DEDie Macht der Energiedichte

13-10-2026



Jede Art von Stromerzeugung verursacht Abfälle, auch die Photovoltaik

Dank ihrer enormen Energiedichte gehört die Kernenergie zu den ressourcen- und umweltschonendsten Möglichkeiten, viel Strom zu erzeugen – CO_2-arm und rund um die Uhr. Sie produziert auch Abfälle, doch ein Vergleich mit der Photovoltaik fördert Erstaunliches zutage.

Erstpublikation in SICHTWEISENSCHWEIZ: https://sichtweisenschweiz.ch/gesellschaft/die-schmutzige-seite-des-sauberen-stroms-und-die-macht-der-energiedichte/

Die schnellste Energiewende aller Zeiten

Im New York des Jahres 1900 besorgten rund 130 000 Pferde den Transport von Personen und Gütern. Als Energiequelle dienten 1.8 Millionen kg Futter pro Tag (meist Heu und Hafer). 15 Jahre später waren sie verschwunden. Dafür verkehrten 250 000 Motorfahrzeuge – oft ein Ford Model T, in grossen Serien hergestellt. Diese Wende gelang ohne jede Subvention. Denn die Vorteile waren überwältigend: Eine Steigerung der Transportleistung um eine Grössenordnung, zu einem Bruchteil der Energie und der Kosten.

Das Geheimnis? Die Naturgesetze. Ein Verbrennungsmotor besitzt eine über hundertmal höhere Leistungsdichte als ein Hafermotor.

Auch bei der Photovoltaik (PV) zeigt sich die Natur auf den ersten Blick sehr wohlwollend: Der Strom wird ohne bewegliche Teile, lautlos, sauber und mit erneuerbarer Primärenergie erzeugt. Faszinierend. Doch die Natur hat ihr auch zwei Steine in den Weg gelegt: eine sehr kleine Energiedichte und eine erratische Stromproduktion.

Kupfer und seine Nebenwirkungen

Um in mittleren Breiten gleich viel Strom zu erzeugen wie ein konventionelles 1 GW-Grosskraftwerk, müssen wir die Sonnenenergie auf einer Fläche von typisch 50 Millionen Quadratmetern einfangen – beispielsweise mit einer Million Dach- oder Fassadenflächen zu je 50 Quadratmeter. Hinzu kommen noch eine Million Wechselrichter und viele Millionen Meter dicker Stromkabel. Da die Stromproduktion erratisch ist - die PV produziert entweder zu viel, zu wenig oder gar keinem Strom - müssen Speicher und/oder Ersatzkraftwerke für einen Ausgleich sorgen. Die Folge: ein Rohstoffbedarf, der je nach Material bis hundertmal höher liegt als bei einem thermischen oder Wasserkraftwerk. Beim Kupfer ist der Bedarf etwa 50-mal so hoch.

Auf der Welt werden täglich vier bis fünf Millionen Solarmodule hergestellt, aufeinandergestapelt würde der Turm bis in den Weltraum hineinragen (150 km). Zum Bau der Module werden ganze Berge von Rohstoffen benötigt, in der Grössenordnung von 100'000 Tonnen pro Tag. Nicht wenig für einen Planeten mit begrenzten Ressourcen.

Kupfer spielt dabei eine wichtige Rolle. Die PV beansprucht heute rund 10% der weltweiten Kupferproduktion. Das Problem dabei: Der Kupferbergbau ist der unbestrittene Weltmeister bei der Erzeugung von toxischen Abfällen – vor allem in Form von rund 4 Milliarden Tonnen Bergbauschlämme pro Jahr.

Für ein Kilogramm Kupfer müssen heute einige hundert Kilogramm Erz abgebaut und aufbereitet werden. Fast die gesamte Restmasse verbleibt als «Tailings» – fein gemahlene Bergbauschlämme, die viel Arsen, aber auch Cadmium, Blei, Quecksilber und weitere Schwermetalle enthalten. Rechnet man pro Solarmodul mit etwa 1,5 Kilogramm Kupfer, so stehen dahinter mehr als 200 Kilogramm Giftschlämme. Werden zusätzlich Speicher, Netzausbau und gesicherte Ersatzleistung berücksichtigt, steigt der kupferbedingte Materialaufwand weiter.



Abbildung 1 Streng nach dem Verursacherprinzip, müsste zu jedem Solarmodul auch ein 200 kg-Fass mit toxischen Bergbauschlämmen zur Entsorgung mitgeliefert werden.

Weltweit verursacht die Photovoltaik pro Jahr mindestens 400 Millionen Tonnen solcher Schlämme. Eine sichere Endlagerung dieser gigantischen Mengen – im Laufe der Zeit vielen Milliarden Tonnen – ist unmöglich. Verglichen damit ist die Endlagerung der vergleichsweisen winzigen Mengen hochradioaktiver Abfälle geradezu einfach. Natürlich erzeugt auch der Uranbergbau Abfälle, doch in kleinerem Umfang, besonders wenn das „In-Situ-Leaching“ benutzt wird. Zudem sind diese Abfälle im Durchschnitt etwas weniger toxisch, selbst bei Berücksichtigung der Radioaktivität.

Radioaktive Abfälle – ein Beispiel für unsere verzerrte Wahrnehmung

Der Vergleich zwischen «solaren» Bergbauabfällen und nuklearen Abfällen (hochradioaktiver Abfall und Uranbergbau) führt zu einem überraschenden Ergebnis. Die Giftmengen bezogen auf die produzierte Strommenge sind ähnlich gross: etwa 50'000 tödliche Dosen pro Gigawattstunde. Die Details sind in meinem Buch "Zeitalter der Ängste"[1] nachzulesen. Nachrechnen erlaubt. Ein bemerkenswerter Unterschied zwischen diesen beiden Abfällen: Nach einigen hundert Jahren sind in den nuklearen Abfällen nur noch rund 5000 Giftdosen vorhanden, und sie zerfallen weiter. Die 50'000 PV-Giftdosen aber bleiben bis zum jüngsten Gericht erhalten. Denn leider sind sie nicht radioaktiv.

Der wichtigste Unterschied: Die radioaktiven Abfälle sind in einer hochschmelzenden, extrem wasserunlöslichen Keramik- oder Glasmatrix eingeschlossen, eingelagert in dickwandige Stahlbehälter, vorgesehen für eine Tiefenlagerung. Oder, viel besser, wir benutzen sie als Brennstoff in dafür geeigneten Reaktoren und vernichten sie dabei weitgehend.

Ganz anders die Bergbauschlämme, sie werden in riesigen oberirdischen Rückhaltebecken gelagert. Schwermetalle und Arsen gelangen über Sickerwasser oder Staub in die Umwelt, gemäss Schätzungen bis zu 20% des Inventars. Dammbrüche haben immer wieder schwere Umweltkatastrophen verursacht. All dies meist weit weg von uns, irgendwo auf einem anderen Kontinent. Und so können wir die Photovoltaik bei uns als „sauber" deklarieren. Ethisch sehr fragwürdig, denn die Bergbauabfälle belasten die dortige Bevölkerung massiv. Todeszahlen sind unbekannt – man will es lieber nicht wissen.



Abbildung 2 Abfallschlämme einer tasmanischen Kupfermine (Bild Alamy)

Die CO_2-Konzentration steigt und steigt

Noch immer stammen über 80 Prozent der weltweiten Primärenergie aus Kohle, Öl und Gas. Gleichzeitig versucht die Welt seit gut 30 Jahren den Anteil fossiler Energien drastisch zu reduzieren – mit gewaltigen Investitionen in die erneuerbaren Energien. Insgesamt dürften inzwischen rund 10'000 Milliarden Dollar investiert worden sein, die zusätzlichen Systemkosten (Ausbau Stromnetze und

[1] ISBN 978-3-907339-66-4

Transformatoren) nicht eingerechnet. Die meisten Anlagen kamen nicht ohne massive staatliche Unterstützung aus – sei es durch direkte Beteiligungen, Subventionen, Einspeisevergütungen, Steuererleichterungen, günstige Kredite oder Garantien.

Doch der Erfolg ist bescheiden: Der fossile Anteil am weltweiten Primärenergieverbrauch ist in 35 Jahren – je nach Berechnungsmethode – nur um wenige Prozentpunkte gesunken. Absolut sieht es noch schlimmer aus: Die weltweiten CO_2-Emissionen stiegen von rund 23 auf etwa 38 Milliarden Tonnen pro Jahr. Und die Kurve zeigt weiterhin nach oben. Auch 2026 dürfte der Verbrauch fossiler Rohstoffe einen neuen Rekord erreichen. Entsprechend steigt die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre weiter – allen 30 Klimakonferenzen, einer grossen Sammlung von Netto-0-Versprechen und andauernden staatlichen Förderungen zum Trotz.

Eine rasche Trendwende ist nicht in Sicht. Mitte 2026 befanden sich weltweit fossile Kraftwerke mit rund 500 GW Leistung im Bau und weitere rund 1'400 GW sind in der Planungsphase, ein grosser Teil davon in Asien und Afrika. Ein enormer Zuwachs, er entspricht gut 50% des gesamten heutigen Strombedarfs. Trotzdem ist er dringend notwendig, es gilt gegen eine Milliarde Menschen aus der tiefen Armut zu erlösen (<3 $/Tag). Weitere drei Milliarden träumen von einem Leben mit mehr als 8.30 $ Tageseinkommen. Die Grundvoraussetzung für einen minimalen Lebensstandard ist kostengünstiger Strom, auf Knopfdruck verfügbar.

Viele dieser neuen fossilen Kraftwerke entstehen in sonnenreichen Ländern. Gleichzeitig predigen gescheite Professoren, dass die Photovoltaik heute die kostengünstigste Stromquelle sein, ja dass es sich wirtschaftlich sogar lohnen würde, bestehende Kohlekraftwerke stillzulegen und durch Solaranlagen zu ersetzen. Können all diese Länder nicht rechnen? Gemäss den Pisa-Tests ist es eher so, dass die reichen Industriestaaten dies nicht können.

Eigentlich ist die Situation nicht so kompliziert: Ein Solarmodul kann zwar sehr billige Kilowattstunden produzieren, besonders im sonnenreichen Süden. Aber nur dann, wenn die Sonne scheint. Ein Stromnetz hingegen muss auch um drei Uhr morgens funktionieren, während einer langen Regenperiode und an einem windstillen Winterabend. Entscheidend sind deshalb die Kosten eines zuverlässigen Gesamtsystems.

Ein unrealistischer Umbau

Wollen wir die über 80% fossiler Energie bis 2050 vorwiegend durch Strom aus PV und Windkraft ersetzen, müssten wir deren Beitrag zur Weltenergie schnell und dramatisch erhöhen. Heute liegt er erst bei 3-6% (je nach Rechenmethode). Zusammen mit dem steigenden Strombedarf bedeutet dies einen Ausbau der Installationen auf das 20-fache – mindestens. Dafür müsste der jährliche Zubau gegenüber heute im Durchschnitt ungefähr um den Faktor 3 bis 5 steigen.

Dies ist illusorisch. Kosten und Rohmaterialbedarf (Kupfer, Aluminium, Stahl, Nickel, Lithium und andere Stoffe) wären enorm. PV und Windkraft, zusammen mit Speicher, Ersatzkraftwerke und dem benötigten Netzausbau verzehren bereits heute etwa 20% des Weltkupferbedarfs. Zusätzlich muss man auch alle fossil betriebenen Maschinen und Anlagen in Transport, Industrie, Haushalt und Gewerbe ersetzen – auch ein enormer Materialaufwand. Recycling verbessert die Situation etwas, rein technisch sind etwa 95% möglich. Doch in der realen Welt erreicht man nur 50%-70%. Nach einigen Zyklen ist nicht mehr viel übrig.

Da finanzielle Mittel, Rohstoffe und Produktionskapazitäten begrenzt sind, sollte man sie dort einsetzen, wo sie am meisten bewirken. Solaranlagen gehören bevorzugt in sonnenreichen Gebieten installiert. Pro investierten Dollar ist dort die Klimawirkung um ein Vielfaches höher als in mittleren oder gar nördlichen Breiten. In der Wüste lässt sich PV-Strom für 1 bis 2 US-¢/kWh erzeugen – mit riesigen Anlagen, staatlicher Unterstützung, sehr tiefen Bau- und Finanzierungskosten und hoher Sonneneinstrahlung, das ganze Jahr über. Die PV eignet sich in diesen Ländern ideal zur Deckung der täglichen Lastspitzen durch Klima- und Bewässerungsanlagen.

Aber selbst in der Sahara geht nachts die Sonne unter. Ein zuverlässiges Stromsystem braucht deshalb zusätzlich regelbare Leistung. Wasserkraft, Kernkraft oder fossile Kraftwerke müssen die Versorgung rund um die Uhr garantieren. Eine kostengünstige, rohstoffschonende Speicherung grosser Strommengen ist für die nächsten 20-30 Jahre nicht in Sicht.

Der Dornröschenschlaf der Kernenergie

Da die Wasserkraft nur beschränkt ausgebaut werden kann, rückt die Kernkraft wieder stärker in den Fokus. Sie erwacht erst allmählich aus dem politisch verordneten Dornröschenschlaf der letzten vierzig Jahre. Es werden noch zehn bis zwanzig Jahre vergehen, bis sie im grossen Massstab zur Verfügung steht. Heute sind über 400 Kernkraftwerke in Betrieb, über 70 Reaktoren sind im Bau, weitere 125 in der konkreten Planungsphase und über 300 im Status „proposed".

Ein Aufwärtstrend ist erkennbar – auch ohne die viel diskutierten Small Modular Reactors (SMR). In vielleicht 10 Jahren könnten diese beginnen, eine grössere Rolle zu spielen, besonders dort, wo sehr viel zuverlässige Energie auf engem Raum benötigt wird: in Industriezentren, bei chemischen Prozessen, für Fernwärme und bei grossen Rechenzentren.

Allerdings sollte man sich auch hier keinen Illusionen hingeben. Wollte man die Welt im grösseren Massstab mit Kernenergie dekarbonisieren, müsste der heutige Reaktorbestand um ein oder zwei Grössenordnungen wachsen – ähnlich wie bei den Erneuerbaren. In den nächsten 20-30 Jahre schwerlich machbar, auch wenn die Voraussetzungen (Systemkosten und Rohstoffbedarf) gegenüber den Erneuerbaren besser sind.

Doch langfristig wird Kernenergie dominieren. Keine andere Energietechnik bietet die Möglichkeit, überall auf dem Planeten, völlig unabhängig von Wetter und Jahreszeit, ressourcen- und umweltschonend viel Strom zu erzeugen – CO_2-arm und rund um die Uhr. Und die Perspektive für tiefe Kosten bei einer Serienproduktion sind intakt: Ein Kernkraftwerk ist nicht deshalb teuer, weil es grosse Mengen wertvoller Rohstoffe, besonders Metalle, verschlingt. Teuer sind heute vor allem die lange Planungsphase, der zeitaufwändige Bau ohne eingespielte Teams und Lieferketten, die Finanzierung und der Aufwand und die Verzögerungen durch die komplizierten regulatorischen Verfahren. Im Westen sind wir immer noch auf dem Niveau von Prototypen und Einzelanfertigungen und dies wird noch mehrere Jahre so weitergehen.

Die Physik jedenfalls steht der Kernenergie nicht im Weg – eher unsere Fähigkeit, aus ihr ein industrielles Serienprodukt zu machen.

Wir müssen uns anpassen

Da wir in der nächsten Zeit weder die erneuerbaren Energien noch die Kernkraft massiv ausbauen können, müssen wir uns damit abfinden, dass in den nächsten Jahrzenten die fossilen Brenn- und Treibstoffe dominieren werden. Vor allem sollten wir aufhören, uns etwas vorzumachen: In den nächsten 20-30 Jahren besteht wenig Hoffnung für eine starke Reduktion der CO_2-Emissionen, was auch immer an Klimakonferenzen beschlossen wird.

Wir tun gut daran, uns an die Klimaänderungen anzupassen. Höhere Temperaturen an sich, wie etwa in Singapur oder Okinawa (10-15°C über denjenigen in Mitteleuropa), stehen offensichtlich einem grösseren Wohlstand, einer längeren Lebenserwartung und einer besseren Gesundheit als im europäischen Mittel nicht im Wege.

Der weltweit starke Ausbau fossiler Energien hat einen einfachen Grund: Kohle, Öl und Gas besitzen eine hohe Energiedichte, sind speicherbar und ermöglichen eine jederzeit abrufbare Leistung. Dass so viele Länder weiterhin daraufsetzen, zeigt deutlich, dass mit hohen Anteilen wetterabhängiger Stromerzeugung ein Energiesystem nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Und schon gar nicht in sonnen- und windarmen Ländern mit einem grossen Winterloch.

Die Welt wird früher oder später nicht um einen grösseren Ausbau der Kernkraft herumkommen.

Datenquellen: IRENA, IEA, BloombergNEF, GEM, OWID, UNECE, UNEP, WNA, CEA, IAEA, ICA), FOEN/BAFU, Wikipedia und vers. wissenschaftliche Artikel.

Walter Rüegg war an der ETH-Zürich als Kernphysiker tätig und arbeitete anschliessend in der ABB auf dem Gebiet der Energietechnik. Autor des Buches «Zeitalter der Ängste».