

100 % erneuerbare Gebäudewärme mit 25 % Holz und 75 % PV-Wärmepumpen

PV-Wärmepumpen und Holz für Gebäudewärme

Das Energieholz genügt nur für die Hälfte der künftigen Gebäudewärme. Holz wird in Zukunft aber auch für Hochtemperaturwärme benötigt, da dazu kaum Alternativen existieren. Im Gebäudebereich sollte Energieholz vermehrt als Saisonspeicher genutzt werden und damit den Ausbau der Photovoltaik ergänzen.



Text und Grafiken Thomas Nussbaumer*
Foto Schmid AG

In einer Zukunft ohne fossile Energien wird Energieholz ein rares Gut, da mit Holz – im Gegensatz zu Wärmepumpen – auch Hochtemperaturwärme erzeugt werden kann und da Holz – im Gegensatz zu Solarstrahlung und Wind – lagerfähig und bei Bedarf nutzbar ist. Für eine ökonomische Transformation von der fossilen zu einer CO₂-neutralen Gesellschaft ist die Nutzung von Energieholz auf Anwendungen zu beschränken, welche diese Qualitäten nutzen und damit den Ausbau der Solar- und Windenergie unterstützen. Demgegenüber ist ein monovalenter Einsatz für Gebäudewärme nicht zukunftsfähig, weil das Energieholz nicht ausreicht, um den Wärmebedarf für Gebäude und Prozesse zu decken.

1 Ausgangslage

Gebäudewärme verursacht 36,2 % und Prozesswärme 12,9 % des schweizerischen Endenergieverbrauchs von 206 TWh/a [1]. Zur Substitution fossiler Prozesswärme bei hohen Temperaturen kommt in erster Linie Energieholz infrage, da erneuerbare Elektrizität oder erneuerbare synthetische Brennstoffe oft aufwendiger wären. Um die Energie 2050 erneuerbar bereitzustellen, ist ein Ausbau aller erneuerbaren Ressourcen notwendig. Aktuell tragen die Wasserkraft mit 14 % und Energieholz mit 6 % zur Versorgung bei. Beide können nur noch begrenzt ausgebaut werden, nämlich Energieholz von etwa 16 TWh/a auf 20 TWh/a bis 27 TWh/a oder um rund 50 %

Heizzentrale Wärmeverbund Käferberg in Zürich: Holzheizung Schmid und Wärmepumpe CTA.

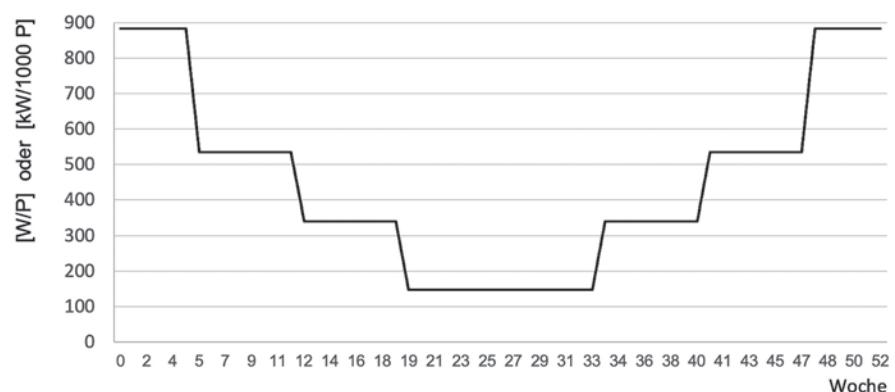


Bild 1: Wärmeleistungsbedarf in Watt pro Person oder in Kilowatt pro 1000 Personen.

sowie die Wasserkraft um knapp 10 % auf 39 TWh/a ([1] – [5]).

Holz und Wasserkraft können somit zusammen nur rund einen Viertel des heutigen Gesamtenergiebedarfs decken, weshalb vor allem Solar- und Windenergie stark ausgebaut werden müssen. Rasch umsetzbar sind PV-Anlagen an Gebäuden. Wie Bild 2 illustriert, beträgt der Ertrag auf Dächern in Zürich aber in den Wintermonaten nur etwa 14 % (bei Ost/West-Ausrichtung) bis 28 % (bei 60° Südausrichtung) des Sommerertrags. Dies führt zu einem grossen Bedarf an saisonaler Energiespeicherung. Entsprechend würde der Ersatz der Kernkraftwerke durch PV einen Sommer-Überschuss und ein Winter-Defizit von je rund 10 TWh verursachen [6]. Wenn Energieholz zur Deckung von Bedarfs spitzen im Winter dient, reduziert dies den Speicherbedarf und zusätzliche Verluste. Für einen sinnvollen Einsatz ist allerdings zu beachten, dass das Energieholz nur zur Versorgung von etwa einem Viertel des heutigen Gebäudeparks ausreicht. Auch wenn der Bedarf bis 2050 wie prognostiziert von 91 TWh/a auf 39 TWh/a sinkt [7], genügt das Holz künftig nur für etwas mehr als die Hälfte der Gebäude. Um Energieholz künftig auch für Prozesswärme einsetzen zu können, muss seine Verwendung für Gebäudewärme jedoch begrenzt werden, womit das Holz nur noch deutlich weniger als 50 % und ideal nur 25 % der künftigen Gebäudewärme decken kann.

Demgegenüber ist das Potenzial an Umweltwärme für Wärmepumpen praktisch unbegrenzt, weshalb der Einsatz von Wärmepumpen in erster Linie durch die Bereitstellung erneuerbarer Elektrizität eingeschränkt wird. Dabei ist zu beachten, dass diese Elektrizität zeitgleich zum Wärmebedarf und somit vermehrt im Winter bereitgestellt werden muss, was für Solarstrom von Gebäuden nicht zutrifft.

Eine Kombination von Wärmepumpen und Holzheizungen ist grundsätzlich in jedem Gebäude möglich, bietet sich aber aus Kostengründen vor allem in Verbindung mit thermischen Netzen an. Aktuell werden in der Schweiz 61 % der total 1037 Fernwärmennetze mit Holz versorgt [8]. Das Potenzial für Fernwärme wird auf 17 TWh/a geschätzt, zu dessen Erschliessung vor allem die Nutzung von Oberflächenwasser und der Einsatz von Wärmepumpen notwendig sind [9].

2 Methode

2.1 Wärmebedarf 2050

Für den Wärmebedarf im Jahr 2050 wird nach Annahmen in Tabelle 1 von effizienten Gebäuden und einer Bevölkerung von 10 Mio. ausgegangen. Der damit erwartete Bedarf von 39 TWh/a entspricht der Prognose zum Ausbau der Fernwärme ([7], [9]). Der Wärmebedarf wird in vier saisonale Perioden nach Tabelle 2 unterteilt, was

dem in Bild 1 gezeigtem Bedarfsprofil entspricht. Zur Veranschaulichung wird der durchschnittliche Wärmeleistungsbedarf in Watt pro Person oder Kilowatt pro 1000 Personen dargestellt. Im Modell erfolgt eine Berechnung für 52 Wochen. Die im Vergleich zu Tagesmittelwerten damit unterschätzte Spitzenlast wird mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt. Weitere Annahmen sind in [5] beschrieben.

2.2 Anlagenbetrieb

Im Konzept erfolgt die Wärmeversorgung im Sommer durch mit PV-Strom betriebene Wärmepumpen, wobei die Verschiebung zwischen Ertrag und Wärmebedarf durch Speicherung ausgeglichen wird. Frühling und Herbst umfassen eine warme und eine kalte Übergangsphase, in welcher Holz nur bei Bedarf eingesetzt wird, während die Versorgung im Winter hauptsächlich durch Holz erfolgt. Die Berechnungen erfolgen für die Schweiz als Systemgrenze, während die Umsetzung für einzelne Grossverbraucher und für mit thermischen Netzen ver-

Kenngroßes	Symbol	Wert	Dimension
Nettowohnfläche pro Person	a_1	45	
Infrastruktur-Gebäudefläche pro Person	a_2	20	m^2/P
Total Gebäudefläche pro Person (a_1+a_2)	a	65	
Spezifischer Heizwärmebedarf Gebäude	w_1	40	
Spezifischer Heizwärmebedarf Warmwasser	w_2	20	$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$
Total spezifischer Heizwärmebedarf (w_1+w_2)	w	60	
Total Wärmebedarf pro Person	$a \cdot w$	3900	kWh/Pa
Einwohnerzahl	e	10	Mio. P
Total Wärmebedarf Gebäude	e · a · w	39	TWh/a

Tabelle 1: Annahmen zum Wärmebedarf der Gebäude in der Schweiz im Jahr 2050.

sorgte Gebiete sinnvoll ist. Letztere decken in der Schweiz typische Anschlussleistungen zwischen 300 kW und 30 MW ab [8]. Zur Nutzung von Holz bieten sich Wärmezentralen an, während PV-Anlagen und Wärmepumpen zentral und teilweise auch dezentral ausgeführt werden können. Für die Wärmeerzeuger mit Holz resultiert eine geringe Anzahl jährlicher Vollbetriebsstunden. Dies wurde bis anhin aus Kostengründen vermieden, kann aber wegen der Begrenztheit der Ressourcen in Zukunft nicht mehr ausgeschlossen werden.

2.3 PV-Produktion

Der Ertrag von Photovoltaikanlagen ist abhängig von Standort, Technologie und Ausrichtung. Für einen Standort mit eher geringem Ertrag ergeben sich an einem Beispiel in Zürich die in Bild 2 gezeigten Erträge. Steil nach Süden geneigte Anlagen (60° und 90°) erzielen im Dezember einen rund doppelt so hohen Ertrag wie horizontale oder flach geneigte Anlagen. Für die Berechnungen werden je zur Hälfte Ost-/West-Anlagen und steile Süd-Anlagen angenommen. Für einen Anlagenwirkungsgrad von künftig 15% (was Modulwirkungsgrade von über 19% voraussetzt) ergeben sich damit die in Tabelle 3 gezeigten PV-Erträge.

2.4 Einsatz von Wärmepumpen

Mit Seewasser als Quelle für Wärmepumpen werden typische Temperaturen zwischen 4°C und 12°C erzielt, während Um-

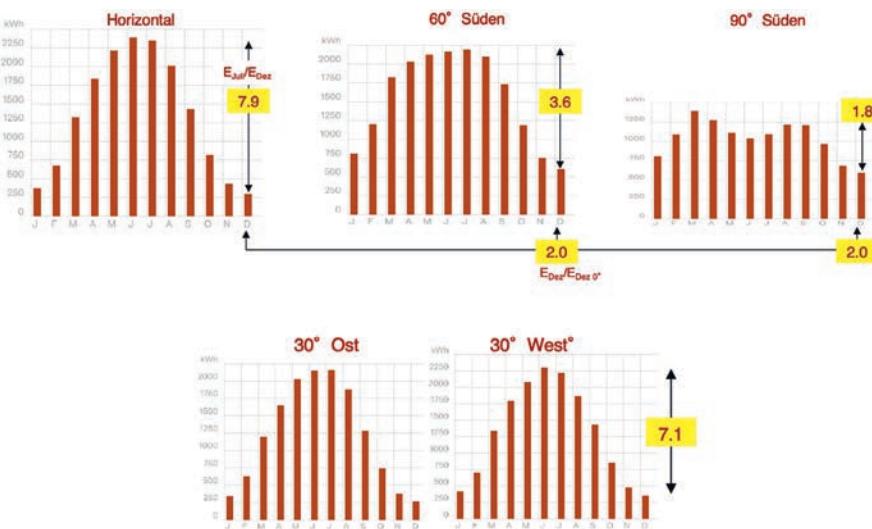


Bild 2: PV-Ertrag in Zürich, Tannenstrasse 7, für unterschiedliche Neigungen und Ausrichtungen nach Berechnungen mit [10].

Kenngroßes	Sommer	Übergang warm	Übergang kalt	Winter	Total	Dimension
Anzahl Tage pro Jahr	98	98	98	71	365	d/a
Anzahl Wochen pro Jahr	14	14	14	10.14	52.14	w/a
Wärmebedarf pro Fläche	Heizen	0	7.0	14.0	19.0	40
	Warmwasser	5.4	5.4	5.4	3.9	20 $\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$
	w	5.4	12.4	19.4	22.9	60
Wärmebedarf pro Person	pro Saison (sai)	349	804	1259	1488	-- kWh/Psai
	pro Jahr (a)	--	--	--	--	3900 kWh/Pa
	pro Tag (d)	3.6	8.2	12.8	21.0	-- kWh/Pd
Wärmeleistungsbedarf pro Person	148	342	535	873	--	W/P

Tabelle 2: Saisonale Verteilung des Jahreswärmebedarfs.

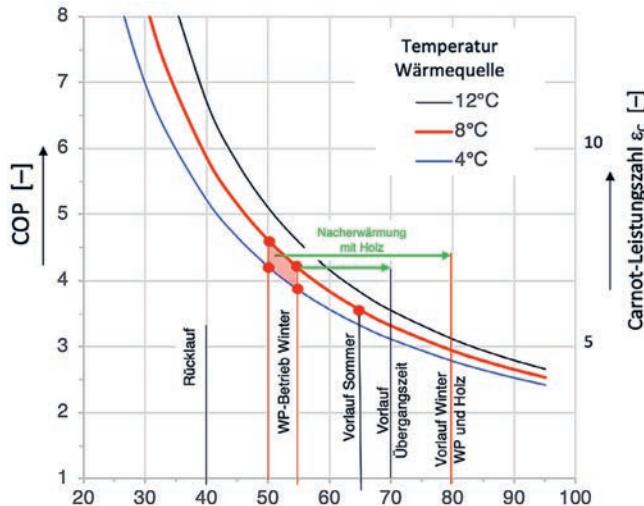


Bild 3: Carnot-Leistungszahl und COP von Wärmepumpen bei einem Gütegrad von 0.6 für Quellentemperaturen von 4°, 8° und 12° C.

nutzung um rund 10 % bis 20 % erhöht werden, was in den vorliegenden Berechnungen noch nicht berücksichtigt ist.

3 Resultate

Eine Auslegung der Solarstromproduktion zur Deckung des Wärmebedarfs im Sommer ergibt eine PV-Anlage mit 228 Wp oder 1.2 m² pro Person. Wenn die Wärmepumpen ganzjährig betrieben werden (Szenario 1A), resultiert eine Wärmeversorgung nach Bild 4. Der solare Deckungsgrad mit Wärmepumpe beträgt dann 19 %, während 81 % der Wärme auf Holz basiert. Wenn die Wärmepumpen nur im Sommer betrieben werden, sinkt der solare Deckungsgrad auf 8 % und es resultiert ein Solarstromüberschuss von 1.3 TWh/a, was in Tabelle 4 für das Szenario 1B ausgewiesen ist.

Um das Ziel von 25 % bis 50 % Holzanteil und somit 50 % bis 75 % solarem Anteil zu erreichen, werden deutlich grössere PV-Flächen benötigt. Als Variante, die sicher realisierbar ist und den Zielwert erreicht, wird in Szenario 2 eine PV-Fläche von 12 m² pro Person angenommen. Für die Schweiz entspricht dies 120 km² PV-Fläche, was etwa 50 % der für PV-Anlagen heute verfügbaren Dachfläche von 231 km² [12] entspricht. Damit resultiert ein Jahresertrag von etwa 23 TWh/a, was 68 % der in den Energieperspektiven 2050+ vorausgesetzten PV-Produktion ausmacht [13].

Wenn die Wärmepumpen ganzjährig betrieben werden, resultiert eine Versorgung nach Bild 5 (oben) mit einem solaren Deckungsgrad von 74 % und 26 % Deckung mit Holz. Dies ist in Tabelle 4 als Szenario 2A ausgewiesen. Die Holzkessel werden dabei nur während der 10-wöchigen Winterperiode betrieben. Während der restlichen Zeit erfolgt die Versorgung mit Wärmepumpen. Aus der PV-Produktion

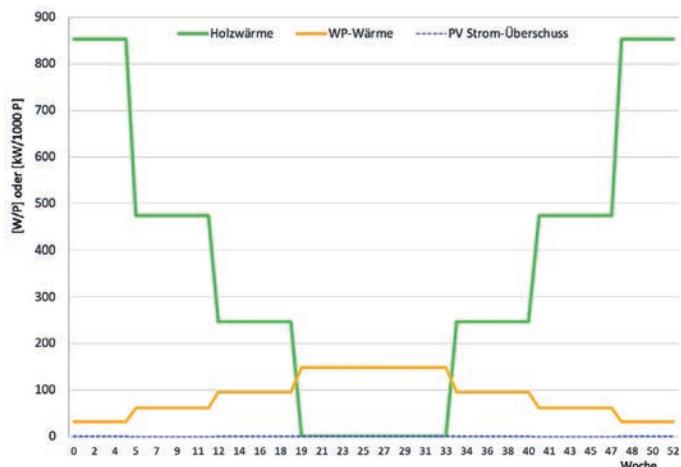


Bild 4: Szenario 1A mit einer PV-Fläche von 1.2 m² pro Person und ganzjähriger Nutzung von Solarstrom für Wärmepumpen.

Umgebungsluft höhere saisonale Schwankungen aufweist. Im Konzept ist vorgesehene, Fernwärmennetze im Sommer mit Vorlauftemperaturen zwischen 65° und 70°C zu betreiben. Im Winterbetrieb erfolgt eine Anhebung auf 80°C entsprechend einem gleitend-konstanten Betrieb [11], während die Rücklauftemperaturen ganzjährig rund 40°C betragen. Wenn die Wärmepumpen im Sommer auf die Vorlauftemperatur ausgelegt werden, erzielen sie nach Bild 3 einen COP von etwa 3.6. Mit Umgebungsluft als Wärmequelle sind im Sommer höhere COP möglich, im Winter dagegen tiefere. Die Kombination von Wärmepumpe und Holzkessel bietet jedoch die Möglichkeit einer Kaskadierung, indem die Wärmepumpen zur Vorwärmung und die Holzkessel zur Nacherwärmung eingesetzt werden. Damit wird im Winter

ein COP von rund 4.0 bis 4.5 erzielt. Daneben besteht die Möglichkeit, den Netzrücklauf als Quelle für die Wärmepumpe zu nutzen, womit höhere COP erzielt werden und der Holzkessel zusätzlich mit Abgas kondensation ausgerüstet werden kann. Damit kann der Wirkungsgrad der Holz-

Kenngroesse	Sommer	Übergang warm	Übergang kalt	Winter	Total	Dimension
Globalstrahlung	5.5	3.5	2.0	1.0	--	kWh/m ² d
	540	343	196	71	1150	kWh/m ² a
PV-Ertrag	81	51	29	11	172	kWh/m ² a
COP der Wärmepumpe	3.6	3.6	4.0	4.0	--	--

Tabelle 3: Annahmen zur saisonalen Verteilung von Globalstrahlung, PV-Ertrag und COP der Wärmepumpen.

Szenario			PV-Kennzahlen						Deckungsanteile	
			Fläche [m ² /P]	Jahresproduktion		Eigen- verbrauch [-]	Überschuss		Holz [-]	Solar (PV+WP) [-]
				[TWh/a]	Anteil an Ziel 2050		TWh/a	Anteil an Ziel 2050		
1 A	PV-Fläche für Wärmebedarf im Sommer	Ganzjähriger Betrieb der Wärmepumpen	1.2	2.3	6.8%	100 %	0.0	0.0 %	81 %	19 %
		Nur Sommer- betrieb der Wärmepumpen				45 %	1.3	3.7 %	92 %	8 %
2 A	Zehnfache PV-Fläche	Ganzjähriger Betrieb der Wärmepumpen	12	23	67.8%	38 %	14.3	42.1 %	26 % (10 Wochen im Winter)	74 %
		Betrieb mit 50 % Holz und 50 % WP				26 %	17.0	50.1 %	(50 %)	(50 %)
3	PV-Produktion nach Energie- perspektiven 2050+	17.7	(34)	(100 %)	17 %	28.4	83.5 %	26 %	74 %	

Tabelle 4: Wärmeversorgung nach Szenarien 1 bis 3. Zahlen in Klammern: Gegebene Werte.

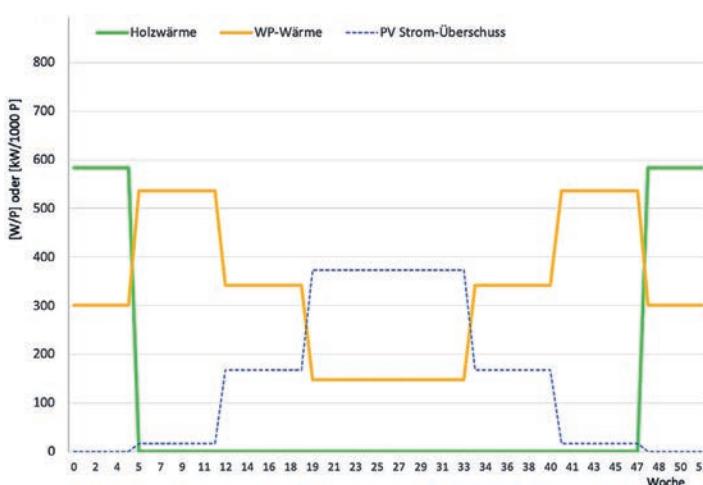


Bild 5: Szenario 2 mit einer PV-Fläche von 12 m² pro Person. Oben mit ganzjährigem Betrieb der Wärmepumpen (Szenario 2A), unten mit einem Betrieb mit je 50 % Deckung für Holz und Wärmepumpen (Szenario 2B).

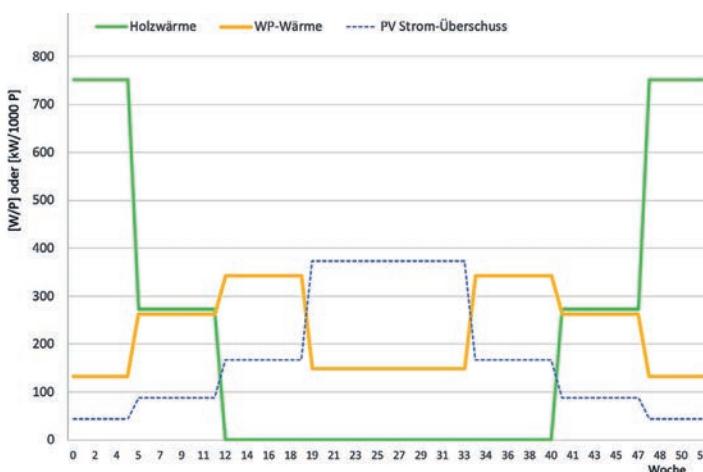
von 23 TWh/a fallen 14 TWh/a als Überschuss an.

Wenn der Betrieb der Holzkessel auf die winternahe Periode erweitert wird und die Wärmepumpen dann zur Vorwärmung eingesetzt werden, wird zum Beispiel eine Versorgung nach Bild 5 (unten) und Tabelle 4 (Szenario 2B) mit je 50 % Deckung erzielt. Der PV-Überschuss steigt dabei auf 17 TWh/a.

Zum Vergleich beschreibt Szenario 3 eine Auslegung auf das in den Energieperspektiven vorausgesetzte Total an Solarstrom [13].

4 Schlussfolgerungen

Im Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, das im Jahr 2050 eine erneuerbare Wärmeversorgung der Gebäude ermöglicht. Basis bilden mit Solarstrom betriebene Wärmepumpen, die durch Holzkessel ergänzt werden. Zum Betrieb der Wärmepumpen erfolgt ein Zubau von Photovoltaikanlagen, welche den Strombedarf der Wärmepumpen im Sommer und in der Übergangszeit decken. Im Winter erfolgt die Wärmeversorgung hauptsächlich mit Holz, sodass das System keinen Winterstrombedarf verursacht und je nach Betriebsart zusätzlich Winterstrom bereitstellt. Das Holz übernimmt im System die Funktion eines Saison speichers. Das Konzept bietet zudem die Möglichkeit, Wärmepumpen und Holzkessel im Winter in Kaskade zu nutzen und die Systemeffizienz damit deutlich zu erhöhen. Die Untersuchung zeigt, dass eine 100 %



erneuerbare Wärmeversorgung der Gebäude mit einem bis 2050 auf 39 TWh/a reduzierten Energieverbrauch möglich ist, wenn pro Person rund 12 m² PV-Fläche oder etwas weniger als die Hälfte der heutigen Dachflächen verfügbar ist und damit Wärmepumpen in thermischer Vernetzung mit Holzheizungen betrieben werden. Der Deckungsgrad von Holz kann dabei je nach Betriebsweise zwischen rund 26 % und bis zu über 50 % variiert werden, was folgende Konsequenzen hat:

- Bei einem Betrieb mit Deckung durch 50 % Holz und 50 % Wärmepumpen werden annähernd das gesamte Energieholzpotenzial beansprucht und jährlich etwa 17 TWh Überschuss an Solarstrom produziert, davon ein geringer Teil im Winter.
- Ein auf minimalen Holzverbrauch ausgelegter Betrieb führt zu rund 26 % Deckung mit Holz und 74 % mit solar betriebenen Wärmepumpen. Der Überschuss an Solarstrom sinkt dabei auf 14.3 TWh pro Jahr ohne Überschuss im Winter. Die Gebäudewärme beansprucht in diesem Fall rund die Hälfte des Energieholzpotenzials, während die verbleibende Hälfte für Prozesswärme und andere Anwendungen verfügbar bleibt. Im Vergleich zu einem Ausbau von monovalenten Holzheizwerken wird durch den auf den Winter reservierten Einsatz von Holz das Potenzial zur Wärmeversorgung vervierfacht.

5 Ausblick

Das Konzept beschreibt eine isolierte Wärmeversorgung der Gebäude, was einem ungünstigen und somit pessimistischen Fall entspricht. Nebst der im Text erwähnten Abgaskondensation können folgende Optionen genutzt werden, um die Umsetzung zu vereinfachen und den Resourcenverbrauch zu reduzieren:

1. Nutzung von Abwärme (wo vorhanden).
2. Wärme-Kraft-Kopplung mit Holz statt reine Holzwärme.
3. PV-Anlagen mit höherem Winterstromanteil (Südfassaden, alpine Anlagen, bifaziale Solarmodule und vertikale Anwendungen [14]).

4. Nutzung des Windkraftpotenzials von 29.5 TWh pro Jahr, wovon 64 % auf das Winterhalbjahr entfallen [15]. Vom Gesamtpotenzial entfällt zudem die Hälfte auf Waldgebiete, was ungefähr der heutigen Energieholznutzung entspricht. ■

Autor

* Prof. Dr. Thomas Nussbaumer ist Professor an der Hochschule Luzern und Inhaber der Verenum AG in Zürich.

Literatur

- [1] Kemmler, A. et al.: Analyse des schweiz. Energieverbrauchs 2000-2019, BfE, Bern 2020.
- [2] Stettler, Y.: Schweiz. Holzenergiestatistik, BfE, Bern 2020.
- [3] Thees, O. et al.: WSL Berichte Heft 57, Birmensdorf, 2017.
- [4] Bundesamt für Energie: Wasserkraftpotenzial, Bern 2019.
- [5] Nussbaumer, T.: 17. Holzenergie-Symposium, Zürich 2022, 47-70.
- [6] Bach, C.: Die post-fossile Mobilität, EMPA, 2018.
- [7] Eicher, H.-P., 15. Holzenergie-Symposium, 2018, 13-24.
- [8] Hangartner, D.; Ködel, J.: Liste "Thermische Netze", BfE, Bern 2021.
- [9] Sres, A.: Weissbuch Fernwärme, VFS, Niederrohrdorf 2014.
- [10] www.energieschweiz.ch/tools/solarrechner, 13.07.2022.
- [11] Nussbaumer, T. et al.: Planungshandbuch Fernwärme, BfE, Bern 2017.
- [12] Moro, N. et al.: Das Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern, ZHAW 2021.
- [13] Bundesamt für Energie: Energieperspektiven 2050+, BfE, Bern 2022.
- [14] Bucher, C.: Photovoltaikanlagen, Faktor Verlag, 2021.
- [15] Meyer, L. et al.: Windpotenzial Schweiz 2022, BfE, Bern 2022.



Jenni Energietechnik

Ihr Partner für erneuerbare Energie und solares Heizen

Hersteller von Energiespeichern bis 15 MWh

- Das Original: Made in Switzerland
- Schnelle und kostenlose Lieferung
- 45 Jahre Erfahrung

Jenni Energietechnik AG
Lochbachstr. 22
CH-3414 Oberburg bei Burgdorf
+41 34 420 30 00 • www.jenni.ch