

# ***Turbulenzen bei Windkraft und Solarenergie***

***Hartmut Graßl***

***Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg***

***Beitrag zum Workshop  
Turbulenzen bei Öl und Gas  
Berlin, 24 . Oktober 2016***

## ***Ausgangslage:***

**Wird die ab 4. November 2016 völkerrechtlich verbindliche Paris-Vereinbarung im Wesentlichen umgesetzt, dann sollte in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts gelten:**

***Balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases! In Deutsch: Treibhausgasneutralität!***

***Man könnte auch sagen:***

***Kohle, Erdöl und Erdgas müssen überwiegend in der Erdkruste bleiben***

***oder***

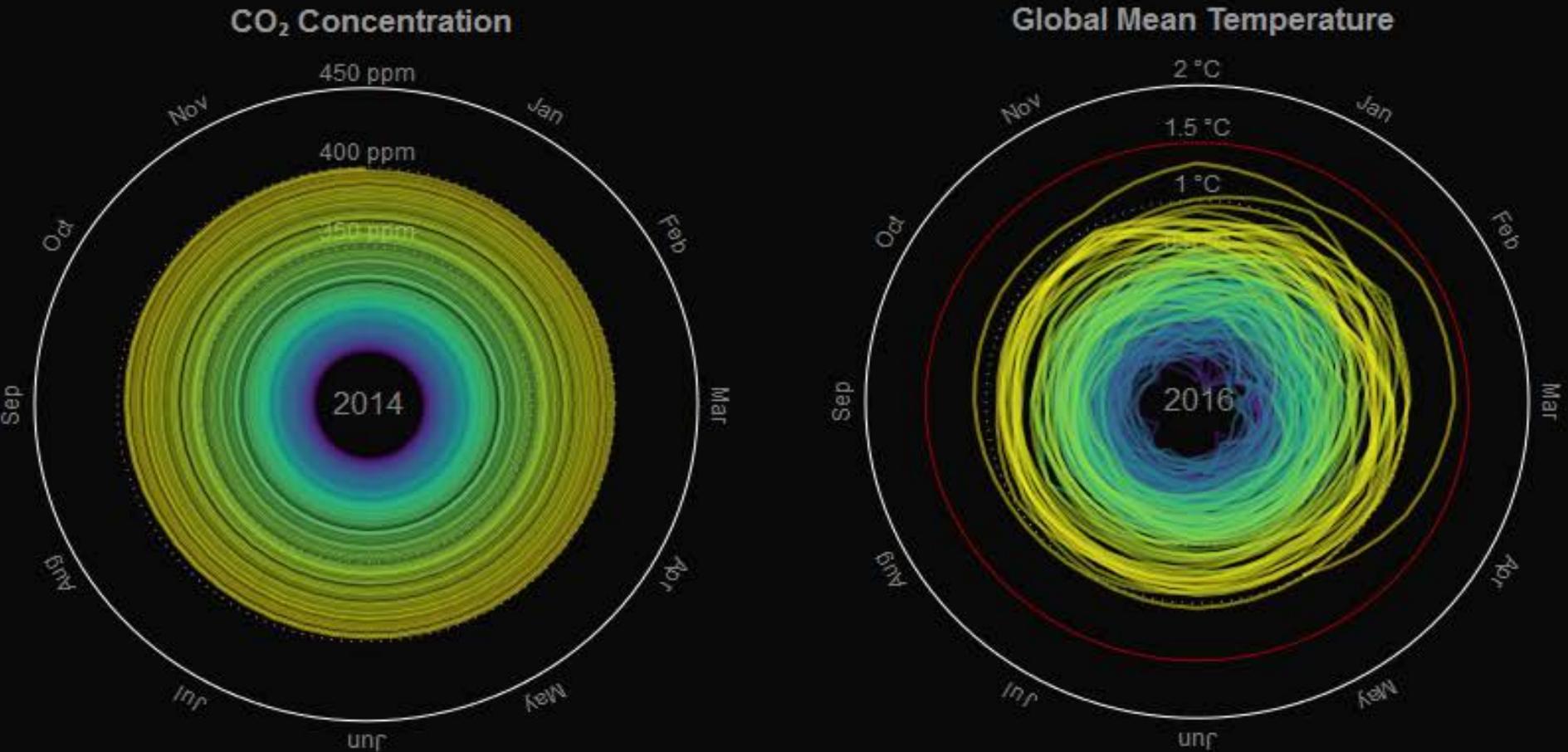
***Warum reden wir überhaupt noch über Peak Oil?***

***oder***

***Die globale Energiewende ist Völkerrecht***

# *CO<sub>2</sub>- und Temperaturzunahme seit 1860*

## *Das hat die Politiker bewegt*



*(PIK 2016)*

## ***Warum ist die globale Energiewende unumgänglich?***

- ***Erstens***, weil die schlampige Verbrennung fossiler Brennstoffe weltweit sehr vielen Menschen durch Luftverschmutzung das Leben verkürzt.
- ***Zweitens***, weil fossile Brennstoffe (Reste von Lebewesen) gegenüber ihrer Bildungsrate mit millionenfach erhöhter Geschwindigkeit verbrannt werden, also bald zu Ende gehen.
- ***Drittens***, weil die vom Klimawandel besonders betroffenen Menschen nicht die wesentlichen Verursacher sind, also die Ungerechtigkeit noch weiter zunimmt (siehe dazu „Laudato Si“).
- ***Viertens***, weil es in unserer Umwelt Energieflüsse gibt, die den *homo sapiens* sicher - was die Verfügbarkeit anlangt - überleben werden, und die wir also für unsere Zwecke so lange wir es möchten nützen können.
- ***Fünftens***, weil es ab 4. November 2016 ein völkerrechtlich verbindliches Abkommen zur Begrenzung der mittleren globalen Erwärmung geben wird.

***Reichen die Energieflüsse in der Umwelt für die komplette Energieversorgung von neun Milliarden Menschen?***

***Eine erste oberflächliche Antwort:***

***Wir brauchen im globalen Mittel nur eine Energieflussdichte von  $0,03 \text{ W/m}^2$  und die Sonne bietet an der Erdoberfläche im Mittel ca.  $165 \text{ W/m}^2$  an***

***Folgerung: Eine solare Gesellschaft ist aus physikalischen Gründen leicht möglich***

**Die Lobby für die erneuerbaren Energien, meist NROs, war sehr erfolgreich in der Vermittlung der folgenden Überzeugung des Normalbürgers: *Die Erneuerbaren schaffen das locker! Und zwar immer dezentral!***

**Ich möchte heute zeigen, dass das für ein dicht besiedeltes Land bei hohem Lebensstandard nur schwer oder gar nicht zu erreichen ist.**

# Das Angebot: Rangliste der Potenziale Erneuerbarer Energiequellen

## Ranking of technical potentials of renewable energy types

Energietyp	Globaler Mittelwert	Deutschland/Germany	Angebotstyp/Type of offer
<b>Sonne</b> Sun	~ 165	~ 110	<b>stark schwankend, nur tagsüber;</b> <i>strongly varying, daytime only</i>
<b>Wind</b>	~ 2	~ 2	<b>unregelmäßig, Tag und Nacht;</b> <i>variable, day and night</i>
<b>Biomasse</b> Biomass	~ 0,1	< 0,3 Gedüngter Maisacker <0,5 Zuckerrohr	<b>steuerbar, jedoch großer Flächenverbrauch, Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung;</b> <i>manageable, but low energy flux density, competition with food production</i>
<b>Tiefe Geothermie</b> Deep Geothermal Energy	~ 0,1	~ 0,08	<b>kontinuierlich, risikohafte Erkundung</b> <i>continuous, risky exploration</i>
<b>Gezeiten</b> Tides	<< 0,1		<b>regelmäßig, jedoch alternierend, nur wenige Küstenabschnitte;</b> <i>regularly alternating, only few coastal areas</i>
<b>Ozeanwellen</b> Ocean waves	< 0,1		<b>unregelmäßig, fast wie Wind, küstennah;</b> <i>irregular, nearly as wind, coastal areas</i>
<b>Energieflussdichte heute</b> Energy flux density today	< 0,03	~ 1,5	
<b>Energieflussdichte in 2050</b> Energy flux density in 2050	< 0,06	< 1.5	

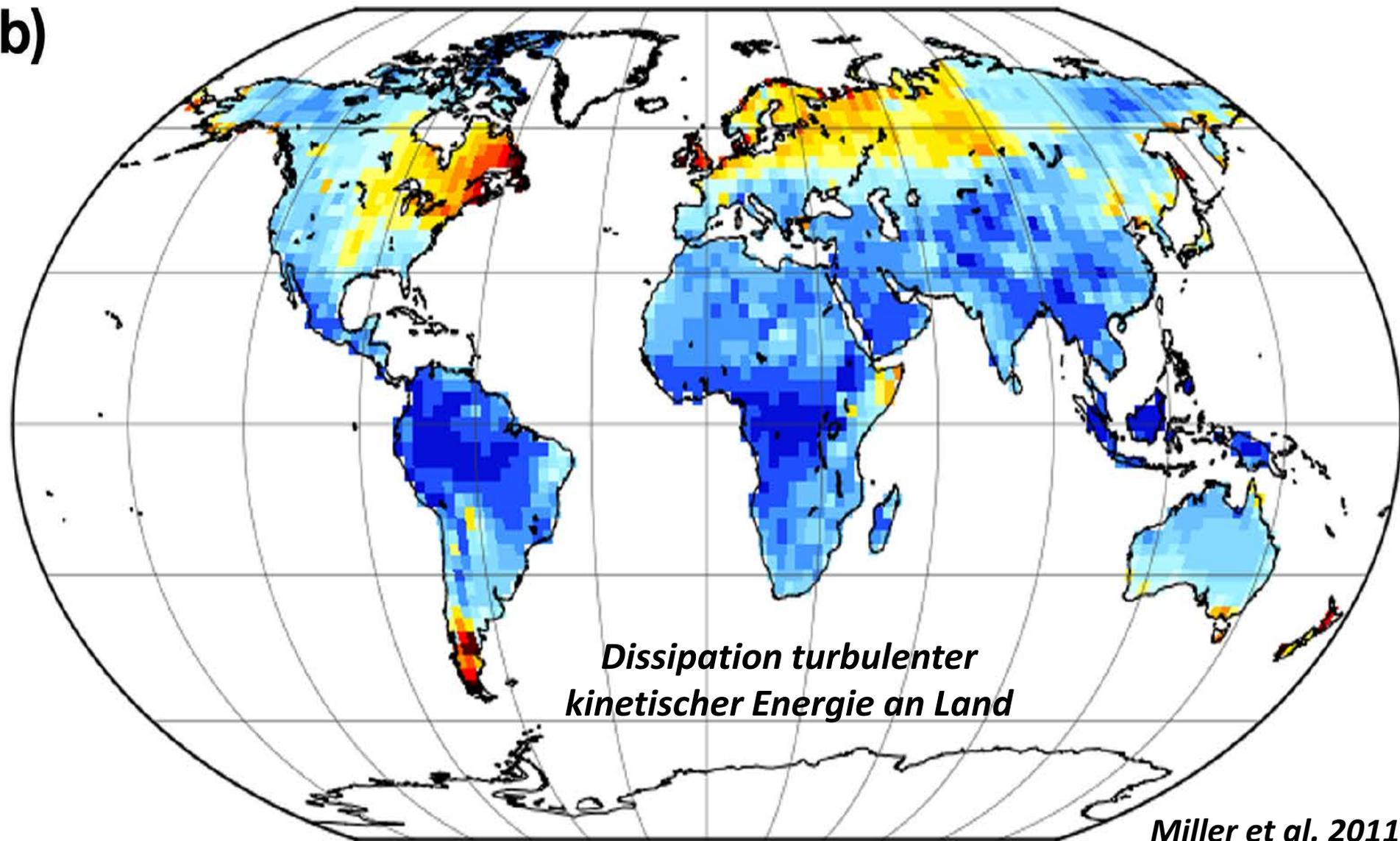
Globale Mittelwerte der Energieflussdichten an der Erdoberfläche, in Watt pro Quadratmeter ( $\text{Wm}^{-2}$ ), für verschiedene erneuerbare Quellen, gereiht nach Bedeutung; zum Vergleich sind auch aktuelle Werte des Energieversorgungssystems mit angegeben.

# ***Wiederholung: Die Reihung der erneuerbaren Energien für Deutschland***

- 1) Sonne  $110 \text{ W/m}^2$ , starker Jahres- und Tagesgang***
- 2) Wind  $1 \text{ bis } 2 \text{ W/m}^2$ , Faktor 100 schwächer als die Sonne, Faktor 10 schwächer (bei 10% Effizienz der Solarzellen), bei Beachtung von maximal 60 Prozent Effizienz der Rotoren***
- 3) Biomasse  $<0,3 \text{ W/m}^2$ , Faktor ca. 5 schwächer als der Wind***
- 4) Tiefe Geothermie  $0,08 \text{ W/m}^2$ , etwa Faktor 3 schwächer als die Biomasse***
- 5) Wasserkraft  $0,022 \text{ W/m}^2$ , fast nicht mehr ausbaubar***

# ***Die Begrenztheit der Windenergie***

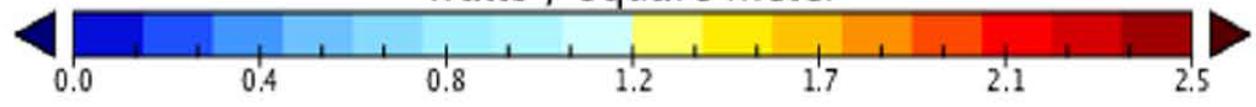
b)



*Dissipation turbulenter  
kinetischer Energie an Land*

*Miller et al. 2011*

watts / square meter



simple top-down estimate

# 174 000

incoming solar radiation flux density

122 000

30% atmos. reflection

87 000

20% atmos. absorption

31% conversion efficiency

# 29 000

maximum photovoltaic conversion rate

# 45 000

differential solar heating

0.06%  
extraction

# 900

atmospheric wind energy generation rate

large-scale  
and  
convective heating

# 17

human energy demand

6%  
extraction

# 450

wind energy dissipation in the atmospheric boundary layer

# 267

maximum wind energy extraction rate from atmospheric boundary layer

# 112

wind energy dissipation over land

60% conversion efficiency

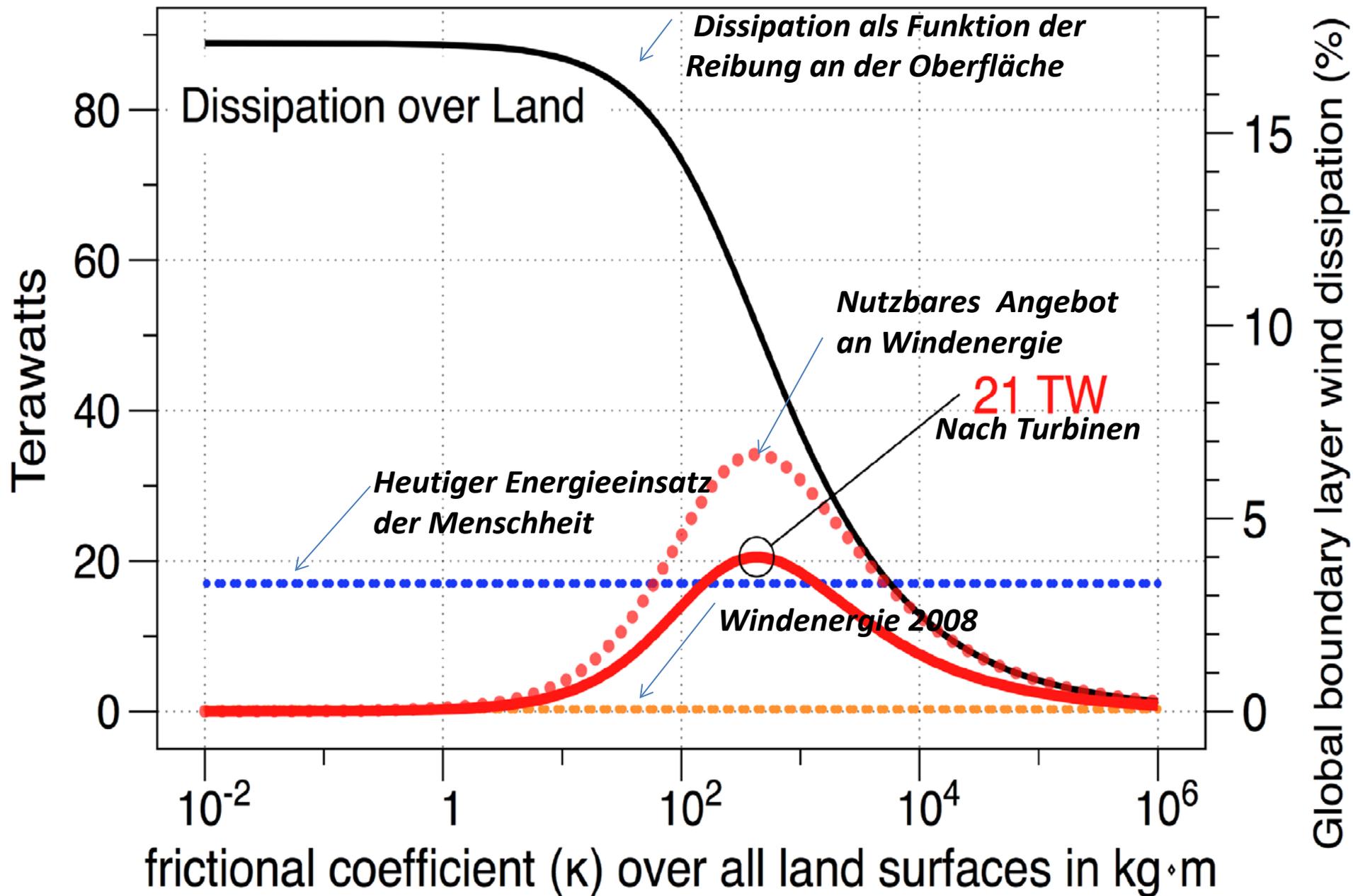
# 68

continually extractable wind energy over land

dependent processes

Miller et al. 2011

\* all quantities are in terawatts (TW) unless otherwise noted



# ***Haupthürden für eine Energieversorgung mit fast ausschließlicher Nutzung von Sonnen- und Windenergie (in Deutschland)***

- ***Lobby für die fossilen Brennstoffe***
- ***Hochdrucklage Mitteleuropa im dunkelsten Abschnitt des Jahres (Ende November bis Ende Januar)***
- *Begrenztheit der Windenergie*
- ***Bürger mit wenig Gemeinsinn***
- ***Geringe Unterstützung der Effizienzsteigerung durch die Politik und die Bürger***

# ***Kleine Rechenbeispiele***

***Deutsche Bürger benötigen zurzeit eine Energieflussdichte von 1,5 W/m<sup>2</sup> für ihr „Luxusleben“***

***1. Frage: Reicht dafür die Windenergie?***

***Antwort: Nein, weil auf höchstens 30% der Fläche höchstens 1W/m<sup>2</sup> im Mittel geerntet werden kann. Der Beitrag wäre dann etwa nur ein Fünftel des gesamten Energiebedarfs.***

***2. Frage: Reichen Strom und Wärme aus Biomasse?***

***Antwort: Nein, bei weitem nicht. Würden wir von einem Fünftel des Landes jährlich alles dafür ernten, bekämen wir einen Beitrag von nur wenigen Prozent.***

***3. Frage: Reicht die Sonnenenergie?***

***Antwort: Ja, wenn Teilspeicherung für das Winterhalbjahr gelingt.***

***4. Frage: Können alle Erneuerbaren zusammen die Versorgung sichern?***

***Antwort: Ja, aber nur mit weit mehr Speicherung und Ferntransport***

## **Wie schnell sollen neue Diesel- und Benzinfahrzeuge nicht mehr zugelassen werden?**

**Immer wenn der Staat über neues Ordnungsrecht nachdenkt oder solches vorschlägt, argumentieren die Betroffenen meist mit dem Untergang ganzer Industriezweige. Mit der Verbindlichkeit der Paris-Vereinbarung ist bis 2050 der fast völlige Ausstieg aus fossilen Energieträgern nicht nur in Deutschland notwendig. Wir brauchen bis 2050 nicht nur einen Kohleausstiegsplan sondern auch den elektrifizierten Automobilverkehr, sei es durch Elektro- oder Brennstoffzellenautos, deren Energie aus erneuerbaren Energieträgern stammt. Einen langfristigen Zeitplan mit Ausstieg aus bisherigen Treibstoffen für Neuwagen hat der Bundesrat bis 2030 vorgeschlagen, damit sich die Industrie schon jetzt darauf einstellen kann. Die Politiker wollen doch damit die Wettbewerbsfähigkeit der Deutschen Autobauer erhöhen.**

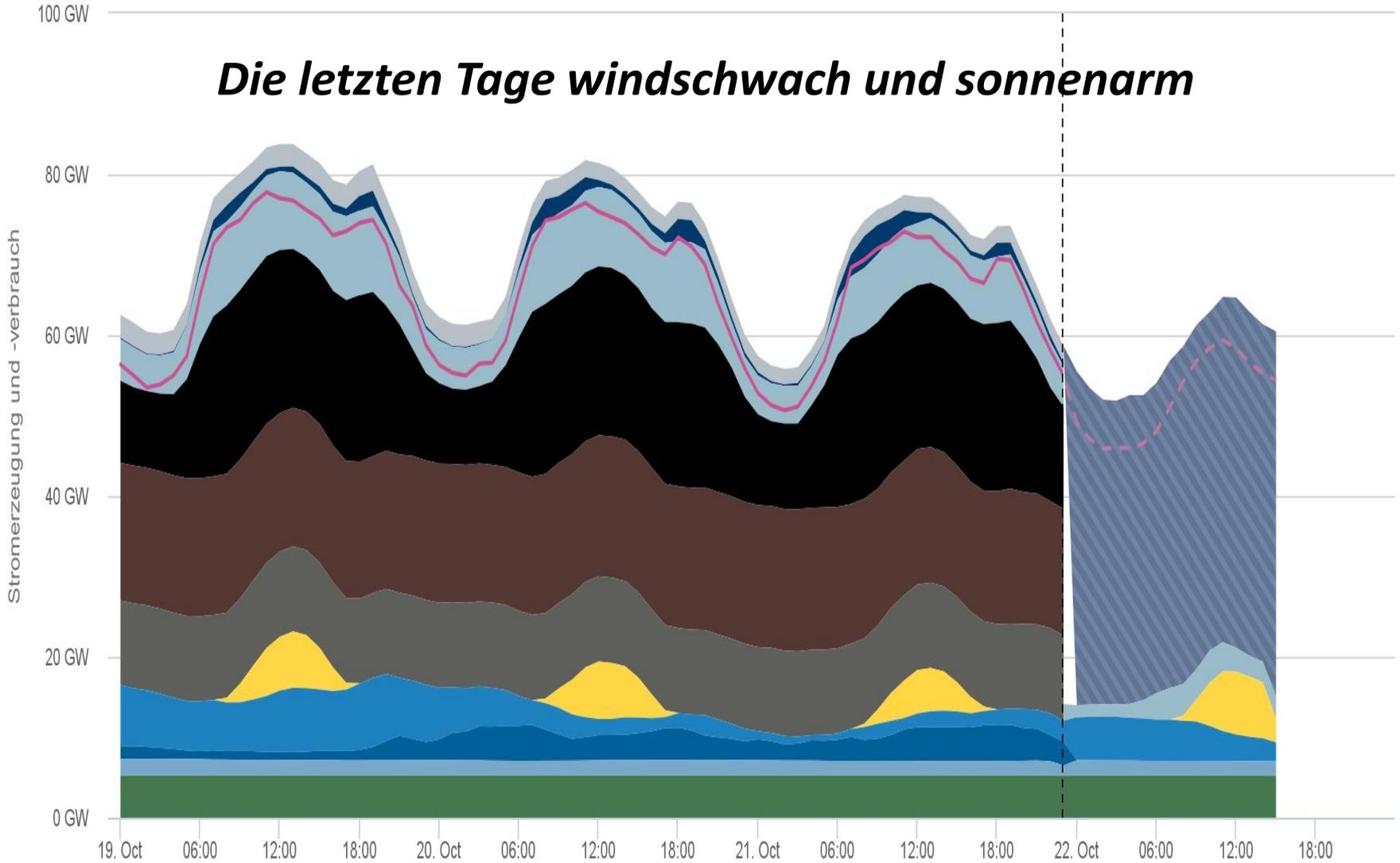
**Modifiziert nach Graßl, [Klimaretter.info](http://Klimaretter.info)**

*Zwei sehr harte Nüsse bleiben:*

**Der Straßengüterverkehr**

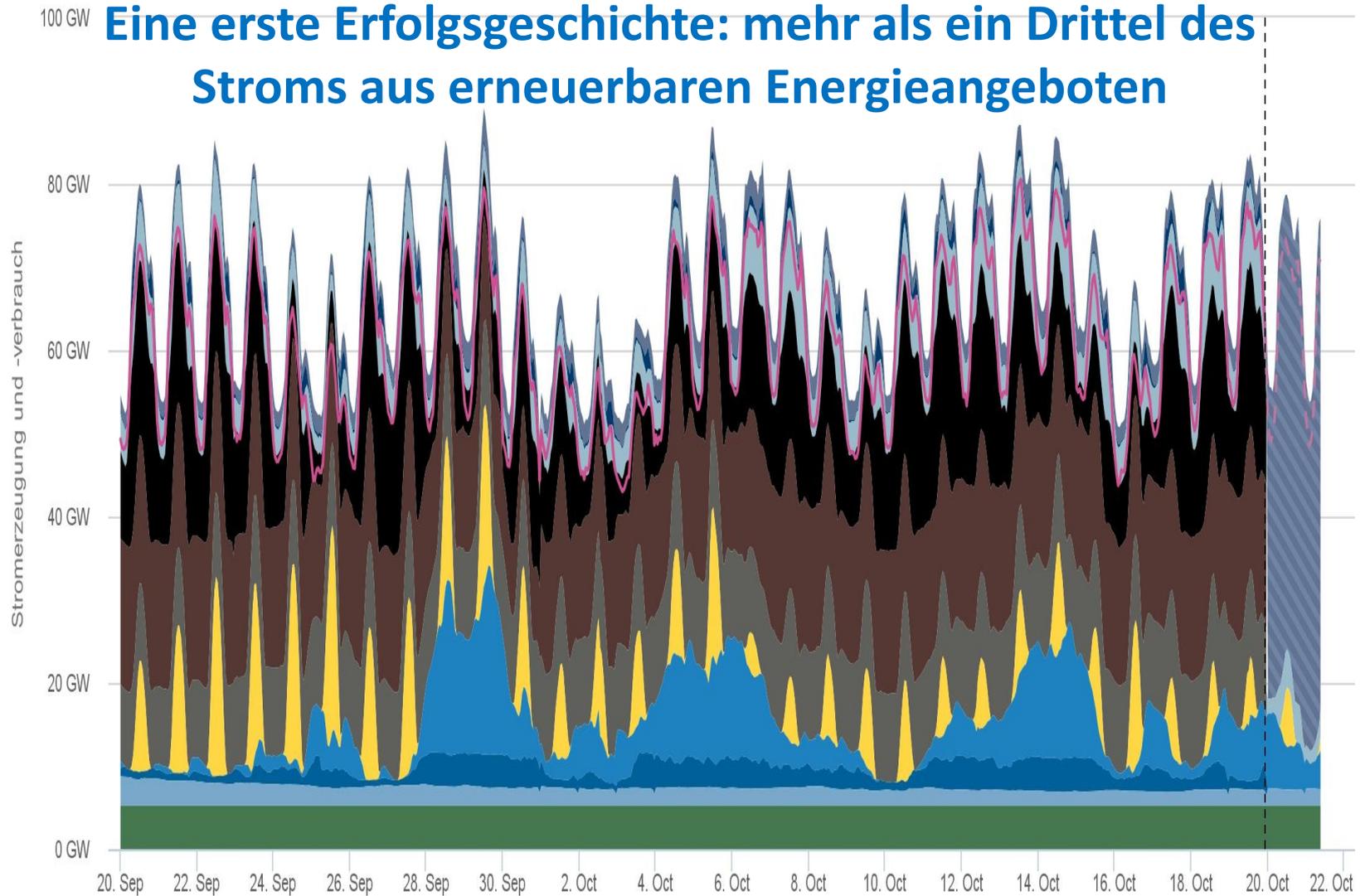
**Die Luftfahrt**

# Die letzten Tage windschwach und sonnenarm



- Restliche / Konv. Kraftwerke
- Konv. Kraftwerke (Vorläufig)
- Solar
- Wind Onshore
- Wind Offshore
- Wasserkraft
- Biomasse
- Stromverbrauch
- - - Stromverbrauch (Vorläufig)
- Steinkohle
- Braunkohle
- Kernenergie
- Pumpspeicher
- Erdgas
- Andere

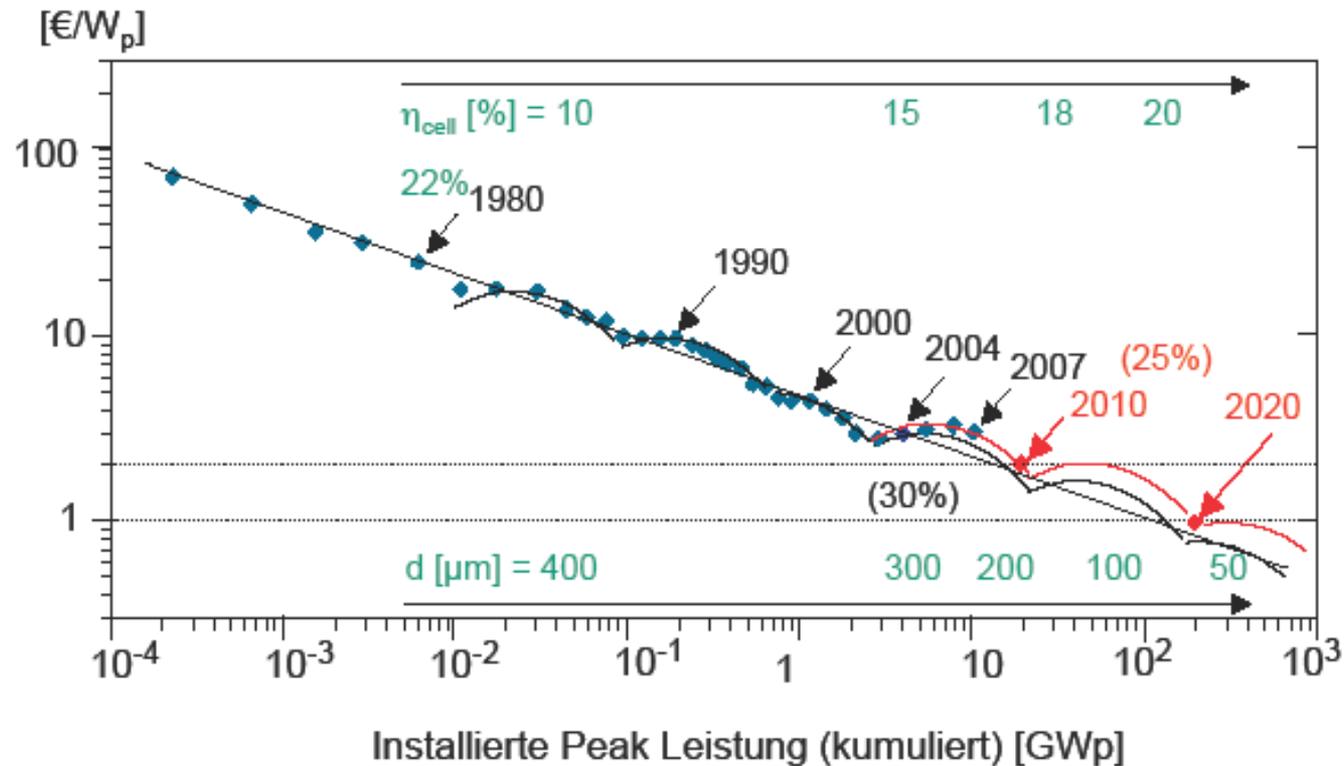
# Eine erste Erfolgsgeschichte: mehr als ein Drittel des Stroms aus erneuerbaren Energieangeboten



- Restliche / Konv. Kraftwerke
- Konv. Kraftwerke (Vorläufig)
- Solar
- Wind Onshore
- Wind Offshore
- Wasserkraft
- Biomasse
- Stromverbrauch
- Stromverbrauch (Vorläufig)
- Steinkohle
- Braunkohle
- Kernenergie
- Pumpspeicher
- Erdgas
- Andere

# *Diese Kurve war der wichtigste Helfer für die Paris-Vereinbarung*

## Preis-Lernkurve von PV-Modulen aus kristallinem Si

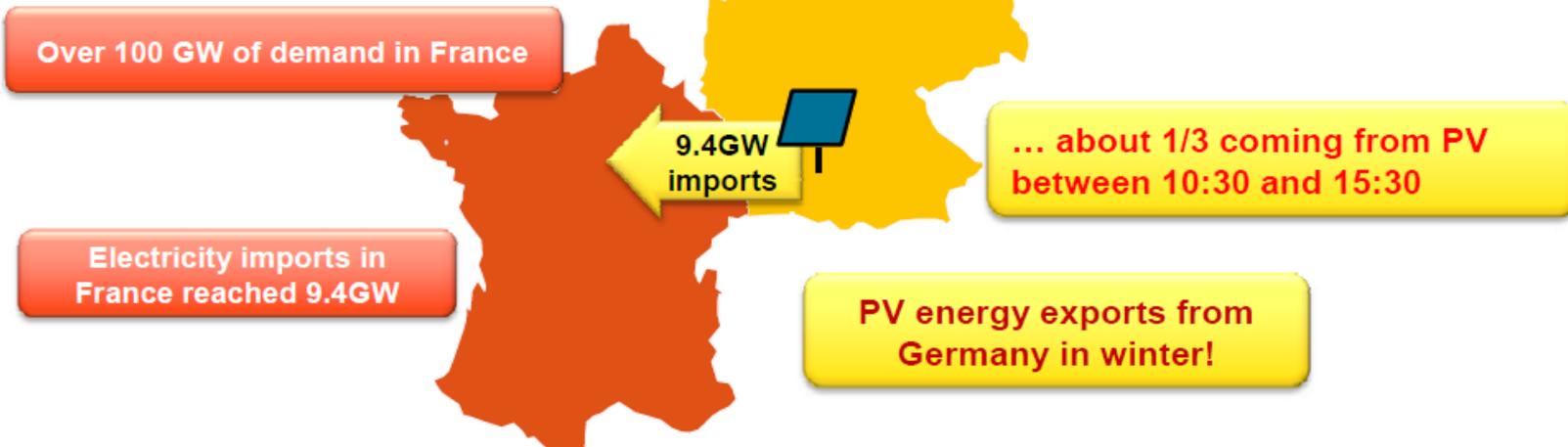


Graph: G. Willeke, ISE

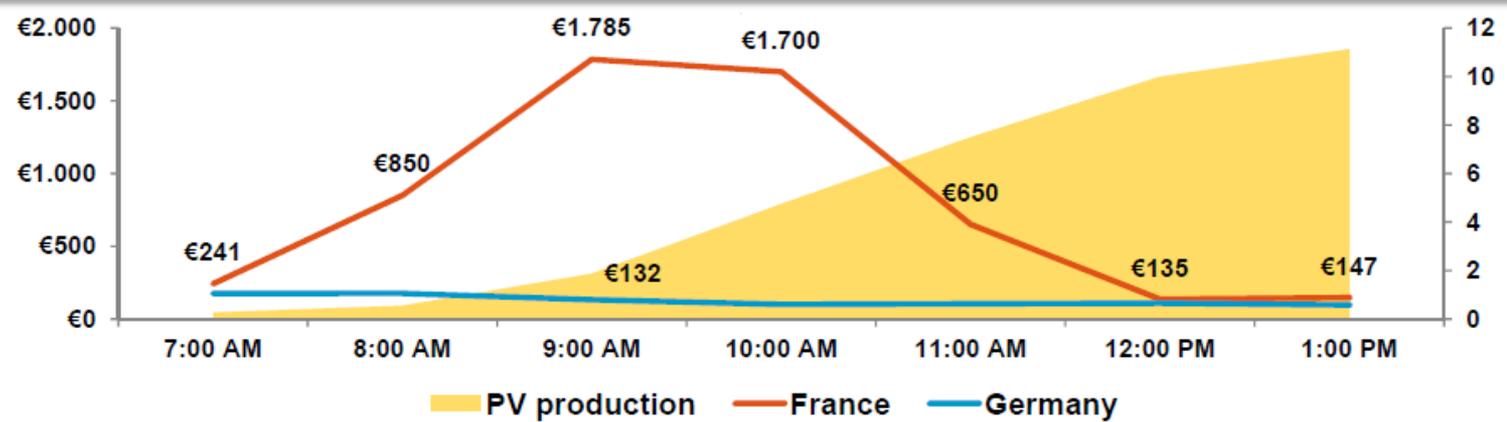
# PV in interconnected electricity systems

## Example: export of German PV energy to France

9 February 2012



**Peak Prices in France and Germany on 9th February 2012 (€/MWh)**



Source: ICF, Renewables International EEX power exchange, Epex Spot  
 Brussels, 21 March 2012. EPIA Market Workshop

# ***Schlussbemerkung aus Sicht eines Physikers und Politikberaters***

- ***Die Energiewende ist unumkehrbar eingeläutet***
- ***Die zentrale Stütze wird im globalen Maßstab langfristig die Sonnenenergie sein***
- ***Bioenergie und tiefe Geothermie werden nur einen kleinen Beitrag liefern***
- ***Kohle und Erdöl werden früher ausscheiden als Erdgas***
- ***Speicherung als Gas muss noch entwickelt werden***
- ***Das Energienetz muss ein europäisches sein, Autarkie in kleineren Regionen ist ein Traum***