

Methode zur Abschätzung des Eigenverbrauchsanteils von Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung

Institut für Gebäude-Energieforschung Dr. Markus Lichtmeß (ingefo)

Markus Lichtmeß

Im Auftrag von

Ministerium für Energie und Raumentwicklung, Luxemburg

Version 1.2.1

Kurzbericht

19. April 2023

Redaktionelles Update 27.04.2023 | 07.12.2023

[Schlüsselwörter: Eigenverbrauch, Photovoltaik, Volleinspeisung, Stromspeicher]

Inhalt

1	Aufgabenstellung.....	3
1.1	Datengrundlage	4
1.2	Spezifische Kenndaten.....	7
2	Schätzung des Eigenverbrauchs.....	10
2.1	Schätzung des Eigenverbrauchs: Funktionale Methode	11
2.1.1	Anlagen ohne Stromspeicher	12
2.1.2	Anlagen mit Stromspeicher	13
2.1.3	Anmerkung zur funktionalen Methode	15
2.2	Schätzung des Eigenverbrauchs: Referenzkennwert-Methode.....	16
3	Diskussion der Ergebnisse	17
4	Literaturverzeichnis.....	19

1 Aufgabenstellung

In Luxemburg können am Gebäude installierte Photovoltaikanlagen mit Voll- oder Überschusseinspeisung umgesetzt werden. Diesbezüglich unterscheiden sich auch die vorgesehene Förderung und Einspeisevergütung [1] [2]. Bei der Volleinspeisung wird die Anlage parallel zu einem vorhandenen Gebäude installiert und unabhängig davon betrieben. Der insgesamt erzeugte Strom wird in das Netz eingespeist und mit einem festgelegten Einspeisetarif vergütet. Bei der Überschusseinspeisung wird die Anlage in Verbindung mit dem Gebäude betrieben. Die Anlage wird elektrisch vor dem Gebäudezähler eingebunden und der erzeugte Strom kann direkt genutzt werden. Übersteigt der erzeugte Strom den aktuellen Bedarf, wird der Überschuss in das Netz eingespeist und das wird über den Gebäudestromzähler erfasst. Der eingespeiste Strom wird vom Netzbetreiber abgenommen und vergütet. Welches Installationsmodell gewählt wird, hängt mit davon ab, welche Variante wirtschaftlicher ist und für manche Anlagenbetreiber ist die eigene Stromnutzung die Motivation. Bei der Volleinspeisung ist die Wirtschaftlichkeit einer Anlage sehr gut prognostizierbar, da die garantierte Vergütung über einen Zeitraum von 15 Jahren festgelegt wird. Bei Anlagen mit Überschusseinspeisung liegt ein Teil des finanziellen Risikos beim Anlagenbetreiber, da die Wirtschaftlichkeit u.a. vom Strombezugspreis und Eigenverbrauch (Nutzerverhalten) abhängen. Unter Berücksichtigung der Förderung, ist jedoch eine bessere Wirtschaftlichkeit möglich.

Derzeit ist bei jeder Installationsvariante ein Anlagenzähler für die Gesamtstromerzeugung vorgesehen. Ist die Anlage als Volleinspeiser ausgeführt, ist dieser Zähler auch relevant für die Vergütung. Im Fall der Überschusseinspeisung ist eine Kombination mit dem Gebäudezähler als Zweirichtungszähler erforderlich, da nur der überschüssige in das Stromnetz eingespeist und entsprechend vom Netzbetreiber vergütet wird. Der insgesamt erzeugte Strom wird für die Abrechnung nicht berücksichtigt. Im Zuge der Vereinfachung bei der Installation von Photovoltaikanlagen und bei den administrativen Prozessen, soll im Fall der Überschusseinspeisung der derzeit verpflichtende Zähler der Photovoltaikanlage entfallen. Darüber können die jährlichen Fixkosten für die Zählermiete reduziert werden, was insbesondere bei kleineren Anlagen (<30 kW_p) zu einer finanziellen Erleichterung führt. Abbildung 1 zeigt schematisch die vorgesehenen Installationsvarianten.

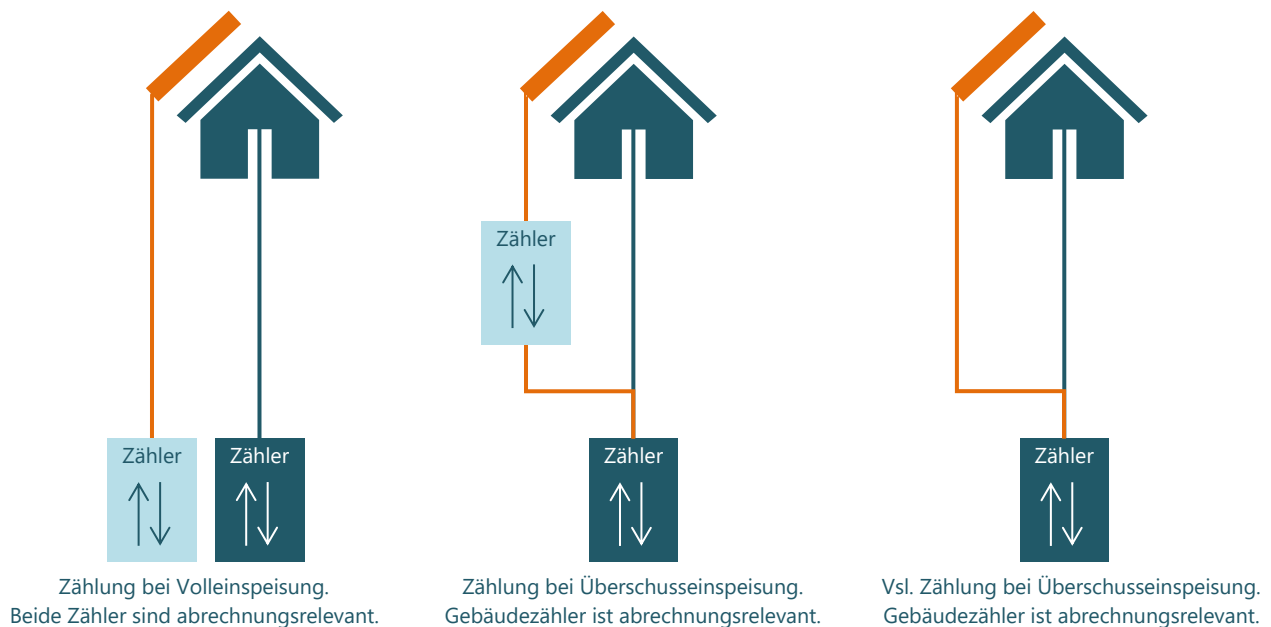


Abbildung 1: Vorgesehene Zähler für unterschiedliche Installationsvarianten als Voll- und Überschusseinspeisung. Im Fall der Überschusseinspeisung soll die Verpflichtung eines bisher erforderlichen Zählers für die Photovoltaikanlage entfallen, da dieser nicht abrechnungsrelevant ist.

In dem Zusammenhang geht jedoch die gemessene Information verloren, wieviel Energie die Anlage insgesamt erzeugt hat. Diese Information kann zum Beispiel erforderlich sein, um das Ziel der insgesamt erneuerbaren Energieerzeugung messtechnisch zu überwachen. Damit dieser Energieanteil dennoch erfasst werden kann, soll eine Methode beschrieben werden, mit welcher der Gesamtertrag der Anlagen mit Überschusseinspeisung abgeschätzt werden kann.

1.1 Datengrundlage

Stromerzeugungsanlagen werden in Luxemburg seit einiger Zeit in einem zentralen Datenbanksystem erfasst. Die Datenbank wird vom *Institut Luxembourgeois de Régulation (ILR)* betrieben und die Netzbetreiber sind für die Einträge verantwortlich. Diese Daten werden u. a. auch genutzt, um den insgesamt erzeugten erneuerbaren Strom zu quantifizieren, so wie es z. B. für Veröffentlichungen dazu erforderlich ist. Für die vorliegende Analyse wurde vom ILR¹ ein anonymisierter Datenbanksauszug bereitgestellt. Derzeit werden 10 verschiedene Anlagentypen zur Stromerzeugung erfasst (vgl. Tabelle 1). Zusätzlich zum Anlagentyp werden die Einträge nach verschiedenen Kriterien differenziert und in der zur Verfügung gestellten Datenbank sind die folgenden Einträge vorhanden.

Tabelle 1: In der zur Verfügung gestellten Datenbank vorhandene Merkmale.

Bereich	Charakterisierungsmerkmal
LAU 2	Parameter für die ungefähre geografische Lage der Anlage
Entreprise	Stromanbieter über den die Erfassung läuft
Année	Jahr der Inbetriebnahme
Leistung (kW)	Installierte Peak-Leistung der Anlage in kW _p
Erzeugung (kWh)	Im Jahr erzeugte elektrische Energie in kWh/a

Die Datenbank enthält 11.395² Einträge mit Installationsdatum und Anlagenleistung zum 12.04.2023 (vgl. Tabelle 2). Davon sind 11.116 Photovoltaikanlagen – das entspricht rund 98 % der erfassten Anlagen.

Tabelle 2: Anzahl der in der Datenbank erfassten Stromerzeugungsanlagen zum Stand 12.04.2023.

Anlagentyp		12.04.2023
Biomasse solide	Feste Biomasse	5
Bois de rebut	Altholz	3
Centrale à Biogaz	Biogasanlage	27
Centrale à gaz de décharge	Deponiegasanlage	1
Cogénération	Kraft-Wärme-Kopplung	141
Eolienne	Windkraftanlage	56
Epuration eaux usées	Abwasserbehandlung	7
Incinération Ordures	Müllverbrennung	1
Inconnu	Unbekannt	0
Installation hydroélectrique	Wasserkraftanlage	38
Installation photovoltaïque	Photovoltaikanlage	11.116
Summe		11.395

Die Altersstruktur der in Luxemburg installierten Photovoltaikanlagen wird in Abbildung 2 dargestellt. Die älteste in der Datenbank erfasste Anlage ist aus 1999. Größere Zubauraten sind während den Jahren 2003/2004, 2012 und rezent 2021/2022 zu verzeichnen.

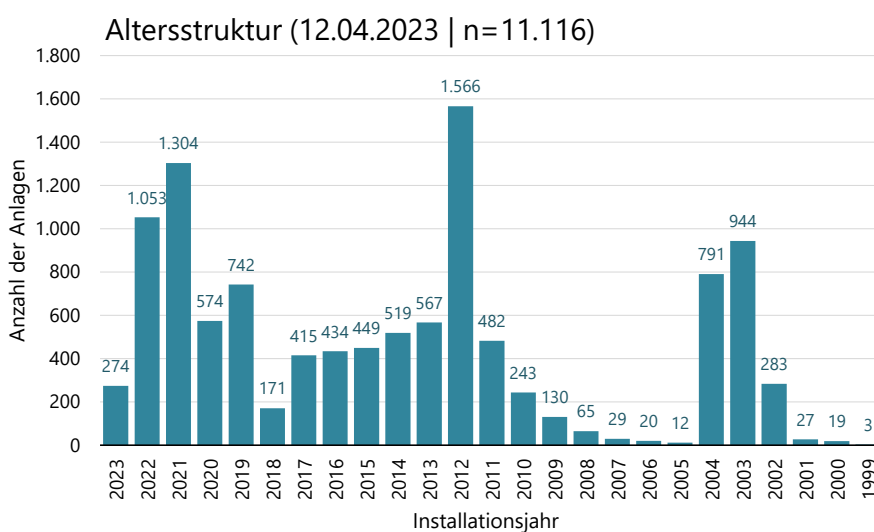


Abbildung 2: Altersstruktur in der Datenbank erfasster Photovoltaikanlagen.

¹ ILR | Frédéric-Michael FOETELER | Anonymisierter Datenauszug vom 12.04.2023
Datei: 20230411_Centrales_Production-2022-2021-2020-2019_Without-POD_2.xlsx

² Die Datenbank umfasst 11.432 Einträge. Für einen Eintrag ist kein Installationsjahr und für 36 Einträge keine Anlagenleistung angegeben und wurden nicht berücksichtigt.

Die jährliche Stromerzeugung wird für die Jahre 2019 bis 2022 angegeben. Für Anlagen aus 2023 liegen keine Einträge zur Energielieferung vor. In Tabelle 3 werden die Anlageneinträge für das jeweilige Jahr aufbereitet dargestellt. Zuvor werden die Einträge auf Konsistenz überprüft. Dabei werden für die Jahre 2019 bis 2022 nur diejenigen Einträge berücksichtigt, die den folgenden Kriterien entsprechen:

- Installationsdatum: Wert vorhanden und Wert > 0
- Leistung der Anlage: Wert vorhanden und Wert > 0
- Energieertrag im Jahr: Wert vorhanden und Wert > 0

Entsprechend den Plausibilitätskriterien ergibt sich die folgende Datenlage in Tabelle 3. Hierbei ist anzumerken, dass insbesondere die Daten zur Energielieferung ab dem Jahr 2021 für die Auswertungen relevant sind, da sich der sukzessive Einbau von Smart-Metern für jeden Anlagentyp niederschlägt. Für die Jahre 2019 und 2020 ist die Datengrundlage nicht vollständig. Da die Einträge über die Stromlieferung für die Netzbetreiber nicht verpflichtend zu liefern sind (im Gegensatz zu den Leistungsangaben) und die Einträge, insbesondere bei nicht-intelligenten Zählern, auch fehlerbehaftet sein können, ist das Bild auch für aktuellere Daten nicht vollständig.

Tabelle 3: Anzahl der in der Datenbank erfassten Stromerzeugungsanlagen nach Erfassungsjahr.

Anlagentyp		2019	2020	2021	2022
Biomasse solide	Feste Biomasse	3	3	3	5
Bois de rebut	Altholz	3	3	3	3
Centrale à Biogaz	Biogasanlage	22	21	17	16
Centrale à gaz de décharge	Deponiegasanlage	1	1	1	1
Cogénération	Kraft-Wärme-Kopplung	67	62	68	69
Eolienne	Windkraftanlage	35	37	37	40
Epuration eaux usées	Abwasserbehandlung	6	6	6	4
Incineration Ordures	Müllverbrennung	1	1	1	1
Inconnu	Unbekannt	0	0	0	0
Installation hydroélectrique	Wasserkraftanlage	21	20	25	23
Installation photovoltaïque	Photovoltaikanlage	2.067	2.288	9.118	10.210
Summe		2.226	2.442	9.279	10.372

Im Folgenden beziehen sich die Auswertungen nur auf Photovoltaikanlagen und auf ein jeweils abgeschlossenes Kalenderjahr (2019, 2020, 2021 und 2022). Für den aktuellen Stand wird das Jahr 2022 berücksichtigt. Bereits im Jahr 2023 erfolgter Zubau (Stand 12.04.2023: 274 Anlagen) wird hierbei nicht berücksichtigt.

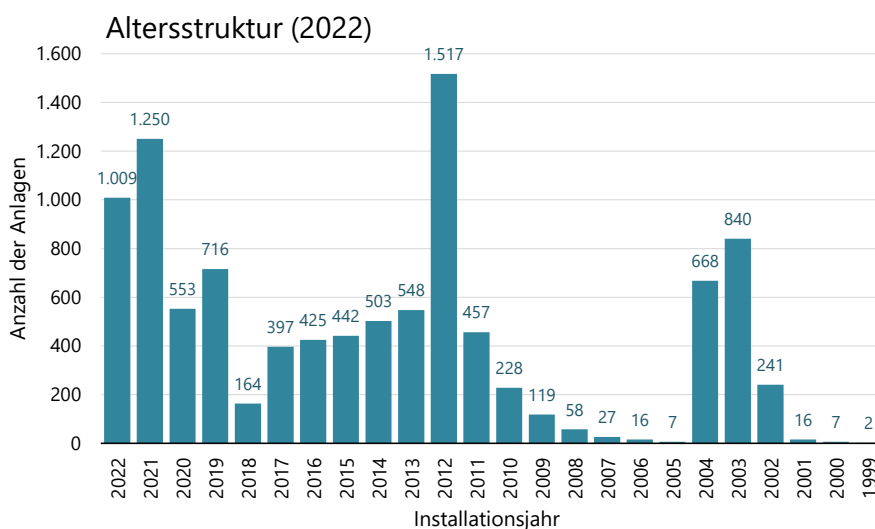


Abbildung 3: Altersstruktur in der Datenbank erfasster Photovoltaikanlagen im Jahr 2022.

Neben der Altersstruktur ist das realisierte Leistungsspektrum eine relevante Information. Darüber erkennt man zum Beispiel, in welchem Bereich vermehrt Anlagen installiert werden. Die in Abbildung 4 dargestellten Leistungsbereiche korrespondieren erwartungsgemäß auch mit der Fördersituation. So werden Anlagen bis zu einer Leistung von 30 kW_p gefördert und entsprechen viele Anlagen sind bis zu dieser Grenze realisiert.

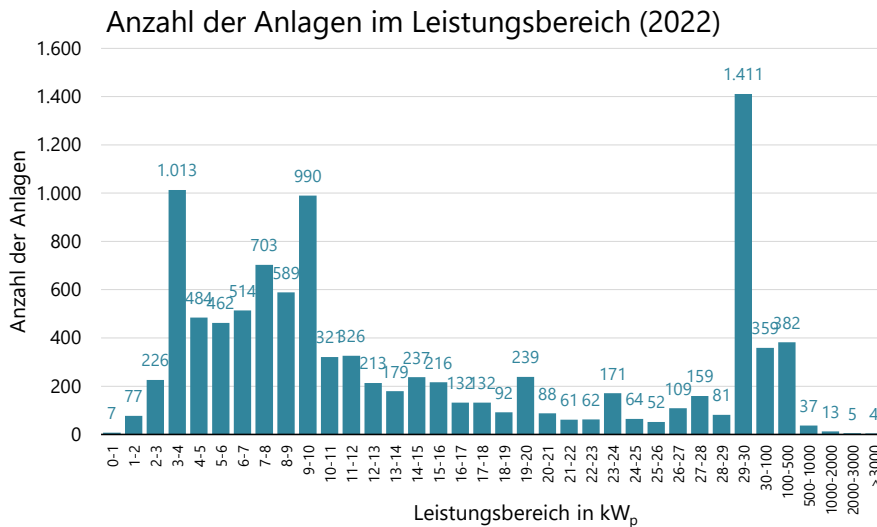


Abbildung 4: Leistungsbereiche in der Datenbank erfasster Photovoltaikanlagen im Jahr 2022.

Die Einspeisetarife sind in Luxemburg für verschiedene Leistungsbereiche unterschiedlich. Ordnet man die Anzahl der Anlagen zu den entsprechenden Leistungsbereichen, ergibt sich das folgende Bild über die Jahre 2019 bis 2022. Im Jahr 2022 machen Anlagen bis 30 kW_p etwa 93 % aller installierten Photovoltaikanlagen aus.

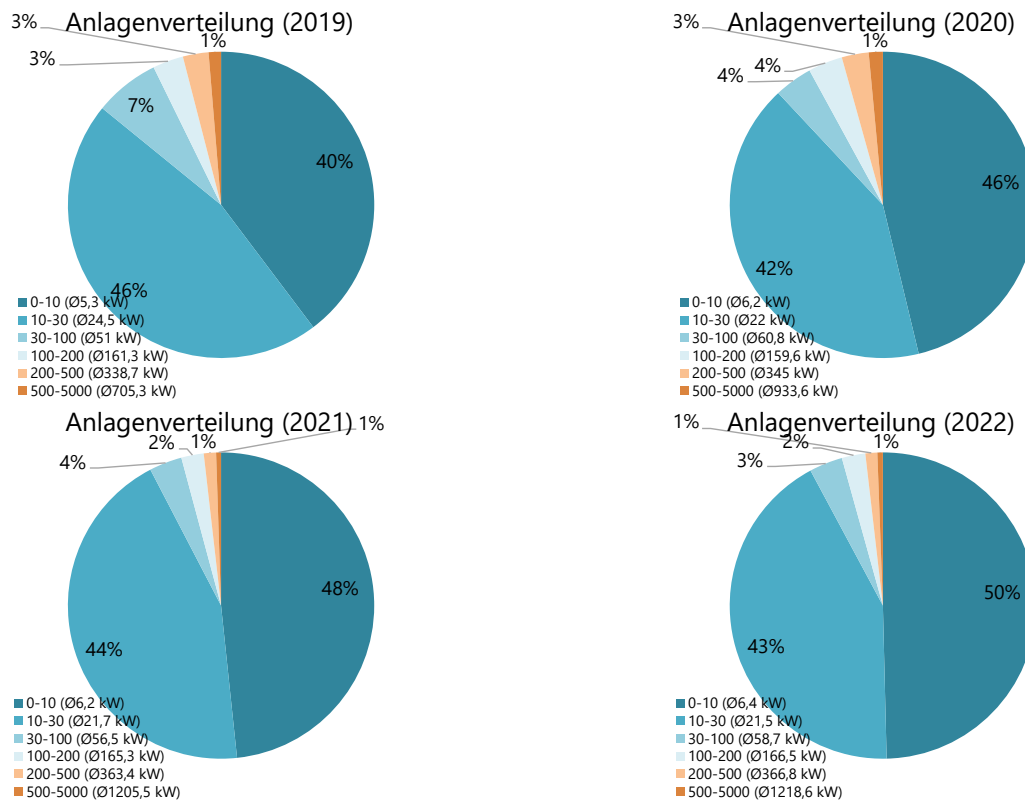


Abbildung 5: Prozentuale Häufigkeit installierter Photovoltaikanlage für verschiedene Leistungsbereiche.

Vergleicht man darüber hinaus die Stromerzeugung der Anlagen über die verschiedenen Leistungsbereiche, so erzeugten im Jahr 2022 rund 93 % der Anlagen (bis 30 kW_p) etwa 42 % des Gesamtstroms. Mit der Zunahme insbesondere von kleineren Anlagen bis 30 kW_p konnte deren Anteil von 29 % (2019) um 13 % gesteigert werden.

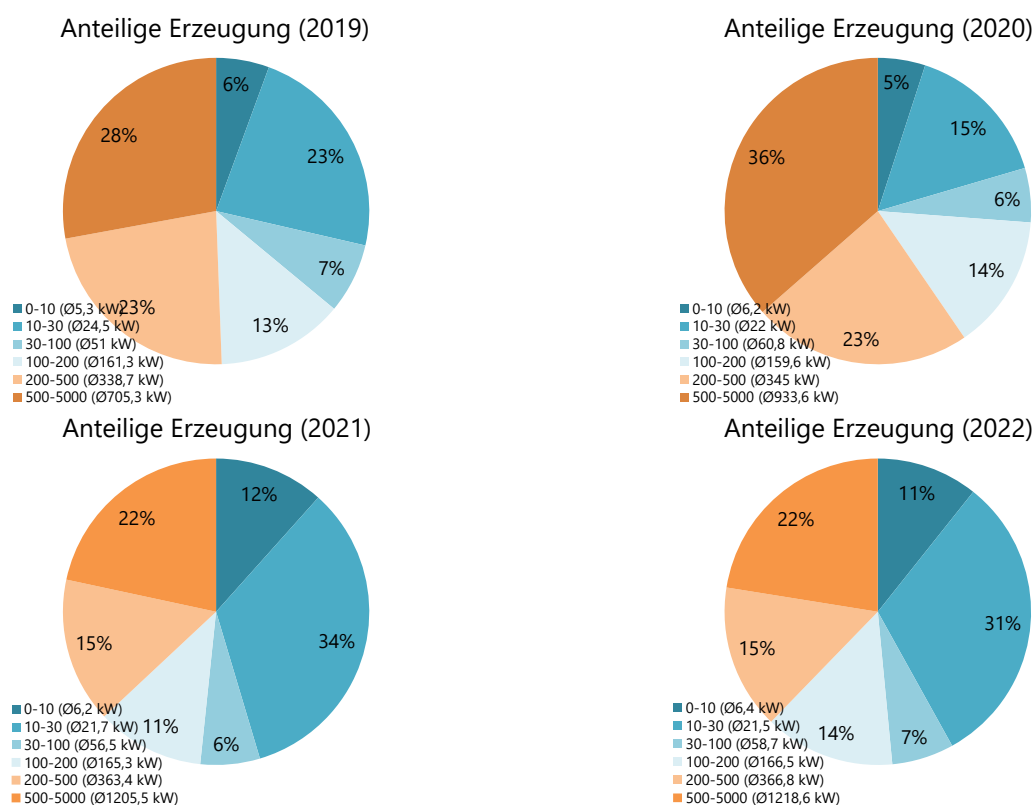


Abbildung 6: Anteilige Energieerzeugung aller Anlagen nach Leistungsbereich.

1.2 Spezifische Kenndaten

In der Datenbank liegen die Leistungsdaten P_{PV} der Anlagen (kW_p) und der insgesamt erzeugte Strom Q_{prod} (kWh/a) vor. Damit Anlagen unterschiedlicher Größe miteinander verglichen werden können, sind spezifische Kennzahlen hilfreich. Entsprechend wird für jede Anlage in der Datenbank mit Volleinspeisung eine leistungsspezifische Jahresstromerzeugung q_{prod} berechnet. Dabei wird der erzeugte Strom Q_{prod} (kWh/a) durch die installierte Leistung P_{PV} (kW_p) geteilt und es ergibt sich ein leistungsspezifischer Jahreswert für die Stromerzeugung (kWh/kW_p).

$$q_{prod} = \frac{Q_{prod}}{P_{PV}}$$

wobei

q_{prod}	$\text{kWh}/(\text{a} \cdot \text{kW}_p)$	Im Jahr spezifisch erzeugter Strom einer Photovoltaikanlage
Q_{prod}	kWh/a	Insgesamt im Jahr eingespeister Strom einer Photovoltaikanlage
P_{PV}	kW	Peak-Anlagenleistung einer Photovoltaikanlage

Für ein übliches Referenzjahr, und unter Annahme einer guten Anlageneffizienz bei optimaler und verschattungsfreier Ausrichtung, liegt dieser Wert in Luxemburg³ bei etwa 1.000 kWh/kW_p [3] [4]. Da nicht alle Anlagen optimal ausgerichtet sind, ist zu erwarten, dass der Mittelwert über alle Anlagen darunter liegt. Darüber hinaus unterliegt der Energieertrag jährlichen Schwankungen, die von den jeweiligen Einstrahlungsbedingungen und dem Wetterverlauf beeinflusst werden.

Mit *PVCalc* [3] wird der Energieertrag einer Photovoltaikanlage für verschiedene Ausrichtungen (Orientierung und Neigung) berechnet. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse. Für die geografische Lage Luxemburgs ist es üblich, Photovoltaikanlagen mit einer Neigung zwischen 10° und 45° zu installieren und sie in Richtung Ost-Süd-West auszurichten. Der spezifische Energieertrag variiert hierbei zwischen rund 800 und 1.000 kWh/kW_p . Die ungünstigste Orientierung ist Norden bei vertikaler Ausrichtung. Im Vergleich zur optimalen Ausrichtung ist der Jahresenergieertrag um 66% geringer.

³ Berechnet mit *PVCalc* für eine Anlage mit 30° Neigung und Südorientierung mit 997 kWh/kW_p und dem Luxemburger Wetterdatensatz.

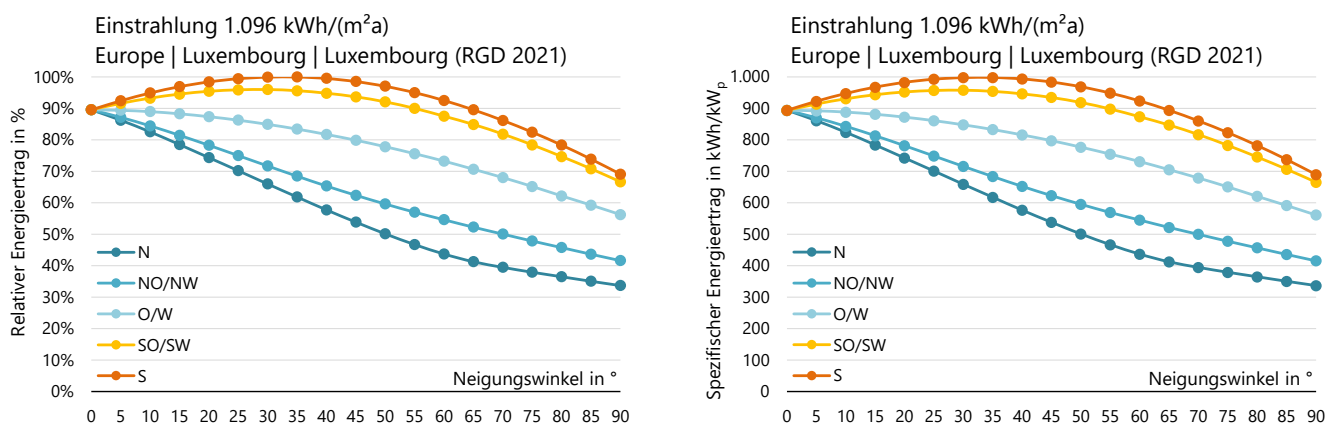


Abbildung 7: Mit PVCalc [3] simulierter Ertrag einer Photovoltaikanlage in Abhängigkeit von der Ausrichtung für das LU-Testreferenzjahr [4].

Da sich die klimatischen Einflüsse bereits in den gemessenen Jahreswerten für Anlagen mit Volleinspeisung niederschlägt, muss das nicht weiter berücksichtigt werden. Für die Bestimmung des Referenzwerts ist der Mittelwert über alle Anlagen zu bestimmen. Die in der Datenbank enthaltenen Anlagendaten werden entsprechend aufbereitet. In Abbildung 8 werden die spezifischen Anlagenerträge in Abhängigkeit des Anlagenalters für die Jahre 2019 bis 2022 dargestellt. Wie bereits zuvor erwähnt, sind die Datenbankeinträge für die Jahre 2019 und 2020 nicht vollständig und unter Umständen fehlerbehafteter als Einträge neueren Datums, da keine elektronische Übertragung über Smart-Metern erfolgt.

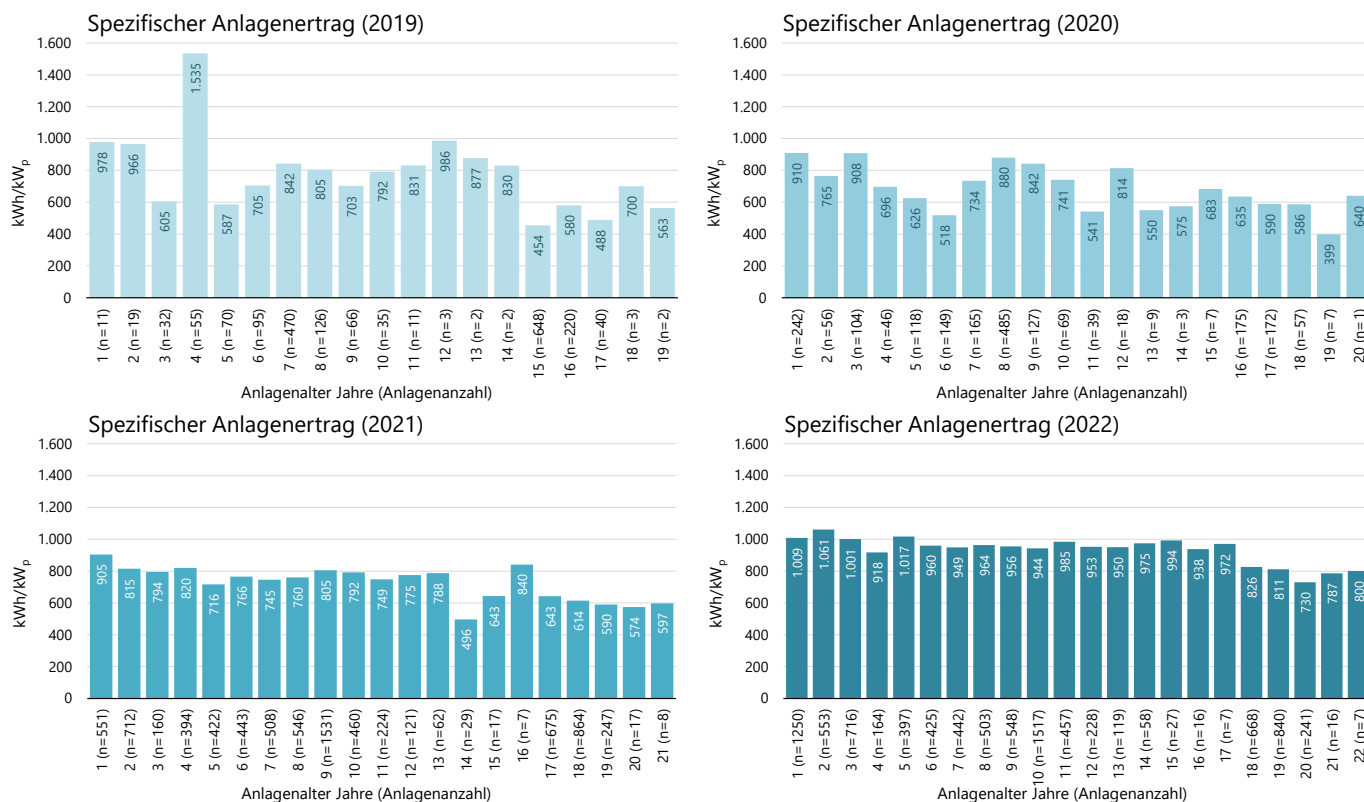


Abbildung 8: Berechnete spezifische Jahreserträge von Photovoltaikanlagen in Abhängigkeit des Anlagenalters im Betrachtungsjahr.

In folgender Übersicht sind die mittleren spezifischen Jahreserträge der Anlagen für verschiedene Leistungsbereiche und für das jeweilige Betrachtungsjahr 2019 bis 2022 dargestellt. Im Jahr 2022 liegt der mittlere Anlagenertrag über alle Anlagen bei 886 kWh/kW_p. Die Jahre davor lag der spezifische Anlagenertrag auf niedrigerem Niveau. Die Differenzen im Verlauf der spezifischen Kennzahlen zwischen den Leistungsbereichen für die Jahre 2019 bis 2021 lassen sich physikalisch-technisch nicht erklären.

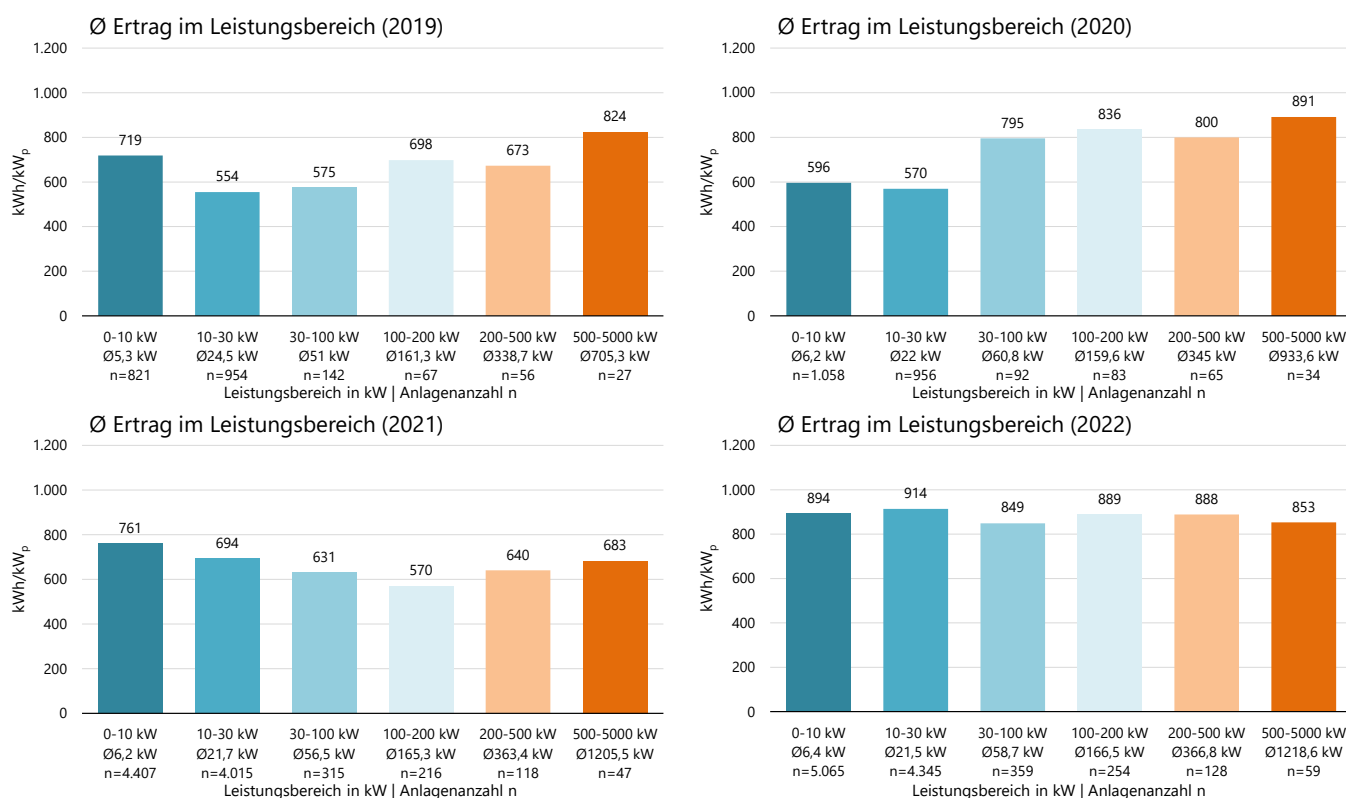


Abbildung 9: Berechnete spezifische Jahreserträge von Photovoltaikanlagen für verschiedene Leistungsbereiche im Betrachtungsjahr.

Zur besseren Beurteilung der Ergebnisse werden die Daten mit anderen Quellen verglichen. Das *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE* veröffentlicht auf Energy-Charts⁴ interaktive Grafiken und Diagramme zur Stromproduktion und Börsenstrompreisen in Deutschland ab 2011. Zum Vergleich werden für die Jahre 2019 bis 2022 die in Deutschland bereitgestellten Daten⁵ herangezogen. Dabei muss beachtet werden, dass diese Daten für Gesamtdeutschland zur Verfügung stehen und als geografische Situation daher nur eingeschränkt mit Luxemburg vergleichbar ist. Darüber hinaus wird eine seit 2010 installierte Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 5,28 kW_p in die Auswertung einbezogen, für die seit diesem Zeitraum hochaufgelöste Messdaten zur Verfügung stehen. Diese Anlage befindet sich geografisch nahe an Luxemburg (DE-54441) und liefert entsprechend vergleichbare Klimatrends, wobei diese Anlage optimal ausgerichtet ist (Süd bei $\angle 25^\circ$).

Die Ausprägung einer jeweiligen Kennwertreihe spiegelt im Wesentlichen die klimatischen Einflüsse der Jahre wider. Legt man das Jahr 2022 als Referenzwert zugrunde ($\triangleq 100\%$) kann die jährliche Schwankung als relativer Vergleichswert dargestellt werden, was einen Vergleich zwischen den drei Datenquellen erleichtert. Ausgehend vom Referenzjahr 2022 ergeben sich, im Vergleich zu den anderen Quellen, zum Teil Unterschiede. So war die Stromerzeugung im Jahr 2021 etwa 24 % geringer als im Jahr 2022. Bei den anderen beiden Datenquellen liegt die Differenz bei nur 5 % bis 8 %. Im Betrachtungsjahr 2021 ist der Verlauf der spezifischen Kennwerte über die Leistungsbereiche ebenfalls auffällig (vgl. Abbildung 9).

⁴ <https://www.energy-charts.info>, Abrufdatum 08.04.2023.

⁵ Ausgewertet werden: Energie > Balkendiagramm zur Stromerzeugung > Jahr > Solar, Wind für die Energiemengen und Leistung > Installierte Leistung > Jahr für die Energiemengen.

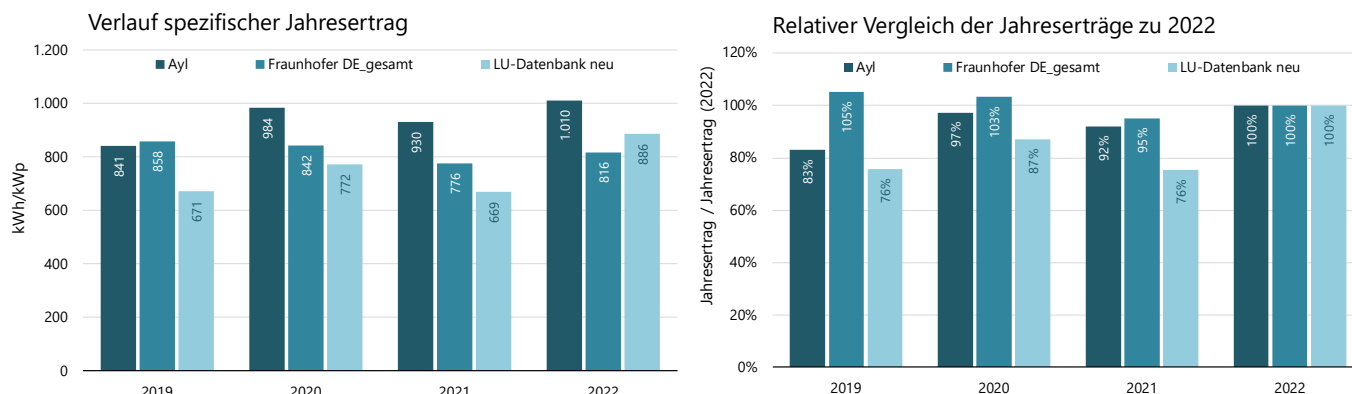


Abbildung 10: Vergleich spezifischer Jahreserträge von Photovoltaikanlagen unterschiedlicher Quellen.

Eine Rücksprache mit dem Betreiber⁶ der Datenbank (ILR) hat keine weiteren Erkenntnisse geliefert, mit denen diese Aspekte erklärt werden können. Da das Einpflegen der Erzeugungsdaten in das System von den Netzbetreibern erfolgt, sollte an dieser Stelle über eine verbesserte Qualitätskontrolle nachgedacht werden, damit die übermittelten Daten vor dem Eintragen in das System auf Plausibilität geprüft werden können.

Mit zunehmendem Alter der Photovoltaikanlagen nimmt aufgrund von Alterungsprozessen die Leistung der Photovoltaikmodule ab. Dieses Phänomen wird Modul-Degradation genannt und die Leistungsminderung beträgt etwa 0,5 % bis 1,0 % pro Jahr. Üblich werden nach 20 Jahren noch 80 % der Leistung garantiert. In Abbildung 10 wird der spezifische Jahresertrag der Anlagen über das Anlagenalter dargestellt. Das Jahr 2022 ist hier als Referenzjahr anzusehen, da hierfür die meisten Messwerte vorliegen. Die darüber erfasste Leistungsminderung beträgt im Mittel etwa 1,1 % pro Jahr und deckt sich mit anderen Untersuchungen dazu [5].

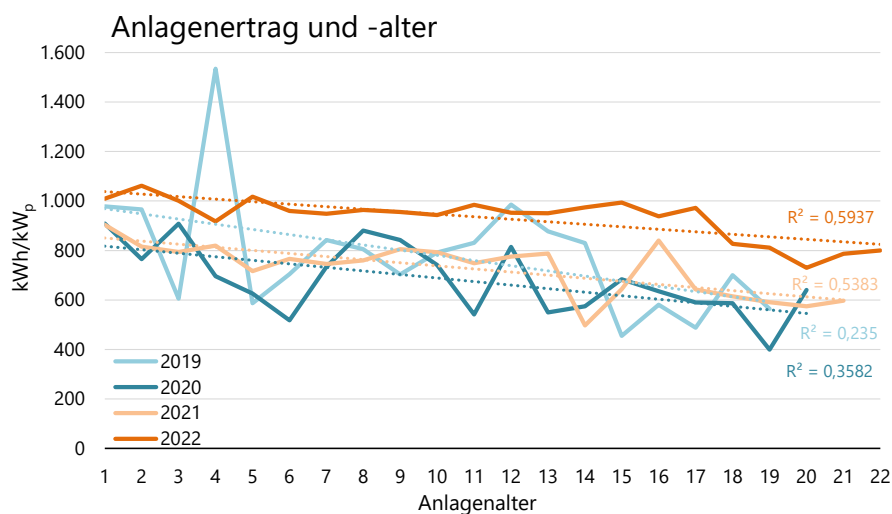


Abbildung 11: Vergleich spezifischer Jahreserträge von Photovoltaikanlagen in Abhängigkeit ihres Alters.

2 Schätzung des Eigenverbrauchs

Im Rahmen einer ministeriellen Arbeitsgruppe wurden verschiedene mögliche Ansätze zur Bestimmung des Eigenstromverbrauchs diskutiert. Zur Schätzung des Eigenverbrauchsanteils werden im Folgenden zwei Methoden skizziert, die in der Arbeitsgruppe zurückbehalten wurden. Mit der *Funktionalen Methode* kann der Eigenverbrauchsanteil über übliche Eigenverbrauchsanteile für Anlagen mit Überschusseinspeisung abgeschätzt werden. Bei der *Referenzkennwert-Methode* wird der Eigenverbrauchsanteil auf der Basis der Anlagen abgeleitet, die als Vollein- speiser ausgeführt sind.

⁶ ILR | Frédéric-Michael FOETELER | 13.04.2023 | per Video Call.

2.1 Schätzung des Eigenverbrauchs: Funktionale Methode

Liegen außer der eingespeisten Strommenge keine weiteren Informationen vor, so muss der Anteil des Eigenverbrauchs abgeschätzt werden. Dieser Anteil ist sehr individuell und hängt, neben Faktoren wie Ausrichtung, Orientierung, Wetterbedingungen und Anlageneffizienz, insbesondere von der Anlagengröße, dem Stromverbrauch und vom Nutzerverhalten ab. In [6] wurden diesbezüglich Simulationsrechnungen durchgeführt. Bei Einfamilienhäusern liegt das Verhältnis der installierten Leistung der Photovoltaikanlage P_{PV} und dem Jahresstrombedarf $Q_{el,need}$ üblich zwischen 0,5 und 2,0. Bei Anlagen ohne Stromspeicher beträgt der Eigenverbrauchsanteil für Einfamilienhäuser im Mittel etwa 25 %. Mit steigender Gebäudegröße ergeben sich bei Mehrfamilienhäusern in der Regel höhere Eigenverbrauchsanteile. Die auf dem Dach realisierbare Anlagenleistung nimmt, aufgrund der mit der Gebäudegröße in der Regel auch steigenden Geschossigkeit, nicht in gleichem Maße zu wie der Stromverbrauch. Der Eigenverbrauchsanteil für ein Mehrfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 1.100 m² und 4 Geschossen kann im Mittel mit etwa 40 % angesetzt werden.

Werden Stromspeicher eingesetzt oder vermehrt auch Elektroautos verwendet, so kann ein Teil des am Tag überschüssigen Stroms zwischengespeichert und während der Zeit ohne solare Einstrahlung (z.B. nachts) genutzt oder das Elektroauto geladen⁷ werden. Entsprechend verändern sich die möglichen Anteile der Eigenstromnutzung. Ebenfalls für Einfamilienhäuser können darüber typische Eigenverbrauchsanteile von zwischen 40 % und 70 % erreicht werden [6]. Abbildung 12 zeigt berechnete Eigenverbrauchsanteile für Wohngebäude.

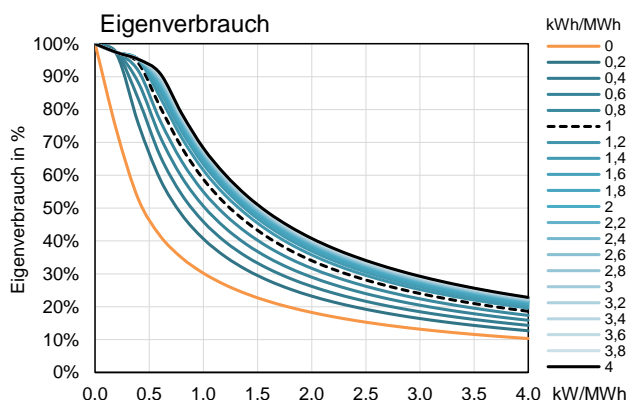


Abbildung 12: Berechnete normierte Eigenverbrauchsanteile für PV-Anlagen mit Speicher für das Lastprofil H0.1 aus [6]. Auf der Abszisse wird die Leistung der Photovoltaikanlage normiert auf 1 MWh Jahresstromverbrauch dargestellt. Dadurch können Gebäude mit unterschiedlich hohem Stromverbrauch miteinander verglichen werden. Die Kurven entsprechen einer normierten Speicherkapazität in kWh je 1 MWh Jahresstromverbrauch. Der Jahresertrag der Photovoltaikanlage liegt bei 997 kWh/kW_p.

Ausgehend von der Annahme, dass die Überschusseinspeisung überwiegend für kleinere Anlagen relevant ist, könnte für diese Anlagenvarianten ein typischer Eigenverbrauchsanteil abgeschätzt werden. In [6] wurde die mögliche Förderung von Stromspeichern in vorhandenen Fördersystem bewertet. Dahingehend wurden für Anlagen bis 30 kW_p auch Simulationsrechnungen durchgeführt, um unter anderem den möglichen Eigenverbrauch von Anlagen mit Überschusseinspeisung zu quantifizieren. Der selbst genutzte Anteil hängt insbesondere von folgenden Einflussgrößen ab.

- Größe der Photovoltaikanlage in kW
- Höhe des Gebäudestrombedarfs kWh/a
- Verlauf des Gebäudestrombedarf als Nutzungsart (Stromlastprofil)
- Größe des Stromspeichers in kWh

Als Grundlage für eine funktionale Schätzung des Eigenverbrauchs müssen diese Parameter bestmöglich einbezogen werden. Dazu müssen die durch den Netzbetreiber erfassten Informationen für die Datenbank erweitert werden, um die maßgeblichen Einflussparameter einzubeziehen. In den vorhandenen Daten fehlen derzeit allerdings wesentliche Informationen, um daraus sicher den Eigenverbrauch abschätzen zu können. Die Datensätze müssten zukünftig mindestens um die folgenden Parameter erweitert werden:

⁷ Im Fall von bidirektionalem Laden (Vehicle-to-Home (V2H)) kann das Elektroauto auch als Stromlieferant des Gebäudes dienen und ersetzt damit den Stromspeicher

- Art des Gebäudes: Ein- oder Mehrfamilienhaus, Nichtwohngebäude
- Größe des Gebäudes: Energiebezugsfläche aus dem Energiepass
- Stromspeicher: Größe eines eventuell vorhandenen Stromspeichers in kWh
- Stromverbrauch: Jahresstromverbrauch des Gebäudes

Im Folgenden wird ein Verfahren beschrieben, dass eine grobe Abschätzung des Eigenverbrauchsanteils auf der Grundlage der zuvor genannten Informationen ermöglicht – es bedingt aber zusätzliche Informationen.

2.1.1 Anlagen ohne Stromspeicher

Der realisierbare Eigenverbrauchsanteil hängt wesentlich vom Verhältnis des erzeugten Stroms und des Strombedarfs ab. Werden die Eigenverbrauchsanteile normiert, so kann die Bewertungsgröße Anlagenleistung zu Strombedarf herangezogen werden. Ist der Strombedarf des Gebäudes nicht bekannt, so muss dieser sinnvoll in Abhängigkeit des Gebäudetyps abgeschätzt werden. Für Wohngebäude sollte daher mindestens eine Unterteilung in Ein- und Mehrfamilienhäuser erfolgen. Bei den Mehrfamilienhäusern ist eine weitere Differenzierung hinsichtlich der Gebäudegröße sinnvoll. Da für das Gros der Gebäude ein Energiepass vorliegt, könnte hier die Energiebezugsfläche als Größenparameter herangezogen werden. Wenn dieser nicht vorliegt kann die Größe vereinfacht aus der Grundfläche des Gebäudes⁸ und der Anzahl der Geschosse abgeschätzt werden. Folgendes Bild zeigt berechnete Eigenverbrauchsanteile für unterschiedliche Stromlastprofile [6].

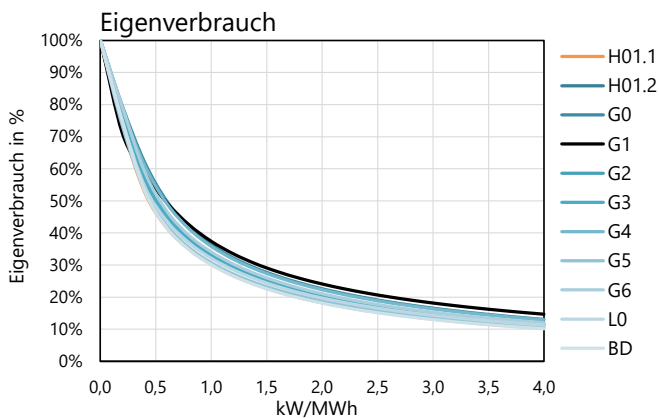


Abbildung 13: Berechnete normierte Eigenverbrauchsanteile für PV-Anlagen ohne Speicher für verschiedene Lastprofile aus [6]. Auf der Abszisse wird die Leistung der Photovoltaikanlage normiert auf 1 MWh Jahresstromverbrauch dargestellt. Dadurch können Gebäude mit unterschiedlich hohem Stromverbrauch miteinander verglichen werden. Der Jahresertrag der Photovoltaikanlage liegt bei 997 kWh/kW_p.

Vergleicht man die in Abbildung 13 dargestellten berechneten normierten Eigenverbrauchsanteile für Photovoltaikanlagen ohne Speicher, zeigt sich, dass diese vom Verlauf her ähnlich sind. Für diese einfache Analyse werden die Ergebnisse für die Stromlastprofile H01.1 und H01.2 für Wohnen zusammengefasst bewertet und mittels einer nichtlinearen Regressionsfunktion⁹ kann der Verlauf des Eigenverbrauchanteils für Anlagen ohne Stromspeicher gemäß der folgenden Beziehung abgeschätzt werden.

⁸ Entweder über Länge und Breite des Gebäudes oder über die offizielle nationale Plattform für geografische Daten und Dienstleistungen (www.geoportail.lu) auszumessen.

⁹ Nichtlineare Kleinste-Quadrate-Kurvenanpassung über: $y = 1 / [(1 / a) + b \cdot x]$

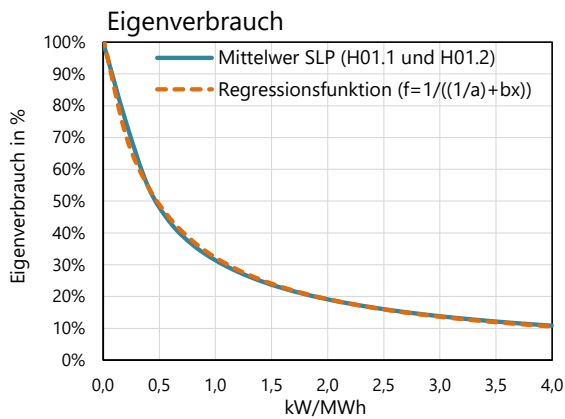


Abbildung 14: Mittelwert der berechneten Eigenverbrauchsanteile für PV-Anlagen ohne Speicher für die Lastprofile Haushalt (nur Wohnen und Wohnen mit geringfügig gewerblichem Bedarf) und Vergleich mit der Regressionsfunktion in der Form $y = 1 / [(1/a) + b \cdot x]$ mit den Parametern $a = 1,015$, $b = 2,111$ und x in kW/MWh.

Als Parameter werden $a = 1,015$ und $b = 2,111$ bestimmt. Als Bewertungsgröße dient die auf den Gebäudestrombedarf normierte Anlagenleistung in kW/MWh. Vereinfacht und parametergerundet kann die Funktion zur Schätzung des Eigenverbrauchsanteils $f_{self,use}$ wie folgt umgeschrieben werden, wobei P_{PV} der Anlagenleistung in kW und $Q_{el,need}$ dem Gebäudestrombedarf in MWh/a entspricht.

$$f_{self,use} = \left(1 + 2,1 \cdot \frac{P_{PV}}{Q_{el,need}} \right)^{-1}$$

wobei

$f_{self,use}$	%	Eigenverbrauchsanteil über alle Anlagen mit Überschusseinspeisung
P_{PV}	kW	Leistung der Photovoltaikanlage
$Q_{el,need}$	MWh	Stromverbrauch des Gebäudes

Der Gesamtertrag der Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung $Q_{prod,self}$ kann, unter der Voraussetzung dass der eingespeiste Strom $Q_{prod,self,feedin}$ als Messwert vorliegt und die Faktoren für die Eigenstromnutzung bestimmt werden können, wie folgt geschätzt werden.

$$Q_{prod,self} = \frac{Q_{prod,self,feedin}}{(1 - f_{self,use})}$$

wobei

$Q_{prod,self}$	kWh/a	Geschätzter insgesamt erzeugter Strom über alle Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung
$Q_{prod,self,feedin}$	kWh/kW _p	Insgesamt im Jahr eingespeister Strom aller Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung

Es bleibt allerdings zu beachten, dass die Verwendung eines gemittelten Stromlastprofils für die Wohnnutzung für alle Nutzungsarten fehlerbehaftet ist. Bei der Wohnnutzung ergeben sich, im Vergleich zur gewerblichen Nutzung, tendenziell etwas geringere Eigenverbrauchsanteile, da der Nutzung während den Abendstunden ausgedehnter ist. Hier kann es sinnvoll sein, für die Schätzung des Eigenverbrauchsanteils zwei unterschiedliche Funktionen anzugeben, mit denen der Eigenverbrauchsanteil für die beiden wesentlichen Nutzungsarten „Wohnen“ und „Gewerbe allgemein“¹⁰ differenziert bewertet werden kann.

2.1.2 Anlagen mit Stromspeicher

Um den Einfluss eines Stromspeichers mit einzubeziehen werden aus den Berechnungsergebnissen [6] Vereinfachungen und ein Schätzverfahren abgeleitet. Folgendes Bild zeigt, analog zur vorigen Analyse, berechnete Eigenverbrauchsanteile für Photovoltaikanlagen mit Stromspeicher. Wie die Größe der Photovoltaikanlage wird auch die Größe des Stromspeichers normiert angegeben.

¹⁰ In dem Fall lauten die Parameter $a = 0,997$ und $b = 1,652$ → Als Funktion vereinfacht und parametergerundet ist $f_{self,use} = (1 + 1,65 \cdot P_{PV} / Q_{el,need})^{-1}$

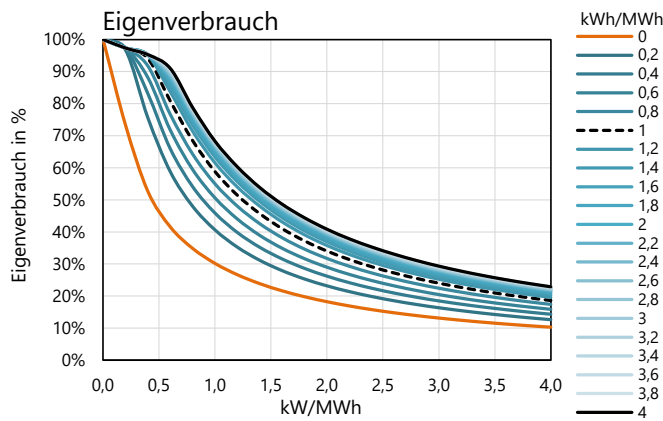


Abbildung 15: Berechnete normierte Eigenverbrauchsanteile für PV-Anlagen mit Speicher für das Lastprofil H0.1 aus [6]. Auf der Abszisse wird die Leistung der Photovoltaikanlage normiert auf 1 MWh Jahresstromverbrauch dargestellt. Dadurch können Gebäude mit unterschiedlich hohem Stromverbrauch miteinander verglichen werden. Die Kurven entsprechen einer normierten Speicherkapazität in kWh je 1 MWh Jahresstromverbrauch. Der Jahresertrag der Photovoltaikanlage liegt bei 997 kWh/kW_p.

Dafür werden die Berechnungsergebnisse aus [6] umgeformt und ein Zuwachsfaktor bestimmt, der auf den Eigenverbrauchsanteil für Anlagen ohne Stromspeicher appliziert werden kann. Der Faktor entspricht dem Verhältnis zwischen dem jeweiligen Eigenverbrauchsanteil mit Stromspeicher zu dem ohne Stromspeicher. Abbildung 16 zeigt die sich ergebenden Verhältnisse für unterschiedliche Speicherkonfigurationen.

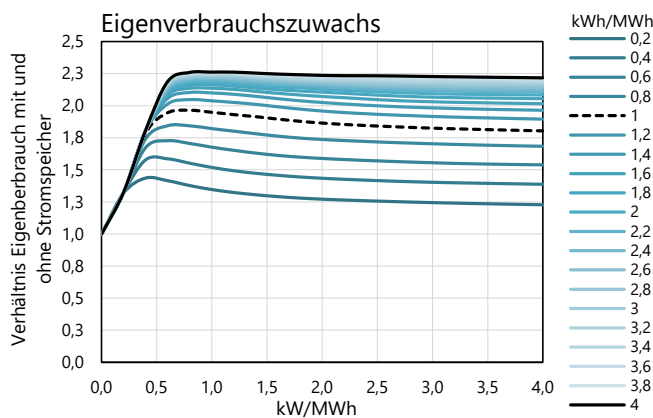


Abbildung 16: Dargestellt wird das Verhältnis des Eigenverbrauchsanteils mit Stromspeicher zum Eigenverbrauchsanteil ohne Stromspeicher für verschiedene Speicherkonfigurationen.

Durch eine Mittelung der berechneten Faktoren über alle Größen der Photovoltaikanlage kann für jede Speicherkonfiguration ein linearisierter Faktor bestimmt werden. Folgende Grafik zeigt den mittleren linearisierten Zuwachsfaktor für alle Größen von Photovoltaikanlagen bezogen auf die normierte Stromspeichergöße in kWh je 1.000 kWh Gebäudestromverbrauch. Über eine entsprechende Regressionsfunktion¹¹ kann der Zuwachsfaktor mittels einer Gleichung bestimmt werden.

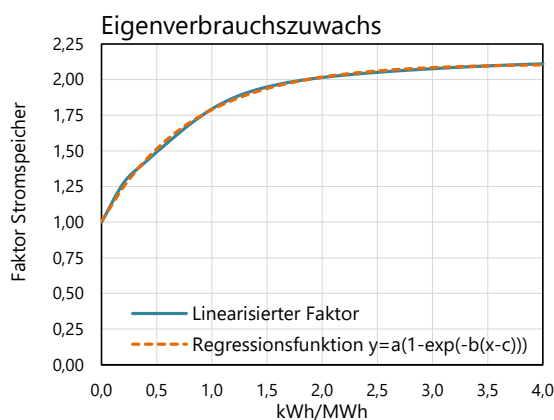


Abbildung 17: Faktor Stromspeicher zur Berücksichtigung des Einflusses eines Stromspeichers auf den Eigenverbrauchsanteil einer Photovoltaikanlage. Linearisierter Mittelwert berechneter Faktoren und Vergleich mit der Regressionsfunktion in der Form $y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot (x - c)))$ mit den Parametern $a = 2,11$, $b = 1,23$, $c = -0,53$ und x in kWh/MWh für das gemittelte Lastprofil Haushalt.¹²

¹¹ Nichtlineare Kleinste-Quadrate-Kurvenanpassung über: $y = a \cdot [1 - \exp(-b \cdot (x - c))]$

¹² Für das gemittelte Stromlastprofil Gewerbe sind die Parameter $a = 1,59$, $b = 1,70$, $c = -0,63$.

Um den Eigenverbrauchsanteil einer Photovoltaikanlage mit Stromspeicher $f_{self,use,bat}$ grob abzuschätzen ist der zuvor ermittelte Eigenverbrauchsanteil $f_{self,use}$ für Anlagen ohne Stromspeicher mit dem Faktor zur Berücksichtigung des Eigenverbrauchs über einen Stromspeichers f_{bat} zu multiplizieren.

$$f_{self,use,bat} = f_{self,use} \cdot f_{bat} \quad | \quad \text{mit } f_{self,use,bat} \text{ max} = 1$$

$$f_{bat} = 2,11 \cdot \left(1 - \exp \left(-1,23 \cdot \left(\frac{Q_{bat}}{Q_{el,need}} + 0,53 \right) \right) \right)$$

Der Gesamtertrag einer Photovoltaikanlage mit Überschusseinspeisung $Q_{prod,self}$ kann, unter der Voraussetzung dass der eingespeiste Strom $Q_{prod,self,feedin}$ als Messwert vorliegt und die Faktoren für die Eigenstromnutzung bestimmt werden können, wie folgt geschätzt werden.

$$Q_{prod,self} = \frac{Q_{prod,self,feedin}}{(1 - f_{self,use,bat})}$$

wobei

$f_{self,use,bat}$	%	Eigenverbrauchsanteil über alle Anlagen mit Überschusseinspeisung
f_{bat}	-	Faktor zur Berücksichtigung des Eigenverbrauchsanteils über Stromspeicher
Q_{bat}	kWh	Speicherkapazität des Stromspeichers

Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die Berechnungsergebnisse aus [6] im Vergleich zur Schätzung des Eigenverbrauchsanteils für Photovoltaikanlagen mit Stromspeicher für das Lastprofil der Wohnnutzung (H0.1). Vergleicht man das Ergebnis der Schätzfunktion mit dem Ergebnis der Berechnungen, so kann der Verlauf des Eigenverbrauchs in der Tendenz nachgebildet werden.

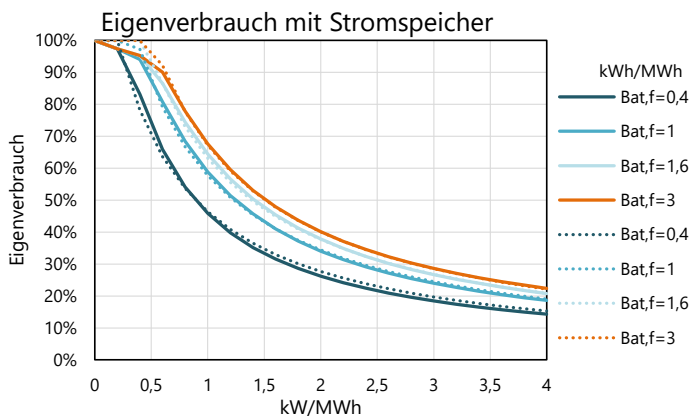


Abbildung 18: Berechnete normierte Eigenverbrauchsanteile für PV-Anlagen mit Speicher für das Lastprofil H0.1 aus [6] und Vergleich mit dem über den Speicherfaktor ermitteltem Eigenverbrauchsanteil als Verlauf mit Bezug auf die Größe der Photovoltaikanlage für 4 unterschiedliche Speicherauslegungen (0,4, 1,0, 1,6, und 3 kWh/MWh).

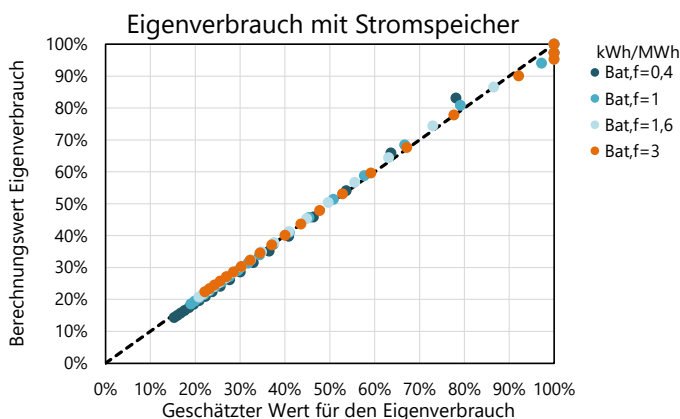


Abbildung 19: Berechnete normierte Eigenverbrauchsanteile für PV-Anlagen mit Speicher für das Lastprofil H0.1 aus [6] und Vergleich mit dem über den Speicherfaktor ermitteltem Eigenverbrauchsanteil als direkter Wertevergleich für 4 unterschiedliche Speicherauslegungen (0,4, 1,0, 1,6, und 3 kWh/MWh).

2.1.3 Anmerkung zur funktionalen Methode

Eine Schätzung des Eigenverbrauchsanteils auf der Basis üblicher Werte erscheint aufgrund der vielen Einflussfaktoren und der aktuellen Datenlage nicht praktikabel für eine Umsetzung einer Anrechnungsmethodik. Um diese Methodik anwenden zu können, müssen die erfassten Anlagendaten um zusätzliche Informationen erweitert

werden. Sollten die Datenbankeinträge über die Gesamtstromerzeugung unzureichend sein, kann alternativ dazu über einen aufgezeichneten Jahreswetterdatensatz ein theoretischer spezifischer Ertragswert berechnet und als Vergleichsgröße herangezogen werden. Das Verfahren kann zum Beispiel auch zur Plausibilisierung anderweitig erfasster Daten genutzt werden.

2.2 Schätzung des Eigenverbrauchs: Referenzkennwert-Methode

Die Schätzung des Eigenverbrauchs von Anlagen mit Überschusseinspeisung kann vereinfacht auf einer Differenzrechnung zu Anlagen erfolgen, die als Volleinspeiser installiert sind. Bei diesem Bilanzierungsansatz wird der Eigenverbrauchsanteil zur Gesamtstromerzeugung basierend auf der gemessenen Gesamterzeugung der Anlagen mit Volleinspeisung aus der Anlagendatenbank abgeschätzt. Der insgesamt erzeugte Strom für Anlagen mit Überschusseinspeisung berechnet sich aus der gemessenen Stromerzeugung aller Anlagen mit Volleinspeisung, der gemessenen Strommenge aller Anlagen mit Überschusseinspeisung und einer geschätzten Stromerzeugung, die dem Eigenverbrauch gleichkommt. Der Eigenverbrauch wird dabei basierend auf der Stromerzeugung über alle Anlagen mit Volleinspeisung abgeschätzt. Diese Anlagen repräsentieren den Referenz- oder Vergleichswert. Diesbezüglich wird von der Annahme gebraucht gemacht, dass sich im Mittel über alle betrachteten Anlagen, deren Energieeffizienzunterschiede sowie die Einflüsse wie Orientierung und Neigung ausgleichen und dass es keine systemischen Unterschiede zwischen Anlagen mit Voll- und Überschusseinspeisung gibt. Beide Installationsarten sind im Mittel gleich effizient und werden in ähnlicher Ausrichtung installiert. Der insgesamt im Jahr spezifisch erzeugte Strom über alle Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung $q_{prod,self}$ kann darüber abgeschätzt werden. Er setzt sich aus dem gemessenen Teil der Stromeinspeisung $q_{prod,feedin}$ und einem geschätzten Teil zum Eigenverbrauch $q_{prod,self,use}$ zusammen. Die aufgeführten Variablen beziehen sich auf die in der Datenbank vorkommenden Anlagentypen und kann auf die gesamte Datenbank mit allen Erzeugertypen angewendet werden. Maßgebend für diese Berechnung ist, dass die Anlagen mit Überschusseinspeisung in der Datenbank entsprechend gekennzeichnet sind, sodass diese Installationsart von Anlagen mit Volleinspeisung differenziert werden kann. Das kann über einen Anlagentypfaktor $f_{prod,pv}$ erfolgen, der für Anlagen mit Volleinspeisung 1 und für Anlagen mit Überschusseinspeisung 0 beträgt. Dieser Wert steht nach Aussage des ILR¹³ bereits in ähnlicher Form in der Datenbank zur Verfügung. Der insgesamt erzeugte Strom für Anlagen mit Überschusseinspeisung $q_{prod,self}$ berechnet sich aus dem gemessenen eingespeisten Strom $q_{prod,self,feedin}$ für diesen Anlagentyp und dem geschätzten Anteil $q_{prod,self,use}$, der in den Gebäuden selbst verbraucht wird.

$$q_{prod,self} = q_{prod,self,feedin} + q_{prod,self,use}$$

wobei

$q_{prod,self}$	kWh/kW _p	Geschätzter im Jahr insgesamt spezifisch erzeugter Strom für Anlagen mit Überschusseinspeisung
$q_{prod,self,feedin}$	kWh/kW _p	Insgesamt im Jahr spezifisch eingespeister Strom aller Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung
$q_{prod,self,use}$	kWh/kW _p	Geschätzter im Jahr spezifisch erzeugter Strom für Anlagen mit Überschusseinspeisung, der selbst verbraucht wird

Zur Abschätzung des selbst verbrauchten Stroms $q_{prod,self,use}$ wird von der Annahme gebraucht gemacht, dass sich der spezifische Gesamtertrag von Anlagen mit Voll- und Überschusseinspeisung nicht grundsätzlich unterscheiden. Bei Anlagen mit Volleinspeisung liegt der insgesamt spezifisch erzeugte Strom $q_{prod,feedin}$ direkt über Messwerte vor. Davon kann der gemessene insgesamt spezifisch eingespeiste Strom der Anlagen mit Überschusseinspeisung $q_{prod,self,feedin}$ abgezogen und damit der spezifische Anteil des selbst verbrauchten Stroms $q_{prod,self,use}$ abgeschätzt werden.

$$q_{prod,self,use} = q_{prod,feedin} - q_{prod,self,feedin}$$

wobei

$q_{prod,feedin}$	kWh/kW _p	Insgesamt im Jahr spezifisch eingespeister Strom aller Photovoltaikanlagen mit Volleinspeisung
-------------------	---------------------	--

Der im Mittel spezifisch eingespeiste Strom $q_{prod,feedin}$ aller Anlagen mit Volleinspeisung berechnet sich gemäß folgender Beziehung und entspricht dem gesamt erzeugten Strom.

¹³ Das Kriterium heißt „autoconsommation“. Darüber wird erfasst, ob die Anlage mit Eigenverbrauch oder als Volleinspeiser installiert ist.

$$q_{prod,feedin} = \frac{\sum_i q_{prod,i} \cdot f_{pv,typ,i} \cdot f_{prod,pv,i}}{\sum_i f_{pv,typ,i} \cdot f_{prod,pv,i}}$$

wobei

$q_{prod,i}$	kWh/kW _p	Insgesamt im Jahr spezifisch eingespeister Strom einer Photovoltaikanlage
$f_{prod,pv}$	0 oder 1	Variable für den Erzeugertyp: Photovoltaikanlage = 1, sonstige Stromerzeugung = 0
$f_{pv,typ}$	0 oder 1	Variable für den Anlagentyp: Volleinspeisung = 1, Überschusseinspeisung = 0
i	-	Zählvariable i für erfasste Anlagen

Der im Mittel spezifisch eingespeiste Strom $q_{prod,self,feedin}$ aller Anlagen mit Überschusseinspeisung berechnet sich nach folgender Beziehung und entspricht dem Anteil der Gesamterzeugung der nicht in den Gebäuden direkt verbraucht wird.

$$q_{prod,self,feedin} = \frac{\sum_i q_{prod,i} \cdot (1 - f_{pv,typ,i}) \cdot f_{prod,pv,i}}{\sum_i (1 - f_{pv,typ,i}) \cdot f_{prod,pv,i}}$$

Der Eigenverbrauchsanteil $f_{self,use}$ kann wie folgt berechnet werden und kann als Plausibilisierungsgröße herangezogen werden. Werte für den Erwartungsbereich sind im vorigen Abschnitt oder in [6] angegeben.

$$f_{self,use} = \frac{q_{prod,self,use}}{q_{prod,self}}$$

wobei

$f_{self,use}$	%	Eigenverbrauchsanteil über alle Anlagen mit Überschusseinspeisung
----------------	---	---

Der insgesamt im Jahr erzeugte Strom über alle Photovoltaikanlagen $Q_{prod,tot}$ berechnet sich aus dem gemessenen Strom der Photovoltaikanlagen mit Volleinspeisung $Q_{prod,feedin}$, der direkt in der Datenbank zur Verfügung steht, und dem geschätzten erzeugten Strom der Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung $Q_{prod,self}$.

$$Q_{prod,tot} = Q_{prod,feedin} + Q_{prod,self}$$

wobei

$Q_{prod,tot}$	kWh/a	Insgesamt erzeugter Strom über alle Photovoltaikanlagen
$Q_{prod,feedin}$	kWh/a	Insgesamt erzeugter Strom über alle Photovoltaikanlagen mit Volleinspeisung
$Q_{prod,self}$	kWh/a	Geschätzter insgesamt erzeugter Strom über alle Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung

Da der geschätzte erzeugte Strom für Anlagen mit Überschusseinspeisung $q_{prod,self}$ als mittlerer spezifischer Wert über alle Anlagen ermittelt wird, ist dieser mit der insgesamt installierten Anlagenleistung $P_{PV,self}$ des Typs zu verrechnen.

$$Q_{prod,self} = P_{PV,self} \cdot q_{prod,self}$$

wobei

$P_{PV,self}$	kW	Insgesamt installierte Anlagenleistung aller Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung
---------------	----	--

Die insgesamt installierte Anlagenleistung für Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung $P_{PV,self}$ kann wie folgt aus den Informationen der Datenbank berechnet werden.

$$P_{PV,self} = \sum_i P_{PV,i} \cdot (1 - f_{pv,typ,i}) \cdot f_{prod,pv,i}$$

wobei

$P_{PV,i}$	kW	Installierte Anlagenleistung einer Photovoltaikanlage
------------	----	---

3 Diskussion der Ergebnisse

Für Anlagen mit Überschusseinspeisung soll zukünftig der verpflichtende Zähler entfallen, mit dem der Gesamtertrag der Anlage gemessen wird. Erfasst wird zukünftig nur noch der in das Netz eingespeiste Strom und für die Ermittlung der insgesamt in Luxemburg erzeugte Strom aus Photovoltaikanlagen fehlt der Betrag, der im Gebäude selbst verbraucht wird. Das *Institut Luxembourgeois de Régulation* (ILR) betreibt eine Datenbank mit installierten Stromerzeugungsanlagen in Luxemburg. Die Netzbetreiber sind für die Dateneinträge verantwortlich. Diese

Datengrundlage wird derzeit auch genutzt, um den insgesamt erzeugten Strom zu quantifizieren. Unter Einbeziehung dieser Datenbank, werden zwei Verfahren skizziert, mit denen der Eigenverbrauchsanteil für Photovoltaikanlagen mit Überschusseinspeisung abgeschätzt werden kann. Die beiden Verfahren wurden im Rahmen der ministeriellen Arbeitsgruppe grundsätzlich diskutiert.

Mit der *funktionalen Methode* kann der Eigenverbrauchsanteil für übliche Anlagen in der Tendenz geschätzt werden. Allerdings sind dafür weitere Informationen in der Datengrundlage erforderlich, die derzeit nicht vorliegen. Diese Methode ist derzeit daher weniger geeignet. Über die *Referenzkennwert-Methode* kann der Eigenverbrauch über eine Vergleichsrechnung mit Anlagen erfolgen, die als Volleinspeiser realisiert sind. Mit dem Wegfall des Anlagenzählers entsprechen die in der Datenbank erfassten Daten für Anlagen mit Überschusseinspeisung dem überschüssig in das Netz eingespeisten Strom. Bei Anlagen mit Volleinspeisung ergibt sich dahingehend keine Änderung und die übermittelten Daten entsprechen dem Gesamtertrag. Auf der Basis der Anlagen mit Volleinspeisung kann ein mittlerer leistungsspezifischer Stromertrag für das Betrachtungsjahr berechnet werden, der als Referenz- und Vergleichsgröße für Anlagen mit Überschusseinspeisung dient. Die Schätzung des Eigenverbrauchs erfolgt in dem Fall über eine Differenzrechnung. Dieses Verfahren beruht ausschließlich auf Messwerten und berücksichtigt damit auch die klimatischen Schwankungen bei der jährlichen Energieerzeugung.

Allerdings muss nach Sichtung der vorhandenen Daten auch konstatiert werden, dass diese, insbesondere für die Jahre vor 2022, Inkonsistenzen aufweisen und sich in der Auswertung zum Teil nicht erklärbare Tendenzen zeigen. Da diese Daten derzeit bereits genutzt werden, um die erneuerbare Stromerzeugung landesweit zu erfassen, kann es sinnvoll sein, bei der Datenerfassung und -sammlung eine weitere Qualitätssicherung vorzusehen, damit die Daten bereits beim Eintrag in die Datenbank plausibilisiert werden. In Luxemburg soll zukünftig ein neues Energieregister entstehen. Insbesondere in diesem Projekt wäre ein intensiver Blick dahingehend sinnvoll.

Für den Fall, dass Anlagen mit Volleinspeisung zukünftig weniger oft realisiert werden, kann die Datengrundlage unter Umständen nicht mehr ausreichend sein, um über diese Beziehung den selbst verbrauchten Strom hinreichend genau zu bestimmen. Das ist im zeitlichen Verlauf insbesondere dann der Fall, wenn neue Anlagen in kleineren Leistungsbereichen ($<30 \text{ kW}_p$) überwiegend als Überschusseinspeisung realisiert werden und lediglich ältere und gegebenenfalls im Vergleich ineffizientere Anlagen als Referenzwert zur Verfügung stehen. Deshalb sollten für die Referenzwertbildung weitgehend Anlagen neueren Datums herangezogen werden, wenn sich größere Diskrepanzen in der Altersstruktur der erfassten Anlagen ergeben.

Darüber hinaus kann es sinnvoll sein, eine vergleichende Messung der solaren Einstrahlungsintensität für Luxemburg als Plausibilitätsparameter einzubeziehen. Über die Wetterstation¹⁴ am Flughafen Findel werden seit 1947 meteorologische Daten erfasst. Hinsichtlich solarer Parameter wird die Sonnenscheindauer über ein optisches Prinzip gemessen. Die Sonnenscheindauer ist zur Bestimmung eines Referenzwertes nicht optimal, da im Wesentlichen eine zeitliche Komponente berücksichtigt wird. Besser eignet sich die gemessene Globalstrahlung als Referenzwert, die nach Kenntnis des Autors für Luxemburg nicht gemessen wird. Alternativ kann auf Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in näherer Umgebung (z.B. Trier) zurückgegriffen werden.

Im Rahmen dieser Untersuchung konnte nicht abgeklärt werden, wie derzeit die Daten zur Gesamtstromerzeugung statistisch erfasst werden. Wenn der Ansatz ist, die erfassten Anlagenleistungen als Bewertungsgrundlage heranzuziehen und mit einem üblichen spezifischen Ertragswert¹⁵ $q_{PV,ref}$ die Stromerzeugung zu prognostizieren, dann könnte auch dieser Ansatz weiterhin Anwendung finden, sofern es keine reglementarischen Gründe gibt, dass die Informationen auf Messwerten beruhen sollen. Hierbei kann es allerdings erforderlich sein, die klimatischen Schwankungen mit zu berücksichtigen. Ausgehend von einem Referenzwert für die Globalstrahlung $G_{h,ref}$ gemäß

¹⁴ Internetseite: www.meteolux.lu | veröffentlicht von der „Administration de la navigation aérienne (ANA)“, WMO-Stationenkennung: 06590. Die Sonnenscheindauer wird als meteorologischer Parameter erfasst.

¹⁵ $q_{PV,Ref} = 997 \text{ kWh/kW}_p$ für eine Anlage mit optimaler und verschattungsfreier Ausrichtung. Da nicht alle Anlagen diese Kriterien erfüllen sollte dieser Wert über einen Abminderungsfaktor angepasst werden, der zum Beispiel mit 0,9 angesetzt werden kann $\rightarrow q_{PV,Ref} = 897 \text{ kWh/kW}_p$.

dem Luxemburger Testreferenzjahr¹⁶ [4] kann, analog zur Klimakorrektur f_{klima} bei der Erfassung von Energieverbräuchen im Energiepass [7], der klimatische Einfluss jährlich modifiziert werden. Dafür ist jedoch der Wert der jährlich gemessenen Globalstrahlung $G_{h,jahr}$ für Luxemburg erforderlich¹⁷. Der Einstrahlungsfaktor f_{sol} kann als Verhältniswert der gemessenen jährlichen Globalstrahlung $G_{h,jahr}$ zum Referenzwert $G_{h,ref}$ angegeben werden und der übliche spezifische Ertragswert $q_{PV,ref}$ ist mit diesem Faktor zu multiplizieren.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Le Gouvernement grand-duché de Luxembourg, „Règlement grand-ducal du 7 avril 2022 déterminant les mesures d'exécution de la loi du 23 décembre 2016 instituant un régime d'aides pour la promotion de la durabilité, de l'utilisation rationnelle de l'énergie et des énergies renouvelables,“ Service central de législation, Luxembourg, 2022.
- [2] Le Gouvernement grand-duché de Luxembourg, „Règlement grand-ducal du 12 avril 2019 modifiant: le règlement grand-ducal modifié du 1er août 2014 relatif à la production d'électricité basée sur les sources d'énergie renouvelables,“ Service central de législation, Luxembourg, 2019.
- [3] M. Lichtmeß, „PVCalc - Werkzeug zur Berechnung von Photovoltaikanlagen,“ Institut für Gebäude-Energieforschung Dr. Markus Lichtmeß, Ayl, 2023.
- [4] Ministère de l'Énergie et de l'Aménagement du territoire, Données climatiques du Luxembourg (Protection thermique d'été), 06.04.2023. [Online]. Available: <https://mea.gouvernement.lu/fr/energie/efficacite-energetique/informations-techniques.html>.
- [5] K. Kiefer, B. Farnung und B. Müller, „Degradation in PV power plants: theory and practice,“ in Presented at the 36th European PV solar Energy Conference and Exhibition, Marseille, France, 2018.
- [6] M. Lichtmeß, „Überprüfung der aktuellen Förderung von Photovoltaikanlagen für Prosumer mit Stromspeicher in Luxemburg,“ Institut für Gebäude-Energieforschung Dr. Markus Lichtmeß, Ayl, 2022.
- [7] Le Gouvernement grand-duché de Luxembourg, „Règlement grand-ducal modifié du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments,“ Service central de législation, Luxembourg, 2021.

¹⁶ Der Globalstrahlungswert des Luxemburger Testreferenzjahrs beträgt $G_h=1.096 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

¹⁷ Alternativ kann auch die langjährig mittlere spezifische Stromerzeugung für alle Anlagen mit Volleinspeisung, zum jeweils gemessenen Jahreswert in Bezug gesetzt werden.