



Virtuelle Akademie **Nachhaltigkeit**

# Technisch-ökologische Bewertung von erneuerbaren Energien

## Episode 1: Energetische Amortisation und Erntefaktoren

Prof. Dr. Stefan Gößling-Reisemann  
Universität Bremen

 Universität Bremen\*  
\*EXZELLENT.

**ZMML**  
Zentrum für Multimedia  
in der Lehre

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

Veranstaltung: Technik, Energie und Nachhaltigkeit *erstellt und gefördert durch*





# Übersicht der Lerneinheit

## Episode 1: Energetische Amortisation und Erntefaktoren

Episode 2: Flächenbedarfe für erneuerbare Energien

Episode 3: Interview mit dem Referenten



## Lernziele dieser Episode

### Lernziel 1:

Sie verstehen, warum auch erneuerbare Energien fossile Rohstoffe verbrauchen.

### Lernziel 2:

Sie verstehen das Konzept des Kumulierten Energieaufwands und der abgeleiteten Größen Amortisationszeit und Erntefaktor.

### Lernziel 3:

Sie können den Anwendungsbereich und die Aussagekraft der primärenergetischen Bewertung von Energieanlagen abschätzen.



## Energetische Amortisation

- In aller Kürze:
  - Energieanlagen „**erzeugen**“ Energie
  - Energieanlagen „**verbrauchen**“ aber auch Energie
- Wenn gleich viel Energie erzeugt wie verbraucht wurde, spricht man von „**energetischer Amortisation**“.
- Der **Erntefaktor** gibt an, wie viel Energie aus einer anfangs investierten Energiemenge geerntet werden kann.
- ❖ Moment mal, da kann doch was nicht stimmen? Energie bleibt doch **erhalten** und kann nicht zunehmen?



## Energieerhaltung

- Mayer/Joule/Helmholtz beobachteten in den 1840er Jahren die **Energieerhaltung**
- Darauf basiert der **Energieerhaltungssatz**
- In einem **geschlossenen System**

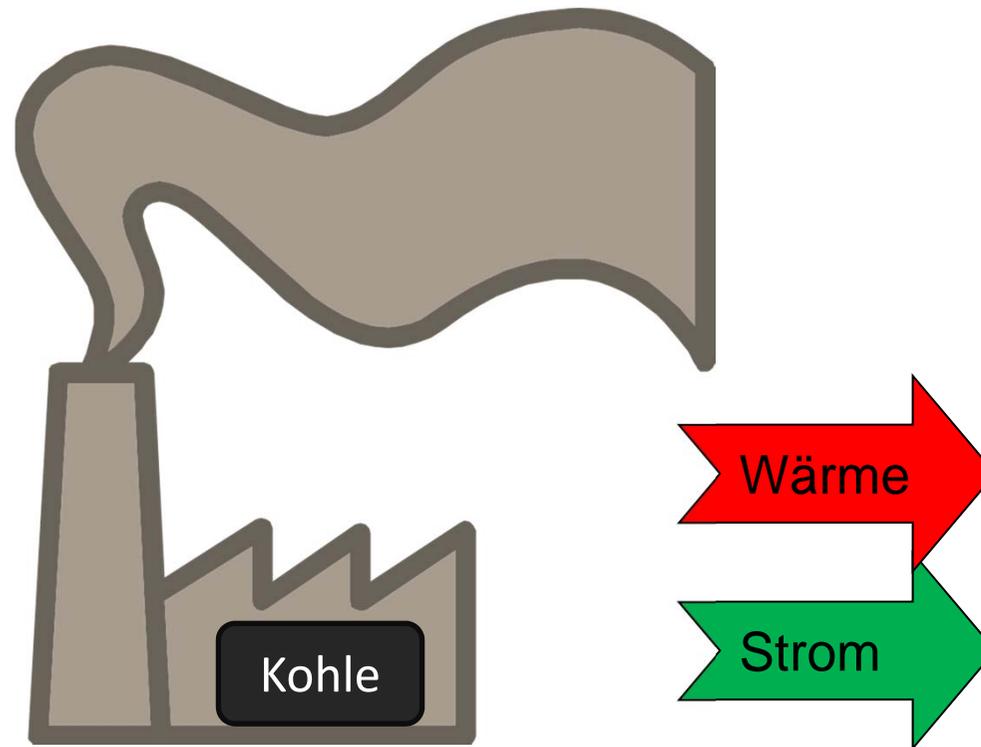
$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

- Die **inneren Energie  $U$**  kann in **Wärme  $Q$**  und **Arbeit  $W$**  umgewandelt werden
- Das passiert z.B. in einem Kohlekraftwerk



## Kohlekraftwerk

- Kohle wird in Wärme und Strom verwandelt





## Offene Systeme

In einem **offenen System** gilt:

- Die **hineinfließende Energie** ( $E_{in}$ ) muss auch wieder **herausfließen** ( $E_{out}$ ) oder im System **gespeichert** werden ( $\Delta E_{sys}$ )

$$E_{in} = E_{out} + \Delta E_{sys}$$

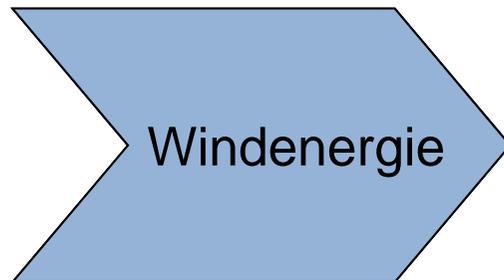
- Das passiert in einer **Windenergieanlage**



[Technik, Energie und Nachhaltigkeit]

Technisch-ökologische Bewertung von erneuerbaren Energien • Episode 1 • Prof. Dr. Stefan Gößling-Reisemann

# Windenergieanlage (WEA)



Enercon





# Windenergieanlage (WEA)



(Abwärme)

Strom

Windenergie

Enercon



## Energiewandlung

- Energie allgemein wird also nicht „verbraucht“ und „erzeugt“, sondern zwischen verschiedenen Energieformen **umgewandelt**.
  - **Kein Kraftwerk kann mehr Energie liefern („erzeugen“) als man hineinsteckt.**
  - Bestimmte Energieformen können aber **erzeugt** werden, wenn sie aus einer anderen Energieform **neu hergestellt** werden, z.B. **Strom oder Wärme**
- Es ist also korrekt von **Strom- oder Wärmeerzeugung** zu sprechen



## Energetische Amortisation

- Zurück zur Frage: Wann hat sich eine Energieanlage energetisch amortisiert?
- Sinnvoll kann diese Frage nur beantwortet werden, wenn man sich auf **spezifische Umwandlungen** konzentriert.
- Im Rahmen einer nachhaltigen Energieversorgung interessieren uns vor allem die **nicht-erneuerbaren Energieträger**.
- Deren Verbrauch sollte möglichst reduziert werden.



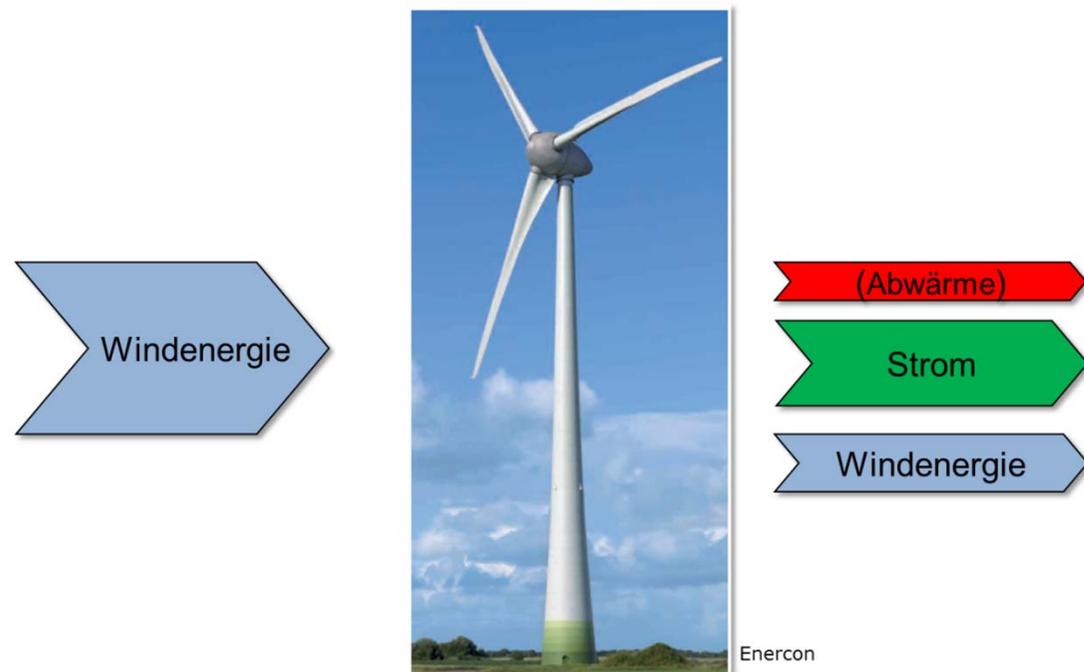
## Energetische Amortisation

- Präzisierung für Stromerzeugung:
- **Eine Energieanlage hat sich energetisch amortisiert, wenn sie mehr nicht-erneuerbare Energieträger geschont / vermieden hat, als sie „verbraucht“ hat.**
- Verbrauch bedeutet hier, dass die nicht-erneuerbaren Energieträger umgewandelt wurden.



## Energetische Amortisation einer WEA

- Wo werden denn bei der Windenergieanlage (WEA) nicht-erneuerbare Energieträger verbraucht?





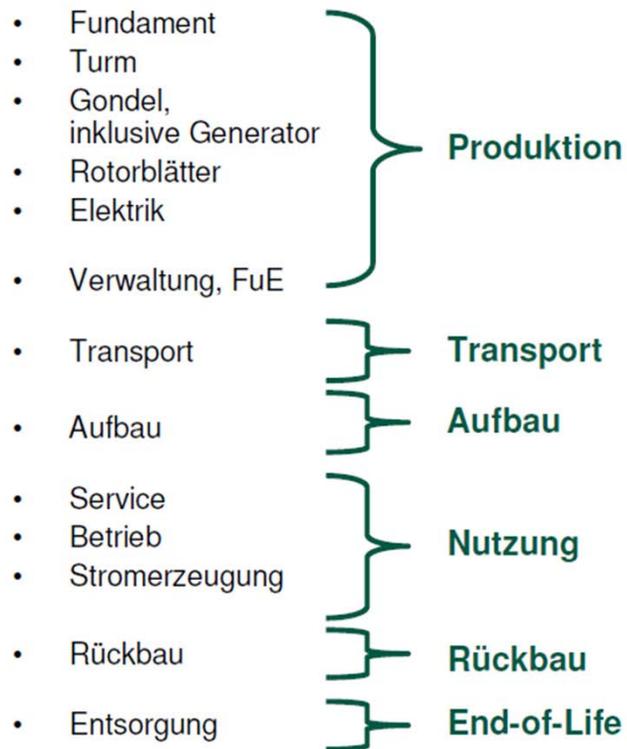
## Energetische Amortisation einer WEA

- Verbrauch n.e./fossiler Energien:
  - Beim Bau einer WEA, um die Materialien herzustellen,
  - beim Betrieb: für Wartung und für Ersatzteile,
  - beim Transport, etc.
- Kurz: entlang des kompletten **Lebenszyklus** einer WEA werden nicht-erneuerbare Energien verbraucht
  - **Kohle** für Stromerzeugung (z.B. beim Fördern der Erze)
  - **Erdgas** für die Wärmerzeugung (z.B. beim Gießen)
  - **Diesel** für Antriebsenergie (z.B. beim Transport)



# Energetische Amortisation einer WEA

## Übersicht - WEA





## Kumulierter Energieaufwand (KEA)

- Wie bestimmt man nun die aufgewendete Menge an Energie?
- Methode: **Kumulierter Energieaufwand (KEA)**
- = **primärenergetisch** bewertete Summe aller Energieaufwendungen
  - Herstellung (H)
  - Nutzung (N)
  - Entsorgung (E)
- Primärenergie heißt: in der Natur vorliegende Energieträger
- D.h. alle Aufwendungen von Energieträgern werden bis zur Lagerstätte zurückverfolgt und bilanziert.



## KEA und Amortisation

- Nun können wir die Ausgangsfrage beantworten:  
Wann **amortisiert** sich die Herstellung, Nutzung, Entsorgung einer Energieanlage?

$$T_A = \frac{KEA}{E_{net} g_{Netz}}$$

$T_A$  = energetische Amortisationszeit (a)

$E_{net}$  = Pro Jahr erzeugte Nettoenergie (MJ/a)

$g_{Netz}$  = Bereitstellungsgrad der Energieerzeugung am Standort

$KEA$  = Kumulierter Energieaufwand (MJ)



## Bereitstellungsnutzungsgrad

- Der **Bereitstellungsnutzungsgrad**  $g_{Netz}$  gibt an, wie viel **Primärenergie** aufgewendet werden muss, um am Standort elektrische Energie zu erzeugen.
- Auch hier wird berücksichtigt
  - Exploration
  - Gewinnung der Primärenergieträger
  - Transport
  - Aufbereitung bzw. Umwandlung
  - Verteilung
  - Bereitstellung als Endenergie
- $E_{net} * g_{Netz}$  stellt also die Menge an Primärenergie dar, die durch die Energieanlage **vermieden** wurde.



## Erntefaktor

- Der **Erntefaktor** (EF) gibt an, wie viel nutzbare Energie im Laufe des Lebens eines Kraftwerks abgegeben wird, im Verhältnis zum eingesetzten Primärenergieaufwand (KEA).
- Für fossile gespeiste Kraftwerke ist dieser Wert immer kleiner als 1, und ungefähr gleich dem Wirkungsgrad.

$$EF = \frac{E_{net,kum}}{KEA}$$

$E_{net,kum}$  = über Lebensdauer kumuliert erzeugte nutzbare Energie



## Frage

Schätzen (oder raten) Sie die Amortisationszeit und den Erntefaktor von Windenergie- und Photovoltaikanlagen!





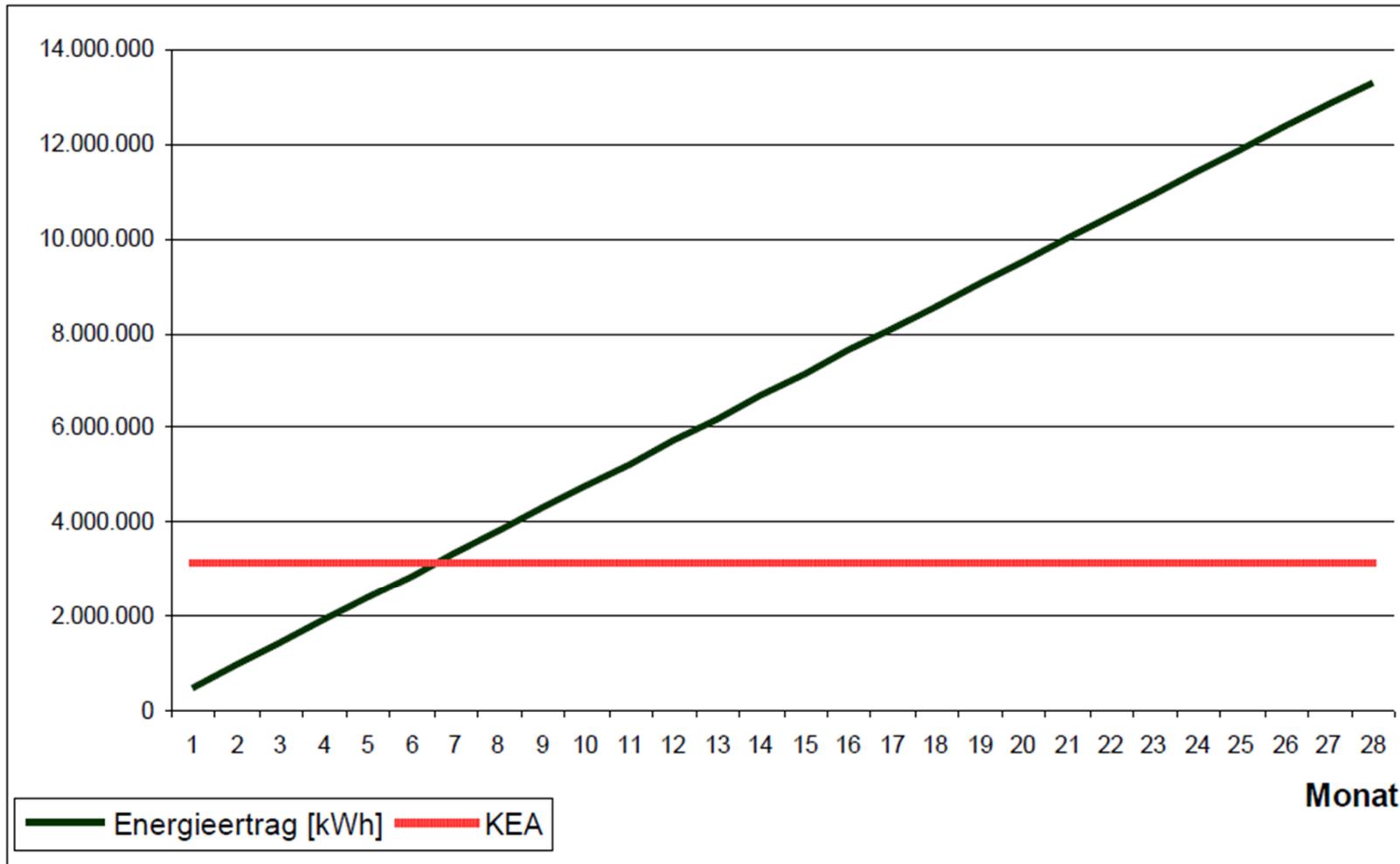
## Typischer KEA einer Windenergieanlage

Lebenszyklusphase	Primärenergieaufwand in MWh	Primärenergieaufwand (relativ, Prozent)
Produktion	2.958,600	93,8
Transport	64,696	2,0
Aufbau inklusive Fundament	515,550	16,3
Nutzung (ohne Stromerzeugung)	277,110	8,7
Rückbau	28,475	0,9
Entsorgung	- 689,840	-21,7
<b>Gesamt</b>	<b>3.154,6</b>	<b>100,00</b>
KEA <sub>H</sub>	3.538,846	
KEA <sub>N</sub>	277,110	
KEA <sub>E</sub>	- 661,365	
<b>KEA</b>	<b>3.154,6</b>	

Quelle: Zimmermann 2011



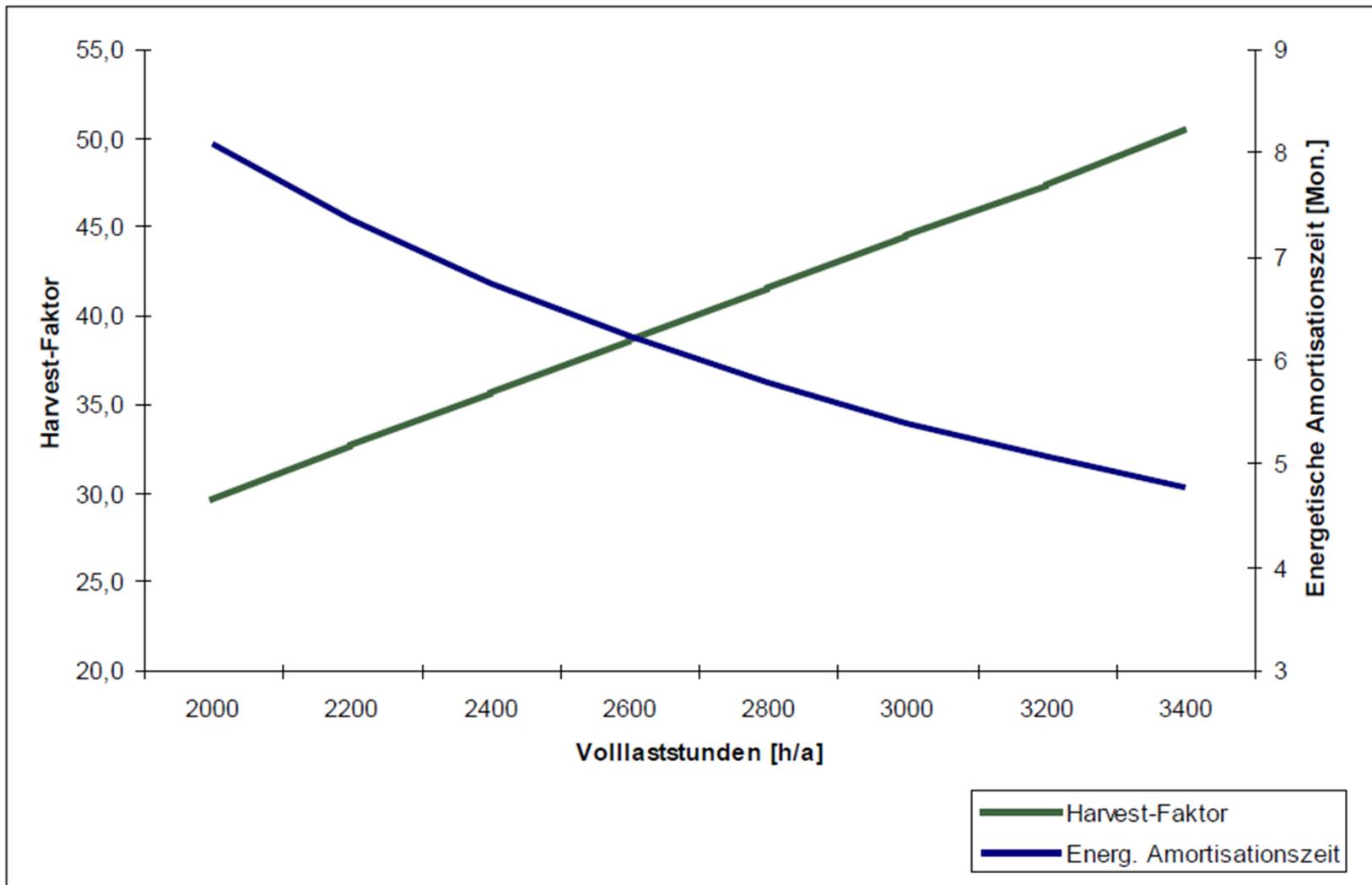
# Energieertrag und KEA: Amortisation



Quelle: Zimmermann 2011



## Erntefaktor/Amortisation und Volllaststunden



Quelle: Zimmermann 2011

Volllaststunden = Maß für die Auslastung der Anlage. Guter Standort: 3.000h (pro Jahr)



## Typische Amortisationszeiten für EE

Energetische Amortisationszeit verschiedener Anlagen in Monaten				
Technologie	Photovoltaik Deutschland	Photovoltaik Südeuropa	Windkraft	Solarthermie (Brauchwasser)
Spanne der Amortisationszeit in Monaten	15 - >100	7 - 76	3 - 23	5 - 32
Gewählte realistische Amortisationszeit in Monaten	mono-Si: 40 poly-Si: 30 amorph: 28 CIS: 17	mono-Si: 24 poly-Si: 18 amorph: 16 CIS: 10	5	10

Quelle: Volker Quaschnig, <http://www.volker-quaschnig.de/datserv/kev/index.php>



## Typische Erntefaktoren für EE

### Erntefaktor verschiedener regenerativer Anlagen

Technologie	Photovoltaik Deutschland	Photovoltaik Südeuropa	Windkraft	Solarthermie (Brauchwasser)
Erntefaktor	mono-Si: 7,5 poly-Si: 10 amorph: 11 CIS: 17	mono-Si: 12,5 poly-Si: 17 amorph: 19 CIS: 30	48	24

Quelle: Volker Quaschning, <http://www.volker-quaschning.de/datserv/kev/index.php>



## Typische KEA für Photovoltaik

Kumulierter Energieaufwand in kWh/kWp für die Photovoltaik				
Quelle	mono-Si	poly-Si	a-Si/ $\mu$ -Si	CIS/CIGS
Hagedorn 1989	12.200 - 20.500	9.000 - 20.000	7.500 - 13.300	
Adler 1993	11.400 - 17.900	6.300 - 13.600	4.200 - 9.800	
Adam, Schieferdecker 1997	11.000	7.500	5.500	790 - 2.990
Alsema, Frankl, Kato 1998	13.055 - 30.277	9.722 - 26.666	5.555	
Knapp, Jester 2000 *)	5.600			3.070
Ito et al. 2010	10.420 - 13.280	7.580 - 8.500	6.970 - 8.940	5.250 - 6.360
Kim, Fthenakis 2011				2.400 - 4.870

\*) Knapp, Jester: kWhel / kWp, alle anderen kWh(Primärenergie) / kWp

Quelle: Volker Quaschnig, <http://www.volker-quaschnig.de/datserv/kev/index.php>



## Typ. KEA für Windenergieanlagen / Solarthermie

### Kumulierter Energieaufwand in kWh/kW für Windkraftanlagen

Quelle	kWh/kW
Hagedorn, Ilmberger 1992	5.000 - 45.000
Pick, Wagner, Bunk 1998	2.194 - 2.767

### Kumulierter Energieaufwand in kWh/m<sup>2</sup> für Solarthermieanlagen

Quelle	kWh/m <sup>2</sup>
Adler 1993	330 - 1.100

Quelle: Volker Quaschnig, <http://www.volker-quaschnig.de/datserv/kev/index.php>



## Aufgaben für das Selbststudium

1. Führen Sie sich die Berechnung der Amortisationszeit eines fossilen Kraftwerks vor Augen. Warum ist dies keine sinnvolle Größe?
2. Warum ist der Erntefaktor als Bewertungsgröße für erneuerbare Energieanlagen besser geeignet als die Amortisationszeit?
3. Wann und warum kann ein KEA Wert auch negativ sein? Siehe z.B. die Entsorgungsphase einer Windenergieanlage. Was bedeutet das für die Verbesserung der energetischen Effizienz?
4. Woher stammen die großen Spannweiten bei KEA,  $T_A$  und EF? Welche Standortfaktoren beeinflussen den Erntefaktor bei Wind und Photovoltaik?



## Literatur und weiterführende Quellen

- Zimmermann, T. (2011). Entwicklung eines Life Cycle Assessment Tools für Windenergieanlagen (Diplomarbeit). Universität Bremen, Bremen.
- Zimmermann, T. (2012 // 2013). Parameterized tool for site specific LCAs of wind energy converters. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 49–60. doi:10.1007/s11367-012-0467-y
- Adam, T.; Schieferdecker, B.: Methodik im Rahmen produktorientierter Betrachtungen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 47.Jg. (1997) Heft 11, S. 678-682
- Adler, U.: Energetische Amortisation. *Sonnenenergie* 6/93, S. 10-12
- Alsema, E.A.; Frankl, P.; Kato, K.: Energy pay-back Time of Photovoltaic Energy Systems: Present Status and Prospects. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. Vienna, 6-10 July 1998, S. 2125-2130.

**Anmerkung zu den rechtlichen Grundlagen:** Die Rechte der Bilder und Graphiken liegen, sofern nicht anders angegeben, beim Verfasser der Folien. Die Folientexte beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf eigene Forschungs-, Lehr- und Praxistransfertätigkeiten und sind deshalb bei deren Verwendung zu zitieren.



## Literatur und weiterführende Quellen

- Hagedorn, G.: Kumulierter Energieverbrauch und Erntefaktoren von Photovoltaik-Systemen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 39.Jg. (1989) Heft 11, S. 712-718
- Hagedorn, G.; Ilmberger, F.: Kumulierter Energieverbrauch und Erntefaktoren von Windkraftanlagen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 42.Jg. (1992) Heft 1/2, S. 42-51
- Ito, Masakazu; Kudo, Mitsuru; Nagura, Masashi; Kurokawa, Kosuke: A Comparative Study on Life-Cycle Analysis of 20 Different PV Modules Installed at a Hokuto Mega-Solar Plant. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, 6-10 September 2010, S. 3900-3903.
- Kim, H.C.; Fthenakis, V.: Energy Payback Time and Life-Cycle Greenhouse-Gas Emissions of CIGS PV: Best Current Estimates. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 5-9 September 2011, S. 3826-3830.

**Anmerkung zu den rechtlichen Grundlagen:** Die Rechte der Bilder und Graphiken liegen, sofern nicht anders angegeben, beim Verfasser der Folien. Die Folientexte beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf eigene Forschungs-, Lehr- und Praxistransfer-Tätigkeiten und sind deshalb bei deren Verwendung zu zitieren.



## Literatur und weiterführende Quellen

- Knapp, K.; Jester, T.: PV payback. Homepower #80, December 2000/January 2001, S. 42-46.
- Pick, E.; Wagner, H-J.; Bunk, O.: Kumulierter Energieaufwand von Windkraftanlagen. BWK Bd. 50 (1998) Nr. 11/12, S. 52-55.

**Anmerkung zu den rechtlichen Grundlagen:** Die Rechte der Bilder und Graphiken liegen, sofern nicht anders angegeben, beim Verfasser der Folien. Die Folientexte beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf eigene Forschungs-, Lehr- und Praxistransfer-Tätigkeiten und sind deshalb bei deren Verwendung zu zitieren.