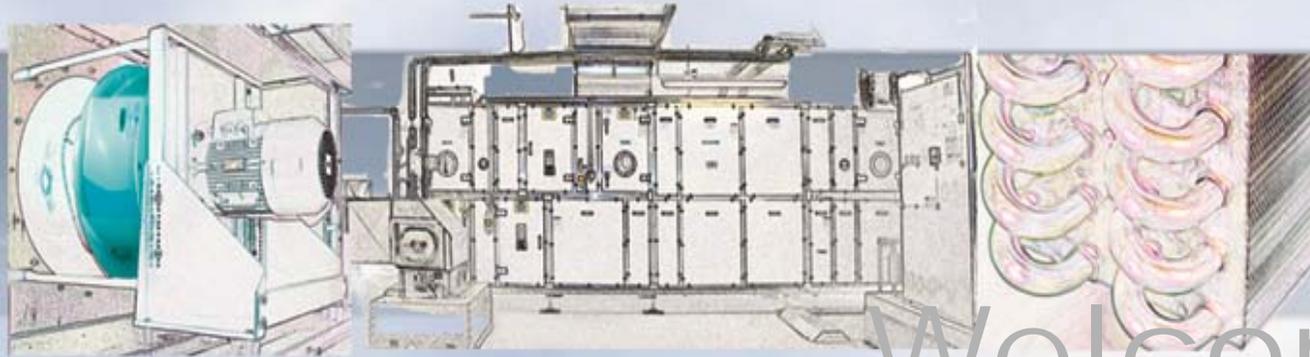


# Willkommen



# Bienvenue

# Welcome

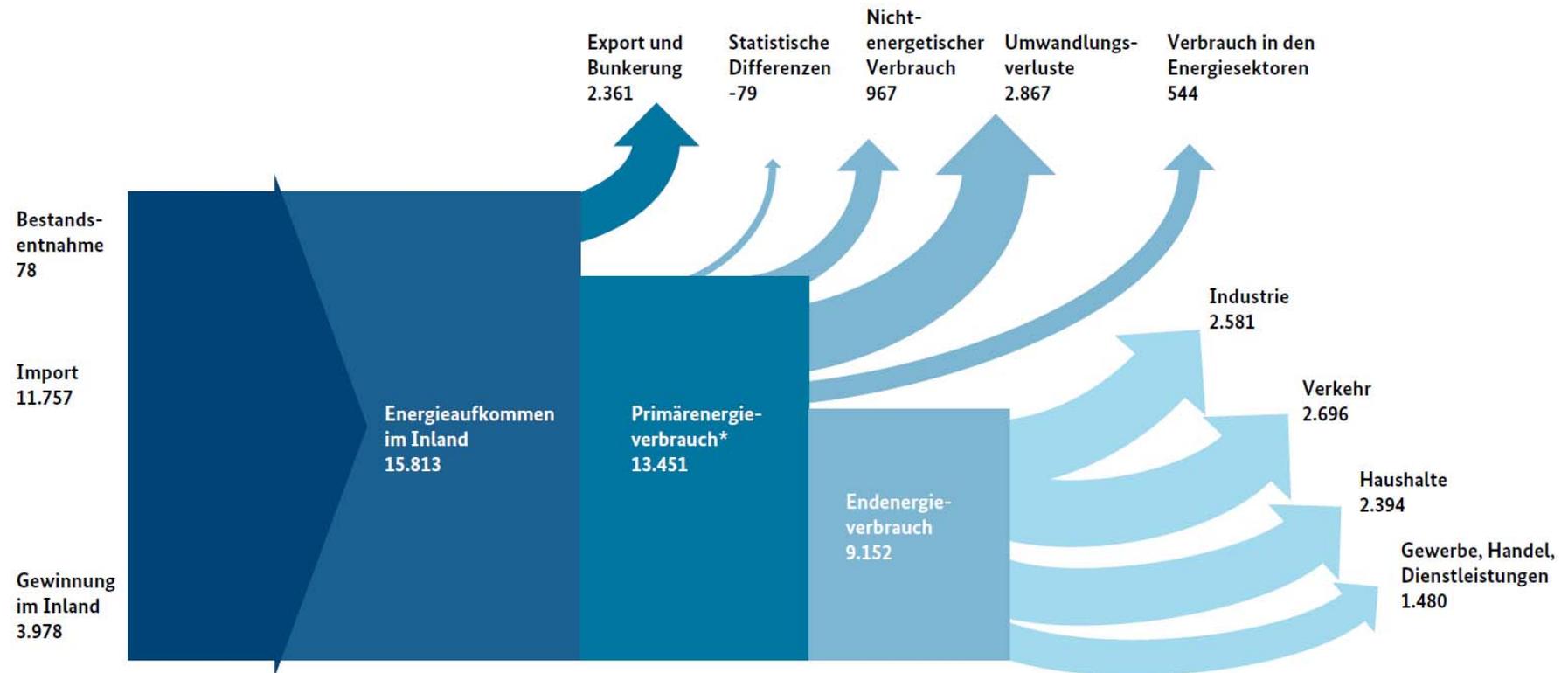
## Energietechnik Erneuerbare Physik der Windenergie

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup  
c.kaup@umwelt-campus.de



HOCHSCHULE TRIER  
Umwelt-Campus Birkenfeld  
Umwelt macht Karriere.

## Energieflussbild 2016 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule (PJ)



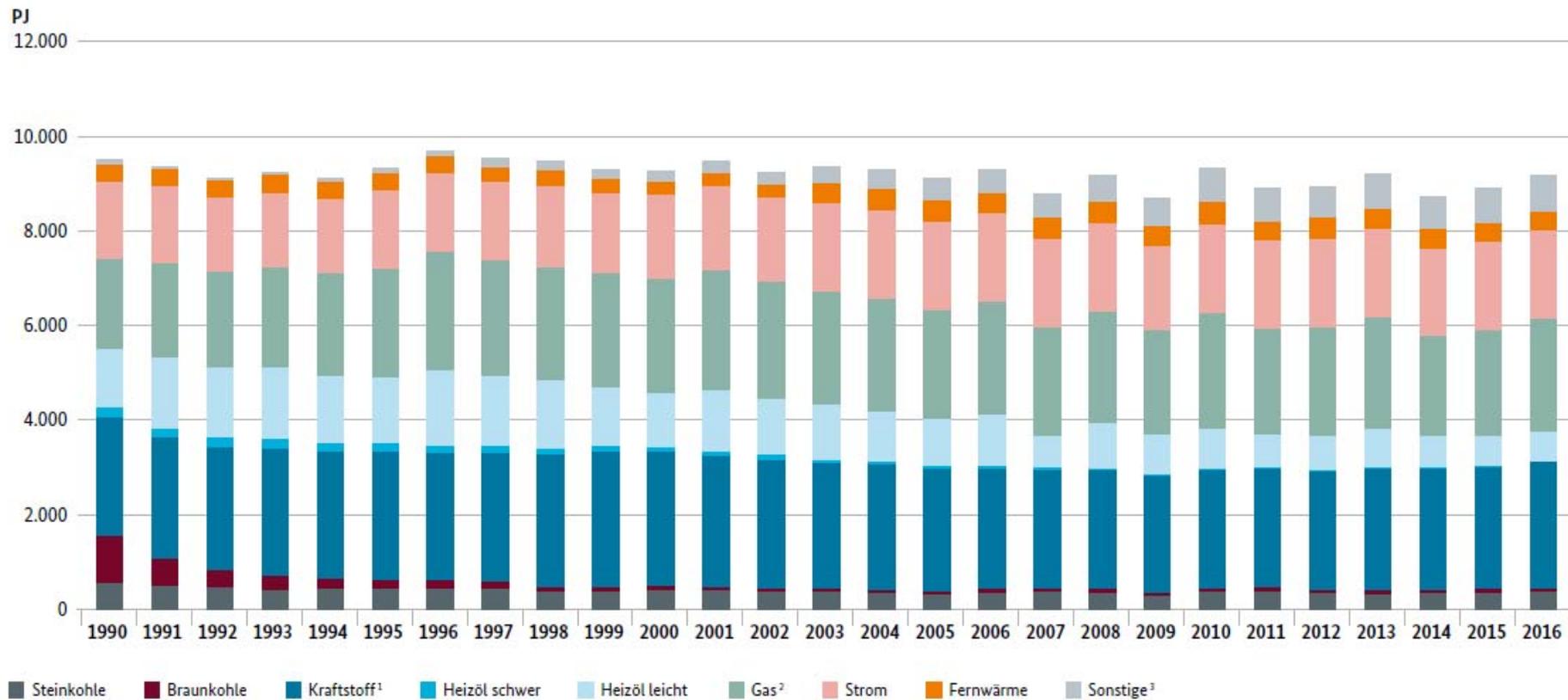
Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Primärenergieverbrauch liegt bei 12,6 %. Abweichungen in den Summen sind rundungsbedingt.

\* Alle Zahlen vorläufig/geschätzt  
29,308 Petajoule (PJ)  $\triangleq$  1 Mio. t SKE

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) 07/2017

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

## Endenergieverbrauch nach Energieträgern in Deutschland

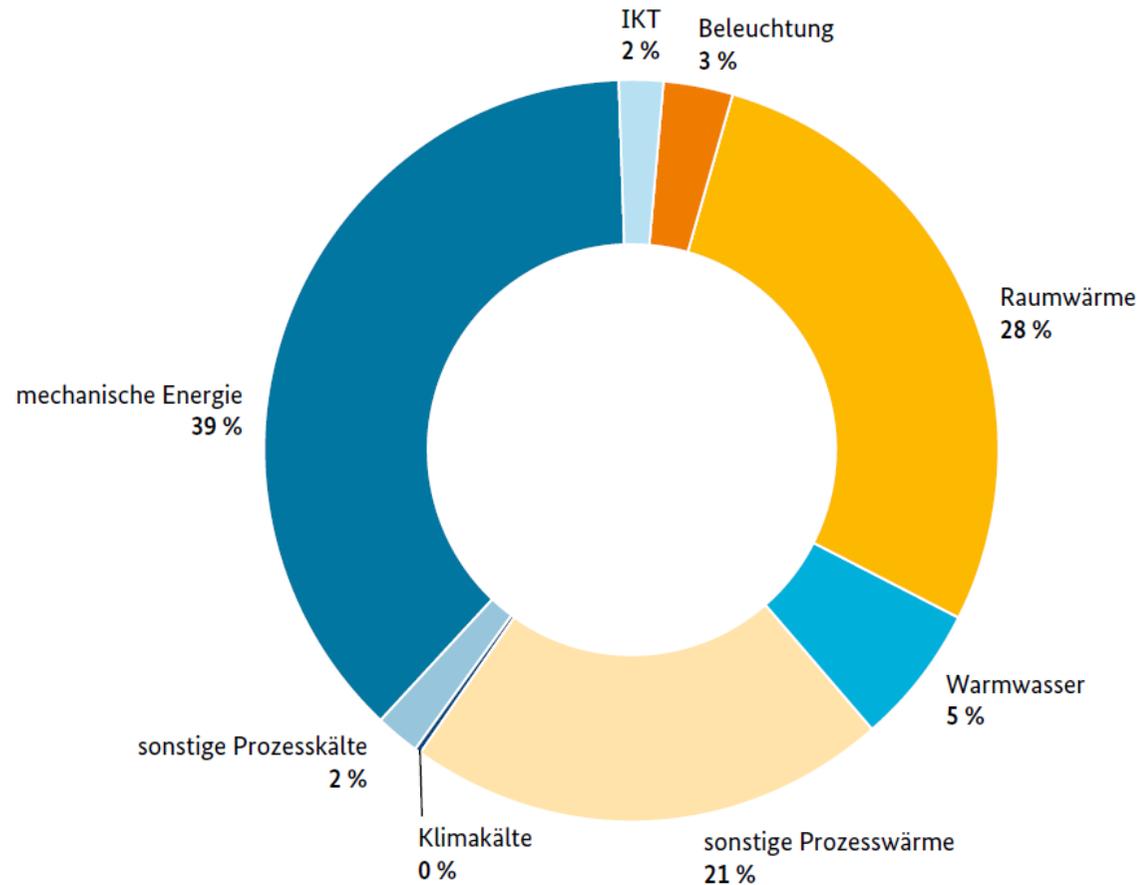


1 Kraftstoffe und übrige Mineralölprodukte 2 Flüssiggas, Raffineriegas, Kokereigas, Gichtgas und Naturgas  
3 Brennholz, Brenntorf, Klärschlamm, Müll

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

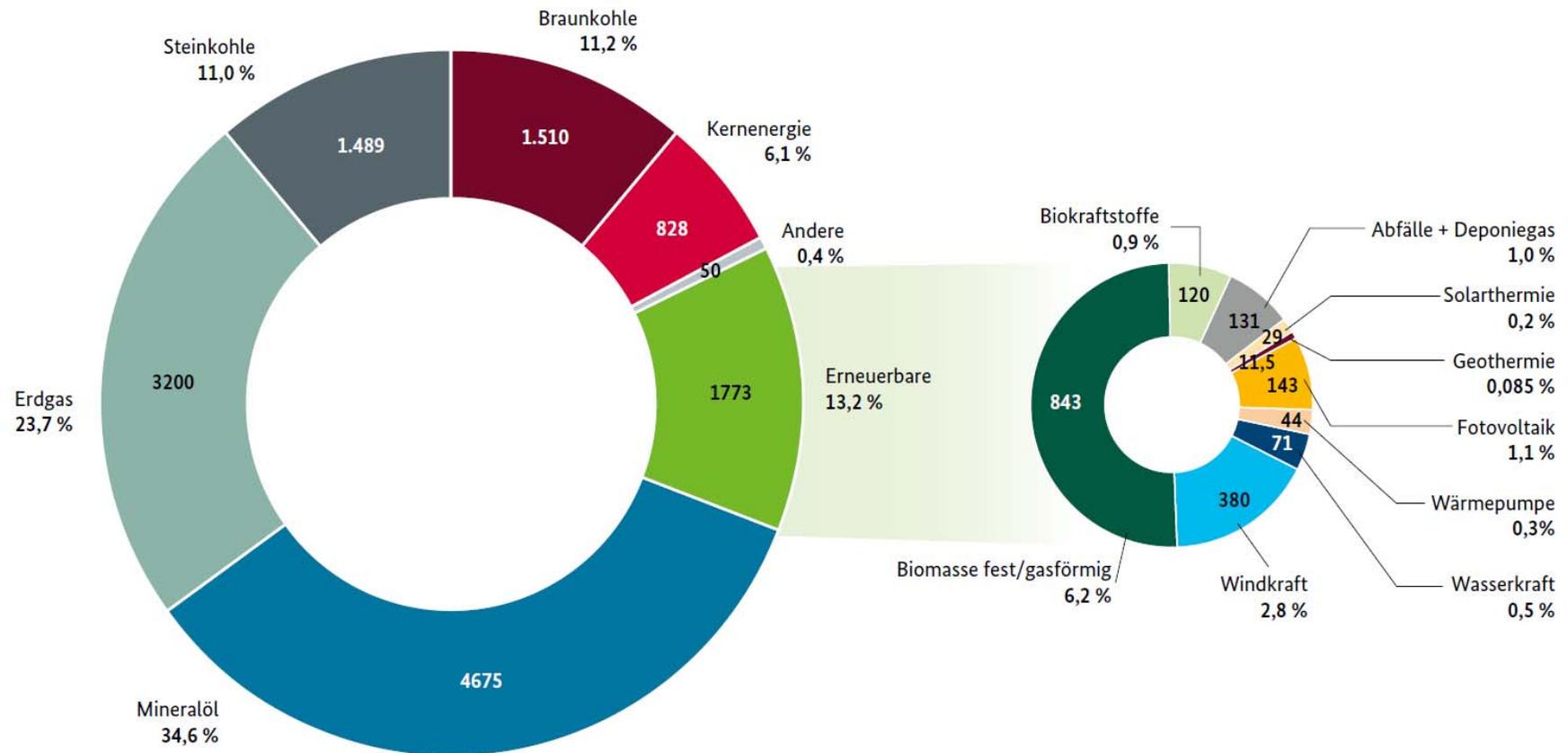
## Energieverbrauch nach Anwendungsbereichen in Deutschland 2016 (insgesamt 9.151 PJ)



Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

Primärenergieverbrauch in Deutschland 2017 (13.525 PJ\*)

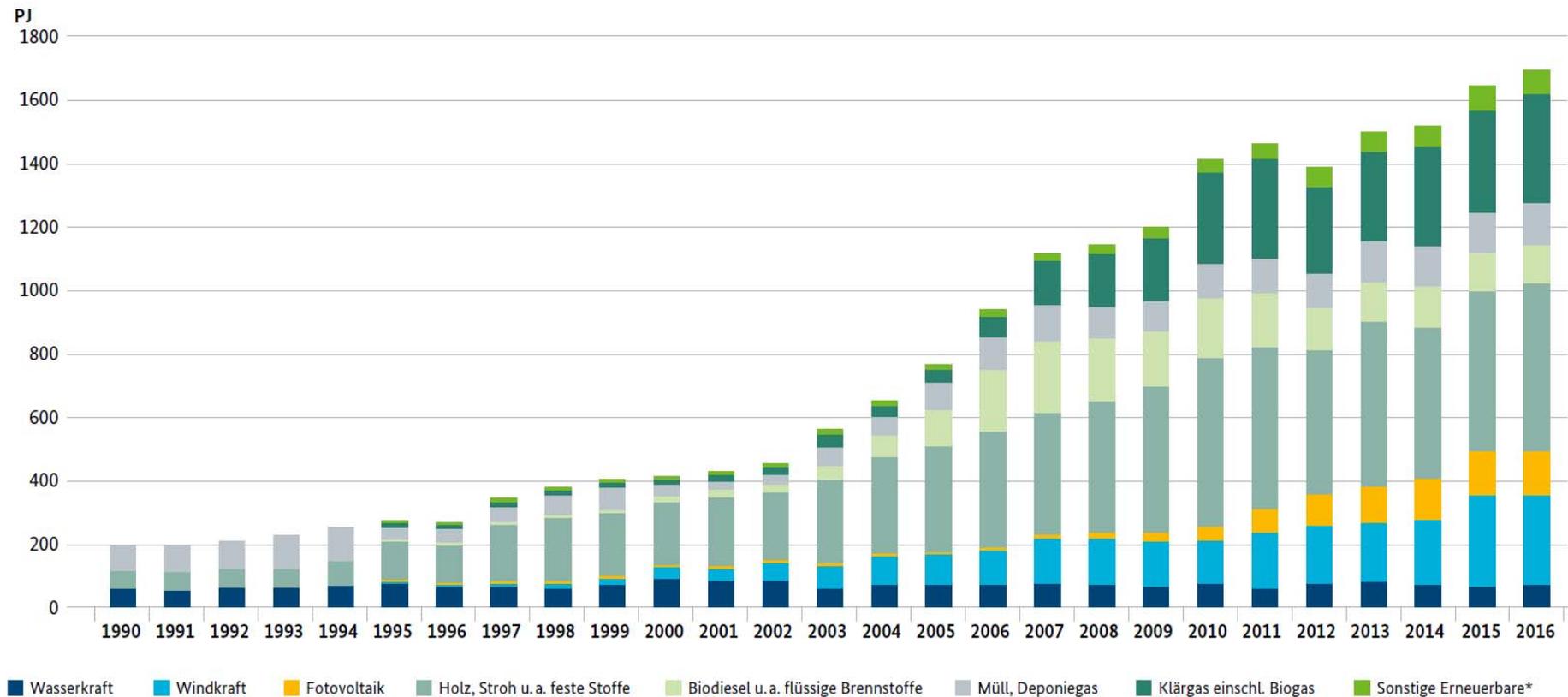


\* Vorläufig

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

## Beitrag erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch in Deutschland



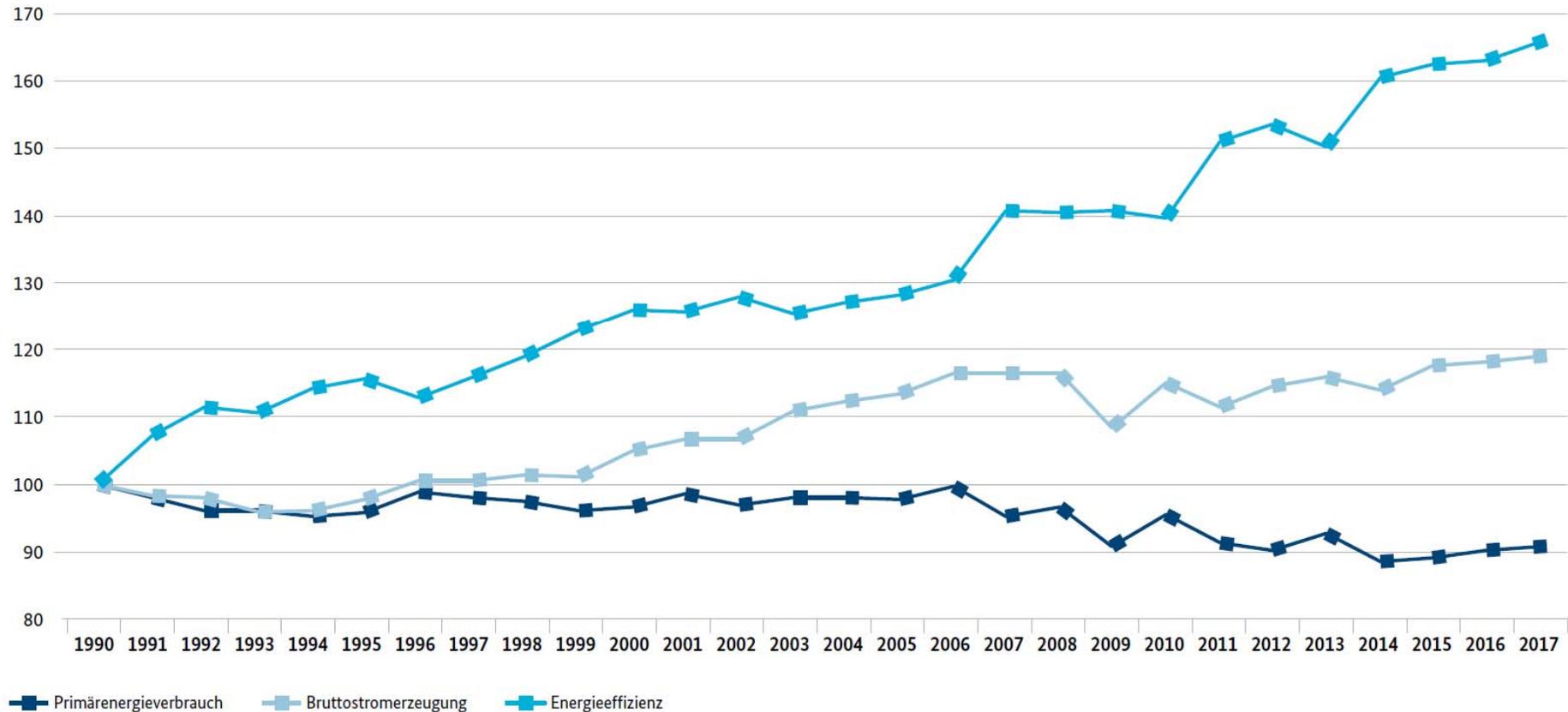
\* Solarthermie, Geothermie, Wärmepumpen

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

## Entwicklung von Primärenergieverbrauch, Stromerzeugung und Energieeffizienz

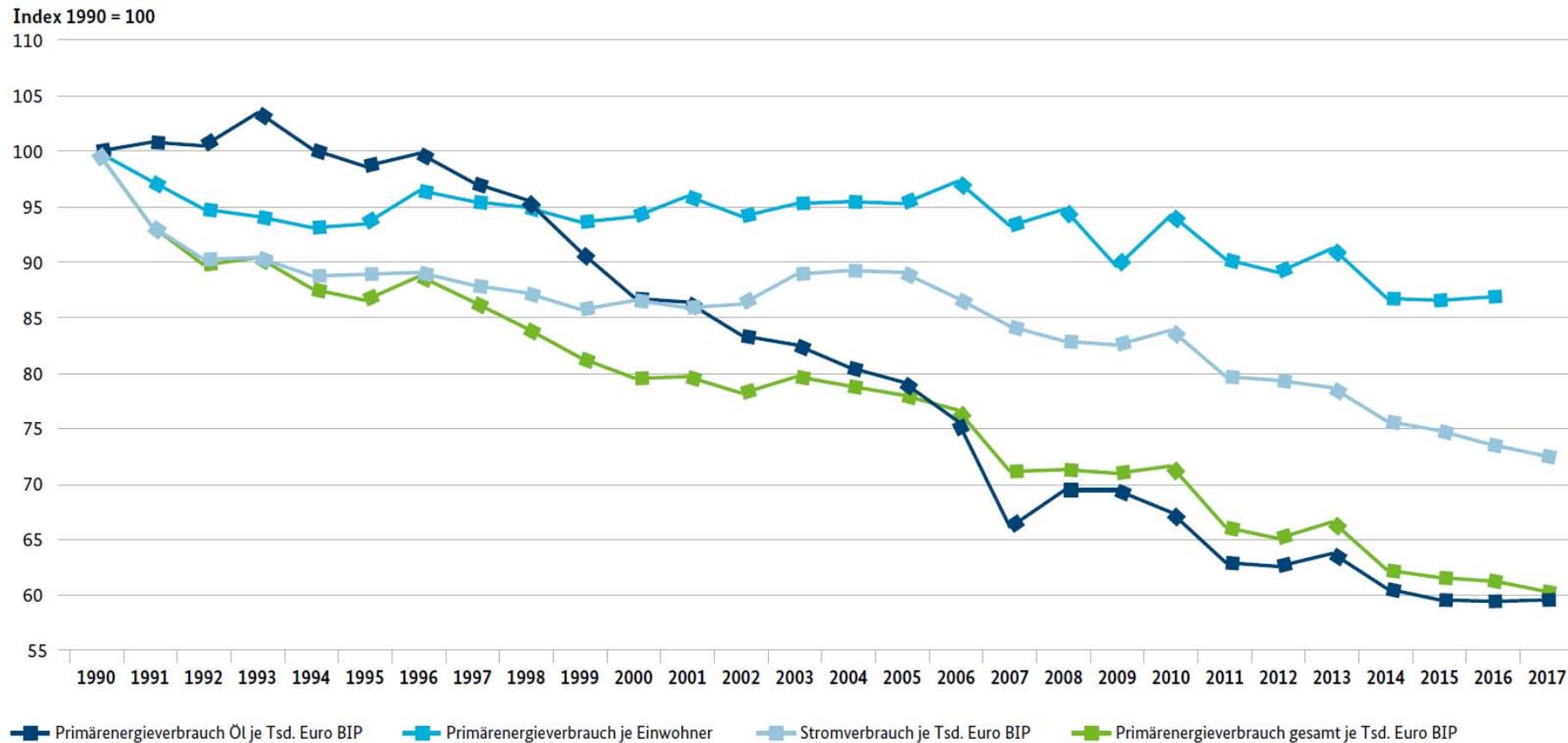
Index 1990 = 100



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Statistisches Bundesamt (StBa)

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

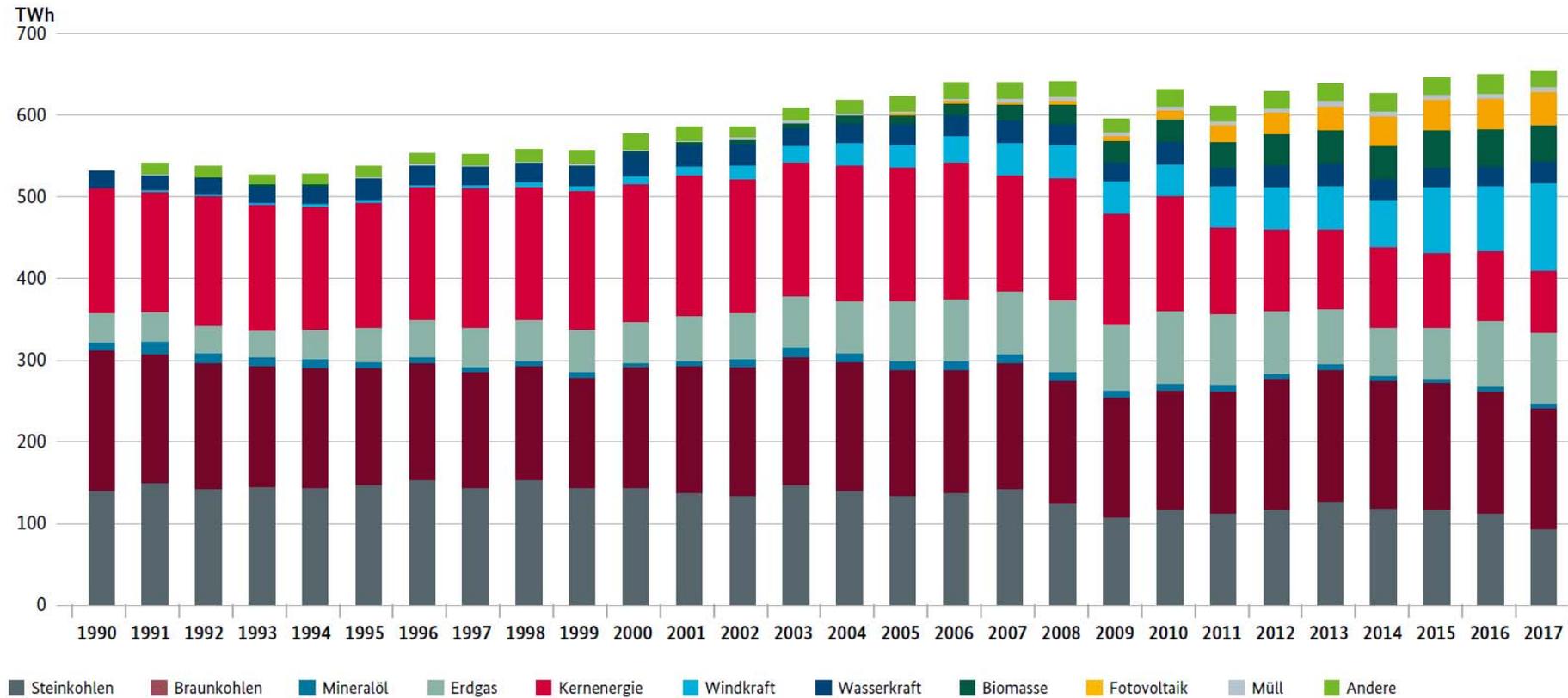
## Entwicklung der Energieintensität



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Statistisches Bundesamt (StBa)

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

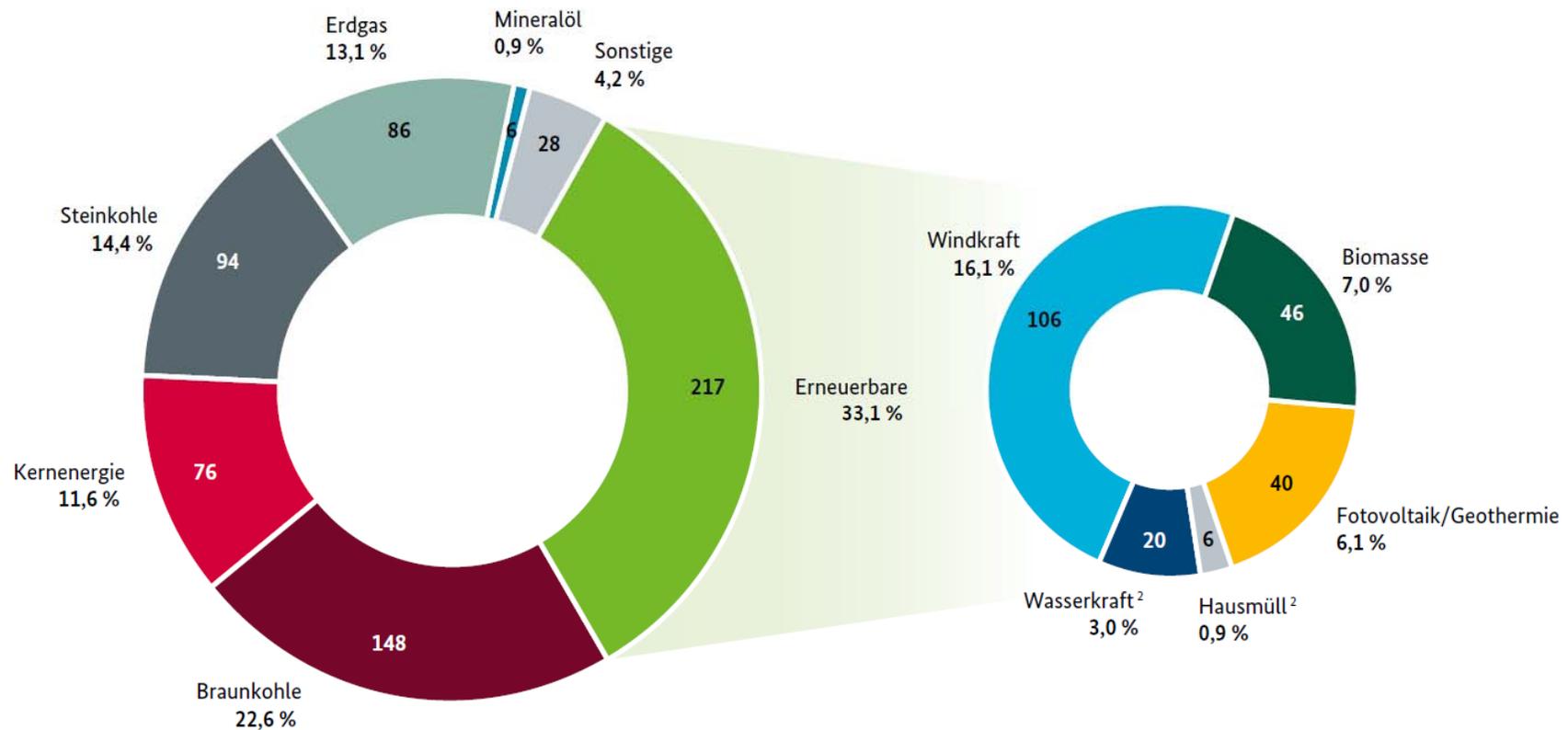
## Bruttostromerzeugung in Deutschland



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

Bruttostromerzeugung in Deutschland 2017<sup>1</sup>: insgesamt: 654,2 TWh



1 Vorläufig

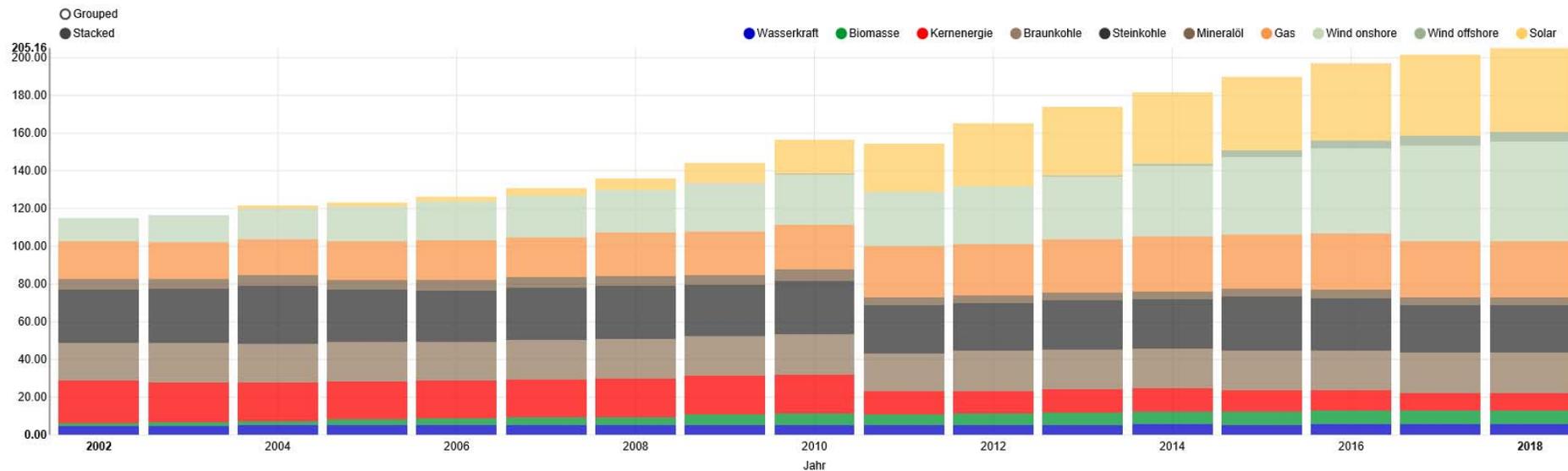
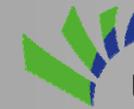
2 Regenerativer Anteil

Geothermie aufgrund der geringen Menge in Fotovoltaik

Quelle: AG Energiebilanzen, Stand Dezember 2017

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

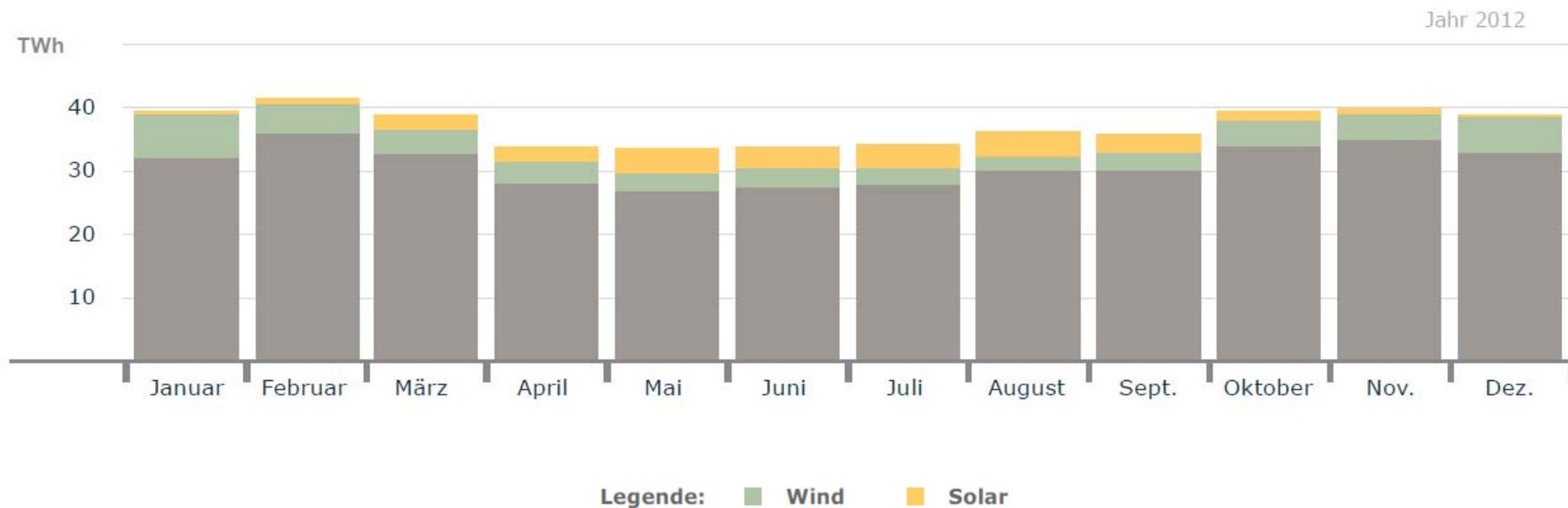
# Installierte Leistung Strom



Datenquelle: AGEE, BMWi, Bundesnetzagentur  
letztes Update: 31 Jul 2018 19:44

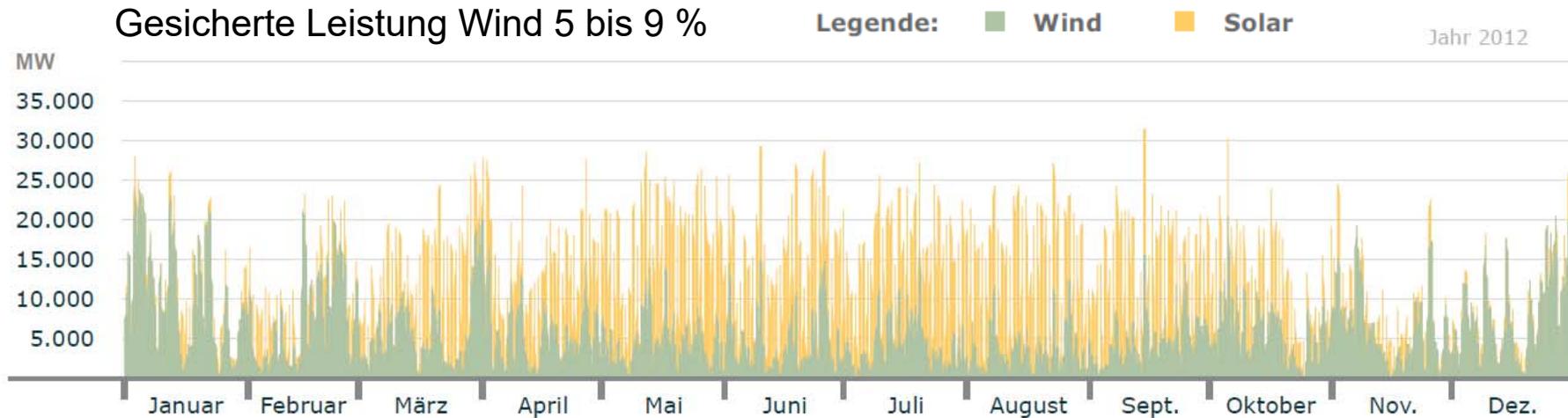
[www.energy-charts.de](http://www.energy-charts.de)

## Monatliche Produktion Solar, Wind und Konventionell

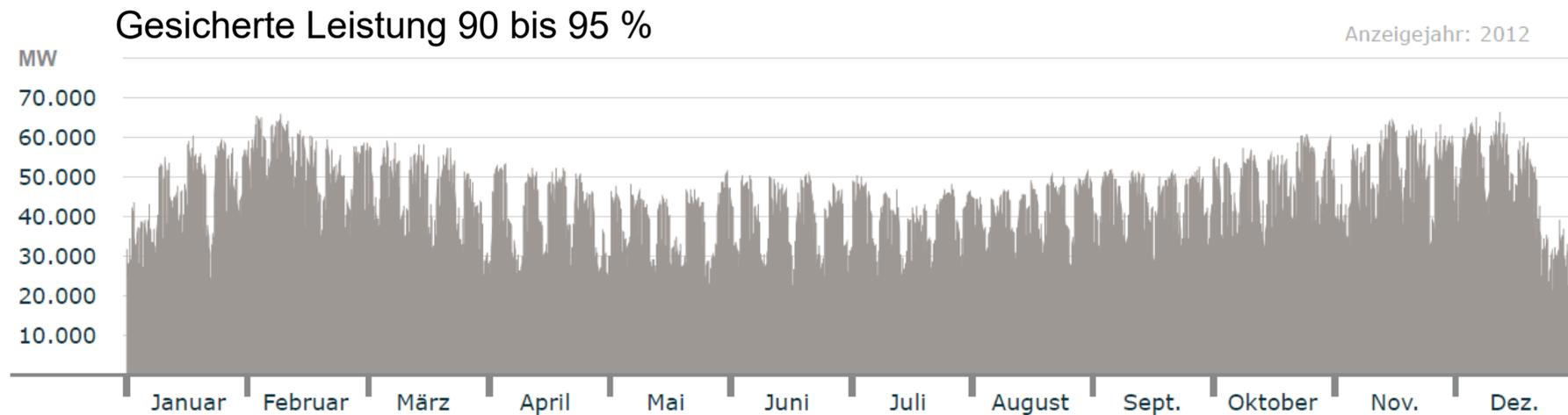


Grafik: B. Burger, Fraunhofer ISE; Daten: Leipziger Strombörse EEX

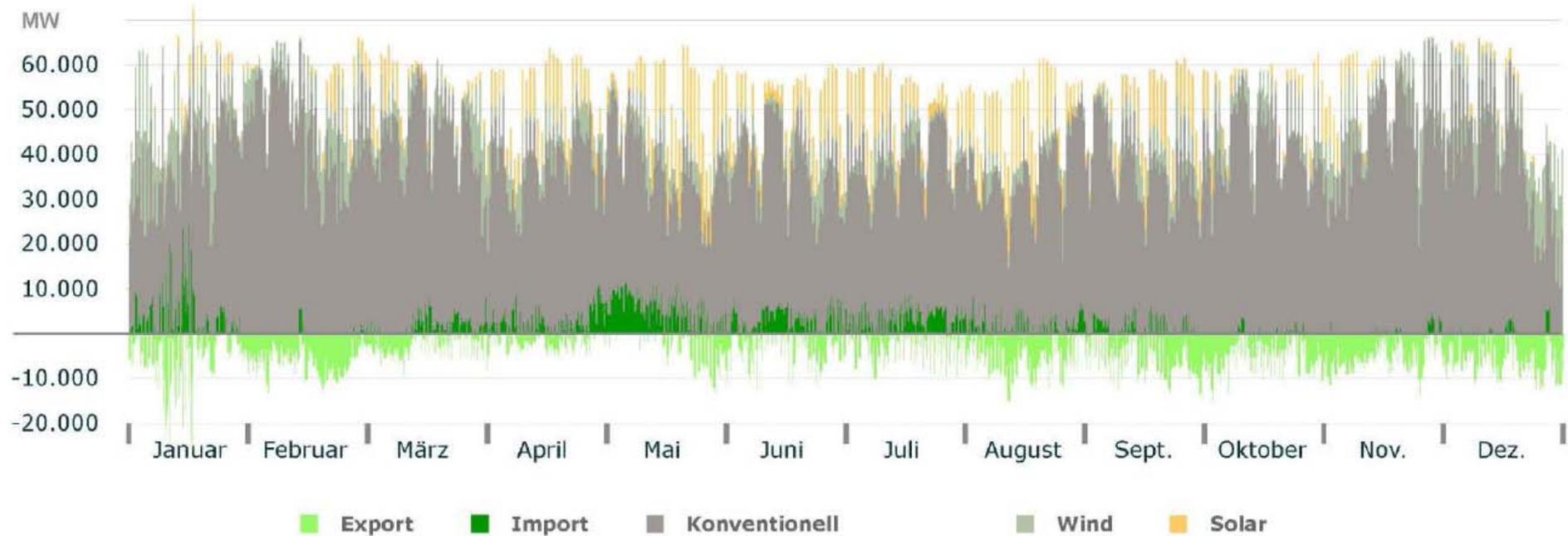
## Tatsächliche Produktion Solar und Wind



## Tatsächliche Produktion Konventionell < 100 MW

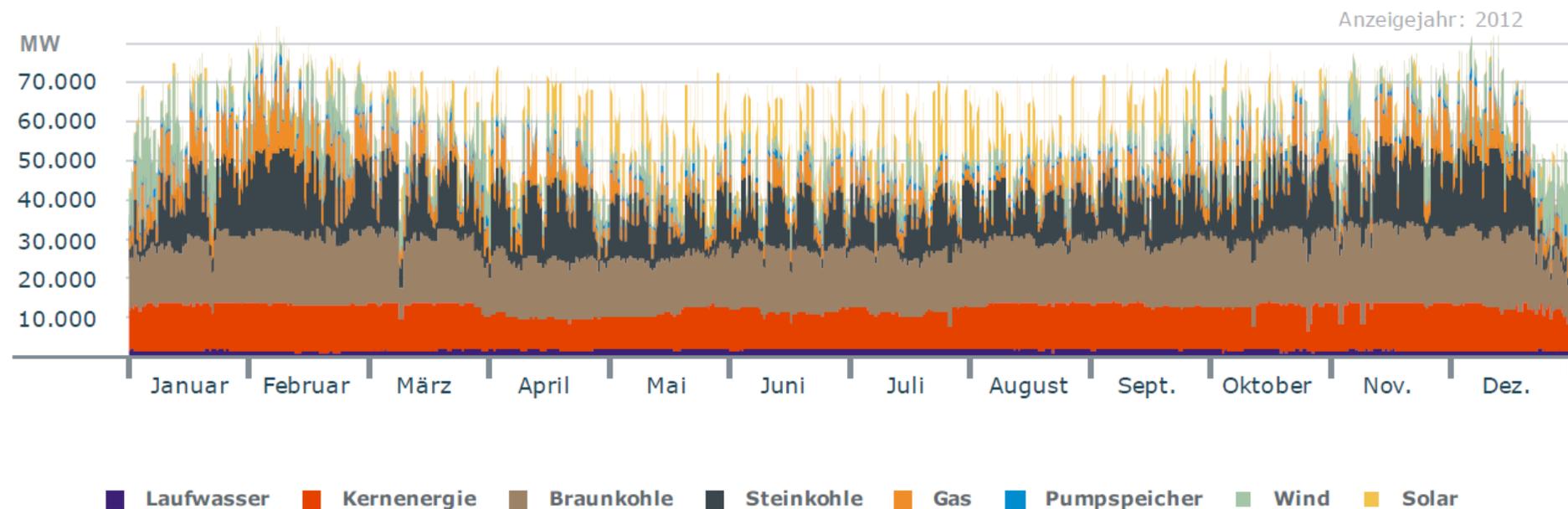


## Tatsächliche Produktion mit Export und Import



Grafik: B. Burger, Fraunhofer ISE; Daten: Leipziger Strombörse EEX

## Tatsächliche Produktion

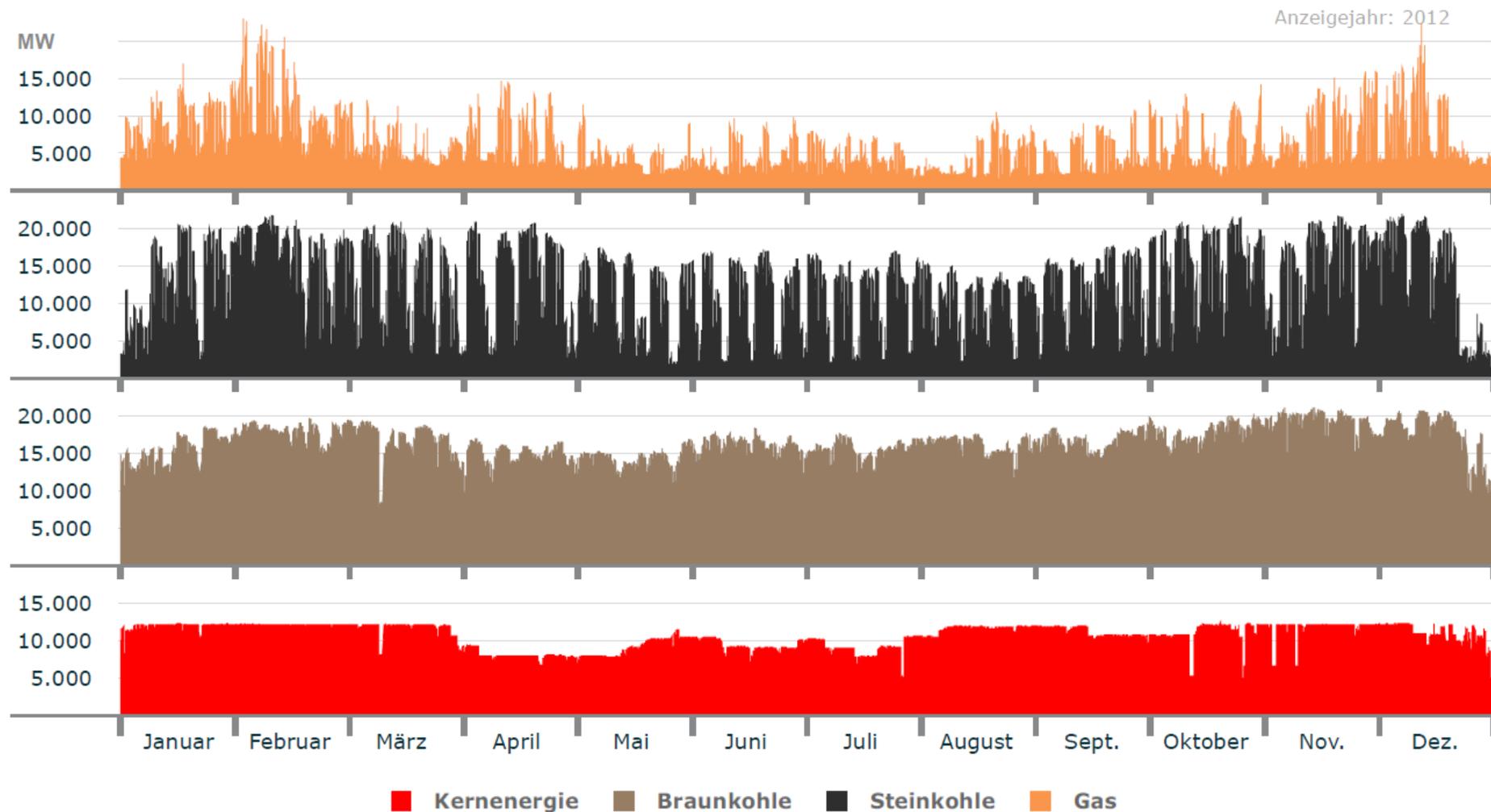


Grafik: B. Burger, Fraunhofer ISE; Daten: Leipziger Strombörse EEX

# Strom in Deutschland

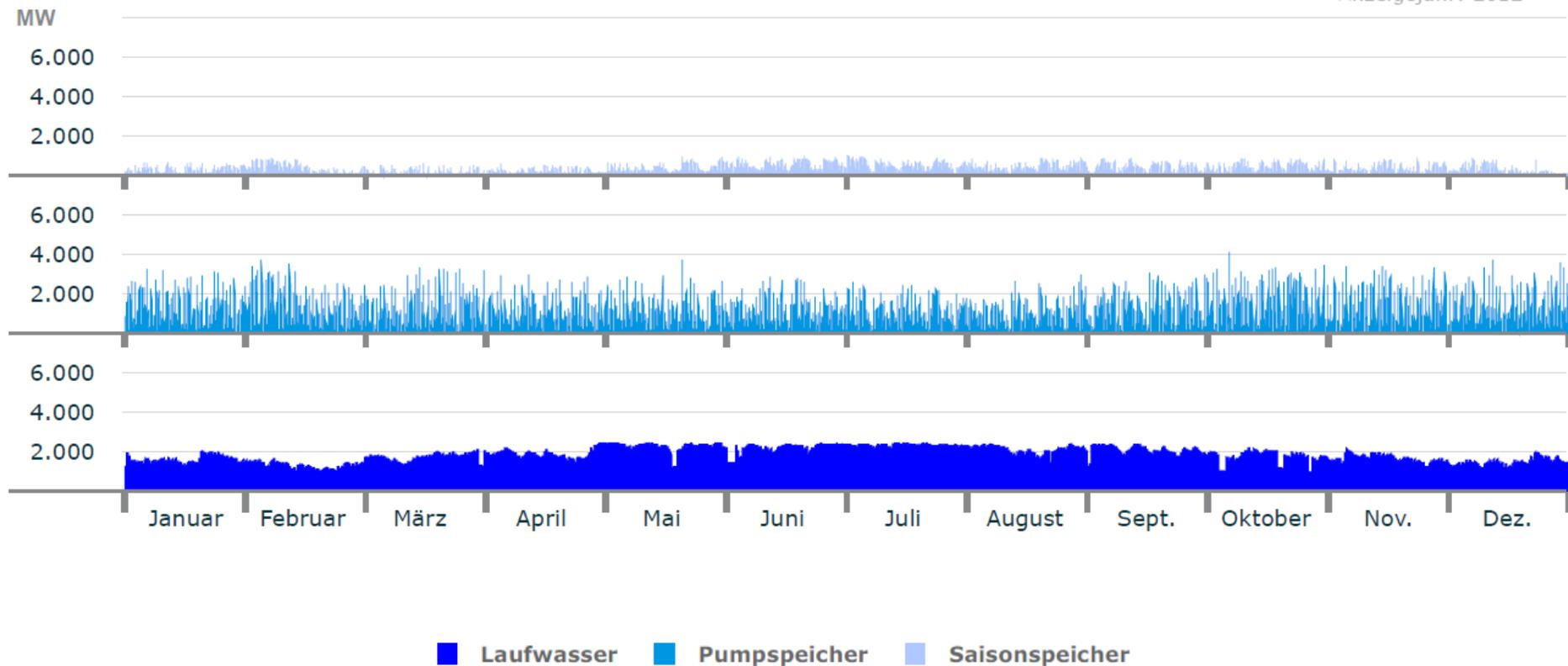


## Tatsächliche Produktion



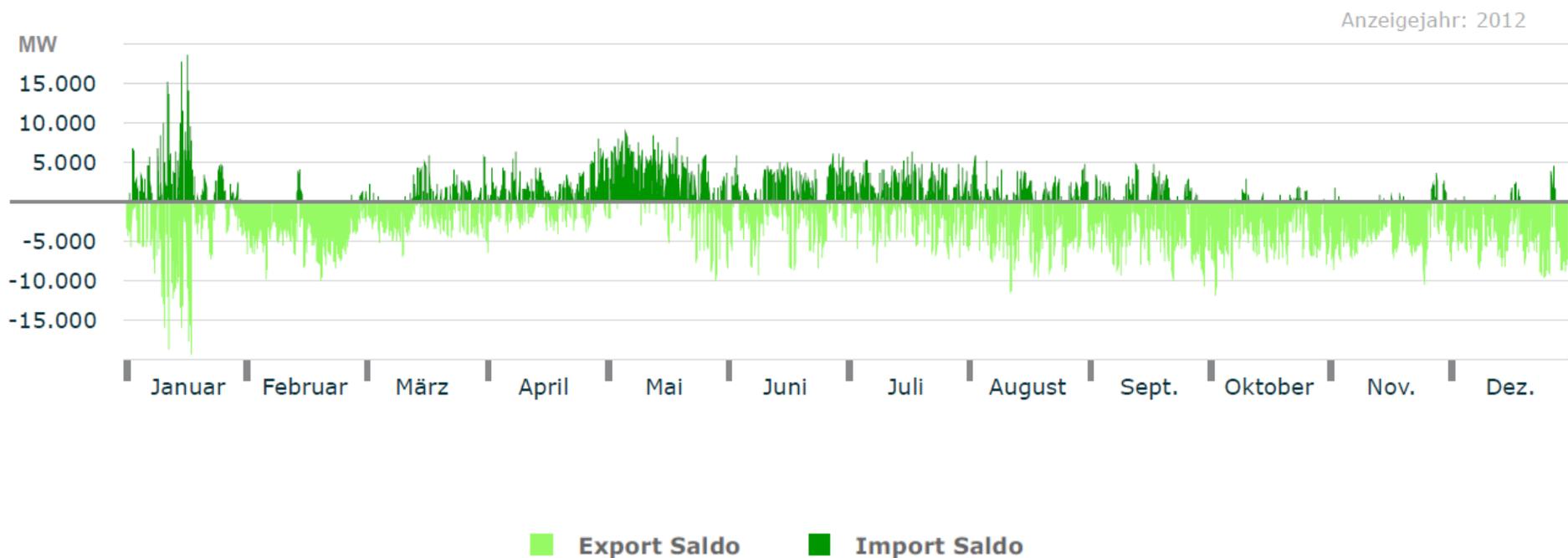
## Tatsächliche Produktion

Anzeigejahr: 2012



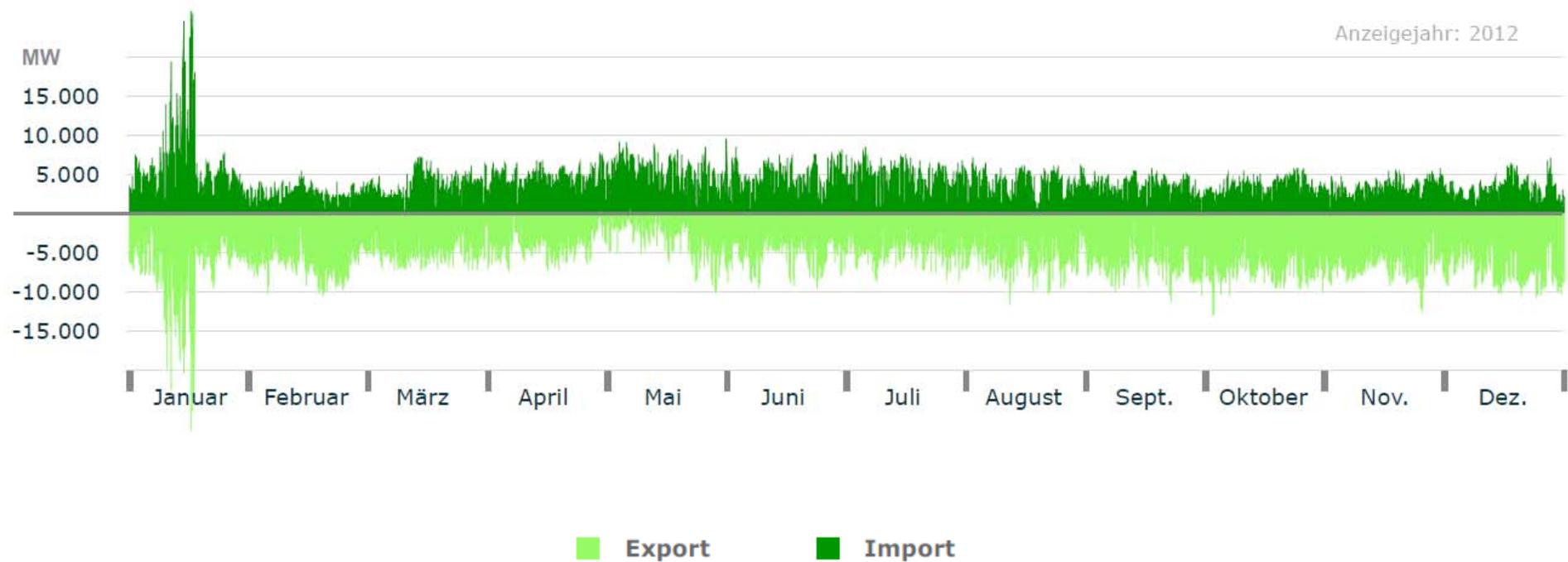
Grafik: B. Burger, Fraunhofer ISE; Daten: Leipziger Strombörse EEX

## Import und Export Saldo



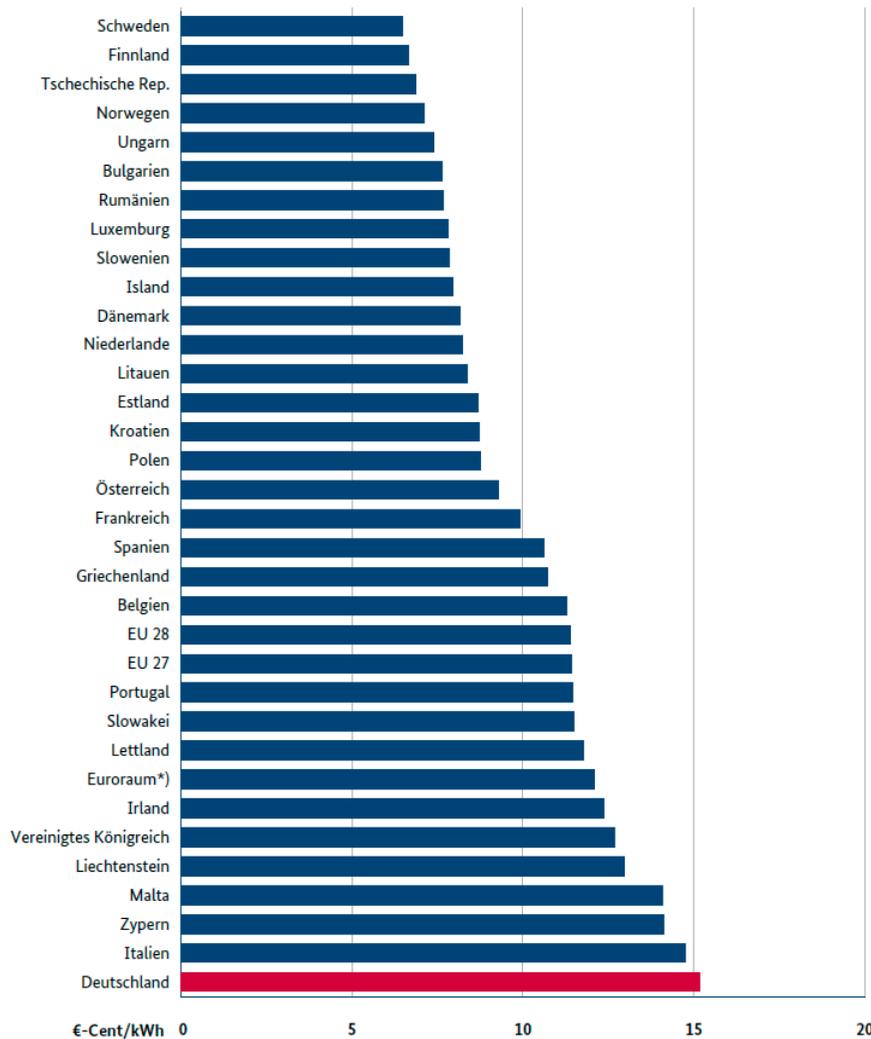
Grafik: B. Burger, Fraunhofer ISE; Daten: Leipziger Strombörse EEX

## Import und Export

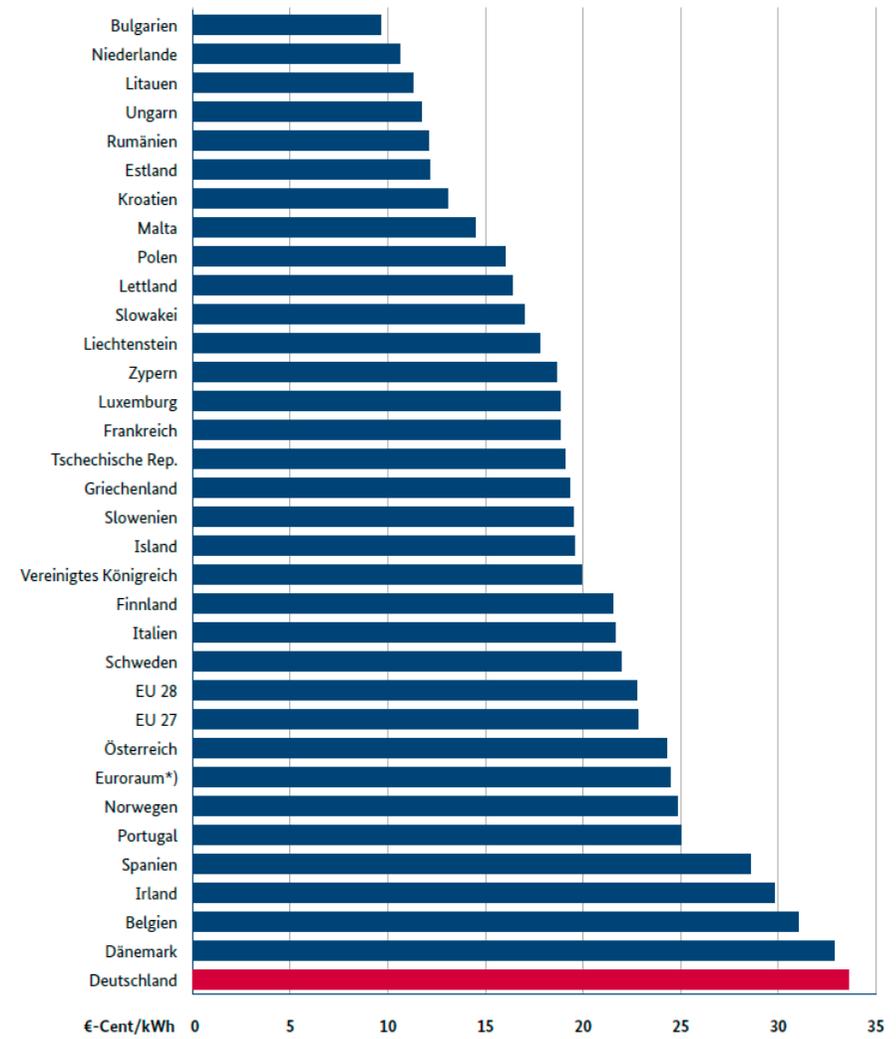


Grafik: B. Burger, Fraunhofer ISE; Daten: Leipziger Strombörse EEX

**Internationaler Strompreisvergleich (Industrie) 2017\***  
Verbrauch: 500 MWh < 2.000 MWh



**Internationaler Elektrizitätspreisvergleich (private Haushalte) 2017\***  
Jahresverbrauch 1.000 kWh < 2.500 kWh

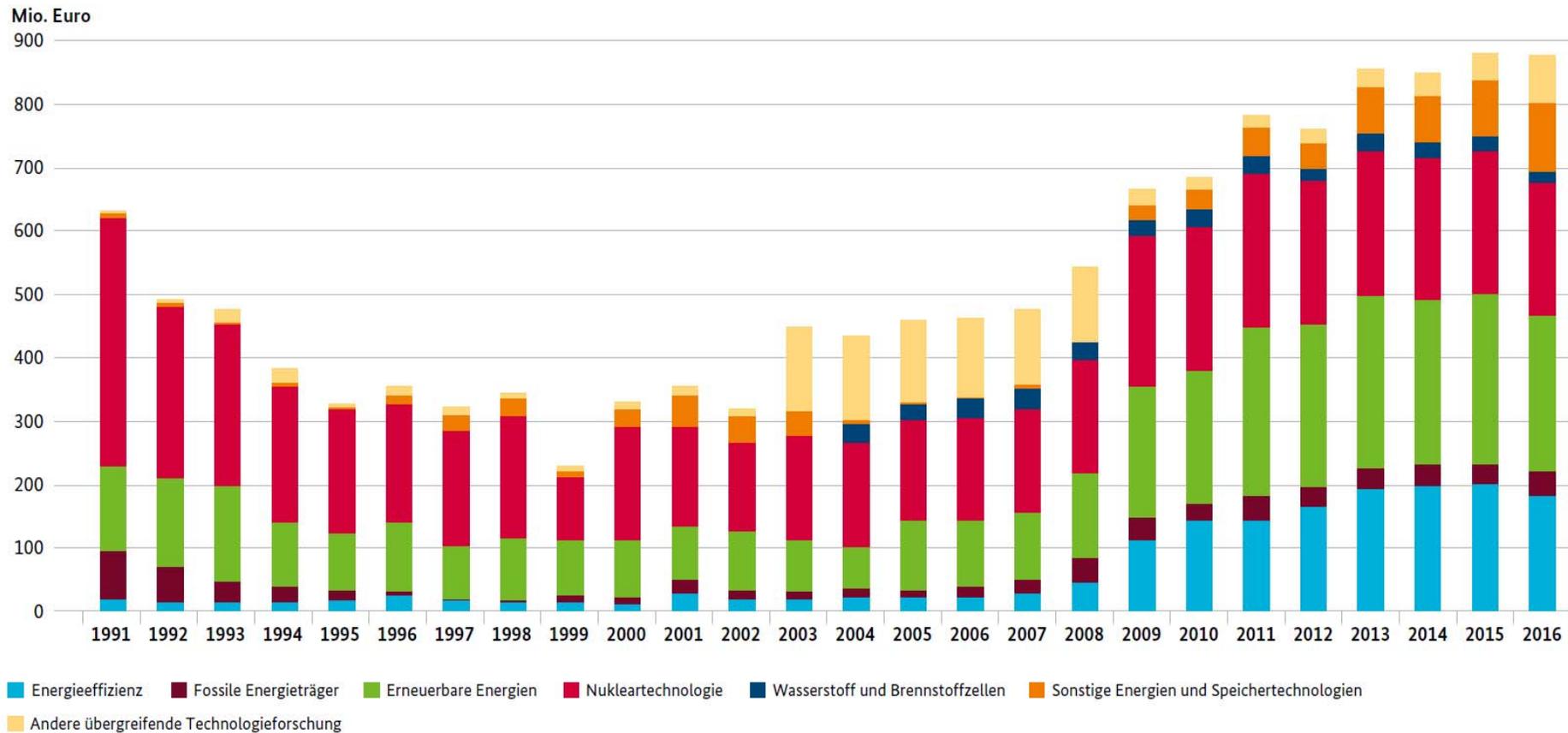


\*vorläufig

Quelle: Eurostat

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

## Ausgaben (real 2016) für Energieforschung aus Bundesmitteln



Quelle: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

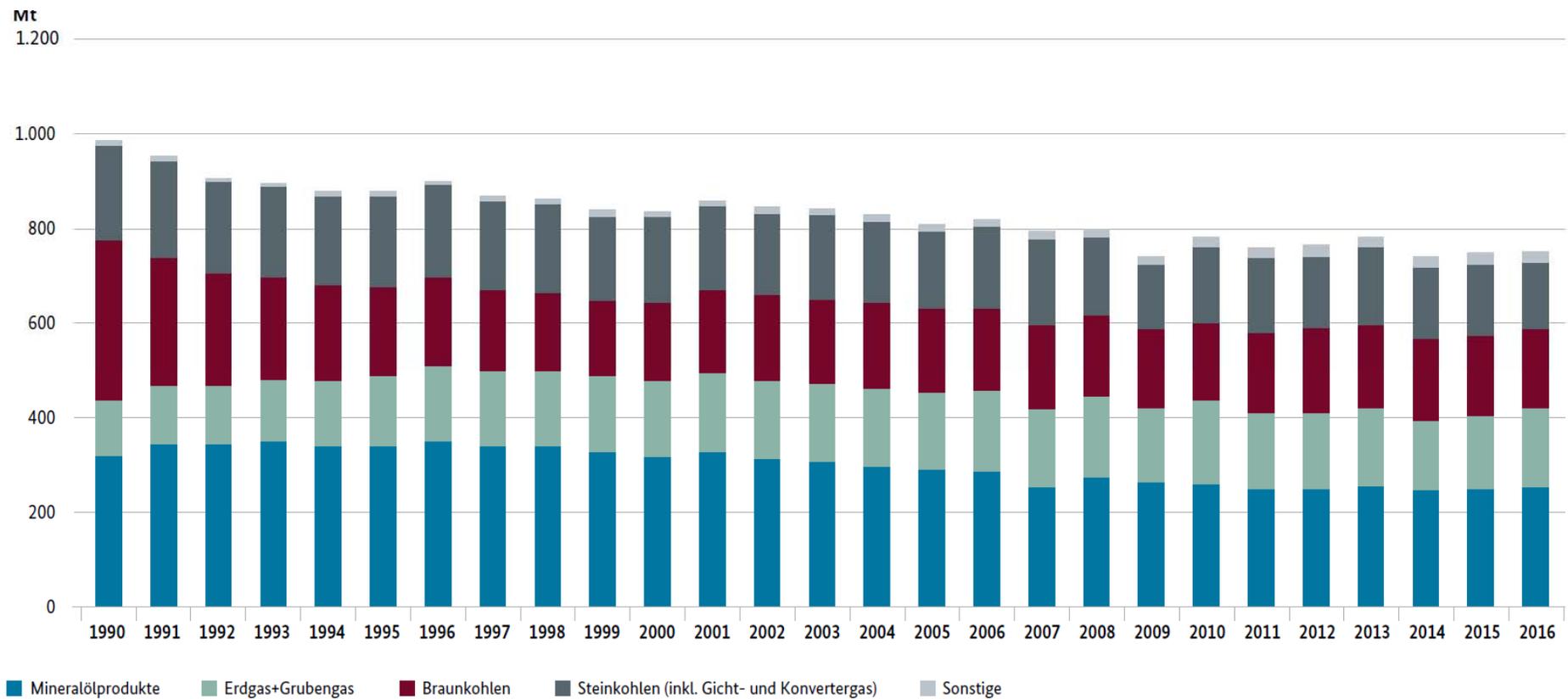
Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

# CO<sub>2</sub> Emissionen in Deutschland



HOCHSCHULE TRIER  
Umwelt-Campus Birkenfeld

## Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen



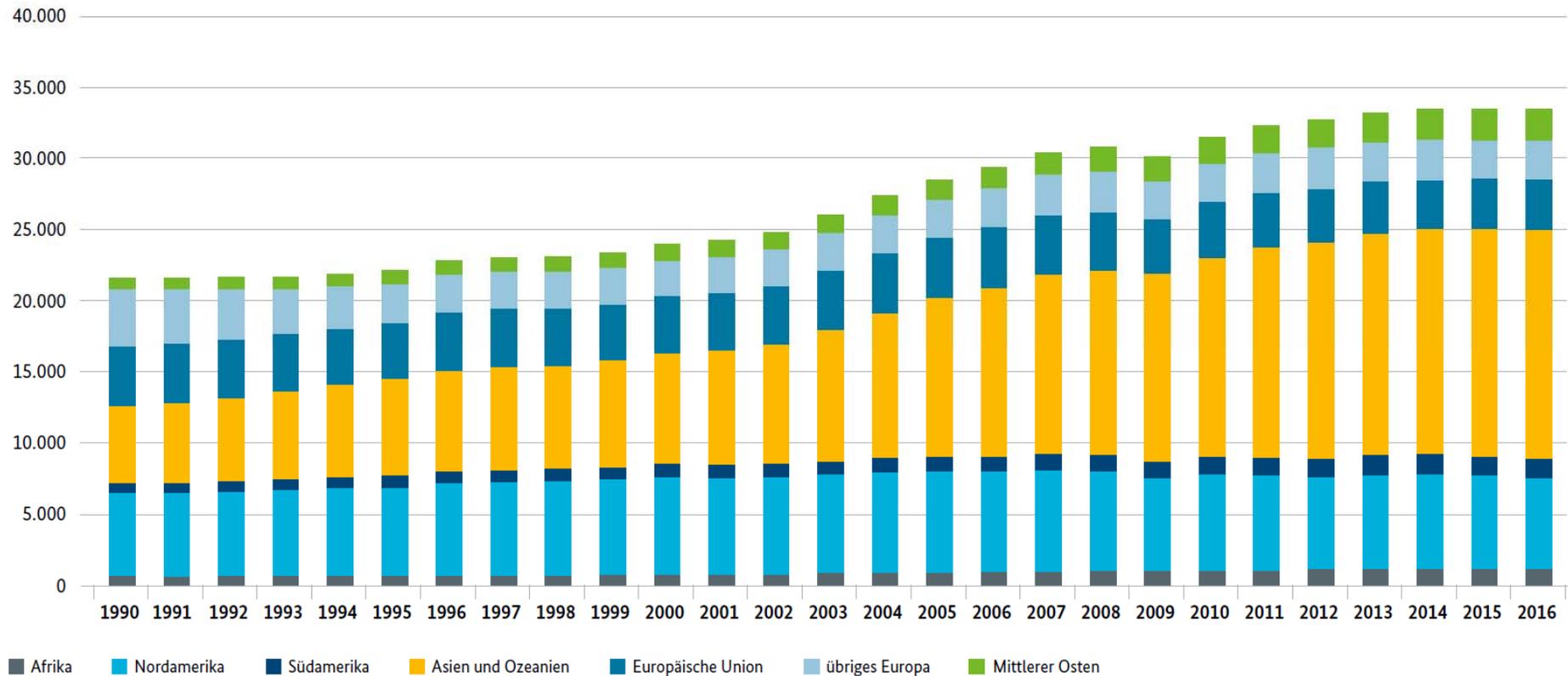
Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Umweltbundesamt (UBA)

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

# CO<sub>2</sub> Emissionen Weltweit



## Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit



Quelle: BP Statistical Review of World Energy 2016

Energiedaten und –szenarien, Publikation: Gesamtausgabe der Grafiken zu Energiedaten, BMWi, 01/2018

- **Anteil erneuerbarer Energien in 2050 soll 80 % betragen**
- Die **gesicherte Leistung der Erneuerbaren** liegt dann bei **24 %**
- **9 %** der gesicherten Leistung entfällt auf **Speichertechnologien**
- **60 %** der gesicherten Leistung wird weiterhin auf **Kohle und Gaskraftwerke** entfallen (**-37 % gegenüber 2010**)
- **neuen fossilen Kraftwerke** mit einer Leistung von insgesamt **49 GW** gemäß Modellergebnis zum größten Teil **bis 2020, spätestens bis 2030** erforderlich. Des Weiteren **12 GW konventionell befeuerte Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK)**

Dena Studie 2012

	Wirkungsgrad	Einsatzbereich	Potential *
 <p>Pumpspeicher</p>	80 %	kurz/mittel	~ 60 GWh
 <p>Druckluftspeicher</p>	70 %	kurz/mittel	>> 100 GWh
 <p>Elektro-chemische Speicher</p>	80 %	kurz/mittel	>> 100 GWh
 <p>Chemische Speicher</p>	35 %	kurz/mittel/lang	> 100 TWh

\* Mittel- bis langfristig

## Speicherung von Strom / Strom in Gas umwandeln

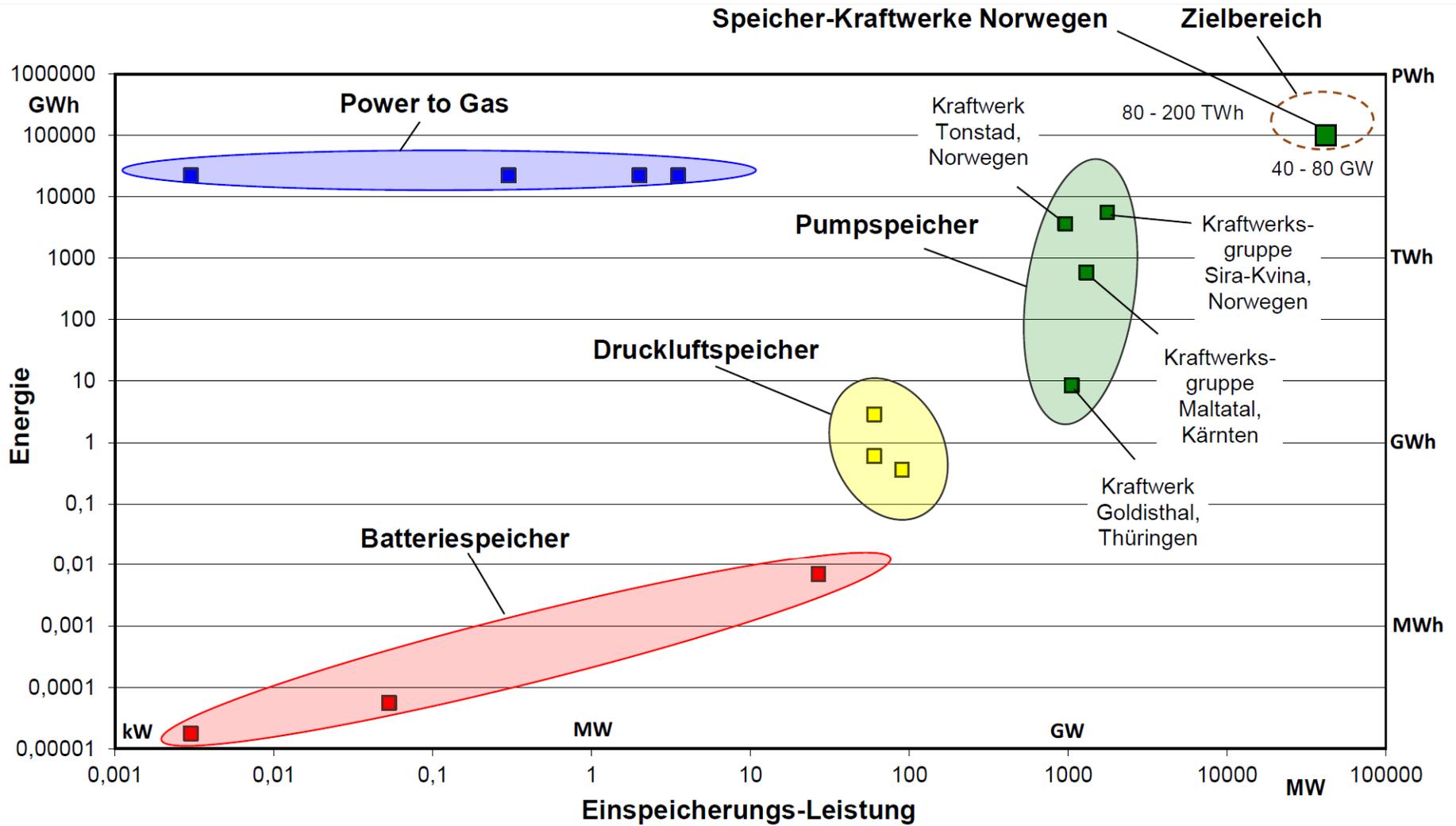
Mit Hilfe der Systemlösung **Power to Gas** kann Strom aus erneuerbaren Energien in **Wasserstoff** oder **synthetisches Erdgas** umgewandelt und im Erdgasnetz gespeichert werden. Eine Möglichkeit, um große Mengen Strom aus erneuerbaren Energien langfristig zu speichern.

Redoxreaktion Wasserelektrolyse		
$2 \text{H}_2\text{O} (\text{l})$	$\rightarrow 2 \text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g})$	$\Delta H_{\text{R}}^0 = + 572 \text{ kJ/mol}$

Methanisierungsreaktion		
$3 \text{H}_2 + \text{CO}$	$\rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} (\text{g})$	$\Delta H_{\text{R}}^0 = - 206 \text{ kJ/mol}$
$4 \text{H}_2 + \text{CO}_2$	$\rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} (\text{g})$	$\Delta H_{\text{R}}^0 = - 165 \text{ kJ/mol}$

Die Umwandlung von Strom in synthetisches Erdgas erfolgt in zwei Schritten: Zunächst wird **Wasserstoff** mittels **Elektrolyse** erzeugt, anschließend folgt die **Methanisierung**.



Prof. Dr.-Ing. Roland Scharf

## Kinetische Energie der bewegten Luft

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot w^2$$

$$V = m \cdot \rho$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot w^2$$



## Leistung ist Energie pro Zeit

$$P_{\text{Wind}} = \frac{E_{\text{kin}}}{t}$$

$$\dot{V} = A \cdot w$$

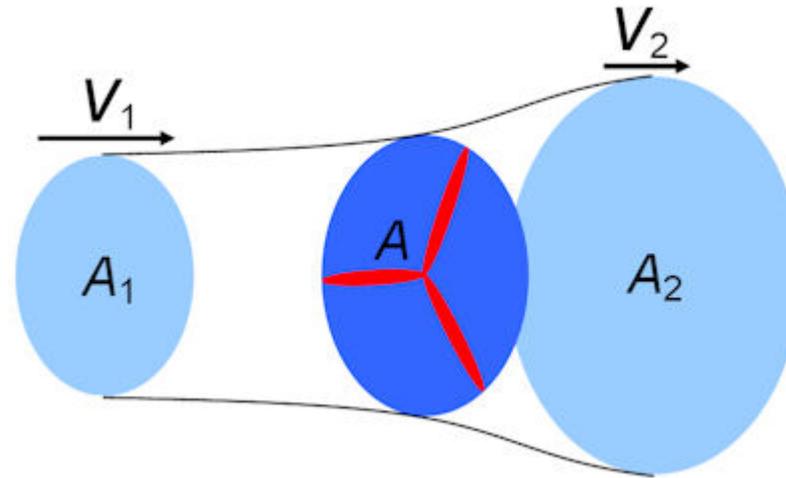
$$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \dot{V} \cdot w^2$$

$$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot w^3$$

- Die **“Windleistung”** wächst demnach mit der **3-Potenz der Windgeschwindigkeit**.
- Eine Verdopplung der Windgeschwindigkeit ergibt die achtfache Windleistung.
- Die **Halbierung der Windgeschwindigkeit** ergibt ein **Achtel der ursprünglichen Windleistung (Nennleistung)**.
- Die effektiv nutzbare Windleistung ist geringer, als durch Gleichung angegeben.
- Denn die Windgeschwindigkeit hinter dem Windrad kann nicht null werden, da dann keine Luft nachströmen könnte.

$$P_{\text{eff}} = P_1 - P_2$$

$$\dot{V} = A \cdot \bar{w} = A \cdot \left( \frac{w_1 - w_2}{2} \right)$$



Die Windgeschwindigkeit vor dem Windrad ist größer als die danach. Weil der Luftmassenstrom durch das Rad “abgebremst” wird, ist die Fläche  $A_2$  nach dem Windrad größer als die Fläche  $A_1$  davor.

Die effektive Leistung ist die Differenz der “Windleistungen”:

$$P_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \dot{V} \cdot (w_1^2 - w_2^2)$$

$$P_{\text{eff}} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (w_1 + w_2) \cdot (w_1^2 - w_2^2)$$

Ist die Differenz der beiden Geschwindigkeiten null, ist die Nutzleistung gleich Null.

Ist die Differenz zu groß, wird die Luftströmung durch den Rotor zu stark “behindert”.

Der **Leistungsbeiwert**  $c_p$  (nach Betz) charakterisiert die relative Leistungsentnahme:

$$c_p = \frac{P_{\text{eff}}}{P_{\text{wind}}} = \frac{\rho \cdot A \cdot (w_1 + w_2) \cdot (w_1^2 - w_2^2)}{4} \cdot \frac{2}{\rho \cdot A \cdot w_1^3}$$

Bei der Gleichung wird davon ausgegangen wurden, dass:

$$A_1 w_1 = A_2 w_2 \quad \text{und} \quad x = w_2 / w_1$$

$$c_p = \frac{P_{\text{eff}}}{P_{\text{wind}}} = \frac{(w_1 + w_2) \cdot (w_1^2 - w_2^2)}{2 \cdot w_1^3} = \frac{(1+x) \cdot (1-x^2)}{2}$$

Eine Extremwertbetrachtung dieser Gleichung (Nullsetzen der ersten Ableitung nach  $x$ ) ergibt für  $x = 1 / 3$  ein Maximum.

Maximale Leistungsentnahme erfolgt also bei  $w_2 = w_1 / 3$ , und der **ideale Leistungsbeiwert (“Wirkungsgrad”)** bei diesem Verhältnis ist:



$$c_p = \frac{P_{\text{eff}}}{P_{\text{wind}}} = \frac{\left(\frac{w_1}{w_1} + \frac{w_2}{w_1}\right) \cdot \left(\frac{w_1^2}{w_1^2} - \frac{w_2^2}{w_1^2}\right)}{2} = \frac{(1+x) \cdot (1-x^2)}{2}$$

$$c_p = \frac{P_{\text{eff}}}{P_{\text{wind}}} = \frac{16}{27} = 0,5926$$

Die mechanische **Rotorleistung** ist proportional zum auf die Welle wirkenden **Drehmoment  $M$**  und zur **Drehzahl  $n$** .

Letztere wird durch die Schnelllaufzahl  $\lambda$  beeinflusst, die sich gemäß  $\lambda = v_u / v_1$  aus dem Verhältnis von Umfangsgeschwindigkeit (Blattspitzen-geschwindigkeit)  $v_u$  des Rotors und der Windgeschwindigkeit  $v_1$  berechnet.

Nun wächst zwar das **Drehmoment  $M$**  mit der **Zahl der Flügel**. Es ist demnach am größten für die „Viel-Flügel-Western Mill“ und für den Vierflügler größer als für den Dreiflügler.

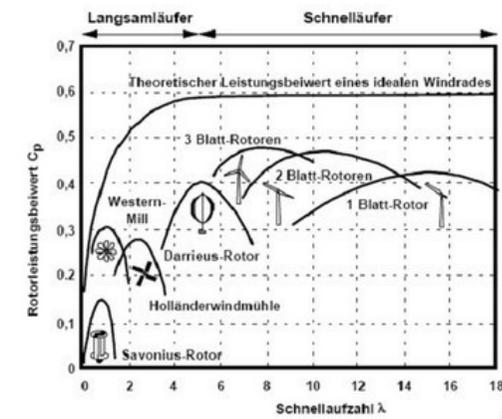
Jeder Flügel reduziert mit zunehmender Drehzahl das Windangebot für den im Drehsinn folgenden Flügel. Dieser "**Windschatten**" wirkt um so stärker, je mehr Flügel ein Rotor besitzt.

Die **optimale Schnelllaufzahl** ist deshalb nur **etwa eins** für die **Western Mill**, überschreitet **kaum zwei** für die **Vier-Flügel-Windmühle** und ist **7 bis 8** für die **Drei-Flügel-Rotoren**.

Diese erreichen bei ihrer optimalen Schnelllaufzahl einen Wert von  $c_p = 48 \%$  und kommen damit dem idealen Leistungsbeiwert der Windenergieausbeute von  $c_p = 59 \%$  am nächsten.

Für Zweiflügler oder mit Gewichten ausgewuchtete Einflügler ist die Ausbeute wegen des kleineren Drehmoments trotz noch höherer Schnelllaufzahlen ebenfalls geringer.

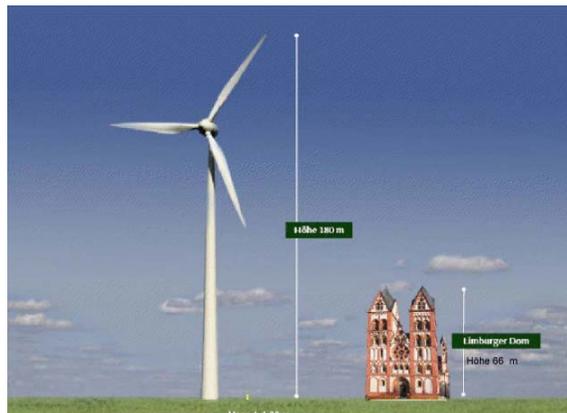
Deshalb haben Windkraftanlagen 3 Flügel (Optimum).



Übliche **Durchmesser** von Windrädern sind **50 m** bei einer installierten Leistung von **1 MW** und **126 m** bei einer **5 MW**.

Ein zu nahe hinter einem Windrad befindliches weiteres Windrad würde nur durch die langsamere Luft angetrieben.

Deshalb ist bei Windparks in der **Hauptwindrichtung** ein **Mindestabstand** des **achtfachen Rotordurchmessers** bzw. **senkrecht** dazu ein mindestens **vierfacher Abstand** einzuhalten.



Die installierte Leistung oder auch **Nennleistung** einer Windkraftanlage entspricht der **abgegebenen elektrischen Leistung** bei der Nenn-  
geschwindigkeit zwischen **12 bis 16 m/s**, also bei optimalen Wind-  
bedingungen.

Bei höheren Windgeschwindigkeiten, für die die Anlage kaum ausgelegt  
ist, wird aus Sicherheitsgründen keine größere Leistung erzeugt.  
Bei Sturm werden die Anlagen abgeschaltet.

Im **Binnenland** kann im **Jahresmittel** eine  
**Auslastung von 23 %** erreicht werden.  
Dieser Wert erhöht sich auf **28 %** an der  
**Küste** und auf **43 %** für **Off-Shore-Anlagen**.





**16,6 %**

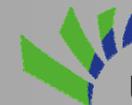
**25 % Auslastung**

Anschaffungskosten ( E-101 lt .juwi Sept.2011)	5.243.000€	5.243.000€
Voll-Laststunden	<b>1.456</b> h/a	<b>2.200</b> h/a
MW-Leistung	3.050KW	3.050KW
produzierte KWh	4.440.800KWh/a	6.710.000KWh/a
EEG-Ertrag ab 2013	0,088€/KWh	0,088€/KWh
Stromertrag	<b>390.790€</b>	<b>590.480€</b>

Betriebsdauer 20 a

© Johann Richter, Steuerberater, Vaterstetten





Betriebskosten	16,6 %	25 % Auslastung
Pacht 4,5 % vom Ertrag	17.586€	26.572€
Versicherungen	7.816€	11.810€
Wartung(ab dem 3.Jahr)	15.543€	23.485€
Reparaturrückstellung	36.701€	52.430€
Rückbaurückstellung	12.500€	12.500€
allg. Verwaltungskosten	1.954€	2.952€
Kosten Geschäftsführung	7.500€	7.500€
Steuer- Rechtsberatung	3.908€	5.905€
Stromkosten	1.600€	1.600€
Abstandsflächenübernahme	3.000€	3.000€
Pflege, Mulchen, Winterdienst	1.000€	1.000€
Unvorhergesehenes	5.000€	5.000€
4 % Zinsen f. 70 % Fremdkapital	146.804€	146.804€
Abschreibung 6,25 %	327.688€	327.688€
Gewerbsteuer	0€	4.916€
<b>Summe Betriebskosten</b>	<b>571.013€</b>	<b>606.589€</b>
<b>Verlust (Steuerlich)</b>	<b>-180.223€</b>	<b>-16.109€</b>





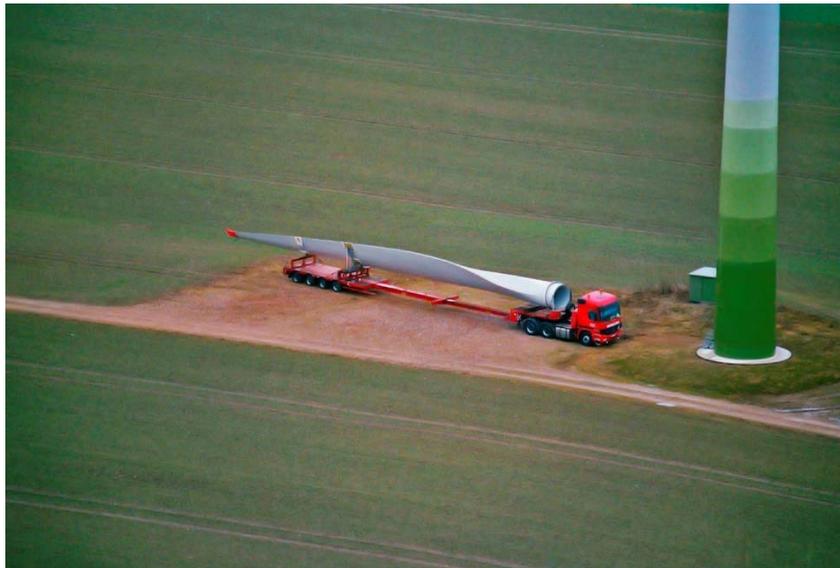
Liquiditätsrechnung	16,6 %	25 % Auslastung
Steuerliches Ergebnis	-180.223€	-16.109€
+ AfA	327.688€	327.688€
Liquidität	147.465€	311.578€
. / . Tilgung 5 % für FK	-183.505€	-183.505€
Liquides Ergebnis	-36.040€	128.073€



## Blattspitzengeschwindigkeiten

$n = 15 \text{ 1/min}$     und     $D = 101 \text{ m}$

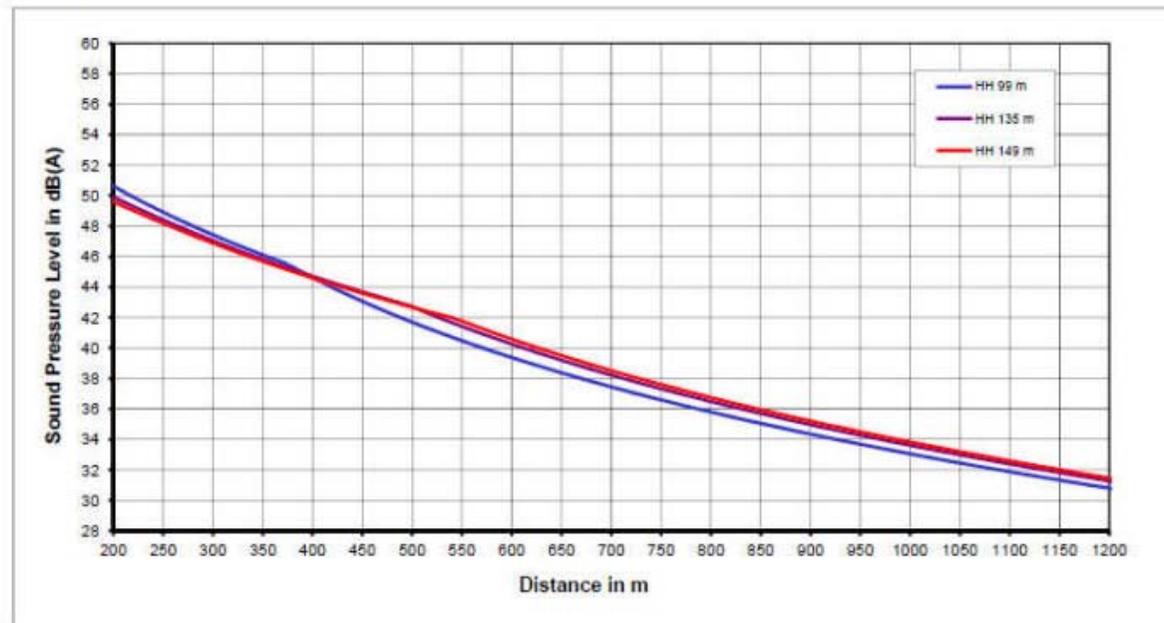
$$v_u = D \cdot \pi \cdot n = 101 \text{ m} \cdot 3,1415 \cdot 15 / 60 \text{ 1/s} = 79 \text{ m/s} = 286 \text{ km/h}$$



## Schallpegel (in Nabenhöhe gemessen) 106 dB(A) Schalleistung



Sound pressure level (according to ISO 9613-2) of an ENERCON E-101 with different hub heights depending on distance (reference: 10 m/s in 10 m height) - without meteorological correction



Target value:	35 dB(A)	40 dB(A)	45 dB(A)	50 dB(A)	Value at 1000 m
Distance HH 99 m:	860 m	580 m	390 m	220 m	HH 99 m: 33,1 dB(A)
Distance HH 135 m:	900 m	620 m	390 m	200 m	HH 135 m: 33,6 dB(A)
Distance HH 149 m:	920 m	630 m	390 m	190 m	HH 149 m: 33,8 dB(A)

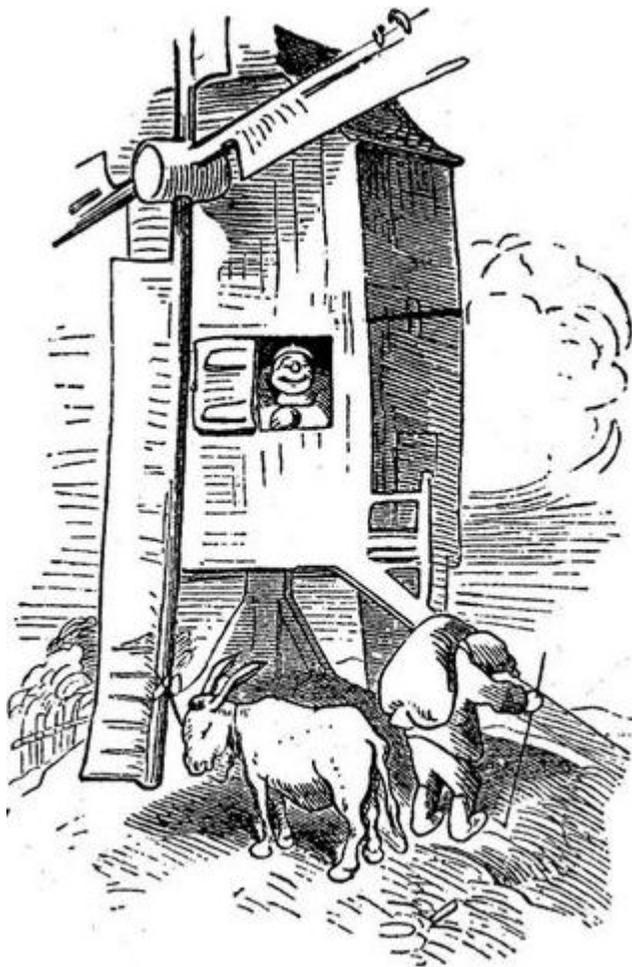
Sound power level  $L_{WA}$ : 106,0 dB(A)  
Tonality  $K_{TN}$ : 0 dB

Statements towards sound power level and tonality according to the ENERCON Sound Power Level Guarantee

## Denkanstöße

- Wirtschaftlichkeit
- Subventionen
- Klimaschutz
- Versorgungssicherheit
- Netz-Konzept
- Energiespeicherung
- Akustische- und visuelle Beeinträchtigung (Schattenwurf, Befeuerung)
- Landschaftsbild und -wert
- Altlasten und Rückbau
- Vogelschlag und Eiswurf
- Naturschutz





Wilhelm Busch hat die wirtschaftlichen Probleme beim Betrieb einer Windanlage so beschrieben:

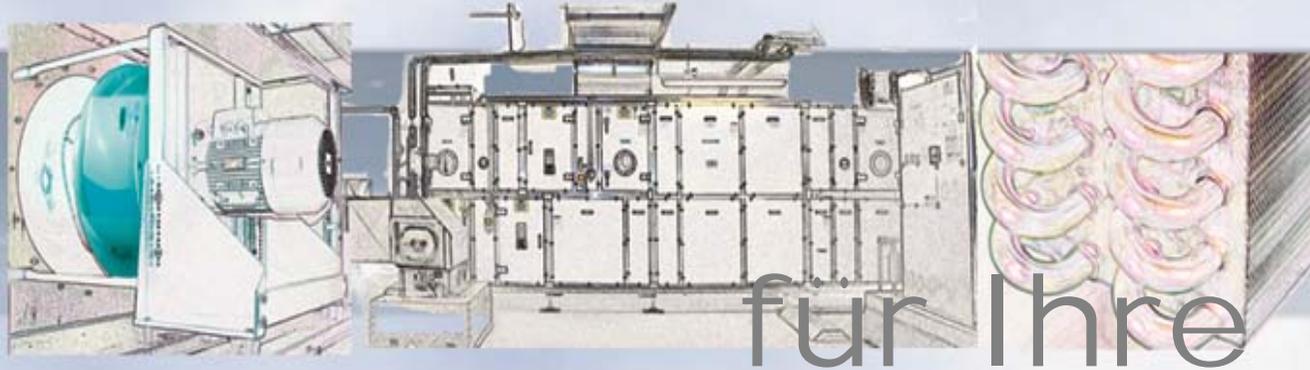
*Aus der Mühle schaut der Müller, der so gerne mahlen will, stiller wird der Wind und stiller, und die Mühle stehet still.*

*So geht's immer wie ich finde, ruft der Müller voller Zorn, hat man Korn so fehlt's am Winde, hat man Wind so fehlt's am Korn.*

Modern übersetzt:

*Der Wind weht nicht immer - dafür „schreibt er keine Rechnung.“*

# Herzlichen Dank



für Ihre  
Aufmerksamkeit

## Energietechnik Erneuerbare Physik der Windenergie

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup  
c.kaup@umwelt-campus.de



HOCHSCHULE TRIER  
Umwelt-Campus Birkenfeld  
Umwelt macht Karriere.