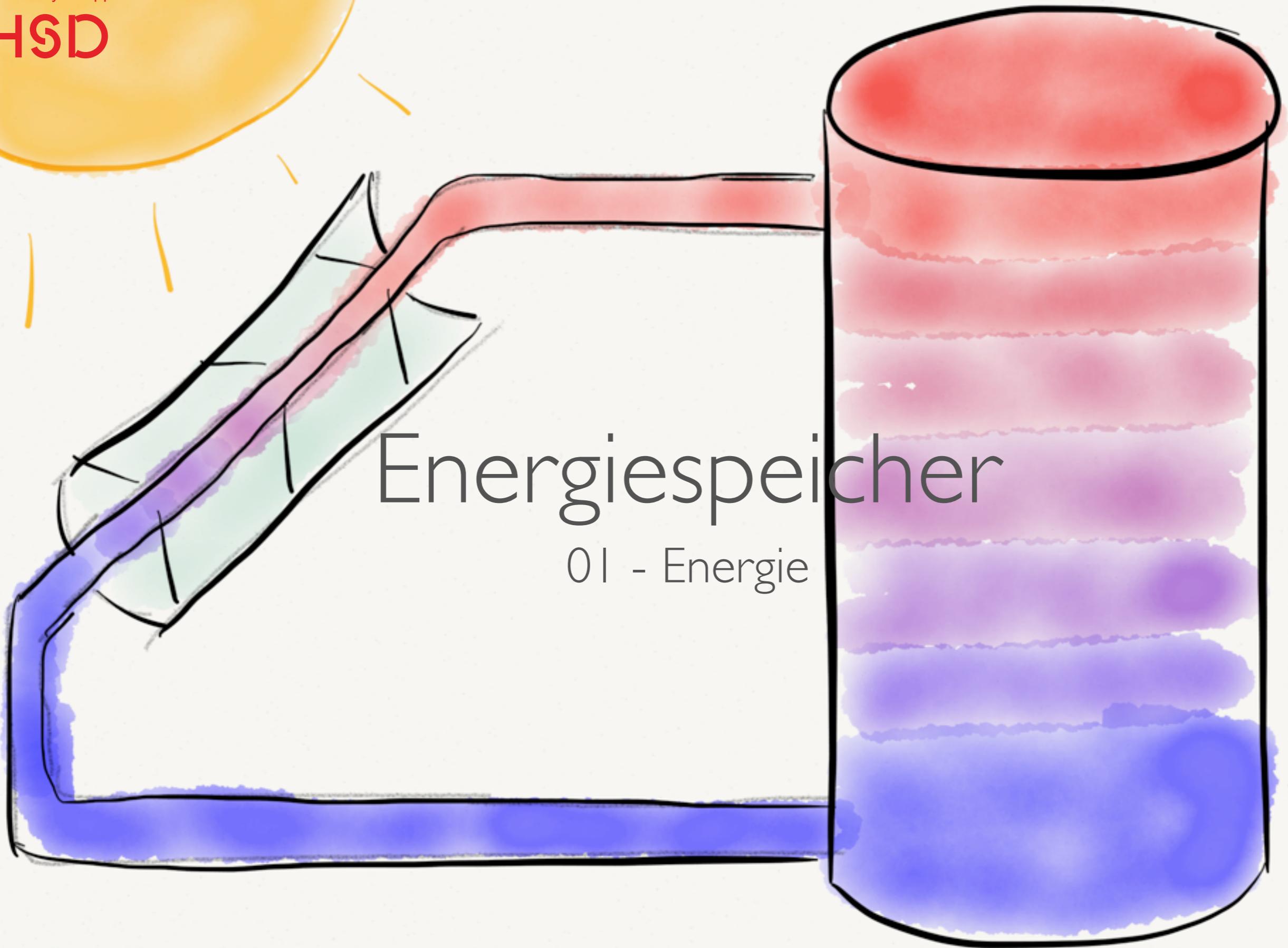


Energiespeicher

01 - Energie

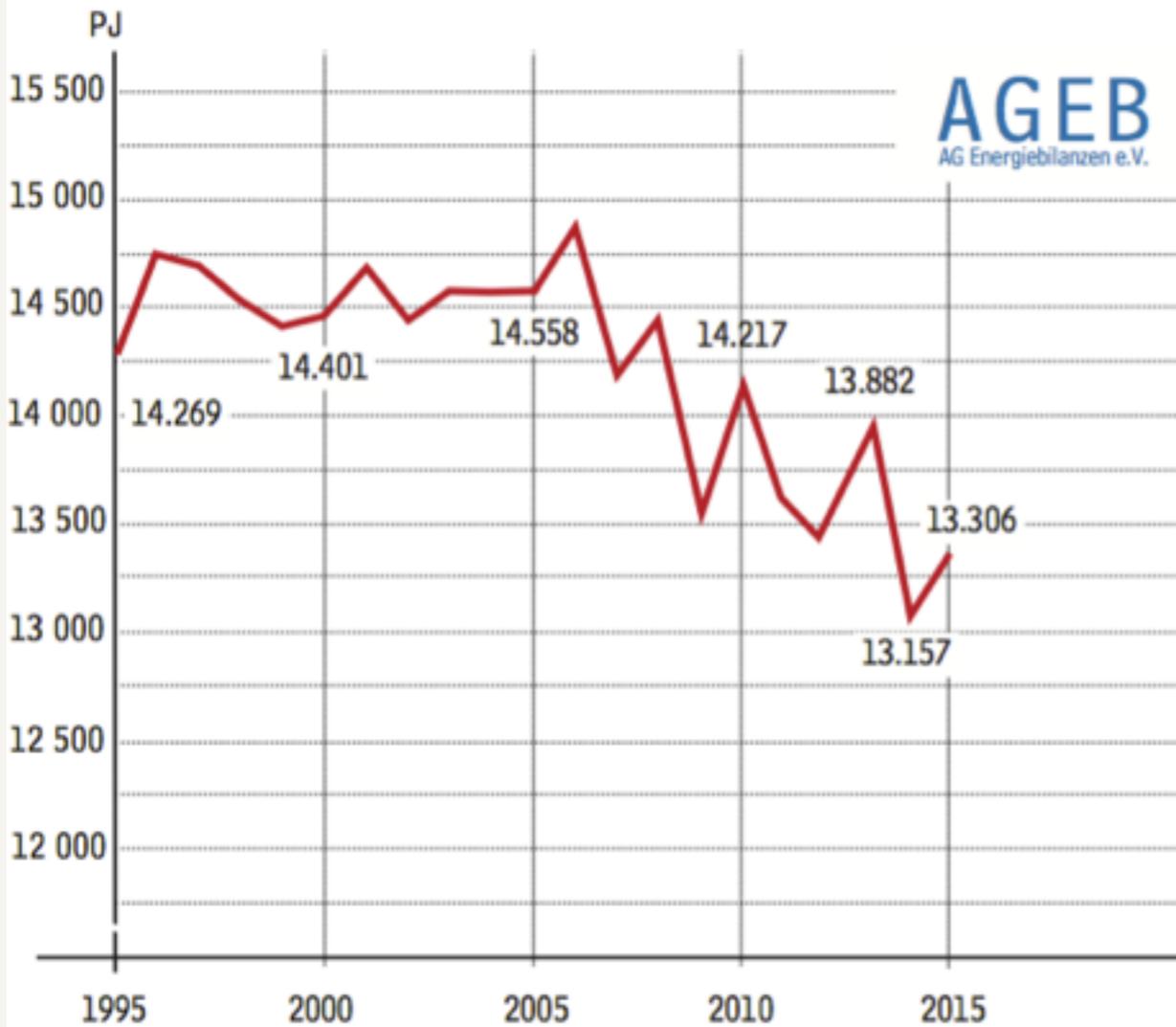


Energieverbrauch

Gesamtenergiefluss in Deutschland

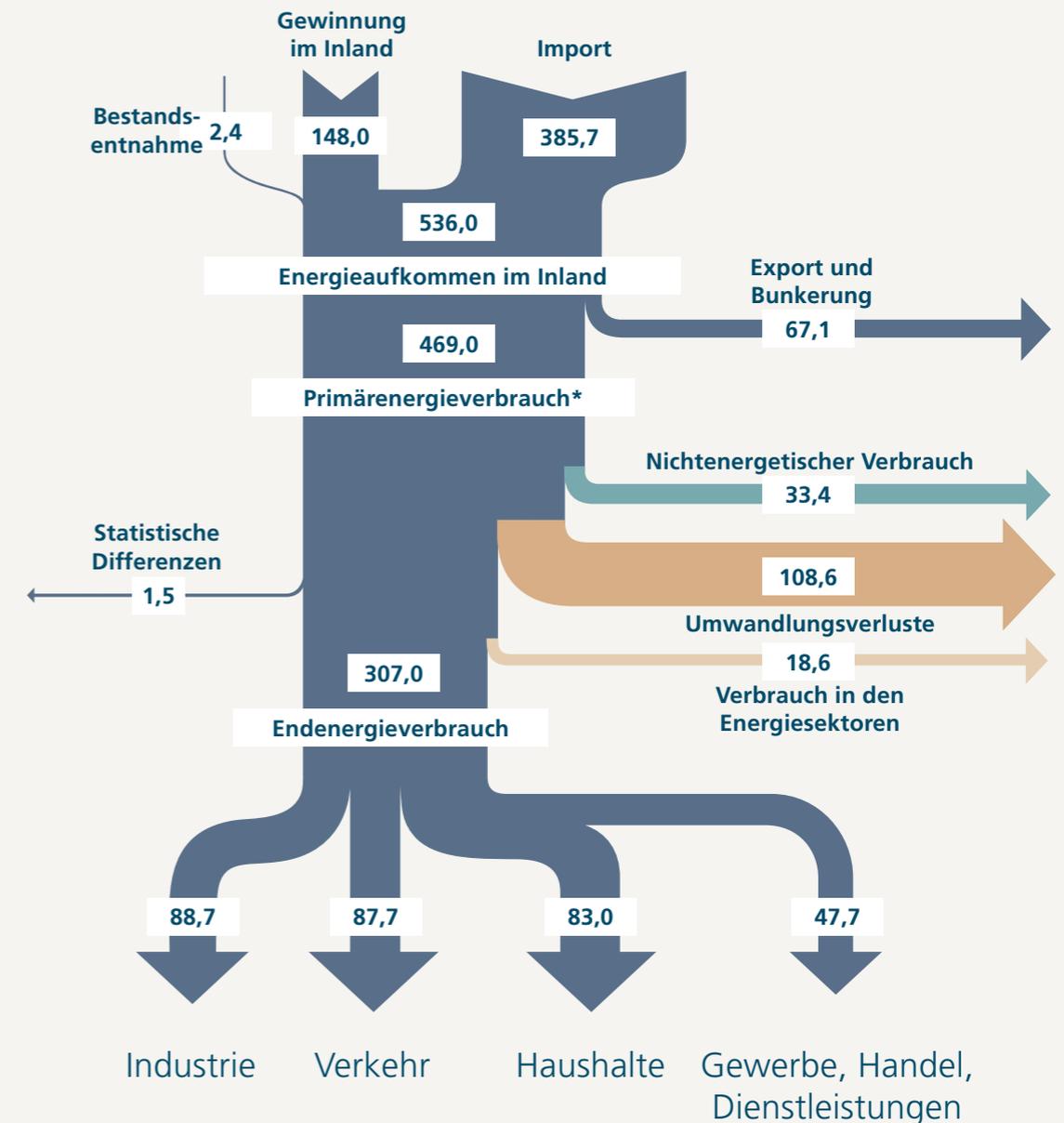
Entwicklung des Primärenergieverbrauchs
in Deutschland 1995 - 2015

in Petajoule (PJ)



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

Energieflussbild 2012
für die Bundesrepublik Deutschland
in Mio. t SKE

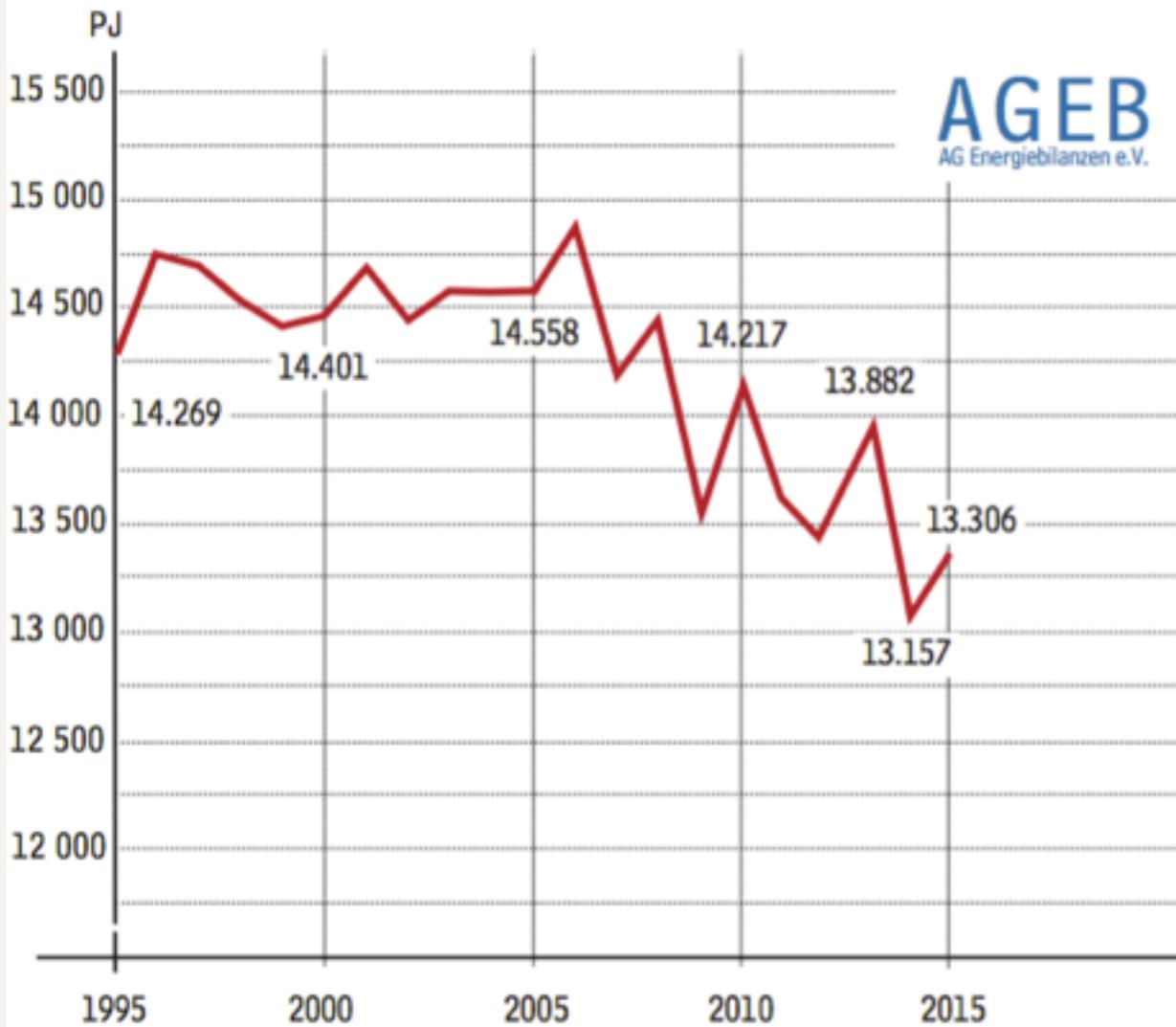


Quelle: <http://www.ag-energiebilanzen.de>

Gesamtenergiefluss in Deutschland

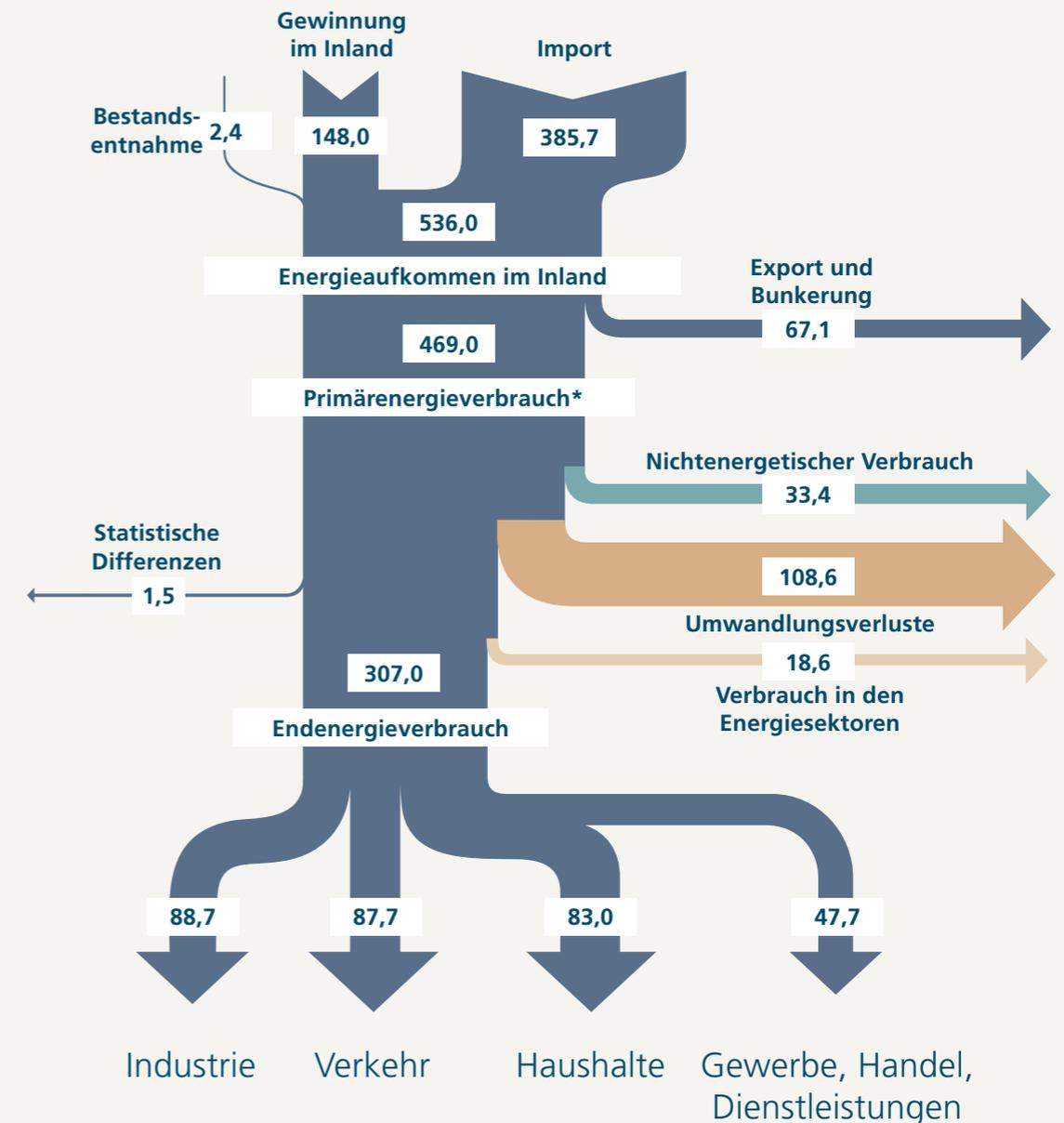
Entwicklung des Primärenergieverbrauchs
in Deutschland 1995 - 2015

in Petajoule (PJ)



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

Energieflussbild 2012
für die Bundesrepublik Deutschland
in Mio. t SKE



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

Aufgabe

- Rechnen Sie kWh in J um.
- Rechnen Sie den Primärenergiebedarf für Deutschland 2013 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

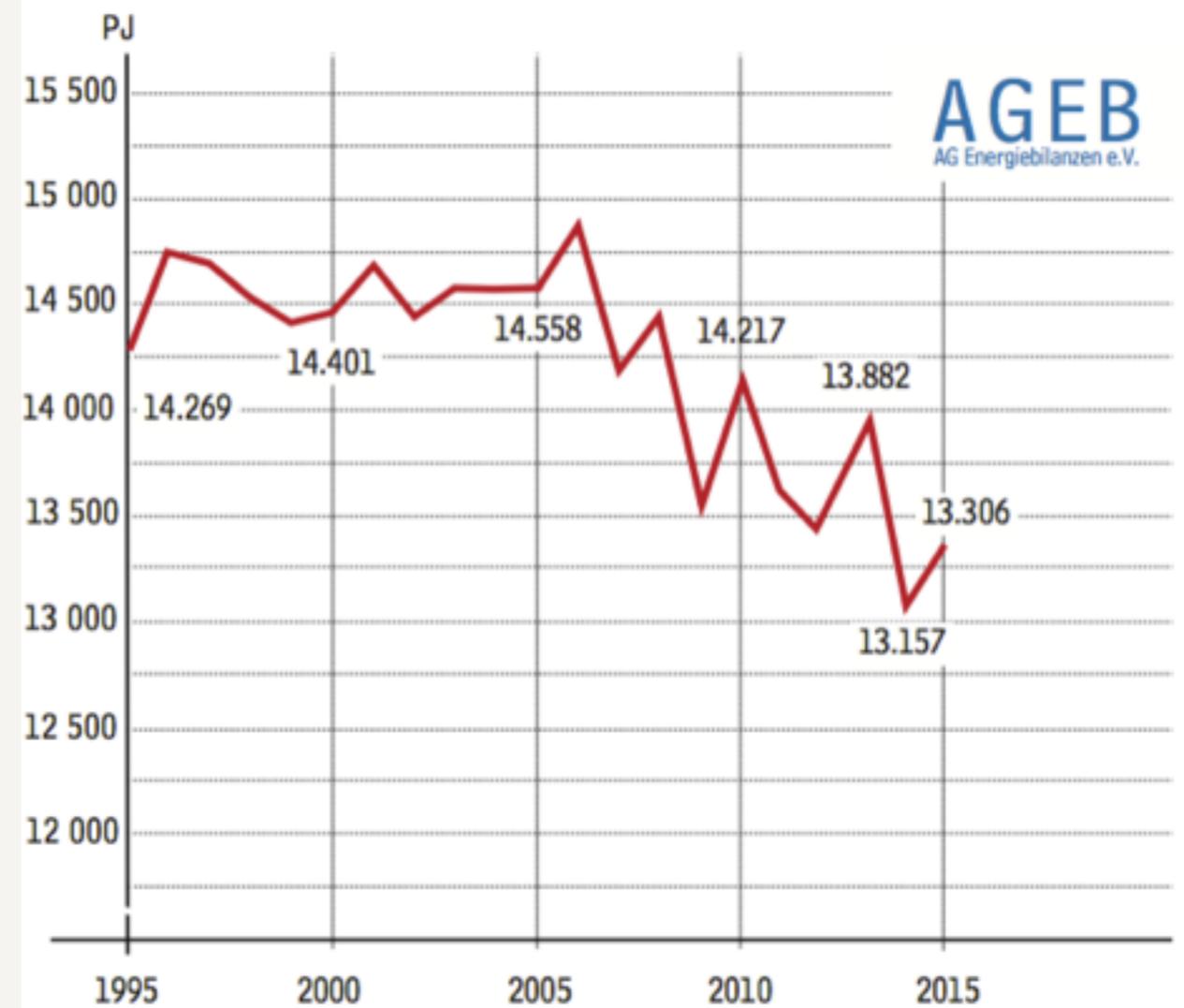
$$\mathbf{E} = \mathbf{J}$$

- kWh Hausanlage
- MWh Industrieanlage
- GWh Großes Kraftwerk

Aufgabe

- Welche Leistung müssen Sie durchgehend zur Verfügung stellen um den Primärenergieverbrauch 2013 in Deutschland zu bedienen?

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs
in Deutschland 1995 - 2015
in Petajoule (PJ)



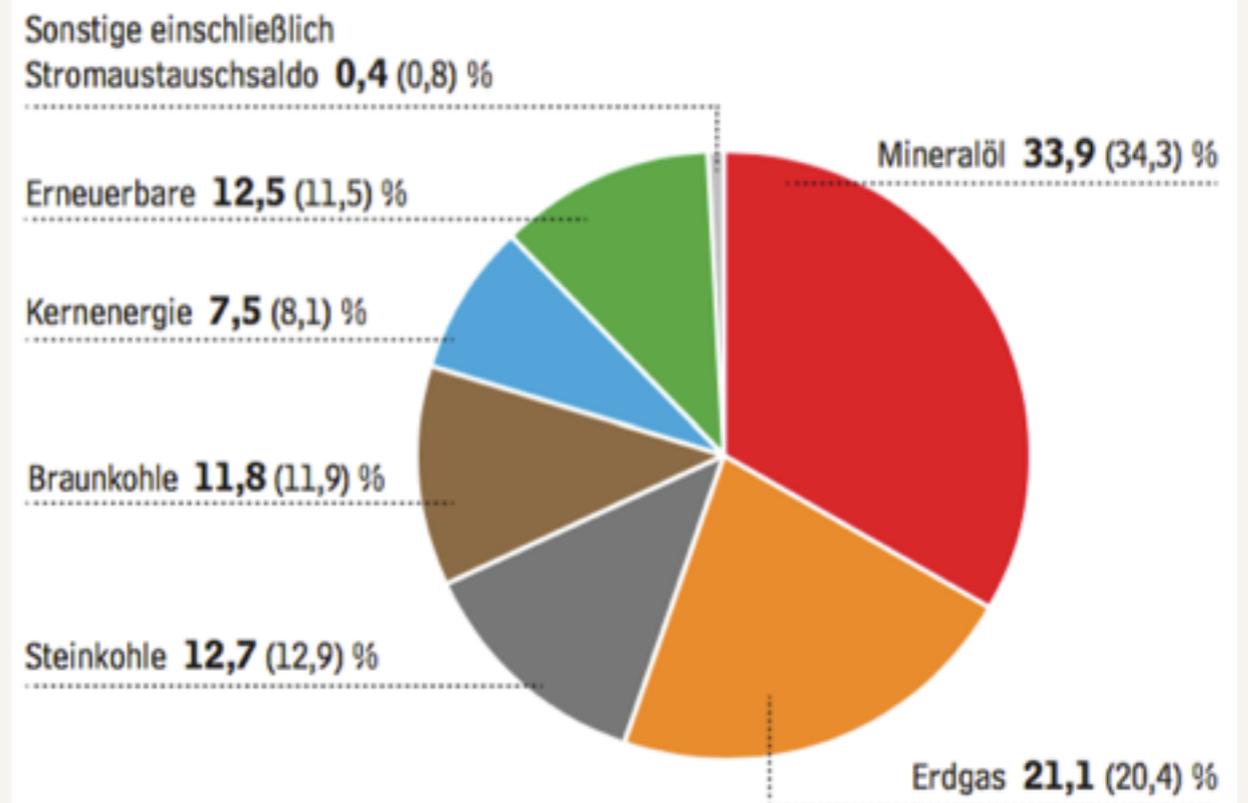
Energiemix

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

Ausgewogener Energiemix

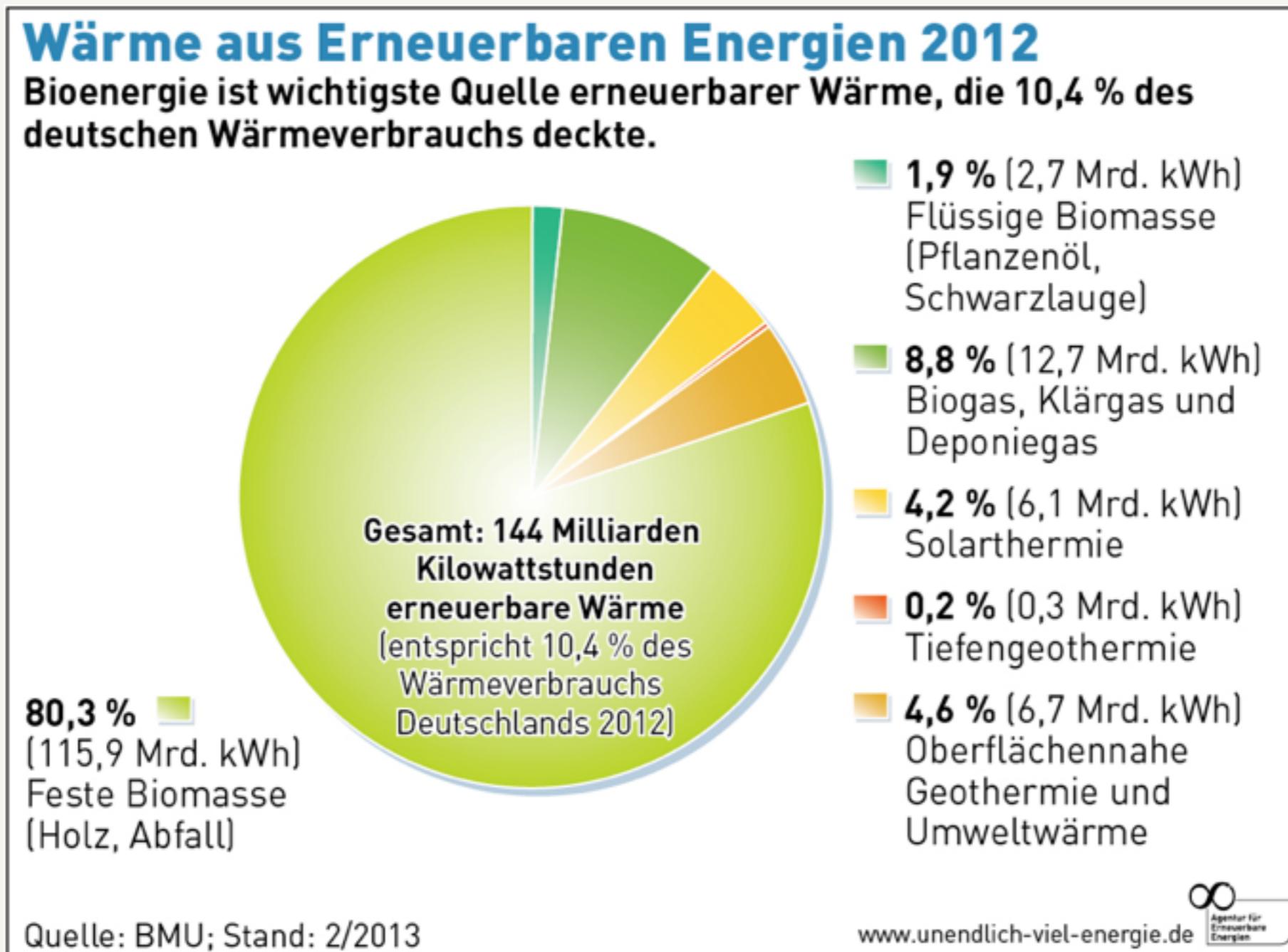
Anteile der Energieträger am Primärenergieverbrauch in Deutschland
2015 - gesamt 13.306 PJ oder 454 Mio. t SKE
Anteile in Prozent (Vorjahreszeitraum in Klammern)

AGEB
AG Energiebilanzen e.V.



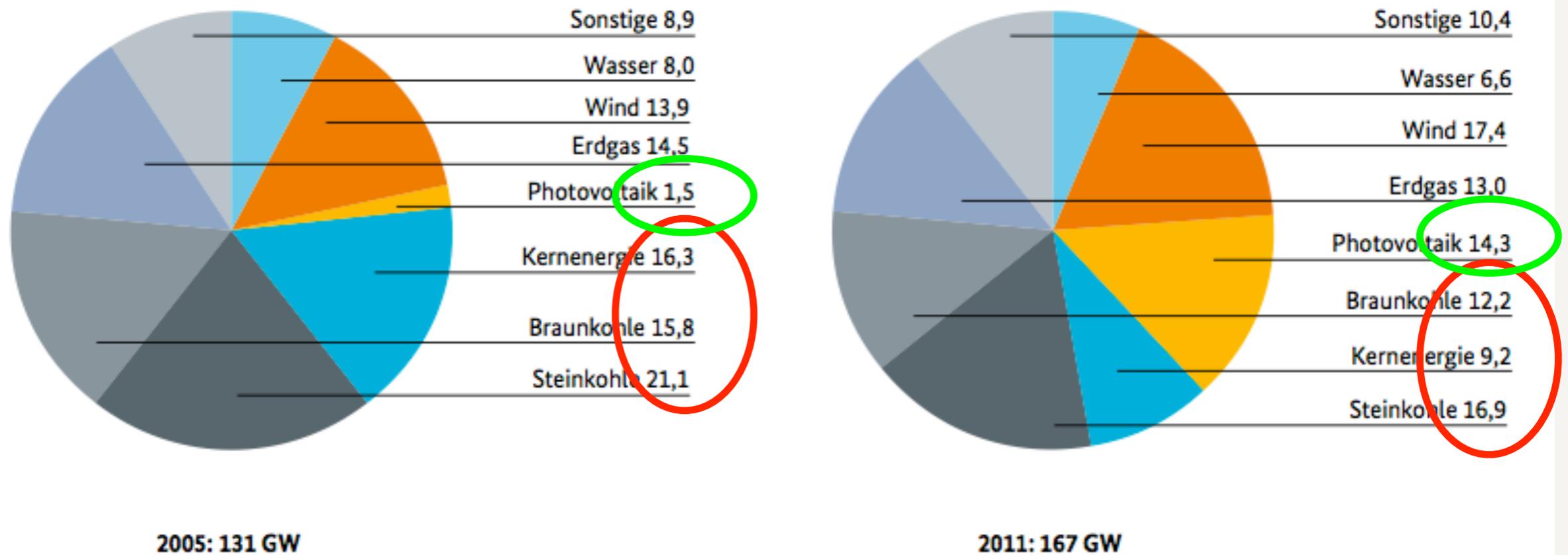
Quelle: <http://www.ag-energiebilanzen.de>

Wärme aus erneuerbaren Energien



Stromerzeugung in Deutschland

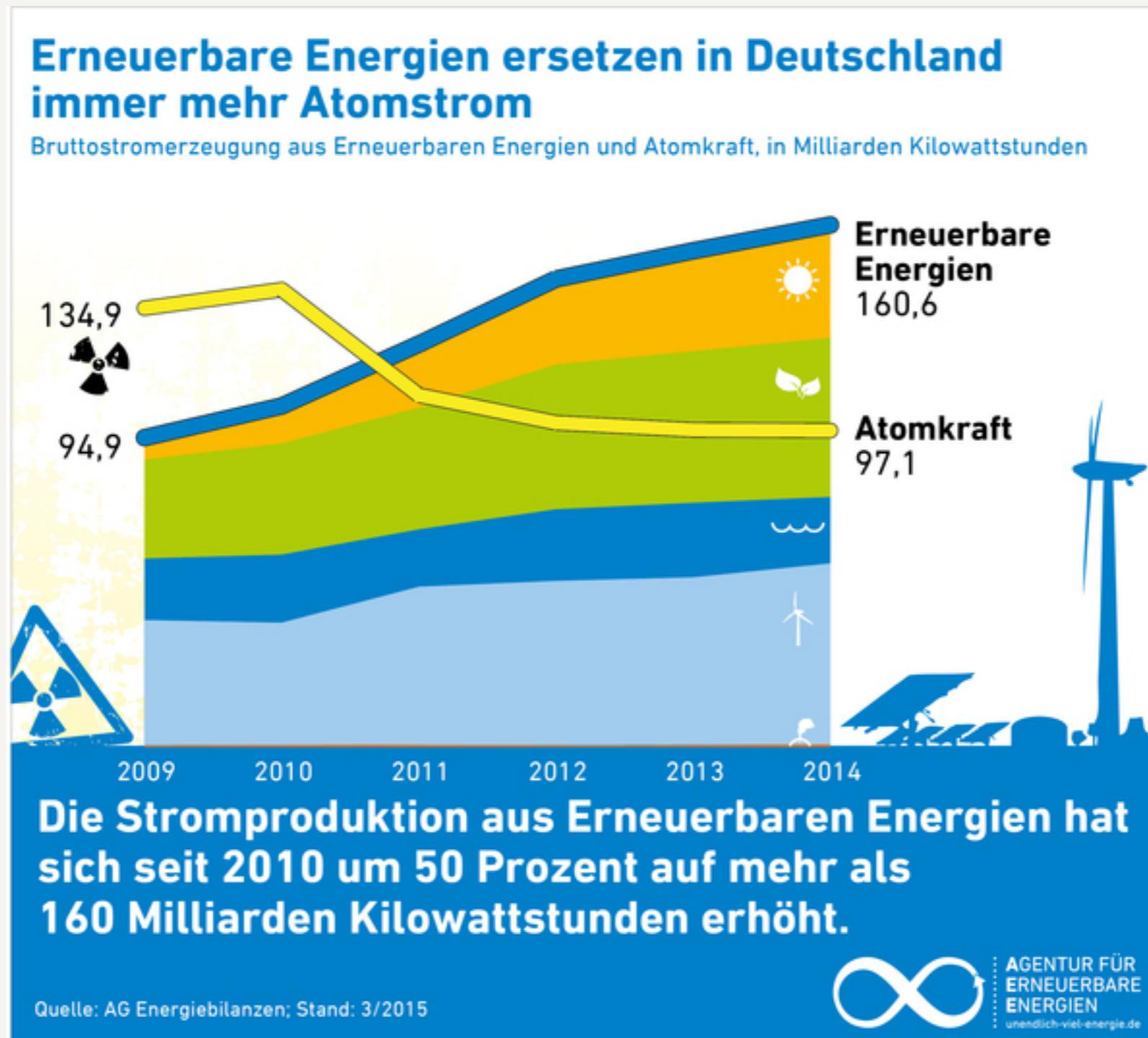
Schaubild 12: Installierte Stromerzeugungskapazitäten in Deutschland nach Energieträgern
2005 und 2011, in GW, Allgemeine Versorgung, Industrie und Einspeiser



Quelle: Berechnungen EEFA nach Statistisches Bundesamt

Quelle: Energie in Deutschland

Atomausstieg



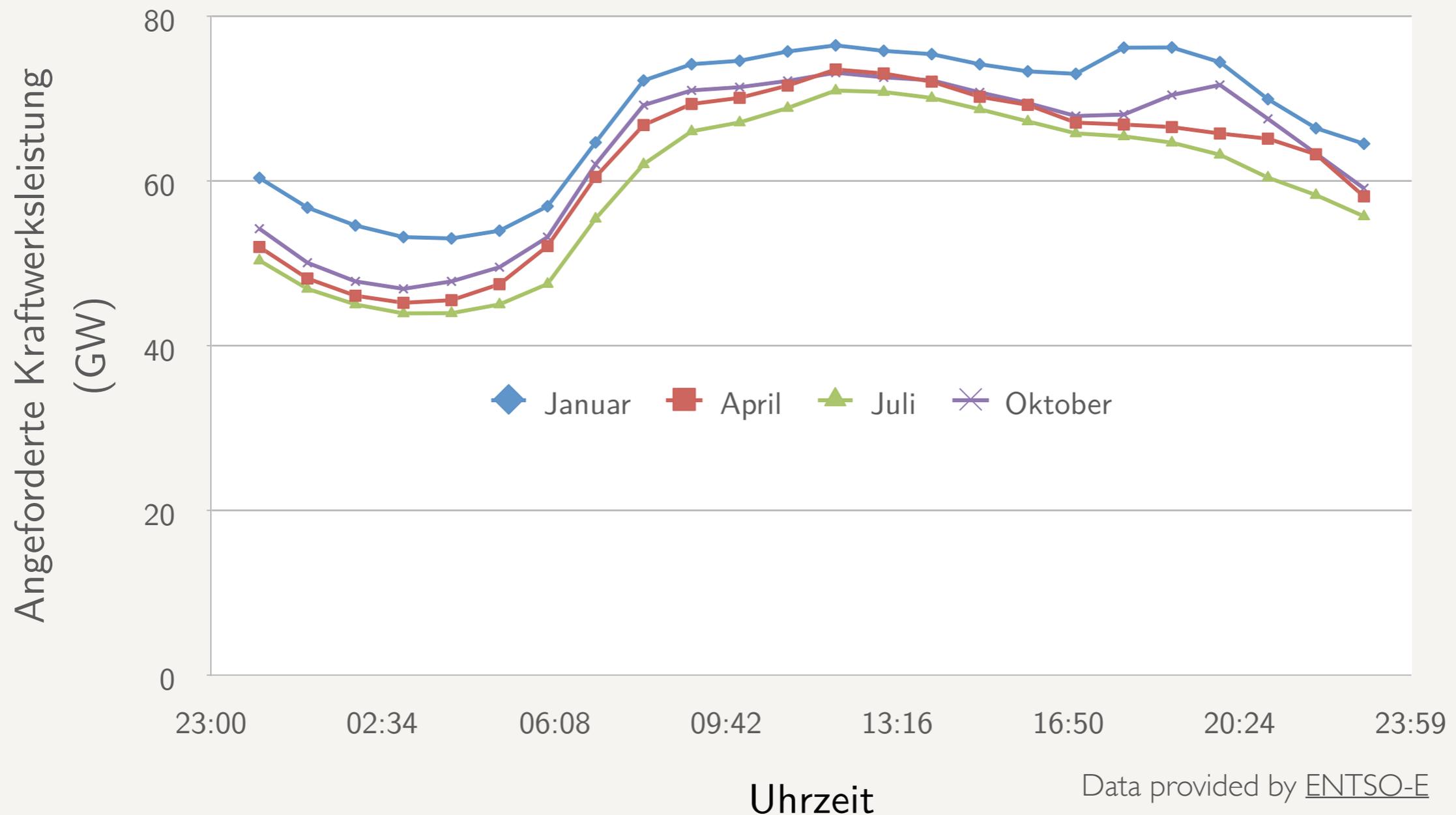
Quelle: <http://www.unendlich-viel-energie.de/erneuerbaren-energien-weltweit-zum-durchbruch-verhelfen>

Aufgabe

- Berechnen Sie wie lange die Kernkraftwerke im Jahr 2013 gelaufen sind um die gezeigte Energie zur Verfügung zu stellen.
- Berechnen Sie wie lange die PV-Anlagen im Jahr 2013 gelaufen sind um die gezeigte Energie zur Verfügung zu stellen.
- Installierte PV-Leistung nehmen Sie bitte mit **35 GW** an.

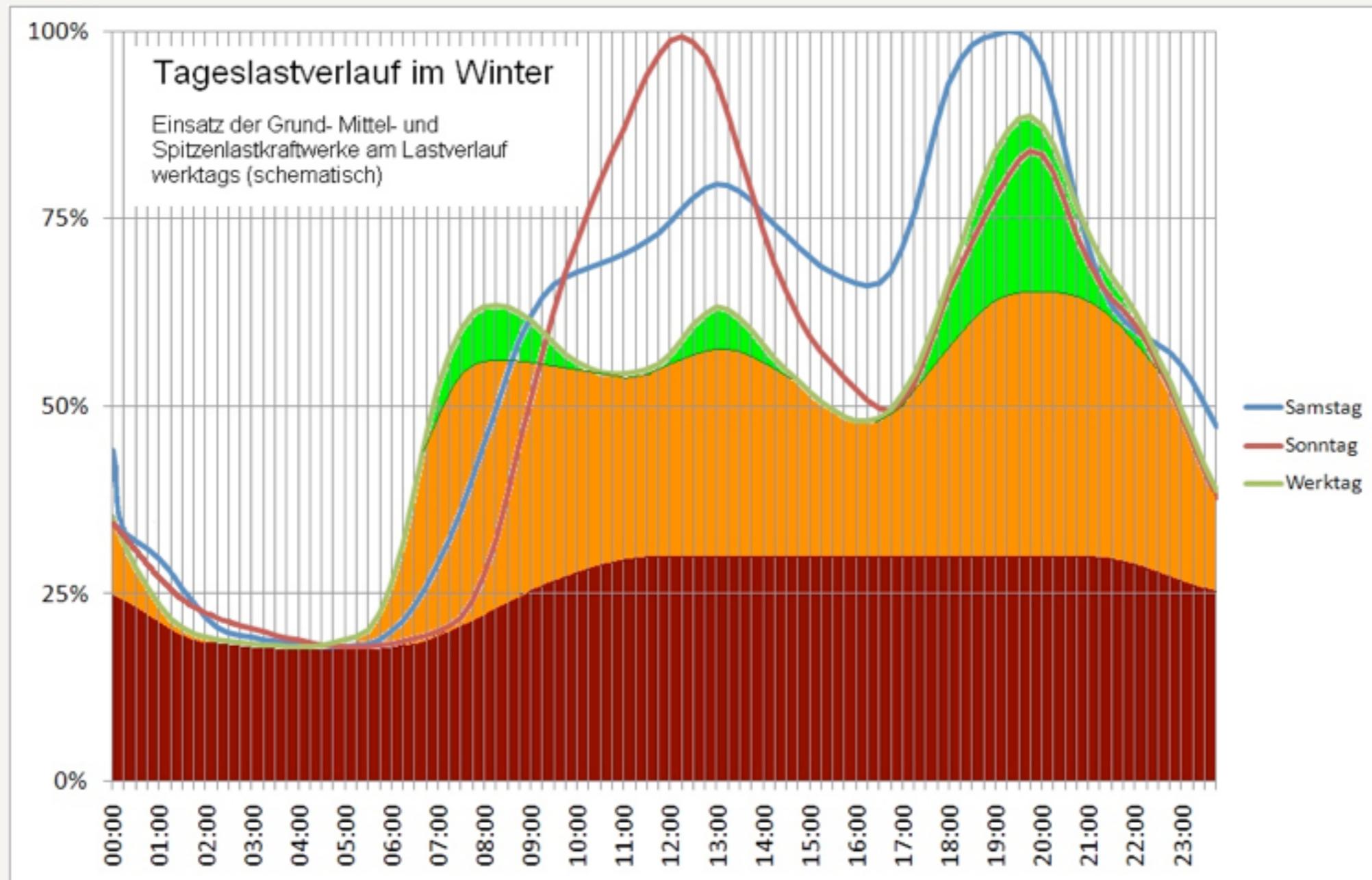
Verbrauchte Stromleistung in Deutschland im Laufe des Tages und Jahres

Angeforderte Kraftwerksleistung in ganz Deutschland im Laufe eines Tages



Data provided by [ENTSO-E](#)

Verlauf des täglichen Strombedarfs



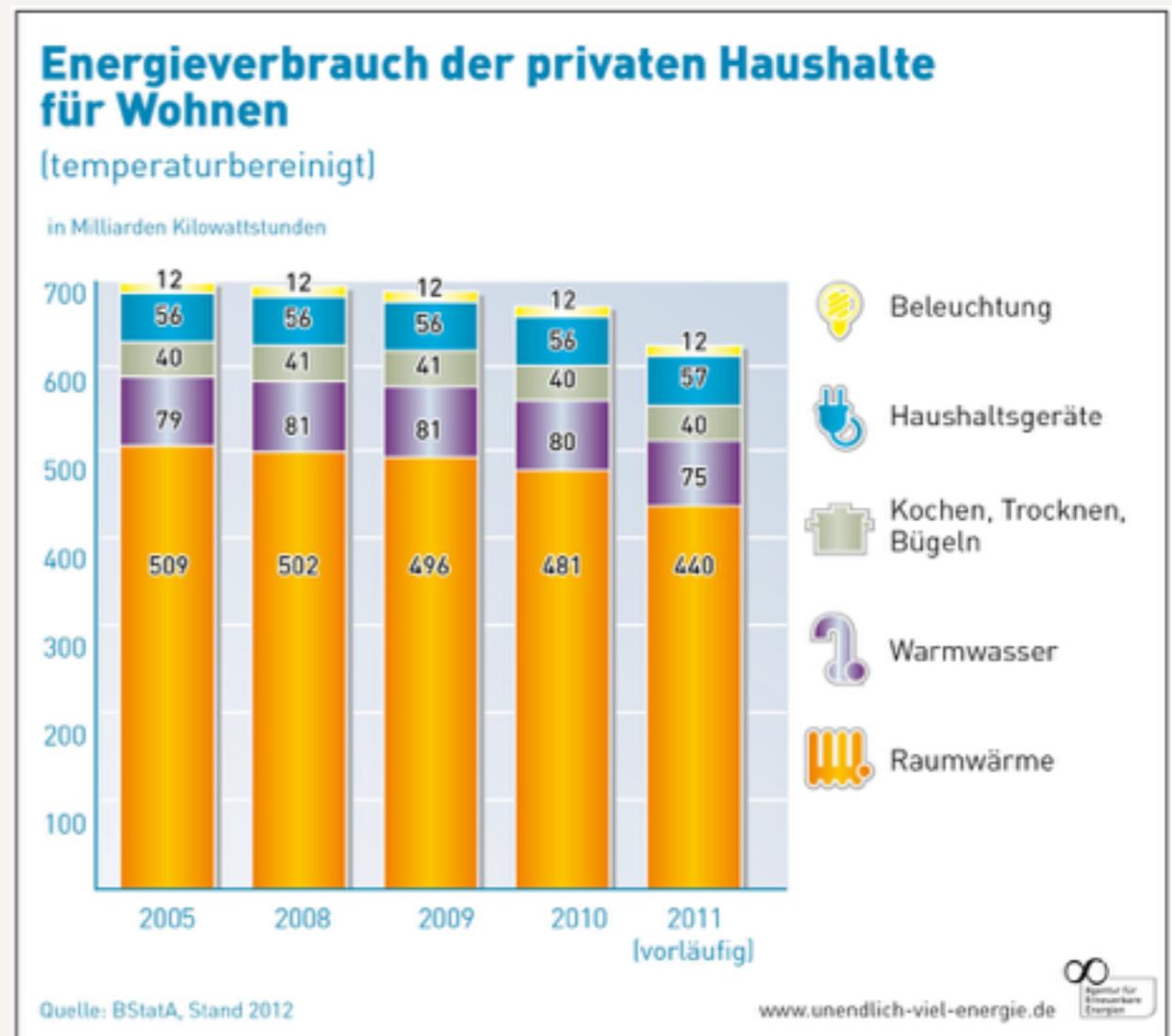
https://de.wikipedia.org/wiki/Bedarf_an_elektrischer_Energie

Quelle:



Energieverbrauch privater Haushalte

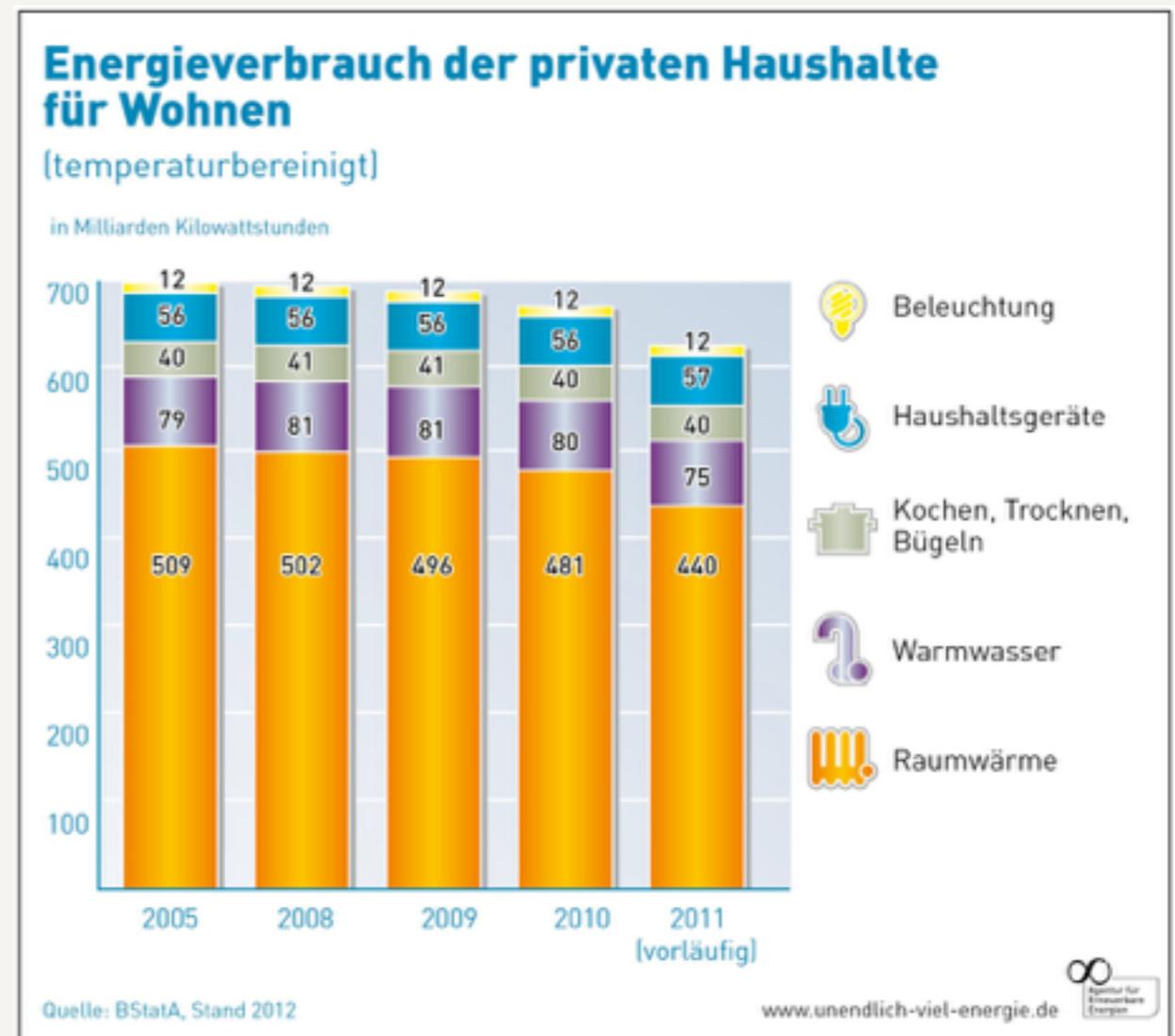
„Grund für sinkende Verbräuche von Öl und Gas sind nach Aussage der Agentur für Erneuerbare Energien neben **Dämm- und Sanierungsmaßnahmen** auch der verstärkte Einsatz energieeffizienter Heizungstechnik auf Basis **erneuerbarer Energien**“.



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

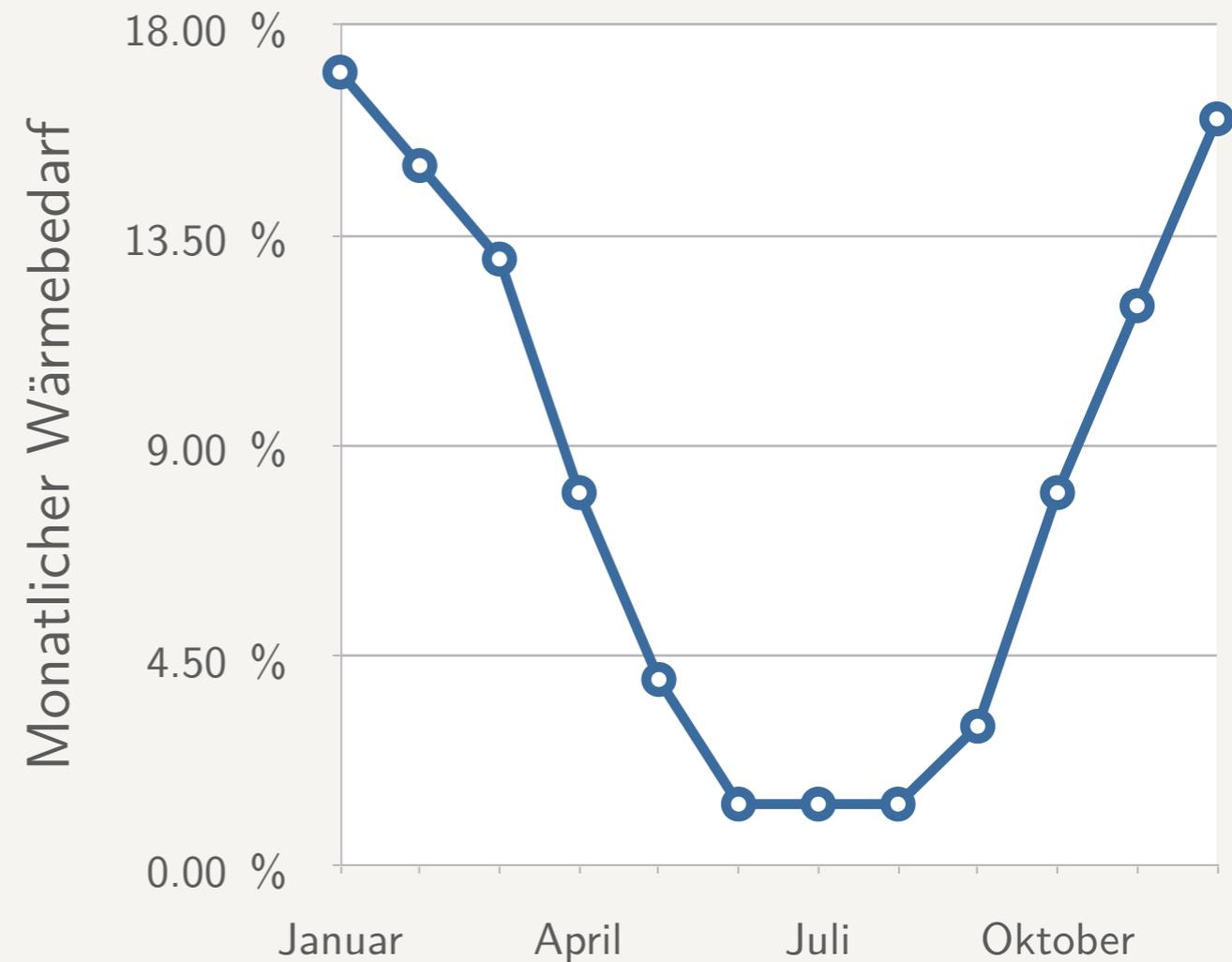
- Meine Frau und ich überlegen für den neu gekauften Kronenleuchter mit 12 Glühbirnen (Kerzenform) LED-basierte Leuchten anzuschaffen.
- Der Kronleuchter wird im Schnitt 2h am Tag brennen.
- Eine LED-Leuchte kostet €6, verbraucht 2W und hält 30.000h.
- Eine vergleichbare Halogen-Leuchte kostet €1.1, 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	€	

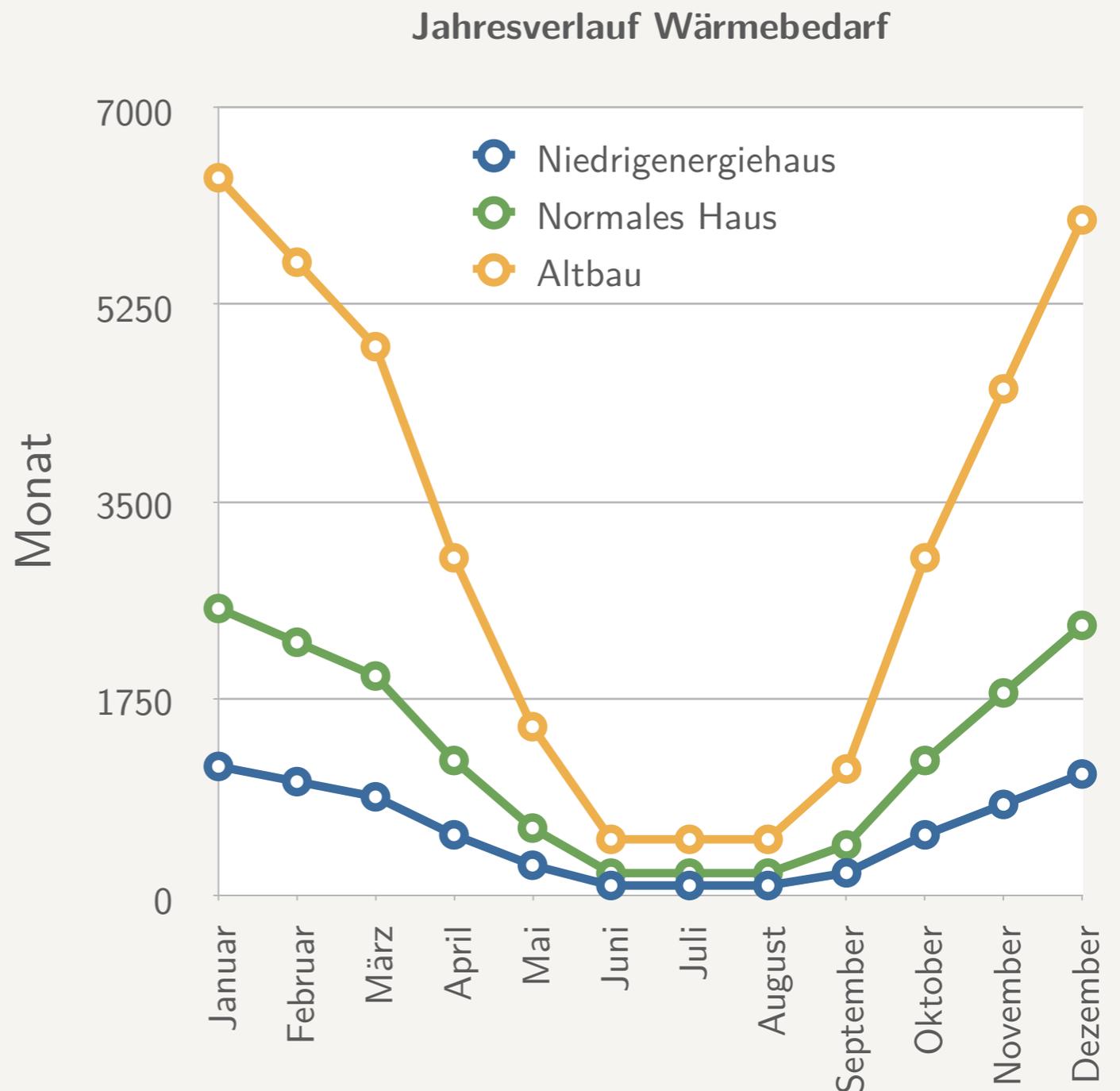
Verlauf des jährlichen Heizbedarfs im Einfamilienhaus

- **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



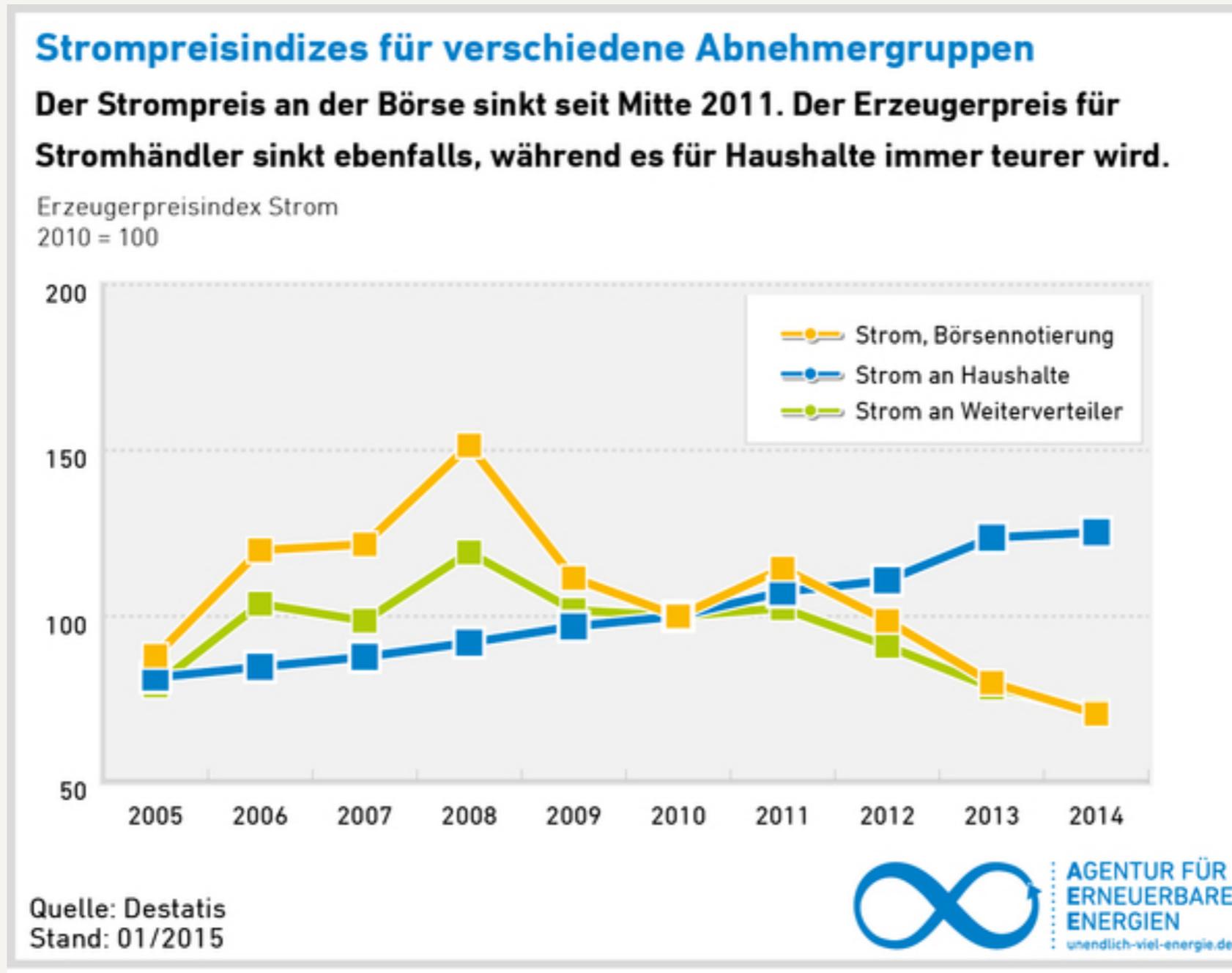
Stromverbrauch im Haushalt

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



Einführung Energie und Speicher

Energiearten

Primärenergie



- Kernenergie

- Chemische Energie



Quelle:



Physikalische Energie

- Potentielle Energie

- Kinetische Energie

- Innere Energie

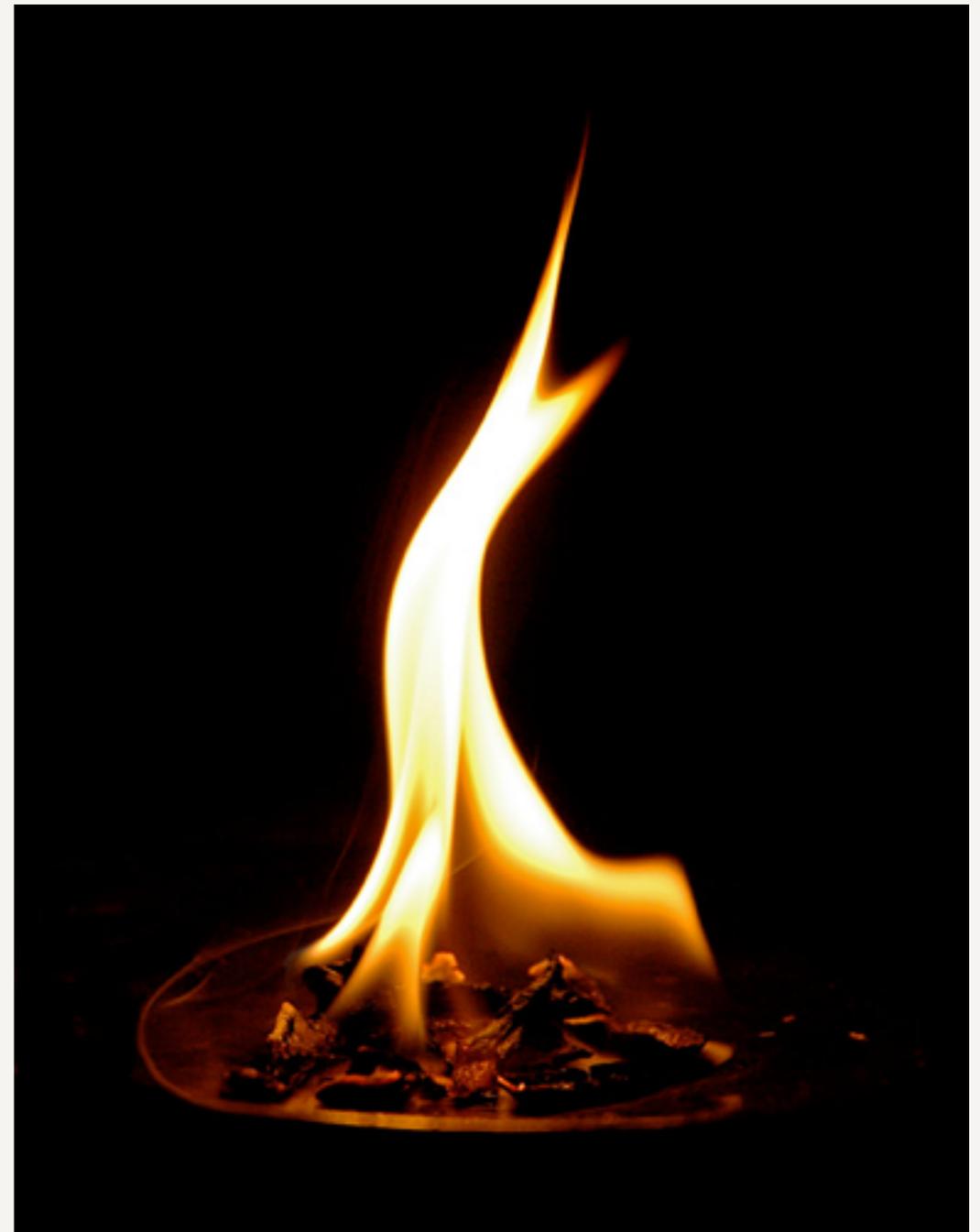
Energieformen

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)

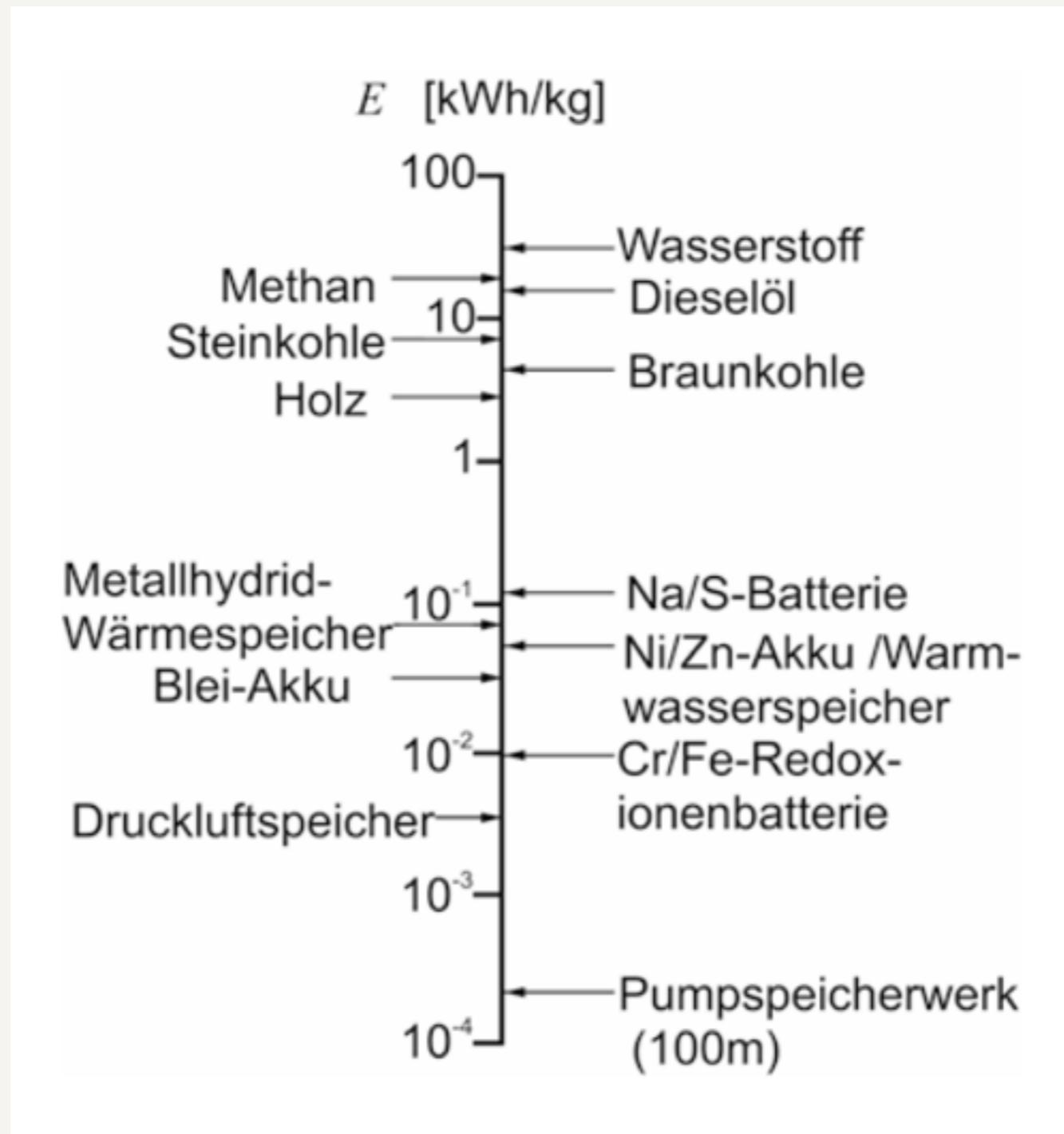


https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk_Niederwartha

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!

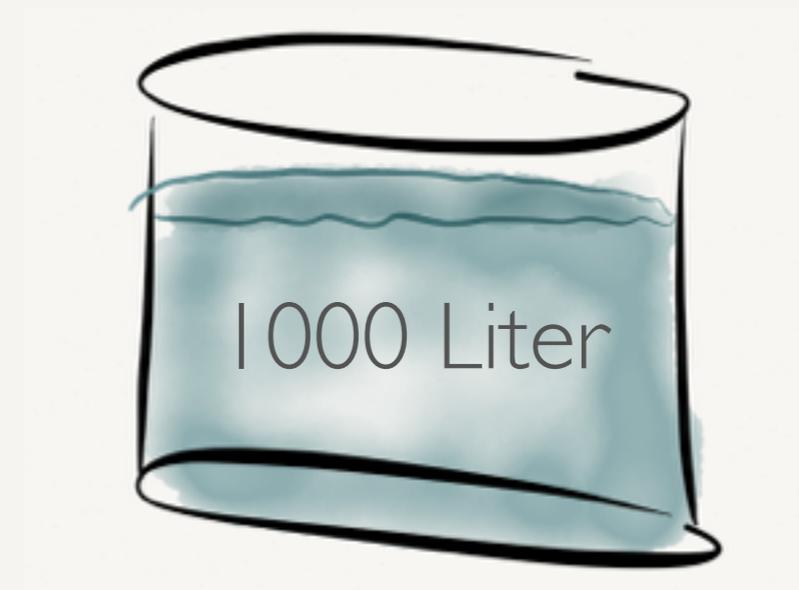
Eigenschaften von Speichern

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).

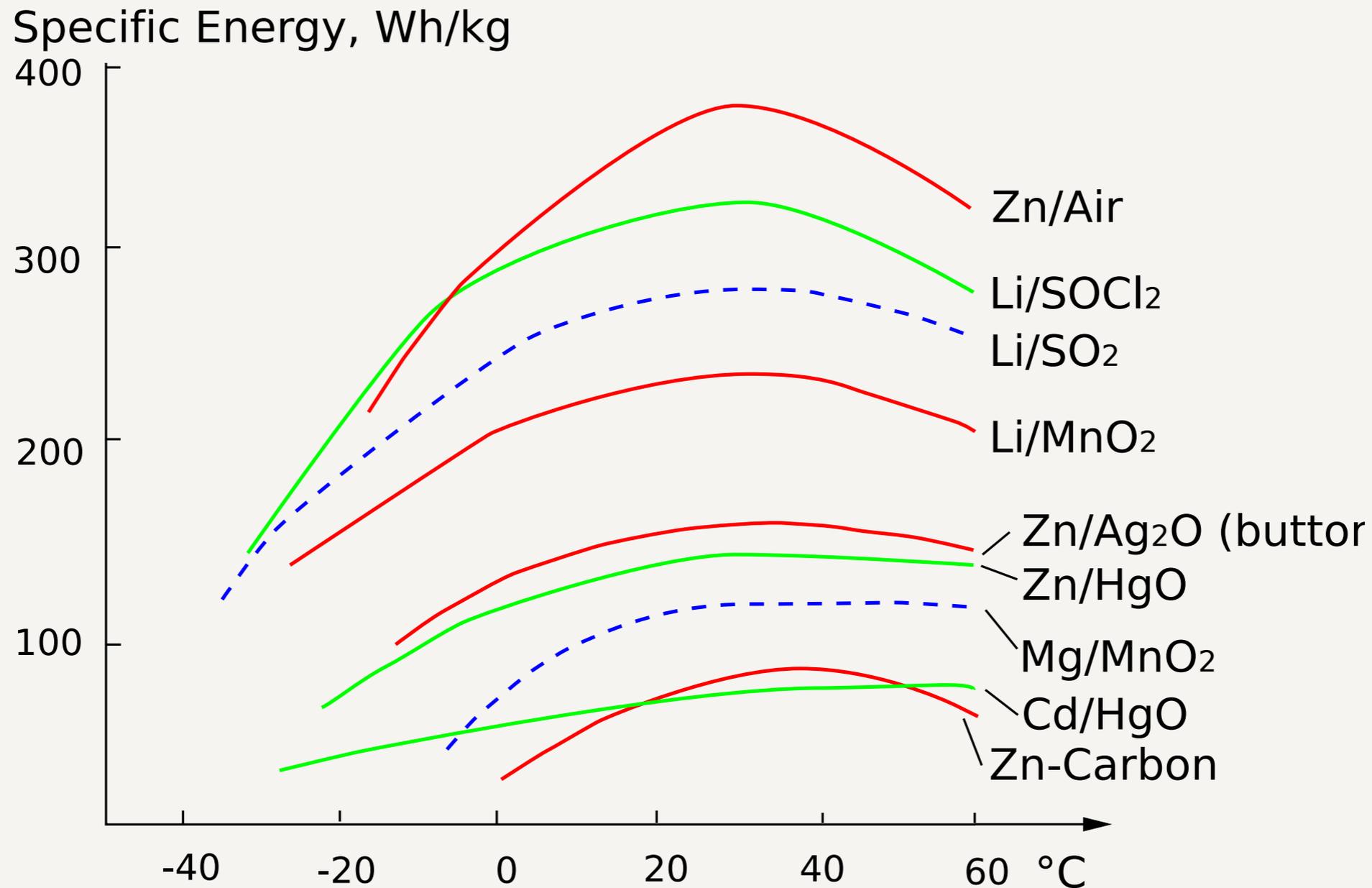
<http://de.wikipedia.org/wiki/Energiedichte>



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

Kapazität und Speicherdichte

Speicherdichte bei Batterien



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

Quelle:



Aufgabe

- Berechnen Sie wie groß ein Wasserspeicher mit 50 kWh/m^3 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?
- Wie groß muss eine Batterie für ein Einfamilienhaus sein um ca. 2 Wochen Stromverbrauch zu speichern?
- (Mitteln Sie über das ganze Jahr)
- Was kostet das?

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)