

„Grundlast“ und die Eigenschaften der volatilen Stromerzeuger

geschrieben von Andreas Demmig | 15. Januar 2026

Einleitung:

Sie möchten mehr über die wirtschaftlichen Eigenheiten der „Erneuerbaren“ wissen? Dann lesen Sie hier, was Leen Weijers zusammengestellt hat.

Eine kurze Zusammenfassung finden Sie am Ende des Artikels.

Substack, Leen Weijers, 29. November 2025

Zuverlässigkeit vs. Einschränkung

Strom ist eine Dienstleistung. Der Strombedarf muss sekundlich mit dem Angebot abgeglichen werden. Mein ehemaliger Kollege **Chris Wright** verglich den Strombedarf mit der Nachfrage nach einer Uber-Fahrt. Timing ist alles.

Es gibt zwei Möglichkeiten, wie ein Uber-Fahrer keinen Mehrwert generieren kann: Er fährt entweder gar nicht oder zur falschen Zeit. Ähnlich verhält es sich mit erneuerbaren Energien: Oftmals decken sie die gewünschte Last entweder gar nicht oder liefern sie zum falschen Zeitpunkt.

Das erste Problem tritt auf, wenn erneuerbare Energiesysteme relativ klein sind. Ein intermittierendes System, das nur 16 Stunden pro Woche arbeitet, wie beispielsweise Solaranlagen in Deutschland, funktioniert schlichtweg die meiste Zeit nicht und benötigt die Unterstützung durch zuverlässige, leistungsstarke Energiequellen.

Mit dem relativen Kapazitätswachstum der Solarenergie hat sich das Problem der [zuviel] Stromerzeugung außerhalb der benötigten Zeiten verschärft. Dieses Phänomen wird als Abregelung bezeichnet. Für sogenannte Grundlast-Solaranlagen, die eine konstante Stromversorgung über das ganze Jahr gewährleisten sollen, stellt die Abregelung ein deutlich größeres Problem dar.

Warum sollte eine Drosselung ein „Problem“ darstellen? Energieversorger lassen Kohle- und Gaskraftwerke bereits stillstehen, wenn erneuerbare Energien zur Verfügung stehen. Ist das nicht vergleichbar? Ja, es handelt sich um ähnliche Probleme.

Diese Anlagen stellen ein Problem dar, da sie nur einen Teil der vorgesehenen Betriebszeit nutzen. Das bedeutet, dass sich die Baukosten auf weniger Betriebsstunden verteilen müssen. Dadurch verringert sich auch der CO₂-Fußabdruck aus dem Abbau und der Produktion, da weniger

Kilowattstunden verbraucht werden. Zudem benötigen sie aufgrund der höheren Bauanforderungen deutlich mehr Platz. Wir werden die Auswirkungen der Drosselung auf all diese Parameter untersuchen.

Wenn Energieversorger ein 1-Gigawatt-Kraftwerk (GW) zur Stromerzeugung bauen, bedeutet dies in der Regel, dass diese Leistung 90–95 % des Jahres über kontinuierlich und zuverlässig verfügbar ist, da diese Kraftwerke nur gelegentlich für planmäßige Wartungsarbeiten außer Betrieb genommen werden müssen. Bei Wind- und Solaranlagen hingegen bedeutet der Bau eines 1-GW-Kraftwerks nicht, dass 1 GW Leistung kontinuierlich bereitgestellt wird. Wie **Abbildung 1** für die Solarstromerzeugung in Texas und Deutschland zeigt, werden 1 GW nie erreicht. Im sonnigen Texas werden bestenfalls an wenigen Stunden im Jahr 80 % der angestrebten Leistung erzielt. Die meiste Zeit liegt die Produktion jedoch bei null. Im Durchschnitt beträgt die Leistung einer „1-GW“-Solaranlage in Texas etwa 0,22 GW. Anders ausgedrückt: Der natürliche Kapazitätsfaktor für Solarenergie in Texas liegt bei 22 %. In Deutschland ist die Sonneneinstrahlung deutlich geringer, der natürliche Kapazitätsfaktor liegt dort unter 10 %.

Weiter verschärfend ist die Tatsache, dass die Spitzen- und Durchschnittsleistung deutlich unter der Nennleistung liegt, da die Stromerzeugung der Sonne saisonalen Schwankungen unterliegt. In Texas schwankt der natürliche Kapazitätsfaktor zwischen einem monatlichen Durchschnitt von 7 % und 30 %, in Deutschland zwischen 1,6 % und 18 %. Hierbei ist der Unterschied zwischen saisonalem Minimum und Maximum bemerkenswert – etwa das Vierfache in Texas und etwa das Elffache in Deutschland. Diese Differenz muss überbrückt werden, um ein zuverlässiges System zu dimensionieren.

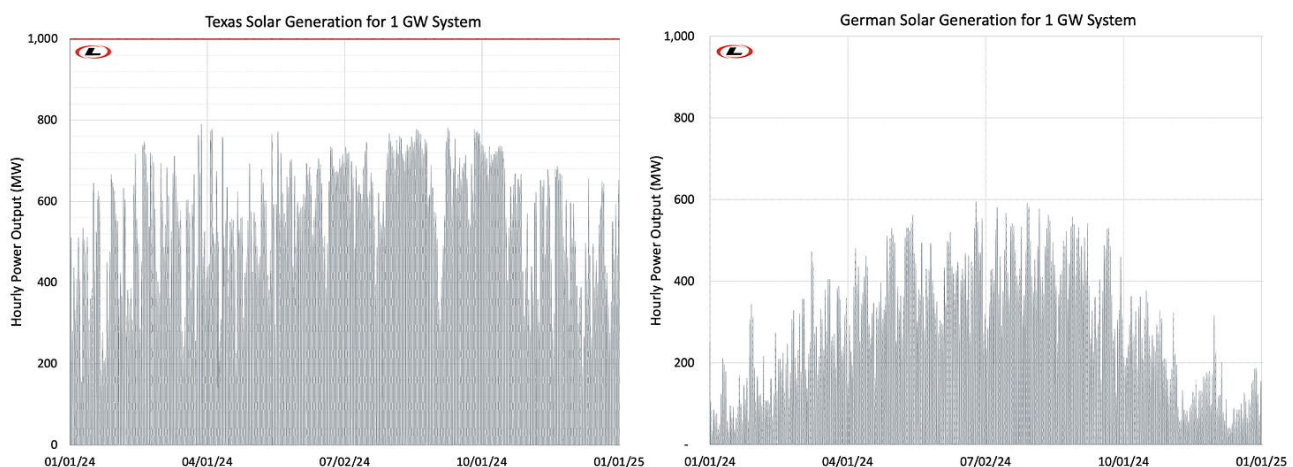


Abbildung 1: Stromerzeugung in Texas (links) und Deutschland (rechts) im Jahr 2024 für ein System mit einer Solarkapazität von 1 GW.

In einem aktuellen Bericht behauptet Ember, dass 6 GW Solarkapazität mit 17 GWh Batteriespeicher 97 % einer ganzjährigen Dauerlast von 1 GW in Städten wie Las Vegas abdecken können. Ember bezeichnet dies als „Grundlast“-Solarstrom. Richtig gelesen: Um die schwankende

Sonneneinstrahlung auszugleichen, muss eine Solaranlage sechsmal überdimensioniert sein und über eine Batteriekapazität von 17 Stunden verfügen, um auch nachts und an bewölkten Tagen Strom zu liefern. Wie Sie weiter unten sehen werden, liefert dieses System jedoch nicht die gewünschte „kontinuierliche“ Stromversorgung.

Abbildung 2 zeigt, wie sich ein solches 6-GW/17-GWh-System in Texas (wo der natürliche Kapazitätsfaktor für Solarenergie 2024 bei etwa 22 % lag) und in Deutschland (wo er in diesem Jahr etwas unter 10 % lag) entwickeln würde. Diese Daten basieren auf tatsächlichen Solarstromdaten von ERCOT und den deutschen Energiecharts aus dem Jahr 2024 .

In Texas erreicht Embers bevorzugtes Solarsystem eine Lastdeckung von 91 %, während 32 % des erzeugten Stroms nicht verbraucht werden. In Deutschland erreicht das System hingegen nur 53 % der Last, die Abregelung ist mit 2 % minimal. In Texas ist die Lastversorgung über den Sommer nahezu durchgehend gewährleistet. Auch in Deutschland ist die Situation derzeit günstig, allerdings werden ähnliche Werte auch in einigen Sommerwochen erreicht. Die Kehrseite der Medaille ist jedoch, insbesondere in Deutschland, dass die bereitgestellte Last weit von den angestrebten 1 GW entfernt ist.

Diese beiden Beispiele verdeutlichen: Ist das wetterabhängige System auf den Sommer ausgelegt, reicht die Versorgung im Winter nicht aus; ist es hingegen auf den Winter ausgelegt, kommt es im Sommer zu massiven Leistungseinschränkungen. Diese saisonalen Schwankungen bestimmen die Versorgungssicherheit und das Ausmaß der nicht nutzbaren „Abfälle“. Beides wiederum hängt von den saisonalen Unterschieden in der Stromerzeugung ab.

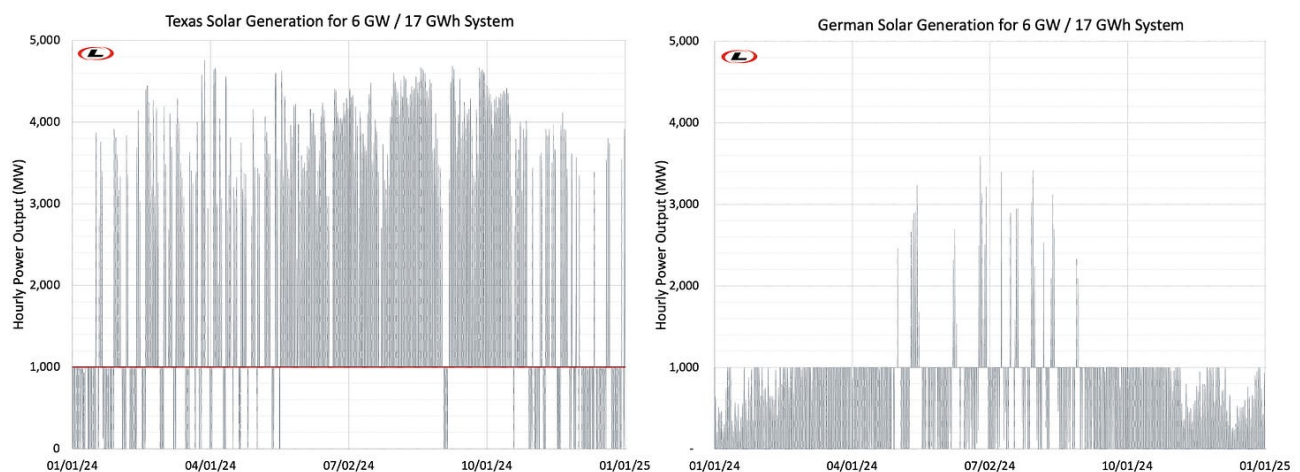


Abbildung 2: Texas (links) und Deutschland (rechts) 2024 Leistung für ein gewünschtes 1 GW „kontinuierliches“ Solarenergiesystem unter Verwendung des von Ember vorgeschlagenen Systems mit 6 GW Solarkapazität und 17 GWh Batteriespeicherkapazität.

Man kann daher mit Fug und Recht behaupten, dass eine Solaranlage mit sechsfacher Überdimensionierung und 17 Stunden Batteriespeicher in Texas

die Grundlastversorgung oft sicherstellen kann. Das gilt jedoch nur für Texas, das ideale Gebiet für Solarenergie. In sonnenärmeren Regionen ist das deutlich weniger effektiv.

Zurück in Deutschland führt die Deckung des Strombedarfs jedoch zu Herausforderungen im Zusammenhang mit der Abregelung. **Abbildung 3** zeigt die gedeckte Last im Verhältnis zur Abregelungsquote, also dem Anteil des abgeregelten Stroms an der gesamten Stromerzeugung. Um die Auswirkungen saisonaler Schwankungen auszugleichen, ist eine enorme Batteriekapazität erforderlich. Selbst die in dieser Grafik verwendete 200-GWh-Batterie, die für etwa 8 Tage bei 1 GW ausreicht, genügt bei Weitem nicht, um eine 100%ige Lastdeckung zu erreichen. Dies ist nur durch den Ausbau der Erzeugungskapazität möglich – allerdings auf Kosten der Abregelung eines Großteils dieser Leistung, selbst bei Einsatz großer Batteriespeicher.

Das ideale System befindet sich in dieser Grafik oben links. Diese Kombination ist für Deutschland nicht realisierbar. Systeme ohne Batteriespeicher liegen alle im unteren Bereich der farbigen Kurven. Da die Sonne in Deutschland größtenteils gleichzeitig überall scheint, erzielen kleinere Systeme die größten Zuwächse bei der Stromerzeugung. Batteriespeicher verschieben die farbigen Kurven nach links und oben, was bedeutet, dass Batterien dazu beitragen, auch nachts und in der Dunkelheit mehr Strom zu erzeugen und gleichzeitig die Abschaltung zu reduzieren.

Wie wäre es mit dem bescheidenen Ziel einer Lastabdeckung von 90 %, wie sie Kohle- und Gaskraftwerke üblicherweise erreichen? Wie die orange Linie unten zeigt, ist dies mit einem System mit 50 GW Kapazität und einer Batteriekapazität von ca. 14 GWh möglich. Das bedeutet, dass die Solarkapazität 50-mal überdimensioniert sein muss, um eine kontinuierliche Leistung von 1 GW zu erzielen.

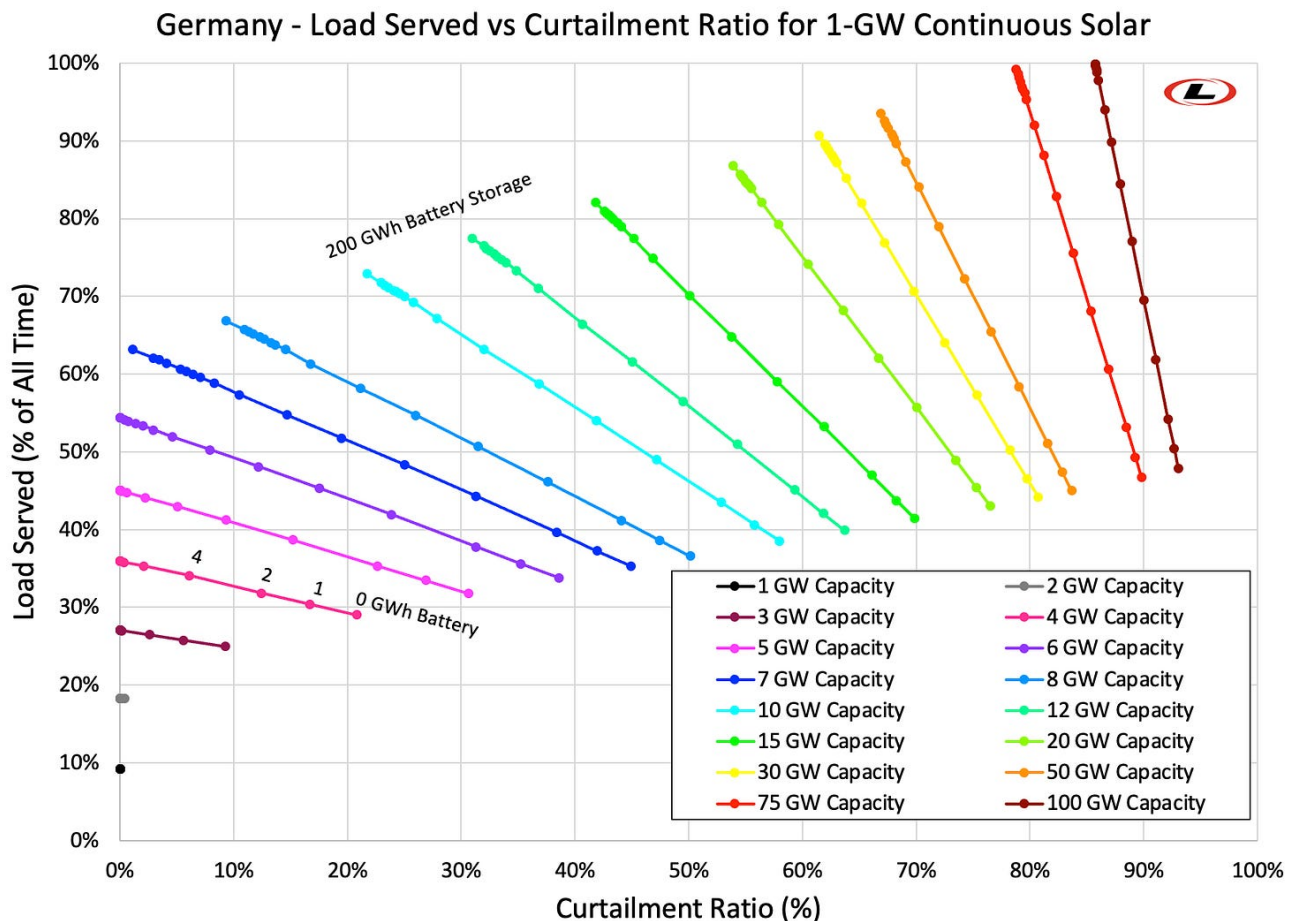


Abbildung 3: Deutschland bediente Last im Vergleich zum Abschaltverhältnis.

Klingt das vernünftig? Warten Sie ab, bis Sie die Auswirkungen auf Kosten, Leistungsdichte und CO₂-Fußabdruck sehen. Diese ungenutzte Energie in überdimensionierten Anlagen hat Konsequenzen: Sie verteuert Solarenergie, benötigt deutlich mehr Platz, reduziert den Energieertrag (EROI) und erhöht den CO₂-Fußabdruck der Solarenergie erheblich.

Auswirkungen der Unbeständigkeit auf die Wirtschaft

In einem kürzlich erschienenen Beitrag (https://open.substack.com/pub/wirescrossed/p/solar-reliability-when-the-r-is-in?r=1r9eeo&utm_medium=ios) haben wir die Auswirkungen steigender Lasten auf die Stromgestehungskosten (LCOE) erörtert, vor allem mit dem Ziel, einen LFSCOE – die Gesamtsystem-LCOE bei verschiedenen Grundlastniveaus – zu definieren. **Abbildung 4** zeigt ein Beispiel hierfür für Deutschland.

Um auf die beiden vorherigen Beispiele zurückzukommen: In Deutschland lassen sich 100 % bzw. 90 % der Last decken, und zwar zu Stromgestehungskosten (LCOE) von 1.400 \$/MWh bzw. ca. 376 \$/MWh. Zum Vergleich: In den USA liegen die Stromgestehungskosten für Erdgas bei einer ähnlichen Last bei 110 \$/MWh bzw. 80 \$/MWh.

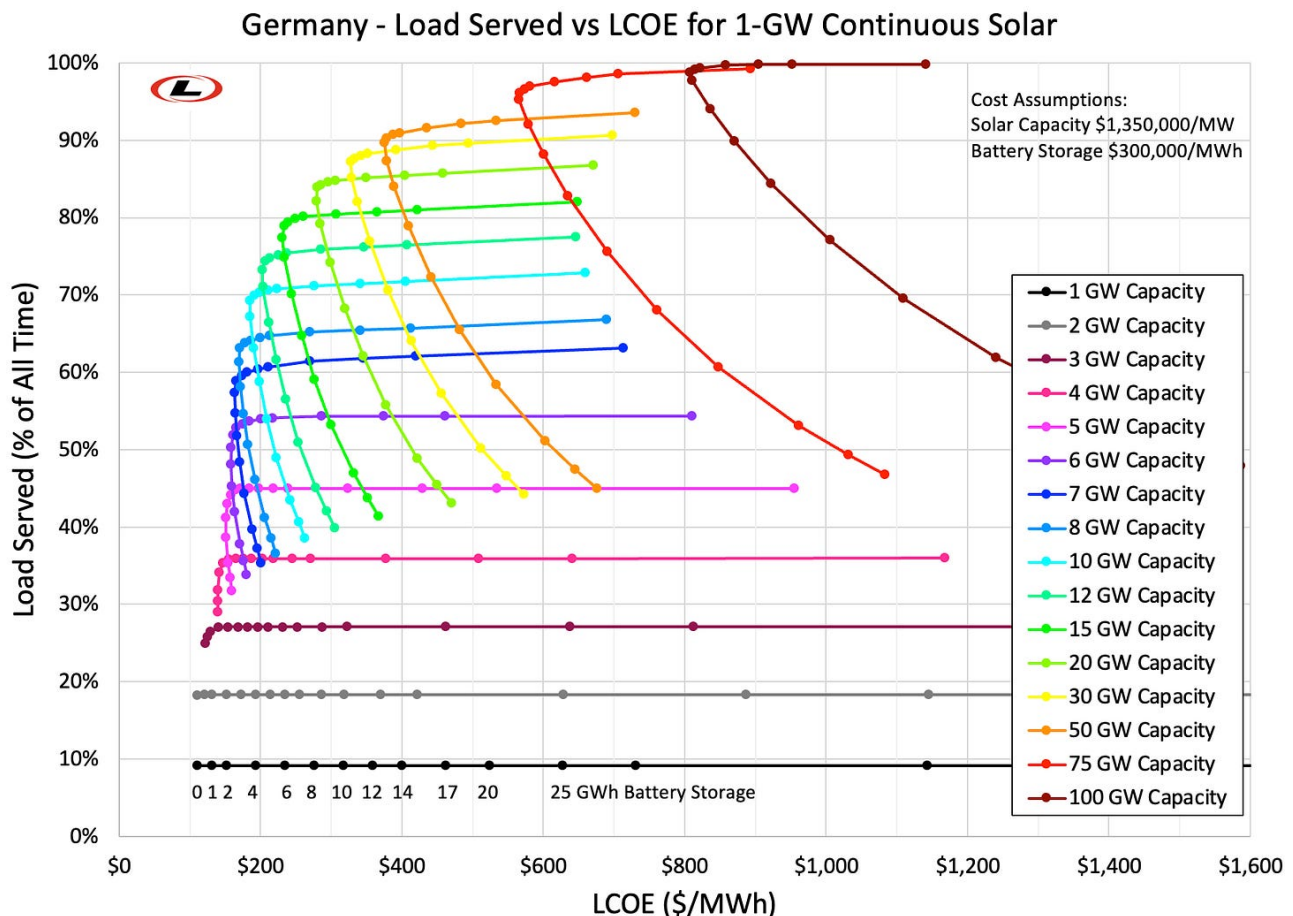


Abbildung 4: Vergleich der Stromgestehungskosten (LCOE) verschiedener Solar-/Batteriesysteme in Deutschland.

Das ideale System ist kostengünstig und arbeitet permanent, weshalb es sich im oberen Bereich und möglichst weit links befindet. Diese Grafik verdeutlicht, dass die Stromgestehungskosten (LCOE) nicht ohne Berücksichtigung der Abruflbarkeit betrachtet werden können. Bei Solaranlagen beträgt der Unterschied zwischen einem System mit variabler und einem mit über 90 % variabler Leistung das 4- bis 15-Fache.

Platz da, Biokraftstoffe!

Die durch Versorgungsengpässe entstehenden Verluste haben weitreichendere Folgen als nur Kosten. Überkapazitäten, die zur Steigerung der bedienten Lasten errichtet wurden, bleiben oft ungenutzt und belegen unnötig Platz und Subventionen bei „grüner Energieerzeugung“.

Mehrere Studien kommen zu dem Schluss, dass die durchschnittliche Leistungsdichte von Solaranlagen in Texas etwa 10 Watt pro Quadratmeter (W/m^2) beträgt. Dieser Durchschnittswert berücksichtigt den niedrigen natürlichen Kapazitätsfaktor von Solaranlagen, selbst in Texas, da er über einen Zeitraum von 24/365 Tagen gemittelt wird. Die Sonne steht nie optimal. Aufgrund des naturgemäß niedrigeren natürlichen Kapazitätsfaktors in Deutschland liegt dieser bei etwa $4,4 \text{ W/m}^2$ für ein

System, bei dem der gesamte erzeugte Strom verbraucht wird. Dies wird in **Abbildung 5 an einem einzelnen Punkt** bei einer Auslastung von 9 % und einer solaren Leistungsdichte von $4,4 \text{ W/m}^2$ dargestellt.

Bei der Berücksichtigung von Leistungsverlusten erhöht sich die benötigte Fläche für den verbrauchten Solarstrom. Beträgt der Leistungsverlust beispielsweise 50 %, so bedeutet dies, dass die Hälfte der erzeugten Leistung nicht zum optimalen Zeitpunkt erzeugt wurde und die benötigte Fläche für die Solaranlage im Vergleich zu einem System ohne Leistungsverluste verdoppelt ist. Anders ausgedrückt: In diesem Beispiel ist die Leistungsdichte der Solaranlage ebenfalls nur halb so hoch wie bei einem System ohne Leistungsverluste.

Solaranlagen sind bereits sehr weit verbreitet. Ihre Leistungsdichte von 10 W/m^2 ist etwa 50-mal geringer als die von Kohlekraftwerken, 70-mal geringer als die von Gaskraftwerken und 100-mal geringer als die von Kernkraftwerken. Für die Grundlastversorgung in Gebieten mit geringer Sonneneinstrahlung in Deutschland kann die Leistungsdichte auf Bruchteile von 1 W/m^2 sinken, was um ein Vielfaches niedriger ist als die von Gaskraftwerken. Umgekehrt zur Leistungsdichte ist der Flächenbedarf, der daher für die gleiche Strommenge wie bei Gaskraftwerken um ein Vielfaches größer ist. Dies entspricht in etwa der durchschnittlichen Leistungsdichte und dem Flächenbedarf von Nutzpflanzen und Biokraftstoffen.

Es wird oft behauptet, Solarenergie sei deutlich energiereicher als Land- oder Forstwirtschaft, wo die Energiedichte von Nutzpflanzen im Bereich von $0,1\text{--}1,0 \text{ W/m}^2$ liegt. Im Gegensatz zur Solarenergie kann der Brennstoff aus diesen Pflanzen jedoch rund um die Uhr (24/365) bereitgestellt werden. Die Grundlast-Solarenergie erreicht eine Energiedichte, die der extrem geringen von Biokraftstoffen ähnelt.

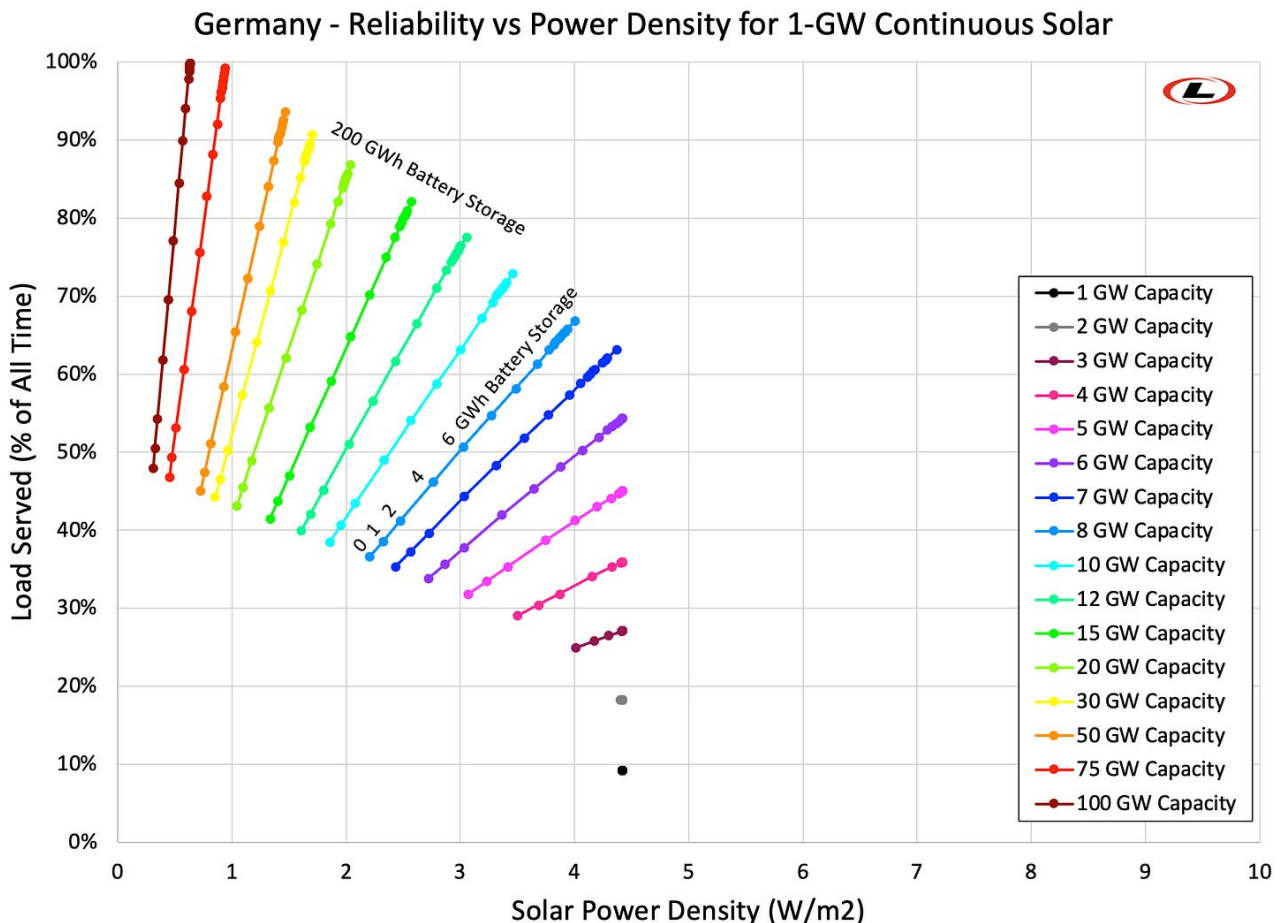


Abbildung 5: Leistungsdichte verschiedener „Grundlast“-Solaranlagen in Deutschland

C02-Fußabdruck

Der Hauptgrund für die Entwicklung von Solar- und Windenergie und deren Förderung liegt in ihrem [angeblich] geringeren CO₂-Fußabdruck im Vergleich zu Strom aus Erdgas und Kohle. Ihre vermeintlich niedrigen CO₂-Emissionen haben ihnen den Status „grün“ eingebracht (obwohl mehr CO₂ – nicht weniger – den Planeten grüner macht, aber das ist ein anderes Thema). Manche bezeichnen sie auch als sogenannte „erneuerbare Energien“, obwohl sie aus fossilen Brennstoffen hergestellte Produkte mit begrenzter Lebensdauer darstellen (auch das ist ein anderes Thema).

Wenn ein Großteil der erzeugten Energie abgeregelt wird und man zur Deckung des Bedarfs überdimensioniert gebaut hat, steigt der CO₂-Fußabdruck in Gramm CO₂-Äquivalent (gCO₂e) pro Kilowattstunde (kWh), da beim Bau von Solaranlagen mehr Gramm CO₂ freigesetzt werden, während im Verhältnis weniger kWh produziert werden.

Wir hören immer wieder, dass Solarenergie eine geringere CO₂-Bilanz hat als die Stromerzeugung aus Erdgas oder Kohle. Die IEA beziffert sie aktuell auf etwa 41 g CO₂ elektrische -e/kWh, im Vergleich zu etwa 500 bis 1.000 g CO₂ e/kWh für Strom aus Erdgas und Kohle. Diese Werte beziehen sich jedoch nur auf die Solarmodule ohne Batteriespeicher.

Abbildung 6 zeigt die Folgen einer Überdimensionierung zur Erreichung einer bestimmten Grundlast durch höhere Solarkapazität und Batteriespeicher. Das von Ember vorgeschlagene Solargrundlastsystem zur kontinuierlichen Versorgung von 1 GW mit 17 GWh Batteriespeicher und 6 GW Erzeugungsleistung weist einen CO₂-Fußabdruck von 405 g CO₂ e/kWh auf. Das ist etwa das Zehnfache des üblicherweise genannten Wertes. Mit diesem System lassen sich in Deutschland lediglich 53 % der Last decken.

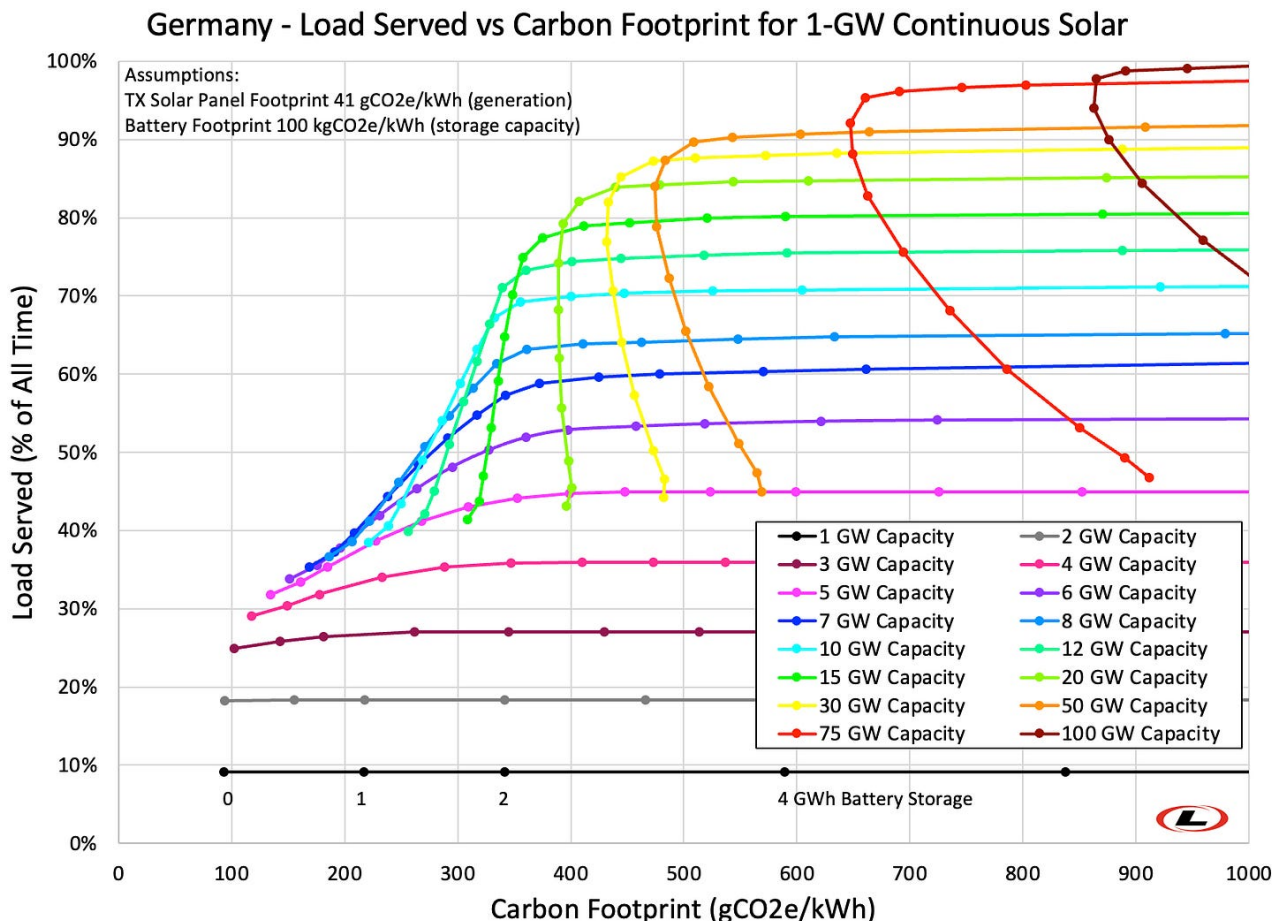


Abbildung 6: CO₂-Fußabdruck verschiedener Grundlast-Solaranlagen in Deutschland

Wer im Bereich der Stromerzeugung für Erwachsene mitmischen möchte, wo 90 % oder mehr des Strombedarfs gedeckt werden, dessen Solarstrom-Fußabdruck liegt bei etwa 510 g CO₂ e/kWh – ähnlich dem von Erdgas. Allerdings ist Solarstrom deutlich teurer und benötigt eine wesentlich größere Fläche.

Abbildung 7 fasst diese Ergebnisse zusammen und zeigt auch, was mit der Grundlast-Solarstromerzeugung im sonnenreicheren Texas passiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass meine Einschätzung der Grundlast-Solarenergie darin besteht, dass sie zu Überkapazitäten und Verschwendung durch Abschaltung führt, dass sie teuer ist, dass sie definitiv nicht „grün“ ist und dass sie aufgrund der starken Verdünnung riesige Flächen der Erde beanspruchen wird.

Interessanterweise vergessen Organisationen, die mit der Möglichkeit der Grundlastversorgung durch Solarenergie prahlen, das ursprüngliche Versprechen, das Solarenergie überhaupt erst ermöglicht hat – ihren scheinbar geringen CO₂-Fußabdruck. Die Einschätzung, Solarenergie sei „kostengünstig“, gepaart mit einem Vergleich zwischen 10 % nicht garantierter und 90 % garantierter Leistung, hat in letzter Zeit zumindest etwas Beachtung gefunden.

Die wahren Kosten, der CO₂-Fußabdruck und der Flächenbedarf müssen ernster genommen werden, wenn unsere Gesellschaften beschließen, die Nutzung wetterabhängiger Energiequellen weiter auszubauen.

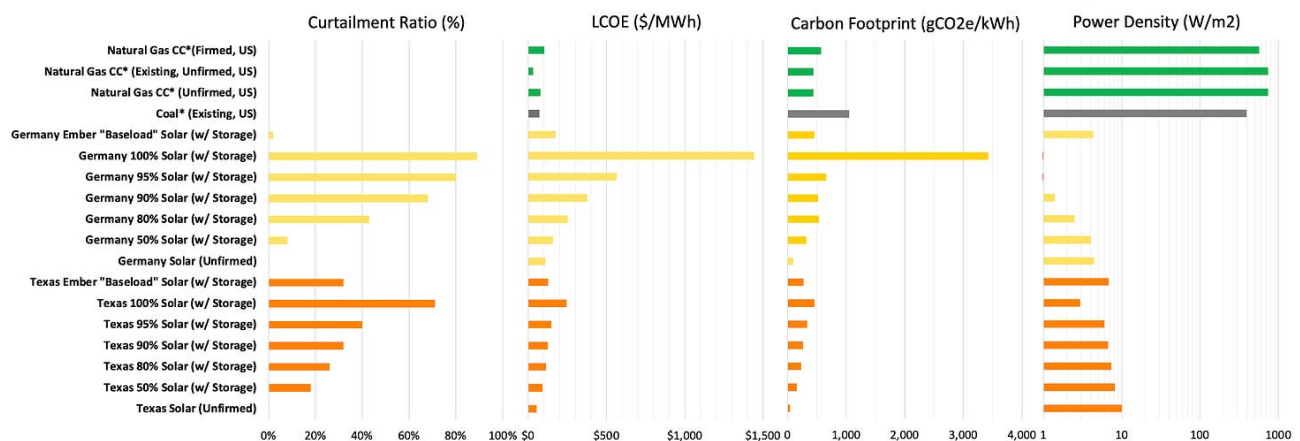


Abbildung 7: Abregelung, Stromgestehungskosten, CO₂-Fußabdruck und Leistungsdichte für „Grundlast“-Solaranlagen in Deutschland und Texas

Schlussfolgerungen

- Zwar kann der Ausbau von Überkapazitäten und die Nutzung von Batteriespeichern die Schwankungen der Solarenergie abfedern, doch führt dies mitunter zu einer erheblichen Einschränkung eines Großteils des zusätzlich erzeugten Stroms.
- Der Versuch, unzuverlässige Energiequellen zuverlässiger zu machen, ist kostspielig. Der Gesamtenergieverbrauch (LFSCO₂E) einer Solaranlage zur Grundlastnutzung ist etwa 5- bis 15-mal höher als der einer nicht abgesicherten Solaranlage.
- Die Drosselung der Einspeisung führt zu einer deutlich höheren CO₂-Bilanz von Solaranlagen zur Grundlastnutzung, die in manchen Fällen sogar die CO₂-Bilanz von Gaskraftwerken übersteigt. Gemäß der Definition von „grün“ im Sinne von geringen CO₂-Emissionen erfüllt Solaranlagen zur Grundlastnutzung diese Kriterien nicht.
- Solarenergie ist bereits eine verdünnte Energiequelle, und Grundlaststrom verdünnt sie noch weiter.

<https://wirescrossed.substack.com/p/baseload-solars-four-little-secrets>

Ergänzungen

In dieser sehr ausführlichen Beschreibung von Auslastungen, Hilfestellung für Grundlast und Kosten je kWh vs. Kapital, Fläche und Emissionen, werden die physikalischen Grundlagen nicht dargestellt. Hier nur kurz angerissen:

- Es ist schwieriger auszuregeln, wenn zuviel Strom ins Netz drückt, denn nur der mit der höheren Ausgangsspannung liefert (physikalisch gesehen)
- Spannung darf im Betrieb um $\pm 10\%$ schwanken (also 207 bis 253 Volt ac), moderne Geräte sind darauf ausgelegt, (Umstellung von 220V um 1990)
- Solarpanels, Batterien und auch Windräder liefern Gleichspannung, diese muss über Wechselrichter an die Netz-Wechselspannung (bzw. 3~) ... gerichtet werden.
- Dabei entstehen Phasenverschiebungen, die zu hohen Ausgleichsströmen, gar Kurzschlüssen führen können.

Wechselstromnetz – Gleichtakt ist wichtig