Wieviel Erde braucht der Mensch?

[latexpage]

Energiewende für einen 4-Personen Haushalt

Die Energiewende geht von der Zielvorstellung aus, dass der komplette Energiebedarf durch Wind- und Sonnenergie gedeckt werden soll. Beide Energiearten zeichnen sich dadurch aus, dass sie

1. volatil sind, d.h. nicht die ganze Zeit verfügbar sind,
2. dass sie keine hohe Energiedichte haben, d.h. viel (Boden-)Fläche beanspruchen

Ziel dieser Untersuchung ist, an dem eingeschränkten konkreten Beispiel der Basisenergieversorgung eines beispielhaften 4-Personen Haushalt in Form von

- Elektrizität
- Warmwasser
- Heizung

zu ermitteln, wie groß der Flächenbedarf für eine Vollversorgung mittels Photovoltaik ist, ohne Energiesubventionierung durch Backup von Kohle-, Gas- oder Kernkraftwerken.

Annahmen zum Verbrauch und Energiespeicherung

Beim Verbrauch wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Der direkte Stromverbrauch beträgt im Jahr 4000 kWh.
- Der Aufwand zum Aufheizen des Warmwassers beträgt effektiv 3000 kWh, durch die Verwendung einer Wärmepumpe wird ein reduzierter Verbrauch von 1000 kWh erwartet. Der Verbrauch wird zu allen Jahreszeiten als gleich

angenommen.
- Bei der Heizung wird es komplizierter, weil diese stark von der Bauweise des Hauses abhängt. Stand heute dürfte die sinnvollste Annahme die eines durchschnittlich alten Hauses (Baujahr 2002) mit 140 m^2 Wohnfläche sein, mit einem Wärmeenergiebedarf von $100 kWh/m^2$ = 14.000 kWh. Davon können 3000 kWh für Warmwasser abgezogen werden.

Energieerzeugung, Speicherung mit Batterien und Wasserstoff

Batteriespeicher für Tag/Nacht-Ausgleich
Für die kurzfristige Speicherung photovoltaischen Stroms, d.h. zur Überbrückung der Tag-/Nachtvolatilität werden Batteriespeicher angenommen, was zu einer 75% Strom-Autarkie im Jahresdurchschnitt führt. Von diesen 75% stammt die Hälfte direkt und damit verlustlos von der Photovoltaik, die andere Hälfte, also 37,5% kommen vom Batteriespeicher unter der optimistischen Annahme von 10% Verlust. Die restlichen 25% müssen aus gespeicherten Wasserstoff generiert werden. Der Batteriespeicher ist so bemessen, dass er etwa die Kapazität des halben durchschnittlichen Tagesbedarfs hat, im Beispiel also 6 kWh.

Brennstoffzelle und Wärmepumpe für die Heizung
Da die Heizung im überwiegend sonnenarmen Winter erfolgt, kann allenfalls 1/3, also etwa 3500 kWh durch die direkte Umwandlung von PV-Strom mit einer Wärmepumpe gewonnen werden. Der Rest von 7500 kWh erfolgt durch Speicherung von Wasserstoff und Rückumwandlung in Elektrizität und Wärme. Die Kennzahlen dazu sind exemplarisch der Spezifikation der Panasonic Brennstoffzelle entnommen. Diese 5 KW Brennstoffzelle hat einen elektrischen Wirkungsgrad von 56% und einen thermischen Wirkungsgrad von 39%, also fallen pro kWh Wasserstoff 0,56 kWh Strom und 0,39 kWh verwertbare Wärme an. Erfolgt die Heizung mit einer Wärmepumpe, dann wird der Stromanteil um den COP-Faktor „aufgewertet“. Um eine realistische Bewertung abzugeben, verwende ich einen

konservativen COP-Faktor von 3. Je nach individuellen Gegebenheiten kann dieser bis maximal 5 sein. Der effektive Heizwert des Wasserstoffs ist dann pro erzeugte kWh $0,56 kWh\cdot 3 + 0,39 kWh = 2,07 kWh $, also etwas mehr als das doppelte des theoretischen Brennwerts, maximal bei einem COP-Faktor von 5 sind es 3,19 kWh.

Elektrolyse für die Wasserstoff-Erzeugung
Bei der Elektrolyse wird einen Wirkungsgrad von 62,5% angenommen, gemäß des Datenblatts des Enapter Elektrolyseurs, der z.B. in der Komplettlösung PICEA Anwendung findet. Die Wärme des Elektrolyseurs kann ggf. zur Warmwasserbereitung mitverwendet werden, da sie aber überwiegend in der warmen Jahreszeit anfällt, wird sie hier nicht berücksichtigt. **1 kWh primäre PV Energie erzeugt demnach 0,625 kWh Wasserstoff (und etwa 0,33 kWh nicht speicherbare Wärme), bei Nutzung einer Brennstoffzelle und Wärmepumpe also 1,29 (maximal 2) kWh Heizwärme und 0,35 kWh nutzbare elektrische Energie.**

Flächenbedarf

Zur Berechnung der notwendigen Kollektorfläche wird der Gesamtverbrauch aufgeteilt:

1. Stromnutzung direkt vom Modul oder dem Batteriespeicher mit einem mittleren Wirkungsgrad von 95%, für elektrische Verbraucher, Warmwasser und Heizung in der Übergangszeit:
   $ (5000\cdot 0,75 + \frac{3500}{3})\cdot \frac{100}{95} kWh = 5175 kWh $
2. Stromerzeugung aus gespeichertem Wasserstoff bei einem Gesamtwirkungsgrad von 35%, für elektrische Verbraucher und Warmwasser (die Abwärme der Brennstoffzelle wird als Wärmequelle für die Wärmepumpe im Winter verwendet):
   $(5000\cdot 0,25)\cdot \frac{100}{35} kWh = 3571 kWh $
3. Heizwärme aus gespeichertem Wasserstoff bei einem Gesamtwirkungsgrad von 129%:
   $7500\cdot \frac{100}{129} kWh = 5814 kWh $

Daraus ergibt sich ein Gesamtbedarf von primärer PV-Energie von 14.560 kWh im Jahr, also eine Durchschnittsleistung von 1661 Watt. Das entspricht bei dem in Deutschland mittleren Ertrag von 10,6% der installierten Maximalleistung einer installierten Leistung von 15,7 kW_p, also 39 Module zu je 400 W_p mit einer Gesamtmodulfläche von 67 qm. Bei Abweichungen von der optimalen Südausrichtung steigt die Anzahl der notwendigen Module.
Unter der Voraussetzung der Nutzung einer Wärmepumpe wird zusätzlich noch Gartenfläche für den sog. Wärmekollektor benötigt, ungefähr 40qm pro KW Heizleistung. Bei 11 KW Heizleistung müssen also 440 qm Garten aufgegraben und mit einem Wärmekollektor bestückt werden. Die Bepflanzung auf dieser Fläche ist stark eingeschränkt.

Die von der Photovoltaik beanspruchte effektive Bodenfläche ergibt sich unter der Annahme von durchschnittlich etwa 10,5 W/qm Bodenfläche. Dieser Wert ist deswegen deutlich niedriger als die Leistung pro Modulfläche, weil die Module in der Regel schräg gestellt sind, und somit etwa die doppelte Modulfläche verschatten. PV-Module, die in die gleiche Richtung ausgerichtet sind, können im Mittel nicht dichter aufgestellt werden. Diese Bodenfläche wird implizit auch bei Dachmontage beansprucht, sie überlappt sich dann aber mit der Grundfläche des Gebäudes. **Bei der Modellrechnung ergibt sich also eine Mindestbedarf von 158 qm Bodenfläche, um den Energiebedarf für Strom, Warmwasser und Heizung eines durchschnittlichen 4 Personen-Einfamilienhauses zu decken.** Diese Fläche ist für jeden Haushalt notwendig, daher ist die reine PV-basierte Lösung für Mehrfamilienhäuser, wo der einzelnen Familie weniger nutzbare Fläche zur Verfügung steht, unrealistisch. Von Stadthäusern und gemieteten Wohnungen ganz zu schweigen. Eine dort auf dem Dach installierte Anlage kann allenfalls einen Teil des Bedarfs abdecken. Die besten Voraussetzungen hat ein Einfamilienhaus mit großem Grundstück, dessen Qualität durch die installierte Wärmepumpe deutlich eingeschränkt wird.

Potential von Brennholz

Bestandserhaltend geerntetes Brennholz ist eine nachhaltige Energiequelle, kann also ebenfalls als künftiger Energieträger berücksichtigt werden. Eine Überschlagsrechnung zeigt das Potential von Brennholz als Beitrag zum Heizen von Wohngebäuden:

Deutschland hat eine Waldfläche von 11,7 Millionen ha und (Stand 31.12.2021) eine Einwohnerzahl von 82,3 Millionen. Das ist ein rechnerischer Anteil von 0,137 ha Waldfläche pro Einwohner.
Der bestandserhaltende Holzertrag ist etwa 12 Festmeter bzw. 22 Raummeter pro ha und Jahr. Die tatsächliche durchschnittliche Holzverwendung für Brennholz in privaten Haushalten war im Schnitt der letzten 15 Jahre etwa 30 Millionen Festmeter pro Jahr. Das entspricht einer Nutzung von 10 Raummeter pro ha im Jahr auf der Hälfte der verfügbaren Waldfläche. Soviel (d.h. 7-10 Raummeter) kann man bei naturverträglicher Brennholz-Nutzung erwarten. Da aber außer der privaten Nutzung nochmal etwa genauso viel in Kleinfeuerungsanlagen und Großfeuerungsanlagen verbrannt wird, muss davon ausgegangen werden, dass ein großer Teil unseres Brennholzes importiert und daher nicht nachhaltig verwendet wird, z.B. aus Rumänien stammt.
Der durchschnittliche Heizwert von Brennholz wird mit 1600 kWh/Raummeter geschätzt, was etwa 2900 kWh/Festmeter entspricht.

Würde die ganze Waldfläche systematisch nachhaltig bewirtschaftet und wird knapp die Hälfte als Brennholz verwendet, steht rechnerisch für jeden Einwohner pro Jahr die Heizenergie von
$ 0.137\cdot 10 \cdot 1600 kWh = 2192 kWh $
zur Verfügung. Für einen 4-Personen-Haushalt also 8768 kWh. Das entspricht ungefähr der o.g. Heizenergie aus gespeichertem Wasserstoff (7500 kWh). Optimistisch gesehen, kann also langfristig für den größten Teil der Bevölkerung statt

Wasserstoff auch Holz zum nachhaltigen Heizen im Winter verwendet werden. Eine Verwendung in Kraftwerken wäre dann aber ausgeschlossen.

Die aktuelle für Privathaushalte verwendete Energiemenge aus Brennholz ist aber im Schnitt pro Person und Jahr nur
$ \frac{30 \cdot 2900}{82.3} kWh = 1057 kWh $,
was bei einem 4-Personen Haushalt 4288 kWh entspricht. Grenzen der weiteren Nutzung werden insbesondere auch durch den Naturschutz gesetzt. Weiterhin ist zu prüfen, ob dieses Brennholz tatsächlich aus nachhaltiger Nutzung der heimischen Wälder stammt oder ob es importiert ist.

Fazit

Als Fazit ist festzuhalten, dass **das Ideal der Energiewende nur von einem Teil der Bevölkerung im eigenen Wohnbereich umgesetzt werden kann**, den wohlhabenden Eigentümern eines Einfamilienhauses. Zu dem Aufwand an Dach- und Bodenfläche kommt noch der finanzielle Aufwand für die beschriebenen Geräte. **Stand heute sind die Investitionskosten für ein solches autarkes System noch so teuer, dass in realistischen Amortisationszeiten von 10-20 Jahren allenfalls eine 75% Autarkie für die Stromgewinnung mit PV-Modulen und Batteriespeicher, und ggf. einer kleinen Wärmepumpe für die Warmwasserbereitung von März-Oktober mit Überschuss-PV-Strom sinnvoll ist.**
Dabei entfallen die horrenden Kosten für die Wasserstoff-Elektrolyse und Lagerung, sowie die teure und große Gartenflächen erfordernde Installation einer Heizungs-Wärmepumpe, dem nach aktueller Gesetzgebung künftig verpflichtenden Standard für neu installierte Heizsysteme.
Die Abschätzung über die Verwendung von Holz als – bereits üblichem – Energieträger zum Heizen weist einen Weg, die unbezahlbar teuren Investitionen in Wasserstoff als Energieträger für Privathaushalte zu umgehen. Allerdings sind die Begrenzungen zu berücksichtigen, die durch die nachhaltige Nutzung der Wälder gesetzt sind.

In diesen Betrachtungen wurde weder der Energieaufwand für den Mobilität noch der für die industrielle Herstellung aller Gebrauchsgüter berücksichtigt. Eine neuere Studie hat verschiedene Szenarien der Energieversorgung der Schweiz mit erneuerbaren Energien durchgerechnet, wo der Verkehr mitberücksichtigt wird.
Auch eine Kostenanalyse steht noch aus, da von einigen Produkten die Endkundenpreise (noch) nicht bekannt sind und zu erwarten ist, dass die – aktuell prohibitiven – Preise für Elektrolyseure und Brennstoffzellen deutlich fallen werden.