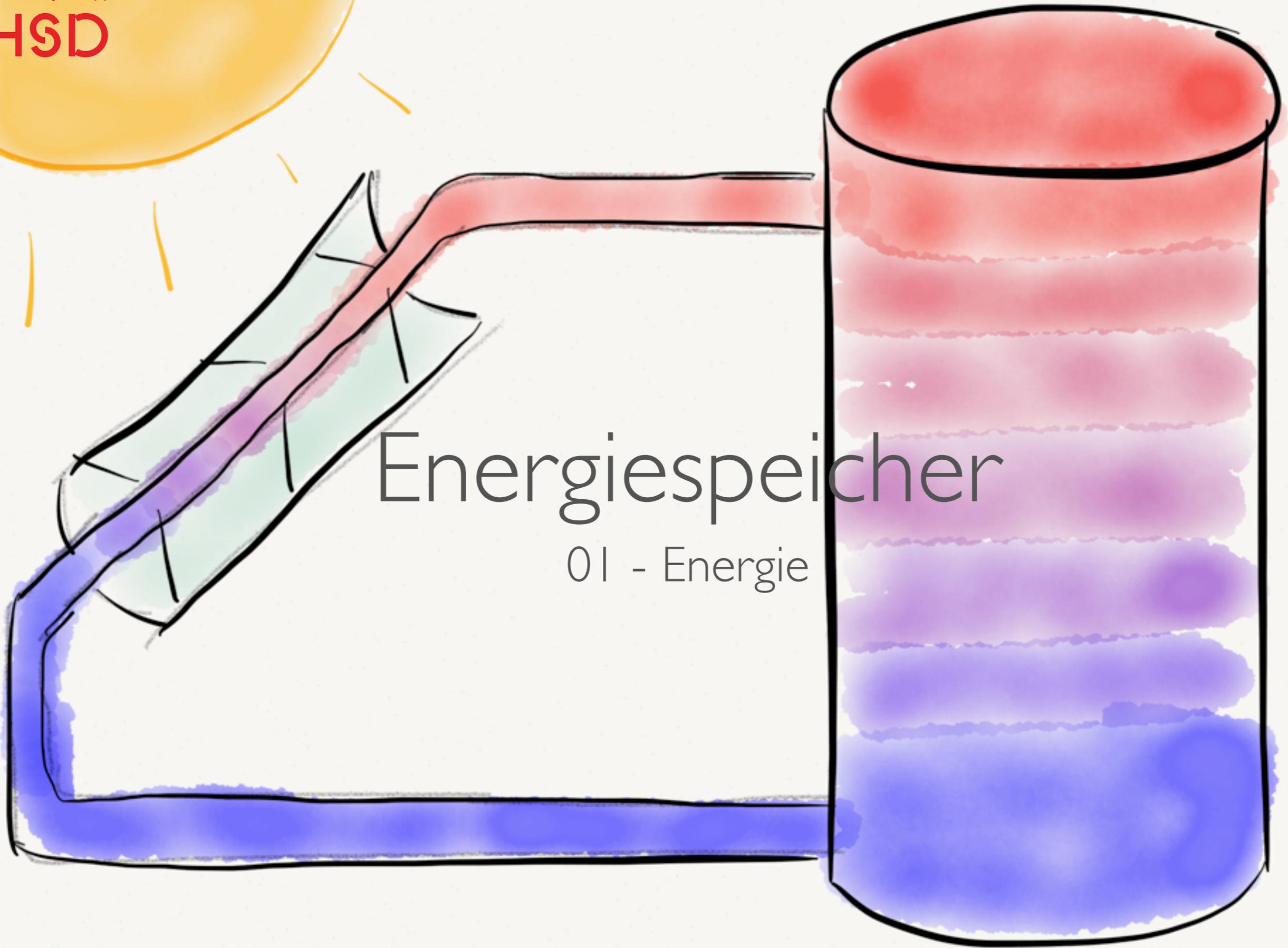


Energiespeicher

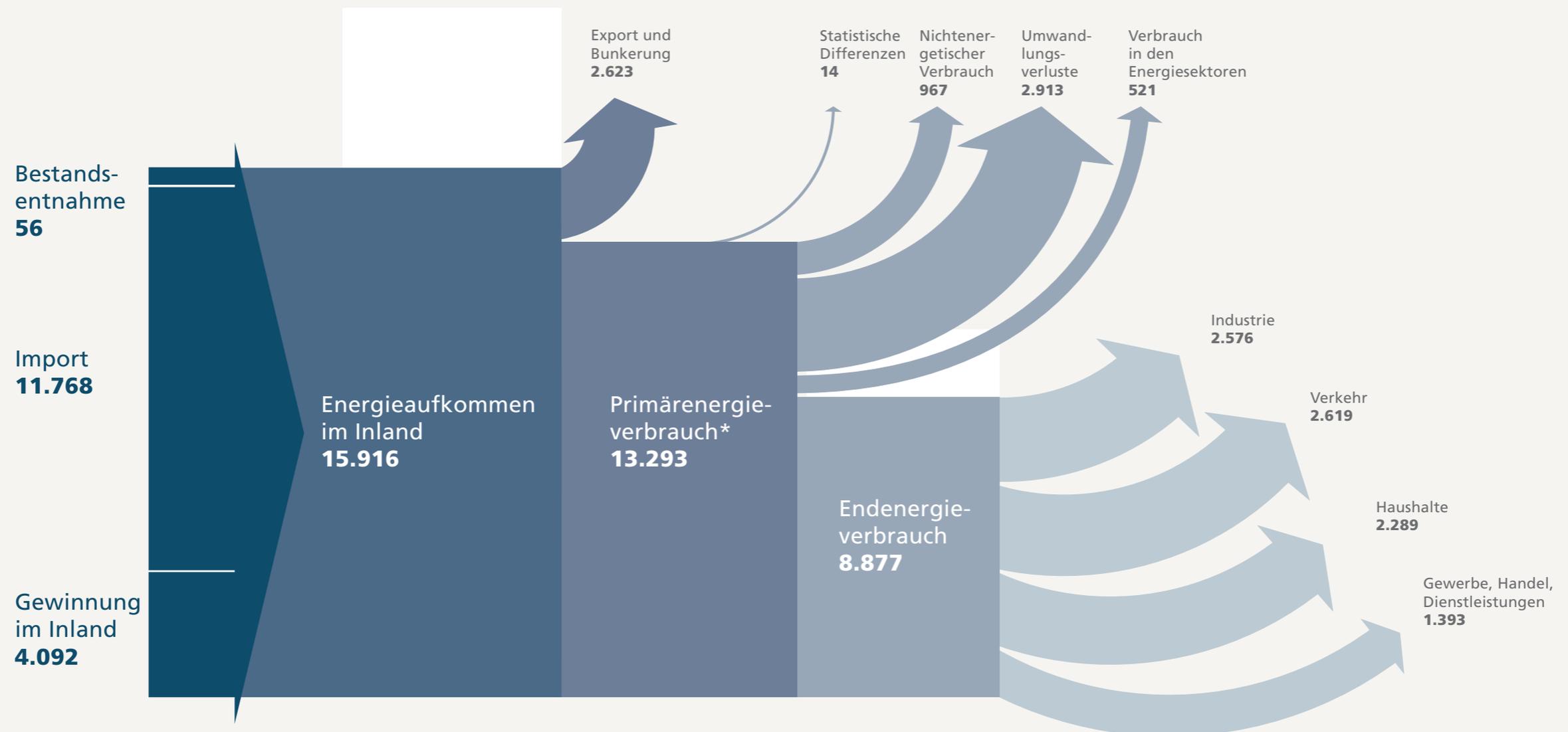
01 - Energie



Energieverbrauch I

Primärenergie

Energieflussbild 2015 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule (PJ)



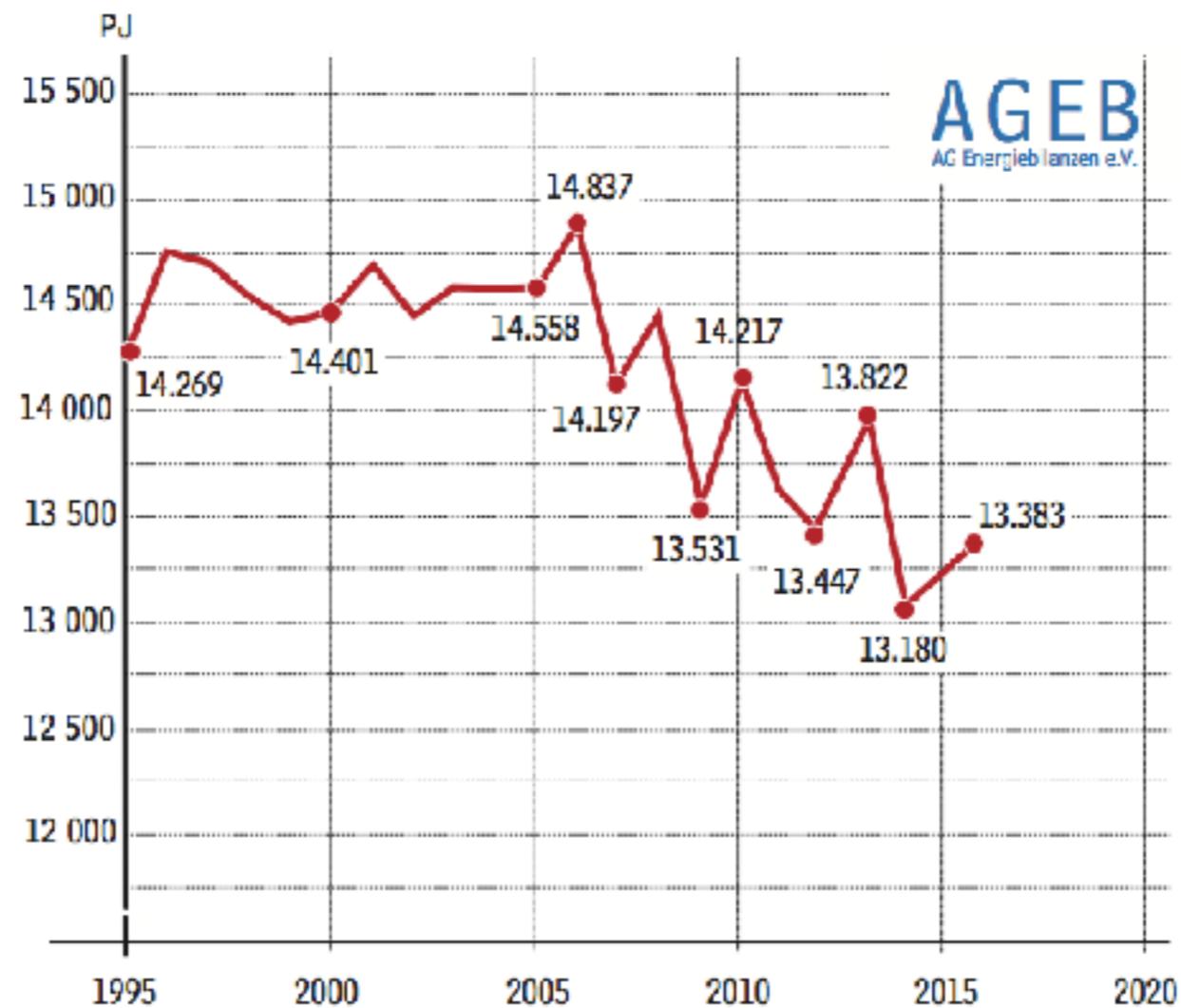
Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Primärenergieverbrauch liegt bei 12,5 %.
Abweichungen in den Summen sind rundungsbedingt.
* Alle Zahlen vorläufig/geschätzt.
29,3 Petajoule (PJ) $\hat{=}$ 1 Mio. t SKE
Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 07/2016

Quelle: <http://www.ag-energiebilanzen.de>

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland 1995-2016

in Petajoule (PJ)



Quelle: <http://www.ag-energiebilanzen.de>

Prof. Dr. Alexander Braun // Energiespeicher // SS 2017

Aufgabe

- Rechnen Sie kWh in J um.
- Rechnen Sie den Primärenergiebedarf für Deutschland 2016 in kWh um.

$$\begin{aligned} 1 \text{ kWh} &= 1000 \text{ Wh} \\ &= 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} \\ &= 3.6 \text{ MJ} \end{aligned}$$

Leistung nicht gleich Energie!

Leistung

$$\mathbf{W} = \mathbf{J} / \mathbf{s}$$

- kW Hausanlage
- MW Industrieanlage
- GW Großes Kraftwerk

Energie

$$\mathbf{E} = \mathbf{J}$$

- kWh Hausanlage
- MWh Industrieanlage
- GWh Großes Kraftwerk

Volllast-Stunde und Jahresnutzungsgrad

- Eine **Volllast-Stunde** ist ein Maß für den Nutzungsgrad (hier) eines Kraftwerkes.
- Es bezeichnet die rechnerische Anzahl der Stunden unter Volllast um die Energiemenge des Jahres zu erzeugen.
- Der **Jahresnutzungsgrad** setzt diese Anzahl zur Anzahl Stunden im Jahr ins Verhältnis.

$$\#h_{\text{Volllast}} = \frac{\text{Jahres-Energie}}{\text{Nennleistung}}$$

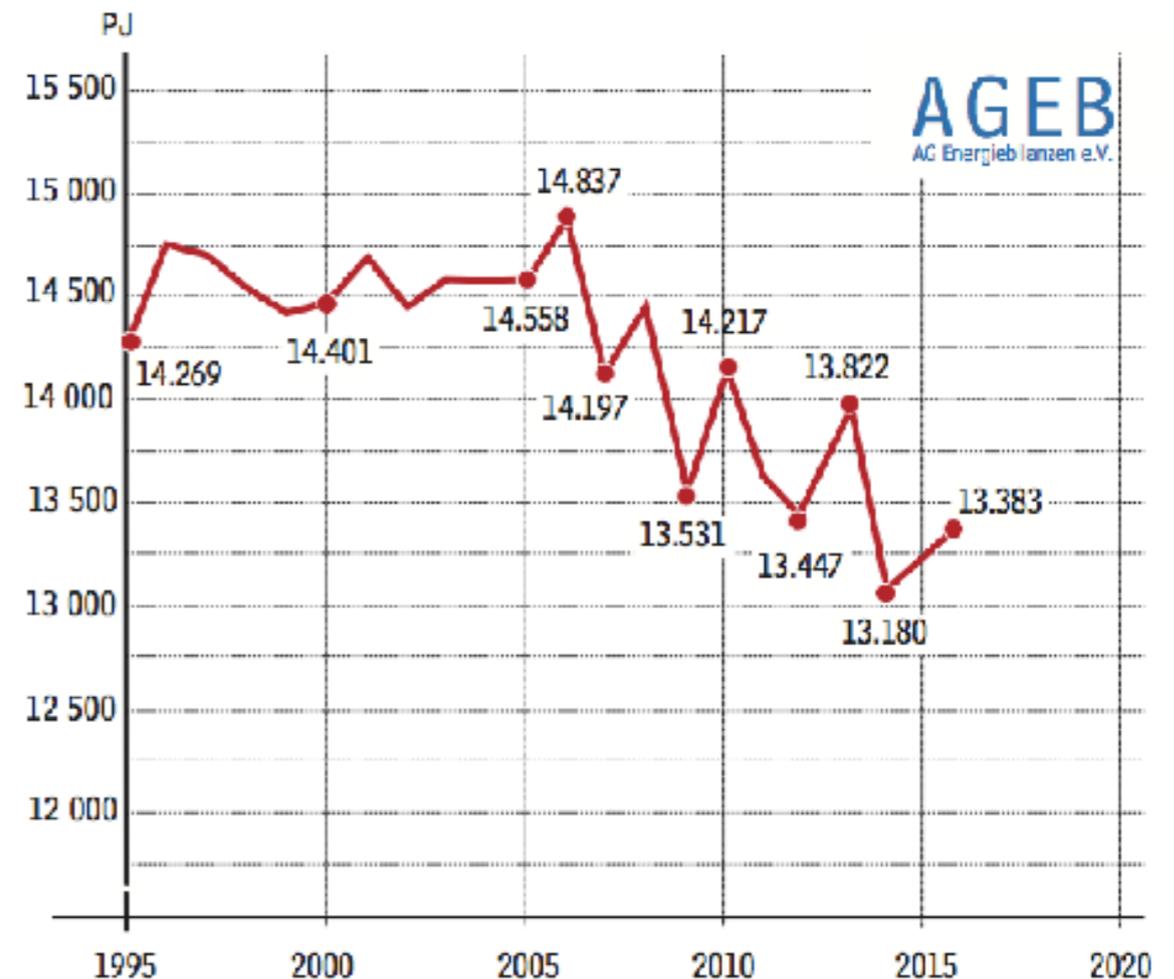
$$\text{Jahresnutzungsgrad} = \frac{\#h_{\text{Volllast}}}{8760 \text{ h}}$$

Aufgabe

- Welche Leistung müssen Sie durchgehend zur Verfügung stellen um den Primärenergieverbrauch 2016 in Deutschland zu bedienen?

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland 1995 - 2016

in Petajoule (PJ)

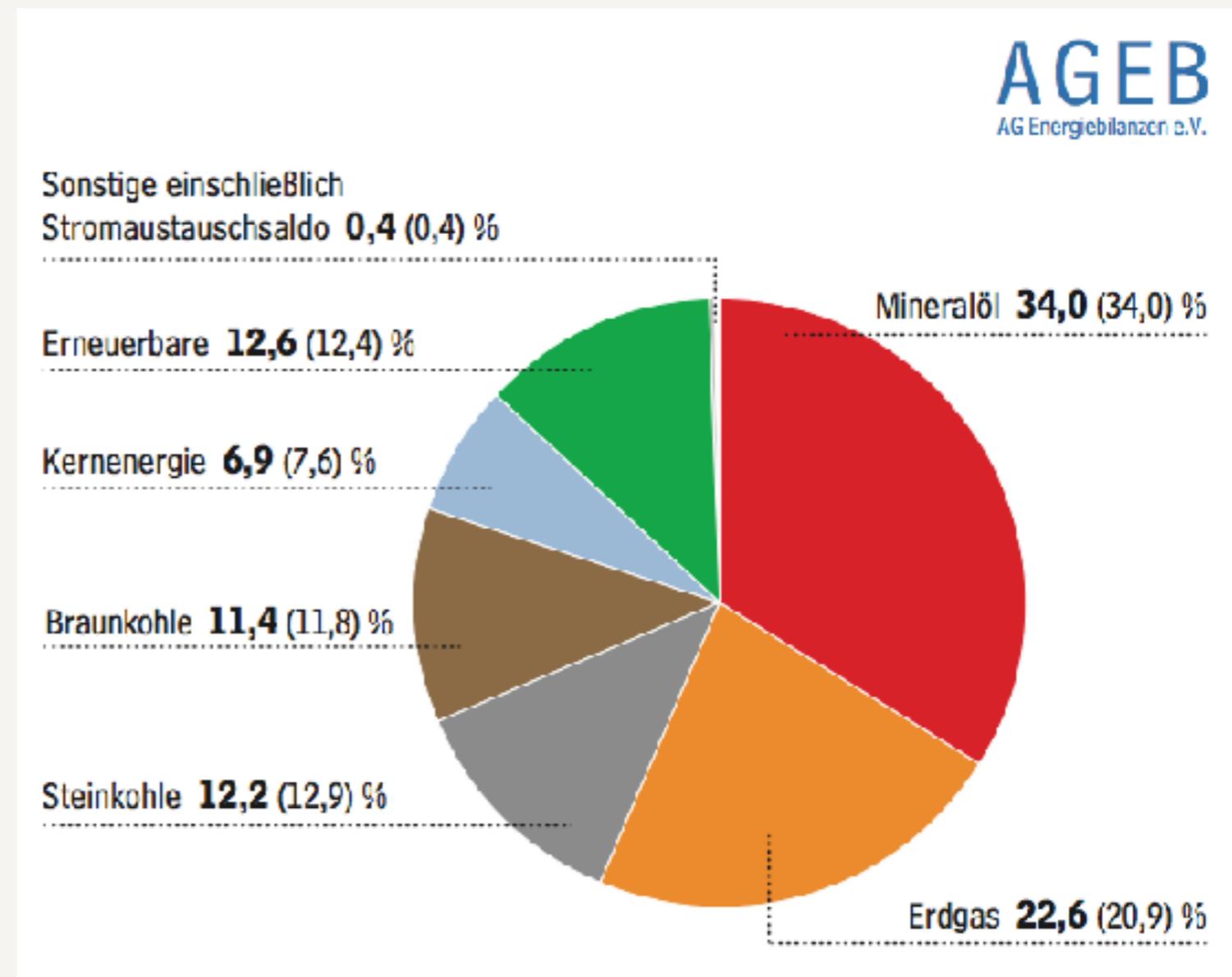


Quelle: <http://www.ag-energiebilanzen.de>

Energieerzeugung

Energiemix

- Alles drin alles dran
- Wärme und Strom
- Industrie und Haushalte
- Import und Export

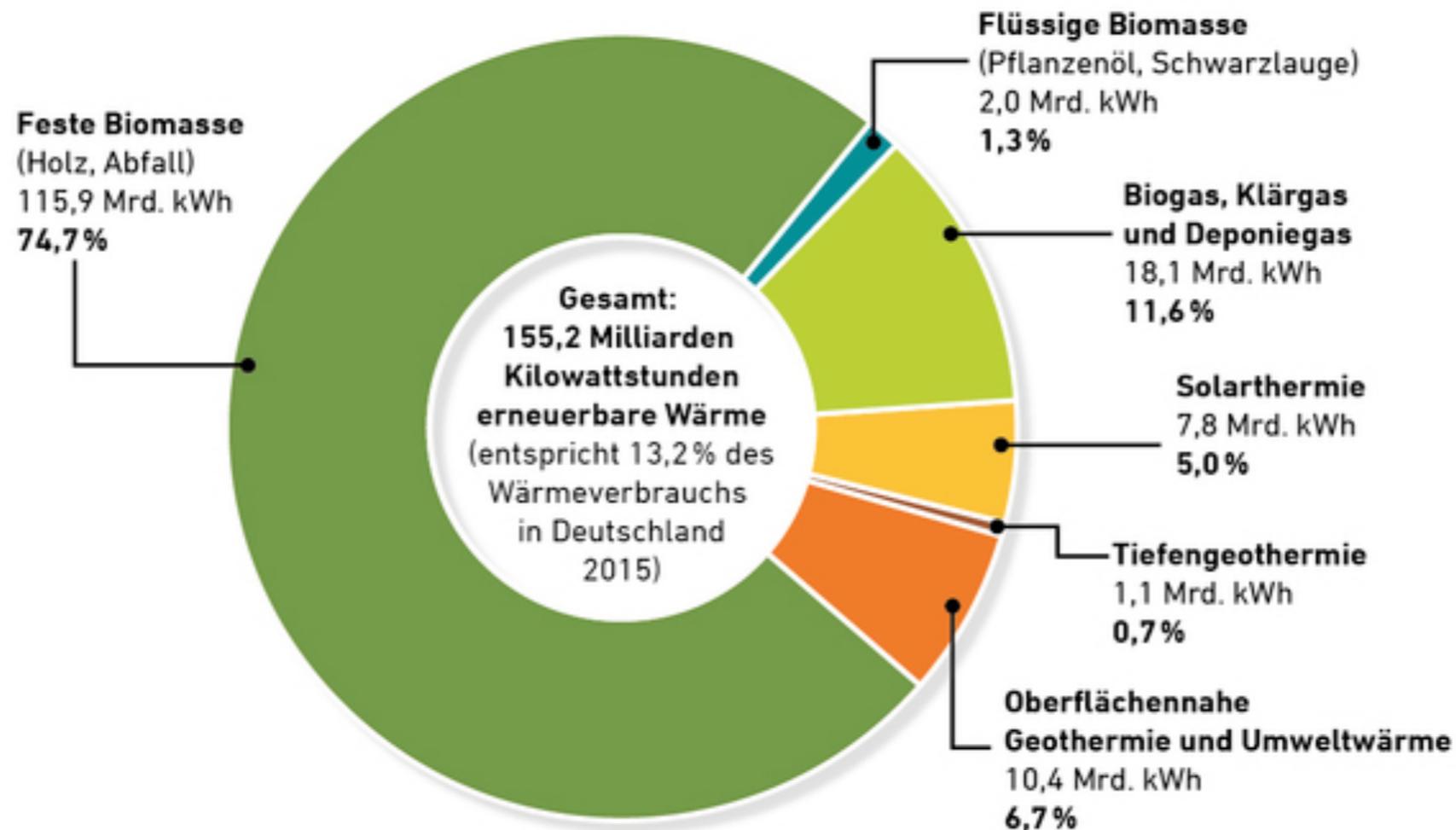


Quelle: <http://www.ag-energiebilanzen.de>

Wärme aus erneuerbaren Energien

Wärme aus Erneuerbaren Energien 2015

Bioenergie ist wichtigste Quelle erneuerbarer Wärme, die insgesamt rund 12 Prozent des deutschen Wärmeverbrauchs deckte.



Quelle: BMWi, AGEE-Stat
Stand: 02/2016

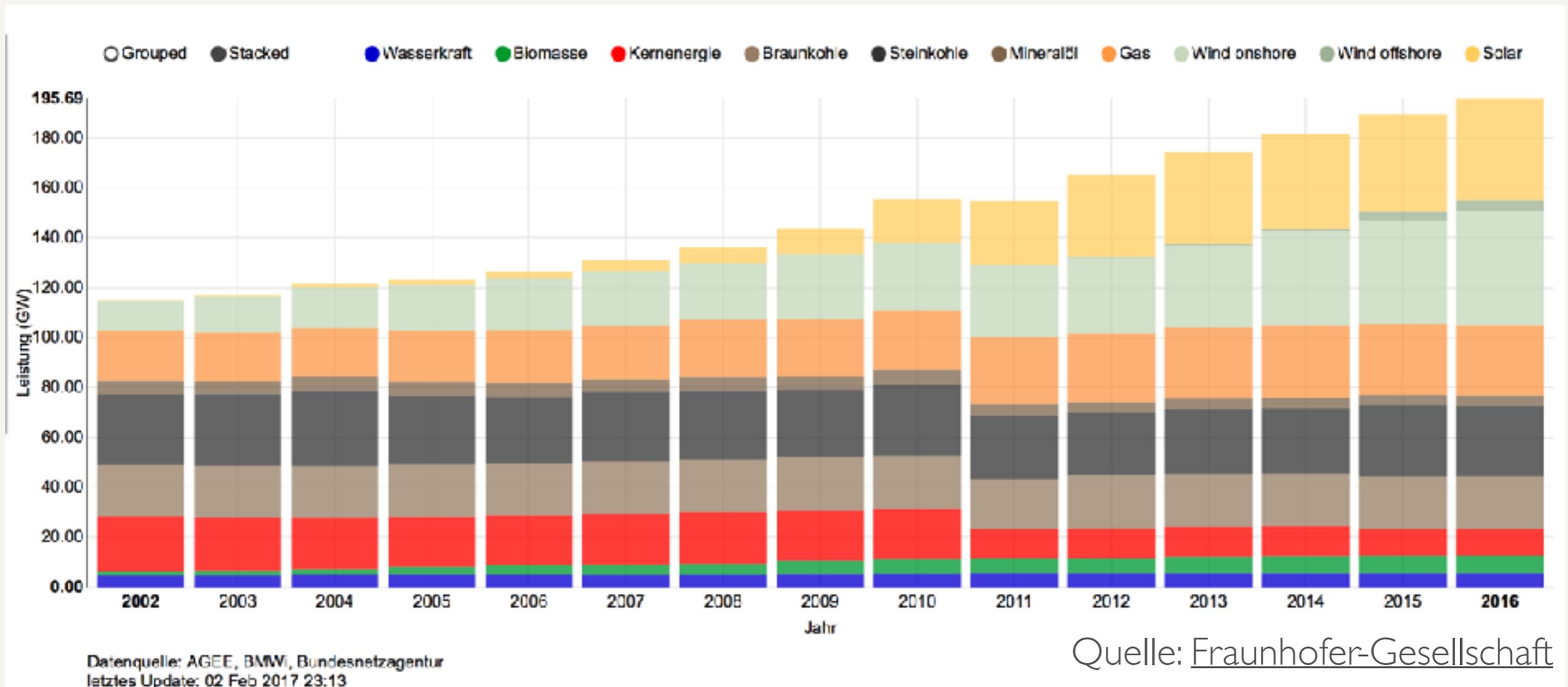
© 2016 Agentur für Erneuerbare Energien e.V.



<http://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/waerme-aus-erneuerbaren-energien>

Stromerzeugung in Deutschland

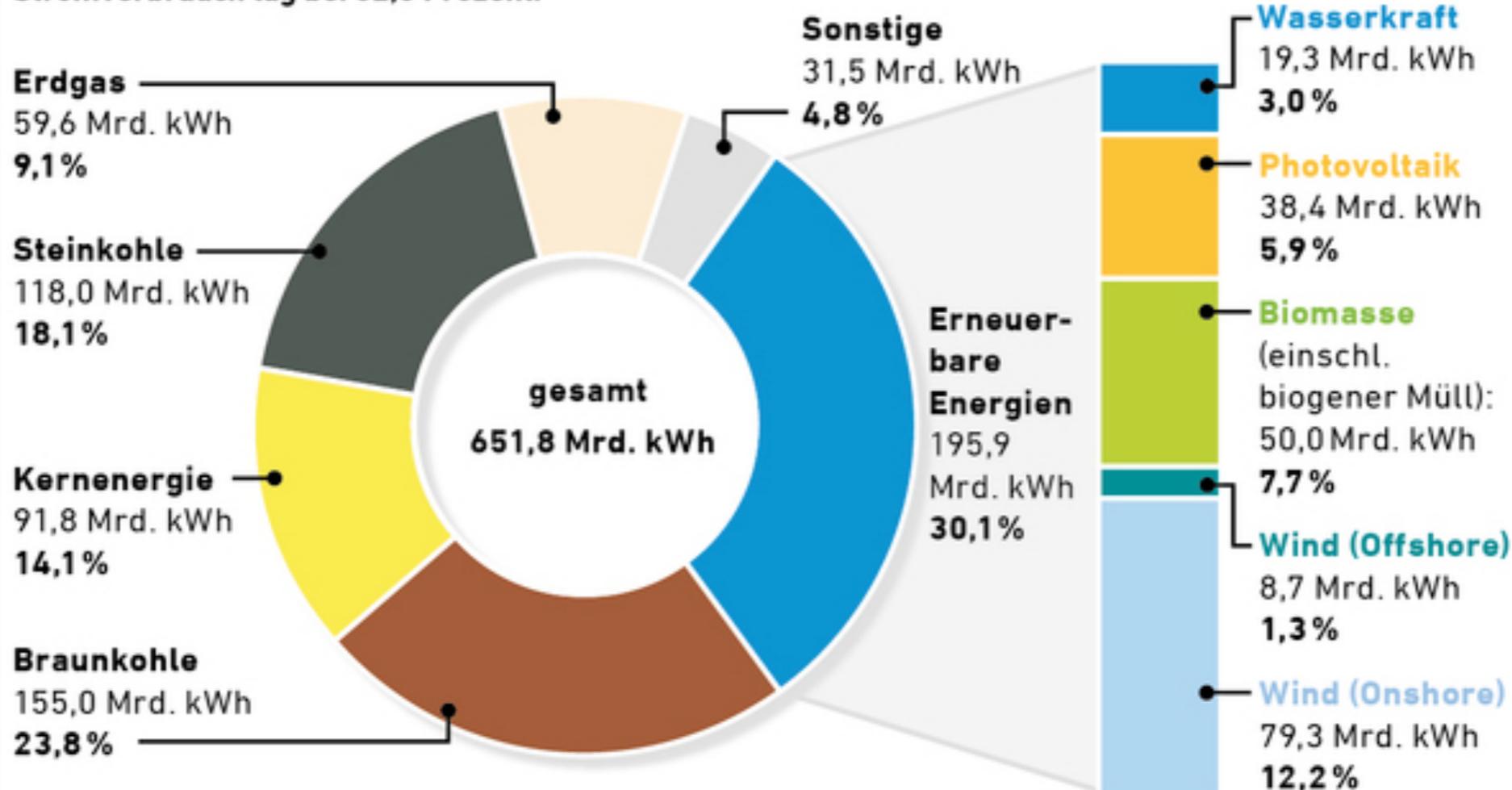
Offizielle Daten: **204.1 GW**, s. Bundesnetzagentur



Strommix Deutschland

Der Strommix in Deutschland im Jahr 2015

Mit rund 196 Milliarden Kilowattstunden lieferten Erneuerbare Energien 30,1 Prozent der deutschen Bruttostromerzeugung und sind damit der wichtigste Energieträger zur Stromproduktion. Ihr Anteil am Stromverbrauch lag bei 32,6 Prozent.



Quelle: AGEE-Stat, AG Energiebilanzen
Stand: 2/2016

© 2016 Agentur für Erneuerbare Energien e.V.

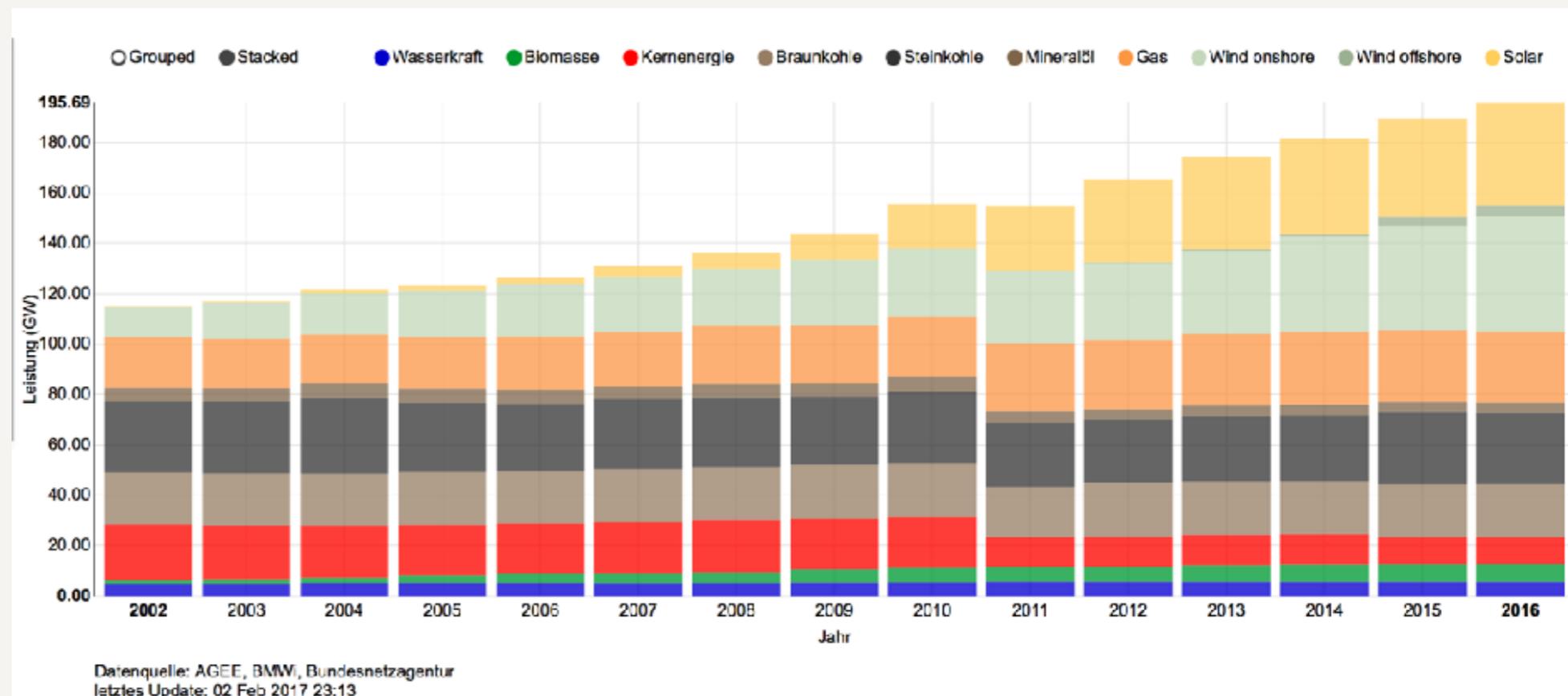
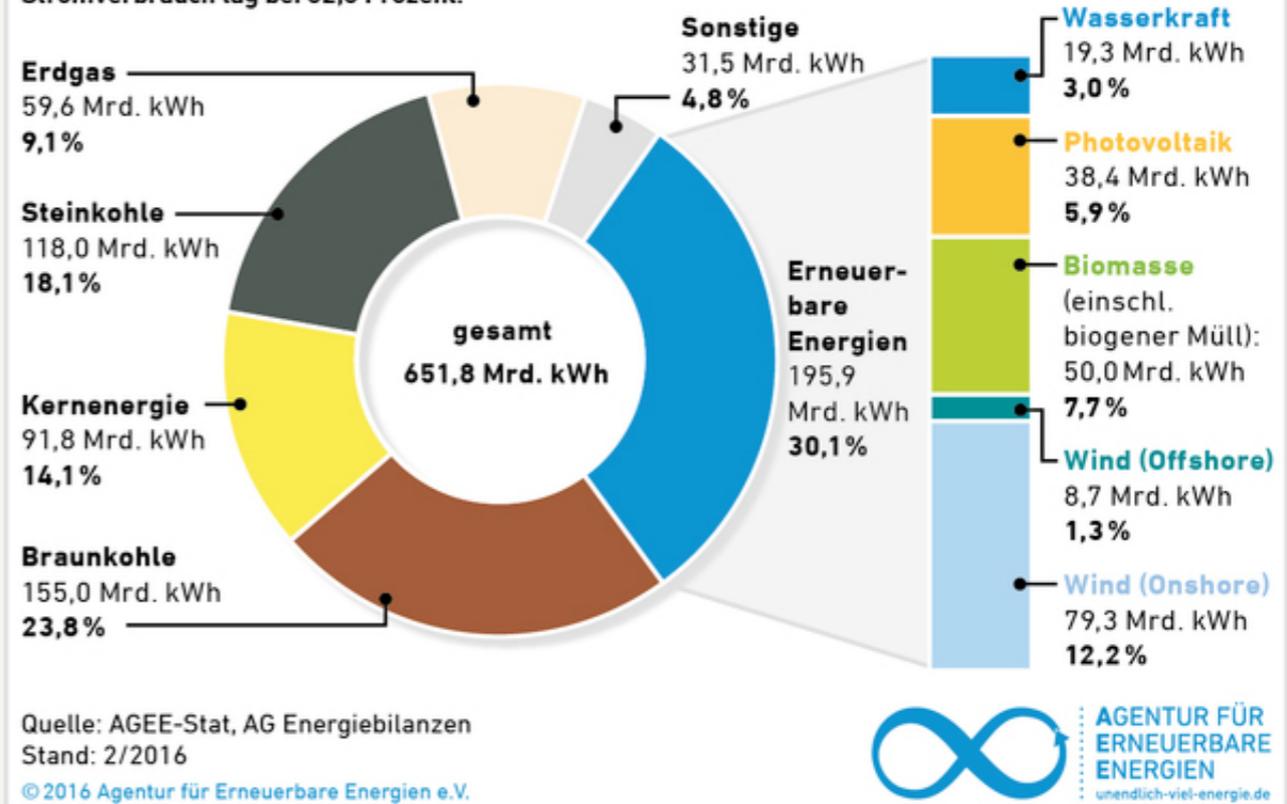


Aufgabe

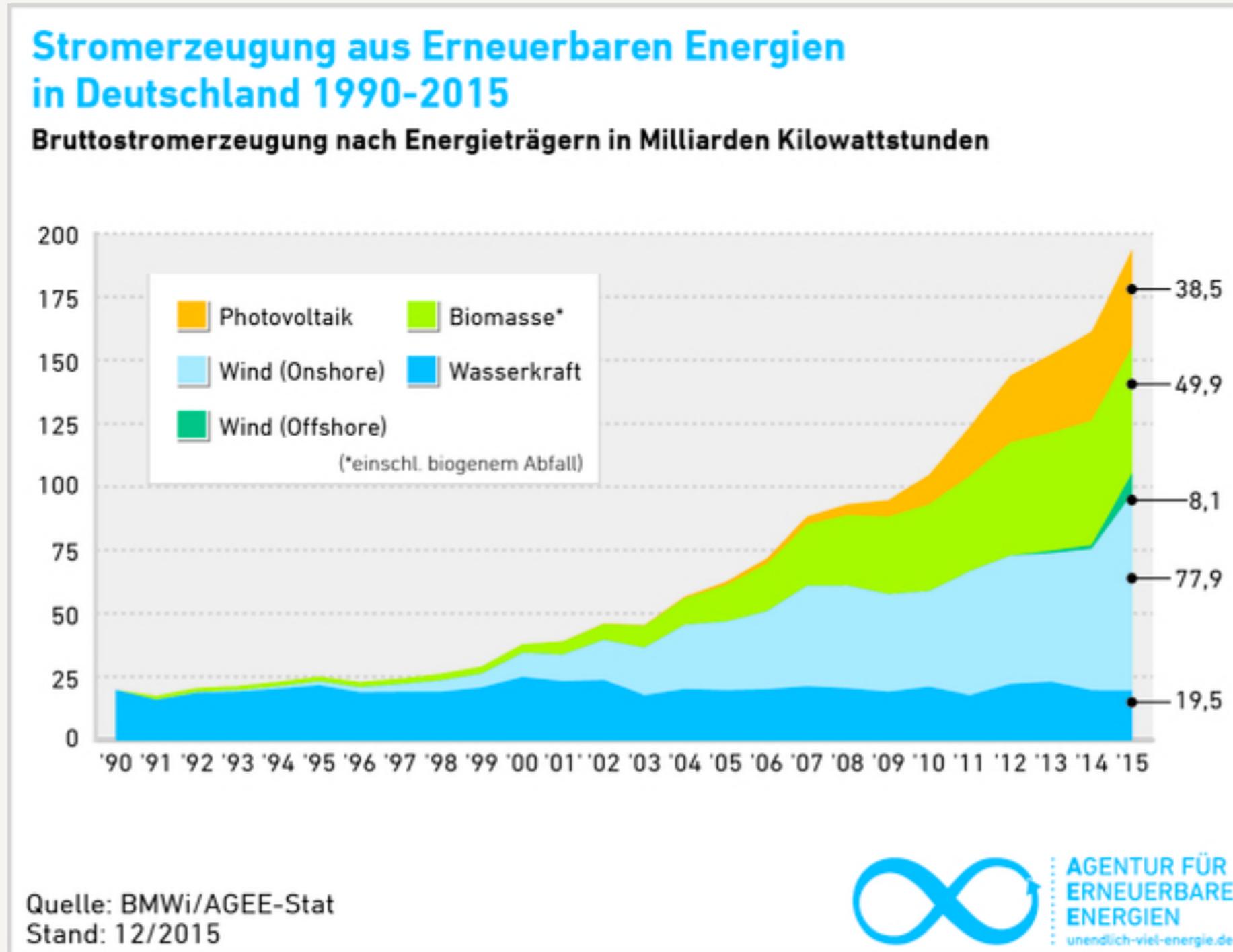
- Schätzen Sie die Volllast-Stunden für Braunkohle, Solar und Wind (onshore) ab.

Der Strommix in Deutschland im Jahr 2015

Mit rund 196 Milliarden Kilowattstunden lieferten Erneuerbare Energien 30,1 Prozent der deutschen Bruttostromerzeugung und sind damit der wichtigste Energieträger zur Stromproduktion. Ihr Anteil am Stromverbrauch lag bei 32,6 Prozent.



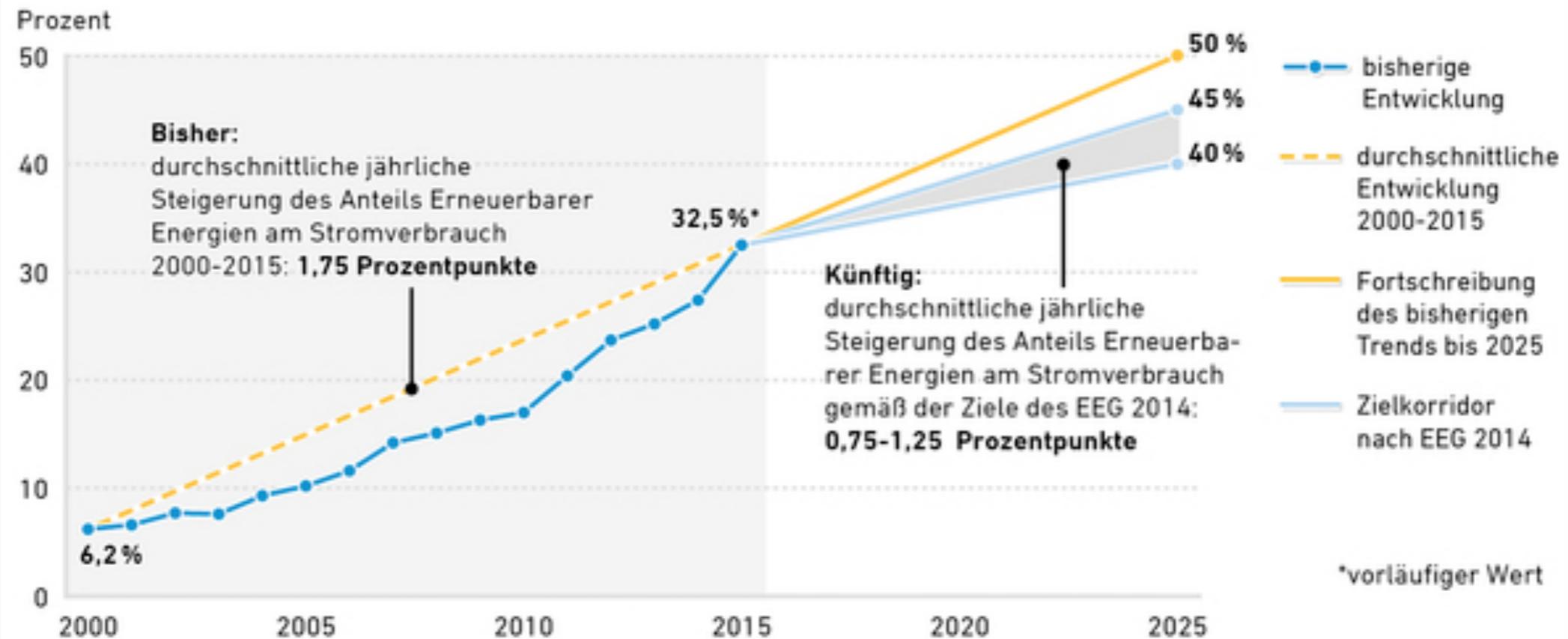
Strom aus erneuerbaren Energien



Strom aus erneuerbaren Energien

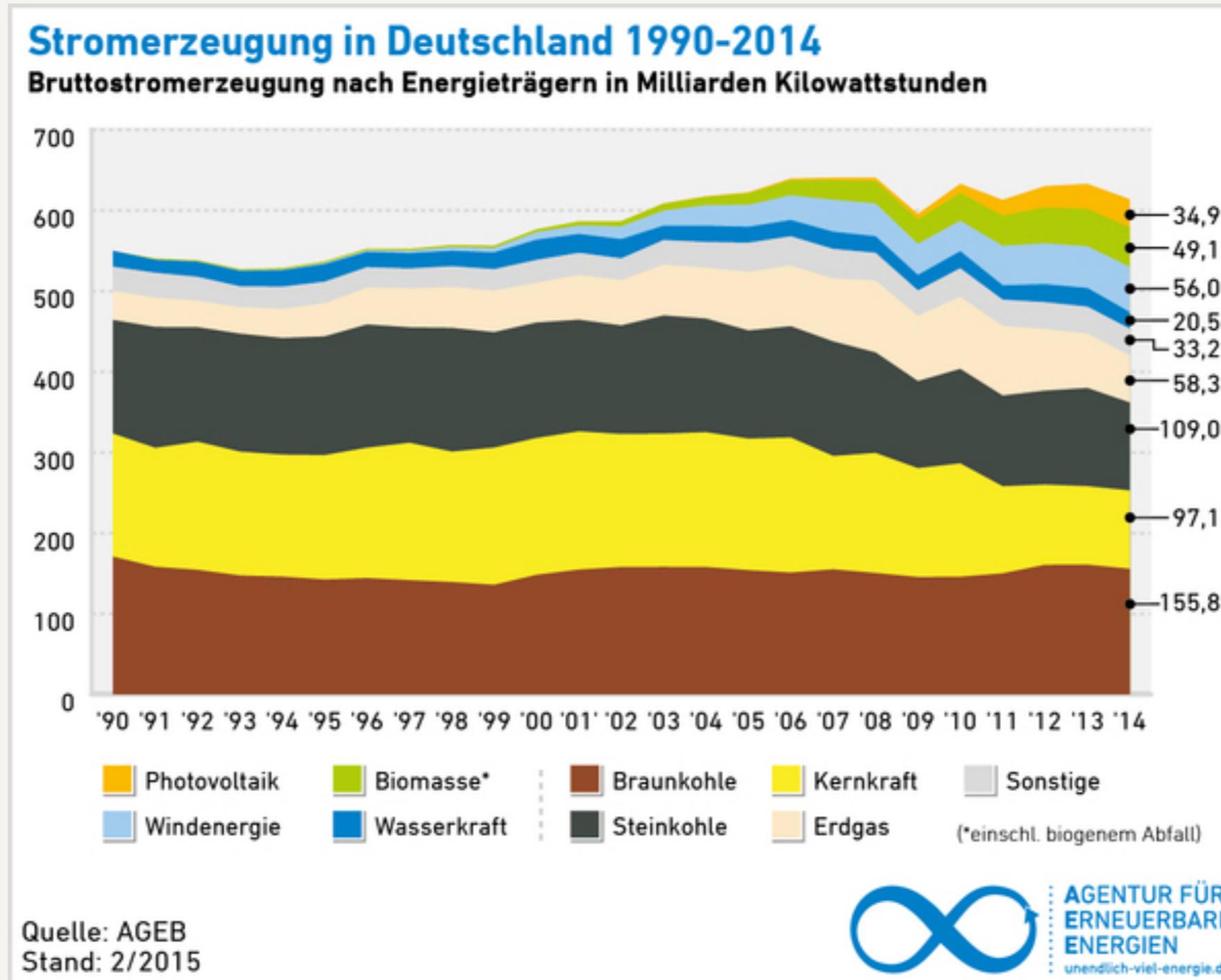
Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien am Stromverbrauch bis 2015 und Ziel bis 2025

Seit dem Jahr 2000 konnten die Erneuerbaren Energien ihren Anteil am Stromverbrauch jährlich im Schnitt um 1,75 Prozentpunkte steigern und erreichten 2015 eine Marke von 32,5 Prozent. In den kommenden 10 Jahren soll dieser Anteil gemäß EEG 2014 deutlich langsamer wachsen.



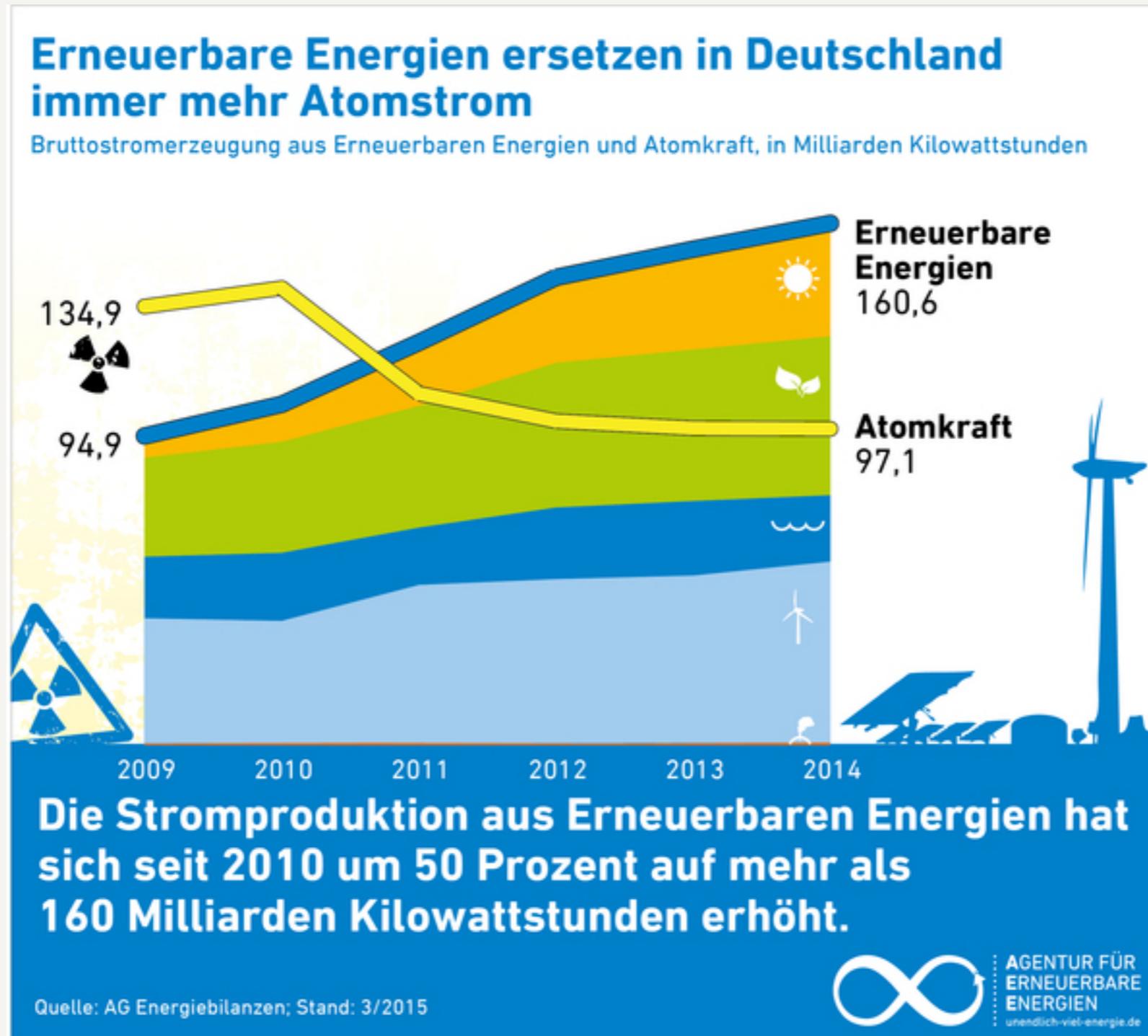
Quelle: AGEB, AGEE-Stat, eigene Berechnung
Stand: 12/2015

Strommix Entwicklung



Quelle: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/entwicklung-der-stromerzeugung-in-deutschland>

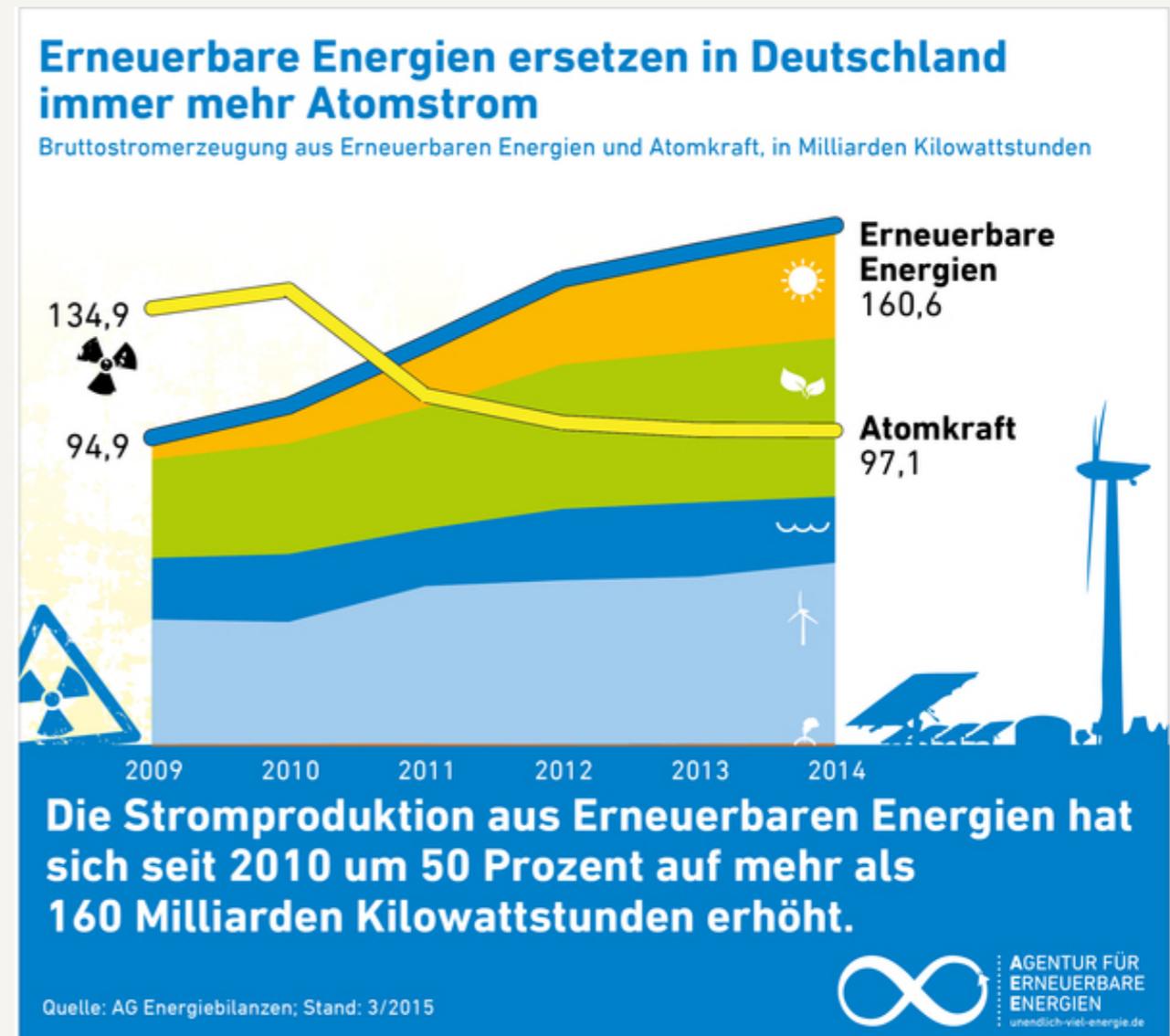
Atomausstieg



Quelle: <http://www.unendlich-viel-energie.de/erneuerbaren-energien-weltweit-zum-durchbruch-verhelfen>

Aufgabe

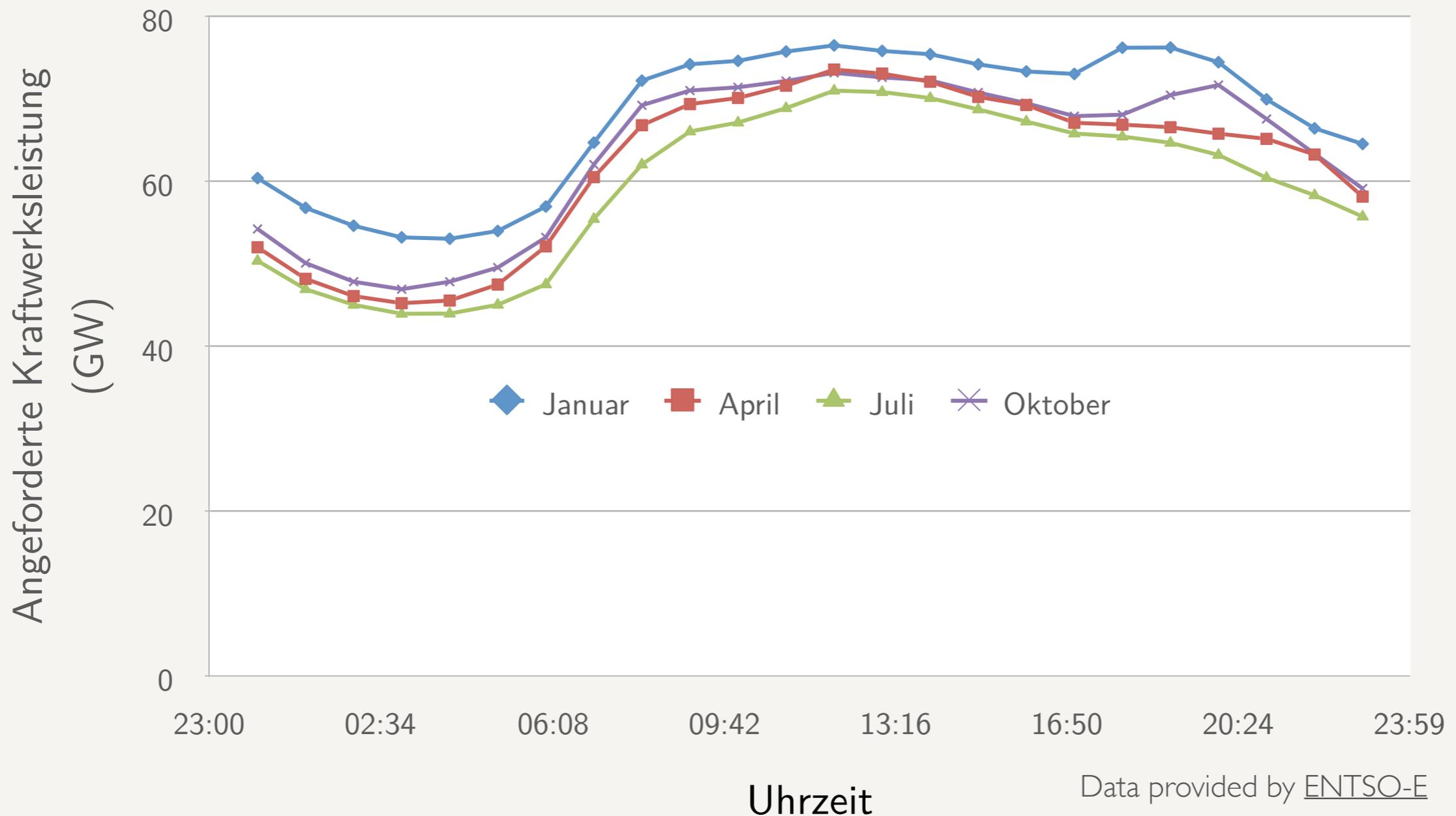
- Berechnen Sie wie lange die Kernkraftwerke im Jahr 2014 gelaufen sind um die gezeigte Energie zur Verfügung zu stellen.
- Berechnen Sie wie lange die PV-Anlagen im Jahr 2014 gelaufen sind um die gezeigte Energie zur Verfügung zu stellen.
- Die installierte PV-Leistung nehmen Sie bitte mit 35 GW an.



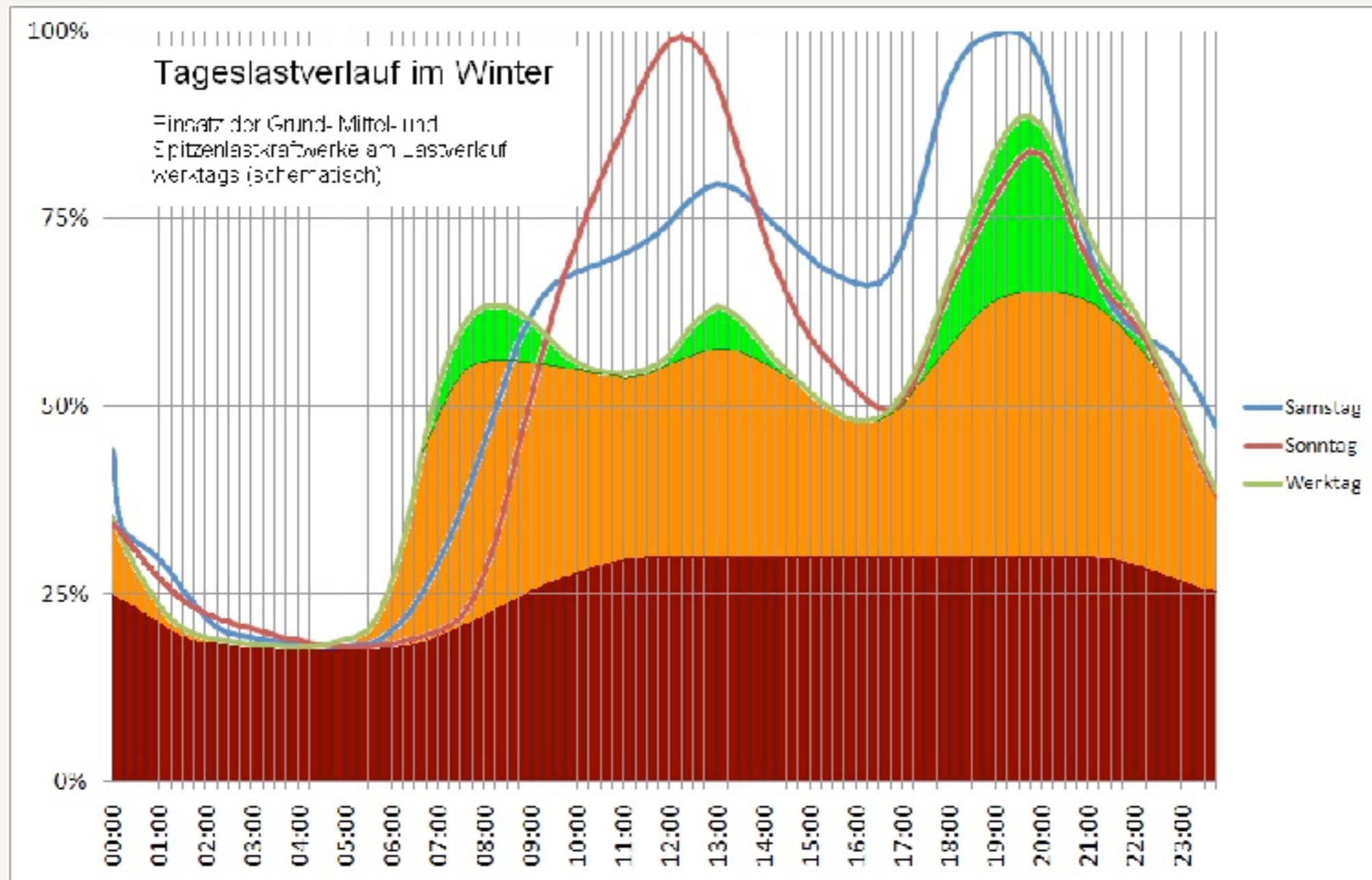
Energieverbrauch II

Verbrauchte Stromleistung in Deutschland im Laufe des Tages und Jahres

Angeforderte Kraftwerksleistung in ganz Deutschland im Laufe eines Tages



Verlauf des täglichen Strombedarfs



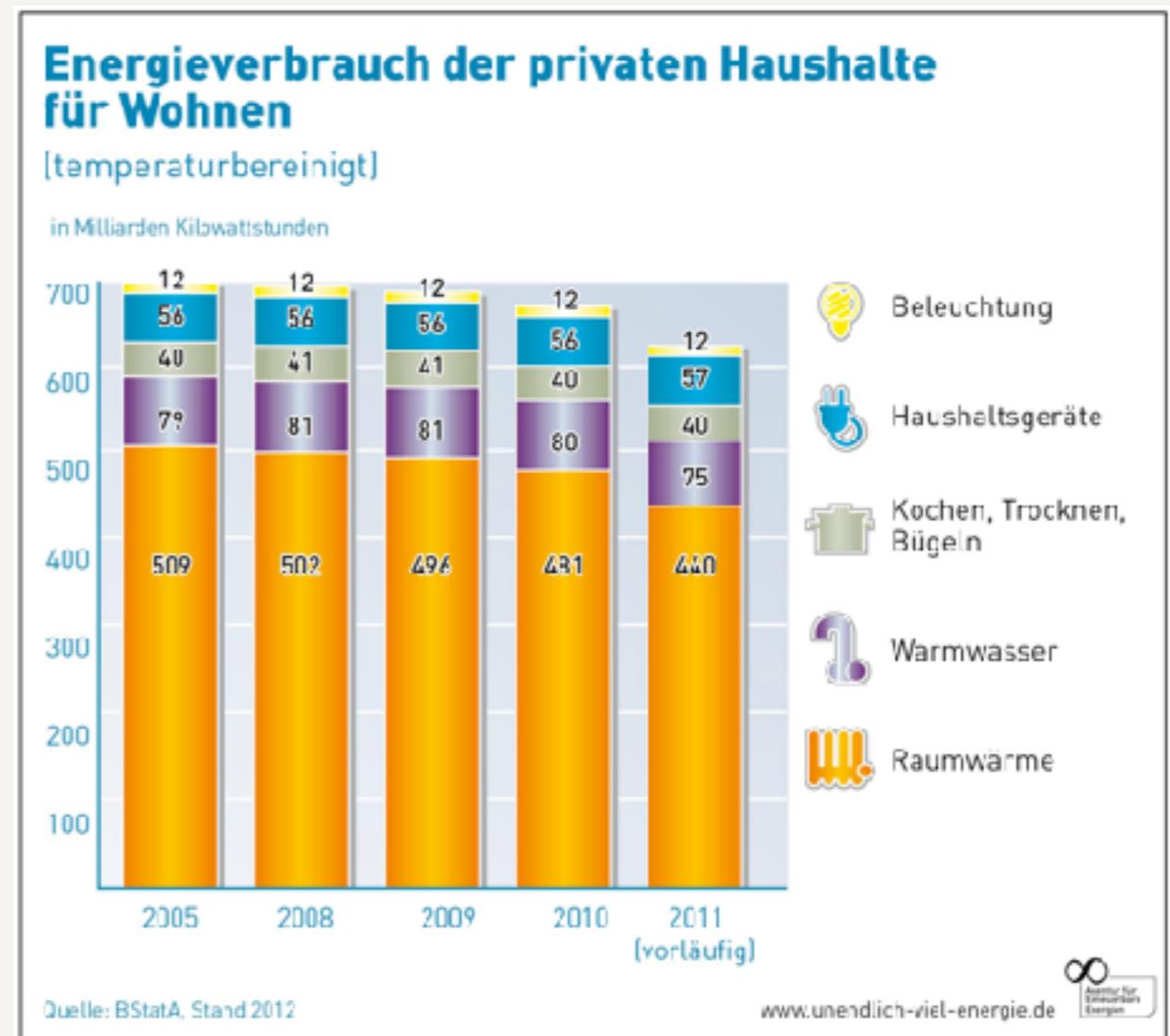
https://de.wikipedia.org/wiki/Bedarf_an_elektrischer_Energie

Quelle:



Energieverbrauch privater Haushalte

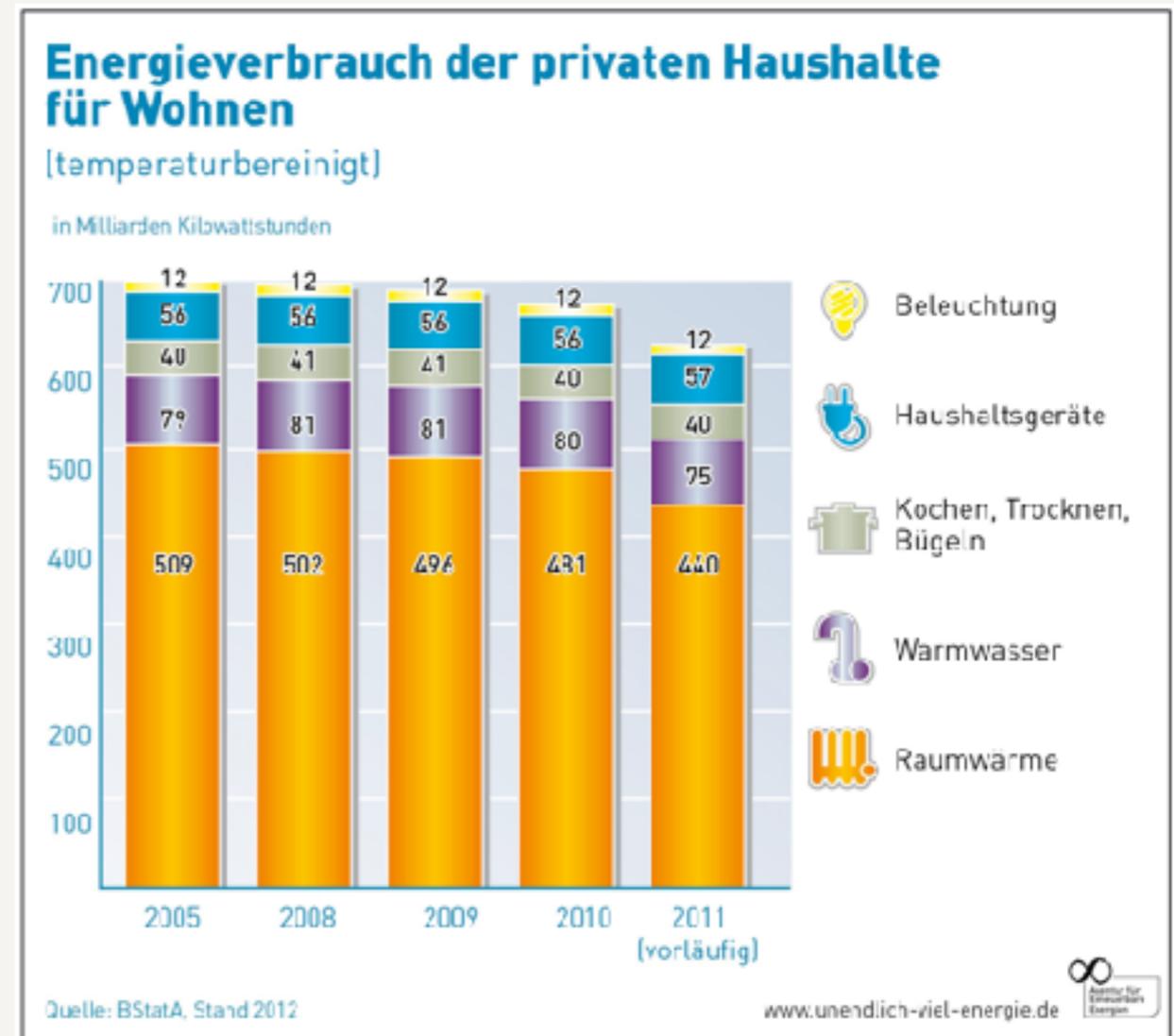
„Grund für sinkende Verbräuche von Öl und Gas sind nach Aussage der Agentur für Erneuerbare Energien neben **Dämm- und Sanierungsmaßnahmen** auch der verstärkte Einsatz energieeffizienter Heizungstechnik auf Basis **erneuerbarer Energien**“.



Quelle: <http://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/endenergieverbrauch-von-privathaushalten>

Aufgabe

- Bestimmen Sie in Prozent den Energieverbrauch für Wärme (Heizung, Warmwasser) und Strom.
- Nehmen Sie für Deutschland 40 Millionen Haushalte an. Rechnen Sie die Tabelle auf einen Haushalt herunter.



Aufgabe

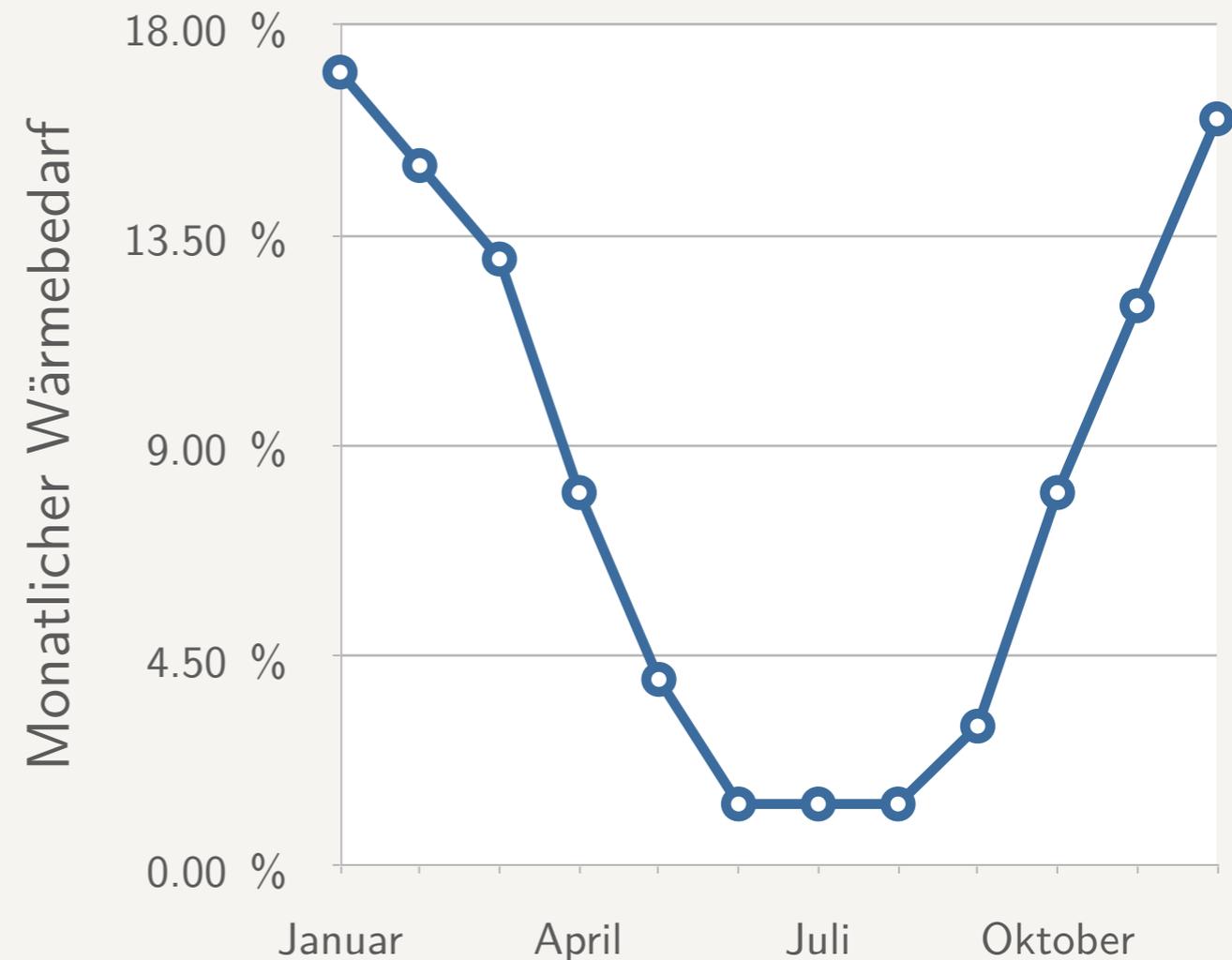
- Meine Frau und ich überlegen für den neu gekauften Kronenleuchter mit 12 Glühbirnen (Kerzenform) LED-basierte Leuchten anzuschaffen.
- Der Kronleuchter wird im Schnitt 2h am Tag brennen.
- Eine LED-Leuchte kostet €6, verbraucht 2W und hält 30.000h.
- Eine vergleichbare Halogen-Leuchte kostet €1.1, benötigt 18W und hält 2.000h.
- Wie viel Energie sparen wir im Jahr?
- Nach welcher Zeit hat sich die LED-Leuchte amortisiert?
- Nach welcher Zeit müssen Sie die Leuchten im Schnitt austauschen?

Aufgabe

| Einzelne Leuchte | | | |
|----------------------------------|----------------|------------|-------|
| | Halogen | LED | |
| Stromverbrauch | 18 | 2 | W |
| Lichtleistung | 205 | 150 | Lumen |
| Kosten | 1.1 | 5.9 | € |
| Lebensdauer | 2000 | 30000 | h |
| Kostendifferenz | 4.8 | € | |
| | | | |
| Gebrauch | 2 | h / Tag | |
| Jahresbetriebsdauer | 730 | h | |
| Betriebsdauer | 2.74 | 41.10 | a |
| | | | |
| Strompreis | 0.25 | € | |
| Stromverbrauch | 13.14 | 1.46 | kWh |
| Stromkosten | 3.285 | 0.365 | € |
| | | | |
| Energiedifferenz | 11.68 | kWh | |
| Kostendifferenz | 2.92 | € | |
| Arbeitszeit | 1.64 | a | |
| | | | |
| Kronleuchter | | | |
| Anzahl Kerzen | 12 | | |
| Energieersparnis | 140.16 | kWh | |
| Kosteneinsparung pro Jahr | 35.04 | € | |

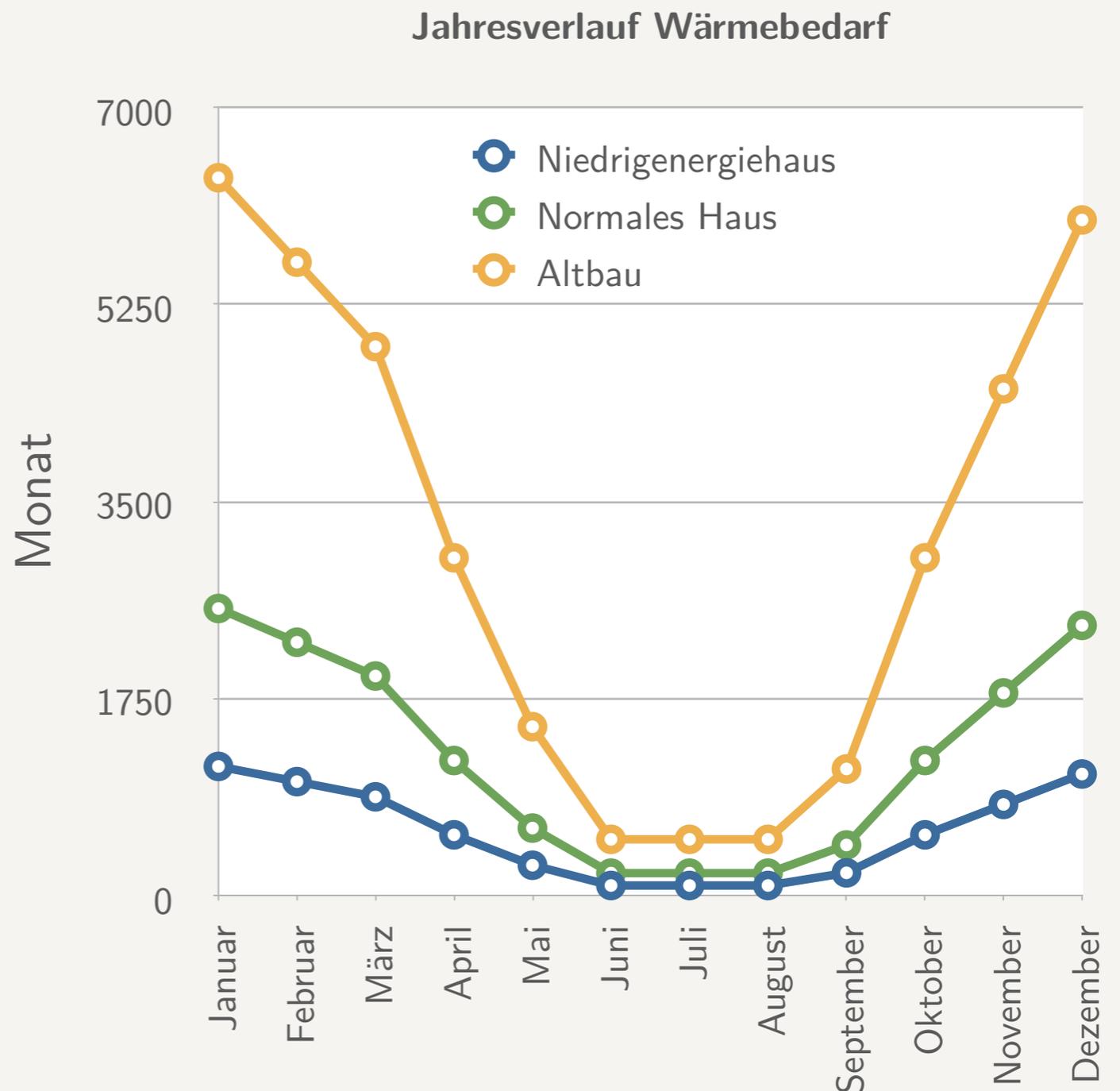
Verlauf des jährlichen Heizbedarfs im Einfamilienhaus

- **DIN 4713**: Definition der prozentualen Verteilung des Wärmebedarfs auf die Monate.
- Rechnen mit **Heizgradtagen**.



Verlauf des jährlichen Heizbedarfs im Einfamilienhaus

| | Spezifischer Verbrauch / kWh/(m ² a) | Jahressumme / kWh |
|----------------|---|-------------------|
| Niedrigenergie | 45 | 6750 |
| Normal | 100 | 15000 |
| Altbau | 250 | 37500 |



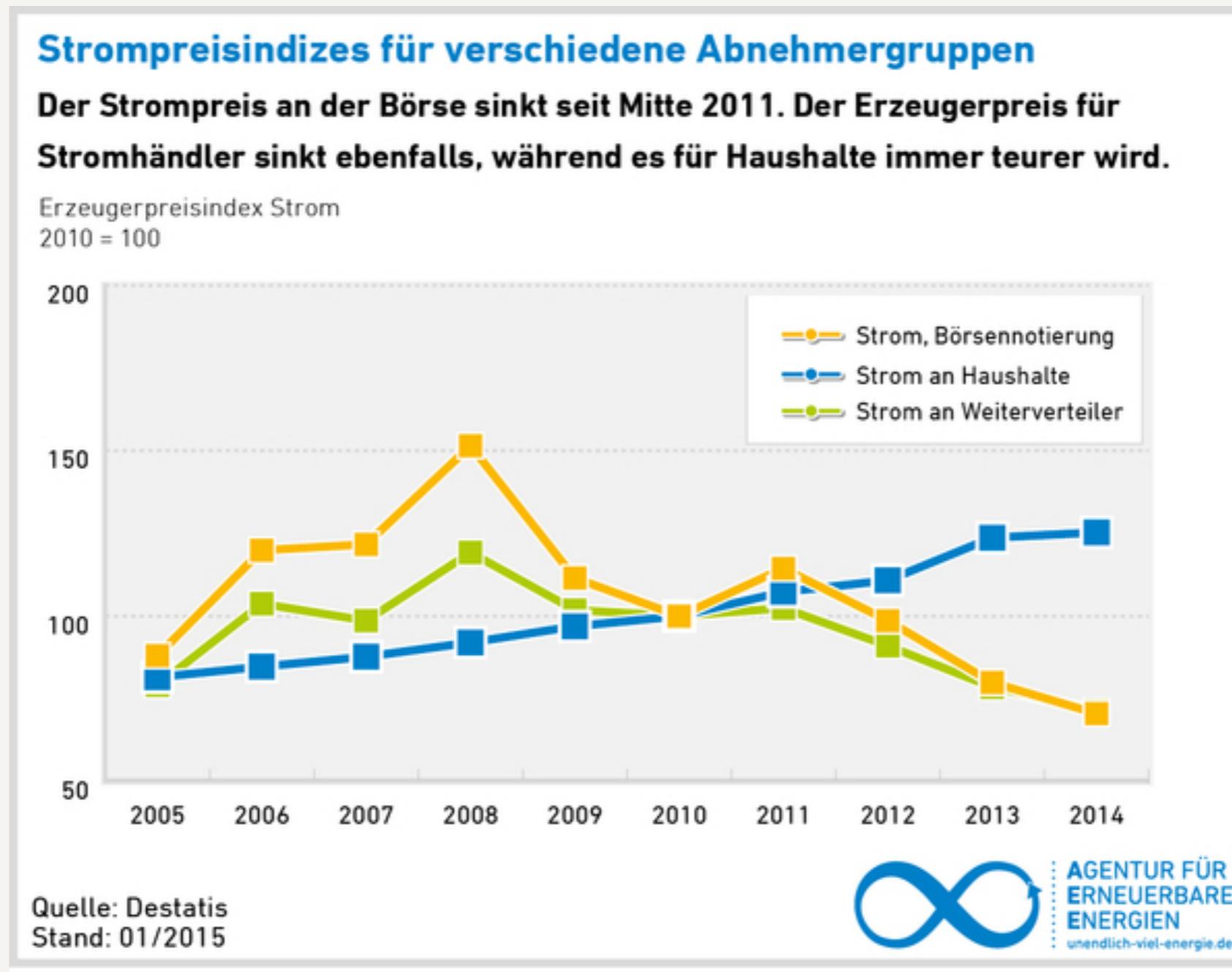
Stromverbrauch im Haushalt

WWB: Warmwasserbereitung

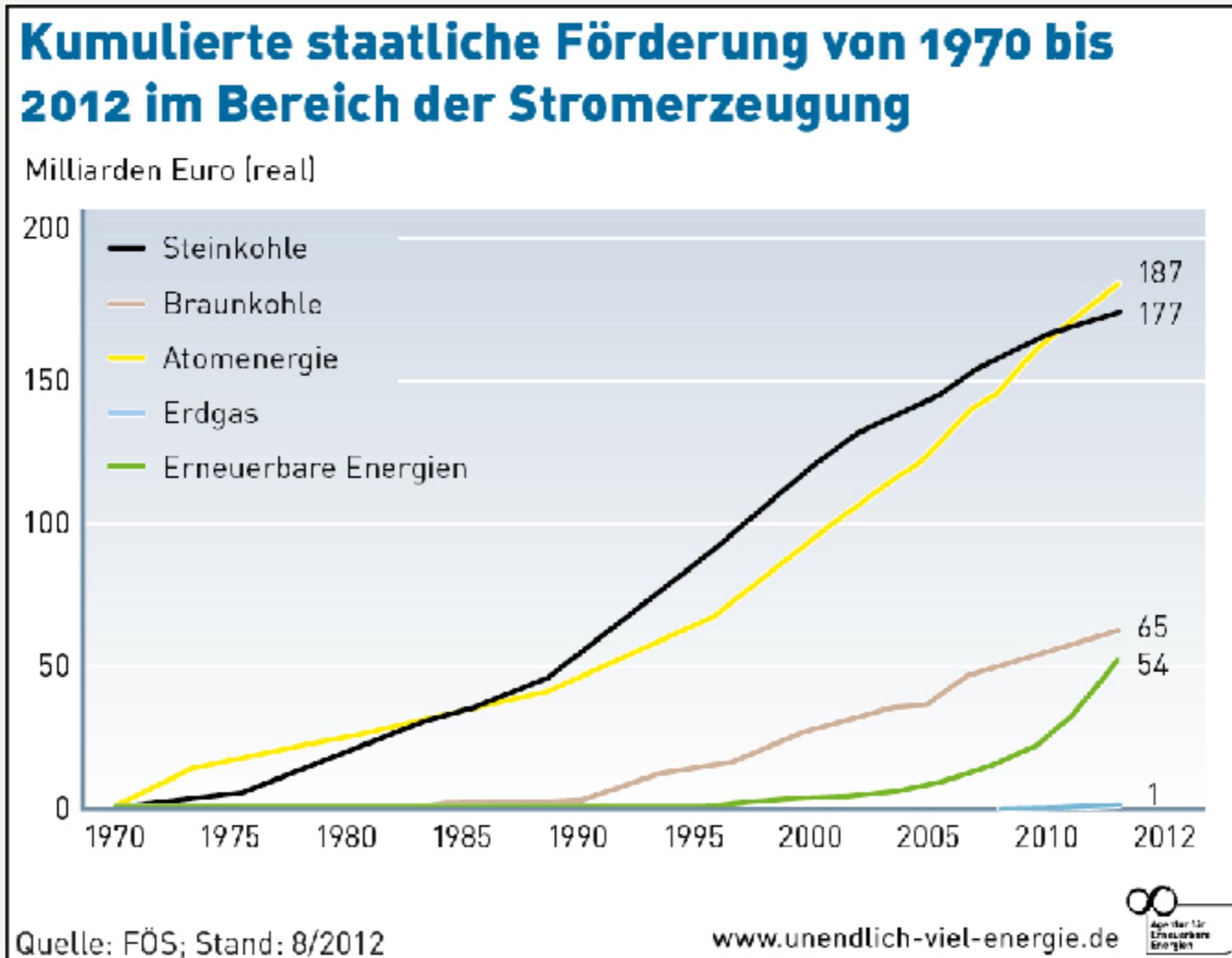
| Haushaltsgröße | Anzahl Datensätze* | Verbrauchswerte verschiedener Haushaltsgrößen mit und ohne elektrische WWB [kWh] | | |
|---|--------------------|--|-------|-------|
| | | mit / ohne | mit | ohne |
|  | 72.693 | 2.256 | 2.818 | 1.798 |
|  | 143.699 | 3.248 | 3.843 | 2.850 |
|  | 72.139 | 4.246 | 5.151 | 3.733 |
|  | 67.605 | 5.009 | 6.189 | 4.480 |
|  | 18.988 | 5.969 | 7.494 | 5.311 |
|  | 5.246 | 6.579 | 8.465 | 5.816 |

Quelle: <http://www.energieagentur.nrw.de>, „Wo bleibt der Strom?“

Strompreisentwicklung



Staatliche Förderung



Hinkley Point C

- 112€ / MWh garantierter Abnahmepreis
- Preisgarantie für 35 Jahre (!)
- Inflationsanpassung (Steigerung!)
- Aktueller Preis in Leipzig: €30/ MWh!

Hinkley Point B



Einführung Energie und Speicher

Energiearten

Primärenergie



- Kernenergie
- Chemische Energie



Quelle:



Physikalische Energie

- Potentielle Energie
- Kinetische Energie
- Innere Energie

Energieformen

Chemische Energie

Quelle: 

- Energie, die in einer chemischen Verbindung gespeichert ist.
- Kann durch chemische Reaktionen aufgenommen (endotherm) oder abgegeben werden (exotherm).
- Beispiel: Verbrennung mit einem Heizwert.

http://de.wikipedia.org/wiki/Chemische_Energie



Energieformen

Potentielle Energie

Wasserbecken als Speicher von Lagerenergie
für ein Pumpspeicherwerk

- Potentielle Energie kann in verschiedenen Formen gespeichert werden:
 - ▶ Lageenergie (Stausee)
 - ▶ Verformung (Feder)

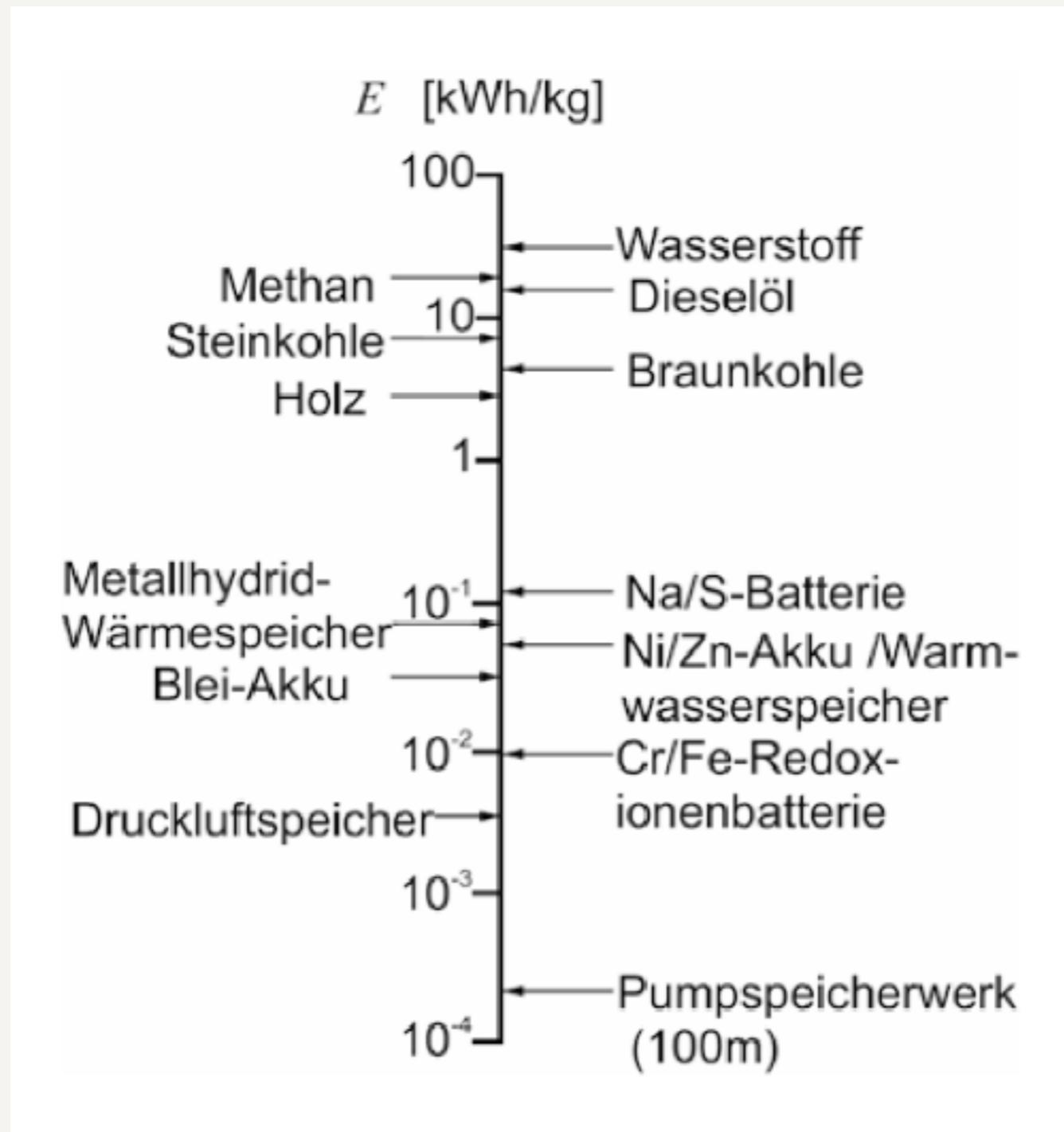


https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk_Niederwartha

Quelle:



Energiegehalt



Quelle: Thermische Solarenergie [1]

Energiespeicher

Voher: kWh/kg

| | Technologie | Energiedichte e in kWh/m ³ |
|--|--|--|
| Speicherung mechanischer Energie | potenzielle Energie (z. B. Pumpspeicherkraftwerk mit einem Höhenunterschied von 360 m) (elektrische Energie) | |
| | kinetische Energie (z. B. Schwungräder) (elektrische Energie) | 10 |
| Speicherung elektrischer Energie ³ | elektrostatische Felder (Kondensatoren) (elektrische Energie) | 10 |
| | elektromagnetische Felder (Spulen) (elektrische Energie) | 10 |
| Elektrochemische Speichersysteme | Blei-Säure-Batterie (elektrische Energie) | 100 |
| | Lithium-Ionen-Batterie (elektrische Energie) | 500 |
| Speicherung thermischer Energie | sensible Wärme (z. B. Wasser mit $\Delta T = 100$ K) (thermische Energie) | 116 |
| | Phasenübergang (z. B. von Wasser zu Dampf) (thermische Energie) | 636 |
| Speicherung chemischer Energie | flüssiger Wasserstoff (thermische Energie) | 2.400 |
| | Benzin (thermische Energie) | 8.500 |

Quelle: SEFEP [2]

Einsatz von Energiespeichern

Überblick

Wärme

- Kraftwerksbetrieb
(Verlängerung der Stromproduktion)
- Hausbetrieb (Eigennutzung)
- Industrielle Nutzung
(Eigennutzung, Nahwärme)

Strom

- Netzstabilisierung (Puffer für schwankende Quellen)
- USV
- Hausbetrieb (Eigennutzung)
- Inselbetrieb

Das wird der Inhalt dieser Vorlesung!

Eigenschaften von Speichern

Kapazität und Speicherdichte

Sensibler Wärmespeicher

- **Kapazität** ist die Energiemenge in J oder kWh, die maximal gespeichert werden kann.
- **Speicherdichte** oder **Energiedichte** bezieht die Kapazität auf das eingesetzte Volumen (kWh / m^3) oder die Masse (kWh / kg).

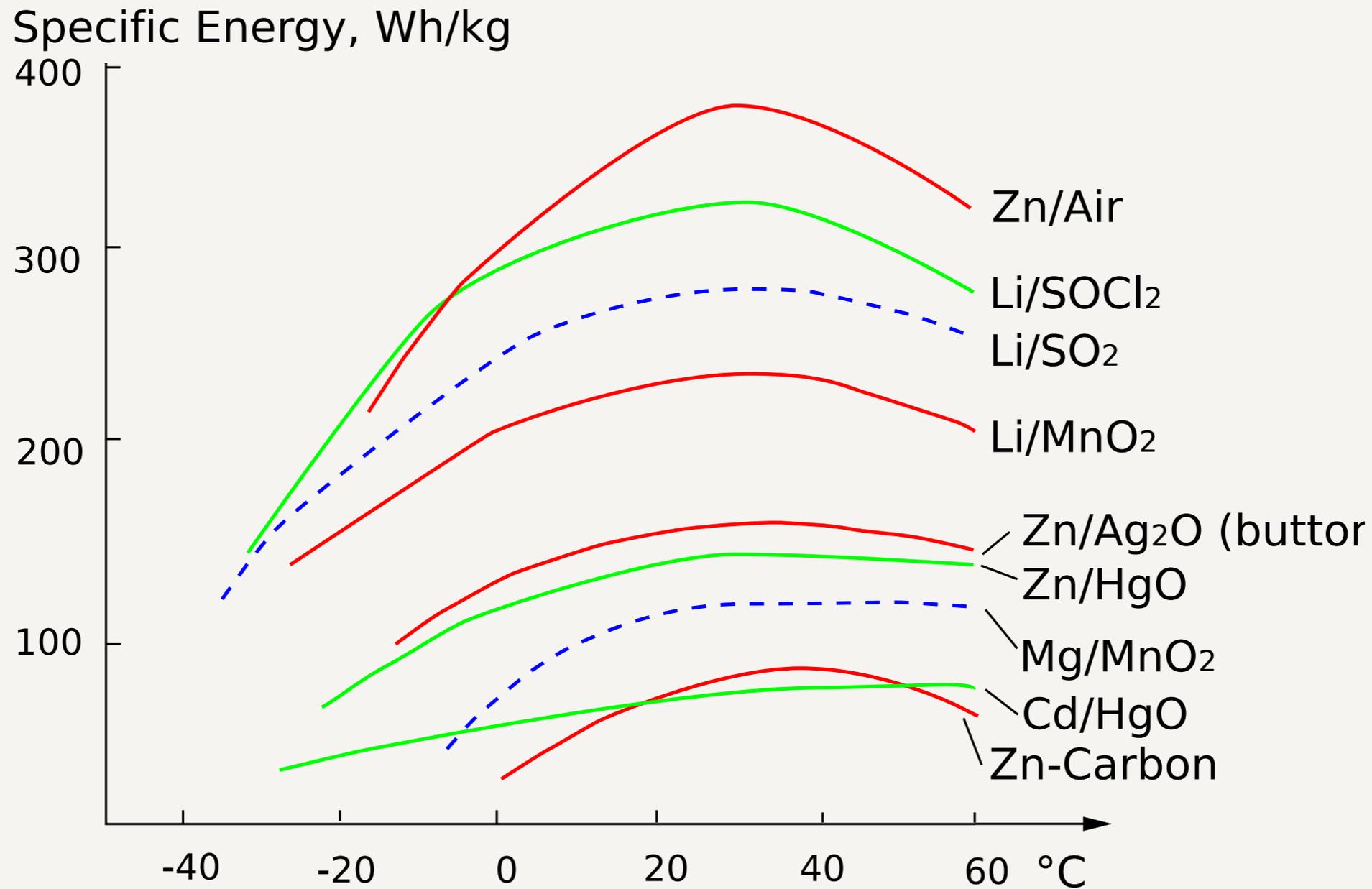
<http://de.wikipedia.org/wiki/Energiedichte>



$$Q \approx 50 \text{ kWh}$$
$$w = 50 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad w = 0.05 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

Kapazität und Speicherdichte

Speicherdichte bei Batterien



https://de.wikipedia.org/wiki/Batterie_%28Elektrotechnik%29

Quelle:



Aufgabe

2100 kWh im Januar Wärmebedarf

- Berechnen Sie wie groß ein Wasserspeicher mit 50 kWh/m³ für ein Einfamilienhaus sein muss um den Energiebedarf im Winter zu decken.
- Holz hat eine Speicherdichte von ca. 4 kWh/kg. Wie viel Holz bräuchten Sie?

ca. 480 kg / Raummeter für Holz

ca. 10 - 15 kWh Stromverbrauch / Tag
oder 4000 kWh / Jahr

Li-Ionen ca. 150 Wh / kg
Blei ca. 30 Wh / kg

- Wie groß muss eine Batterie für ein Einfamilienhaus sein um ca. 2 Wochen Stromverbrauch zu speichern?
- (Mitteln Sie über das ganze Jahr)

Leistung

Wärme

- Wie schnell kann der Speicher be- und entladen werden?
- Wärmetauscher
- Wärmeleitfähigkeit
- Typischerweise ist die Wärmeleistung keine Kenngröße für die Praxis.
Beispiel: Solarthermiekraftwerk mit Wärmespeicher produziert Strom der mit elektrischer Leistung quantifiziert wird.

Strom

- Beladung: Wie schnell kann der Speicher beladen werden?
Beispiel: Elektrische Autos „tanken“.
- Entladung: Welche Leistung steht elektrisch zur Verfügung?
Batterien mit mW bis Netzstabilisation mit MW.

Zeitskala

Wärme

- Die betrachtete Zeitskala hängt maßgeblich vom Einsatz ab.
- Hier nur einige Beispiele.

- Sonnenhaus: Wärme vom Sommer in den Winter tragen.
- Solarkraftwerk: Arbeitszeit des Kraftwerks in die Nacht hinein verlängern.

Strom

- Netzstabilisierung:
 - ▶ Kurzzeit: Sekunden - Minuten
 - ▶ Mittelfristig: Minuten - Stunden
 - ▶ Langzeit: einige Tage

Wirkungsgrad

- Verhältnis von eingespeicherter zu entnommener Energie eines Ladezyklus.
- Q kann Wärme oder elektrische Ladung sein.
- Beispiel Akkumulator: Li-Ionen-Akkus ca. 90% Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{Q_{\text{raus}}}{Q_{\text{rein}}}$$

Temperaturbereich

- Mit Temperaturbereich sind zwei Szenarien gemeint:
 1. Wärmespeicher: die Temperatur die dem Speicher entnommen werden kann.
 2. Der Temperaturbereich in dem der Speicher arbeitsfähig ist.
- Chemische Reaktionen erfordern oft hohe Temperaturen.
- Turbinen zur Stromerzeugung erfordern hohe Temperaturen
- Hohe Temperaturen bedeuten meist hohe Temperaturdifferenzen zur Umgebungstemperatur und damit hohe Verluste.
- Insgesamt hat jedes System eigene Anforderungen an den Temperaturbereich, und ist dadurch entsprechend im Einsatz begrenzt.

Anzahl Ladezyklen

- Einige Speicher können beliebig oft be- und entladen werden (Pumpspeicherwerk).
- Andere verbrauchen sich oder degradieren in der Funktion.
- Die Anzahl Ladezyklen ist ein wichtiges Kriterium für die Gesamtkosten (Betriebsdauer).

Verluste

- Akkumulatoren verlieren langsam ihre Ladung.
- Wärmespeicher verlieren Wärme in die Umgebung.
- Bei Wärmespeichern gilt: je höher die Differenz von Arbeits- zu Umgebungstemperatur, desto höher die Verluste.
- Es gibt Speicher die fast verlustfrei arbeiten können.

Kosten

- Interessante Kosten sind:
 - ▶ € / kWh Kapazität
- Diese teilen sich auf in Kosten für
 - ▶ Material
 - ▶ Produktion
 - ▶ Installation
 - ▶ Betrieb und Wartung
- Zur Vergleichbarkeit von Stromgestehungskosten wurde die *Levelized Cost of Electricity (LCOE)* eingeführt. Dort werden auch Kapitalkosten und Zinseffekte berücksichtigt.

Eigenschaften von Speichern

| Eigenschaft | Kurzbeschreibung |
|-------------------|---|
| Kapazität | Energiegehalt |
| Speicherdichte | Energie pro Volumen oder Masse |
| Leistung | Energie pro Zeit Be- und Entladungsrate |
| Zeitskala | Kurzfristig oder saisonale Speicher |
| Wirkungsgrad | Verhältnis eingespeicherter zu entnommener Energie |
| Temperaturbereich | Arbeitsbereich Maximale verfügbare Temperatur |
| Anzahl Ladezyklen | Wie häufig kann der Speicher be- und entladen werden? |
| Verluste | Selbstentladung (Wärme oder Strom) |
| Kosten | Material-, Produktions- und Betriebskosten €/kWh, LCOE |

Verlauf des täglichen Warmwasserbedarfs

- Der Trinkwasserwärmebedarf wird bei manchen Verfahren pauschal mit $12,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ angesetzt. Dies entspricht einem Bedarf von 23 l pro Person und Tag.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Warmwasserw%C3%A4rmebedarf>

Literatur

1. Stieglitz, Heinzel: Thermische Solarenergie, Springer (2008)
2. U. Sauer et al: Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, SEFEP (2012). Übersetzung der englischen Originalversion. Siehe www.sefep.eu.
3. Weigand, Köhler, v. Wolfersdorf: Thermodynamik kompakt, Springer-Vieweg (2013)