

# ViaGialla

## Wegbeschreibung für Gebäude in eine nachhaltige Energie-Zukunft

### Report

**Author(s):**

Leibundgut, Hansjürg

**Publication date:**

2007

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005391899>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

# viaGialla

Wegbeschreibung für Gebäude  
in eine nachhaltige Energie-Zukunft



**viaGialla**

---

**Übersicht** **viaGialla – Wegbeschreibung für Gebäude**  
**in eine nachhaltige Energie-Zukunft**

**Einführung** Motivation / Seite 02  
Unser Team / Seite 03  
Unsere Mittel / Seite 04

**Teil A** **viaGialla – Weg und Ziel** / Seite 05 – Seite 36

**Exkurs** Stromeffizienz im Gebäude / Seite 24  
Stromspeicherung und Digitalstrom im Gebäude / Seite 25  
Schrittweise Transformation der Gebäude / Seite 26  
Stabilisierung des Stromverbrauchs / Seite 27

**Teil B1** **Thermodynamische Grundlagen** / Seite 38 – Seite 48

**Teil B2** **Technologische Grundlagen** / Seite 49 – Seite 55

**Fazit** Hypothese / Seite 56

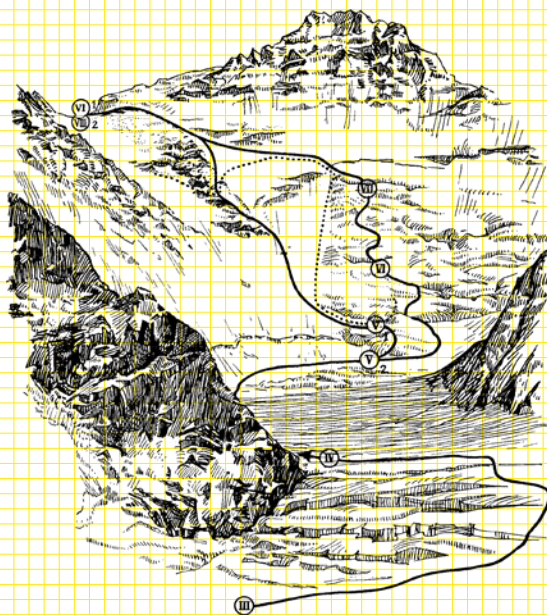
**Anhang** Quellenverzeichnis und Bildnachweis / Seite 57  
Impressum / Seite 58

## Einführung **Motivation**

Zu jedem Ziel führen verschiedene Wege; auch zum Ziel der Energieversorgung der Schweiz im Stoffkreislauf. Die vorliegende Arbeit ist die Beschreibung einer Route, die mir als erfahrenem *Expeditionsleiter* als attraktiv und machbar erscheint und für deren Planung ich meine Kraft und Zeit einsetze. Um mich nicht zu verzetteln, konzentriere ich mich auf diese Variante, werde in den kommenden Jahren den Weg präzisieren und die Ausrüstung überprüfen, ergänzen, austauschen. Andere Varianten und Wege auf den Gipfel zu gelangen erkenne ich an und betrachte diese als Herausforderung für andere Expeditionen. Mein Interesse aber gilt der *viaGialla*. Unser Team wird die Route detaillierter beschreiben, neue

Werkzeuge entwickeln, die Kosten und die Auswirkungen der Expedition immer präziser planen, so gut, dass viele sich mit uns auf den Weg machen werden. Jährlich werden wir einmal Bericht erstatten und unsere Homepage <http://www.viagiabella.ch> neu aufschalten, immer exakt am 0X.OX.OX um 0X.OX Uhr, erstmals am 07.07.07 um 07.07 Uhr.

*Prof. Dr. Hansjürg Leibundgut*  
ETH Zürich



---

Einführung **Unser Team**

**Baldini, Luca**

Dipl. Masch.-Ing. ETH

**Blatter, Max**

Geschäftsführer Energie-Atlas GmbH

**Bollier, Philipp**

Stud. Arch. ETH

**Krüger, Georg**

Stud. Arch. ETH

**Lzicar, Robert**

Dipl. Designer FH

**Leibundgut, Hansjürg**

Professor für Gebäudetechnik ETH

**Meggers, Forrest**

MS Enviromental Engineering

**Radaelli, Emma**

Stud. Arch. ETH

**Schlüter, Arno**

Dipl. Ing. Architekt, MAS ETH

**Thesseling, Frank**

Dipl. Ing. FH Architekt, MAS ETH

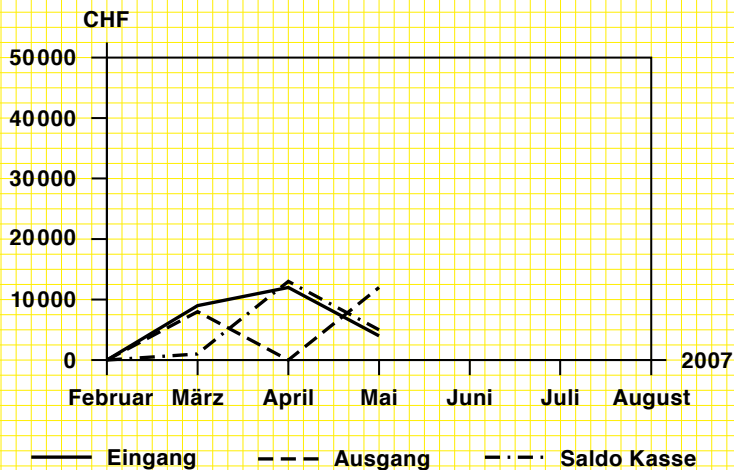
**Wellig, Beat**

Dozent für Verfahrenstechnik, HTA

## Einführung **Unsere Mittel**

Expeditionen benötigen hervorragende Menschen und etwas Geld. Bei den Menschen sind wir wählerisch, beim Geld nicht. Ihre Beträge, die Sie auf unser Konto überweisen, verwenden wir für:

- **Finanzierung der Öffentlichkeitsarbeit**, wie dieses Büchlein, Update der Homepage, später einen Kurzfilm, spezielle Inserate, etc.
- **Finanzierung von fachlichen Arbeiten**, die nicht durch die ETH finanziert werden sollten.
- **Finanzierung von Festen**, die wir mit Ihnen feiern (Defizitgarantie).
- etc.



---

## Inhalt A **viaGialla – Weg und Ziel**

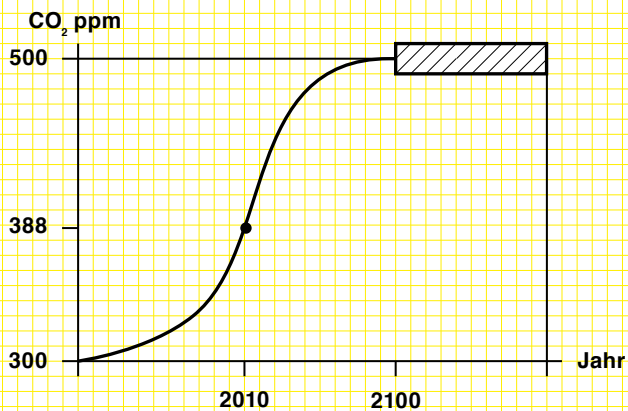
- A.1 Das Ziel / Seite 07
- A.2 Das abgeleitete Ziel / Seite 08
- A.3 Das abgeleitete Ziel für die Schweiz / Seite 09
- A.4 Risiken verschiedener Wege / Seite 10
- A.5 Die Wahl der Route / Seite 11
- A.6 Unser Lösungsansatz / Seite 12
- A.7 Der Ausgangspunkt / Seite 13
- A.8 Die bauliche Transformation der Gebäude / Seite 14
- A.9 Das Low-Ex-Gebäude nach dem Umbau / Seite 15
- A.10 Die Energiebilanz für die Wärmeerzeugung / Seite 16
  
- A.11 Die CO<sub>2</sub>-Emissionsbilanz / Seite 17
- A.12 Die Herkunft des Stroms / Seite 18
- A.13 Stromproduktion aus Photovoltaik an guten Standorten / Seite 19
- A.14 Siliziumbedarf für die Photovoltaik / Seite 20
- A.15 Stromproduktion aus Windkraft an guten Standorten / Seite 21
- A.16 Grosses Angebot von Wind und Sonne / Seite 22
- A.17 Geeignete Ernteplätze / Seite 23
- A.18 Die Stromlücke / Seite 28
- A.19 Rasanter Zuwachs an Wind- und Solarstrom / Seite 29
- A.20 Die Deckung der Stromlücke bis 2035 / Seite 30
- A.21 GUD-Kraftwerke zur Überbrückung / Seite 31



- 
- A.22 Reduktion der Brennstoffmenge / Seite 32
  - A.23 CO<sub>2</sub>-Reduktion / Seite 33
  - A.24 Versorgungssicherheit / Seite 34
  - A.25 Investitionen und Erlös / Seite 35
  - A.26 Gute Amortisation der Investition / Seite 36
  - A.27 Die Finanzierung / Seite 37

## A.1 Das Ziel

Das Ziel ist klar erkannt und unumstritten: Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre soll den eingezeichneten Grenzbereich von 500 - 550ppm nie überschreiten.



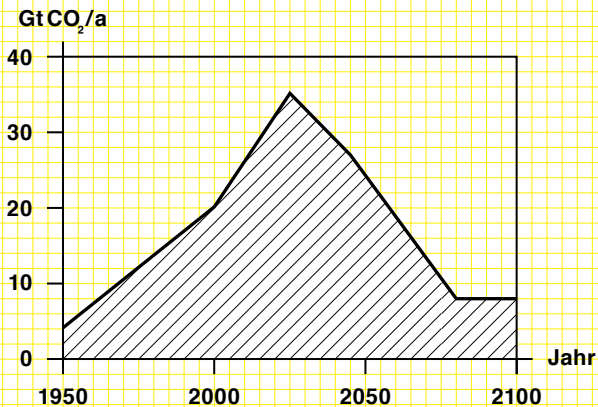
## A.2 Das abgeleitete Ziel

Die IPCC hat berechnet, dass – um das Ziel *Konzentration* < 550ppm zu erreichen – die anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen rasch von heute 23GtCO<sub>2</sub> auf unter 8GtCO<sub>2</sub> reduziert werden müssen.

Das abgeleitete Ziel der massiven und raschen CO<sub>2</sub>-Emissionsverminderung wird damit ein wesentliches Kriterium für die Wahl des einzuschlagenden Weges.

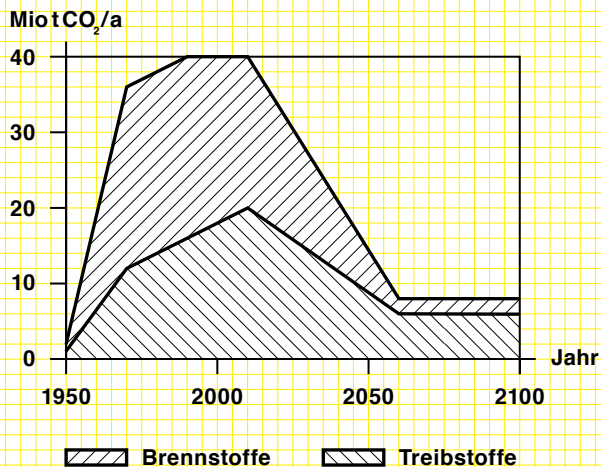
---

1GtCO<sub>2</sub>  
= 1 Giga-Tonne Kohlendioxid  
= 10<sup>9</sup> Tonnen Kohlendioxid



### A.3 Das abgeleitete Ziel für die Schweiz

Für die Schweiz bedeutet die Forderung nach einer Tonne CO<sub>2</sub> pro Person und Jahr eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses um den Faktor 5 innert ca. 50 Jahren. Da für die Gebäude (Brennstoffe) deutliche bessere Möglichkeiten bestehen [→ **B1**] als für den Verkehr (Treibstoffe), ist eine asymmetrische Reduktion sinnvoll. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Gebäudepark der Schweiz muss von 20Mio auf 2Mio Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr reduziert werden.



---

## A.4 Risiken verschiedener Wege

Das Ziel ist allgemein anerkannt.  
Die möglichen Wege zum Ziel bergen  
alle gewisse Risiken.

### **Energieeffizienz:**

Das Risiko besteht darin, dass mit der Effizienzsteigerung alleine das Ziel nicht erreicht wird. Neben den Massnahmen zur Verbrauchsreduktion gehören auch Gaskraftwerke GUD und Wärmekraftkopplungsanlagen WKK zu diesem Weg, weil mit diesen Technologien die fossilen Brennstoffe exergetisch effizienter genutzt, nicht aber ersetzt werden. Technologisch und ökonomisch bestehen wenig Risiken.

### **Kernenergie:**

Das Risiko ist im Betrieb und bei der Lagerung grundsätzlich gleich: Der

Austritt von Radioaktivität. Zum einem ist der extrem hohe potentielle Schaden bei einem wenig wahrscheinlichen Austritt von Radioaktivität sehr gross, zum anderen ist auch bei einem kleinen Störfall der globale psychologische Effekt als kritisch zu betrachten. Das ökonomische Risiko ist bei sicherem Betrieb sehr klein, jedoch im Schadensfall sehr gross.

### **Solar-/Windenergie:**

Das Risiko liegt nur bei der Geschwindigkeit in der Einführung. Der anfänglich hohe Preis behindert die rasche Einführung. Technologisch bestehen wenig Risiken, der Schadensfall hat sehr kleine Auswirkungen.

## A.5 Die Wahl der Route

Unsere Gruppe hat aus den vielen möglichen Wegen den Weg ausgewählt, der uns langfristig die kleinsten Risiken verspricht. Der Preis für diese Wahl, die Technologie an sich und die Wirkung werden nachstehend aufgezeigt.

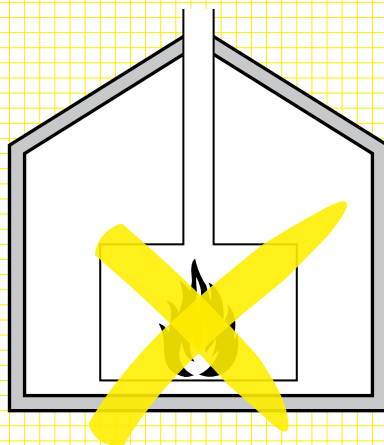
*viaGialla:*

*Die Kombination aus Energieeffizienz  
und Solar-/Windenergie!*

## A.6 Unser Lösungsansatz

Die Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre und der damit verbundenen Klimawandel zwingt zu drastischen Massnahmen.

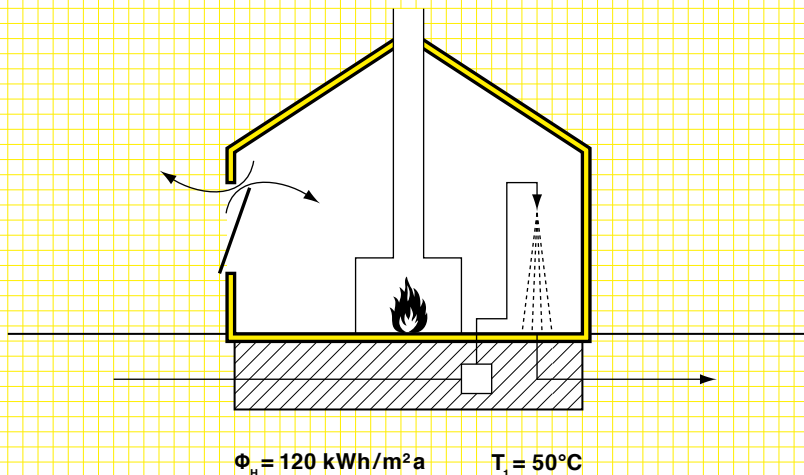
Wir sind überzeugt, dass die erlaubte Menge an fossilen Kohlenstoff für die Mobilität reserviert werden muss und, dass Gebäude *ohne Verbrennungsprozesse* betrieben werden müssen. Um zu verstehen, wie man künftig heizen und das Brauchwasser erwärmen wird, braucht es mehr physikalisches Verständnis als bisher [→ **B**].



## A.7 Der Ausgangspunkt

Die Ausgangssituation wird beschrieben durch ein bestehendes Gebäude mit einem spezifischen Wärmefluss  $\Phi = 120\text{kWh/m}^2\text{a}$  und mit hohen Vorlauftemperaturen ( $T_1$ ) des Heizungssystems. Dieses Gebäude ist überwiegend mit Gas oder Öl beheizt.

Die Technik für Beleuchtung, Lüftung, für die IT-Geräte und den Haushalt entsprechen dem Stand des Jahres 2005 eines durchschnittlichen Haushalts bzw. Arbeitsplatzes ausserhalb von Industrie/Gewerbe.





## A.8 Die bauliche Transformation der Gebäude

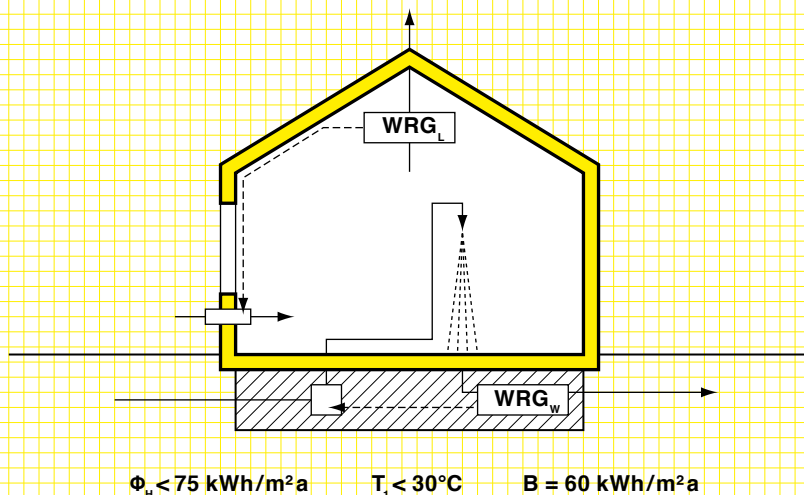
Die Transformationen am Gebäude selbst verändern die Parameterwerte so, dass die Voraussetzungen für den Wärmepumpenbetrieb mit einer Jahresarbeitszahl von  $> 5$  gegeben sind:

- gezielte Wärmedämmungen der Hülle:
  - gegen oben und unten
  - Fenster
  - Teile der Fassade so weit, dass alle Wandtemperaturen über  $17^{\circ}\text{C}$  liegen. (Herstellung der Strahlungssymmetrie in den Räumen.)
- Aufheizung der Zuluft in neuen Geräten mit grossen Wärmetauscherflächen, die die Luft von  $-10^{\circ}\text{C}$  auf  $20^{\circ}\text{C}$  mit einer Vorlauftemperatur ( $T_1$ ) von  $28^{\circ}\text{C}$  erwärmen können.
- Einbau von Wärmerückgewinnungsapparaten in der zentral abgesaugten Abluft und dem Dusch-Abwasser.

- Vergrösserung der Heizkörper

Die erneuerten Elemente der Bauten müssen so ausgelegt werden, dass am Ende der Umbaukette in spätestens 50 Jahren die Vorlauftemperatur unter  $30^{\circ}\text{C}$  liegt, dass in jedem Raum Strahlungssymmetrie besteht (keine Wände kälter als  $4^{\circ}$  unter der Raumlufttemperatur) und, dass Niedertemperaturquellen (B) erschlossen sind, die bei einer Temperatur  $> 5^{\circ}\text{C}$  80% der benötigten Wärmemenge liefern.

Diese Massnahmen sind kostengünstig, wenn sie im Rahmen der ohnehin notwendigen Umbaumassnahmen vorgenommen werden.



## A.9 Das Low-Ex-Gebäude nach dem Umbau

In die so transformierten Gebäude wird eine Wärmepumpe als Wärmeerzeuger eingesetzt.

80 % der Wärme  $\Phi$  für die Beheizung der Häuser und zur Aufbereitung des Warmwassers ist lokal abgeerntete Anergie [→ **B1.9**].

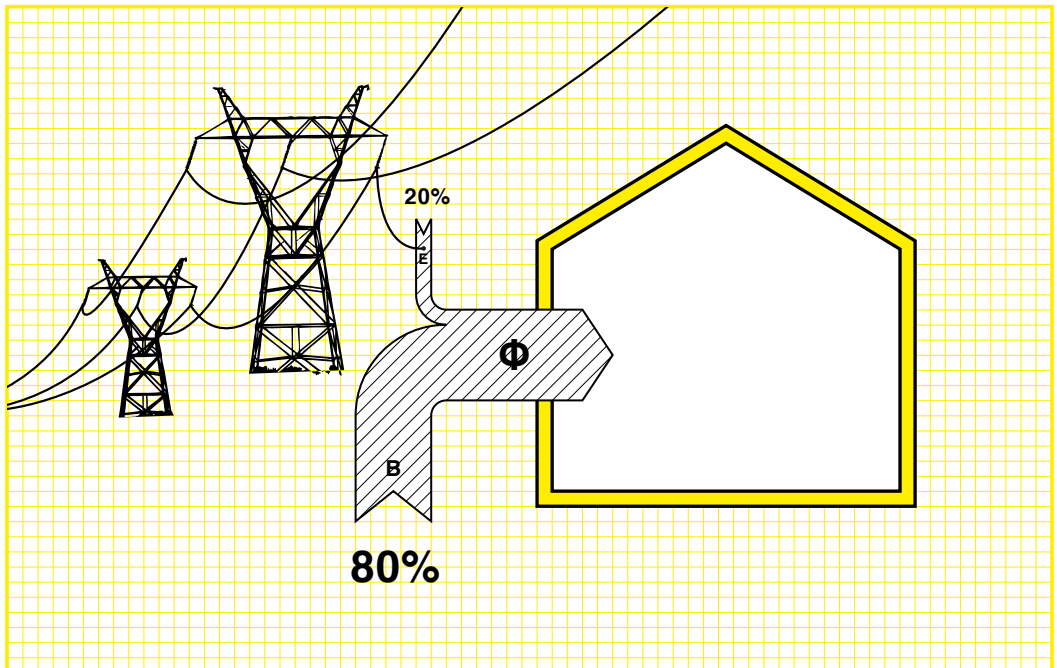
20 % der Wärme  $\Phi$  ist dem Gebäude zugeführte Exergie, die in Form von elektrischem Strom geliefert wird.

90 % aller bestehenden Gebäude der Schweiz können innerhalb von 50 Jahren in Low-Ex-Gebäude umgebaut werden.

---

Energiekennzahl Wärme und charakteristische Temperaturen nach Umbau in ein Low-Ex-Gebäude:

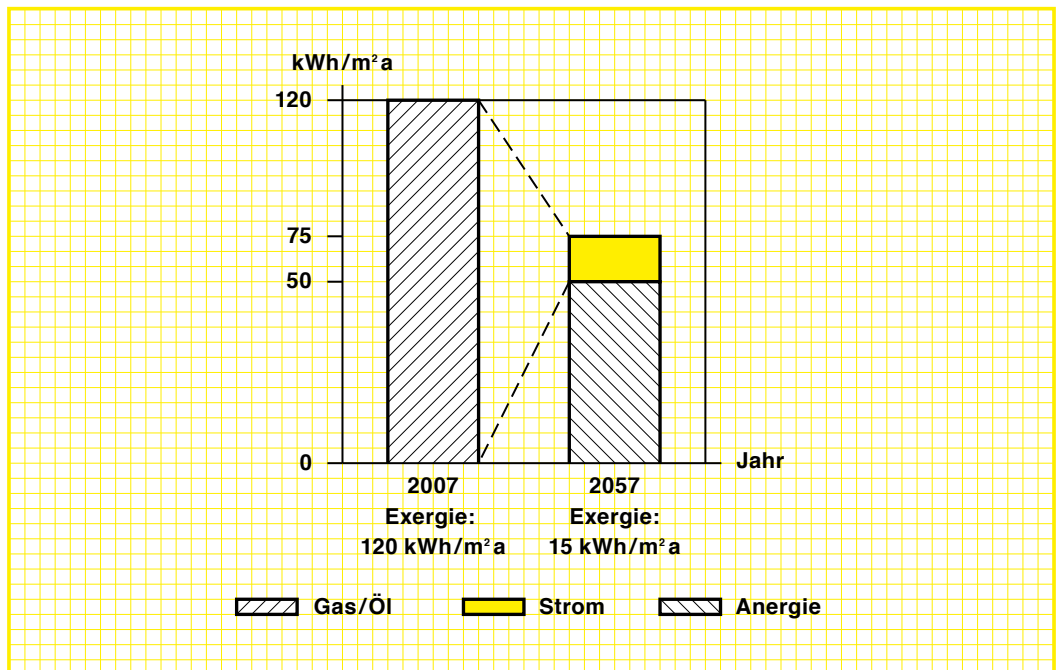
- $Q_H < 75 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$
- $T_1 < 30^\circ \text{C}$  max. Vorlauf Heizung
- $T_2 > 5^\circ \text{C}$  min. Anergietemperatur



## A.10 Die Energiebilanz für die Wärmeerzeugung

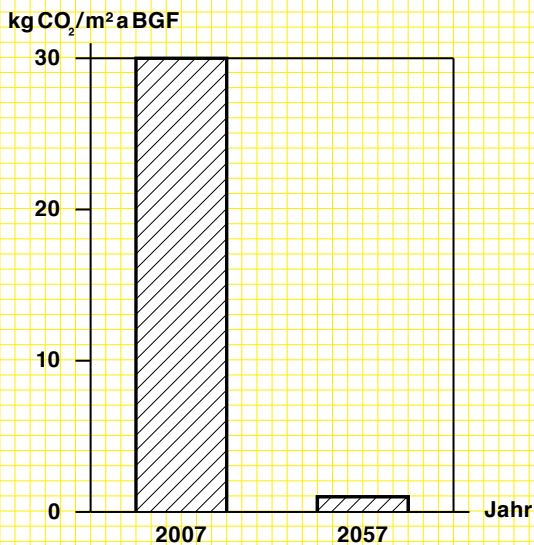
Die Massnahmen bewirken, dass dem Gebäude bzw. dem Grundstück nur noch  $15\text{kWh/m}^2\text{a}$  Strom anstatt  $120\text{kWh/m}^2\text{a}$  Öl/Gas von ausserhalb zugeführt werden muss.

Mit dem Einbau der Wärmepumpe wird erreicht, dass 80% des Wärmeflusses  $\Phi$  aus erneuerbarer Anergie (*Umweltwärme*) stammt.



## A.11 Die CO<sub>2</sub>-Emissionsbilanz

1m<sup>2</sup> beheizte Fläche braucht neu 15kWh/a Strom für die Wärmepumpe. Dieser Strom wird zu 90% aus erneuerbaren Energiequellen (Solarstrahlung, Wind, Wasser, Geothermie, etc.) gewonnen. 10% des Stroms dürfen aus öl-/gas-betriebenen Kraftwerken stammen, die einen elektrischen Wirkungsgrad von mehr als 50% aufweisen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gaskraftwerk bewirken, dass dem Quadratmeter beheizte Fläche noch 1kgCO<sub>2</sub>/a zugeordnet werden muss.



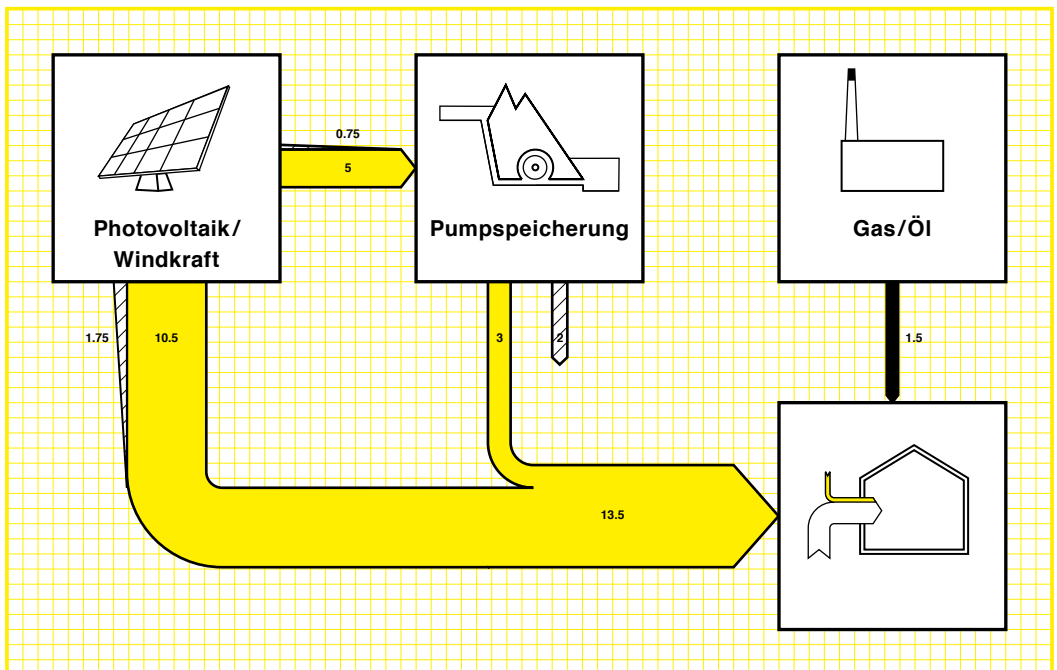
## A.12 Die Herkunft des Stroms

Die Produktion der  $15\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$  Strom erfolgt zu 90% aus Solar- und Wind und zu 10% aus öl-/gasbefeuelten GUD-Kraftwerken.

78% des Solar- und Windstroms wird ohne Zwischenspeicherung, 22% mit Zwischenspeicherung dem Gebäude zugeführt.

Das Gebäude erhält demnach rund 30% des Stroms aus einer speicherbaren Energieform (Öl, Gas, Wasser mit Höhendifferenz), dieser Strom kann bewirtschaftet werden.

Mittels Photovoltaik und Wind müssen inkl. Transportverluste über  $\varnothing 1500\text{km}$  rund  $18\text{kWh}/\text{m}^2_{\text{BFGa}}$  produziert werden.



## A.13 Stromproduktion aus Photovoltaik an guten Standorten

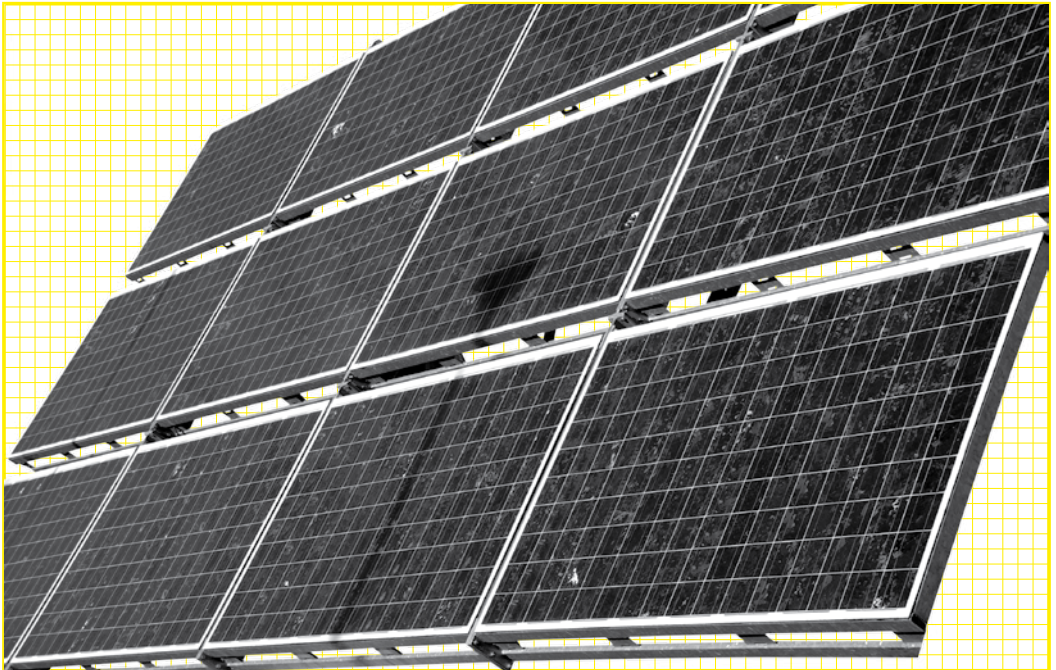
1m<sup>2</sup> aktive Photovoltaikfläche, der Sonne zwei-achsig nachgeführt, produziert pro Jahr 400kWh Strom an einem guten Standort. Zur Deckung der 18kWh/m<sup>2</sup>a Strom braucht es 0.05m<sup>2</sup> aktive Photovoltaikfläche mit einer Peak-Leistung von ca. 9W.

---

$$\begin{aligned} I_0 \text{ (horizontal)} &= 1800\text{kWh/m}^2\text{a} \\ I_0 \text{ (nachgeführt)} &= 2250\text{kWh/m}^2\text{a} \\ \eta \text{ (PV)} &= 0.18 \\ E \text{ (nachgeführt)} &= \text{ca. } 400\text{kWh/m}^2\text{a} \end{aligned}$$

---

$$\text{PV/m}^2 \text{ Wohnfläche} = 0.05\text{m}^2$$



## A.14 Siliziumbedarf für die Photovoltaik

Im Privatbereich verbraucht der Durchschnitts-Schweizer rund 2000kWh Strom pro Jahr. Diese Menge wird produziert von 5m<sup>2</sup> aktiver Solarzellenfläche, der Sonne im Süden nachgeführt [→ A.13].

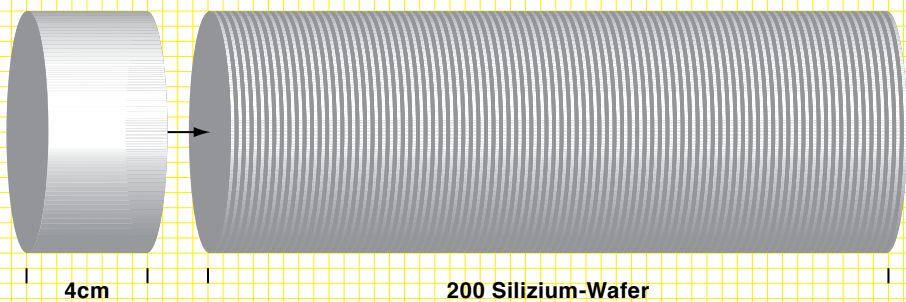
Mit der zur Zeit besten Technologie (Zellendicke 0.12mm, Schnittbreite 0.08mm) werden 200 Wafer (16cm × 16cm) benötigt, für deren Produktion ca. 10kg solargrade Silizium erforderlich sind. Die ganze Energie der Solarzellen wird in 1.5 Jahren Betrieb erzeugt, die Lebensdauer liegt über 30 Jahren.

Silizium ist das dritt-häufigste Element der Erde und wird aus Sand gewonnen.

Inkl. Kosten:

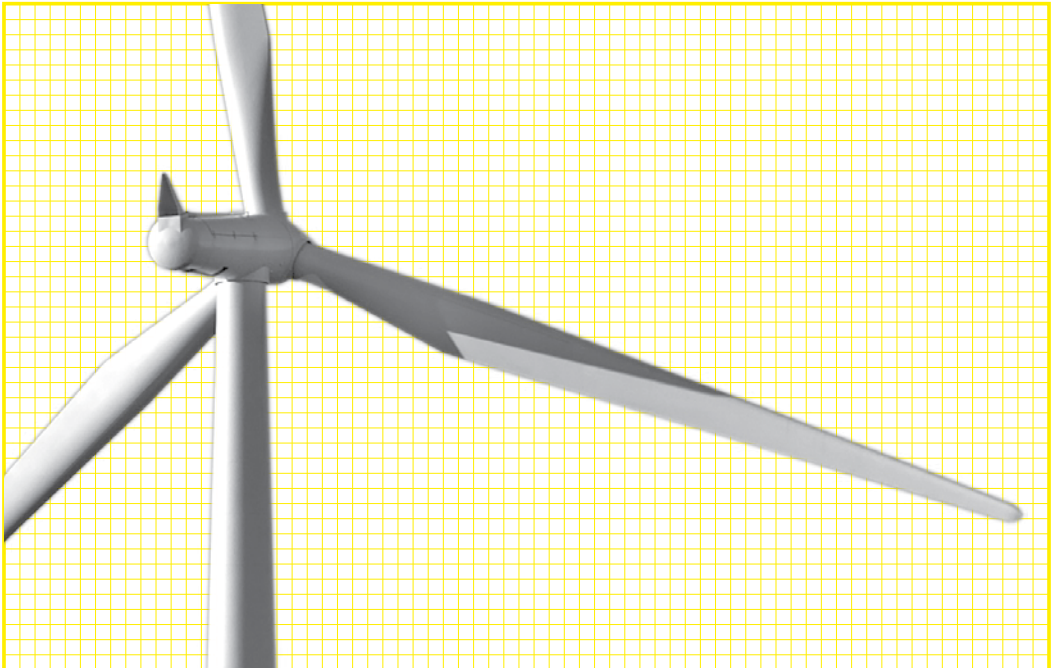
2010: CHF45/m<sup>2</sup> BGF

2020: CHF30/m<sup>2</sup> BGF



## A.15 Stromproduktion aus Windkraft an guten Standorten

Grosse Windmaschinen mit 5MW Leistung an guten Standorten (z.B. Offshore) erzeugen pro Jahr ca. 15Mio kWh Strom. Eine Maschine liefert also den Strom für 1Mio m<sup>2</sup> BGF in Low-Ex Gebäuden. Bei spezifischen Kosten von ca. CHF1200/kW<sub>peak</sub> [→ **B2.2**] ergeben sich damit Investitionskosten von CHF6/m<sup>2</sup> BGF im Jahr 2010.



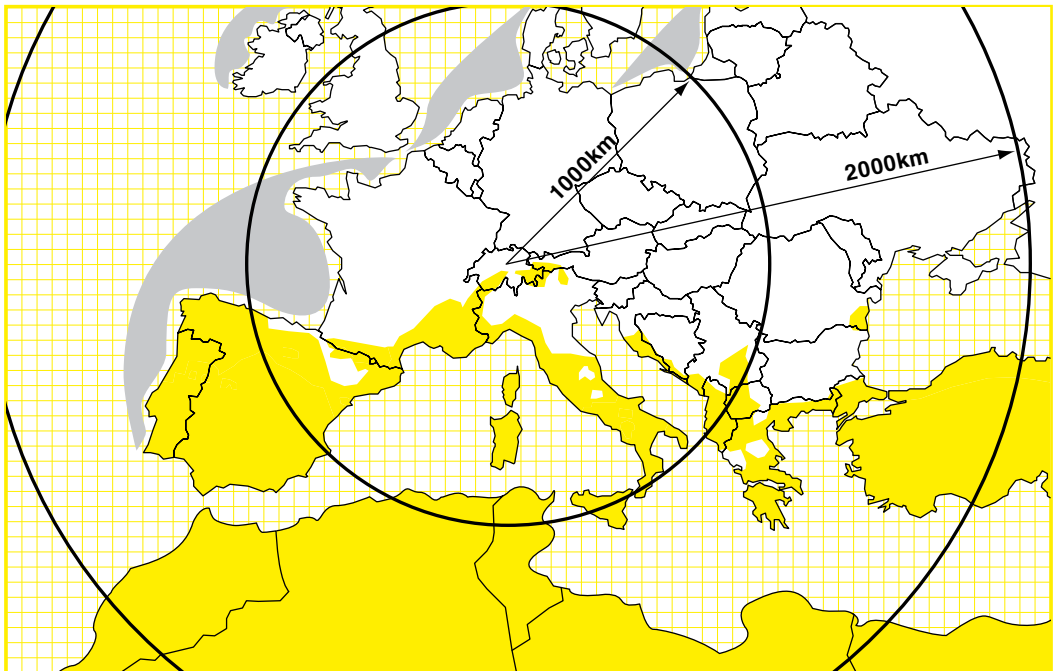


## A.16 Grosses Angebot von Wind und Sonne

Im Umkreis von weniger als 2000km um die Schweiz liegen gute Wind- (grau) und Solarfelder (gelb) im Überfluss.

Die Bodenfläche, auf der pro  $m^2$  mehr als  $100kWh/a$  mittels Windmaschinen oder Solarstromsystemen abgeerntet werden kann, beträgt über  $7'000'000km^2$  im Umkreis von 1500km.

Pro 100km Transportdistanz betragen die Übertragungsverluste für Strom auf der Spannungsstufe über 380kV rund 1%.



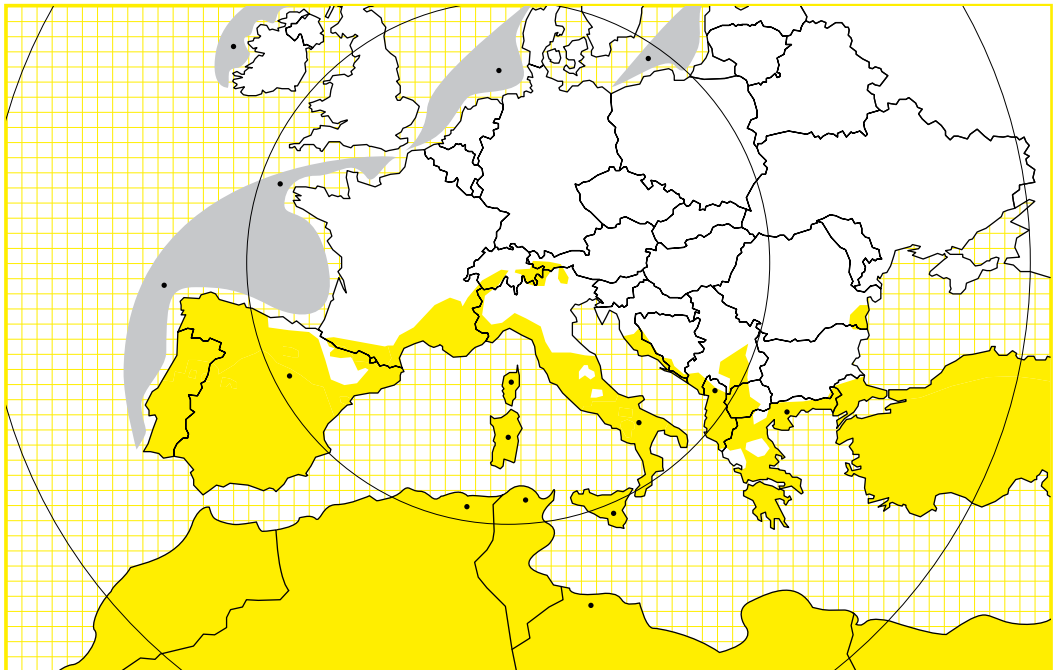
## A.17 Geeignete Ernteplätze

Die Differenz zwischen der Stromnachfrage und dem Angebot der einheimischen Wasserkraft (ca. 35TWh/a) wird ab ca. 2035 zu über 90% durch Solar- und Windstrom gedeckt [→ A.20].

Zur Senkung des Klumpenrisikos (Flaute, Beschattung, Embargo,) werden die erforderlichen PV-Flächen und Windparks in mehreren Ländern innerhalb eines Radius  $< 1500\text{km}$  um die Schweiz in Gegenden mit  $I_{0,\text{horizontal}} > 1400\text{kWh/m}^2\text{a}$  (bzw.  $\bar{v} > 4.5\text{m/s}$ ) erstellt. Bei einem Mix von 30% Wind- und 70% PV Strom ist eine aktive PV-Fläche von  $70\text{km}^2$  notwendig.

Der Landbedarf (ca. 3.5 mal mehr wegen Eigenverschattung) beträgt rund  $250\text{km}^2$  oder zehn Ernteplätze à  $25\text{km}^2$ .

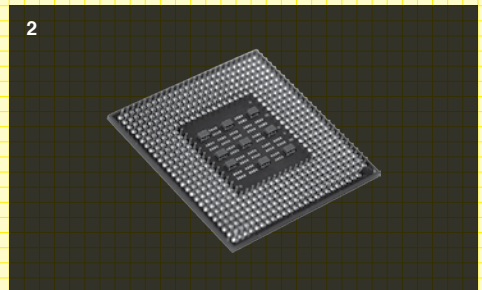
Die Fläche von  $5\text{km} \times 5\text{km}$  kann in der Karte nicht eingezeichnet werden ( $1\text{mm} \approx 30\text{km}$ ). Die eingezeichneten Punkte haben eine ca. 14-mal zu grosse Fläche.



## Exkurs **Stromeffizienz im Gebäude**

Neue Technologien, moderne Leistungselektronik (*Digitalisierung des Stroms*) und Stromspeicherung in Akkumulatoren und Kondensatoren ermöglichen es den Stromverbrauch von Apparaten und Geräten bei gleichem Komfort deutlich zu senken:

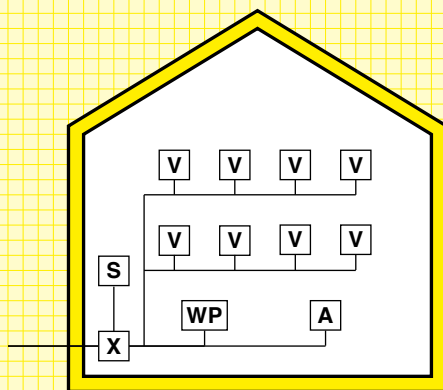
- **LED-Beleuchtung** anstatt Glühlampe (80–100lm/W anstatt 10–12lm/W). (1)
- **Elektronisches Bauteil** zur Reduktion der Standby-Verluste. (2)
- **Neue Sensoren** zur Reduktion der Betriebszeiten. (3)
- **Dezentrale Kleingeräte** zur Reduktion der elektrischen Leistung. (4)



## Exkurs Stromspeicherung und Digitalstrom im Gebäude

Eine normale Autobatterie speichert 1kWh Strom. Optimierte Systeme erreichen die doppelte Speicherdichte. Pro Wohneinheit mit 100m<sup>2</sup> Fläche kann  $\frac{1}{3}$  des täglichen Stromverbrauchs in einer modernen Batterie zwischengespeichert werden, die halb so gross ist wie eine kleine Waschmaschine. Mit dem dezentralen Stromspeicher können sowohl das Stromnetz wie auch die persönlichen Stromrechnung optimiert werden. Die Speicherverluste können als Anergie rückgewonnen werden.

Mit den neuen Systemen für die Steuerung von Geräten (digitalSTROM®) kann der Stromverbrauch bei gleichem Komfort deutlich (15-25%) gesenkt werden. [→ <http://www.viagialla.ch>]



**S:** Steuerung (TCP/IP)

**X:** Digitalstrom-Modulator

**A:** Strom-Akkumulatoren

**WP:** Wärmepumpe

## Exkurs Schrittweise Transformation der Gebäude

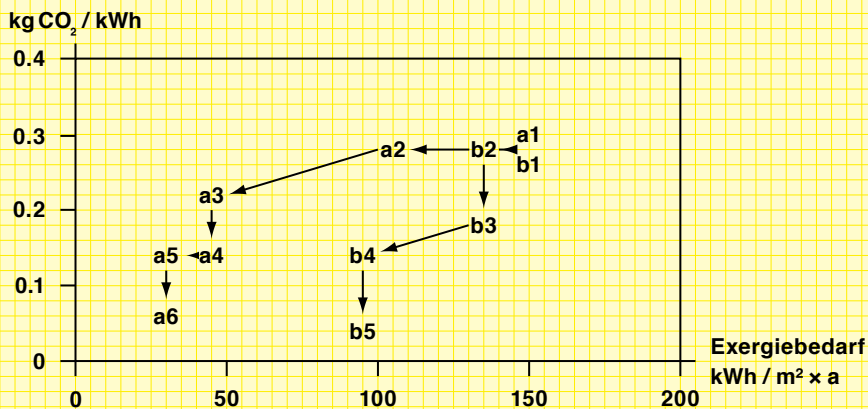
Gebäude können auf unterschiedlichen Wegen in low-Ex- & low-CO<sub>2</sub>-Gebäude transformiert werden:

### Weg a

- a1 Wärmedämmung, Reduktion Vorlauftemperatur
- a2 Einbau einer Wärmepumpe (Ersatz von Exergie durch Energie)
- a3 Einkauf von CO<sub>2</sub>-freiem Strom
- a4 Stromsparmassnahmen
- a5 Weiterer Einkauf von CO<sub>2</sub>-freien Strom
- a6 Strom

### Weg b

- b1 Fensterersatz
- b2 Einbau einer Wärmepumpe parallel zum Heizkessel
- b3 Weitere Wärmedämmung, Stromsparmassnahmen
- b4 Einkauf von CO<sub>2</sub>-freien Strom
- b5 Ersatz der Wärmepumpe und des Heizkessels durch monovalente Wärmepumpe
- b6 Weiterer Einkauf von CO<sub>2</sub>-freien Strom

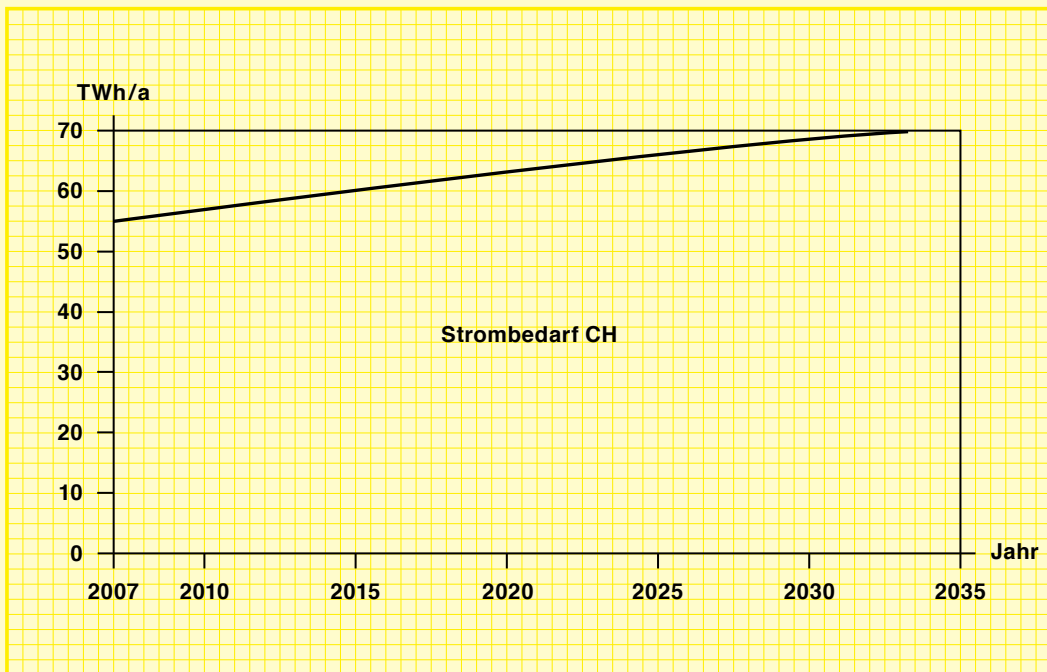


## Exkurs Stabilisierung des Stromverbrauchs

Der Gesamt-Stromverbrauch der Schweiz wird sich bis zum Jahr 2035 auf einem Wert von etwa 70TWh/a (8500kWh pro Person und Jahr) stabilisieren (2006: 55TWh/a).

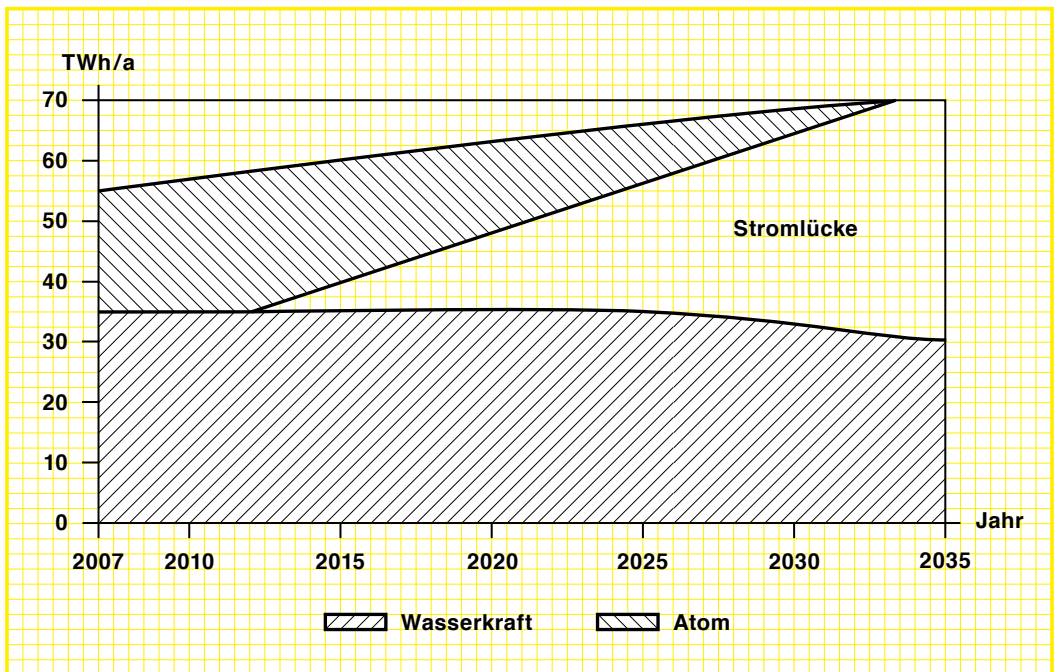
Die demographische Entwicklung (Abnahme der erwerbstätigen Bevölkerung ab ca. 2020) und vor allem die erhöhte Stromeffizienz werden eine Entkopplung zwischen Bruttoinlandprodukt und Stromverbrauch bewirken (analog den fossilen Energieträgern, des Flächenbedarfs pro Person, des Nahrungsbedarfs pro Person, des Nahrungsbedarfs pro Person, der Anzahl an Restaurants, an Museen, an Schulen, etc.).

Nur der Mehrverbrauch für die Wärmepumpen bewirkt den Anstieg des Stromverbrauchs.



## A.18 Die Stromlücke

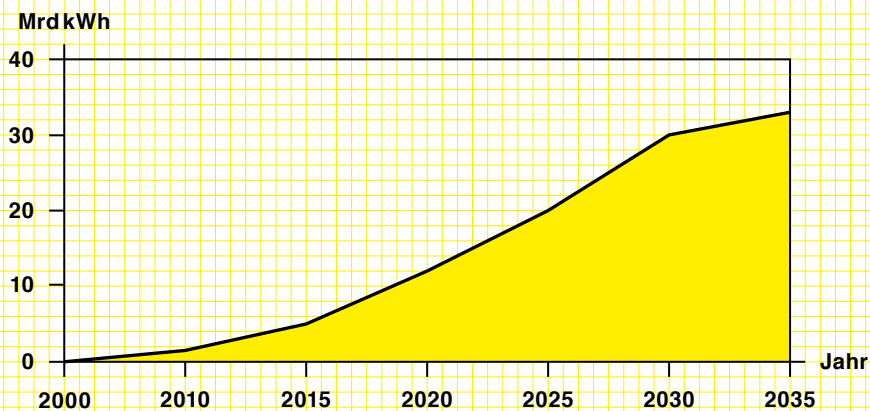
Durch das gestaffelte Abschalten der Atomkraftwerke entsteht in der Schweiz eine Differenz zwischen Nachfrage und *einheimischen* Angebot.



## A.19 Rasanter Zuwachs an Wind- und Solarstrom

Die Dynamik der Integration der Stromproduktion aus Wind und direkter Solarenergie wird innerhalb der nächsten 15 Jahre laufend zunehmen und im Jahr 2030 die höchsten jährlichen Zuwachsraten erreichen. Die Mehrkosten für den stoffflussfreien Strom liegen mit 1 bis ca. 1.5Mrd/Jahr pro Jahr deutlich unter 1% des BIP.

Der Mix zwischen Wind- und Solarstrom bestimmt sowohl den Mischpreis für den erneuerbaren Strom, als auch die Herkunftsregion.



|           |     |     |     |     |     |      |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Mrd kWh*  | 1.2 | 5.2 | 12  | 20  | 30  | 32.5 |
| Mrd CHF/a | 1.2 | 1.8 | 2.3 | 2.5 | 2.5 | 0    |

\*erneuerbar



## A.20 Die Deckung der Stromlücke bis 2035

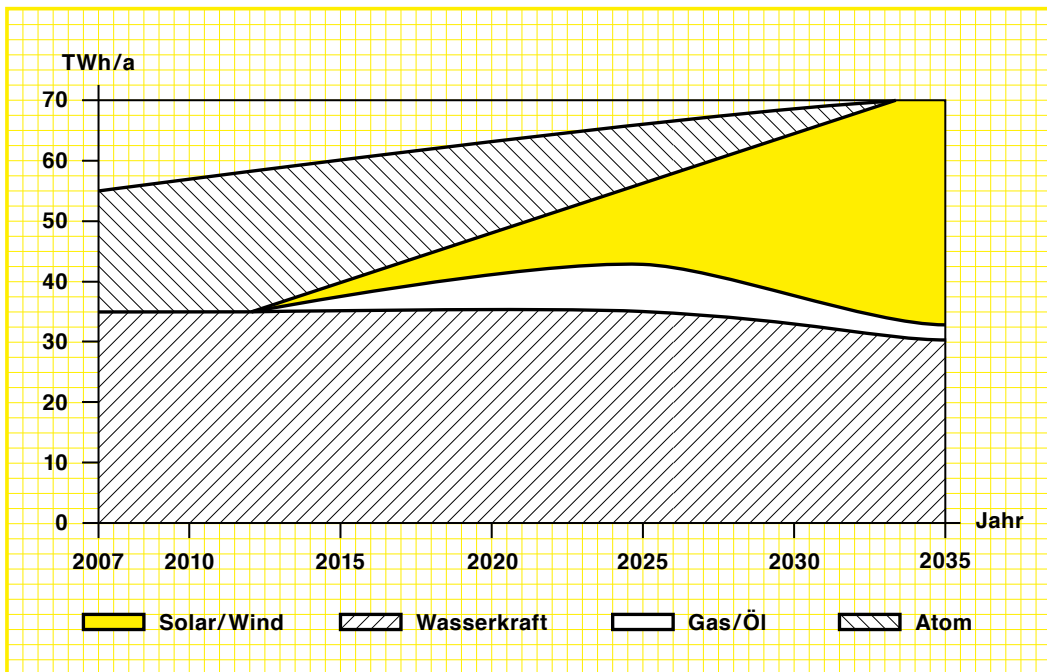
Mit dem Abschalten der ersten Kernkraftwerke in der Schweiz vom Netz und dem Anstieg des Strombedarfs infolge der Entwicklung im Wärmemarkt (Wärmepumpen) entsteht ab ca. 2015 ein Ungleichgewicht zwischen inländischer Stromnachfrage und -angebot.

– **Sicherstellung der Versorgungssicherheit** im Endausbau (daher im Inland gebaut).

Das Angebot wird laufend ergänzt durch Strom aus Wind- und Solarkraft (importiert) und gasbetriebenen GUD-Kraftwerken (in der Schweiz erstellt).

Die GUD-Kraftwerke übernehmen dabei zwei Funktionen:

– **Überbrückung der Stromlücke** bis zum Vollausbau der *Gelben Energie* (Wind- und Solarstrom).

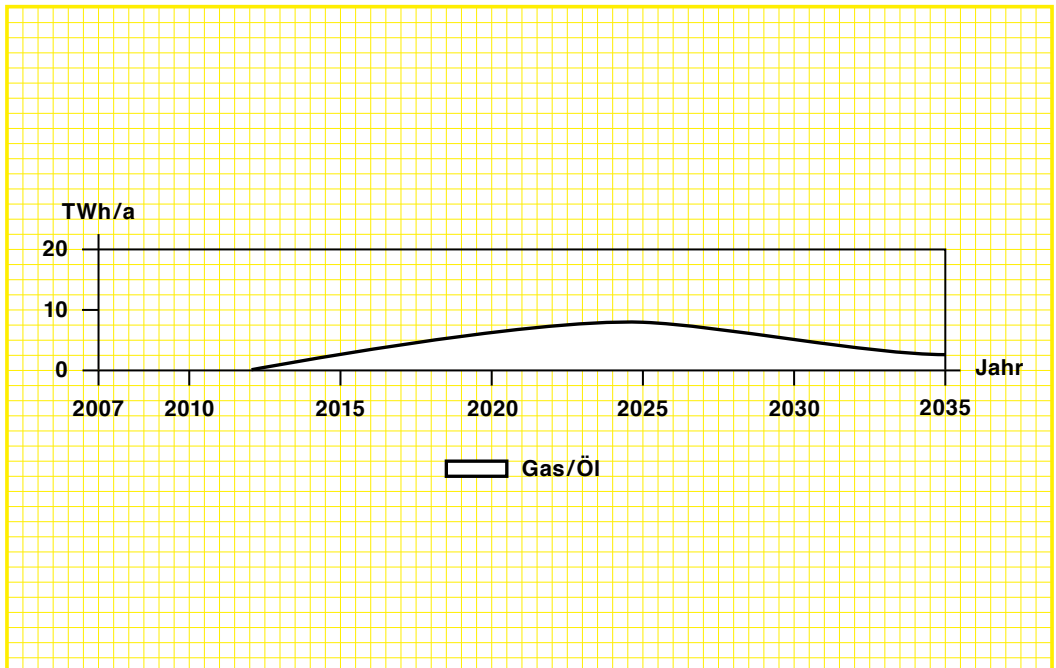


## A.21 GUD-Kraftwerke zur Überbrückung

Zwischen 2015 und 2025 werden rund 2.2GW elektrische Leistung in GUD-Kraftwerken installiert, die bei maximaler Auslastung von ca. 4000 Stunden pro Jahr, rund 9TWh/a produzieren. Sie werden CO<sub>2</sub>-optimal und mit Erdgas betrieben.

Ab ca. 2020 wird die Laufzeit der GUD-Kraftwerke laufend reduziert bis sie ab 2035 nur mehr Sicherheits-Standby-Funktion einnehmen (< 1000h/a mit ca. 2TWh/a Produktion).

Die Systeme werden als Bi-Fuel-Anlagen geplant, damit sie rasch von Gas auf den lagerbaren Brennstoff Öl umgestellt werden könnten. Öl-Lager sind im Überfluss vorhanden.



## A.22 Reduktion der Brennstoffmenge

Mit neuer Technik wird es gelingen, den Stromverbrauch ausserhalb der Wärmeproduktion zu stabilisieren [→ **Exkurs**].

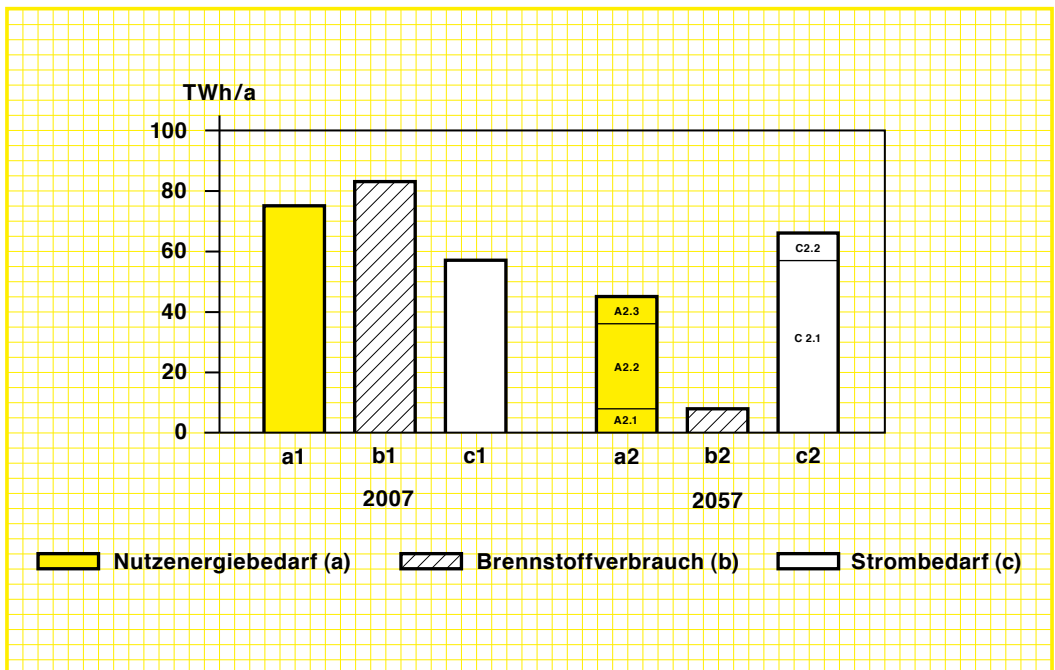
Der zusätzliche Strombedarf resultiert aus der Transformation der Technik für die Wärmeerzeugung (Heizung und Warmwasser).

Für die Betrachtung wird vom Nutzenergiebedarf für die Wärmeerzeugung von rund 75TWh ausgegangen (a1). Dafür müssen 83TWh an Brennstoff eingesetzt werden (b1).

Durch gezielte Wärmedämmung und den Einbau von Wärmerückgewinnungsanlagen in die Abluft und das Abwasser kann

der Wärmebedarf von 75TWh/a (a1) auf 45TWh/a im Jahr 2057 (a2) gesenkt werden.

Dieser neue Wärmebedarf wird im Jahr 2057 gedeckt werden durch 28TWh (a2.2) Anergie, 9TWh Strom für den Antrieb der Wärmepumpen (a2.3) und rund 8TWh an fossilen Brennstoffen für spezielle Gebäude, industrielle Prozesse und für den Betrieb der grossen GUD-Notstromanlagen (a2.1). Die Brennstoffmenge wird also von 83TWh (b1) im Jahr 2007 auf 8TWh im Jahr 2057 (b2) reduziert. Der Strombedarf nimmt entsprechend von 57TWh (c1) im Jahr 2007 auf 66TWh (c2) im Jahr 2057 zu.

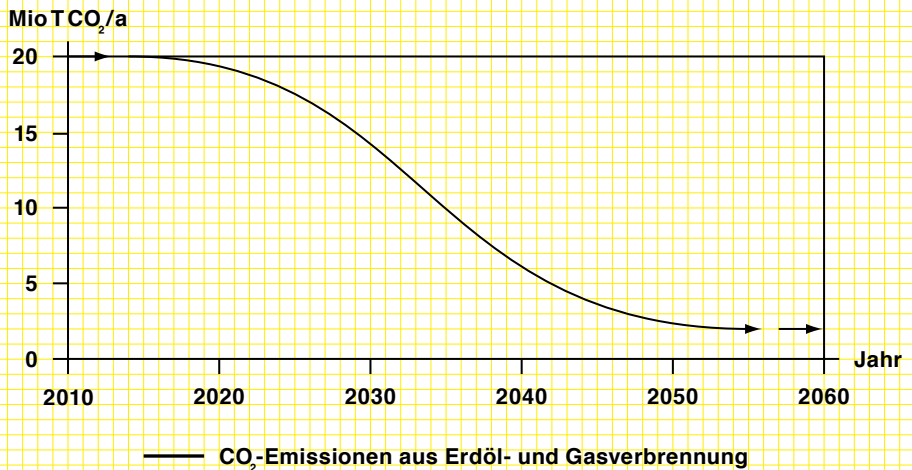


## A.23 CO<sub>2</sub>-Reduktion

Der Verbrauch von rund 5.2Mio Tonnen Erdölbrennstoffen und ca. 29TWh Gas im Jahr 2006 bewirkt eine CO<sub>2</sub>-Emission von ca. 20Mio Tonnen CO<sub>2</sub>/a.

Nach dem Umbau der Heizungssysteme und der Stromerzeugung gemäss *viaGialla* wird im Jahr 2060 eine CO<sub>2</sub>-Emission von ca. 2Mio Tonnen CO<sub>2</sub>/a resultieren.

Der Verlauf der Emissionskurve hängt ab von der Geschwindigkeit der Transformation der Gebäude.

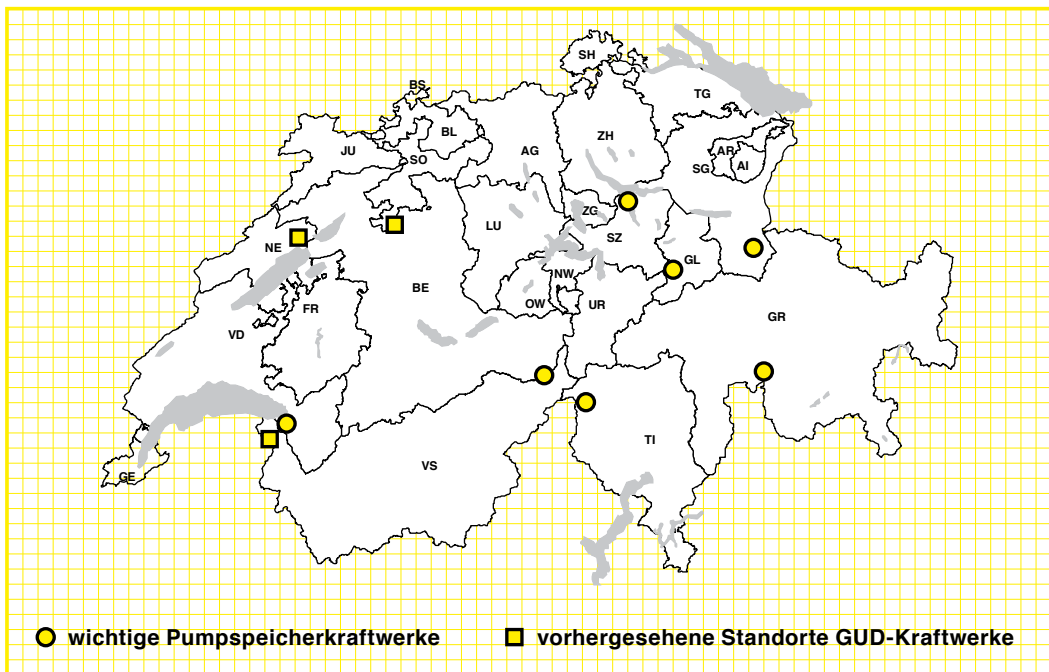


## A.24 Versorgungssicherheit

Die sichere Stromversorgung der Schweiz wird gewährleistet durch ein vernetztes System technischer Sicherheitseinrichtungen.

Gasbefeuerte GUD-Kraftwerke mit 60% elektrischem Wirkungsgrad werden in unterschiedlichen Grösseneinheiten solange ins Netz integriert, bis die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien den Nettozuwachs des Bedarfs (zusätzlicher Bedarf und wegfallender Atomstrom) decken kann. Ab diesem Zeitpunkt wird die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien weiter gesteigert, bis die Produktion mit fossilen Brennstoffen nur noch 5 bis 10% im Strommix ausmacht. (Standbybetrieb für die Versorgungssicherheit)

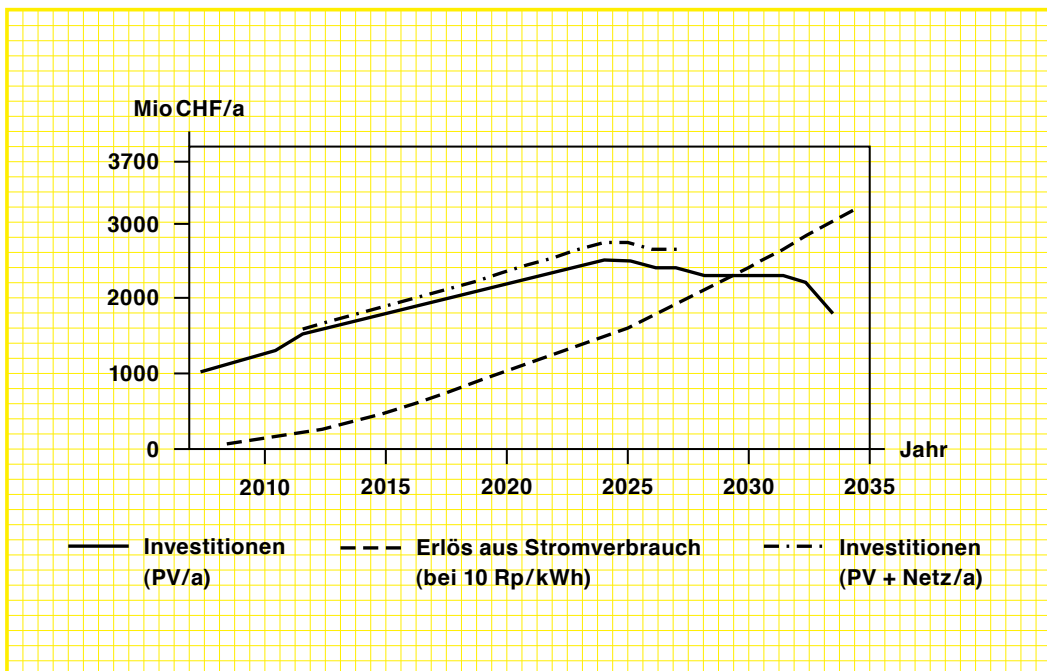
Die neue Leistungselektronik und die Stromspeicher in Gebäuden [→ **Exkurs**], die bestehenden hydraulischen Pumpspeicherwerke, und die Stauseen werden zusammen mit den GUD-Notstromanlagen die Stromversorgung sicherstellen. Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Ausfalls aller 10 bis 15 Erntefelder in Europa ist sehr gering.



## A.25 Investitionen und Erlös

In einem dynamischen Aufbau des neuen Stromproduktionssystems, bestehend aus Wind- und Solaranlagen, werden anfänglich CHF1Mrd/a, im Maximum CHF2.5Mrd/a im Jahr 2025 investiert. Der Erlös aus dem Stromverkauf bei 10Rp/kWh ab Produktionsstandort erreicht 2020 erstmals den Wert von CHF1Mrd/a, im Jahr 2033 nach Beendigung des Aufbaus beträgt der Jahreserlös rund CHF2.5Mrd/a.

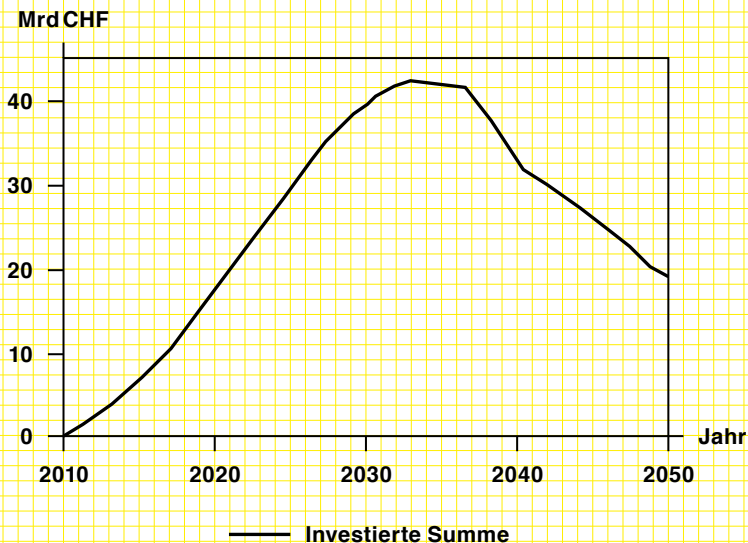
In den Ausbau des Stromnetzes werden zwischen 2012 und 2027 ca. CHF3Mrd investiert.



## A.26 Gute Amortisation der Investition

Der Buchwert der Produktionseinrichtungen wächst bis 2033 kontinuierlich bis auf den Wert von rund CHF43Mrd an (Investition plus 4% Zins minus Erlös).

Nach 25 Jahren Aufbau kann der Restbuchwert (von CHF43Mrd) rasch abgeschrieben werden, weil die mittlere Lebensdauer des Systems ca. 33 Jahre beträgt. Ab 2040 müssen jährlich Anlagen mit einer Leistung von ca. 0.7GW ersetzt werden, die 1.12TWh/a Strom liefern. Den Ersatzinvestitionen von ca. CHF1.5Mrd/a stehen Erträge von CHF3.25Mrd/a gegenüber. Zwischen 2040 und 2050 reduziert sich der Buchwert von rund CHF32Mrd auf ca. CHF20Mrd bei vollem Erhalt der Qualität des Anlagenparks.



---

## A.27 Die Finanzierung

Das Anlagevermögen der Pensionskassen der Schweiz beträgt ca. CHF 250Mrd. Die Erarbeitung einer nachhaltigen Rendite von 4% wird zunehmend schwierig weil die Investitionsmöglichkeiten mit sicherem Ertrag über 4% seltener werden.

Die Investition in die neuen Stromproduktionsanlagen ist sicherer als jene in Immobilien, weil der Ertrag bzw. die Absatz von Strom sicherer ist als der Mietertrag. Eigentlich müsste die öffentliche Hand in die Infrastrukturanlagen für die Stromerzeugung, analog den Infrastrukturen für den Verkehr, die Wasserversorgung, die Wasserreinigung, etc.) investieren.

Dies widerspricht aber dem gegenwärtigen Trend der Privatisierung von Aufgaben für das Gemeinwohl.

Sobald durch den Bundesrat beschlossen wird, dass die Variante *viaGialla* wünschenswert ist, dass Pensionskassengelder gleich wie Investitionen in Liegenschaften behandelt werden (individueller, zweckgebundener Vorbezug möglich) und sobald speziell überwachten Fonds eine Ertragsgarantie durch den Bund gewährt wird in der Art einer Versicherung, wird die Finanzierung des Weges *viaGialla* eine Leichtigkeit sein.



---

## Inhalt B1 **Thermodynamische Grundlagen**

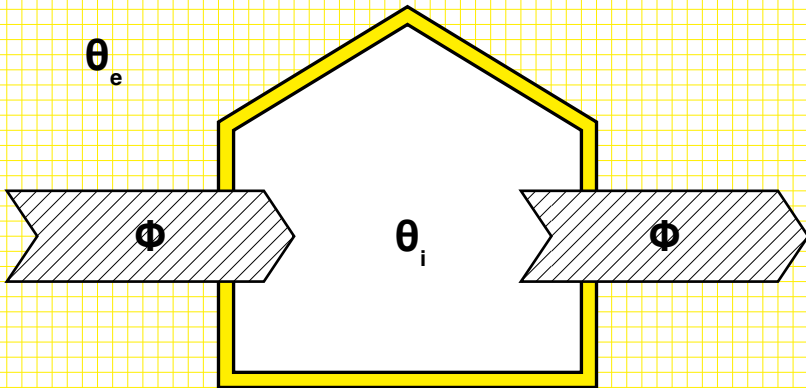
- B1.1 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik / Seite 39
- B1.2 Thermodynamik der Gebäudeheizung / Seite 40
- B1.3 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik / Seite 41
- B1.4 Der Carnot-Wirkungsgrad / Seite 42
- B1.5 Die Wärmepumpe / Seite 43
- B1.6 Der COP der Wärmepumpe / Seite 44
- B1.7 Anergiequelle / Seite 45
- B1.8 Der effektive COP / Seite 46
- B1.9 Strom betreibt die Gebäude / Seite 47
- B1.10 Parameter für die Optimierung von Gebäuden / Seite 48

## Inhalt B2 **Technologische Grundlagen**

- B2.1 Strom aus Wind und Sonne / Seite 49
- B2.2 Stand und Prognose der Photovoltaik / Seite 50, 51
- B2.3 Stand und Prognose der Windenergie / Seite 52, 53
- B2.4 Akkumulation der Prognosen / Seite 54, 55

## B1.1 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik sagt aus, dass dem Gebäude gleich viel Wärme  $\Phi$  zugeführt werden muss, wie es gegen Aussen verliert, wenn die Raumtemperatur  $\theta_i$  konstant bleiben soll.



## B1.2 Thermodynamik der Gebäudeheizung

Der Wärmestrom  $\Phi$  besteht aus:

- Wärmedurchgang durch die Hülle  $\Phi_T$
- Wärmetransport der Abluft  $\Phi_L$
- Wärmetransport des Abwassers  $\Phi_W$

Ohne Einbusse an Komfort stehen uns die Parameter (U), ( $\Delta T_L \times \eta_{WRG,L}$ ) und ( $\Delta T_W \times \eta_{WRG,W}$ ) für eine Optimierung zur Verfügung.

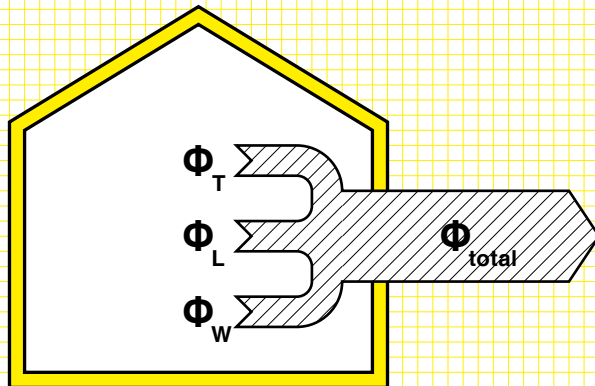
Die bisherigen Energieverordnungen und -labels orientieren sich praktisch ausschliesslich an diesen Grössen:

- Häuser isolieren (U verringern)
- Kontrolliertes Lüften ( $\Delta T \times \eta_{WRG,L}$ )

Im Bereich des Warmwassers wird aber noch sehr wenig gemacht, obwohl die Brauchwasseraufbereitung fast gleich viel Wärme erfordert wie das Heizen.

---

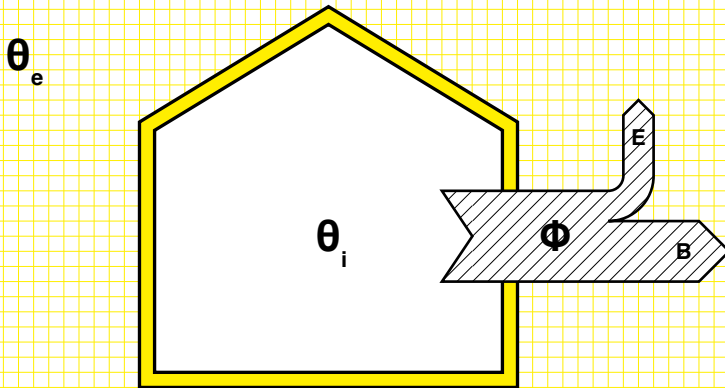
$$\begin{aligned}\Phi_T &= A \times (U) \times \Delta T \\ \Phi_L &= m \times c_{p,L} \times (\Delta T \times \eta_{WRG,L}) \\ \Phi_W &= m_{WW} \times c_W \times (\Delta T_W \times \eta_{WRG,W}) \\ \text{-----} \\ \Phi_{total} &= \Phi_T + \Phi_L + \Phi_W\end{aligned}$$



## B1.3 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik lässt sich ableiten, dass der Wärmestrom  $\Phi$ , der zwischen den Reservoirs mit den Temperaturen  $\theta_i$  und  $\theta_e$  fließt, theoretisch eine Wärmekraftmaschine antreiben könnte, die den Anteil  $E$  an mechanischer Nutzarbeit und die Abwärme  $B$  abgibt.

$E$  wird als Exergie,  $B$  als Anergie bezeichnet.

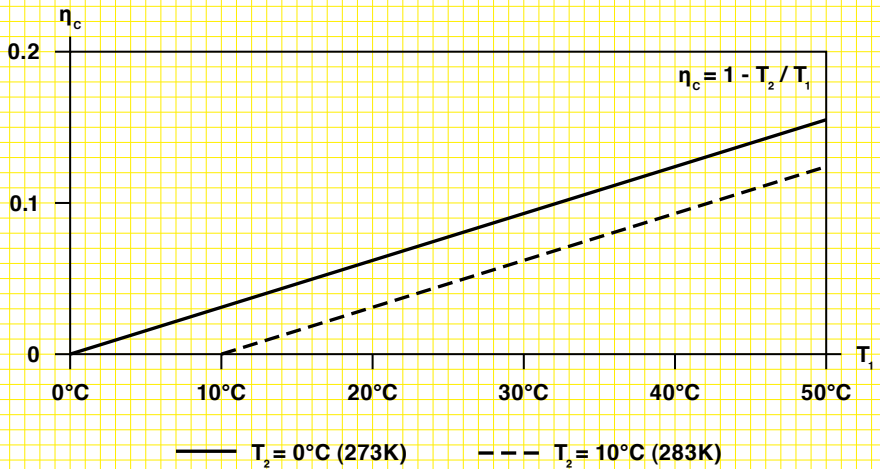


## B1.4 Der Carnot-Wirkungsgrad

Der Carnot-Wirkungsgrad ist das Verhältnis von  $E$  zu  $\Phi$  und wird berechnet mit:

$$\eta_c = 1 - T_2 / T_1$$

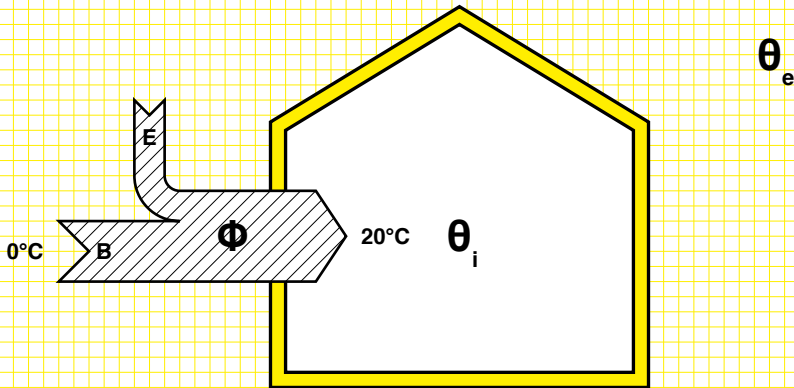
Bei den Temperaturen  $T_1 = 293\text{K}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) und  $T_2 = 283\text{K}$  ( $10^\circ\text{C}$ ) könnte die Maschine theoretisch maximal 3.4% Arbeit leisten, 96.6% wären Abwärme bei  $10^\circ\text{C}$ .



## B1.5 Die Wärmepumpe

Um die Temperatur  $T_1$  bzw.  $\theta_i$  konstant bei  $20^\circ\text{C}$  zu halten, muss nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik der Wärmestrom  $\Phi$  zugeführt werden, der nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik aus einem Anteil Exergie und einem Anteil Anergie besteht.

Die Maschine, die einen Energiestrom  $B$  mit Hilfe von Exergie  $E$  in den Wärmestrom  $\Phi$  transformieren kann, ist die Wärmepumpe.



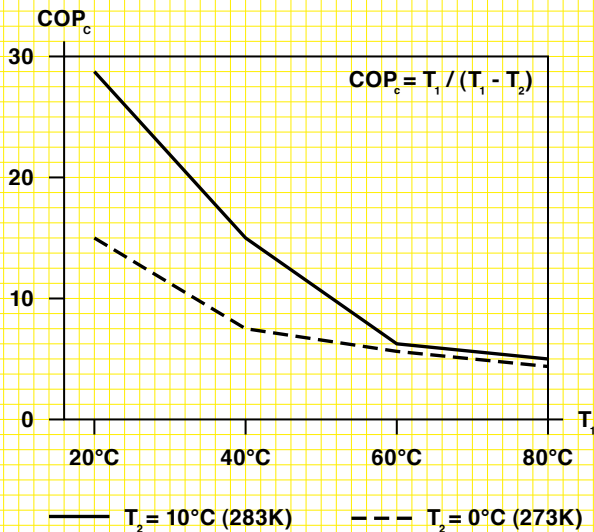
## B1.6 Der COP der Wärmepumpe

Die Effizienz der Wärmepumpe wird beschrieben mit dem *Coefficient of Performance (COP)*, der angibt, wieviel Nutzwärme  $\Phi$  pro Einheit Exergie  $E$  gewonnen werden kann.

Der COP der idealen Carnot-Wärmepumpe berechnet sich zu:

$$\text{COP}_c = T_1 / (T_1 - T_2)$$

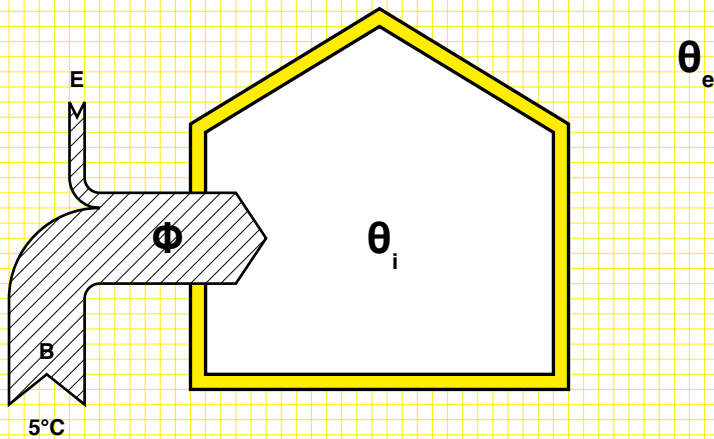
Die Darstellung zeigt, dass hohe COP-Werte vor allem aufgrund tiefer Temperaturdifferenzen ( $T_1 - T_2$ ) und hoher Temperaturen  $T_2$  erreicht werden können.



## B1.7 Energiequelle

Energiequellen mit hohen Temperaturen (z.B. das Erdreich oder das Grundwasser, die Abluft und das Abwasser) ermöglichen hohe COP-Werte.

Eine Anhebung der Temperatur  $T_2$  von  $0^\circ\text{C}$  auf  $5^\circ\text{C}$  bewirkt in guten Anlagen eine Erhöhung des  $\text{COP}_c$  von 11.1 auf 13.6 bei  $T_1 = 27^\circ\text{C}$ . Bei  $T_2 = 10^\circ\text{C}$  resultiert ein Wert von 17.6.





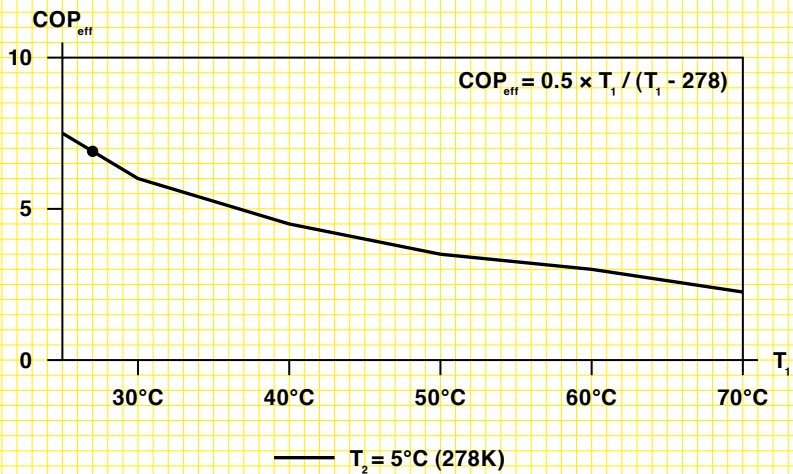
## B1.8 Der effektive COP

In der Realität weicht der effektive  $COP_{eff}$  vom idealen  $COP_c$  ab. Qualitativ gute Wärmepumpen weisen einen Gütegrad  $g > 0.5$  auf:

$$COP_{eff} = g \times T_1 / (T_1 - T_2)$$

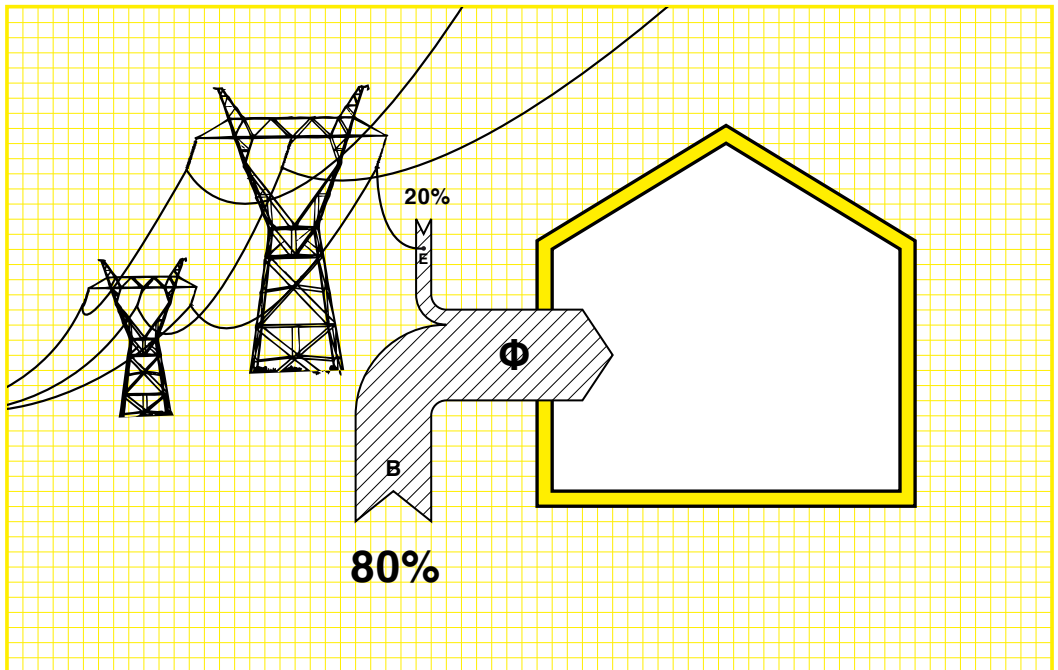
---

Beispiel: für  $T_1=27^\circ\text{C}$  (290K),  $T_2=5^\circ\text{C}$  (278K) und  $g=0.5$  resultiert ein  $COP_{eff}$  von 6.81.



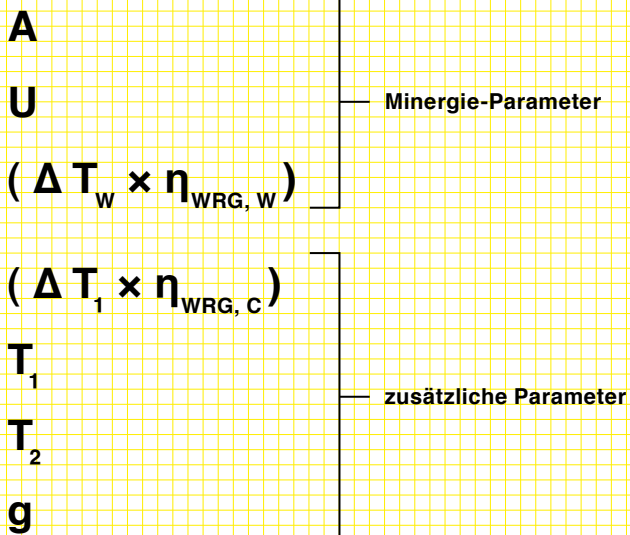
## B1.9 Strom betreibt die Gebäude

Die Physik liefert die Erkenntnis, dass Gebäude von Aussen nur mit Exergie versorgt werden müssen. Strom ist reine Exergie. [→ A.9]



## B1.10 Parameter für die Optimierung von Gebäuden

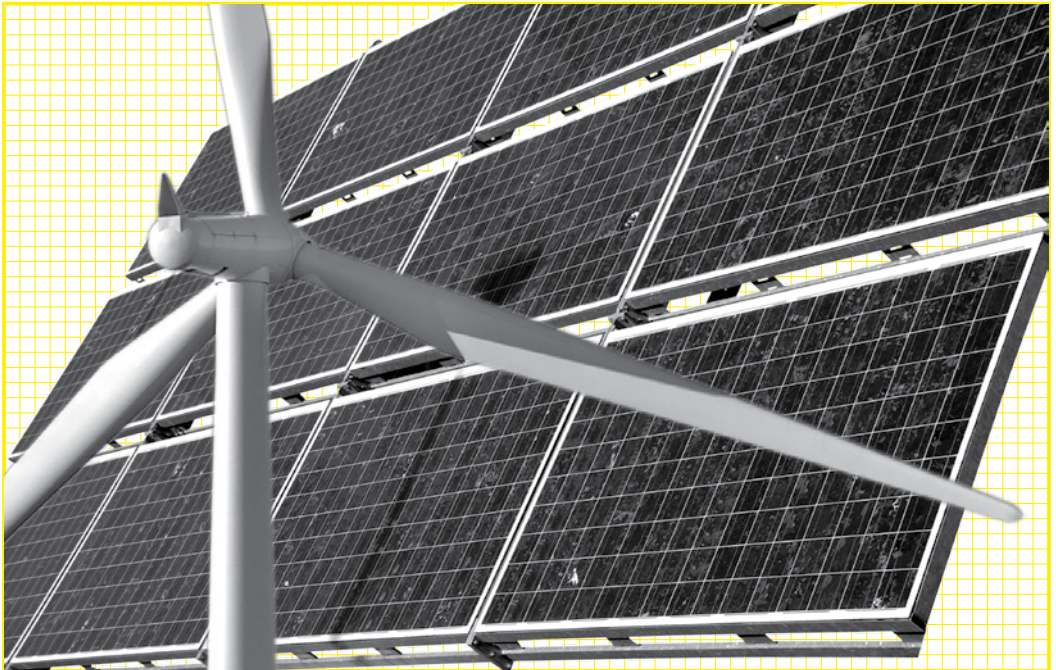
Mit Berücksichtigung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik stehen für die thermische Optimierung von Gebäuden sieben anstatt nur drei Parameter zur Verfügung:



## B2.1 Strom aus Wind und Sonne

Die Gestehungskosten für Strom aus der Windkraft und der Solarstrahlung sind zu mehr als 90% Kapitalkosten.

Die spezifischen Investitionskosten CHF/kW<sub>peak</sub>, der Zinssatz und die Lebensdauer der Anlagen sind die entscheidenden Parameter der Gestehungskosten. Nach der Erstellung sind bei langfristiger Finanzierung die Gestehungskosten über die ganze Lebensdauer bekannt.



---

## B2.2 **Stand und Prognose der Photovoltaik**

Die spezifischen Produktionskosten der Photovoltaik pro  $\text{kW}_{\text{peak}}$  sind vorwiegend eine Frage der industriellen Produktion und weniger der Forschung.

Alle sechs Monate wurden bisher die Prognosen für die weltweite jährliche Zellenproduktion nach oben korrigiert.



## B2.3 Stand und Prognose der Windenergie

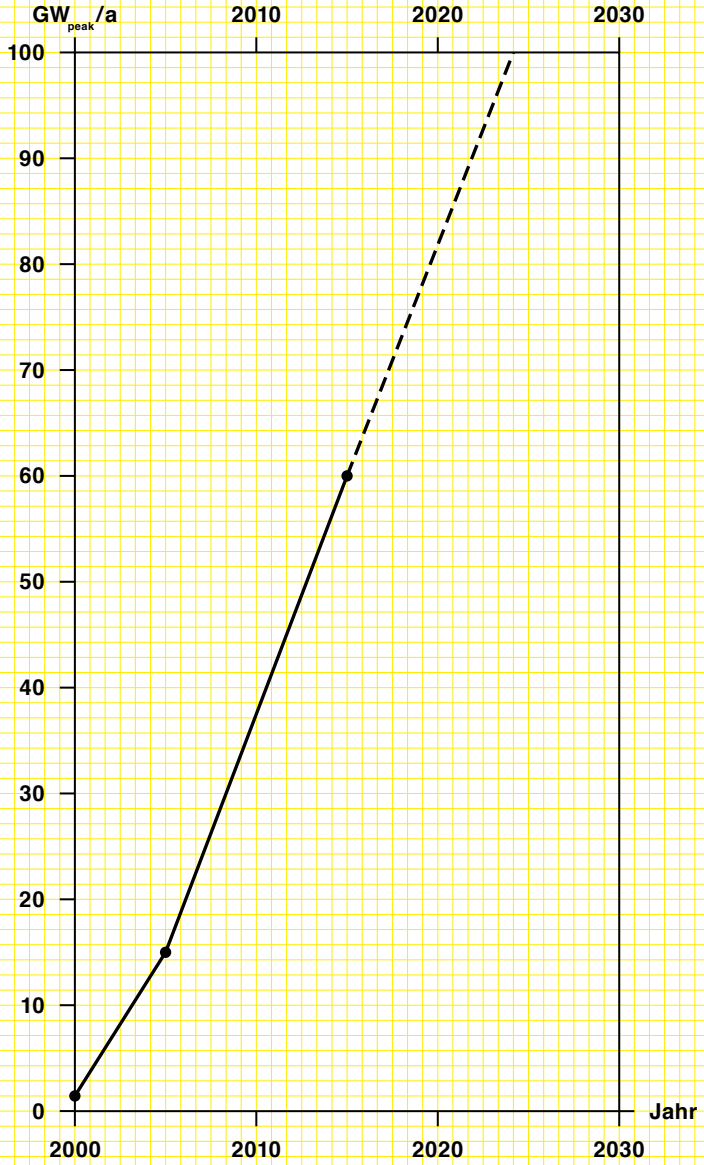
Die spezifischen Produktionskosten pro  $kW_{peak}$  sind bei der Windenergie bereits nahe den tiefstmöglichen Kosten. 800 bis CHF1000/ $kW_{peak}$  sind für 6MW Offshore-Maschinen in etwa 10 Jahren zu erwarten.

Der Wert von 15GW pro Jahr und der spezifische Preis von CHF1500/ $kW_{peak}$  sind im Jahr 2006 Stand der Dinge.

Die mittlere Lebensdauer der Anlagen wird mit ca. 30 Jahren angegeben, die energetische Amortisationszeit liegt unter 1.5 Jahren.

|      | CHF/ $kW_{peak}$ | Rp/kWh* |
|------|------------------|---------|
| 2006 | 1500             | 15      |
| 2020 | 900              | 9       |
| 2030 | 800              | 8       |

\* unter optimalen Bedingungen



— Anlagenproduktion (BWE)      - - - eigene Verlängerung



---

## B2.4 Akkumulation der Prognosen

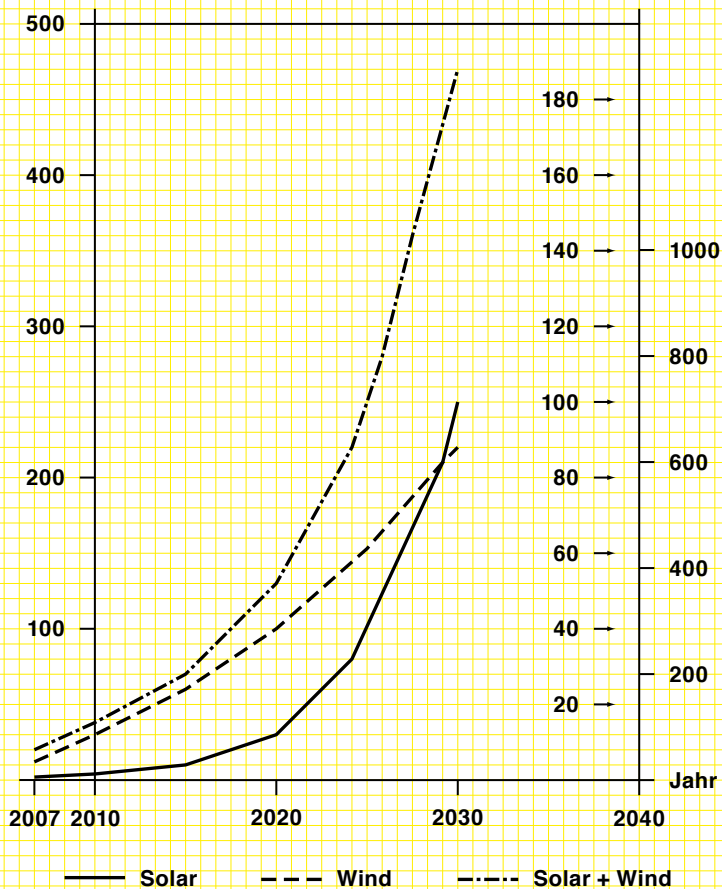
Anerkannte Institute prognostizieren die elektrische Leistung aus Sonne und Wind, die jährlich weltweit neu ans Netz gehen sollen. Die Kurve *Solar und Wind* fasst beide Technologien zusammen. Die linke Skala zeigt die jährliche Zusatzleistung, die rechte Skala die jährliche Zusatz-Energiemenge.

Beispiel: Im Jahr 2025 sollen 220GW Leistung neu ans Netz gehen. Im Jahr 2026 werden damit 630TWh mehr Solar-/Windstrom produziert als im Jahr 2025.

630TWh/a können auch mit rund 85 neuen Atomkraftwerken produziert werden, die im Jahr 2025 neu ans Netz geschaltet werden (Skala innen).

Installierte Zusatzleistung  
GW/a

Energie  
TWh/a



---

## Fazit **Hypothese**

### 1. [→ **B1.9**]

Der bisher wenig beachtete zweite Hauptsatz der Thermodynamik eröffnet Chancen für **CO<sub>2</sub>-freie Gebäude**.

### 2. [→ **A.9**]

Gebäude werden künftig ausschliesslich mit **Strom von Aussen** versorgt.

### 3. [→ **Exkurs**]

**Stromeffiziente Systeme** kompensieren den Mehrverbrauch an Strom ausserhalb der Wärmeanwendung.

### 4. [→ **B2.4**]

**Sonne und Wind** liefern weltweit im Jahr 2020 zusammen 30 mal mehr neuen Strom als Kernenergie im besten Fall (> 250TWh/a Zuwachs).

### 5. [→ **A.25**]

Im Jahr 2020 werden die Mehrkosten für einen Mix aus 50% Wind- und 50% Solarstrom inkl. 10% zusätzlicher Verteilverluste **15Rp/kWh** betragen.

### 6. [→ **A.26**]

Im Jahr 2030 werden die Mehrkosten für einen Mix aus 30% Wind und 70% Solarstrom inkl. 15% zusätzlicher Verteilverluste **maximal 5-10Rp/kWh** betragen.

---

## Anhang **Quellenverzeichnis und Bildnachweis**

### **Einführung**

Oelz, Everest – Lhotse, Schweizer am Everest 1952 und 1956, Zürich 2006 [Bild]

### **A.1, A.2**

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPPC), Bericht vom 2.2.2007

### **A.13, B1.2**

iStockphoto™, [http://www.istockphoto.com/file\\_closeup/when/settings/future/2620047\\_solar\\_power\\_isolated.php?id=2620047](http://www.istockphoto.com/file_closeup/when/settings/future/2620047_solar_power_isolated.php?id=2620047) [Bild]

### **A.15, B1.2**

iStockphoto™, [http://www.istockphoto.com/file\\_closeup/business/agriculture\\_farming/windfarms/2304277\\_wind\\_turbine\\_isolated\\_with\\_clipping\\_path.php?id=2304277](http://www.istockphoto.com/file_closeup/business/agriculture_farming/windfarms/2304277_wind_turbine_isolated_with_clipping_path.php?id=2304277) [Bild]

### **A.16, A.17, A.24**

Energie-Atlas GmbH, <http://www.energie-atlas.net> [Karten]

### **B2.2**

The Institute of Energy Economics (IEEJ), Japan, <http://www.iee.or.jp>

Paul Scherrer Institut (PSI), ISSN 1019-0643, S.208

Sarasin Privatbank (Sarasin), Schweiz, <http://www.sarasin.ch>

### **B2.3**

Bundesverband Windenergie (BWE), Deutschland, <http://www.wind-energie.de>

---

Anhang **Impressum**

**Herausgeber, Autor**

Prof. Dr. Hansjürg Leibundgut

**Redaktion**

Luca Baldini  
Philipp Bollier  
Valérie Gass  
Georg Krüger  
Forrest Meggers  
Emma Radaelli  
Arno Schlüter  
Frank Thesseling

**Gestaltung**

Robert Lzicar, rl@stvg.ch  
Zürich

**Druck**

Druckerei Odermatt AG  
Dallenwil

**Bindung**

Schumacher AG  
Schmitten

**Buchvertrieb**

info@viagialla.ch  
<http://www.viagialla.ch>

**Copyright**

Alle Rechte vorbehalten  
© 2007 beim Herausgeber

ETH Zürich  
Institut für Hochbautechnik  
Professur für Gebäudetechnik  
HIL E 15.1  
Wolfgang-Pauli-Str. 15  
CH-8093 Zürich

<http://www.gt.arch.ethz.ch>

<http://www.viagialla.ch>



