

# **Das Energiesystem der Zukunft, was sich für uns alle ändern wird**

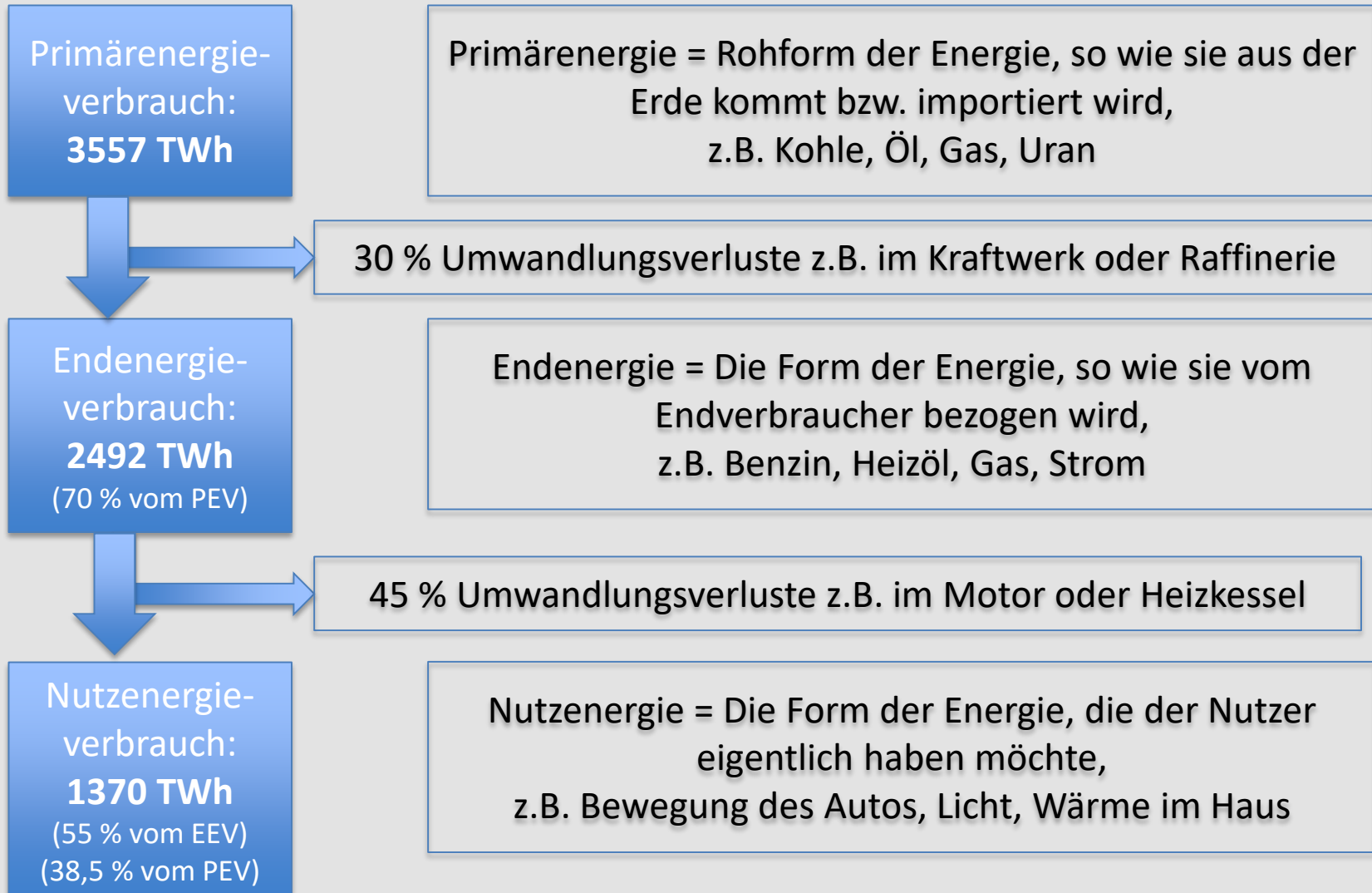
Vortrag am 29.02.2024 um 19:00  
Forum altes Rathaus Borken, FARB

Prof. Dr.-Ing. Olaf Goebel  
Hochschule Hamm-Lippstadt

# Worum geht es?

- Deutschland möchte bis 2045 „klimaneutral“ sein.
- D.h. bis dahin sollen keine fossilen Brennstoffe mehr verwendet werden.
- D.h. bis dahin sollen wir uns zu 100% mit Erneuerbaren Energien (REN) versorgen.
- 2045, das ist in 21 Jahren. Das ist so lange wie von 2003 bis heute. Das ist nicht viel Zeit!
- Wenn wir damit ernst machen, dann stehen wir vor dem größten Umbruch unserer Volkswirtschaft seit Beginn der industriellen Revolution.
- Geht das überhaupt? (Das ist das Thema dieses Vortrages)

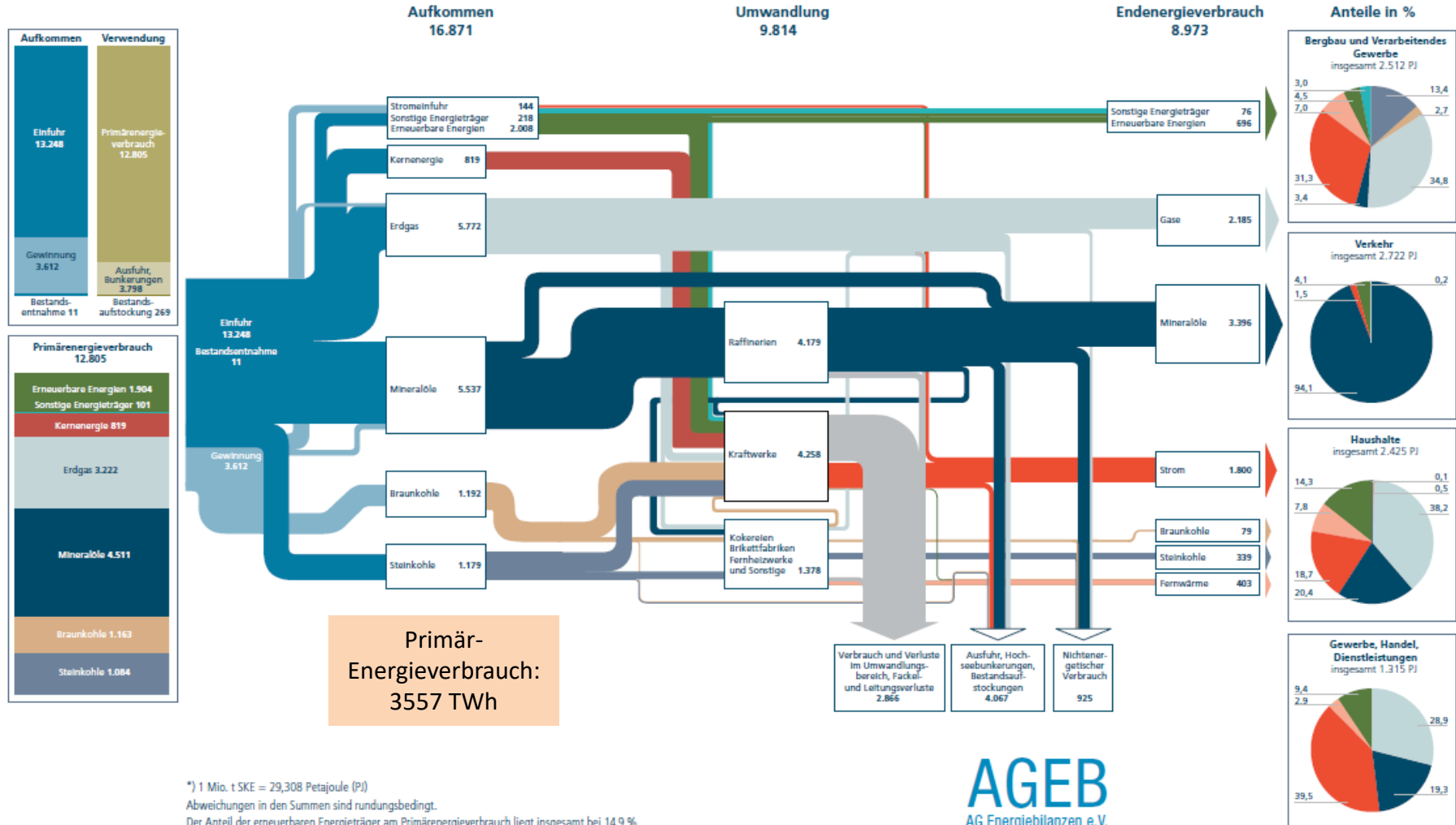
## Deutschland 2019 (Daten: AGEBA)



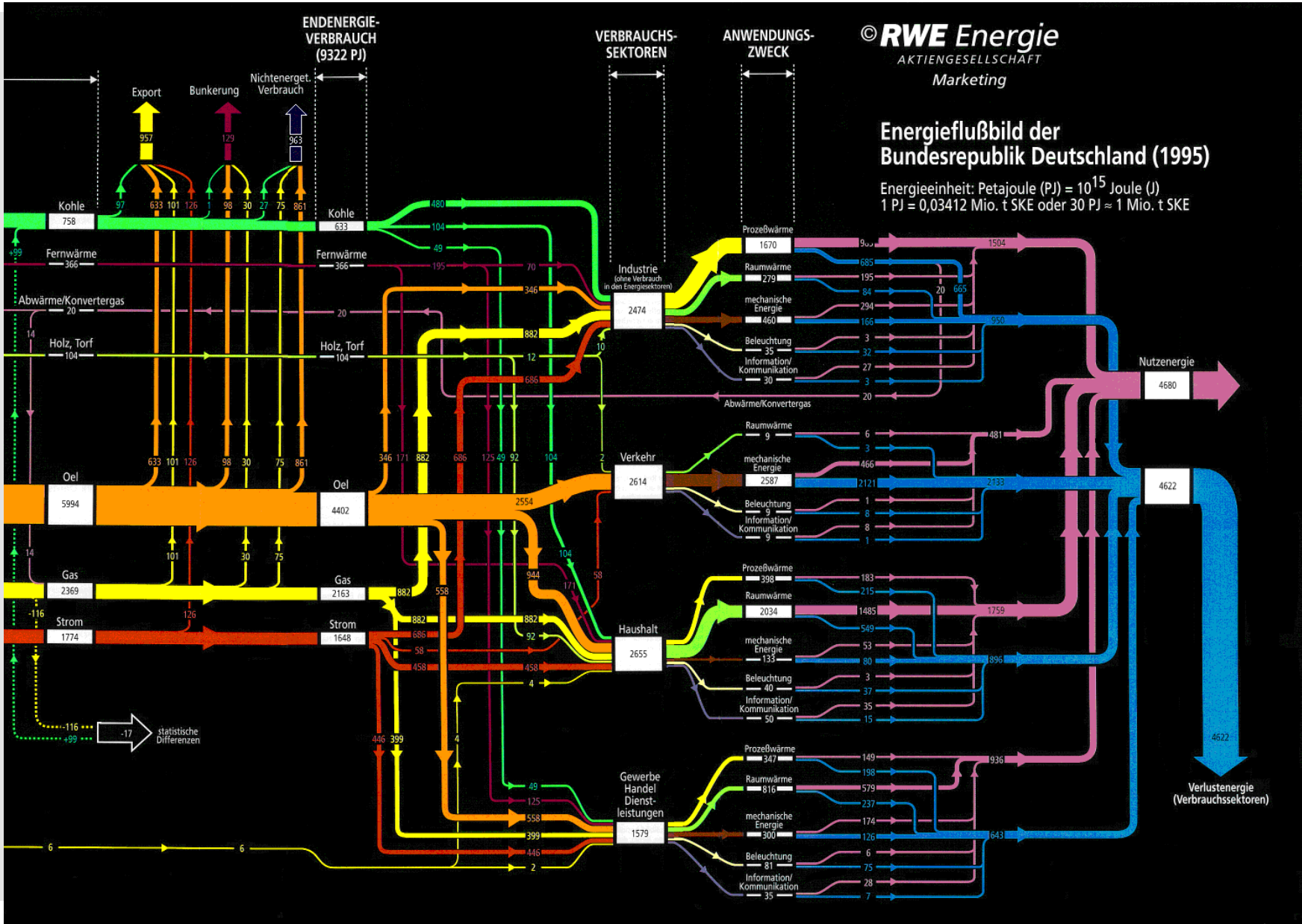
# Blick aufs gesamte Energiesystem

Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland 2019  
Energieeinheit Petajoule (PJ)\*

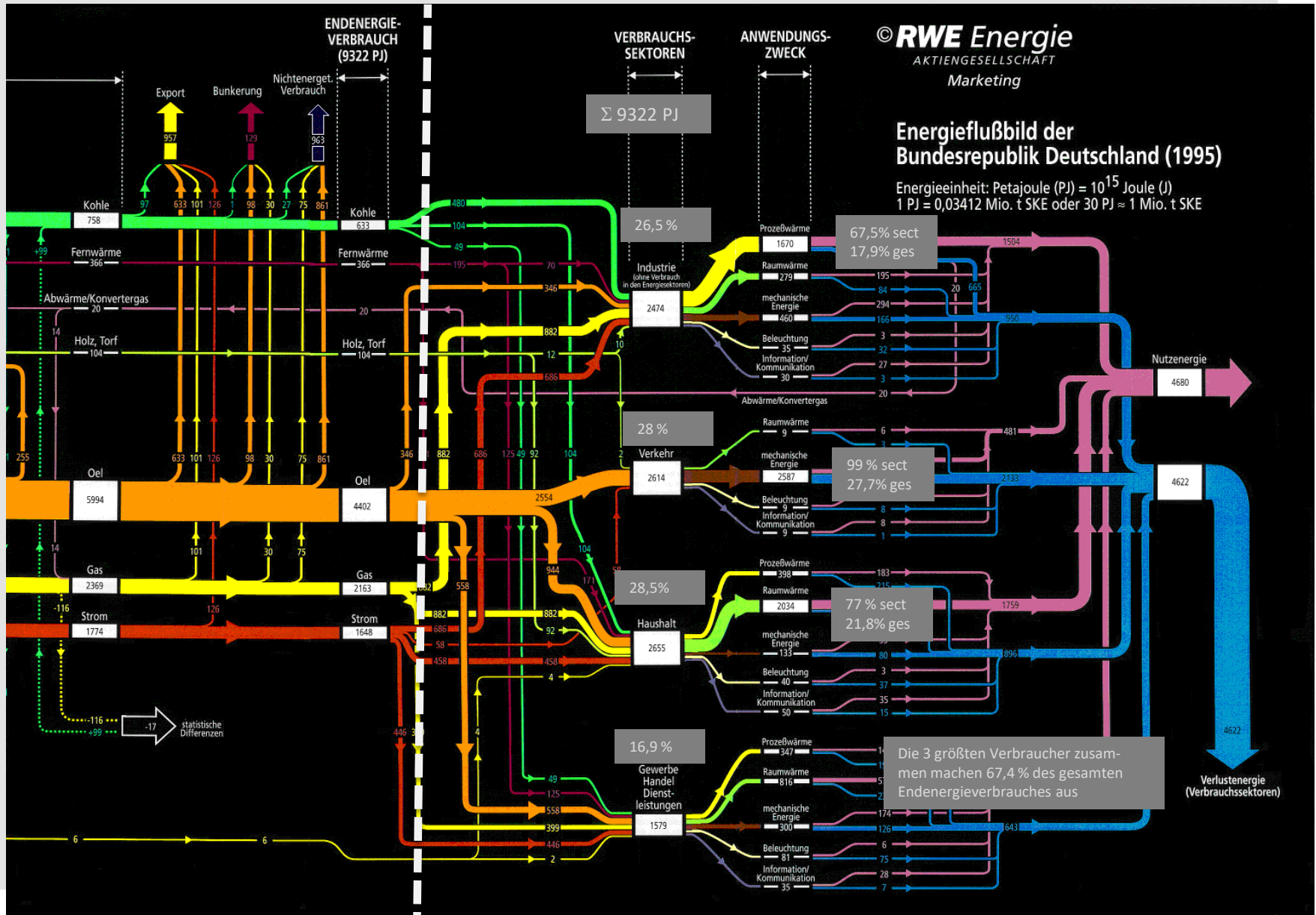
Endenergieverbrauch:  
2493 TWh



# Blick aufs gesamte Energiesystem



# Das RWE Energieflussdiagramm 1995: Verbrauchssektoren



# Endenergie => Nutzenergie

Heute, Verbrenner

Endenergie,  
Bewegung,  
Verkehr:  
718 TWh



Systemwirkungs-  
grad: 25%

Nutzenergie,  
Bewegung,  
Verkehr:  
180 TWh

E-Mobilität

Endenergie,  
Bewegung,  
Verkehr:  
224 TWh



Systemwirkungs-  
grad: 80%

Nutzenergie,  
Bewegung,  
Verkehr:  
180 TWh

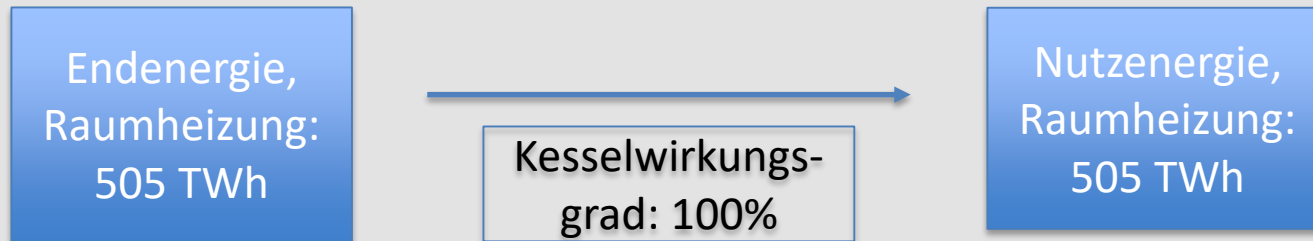
Eingespart: 494 TWh Endenergie (20% der heutigen Endenergie)

Quelle AGEB, Deutschland 2019, Annahme Verkehr (95% des EE-Bedarfs für Bewegungsenergie)

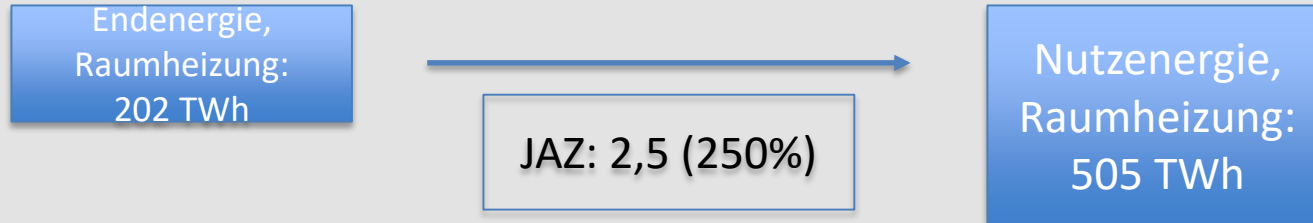


# Endenergie => Nutzenergie

Heute, Gas- und Ölheizungen, private Haushalte



Wärmepumpen-Heizungen, private Haushalte

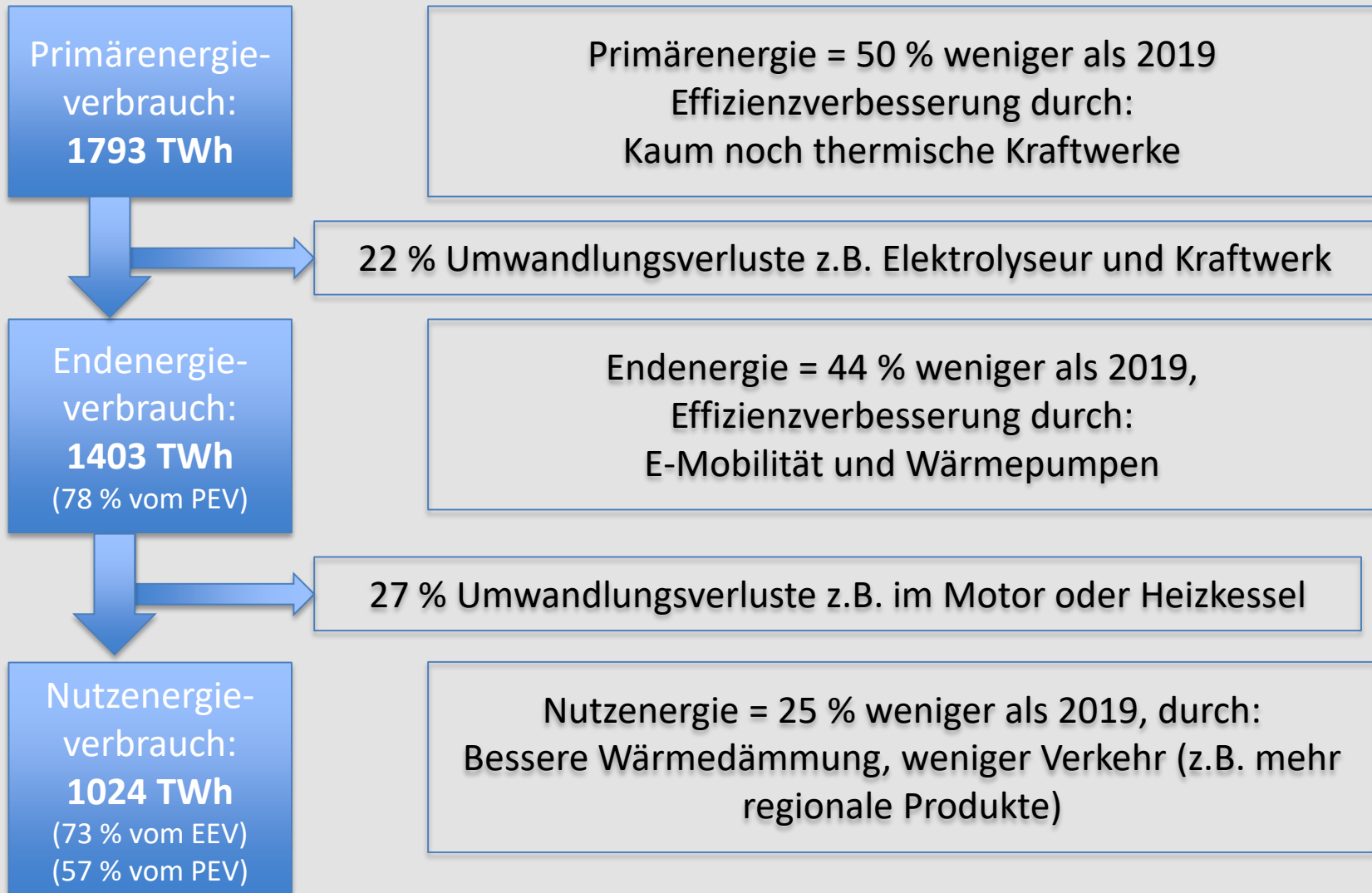


- **Eingespart: 303 TWh Endenergie (12% der heutigen Endenergie)**
- ***Oft nicht berücksichtigt: Auch der Nutzenergiebedarf kann sinken!***

*Quelle AGEB, Deutschland 2019, Annahme Haushalte (75% des EE-Bedarfs für Raumwärme)*

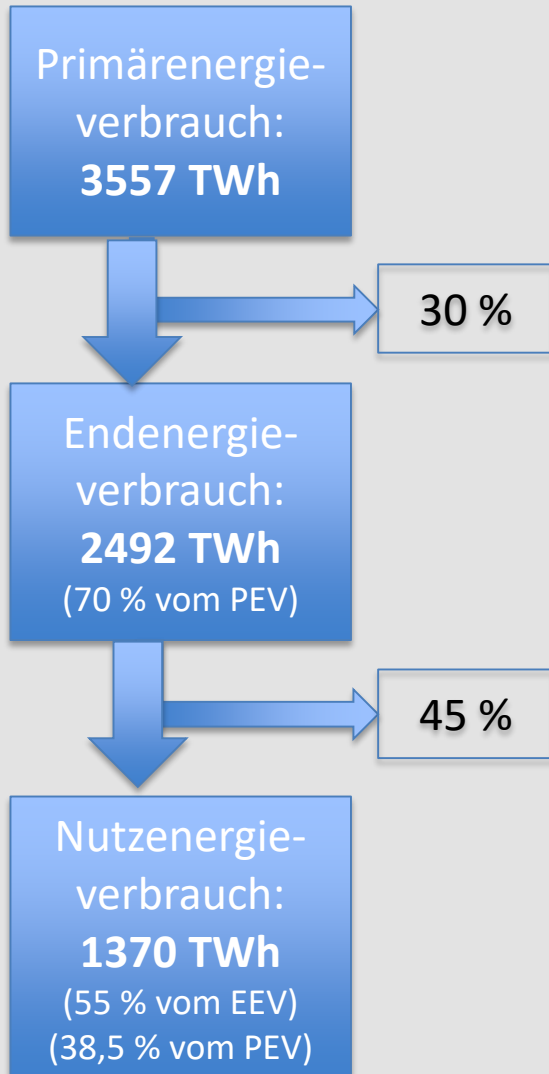


## Deutschland 2045

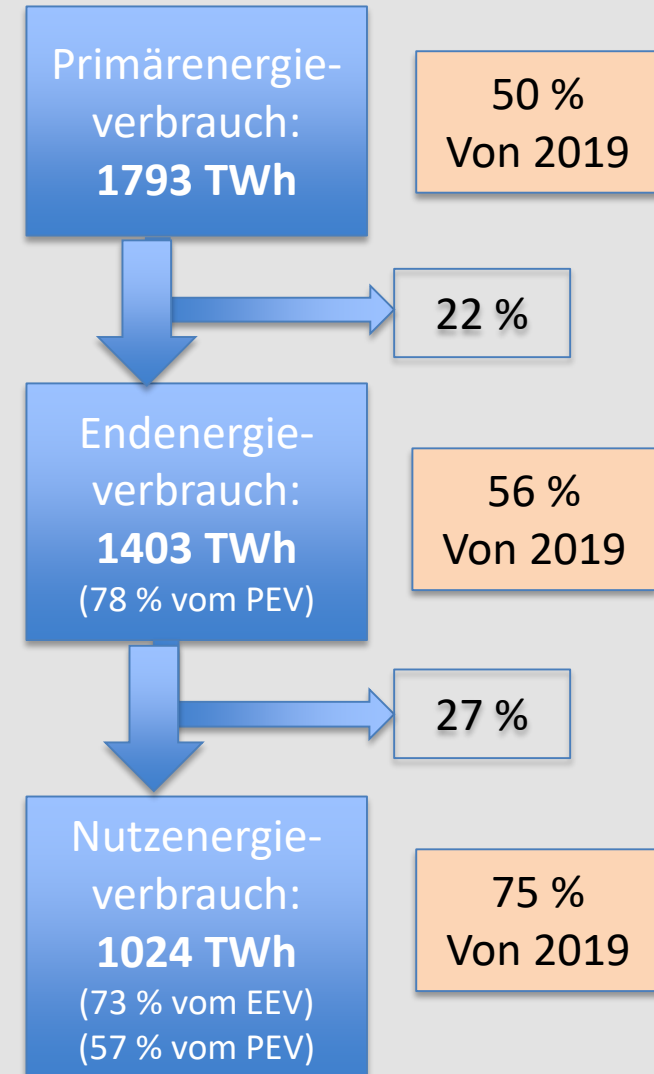


# Definition: Primär-, End-, Nutzenergie

## Deutschland 2019

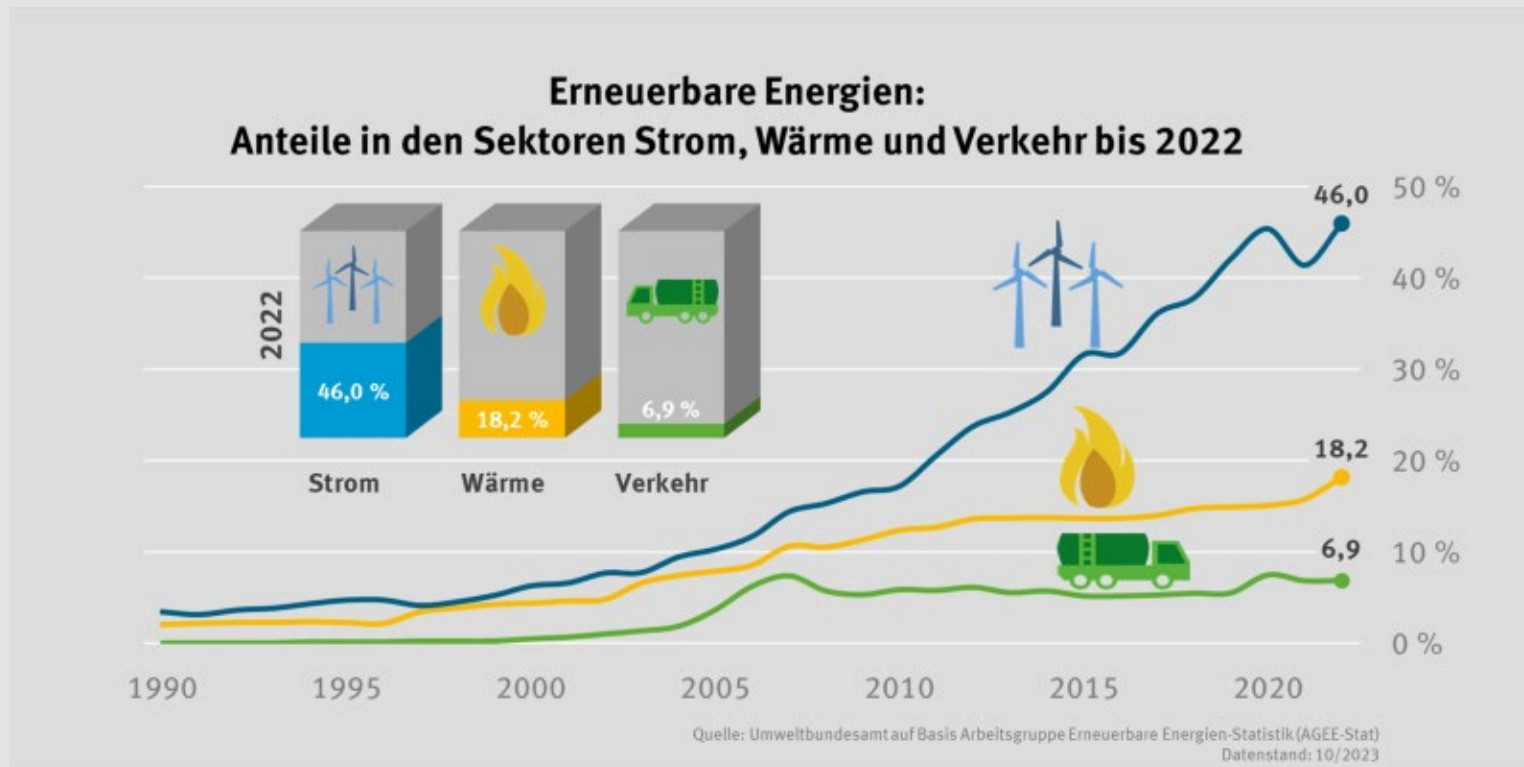


## Deutschland 2045



## Energiewende Zwischenbilanz 2022:

- Nettostromerzeugung: 46 % REN (steigend) (2023 die 50% Marke geknackt)
- Verkehrssektor: 6,9 % REN (stagnierend)
- Wärmesektor: 18,2 % REN (stagnierend)

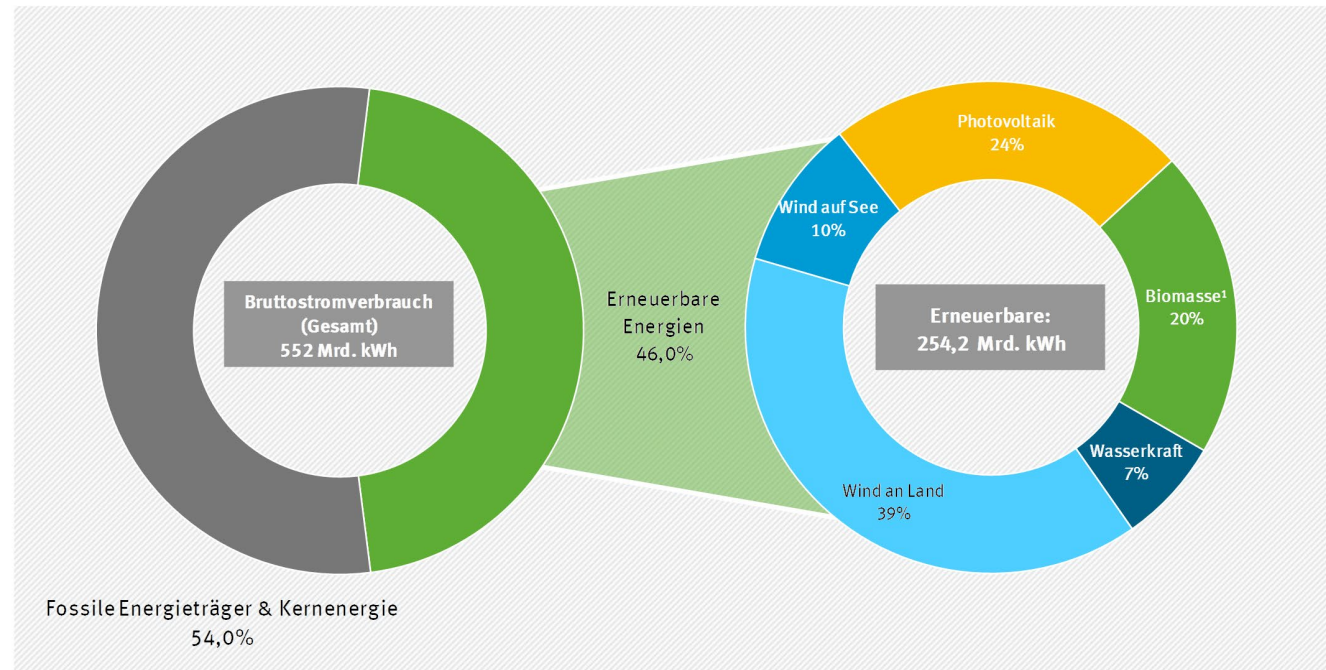


- Strom ist nicht alles! Nur ca. 1/3 des Primärenergieaufkommens geht in die Stromerzeugung

### Bruttostromverbrauch im Jahr 2022

Anteile in Prozent [%]

### Daten für Deutschland



Stromerzeugung aus Geothermie aufgrund geringer Mengen nicht dargestellt (0,2 TWh)

<sup>1</sup> gasförmige, flüssige und feste Biomasse inkl. biogenem Abfall

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat

Stand 09/2023

- Der heutige REN-Anteil im **Stromsektor** besteht im Wesentlichen aus Sonne (PV) und Wind und Biomasse.
- Signifikante Steigerungen sind nur noch im Bereich PV und Wind realisierbar. Aber diese beiden Technologien liefern leider nur fluktuierenden Strom.

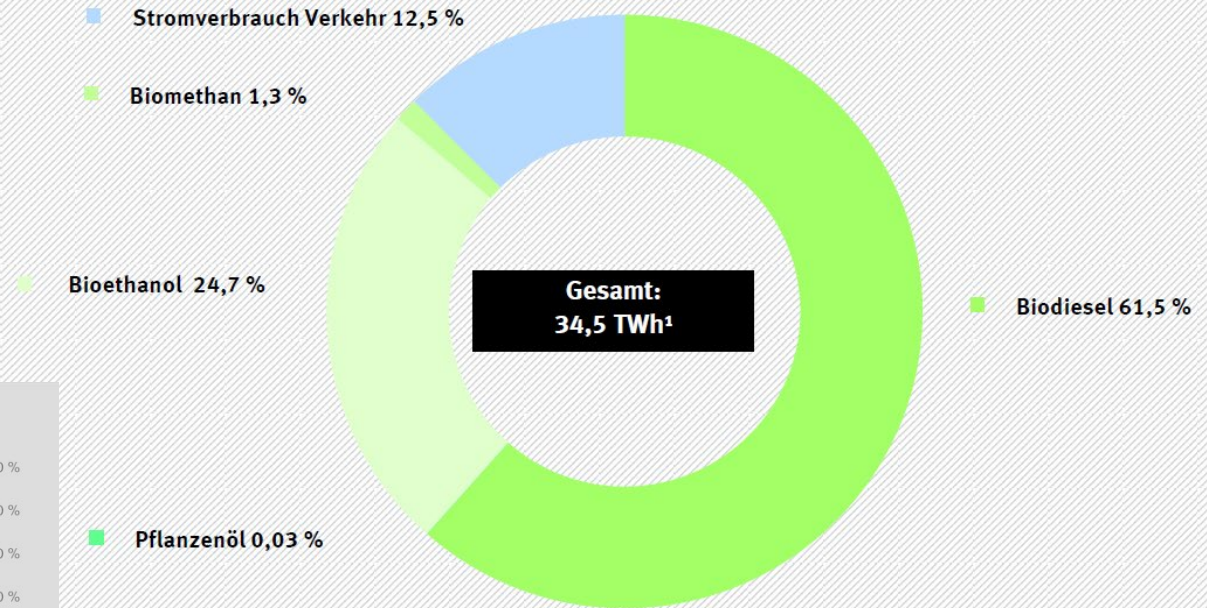
# Sektoren- kopplung

## Verkehr

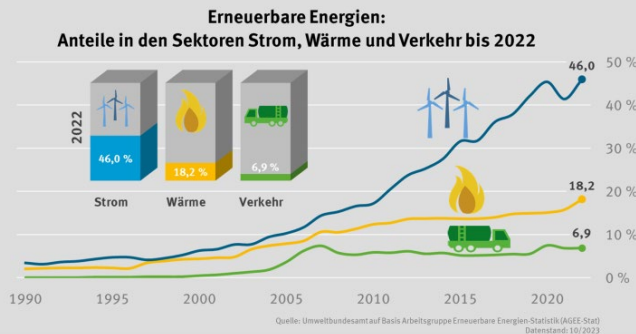
### Verbrauch erneuerbarer Energien im Verkehrssektor im Jahr 2017

Anteile in Prozent

Daten für Deutschland



Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat, Stand 12/2018



- Der heutige REN-Anteil im **Verkehrssektor** besteht im Wesentlichen aus Beimischung von biomassebasierten Kraftstoffen zu Benzin und Diesel. Dieser Anteil lässt sich nicht weiter steigern (Stichwort „Teller-Tank-Diskussion“).
- Ein signifikantes Eindringen der REN in den Verkehrssektor wird nur gelingen durch Elektromobilität.



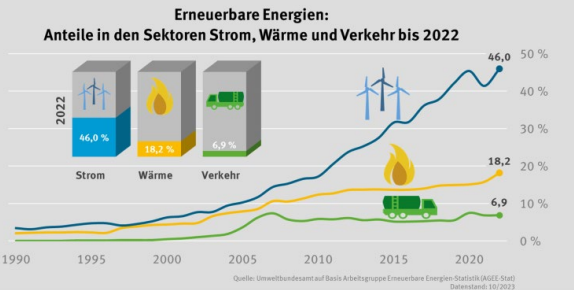
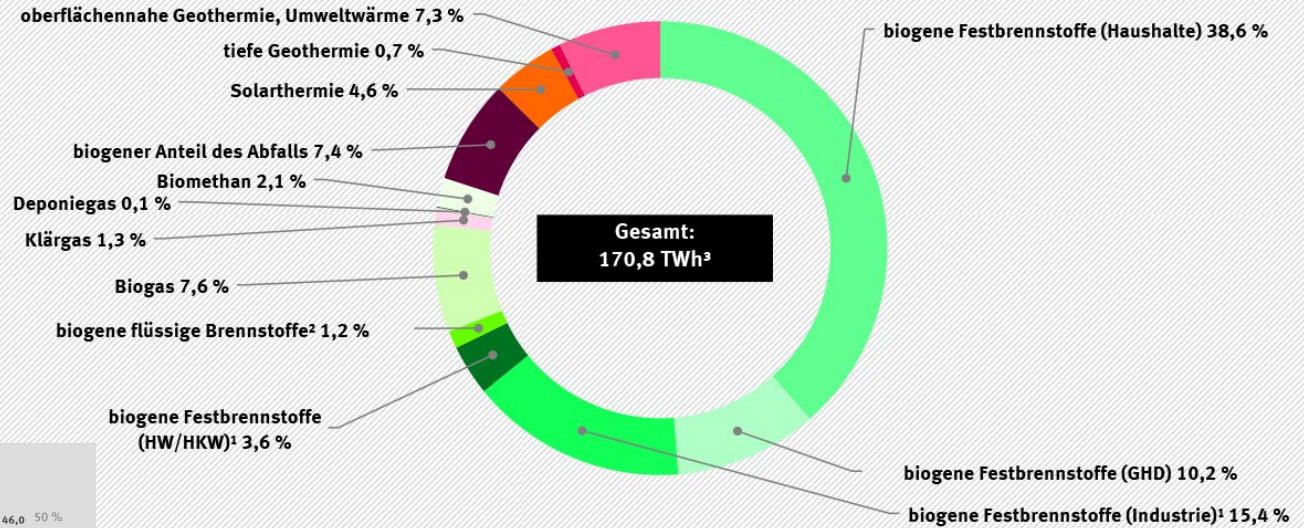
# Sektoren- kopplung

# Wärme

## Wärmeverbrauch aus erneuerbaren Energien im Jahr 2017

Anteile in Prozent

Daten für Deutschland



<sup>1</sup> in der Land- und Forstwirtschaft, Baugewerbe und Militär  
<sup>2</sup> = 1 Mrd. Kilowattstunden (kWh)

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat, Stand 12/2018

- Der heutige REN-Anteil im **Wärmesektor** besteht im Wesentlichen aus der Verbrennung von Biomasse (Holz, Holzpellets, Biogas). Auch dieser Anteil lässt sich in Deutschland nicht mehr wesentlich steigern (industrielle Waldnutzung vs. Naturschutz).
- Ein signifikantes Eindringen der REN in den Wärmesektor wird nur gelingen durch Power to Heat (P2H) und zwar mit\* und ohne\* Wärmepumpen (WP).

\* mit WP bei Grundlastanwendungen \*und ohne WP bei Anwendungen zur Verwertung von Überschussstrom

- Wenn man aus dem REN Strom erst Wasserstoff macht, und dann wieder Strom (in der **Brennstoffzelle im Auto**), dann bleibt nur noch 40% des vorher vorhandenen Stroms übrig.
  - Umwandlung Endenergie => Nutzenergie ist so schlecht wie heute.
  - Kein Effizienzgewinn
- Wenn man statt mit einer Wärmepumpe **mit Wasserstoff heizt (so wie man heute Erdgas verheizt)**, dann hat man nicht den Strom x 2,5 als Energie im Haus, sondern nur den Strom x 0,6 (Wirkungsgrad der Elektrolyse)
  - 2,5 zu 0,6 = 4, d.h. man braucht 4 mal mehr Strom zum Heizen!
- **Zwischenfazit:** Die Elektrifizierung bei Auto und Heizung ist nicht eine Frage der *persönlichen Vorlieben*, sondern sie ist aus der Systemsicht geboten.



# Vgl. Wasserstoff-Heizung vs. WP

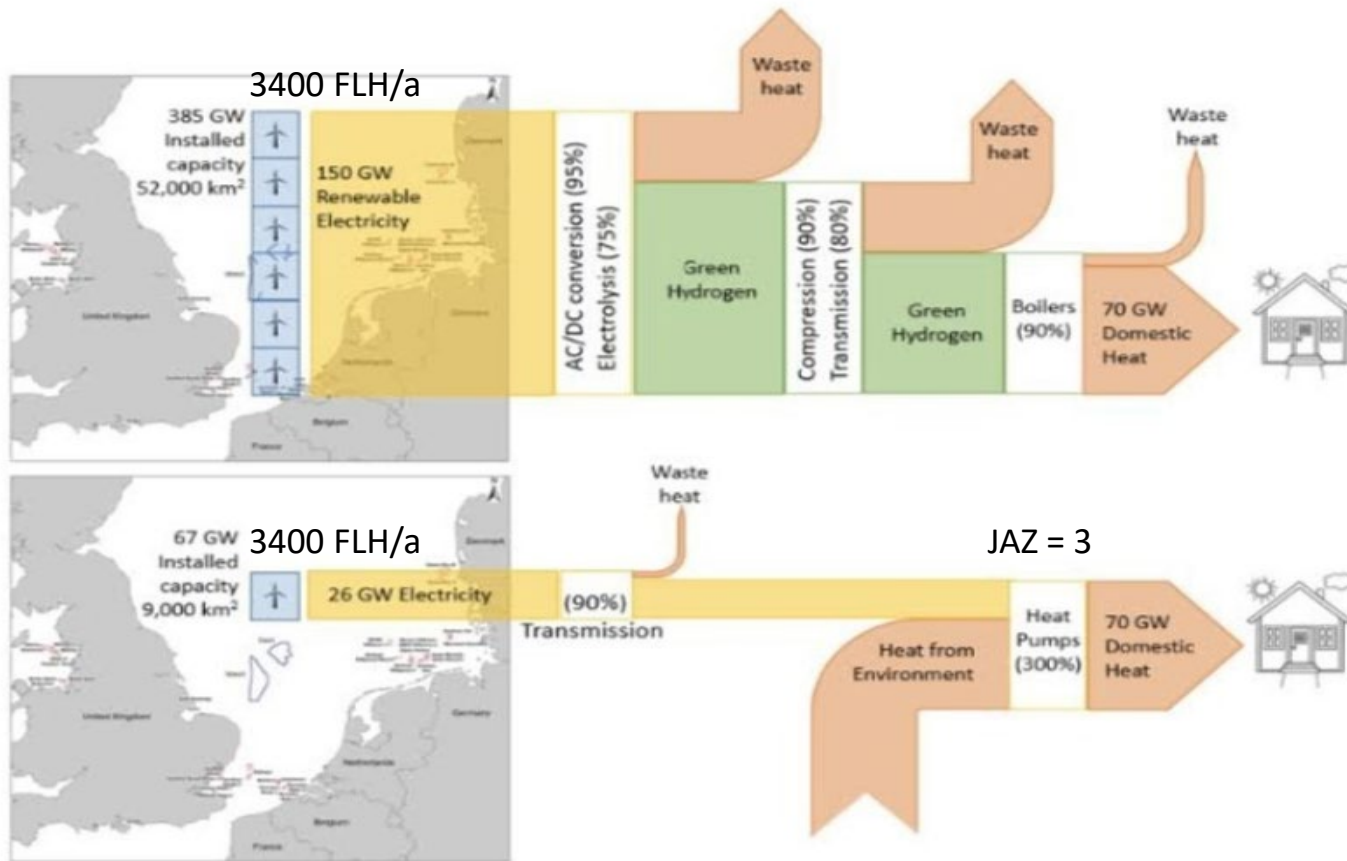


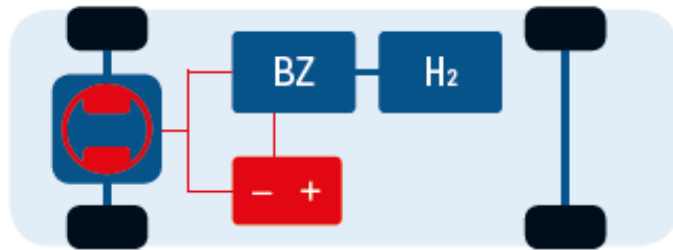
Fig. 1 Providing domestic heating in the UK using either Green Hydrogen or Heat Pumps. The colours of the arrows indicate the type of energy: electricity, green hydrogen or heat. The widths of the arrows are proportional to the power flows (in units of GW). The blue boxes show scaled areas of wind turbine farms on the maps. Red polygons on the maps are existing offshore wind turbine installations, which currently total approx. 10 GW.

## Wofür also Wasserstoff?

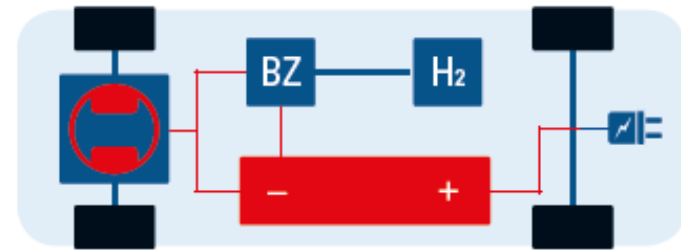
- Batterien sind sehr schwer und daher nicht in allen Fahrzeugkategorien einsetzbar.
- Wasserstoff könnte sich durchsetzen bei:
  - LKW und Bussen im Fernverkehr (nicht im Nahverkehr)
  - Hochseeschiffen
  - Langstreckenflugzeugen
- Außerdem wird Wasserstoff gebraucht für:
  - Energiespeicherung (saisonal)
  - Als Rohstoff in der Industrie (heute schon 57 TWh)
  - Für die CO<sub>2</sub>-freie Stahlerzeugung

Entwicklungstendenz: Hybrid mit Batterie und H<sub>2</sub>-BZ als Range Extender, REX

BZ NOW GmbH, Leitfaden Wasserstoff-Busse



BZ-REX



		BZ	BZ-REX
Solobus 12 m	HV-Batterie	30 kWh	250 kWh
	H <sub>2</sub> -Tank	40 kg H <sub>2</sub>	15 kg H <sub>2</sub>
	Brennstoffzelle	100 kW	30 kW

Hecke, 2018, Van Hool, 2018, thinkstep & Prognos, 2017, Witkowski, 2017

- Der vielleicht wichtigste Vorteil des BZ-REX gegenüber reinen E-Bus: Bei Stromknappheit kann auf H<sub>2</sub> gefahren werden (netzdienlich)

- Energieeffizienter als reiner H<sub>2</sub> Brennstoffzellenbus
- Kleinere BZ als reiner H<sub>2</sub>-Bus
- Kleinere Batterie als reiner E-Bus.
- => Batterie leichter, kleiner und billiger.
- Niedrigere Life Cycle Cost als reiner E- oder reiner H<sub>2</sub>-Bus.

- Der REX muss nicht unbedingt mit Wasserstoff betrieben werden. Alternativen:
  - Biokraftstoffe
  - E-Fuels (Brennstoffe aus Wasserstoff)
    - Diese haben bei der Herstellung noch mehr Verluste als Wasserstoff, sind aber leichter zu handhaben.
- Biokraftstoffe: **Teller-Tank** Diskussion und **Energieeffizienz**
  - Um ein E-Auto die in Deutschland üblichen 14 000 km p.a. zu bewegen, benötigt man eine PV Anlage von 2,8 kWp, und die benötigt eine Fläche von 14 m<sup>2</sup>. (Flächenbelegung von 60% => 23,3 m<sup>2</sup> Ackerfläche)
  - Um einen Verbrenner (6 L / 100 km) mit Biodiesel zu versorgen benötigt man einen Acker von 1 260 m<sup>2</sup> (die gut 50-fache Fläche).
- Trotzdem kann Biokraftstoff als Kraftstoff für den REX sinnvoll sein. Statt heute 7% für alle beizumischen – in Zukunft gezielt für REX.

Wenn eine Industrie ganz ohne fossile Energien auskommen soll, dann benötigt sie Wasserstoff aus diesen Gründen:  
(es ist eine „**push – pull – Situation**“)

- Beim weiteren Ausbau von Wind und PV wird es zu Stromüberschüssen kommen. Diese müssen genutzt werden!  
(das ist der **push**)
- Die Energie muss von Zeiten mit Überschussstrom (windig und sonnig) gespeichert werden, damit sie an Tagen mit Stromknappheit (**Dunkelflaute**) zur Verfügung steht.  
(das ist der **pull**)
- Das geht nur mit Wasserstoff.

Es ergibt sich die Frage, wie die im Wasserstoff gespeicherte Energie am besten genutzt wird.

## 1. Stoffliche Verwertung?

- Ja! Weil ohne Konkurrenz (Wenn ein Prozess Wasserstoff braucht, dann braucht er Wasserstoff.)

## 2. Stromspeicher für Dunkelflaute?

- Ja! Weil alle anderen Speicher für Langzeitspeicherung zu teuer sind.
- Aber erst, wenn H<sub>2</sub> nur noch grün hergestellt wird.

## 3. Im Verkehr?

- Noch nicht klar! Warum? Weil es durch die batterie-betriebene E-Mobilität eine starke Alternative gibt.
- Nur bei Flugzeugen und Hochseeschiffen ist Batteriebetrieb keine Alternative.

Die Tabelle zeigt, wie die heute bestehende Lücke bei der Bereitstellung der Primärenergie (PE) durch PV und Wind geschlossen werden könnte.

- Die Ausbau-Faktoren PV bzw. Wind sagen aus, um welchen Faktor die heute (2020) bestehenden Installationen erhöht werden müssten, um die Lücke von 1300 TWh zu schließen.
- Beispiel: Bei **Verdreifachung** der **Wind**installation müsste die **PV**-Installation um den **Faktor 15** gesteigert werden.

Annahmen:

- Kein weiterer Ausbau von Biomasse (Teller-Tank) und Wasserkraft (Naturschutz)

PV-Wind Balance für PEB von 2045						
				PV Ausbau- Faktor	Wind Ausbau -Faktor	Lücke PE
PEB 2045	1800	TWh		0	10,00	1300
REN PE heute	500	TWh		1	9,54	1300
Lücke PE	1300	TWh		2	9,08	1300
Wind 2022	130	TWh		3	8,62	1300
PV 2022	60	TWh		4	8,15	1300
				5	7,69	1300
				6	7,23	1300
				7	6,77	1300
				8	6,31	1300
				9	5,85	1300
				10	5,38	1300
				11	4,92	1300
				12	4,46	1300
				13	4,00	1300
				14	3,54	1300
				15	3,08	1300
				16	2,62	1300
				17	2,15	1300



Daten 2010, Quelle: Erneuerbare Energien 2010, Bundesministerium für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit,

[https://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/ee\\_in\\_zahlen\\_2010\\_bf.pdf](https://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/ee_in_zahlen_2010_bf.pdf)

## Wachstum Stromerzeugung Wind:

- 2010: 37,4 TWh, 2020: 130 TWh, Wachstum: 9,26 TWh/a ( $\cong$  4,2 GW/a @ 2200 FLH/a)

## Wachstum Stromerzeugung PV:

- 2010: 12,0 TWh, 2020: 47,8 TWh, Wachstum: 3,58 TWh/a ( $\cong$  3,58 GW/a @ 1000 FLH/a)

## Wachstum Stromerzeugung PV und Wind gemeinsam:

- 2010: 49,4 TWh, 2020: 177,8 TWh, **Wachstum: 12,84 TWh/a**

➤ D.h. bei **gleichem Wachstum wie heute** dauert es **über 100 Jahre**, bis die Lücke von 1300 TWh geschlossen sein wird.

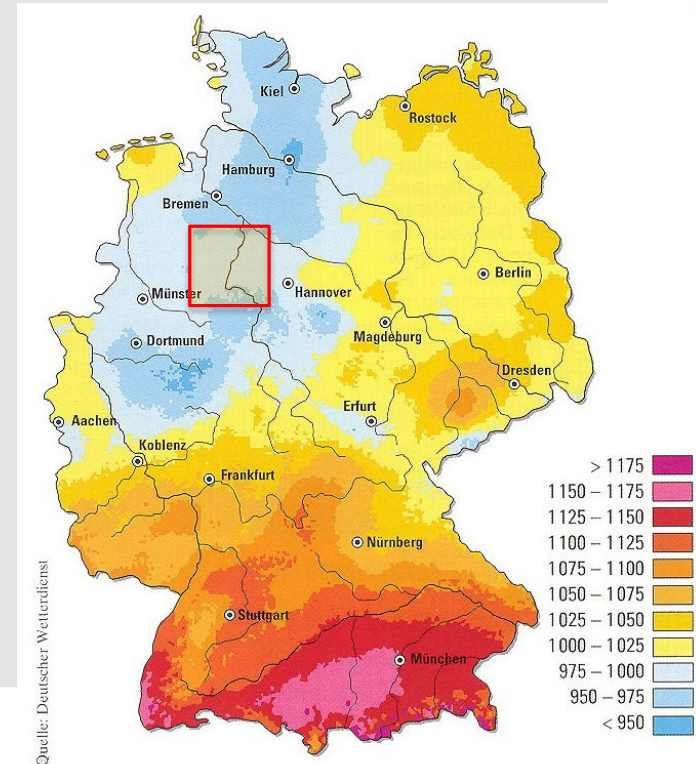
- Sie soll aber bis 2045 (in 21 Jahren) geschlossen werden.  
=> Ausbautempo mit nahezu dem Faktor 5 erforderlich
- Oder: Ein Teil der Energie muss importiert werden (als Strom oder Wasserstoff)
- Oder: Der PEB muss noch weiter gesenkt werden

## Flächenbedarf für neu zu installierende PV Kapazität auf Freifläche (Stand heute x 15):

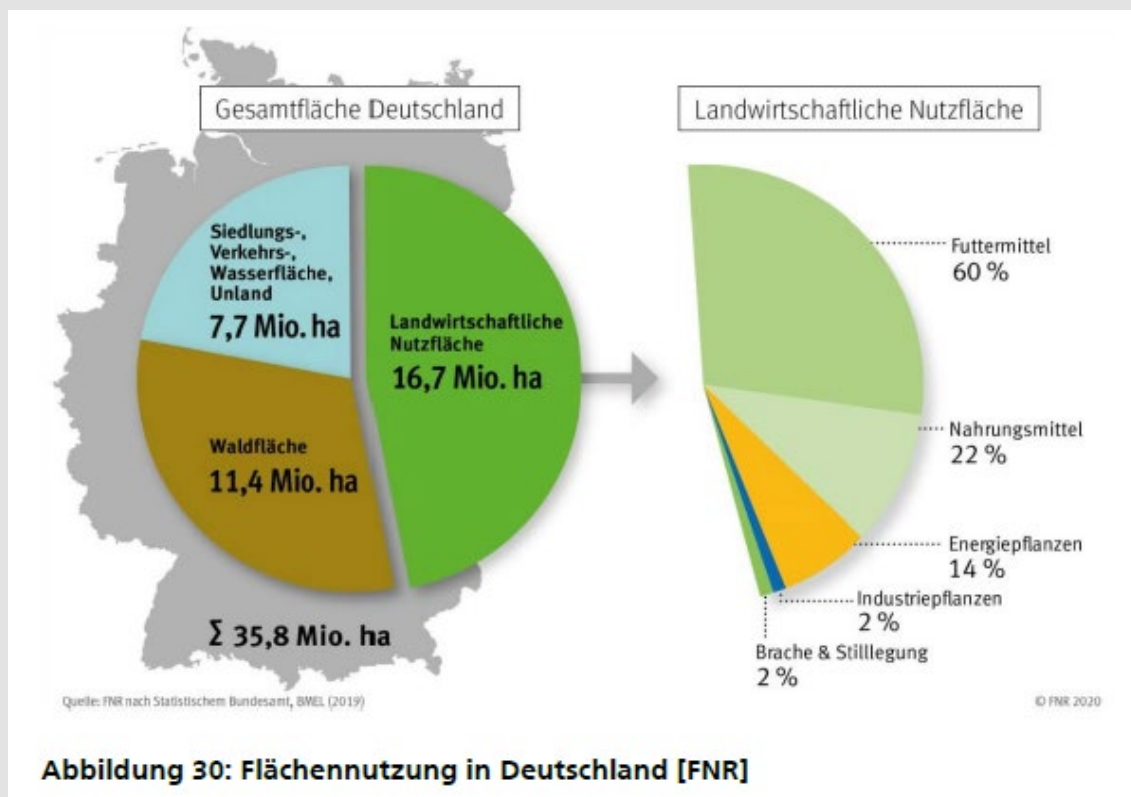
- $GHI_{\text{Deutschland}} = 1000 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a}) \Rightarrow 1 \text{ TWh}/(\text{km}^2 \text{ a})$  (*GHI = Global Normal Irradiation*)
- $\eta_{\text{PV}} = 20 \%$ , Flächenbelegung = 50%  $\Rightarrow \eta_{\text{PV-Freiflächenanlage}} = 10\%$  (bezogen auf Landfläche)
  - Ertrag PV<sub>Freifläche</sub> = 0,1 TWh/(km<sup>2</sup> a)
  - Daumenwert: 1 TWh/a  $\cong$  1 GW<sub>p</sub> (@ 1000 FLH/a)  $\Rightarrow$  0,1 TWh/a  $\cong$  0,1 GW
- Wachstum PV von 60 GW auf 900 GW (ver-15-fachung) d.h. 840 GW Zubau bis 2045
- 8400 km<sup>2</sup> PV Fläche erforderlich,  
entspr. Quadrat mit 91,6 km Kantenlänge
  - 8400 km<sup>2</sup> entspr. 2,35% der Fläche der BRD
  - bzw. 4,7 % der landw. genutzten Fläche der BRD
  - **Landkarte: rotes Quadrat** mit a = 91,6 km

### Aber:

- Es muss nicht alles auf der Freifläche installiert werden!



- Die rechts zitierte Studie sieht auf den **Gebäuden** der BRD ein Potential von **1000 GW<sub>p</sub>**
  - (nur Flächen berücksichtigt mit Einstrahlung > 500 kWh/m<sup>2</sup> a)
- D.h. ein Ausweichen auf die Freifläche wäre gar nicht nötig.
- Aber: Freiflächenanlagen sind kostengünstiger.



Fraunhofer ISE: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland 2022, [www.pv-fakten.de](http://www.pv-fakten.de)

- Zusätzlich bräuchte eine PV-Überdachung von bestehenden großen **Parkplätzen** weitere **59 GW<sub>p</sub>**.
- **Agri-PV** bietet Potential für **2 900 GW<sub>p</sub>**, also gut 3 x mehr als benötigt (FH-ISE, Seite 36)

# Primärenergiebereitstellung 2045

- Agri-PV beeinträchtigt die Landwirtschaft kaum.
- Einige Pflanzen gedeihen sogar besser im Halbschatten.
- Senkrechte Module bieten Windschutz und hohe Stromerträge im Winter.

Fraunhofer ISE: Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende, Ein Leitfaden für Deutschland, Stand April 2022

Tab. 01: Überblick über Kategorien und Nutzungsformen der DIN SPEC 91434

Agri-PV-Systeme	Nutzung	Beispiele
<b>Kategorie I:</b>	1A: Dauerkulturen und mehrjährige Kulturen	Obstbau, Beerenobstbau, Weinbau, Hopfen
<b>Bodennahe Aufständerung &lt; 2,1 m</b>	1B: Einjährige und überjährige Kulturen	Ackerkulturen, Gemüsekulturen, Wechselgrünland, Ackerfutter
<b>Bewirtschaftung unter der Agri-PV-Anlage (Bild 1)</b>	1C: Dauergrünland mit Schnittnutzung	Intensives Wirtschaftsgrünland, extensiv genutztes Grünland
	1D: Dauergrünland mit Weidenutzung	Dauerweide, Portionsweide (zum Beispiel Rinder, Geflügel, Schafe, Schweine und Ziegen)
<b>Kategorie II:</b>	2A: Dauerkulturen und mehrjährige Kulturen	Obstbau, Beerenobstbau, Weinbau, Hopfen
<b>Bodennahe Aufständerung &lt; 2,1 m</b>	2B: Einjährige und überjährige Kulturen	Ackerkulturen, Gemüsekulturen, Wechselgrünland, Ackerfutter
<b>Bewirtschaftung zwischen den Agri-PV-Anlagenreihen (Bild 2/3)</b>	2C: Dauergrünland mit Schnittnutzung	Intensives Wirtschaftsgrünland, extensiv genutztes Grünland
	2D: Dauergrünland mit Weidenutzung	Dauerweide, Portionsweide (zum Beispiel Rinder, Geflügel, Schafe, Schweine und Ziegen)

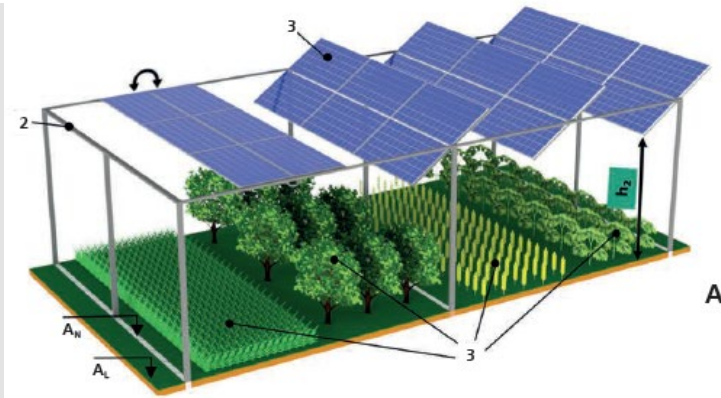
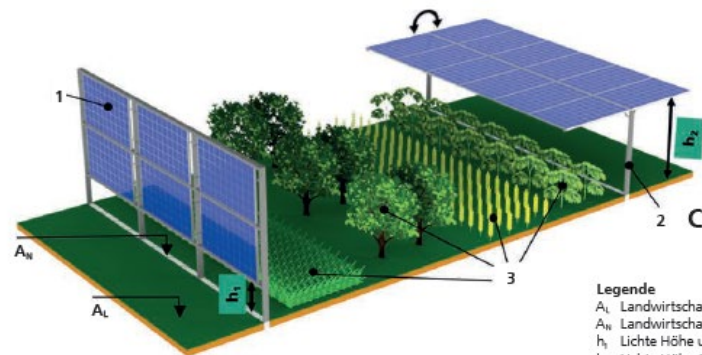
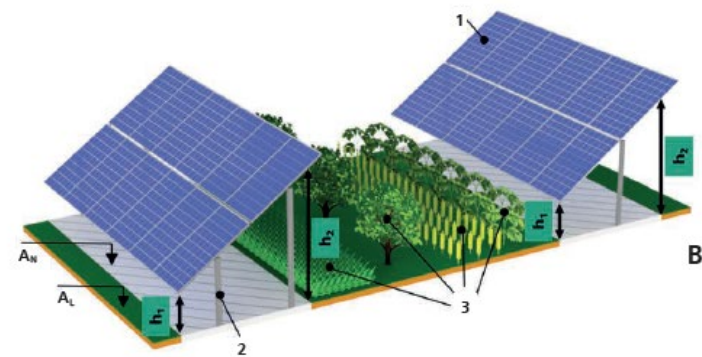


Abb. 10: Illustration der Kategorien und Nutzungsformen der DIN SPEC 91434. © Fraunhofer ISE

Bild A: Darstellung zu Kategorie I;

Bild B: Darstellung zu Kategorie II, Variante 1;

Bild C: Darstellung zu Kategorie II, Varianten 1 und 2.



#### Legende

- $A_L$  Landwirtschaftlich nutzbare Fläche
- $A_N$  Landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche
- $h_1$  Lichte Höhe unter 2,10 m
- $h_2$  Lichte Höhe über 2,10 m
- 1 Beispiele zu Solarmodulen
- 2 Aufständerung
- 3 Beispiele landwirtschaftlicher Kulturen

## Flächenbedarf für neu zu installierende Wind Kapazität, onshore (Stand 2021 (56 GW) x 3, d.h. Zubau von 168 GW)

- $P_{el}$  pro Rotorfläche am Beispiel der Enercon E-138 EP3 (Binnenland-WKA):
- $P_{el} = 4,2 \text{ MW}$ ,  $D_{\text{Rotor}} = 138,25 \text{ m} \Rightarrow A_{\text{Rotor}} = 15\,011 \text{ m}^2 \Rightarrow P/A = 280 \text{ W/m}^2_{\text{Rotorfläche}}$
- Bei Raster-Abstand von  $4 \times D \Rightarrow$  Flächenbedarf je WKA =  $(553\text{m})^2 = 305\,809 \text{ m}^2$
- $\Rightarrow 13,7 \text{ W/m}^2 = 13,7 \text{ MW/km}^2 \Rightarrow 12\,262,8 \text{ km}^2$  für 168 GW
- Entspricht 3,4 % der Fläche der BRD (etwas mehr als für  $900 \text{ GW}_{\text{PV}}$ )
- Das Land im Windpark kann aber weiterhin landwirtschaftlich genutzt werden.
- Auch gleichzeitige Nutzung für PV Freiflächenanlagen möglich

### Fazit:

- **Die Erzeugung von 1800 TWh/a in Deutschland** mit dem heutigen Bestand an Wasserkraft und Biomasse und Schließen der Lücke von 1300 TWh/a (Stand 2022) durch PV und Wind **ist möglich**.
- Außerdem besteht die Möglichkeit, Energie zu importieren (Strom und/oder Wasserstoff)

- Jetzt brauchen wir „nur noch“ Die Handwerker\*innen und Ingenieur\*innen, die das alles umsetzen!
- Daher: Werben Sie für die Berufe in der Energietechnik (handwerklich und akademisch).
- **Alles Reden bringt nichts, wenn wir es nicht umsetzen!**
- An der HSHL kann man Energietechnik studieren:  
<https://www.hshl.de/studieren/studiengaenge/bachelorstudiengaenge/energietechnik-und-ressourcenoptimierung/>



# Vielen Dank für Ihr Interesse



Dieser Vortrag ist in ähnlicher Form auch auf youtube verfügbar:

<https://www.youtube.com/watch?v=VvnmBOLuvGw>

youtube-Kanal der HSHL:

<https://www.youtube.com/user/hshammlippstadt/videos?app=desktop>