

Anmerkungen zur Klimaproblematik und zu erneuerbaren Energien

Vorwort

Über die "Klimaproblematik" und "Erneuerbare Energien" ist in letzter Zeit sehr viel geschrieben und behauptet worden. Nicht alles davon war richtig, vieles war (ist) bloß "politisch" motiviert, und sehr oft werden die naturwissenschaftlichen Grundlagen und die sich daraus ergebenden Fakten vernachlässigt oder gar geleugnet.

Im folgenden wird der Versuch unternommen, einige Facetten beider Aspekte, nämlich "Klimaproblematik" und "Erneuerbare Energien", zusammenzufassen und zwar unter Beibehaltung einer (gemäßigt) wissenschaftlichen Sprache und hoffentlich Verständlichkeit. So gehört neben der Beziehung der "Temperatur" zur Konzentration von Kohlendioxid (CO_2), selbstverständlich auch die Bodenflächenbeanspruchung zum Thema "Klima" und natürlich eine kritische Darstellung einiger Formen von "Erneuerbarer Energie". Klarerweise kann kein Anspruch auf Vollständigkeit gestellt werden, ausgewählt sind vor allem Themen, die als "buzz words" in der Öffentlichkeit herumschwirren.

Ein Anhang soll helfen, zumindest ansatzweise ein wenig an die physikalischen Grundlagen von erneuerbaren Energien zu erinnern. In Zeiten zunehmender Wissenschaftsfeindlichkeit wird es immer notwendiger, Fakten "rationell" zu verstehen und die Zukunft bereits bestehender Technologien zu hinterfragen.

Klimarelationen

Die CO_2 /Temperatur-Relation

Die CO_2 /Temperatur-Relation ist formal definiert als

$$\begin{aligned}\langle T(t) \rangle &= f(c_{CO_2}(t)) \\ T_a(t) &= \langle T(t) \rangle - T_r = f_a(c_{CO_2}(t)) \ ,\end{aligned}$$

in der $c_{CO_2}(t)$ die gemessene CO_2 Konzentration ist, $\langle T(t) \rangle$ die (weltweit) gemittelte Temperatur, $T_a(t)$ die Temperatur- Anomalie, T_r eine Referenztemperatur für eine vorgegebene Zeitperiode und t die Zeit. Abgesehen von sehr

geringen Fluktuationen ist die CO_2 Konzentration eine globale Größe (*siehe Anhang*), die Temperatur eine lokale Größe. Alle Prognosen für die Erderwärmung beziehen sich vor allem auf $c_{\text{CO}_2}(t)$ und $\langle T(t) \rangle$ bzw. $T_a(t)$, obwohl auch andere Gase eine nicht unwichtige Rolle spielen. f ist übrigens eine implizite Funktion von t , am besten vorstellbar als Korrelation zwischen zwei zeitabhängigen Größen.

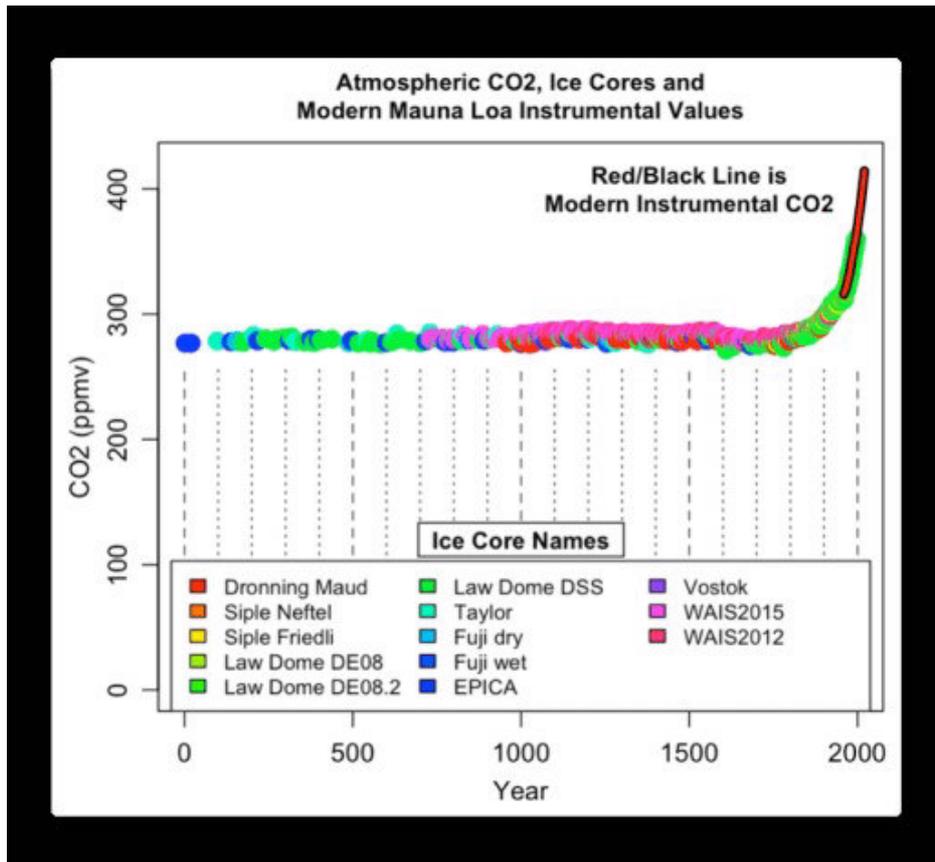


Fig.1: Die CO_2 Konzentration, gemessen mittels verschiedener Methoden, in den letzten 2000 Jahren.

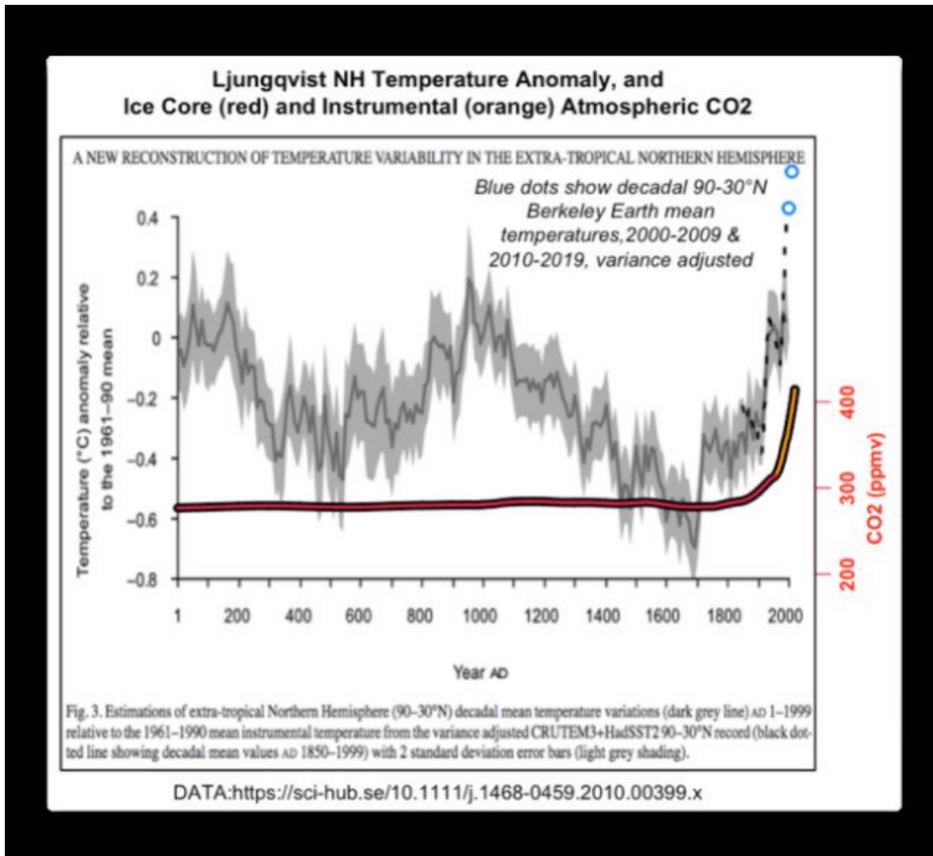


Fig.2: Temperatur-Anomalie im Vergleich zur CO₂ Konzentration in den letzten zweitausend Jahren.

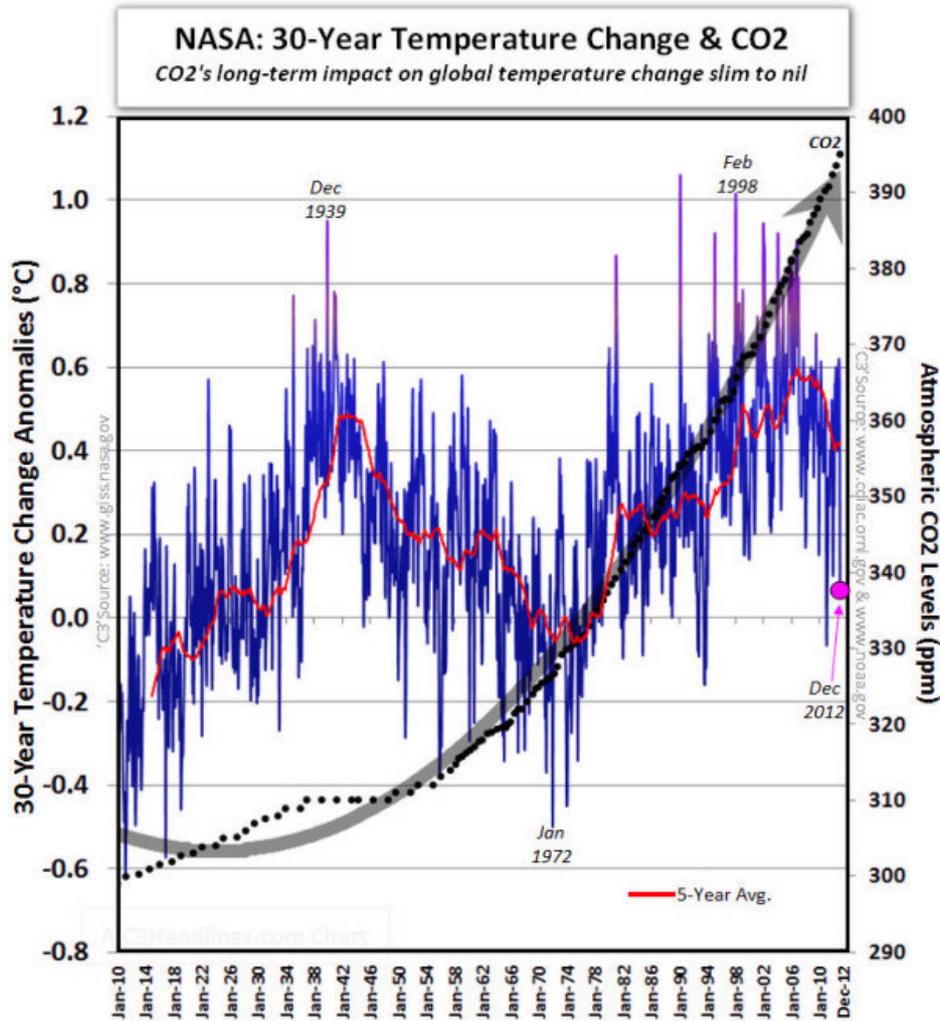


Fig. 3: Temperatur-Anomalie im Vergleich zur CO_2 Konzentration in den letzten 30 Jahren.

Aus Fig.1 ist deutlich erkennbar, dass die Temperatur mit Beginn des industriellen Zeitalters kontinuierlich stark wächst¹. Aus Fig.2 und Fig.3 ist auch das Anwachsen der Temperatur-Anomalie T_a (Schwankungen der Temperatur bzgl. eines Referenzjahres) über die Jahre hinweg deutlich sichtbar. Insbesondere die Veränderung von T_a in den letzten Jahrzehnten ist der Kern des Klimaproblems.²

¹Im Internet lassen sich sehr viele ähnliche graphische Darstellungen finden, z..B. <https://holoceneclimate.com/temperature-versus-co2-the-big-picture.html>

²Vorhersagen über die zukünftige Entwicklung können u.a. mittels Anpassung der

Die CO₂/Benzin Relation

Ein Baum³ absorbiert mittels **Phytosynthese** im Durchschnitt 30g CO₂/Tag. Bäume kann sich jeder vorstellen, daher wird in der folgenden Diskussion als **Einheit ein Baum pro Tag** verwendet. Der Einfachheit halber entspricht etwa

$$\boxed{1\text{kg CO}_2 \sim \text{Phytosynthese von 30 Bäumen/Tag}}$$

Ein Liter Benzin⁴ verursacht (im Verbrennungsmotor) im Durchschnitt 2,65 kg CO₂

Durchschnittlicher Ausstoß⁵ eines Autos: CO₂ in kg pro 100 km, in Klammer der Kraftstoffverbrauch in Liter

		Stadtverkehr	Landstraße	Autobahn	Stadtverkehr kg/Liter
Benzin	Kleinwagen	18 (7,3)	13 (5,1)	17 (6,9)	2.56
	Mittelklasse	25 (8,7)	14 (5,7)	19 (7,4)	2.87
	Oberklasse	32 (12,6)	22 (8,7)	19 (7,4)	2.53
Diesel	Kleinwagen	14 (4,5)	10 (3,1)	13 (4,1)	3.11
	Mittelklasse	21 (6,8)	15 (4,7)	16 (5,2)	3.08
	Oberklasse	28 (8,9)	19 (6,2)	26 (8,5)	3.14

Kraftstoffverbrauch/100km in Phytosynthese von Bäumen/Tag

		Stadtverkehr	Landstraße	Autobahn
Benzin	Kleinwagen	19	13	18
	Mittelklasse	23	15	19
	Oberklasse	33	23	19
Diesel	Kleinwagen	12	8	11
	Mittelklasse	18	12	14
	Oberklasse	23	16	22

5-Jahresmittel an geeignete Polynome und Fortsetzung deren analytischen Form (Extrapolation) erstellt werden.

³Dazu gibt es viele Quellen, sehr detailliert:

<https://www.cermeter-pflanzen.de/2018/12/22/wie-viel-co2-nimmt-ein-baum-auf/>

⁴Siehe zum Beispiel:

<https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/wie-viel-co2-steckt-in-einem-liter-benzin/>

⁵<https://www.co2online.de/klima-schuetzen/mobilitaet/auto-co2-ausstoss/#c162641>

Die CO₂/Fahrgeschwindigkeitsrelationen

Durchschnittliche Fahrzeugemissionen je Geschwindigkeit

	CO ₂ g/km	NO _x g/km
Tempo 100	146	0,286
Tempo 110	158	0,328
Tempo 120	172	0,416
Tempo 130	190	0,569

Relative Veränderung (Tempo 130 = 100%)⁶

	ΔCO ₂ %	ΔNO _x %
Tempo 100	-23,0	-49,7
Tempo 110	-16,6	-42,4
Tempo 120	-9,4	-27,0
Tempo 130	0	0

Eine Reduktion der Geschwindigkeit von 130 auf 100 ergibt einen Minderverbrauch von etwa 10% an Benzin⁷ (durchschnittlich etwa 1 L) und damit eine **Reduktion des CO₂ von 2,65 kg CO₂/100km**. In Bäumen/Tag ausgedrückt ist, bedeutet dies eine **Reduktion äquivalenter Photosynthese um etwa 80 Bäumen/Tag**

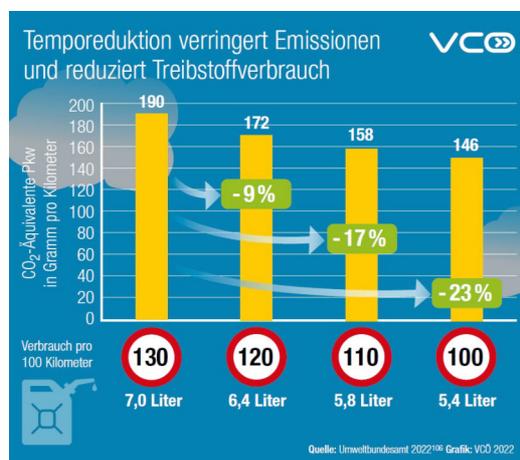


Fig. 4: Geschwindigkeitsreduktion

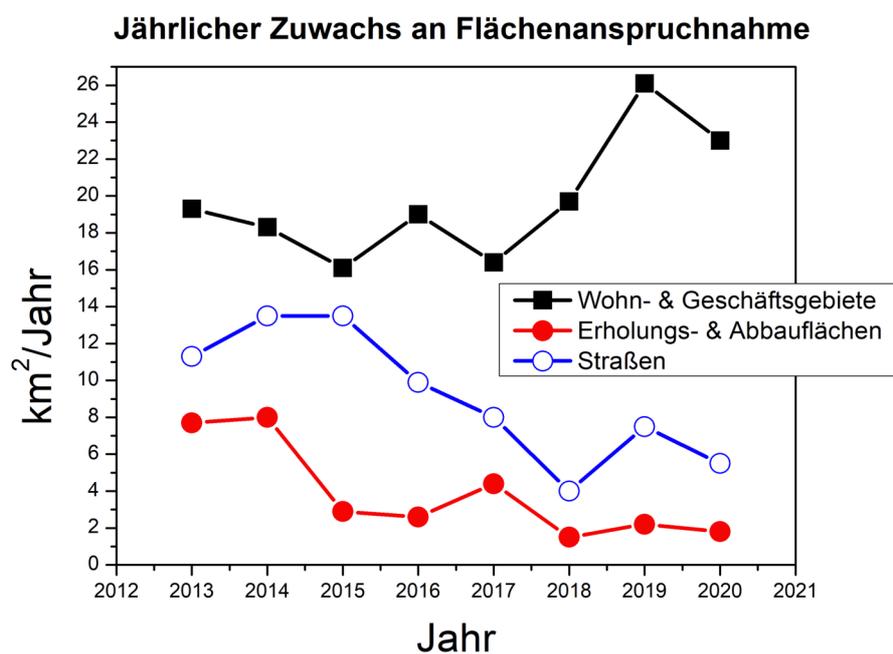
⁶<https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/mobilitaet/mobilitaetsdaten/tempo>

⁷<https://vcoe.at/service/fragen-und-antworten/welche-wirkung-hat-tempo-100-statt-130>

Bodenverwertung

Flächenanspruchnahmen

Um einen Überblick über den jährlichen Zuwachs an verbauten Flächen (Bodenversiegelung) zu bekommen, ist es interessant zu sehen, welche Zwecke damit verbundensind.⁸



Fig, 5: Flächenanspruchnahme: jährliche Zuwächse

⁸<https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/boden/flaechenanspruchnahme>

Durchschnittliche Flächeninanspruchnahme

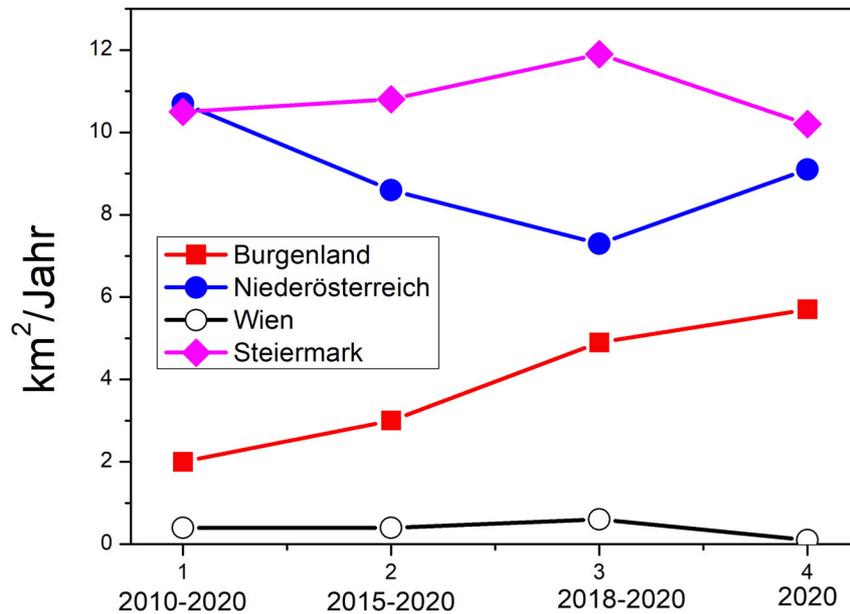


Fig. 6: Flächenanspruchnahme für einige Bundesländer

Aus der Statistik des Umweltbundesamts⁹ ist leicht zu erkennen, dass die Flächenanspruchnahme für Wohn- und Geschäftsbereiche über die Jahre hinweg zunimmt, während der Anteil für Erholung und Strassen abnimmt.

Pro Kopf Statistiken

Da die Bundesländer unterschiedliche Einwohnerzahl aufweisen, sind vor allem Pro-Kopf-Statistiken relevant. Für die tatsächlich versiegelte Fläche zeigt sich, dass Wien mit 58 m²/Kopf den bei weitem niedrigsten Anteil an versiegelten Flächen hat, der im Burgenland ist fast 10 Mal so groß.

⁹Bodenversiegelung versus Lebensmittelproduktion - Stadtmarketing Austria

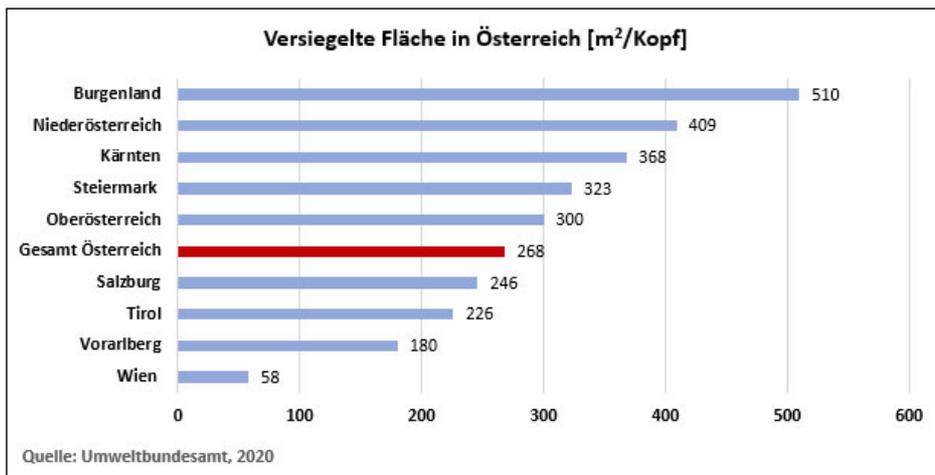


Fig. 7: Versiegelte Flächen in Österreich

Ein ähnlicher Vergleich bezüglich Strassen ist ganz besonders interessant, denn den Wienern und Wienerinnen stehen bloß je 1.5 Meter Strasse/Kopf zu Verfügung, also etwa ein Zehntel des Durchschnitts für Österreich.

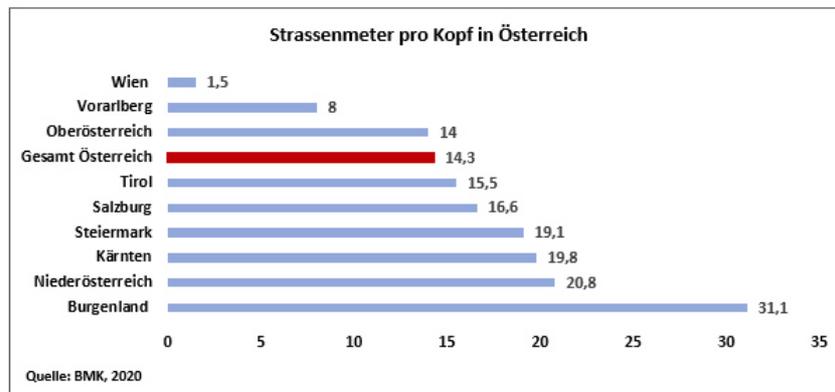


Fig. 8: Strassenmeter pro Kopf

Beispiel "Stadtstraße"

Die Stadtstrasse in Wien Donaustadt soll 3,2 km lang werden und 4 Spuren haben. Damit ergibt sich je nach Fahrbahnbreite die damit verbundene versiegelte Fläche

Fahrbahnbreite [m]	Versiegelte Fläche [km ²]
4	5,1
5	6,4
6	7,68

Es ist wichtig, sich Flächen vorstellen zu können: Für die Generalsanierung des Stephansplatzes und des Grabens¹⁰ wurden 36 400 Granitplatten verwendet entsprechend einer Gesamtfläche von 10.7 km². Bei einer Fahrbahnbreite von 4 m entspricht die Fläche der Stadtstrasse damit etwa der halben sanierten Fläche um den Stephansplatz.

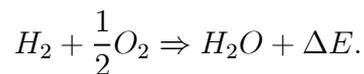
Energiebilanzen, "erneuerbare Energien"

Eine Energiebilanz ergibt sich aus dem erzieltem Gewinn an "Energie" verringert um alle für eine bestimmte Technologie notwendigen Energien (*siehe Anhang*).

Wasserstofftechnologie:

Im Prinzip sind drei physikalische Schritte involviert:

- (1) **Elektrolyse von Wasser** zur Erzeugung von Wasserstoff. Je nach Elektrolyseverfahren werden 40 bis 80 kWh zur Erzeugung von 1kg Wasserstoff benötigt.
- (2) **Kompression und Verflüssigung** von H_2 : Wasserstoffgas wird bei -253^0C verflüssigt (*Joule-Thompson Effekt*).
- (3) **Verbrennung (Oxidation)** von Wasserstoff:



Die freiwerdende Energiemenge ΔE beträgt: 289,5 kJ/mol = 0,08 kWh/mol = 40,2 kWh/kg H_2 . Der Energieaufwand für die Verflüssigung von Wasserstoff ist erheblich; je nach gewählter Technologie entspricht er mindestens etwa einem Fünftel des Heizwerts, oft aber sogar mehr als einem Viertel. Eine technologische Umsetzung für eine Verwertung von H_2 hat mit folgenden Fakten zu rechnen¹¹.

¹⁰https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20170313_OT0058/stephansplatz-generalsanierung-der-oberflaeche-startet

¹¹<https://www.tatup.de/index.php/tatup/article/view/1229/2324>

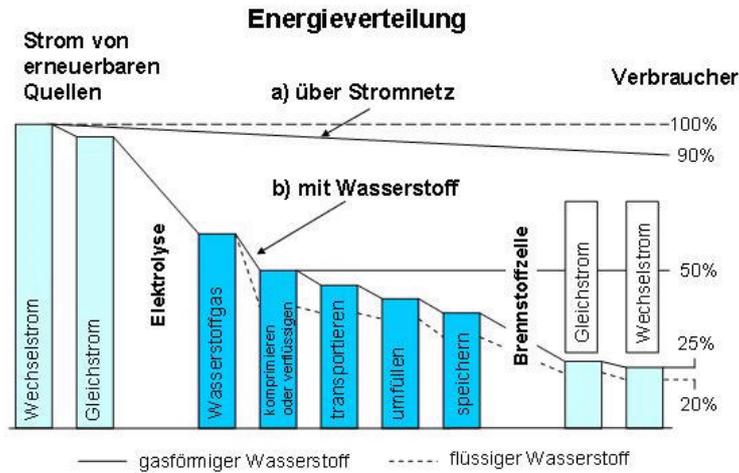


Fig. 9: Energiebilanz in der Wasserstofftechnologie

Tab.1: Typischer Energiebedarf für Erzeugung, Kompression bzw. Verflüssigung, Transport und Nutzung von Wasserstoff

Verfahrensschritte	Technische Angaben	Energieverluste (MJ / kg H ₂)	Verluste (in % des H ₂ Wasserstoff)
Elektrolyse	1,76 Volt, 1 atm	61	43
Kompression	1 bar - 200 bar	10	7
	1 bar - 400 bar	13	9
	1 bar - 800 bar	17	12
Verflüssigung	100 kg / h	65	46
	1.000 kg / h	45	32
	10.000 kg / h	35	28
Straßentransport	200 bar, 200 km	18	13
	200 bar, 400 km	36	25
	flüssig, 200 km	3	2
Pipeline	10 bar, 1.000 km	12	8
H ₂ -Elektrolyse an Tankstelle	entspricht 60.000 Liter Benzin pro Tag	80 *)	56
Betanken	100 bar auf 400 bar	5	4
Brennstoffzelle	Verstromung	142	50

*) einschl. Wasseraufbereitung, Kompression, Gebäudeenergiebedarf usw.; der Brennwert (H₀) von Wasserstoff beträgt 142 MJ / kg

Fig. 10: Daten zur Wasserstofftechnologie

Das Beispiel Wasserstofftechnologie zeigt, dass eine Energiebilanz recht umfangreich werden kann, da wirklich alle energetischen Aufwendungen berücksichtigt werden müssen.

Wärmepumpen

Wärmepumpen sind im Prinzip ein umgekehrter Kühlschrank. Energiebilanz:

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta E_{ext} ,$$

wobei ΔQ die "gewonnene" thermische Energie ist. Der Energiebedarf ΔE_{ext} zum Betrieb einer Wärmepumpe hängt sehr von der verwendeten Type (Luft, Wasser, Boden) ab und liegt bei mindest 30% von ΔE . Klarerweise, der Betrieb einer Wärmepumpe ist nicht nur vom Wirkungsgrad (*siehe Anhang*) einer Wärmepumpe abhängig, sondern vor allem auch von den Kosten zum Erzeugen von ΔE_{ext} (Strompreis inkl. Leitungskosten). Sinnvoll ist daher Wärmepumpen mit Photovoltaiktechnologien zu verbinden. Da ΔE im Prinzip positiv ist, wird diese Energiedifferenz zu Recht als "grüne" Energie bezeichnet. Die Bodenversiegelung ist minimal, da bei kleinen und mittelgroßen Pumpen nur etwa die Bodenfläche verfestigt werden muss oder bereits vorhanden ist. Bei Großwärmepumpen sind allerdings Fabrikshallen notwendig.¹²

Windräder, Wasserkraft

Die Idee Translationenergie (Wind, fließendes Wasser) in Rotationsenergie umzusetzen ist sehr alt, wie vertraute Bilder von Mühlen zeigen. "Windenergie" oder die kinetische Energie eines Baches oder Flußes ist "kostenlos", ist "erneuerbar". Allerdings erst die von Faraday (und mehr oder weniger gleichzeitig von Henry) 1831 entdeckte **elektromagnetische Induktion**¹³ gestattet Rotationsenergie in "elektrische Energie" zu verwandeln, *siehe Anhang*.

¹²<https://www.wienenergie.at/blog/staerkste-grosswaermepumpe-mittleuropas-pumpt-in-wien-2/>

¹³P. Weinberger, Faraday and the Philosophical Magazine, Phil. Mag. 93, 1455 (2013).



Fig 11: Historische Mühlen

Das Prinzip dieses Effekts lässt sich am besten mit einem einfachen Bild erklären: Werden um einen metallischen Stab gewickelte Kupferdrähte in einem Magnetfeld (zwischen den Polen eines Magneten) gedreht, fließen Elektronen entlang des Stabes, d.h. an einem Ende des Stabes kann elektrischer Strom abgegriffen werden.

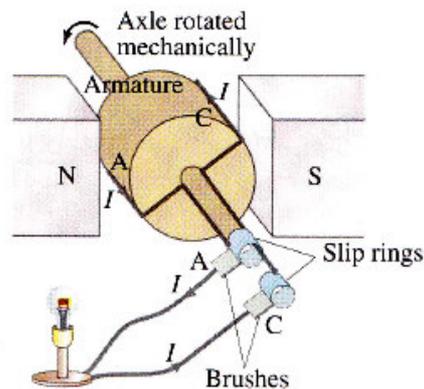


Fig. 12: Prinzip eines Generators

Genauso funktionieren, *siehe Anhang*, alle Wasserkraftwerke und Windräder, die erzeugte Energie ist erneuerbar und darf in Anspruch nehmen als "grüne Energie" bezeichnet zu werden. Eine Energiebilanz hat selbstverständlich auch die Energien zur Erzeugung von Wasserkraftwerken bzw. Windrädern zu berücksichtigen und natürlich ist der Aspekt der Bodenverbauung in Betracht zu ziehen. Im Falle von Wasserkraftwerken ist der Eingriff in die umgebende "Natur" allerdings beträchtlich.

Photovoltaik

Zur "Energieumwandlung" wird der **photoelektrische Effekt** von Solarzellen genutzt, die ihrerseits wiederum zu so genannten Solarmodulen verbunden werden. Die erzeugte Elektrizität kann direkt genutzt, in Stromnetze eingespeist oder in Akkumulatoren gespeichert werden. Vor der Einspeisung in Wechselspannungs-Stromnetze wird die erzeugte Gleichspannung von einem Wechselrichter umgewandelt. Das System aus Solarmodulen und den anderen Bauteilen (Wechselrichter, Stromleitung) wird üblicherweise als Photovoltaikanlage bezeichnet.¹⁴

2020 hielt die Internationale Energieagentur fest, dass Photovoltaikanlagen, die auf guten Standorten und mit günstigen institutionellen Bedingungen errichtet werden, inzwischen die günstigste Form der Stromerzeugung der Geschichte sind. Einer 2017 im Fachjournal *Nature Energy* erschienenen Studie zufolge kann die Photovoltaik bis zum Jahr 2050 ca. 30–50 % des weltweiten Strombedarfs technisch und wirtschaftlich decken und damit die dominierende Art der Stromerzeugung werden.

Die Nennleistung von Photovoltaikanlagen wird in kWp (kiloWatt peak¹⁵) angegeben und bezieht sich auf die Leistung bei international festgelegten-Testbedingungen entsprechend normierter Einstrahlung.

Der Ertrag pro Jahr wird in Kilowattstunden (kWh) gemessen. Standort und Ausrichtung der Module sowie Verschattungen haben wesentlichen Einfluss auf den Ertrag, wobei in Mitteleuropa Dachneigungen von 30 – 40° und Ausrichtung nach Süden den höchsten Ertrag liefern. Ein Solarkataster liefert sehr detailliert die besten Standorte.

Besonders interessant sind natürlich Standorte, bei denen in Folge bereits vorhandener Gebäude kein weiterer Boden versiegelt wird, also Dächer wie z.B. die Großanlage am Dach des Donauzentrums, Dachanlagen im städtischen Bereich oder einfach nur bei Einfamilienhäusern. Bei Neuinstallationen haben übrigens den geringsten Bodenverbrauch Solaranlagen auf Masten.

¹⁴<https://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaik>,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaikanlage>

¹⁵"Peak" bezog sich ursprünglich auf die maximale Sonneneinstrahlung.



Fig. 13: Solaranlage am Dach des Donauzentrums in Wien Donaustadt.



Fig. 14: Photovoltaikanlage auf einem Hausdach.

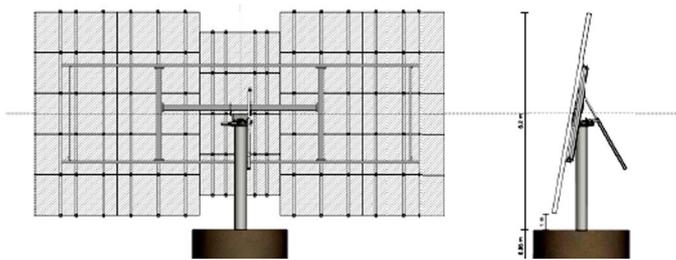


Fig. 15: Photovoltaikanlage auf Masten

Batterienspeicher

Es ist wohlbekannt, dass der Photonendruck am höchsten in den Sommermonaten ist. Um Photovoltaikanlagen auch während der Wintermonate optimal zu benutzen, ist eine Kombination mit einem Batterienspeicher eine empfehlenswerte Lösung. Aus einer schematischen Übersicht des täglichen Stromverbrauchs ist ersichtlich, dass während der Zeiten, in denen keine Energie durch Photovoltaik erzeugt wird, einem Batterienspeicher Energie entnommen werden kann, der untertags wieder aufgeladen wird. Vor allem in den Wintermonaten kann das Laden und Entladen des Speichers zur Effizienz der Erzeugung und des Verbrauchs an Energie entscheidend beitragen.

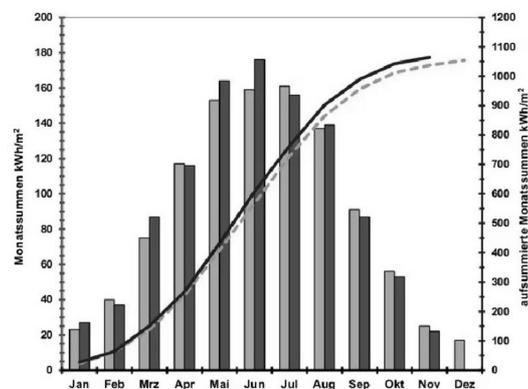


Fig. 16: Maximale Sonneneinstrahlung

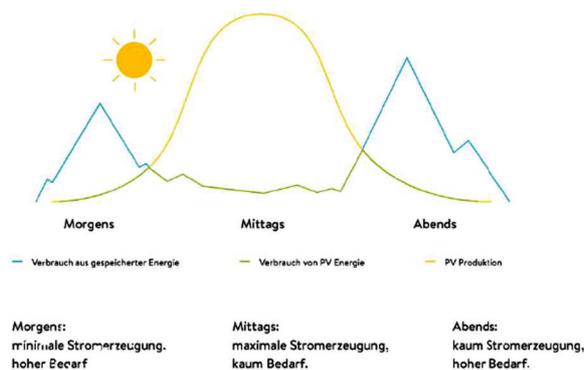


Fig. 17: Typischer täglicher Stromverbrauch

Kritische Anmerkungen

Selbstverständlich haben Technologien mit der geringster Bodenversiegelung den absoluten Vorrang, nämlich Windräder und vor allem Photovoltaik, da es viele Quadratkilometer an ungenutzten Dächern gibt. Während Windräder kaum für den privaten Gebrauch gedacht sind, bleibt im Grunde genommen die Photovoltaik als Mittel zu "Energieneutralität" im kleinen Maßstab.

Materialanforderungen bei der Wasserstofftechnologie

Zwei besondere Eigenschaften von Wasserstoff müssen beachtet werden, nämlich (1) Wasserstoff diffundiert in die Oberflächenbereiche von Metallen¹⁶ und (2) besitzt keine Schmiereigenschaften, wenn für Motore gedacht. Die Diffusionseigenschaften von H_2 bedingen u.a. besondere Eigenschaften der verwendeten Materialien. In Wasserstoffverbrennungsmotoren müssen Schmiermittel zugesetzt werden.

Öffentliche Subventionen

Öffentliche Subventionen helfen nur für Photovoltaik-Kleinanlagen, da damit lediglich bei Investitionen bis etwa €25000 die anfallende Umsatzsteuer abgedeckt ist. Bei größeren Anlagen, die auch zur Wärmeversorgung verwendet werden können, scheint das öffentliche Interesse nicht gerade groß zu sein: die verbleibende Differenz zur Umsatzsteuer muss in die Investitionskosten eingerechnet werden..

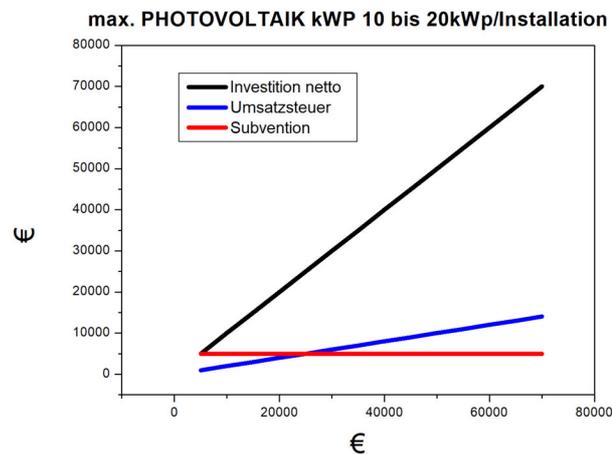


Fig. 18: Umsatzsteuer bei Investitionen in Photovoltaikanlagen

¹⁶Eine zeitlang wurde sogar diskutiert, Palladium als Wasserstoffspeicher zu verwenden.

Für eine Nutzung der Erdwärme (Tiefenbohrungen) gibt es übrigens zur Zeit keine öffentlichen Subventionen.

Beschränkungen bei Photovoltaik

Der Ausbau von mittelgroßen Anlagen ist beschränkt durch die Kapazität, mit der mittels Photovoltaik erzeugter elektrischer Strom in das öffentliche Netz eingespeist werden kann. Die Leitungskapazitäten der Energieversorger sind bei weitem nicht ausreichend, um einem substantiellen Ausbau an Photovoltaik gerecht zu werden.

Private Betreiber einer PV-Anlage $> 25\text{kWp}$ oder ab einer Einspeisung von $12\,500\text{kWh}$ ($12,5\text{ MWh}$) pro Jahr werden als Unternehmen gewertet und sind somit einkommensteuerpflichtig.¹⁷ Genauso, wie die zuvor diskutierte Umsatzsteuer ist diese Bestimmung zur Einkommensteuer für eine zukunftsorientierte Klimapolitik nicht gerade zielgerichtet.

Abgesehen von zur Zeit bestehenden Lieferverzögerungen, stellt vor allem der Mangel an Facharbeitern und entsprechenden Ausbildungsstätten eine Beschränkung von Photovoltaik dar.

Beschränkungen bei Windrädern

Dem vermehrten Ausbau von Windrädern stehen mitunter merkwürdige Vorstellungen bzgl. des "Landschaftsschutzes" im Wege. Windräder sind nicht häßlicher als Wasserkraftwerke oder – um es provokant zu sagen – als so manches Einkaufszentrum.

¹⁷<https://www.bmf.gv.at/themen/klimapolitik/steuerliche-aspekte-bei-photovoltaikanlagen-von-privatpersonen/ueberschusseinspeisung.html>

Appendix:

Warum ist die CO_2 Konzentration eine globale Größe?

Das Maximum in der Maxwell-Boltzmann Geschwindigkeitsverteilung¹⁸ von Teilchen eines *idealen* Gases, c_w , und die die "mittlere thermische Geschwindigkeit" \bar{c} sind gegeben¹⁹ durch

$$c_w = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad \bar{c} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}},$$

wobei k die Boltzmann-Konstante ist, T die Temperatur in Grad Kelvin und m die Masse des Teilchens. Für *reale* Gase treffen bei Raumtemperatur 20⁰ Celsius folgende Werte zu:

Gas		\bar{c} [ms ⁻¹]
Wasserstoff	H	1754
Helium	He	1245
Wasserdampf	H_2O	585
Stickstoff	N_2	470
Kohlendioxid	CO_2	375

375 Meter pro Sekunde für CO_2 = 22,5 Kilometer pro Minute!

Gedankenexperiment

Könnte man auf einem CO_2 Molekül sitzen, dann wäre man von Wien aus

in zwei Minuten und 28 Sekunden in St. Pölten

in 5 Stunden in New York und

in 7 1/2 Stunden in Los Angeles.

Gasmoleküle bewegen sich bei Raumtemperatur mit Überschallgeschwindigkeit und genau deshalb ist die CO_2 Konzentration keine lokale Größe.

¹⁸<https://de.wikipedia.org/wiki/Maxwell-Boltzmann-Verteilung>

¹⁹<https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/einfuehrung-in-die-vakuumentchnik/grundlagen/thermische-teilchengeschwindigkeit/>

Energiebilanzen

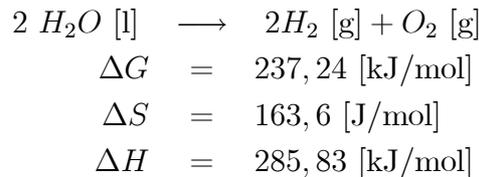
Energiebilanzen beruhen auf den Grundgesetzen der Thermodynamik, formal dargestellt als

$$\begin{aligned}F &= U - TS, \\G &= H - TS, \\H &= U + pv,\end{aligned}$$

wobei F die "Helmholtz freie Energie" ist, G die "Gibbs freie Energie", F die "Helmholtz freie Energie", H die "Enthalpie", T die (absolute) Temperatur, S die "Entropie", p der Druck und v das Volumen.

Beispiel **Elektrolyse von Wasser:**

Zur Erzeugung von Wasserstoff²⁰ bei $T = 298,15^{\circ}\text{K}$ ($= 25^{\circ}\text{C}$), $p = 1,013 \cdot 10^5$ [Pa] (1Atm) entspricht die Energiebilanz den folgenden Werten²¹:



Wärmepumpen

Das unterliegende physikalische Prinzip ist der sog. Carnot Prozess²². In

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta E_{ext},$$

ist ΔQ die thermische Energie ist und ΔE_{ext} die Energie (Strombedarf) zum Betreiben der Wärmepumpe. ΔQ ist bestimmt durch den Wirkungsgrad η der "Carnot Maschine",

$$\eta = \frac{\Delta Q}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

wobei T_1 die Temperatur des "heißen Reservoirs" (Q_1) ist und T_2 die des "kalten Reservoirs" (Q_2),

²⁰<https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserelektrolyse>

²¹In den Aggregatzustandsbezeichnungen bedeutet [l] "liquid" (flüssig) und [g] gasförmig.

²²P. Weinberger, The discovery of Thermodynamics, Phil. Mag. 93, 2575 (2013).

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 .$$

Das "heiße Reservoir" ist entweder Luft, Wasser (Abwasser) oder Erdwärme (Sole bei Tiefenbohrung)

Rotationsenergie und elektromagnetische Induktion

Die kinetische Rotationsenergie (für eine starre Achse) E_R ist gegeben durch das "Trägheitsmoment" I und die "Winkelgeschwindigkeit" ω , die kinetische Translationenergie E_T durch die Masse m und die Geschwindigkeit v ,

$$E_R = \frac{1}{2} I \omega^2 , \quad E_T = \frac{1}{2} m v^2 .$$

Im Gleichgewicht $E_R = E_T = E$ ist die Winkelgeschwindigkeit ("Schnelligkeit der Drehung") demnach proportional der Wurzel aus der aufgewendeten Energie E .

$$\omega = \sqrt{\frac{2E}{I}}$$

Das **Faraday Gesetz** für die elektrische Induktion lautet²³:

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} ,$$

woraus man erkennen kann, dass das elektrische Feld \vec{E} von der zeitlichen Veränderung des Magnetfeldes \vec{B} abhängt. Der Strom ("current") \vec{J} ist proportional zum elektrischen Feld (makroskopisches **Ohm'sches Gesetz**)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} .$$

σ , die sog. "elektrische Leitfähigkeit", A die Querschnittsfläche und L , die Länge eines "Drahts",

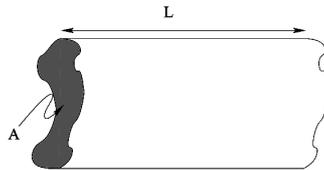


Fig. 19: Abmessungen elektrischer Leiter

²³ $\text{rot } \vec{E} = \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \hat{e}_x + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \hat{e}_y + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \hat{e}_z$
 E_x, E_y, E_z sind die Komponenten des elektrischen Feldes, $\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$ die kartesischen Einheitsvektoren.

bestimmen den Widerstand R ,

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{L}, \quad V = I \left(\frac{L}{\sigma A} \right) = IR.$$

Aus dieser kurzen Skizze der elektrischen Stromerzeugung durch "Windenergie" bzw. in Wasserkraftwerken ist offensichtlich, dass sehr viel klassisches technisches Wissen über die einzelnen Schritte vorhanden ist und wartet darauf, benutzt zu werden.

Der photoelektrische Effekt

Während das Prinzip von Wärmepumpen und der Erzeugung elektrischer Energie mittels Windräder oder durch Wasserkraftwerke auf physikalische Errungenschaften des 19. Jahrhunderts basieren, beruht Photovoltaik auf Erkenntnissen der Physik des 20. Jahrhunderts²⁴. Der von Einstein 1903 postulierte photoelektrische Effekt²⁵ führte kombiniert mit den Transistoreigenschaften von Halbleitern²⁶ (Bell Labs, 1947) letztlich zur Photovoltaik (Anwendung des "inneren photoelektrischen Effekts")

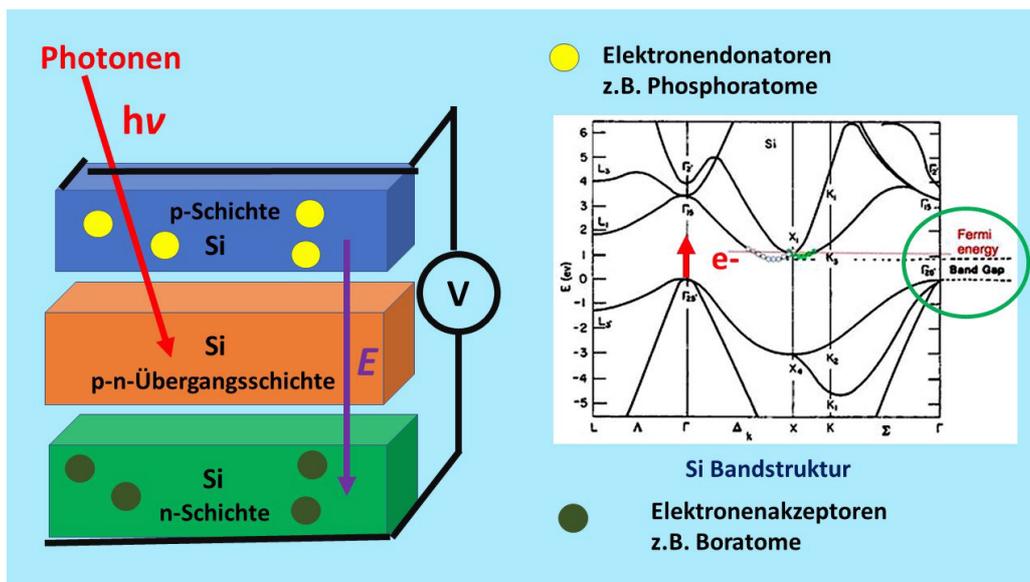


Fig. 20: Das physikalische Prinzip von Photovoltaik Zellen

²⁴Das chemische Element Silizium wurde bereits 1824 entdeckt.

²⁵Aus dem gleichen Jahr stammt übrigens seine "spezielle Relativitätstheorie".

²⁶Noch in den 50er Jahren wurde die Halbleiterphysik als "Orchideen Wissenschaft" bezeichnet.

Eine Photovoltaik-Zelle besteht im wesentlichen aus drei dünnen Schichten von Silizium (Si). Die oberste Schichte ("p-Schichte") ist mit Fremdatomen mit Donoreigenschaften, wie z.B. Phosphor (P , $Z = 15$, elektronische Konfiguration $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$; als Ion P^+ : $\dots 3p^2$) dotiert, die unterste Schichte ("n-Schichte") mit Fremdatomen mit Akzeptoreigenschaften, z.B. Bor (B , $Z=5$, $1s^2 2s^2 2p^1$; als Ion B^- : $\dots 2p^2$). In Folge der unterschiedlichen "Ladungsverhältnisse" entsteht ein schwaches elektrisches Feld \vec{E} zwischen der p- und der n-Schichte.

Weisen die in die innere Schichte eintreffenden Photonen eine Energie auf, die größer ist als die Bandlücke²⁷ ("bandgap"), werden Valenzelektronen des Silizium über das Fermi-Niveau angeregt. Diese Elektronen sind frei beweglich und in Folge des schwachen elektrischen Feldes entsteht ein elektrischer Strom, der mittels Kontakte abgegriffen werden kann. Übrigens, ist die Oberfläche der obersten Silizium Schichte gerippt, dann werden die Richtungen der einfallenden Photonen im Inneren chaotisch.

Das Prinzip von Photovoltaik-Zellen beruht auf Anwendungen der Quantenmechanik und Strukturkenntnissen im Rahmen der Festkörperphysik. Die Zellen können in Reihe geschaltet werden und liefern so den "makroskopisch" erwünschten elektronischen Strom. Die technischen Voraussetzungen sind (1) die Herstellung von reinem Silizium, (2) die Erzeugung ultradünner Si-Schichten, (3) die Implantierung von Fremdatomen und (4) das Anheften von Leitungselementen. Eine Energiebilanz hat selbstverständlich alle für die Erzeugung von Photovoltaikzellen und die elektrische Ausstattung in Betracht zu ziehen.

Peter Weinberger, Mai 2023
<http://www.pwein.at>

²⁷Energiebänder sind Abbildungen der elektronischen Energien in Festkörper. Die Energiedifferenz zwischen dem höchsten Valenzzustand und dem Fermi Niveau bezeichnet man als Bandlücke.