großwärmepumpen inklusive möglicher Synergieeffekte mit Fernwärmenetzen beschrieben sowie Potenziale im Bereich der Sektorkopplung aufgezeigt. Abschließend erfolgt ein Fazit.

02 FERNWÄRMENETZE

In Kapitel 02 werden zuerst technische Vor- und Nachteile von Fernwärmenetzstrukturen im Vergleich zu Individualheizungslösungen beschrieben. Darauf aufbauend werden die Vorteile der Fernwärmeversorgung aus Verbrauchersicht gelistet. Zudem wird die optimale Konzeption der Wärmeerzeuger in Fernwärmenetzen im Allgemeinen analysiert bzw. die Vorteile multivalenter Netze beschrieben, bevor eine Prognose zur Zukunft der Fernwärmeversorgung getroffen wird.

02.01 Technische Betrachtung der Fernwärme

Aus technischer Sicht sprechen viele Punkte für aber auch einige wichtige gegen die Fernwärmeversorgung von Quartieren. Diese Aspekte sollen unter folgenden Überbegriffen zusammengefasst werden:

- Dimensionierung der Erzeuger / Gleichzeitigkeit
- Wärmeverluste
- Umwelttechnische Gesichtspunkte
- Synergien im Quartier

Es ist wichtig zu beachten, dass neben den aufgeführten Faktoren eine Vielzahl weniger relevanter⁷ Aspekte existiert, die in dieser Arbeit nicht näher behandelt werden.

Um die Ergebnisse der Betrachtung in Relation setzen zu können, wird in diesem Kapitel die zentrale Wärmeversorgung mittels Fernwärme mit der dezentralen Wärmeerzeugung verglichen. Basis ist ein hypothetisches Quartier bestehend aus Wohnhäusern mit einem Wärmebedarf, der in der Installation gängiger privater Heizungslösungen (< 100 kW) resultiert.

02.01.01 Dimensionierung der Erzeuger / Gleichzeitigkeit

Einer der gewichtigsten Vorteile der Fernwärmeversorgung liegt in der geringeren benötigten kumulierten Erzeugerleistung. Grund hierfür ist die sogenannte Gleichzeitigkeit. Diese beschreibt, dass innerhalb eines Fernwärmenetzes mit ausreichend Verbrauchern zu keinem Zeitpunkt von allen Kunden die volle, ihnen vertraglich zur Verfügung stehende Leistung abgerufen wird. In Folge muss signifikant weniger Erzeugerleistung installiert werden als bei einer dezentralen Alternative. Ein Beispiel verdeutlicht dies: In einem Quartier mit 100 gleich großen Verbrauchern (15 kW) werden entsprechend 100 Wärmeerzeuger mit jeweils 15 kW Erzeugerleistung installiert, was in einem kumulierten Leistungsbedarf von 1.500 kW resultiert. Würde anstelle der dezentralen Versorgung unter Vernachlässigung von Leitungsverlusten ein Fernwärmenetz betrieben, würde nur rund das 0,6-fache der Erzeugerleistung, also 900 kW benötigt.

⁷ Aus Sicht der DME Consult, dem diese Arbeit verfassenden Unternehmen, basierend auf deren Praxiserfahrung im Fernwärmekontext.

Der Faktor 0,6, welcher den oben beschriebenen Sachverhalt der zeitlich abweichenden Wärmebedarfe beschreibt, wird in diesem Kontext „Gleichzeitigkeitsfaktor“ genannt. Dieser wird häufig auf Basis von 1998 bis 1999 erhobenen Daten zweier Fernwärmenetze von Winter und Kollegen wie folgt angenähert⁸:

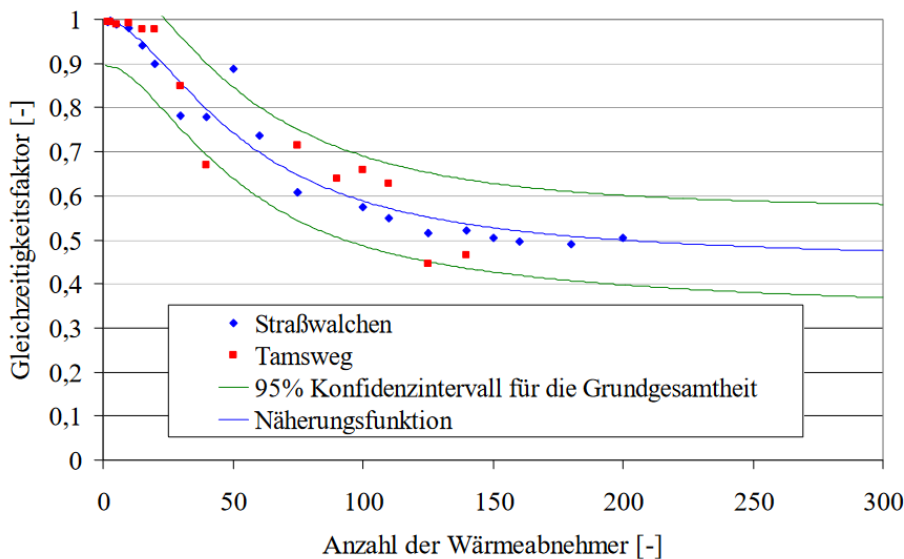


Abbildung 02-1: Gleichzeitigkeitsfaktor nach Winter und Kollegen⁹

Auch aktuelle Planungshandbücher¹⁰ oder Softwarelösungen¹¹ beziehen sich häufig noch auf diese Annäherung, was zeigt, dass sie bis heute im Praxiskontext für erste Dimensionierungen der benötigten Erzeugerleistung herangezogen werden kann. Es sei darauf hingewiesen, dass bspw. ein durch die COVID-19-Pandemie gesteigener Homeoffice-Anteil oder die vermehrte Verbreitung von Fußbodenheizungen mit hohen Vollbenutzungsstunden und entsprechend hoher Gleichzeitigkeit bei Nutzung dieser Datenbasis nicht beachtet wird.

Auf einen etwas differenzierter Ansatz greift der Softwarehersteller „h2x“ zurück, indem er unter Berufung auf Daten der „Chartered Institution of Building Services Engineers“ (CIBSE) zwischen der Gleichzeitigkeit für Trinkwarmwasser und Raumwärme unterscheidet¹²:

⁸ Vgl. Winter, Haslauer, Obernberger, 2001, S. 3f.

⁹ Winter, Haslauer, Obernberger, 2001, S. 12.

¹⁰ Beispielhaft: Vgl. Arbeitsgemeinschaft QM Fernwärme (Hrsg.), 2021, S. 107.

¹¹ Beispielhaft: Vgl. nPro Energy (Hrsg.), o. D.

¹² Vgl. h2x Engineering, o. D. unter Berufung auf Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) (Hrsg.), 2020.

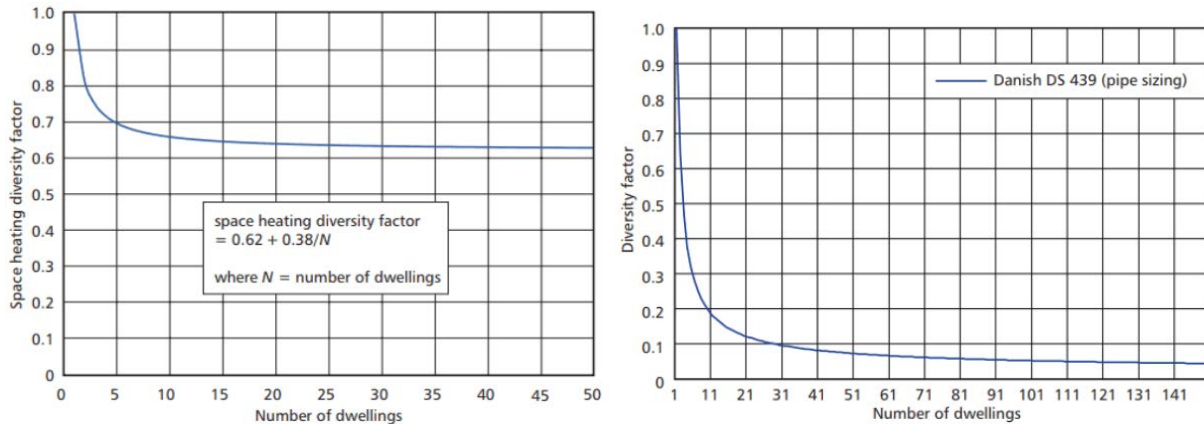


Abbildung 02-2: Gleichzeitigkeitsfaktoren für Raumwärme (links) und Trinkwarmwasser (rechts)

Diese Unterscheidung ist besonders wichtig, wenn Gebäude mit geringem Heiz- und einem hohen Trinkwarmwasserbedarf, wie zum Beispiel Sporthallen, Teil des Quartiers sind.

In der Umsetzungspraxis hat sich für die DME Consult zudem die Differenzierung nach Gebäudetypen wie bspw. von Röder und Kollegen vorgeschlagen¹³, innerhalb des Quartiers bewährt. So werden bei der Planung verschiedene Gebäudetypen, wie bspw. Einfamilienhäuser (mit und ohne Fußbodenheizung), Mehrfamilienhäuser (mit und ohne Fußbodenheizung), Büros etc., zusammengefasst und unter Annahme einer auf Leistungsbedarf, Trinkwarmwasserbedarf etc. basierenden Gleichzeitigkeit simuliert. Die resultierenden Simulationen werden anschließend addiert. Auf diese Weise wird dem Umstand Rechnung getragen, dass z. B. Wohnhäuser ohne Fußbodenheizung (bei geringem Homeoffice- und Teilzeit-Anteil der Bewohner) den Hauptwärmebedarf in den Morgen- und Abendstunden haben, Wohnhäuser mit Fußbodenheizung tendenziell an kalten Tagen häufig kontinuierlich heizen, Büros während des Tages am meisten Wärme benötigen etc. Das Verhältnis des auf die einzelnen Gebäudetypen entfallenden Wärmebedarfs kann so in die sich ergebende Gleichzeitigkeit und somit Planung übernommen werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die Wärmeverluste. Da diese (v. a. Trassenverluste) kontinuierlich auftreten, sollten sie immer in die Gleichzeitigkeitsbetrachtung eines Wärmenetzes inkludiert werden.

02.01.02 Wärmeverluste

Bei der Wärmeerzeugung und -verteilung entstehen in Fernwärmenetzen aber auch in privaten Heizsystemen signifikante Wärmeverluste. Diese werden unter den folgenden Punkten subsumiert:

- Bei der Umwandlung des Energieträgers in Wärme (Wirkungsgradverluste)
- Beim Transport vom Erzeuger zur Netz- bzw. Umwälzpumpe (Verluste vor Pumpe)
- Am Pufferspeicher (Pufferspeicherverluste)
- In den verlegten Rohren (Netz- bzw. Leitungsverluste)

Da vor allem vermeidbare Wärmeverluste relevant für eine Aussage über die Vor- und Nachteile einer Fernwärmelösung sind, werden die Verluste der zentralen Wärmeversorgung mit jenen der dezentralen verglichen.

¹³ Vgl. Röder et al., 2021, S. 12.

Im Generellen lässt sich bzgl. der Wirkungsgradverluste konstatieren, dass je mehr Wärme ein Erzeuger produziert, auch die absoluten Wirkungsgradverluste steigen und somit nutzbare und vor allem monetarisierbare Wärme verloren geht. In Folge werden bei großen Erzeugern insbesondere in Fernwärmenetzen Lösungen, welche den Wirkungsgrad erhöhen lukrativ und können so zu einer höheren Effizienz bzw. zu geringeren Wärmegestehungskosten beitragen¹⁴.

Die Verluste vor der Netzpumpe in Fernwärmenetzen bzw. der Umwälzpumpe bei der dezentralen Wärmeerzeugung hängen u. a. stark von der Positionierung der Bauteile¹⁵ und der Isolation der Rohre zwischen Erzeuger und Pumpe ab. In der Umsetzungspraxis der DME Consult fallen in beiden Fällen zumeist Verluste kleiner 2 % der erzeugten Wärme an.

Auch ein konkreter Vergleich zwischen der Pufferspeicherlösung der Fernwärme- und der privaten Wärmeversorgung ist pauschal nicht anstellbar. Es lässt sich jedoch sagen, dass Pufferspeicher in Fernwärmenetzen zumeist in Außenbereichen installiert werden und auch bei Installation innerhalb eines Gebäudes dieses zumeist nicht beheizt ist. In Folge steigern negative Außentemperaturen und Wind die Wärmeverluste des Puffers weit stärker als bei einer privaten Heizungsanlage in einem u. U. aufgrund von Wirkungsgradverlusten bereits warmen Raum. Auf der anderen Seite ist die Oberfläche eines großen Wärmenetz-Pufferspeichers weit geringer als die Oberflächensumme der durch diesen substituierten dezentralen Puffer (siehe hierzu Kapitel 04.03). Da größere Oberflächen zu höheren Verlusten führen, fällt der Vergleich an dieser Stelle zugunsten des zentralen Puffers aus. Substituiert bspw. ein Großpufferspeicher¹⁶ bei -10 °C Außentemperatur 100 dezentrale Puffer mit einem kumuliert vergleichbaren Volumen¹⁷, gleicher Fülltemperatur, gleichem Wärmedurchgangskoeffizient bei 10 °C Umgebungstemperatur, so sind die Verluste des Großpufferspeichers nur rund ein Drittel der dezentralen Alternative¹⁸.

Der größte Nachteil der Fernwärmeversorgung sind deren Netzverluste. Trotz Isolierung der Fernwärmeleitungen wird ein signifikanter Anteil der erzeugten Wärme an das Erdreich abgegeben. Die „Deutsche Umwelthilfe“ hat 2022 75 Fernwärmenetze mit einer Gesamteinspeisung von 70 TWh (dies entspricht rund der Hälfte der Gesamtwärmeerzeugung in Wärmenetzen der öffentlichen Versorgung in Deutschland) untersucht und kommt zu dem Schluss, dass in den meisten Netzen 10 % bis 20 % der ins Netz eingespeisten Wärme verloren gehen (siehe hierzu Abbildung 02-3)¹⁹. Die starke Streuung hängt primär mit der Belegungsdichte an der Fernwärmetrasse (Abnahme pro Meter Trasse) und der benötigten Vorlauftemperatur zusammen.

¹⁴ Beispiele sind: Der Einsatz mehrerer Kältemittel bei Großwärmepumpen, Wärmerückgewinnungsanlagen für die Abgase von Biomassekesseln oder lediglich die Nutzung effizienterer und somit kostenintensiverer Bauteile.

¹⁵ Insb. des Pufferspeichers sofern vorhanden.

¹⁶ Mit einem Durchmesser von rund 4,5 m, einer Höhe von 10 m und daraus resultierend einem Volumen von rund 160 m³, gefüllt mit 60 °C heißem Wasser.

¹⁷ Ca. 1 m Durchmesser, 2 m Höhe.

¹⁸ Die Verluste wurden unter der Vernachlässigung von Wind mit der Formel: Verluste = Oberfläche * Wärmedurchgangskoeffizient * Temperaturunterschied (Verluste = O*U* ΔT) berechnet.

¹⁹ Vgl. Deutsche Umwelthilfe (Hrsg.), 2022, S. 2.

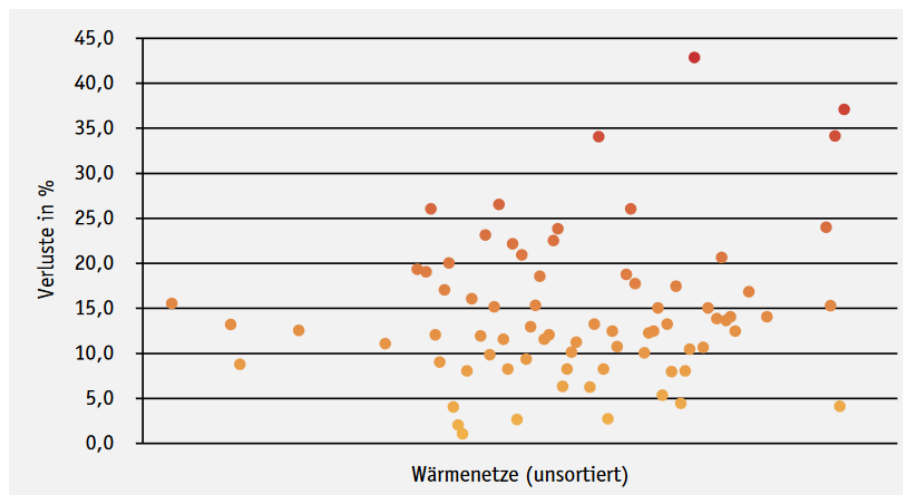


Abbildung 02-3: Trassenverluste von 75 untersuchten Wärmenetzen²⁰

Vor diesem Hintergrund ist auch die Problematik anzusprechen, dass Fernwärmenetze auf den Nutzer mit den höchsten Anforderungen an die Vorlauftemperatur ausgelegt werden müssen. Umfasst ein Quartier Industrie- sowie Privatkunden mit Anforderungen von 90 °C und 60 °C, so muss das Netz, sofern bei den Industriekunden keine (häufig kostenintensive) dezentrale Steigerung des Temperaturniveaus erfolgt, mit 90 C im Vorlauf betrieben werden. Dies steigert in Folge die Wärmeverluste der Trasse.

Im Kontext dieses Kapitels ist allerdings darauf hinzuweisen, dass bei Heizungsanlagen in Wohnhäusern der Begriff Verluste zu Missverständnissen führen kann. In diesem Kapitel ist damit die Wärmeabgabe an die umgebende Luft an Stellen gemeint, an denen dies nicht der Intention der Konzeption der Heizungsanlage entspricht. Ist der „Heizraum“ (inkl. Puffer) oder sind die Leitungen anliegend zu Wohnräumen, so wird die Wärme an diese abgegeben und erfüllt somit trotzdem einen Heizzweck. In Konklusion ist eine allgemeingültige Bestimmung der Wärmeverluste in Wohnhäusern nicht sinnvoll bzw. nur unter sehr hohem Aufwand als Mittel untersuchter repräsentativer Einzelfälle möglich. Aus diesem Grund und da eine detaillierte Betrachtung von Wärmeverlusten in Wohnhäusern nicht der Zielstellung dieser Arbeit entspricht, wird hierauf nicht detaillierter eingegangen. Das gilt vor allem, da Leitungsverluste innerhalb des Gebäudes und (in geringerer Form) die Verluste vor der Umwälzpumpe sowohl bei einem Versorgungsszenario mittels Fernwärme als auch bei der privaten Heizungsanlage anfallen.

02.01.03 Umwelttechnische Gesichtspunkte und Synergien

Vergleicht man die dezentrale Wärmeerzeugung mit der zentralen Fernwärmeversorgung unter umwelttechnischen Gesichtspunkten, so sind in diesem Kontext vor allem die Materialaufwendungen und die Möglichkeiten zur Senkung von negativen Umwelteinflüssen in Relation zu setzen. Die in diesem Kapitel getroffenen Aussagen basieren auf der langjährigen Projekterfahrung der DME Consult.

Kommen bei der Wärmeerzeugung Wärmepumpen zum Einsatz, so ist es speziell bei Großwärmepumpen technisch und wirtschaftlich leichter umsetzbar, ein Kältemittel mit geringem „Global Warming Potential²¹“ (GWP) zu

²⁰ Deutsche Umwelthilfe (Hrsg.), 2022, S. 2.

²¹ Häufig verkürzt auf GWP, zu Deutsch: Treibhauspotential.

nutzen²² (vgl. Kapitel 03.01). Auch nutzt eine Großwärmepumpe nur einen Bruchteil der Menge an Kältemittel, welche die diese substituierenden dezentralen Wärmepumpen in Summe benötigen würden. Der Effekt der Gleichzeitigkeit verstärkt dies noch (vgl. Kapitel 02.01.01). Bei Einsatz von Grundwasserwärmepumpen kann zudem ein einzelner zentraler Brunnen mit weit weniger Aufwand bzgl. geltender Auflagen kontrolliert werden als mehrere dezentrale Bohrungen. Bei bspw. zentralen Biomasse- oder Gaskesseln, also Wärmeerzeugern, welche schädliche Emissionen in Form von Abgasen in die Umwelt abgeben, werden in der Regel bzw. gemäß den geltenden rechtlichen Anforderungen Filter verbaut, die diese Abgase reinigen. Bei dezentralen Installationen ist dies häufig nicht der Fall bzw. nicht gesetzlich vorgeschrieben. Zudem ist die zentrale Abgasreinigung und die damit verbundene Entsorgung der dem Abgas entzogenen Schadstoffe oft auch aus kostentechnischer Sicht der dezentralen Alternative vorzuziehen. In Folge werden für die Erzeugung einer kWh Wärmeenergie ($\text{kWh}_{\text{thermisch}}$) weniger Schadstoffe in die Umwelt abgegeben. Dies ist jedoch mit dem durch die Wärmeverluste gesteigerten Erzeugungsaufwand (vgl. Kapitel 02.01.02) in Relation zu setzen. Darüber hinaus gilt für zentrale Wärmeerzeuger im Allgemeinen, dass Schall-Emissionen mit weniger Aufwand eindämmbar sind als bei vielen räumlich verteilten Emittenten.

Betrachtet man die benötigten Materialaufwendungen, so sind aufseiten des Wärmenetzes die Materialien für den Bau der Fernwärmetrasse, der Wärmeübergabestationen, der Heizzentrale und der zentralen Erzeuger, den vielen dezentralen Heizsystemen der Alternative entgegenzustellen. Besonders ist hier darauf zu achten, dass Trasse, Wärmeübergabestationen und Heizzentrale im Vergleich zu den Wärmeerzeugern hohe Nutzungsdauern haben und deren Materialaufwand somit nur anteilig den Erzeugerlösungen angerechnet werden kann. Auch sind die Wartung und Instandhaltung weniger zentraler Komponenten signifikant weniger aufwendig als jene der Alternative.

Größter Vorteil der Fernwärme ist, dass Synergien geschaffen werden können. So können z. B. mittels Großwärmepumpen niederkalorische Abwärme-Potenziale nutzbar gemacht werden (Abwasser, Abwärme aus der Industrie etc.), Wärmequellen an für den Einzelverbraucher nicht erreichbaren Standorten (z. B. Flusswasser) erschlossen werden oder die Wärmeerzeugung durch Nutzung von Saisonal-Pufferspeichern zeitlich von deren Verbrauch abgekoppelt werden. Auch können bspw. lokale Kältenetze mit der in Wärmepumpen bei der Wärmeerzeugung entstehenden Kälte versorgt werden. Die beschriebenen und weitere Synergieeffekte werden in den späteren Kapiteln aufgezeigt.

²² Ein umweltschonendes Kältemittel ist auch eines der Ziele des diesem Bericht zugrunde liegenden Forschungsvorhaben „Low Carbon District Heat“ (LoCarDi).

02.01.04 Resümee

Tabelle 02-1 veranschaulicht die in diesem Kapitel beschriebenen Vor- und Nachteile der Versorgungsvarianten:

Tabelle 02-1: Vergleich von Fernwärme und dezentraler Wärmeerzeugung

Fernwärme (zentral)	Individualerzeuger (dezentral)
Erzeugerleistung entsprechend dem tatsächlichen Spitzenbedarf (Gleichzeitigkeitsfaktor)	Erzeugerleistung entsprechend dem theoretischen Spitzenbedarf
Wenig große, gut gedämmte Speicher im Außenbereich	Viele kleine, weniger gut gedämmte Speicher im Innenbereich
Effiziente Großanlagen (Abgaswärmetauscher, effizientere Technologie ...)	Geringerer Wirkungsgrad
Verluste in Netz und Heizzentrale	Geringe Rohrleitungsverluste und Verluste vor Pumpe
Geringe Schadstoff-Emissionen pro erzeugter kWh _{thermisch} (Weniger Kältemittel mit geringerem GWP, Filter etc.)	Höhere Schadstoff-Emissionen pro erzeugter kWh _{thermisch}
Schall-Emissionen können leicht gedämmt werden (v. a. L/W Wärmepumpen)	Schall-Emissionen an mehreren Standorten (oft ungedämmt)
Geringerer Material- und Wartungsaufwand für Wärmeerzeuger	Material und Wartung für Erzeuger höher, jedoch kein Bedarf für Fernwärmerohre
Notwendigkeit von Wärmeübergabestationen	Kein Bedarf von Wärmeübergabestationen
Notwendigkeit einer Heizzentrale	Mögliche Nutzung vorhandener Räumlichkeiten
Nutzung von Synergien im Quartier (Abwärme, ungenutzte Freiflächen, Multivalenz ...)	Keine Möglichkeit der Synergienutzung

Wirtschaftliche Vorteile der Fernwärmeversorgung, wie bspw. die gesteigerte Planungssicherheit, die daraus resultiert, dass der Wärmeerzeuger und häufig auch die Wärmeübergabestation nicht in Privatbesitz sind und somit bei einem Defekt nicht auf eigene Kosten repariert werden müssen, werden in dieser Arbeit nicht diskutiert bzw. nur angeschnitten.

02.02 Vorteile von Fernwärme aus Verbrauchersicht

Auch aus Sicht des Verbrauchers bietet der Anschluss an ein Fernwärmenetz diverse Vorteile. Die wohl wichtigsten sind:

- Sowohl die zum eigenen Haus verlegte Leitung als auch die Wärmeübergabestation sind im Vergleich zu Individualerzeugern sehr **langlebig**.
- Zudem sind beide aufgrund deren simplen Aufbaus bzw. der technisch wenig anspruchsvollen Bestandteile **wartungsarm**. Auch wird die Wartung in vielen Fällen vom Netzbetreiber übernommen.
- In direkter Folge ergibt sich für den Verbraucher ein **geringer zeitlicher Aufwand**, den dieser für sein Heizsystem einsetzen muss.
- Darüber hinaus entfällt der Kauf eines privaten Wärmeerzeugers, Puffers und u. U. Energieträgerlagers (Pellet-Bunker, Öltank ...). Aus diesem Grund wird Fernwärme oft als eine **platzsparende** und **saubere**²³ Wärmeversorgung beschrieben.
- Ergänzend ist auch auf den **geringen Lärmpegel** hinzuweisen, der von Wärmeübergabestationen emittiert wird.
- Abschließender Vorteil ist die **Planungssicherheit** von Fernwärme, da sofern die Anschlussleitung und Wärmeübergabestation im Besitz des Betreibers sind, keine hohen Einmalzahlungen für bspw. deren Ersatz anfallen.

Auf eine ausführliche Begründung der genannten Vorteile soll an dieser Stelle verzichtet werden, da sie logisch aus den Inhalten des vorangegangenen Kapitels folgen.

02.03 Vorteile der Multivalenz

In diesem Kapitel sollen die Vorteile multivalenter Wärmeerzeugerstrukturen, also der Kombination mehrerer verschiedener Erzeuger mit dem Ziel eines möglichst effizienten und wirtschaftlichen Netzbetriebs näher beschrieben werden.

02.03.01 Abdeckung von Bedarfsspitzen

Es ist gängige Praxis, Wärmeerzeuger im Zusammenspiel mit Pufferspeichern (zumeist Warmwasserspeichern) zur Abdeckung von Bedarfsspitzen bzw. Spitzenlasten einzusetzen. Der zumeist wesentlich kostenintensivere Erzeuger wird entsprechend so dimensioniert, dass er nur die Grundlast der benötigten Wärmeleistung erbringen muss und Spitzen vom Puffer abgedeckt werden können (vgl. Abbildung 02-4).

²³ Im Sinne von anfallendem Schmutz durch Öl oder Biomasse.

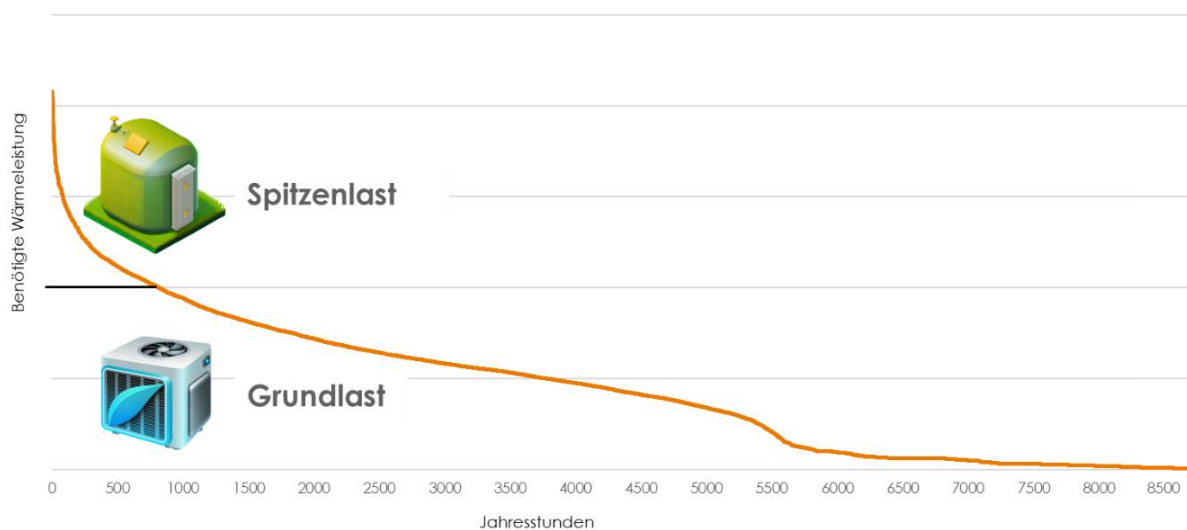


Abbildung 02-4: Beispielhafte Jahresdauerlinie eines Quartiers

Da es sich bei der beschriebenen Konstellation streng genommen zwar um eine monovalente Wärmeerzeugung, aber eine multivalente Wärmeeinspeisung in ein Fernwärmenetz handelt, wird sie an dieser Stelle der Vollständigkeit halber gelistet. Im weiteren Verlauf wird Monovalenz als Wärmeerzeugung mittels einer Art von Erzeugern (bspw. Luft/Wasser-Wärmepumpen) unter Einbeziehung von Pufferspeichern und Multivalenz als Wärmeerzeugung mittels mehrerer Arten von Erzeugern (bspw. Luft/Wasser-Wärmepumpen sowie Wasser/Wasser-Wärmepumpe) unter Einbeziehung von Pufferspeichern definiert. Auf Saisonal-Pufferspeicher, also sehr große Puffer, welche für mehr als nur die Spitzenlastabdeckung ausgelegt sind, wird gesondert eingegangen (vgl. Kapitel 04.03).

02.03.02 Substitution kritischer Erzeuger

In großen Wärmenetzen ermöglicht eine multivalente Erzeugerstruktur, die Dimensionen der genutzten Erzeuger gemäß verschiedensten Vorgaben zu optimieren. Ein Beispiel hierfür ist die Genehmigungspflicht für Biomassekessel. Im Generellen ist die Notwendigkeit der immissionsschutzrechtlichen Genehmigungspflicht einer Anlage im „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)²⁴ sowie der „vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV)²⁵ geregelt. Eine Genehmigungspflicht für einen Biomassekessel ist dabei ab einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW gegeben.²⁶ Da die benötigten Genehmigungsverfahren sowohl kosten- als auch zeitintensiv sind, wird in kleineren Quartieren häufig versucht, ein entsprechendes Verfahren durch die Kombination mehrerer Wärmeerzeuger zu vermeiden. Abbildung 02-5 verdeutlicht dieses Prinzip.

²⁴ Siehe hierzu BImSchG §4 Abs.1.

²⁵ Siehe hierzu 4. BImSchV §1 Abs. 1.

²⁶ Siehe hierzu 4. BImSchV Anhang 1 Nr. 1.2.1.



Abbildung 02-5: Substitution eines genehmigungspflichtigen Wärmeerzeugers

Zudem gelten je nach Art des Wärmeerzeugers unter Umständen diverse Anforderungen, sollten Fördergelder vom Bund für dessen Installation benötigt werden. Die „Bundesförderung für effiziente Wärmenetze“ (BEW) limitiert bspw. den maximalen Anteil an Biomasse in Fernwärmenetzen mit einer Hauptleitungslänge von mehr als 20 km²⁷. Aber auch die „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ (BEG) fordert: „Für die Errichtung von Biomasseheizungen [...] wird der Bonus nur gewährt, wenn diese mit einer solarthermischen Anlage oder einer Anlage zur Erzeugung von Strom aus solarer Strahlungsenergie zur elektrischen Warmwasserbereitung oder einer Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung und/oder Raumheizungsunterstützung kombiniert werden.“²⁸ Zwar sind klassische Fernwärmenetze nicht nach der BEG förderfähig, jedoch können Gebäudenetze, also die zentrale Wärmeerzeugung für wenige Abnehmer (< 17) gefördert werden, weshalb sie an dieser Stelle erwähnt werden soll.

Ferner können Ausfälle einzelner Erzeuger leichter überbrückt werden. Im obigen Beispiel kämen aus kostentechnischen Gründen nur an sehr kalten Wintertagen alle Erzeuger gleichzeitig zum Einsatz. In Folge kann an weniger kalten Tagen ein nicht benötigter Wärmeerzeuger einen Ausfallenden substituieren. Auch ist eine reine Redundanz für jeden Zeitpunkt des Jahres wesentlich preiswerter, da nur ein kleiner Erzeuger mit im obigen Beispiel 300 kW anstelle eines 1,2 MW Moduls installiert werden muss.

02.03.03 Effizienter Betrieb

Multivalente Erzeugerstrukturen ermöglichen in vielen Fällen den optimierten Betrieb der einzelnen Komponenten. Bspw. arbeiten Luft/Wasser-Wärmepumpen bei hohen Außentemperaturen und Solarthermie-Kollektoren bei starker Solarstrahlung am effizientesten. In kalten Winternächten sinkt die Leistungszahl (COP) von Wärmepumpen mit einer Wärmequelle, deren Temperatur mit der Außentemperatur korreliert, enorm. Solarthermieanlagen erzeugen nachts überhaupt keine Wärme und können im Winter auch tagsüber nur einen Bruchteil ihrer Maximalleistung generieren. Dies wirkt sich, sofern keine Saisonal-Wärmespeicher zum Einsatz kommen, negativ auf die Effizienz (und somit die Kosten) bzw. die generelle Einsatzmöglichkeit der Erzeuger aus. In dem beschriebenen Szenario ist ein temperaturunabhängiger Erzeuger, wie bspw. ein Biomassekessel oder ein Blockheizkraftwerk (BHKW) für den Winterfall zumindest aus wirtschaftlicher Sicht häufig ratsam²⁹. Während des Sommers kann der Wärmebedarf (primär Trinkwarmwasser) hingegen sehr effizient und kostengünstig durch die

²⁷ Vgl. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)(Hrsg.), 2023, S. 9ff.

²⁸ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.), 2023a, S. 11.

²⁹ Zur generellen Einschätzung von aus Biomasse erzeugter Wärme, vgl. Kapitel 04.04.

Solarthermieanlage oder Luft/Wasser-Wärmepumpen im Verbund mit einem gering dimensionierten Pufferspeicher gedeckt werden.

Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass ein einzelner Erzeuger (bspw. ein Hackschnitzelkessel) auch über das ganze Jahr die Wärmeversorgung gewährleisten kann. In Abhängigkeit von den Kosten der Solarthermiemodule oder einer Wärmepumpe ist es denkbar, dass dies sogar den aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten effizientesten Ansatz darstellt. Da der Platz für den Anbau von nachhaltiger Biomasse jedoch begrenzt ist, ist die Nutzung der solaren Strahlung dem Einsatz von Biomasse v. a. während des Sommers vorzuziehen bzw. aus umwelttechnischer Sicht günstiger (siehe hierzu Kapitel 04.01.).

02.03.04 Geringere Abhängigkeit von Bezugskosten

Multivalente Erzeugerstrukturen benötigen in der Regel mehrere Energieträger. Dies führt außerhalb von Spitzenbedarfszeiten, bzw. wenn nicht alle Erzeuger voll ausgelastet sind, dazu, dass der Wärmeversorger entscheiden kann, in welchem Umfang er seine Anlagen betreibt. Abbildung 02-6 zeigt, dass die Energieträgerpreise, dargestellt anhand der Preise für Strom und Hackschnitzel zwar zum Teil korrelieren, jedoch in der Vergangenheit deutliche Unterschiede in der Ausprägung der Spitzenpreise erkennbar waren.

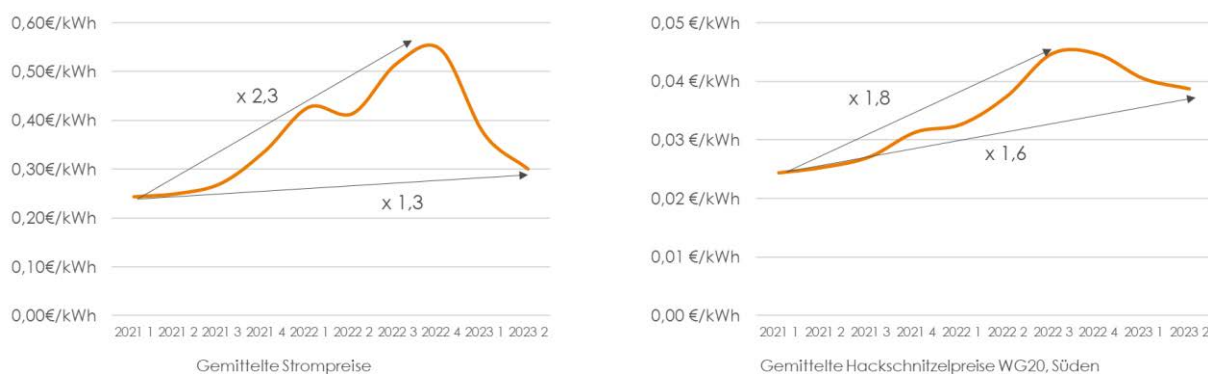


Abbildung 02-6: Gemittelte Energieträgerpreise 2021 bis Q2 2023³⁰

In Folge ist eine multivalente Erzeugerstruktur dazu in der Lage, v. a. temporäre Schwankungen in den Bezugskosten der benötigten Energieträger den Umständen entsprechend effektiv auszugleichen.

02.03.05 Einbindung von Standortvorteilen / Synergien

Die Möglichkeit zur Nutzung sämtlicher lokaler Standortvorteile stellt einen weiteren und häufig im Anwendungsfall den relevantesten Vorteil multivalenter Systeme dar. An vielen Standorten können Umwelt- oder Abwärmewärmequellen in Anspruch genommen werden. In vielen Fällen sind diese jedoch in ihrer Kapazität begrenzt, bspw. durch eine maximal zulässige Abkühlung des Grundwassers oder schwanken stark wie bspw. Serverräume je nach Auslastung der Server. In Folge sind diese Quellen, wenn auch aus wirtschaftlicher und umwelttechnischer Sicht wünschenswert, nicht in einem monovalenten System nutzbar. Um die lokalen Standortspezifika optimal

³⁰ Strompreise gemäß Norddeutschem Rundfunk (Hrsg.), 2023 (Analyse auf Basis von Daten der Verivox GmbH); Hackschnitzelpreise gemäß Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N.) (Hrsg.), 2023a.

nutzen zu können, ist in diesen Beispielen somit ein multivalentes System notwendig. Abbildung 02-7 stellt das Konzept mit beispielhaften Erzeugern graphisch dar.



Abbildung 02-7: Beispielhafte Darstellung einer optimierten Wärmeproduktion

Besonders hervorzuheben ist, dass auch verschiedenen Wärmepumpenarten oder eine Wärmepumpe mit mehreren Quellen dazu beitragen können, die Wärmeerzeugung vor Ort bestmöglich zu gestalten.

02.03.06 Resümee

Zusammengefasst lässt sich resümieren, dass die Vielzahl möglicher Synergien multivalenter Systeme in Zukunft zu einer Abkehr von monovalenten Strukturen, wie sie aktuell häufig mit Öl- Gaskesseln betrieben werden (vgl. Kapitel 01.01), führen wird. Die Gründe hierfür sind einerseits das von Seiten des Gesetzgebers geforderte Ausscheidens fossiler Wärmeerzeuger. Andererseits bedingt durch den steigenden CO₂-Preis, immer höhere Energieträgerkosten, welche die Nutzung von Synergien aus wirtschaftlicher Sicht obligatorisch machen.

Abbildung 02-8 zeigt mögliche positive Wechselwirkungen eines auf Wärmepumpen basierenden multivalenten Systems mit Solarthermie zur Trinkwarmwassererwärmung während des Winters auf.



Abbildung 02-8: Beispiel eines multivalenten Wärmenetzes auf Basis von Wärmepumpen

Wie bereits in den obigen Kapiteln beschrieben, kann aber auch der Einsatz bzw. die Kombination mit weiteren erneuerbaren Wärmeerzeugern vorteilhaft sein (vgl. Kapitel 04).

02.04 Entwicklungsprognose Fernwärme

Im Jahr 2022 wurden nach Angaben des „Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft“ 14,2 % des Wohnungsbestandes in Deutschland mit Fernwärme beheizt³¹. Zwar gehen mehrere Studien davon aus, dass aufgrund der fortschreitenden Sanierung in Bestandsnetzen auch bei entsprechender Nachverdichtung³² der Wärmeabsatz in diesen sinken wird, nichtsdestotrotz ist bis zum Jahr 2050 mit einem signifikanten Aus- und Neubau der Fernwärmeinfrastruktur und damit verbunden einer Steigung des Wärmeabsatzes zu rechnen³³. Als einzige der zitierten Studien prognostiziert die „Ariadne-Analyse“ zwar einen Anstieg der Fernwärme auf rund 35 % des Anteils am Wärmemarkt bis zum Jahr 2035 geht jedoch aufgrund der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes danach von einem Abfall auf rund 30 % aus³⁴.

Laut der Forschung des von „Clarivate“ mehrfach als „Highly Cited Researcher in the field of Engineering“ gelisteten Henrik Lund und seiner Kollegen werden sich zudem in Zukunft Fernwärmenetze der vierten Generation durchsetzen (vgl. Abbildung 02-9). Konkret heißt dies zum einen, dass fossile Erzeuger (auch wenn diese zur gleichzeitigen Stromerzeugung genutzt werden) sowie Biomassekessel (sofern sie nur Wärme und keinen Strom erzeugen) zunehmend durch ökologisch vorteilhaftere Erzeuger substituiert werden. Zum anderen werden die hohen Vorlauftemperaturen in den aktuell noch viel verbreiteten Netzen der dritten Generation (bis zu 100 °C) auf bis zu 60 °C fallen, was die Netzverluste signifikant senkt (vgl. Kapitel 02.01.02) und gleichzeitig die Einbindung diverser bisher ungenutzter Abwärme-Quellen (Supermärkte etc.) ermöglicht.³⁵

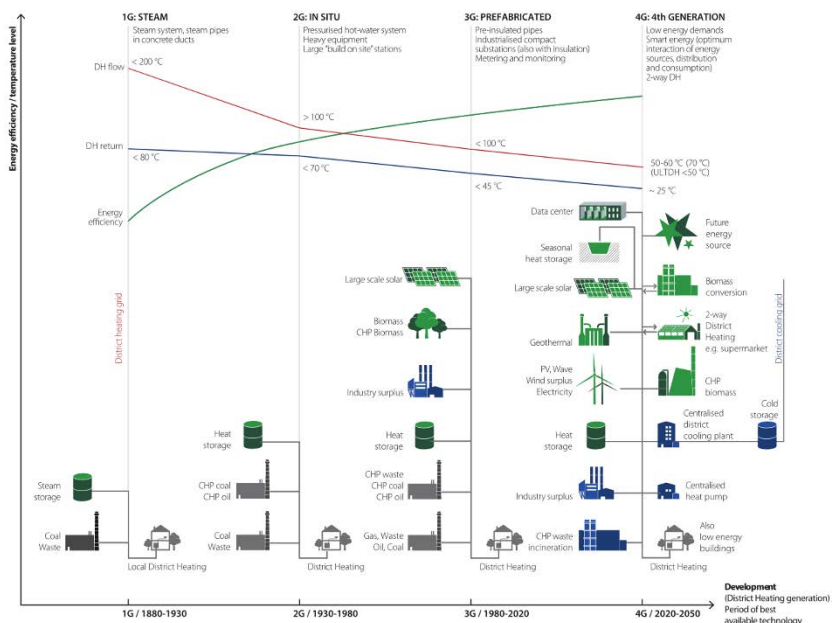


Abbildung 02-9: Mögliche Erzeuger und Vorlauftemperaturen in Wärmenetzen der vierten Generation³⁶

³¹ Vgl. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (Hrsg.), 2023b.

³² Der Begriff Nachverdichtung beschreibt den Anschluss von Anliegern mit bisher privater Wärmeversorgung an das Netz.

³³ Vergleiche hierzu: Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2020a, S. 12; Agora Energiewende (Hrsg.), Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG) (Hrsg.), 2023, S. 37; Kopernikus-Projekt Ariadne des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (Hrsg.), 2023, S. 12.

³⁴ Vgl. Kopernikus-Projekt Ariadne des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (Hrsg.), 2023, S. 12f.

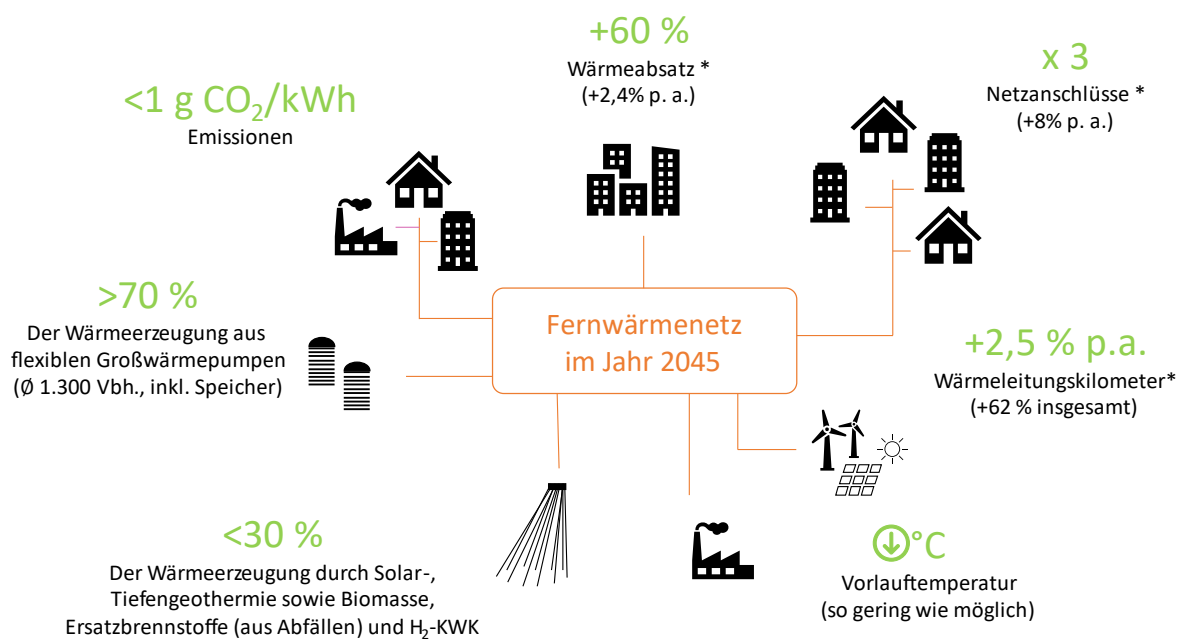
³⁵ Vgl. Lund et al., 2021, S. 2ff.

³⁶ Lund et al., 2021, S. 3.

Auch steigt der Ertrag einiger erneuerbarer Wärmeerzeuger bei geringeren Vorlauftemperaturen und somit geringerem zu leistendem Temperaturhub an. Beispiele sind Wärmepumpen (vgl. Kapitel 03.02) oder Solarthermiemodule (vgl. Kapitel 04.02.03). Neben dem starken Aus- und Neubau der deutschen Fernwärmeinfrastruktur ist folglich mit einer Transformation der Wärmeerzeuger in bestehenden Netzen sowie einer Absenkung der Vor- und Rücklauftemperaturen zu rechnen.

Perspektivisch ist sogar eine Absenkung der Vorlauftemperatur auf unter 60 °C möglich, sofern die Trinkwasserhygiene vor Ort sichergestellt werden kann³⁷. Ob eine entsprechende Absenkung auf bspw. 45 °C (in einem passenden Quartier mit ausreichendem Sanierungsstand und z. B. Flächenheizungen) auch umgesetzt wird, hängt voraussichtlich in großem Maße davon ab, ob die durch den geringeren Temperaturhub steigende Erzeugerleistung (bspw. bei Wärmepumpen) und die sinkenden Verluste auf Betreiberseite einen Wärmepreis ermöglichen, der den Aufwand der dezentralen Trinkwarmwasseraufbereitung ausgleicht. Möglichkeiten der Aufbereitung des Trinkwarmwassers sind bspw. die Erhitzung mittels dezentraler Wärmepumpen, Ultrafiltrationssysteme, UV-Licht oder ähnliches³⁸.

Die „Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie“ (IEG) fasst ihre Prognose bzgl. der Entwicklung des durchschnittlichen deutschen Fernwärmenetzes wie folgt grafisch zusammen:



* Gegenüber dem Stand im Jahr 2020

Abbildung 02-10: Das durchschnittliche deutsche Fernwärmenetz 2045 im Vergleich zu 2020³⁹

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Prognose auf Daten des „Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung“ (ISI) beruht⁴⁰.

³⁷ Hygienische Anforderung: „Das warme Wasser sollte überall im Leitungssystem immer eine Temperatur von mindestens 55 °C haben und am Austritt des Trinkwassererwärmers stets eine Temperatur von mindestens 60 °C einhalten, damit es zu keinem Legionellenwachstum kommt.“ Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023a.

³⁸ Vgl. Zhang et al., 2014, S. 2511.

³⁹ Eigene Darstellung in enger Anlehnung an: Agora Energiewende (Hrsg.), Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG) (Hrsg.), 2023, S. 13.

⁴⁰ Vgl. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (Hrsg.), 2022b.

03 HERAUSFORDERUNGEN DER WÄRMEPUMPENTECHNOLOGIE

In diesem Kapitel soll auf Herausforderungen der Wärmepumpentechnologie eingegangen werden, bevor Praxisbeispiele für den Einsatz von Großwärmepumpen gelistet werden. Die größten Herausforderungen der Technologie beziehen sich in der Regel auf das benötigte Kältemittel sowie die von vielen Faktoren abhängige Effizienz.

03.01 Das Kältemittel

Bei der normalen Wärmeproduktion werden sowohl die Verdampfungs- als auch die Kondensationsenthalpie des Kältemittels genutzt, da dessen Phasenänderungen deutlich energiereicher sind als eine temperaturbedingte Erwärmung oder Abkühlung eines Mediums.

Das Kältemittel einer Wärmepumpe beeinflusst maßgeblich technische, energetische und umweltrelevante Eigenschaften. Zwar wird im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert auf dieses eingegangen, da ein Fokus auf dem Einsatz und nicht der technischen Konzeption von Wärmepumpen liegt, ein Überblick soll im Folgenden dennoch gegeben werden.

Kältemittel sind in der Regel chemisch hergestellte Fluide, die aufgrund ihrer Zusammensetzung potenziell umweltschädlich sein können. Die Bewertungskriterien für ihre Auswirkungen umfassen im Allgemeinen das Global Warming Potential (GWP), das Ozon Depletion Potential (ODP) und die Bewertung der Zerfallsprodukte in Wechselwirkung mit der Atmosphäre oder dem Grundwasser (z. B. Säurebildung). Da das ODP bei gängigen Kältemitteln häufig gleich oder nahe null ist, ist dieser Faktor in der Praxis jedoch nur selten relevant⁴¹ (vgl. Tabelle 03-1).

Natürliche Kältemittel, also Stoffe, die in der Umwelt vorhanden sind, gelten als umweltfreundlich und ökologisch. Beispiele sind R744 (Kohlenstoffdioxid), R717 (Ammoniak), R718 (Wasser) sowie verschiedene Kohlenwasserstoffe (R290 – Propan, R1270 – Propylen, R600 – Butan, R600a – Isobutan etc.).

Tabelle 03-1: Gängige Kältemittel für Großwärmepumpen⁴²

	Bezeichnung		Sicherheitsgruppe	Klimawirkung	
	Kürzel	Name		ODP	GWP ⁴³
Natürliche Kältemittel	R 717	Ammoniak (NH ₃)	B2C	0	0
	R 744	Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	A1	0	1
	R 290	Propan (C ₃ H ₈)	A3	0	3
	R 600	Butan (C ₄ H ₁₀)	A3	0	4
	R 600a	Isobutan (C ₄ H ₁₀)	A3	0	3
Synthetische Kältemittel	R 1234ze		A2L	0	7
	R 1233zd		A1	0,00034	4,5
	R 1234yf		A2L	0	4

⁴¹ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2023, S. 19.

⁴² In enger Anlehnung an: Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2023, S. 21.

⁴³ Das GWP ist u.U. bei synthetischen Kältemitteln aufgrund der noch nicht umfassenden Forschung zu Abbauprozessen in der Atmosphäre nicht akkurat. Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2023, S. 21.

Bzgl. der Sicherheitsgruppe sei an dieser Stelle erklärt, dass Kältemittel der Klasse A eine geringere Toxizität aufweisen als Kältemittel der Klasse B. Die Stufe 1 steht für „keine Flammenausbreitung“, 2L, 2 und 3 signalisieren in dieser Reihenfolge eine zunehmende Brennbarkeit.

Trotz ihrer Umweltfreundlichkeit sind natürliche Kältemittel aufgrund des überwiegenden Einsatzes von halogenierten, fluorbasierten Verbindungen (häufig als F-Gase bezeichnet) noch nicht weit verbreitet. Diese synthetischen Kältemittel werden aufgrund ihrer Sicherheitseinstufung und da sie weniger aufwendig und kostengünstiger sind, häufiger verwendet. Gründe, die der breiteren Anwendung natürlicher Kältemittel entgegenstehen, sind beispielsweise die hohe Drucklage von R744, die Tatsache, dass R717 giftig und brennbar ist sowie der hohe Normsiedepunkt von Wasser, der einen Vakuumbetrieb erfordert. Kohlenwasserstoffe unterliegen aufgrund ihrer Brennbarkeit ebenfalls hohen Sicherheitsstandards.

Zwar sollen F-Gase bis zum Jahr 2050 in der Europäischen Union nicht mehr verbraucht und Wärmepumpen mit diesen Kältemitteln bereits ab 2027 nicht mehr verkauft werden dürfen, aktuell sind jedoch zur Sicherstellung der Energiewende noch Ausnahmen möglich⁴⁴.

03.02 Effizienz der Wärmeherzeugung

Die technische Effizienz einer Wärmepumpe hängt neben ihrer Vorlauftemperatur zu großen Teilen von dem benötigten zu erzeugenden Temperaturhub ab. In Folge spielt die Wärmequelle hierbei eine entscheidende Rolle. Tabelle 03-2 zeigt mögliche Quellen von Wärmepumpen, ihren jeweiligen Investitionsaufwand und eine beispielhafte Leistungszahl (bzw. das wie vielfache an Wärme aus einer kWh Strom erzeugt werden kann) auf.

Tabelle 03-2: Vergleich verschiedener Quellen von Großwärmepumpen

Umwelt- und Abwärmequellen	Investitionsaufwand ⁴⁵	Typische Temperatur ⁴⁶	Leistungszahl (COP) Winter bei Erhitzung auf 65 °C; Gütegrad = 0,5 ⁴⁷
Umgebungsluft	Gering	-10 °C - 30 °C	2,6** bei 0 °C
Oberflächennahe Geothermie	Hoch	5 °C - 15 °C	3,1 bei 10 °C
Mitteltiefe und tiefe Geothermie	Sehr hoch	15 °C - X °C*	4,8 bei 30 °C
Gewässerthermie (Flusswasser, Seewasser, Meerwasser)	Moderat	4 °C - 25 °C	3,4 bei 15 °C
Abwasser und Kläranlagen	Gering / Moderat	10 °C - 17 °C	3,2 bei 12 °C
Abwärme	Gering / Moderat	20 °C - X °C*	3,8 bei 20 °C

*bei Temperaturen > 50 °C wird die Quelle häufig direkt eingebunden.⁴⁸

** Die Abkühlung von feuchter Luft kann dazu führen, dass die Wärmeübertrager einfrieren. Der Energieeinsatz, um dies zu vermeiden, kann sich negativ auf die Leistungszahl auswirken.

⁴⁴ Das Parlament (Hrsg.), 2024.

⁴⁵ Vgl. Agora Energiewende (Hrsg.), Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG) (Hrsg.), 2023, S. 48 & S. 76 (auf Basis der eigener Datenerhebungen und der Auswertung diverser Untersuchungen).

⁴⁶ Vgl. Agora Energiewende (Hrsg.), Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG) (Hrsg.), 2023, S. 48.

⁴⁷ In der Praxis zwischen 40 und 60 Prozent; Deutsche Energie-Agentur (dena) (Hrsg.), 2022, S. 2.

⁴⁸ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2023, S. 14.

Grubenwasser aus dem Bergbau wird an dieser Stelle aufgrund seines sehr speziellen Einsatzfeldes und seiner lokalen Begrenztheit nicht näher beschrieben. Auch nicht gelistet ist Solarthermie, da diese bei Vorlauftemperaturen, wie sie in Zukunft zu erwarten sind (vgl. Kapitel 02.03) zumeist direkt eingebunden und nicht noch weiter erwärmt wird.

Trotz der hohen Leistungszahlen, die in obigem Beispiel einem Wirkungsgrad zwischen 260 % und 380 % entsprechen, ist nicht oder nur in Einzelfällen davon auszugehen, dass in Zukunft eine Vielzahl monovalenter Fernwärmenetze mit Wärmepumpen als einzigem Erzeuger entstehen wird. Hierfür gibt es mehrere Gründe.

- Zum einen sind Wärmepumpen, in denen u. a. ein spezielles Kältemittel verdichtet werden muss, komplexer im Bau als herkömmliche Gas-, Elektroden- oder Biomassekessel, die mit vergleichsweise technisch einfachen Prozessen arbeiten. Dies führt zu einem höheren **Preis je kW Leistung** und resultiert darin, dass die Abdeckung von Bedarfsspitzen mit hohen Kosten einhergeht.
- Zudem stehen einige Wärmepumpen vor dem Problem, dass ihre Wärmequelle bspw. aufgrund negativer Außentemperaturen abkühlen kann und somit der **Wärmeerzeugungsprozess in Zeiten mit hohem Heizbedarf weniger effizient** abläuft. Dies gilt v. a. für Luft/Wasser-Wärmepumpen und in schwächer ausgeprägter Form für Wasser/Wasser-Wärmepumpen insofern die Quelle nicht isoliert ist (Flüsse, Seen etc.). Aber auch das Grundwasser oder Erdsonden können bei Überbeanspruchung auf ein kritisches Level auskühlen.
- Auch arbeiten Wärmepumpenarten häufig **antizyklisch am wirtschaftlich effizientesten**. Das heißt, dass sie tagsüber zu Zeiten mit geringem Wärmebedarf und der Möglichkeit, kostenlosen Photovoltaikstrom zu produzieren, am effizientesten arbeiten, wohingegen der Hauptwärmebedarf auf die Morgen- und Abendstunden entfällt.
- Überdies benötigen Wärmepumpen zur Erzeugung der „minderwertigen Energieform“ Wärme, welche sich im Anwendungsfall zumeist nicht oder nur schwer in andere Energieformen umwandeln lässt, die „hochwertige Energieform“ Strom. Da Strom unter zum Teil hohen Wirkungsgradverlusten erzeugt werden und anschließend transportiert werden muss, ist der **Betrieb von Wärmepumpen häufig teuer** (im Vergleich zu bspw. Biomassekesseln).
- Je nach Herstellungsart des Stroms bspw. durch fossile Energieträger, ist die Deklaration der erzeugten Wärme als „nachhaltig“ zumindest debattierbar. Eine Wärmepumpe muss in Folge **nicht zwingend klimafreundlich** sein.

Im Resultat bzw. um den oben genannten Schwachpunkten zu begegnen, ist davon auszugehen, dass Wärmepumpen v. a. mit nur saisonal verfügbaren oder in ihrem Temperaturniveau stark schwankenden Quellen in Zukunft in multivalenten Wärmenetzen, sprich im Zusammenspiel mit anderen Wärmeerzeugern und Pufferspeichern eingesetzt werden. Auch ist ein Einsatz im Rahmen der Sektorkopplung, also die gezielte Erzeugung von Synergien mit den Sektoren „Strom“ und „Verkehr“ (bspw. die Speicherung von überschüssigem Strom in Form von Wärme) künftig vermutlich essenziell für einen effizienten Betrieb.

03.03 Praxisbeispiele

Beispiele für die Einbindung von Wärmepumpen in Fernwärmenetze sind wie bereits beschrieben zumindest in Deutschland selten jedoch gibt es mehrere erfolgreiche Projekte.

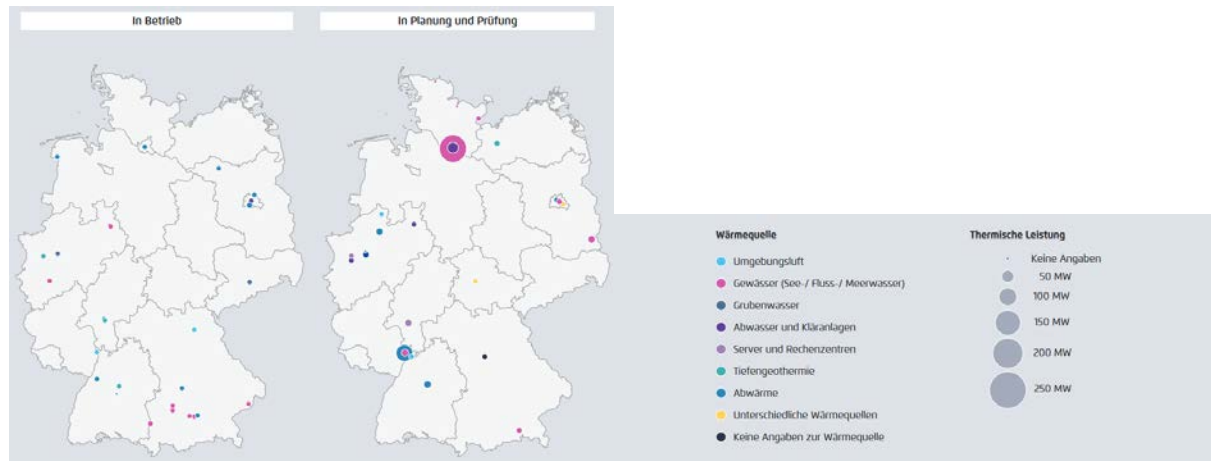


Abbildung 03-1: Großwärmepumpenprojekte in Deutschland⁴⁹

Folgende Beispiele hebt die „Arbeitsgemeinschaft Fernwärme“ (AGFW) besonders hervor:

Die „Stadtwerke Lemgo“ setzen seit 2019 auf eine 2,4 MW Wasser/Wasser-Wärmepumpe (Reinwasser aus Klärwerk). Gleiches gilt seit dem Jahr 2022 für die „Stadtwerke Rosenheim“, welche drei 1,5 MW Wasser/Wasser-Wärmepumpen installiert haben (Flusswasser). Auch zwei Flusswasser-Wärmepumpen hat die „BTB GmbH“ in Berlin installiert, wobei die thermische Leistung zwischen 3 und 4,4 MW variiert. Auf Luft als Quelle setzen die „Stadtwerke Heidelberg“ mit drei 1,35 MW Geräten sowie die „Glood GmbH“, welche in Papenburg vier 2,8 MW Luft-Glykol-Wasser-Wärmepumpen in die dortige Fernwärmeversorgung eingebunden hat. Hierbei nutzen die „Stadtwerke Heidelberg“ R-717 und die „Glood GmbH“ R-134a als Kältemittel, um Jahresarbeitszahlen zwischen 2,6 und 2,9 bzw. 2,65 und 2,75 zu erreichen. Häufig werden Wärmepumpen zudem im Verbund mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) eingesetzt.⁵⁰

Weitere Praxisbeispiele können bspw. dem „Praxisleitfaden Großwärmepumpen“ der „AGFW“⁵¹, dem Überblick an Referenzprojekten des „Bundesverbands Wärmepumpen“⁵² oder der Studie „Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland“⁵³ entnommen werden.

⁴⁹ Agora Energiewende (Hrsg.), Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG) (Hrsg.), 2023, S. 26.

⁵⁰ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2023, S. 35ff.

⁵¹ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2023, S. 35ff.

⁵² Vgl. Bundesverband Wärmepumpen (BWP) (Hrsg.), 2022, S. 10ff.

⁵³ Vgl. Agora Energiewende (Hrsg.), Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG) (Hrsg.), 2023, S. 117ff.

04 OPTIONEN DER ERNEUERBAREN ENERGIEERZEUGUNG

In diesem Kapitel sollen die im Rahmen der Energie- und Wärmewende als wesentlich eingeschätzten Wärmeerzeuger (ausgenommen den bereits analysierten Wärmepumpen), welche das Potenzial besitzen, nachhaltig und CO₂-neutral zu agieren, näher beschrieben und bewertet werden. Zudem werden für diese Erzeuger Zukunftsprognosen formuliert und mögliche optimale Einsatzbedingungen häufig auch im Verbund mit Wärmepumpen beschrieben.

Ein besonderer Fokus wurde auf die solare und biogene Wärmeerzeugung gelegt, da diese aus Sicht der Autoren kurz und mittelfristig die höchste Relevanz für Fernwärmenetze bzw. deren Erzeugerstruktur hat.

04.01 Mögliche erneuerbare Erzeuger

Es gibt eine Vielzahl erneuerbarer Wärmeerzeuger, mit denen Wärmepumpen und im Speziellen Luft/Wasser-Wärmepumpen kombiniert werden können, um positive Synergien zu erzielen. Im Folgenden sollen diese gelistet und bzgl. ihrer Einsatzmöglichkeiten und zukünftigen Relevanz bewertet werden. Es ist anzumerken, dass davon auszugehen ist, dass auch fossile Erzeuger kurz bis mittelfristig einen entscheidenden Beitrag zur Wärmeerzeugung leisten werden. In Kombination mit anderen Erzeugern sollten diese jedoch zum Zwecke der Vermeidung von CO₂-Emissionen und mit Blick auf voraussichtlich stark steigende CO₂-Abgaben nur zur Spitzenlastdeckung oder als Redundanz eingesetzt werden. Aufgrund des Innovations- sowie Nachhaltigkeitsanspruchs des Projekts, welchem diese Arbeit entstammt, werden sie in diesem Kapitel nicht betrachtet.

Grundsätzlich kann Wärme aus drei Quellen nachhaltig erzeugt werden:

- Durch Verbrennungsprozesse wie beispielsweise die Verbrennung von
 - fester Biomasse (biogene Siedlungsabfälle, Holz etc.),
 - Gasen (bspw. Wasserstoff oder Biogas), sowie
 - Bioöl.
- Durch den Einsatz elektrischen Stroms wie beispielsweise in
 - Wärmepumpen oder
 - elektrischen Heizkörpern (bspw. Heizlanzen).
- Durch die Nutzung von Umgebungswärme oder Strahlung wie beispielsweise bei
 - Solarthermie Anlagen,
 - Geothermie Anlagen oder
 - Anlagen zur Nutzung hochkalorischer Abwärme (z. B. aus Industrie- oder Stromerzeugungsprozessen (Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen)).

Voraussetzung für die nachhaltige Wärmeerzeugung ist hierbei der vollumfängliche Einsatz erneuerbarer Energieträger wie bspw. „grünem“ Strom, CO₂ neutral erzeugter Biomasse etc. Dies ist in der praktischen Umsetzung von Fernwärmenetzen in der Regel jedoch nicht möglich. An dieser Stelle sei aus diesem Grund darauf hingewiesen, dass obiger theoretischer Ansatz nicht der aktuellen Gesetzgebung in Deutschland entspricht. Biogenen Brennstoffen sowie netzbezogenem Strom unabhängig vom gewählten (u. U. „grünen“) Tarif werden im Gebäudeenergiegesetz (GEG) sowohl ein Primärenergiefaktor, dessen nicht erneuerbarer Anteil größer null ist als auch ein CO₂-Äquivalent größer null zugewiesen. Abbildung 04-1 zeigt eine Kopie der Anlagen 4 und 9 des „Gebäudeenergiegesetz“.

Nummer	Kategorie	Energieträger	Emissionsfaktor [g CO ₂ -Äquivalent pro kWh]
1	Fossile Brennstoffe	Heizöl	310
2		Erdgas	240
3		Flüssiggas	270
4		Steinkohle	400
5		Braunkohle	430
6	Biogene Brennstoffe	Biogas	140
7		Biogas, gebäudenah erzeugt	75
8		Biogenes Flüssiggas	180
9		Bioöl	210
10		Bioöl, gebäudenah erzeugt	105
11		Holz	20
12	Strom	netzbezogen	560
13		gebäudenah erzeugt (aus Photovoltaik oder Windkraft)	0
14		Verdrängungsstrommix	860
15	Wärme, Kälte	Erdwärme, Geothermie, Solarthermie, Umgebungswärme	0
16		Erdkälte, Umgebungskälte	0
17		Abwärme aus Prozessen	40
18		Wärme aus KWK, gebäudeintegriert oder gebäudenah	nach DIN V 18599-9: 2018-09
19		Wärme aus Verbrennung von Siedlungsabfällen (unter pauschaler Berücksichtigung von Hilfsenergie und Stützfeuerung)	20
20	Nah-/Fernwärme aus KWK mit Deckungsanteil der KWK an der Wärmeerzeugung mindestens 70 Prozent	Brennstoff Stein-/Braunkohle	300
21		Gasförmige und flüssige Brennstoffe	180
22	Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	Erneuerbarer Brennstoff	40
23		Brennstoff Stein-/Braunkohle	400
24		Gasförmige und flüssige Brennstoffe	300
25		Erneuerbarer Brennstoff	60

Nummer	Kategorie	Energieträger	Primärenergiefaktoren nicht erneuerbarer Anteil
1	Fossile Brennstoffe	Heizöl	1,1
2		Erdgas	1,1
3		Flüssiggas	1,1
4		Steinkohle	1,1
5		Braunkohle	1,2
6	Biogene Brennstoffe	Biogas	1,1
7		Bioöl	1,1
8		Holz	0,2
9	Strom	netzbezogen	1,8
10		gebäudenah erzeugt (aus Photovoltaik oder Windkraft)	0,0
11		Verdrängungsstrommix für KWK	2,8
12	Wärme, Kälte	Erdwärme, Geothermie, Solarthermie, Umgebungswärme	0,0
13		Erdkälte, Umgebungskälte	0,0
14		Abwärme	0,0
15		Wärme aus KWK, gebäudeintegriert oder gebäudenah	nach Verfahren B gemäß DIN V 18599-9: 2018-09 Abschnitt 5.2.5 oder DIN V 18599-9: 2018-09 Abschnitt 5.3.5.1
16	Siedlungsabfälle		0,0

Abbildung 04-1: Primärenergiefaktoren und CO₂-Äquivalent gemäß GEG⁵⁴

Auch ist zu beachten, dass v. a. die vergleichsweise hohen Primärenergiefaktoren für Biogas und Bioöl unter speziellen „nachhaltigen“ Umständen nach unten abweichen können⁵⁵. Es ist hierbei besonders hervorzuheben, dass das GEG zwischen biogenen Brennstoffen und Siedlungsabfällen, welche in Teilen häufig auch biogen sind, unterscheidet.

04.02 Einstufung solarer Energieerzeugung

Eine der wichtigsten erneuerbaren Energiequellen ist bekanntlich die Sonne. Aus ihrer Strahlung lässt sich sowohl Wärme (mittels Solarthermieanlagen) als auch elektrischer Strom (mittels Photovoltaikanlagen) erzeugen. Im Folgenden sollen die Vorteile der solaren Energiegewinnung sowie eine Grundlage zur Bewertung der Wärme- im Vergleich zur Stromerzeugung aufgezeigt werden.

Es ist darauf zu achten, dass verschiedene Bauweisen von Solarthermie-Kollektoren und Photovoltaikmodulen existieren. In der Regel werden im Rahmen der Solarthermie jedoch Flachkollektoren oder die etwas preisintensiveren, aber ertragreicheren Röhrenkollektoren genutzt. Die am häufigsten genutzten Photovoltaikmodule bestehen aus mono- oder den günstigeren, aber weniger effizienteren polykristallinen Siliziumzellen. In Folge wird sich in diesem Kapitel auf diese Kollektorarten fokussiert.

⁵⁴ GEG Anlage 4 sowie GEG Anlage 9.

⁵⁵ Siehe hierzu GEG § 22 Abs.1.

04.02.01 Synergien bei der Flächennutzung

Ein wesentlicher Vorteil von Photovoltaik- und Solarthermieanlagen ist die Möglichkeit der Schaffung von Synergien bei der Flächennutzung. Werden Module auf Freiflächen installiert, kann sich bspw. der darunterliegende Boden regenerieren, sofern er zuvor landwirtschaftlich überbeansprucht wurde, Moorflächen können bei entsprechender Aufständering wiedervernässt werden oder verschiedenste Pflanzen können zwischen und unter den Modulen großteils ungestört wachsen (auch wenn in einigen Fällen negativen Auswirkungen wie bspw. ungewünschte Mikroklimaänderungen dokumentiert wurden)⁵⁶. Gleichzeitig sind zudem Synergien mit der Landwirtschaft möglich und zumindest im Bereich der Photovoltaik bereits erprobt⁵⁷. Sogenannte „Agri-PV“ Anlagen bieten die Möglichkeit der Doppelnutzung landwirtschaftlicher Nutzflächen (siehe hierzu Abbildung 04-2), wobei sich der Einsatz häufig auf den Anbau von Pflanzen, die nicht auf große Mengen Solarstrahlung angewiesen sind und somit auch im Schatten oder Halbschatten wachsen können, beschränkt.



Abbildung 04-2: Synergien zwischen Landwirtschaft und Stromproduktion mittels Agri-PV Anlagen⁵⁸

Zudem können in urbanen Räumen Module auf Dachflächen installiert werden. Da diese in der Regel über keine alternative Nutzungsmöglichkeit verfügen, können so beachtliche Mengen Energie ohne zusätzlichen Platzbedarf erzeugt werden. Um diese Synergien zu nutzen, wurden in einigen Bundesländern wie bspw. Baden-Württemberg bereits Gesetze erlassen, die Eigentümer (unter Einbezug einiger Ausnahmen) verpflichten, bei Neubauten oder Dachsanierungen solare Energieträger zu installieren⁵⁹.

04.02.02 Autarkie und Preisstabilität

Im Generellen lässt sich konstatieren, dass die Wärme- bzw. Stromgestehungskosten von solaren Energieerzeugern annähernd konstant sind und primär auf den Investitionskosten des Erzeugers basieren. Beispielsweise betragen nach Recherche der „AGFW“ die Kosten für Wartung und Instandhaltung von Solarthermieanlagen jährlich lediglich 0,7 % der Gesamtinvestitionskosten. Hinzu kommen 1 % bis 1,5 % der erzeugten Wärme als Stromkosten.⁶⁰ Die Kosten für den Betrieb von Photovoltaikanlagen liegen in der Regel zwischen 1 % und 2 % der Gesamtinvestitionskosten⁶¹.

Ansonsten hängt der Ertrag eines solaren Energieerzeugers im Wesentlichen von der Sonneneinstrahlung an dessen Standort (siehe hierzu Abbildung 04-17) sowie dem Aufstellwinkel der Module, deren Ausrichtung, der Windstärke und der Außentemperatur ab.

⁵⁶ Vgl. Thünen-Institut (Hrsg.), 2023, S. 61 f.

⁵⁷ Siehe hierzu: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Hrsg.), o. D.

⁵⁸ Eigene Darstellung in enger Anlehnung an: RWE AG (Hrsg.), 2023.

⁵⁹ Siehe hierzu KlimaG BW § 23.

⁶⁰ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2021, S. 20.

⁶¹ Vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.), 2019, S.14 sowie Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N.) (Hrsg.), 2023b, S. 43.

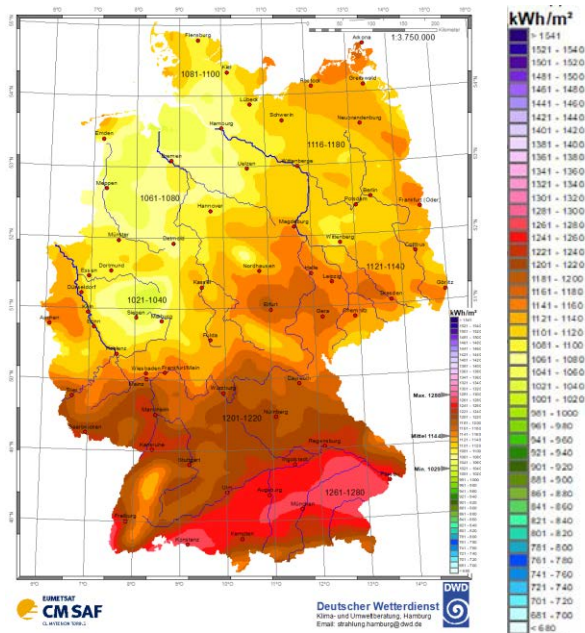


Abbildung 04-3: Globalstrahlung in Deutschland (Jahressumme 2023)⁶²

In Folge sind Besitzer von Solarthermie oder Photovoltaikanlagen im direkten Vergleich zu anderen Energieerzeugern in hohem Maße autark und nicht von Energieträgerpreisschwankungen betroffen. Dies gilt jedoch nur in Zeiten, in denen genügend Strahlung vorhanden ist oder bei Einsatz von entsprechend dimensionierten Speichern, um die erzeugte Energie bis zur Abnahme zu speichern.

04.02.03 Vergleich der Energieerzeuger

Will man Solarthermie und Photovoltaik vergleichen, so spielt die Ausrichtung der Module sowie deren Aufstellwinkel eine essenzielle Rolle. Ein optimaler Ertrag pro m^2 wird in der Regel bei einer Südausrichtung und einem Aufstellwinkel von rund 35° erzielt⁶³. Abbildung 04-4 zeigt die jährliche Einstrahlung in Prozent in Abhängigkeit der Ausrichtung und des Aufstellwinkels, wobei auch bei kleineren Abweichungen vom optimalen Aufstellwinkel annähernd 100 % der Einstrahlung genutzt werden können.

⁶² Deutscher Wetterdienst (DWD), o. D.; basierend auf Satellitendaten und Bodenwerten aus dem DWD-Messnetz

⁶³ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2021, S.12 sowie Berliner Stadtwerke (Hrsg.), o. D.

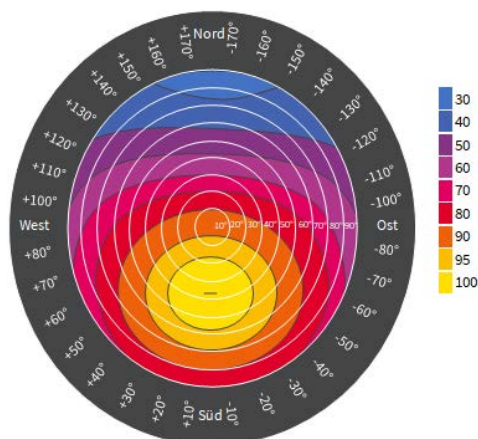


Abbildung 04-4: Solare Einstrahlung in Abhängigkeit von Neigungswinkel und Himmelsrichtung⁶⁴

Allerdings müssen bei dieser optimierten Variante vergleichsweise große Abstände zwischen den Modulreihen aufgrund des Schattenwurfs der Module eingehalten werden (siehe hierzu Abbildung 04-5). Zudem werden bei dieser Aufstellweise die höchsten Erträge um die Mittagszeit, also zu einem Zeitpunkt, zu dem wenig Strom und Wärme benötigt werden, erzielt.

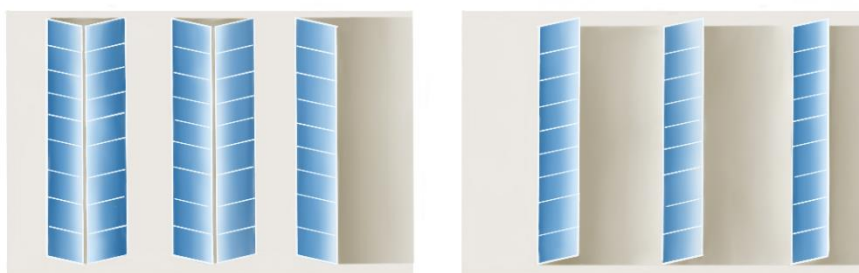


Abbildung 04-5: Vergleich der Aufstellweisen von Solarmodulen

Werden Module in Ost-West oder Nord-Süd Ausrichtung platziert (zumeist in einem Winkel von 10° bis 15°), können auf einer finiten Fläche mehr Module installiert und somit in der Regel ein in Summe höherer Ertrag erzielt werden. Die erzeugte Energiemenge einer Nord-Süd-Ausrichtung ist hierbei über das Jahr gesehen annähernd gleich hoch wie bei einer Ost-West-Ausrichtung⁶⁵. Dies gilt bei Solarthermie sowohl für eine mittlere Kollektortemperatur von 50 °C als auch von 75 °C. In Anlehnung an Abbildung 04-4 mag sich die Frage stellen, wieso die Module bei Ost-, West- oder gar Nordausrichtung nicht flach auf den Boden gelegt werden. Die Antwort hierauf ist, dass bei sehr flachen Winkeln Verunreinigungen auf den Modulen nicht durch Regen abgewaschen werden können.

Der Ertrag von solaren Energieerzeugern hängt neben der Stärke der solaren Strahlung und natürlich der Bauart auch von der Temperaturdifferenz zwischen Modul- und Außentemperatur ab. Solarthermiemodule, welche je nach Einbindung in ein Fernwärmenetz häufig mittlere Temperaturen von 50 °C bis 75 °C erreichen, arbeiten besonders effizient, wenn diese Differenz gering, es also draußen warm und die Modultemperatur möglichst nahe an der Außentemperatur ist. Aus diesem Grund kann es von Vorteil sein, Wärme aus Solarthermiemodulen in den

⁶⁴ Eigene Darstellung in enger Anlehnung an: Ingenieurbüro Junge (Hrsg.), o. D.

⁶⁵ Siehe hierzu Anhang 1 bis Anhang 12. Photovoltaik Simulation mittels PVGIS [Software] (Version 5.2), 2022; Solarthermie Simulation mittels SCFW [Software] (Version 2.0), 2017 sowie Validierung mittels Sceno Calc [Software] (Version 6.2), 2022.

Rücklauf eines Fernwärmenetzes einzubinden, um die mittlere Modultemperatur zu senken. Abbildung 04-6 zeigt diesen Sachverhalt sowohl für Flachkollektoren als auch für die ertragreicheren CPC-Vakuumröhrenkollektoren auf.

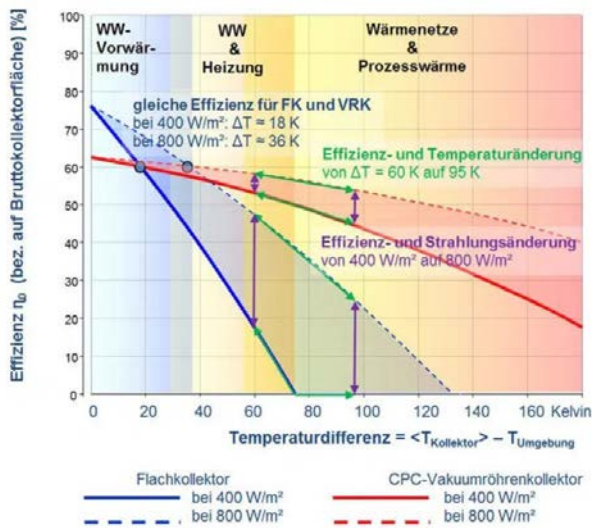


Abbildung 04-6: Wirkungsgrad der Solarthermie in Abhängigkeit der Solarstrahlung und Temperaturdifferenz⁶⁶

Photovoltaik Module mit Zellen aus monokristallinem Silizium erzielen bei 25 °C und 1.000 W/m² Sonneneinstrahlung typische Wirkungsgrade von ca. 19 % und maximale Wirkungsgrade von ca. 24 %. Multikristalline Siliziumzellen liegen hier bei 17 % bzw. 20 %.⁶⁷

Im Gegensatz zu Solarthermie Modulen arbeiten Photovoltaikanlagen jedoch bei geringen Modultemperaturen, bedingt durch niedrige Außentemperaturen sowie Wind am effizientesten (vgl. Abbildung 04-7).

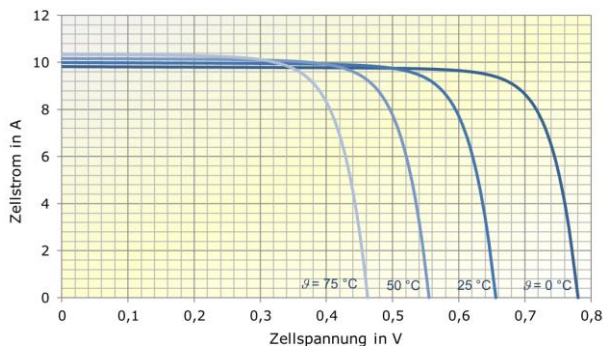


Abbildung 04-7: Solarzellenkennlinien in Abhängigkeit der Modultemperatur (Theta)⁶⁸

Als Faustregel lässt sich pro Kelvin gestiegener Modultemperatur ein Leistungsverlust von ca. 0,4 % annehmen⁶⁹. So kann ein Modul an heißen Sommertagen in einigen Fällen Temperaturen von 70 °C erreichen, was den Wirkungsgrad eines Modules, welches bei 25 °C 20 % und 10 kW_{Peak} erreicht, auf 16 % bzw. auf 8,2 kW_{Peak} senkt (vgl. Abbildung 04-8).

⁶⁶ Ritter XL Solar (Hrsg.), o. D.

⁶⁷ Vgl. Quaschnig, 2021, S. 138.

⁶⁸ Quaschnig, 2019, S. 221. (Hinweis: Die elektrische Leistung ist das Produkt aus Zellstrom und -spannung)

⁶⁹ Vgl. Quaschnig, 2019, S. 221.

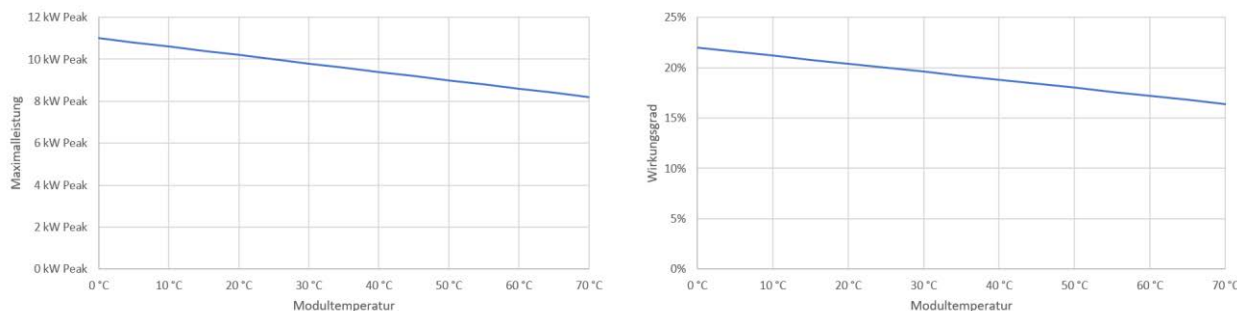


Abbildung 04-8: Maximalleistung und Wirkungsgrad eines PV Moduls in Abhängigkeit zur Modultemperatur

Pauschale Aussagen über den Ertrag der solaren Energieerzeuger sind aufgrund der vielseitigen Einflussparameter jedoch schwierig. Allerdings wird in der Planung häufig von folgenden Richtgrößen in Abhängigkeit von Aufstellort, -winkel und Modultyp gerechnet:

- Der Stromertrag einer Photovoltaikanlage liegt jährlich zwischen 800 kWh und 1.200 kWh pro $\text{kW}_{\text{Peak}}^{70}$. In der Praxis werden in der Regel pro m^2 Bruttofläche ca. $0,2 \text{ kW}_{\text{Peak}}$ angesetzt. Dies resultiert in einem jährlichen Ertrag zwischen 160 kWh und 240 kWh pro m^2 .
- Der jährliche Wärmeertrag von Solarthermieanlagen pro m^2 Bruttofläche liegt zwischen 340 kWh und 540 kWh (je nach Kollektortyp und Modultemperatur)⁷¹.

Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass bei beiden Energieerzeugern mit zusätzlichen Verlusten zu rechnen ist. So verlieren Solarthermieanlagen z. B. Wärme an deren Wärmetauschern bzw. während der Übergabe von Wärme ins Wärmenetz, bei dem Transport der Wärme von den Anlagen zu deren Netzen (in Abhängigkeit der Leitungslänge und Durchmesser) oder durch Maßnahmen zum Frostschutz oder zur Verhinderung von Überhitzung. Photovoltaikanlagen verlieren Strom bei dessen Umwandlung von Gleich- zu Wechselstrom im Wechselrichter. Zudem ist in beiden Varianten mit Verlusten aufgrund von Speicherung, Verschleiß, Verschattung oder Verschmutzung zu rechnen.

04.02.04 Wärmeerzeugung: Solarthermie vs. Photovoltaik plus Wärmepumpe

Im Kontext der multivalenten Fernwärme und der Inkludierung von Wärmepumpen als Erzeugern stellt sich basierend auf den Aussagen des letzten Kapitels folgende Frage: „Wenn eine Photovoltaikanlage im jährlichen Mittel einen Ertrag von $200 \text{ kWh}/\text{m}^2$ erzielt und sie mit einer Wärmepumpe unter Annahme einer Jahresarbeitszahl von drei kombiniert wird, ist dann der Wärmeertrag (also $600 \text{ kWh}/\text{m}^2$) nicht höher als bei einer Solarthermieanlage, welche im Schnitt rund $440 \text{ kWh}/\text{m}^2$ erzeugt?“

Diese Frage ist, wie die folgende Auswertung zeigt, berechtigt (siehe hierzu Tabelle 04-1 sowie Abbildung 04-9). Verglichen wurde am Standort Würzburg der mögliche Wärmeertrag bei Einspeisung in ein typisches Fernwärmenetz mit 70 °C bzw. 90 °C Vorlauf (VL) und einer Spreizung von 30 K^{72} . In Folge wurden für die Solarthermiemodule (ST) mittlere Temperaturen von 55 °C bzw. 75 °C angenommen. Basis waren 5.000 m^2 Solarthermie mit einem jährlichen Ertrag von $509 \text{ kWh}_{\text{thermisch}}/\text{m}^2$ bei einer mittleren Kollektortemperatur von 50 °C sowie optimaler

⁷⁰ Vgl. E.ON (Hrsg.), o. D.

⁷¹ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2021, S. 17.

⁷² Vergleich ohne Verluste durch Leitungen, Wechselrichter etc., aber unter Berücksichtigung der für den Frostschutz der Solarthermie benötigten Wärme.

Ausrichtung⁷³ und das Flächenbedarfsäquivalent von 1.000 kW_{Peak} Photovoltaik (PV) mit einem jährlichen Ertrag von 1.000 kWh_{elektrisch} pro kW_{Peak} bzw. 200 kWh_{elektrisch}/m². Sämtlicher produzierter Strom wurde von einer beispielhaften Luft-Wasser Wärmepumpe (WP) mit einer Jahresarbeitszahl von rund 2,7 bei 70 °C Vorlauf (VL) und rund 2,3 bei 90 °C Vorlauf in Wärme umgewandelt.⁷⁴

Tabelle 04-1: Kumulierte Wärmeerträge über das Jahr

	PV+WP_70 °C VL	ST_70 °C VL	PV+WP_90 °C VL	ST_90 °C VL
Januar	96.773 kWh	55.172 kWh	84.172 kWh	27.184 kWh
Februar	141.014 kWh	83.601 kWh	122.567 kWh	51.461 kWh
März	285.847 kWh	168.339 kWh	247.919 kWh	109.847 kWh
April	417.296 kWh	249.718 kWh	359.534 kWh	176.027 kWh
Mai	391.702 kWh	319.484 kWh	337.145 kWh	227.276 kWh
Juni	320.384 kWh	314.016 kWh	274.617 kWh	213.313 kWh
Juli	395.906 kWh	344.410 kWh	338.822 kWh	249.140 kWh
August	341.901 kWh	338.151 kWh	291.955 kWh	247.031 kWh
September	311.875 kWh	261.196 kWh	267.411 kWh	195.618 kWh
Oktober	142.266 kWh	138.255 kWh	122.748 kWh	90.412 kWh
November	124.883 kWh	39.137 kWh	108.292 kWh	20.887 kWh
Dezember	59.169 kWh	26.940 kWh	51.516 kWh	12.018 kWh
	3.029.016 kWh	2.338.419 kWh	2.606.697 kWh	1.620.215 kWh

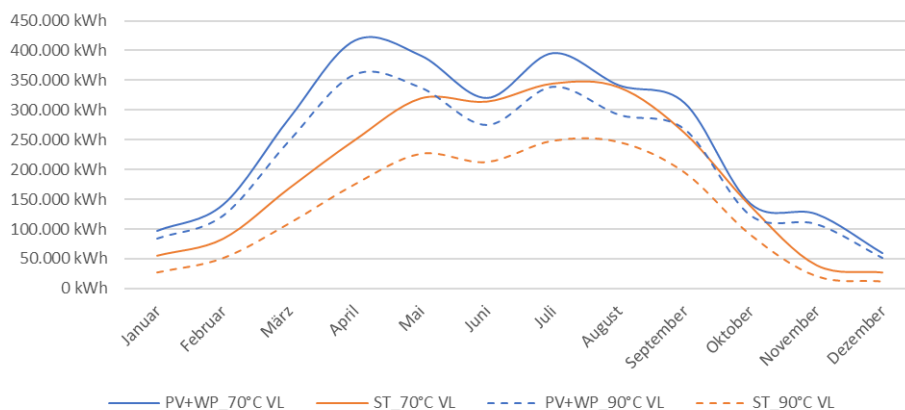


Abbildung 04-9: Kumulierte Wärmeerträge über das Jahr (graphische Darstellung)

Es zeigt sich, dass auch wenn sich die Erträge in einigen Monaten annähern, vor allem in den kalten Monaten ein deutlicher Vorteil zu Gunsten der Kombination aus Wärmepumpe und Photovoltaik erkennbar ist. Zudem wurde auch in Summe mehr Wärme produziert als bei der Solarthermie Alternative. Ein konkurrenzfähiges Solarthermie-Modul müsste in Folge jährlich, verglichen mit dem Industriestandard, weit überdurchschnittlich hohe Erträge nämlich bei 70 °C im Vorlauf 605 kWh/m² und bei 90 °C 520 kWh/m² erzielen.

Auch kann der Vergleich genutzt werden, um aufzuzeigen, dass die Photovoltaikanlage bzw. die angeschlossene Wärmepumpe bereits wesentlich früher mit der Produktion beginnen kann. Bei hohen Vorlauftemperaturen kann

⁷³ Ausrichtung: Azimut = -3 (0=Süden, -90 = Osten) Neigung = 38° gemäß PVGIS [Software] (Version 5.2), 2022.

⁷⁴ Siehe hierzu Anhang 13 bis Anhang 17. Photovoltaik Simulation mittels PVGIS [Software] (Version 5.2), 2022; Solarthermie Simulation mittels SCFW [Software] (Version 2.0).

zudem länger Wärme produziert werden. Allerdings wird in den Mittagsstunden der Sommermonate vor allem bei 70 °C VL signifikant weniger Wärme produziert. Dieser Sachverhalt wird in folgender Abbildung veranschaulicht:

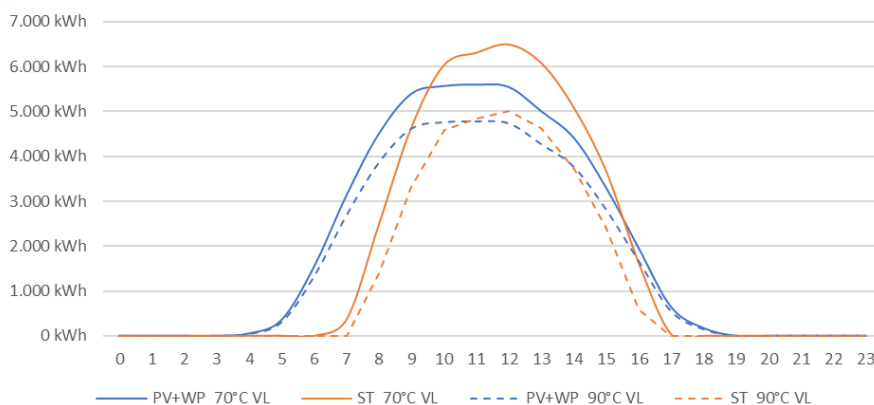


Abbildung 04-10: Mittlere Wärmeproduktion nach Stunde des Tages in den Monaten Mai bis August⁷⁵

Untersucht wurde die mittlere Wärmeerzeugung in den Monaten Mai bis August, da sich in dieser Zeit der Wärmeertrag der beiden Varianten am ehesten annähert und so aufgezeigt werden kann, dass der Ertrag der Solarthermie den der Photovoltaik plus Wärmepumpe temporär sogar übertrifft. Außerhalb dieser Monate ist die Solarthermie bezüglich des Wärmeertrags nicht konkurrenzfähig (vgl. Abbildung 04-11 sowie Abbildung 04-9).

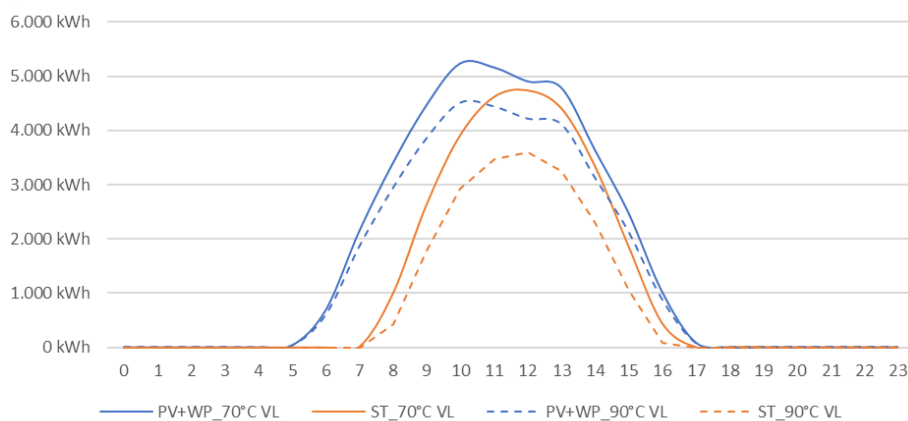


Abbildung 04-11: Mittlere Wärmeproduktion nach Stunde des Tages (März, April, September und Oktober)

Zuletzt sollen in diesem Kontext noch die Erträge einer Südausrichtung (bei 38°) mit einer Ost-West Ausrichtung (13°) in den Monaten Mai bis August verglichen werden⁷⁶. Hierbei wurde der Vergleich bei gleicher Bruttomodulfläche (siehe Abbildung 04-12) sowie gleichem Flächenbedarf zum Aufstellen der Module unter der Annahme, dass bei Ost-West Ausrichtung rund doppelt so viele Module (10.000 m² Bruttomodulfläche, siehe Abbildung 04-13) installiert werden können, durchgeführt.

⁷⁵ Analoge Simulationen zum kumulierten Wärmeertrag und der Produktion nach Tagesstunde in Abhängigkeit der Ausrichtung bei optimiertem Aufstellwinkel können Anhang 18 und Anhang 19 entnommen werden.

⁷⁶ In Anhang 20 und Anhang 21 wird der Vergleich in den Monaten März, April, September und Oktober durchgeführt.

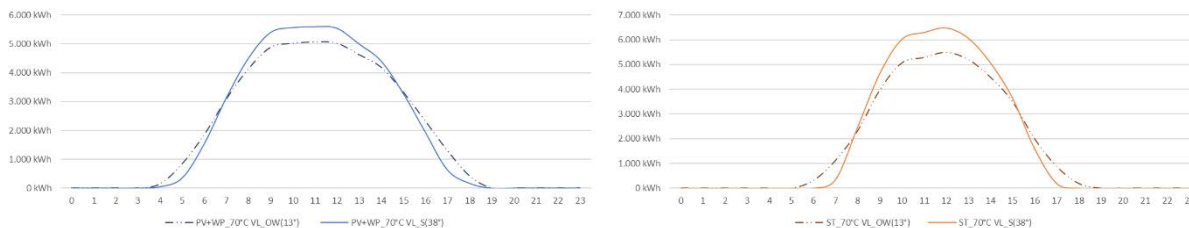


Abbildung 04-12: Vergleich Ost-West zu Süd Ausrichtung bei gleicher Kollektorfläche (5.000 m²)



Abbildung 04-13: Vergleich Ost-West zu Süd Ausrichtung bei gleichem Flächenbedarf

Es zeigt sich, dass die Südausrichtung bei gleicher Modulfläche zwar geringfügig ertragreicher ist⁷⁷, jedoch weniger früh mit der Produktion begonnen bzw. aufgehört wird. Diese Unterschiede sind allerdings v. a. bei der Variante Photovoltaik plus Wärmepumpe so gering, dass die Kurven vereinfacht als gleich angesehen werden können. Bei gleichem Flächenbedarf ist die Ost-West Ausrichtung in allen Punkten überlegen⁷⁸.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass aufgrund der verschiedenen Simulationssoftwares die Simulationsbasis der beiden Energieerzeuger leicht voneinander abweicht. Kleinere Differenzen zwischen den beiden Varianten sollten folglich nicht für generelle Aussagen im Erzeugervergleich genutzt werden. Die getroffenen Aussagen bleiben jedoch valide, da die beschriebenen Effekte auch unter Berücksichtigung etwaiger Simulationsungenauigkeiten bestehen.

04.02.05 Resümee

Auf Basis obiger Ergebnisse stellt sich die Frage, ob die Kombination aus Photovoltaik und einer Wärmepumpe nicht der Solarthermie im Allgemeinen vorzuziehen ist. Vor allem da der scheinbar einzige Vorteil einer Solarthermie Lösung in einer hohen Produktionsspitze in der Mittagszeit der Sommermonate liegt und Wärmekunden tendenziell in den Morgen- und Abendstunden einen höheren Bedarf aufweisen⁷⁹.

Die Antwort ist aus technischer Sicht in den meisten Fällen ein klares Ja. Das gilt vor allem, wenn man bedenkt, dass Wärmepumpen mit Grundwasser oder dem Erdreich als Quelle zu den für den Wärmebedarf relevanten Zeiten aufgrund konstanter Quelltemperaturen eine höhere als die angenommene Effizienz erzielen und somit den Wärmeertrag der Kombinationslösung weiter erhöhen können.

⁷⁷ Erzeugte Wärme aus PV +WP bei Südausrichtung rund 47 MWh bei Ost-West Ausrichtung rund 46 MWh. Erzeugte Wärme aus ST bei Südausrichtung rund 43 MWh bei Ost-West Ausrichtung rund 40 MWh.

⁷⁸ Abgesehen von der Solarthermie in den Monaten März, April, September, Oktober (vgl. Anhang 21). In diesen Monaten sind die Kurven annähernd vergleichbar.

⁷⁹ Basis dieser Aussage ist eine Analyse der Lastprofile der Software nPro [Software] (Version 2.0, 2023).

Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Sachverhalt jedoch weit weniger offensichtlich. So kann Wärme aus Solarthermie wesentlich preiswerter sein als bei der Alternative, auch wenn aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren auf diesen Sachverhalt hier keine definitive Aussage gemacht werden kann. Einflüsse sind bspw.:

- Der **Ertrag der Module**, welcher wie bereits aufgezeigt von vielfältigen Einflüssen abhängt (Vorlauftemperatur im Netz, Möglichkeit der Rücklaufeinspeisung, solare Strahlung, Ausrichtung und Winkel, Aufstellflächen etc.).
- Die **Kosten der Module (inkl. Einbindung)**. Solarthermie Module sind in der Regel wesentlich günstiger als Photovoltaikmodule.
- Die **Kosten der Wärmepumpe**, da diese je nach Anwendungsfall ganz oder zumindest teilweise der Photovoltaik zurechnen sind.
- Aufgrund der unterschiedlichen Investitionshöhen der Alternativen spielen das **vorhandene Eigenkapital** sowie die **Zinskosten** eine wesentliche Rolle, da sie dazu beitragen, dass das teurere Investment im Vergleich noch teurer wird.
- Die **tatsächliche Wärmeabnahme** und in diesem Kontext die vorhandenen **Speichermöglichkeiten**. Kann die von der Solarthermie produzierte Wärme nicht abgenommen oder gespeichert werden, muss sie ungenutzt bleiben. Strom kann, sofern er nicht gespeichert wird, in der Regel alternativ genutzt oder in das Stromnetz eingespeist werden.
 - In Folge spielen die **Einspeisevergütung** von Strom sowie der **Strompreis** bei Eigennutzung eine wesentliche Rolle.
 - Auf der anderen Seite fallen bei Solarthermieanlagen häufig **Mehrkosten für größere Pufferspeicher** an, um die Menge an ungenutzter Wärme zu reduzieren.
- Die **Nutzungsdauer** der Komponenten. Zwar können Solarthermieanlagen und Photovoltaikanlagen annähernd gleich lange genutzt werden, allerdings haben sowohl die von der Photovoltaik benötigten Wechselrichter als auch einige Wärmepumpen (in Abhängigkeit von deren Beanspruchung) geringere Nutzungsdauern.
- Die Quelle der Wärmepumpe bzw. die **erzielbare Jahresarbeitszahl**.

In der Konsequenz ist die Entscheidung für oder gegen eine der beiden Alternativen im Einzelfall zu treffen, auch wenn sich bspw. durch die steigende Elektrifizierung der Mobilität zunehmend Synergien für Photovoltaikanlagen ergeben. Ein Großteil der genannten Einflussfaktoren wirkt zudem auf die Entscheidung bzgl. der Ausrichtung und damit verbunden der Anzahl der Module.

Abschließend sei an dieser Stelle erwähnt, dass solare Energie auch zum Kühlen von Gebäuden genutzt werden kann. Einerseits kann Strom eingesetzt werden, um mittels einer Kompressionskältemaschine⁸⁰ Kälte zu erzeugen. Andererseits kann Wärme durch Ab- oder Adsorptionskältemaschinen⁸¹ in Kälte umgewandelt werden. Dies ist aktuell in einigen speziellen Fernwärmenetzstrukturen lohnend⁸² (vgl. auch Kapitel 05.01.01). Durch die Einbindung von solarer Kühlung wird eine Entscheidung für eine Erzeugeralternative zusätzlich komplexer.

In der Praxis haben sich Solarthermiemodule vor allem im Zusammenspiel mit großen Wärmespeichern oder sogar Saisonalspeichern bewährt. Allerdings hängen hier die benötigten Dimensionen stark von der Anzahl der Kunden eines Fernwärmenetzes bzw. von deren Wärmebedarf ab. So finden Solarthermieanlagen häufig in kleinen

⁸⁰ Der gleiche Prozess, der bei Wärmepumpen genutzt wird, um das Quellmedium abzukühlen und unter Zuführung von elektrischem Strom Wärme zu erzeugen, kann umgekehrt zur Kälteerzeugung genutzt werden, wobei bspw. die Umgebungsluft erwärmt wird.

⁸¹ Die in Wärme gespeicherte Energie wird genutzt, um Kälte zu erzeugen.

⁸² Weiterführende Literatur: Klima- und Energiefonds (Hrsg.), 2021 sowie Klima- und Energiefonds (Hrsg.), 2014.

Netzen, da hier in Relation kleinere Speicher benötigt werden oder in Netzen an Standorten mit der Möglichkeit zum Bau sehr großer Speicher, Anwendung. Zudem hat es sich in einigen Fällen bewährt, Solarthermieanlagen entsprechend dem Trinkwarmwasserbedarf eines Netzes zu dimensionieren und die Wärme prioritär einzuspeisen. Auf diese Weise ist schon bei Nutzung eines kleinen Speichers eine Abnahme der gesamten Wärmeproduktion möglich. Stehen daraufhin noch Flächen zur solaren Energieerzeugung zur Verfügung, ist auch eine Kombination von Photovoltaik und Solarthermie in vielen Fällen sinnvoll.⁸³

04.03 Saisonal-Wärmespeicher

Eine Möglichkeit der Effizienzsteigerung und der Schaffung von Synergien ist, wie bereits in Kapitel 04.02 angesprochen, der Einsatz saisonaler Wärmespeicher. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass deren Wärmespeicherkapazität um ein Vielfaches höher ist als die üblicher Warmwasser-Pufferspeicher. Auf diese Weise ist es möglich, Wärme nicht nur für Bedarfsspitzen zu bevorraten, sondern diese im Sommer effizient zu erzeugen (bspw. mittels Solarthermie oder Wärmepumpen) und in „ineffizienten Zeiten“ wie bspw. einer Dunkelflaute⁸⁴ nutzbar zu machen.

Zuerst sind in Bezug auf die Fernwärme die sensiblen Wärmespeicher zu erwähnen, welche die sensible oder fühlbare Wärme von flüssigen oder festen Speichermedien wie Wasser oder Erde nutzen, indem sie diese erwärmen⁸⁵. Die gängigsten Speicher dieser Art sind (vgl. Abbildung 04-14):

- Beckenspeicher (Englisch: Tank thermal energy storage, kurz TTES)
- Grubenwärmespeicher (Englisch: Pit thermal energy storage, kurz PTES)
- Erdwärmesondenspeicher (Englisch: Borehole thermal energy storage, kurz BTES)
- Aquiferspeicher (Englisch: Aquifer thermal energy storage, kurz ATES)

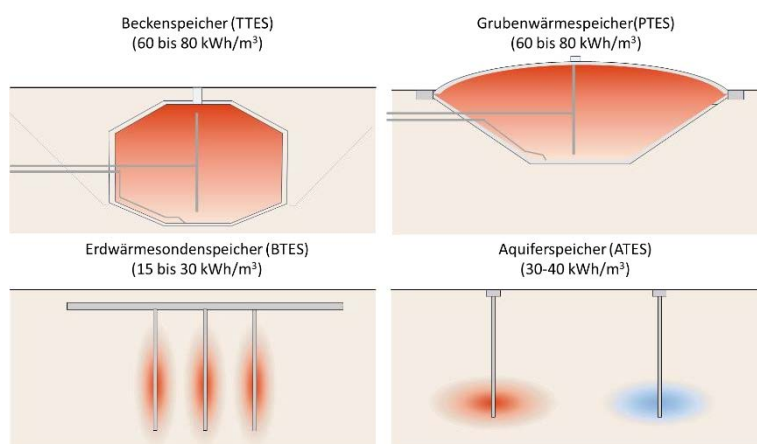


Abbildung 04-14: Typen von Saisonal-Wärmespeichern⁸⁶

⁸³ Basis dieser Aussagen ist die langjährige Projekterfahrung der DME Consult.

⁸⁴ Der Begriff Dunkelflaute bezeichnet Zeiträume, in welchen aufgrund keiner oder geringer Solarstrahlung (Dunkelheit) sowie geringer Windgeschwindigkeiten inkl. 0 m/s (Windflaute) keine Wind- und Solarenergie erzeugt werden kann.

⁸⁵ Vgl. Bundesverband Geothermie (Hrsg.), 2023.

⁸⁶ Eigene Darstellung in enger Anlehnung an: Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020, S. 8.

In Anlehnung an eine Veröffentlichung der „Internationalen Energieagentur“ (IEA), lassen sich die Speichersysteme wie folgt zusammenfassen:

Bei Becken- und Grubenwärmespeichern handelt es sich im Prinzip um unterirdische Warmwasserwärmespeicher mit dem Unterschied, dass bei Grubenwärmespeichern eine Grube isoliert und nach oben abgedeckt wird, wohingegen bei Beckenspeichern ein Tank in Gänze vergraben wird. Aufgrund des gleichen Speichermediums (in der Regel Wasser⁸⁷) sind beide Speicherarten mit 60 bis 80 kWh/m³ ähnlich effizient. Die Temperaturen des Mediums liegen zwischen 5 °C und 95 °C. Bei Beckenspeichern ist auch eine oberirdische Ausführung (Behälterspeicher⁸⁸) möglich, wobei hierfür ein sehr hoher Platzbedarf benötigt wird und die Verluste gerade im Winter aufgrund der unterschiedlichen Umgebungstemperaturen höher ausfallen. Bei Erdwärmesondenspeichern wird Wärme mittels normalerweise 30 bis 100 m tiefer Erdsonden im umgebenden Erdboden gespeichert. Die Effizienz dieser Speicher hängt von der Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens (und möglicher passierter Grundwasservorkommen inkl. deren Strömungsgeschwindigkeiten) sowie der Positionierung der Sonden ab. Die Position der Bohrungen ist wichtig, da die primären Verluste an den Rändern eines Sondenfelds beim Wärmeaustausch mit dem nicht erwärmten Erdboden entstehen. Ein viereckiger oder runder Aufbau ist in Folge einer linearen Aneinanderreihung der Sonden vorzuziehen. Die umliegende Erde kann situationsabhängig bis zu 90 °C erwärmt oder auf -5 °C abgekühlt werden. Im Gegensatz hierzu speichern Aquiferspeicher Wärme in grundwassergeführten Gesteinsschichten (poröses Sandgestein, Kies etc.), sogenannten Aquiferen⁸⁹. Dies ist nur möglich, wenn das vorhandene Wasser sich nicht oder nur sehr langsam bewegt. In oberflächennahen Aquiferen werden in der Regel Temperaturen zwischen 2 °C und 20 °C gespeichert, in tieferen Lagen sind auch Temperaturen bis 80 °C möglich, wobei Temperaturen höher 50 °C zumeist nur bei sehr großen Volumina wirtschaftlich sinnvoll sind.⁹⁰

Neben der generellen Funktion von saisonalen Wärmespeichern, den Wärmebedarf von der -erzeugung über lange Zeiträume zu trennen, zeichnen sich diese Speicher gegenüber kleineren Wärmespeichern durch ihre Energieeffizienz bzw. ihre geringen Wärmeverluste (Wärmeübertragung an den umliegenden Boden, Kälteeintrag aus Regen etc.) aus. Ein Speicher mit einem Volumen von 20 m³ weist bspw. ein Oberflächen-Volumen-Verhältnis auf, das achtmal größer ist als das eines Speichers mit 10.000 m³. In Abhängigkeit von der Dicke der Isolierung eines Speichers werden aber auch saisonale Wärmespeicher mit steigenden Volumina signifikant effizienter⁹¹. In einigen Fällen ist es sogar möglich, in verschiedenen Tiefen bzw. Schichten und sogar innerhalb ein und desselben Speichers sowohl Wärme als auch Kälte zu speichern, was zusätzlich zur Energieeffizienz beiträgt.

Aber nicht nur unter energetischen Gesichtspunkten wächst die Effizienz von Großspeichern mit deren Volumen. Betrachtet man die Auswertungen von Yang und Kollegen sowie der „IEA“, zeigt sich, dass auch die Kosten pro m³ Wasseräquivalent sinken⁹². Im Kontext der wirtschaftlichen Betrachtung sei an dieser Stelle allerdings darauf hingewiesen, dass Erdwärmesondenspeicher und Aquiferspeicher Pumpen benötigen, um das entsprechende Wärmeträgermedium an die Oberfläche zu fördern. Die Stromkosten pro kWh Wärme für diese Pumpen dürfen demnach nicht vernachlässigt werden, sinken in der Regel jedoch auch mit steigenden Volumina. Die „IEA“ rät, in diesem Rahmen anzustreben, mit einer kWh Strom 30 kWh bis 40 kWh Wärme bereitstellen zu können⁹³.

⁸⁷ In Gruben-Wärmespeichern kommen zum Teil Gemische aus Wasser und Kies, Sand oder Erde vor.

⁸⁸ Bezeichnung gemäß Bundesverband Geothermie (Hrsg.), 2023.

⁸⁹ Im deutschen bezieht sich der Begriff Aquifer nach Definition auf alle Gesteinsschichten, die Wasser leiten können, unabhängig davon, ob sie es tun (vgl. Spektrum (Hrsg.), 2001). Im Kontext der Fernwärme wird der Begriff häufig für jene Gesteinsschichten genutzt, die wirtschaftlich nutzbar sind.

⁹⁰ Vgl. Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020, S. 8, 16, 18, 21, 25, 29, 30.

⁹¹ Vgl. Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020, S. 23.

⁹² Vgl. Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020, S. 27, sowie Yang et al., 2021, S. 11.

⁹³ Vgl. Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020, S. 49.

Allerdings ist zu beachten, dass einige vom „Umweltbundesamt“ ausgewertete Studien darauf hinweisen, dass bei Aquiferspeichern in einigen Fällen hohe Temperaturen zu Folgen wie bspw. Mineralausfällung oder Schädigungen der Grundwasserfauna und Mikrobiologieführen können. Mögliche Auswirkung sind Verstopfungen der Pumpen oder eine Beeinträchtigung der Genehmigungsfähigkeit.⁹⁴

Wie bereits erwähnt, können die verschiedenen Speichertypen je nach Umsetzung auch als Kältespeicher dienen. Bspw. ist es möglich, ein Erdsondenfeld während des Winters abzukühlen, um mit der entzogenen Wärme zu heizen und im Sommer die Kälte zur Kühlung zu nutzen und das Sondenfeld somit wieder zu erwärmen. Allerdings wird das beschriebene Beispiel in den meisten Fällen nur in Kombination mit einer Wärmepumpe möglich sein, da der Rücklauf beim Heizen ansonsten nicht wesentlich wärmer sein darf als der benötigte Vorlauf zur Kühlung. Bei Aquiferspeichern gilt in diesem Fall, dass eine wesentlich höhere Temperaturdifferenz erreicht werden kann, sofern zwei Quellen in ausreichendem Abstand genutzt werden können⁹⁵. Gleiches trifft auch auf ausreichend große Grubenwärmespeicher bei effizienter Wärmeschichtung zu⁹⁶ (siehe hierzu Abbildung 04-15).

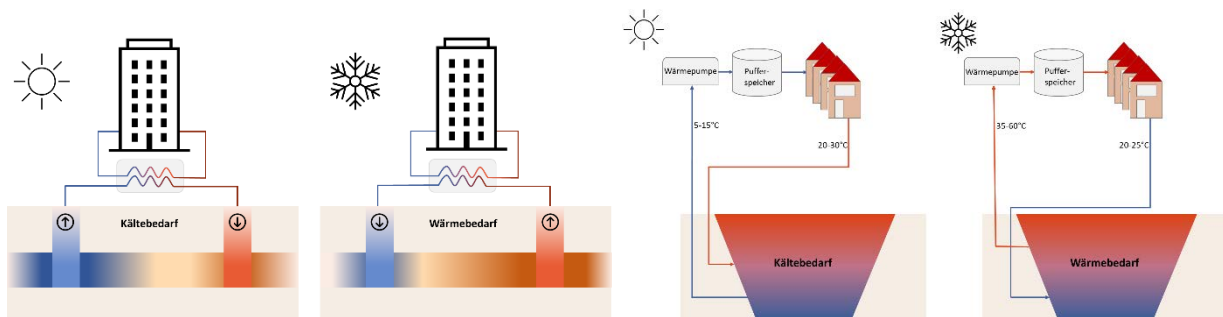


Abbildung 04-15: Nutzung von Großwärmespeichern zum Heizen und Kühlen⁹⁷

Yang und Kollegen haben basierend auf ihren Analysen folgende Entscheidungshilfen bei der Auswahl eines Speichers entwickelt (siehe Abbildung 04-16):

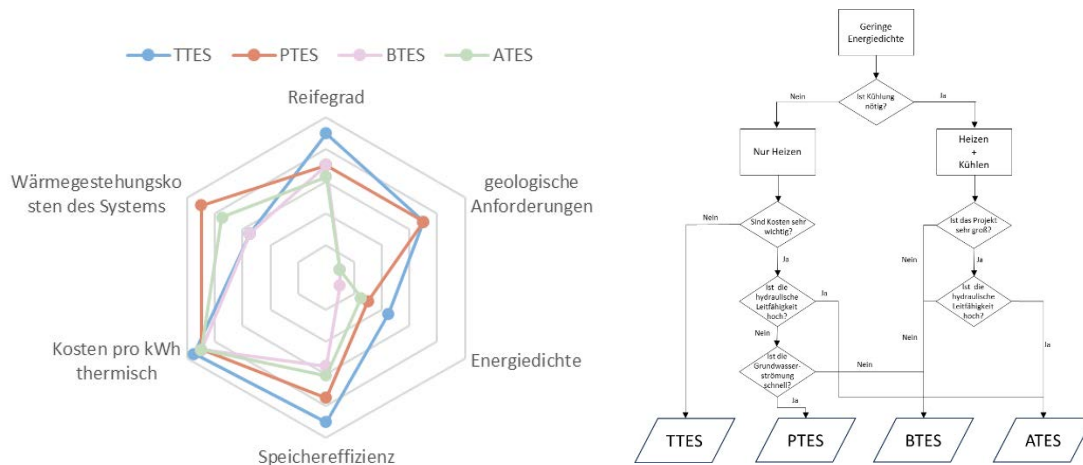


Abbildung 04-16: Entscheidungshilfe zur Auswahl eines Saisonal-Wärmespeichers⁹⁸

⁹⁴ Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.), 2022, S. 120 ff., 186f.

⁹⁵ Vgl. Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020, S. 30.

⁹⁶ Vgl. Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020, S. 57.

⁹⁷ Linke Grafik in enger Anlehnung an IF Technology (Hrsg.), o. D; Rechte Grafik in enger Anlehnung an: Rehman et al., 2021, S. 17.

⁹⁸ Eigene Darstellung in enger Anlehnung an: Yang et al., 2021, S. 11f.

Vergleicht man verschiedene umgesetzte Projekte, so lässt sich erkennen, dass mit zunehmendem Speichervolumen zuerst Beckenspeicher, anschließend Erdwärmesondenspeicher und für die größten Projekte Grubenwärmespeicher umgesetzt wurden⁹⁹. Diese Aussage darf jedoch aufgrund der vielen Faktoren, die die Entscheidung zu einer Speicherart prägen, nicht als Regel, sondern eher als grober Richtwert verstanden werden. Aquiferspeicher wurden in den untersuchten Projekten nicht häufig genug realisiert, als dass sie entsprechend eingeordnet werden könnten¹⁰⁰, auch wenn die Sinnhaftigkeit einer Einordnung aufgrund der hohen geologischen Abhängigkeit unter Umständen auch nicht sinnvoll wäre.

Ein weiterer Grund, der den Einsatz von Aquiferspeichern erschwert, ist das aktuelle Planungsrecht. Das „Umweltbundesamt“ schreibt dabei in einer in diesem Kontext angefertigten Studie:

„Im aktuellen Planungsrecht stellen teils widersprüchliche Angaben in unterschiedlichen Gesetzen und Verordnungen bezüglich der Vorgaben zur Bewirtschaftung von Grundwasser, insbesondere bei der Bewirtschaftung in unterschiedlichen Grundwasserstockwerken ein Hemmnis bei der Planung unterirdischer geothermischer Speicher dar. Naturwissenschaftliche Gesichtspunkte sind derzeit nicht hinreichend im Planungsrecht für unterirdische geothermische Speicher verankert. Zwar beinhalten einige länderspezifische Richtlinien Kenngrößen zur Regulierung der thermischen Nutzung des Grundwassers. Allerdings beziehen sich diese überwiegend auf Erdwärmesonden. Diese Vorgaben sind oft unzureichend für die Planung von unterirdischen geothermischen Speichern.“¹⁰¹

Bzgl. Erdwärmesonden ist bei der Planung vor allem zu beachten, dass bei Bohrtiefen größer 100 m zusätzlich zur in der Regel benötigten wasserrechtlichen Anzeige¹⁰² eine bergrechtliche Anzeige erforderlich ist¹⁰³. Der „Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern“ rät zudem, beim Bau von Erdwärmesonden: „[...] unmittelbar den Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis zu stellen, der zugleich als Anzeige der Bohrung gilt“¹⁰⁴.

Neben den sensiblen Wärmespeichern können auch Latentwärmespeicher¹⁰⁵ (Englisch: Latent heat storage, kurz LHS) oder Thermochemische Wärmespeicher¹⁰⁶ (Englisch: Thermochemical heat storage, kurz THS) zum Einsatz kommen. Diese Speicher eignen sich vor allem dann, wenn sehr hohe Energiedichten benötigt werden, wobei Latentwärmespeicher häufig sehr kostenintensiv und die Technologie thermochemischer Wärmespeicher in Teilen noch nicht ausgereift ist¹⁰⁷. In Folge ist wenig Literatur über den Einsatz dieser Speichermöglichkeiten in Form von Saisonal-Speichern in Fernwärmenetzen vorhanden.

Abschließend soll in diesem Kapitel noch einmal auf die vielseitigen möglichen Synergieeffekte von saisonalen Wärmespeichern hingewiesen werden. Neben der bereits beschriebenen zeitlichen Trennung von Wärmeerzeugung und -bedarf und der Möglichkeit zum Kühlen von Gebäuden sind darüber hinaus die enormen Potenziale von saisonalen Wärmespeichern im Rahmen der Sektorkopplung zu nennen. So kann zum einen ansonsten im Sommer ungenutzte Abwärme (bspw. aus Blockheizkraftwerken oder Industrieprozessen) gespeichert werden und geht auf diese Weise nicht verloren. Zum anderen kann im Verbund mit Wärmepumpen in Zeiten niedriger

⁹⁹ Vgl. Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020, S. 27, sowie Yang et al., 2021, S. 11.

¹⁰⁰ Vgl. Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020, S. 27, sowie Yang et al., 2021, S. 11.

¹⁰¹ Umweltbundesamt (Hrsg.), 2022, S. 183.

¹⁰² Siehe hierzu WHG §49 Absatz 1.

¹⁰³ Siehe hierzu BBergG §127.

¹⁰⁴ Bundesverband Wärmepumpe (BWP) (Hrsg.), 2012, S. 8.

¹⁰⁵ Speicher, in denen durch Wärmezufuhr bzw. -abgabe ein Phasenwechsel des Speichermaterials herbeigeführt wird.

¹⁰⁶ Speicher in denen entweder durch eine chemische Reaktion oder Sorption Wärme gespeichert bzw. abgegeben wird.

¹⁰⁷ Vgl. Yang et al., 2021, S. 11 f.

Strompreise sehr günstig Wärme produziert werden. So ist es auch, sofern von Seiten der Wärmepumpe und des Speichers technisch umsetzbar möglich, die Speicher im Sommer zu „überhitzen“ also auf ein höheres Temperaturniveau aufzuheizen, als es im Vorlauf des Fernwärmenetzes benötigt wird. In Folge kann mehr günstige Wärme gespeichert und vom Sommer in den Winter überführt werden. Der Wärmepumpenhersteller „Qvantum Energi“ setzt bspw. bereits auf ein ähnliches Konzept¹⁰⁸.

04.04 Einstufung biogener Energieträger

Das „Umweltbundesamt“ unterscheidet bei der Definition des Begriffs „Bioenergie“ zwischen vier möglichen Energieträgern. Diese sind:¹⁰⁹

- Eigens landwirtschaftlich angebaute Energiepflanzen wie bspw. Mais, Weizen oder Raps
- Kurzumtriebsplantagen (schnell wachsende Gehölze wie Pappeln oder Weiden) auf landwirtschaftlichen Flächen
- Holz aus der Forstwirtschaft
- Biogene Abfall- und Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft, Haushalten und Industrie

Die im Folgenden formulierte Einschätzung bezieht sich vor allem auf die ersten drei Punkte, auch wenn die Pro-Kopf-Abfallmenge in Deutschland und Europa von vielen Seiten in der Kritik steht und auch im Hinblick auf das Recycling von bspw. Holzabfällen in einschlägigen Medien deutliches Optimierungspotenzial konstatiert wird. Eine Bewertung der Abfallproduktion ist jedoch nicht Bestandteil dieser Untersuchung.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass eine überschneidungsfreie Trennung von Strom- und Wärmeproduktion in diesem Kapitel in einigen Fällen nicht vorgenommen wurde. Grund ist einerseits die beschränkte Datenlage, andererseits, dass Strom in den untersuchten Fällen häufig zeitgleich mit Wärme erzeugt wird.

04.04.01 Umwelttechnische Kritik an der Nutzung von Holz

Wie bereits beschrieben, kann mit dem Einsatz CO₂ neutral produzierter Biomasse nachhaltige Wärme erzeugt werden. Diesem Umstand wird auch im GEG durch das vergleichsweise niedrig angesetzte CO₂-Äquivalent sowie den geringen Primärenergiefaktor Rechnung getragen (vgl. Abbildung 04-1).

An diesem Ansatz bzw. zu der Annahme, Biomasse sei in dem deutschen Wärmebedarf entsprechenden Proportionen nachhaltig, gibt es jedoch einige Kritik. Dr. Ibisch von der „Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde“ formuliert seine Einwände in einem Interview mit dem „Naturschutzbund Deutschland“ (NABU) das in einem Artikel mit der Überschrift „Holz bleibt am besten im Wald - Zustand der deutschen Wälder besorgniserregend“ erschien, wie folgt¹¹⁰:

- „Je mehr Totholz im Wald liegt, desto größer ist seine Widerstandsfähigkeit gegen den Klimawandel“

¹⁰⁸ Vgl. Qvantum Energi (Hrsg.), 2023.

¹⁰⁹ Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023b.

¹¹⁰ Naturschutzbund Deutschland e.V. (Hrsg.), o. D.

- „Wälder mit hoher Einschlagsrate haben meist ein lückenhaftes Kronendach und erwärmen sich deshalb vergleichsweise schnell. Daran ändert auch großflächige Aufforstung nichts“

Aber auch über die Folgeschäden der Bekämpfung des Klimawandels hinaus, ist Totholz ein wichtiger Bestandteil florierender Ökosysteme. Zwar birgt Totholz Risiken, wie etwa Brandgefahr oder den Verschluss von Fließgewässern, so die „Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft“ (WSL). Nichtsdestotrotz sind etwa 25 % der Waldbewohner (insb. Insekten und Pilze) auf Totholz angewiesen. Zudem benötigen Moose, Flechten und verschiedene Wirbeltiere das Totholz. Spechthöhlen, auch in abgestorbenen Bäumen werden von diversen Vogelarten sowie von bspw. Siebenschläfern oder Fledermäusen genutzt. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Bedeutung des Totholzes für die Verjüngung feuchter, hochstaudenreicher Bergwälder. Hier wächst ein erheblicher Teil der Fichten auf verrottendem Holz. Außerdem dient das Totholz als Schutzmaßnahme gegen Elementarschäden. Liegende Baumstämme und Stümpfe tragen zur Bodenstabilisierung bei, was besonders bei Starkregen, Steinschlag und Lawinengefahr von großer Bedeutung ist.¹¹¹

Aktuell werden nur ca. 4 % des deutschen Holzeinschlags, zu dem auch schadholzbedingter Einschlag zählt (z. B. Windwurf, Insektenfraß oder Schneebruch), nicht verwendet¹¹².

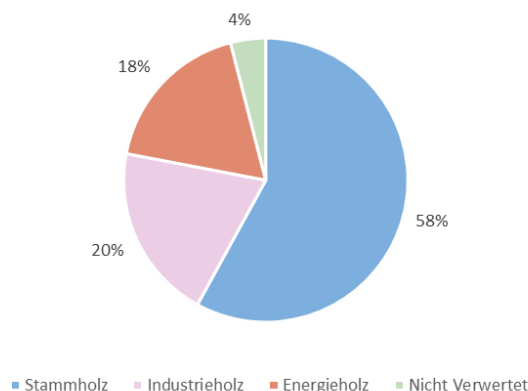


Abbildung 04-17: Gesamteinschlag nach Nutzung in Deutschland 2022¹¹³

Zwar gibt es bereits eine Vielzahl an Schutzmaßnahmen, um den beschriebenen Problematiken zu begegnen, nichtsdestotrotz scheint Holz noch immer nicht seiner Relevanz für das Ökosystem entsprechend behandelt zu werden, wie das Zwischenfazit in einem Artikel der „Europäischen Umweltagentur“ (EAA) deutlich zeigt: „Trotz aller Schutzmaßnahmen kommt es in Europa immer noch zu lokalen Abholzungen und Kahlschlägen, ohne dass neue Bäume gepflanzt werden¹¹⁴“.

Es sei an dieser Stelle gesagt, dass obige Problematiken nicht im Generellen, sondern nur im Spezifischen anwendbar sind. In einigen Fällen mag das CO₂-Äquivalent oder der Primärenergiefaktor für den nicht erneuerbaren Anteil von Biomasse sogar zu hoch angesetzt sein. Das „Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung“ (BMVBS) hat 2012 verschiedene feste Biomassearten untersucht und kommt zu dem sicherlich nicht unumstrittenen Ergebnis, dass ein adäquater Primärenergiefaktor für den nicht erneuerbaren Anteil bei 0,02 für Hackschnitzel aus Altholz und 0,17 für Holzpellets aus Kurzumtriebsplantagen liegen sollte¹¹⁵. Jedoch sieht auch das

¹¹¹ Vgl. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) (Hrsg.), 2019.

¹¹² Vgl. Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.), 2023a.

¹¹³ Eigene Darstellung auf Basis von Daten von Statistisches Bundesamt, 2023.

¹¹⁴ Europäische Umweltagentur (EAA) (Hrsg.), 2023.

¹¹⁵ Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.), 2012, S. 45.

BMVBS eine gewisse Problematik in der Nutzung eines konstanten Primärenergiefaktors: „Durch Rückgriff auf den ‚nicht-erneuerbaren‘ Anteil des PE-Faktors wird suggeriert, als ob erneuerbare, insbesondere biogene Brennstoffe ‚ökologisch nahezu umsonst‘ wären. Dieser Ansatz [kann kritisiert werden], da damit ein Anreiz geschaffen wird, Biomasse zur Erfüllung der EnEV-Pflichten einzusetzen, obwohl sie nicht unbegrenzt zur Verfügung steht und ggf. anderweitig volkswirtschaftlich optimaler eingesetzt wäre¹¹⁶“.

Als möglicher Lösungsansatz wird die Einführung eines Biomasse-Budgets vorgeschlagen. Das bedeutet, dass bis zum Erreichen dieses Budgets oder eines bestimmten Zielwerts in Kilowattstunden Endenergie pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr der erneuerbare Primärenergieanteil der Biomasse, so wie es bisher der Fall war, nur mit dem nicht-erneuerbaren Anteil auf den Primärenergiebedarf des Gebäudes angerechnet wird. Jedoch, für jede Kilowattstunde, um die das Budget überschritten wird, wird der Gesamtprimärenergieinhalt (sowohl erneuerbar als auch nicht erneuerbar) in der Berechnung berücksichtigt.¹¹⁷

04.04.02 Umwelttechnische Kritik an der Nutzung von Energiepflanzen

Zwar sind mehr als 60 % der gesamten in der EU für Energiezwecke bereitgestellten Biomasse holzbasiert¹¹⁸, aber auch die Nutzung von Agrarbiomasse in bspw. Biogasanlagen ist unter umwelttechnischen Gesichtspunkten in Teilen kritisch zu betrachten. Bspw. konstatiert das „Umweltbundesamt“: „ein nicht unerheblicher Anteil, durchschnittlich etwa 5 %, des in Biogasanlagen produzierten Methans entweicht unkontrolliert in die Atmosphäre¹¹⁹“. Aber auch der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen zur Biogaserzeugung kann negative Umweltauswirkungen mit sich bringen. Bspw. wurde Silomais bereits 2006 von der „Europäische Umweltagentur“ ein hohes Risiko zugesprochen, für Nährstoffauswaschungen, Pestizideinträge, Erosionen und negative Auswirkungen auf die Biodiversität verantwortlich zu sein zu können. Das Risiko negativer Auswirkungen auf die Agrodiversität wurde als mittel hoch bis hoch eingestuft.¹²⁰ Im Jahr 2021 betrug der Anteil von Silomais an den zur Biogasproduktion angebauten Nutzpflanzen 56 %¹²¹.

04.04.03 Hinweis zum Ausbau biogener Energieträger

Die Fläche in Deutschland sowie weltweit, die zum Anbau von Energiepflanzen oder Wäldern genutzt werden kann, ist begrenzt. Die „Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe“ fasst die Flächennutzung in Deutschland unter Berufung auf Daten des „Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft“ (BMEL) und des „Statistischen Bundesamtes“ wie in Abbildung 04-18 zu sehen, zusammen.

¹¹⁶ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.), 2012, S. 80.

¹¹⁷ Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.), 2012, S. 80.

¹¹⁸ Vgl. Europäische Kommission (Knowledge Centre for Bioeconomy) (Hrsg.), 2019, S. 3.

¹¹⁹ Umweltbundesamt (Hrsg.), 2019.

¹²⁰ Vgl. Europäische Umweltagentur (EAA) (Hrsg.), 2006, Anhang 4.

¹²¹ Vgl. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.), 2022.

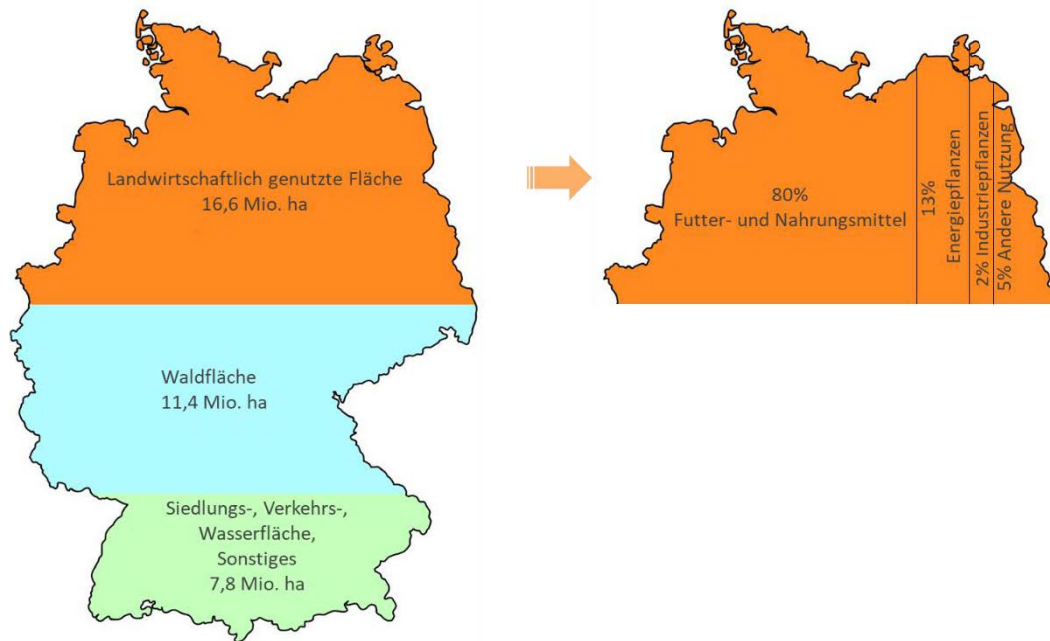


Abbildung 04-18: Flächennutzung in Deutschland¹²²

Neben der Energieerzeugung werden die Erzeugnisse landwirtschaftlicher Nutzflächen sowie von Waldflächen in einer Vielzahl von Industrien benötigt. Hierunter fallen u. a. die Lebensmittel-, die Papier-, die Textil- und die Chemieindustrie sowie die Baubranche¹²³. Ein Ausbau der für Wärme genutzten Wald- oder Landwirtschaftsfläche in Deutschland geht also bei gleichbleibender Siedlungs-, Verkehrs und Wasserfläche (sowie sonstigen Flächen) mit entweder mit einer Reduzierung natürlicher Ökosysteme oder einer Reduzierung industriell benötigter Rohstoffe einher. Da aktuell nicht mit einer erheblichen Senkung des Bedarfs zu rechnen ist, kann davon ausgegangen werden, dass die benötigten Rohstoffe in anderen Ländern der Welt eingekauft und in einigen Fällen dort Ökosysteme zerstört werden. Das beeinflusst zwar die deutsche Ökobilanz nicht unmittelbar, beeinträchtigen aber die weltweite. Dieser Effekt wird gemeinhin mit dem Begriff indirekte Landnutzungsänderung (englisch: indirect land use change; kurz iLUC oder iluc) bezeichnet. Ein Ausbau der biogenen Energieträger ist in Folge in vielen Fällen nicht ohne Umweltschäden umsetzbar.

Genauere Aussagen über die Höhe des iLUC-Effekts können jedoch nicht oder nur schwer getroffen werden. Das „Umweltbundesamt“ fasst die Problematik wie folgt zusammen: „Es ist weitgehend anerkannt, dass der iLUC-Effekt ein bedeutender Faktor für die Ökobilanz von Biokraftstoffen ist. Allerdings ist seine [sic] genaue Bestimmung seiner Größenordnung und die damit zusammenhängenden Emissionen nur über komplexe Modellrechnungen möglich, deren Methodik kontrovers diskutiert wird.“¹²⁴

Zwar erscheint der Einwand sinnvoll, doch die Futtermittelproduktion, welche 2020 noch 60 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland in Anspruch nahm¹²⁵, zu verringern, jedoch steigt die weltweite Fleischproduktion kontinuierlich an (seit 2001 um 51 %)¹²⁶, weshalb auch hier nur von einer Verlagerung der Produktion und damit einhergehendem Abbau von Ökosystemen auszugehen ist.

¹²² Eigene Darstellung in Anlehnung an: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), 2023, S. 16.

¹²³ Ein detaillierterer Überblick ist im Anhang auf Seite XXVIII zu finden.

¹²⁴ Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023b.

¹²⁵ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), 2022, S. 16.

¹²⁶ Vgl. Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.), 2023b auf Basis von Daten (FAOSTAT) der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO).

04.04.04 Flächeneffizienz

Auf Basis der vorangegangenen Kapitel kann die Nutzung biogener Energieträger in vielen Fällen kritisch bewertet werden. Zudem zeigt sich, dass die Fläche, welche nachhaltig für diese Energieträger genutzt werden kann, begrenzt ist und somit auch die Erträge limitiert sind. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob verfügbare Flächen für diese Art von Energieträgern genutzt werden sollen und ob die verfügbaren Kapazitäten nicht in anderen Bereichen besser eingesetzt wären.

In diesem Kontext lässt sich bspw. Kritik an der Nutzung von Energiepflanzen anbringen. Wird statt Silomais auf einer Fläche Photovoltaik installiert, so sind die Stromerträge pro Hektar rund 28-mal so hoch¹²⁷. Wird Windenergie auf der Fläche erzeugt, steigen die Stromerträge im Vergleich zur Silomaisverstromung sogar um das 720-fache¹²⁸. Zwar haben auch Windräder negative Umweltauswirkungen und in Zeiten mit hohem Strombedarf, in denen weder die Sonne scheint noch Wind weht, ist eine alternative Stromerzeugung unumgänglich (sofern der Strom nicht gespeichert werden kann), nichtsdestotrotz geben diese Zahlen eine Basis, um die verstärkte Nutzung von Energiepflanzen zumindest kritisch zu hinterfragen. Es bleibt hinzuzufügen, dass v. a. der Bau von PV-Modulen ökologische Synergien erzeugen kann (vgl. Kapitel 04.02.01).

Sofern in Zukunft bei gleichbleibendem oder nur geringfügig sinkendem Fleischkonsum eine Umstellung weg von der Massentierhaltung hin zur Freilandhaltung erfolgt, ist davon auszugehen, dass dies die Flächenkonkurrenz zusätzlich verschärfen wird.

Was den Einsatz von Holz angeht, welches bspw. in BHKWs oder Pyrolyseprozessen verstromt oder alternativ zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden kann, zieht das Umweltbundesamt folgenden Schluss: „Aus einer Gesamtsicht des Energiesystems wäre es wünschenswert, die knappen Biomasseressourcen in Bereiche zu lenken, in denen andere EE-Anwendungen [EE als Abkürzung für erneuerbare Energien; Anmerkung der Verfasser] nicht oder nur zu sehr hohen Kosten zur Verfügung stehen. Beispielsweise wäre es aus energiesystemischer Sicht sinnvoll, die knappen holzförmigen Biomasse-Ressourcen gezielt in Industrieprozessen anzuwenden, die von hohen Temperaturen abhängig sind, die auf erneuerbarer Basis lediglich durch Biomasse (oder perspektivisch durch synthetische Brennstoffe) bereitgestellt werden können.“¹²⁹

04.04.05 Resümee

Im Fazit lässt sich der Einsatz von Biomasse in Form von Holz oder Energiepflanzen in einigen Fällen kritisch einstufen. Gleiches gilt für den verstärkten Anbau der Energieträger (zumindest in Deutschland), wie er in der aktuellen Debatte häufig gefordert und in diversen Szenarien¹³⁰ prognostiziert wird. Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in Aussagen auf diesem Gebiet prominenter Institute oder Gremien wider:

- „Holzbiomasse sollte nur dann energetisch genutzt werden, wenn 1) dies CO₂-Emissionen reduziert, anstatt (wie dies häufig der Fall ist) zusätzliche Emissionen zu erzeugen oder langfristige CO₂-Senken zu

¹²⁷ Vgl. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.), 2023, S. 16.

¹²⁸ Vgl. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.), 2023, S. 16.

¹²⁹ Umweltbundesamt (Hrsg.), 2021b, S. 286.

¹³⁰ Vgl. Boston Consulting Group (Hrsg.), 2021, S. 167 (Analyse auf Basis von Daten der AG Energiebilanzen e. V. und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie).

mindern, sowie 2) sie aus sorgfältig kontrollierter, nachhaltiger Produktion bzw. insbesondere aus Rest- und Abfallstoffen stammt. Diese Vorgaben ermöglichen eine regional differenzierte Nutzung, schließen aber eine flächendeckende Erweiterung auf große Volumina aus.“¹³¹

- „Aufgrund der zahlreichen Risiken und Nachteile der Nutzung von Energie aus Anbaubiomasse im großen Maßstab empfiehlt das Umweltbundesamt, deren energetische Nutzung nicht auszuweiten und stattdessen der stofflichen Nutzung den Vorrang einzuräumen. [...] Zusammenfassend bedeutet dies, dass der Erfolg der Energiewende nicht an den Ausbau der Bioenergie gebunden ist.“¹³²
- Die Schaffung einer hohen Nachfrage nach Biomasse kann zu einem Raubbau an Ökosystemen oder zu einer veränderten Landnutzung führen, was sich negativ auf die biologische Vielfalt und den Kohlenstoffbestand des Bodens auswirkt. Es ist unerlässlich, die Gewinnung von Biomasse sorgfältig zu steuern, um die Umwelt zu schützen; da Biomasse eine begrenzte Ressource ist, sollte sie umsichtig genutzt werden.¹³³

Der Einsatz von Biomasse als Grundlast eines Wärmeerzeugungssystems, bei welchem im Vergleich zur Verstromung nur geringe Temperaturen benötigt werden, scheint vor diesem Hintergrund fraglich. In Reaktion darauf bzw. um der Relevanz des Rohstoffes Rechnung zu tragen, wird der Einsatz von Biomasse zur Wärmeerzeugung in den deutschen Förderprogrammen im Rahmen der Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW)¹³⁴ und der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)¹³⁵, reguliert. Das Umweltbundesamt empfiehlt sogar, die Förderung von Holzheizungen ganz einzustellen¹³⁶.

Ob ein kompletter Verzicht auf Biomasse in Wärmeerzeugungssystemen kurz und mittelfristig ein gangbarer Weg ist, ist jedoch auch zweifelhaft, da aktuell viele der alternativen Erzeuger fossile Energieträger oder Strom auf deren Basis nutzen. Die Fachzeitschrift „GCB Bioenergy“ veröffentlichte 2021 einen Forschungsbericht, der zu folgendem Ergebnis kam: Die Nutzung nachhaltiger Forstbiomasse für die Energieerzeugung (Wärme, Strom oder Kraftstoffe) kann den Einsatz fossiler Brennstoffe kurzfristig wirksam reduzieren und dazu beitragen, die Verwendung fossiler Brennstoffe in den auf kohlenstoffbasierte Kraftstoffe angewiesenen Technologien und Infrastrukturen schrittweise einzustellen, wodurch künftige Emissionen verringert werden¹³⁷.

Auch muss berücksichtigt werden, dass je nach Standort eines Wärmeerzeugungssystems (bspw. in waldreichen Regionen) vor Ort Restholz aus Grünschnitt oder ähnlichem anfallen kann, das lokal nur zur Wärmeerzeugung genutzt werden kann. Ob es in allen Fällen sinnvoll bzw. nachhaltig ist, das Material an Standorte zu transportieren, an denen es verstromt wird, ist unter Berücksichtigung der zum Transport benötigten Energie fragwürdig.

Nichtsdestotrotz sollte für einen nachhaltigen Einsatz des Rohstoffs eine sog. Kaskadennutzung oder in anderen Worten eine Nutzungshierarchie priorisiert werden (siehe hierzu Abbildung 04-19). Ziel dieser Art der Nutzung ist

¹³¹ Prof. Lucht in Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.), 2022.

¹³² Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023b.

¹³³ Übersetzung des Verfassers: „Creating a huge demand for biomass feedstocks may lead to overexploitation of ecosystems or to land use change, with negative consequences for biodiversity and the soil carbon stock. It is essential to carefully manage the mobilisation of biomass to safeguard the environment; biomass—being a limited resource—should also be used wisely.“; Internationale Energieagentur (IEA) Bioenergie (Hrsg.), 2022, S. 4.

¹³⁴ Vgl. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (Hrsg.), 2023, S. 9 f.

¹³⁵ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.), 2022, Anhang, Punkt 3.3.2.

¹³⁶ Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023c.

¹³⁷ Übersetzung des Verfassers: „The use of sustainable forest biomass for energy (heat, electricity or transport fuels) can effectively reduce fossil fuel use in the short term, and can contribute to phasing out use of fossil fuels in technologies and infrastructure that rely on carbon-based fuels, reducing future emissions.“; Cowie et al., 2021, Abschnitt 13.

es, Biomasse sofern möglich zuerst strukturell, anschließend stofflich und erst im letzten Schritt energetisch zu nutzen.

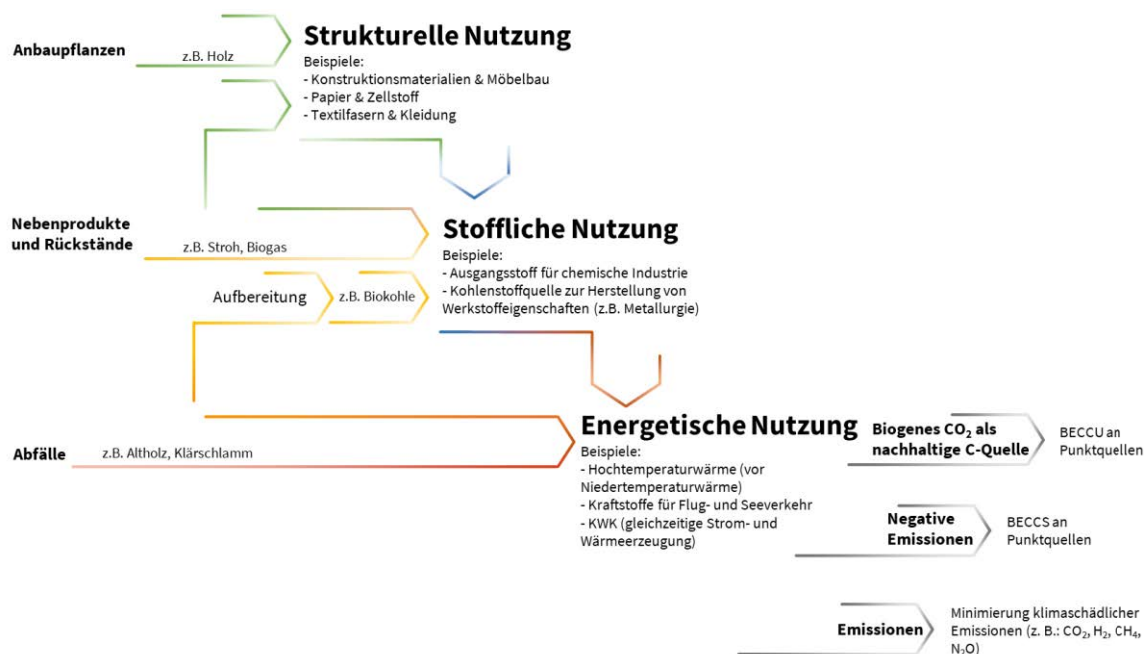


Abbildung 04-19: Nutzungshierarchie von Biomasse¹³⁸

Vor diesem Hintergrund verblüfft die 2021 erschienene Prognose der „Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe“ (FNR) auf Basis von Daten des „Deutschen Biomasseforschungszentrums“ (DBFZ) für das Jahr 2050 nicht. So sollen 23 % des deutschen Gesamtprimärenergiebedarfs mit Biomasse im Generellen und immerhin rund 6 % mittels Energiepflanzen sowie rund 3 % mit Energieholz erzeugt werden (siehe Abbildung 04-20).

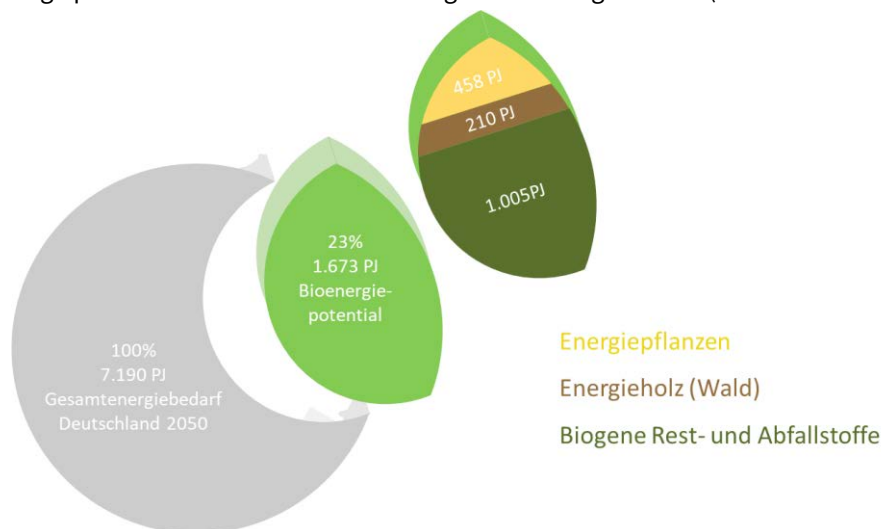


Abbildung 04-20: Bioenergiepotenzial in Deutschland 2050¹³⁹

Das ein bedeutender Prozentsatz der durch Biomasse erzeugten Energie primär für Wärme genutzt wird, ist aus oben genannten Gründen jedoch unwahrscheinlich. Dies spiegelt sich auch in der Arbeit von Lund und Kollegen

¹³⁸ Eigene Darstellung in enger Anlehnung an: NRW.Energy4Climate (Hrsg.), 2023, S. 41.

¹³⁹ Eigene Darstellung in enger Anlehnung an: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hrsg.), o. D. (Copyright der graphischen Aufbereitung 2021).

wider. Laut ihnen wird Biomasse in Wärmenetzen der vierten Generation und somit in Zukunft primär nur noch in Form von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen oder in Zusammenspiel mit der Wasserstoff- bzw. Biogasproduktion zum Einsatz kommen¹⁴⁰.

An dieser Stelle sei zudem erwähnt, dass aus einer finiten Menge Biomasse, welche mittels Verbrennung in eine kWh Wärme umgewandelt werden kann, in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit einem beispielhaften Wirkungsgrad von 40 %, 400 Wh elektrischer Strom und 600 Wh Wärme entstehen. Nutzt man den Strom zur Wärmeerzeugung mittels Luft/Wasser-Wärmepumpe und nimmt für diese einen COP von drei an, so können statt einer kWh 1,8 kWh Wärme entstehen. Selbstverständlich ist diese Rechnung stark vereinfacht und die wirtschaftliche Umsetzbarkeit in kleineren Netzen, sofern nicht ohnehin schon beide Erzeuger existieren mehr als fraglich, jedoch verdeutlicht sie das in diesem Fall verlorene Potenzial beim reinen Einsatz von Biomasse zur Wärmeerzeugung.

Zusammengefasst lässt sich das Fazit ziehen, dass der Einsatz von Biomasse zur Wärmeerzeugung zwar kurz und mittelfristig notwendig sein mag, langfristig jedoch nur begrenzte Einsatzmöglichkeiten bestehen. Aufgrund der in diesem Kapitel formulierten Kritik sollte jedoch auch kurz und mittelfristig bereits geprüft werden, ob die gegebenen Voraussetzungen an einem Standort den Einsatz von Biomasse als Grundlast eines Wärmenetzes rechtfertigen. Der Einsatz von Biomasse für Bedarfsspitzen als Substitut für Öl oder Gas wird vor allem unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bzw. bei im Vergleich zu Alternativerzeugern geringen Preisen pro kW Erzeugerleistung zumindest kurz und mittelfristig sinnvoll sein¹⁴¹. Nichtsdestotrotz ist eine projektspezifische Prüfung ratsam.

04.05 Einstufung von Wasserstoff

Folgend auf die Diskussion biogener Energieträger, in welcher auch „grüne Gase“ also Gase aus organischen Materialien, angeschnitten wurden, soll in diesem Kapitel der Einsatz von grünem bzw. aus erneuerbarem Strom produzierter Wasserstoff zur Wärmeerzeugung analysiert werden. Wenn in diesem Kapitel von Wasserstoff gesprochen wird, so sind darunter auch seine Derivate (bspw. Ammoniak, Methan oder Methanol) subsumiert.

Die Bundesregierung sieht grünen Wasserstoff als zentralen Bestandteil der Energiewende zur Erreichung der Klimaziele und somit zur „Sicherheit und Zukunftsfestigkeit Deutschlands“¹⁴². Hierzu soll seit der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie bis 2030 10 GW heimische Elektrolysekapazität installiert werden (ehemals 5 GW)¹⁴³. Im Jahr 2021 waren jedoch lediglich 0,06 GW Leistung erreicht und aktuell sind Elektrolyseure mit in Summe 1,98 GW im Bau oder in Planung für eine Inbetriebnahme bis 2030¹⁴⁴.

Auch in dem Fall, dass der gewünschte Ausbau bis 2030 umgesetzt wird, ist nicht davon auszugehen, dass damit der gesamte deutsche Wasserstoffbedarf gedeckt werden können wird. Der „Fortschrittmonitor 2023“ kommt in

¹⁴⁰ Vgl. Lund et al., 2021, S. 2f.

¹⁴¹ Zum aktuellen Zeitpunkt ist ein 1 MW Biomassekessel um ein Vielfaches günstiger als (eine) Wärmepumpe(n) mit 1 MW Leistung; Auf Basis der Projekterfahrung der DME Consult.

¹⁴² Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.), 2023b, S. 2f.

¹⁴³ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.), 2023b, S. 3.

¹⁴⁴ Vgl. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (Hrsg.) und Ernst & Young GmbH (EY) (Hrsg.), 2023, S. 38; auf Basis von Daten von BDEW, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz und Prognos AG.

Folge zu dem Schluss: „Um die prognostizierte Lücke von 38–62 TWh zwischen Bedarf und erzeugten Mengen zu schließen, sind Wasserstoffimporte genauso unerlässlich, wie es heute Gasimporte sind.“¹⁴⁵

Auch ist zumindest mittelfristig bzw. bis 2050 trotz des geplanten Wasserstoffausbaus nicht davon auszugehen, dass großflächig Wärme für Wohngebäude mittels Wasserstoff-Gaskesseln erzeugt werden wird¹⁴⁶. Dies liegt zum einen daran, dass grüner Wasserstoff nur nachhaltig aus grünem Strom erzeugt werden kann. Da nicht anzunehmen ist, dass der Weltstrombedarf mittelfristig erneuerbar gedeckt werden kann, ist somit auch grüner Wasserstoff ein begrenztes Gut, das vor allem dort eingesetzt werden wird, wo es keine (preiswerten) Alternativen gibt. In Folge sehen die „Internationale Organisation für erneuerbare Energien“ (IRENA) sowie der Thinktank „Energy Transitions Commission“ die Priorität des Einsatzes von Wasserstoff zur Beheizung von Wohngebäuden als sehr gering an (vgl. Abbildung 04-21)¹⁴⁷.

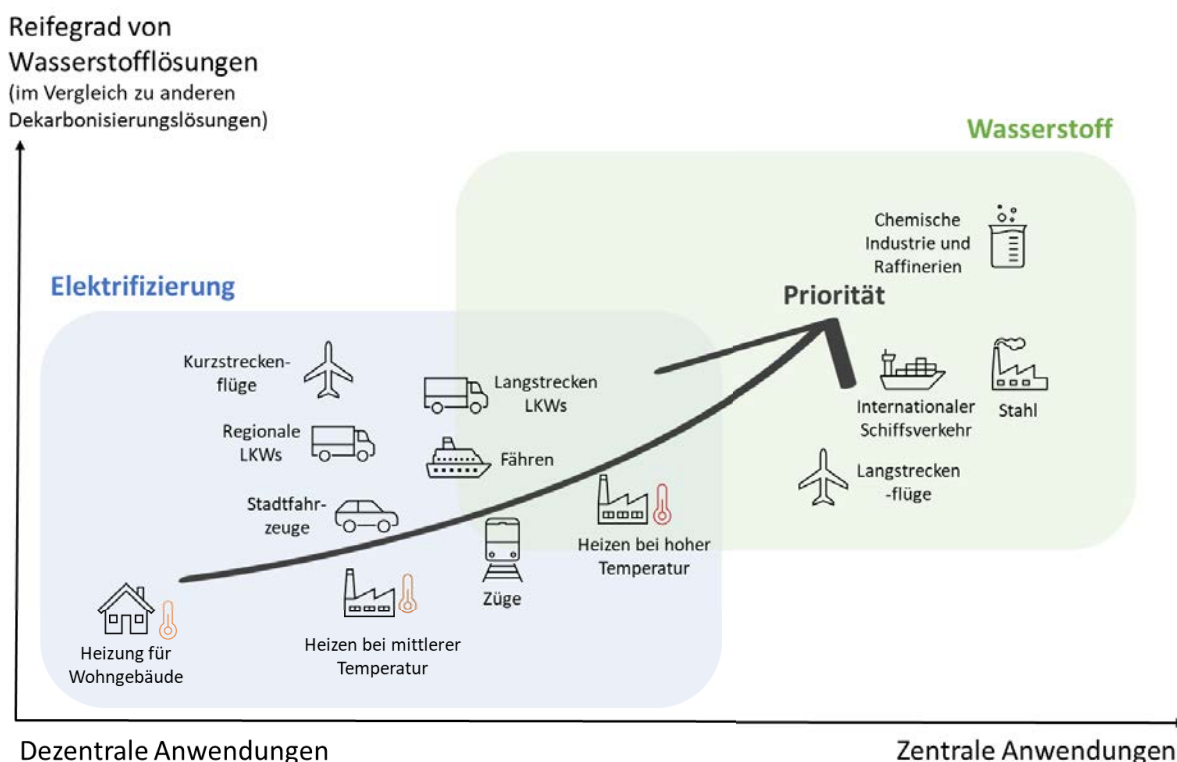


Abbildung 04-21: Priorisierung des Wasserstoffeinsatzes nach Einsatzart¹⁴⁸

Primärer Grund für diese Einstufung ist, dass bei der Wasserstoffherstellung ein beachtlicher Teil des eingesetzten Stroms verloren geht. In Bereichen, in denen eine Elektrifizierung möglich ist, ist der direkte Einsatz von erneuerbarem Strom, sofern er auch für Zeiten geringer Stromproduktion gespeichert werden kann, um ein Vielfaches effizienter. Für die Gebäudebeheizung heißt dies konkret, dass eine Wärmepumpe rund fünfmal so energieeffizient arbeitet wie ein Wasserstoff-Gaskessel¹⁴⁹. Unter anderem aus diesem Grund ist zu prognostizieren, dass die

¹⁴⁵ Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (Hrsg.) und Ernst & Young GmbH (EY) (Hrsg.), 2023, S. 38.

¹⁴⁶ Vgl. Internationale Energieagentur (IEA)(Hrsg.), 2021, S. 61.

¹⁴⁷ Vgl. Internationale Organisation für erneuerbare Energien (IRENA) (Hrsg.), 2022, S. 13 sowie Energy Transitions Commission (Hrsg.), 2021, S. 17.

¹⁴⁸ Eigene Darstellung in enger Anlehnung an: Internationale Organisation für erneuerbare Energien (IRENA) (Hrsg.), 2022, S. 13; auf Basis der Auswertungen von sechs Studien der Jahre 2020 und 2021.

¹⁴⁹ Vgl. Energy Transitions Commission (Hrsg.), 2021, S. 16 sowie Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Hrsg.), 2021, S. 16.

Beheizung mit Wasserstoff zumindest auf absehbare Zeit nicht wirtschaftlich darstellbar sein wird (vgl. Abbildung 04-22)¹⁵⁰.

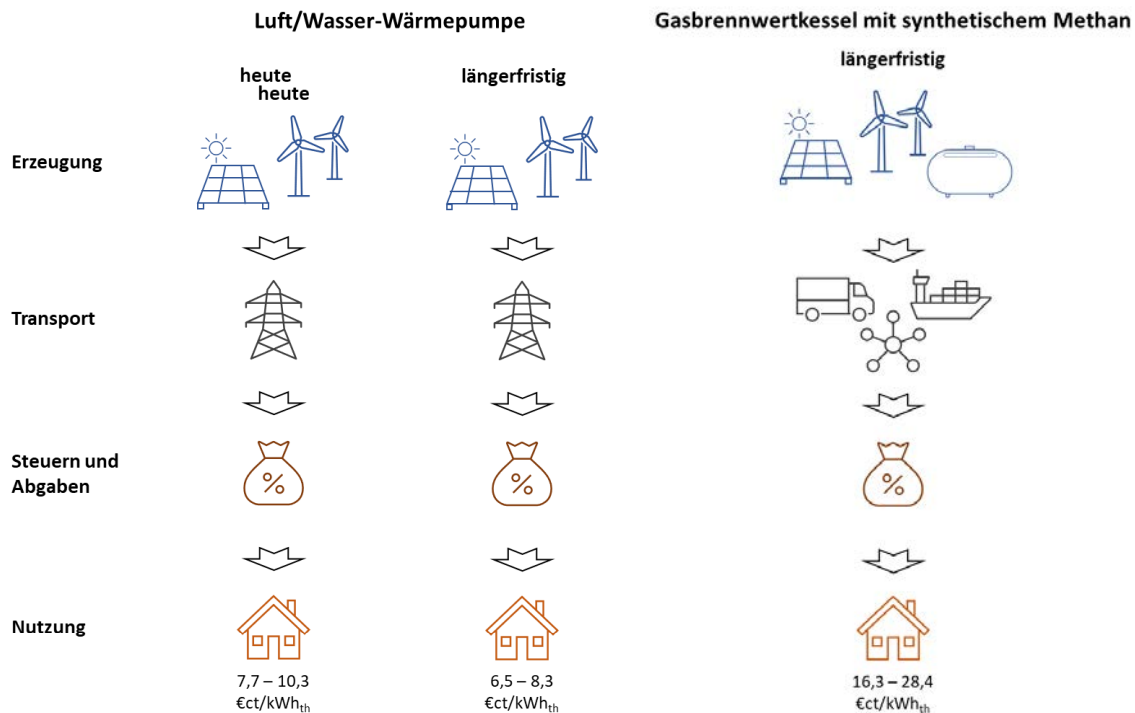


Abbildung 04-22: Kostenvergleich Gasbrennwertkessel und Wärmepumpe¹⁵¹

Zwar wurden die genannten Ergebnisse primär für Einzelkunden untersucht und nicht für einen entsprechend größer dimensionierten und in ein Fernwärmenetz eingebundenen Wasserstoff-Brennwertkessel, nichtsdestotrotz sind sie auch auf diesen anwendbar. Lediglich gilt für den zentralen Gaskessel, dass er nicht zwingend an ein Wasserstoffnetz bzw. ein mit Wasserstoff betriebenes Erdgasnetz angeschlossen werden muss, sofern der Antransport des Brennstoffs sowie dessen Lagerung logistisch bewerkstelligt werden kann. Ob dieser Zusatzaufwand jedoch zu einem wirtschaftlichen Vorteil führt, der die beschriebenen Effizienzprobleme ausgleicht, scheint fraglich.

Dennoch wäre die Aussage, Wasserstoff würde für die Fernwärmenetze der Zukunft keine Rolle spielen, aller Voraussicht nach falsch. Aktuell scheint es, als wäre das genaue Gegenteil der Fall, wenn auch nicht mittels Verbrennung durch Gasbrennwertkessel. Sowohl die oben beschriebene heimische Wasserstoffproduktion als auch der Bedarf werden bis 2045 signifikant ansteigen (vgl. Abbildung 04-23). Da sowohl bei der Herstellung von Wasserstoff als auch bei dessen Umwandlung in seine Derivate und bei einer möglichen Wiederverstromung hohe Wirkungsgradverluste primär in Form von Wärme auftreten, bietet es sich an, diese auftretende Abwärme in Fernwärmenetze einzuspeisen und den Prozess somit wesentlich energieeffizienter zu gestalten.

¹⁵⁰ Vgl. Ueckerdt et al., 2021, S. 391 sowie Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023d.

¹⁵¹ Eigene Darstellung in enger Anlehnung an: Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023d unter Mitarbeit des Fraunhofer IEG und Fraunhofer ISI.

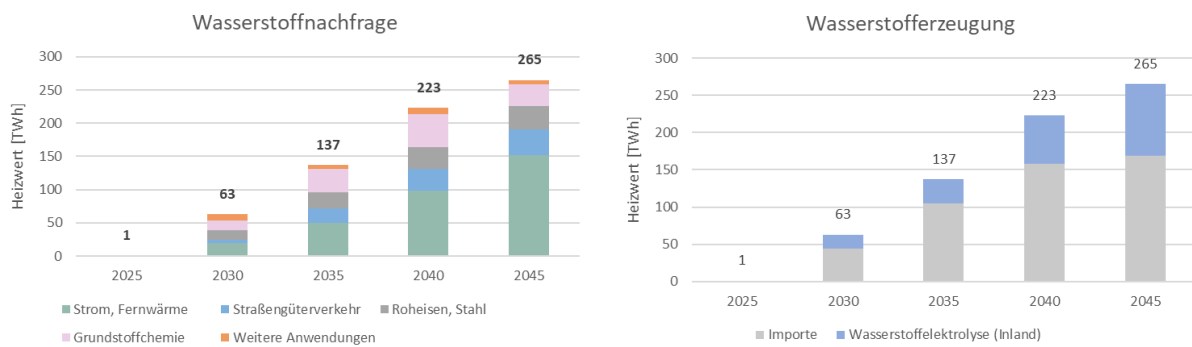


Abbildung 04-23: Erzeugung und Nachfrage grünen Wasserstoffs¹⁵²

Im Fazit ist Wasserstoff ähnlich wie biogene Gase einzustufen. Eine Verbrennung zur reinen Wärmeerzeugung scheint im Generellen kurz und mittelfristig nicht sinnvoll. Diesem Statement schließt sich auch eine Meta-Review über 54 durchgeführte Studien zum Thema Heizen mit Wasserstoff an. Sie kommt zu dem Schluss: Die wissenschaftlichen Erkenntnisse sprechen nicht für die breite Verwendung von Wasserstoff für Beheizung von Gebäuden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Wasserstoff weniger effizient, teurer und umweltschädlicher ist als Alternativen wie Wärmepumpen und Fernwärme.¹⁵³

Nichtsdestotrotz sollte bei der Umsetzung von Fernwärmeprojekten vor Ort geprüft werden, ob im Einzelfall triftige Gründe, wie bspw. eine Überproduktion an Strom ohne Einspeisemöglichkeit in das Stromnetz und fehlende Transportmöglichkeiten für den erzeugten Wasserstoff für einen entsprechenden Einsatz sprechen. Die Nutzung von Abwärme aus dem Erzeugungs- Wandlungs- oder Wiederverstromungsprozess dürfte zudem wie bereits beschrieben, einen wesentlichen Beitrag zur Energieeffizienz von Wasserstoff leisten.

04.06 Abwärme (Industrie, Tiefengeothermie und KWK)

Das Potenzial der Nutzung von Abwärme aus diversen Prozessen wurde in den vorhergegangenen Kapiteln bereits mehrfach angeschnitten und soll nun im Detail erläutert werden. Die „Arbeitsgemeinschaft Fernwärme“ kommt in ihrem „Leitfaden zur Erschließung von Abwärmequellen für die Fernwärmeversorgung“ zu folgendem Fazit: „Nach konservativen Schätzungen des AGFW könnte die Kombination aus der Abwärmenutzung in den Fernwärmenetzen und dem Neuanschluss bisher einzelversorgter Gebäude mindestens 19 Mio. t CO₂ pro Jahr einsparen. Dies entspricht rund 40 % der im deutschen Klimaschutzplan vorgesehenen Einsparungen im Gebäudesektor bis 2030.“¹⁵⁴

Abwärme ist deshalb so effizient und in ihrer Bedeutung für den Klimaschutz nicht zu unterschätzen, da sowieso vorhandene Wärme, welche anderenfalls ungenutzt in die Umgebung abgegeben werden würde, nutzbar gemacht wird. In Folge ist es nicht nötig, zusätzliche Ressourcen für die Erzeugung von Wärme (bspw. Solarthermiemodule) zu investieren. Zwar ist diese Aussage mit dem Hinweis auf benötigte Wärmetauscher sowie

¹⁵² In enger Anlehnung an: Prognos (Hrsg.), Öko-Institut (Hrsg.) und Wuppertal-Institut (Hrsg.), 2021, S. 106.

¹⁵³ Übersetzung des Verfassers: „The scientific evidence does not support the widespread use of hydrogen for heating buildings. This is because it is less efficient, more costly, and more environmentally harmful than alternatives such as heat pumps and district heating.“; Rosenow, 2023, S. 1.

¹⁵⁴ Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2020b, S. 12.

Fernwärmetrassen, um die Wärme von Erzeuger zum Verbraucher zu transportieren, in Relation zu stellen, jedoch ist der hierfür benötigte Aufwand in vielen Fällen wesentlich geringer.

Vor diesem Hintergrund überrascht die Einschätzung der „AGFW“ nicht, wenn diese fordert, die Nutzung vorhandener Abwärme der Nutzung erneuerbarer Energien vorzuziehen. Dies gilt vor allem, wenn man bedenkt, dass Abwärme häufig nicht einfach in die Natur, also bspw. Bäche abgegeben werden darf, sondern zuerst unter Einsatz zusätzlicher Energie abgekühlt werden muss.¹⁵⁵

Unvermeidbare Abwärme entsteht zum einen bei manchen Arten der Stromproduktion. Hierbei sind vor allem Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) zu nennen. Wird Strom bspw. durch die Pyrolyse von Holz oder die Verbrennung von Wasserstoff erzeugt, entstehen hierbei immer Verluste in Form von Wärme. Diese zu nutzen erhöht nicht nur die Effizienz der Anlagen, sondern auch deren Wirtschaftlichkeit. Unter anderem aus diesem Grund ist der Zusammenschluss von erneuerbaren Wärmeerzeugern wie bspw. Wärmepumpen und KWK-Anlagen als innovatives KWK-System (iKWK) aktuell förderfähig¹⁵⁶.

Zum anderen entsteht auch bei der Verstromung von Erdwärme im Rahmen der Tiefengeothermie Abwärme, welche für die Fernwärmeversorgung genutzt werden kann. Tiefengeothermie bezeichnet die Nutzung von Erdwärme aus 400 bis 5.000 m tiefen Bohrungen, wobei eine Verstromung der gewonnenen Wärme nur bei tieferen Bohrungen genauer gesagt ab einer Temperatur von ca. 90 °C wirtschaftlich möglich ist¹⁵⁷. Alternativ kann die gewonnene Wärme auch direkt in Fernwärmenetze eingespeist oder sollte das Temperaturniveau der Abwärme zu gering sein, davor noch mit Hilfe von bspw. Wärmepumpen angehoben werden. In diesem Fall ist jedoch nicht mehr von Abwärmennutzung zu sprechen.

Tatsächliche Abwärme entsteht zudem in diversen Wirtschaftszweigen des verarbeitenden Gewerbes sowie des Dienstleistungssektors, auch wenn die Temperaturniveaus in der Industrie häufig signifikant höher sind. Tabelle 04-2 listet mögliche Abwärme-Erzeuger nach Sektor:

Tabelle 04-2: Potenzielle Abwärme-Quellen

Branchen des verarbeitenden Gewerbes ¹⁵⁸	Dienstleistungssektor ¹⁵⁹
Eisen- und Stahlerzeugung	Rechenzentren
Grundstoffchemie	Wäschereien
Verarbeitung v. Steinen und Erden	Schwimmbäder (Hallenbäder)
Papiergewerbe	Großküchen
Ernährung und Tabak	Einzelhandel (sofern groß genug)
Nicht-Eisen-Metalle & Gießereien	Kühlhäuser
Glas u. Keramik	Krankenhäuser
Metallbearbeitung	Kläranlagen
Fahrzeugbau	
Gummi- und Kunststoffwaren	
Maschinenbau	
Sonstige chemische Industrie oder verarbeitendes Gewerbe	

¹⁵⁵ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2020b, S. 13.

¹⁵⁶ Siehe hierzu KWKAusV §24.

¹⁵⁷ Vgl. Agentur für erneuerbare Energien (Hrsg.), o. D.

¹⁵⁸ Vgl. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (Hrsg.) & GEF Ingenieur (Hrsg.), 2019, S. 7.

¹⁵⁹ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2020b, S. 37.

Es sei jedoch an dieser Stelle erwähnt, dass Abwärme-Quellen v. a. im Dienstleistungssektor häufig auf einem geringeren Temperaturniveau sind, als es für den Betrieb eines Fernwärmenetzes benötigt wird. In Folge muss die Temperatur durch bspw. Wärmepumpen oder Wärmetransformatoren angehoben werden. In einigen Fällen ist es auch möglich, die Abwärme zur Aufheizung des Rücklaufs eines Fernwärmenetzes zu nutzen, um diesen anschließend weniger intensiv erhitzen zu müssen. Bei großen Abwärme-Vorkommen auf einem geringen Temperaturniveau wird zudem häufig die Inkludierung in ein kaltes Fernwärmenetz diskutiert (vgl. Kapitel 05.01.02).

Im Gegensatz dazu fällt Abwärme in den genannten Industriezweigen häufig auf einem derart hohen Temperaturniveau an, dass es sinnvoll sein kann, diese Abwärme noch anderweitig zu nutzen (z. B. sie zu verstromen oder für einen anderen Industrieprozess zu nutzen) und erst die Abwärme aus dem zweiten Prozess (sofern sie anfällt) in Fernwärmenetze einzubinden.

In der „Verordnung über den Vergleich von Kosten und Nutzen der Kraft-Wärme-Kopplung und der Rückführung industrieller Abwärme bei der Wärme- und Kälteversorgung“ wird sogar festgelegt, dass die Abwärme bestimmter Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 20 MW genutzt werden muss, sofern das Ergebnis eines Kosten-Nutzen-Vergleichs positiv ist¹⁶⁰.

Abschließend soll noch darauf hingewiesen werden, dass die „AGFW“ kein Risiko sogenannter „Lock-in-Effekte“, also dem Effekt, dass die Nutzung und Vergütung von Abwärme dazu beiträgt, unnötige Wärme und somit Abwärme zu produzieren sieht. Diesem Einwand wird entgegengehalten, dass die Produktion von Wärme auf einem hohen Temperaturniveau, um anschließend deren Abwärme aus einem ineffizienten Prozess zu verkaufen, in der Regel kostenintensiver ist, als die Erlöse ertragreich sind¹⁶¹.

¹⁶⁰ Siehe hierzu KNV-V § 1 und § 8.

¹⁶¹ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2020b, S. 14.

05 AUSBLICK UND FAZIT

Basierend auf einem Zukunftsausblick, der den Einsatz von Wärmepumpen in verschiedenen Szenarios aufzeigt und den Ergebnissen der bisherigen Kapitel wird in diesem Kapitel ein Fazit zur künftigen Rolle von Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen gezogen.

05.01 Ausblick

Neben der bereits beschriebenen Entwicklungsprognose der Fernwärme und der Einstufung des (zukünftigen) Potenzials verschiedener erneuerbarer Erzeuger soll in diesem Kapitel ein Ausblick zu möglichen weiteren Einsatzmöglichkeiten von Großwärmepumpen sowie zu möglichen Synergien im Bereich der Sektorkopplung gegeben werden.

05.01.01 Nutzung in Kältenetzen

Die „Internationale Energieagentur“ (IEA) prognostizierte in ihrer 2018 veröffentlichten Studie, dass sich gemäß den derzeitigen Trends der Energiebedarf für die Raumkühlung zwischen 2016 und 2050 mehr als verdreifachen wird, was vor allem auf den Wohnungssektor zurückzuführen ist. Gründe hierfür sind unter anderem der Klimawandel und damit einhergehend eine steigende Anzahl extremer Hitzeperioden. Zwar wird der Bedarf in der europäischen Union zumindest im Basisszenario der IEA nur sehr viel geringer steigen als in anderen Regionen der Welt, jedoch ist auch hier eine erhöhte Relevanz der Kühlung klar erkennbar (vgl. Abbildung 05-1).¹⁶²

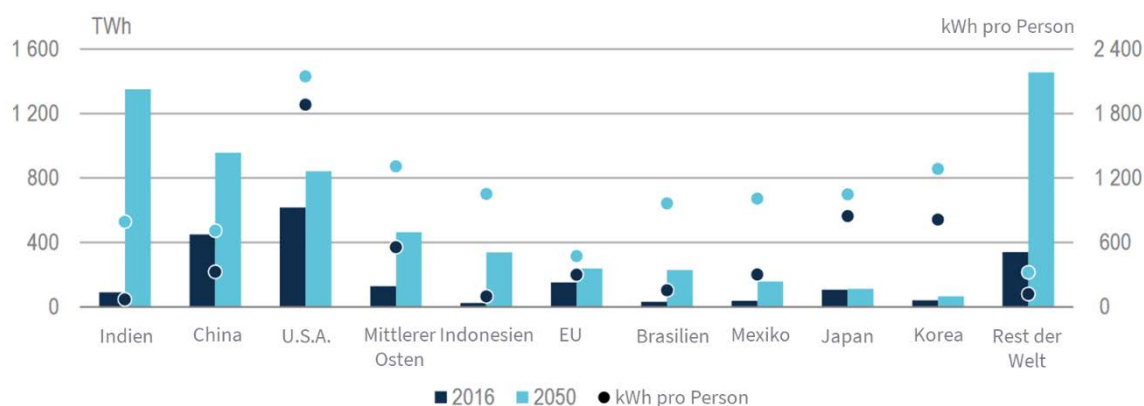


Abbildung 05-1: Energieverbrauch für Raumkühlung nach Land/Region¹⁶³

Selbst unter der Annahme, dass bis zum Jahr 2050 sämtlicher für das Kühlen benötigter Energiebedarf erneuerbar erzeugt wird und somit die Auswirkungen des Klimawandels und der resultierende Kühlbedarf sich nicht gegenseitig bedingen, stellt dies vor allem in städtischen Regionen ein Problem dar. Eine 2020 publizierte Studie rechnet damit, dass die exzessive Nutzung von Klimaanlage während Hitzeperioden durch deren Abwärme zu einer

¹⁶² Vgl. Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2018, S. 61f.

¹⁶³ In enger Anlehnung an: Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2018, S. 62.

Steigerung der Lufttemperatur um mehrere Grad Celsius führen kann¹⁶⁴. Die Auswirkungen auf Kleinkinder, Ältere, Obdachlose und Menschen, die im Freien arbeiten, sind potenziell verheerend.

Um dieser Problematik entgegenzutreten, sind Fernkältenetze eine mögliche Lösung, wobei ein Großteil der für die Fernwärme gelisteten Vorteile (vgl. Kapitel 02) auch auf Fernkältesysteme zutreffen. Eine in Zusammenarbeit mit den „Stadtwerken München“ durchgeführte Dissertation an der „TU München“ kommt zu folgendem Fazit: „Die wichtigste Erkenntnis ist die wesentlich höhere Effizienz der Fernkälte gegenüber einer Eigenlösung. Nutzt man dieses Potential, kann man den steigenden Kältebedarf effizient decken und leistet einen wichtigen Beitrag für eine ökologische und nachhaltige Energieversorgung. [...] Unter Einbezug aller zur Kälteerzeugung und -versorgung benötigten Komponenten sowie unter Berücksichtigung eines optimierten Betriebes in Kombination aller Vorteile lassen sich mit Fernkälte >50 % bis hin zu über 70 % Energieeinsparung gegenüber einer Eigenversorgung erreichen, abhängig von den jeweiligen Vergleichsgegebenheiten.“¹⁶⁵

Großstädte wie Helsinki, Paris und Stockholm betreiben bereits zentrale Fernkälteversorgungsanlagen. Aber auch deutsche Städte wie München, Hamburg oder Rosenheim nutzen Fernkältenetze.

Im Allgemeinen existieren zwei Arten von Kälte: Naturkälte und technisch erzeugte Kälte. Während erstere natürlichen Quellen entstammt wie bspw. dem Erdboden, Grundwasser oder Gewässern, wird die zweite Kälte-Art gemäß ihrem Namen technisch mittels Kältemaschinen erzeugt. Die Vorlauftemperaturen bei der technisch erzeugten Kälte hängen von der Auslegung des Netzes ab, liegen aber bspw. in Hamburg zwischen 6 °C und 8 °C¹⁶⁶ oder in München zwischen 6 °C und 10 °C¹⁶⁷. Bei natürlicher Kälte hängen die Vorlauftemperaturen von der Quelle ab und können sich entsprechend auch über das Jahr ändern. Jedoch sind Temperaturen von 15 °C nicht unüblich¹⁶⁸. Die Rücklauftemperaturen liegen in diesen Beispielen 5 K bis 10 K höher. Im Allgemeinen lässt sich konstatieren, dass die Kühlung mittels Naturkälte wesentlich energiesparender ist als die technische Alternative. In der oben beschriebenen Dissertation kommt der Promovend zu dem Ergebnis, dass im Anwendungsfall für natürliche Kälte (hier Grundwasserkälte) nur rund ein Zehntel so viel Energie benötigt wird wie bei technisch erzeugter Kälte¹⁶⁹.

Nun mag die Frage plausibel scheinen, warum die Kunden von Fernwärmenetzen bspw. durch die Nutzung von privaten Solarthermieranlagen und kleinen Pufferspeichern (evtl. inkl. Heizlanze) nicht während des Sommers ihren Trinkwarmwasserbedarf selbst decken und die vorhandenen Leitungen zur Kühlung genutzt werden. Dies hat neben den voraussichtlich resultierenden äußerst komplexen technischen Anschlussbedingungen (TABs) primär zweierlei Gründe. Zum einen sind für Fernwärme dimensionierte Leitungen zu dünn, um damit in gleichem Maße zu kühlen wie zu heizen. Da die Temperaturspreizung in Kältenetzen um ein Vielfaches geringer ist als in Wärmenetzen, kann in Folge mit der gleichen Menge an Wasser bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit weniger Kälte übertragen werden (vgl. Abbildung 05-2).

¹⁶⁴ Vgl. Viguié et al., 2020, S. 4.

¹⁶⁵ Krystallas, 2017, S. 182f.

¹⁶⁶ Vgl. Hamburger Energiewerke (Hrsg.), o. D.

¹⁶⁷ Vgl. Stadtwerke München (Hrsg.), 2022.

¹⁶⁸ Vgl. Stadtwerke München (Hrsg.), 2022.

¹⁶⁹ Vgl. Krystallas, 2017, S. 182.

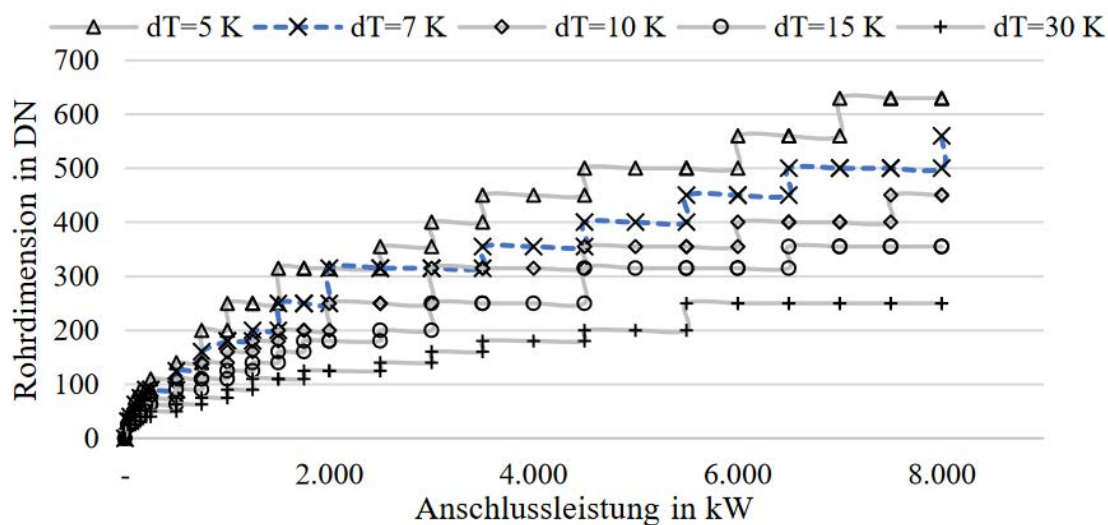


Abbildung 05-2: Benötigte Rohrdimensionen in Abhängigkeit der Anschlussleistung und Spreizung¹⁷⁰

Zum anderen werden aufgrund selbiger Problematik zur Kühlung größere Wärmeübergabestationen benötigt. Im Resultat adressieren Betreiber von Fernkältenetzen aktuell primär an Großkunden wie Industrie oder öffentliche Gebäude. Im Generellen sind in Zeiten von sinkenden Wärme- und steigenden Kältebedarfen Lösungen wie das oben beschriebene Szenario jedoch denkbar. Auch da aktuell die benötigte Heizleistung zumeist noch signifikant höher ist als die benötigte Kühlleistung¹⁷¹. Lediglich müssten aufgrund der größeren Leitungsdimensionen bei der Fernwärmeversorgung höhere Wärmeverluste und Investitionskosten¹⁷² in Kauf genommen werden.

Zudem sehen Experten wie bspw. Hering von den „Stadtwerken München“ aufgrund des voranschreitenden Klimawandels großes Potenzial von Fernkälteleitungen in der Wohnungswirtschaft. Hering begründet dies mit dem bei Einzellösungen anfallenden Lärm und der heißen Abluft von Splitgeräten sowie deren Platzbedarf und dem Platzbedarf benötigter Kälteanlagen¹⁷³. Auch aus Sicht der Städte bietet Fernkälte neben den ästhetischen Aspekten bzw. dem Wegfall der Rückkühlanlagen auf Dächern auch denkmalschutztechnische Vorteile¹⁷⁴. Zum jetzigen Zeitpunkt sollte der Anschluss von Wohnhäusern (v. a. Ein- oder Zweifamilienhäusern) an Fernkältenetze bzgl. dessen wirtschaftlicher Vorteilhaftigkeit jedoch detailliert geprüft werden.

Abschließend soll an dieser Stelle noch das hohe Synergiepotenzial von Fernwärme und Fernkältenetzen hervorgehoben werden. Zum einen ist es mittels Ab- oder Adsorptionskältemaschinen möglich, aus Wärme Kälte zu erzeugen. Zum anderen müssen Wärmepumpen zur Erwärmung einer Wärmeträgerflüssigkeit immer eine Wärmequelle abkühlen. Großwärmepumpen könnten somit Fernkältenetze¹⁷⁵ und gleichzeitig entsprechend dimensionierte (größere) Fernwärmenetze¹⁷⁶ betreiben.

¹⁷⁰ Gross, 2022, S. 101.

¹⁷¹ Beispielhafte Berechnung: Vgl. Gross, 2022, S. 92.

¹⁷² Es ist darauf hinzuweisen, dass Fernwärmeleitungen in der Regel kostenintensiv gedämmt werden, um Wärmeverluste zu minimieren. Diese Dämmung ist in Kältenetzen aufgrund der geringen Vorlauftemperaturen nicht notwendig. Resultat der beschriebenen Lösung wären somit erhöhte Investitionskosten aufgrund der größeren Durchmesser der Leitungen sowie des Mehrbedarfs an Dämmmaterial.

¹⁷³ Vgl. Mein Leben (Hrsg.), o. D.

¹⁷⁴ Vgl. Mein Leben (Hrsg.), o. D.

¹⁷⁵ Vorzugsweise mit Kunden, die auch während des Winters auf Kälte angewiesen sind, wie bspw. Supermärkte oder Rechenzentren.

¹⁷⁶ Im Anwendungsfall stellt die Dimensionierung gemäß dem Trinkwarmwasserbedarf eine intuitive Lösung dar, da dieser ganzjährig bezogen wird.

05.01.02 Nutzung in kalten Fernwärmenetzen

Kalte Fernwärmenetze (häufig auch als kalte Nahwärmenetze bezeichnet) werden mangels allgemeingültiger Definition im Folgenden in Anlehnung an Bilardo und Kollegen als Wärmenetze mit einer Vorlauftemperatur zwischen 10 °C und 25 °C definiert¹⁷⁷. Die Wärmeerzeugung findet in diesen Netzen dezentral mittels Wärmepumpe beim Kunden statt. Häufig wird diese Art der Netze als fünfte Generation der Fernwärme bezeichnet. Gängige Bezeichnungen sind „5th generation district heating“ (kurz: 5GDH) oder „5th generation district heating cooling“ (kurz: 5GDHC). Wie die zweite Benennung zeigt, bieten diese Art der Fernwärmenetze aufgrund ihrer geringen Vorlauftemperaturen auch die Möglichkeit zum Kühlen. In Unterscheidung zu Fernkältenetzen ist dies jedoch nicht ihr einziger Zweck. Aus diesem Grund werden im Sommer auch Vorlauftemperaturen um 10 °C angestrebt und Temperaturen höher 20 °C sind eher unüblich, da in diesen Fällen eine Kühlung mittels Außenluft zumeist effizienter ist¹⁷⁸.

An dieser Stelle soll jedoch die Kritik von Lund und Kollegen an der Bezeichnung der kalten Fernwärme als fünfter Generation geteilt werden. In ihrem Artikel „Perspectives on fourth and fifth generation district heating“ wird aufgezeigt, dass dieser Begriff irrtümlich den Eindruck erwecken mag, Fernwärmenetzen der vierten Generation mit Vorlauftemperaturen von häufig 60 °C bis 70 °C¹⁷⁹ (vgl. auch Kapitel 02.03) technisch überlegen zu sein. Da die Wärmeerzeugung in Fernwärmenetzen der vierten Generation jedoch zentral anstatt dezentral erfolgt und Wärmenetze der fünften Generation nicht nur zum Heizen genutzt werden, lassen sich lediglich unterschiedliche optimale Einsatzbedingungen der beiden Netzarten feststellen. Eine ökologische, ökonomische oder technische Überlegenheit im Allgemeinen kann nicht konstatiert werden.¹⁸⁰

Betrachtet man die Umsetzung kalter Fernwärmenetze, so haben in Europa Deutschland und die Schweiz eine Vorreiterrolle inne¹⁸¹, wobei in Deutschland bereits mindestens 80 Netze errichtet wurden oder sich im Bau befinden¹⁸² (vgl. Abbildung 05-3).

¹⁷⁷ Vgl. Bilardo et al., 2021, S. 1.

¹⁷⁸ Vgl. Wirtz, Schreiber & Müller, 2022, S. 7.

¹⁷⁹ Vgl. Lund et al., 2021, S. 2.

¹⁸⁰ Vgl. Lund et al., 2021, S. 3ff.

¹⁸¹ Vgl. Buffa et al., 2019, S. 1.

¹⁸² Vgl. Wirtz, 2023, S. 4.



Abbildung 05-3: Realisierte kalte Fernwärmenetze in Deutschland nach Wärmequelle¹⁸³

Aktuell wird kalte Fernwärme primär in Neubaugebieten eingesetzt¹⁸⁴. Im Allgemeinen ist jedoch sogar ein Einsatz in nicht renovierten Bestandsgebäuden umsetzbar¹⁸⁵. Gross kommt diesbezüglich zu dem Schluss, dass beim aktuellen Sanierungsstand in Deutschland für etwa 6,5 % bis 8 % des Wohngebäudebestands das Potenzial für einen Anschluss an die kalte Fernwärme besteht¹⁸⁶.

Im Allgemeinen bestehen viele derselben Problematiken, welche in Fernkältenetzen bestehen, auch in kalten Fernwärmenetzen. Aufgrund geringer Temperaturspreizungen, der Softwarehersteller für Wärme- und Kältenetze „heatbeat“ nennt hierfür ein übliches Intervall zwischen 3 K und 8 K¹⁸⁷, werden im Vergleich zur Fernwärme sehr große Leitungsdurchmesser und entsprechende Wärmeübergabestationen verwendet. Zudem werden eine Vielzahl dezentraler Wärmepumpen benötigt, was den Materialeinsatz und in Folge den Wartungs- und Systemregulierungsaufwand in die Höhe treibt. Dem gegenüber stehen allerdings auch beachtliche Vorteile. So kann bspw. niederkalorische Abwärme, die ansonsten ungenutzt bliebe, in das System eingebunden werden. Zudem müssen kalte Fernwärmenetze üblicherweise nicht gedämmt werden, da es aufgrund der niedrigen Vorlauftemperaturen

¹⁸³ Wirtz, 2023, S. 5.

¹⁸⁴ Vgl. Vgl. Wirtz, Schreiber & Müller, 2022, S. 3.

¹⁸⁵ Vgl. Gross, 2022, S. 185.

¹⁸⁶ Vgl. Gross, 2022, S. 187.

¹⁸⁷ Vgl. heatbeat (Hrsg.), o. D.

zu keinen nennenswerten Netzverlusten kommt¹⁸⁸. Auch ist zu erwähnen, dass die genutzten dezentralen Wärmepumpen in Quartieren mit unterschiedlichen Heizsystemen in Teilen signifikant effizienter Wärme produzieren können als eine zentrale Wärmepumpe in demselben Quartier. Grund ist, dass in Häusern mit Flächenheizungen weit geringere Vorlauftemperaturen benötigt werden als in Gebäuden mit herkömmlichen Heizkörpern. Bei einer zentralen Lösung muss sich die Vorlauftemperatur an dem Kunden mit dem höchsten Bedarf anpassen.

Im Kontext von kalten Fernwärmenetzen sind Großwärmepumpen auch auf Kundenseite bei öffentlichen Gebäuden oder großen (Bestands-)Mehrfamilienhäusern denkbar. Hohe Vorlauftemperaturen (>60 °C) werden in Zukunft vermutlich vor allem in schwer sanierbaren oder denkmalgeschützten Gebäuden benötigt.

05.01.03 Exkurs Prosumer

Der Begriff Prosumer setzt sich aus den englischen Begriffen „producer“ (Produzent) und „consumer“ (Konsument) zusammen und bezeichnet einen an ein Fernwärme- oder Fernkältenetz angeschlossenen Verbraucher, der zumindest temporär auch in das Netz einspeist¹⁸⁹.

Beispielhafte Prosumer-Modelle sind bspw. die dezentrale Wärmeeinspeisung von Solarthermieanlagen auf Hausdächern oder die Einbindung eines Supermarkts, welcher bei der Kühlung seiner Produkte und seiner Ladenfläche durch bspw. eine Großwärmepumpe Abwärme produziert¹⁹⁰. Beide Beispiele benötigen im Winter Wärme, können aber im Sommer Überschüsse einspeisen. Auf diese Weise geht keine Wärme vor Ort verloren und die Produktion der für Trinkwarmwasser benötigten Wärme von Seiten des Netzbetreibers kann reduziert werden.

Die Herausforderungen an die Einbindung von Prosumern sind jedoch vielseitig:

- Zum einen müssen Verträge zur Vergütung der eingespeisten Wärme geschlossen werden, was den Verwaltungsaufwand eines Netzbetreibers erhöht.
- Aus wirtschaftlicher Sicht ist zudem darauf zu achten, dass die von den Prosumern eingespeiste Wärme keine vom Netzbetreiber erzeugte „kostenlose“ Wärme bspw. durch Solarthermie substituiert.
- Auch steigt der Regelungsaufwand der Netzhydraulik, da durch zu geringe Differenzialdrücke Probleme entstehen können¹⁹¹.

Im Fazit lässt sich zu diesem Exkurs sagen, dass sofern in einem Quartier mit Fernwärmenetz Prosumer insb. mit eigenen Großwärmepumpen auftreten, deren Einbindung sorgfältig zu prüfen ist, sie jedoch zu einer höheren Energieeffizienz beitragen kann.

05.01.04 Synergien im Bereich der Sektorkopplung

Gegenwärtig bieten sich im Bereich der Sektorkopplung, sprich bei der Schaffung von Synergien zwischen dem Wärme-, Strom- und Verkehrssektor, noch ein hohes Optimierungspotenzial. Vor allem in Zeiten hoher erneuerbarer Stromproduktion kann die Speicherung der Energie in Form von Wärme bspw. durch den Einsatz von

¹⁸⁸ Vgl. Gross, 2022, S. 188.

¹⁸⁹ Vgl. Ancona et al., 2021, S. 1.

¹⁹⁰ Vgl. Gross et al, 2021, S. 12.

¹⁹¹ Vgl. Brage, 2019, S. 25 f.

Wärmepumpen im Verbund mit Speicherlösungen, aber auch anderer Power-to-Heat-Lösungen¹⁹² zu verschiedenen Vorteilen führen:

- Zum einen wird das **Stromnetz temporär entlastet** und eine Drosselung oder gar Abschaltung erneuerbarer Stromerzeuger vermieden. Dies führt u. a. zu einer **Verbesserung der CO₂-Bilanz** des Fernwärmesystems.¹⁹³
- Zudem ist zu berücksichtigen, dass in Zeiten hoher Stromproduktion die Strompreise signifikant sinken, was in Folge zu **sinkenden Wärmegestehungskosten** führen kann¹⁹⁴.
- Dies gilt vor allem, da auch nach Inkludierung der Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe, **Wärmespeicher zumeist signifikant günstiger als Stromspeicher** sind¹⁹⁵.

Ein entsprechend flexibler Einsatz von Power-to-Heat-Erzeugern, genauer gesagt die Ermöglichung, überschüssigen Strom zum Zeitpunkt seiner Produktion auch vollumfänglich nutzen zu können, führt jedoch dazu, dass Erzeuger überdimensioniert werden müssen. In anderen Worten: Der Erzeuger muss eine höhere Leistung innehaben, als für den regulären Betrieb bspw. eines Wärmenetzes benötigt würde. Die Studie „Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland“ geht in diesem Kontext davon aus, dass künftige Großwärmepumpen im Schnitt nur noch 1.300 Vollbenutzungsstunden¹⁹⁶ haben werden¹⁹⁷.

Auf der anderen Seite ist jedoch auch davor zu warnen, dass der verstärkte Einsatz von Power-to-Heat-Erzeugern besonders in kalten Nächten zu einer Überforderung des Stromnetzes führen könnte. Dies ist bei der Planung von Heizsystemen zu beachten und besonders im Fernwärmekontext sind geeignete Maßnahmen (bspw. die Inkludierung von KWK-Anlagen¹⁹⁸) diesbezüglich zu ergreifen.

Sehr viel vager sind Prognosen, welche positive Wechselwirkungen zwischen dem Wärme- und Verkehrssektor beschreiben. Sofern hier jedoch Synergien entstehen, ist es wahrscheinlich im Bereich des „bidirektionalen Ladens“. Bidirektionales Laden beschreibt den Sachverhalt, dass Elektroautos als Stromspeicher genutzt werden können. Also beispielsweise mittags in Zeiten hoher Stromproduktion beladen und entsprechend abends bspw. für den eigenen Strombedarf oder den Betrieb einer Wärmepumpe entladen werden können. Auf die rechtlichen Aspekte des bidirektionalen Ladens soll in dieser Arbeit nicht eingegangen werden. Die technische Umsetzbarkeit hingegen ist erwiesen. Mehrere Automodelle¹⁹⁹ besitzen bereits die entsprechenden Anforderungen (in Form eines sog. „CCS-Stecker“) und auch schon einige Wallboxen (sog. DC- Wallboxen) verfügen über die technischen Voraussetzungen²⁰⁰. Grundsätzlich ist somit eine Kopplung der Sektoren Wärme und Strom möglich. Dazu, ob sich in Europa und im speziellen in Deutschland im Fernwärmekontext Symbiosen ergeben werden, konnte keine Literatur gefunden werden. Denkbar wäre aber bspw. ein Stadtwerk, welches auch eine Carsharing-Flotte betreibt. Sind die Kunden in diesem Beispiel zum Großteil Pendler und die Autos werden abends wieder auf einem

¹⁹² Erzeuger, die Strom in Wärme umwandeln.

¹⁹³ Vgl. Agora Energiewende (Hrsg.), Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG) (Hrsg.), 2023, S. 40.

¹⁹⁴ Vgl. Monie, Hesamzadeh & Aberg, 2022, S. 14.

¹⁹⁵ Vgl. hierzu: Internationale Organisation für erneuerbare Energien (Hrsg.) (IRENA), 2017, S. 100 sowie Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020, S. 27.

¹⁹⁶ Die Vollbenutzungsstunden ergeben sich aus der Division der erzeugten Wärme durch die Leistung eines Erzeugers.

¹⁹⁷ Vgl. Agora Energiewende (Hrsg.), Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG) (Hrsg.), 2023, S. 43.

¹⁹⁸ Vgl. Fesefeldt et al., S. 14.

¹⁹⁹ Bspw. der Honda e, Hyundai Ioniq 5 und der KAI EV6.

²⁰⁰ Vgl. enercity (Hrsg.), 2023.

zentralen Parkplatz abgestellt, ist es möglich, wenn die Autos tagsüber beim Arbeitgeber an das Stromnetz angeschlossen werden, hier zu günstigen Tarifen zu laden und abends jenen Strom teilweise zum Betrieb einer Wärmepumpe zu nutzen. Wahrscheinlicher sind solche Szenarien jedoch in Regionen mit milderen und sonnenreicheren Wintern. Der Autor der Studie „Bidirectional charging as a strategy for rural PV integration in China“ hält exemplarisch eine Kombination aus Photovoltaik, bidirektionalem Laden und Wärmepumpen im ländlichen China für grundsätzlich möglich²⁰¹. Obwohl sich diese Studie nur auf Privathaushalte beschränkt, zeigt sie zumindest eine mögliche Zukunft für die Verknüpfung von Verkehr und Power-to-Heat-Erzeugern auch für die Fernwärmeversorgung auf.

05.01.05 Resümee

Auch neben der klassischen Nutzung von Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen gibt es eine Vielzahl zusätzlicher Einsatzmöglichkeiten. Die Tendenz ist, wie dieses Kapitel aufzeigt, steigend. Bei der Planung künftiger Wärmenetze sollte in Folge immer auf mögliche Synergien geachtet werden. Diese können wie dargestellt den Projektrahmen erweitern (vgl. Kapitel 05.01.01), Kunden zusätzliche Möglichkeiten wie das Kühlen eröffnen (vgl. Kapitel 05.01.02), zusätzliche Wärme- oder Kältequellen erschließen (vgl. Kapitel 05.01.03) oder die Schadstoffbilanz von Projekten verbessern (vgl. Kapitel 05.01.04). Zudem kann auch die wirtschaftliche Umsetzbarkeit durch jeden dieser Punkte positiv beeinflusst werden.

05.02 Fazit

Im Zuge dieser Untersuchung wurden mehrere Hundert Quellen eingehend analysiert, wovon über 100 in die vorliegende Arbeit eingeflossen sind. Das Ziel dieser Studie bzw. des Leitfadens bestand darin, eine äußerst präzise Darstellung des aktuellen Status von Fernwärmenetzen sowie ihrer möglichen erneuerbaren Wärmeerzeuger zu liefern. Zusätzlich sollten zukünftige Entwicklungen auf diesem Gebiet untersucht werden, um darauf aufbauend potenzielle weitere Anwendungsfelder für Großwärmepumpen aufzuzeigen.

Im Resultat kann die in der Einleitung aufgestellte These, dass Wärmepumpen einen essenziellen Bestandteil der Energiewende im Bereich der Fernwärme darstellen werden, bestätigt werden. Einer der wichtigsten Gründe hierfür ist, dass in Zukunft sinkende Versorgungstemperaturen in Fernwärmenetzen dazu führen werden, dass Verbrennungsprozesse zur reinen Wärmeerzeugung zunehmend unrentabel und auch aus umwelttechnischer Sicht nachteilig werden. Die zunehmende Integration von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energieträger ist demzufolge häufig auch im Verbund mit Wärmepumpen wahrscheinlich.

Des Weiteren ermöglichen niedrigere Vorlauftemperaturen die wirtschaftliche Integration bisher ungenutzter Wärmequellen. Diese können in vielen Fällen nur durch den Einsatz von Wärmepumpen erschlossen werden.

Dennoch sind bei der Planung und Umsetzung zukünftiger Fernwärmenetze Standortvorteile und potenzielle Synergieeffekte entscheidende Faktoren für eine positive Umweltbilanz sowie den wirtschaftlichen Betrieb. Oft können hier multivalente Netze monovalenten Alternativen überlegen sein, insbesondere aufgrund der Flexibilität bei der Nutzung verschiedener (Ab-)Wärmequellen.

²⁰¹ Vgl. Oxford Institute for Energy Studies (Hrsg.), 2023, S. 16.

Ein besonderes Augenmerk sollte auf Saisonal-Pufferspeicher sowie Synergien mit dem Stromsektor gelegt werden. Besonders in diesen Bereichen kann sich auch bei sinkenden Vorlauftemperaturen in Fernwärmenetzen die Möglichkeit, hohe Temperaturhübe zu realisieren, positiv auf die Umweltbilanz sowie die Wirtschaftlichkeit auswirken.

In Quartieren mit ausreichender Besiedlungsdichte für Fernwärme, jedoch ohne die Möglichkeit zur Nutzung von Standortvorteilen oder der Installation von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist zu erwarten, dass sich Luft/Wasser-Großwärmepumpen zunehmend zumindest zur Grundlastdeckung durchsetzen. Beispielhafte Quartiere zeichnen sich durch kontaminierte Böden, Nutzungsbeschränkungen beim Grundwasser etc. aus. In solchen Fällen wird die Ausstattung sämtlicher anliegender Gebäude mit Photovoltaik- oder Solarthermiemodulen zunehmend relevant, wobei die Solarthermie speziell für die Trinkwarmwasseraufbereitung dimensioniert werden sollte. Ob sich Luft/Wasser-Großwärmepumpen vor dem Hintergrund gesunkener Gas- und Biomassepreise an allen aus umwelttechnischer Sicht sinnvollen Standorten kurz und mittelfristig wirtschaftlich verwirklichen lassen, bleibt jedoch abzuwarten.

LITERATURVERZEICHNIS

Agentur für erneuerbare Energien (Hrsg.), ohne Datum:

„Tiefengeothermie“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.unendlich-viel-energie.de/erneuerbare-energie/erdwaerme/tiefengeothermie>

Agora Energiewende (Hrsg.), Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG) (Hrsg.) , 2023;

Ahrendts, F., Drechsler, B., Hendricks, J., Küpper, J., Lang, S., Peil, T., Scholz, D., Timofeeva, E., Utri, M., Weidinger, L., Kraus, A., Weiß, U., Müller, S.: „Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland - Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-11_DE_Large_Scale_Heatpumps/A-EW_293_Rollout_Grosswaermepumpen_WEB.pdf

Ancona, M., Bianchi, M., Branchini, L., Pascale, A., Melino, F., Peretto, A., Rosati, J., 2021:

„Influence of the Prosumer Allocation and Heat Production on a District Heating Network“, in *Frontiers in Mechanical Engineering*, Band 7

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.3389/fmech.2021.623932>

Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2020a;

Thamling, N., Langreder, N., Rau, D., Wünsch, M., Maaß, C., Sandrock, M., Fuß, G., Möhring, P., Purkus, A., Strodel, N.: „Perspektive der Fernwärme - Maßnahmenprogramm 2030“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2021/06/AGFW_Perspektive_der_Fernwaerme_2030_final.pdf

Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2020b;

Stark, S., Uthoff, F., Miller, J.: „Leitfaden zur Erschließung von Abwärmequellen für die Fernwärmeversorgung“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.gruene-fernwaerme.de/fileadmin/Redakteure/gruene-fernwaerme/02_Das_Netzwerk/Netzwerk_Karte/AGFW/210401_Abw%C3%A4rmeleitfaden_Langfassung.pdf

Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2021;

Kühne, J., Roth, T., & Schwabe, G.: „Praxisleitfaden Solarthermie“

Abgerufen unter: <https://www.agfw-shop.de/agfw-fachliteratur/erzeugung-sektorkopplung-speicher/agfw-praxisleitfaden-solarthermie.html>

Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) (Hrsg.), 2023;

Kühne, J., Roth, T., & Schwabe, G.: „Praxisleitfaden Großwärmepumpen“

Abgerufen unter: <https://www.agfw-shop.de/agfw-fachliteratur/erzeugung-sektorkopplung-speicher/agfw-praxisleitfaden-grosswaermepumpen.html>

Arbeitsgemeinschaft QM Fernwärme (Hrsg.), 2021;

Nussbaumer, T., Thalmann, S., Jenni, A., Ködel, J.: „Planungshandbuch Fernwärme“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.verenum.ch/Dokumente/PHB-FW_V1.3a.pdf

Berliner Stadtwerke (Hrsg.), ohne Datum:

„Welches ist der optimale Aufstellwinkel von Solarmodulen?“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://berlinerstadtwerke.de/faq-beitrag/welches-ist-der-optimale-aufstellwinkel-von-solarmodulen/>

Bilardo, M., Sandrone, F., Zanzottera, G., Fabrizio, E., 2021:

“Modelling a fifth-generation bidirectional low temperature district heating and cooling (5GDHC) network for nearly Zero Energy District (nZED)”, in *Energy Reports*, Band 7, Seiten 8390 bis 8405

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.054>

Boston Consulting Group (BCG) (Hrsg.), 2021;

Burchardt, J., Franke, K., Hohaus, M., Humpert, H., Päivärinta, J., Richenhagen, E., Ritter, D., Schönberger, S., Schröder, J., Strobl, S., Tries, C., Türpitz, A.: „Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“ Gutachten für den Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI)

Abgerufen am 24.01.2024 von https://issuu.com/bdi-berlin/docs/211021_bdi_klimapfade_2.0_-_gesamtstudie_-_vorabve

Brage, L., 2019:

„District Heating Development: Prosumers and Bottlenecks“, Dissertation (Zusammenstellung), Abteilung für Energy Sciences, Universität Lund

Abgerufen am 24.01.2024 von https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/62892372/District_Heating_Development_Prosumers_and_Bottlenecks.pdf

Buffa, S., Cozzini, M., D’Antoni, M., Baratieri, M., Fedrizzi, R., 2019:

„5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe“, in Renewable and Sustainable Energy Reviews, Band 104, Seiten 509 bis 522

Abgerufen am 24.01.2024 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (Hrsg.), 2023:

„Bundesförderung für effiziente Wärmenetze – technische Anforderungen der Module 1 bis 4“ (Version 1.1 vom 14.02.2023)

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/bew_merkblatt_technik.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.), 2022:

„Biogas“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/bioeconomie-nachwachsende-rohstoffe/biogas.html>

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.), 2023;

Böhm, J. (Thünen-Institut für Betriebswirtschaft): „Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen – für Strom, Wärme und Verkehr“, erschienen in „Berichte über Landwirtschaft“, Band 101, Ausgabe 1.

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://buel.bmel.de/index.php/buel/article/view/462/682>

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.), 2012;

Pehnt, M., Herbert, F., Gärtner, S., Vogt, R., Fehrenbach, H., Negele, B., Schäfer, V., Jungmann, U., Lambrecht, K.: „Primärenergiefaktoren von biogenen Energieträgern, Abwärmquellen und Müllverbrennungsanlagen“, BMVBS-Online-Publikation, Nr. 12/2012

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.solaroffice.de/fileadmin/solaroffice/dokumente/publikationen/BMVBS-Gutachten-Primaerenergiefaktoren-Endbericht.pdf>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.), 2023a:

„Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM)“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.energiewechsel.de/KAENEf/Redaktion/DE/PDF-Anlagen/BEG/bundesfoerderung-f%C3%BCr-effiziente-gebäude-einzelmaßnahmen-20231229.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.), 2023b:

„Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie - NWS 2023“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Downloads/Fortschreibung.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 2022:

„Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM)“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/xSizk6DUlWm93L4XrkY?4>

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (Hrsg.) und Ernst & Young GmbH (EY) (Hrsg.), 2023;

Andreae, K., Fidan, M., Anger, C., Brand-Schock, R., Buhl, C., Gunnarson, H., Herkner, T., Klingemann, A., Maeding, S., Noack, M., Pavel, F., Rubner, P., Sieper, J., Strobel, J., Schaubel, B., Schirrmeister, M., Schwencke, T., Täschner, I., Tessmer, C.: „Fortschrittsmonitor 2023 – Energiewende“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.bdew.de/media/documents/EY-BDEW-Fortschrittsmonitor-2023-Ed.pdf>

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (Hrsg.), 2023b:

„Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland - Anteile der genutzten Energieträger“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/beheizungsstruktur-wohnungsbestand/>

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (Hrsg.), 2023a:

„Die Energieversorgung 2022 – Jahresbericht“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.bdew.de/media/documents/Jahresbericht_2023_final_18Dez2023_V2.pdf

Bundesverband Erneuerbare Energie (Hrsg.), 2022:

„BEE-Wärmeszenario 2045 - Bilanzielle Darstellung der Umstellung der Wärmeversorgung auf 100 % Erneuerbare Energien“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.bee-ev.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Meldungen/Positionspapiere/2022/20221117_BEE-Waermeszenario-2045_Final.pdf

Bundesverband Geothermie (Hrsg.), 2023:

„Wärmespeicher“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/waermespeicher>

Bundesverband Wärmepumpe (BWP) (Hrsg.), 2012:

„Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Energie/Rohstoffe/2021-10-20_Leitfaden_Erdwaermesonden.pdf

Bundesverband Wärmepumpen (BWP) (Hrsg.), 2022:

„Wärme- und Kältekonzepte mit Großwärmepumpen“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/08_Sonstige/Filedump/BWP_A4_GrossWP_web_mail.pdf

Capital (Hrsg.), 2022;

Oberhuber, N.: „Der große Wärmepumpen-Hype“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.capital.de/immobilien/der-grosse-waermepumpen-hype-32647838.html>

Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N.) (Hrsg.), 2023a:

„Marktpreise Hackschnitzel - Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktpreise-energieholz/marktpreise-hackschnitzel/>

Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N.) (Hrsg.), 2023b:

„FreiflächenPhotovoltaikanlagen - Leitfaden“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2022/04/Leitfaden_Freiflaechenanlagen.pdf

Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) (Hrsg.), 2020:

Jones, P., Wppds, P., Crane, M.: “Heat networks: Code of Practice for the UK”, CP1

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/cp1-heat-networks-code-of-practice-for-the-uk-2020.pdf>

Cowie, A., Berndes, G., Bentsen, N., Brandão, M., Cherubini, F., Egnell, G., George, B., Gustavsson, L., Hanewinkel, M., Harris, Z., Johnsson, F., Junginger, M., Kline, K., Koponen, K., Koppejan, J., Kraxner, F., Lamers, P., Majer, S., Marland, E., Nabuurs, G., Pelkmans, L., Sathre, R., Schaub, M., Tattersall Smith Jr., C., Soimakallio, S., Van Der Hilst, F., Woods, J., Ximenes, F., **2021:**

„Applying a science- based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy“, eingereicht 2020, in GCB Bioenergy, Band 13, Ausgabe 8.

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gcbb.12844>

Das Parlament (Hrsg.), 2024:

Metz, J.: „Europaparlament beschließt Aus für F-Gase ab 2050“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.das-parlament.de/aussen/europa/europaparlament-beschliesst-aus-fuer-f-gase-ab-2050>

Deutsche Energie-Agentur (dena) (Hrsg.), 2022:

„Technologie-Fakten Klimaschutz in der Industrie - Hochtemperatur-Wärmepumpen Einsatz und CO₂-Einsparpotenziale“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/Technologie-Fakten_Klimaschutz_in_der_Industrie_Hochtemperatur-Waermepumpen.pdf

Deutsche Umwelthilfe (Hrsg.), 2022:

„Netzverluste in Wärmenetzen - Fragen & Antworten“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Pressemitteilungen/Energie/Fernw%C3%A4rme/220923_Hintergrundpapier_Netzverluste-W%C3%A4rmenetze_final.pdf

Deutscher Wetterdienst (DWD), ohne Datum:

„Globalstrahlung in Deutschland - Jahressumme 2023“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_sum.html#buehneTop

E.ON (Hrsg.), ohne Datum:

„Durchschnittliche Photovoltaik-Leistung & PV-Erträge in Deutschland“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.eon.de/de/pk/solar/kwp-bedeutung-umrechnung.html>

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) (HRSG.), 2019;

Lachat, T., Brang, P., Bolliger, M., Bollmann, K., Grändli, U., Bütler, R., Herrmann, S., Scheider, O., Wermelinger, B.: „Totholz im Wald - Entstehung, Bedeutung und Förderung“, Merkblatt für die Praxis, 2. Überarbeitete Auflage 52

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:20025/datastream/PDF>

enercity (Hrsg.), 2023:

„E-Mobilität und Energiewende - So funktioniert bidirektionales Laden mit E-Autos“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.enercity.de/magazin/unsere-welt/bidirektionales-laden>

Energy Transitions Commission (Hrsg.), 2021:

“Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy”, Version 1.2

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/04/ETC-Global-Hydrogen-Report.pdf>

Europäische Kommission (Knowledge Centre for Bioeconomy) (Hrsg.), 2019:

“Brief on biomass for energy in the European Union”

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/7931acc2-1ec5-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en>

Europäische Umweltagentur (EAA) (Hrsg.), 2006:

„How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?“, EEA Report No 7/2006

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_7

Europäische Umweltagentur (EAA) (Hrsg.), 2023:

„Was schadet Europas Natur?“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.eea.europa.eu/de/signale/signale-2021/artikel/was-schadet-europas-natur> (zuletzt geändert 29.08.2023)

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), 2022:

„Basisdaten Bioenergie Deutschland 2022“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2022_06_web.pdf

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), 2023:

„Basisdaten Bioenergie Deutschland 2024“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2023/Mediathek/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_2023_web.pdf

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), ohne Datum:

„Bioenergiepotenziale 2050“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://bioenergie.fnr.de/bioenergiepotenziale-2050>

Fesefeldt, M., Capezzali, M., Bozorg, M., Karjalainen, R., 2023:

“Impact of Heat Pump and Cogeneration Integration on Power Distribution Grids Based on Transition Scenarios for Heating in Urban Areas”, in Sustainability, Band 15

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.3390/su15064985>

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Hrsg.), ohne Datum:

„Agri-Photovoltaik“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik/agri-photovoltaik-agri-pv.html>

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (Hrsg.) 2022a,

Consentec, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu), Lehrstuhl für Energie- und Ressourcenmanagement der TU Berlin: „Wärmenetze in Deutschland T45 / Heatgrids in Germany T45“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://enertile-explorer.isi.fraunhofer.de:8443/open-view/49949/cf898070daec6a4e613dc889927a5feb>

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (Hrsg.) 2022b,

Consentec, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu), Lehrstuhl für Energie- und Ressourcenmanagement der TU Berlin: „Energieangebot“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/szenario-explorer/angebot.php>

Gross, M., 2022:

„Kalte Nahwärmenetze zur klimafreundlichen Wärmeversorgung: Ökologie und Wirtschaftlichkeit in Bestands- und Neubauquartieren“, Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum - Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/9257/file/diss.pdf>

Gross, M., Karbasi, B., Reiners, T., Altieri, L., Wagner, H., Bertsch, V., 2021:

„Implementing prosumers into heating networks“, in Energy, Band 230

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120844>

h2x Engineering (Hrsg.), ohne Datum;

Mousdell: „What is District Heating?“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.h2xengineering.com/blogs/what-is-district-heating/>

Hamburger Energiewerke (Hrsg.), ohne Datum:

„Wie funktioniert Fernkälte?“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.hamburger-energiewerke.de/wissen-themen/fernkaelte/wie-funktioniert-fernkaelte>

heatbeat (Hrsg.), ohne Datum:

„Kalte Nahwärme“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://heatbeat.de/de/simulation/kalte-nahwaerme/>

IF Technology (Hrsg.), ohne Datum:

„Aquifer Thermal Energy Storage“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.iftechnology.com/aquifer-thermal-energy-storage/>**Ingenieurbüro Junge (Hrsg.), ohne Datum:**

„Nutzung der solaren Globalstrahlung für die Photovoltaik“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.ing-büro-junge.de/html/photovoltaik.html>**Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (Hrsg.) & GEF Ingenieur (Hrsg.) , 2019;**

Blömer, S., Götz, C., Pehnt, M., Hering, D., Ochse, S., Hespeler, S., Richter, S., Thomassen, P., Grytsch, G., Zopff, C., Jäger, S., Huber, B.: „EnEff:Wärme - netzgebundene Nutzung industrieller Abwärme (NENIA) - “ Kombinierte räumlich-zeitliche Modellierung von Wärmebedarf und Abwärmeangebot in Deutschland“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Schlussbericht_EnEffW%c3%a4rme-NENIA.pdf**Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2018:**

„The Future of Cooling - Opportunities for energy- efficient air conditioning“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The_Future_of_Cooling.pdf**Internationale Energieagentur (IEA) (Hrsg.), 2020;**

Pauschinger, T., Schmidt, T., Soerensen, P., Snijders, A., Djebbar, R., Thornton, J.: „Design Aspects for Large-Scale Aquifer and Pit Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling“, Teil A des Projekts „Large-scale Thermal Storage for District Heating and Cooling“, im Rahmen des Technology Collaboration Programme on District Heating and Cooling including Combined Heat and Power

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_XII/2020.03.09_Report_Task_A_IEA_DHC_Annex_XII_Project_03.pdf**Internationale Energieagentur (IEA) Bioenergie (Hrsg.), 2022:**

„IEA bioenergy report 2023 - How bioenergy contributes to a sustainable future“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.ieabioenergyreview.org/wp-content/uploads/2022/12/IEA_BIOENERGY_REPORT.pdf**Internationale Energieagentur (IEA)(Hrsg.), 2021:**

„Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf**Internationale Organisation für erneuerbare Energien (IRENA), 2017;**

Ralon, P., Taylor, M., Ilas, A., Diaz-Bone, H., Kairies, K: „Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf?rev=a264707cb8034a52b6f6123d5f1b1148**Internationale Organisation für erneuerbare Energien (IRENA) (Hrsg.), 2022:**

„Green hydrogen for industry – A guide to policy making“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Industry_2022.pdf**Klima- und Energiefonds (Hrsg.), 2014:**

„Solares Kühlen – Technologie – Planung - Betrieb“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.aee-intec.at/0uploads/dateien1014.pdf>**Klima- und Energiefonds (Hrsg.), 2021;**

Kapusta, F., Pelekanos, E., Starnberger, S.: „Kühlen mit Sonnenenergie & Abwärme – Eine Option für Ihr Unternehmen?“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.energieinstitut.net/sites/default/files/b4c_kaelte_a5.pdf

Kopernikus-Projekt Ariadne des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (Hrsg.), 2023;

Blesl, M., Burkhardt, A., Wendel, F.: „Transformation und Rolle der Wärmenetze“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://ariadneprojekt.de/publikation/analyse-transformation-und-rolle-der-waermenetze/>

Krystallas, P., 2017:

„Technische, organisatorische und ökonomische Analyse der Fernkälte am Projekt ‚Fernkälte München‘“, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München - Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1363296/1363296.pdf>

Lund, H., Østergaard, P., Nielsen, T., Werner, S., Thorsen, J., Gudmundsson, O., Arabkoohsar, A., Vad Mathiesen, B., 2021:

„Perspectives on fourth and fifth generation district heating“, in Energy Band 227 (Artikel 120520)

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>

Mein Leben (Hrsg.), ohne Datum:

„Gegen die Hitze: Fernkälte für Privathaushalte“, Online-Magazin von Wüstenrot

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.mein-leben.at/mein-zuhause/gegen-die-hitze-fernkaelte-fuer-privathaushalte.html>

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.), 2019:

„Freiflächensolaranlagen – Handlungsleitfaden“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Handlungsleitfaden_Freiflaechensolaranlagen.pdf

Monie, S., Hesamzadeh, M., Aberg, M., 2022:

„Power-to-heat on the reserve capacity market—Policy implications considering economic constraints and competing heat production“, in Journal of Renewable and Sustainable Energy, Band 14

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.1063/5.0093346>

Naturschutzbund Deutschland e. V. (NABU) (Hrsg.), ohne Datum;

Netz, H.: „Holz bleibt am besten im Wald - Zustand der deutschen Wälder besorgniserregend“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/waelder/waldbewirtschaftung/28621.html>

Norddeutscher Rundfunk (NDR) (Hrsg.), 2023;

Hesseling, C., Behrend, A.: „Strompreis aktuell: So viel kostet die Kilowattstunde“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.ndr.de/nachrichten/info/Strompreis-aktuell-So-viel-kosten-die-Kilowattstunden,strompreis182.html>

nova-Institut für politische und ökologische Innovation GmbH (Hrsg.), 2010;

Carus, M., Raschka, A., Piotrowski, S.: „Entwicklung von Förderinstrumenten für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland (Kurzfassung)“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22003908.pdf>

nPro Energy (Hrsg.), ohne Datum:

„Gleichzeitigkeitsfaktor in Wärmenetzen“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.verenum.ch/Dokumente/PHB-FW_V1.3a.pdf

NRW.Energy4Climate (Hrsg.), 2023;

Begemann, T., Rieth-Menze, I., Schneider, N., Tluka, P.: „Nachhaltiger Einsatz von Biomasse - Die Rolle von Biomasse in der Energiewende und in einer klimaneutralen Industrie“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Industrie-Produktion/Der-nachhaltige-Einsatz-von-Biomasse-cr-nrwenegy4climate.pdf>

Oxford Institute for Energy Studies (Hrsg.), 2023;

Hove, A.; „Bidirectional charging as a strategy for rural PV integration in China“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2023/12/CE12-Bidirectional-charging-as-a-strategy-for-rural-PV-integration-in-China2-ah.pdf>

Prognos (Hrsg.), Öko-Institut (Hrsg.) und Wuppertal-Institut (Hrsg.), 2021:

„Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann“, Version 1.0, Langfassung, im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/KNDE_2045_Langfassung/Klimaneutrales_Deutschland_2045_Langfassung.pdf

Quaschnig, V., 2019:

„Regenerative Energiesysteme - Technologie – Berechnung – Klimaschutz“, 10. aktualisierte und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag München

Print-ISBN: 978-3-446-46113-0, E-Book-ISBN: 978-3-446-46114-7

Quaschnig, V., 2021:

„Erneuerbare Energien und Klimaschutz - Hintergründe – Techniken und Planung – Ökonomie und Ökologie – Energiewende“, 6. aktualisierte Auflage, Carl Hanser Verlag München

Print-ISBN: 978-3-446-46867-2, E-Book-ISBN: 978-3-446-46868-9

Qvantum Energi (Hrsg.), 2023:

„We make heat pumps part of the solution to stabilize the electrical grid“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.qvantum.com/we-make-heat-pumps-part-of-the-solution-to-stabilize-the-electrical-grid/>

Rehman, O., Palomba, V., Frazzica, A., Cabeza, L., 2021:

„Enabling Technologies for Sector Coupling: A Review on the Role of Heat Pumps and Thermal Energy Storage“, in Energies band 14 Ausgabe 24

Abgerufen am 24.01.2024 von [10.3390/en14248195](https://doi.org/10.3390/en14248195)

Ritter XL Solar (Hrsg.), ohne Datum:

„Kollektorvergleich von Vakuum-Röhrenkollektoren und Flachkollektoren“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.ritter-xl-solar.de/kollektorvergleich/>

Röder, J., Meyer, B., Krien, U., Zimmermann, J., Stührmann, T., Zondervan, E., 2021:

„Optimal Design of District Heating Networks with Distributed Thermal Energy Storages – Method and Case Study“, in International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, Band 31

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.5278/ijsep.m.6248>

Rosenow, J., 2023:

„A meta-review of 54 studies on hydrogen heating“, in Cell Reports Sustainability

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2023.100010>

RWE AG (Hrsg.), 2023:

„Solarstrom und Landwirtschaft Hand in Hand: RWE errichtet Demonstrationsanlage für Agri-PV“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.rwe.com/presse/rwe-renewables-europe-australia/2023-09-06-rwe-errichtet-demonstrationsanlage-fuer-agri-pv/>

Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.), 2022;

Hornberg, C.: „Kurzstellungnahme des SRU zu den Eckpunkten der Nationalen Biomassestrategie“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2022_12_NABIS.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Spektrum (Hrsg.), 2001:

„Lexikon der Geographie – Aquifer“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/aquifer/431>

Stadtwerke München (Hrsg.), 2022:

„Fernkälte: Klimatisierungssystem der Zukunft“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.swm.de/magazin/energie/fernkaelte>**Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.), 2023a:**

„Holzeinschlag: Deutschland, Jahre, Holzsorten, Holzartengruppen, Waldeigentumsarten“, Genesis Online Ergebnis 41261-0002

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=ergebnistabelleInfo&levelindex=2&levelid=1706116228667#ab-readcrumb>**Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.), 2023b:**

„Globale Tierhaltung, Fleischproduktion und Fleischkonsum“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/landwirtschaft-fischerei/tierhaltung-fleischkonsum/_inhalt.html**Thünen-Institut (Hrsg.), 2023;**

Osterburg, B., Böhm, J., de Witte, T., Erasmi, S., Gocht, A., Hansen, H., Kuhnert, H., Nieberg, H., Pahmeyer, C., Plaas, E., Tetteh, G., Ackermann, A., Krämer, C., Moldovan, A., Röder, N., Tietz, A., Wegmann, J., Zinnbauer, M., Dauber, J., Klimek, S., Tiemeyer, B., Bösch, M., Elsasser, P., Rock, J., Heidecke, C., Söder, M.: „Flächennutzung und Flächennutzungsansprüche in Deutschland“, Thünen Working Paper 224

Abgerufen am 24.01.2024 von https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn067046.pdf**Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnaichner, A., Everall, J., Sacchi, R., Luderer, G., 2021:**

„Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation“, in Nature Climate Change 11, S. 384 bis 393

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>**Umweltbundesamt (Hrsg.), 2019:**

„Biogasanlagen“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industrieverbraucher/biogasanlagen#einfuehrung>**Umweltbundesamt (Hrsg.), 2021a;**

Ortner, S., Pehnt, M., Blömer, S., Auberger, A., Steinbach, J., Deurer, J., Popovski, E., Lösch, O., Langreder, N., Thamling, N., Sahnoun, M., Rau, D.: „Analyse des wirtschaftlichen Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung“, Climate Change 54/2021

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-08-05_cc_54-2021_effiziente_waerme-kaelteversorgung.pdf**Umweltbundesamt (Hrsg.), 2021b;**

Engelmann, P., Köhler, B., Meyer, B., Dengler, J., Herkel, S., Kießling, L., Quast, A., Berneiser, J., Bär, C., Sterchele, P., Heilig, J., Bürger, V., Köhler, B., Braungardt, S., Hesse, T., Sandroock, M., Maaß, C., Strodel, N.: „Systemische Herausforderung der Wärmewende“, Climate Change 18/2021

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-26_cc_18-2021_waermewende.pdf**Umweltbundesamt (Hrsg.), 2022;**

Hiester, U., Jungk, V., Canzler, W., Poetke, D., Ulrich, K., Ludwig, F., Schreiber, B., Horn, A.: „Umweltverträgliche Nutzung geothermischer Wärmespeicher - Ermittlung und Bewertung thermischer Veränderungen im Grundwasser“

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_113-2022_umweltvertraegliche_nutzung_geothermischer_waermespeicher.pdf

Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023a:

„Bewusster Umgang mit Warmwasser schont Umwelt und Geldbeutel“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/warmwasser#gewusst-wie>

Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023b:

„Bioenergie“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/bioenergie#bioenergie-ein-weites-und-komplexes-feld->

Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023c:

„Holzheizungen: Schlecht für Gesundheit und Klima“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/quellen-der-luftschadstoffe/holzheizungen-schlecht-fuer-gesundheit-klima#undefined>

Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023d:

„Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schlüssel-im-kuenftigen-energiesystem#Rolle>

Viguié, V., Lemonsu, A., Hallegatte, S., Beuland, A., Marchadier, C., Masson, V., Pigeon, G., Salagnac, J., 2020:

“Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris”, in Environmental Research Letters, Band 15, Nummer 7

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab6a24/pdf>

Winter, W., Haslauer, T., Oberberger, I., 2001:

„Untersuchungen der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen“, in Euroheat & power Band 9 und 10

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.verenum.ch/Dokumente/2001_Winter-Gleichzeitig.pdf

Wirtz, M., 2023:

„Kalte Nahwärme in Deutschland – White Paper“

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.npro.energy/static/files/White-paper-Kalte-Nahw%C3%A4rme-in-Deutschland-nPro-Energy.pdf>

Wirtz, M., Schreiber, T., Müller, D., 2022:

„Survey of 53 Fifth-Generation District Heating and Cooling(5GDHC) Networks in Germany“, in Energy Technology, Band 10, Ausgabe 11

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ente.202200749>

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Hrsg.), 2021;

Thomas, S., Bierwirth, A., März, S., Schüwer, D., Vondung, F., von Geibler, J., Wagner, O.: „CO₂-neutrale Gebäude bis spätestens 2045 - Ein Diskussionsbeitrag für eine ambitionierte und sozialverträgliche Politikstrategie“, Zukunftsimpuls Nr. 21

Abgerufen am 24.01.2024 von https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7888/file/ZI21_Gebaeude.pdf

Yang, T., Liu, W., Kramer, G., Sun, Q., 2021:

„Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review“, in Renewable and Sustainable Energy Reviews, Band 139

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110732>

Zhang, L., Gudmundsson, O., Thorsen, J., Li, H., Svendsen, 2014:

„Technical Comparison of Domestic Hot Water System Which Used in China and Denmark“, in Energy Procedia, Band 61, S. 2509 bis 2513

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.034>

SOFTWAREVERZEICHNIS

SCFW (Version 2.0), 2017;

Simulationssoftware des Steinbeis Forschungsinstituts für solare und zukunftsfähige Energiesysteme (solites) (Hrsg.), Berberich, M., Deschaintre, L., Sch,idt, T.: „ScenoCalc Fernwärme“

Abrufbar unter: <https://www.scfw.de/>

nPro (Version 2.0), 2023;

[Software] nPro Energy GmbH (Hrsg.): „nPro - Planungstool für Gebäude & Quartiere“

Abrufbar unter: <https://www.npro.energy/main/de/>

PVGIS (Version 5.2), 2022;

Europäische Kommission, Joint Research Centre - Referat Energieeffizienz und erneuerbare Energien (Hrsg.): „Photovoltaic Geographical Information System“

Abrufbar unter: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/de/tools.html#PVP

Sceno Calc (Version 6.2), 2022;

Research Institutes of Sweden (RISE) (Hrsg.): „Solar Collector Energy Output Calculator“

Abrufbar unter: <https://solarkeymark.eu/calculation-tools/>

RECHTSQUELLENVERZEICHNIS

BBergG

Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/BJNR013100980.html>

BImSchG

Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 3 des Gesetzes vom 19. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1792) geändert worden ist

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.gesetze-im-internet.de/bimSchG/BJNR007210974.html>

BImSchV

Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Mai 2017 (BGBl. I S. 1440), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1799) geändert worden ist

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.gesetze-im-internet.de/bimSchV_4_2013/BJNR097310013.html

GEG

Gebäudeenergiegesetz in der Fassung der Bekanntmachung Artikel 1 des Gesetzes vom 08.08.2020 (Anlage 4: BGBl. I S. 1775; Anlage 9: BGBl. I S. 1788 - 1789). Das Gebäudeenergiegesetz vom 08.08.2020 (BGBl. I S. 1728) ist durch Artikel 18a des Gesetzes vom 20. 07.2022 (BGBl. I S. 1237) geändert worden.

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf> (BGBl. I 2020)

KlimaG BW

Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg verkündet als Artikel 1 des Gesetzes zum Erlass eines Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz und zur Verankerung des Klimabelangs in weiteren Rechtsvorschriften vom 7. Februar 2023 (GBl. S. 26).

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&query=KlimaSchG+BW&psml=bsbawueprod.psml&max=true&aiz=true#jlr-KlimaSchGBW2023pIVZ>

KNV-V

KWK-Kosten-Nutzen-Vergleich-Verordnung vom 28. April 2015 (BGBl. I S. 670), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 4 der Verordnung vom 6. Juli 2021 (BGBl. I S. 2514) geändert worden ist

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.gesetze-im-internet.de/knv-v/BJNR067010015.html>

KWKAusV

KWK-Ausschreibungsverordnung vom 10. August 2017 (BGBl. I S. 3167), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 17. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 81) geändert worden ist

Abgerufen am 24.01.2024 von <https://www.gesetze-im-internet.de/kwkausv/BJNR316710017.html>

WHG

Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 22. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 409) geändert worden ist

Abgerufen am 24.01.2024 von https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/BJNR258510009.html

GLOSSAR UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
AGFW	Arbeitsgemeinschaft Fernwärme
BCG	Boston Consulting Group
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BECCS	bioenergy with carbon capture and storage (zu dt. Bio-Energie mit CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
BECCU	Bio-energy conversion with carbon capture and utilization (zu dt. Bioenergieumwandlung mit Kohlenstoffabscheidung und -nutzung)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
COP	Coefficient of Performance (zu dt. Leistungszahl)
DME Consult	DME Consult GmbH, Das diese Arbeit verfassende Unternehmen
DWD	Deutscher Wetterdienst
GEG	Gebäudeenergiegesetz
IEA	Internationale Energieagentur
iLUC	Indirect land use change (zu Deutsch indirekte Landnutzungsänderung)
KlimaG BW	Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Monovalenz	Wärmeerzeugung mittels einer Art von Erzeugern (bspw. Luft/Wasser-Wärmepumpen) unter Einbeziehung von Pufferspeichern
Multivalenz	Wärmeerzeugung mittels mehrerer Arten von Erzeugern (bspw. Luft/Wasser-Wärmepumpen sowie Wasser/Wasser-Wärmepumpe) unter Einbeziehung von Pufferspeichern
NABU	Naturschutzbund Deutschland
PV	Photovoltaik
ST	Solarthermie
VL	Vorlauf
WP	Wärmepumpe

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 01-1: Prognosen zum Anteil von Großwärmepumpen an der Wärmeproduktion	6
Abbildung 02-1: Gleichzeitigkeitsfaktor nach Winter und Kollegen	9
Abbildung 02-2: Gleichzeitigkeitsfaktoren für Raumwärme (links) und Trinkwarmwasser (rechts)	10
Abbildung 02-3: Trassenverluste von 75 untersuchten Wärmenetzen.....	12
Abbildung 02-4: Beispielhafte Jahresdauerlinie eines Quartiers	16
Abbildung 02-5: Substitution eines genehmigungspflichtigen Wärmeerzeugers.....	17
Abbildung 02-6: Gemittelte Energieträgerpreise 2021 bis Q2 2023	18
Abbildung 02-7: Beispielhafte Darstellung einer optimierten Wärmeproduktion	19
Abbildung 02-8: Beispiel eines multivalenten Wärmenetzes auf Basis von Wärmepumpen.....	19
Abbildung 02-9: Mögliche Erzeuger und Vorlauftemperaturen in Wärmenetzen der vierten Generation	20
Abbildung 02-10: Das durchschnittliche deutsche Fernwärmenetz 2045 im Vergleich zu 2020	21
Abbildung 03-1: Großwärmepumpenprojekte in Deutschland	25
Abbildung 04-1: Primärenergiefaktoren und CO ₂ -Äquivalent gemäß GEG	27
Abbildung 04-2: Synergien zwischen Landwirtschaft und Stromproduktion mittels Agri-PV Anlagen.....	28
Abbildung 04-3: Globalstrahlung in Deutschland (Jahressumme 2023)	29
Abbildung 04-4: Solare Einstrahlung in Abhängigkeit von Neigungswinkel und Himmelsrichtung	30
Abbildung 04-5: Vergleich der Aufstellweisen von Solarmodulen.....	30
Abbildung 04-6: Wirkungsgrad der Solarthermie in Abhängigkeit der Solarstrahlung und Temperaturdifferenz. 31	
Abbildung 04-7: Solarzellenkennlinien in Abhängigkeit der Modultemperatur (Theta).....	31
Abbildung 04-8: Maximalleistung und Wirkungsgrad eines PV Moduls in Abhängigkeit zur Modultemperatur	32
Abbildung 04-9: Kumulierte Wärmeerträge über das Jahr (graphische Darstellung).....	33
Abbildung 04-10: Mittlere Wärmeproduktion nach Stunde des Tages in den Monaten Mai bis August.....	34
Abbildung 04-11: Mittlere Wärmeproduktion nach Stunde des Tages (März, April, September und Oktober)	34
Abbildung 04-12: Vergleich Ost-West zu Süd Ausrichtung bei gleicher Kollektorfläche (5.000 m ²)	35
Abbildung 04-13: Vergleich Ost-West zu Süd Ausrichtung bei gleichem Flächenbedarf	35
Abbildung 04-14: Typen von Saisonal-Wärmespeichern	37
Abbildung 04-15: Nutzung von Großwärmespeichern zum Heizen und Kühlen.....	39
Abbildung 04-16: Entscheidungshilfe zur Auswahl eines Saisonal-Wärmespeichers	39
Abbildung 04-17: Gesamteinschlag nach Nutzung in Deutschland 2022	42
Abbildung 04-18: Flächennutzung in Deutschland	44
Abbildung 04-19: Nutzungshierarchie von Biomasse	47
Abbildung 04-20: Bioenergiepotenzial in Deutschland 2050	47
Abbildung 04-21: Priorisierung des Wasserstoffeinsatzes nach Einsatzart.....	49
Abbildung 04-22: Kostenvergleich Gasbrennwertkessel und Wärmepumpe.....	50
Abbildung 04-23: Erzeugung und Nachfrage grünen Wasserstoffs	51
Abbildung 05-1: Energieverbrauch für Raumkühlung nach Land/Region.....	54
Abbildung 05-2: Benötigte Rohrdimensionen in Abhängigkeit der Anschlussleistung und Spreizung.....	56
Abbildung 05-3: Realisierte kalte Fernwärmenetze in Deutschland nach Wärmequelle.....	58

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 02-1: Vergleich von Fernwärme und dezentraler Wärmeerzeugung	14
Tabelle 03-1: Gängige Kältemittel für Großwärmepumpen	22
Tabelle 03-2: Vergleich verschiedener Quellen von Großwärmepumpen.....	23
Tabelle 04-1: Kumulierte Wärmeerträge über das Jahr.....	33
Tabelle 04-2: Potenzielle Abwärme-Quellen	52

ANHANG

Solarthermie Simulation am Standort Würzburg (Datensatz 1996 bis 2005)

ScenoCalc Fernwärme 2.0


Projektname:

Standort und Betrachtungszeitraum anpassen



Standort: **Würzburg**
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärmeübertragung

Einstrahlung auf das Kollektorfeld
117 MWh



Kollektorfeld-ertrag
51 MWh
511 kWh/m²

Brutto-Kollektorfläche
100 m²

Kollektortyp
Flachkollektor

Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller:

Kollektorart:

Produkt:

Zertifikatnummer:

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²:

Kollektororientierung

Art der Nachführung:

Kollektorneigung (β) in °:

Kollektorausrichtung (γ) in °:

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol Wasser

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmtrieb Regelung auf Netzvorlauftemperatur

Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Mittlere Kolleortemperatur

konstant Wert in °C: variabel

Verlust durch Glykol (Prozentpunkte-Abzug von η₀):

Grenze der Einstrahlung in W/m²:

Temperaturdifferenz zwischen Rücklauftemperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

Anhang 1: Simulation mittels SCFW [Software] (100m², Südausrichtung, 10°, mittlere Kolleortemperatur 50°C)

ScenoCalc Fernwärme 2.0


Projektname:

Standort und Betrachtungszeitraum anpassen



Standort: **Würzburg**
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärmeübertragung

Einstrahlung auf das Kollektorfeld
100 MWh



Kollektorfeld-ertrag
38 MWh
382 kWh/m²

Brutto-Kollektorfläche
100 m²

Kollektortyp
Flachkollektor

Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller:

Kollektorart:

Produkt:

Zertifikatnummer:

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²:

Kollektororientierung

Art der Nachführung:

Kollektorneigung (β) in °:

Kollektorausrichtung (γ) in °:

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol Wasser

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmtrieb Regelung auf Netzvorlauftemperatur

Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Mittlere Kolleortemperatur

konstant Wert in °C: variabel

Verlust durch Glykol (Prozentpunkte-Abzug von η₀):

Grenze der Einstrahlung in W/m²:

Temperaturdifferenz zwischen Rücklauftemperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

Anhang 2: Simulation mittels SCFW [Software] (100m², Nordausrichtung, 10°, mittlere Kolleortemperatur 50°C)

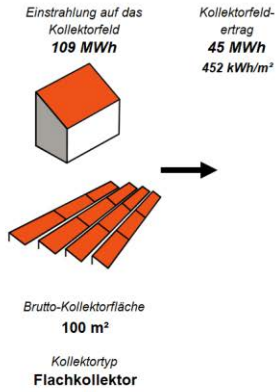
ScenoCalc Fernwärme 2.0

Projektname:

Standort und Betrachtungszeitraum anpassen

Standort: Würzburg
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärme



Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller: Viessmann Werke GmbH & Co KG
Kollektorart: Flachkollektor
Produkt: Vitosol 200-F XL8
Zertifikatnummer: 011-7S2726 F

Kollektor hinzufügen / löschen

Die Kennwerte dieses Kollektors beziehen sich auf die Bruttokollektorfläche.

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²: 100

Kollektororientierung

Art der Nachführung: Keine Nachführung
Kollektorneigung (β) in °: 10
Kollektorausrichtung (γ) in °: -90

Mittlere Kollektortemperatur

konstant Wert in °C: 50
 variabel

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol
 Wasser

Verlust durch Glykol (Prozentpunkte-Abzug von η₀): 0

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmbetrieb
 Regelung auf Netzvorlauftemperatur
 Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Grenze der Einstrahlung in W/m²:
Temperaturdifferenz zwischen Rücklauftemperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

OK Abbrechen

Anhang 3: Simulation mittels SCFW [Software] (100m², Ostausrichtung, 10°, mittlere Kollektortemperatur 50°C)

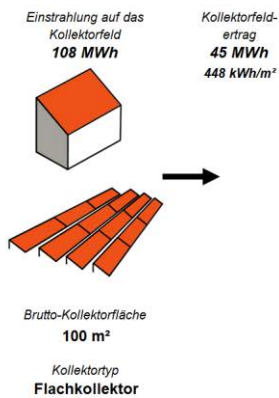
ScenoCalc Fernwärme 2.0

Projektname:

Standort und Betrachtungszeitraum anpassen

Standort: Würzburg
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärme



Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller: Viessmann Werke GmbH & Co KG
Kollektorart: Flachkollektor
Produkt: Vitosol 200-F XL8
Zertifikatnummer: 011-7S2726 F

Kollektor hinzufügen / löschen

Die Kennwerte dieses Kollektors beziehen sich auf die Bruttokollektorfläche.

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²: 100

Kollektororientierung

Art der Nachführung: Keine Nachführung
Kollektorneigung (β) in °: 10
Kollektorausrichtung (γ) in °: 90

Mittlere Kollektortemperatur

konstant Wert in °C: 50
 variabel

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol
 Wasser

Verlust durch Glykol (Prozentpunkte-Abzug von η₀): 0

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmbetrieb
 Regelung auf Netzvorlauftemperatur
 Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Grenze der Einstrahlung in W/m²:
Temperaturdifferenz zwischen Rücklauftemperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

OK Abbrechen

Anhang 4: Simulation mittels SCFW [Software] (100m², Westausrichtung, 10°, mittlere Kollektortemperatur 50°C)

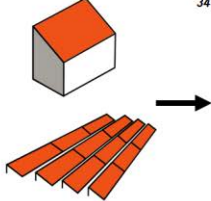
ScenoCalc Fernwärme 2.0

Projektname:

Standort: Würzburg
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärmeübertrager

Einstrahlung auf das Kollektorfeld **117 MWh**
Kollektorfeld-ertrag **34 MWh**
341 kWh/m²



Brutto-Kollektorfläche **100 m²**
Kollektortyp **Flachkollektor**

Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller:

Kollektorart:

Produkt:

Zertifikatnummer:

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²:

Kollektororientierung

Art der Nachführung:

Kollektorneigung (β) in °:

Kollektorausrichtung (γ) in °:

Mittlere Kollektortemperatur

konstant Wert in °C:

variabel

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol

Wasser

Verlust durch Glykol (Prozentpunkte-Abzug von η₀):

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmbetrieb

Regelung auf Netzvorlauftemperatur

Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Grenze der Einstrahlung in W/m²:

Temperaturdifferenz zwischen Rücklauf-temperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

Anhang 5: Simulation mittels SCFW [Software] (100m², Südausrichtung, 10°, mittlere Kollektortemperatur 75°C)

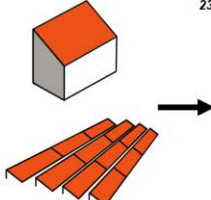
ScenoCalc Fernwärme 2.0

Projektname:

Standort: Würzburg
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärmeübertrager

Einstrahlung auf das Kollektorfeld **100 MWh**
Kollektorfeld-ertrag **23 MWh**
233 kWh/m²



Brutto-Kollektorfläche **100 m²**
Kollektortyp **Flachkollektor**

Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller:

Kollektorart:

Produkt:

Zertifikatnummer:

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²:

Kollektororientierung

Art der Nachführung:

Kollektorneigung (β) in °:

Kollektorausrichtung (γ) in °:

Mittlere Kollektortemperatur

konstant Wert in °C:

variabel

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol

Wasser

Verlust durch Glykol (Prozentpunkte-Abzug von η₀):

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmbetrieb

Regelung auf Netzvorlauftemperatur

Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Grenze der Einstrahlung in W/m²:

Temperaturdifferenz zwischen Rücklauf-temperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

Anhang 6: Simulation mittels SCFW [Software] (100m², Nordausrichtung, 10°, mittlere Kollektortemperatur 75°C)

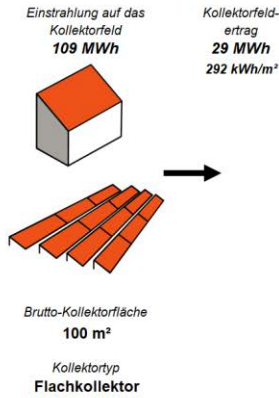
ScenoCalc Fernwärme 2.0

Projektname:

Standort und Betrachtungszeitraum anpassen

Standort: Würzburg
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärmeübertrager



Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller: Viessmann Werke GmbH & Co KG
Kollektorart: Flachkollektor
Produkt: Vitosol 200-F XL8
Zertifikatnummer: 011-7S2726 F

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²: 100

Kollektororientierung

Art der Nachführung: Keine Nachführung
Kollektorneigung (β) in °: 10
Kollektorausrichtung (γ) in °: -90

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol
 Wasser

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmtrieb
 Regelung auf Netzvorlauftemperatur
 Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Mittlere Kolleortemperatur

konstant Wert in °C: 75
 variabel

Verlust durch Glykol (Prozentpunkte-Abzug von η₀): 0

Grenze der Einstrahlung in W/m²:

Temperaturdifferenz zwischen Rücklauf-temperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

OK Abbrechen

Anhang 7: Simulation mittels SCFW [Software] (100m², Ostausrichtung, 10°, mittlere Kolleortemperatur 75°C)

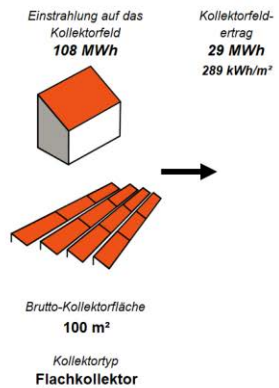
ScenoCalc Fernwärme 2.0

Projektname:

Standort und Betrachtungszeitraum anpassen

Standort: Würzburg
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärmeübertrager



Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller: Viessmann Werke GmbH & Co KG
Kollektorart: Flachkollektor
Produkt: Vitosol 200-F XL8
Zertifikatnummer: 011-7S2726 F

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²: 100

Kollektororientierung

Art der Nachführung: Keine Nachführung
Kollektorneigung (β) in °: 10
Kollektorausrichtung (γ) in °: 90

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol
 Wasser

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmtrieb
 Regelung auf Netzvorlauftemperatur
 Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Mittlere Kolleortemperatur

konstant Wert in °C: 75
 variabel

Verlust durch Glykol (Prozentpunkte-Abzug von η₀): 0

Grenze der Einstrahlung in W/m²:

Temperaturdifferenz zwischen Rücklauf-temperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

OK Abbrechen

Anhang 8: Simulation mittels SCFW [Software] (100m², Westausrichtung, 10°, mittlere Kolleortemperatur 75°C)

Photovoltaik Simulation am Standort Neuburg an der Donau (Datensatz 2005-2020)



PVGIS-5 Schätzung der Solarstromerzeugung:

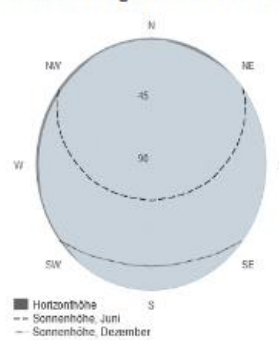
Gemachte Eingaben:

Breite/Länge: 48.738,11.209
 Horizont: Berechnet
 Verw. Datenbank: PVGIS-SARAH2
 PV Technologie: Kristallines Silizium
 Installierte PV: 0.5 kWp
 Systemverlust: 14 %

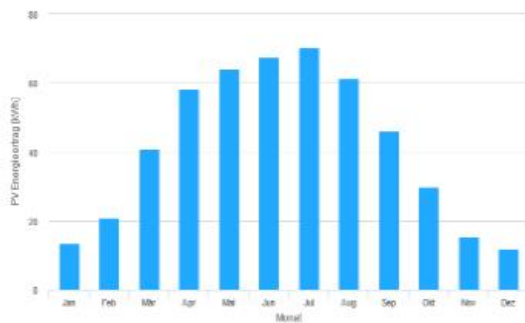
Ergebnisse der Simulation

Neigungswinkel: 10 °
 Azimut-Winkel: 0 °
 PV Energieerzeugung pro Jahr: 500.41 kWh
 Einstrahlung/Jahr auf Modulebene: 1284.26 kWh/m²
 Jährliche Schwankungen: 26.64 kWh
 Veränderung der Ergebnisse aufgrund von:
 Einfallswinkel: -3.66 %
 Spektraleffekte: 1.48 %
 Temp + niedrige Bestrahlungsst.: -7.32 %
 Gesamtverlust: -22.07 %

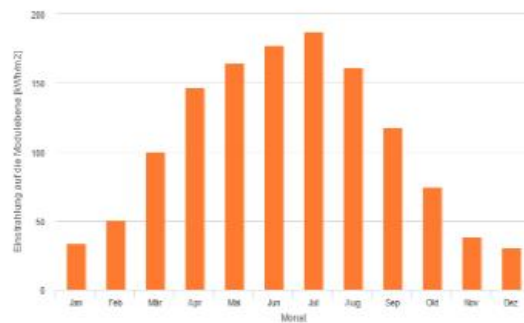
Horizontlinie am gewählten Standort:



Energieertrag pro Monat von PV-Anlage mit fester Neigung:



Einstrahlung pro Monat auf Modulebene mit fester Neigung:



PV-Energie pro Monat und Solareinstrahlung

Monat	E_m	H(i)_m	SD_m
Januar	13.4	33.4	2.7
Februar	21.0	50.4	5.6
März	40.9	100.2	7.5
April	58.3	147.1	9.8
Mai	64.2	164.6	9.3
Juni	67.6	177.8	6.8
Juli	70.3	187.3	6.8
August	61.4	161.6	5.8
September	46.0	117.8	4.8
Oktober	29.8	74.7	4.1
November	15.5	38.9	2.0
Dezember	12.1	30.5	2.5

E_m: Durchschnittliche Stromerzeugung pro Monat für die gewählte Anlage [kWh].
 H(i)_m: Durchschnittssumme pro Monat der globalen Einstrahlung auf die Module des gewählten Systems [kWh/m²].
 SD_m: Standardabweichung der Stromerzeugung pro Monat aufgrund jährlicher Schwankungen [kWh].

Anhang 9: Simulation mittels PVGIS [Software] (0,5 kW_{Peak} Südausrichtung, 10°)



PVGIS-5 Schätzung der Solarstromerzeugung:

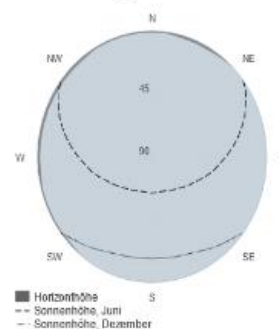
Gemachte Eingaben:

Breite/Länge: 48.738,11.209
 Horizont: Berechnet
 Verw. Datenbank: PVGIS-SARAH2
 PV Technologie: Kristallines Silizium
 Installierte PV: 0.5 kWp
 Systemverlust: 14 %

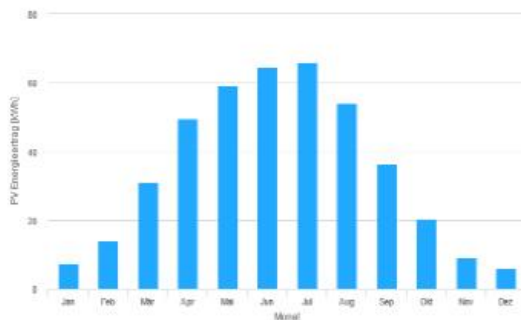
Ergebnisse der Simulation

Neigungswinkel: 10 °
 Azimut-Winkel: -179 °
 PV Energieerzeugung pro Jahr: 418.06 kWh
 Einstrahlung/Jahr auf Modulebene: 1091.56 kWh/m²
 Jährliche Schwankungen: 18.03 kWh
 Veränderung der Ergebnisse aufgrund von:
 Einfallswinkel: -4.99 %
 Spektraleffekte: 1.34 %
 Temp + niedrige Bestrahlungsst: -7.49 %
 Gesamtverlust: -23.4 %

Horizontlinie am gewählten Standort:



Energieertrag pro Monat von PV-Anlage mit fester Neigung:



Einstrahlung pro Monat auf Modulebene mit fester Neigung:



PV-Energie pro Monat und Solareinstrahlung

Monat	E_m	H(i)_m	SD_m
Januar	7.6	21.4	0.7
Februar	14.0	36.2	2.0
März	31.1	78.5	4.2
April	49.5	125.5	7.1
Mai	59.4	151.9	8.1
Juni	64.5	168.6	6.3
Juli	66.0	174.5	6.0
August	54.0	142.1	4.5
September	36.3	94.7	2.9
Oktober	20.3	54.1	1.9
November	9.2	26.0	0.6
Dezember	6.1	18.0	0.5

E_m: Durchschnittliche Stromerzeugung pro Monat für die gewählte Anlage [kWh].
 H(i)_m: Durchschnittssumme pro Monat der globalen Einstrahlung auf die Module des gewählten Systems [kWh/m²].
 SD_m: Standardabweichung der Stromerzeugung pro Monat aufgrund jährlicher Schwankungen [kWh].

Anhang 10: Simulation mittels PVGIS [Software] (0,5 kW_{Peak} Nordausrichtung, 10°)



PVGIS-5 Schätzung der Solarstromerzeugung:

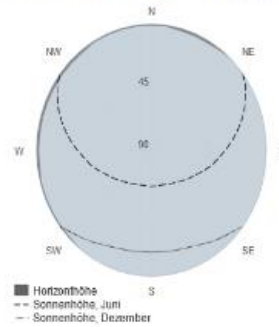
Gemachte Eingaben:

Breite/Länge: 48.738, 11.209
 Horizont: Berechnet
 Verw. Datenbank: PVGIS-SARAH2
 PV Technologie: Kristallines Silizium
 Installierte PV: 0.5 kWp
 Systemverlust: 14 %

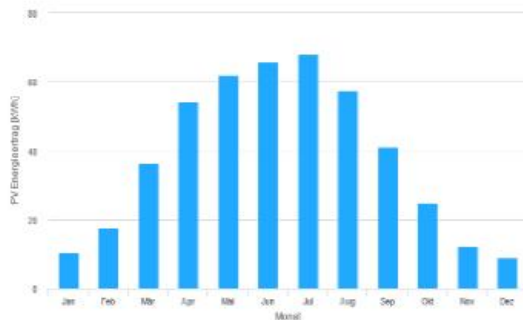
Ergebnisse der Simulation

Neigungswinkel: 10 °
 Azimut-Winkel: -90 °
 PV Energieerzeugung pro Jahr: 459.52 kWh
 Einstrahlung/Jahr auf Modulebene: 1185.65 kWh/m²
 Jährliche Schwankungen: 23.81 kWh
 Veränderung der Ergebnisse aufgrund von:
 Einfallswinkel: -4.12 %
 Spektraleffekte: 1.42 %
 Temp + niedrige Bestrahlungsst.: -7.31 %
 Gesamtverlust: -22.49 %

Horizontlinie am gewählten Standort:



Energieertrag pro Monat von PV-Anlage mit fester Neigung:



Einstrahlung pro Monat auf Modulebene mit fester Neigung:



PV-Energie pro Monat und Solareinstrahlung

Monat	E _m	H(i) _m	SD _m
Januar	10.4	27.4	1.6
Februar	17.6	43.3	4.0
März	36.3	89.5	6.1
April	54.3	136.6	8.7
Mai	62.0	158.7	8.9
Juni	65.8	172.4	6.7
Juli	68.1	180.6	6.4
August	57.6	151.3	5.4
September	41.1	105.5	4.0
Oktober	25.0	63.7	2.9
November	12.3	32.3	1.3
Dezember	9.0	24.2	1.4

E_m: Durchschnittliche Stromerzeugung pro Monat für die gewählte Anlage [kWh].
 H(i)_m: Durchschnittssumme pro Monat der globalen Einstrahlung auf die Module des gewählten Systems [kWh/m²].
 SD_m: Standardabweichung der Stromerzeugung pro Monat aufgrund jährlicher Schwankungen [kWh].

Anhang 11: Simulation mittels PVGIS [Software] (0,5 kW_{Peak} Ostausrichtung, 10°)



PVGIS-5 Schätzung der Solarstromerzeugung:

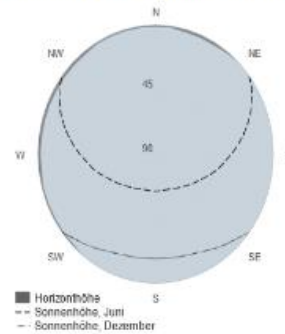
Gemachte Eingaben:

Breite/Länge: 48.738,11.209
 Horizont: Berechnet
 Verw. Datenbank: PVGIS-SARAH2
 PV Technologie: Kristallines Silizium
 Installierte PV: 0.5 kWp
 Systemverlust: 14 %

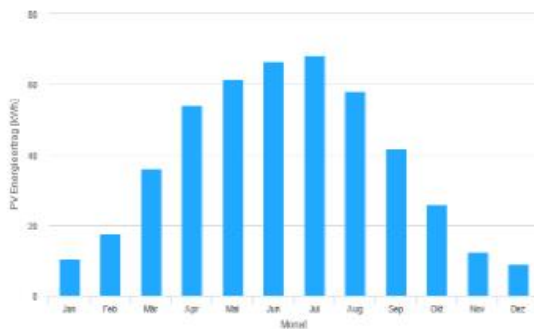
Ergebnisse der Simulation

Neigungswinkel: 10 °
 Azimut-Winkel: 90 °
 PV Energieerzeugung pro Jahr: 462.24 kWh
 Einstrahlung/Jahr auf Modulebene: 1194.62 kWh/m²
 Jährliche Schwankungen: 20.99 kWh
 Veränderung der Ergebnisse aufgrund von:
 Einfallswinkel: -4.1 %
 Spektraleffekte: 1.42 %
 Temp + niedrige Bestrahlungsst: -7.48 %
 Gesamtverlust: -22.61 %

Horizontlinie am gewählten Standort:



Energieertrag pro Monat von PV-Anlage mit fester Neigung:



Einstrahlung pro Monat auf Modulebene mit fester Neigung:



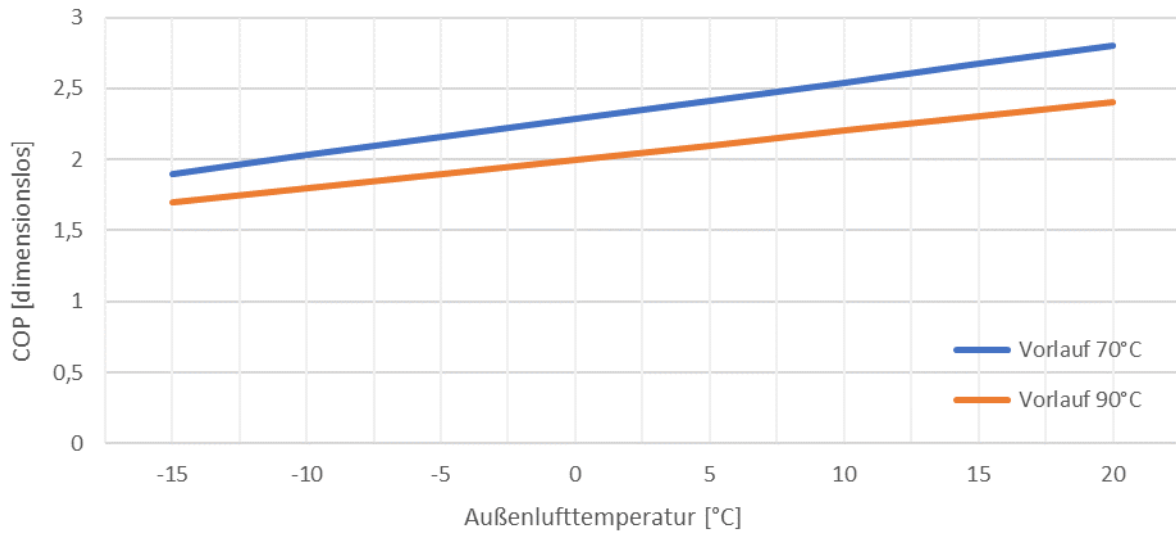
PV-Energie pro Monat und Solareinstrahlung

Monat	E_m	H(i)_m	SD_m
Januar	10.5	27.6	1.7
Februar	17.8	43.7	3.8
März	36.2	89.6	5.7
April	54.1	136.6	8.3
Mai	61.6	158.1	8.5
Juni	66.4	174.2	6.4
Juli	68.3	181.6	6.3
August	58.1	152.9	5.0
September	41.8	107.5	3.8
Oktober	25.8	65.7	3.2
November	12.6	32.9	1.3
Dezember	8.9	24.2	1.4

E_m: Durchschnittliche Stromerzeugung pro Monat für die gewählte Anlage [kWh].
 H(i)_m: Durchschnittssumme pro Monat der globalen Einstrahlung auf die Module des gewählten Systems [kWh/m²].
 SD_m: Standardabweichung der Stromerzeugung pro Monat aufgrund jährlicher Schwankungen [kWh].

Anhang 12: Simulation mittels PVGIS [Software] (0,5 kW_{Peak} Westausrichtung, 10°)

Basis des Vergleichs zwischen Solarthermie und Photovoltaik



Anhang 13: Effizienz der beispielhaften Luft/Wasser Wärmepumpe des Projektes LoCarDi

Projektname: Simulation LoCarDi

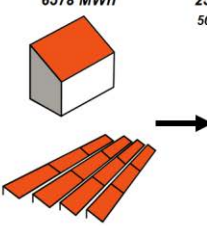
Standort und Betrachtungszeitraum anpassen

Standort: Würzburg_modifiziert
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärmeübertrager

Einstrahlung auf das Kollektorfeld: **6578 MWh**

Kollektorfeld-ertrag: **2545 MWh**
509 kWh/m²



Brutto-Kollektorfläche: **5000 m²**

Kollektortyp: **Flachkollektor**

Wärmebedarf Frostschutz: **26 MWh**

Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller: Solarbayer
Kollektorart: Flachkollektor
Produkt: PremiumPlus AL 2.86 V
Zertifikatnummer: ---

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²: 5000

Kollektororientierung

Art der Nachführung: Keine Nachführung
Kollektorneigung (β) in °: 38
Kollektorausrichtung (γ) in °: -3

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol
 Wasser

Mittlere Kolleortemperatur

konstant Wert in °C: 50
 variabel

Wärmebedarf für Frostschutz in °C: 1
Grenztemperatur für Frostschutz in °C: 4

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmbetrieb
 Regelung auf Netzvorlauftemperatur
 Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Grenze der Einstrahlung in W/m²:
Temperaturdifferenz zwischen Rücklauftemperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

OK Abbrechen

Anhang 14: Simulation bei einer mittleren Kolleortemperatur von 50°C mittels SCFW


Projektname: Simulation LoCarDi

Standort und Betrachtungszeitraum anpassen


Standort: Würzburg_modifiziert
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärmeübertragung

Einstrahlung auf das Kollektorfeld
6578 MWh



Kollektorfeld-ertrag
2338 MWh
468 kWh/m²



Brutto-Kollektorfläche
5000 m²

Kollektortyp
Flachkollektor

Wärmebedarf Frostschutz
24 MWh

Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller: Solarbayer
Kollektorart: Flachkollektor
Produkt: PremiumPlus AL 2.86 V
Zertifikatnummer: ---

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²: 5000

Kollektororientierung

Art der Nachführung: Keine Nachführung
Kollektorneigung (β) in °: 38
Kollektorausrichtung (γ) in °: -3

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol
 Wasser

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmbetrieb
 Regelung auf Netzvorlauftemperatur
 Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Mittlere Kollektortemperatur

konstant Wert in °C: 55
 variabel

Wärmebedarf für Frostschutz in °C: 1
Grenztemperatur für Frostschutz in °C: 4

Grenze der Einstrahlung in W/m²:
Temperaturdifferenz zwischen Rücklauftemperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

OK Abbrechen

Anhang 15: Simulation bei einer mittleren Kollektortemperatur von 55°C mittels SCFW


Projektname: Simulation LoCarDi

Standort und Betrachtungszeitraum anpassen


Standort: Würzburg_modifiziert
Zeitraum: 1.1. - 31.12.

Systemkonzept: Rohrleitungen Wärmeübertragung

Einstrahlung auf das Kollektorfeld
6578 MWh



Kollektorfeld-ertrag
1620 MWh
324 kWh/m²



Brutto-Kollektorfläche
5000 m²

Kollektortyp
Flachkollektor

Wärmebedarf Frostschutz
16 MWh

Kollektorfeld

Kollektor aus der Datenbank auswählen

Hersteller: Solarbayer
Kollektorart: Flachkollektor
Produkt: PremiumPlus AL 2.86 V
Zertifikatnummer: ---

Kollektorfeldfläche (brutto) in m²: 5000

Kollektororientierung

Art der Nachführung: Keine Nachführung
Kollektorneigung (β) in °: 38
Kollektorausrichtung (γ) in °: -3

Wärmeträgermedium

Wasser-Glykol
 Wasser

Angaben zur Systemberechnung

Vorwärmbetrieb
 Regelung auf Netzvorlauftemperatur
 Bei schwacher Einstrahlung wird die Zieltemperatur reduziert

Mittlere Kollektortemperatur

konstant Wert in °C: 75
 variabel

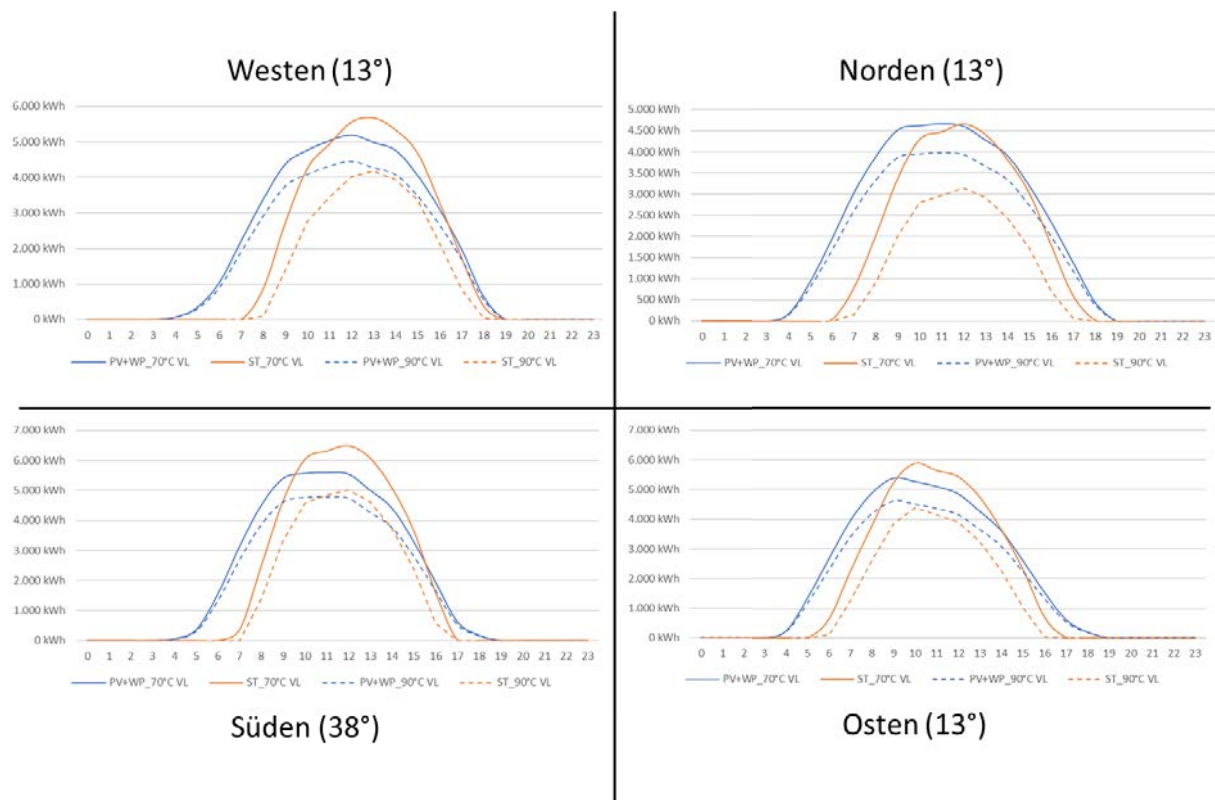
Wärmebedarf für Frostschutz in °C: 1
Grenztemperatur für Frostschutz in °C: 4

Grenze der Einstrahlung in W/m²:
Temperaturdifferenz zwischen Rücklauftemperatur und reduzierter Zieltemperatur in K:

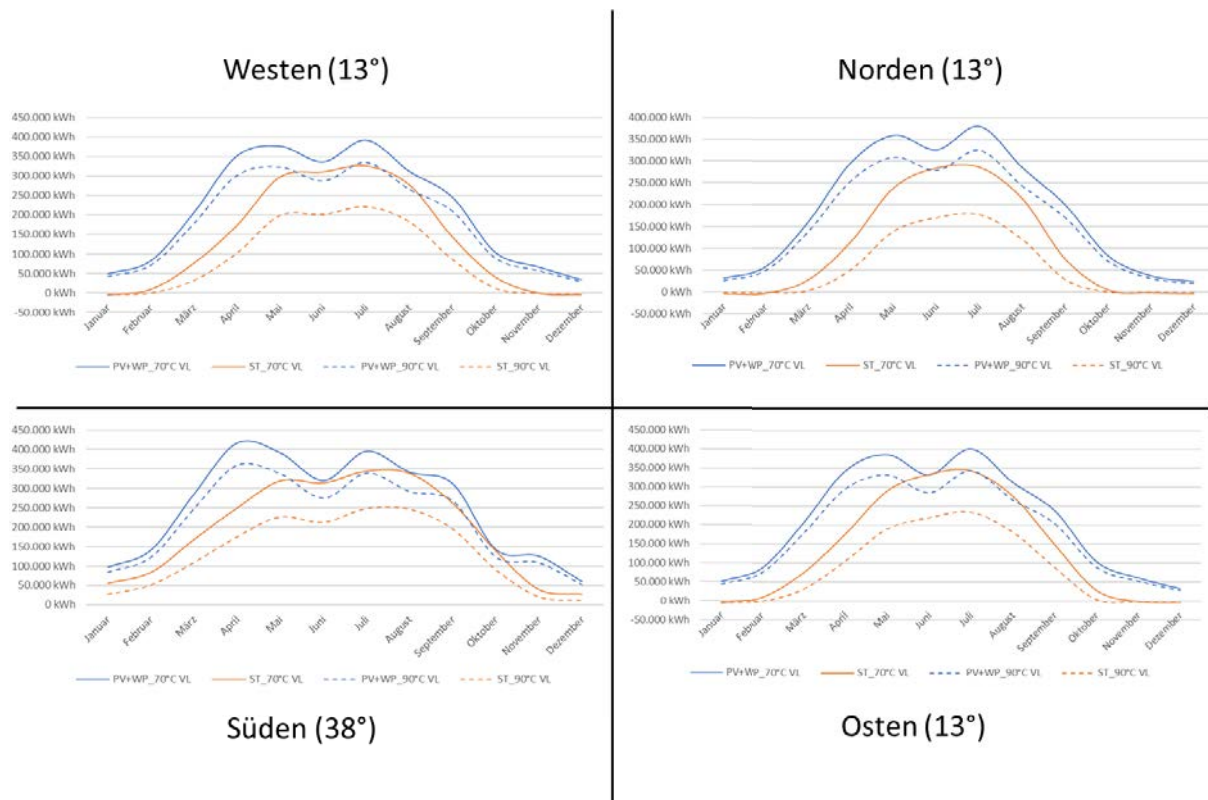
OK Abbrechen

Anhang 16; Simulation bei einer mittleren Kollektortemperatur von 75°C mittels SCFW

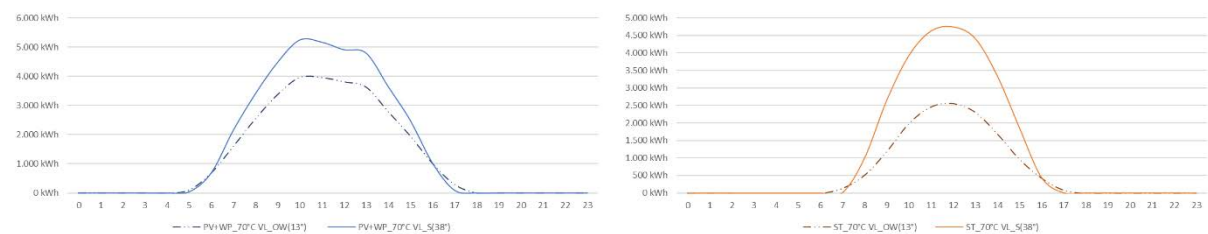
Anhang 17: Simulationsbasis der Stromerzeugung aus Photovoltaik



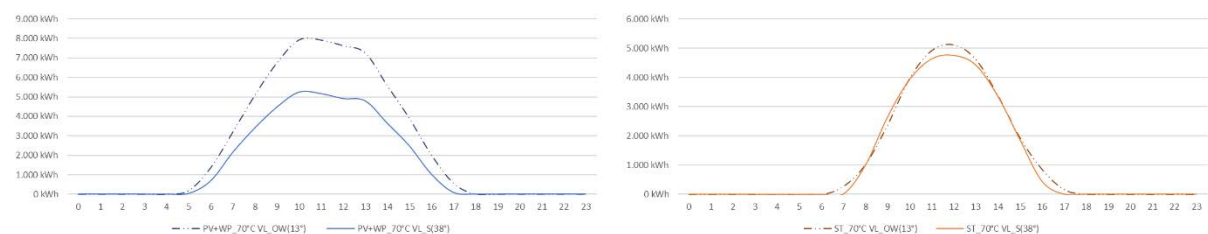
Anhang 18: Stündlicher Wärmeertrag mit abgeändertem Aufstellwinkeln und Ausrichtung (Mai bis August)



Anhang 19: Simulation zum jährlichen Wärmeertrag mit abgeändertem Aufstellwinkeln und Ausrichtung



Anhang 20: Vergleich Ost-West zu Süd Ausrichtung bei gleicher Kollektorfläche (Mär., Apr., Sep., Okt.)²⁰²

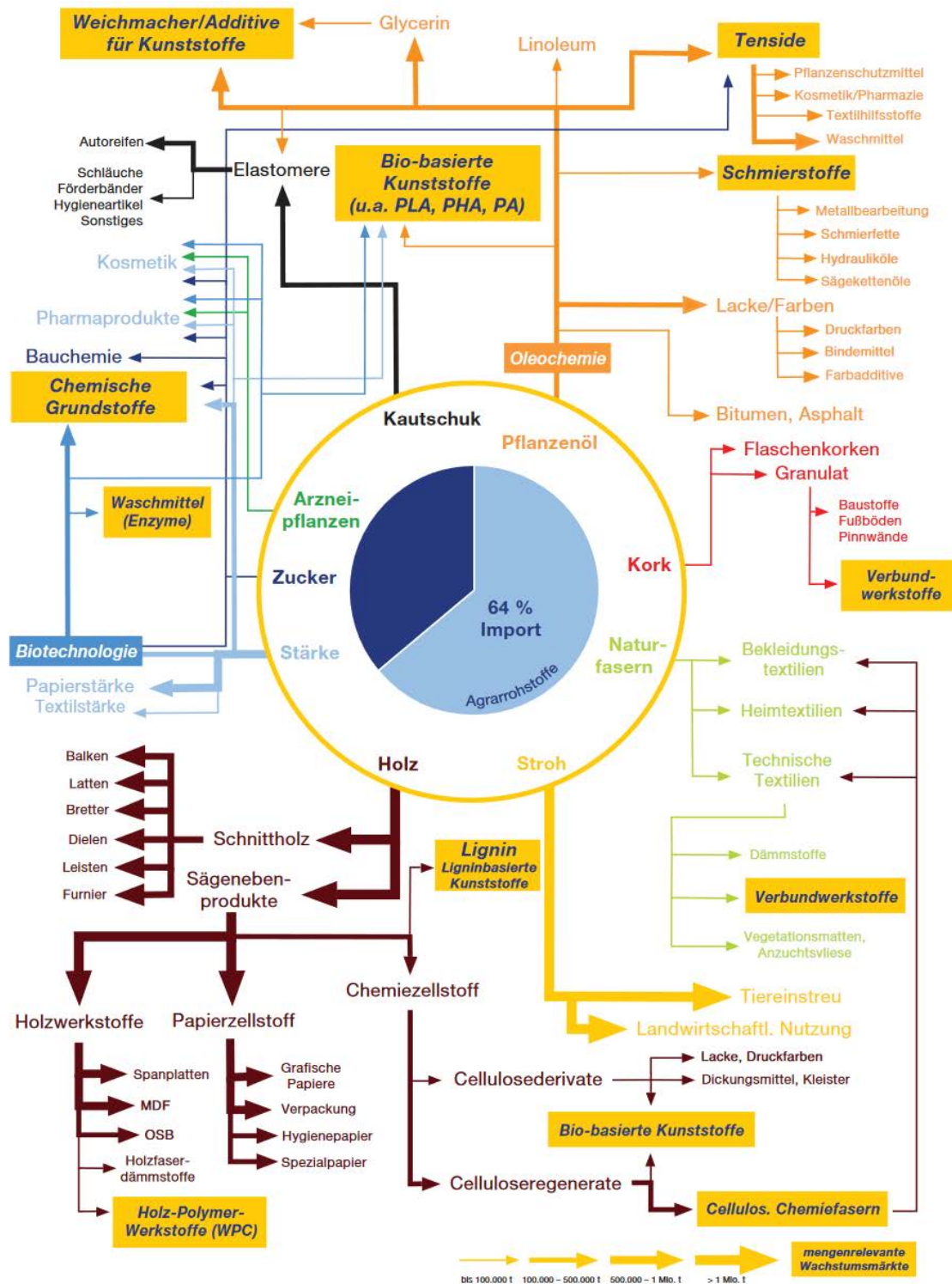


Anhang 21: Vergleich Ost-West zu Süd Ausrichtung bei gleichem Flächenbedarf (Mär., Apr., Sep., Okt.)²⁰³

²⁰² Erzeugte Wärme aus PV +WP bei Südausrichtung rund 38 MWh bei Ost-West Ausrichtung rund 30 MWh. Erzeugte Wärme aus ST bei Südausrichtung rund 26 MWh bei Ost-West Ausrichtung rund 14 MWh.

²⁰³ Erzeugte Wärme aus PV +WP bei Südausrichtung rund 38 MWh bei Ost-West Ausrichtung rund 59 MWh. Erzeugte Wärme aus ST bei Südausrichtung rund 27 MWh bei Ost-West Ausrichtung rund 29 MWh.

Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe



Anhang 22: Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der verarbeitenden Industrie Deutschlands ²⁰⁴

²⁰⁴ nova-Institut für politische und ökologische Innovation GmbH (Hrsg.), 2010, S.6.