Passivhaus und regenerative Energie-quellen als Lösungsansatz für den klimaneutralen Gebäudebestand

Prof. Dr. Harald Krause
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland

Passivhaus und regenerative Energiequellen als Lösungsansatz für den klimaneutralen Gebäudebestand

1. Klimaneutrales Deutschland 2045

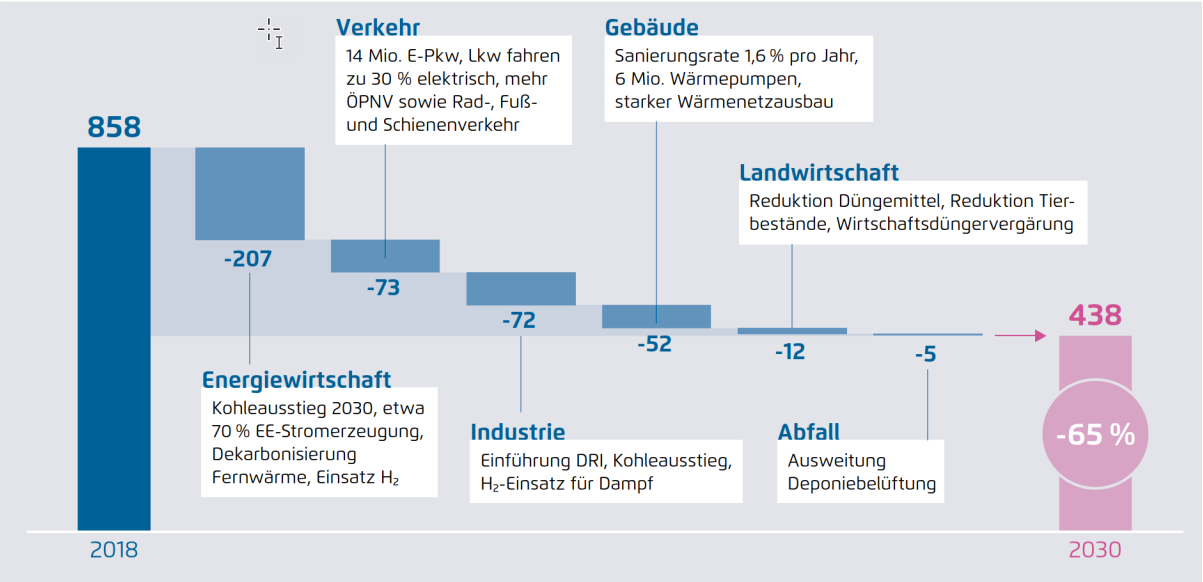
Gemäß dem Klimaschutzgesetz aus der letzten Legislaturperiode [1] soll Deutschland bis 2045 treibhausgasneutral sein. Dies bedeutet, dass sich Emissionen und Entnahmen aus der Atmosphäre die Waage halten sollen.

Von verschiedenen Institutionen wurden dazu Studien zur Machbarkeit und zu konkreten Umsetzungsstrategien entwickelt, z.B. [2, 3, 4]. In den zitierten, aber auch anderen Studien sind die wesentlichen Umsetzungsstrategien ähnlich:

1. Vollständige Umstellung auf erneuerbare Energiequellen: Hauptsächlich Wind- und Sonnenenergie in Form von Photovoltaik.
2. Umstellung auf strombasierte Versorgung in fast allen Sektoren: Elektromobilität, Wärmepumpen zur Heizung u.a.
3. Erhöhung der Energieeffizienz in allen Sektoren: Dazu zählen Gebäudedämmung, Umstellung auf Elektromobilität u.a.
4. Auf- und Ausbau der Wasserstofftechnologie: Einsatz als Rohstoff in der Chemischen Industrie, Stahlproduktion sowie Energiespeichermedium.

Eine Zusammenfassung der Maßnahmen findet man auch in «*Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte*», einer Veröffentlichung der Scientists for Future Deutschland unter Mitwirkung des Autors dieses Tagungsbeitrages [5].

Drei Schritte zur Klimaneutralität: Schritt 1 – 65 Prozent Minderung bis 2030
(Treibhausgas-Emissionen in Mio. t CO_2-Äq) Abbildung 2



Hinweis: H_2 = Wasserstoff
Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021)

Abbildung 1: Maßnahmen zur Klimaneutralität im Zeitraum bis 2030 aus [3]

Im Folgenden wird die Studie «*Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*» im Auftrag der Agora Energiewende [4] verwendet. In Abbildung 1 sind die Maßnahmen bis zum Jahre 2030 gegliedert nach den betrachteten Sektoren zusammengefasst. Die Hauptlast liegt in der Energiewirtschaft und kann mit dem Begriff Dekarbonisierung zusammengefasst werden. Im Gebäudebereich steht vor allem eine Erhöhung der Sanierungsquote sowie die Umstellung auf Wärmepumpen als Heizquelle an. Bis 2030 ist der Einbau von ca. 6 Millionen Wärmepumpen als Ersatz für bestehende Öl- oder Gaskessel angesetzt.

Der Beitrag der verschiedenen Sektoren zu den vergangenen, heutigen und zukünftigen Treibhausgasemissionen ist in Abbildung 2 dargestellt [4]. Daraus ist abzulesen, dass fast alle Sektoren inklusiv des Gebäudebereiches bis 2045 keine Treibhausgase mehr emittieren sollen. Einzig die Landwirtschaft wird als Emittent übrigbleiben, weshalb auch Kompensationsmaßnahmen als «negative» Emissionen nötig sein werden.

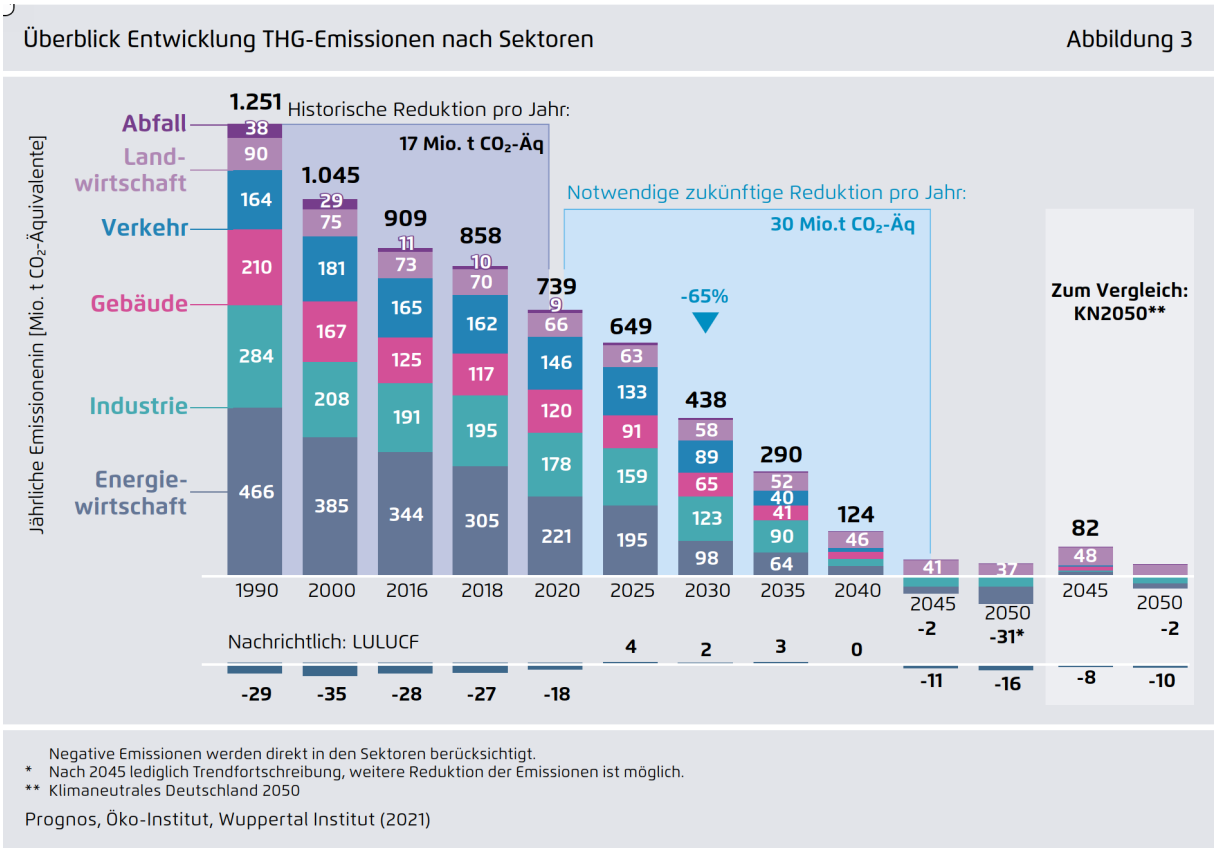


Abbildung 2: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen nach Sektoren aus [4]. Bis 2045 ist eine fast vollständige Umstellung auf regenerative Energiequellen nötig. Zu einem gewissen Teil tragen auch Importe von regenerativ erzeugtem Wasserstoff sowie aktive Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre zur Treibhausgasneutralität bei.

Um die enormen Anstrengungen insbesondere beim Ausbau von Windkraft und Photovoltaik zu verdeutlichen, ist eine weitere Grafik aus der Agora Studie in Abbildung 3 hilfreich. Bei der zusätzlich installierten Leistung steht die Photovoltaik an erster Stelle. Für die Nettostromerzeugung sollen 2045 sowohl Windkraft als auch Photovoltaik die dominante Rolle spielen. Biomasse und Wasserkraft spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Die jährlichen Ausbauraten der installierten Leistung bis 2030 liegen bei der Photovoltaik bei ca. 10 GW, bei der Windenergie onshore 5 GW und offshore 2 GW. Die maximalen jährlich installierten Leistungen lagen bisher bei der Photovoltaik bei 8 GW (2010 und 2012) sowie der Windkraft onshore bei 5 GW (2014 und 2017) und offshore bei 2 GW (2015). Somit sind die Ausbauzahlen rein technisch gesehen machbar.

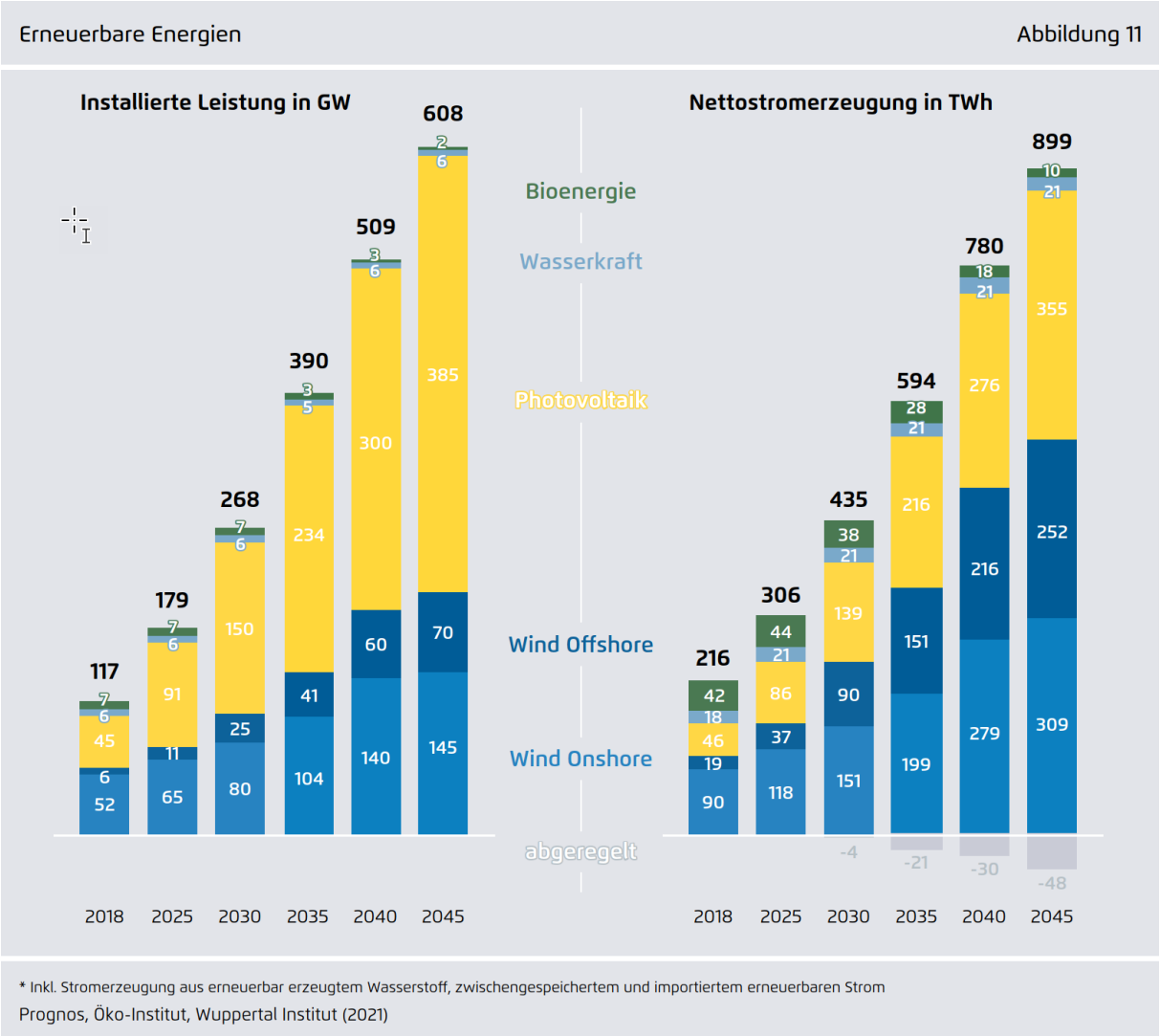


Abbildung 3: Ausbau der erneuerbaren Energiequellen Photovoltaik und Windkraft aus [4].

Zusammengefasst können die nötigen Transformationsprozesse in drei Säulen wie in Abbildung 4 dargestellt werden.

Der Primärenergiebedarf muss bis 2045 deutlich gesenkt werden. Dies geschieht vor allem durch Verbesserung der Energieeffizienz, wie z.B. durch Elektromobilität, Heizung mit Wärmepumpen aber auch Reduktion von Wärmeverlusten in Gebäuden.

Die Umstellung auf Strom als Energieträger wird zu einer deutlichen Erhöhung der Strombedarfs führen. Obwohl dies durch die Umstellung auf Wärmepumpen auch für Gebäude zutrifft, geht man davon aus, dass die Reduktion des Energiebedarfs und auch der Einsatz von effizienteren Elektrogeräten in diesem Sektor zu keinem erhöhten Strombedarf führen.

Wasserstoff als Energieträger und als Grundstoff für die Industrie kommt eine wesentliche Bedeutung zu. Die treibhausgasneutrale Produktion der nötigen Mengen Wasserstoff wird jedoch in Deutschland nicht möglich sein.

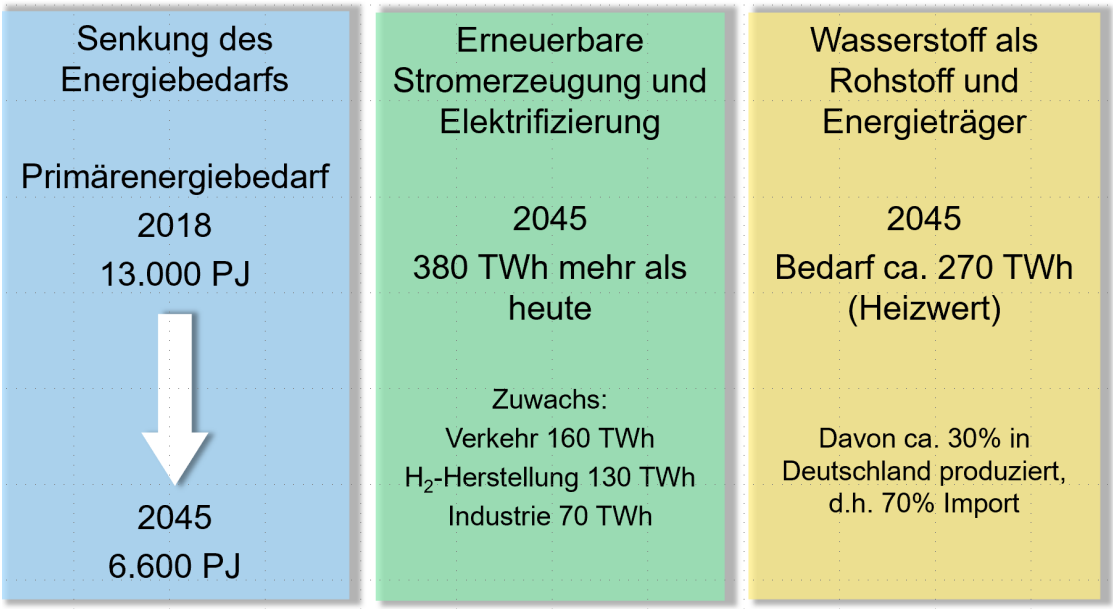


Abbildung 4: Die drei wesentlichen Säulen zur Klimaneutralität Deutschlands nach [4].

2. Klimaneutraler Gebäudebestand

Die Wege zum klimaneutralen Gebäudebestand bis 2045 unterscheiden sich in verschiedenen Studien deutlich. Gemeinsam haben alle, dass nur eine Kombination aus

- Sanierung der Gebäudehüllen,
- höherem Neubauniveau bzgl. des Wärmeschutzes,
- Umstellung auf Wärmepumpen oder regenerativer Fernwärme sowie
- Nutzung von regenerativen Energien und Wärmerückgewinnung im Gebäude

zum Ziel führen. Die nötigen Dämmstandards sind jedoch uneinheitlich, wobei dabei vor allem wirtschaftliche Gründe genannt werden. Eine weitere Diskrepanz ergibt sich aus unterschiedlichen Annahmen zur Entwicklung der Wohnflächen pro Person. [3] setzt eine Reduktion der Wohnflächen voraus während [4] von einem weiteren Anstieg von 45 m² pro Person im Jahre 2018 auf 52 m² pro Person in 2050 ausgeht.

Die bereits vorgestellte Studie der Agora Energiewende [4] geht von einer zukünftigen Sanierungstiefe auf einen Jahresheizwärmebedarf von 60 kWh/(m²a) bei Ein- und Zweifamilienhäusern (entspricht ca. dem heutigen KfW 70 Niveau) und 40 bis 45 kWh/(m²a) (entspricht ca. dem heutigen KfW 55 Niveau) bei Mehrfamilienhäusern aus. Bei Neubauten sinkt der Heizwärmebedarf im betrachteten Zeitraum auf ca. 25 kWh/(m²a).

Die Leitstudie der Dena [2] setzt im Neubau als Mindeststandard ab 2022 den heutigen KfW 55 Standard und ab 2030 den KfW 40 Standard voraus. Der Koalitionsvertrag von SPD, Grünen und der FDP sieht den KfW 40 Standard bereits ab 2025 als für Neubauten verpflichtend vor [6], nachdem man sich in der letzten Regierung noch um jegliche Verbesserung gedrückt hatte. Außerdem soll jeder Neubau zu 65% mit erneuerbaren Energien betrieben werden, was mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe problemlos erreicht wird und somit keine wirkliche Herausforderung darstellt. In der Sanierung werden in der Dena Leitstudie verschiedene Szenarien bzgl. Sanierungstiefe und -rate betrachtet. Bis 2045 soll eine Halbierung der Heizwärmebedarfs des gesamten Gebäudebestandes erreicht werden.

Das EU Projekt outphit [7] mit dem deutschen Partner Passivhaus Institut kommt in einer aktuellen Studie zum Schluss, dass sowohl die Sanierung als auch der Neubau nach Passivhaus Prinzipien die wirtschaftlichste Lösung darstellt. Da die KfW Förderkriterien [8] und die Passivhauskriterien nicht direkt vergleichbar sind, da sie unterschiedliche Nachweisverfahren und Nachweisgrößen verwenden, ist ein unmittelbarer Vergleich an Hand von Kenndaten schwierig. Die Passivhauskriterien setzen zunächst auf den Heizwärmebedarf als Nachweisgröße und damit auf eine optimierte Gebäudehülle, passive solare Gewinne und

Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung. Die Verfahren des GEG [9] bewertet nur die Transmissionswärmeverluste als Kenngröße für die Gebäudehülle. Das primärenergetische Bewertungssystem auf Grundlage der erneuerbaren Primärenergie wird später noch behandelt.

3. Winterlücke

Zwischen Energiebereitstellung durch Wind und Sonne und Energienachfrage für Heizung gibt es keine optimale zeitliche Korrelation. Ein mögliches Szenario für das Jahr 2040 mit einem Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung von 86% zeigt Abbildung 5 [10]. Aus der Grafik wird deutlich, dass im Winterhalbjahr eine deutliche Deckungslücke zwischen Bedarf (rote Linie) und Ertrag (blau und gelb) besteht. Diese muss durch Importe, regelbare Kraftwerke und Energiespeicher geschlossen werden.

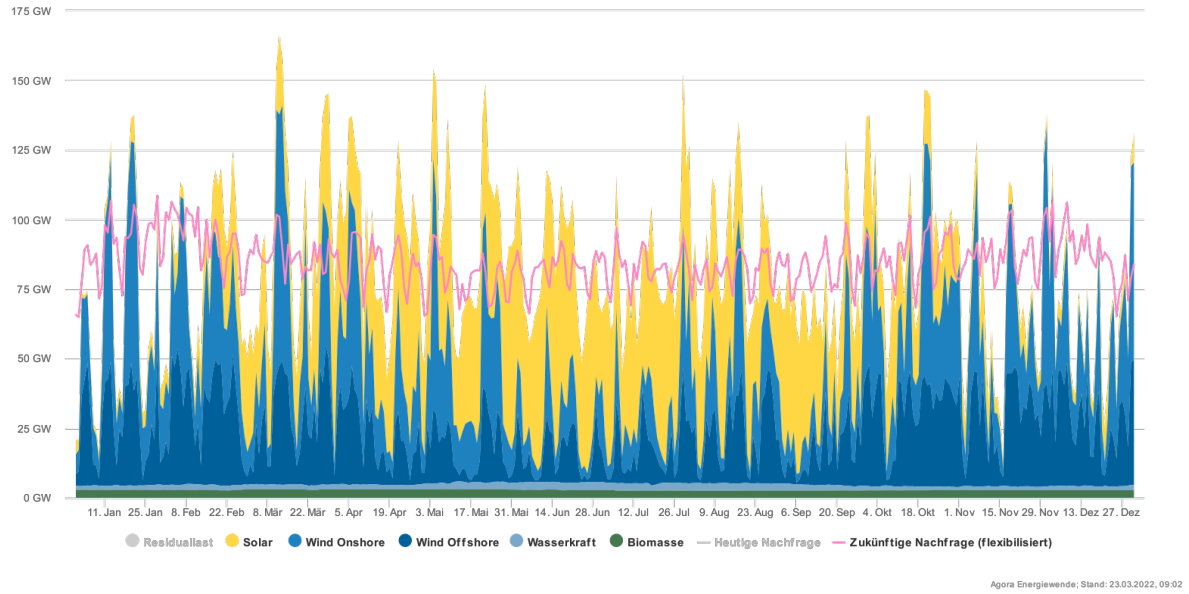


Abbildung 5: Stromerzeugung und -bedarf für das Jahr 2040 nach [10]. Der Bedarf ist durch rote Linie dargestellt. Die Residuallast, also alles was aus regelbaren Kraftwerken, Importen und Speichern stammt ist ausgeblendet. Es wird deutlich, dass dieser Beitrag vor allem im Winter geleistet werden muss, was vor allem am reduzierten Beitrag der Solarenergie im Winter liegt. Die Wetterdaten basieren auf dem Jahr 2021.

Diese drei Beiträge werden nach jetzigem Stand zu hohen Kosten führen, weshalb eine Reduktion der Winterlücke vor allem im Gebäudebereich sinnvoll erscheint.

Diesem Sachverhalt versucht das PER-System (Primärenergie Erneuerbar) des Passivhaus Institutes Rechnung zu tragen [11]. Dieses System setzt eine vollständige Versorgung durch erneuerbare Energien in einem zukünftigen Energiesystem voraus. Treibhausgasemissionen oder wie bisher die nicht erneuerbare Primärenergie sind dabei keine zielführenden Steuergrößen. Vielmehr muss insbesondere für Gebäude die zeitliche Verfügbarkeit der Energie sowie Kosten für Speicherung und anderes mit einbezogen werden. Für weitere Details sei auf die Quelle [11] verwiesen.

4. Vergleich Energiestandards

Um die Problematik der Winterlücke zu verdeutlichen, werden im Folgenden einige Berechnungen für ein Einfamilienhaus vorgestellt. Das Gebäude wurde 2004 als Passivhaus erstellt und auch über mehrere Jahre einem technischen Monitoring unterzogen [12].

Mit der Simulationssoftware «ETU Simulation» der Hottgenroth Software AG wurde ein Modell des Gebäudes erstellt und anhand der Messdaten validiert. Auf dieser Basis wurden Simulationsrechnungen auf Stundenbasis für verschiedene Energiestandards durchgeführt.

Abbildung 6: Das in den Simulationen betrachtete Gebäude

4.1. Randbedingungen und Energiestandards

Die wesentlichen Randbedingungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Randbedingungen für die Simulationen

Wetterdaten	Meteonormdaten für Samerberg aus HSETU Simulation
Photovoltaik	8,6 kWp Anlage
Stromspeicher	Lithium Ionen Speicher mit 9 kWh nutzbarer Kapazität
Heizquelle	Luft-Wasser-Wärmepumpe (Standardwerte aus HSETU Simulation
Wärmeabgabe	Fußbodenheizung
Bauweise	Holztafelbau mit jeweils angepassten Aufbauten
Beheizte Fläche	ca. 180 m² inkl. Büroräume im KG
Personen	Nutzung durch 4 Personen
Lüftung	Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung für die Passivhausvariante, sonst freie Lüftung über Fenster

Es wurden 3 Energiestandards betrachtet.
- Passivhaus, wie tatsächlich ausgeführt.
- GEG 2020 Standard bzgl. Anforderungen an die Gebäudehülle und Luftdichtheit.
- Gebäudebestand: ca. Niveau 1980 für Gebäudehülle und Luftdichtheit.

4.2. Simulationsergebnisse

In Abbildung 7 sind die nötigen Heizleistungen über einen Jahreszeitraum vergleichend dargestellt. Auch außerhalb der Heizperiode ergeben sich theoretisch geringfügige Lasten für einzelne Räume, die in der Ergebnisdarstellung belassen wurden.

Wie zu erwarten, steigen sowohl die mittleren also auch die maximalen Heizleistungen sowie der Heizwärmebedarf mit schlechter werdendem Energiestandard. Die Werte sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

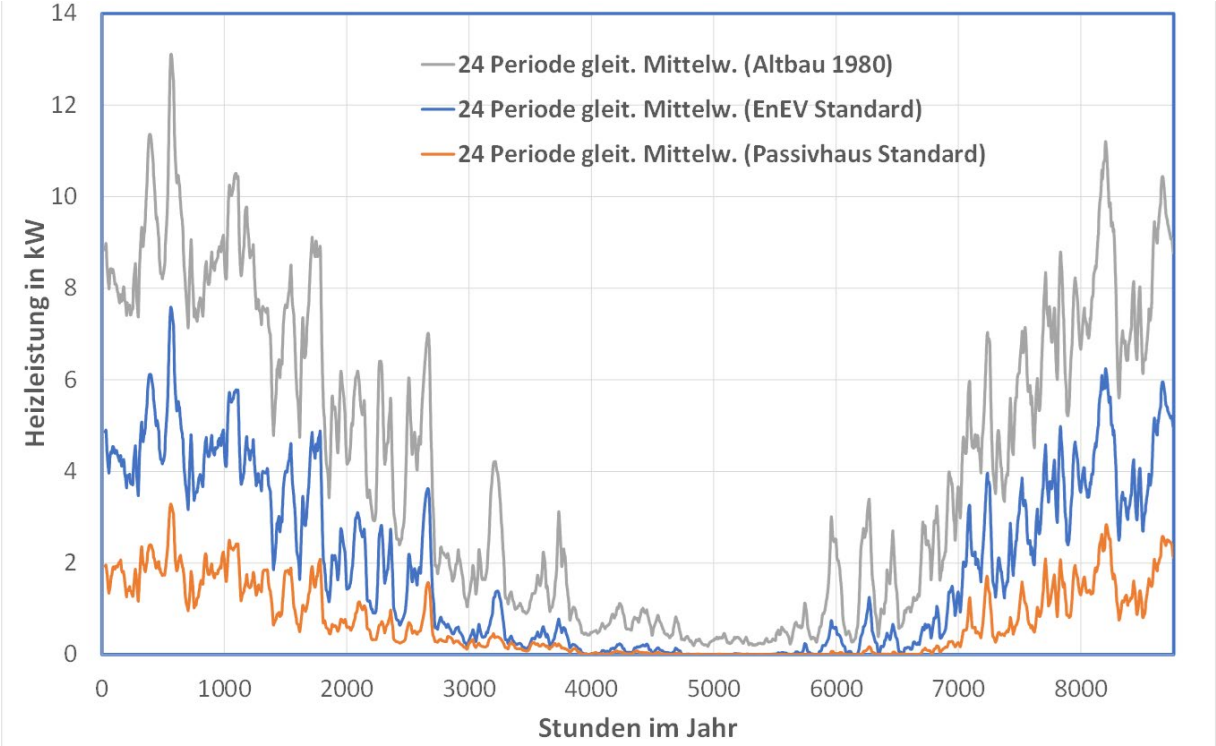


Abbildung 7: Zeitaufgelöste Heizleistungen für die drei betrachteten Energiestandards

Tabelle 2: Zusammengefasste Simulationsergebnisse zu Abbildung 7.

	Passivhaus	GEG	Altbau 1980
Jahresheizwärmebedarf in kWh/a	6300	17200	38200
Maximale Heizlast in kW (Auslegungsfall)	3	8	13

Im Weiteren wurden Berechnungen des gesamten Energiebedarfs (Wärmepumpe (Heizung, Warmwasser), Beleuchtung, Hausgeräte, Medien etc.) sowie der jeweils zur Verfügung stehende Photovoltaikertrag unter Berücksichtigung des Stromspeichers bilanziert.

In den Diagrammen in Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Ergebnisse der stündlichen Werte für den Altbau und das Passivhaus für
- den Photovoltaikertrag,
- den Gesamtstromverbrauch und
- den Netzbezug für Strom

in Monatswerten zusammengefasst. Bitte beachten Sie die unterschiedliche Skalierung der Y-Achse.

Deutlich erkennbar sind folgende Ergebnisse:

1. Sowohl im Passivhaus als auch im Altbau reicht die Photovoltaikanlage nicht aus, um den kompletten Bedarf im Winter zu decken.
2. Auch im Sommer ist ein Netzbezug, wenn auch in geringem Umfang nötig.
3. Im Sommer ist in allen Fällen ein bilanzieller Überschuss an Strom vorhanden.
4. Der Zeitraum der deutlichen Deckungslücke im Passivhaus beschränkt sich auf wenige Monate im Winter.
5. Die Deckungslücke (im Wesentlichen Netzbezug in Wintermonaten zur Heizung) liegt im Passivhaus bei 3500 kWh, im Altbau bei 15300 kWh (GEG nicht dargestellt 6700 kWh)

Dies bedeutet, dass in allen Fällen ein Netzbezug nötig ist. Wie in den vorherigen Abschnitten erläutert, wird es deshalb auch zu einer landesweiten Deckungslücke im Winter kommen,

die durch Importe oder saisonal gespeicherte Energie gedeckt werden muss. Die Windenergie mit den höheren Erträgen im Winter kann diese Lücke vermindern aber nicht schließen.

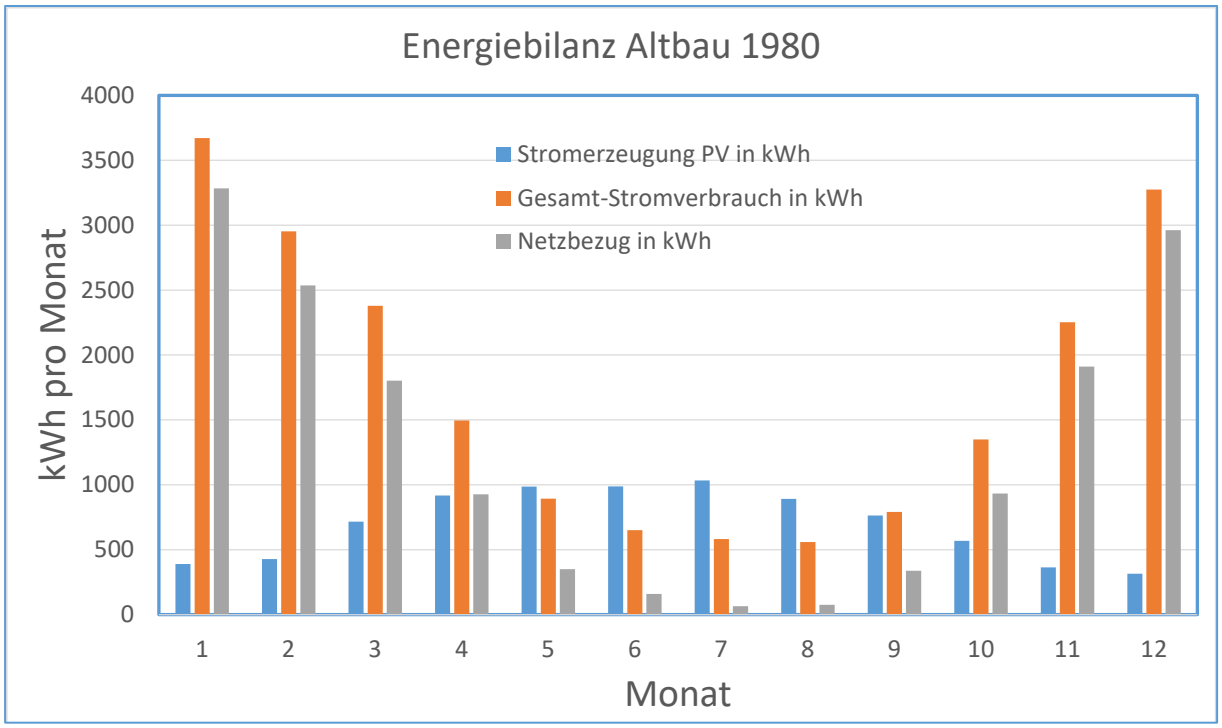


Abbildung 8: Bilanzergebnisse für den Altbau

Die entscheidende Frage im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit ist nun, ob es günstiger ist, Energie zu importieren, zu speichern oder in bessere Gebäudehüllen und Wärmerückgewinnungstechnologien zu investieren.

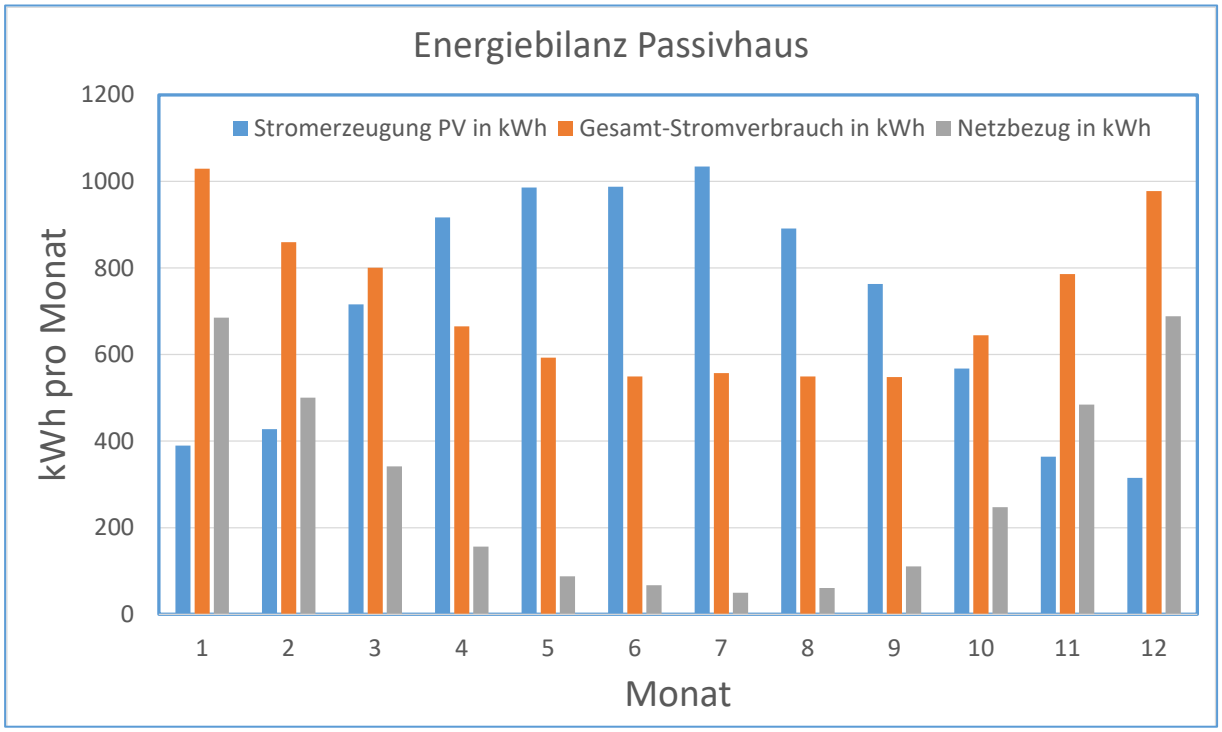


Abbildung 9: Bilanzergebnisse für das Passivhaus

Kosten für saisonale Energiespeicherung sind schwer zu ermitteln und stehen auch in der Literatur nur unzureichend zur Verfügung. Die derzeit einzige halbwegs wirtschaftlich umsetzbare Technologie ist die Erzeugung von Wasserstoff aus Überschüssen (z.B. PV im Sommer) durch Elektrolyse mit anschließender Methanisierung und Speicherung in den

vorhandenen Erdgasspeichern [z.B. 13]. Im Winter erfolgt die Rückverstromung. Ein Schema des Passivhaus Institutes dazu zeigt Abbildung 10.

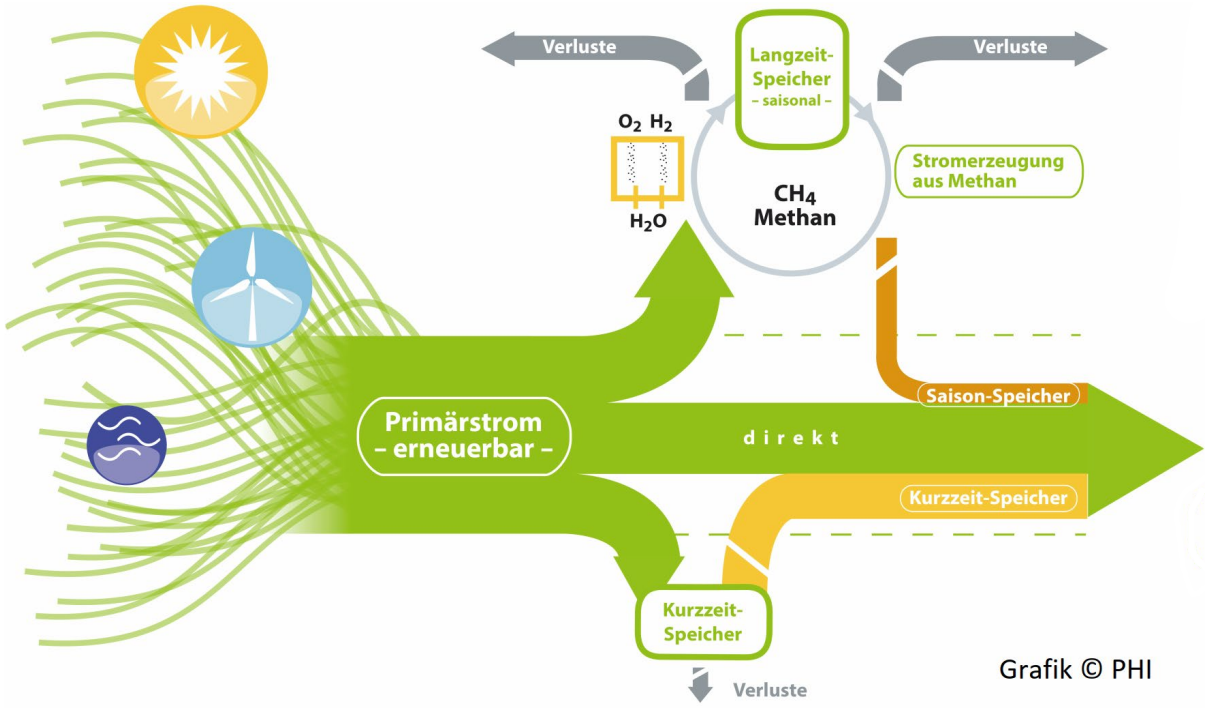


Abbildung 10: Schema der Energiespeicherung über power-to-gas [11].

Alleine aufgrund des Wirkungsgrades von ca. 30% bei diesem Gesamtprozess ergeben sich Kosten von minimal den 3-fachen Stromgestehungskosten. Wolfgang Feist schätzte die Kosten für die «gespeicherte» nutzbare Energie auf 13 bis 16 cent/kWh ab [14]. Eine gesamtheitliche wirtschaftliche Betrachtung ist deutlich komplexer und liefert keine einfachen Kosten pro kWh [13].

Wenn man sich dennoch an den 13 bis 16 cent/kWh orientiert, wird deutlich, dass sowohl Verbesserungen an der Gebäudehülle als auch Wärmerückgewinnungstechnologien mit diesen Kosten mehr als konkurrieren können. Berechnungen zu den Kosten pro eingesparter kWh lassen sich z.B. mit dem tool des BBSR durchführen [15]. Je nach Ansatz der Sowiesokosten können z.B. die Kosten für eine Sanierung des betrachteten Altbaubeispiels auf Passivhausniveau zwischen € 0,03 und € 0,1/kWh liegen (ohne Fördermittel).

Das Passivhaus Institut kommt in einer aktuellen Studie zum Schluss, dass aus diesen Gründen die Investitionen in eine hochwertige Gebäudehülle wirtschaftlicher sind als die in die sonst deutlich höheren Import- oder Speicherkosten [7].

5. Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde dargelegt, warum eine hochwertige Gebäudehülle in Verbindung mit regenerativer Energieerzeugung einen sinnvollen Lösungsansatz für den klimaneutralen Gebäudebestand 2045 auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten darstellt.

Die Umstellung unserer Gebäudewärmeversorgung auf Wärmepumpen und klimaneutrale Fernwärme stellt eine gewaltige Herausforderung dar. Es sollte dabei trotz des massiven Ausbaus von Photovoltaik und Windenergie darauf geachtet werden, die Bedarfsseite zu optimieren. Auch wenn technisch möglich, ist eine Umstellung im Gebäudebestand auf Wärmepumpen ohne thermische Sanierung weder betriebswirtschaftlich (aus Sicht des Gebäudenutzers) noch volkswirtschaftlich sinnvoll.

Es muss das Ziel sein, die Deckungslücken und damit den Import sowie die nötige saisonale Speicherung von Energie so gering wie möglich zu halten. Es ist derzeit nicht absehbar, dass insbesondere die Kosten für Energiespeicherung mit den Kosten für Bedarfsreduzierung in Gebäuden konkurrieren können.

[1] Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), «Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18.August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist»

[2] Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) (dena, 2021). «dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität»

[3] Wuppertal Institut (2020). CO 2-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze. Bericht. Wuppertal.

[4] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann, Zusammenfassung bzw. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende

[5] Gerhards, Christoph, Weber, Urban, Klafka, Peter, Golla, Stefan, Hagedorn, Gregor, Baumann, Franz, Brendel, Heiko, Breyer, Christian, Clausen, Jens, Creutzig, Felix, Daub, Claus-Heinrich, Helgenberger, Sebastian, Hentschel, Karl-Martin, Hirschhausen, Christian von, Jordan, Ulrike, Kemfert, Claudia, Krause, Harald, Linow, Sven, Oei, Pao-Yu, … Weinsziehr, Theresa. (2021). Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte / Climate-friendly energy supply for Germany–16 points of orientation (1.0, pp. 1–55). Scientists for Future Germany. https://doi.org/10.5281/zenodo.4409334

[6] Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP)

[7] https://outphit.eu/de/; https://outphit.eu/media/filer_public/d2/02/d2025737-3d5b-458e-8753-e069f36f3ef3/2022-01-25_outphit_klimaneutralitat_im_gebaudebestand_de.pdf

[8] www.kfw.de

[9] Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG), Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728)

[10] https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter/chart/future_power_generation/01.01.2021/31.12.2021/future/2040/

[11] https://passipedia.de/zertifizierung/passivhaus-klassen/per

[12] Peter Irger: Die energetische Bilanz eines Passivhauses in der Praxis – PHPP Berechnung und Messdaten, Bachelorarbeit 2013, TH Rosenheim, im Rahmen des EU Projektes ENERBUILD

[13] Brinner, A.; Schmidt, M.; Schwarz, S.; Wagener, L.; Zuberbühler, U. (2018): Techno-logiebericht 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken

[14] Wolfgang Feist – Uni Innsbruck, Energiekonzepte – das Passivhaus im Vergleich, 17th International Passive House Conference

[15] https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Wirtschaftlichkeit/VereinfachteAnsaetze/BBSR-Berechnungstool/BBSR-Excel-Tool22.xlsx?_blob=publicationFile&v=2