

# Werkt in een gedecarboniseerde wereld alles op elektriciteit?

Datum: 9 oktober 2023, UHasselt  
Prof. Johan Driesen (KULeuven – EnergyVille)



# Doelstellingen

- De deelnemer/student zou een basisinzicht moeten krijgen de *transitie* naar een *duurzaam energiesysteem*.
- De deelnemer/student verwerft inzicht in de technische mogelijkheden en grenzen van *elektrificatie*.



# Inleiding

# Energietransitie

Drivers:

- Milieu / Klimaat
- Socio-economisch
- Security of Supply

We're the first generation to feel the impact of climate change and the last generation that can do something about it.

*Barack Obama - August 2015*



# (Energie)transities zijn er altijd al geweest

**Ik blijf wie ik ben.**

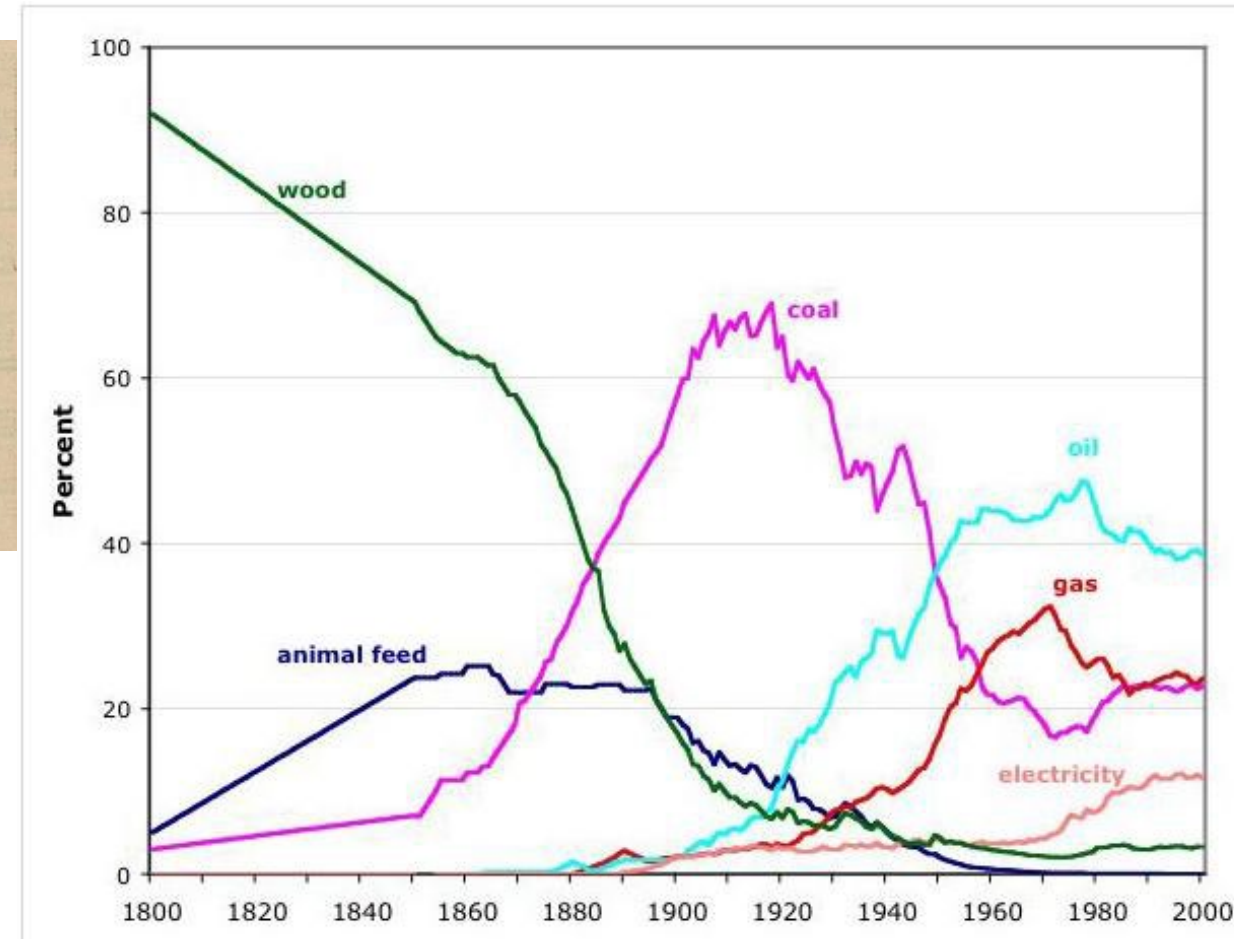
'Ik was er helemaal niet vóór... die omschakeling op aardgas. Per slot van rekening jagen ze je maar op kosten. Dit afgekeurd, dat afgekeurd en de pijp afgekeurd. En in de bus een briefje: zorg er zelf maar voor! Dat kostte me handen vol geld'. Deze verzuchting is van mevrouw D. J. de Jong, Cattenhagestraat 11a in Naarden. Velen voelen het net zo. Waarom blijft zij bij gezellig kolen stoken?

'Dat zal ik u zeggen. Het bevalt mij al niet met koken, laat staan met stoken! En ik wil graag klant blijven. Zoals ik altijd geweest ben. Klant van een kolenhandelaar, die weet wie ik ben als ik opbel. Echt klant - en geen verbruiker nummer zoveel. Een naamloze. Met ambtelijk gedoe. Bovendien: in de kamer waarin je leeft kan je niet zonder echte stralingswarmte. Warmte waar wat aan te beleven is! U hoort het: leefwarmte. Van kolen!

**Zo is het! GEZELLIGE MENSEN STOKEN**

**KOLEN**

de Volkskrant van MAANDAG 5 OKTOBER 1964



- Bijv. einde kolenkachel (“is toch gezelliger”)
- Er zal altijd “weerstand” zijn

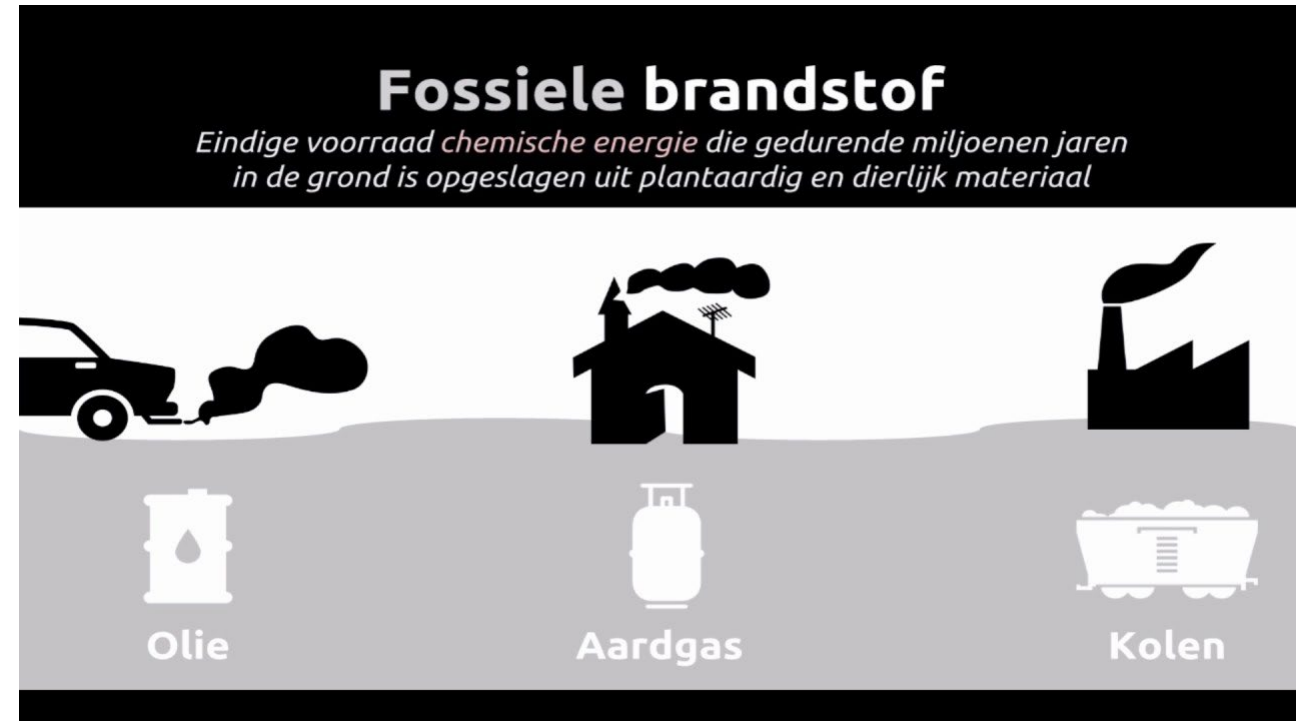
# De huidige transitie: verduurzaming + elektrificatie

- Decarbonisatie
  - Naar een duurzame daling CO<sub>2</sub>-uitstoot
  - Weg van fossiele brandstoffen: hoe?
- Alles lijkt op (groene?) elektriciteit te moeten gaan werken
  - Elektrische auto's
  - Elektrische warmtepompen
  - ...
- Is er een alternatief (nodig)?
- Waar gaat die elektriciteit dan vandaan komen?



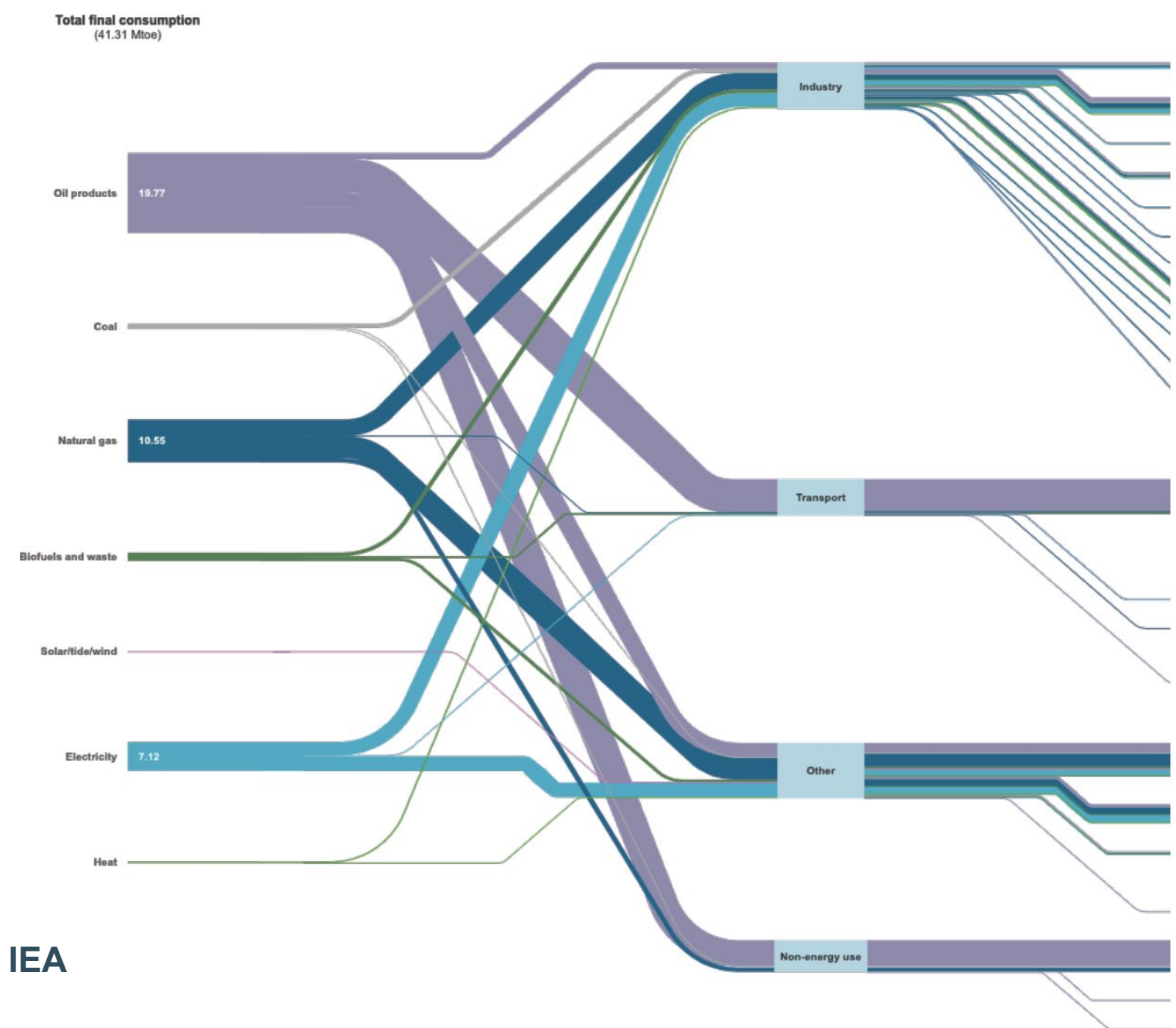
# Fossiele brandstoffen

- Eindige voorraden
  - Begrip “peak-oil”
- Typische omzettingen
  - Rechtstreeks verbranden, bijv. gasboiler
  - Omzetten in beweging, bijv. auto met verbrandingsmotor
  - Elektriciteitsgeneratie via thermische + bewegingstussenstap
- Brengt *extra* CO<sub>2</sub> in de atmosfeer
- Ook bron van fijn stof, stikstof (NO<sub>x</sub>), ...



# De energiebalans van België

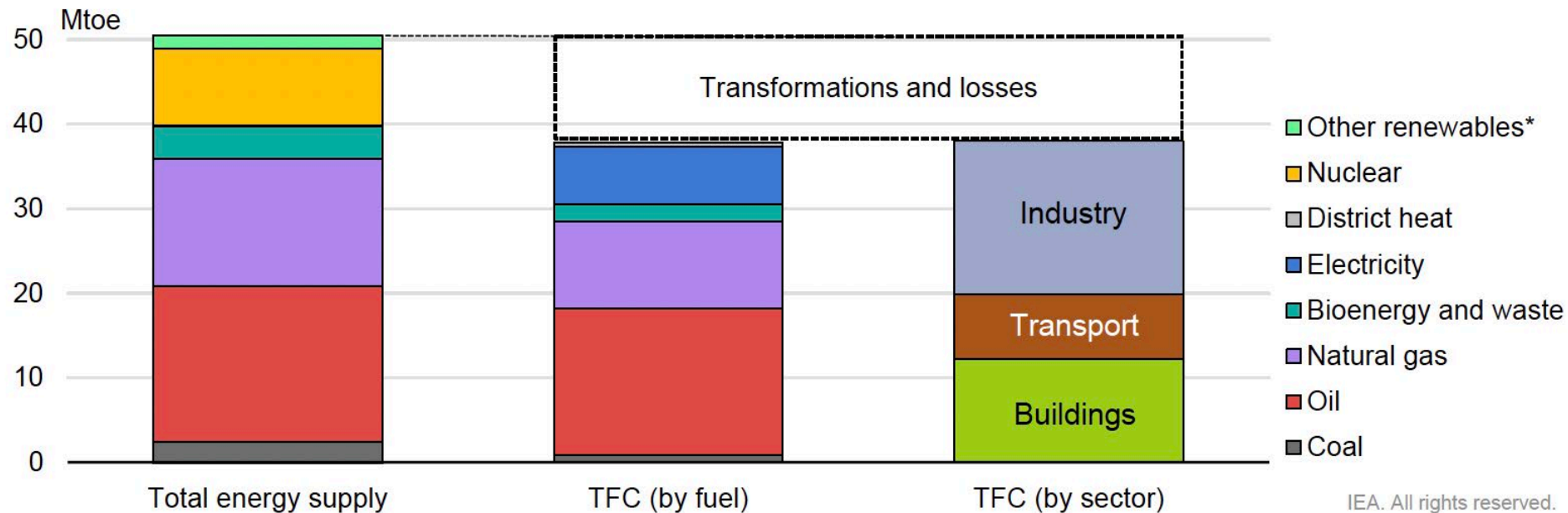
- Industrie, transport, gebouwde omgeving zijn ongeveer gelijkwaardige verbruikers
- Gas, olie nog steeds dominant in verbruik: hoe hier vanaf te geraken?
- Opm.: sommige energiedragers zijn ook grondstoffen





# Het energieverbruik van België

Figure 2.2 Energy supply and demand in Belgium, 2020



Belgium's energy supply and demand are dominated by imported oil and natural gas. Nuclear energy plays a major role. Industry has the largest energy demand (48% of TFC in 2020).

IEA, country statistics

# Indicatieve cijfers

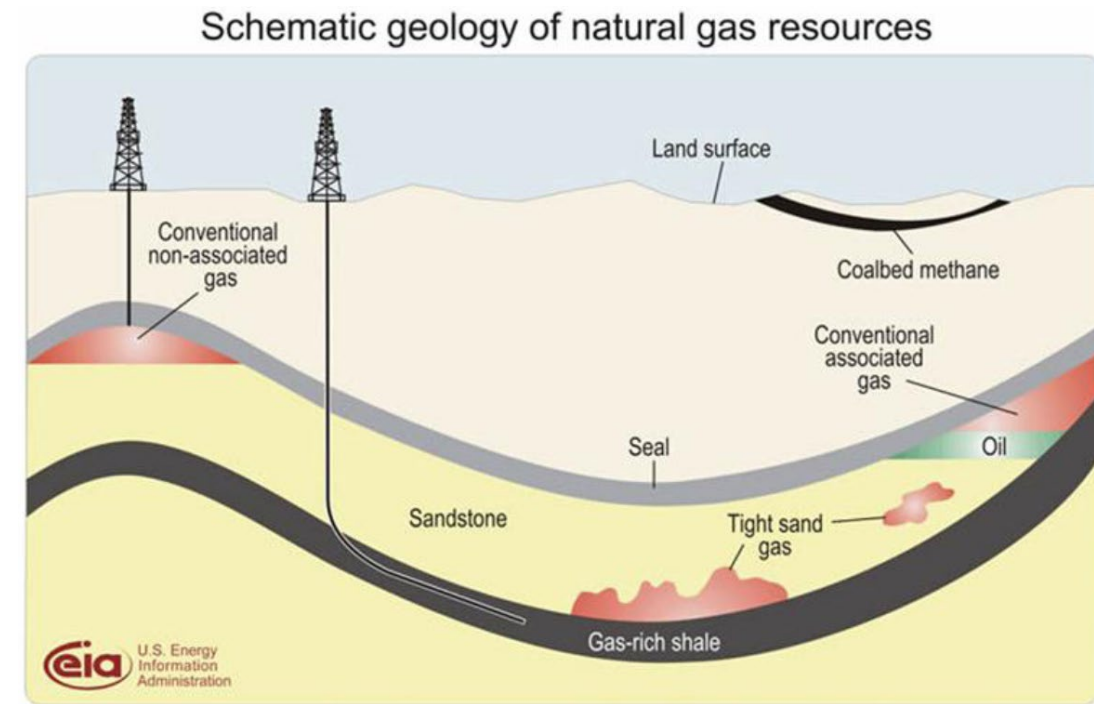
- België (cijfers voor corona-crisis):
  - 81,4 TWh (85,4 TWh productie) elektriciteitsgebruik: verschil door netto-export stroom
  - 489 TWh totaal energiegebruik: elektriciteit is 16,6%
  - Eigenlijk 657 TWh primaire energie, maar ook niet-energetisch gebruik (chemie, staal, cement)
- Europa:
  - 3255 TWh (bruto productie) elektriciteit
  - 18154 TWh (1561 Mtoe), primaire energie: elektriciteit is 17,8%
- Zie <https://www.iea.org/data-and-statistics>

# Transities in Energiediensten

- *Directe Elektrificatie* van verschillende soorten energetisch eindgebruik
  - Verlichting
    - Fakkels/kaarsen → gloeilamp → spaarlamp → LED-lamp
  - Verwarming
    - Houtstook → steenkool → stookolie → aardgas → (elektrische) warmtepomp
  - Beweging
    - Dierlijke/menselijke kracht → stoommachine → verbrandingsmotor → elektrische aandrijving in maakindustrie en mobiliteit
  - Chemische processen
    - Bijv. thermische energie uit verbranding → elektrolyse
- Alternatief: duurzame “groene” brandstof gebruiken? Is dit waterstof (H<sub>2</sub>)?
  - Duurzame brandstoffen: te produceren op basis van duurzame stroom
  - *Indirecte Elektrificatie*
- Is er dan “competitie” tussen elektriciteit en waterstof ?

# Soorten “gas”

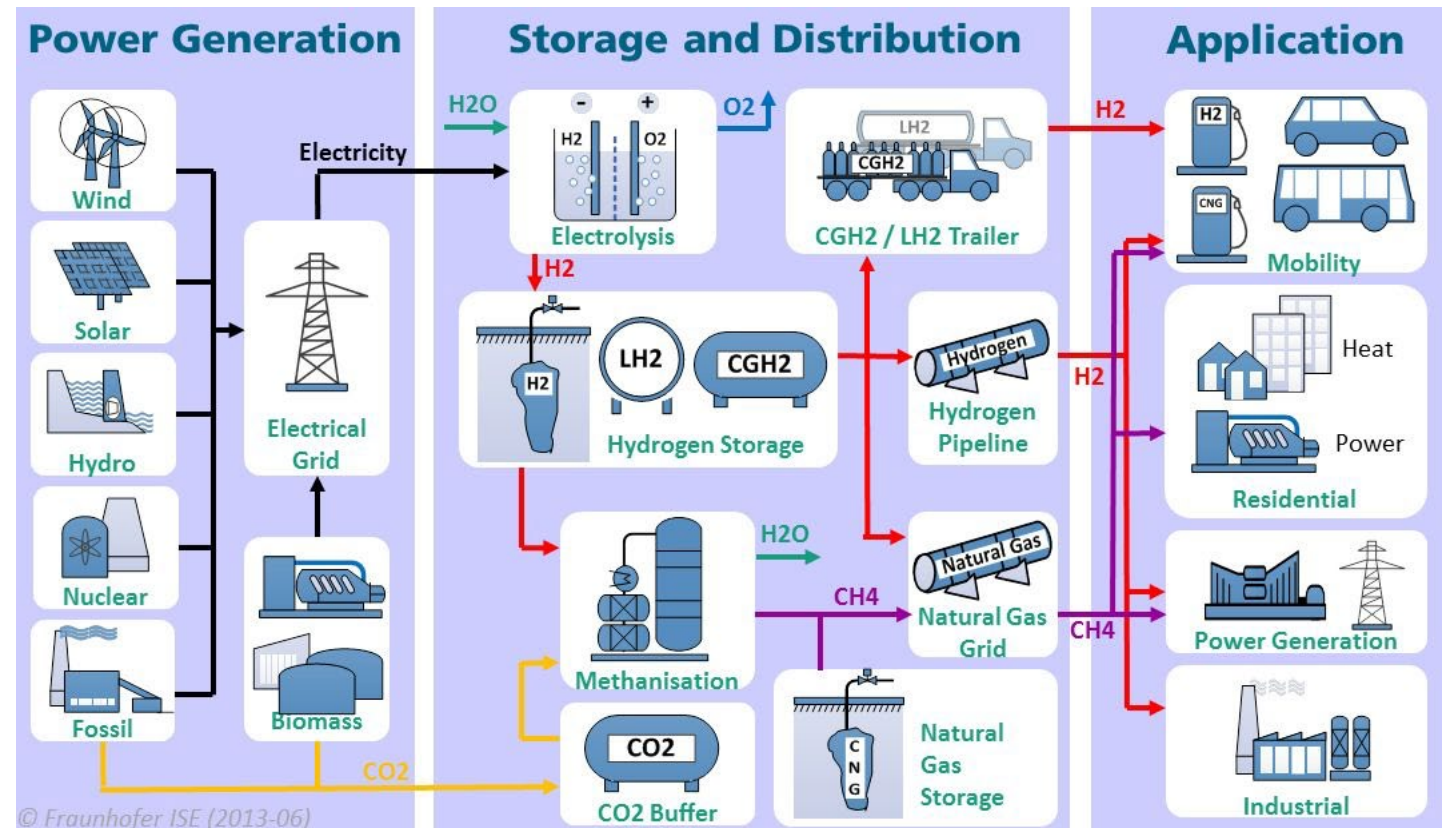
- Hoofdcomponent: methaan (CH<sub>4</sub>)
- Types:
  - Aardgas
    - Via pijpleiding, bijv. uit Noorwegen
    - Lagetemperatuur-vloeibaar, per schip: LNG (liquified natural gas)
  - Schaliegas: vervuilende winning “fracking”
  - Biogas: in principe koolstofneutraal, bijv. uit vergisting
  - Synthetisch gas: na chemische methanatie van *waterstof* (verschillende oorsprong) – zie P2X



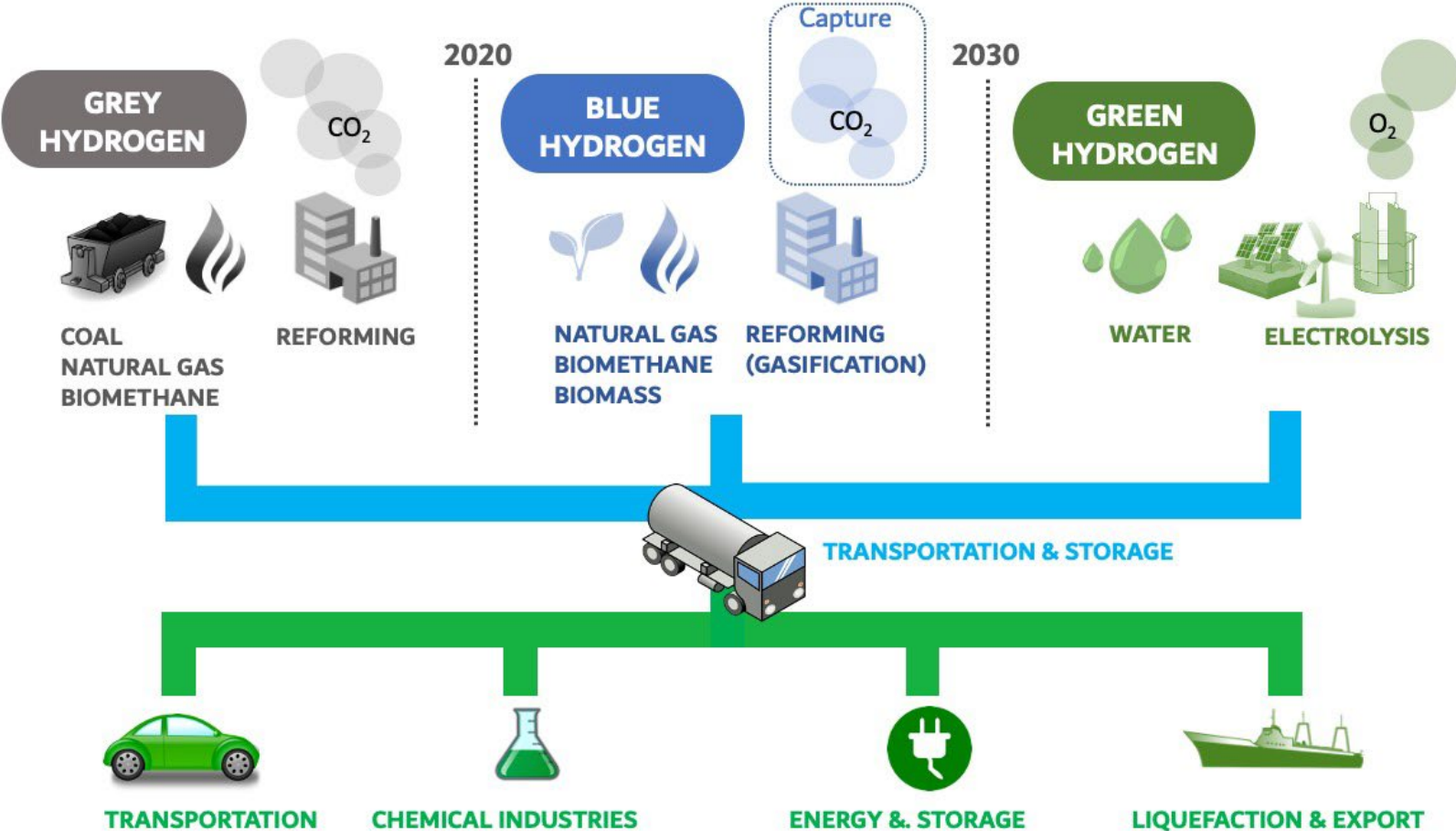
LNG terminal Zeebrugge

# Power-to-gas (P2X): synthetisch gas

- Kan gemaakt worden op basis van koolstofvrije energie
- Waterstof/synfuels zijn ook een grond- of transportbrandstof
- Mogelijkheid tot energieopslag over de seizoenen heen
- Complexe markt, bijv. competitie van chemiesector



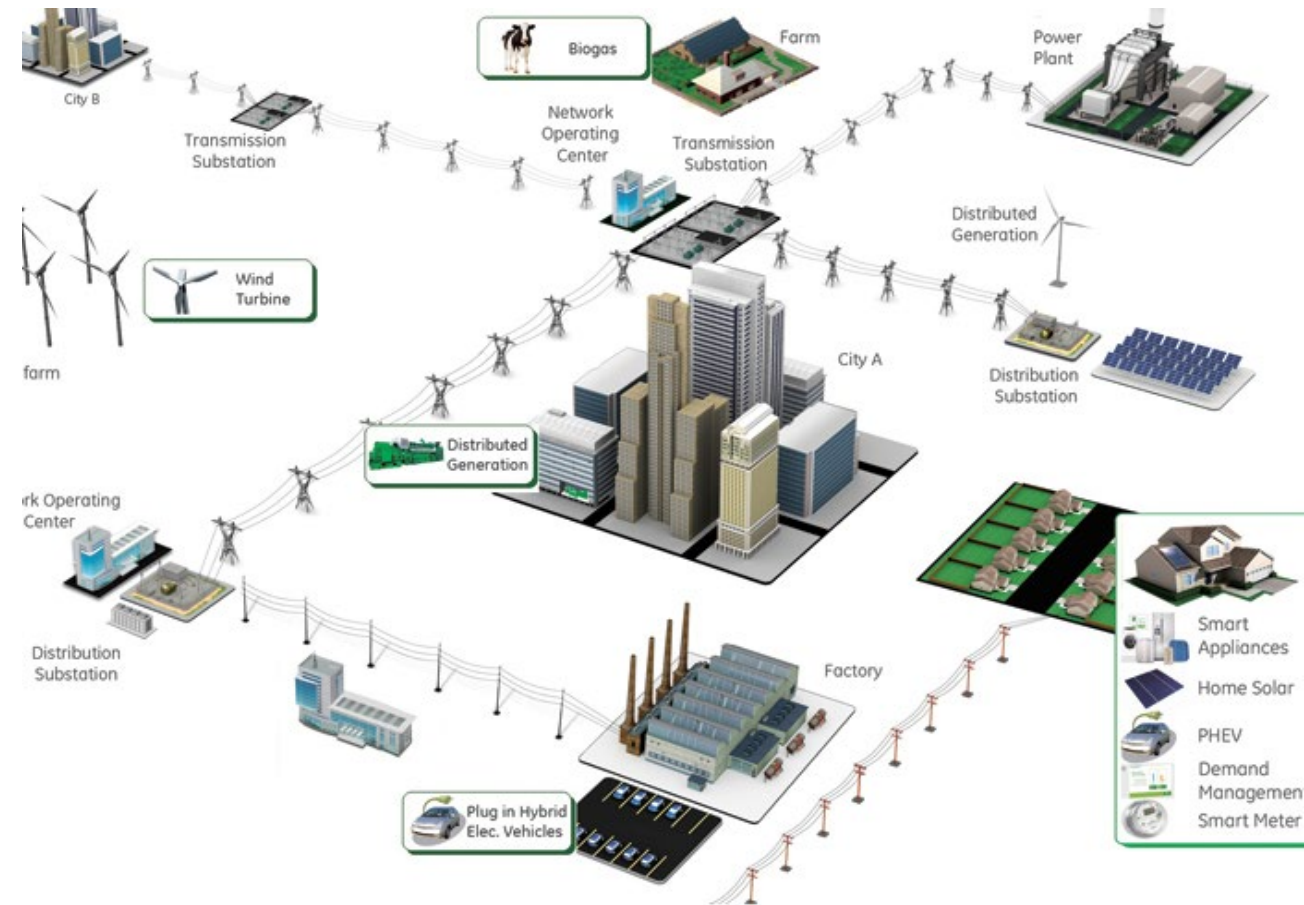
# De “kleur” van (kleurloze) waterstof



Source: Chem4us

# Waar ligt de grens van elektrificatie?

- Bespreking aan de hand van use cases
  - Mobiliteit van wagens en “zwaar” transport
  - Verwarming van gebouwen
  - Industrieel gebruik: enkele voorbeelden
- Herkomst van de stroom en waterstof
- Netwerken en opslag
- Slotbeschouwingen

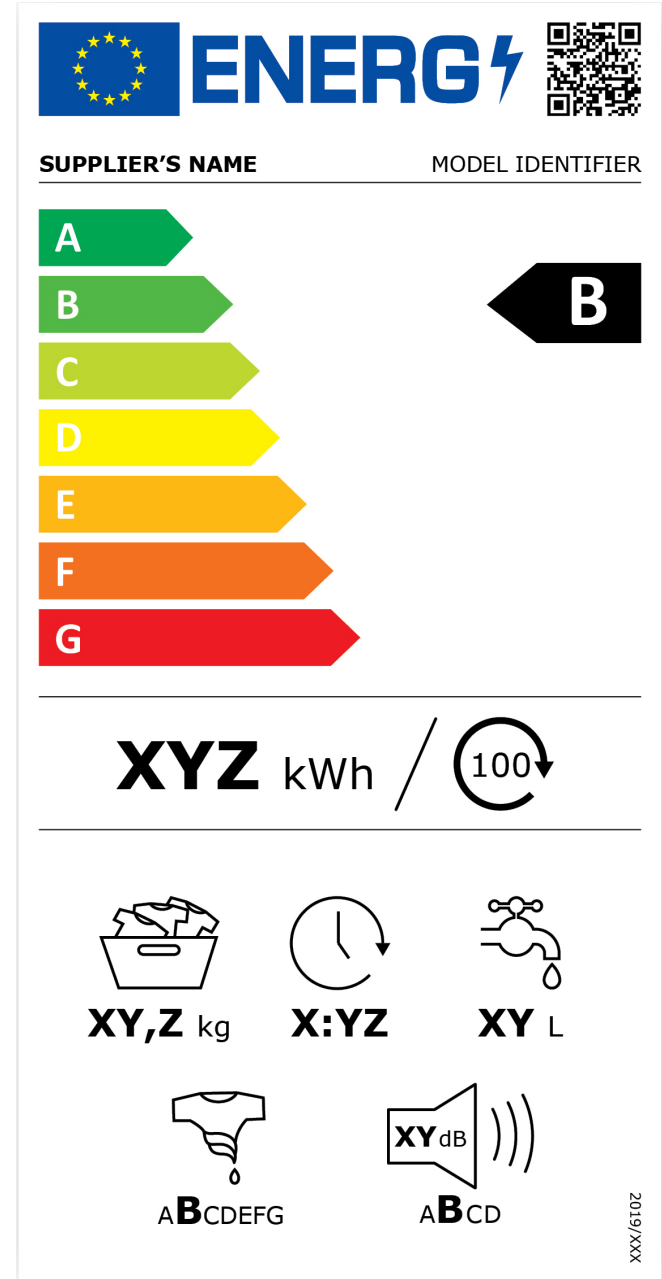


# Eindgebruik van Energie



# Efficiëntie

- “De beste (goedkoopste) kWh is degene die je niet hoeft te produceren”
- Hoe verbeteren?
  - Consumenten (en ook bedrijven) denken niet steeds in termen van “total cost of ownership”; of zijn niet geïnteresseerd
    - Bewustwording via labelling
    - Afdwingen via standardisatie
    - Verbod verkoop/installatie inefficiënte technologie
  - Consumenten hebben niet altijd de mogelijkheid om een duurdere, zuiniger aankoop/investering te doen
    - Andere business modellen nodig: service- of deelmodellen



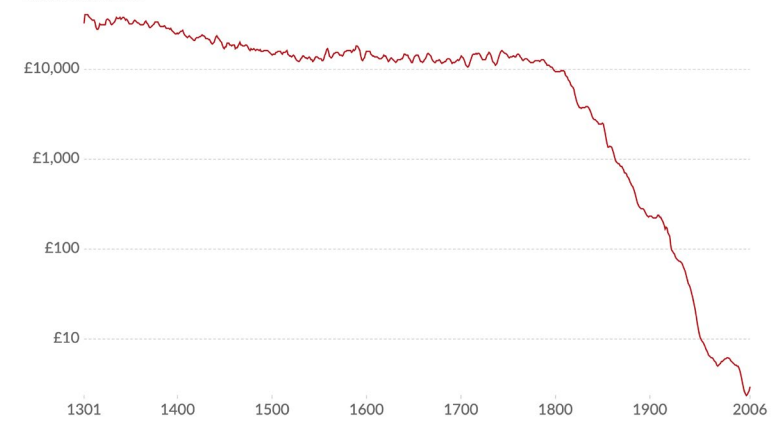
# Voorbeeld: Verlichting als een energiedienst

- Historisch: kaarsen → elektrisch licht (Edison)
  - ouderwetse gloeilamp : 40 W
  - “spaarlamp” : 10 W
  - LED-lamp : 5 W
  - Dus: een LED lamp verbruikt 8 maal minder stroom dan een gloeilamp (en gaat veel langer mee)
- Opgelet: **(p)rebound**-effecten
  - Directe rebound: “licht langer laten branden”
  - Indirecte rebound: geld over, iets anders mee kopen dat energie gebruikt
  - Preboud: armeren bespaarden reeds, daardoor overschatting



The price for lighting in the UK

The price per million lumen-hours in British Pound. 1 lumen hour is equal to the luminous energy emitted in 1 hour by a light source emitting a luminous flux of 1 lumen. For comparison: a standard 100W incandescent light bulb emits ±1700 lumen.



Source: Fouquet and Pearson (2012)

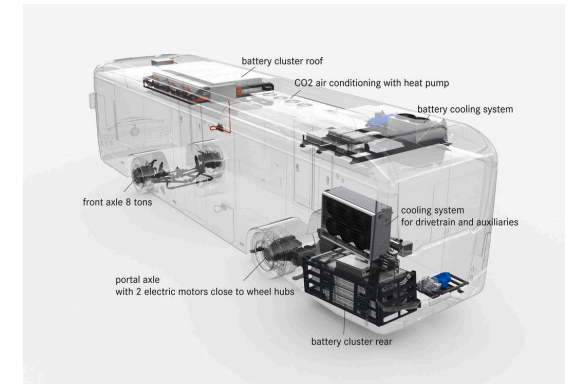
Note: The price is adjusted for inflation and expressed in prices for the year 2000. Shown is a 5-year moving average.

OurWorldInData.org/light/ • CC BY

# Mobiliteit

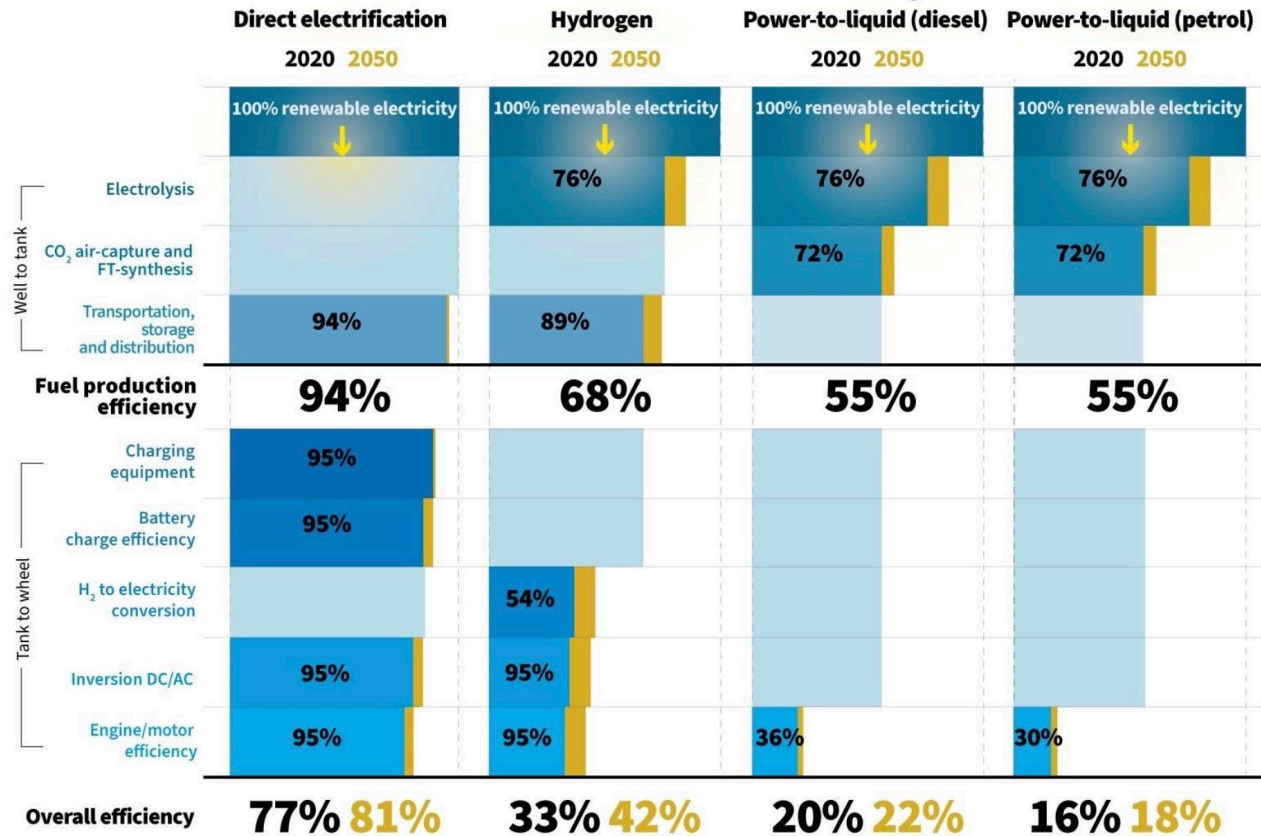
# Energiegebruik van transport: auto

- Benzine of diesel :
  - 4-5 l per 100 km
  - uitstoot aan de uitlaat: 100 – 120 gr CO<sub>2</sub> per km
- Elektrische auto
  - 15 kWh per 100 km
    - Eq. uitstoot met enkel fossiele centrales: 60 gr CO<sub>2</sub> per km
    - Eq. uitstoot met groene stroom: 0 gr CO<sub>2</sub> per km
  - Uitstoot is o.a. afhankelijk van moment van laden
  - Gewicht: nu nog licht hoger, binnenkort gelijk en lichter
  - Prijs: break-even nabij (omw. van batterijprijs)
- Elektrisch rijden
  - geen NO<sub>x</sub>, geen *fijnstof* uit uitlaat, *stiller*
  - Meer elektrisch verbruik: 5-10 TWh
  - Aangepast laadinfra nodig



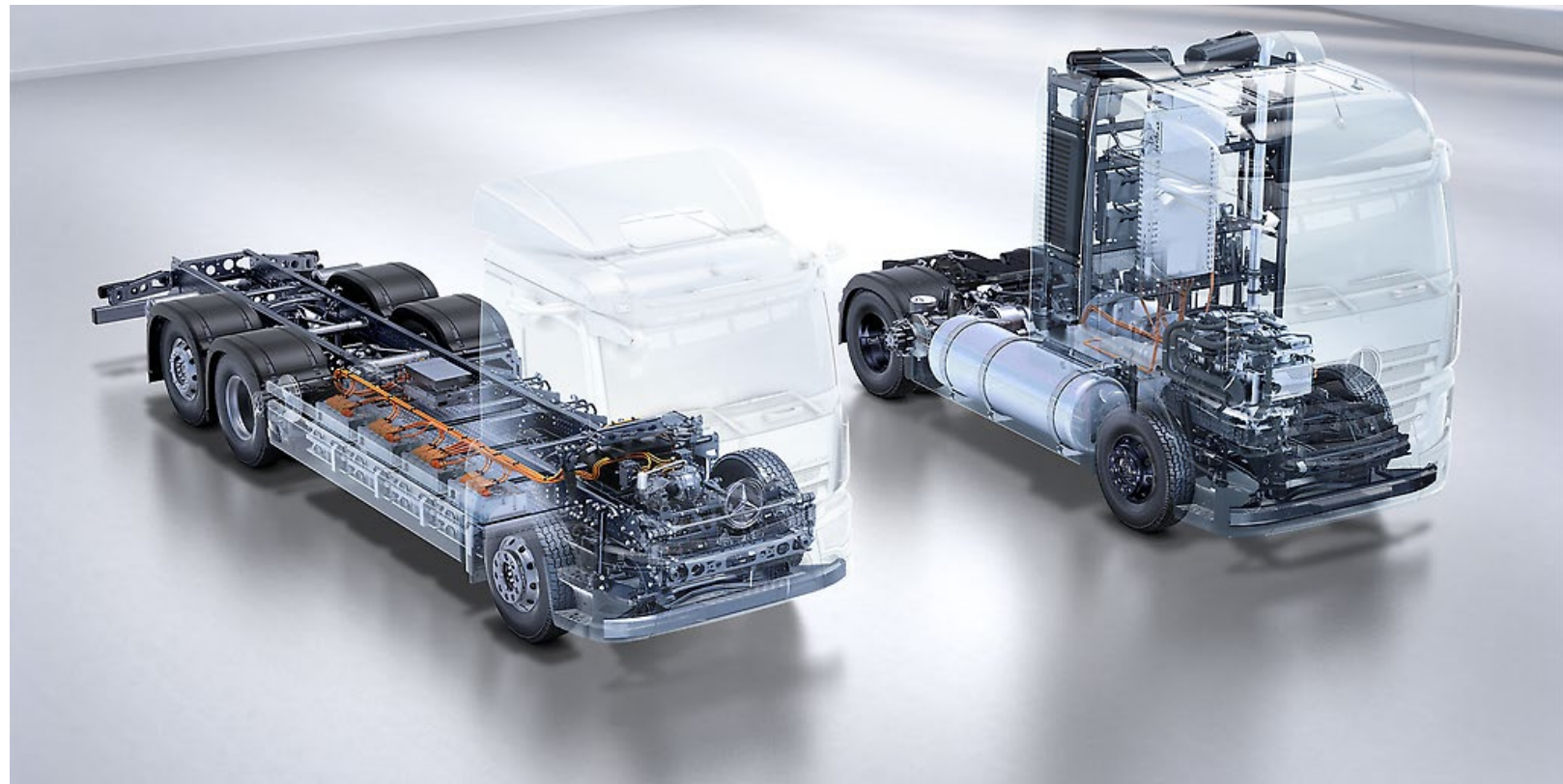
# “Propere brandstoffen”: wat zijn de mogelijkheden?

## Cars: direct electrification most efficient by far



Notes: To be understood as approximate mean values taking into account different production methods. Hydrogen includes onboard fuel compression. Excluding mechanical losses.

# Vrachtransport



- Elektrische range van 400km+ nu al mogelijk: voldoende voor bijladen in rusttijden of aan depot
- Ook stiller, geen NO<sub>x</sub>, fijnstof, enz.
- Waterstoftruck: nog nodig? Betaalbaar?
- Aangepaste laadinfra nodig: laadpunten van meer dan 1 MW
- Meer elektrisch verbruik: 20-30 TWh

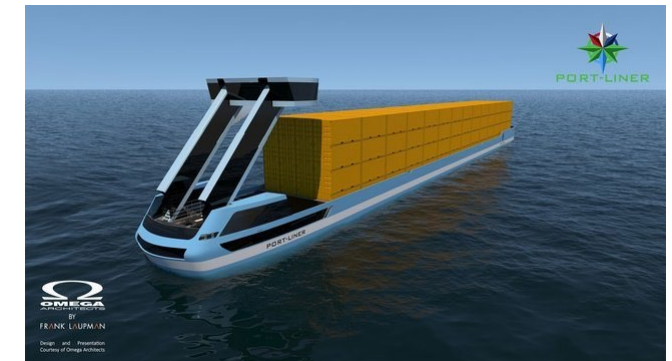
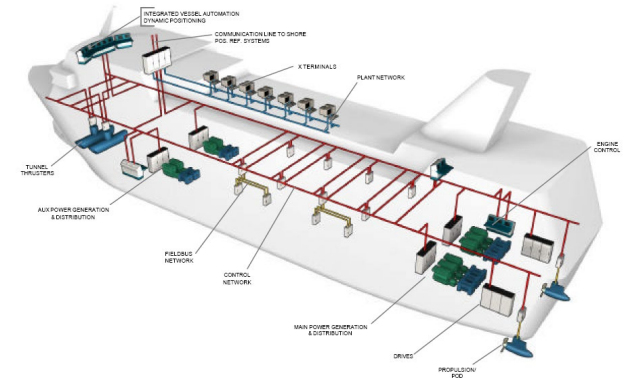
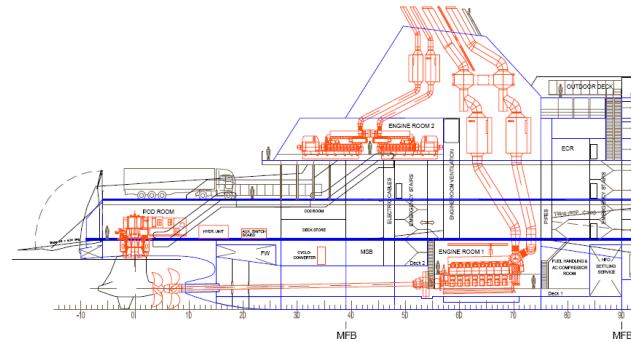
# Uitdaging: opladen EV's

- Laadinfrastructuur
  - Traag laden (<11-22 kW): voor thuisgebruik of bijv. bedrijfsparking
  - Snelladen (tot 350 kW): voor langere ritten (vakantie!) of “stedelingen” zonder eigen oprit/garage – de meerderheid van de autogebruikers
- Stroom genoeg?
  - Relatief beperkt tov totaal verbruik
  - Mogelijke bottleneck in lokaal distributienet (piekverbruiken), daarom:
    - slimme sturing nodig
    - correcte verdeling kosten netgebruik (bijv. aanrekenen werkelijke netkosten)



# Elektrische schepen ?

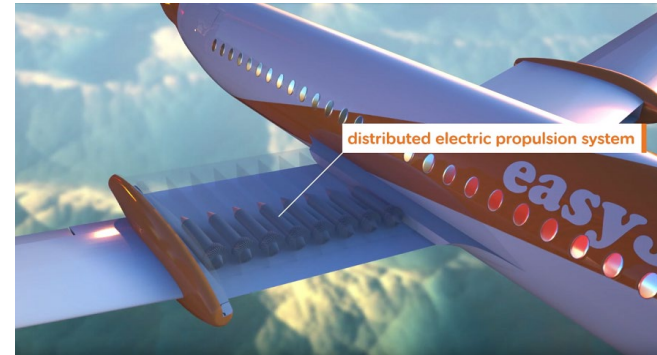
- Korte afstand: vol elektrisch
- Lange afstand: hybride op basis van methanol uit waterstof (P2X), synthetische fuel of ammoniak ( $\text{NH}_3$ )





# Elektrisch vliegen ?

- Korte afstand: vol elektrisch (<1000km?), eerste toestellen gedemonstreerd en te koop
- Lange afstand
  - hybrides
  - naar synthetische fuel (P2X)



# Energievraag van gebouwen

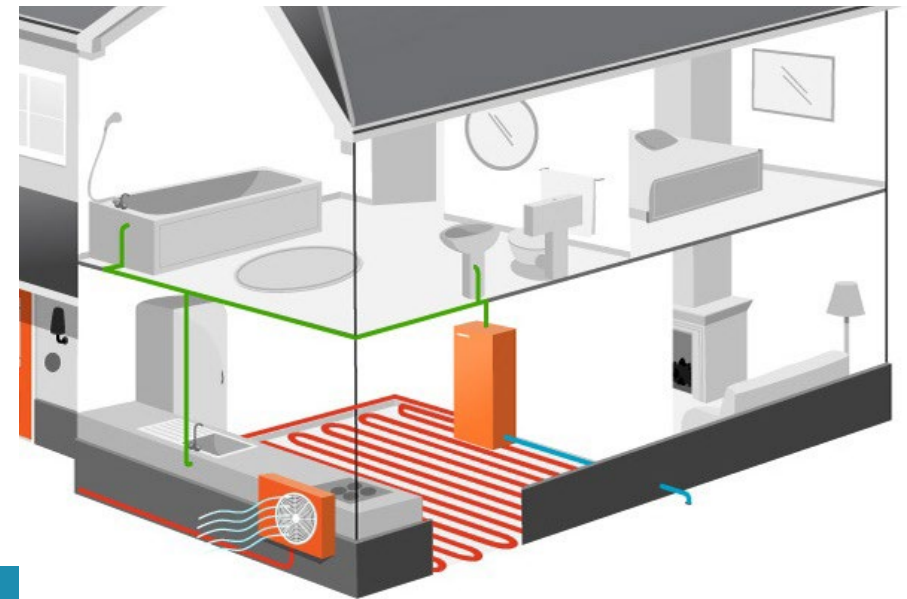
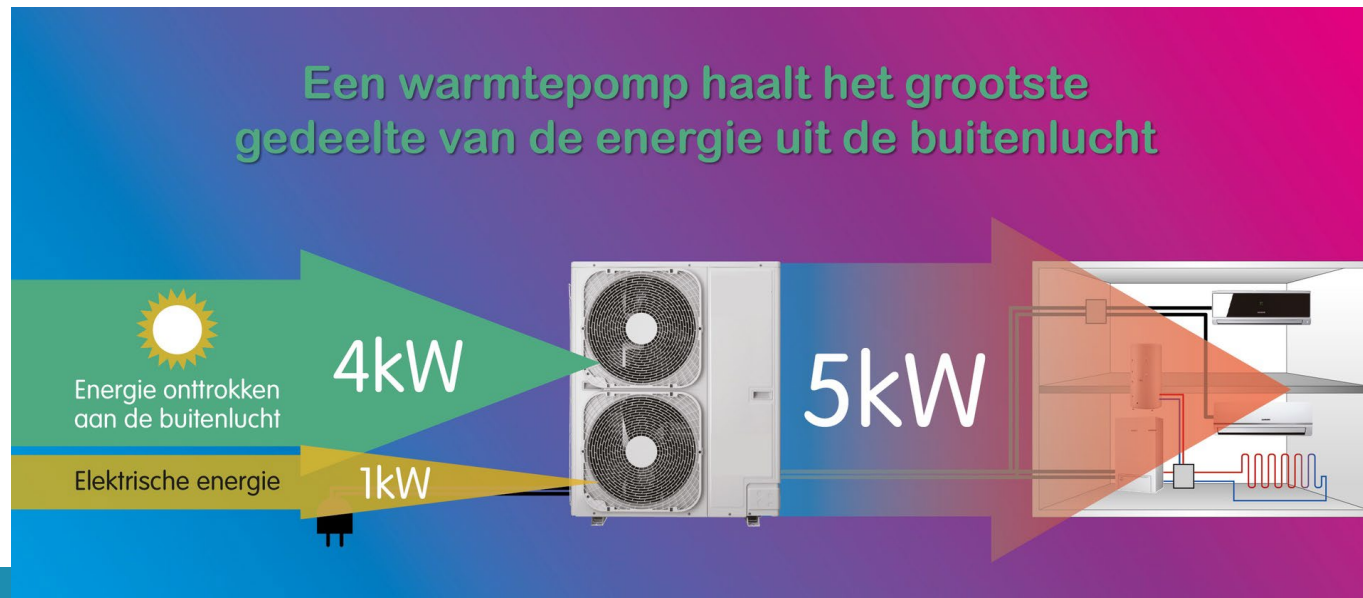
# Energiegebruik van “een huis” ?

- Standaard elektrische aansluiting huis: gem. 10 kVA (max. kW)
- Jaarverbruik elektrische energie: ongeveer 4 MWh
- Jaarverbruik thermische energie: ongeveer 15 MWh (bijv. via aardgas)
- Efficiëntieprobleem:
  - Temperatuur gasvlam ( $1200^{\circ}\text{C}$ ) is veel hoger dan nodig ( $50\text{-}70^{\circ}\text{C}$ ); dit is een groot thermodynamisch verlies
  - Temperatuur warmtebron zou veel dichterbij temperatuur eindverbruik moeten liggen, bijv. warmtepomp

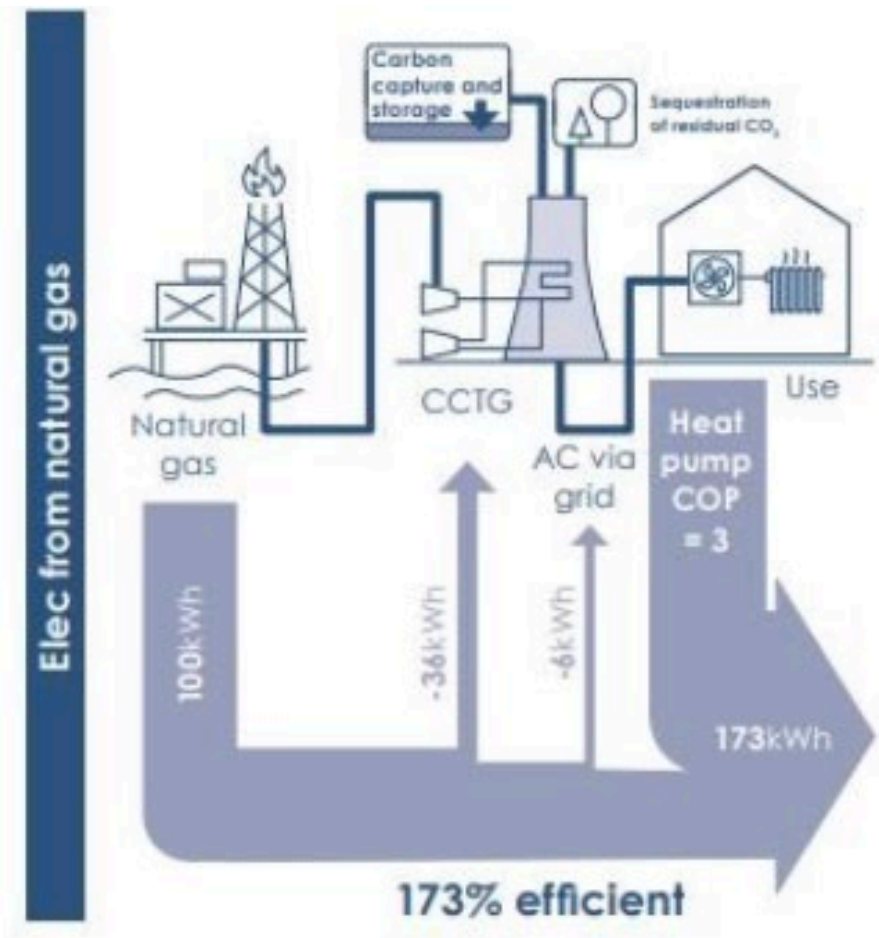
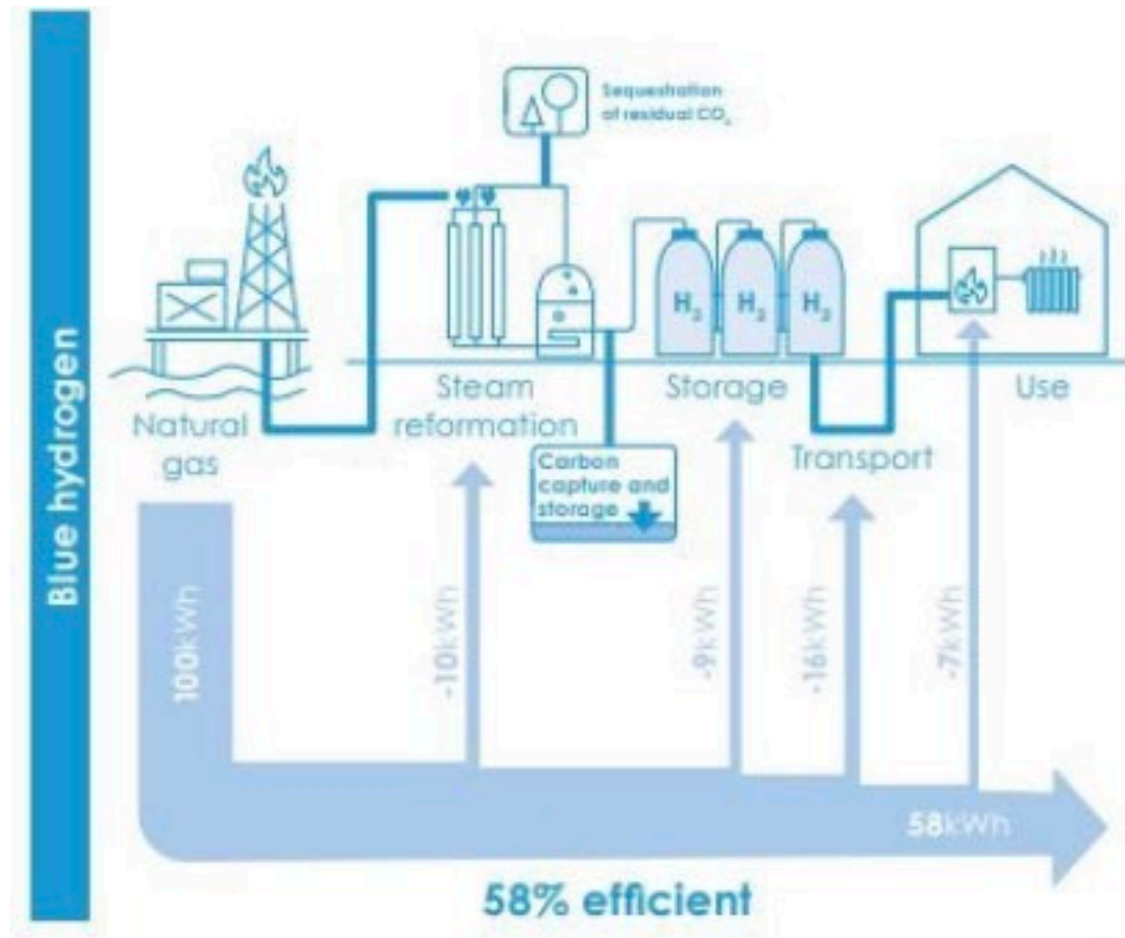


# Warmtepompen: efficiënt verwarmen

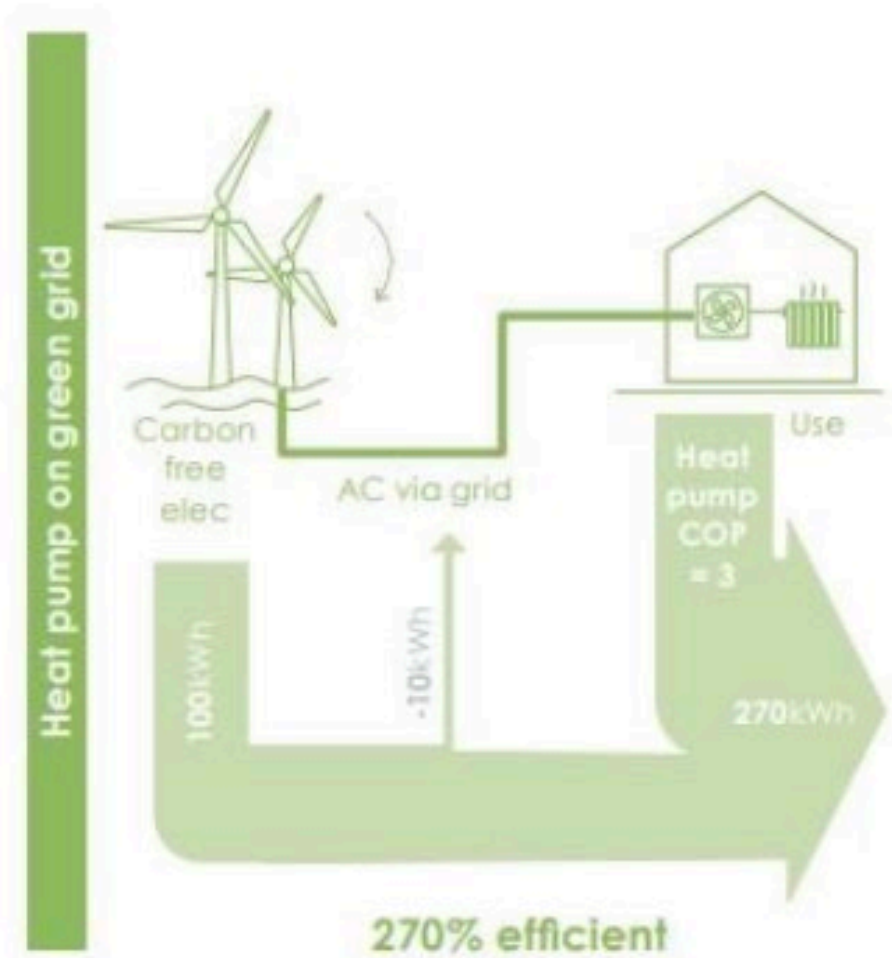
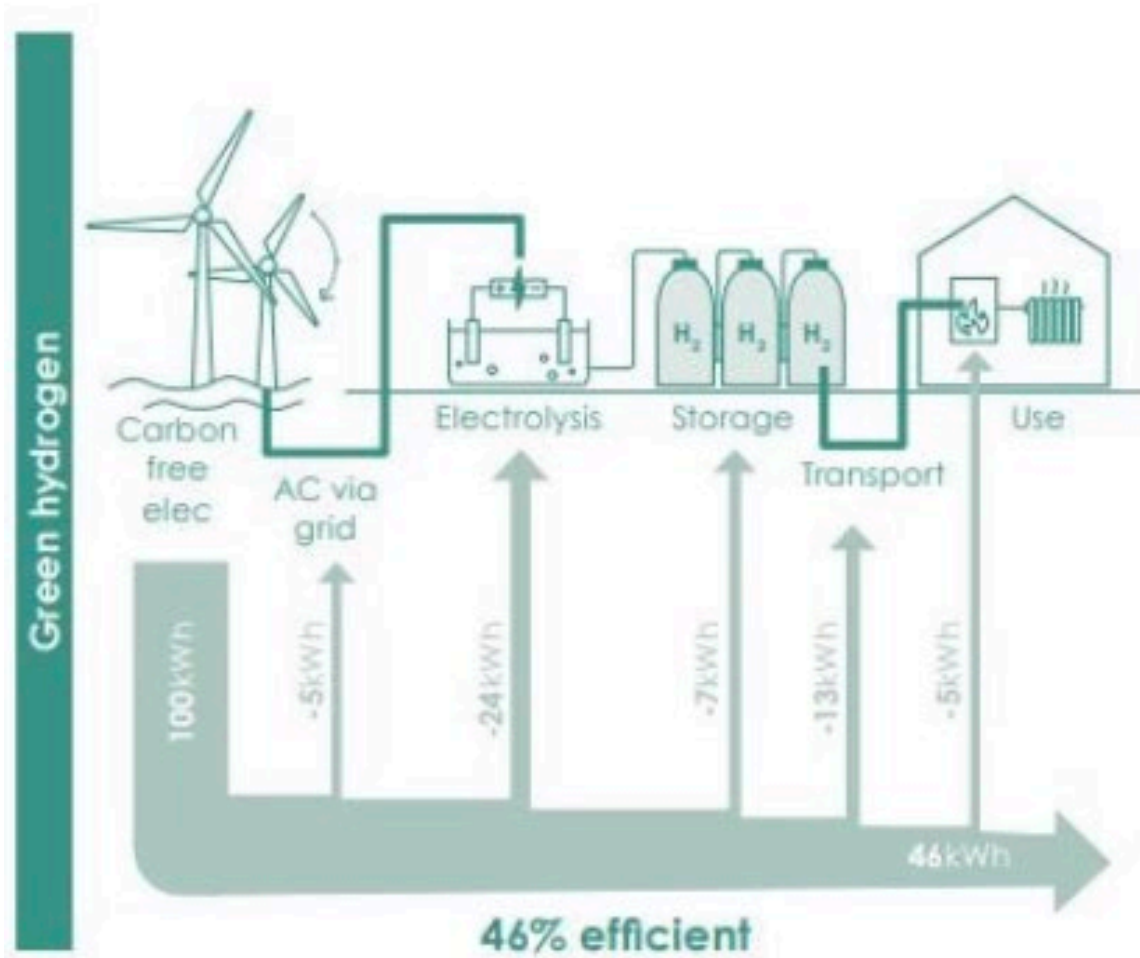
- Thermodynamische machine; “omgekeerde van koelkast”
- Voor elke kWh elektrisch verbruik, produceer je enkele kWh thermisch (verhouding: COP), onttrokken aan lucht, ondergrond, ...
- Geen schouw meer nodig
- Ook mogelijk bij renovatie (altijd goed isoleren!)



# Verwarmen met “blauwe” H<sub>2</sub>: probleem efficiëntie



# Verwarmen met “groene” H<sub>2</sub>: probleem efficiëntie

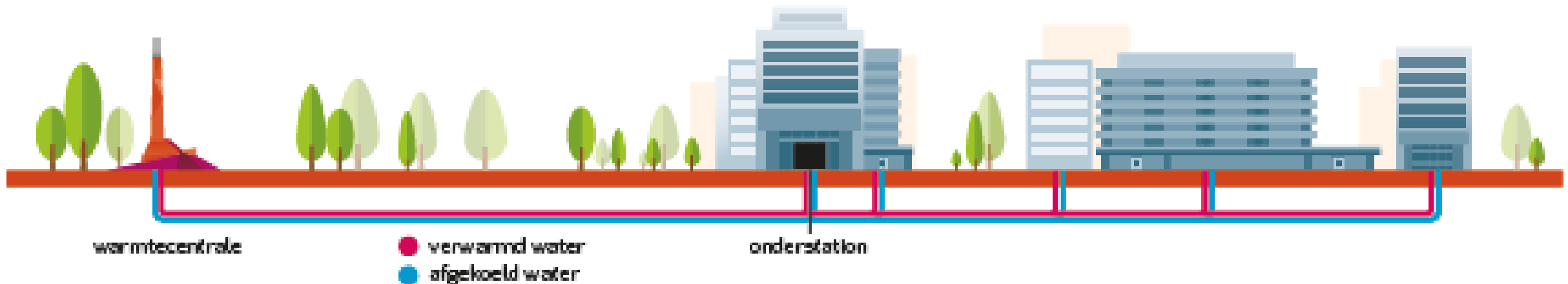


# Opportuniteit: warmtenetten

- Distributie warm water vanaf lokale warmtebron, bijv. “restwarmte”
- 30-90 grC

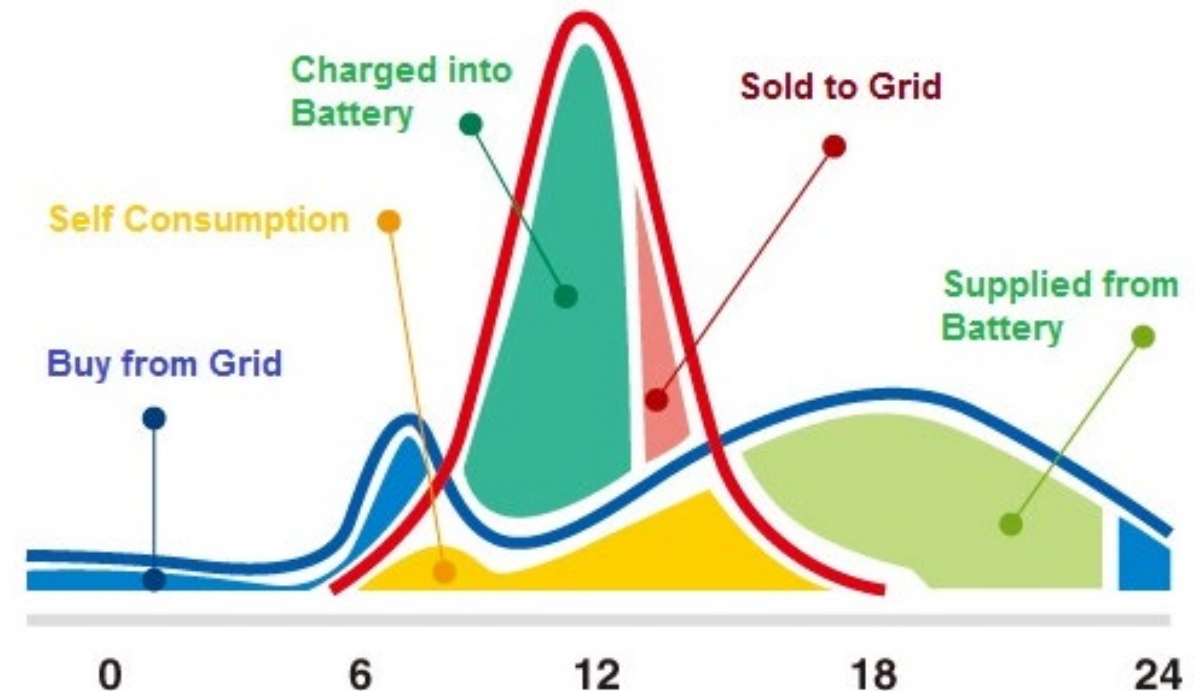


Warmtenet Antwerpen-Zuid



# Probleem: mismatch PV-productie en verbruik

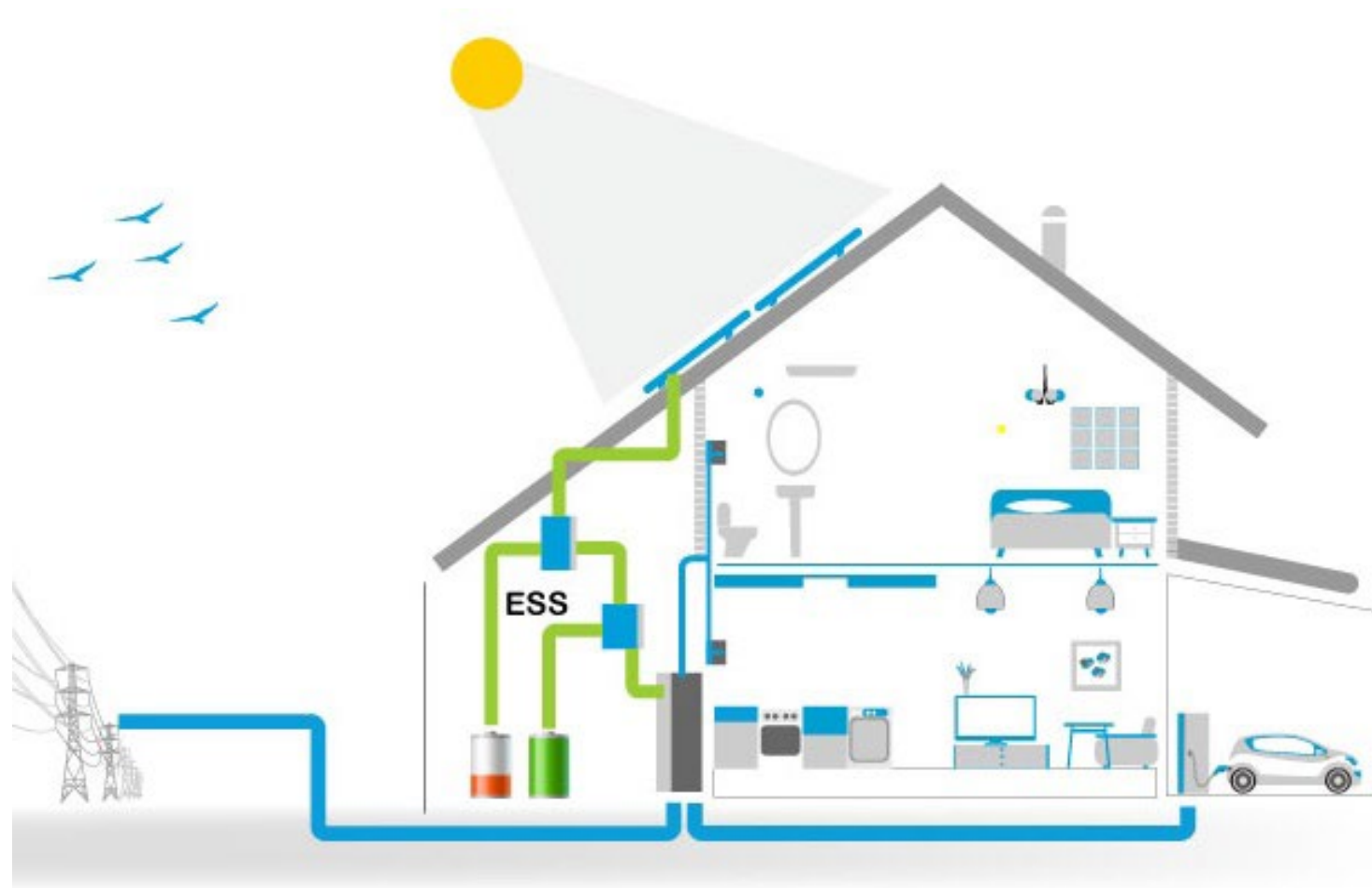
- Onbalans
  - PV-productie: rond midden van de dag
  - Verbruik: ochtend- en avondpiek
- Vroeger geen probleem, want “terugdraaiende teller” = gebruik elektriciteitsnet als (ongelimiteerde, gratis & perfecte) batterij
- Flexibiliteit nodig
  - Stuurbare lasten: bijv. warmtepomp maakt warm water en buffert in vat
  - Ladende elektrische auto: tijd genoeg
  - Eventueel thuisbatterij (ook nuttig om piekverbruiken te beheersen)





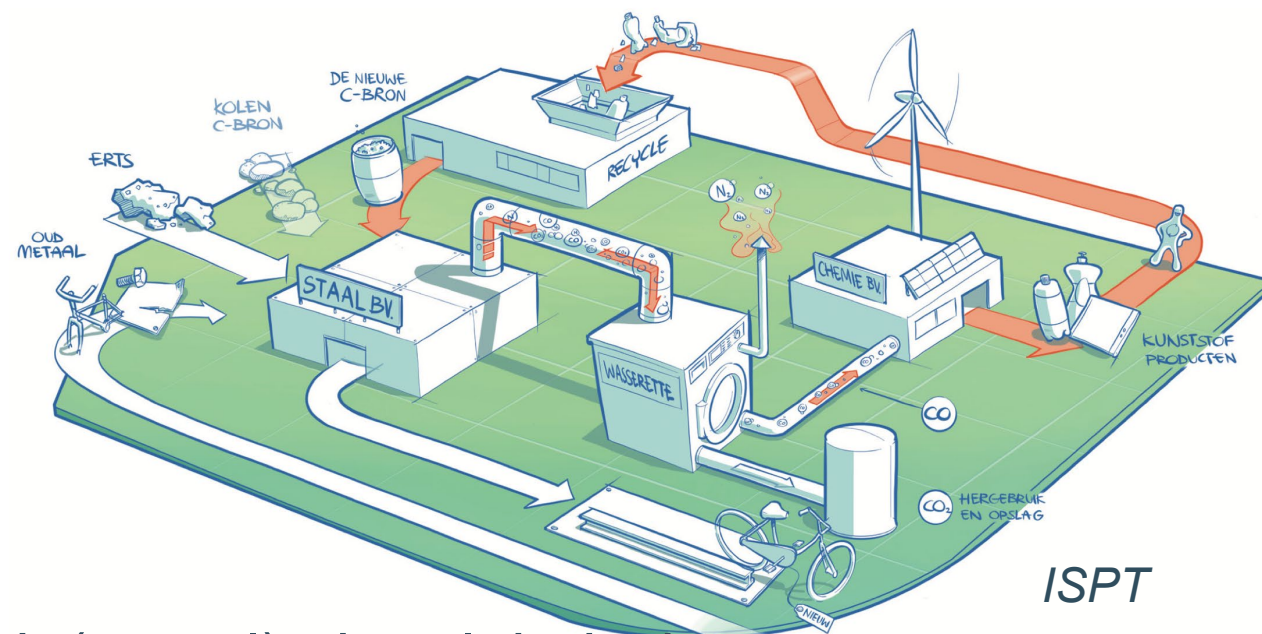
# Het moderne energie-gebouw

- Isolatie!
- PV op dak, misschien ook tegen gevel, in glas, ...
- Geen schoorsteen
- Warmtepomp, flexibel gestuurd
- Elektrisch auto (als mogelijk), slim ladend
- Energie-opslag: batterij + thermisch?
- Uitwisseling in lokale energiegemeenschap?
- Probleem: renovatiesnelheid is 1-2% per jaar... veel te traag



# Industriële processen

# Industrieel verbruik



- Zeer groot aandeel energieverbruik, ook (vooral) niet-elektrisch
- Brandstof is ook grondstof voor  $C$ ,  $H$ , ...
- Deel van transitie naar *circulaire* economie
- Nog veel procesinnovatie nodig
- Onderhevig aan ETS, dus verhuizen binnen Europa helpt niet voor klimaat
- Voorbeelden: staal-, cement-, meststofproductie, ook voedselproductie

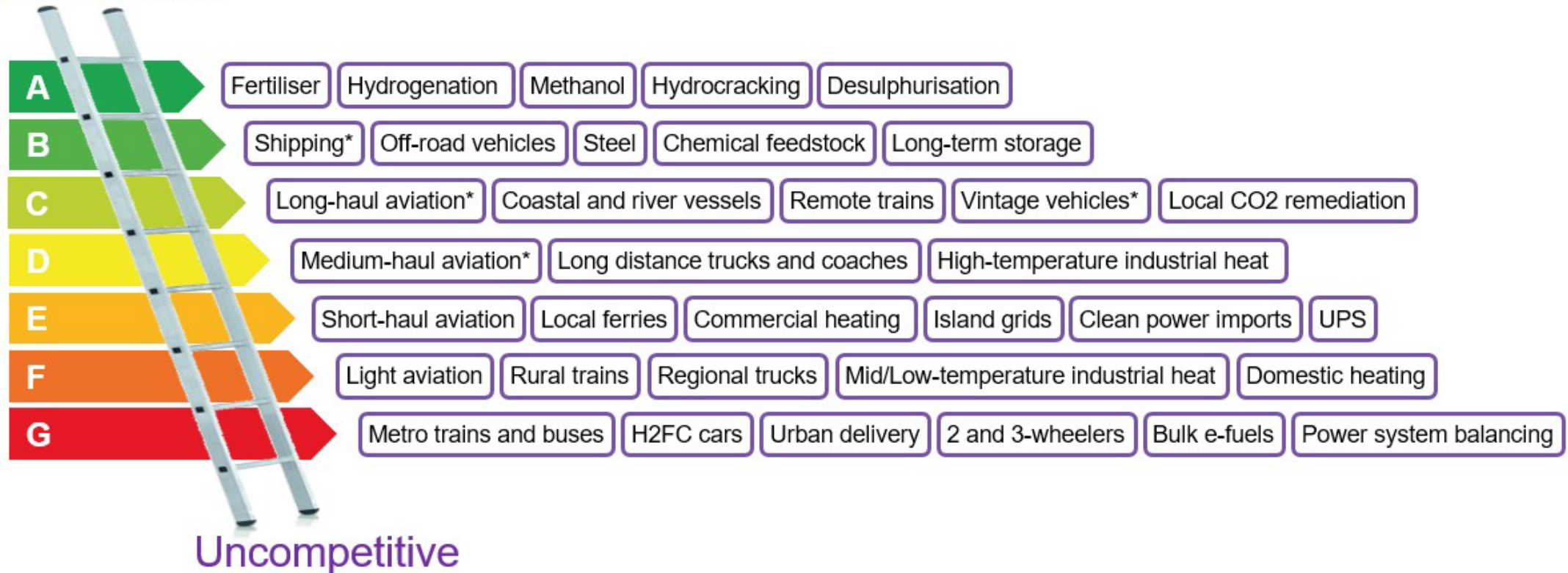
# Voorbeeld: staalproductie



- Staal = ijzer(erts) + koolstof
- Directe reductie van ijzererts, door gebruik van stroom en  $H_2$  (hoge temperatuur)
- Directe reductie vraagt 3200 kWh/ton extra elektriciteit, incl. 2600 kWh/ton voor  $H_2$  hydrogen → ongeveer eq. jaarverbruik gezin
- Bron van koolstof: bijv. deels uit afval, “direct-air-capture” technieken; vraagt ook extra energie
- 169 Mton staal per jaar in EU, zou 540 TWh elektriciteit nodig hebben om 198 TWh eq. fossiele brandstof te vervangen

# Waterstofladder

Unavoidable

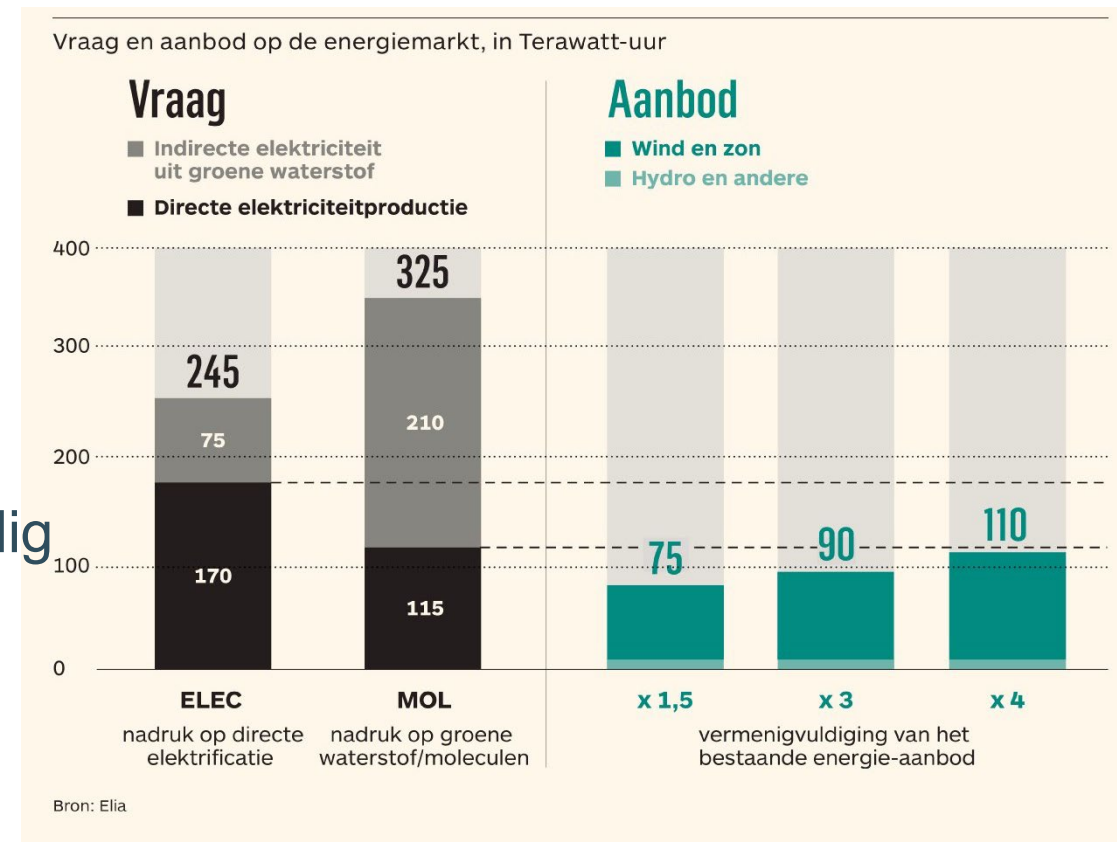


\* Via ammonia or e-fuel rather than H2 gas or liquid

Source: Liebreich Associates (concept credit: Adrian Hiel/Energy Cities)

# Voorspellingen bijkomend elektriciteitsverbruik

- Elia voorspellingen voor 2030
  - Op basis van investeringen in industrie
  - 2019: 40 TWh (ongeveer 50%) industriële vraag
  - → 60 TWh in 2030 (+50%) door directe electrificatie (zonder H<sub>2</sub>-productie!)
- Tegen 2050 (Plan bureau 2020, Elia 2021, EnergyVille/Vito PATHS 2050)
  - Mogelijk 80 GW extra stroomproductie nodig (nu: 27 GW)
  - <https://perspective2050.energyville.be>
- Daarom: *realistisch om alle H<sub>2</sub> hier te maken?*
- "Overschotten" elektriciteit voor elektrolyse uiterst onwaarschijnlijk; grootschalige import van "groene molecules" lijkt waarschijnlijker



# Herkomst van de elektriciteit

# Hernieuwbare energie

- Wind
  - Zon (thermisch, fotovoltaïsch)
  - [Waterkracht]
  - [Aardwarmte]
- 
- In principe onuitputtelijk:  
“*hernieuwbare*” energie
  - *Lokale* bronnen (geen import)



(a)



(b)

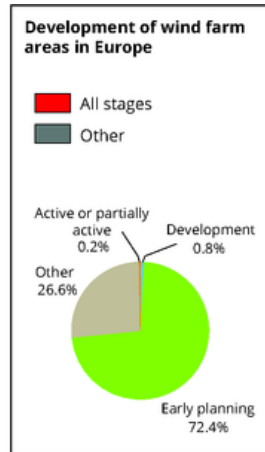
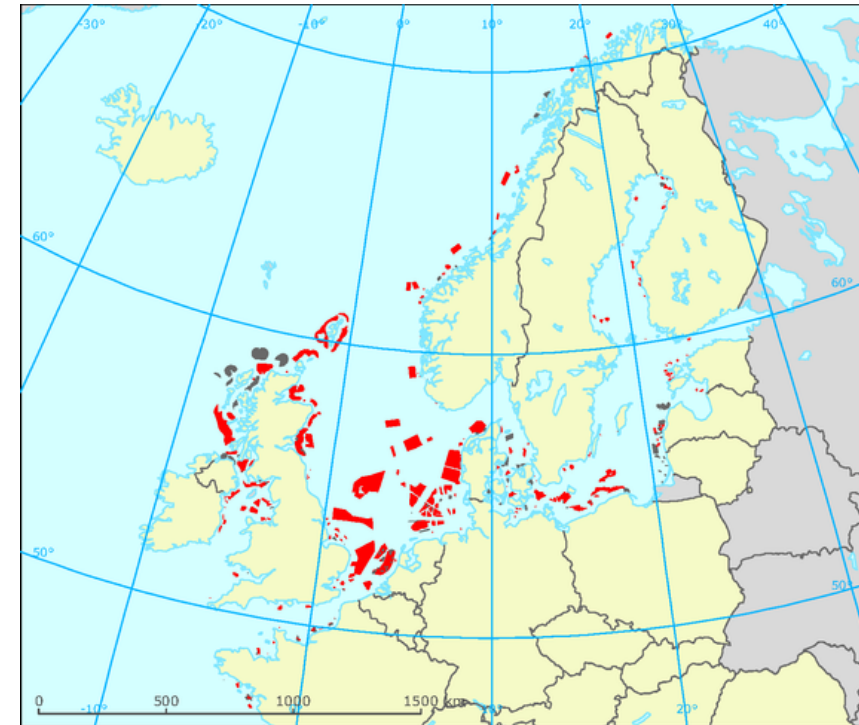
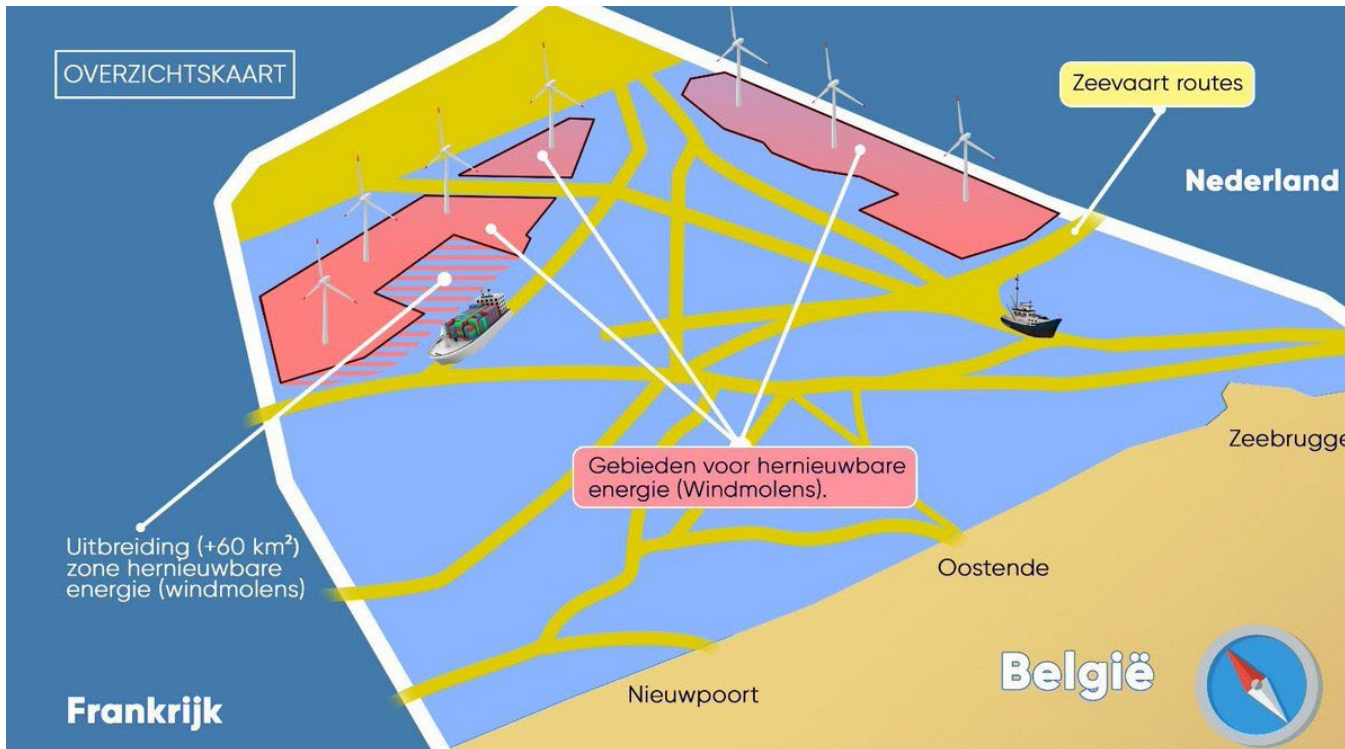


# HE op zee

Offshore wind



Floating PV

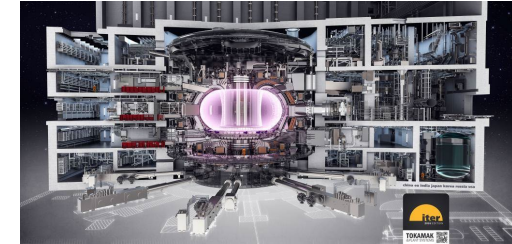


# Nucleaire energie



## kernsplijting

- Thermische energie uit splitsing zware kernen, bijv. van U, Pu, Th
- Elektriciteit uit stoomcyclus
- Reeds halve eeuw toegepast – einde levensduur eerste reactoren
- Afvalproblematiek
- geen CO<sub>2</sub>
- Oorsprong uranium?
- Niet erg dynamisch, tenzij kleine reactor



## kernfusie

- Thermische energie uit fusie lichte kernen (zoals de zon)
- Elektriciteit uit stoomcyclus
- Nog experimenteel, toepasbaar einde eeuw?
- Zeer dure proefinstallaties
- Beperkte(re) afvalproblematiek
- geen CO<sub>2</sub>
- Niet dynamisch
- Zeer grote centrales

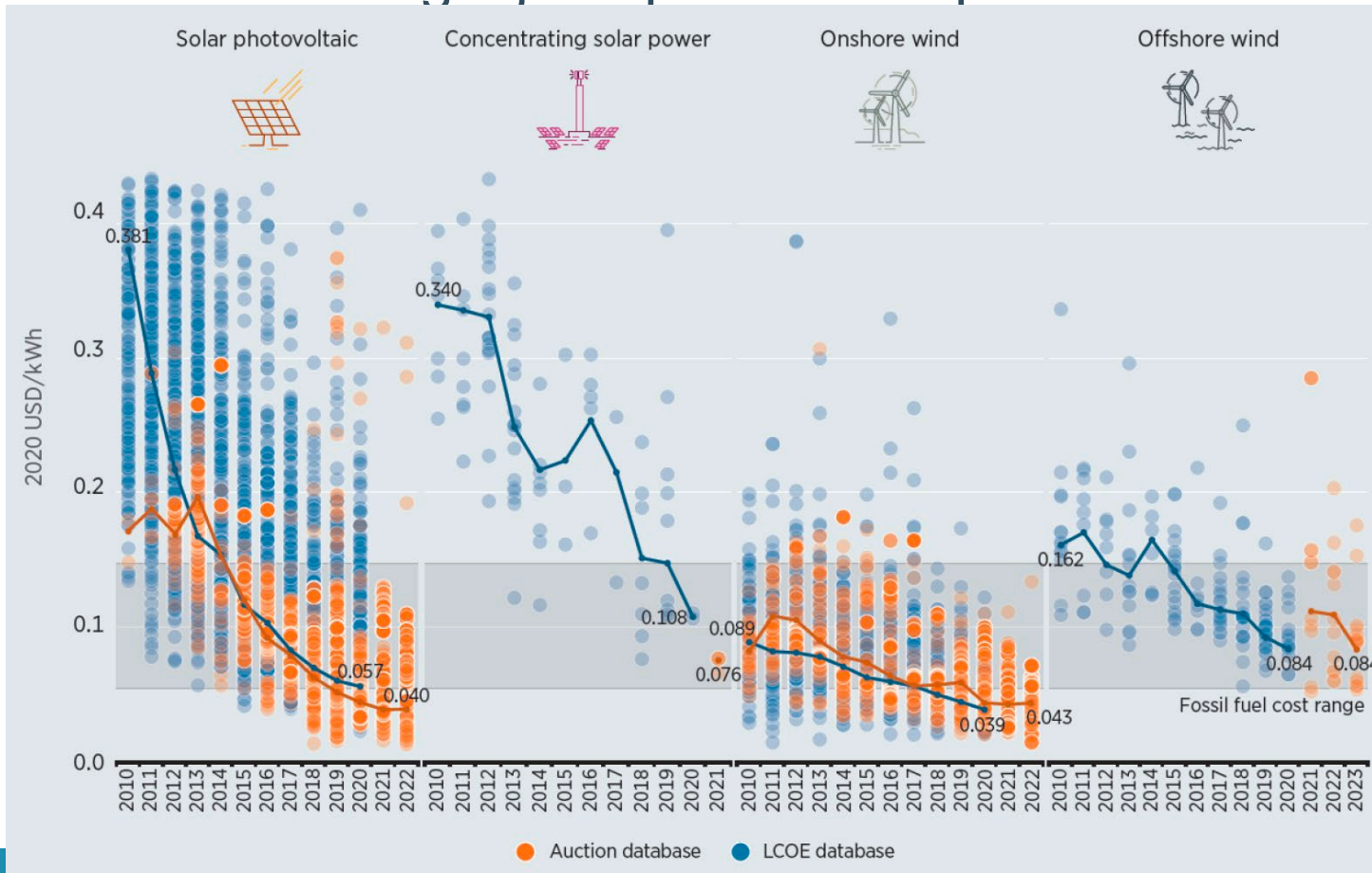
# Nucleaire energie *in de 2<sup>de</sup> helft van de 21<sup>ste</sup> eeuw*

- Levensduurverlengingen
  - veilig, maar “onbetrouwbaar”?
  - kosten (hoe duur??)
  - juridisch/wetgevend uitdagend
- Nieuwe “klassieke” (grote) kerncentrale
  - Duur >20 jaar om te bouwen (vergunningen!)
  - *Te duur tov alternatieven*
- Nieuwe soorten kleine modulaire kerncentrales (“SMNR”)
  - Nog veel onderzoek en pilootinstallaties nodig
  - Beperkte afvalvolume
  - Herkomst brandstof?
  - *Pas grootschalig te realiseren tweede helft deze eeuw?*
- Kernfusie
  - Pas te realiseren tweede helft deze eeuw
  - Extreem duur, te groot, te inflexibel?

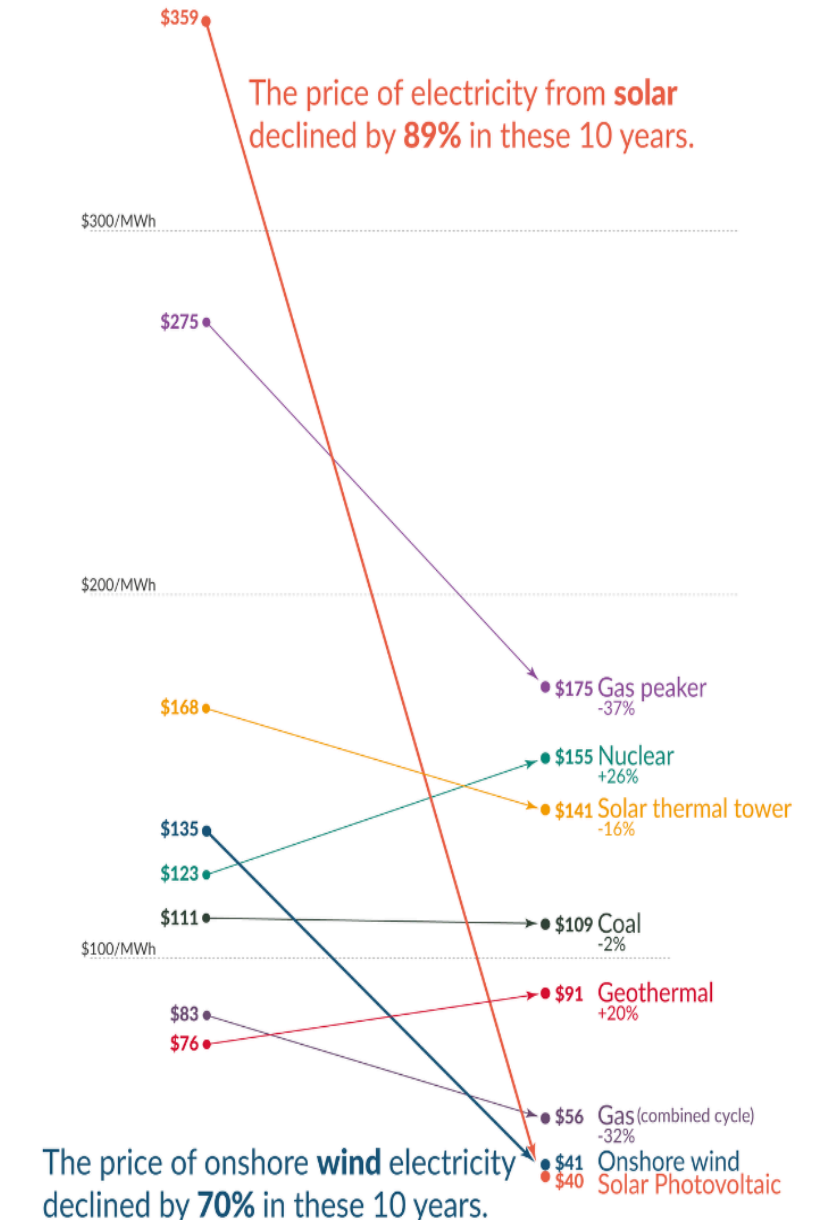


# Betaalbare energie?

- LCOE (levelized cost of electricity) om 'soorten' elektriciteit te vergelijken [ref. IRENA]



ongoing costs for fuel and operating the power plant over its lifetime.



The price of electricity from solar declined by 89% in these 10 years.

The price of onshore wind electricity declined by 70% in these 10 years.

# Maar wat doen we als de zon niet schijnt, en er geen wind is?

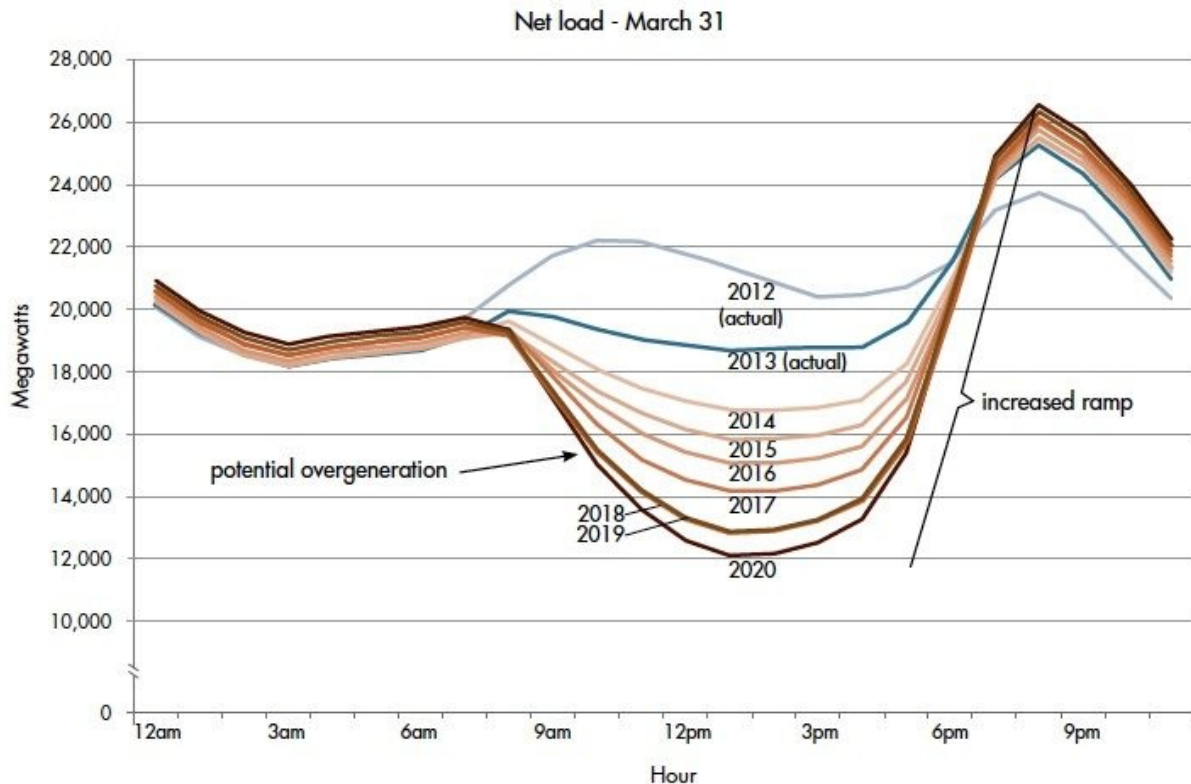


- Mix energiebronnen gebruiken
  - Zon + wind + ...
- Uitwisselen via elektriciteitsnetten
  - Met de burens
  - Met de buurlanden
- Energie-opslag
  - Batterijen!
- Gascentrale op synthetische brandstof?

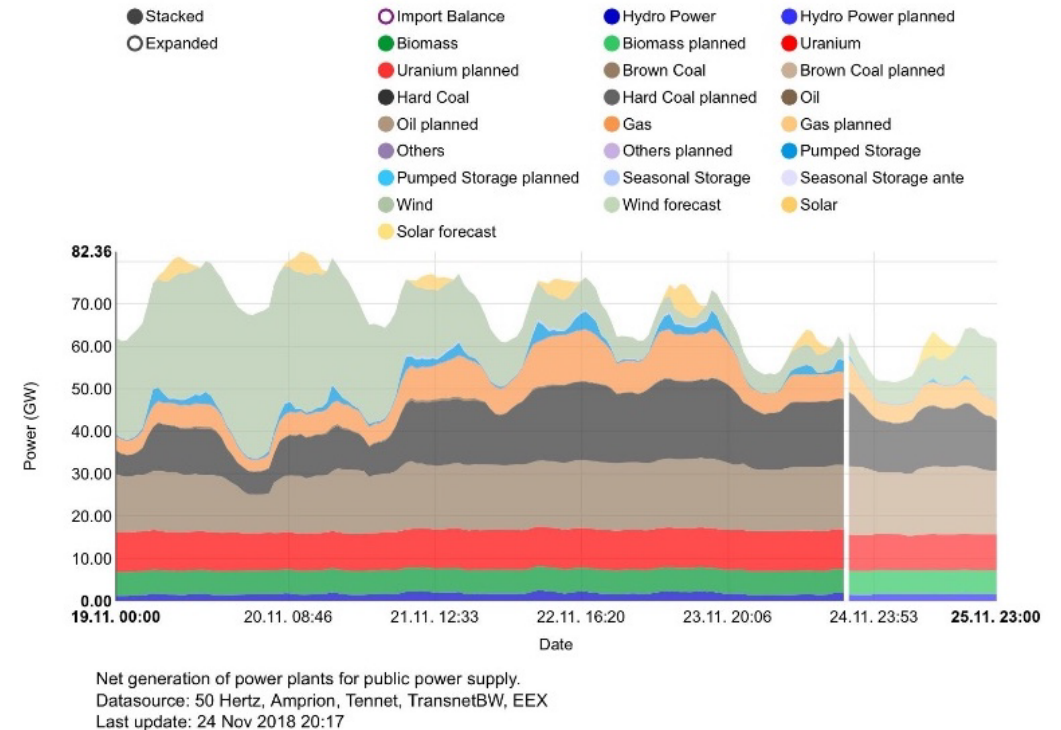


# Snelle & flexibele balancering nodig

- Systeemintegratie : nood aan flexibiliteit, sterk elektriciteitsnet en snelle dynamica



California “duck curve”: invloed groei PV

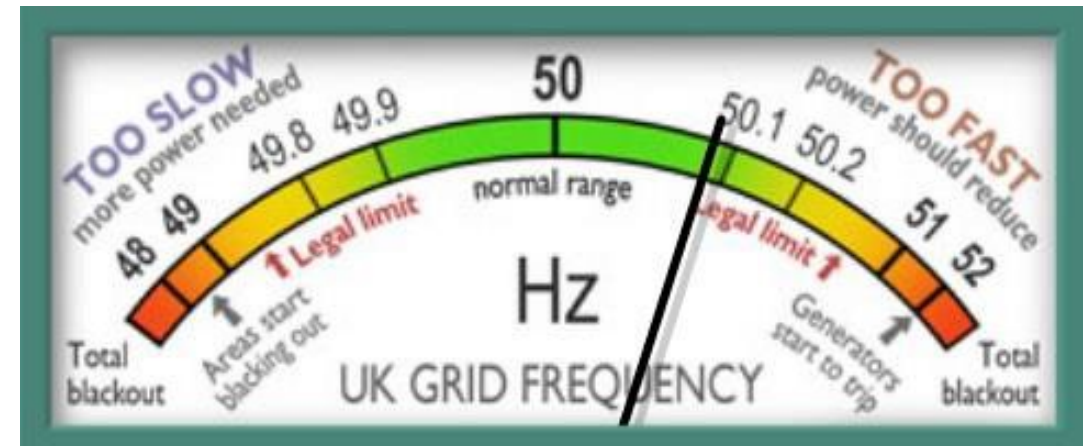


Duitsland (week 47, 2018): windstilte (“Dunkelflaute”)

# Ergienetwerken en -opslag

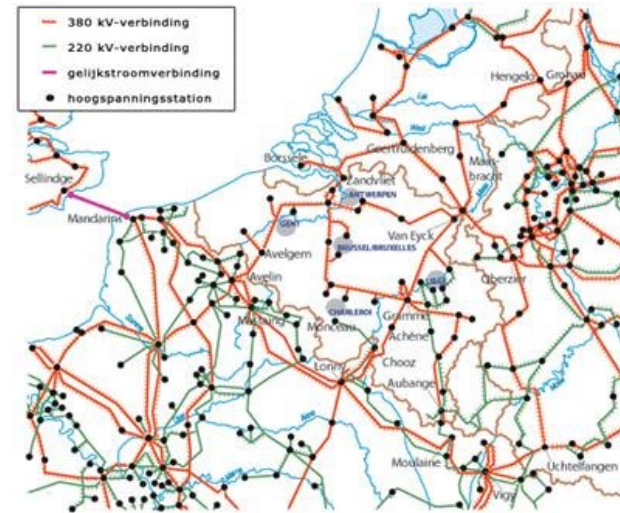
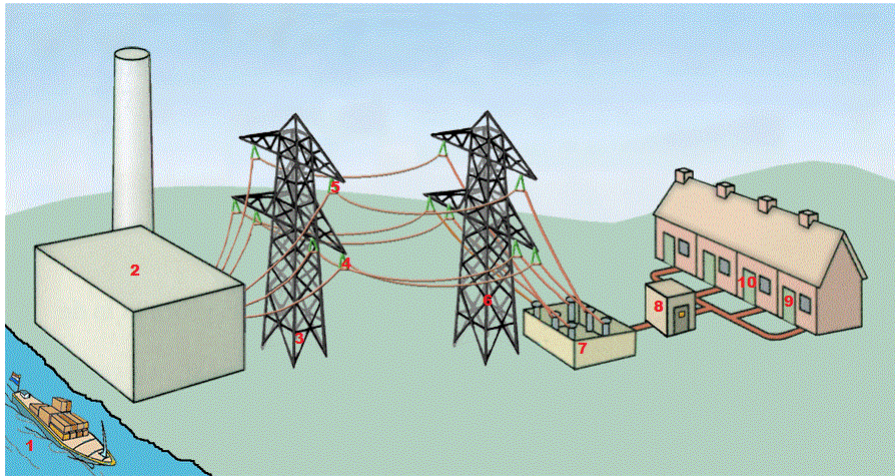
# Elektrische energie... steeds in balans

- Elektriciteit is een *secundaire* energievorm
  - niet “natuurlijk”
  - niet (eenvoudig) te stockeren
- Basisvereiste
  - **Productie = Consumptie**  
+ Verliezen tijdens transport (op elk moment)  
+ Opslag?

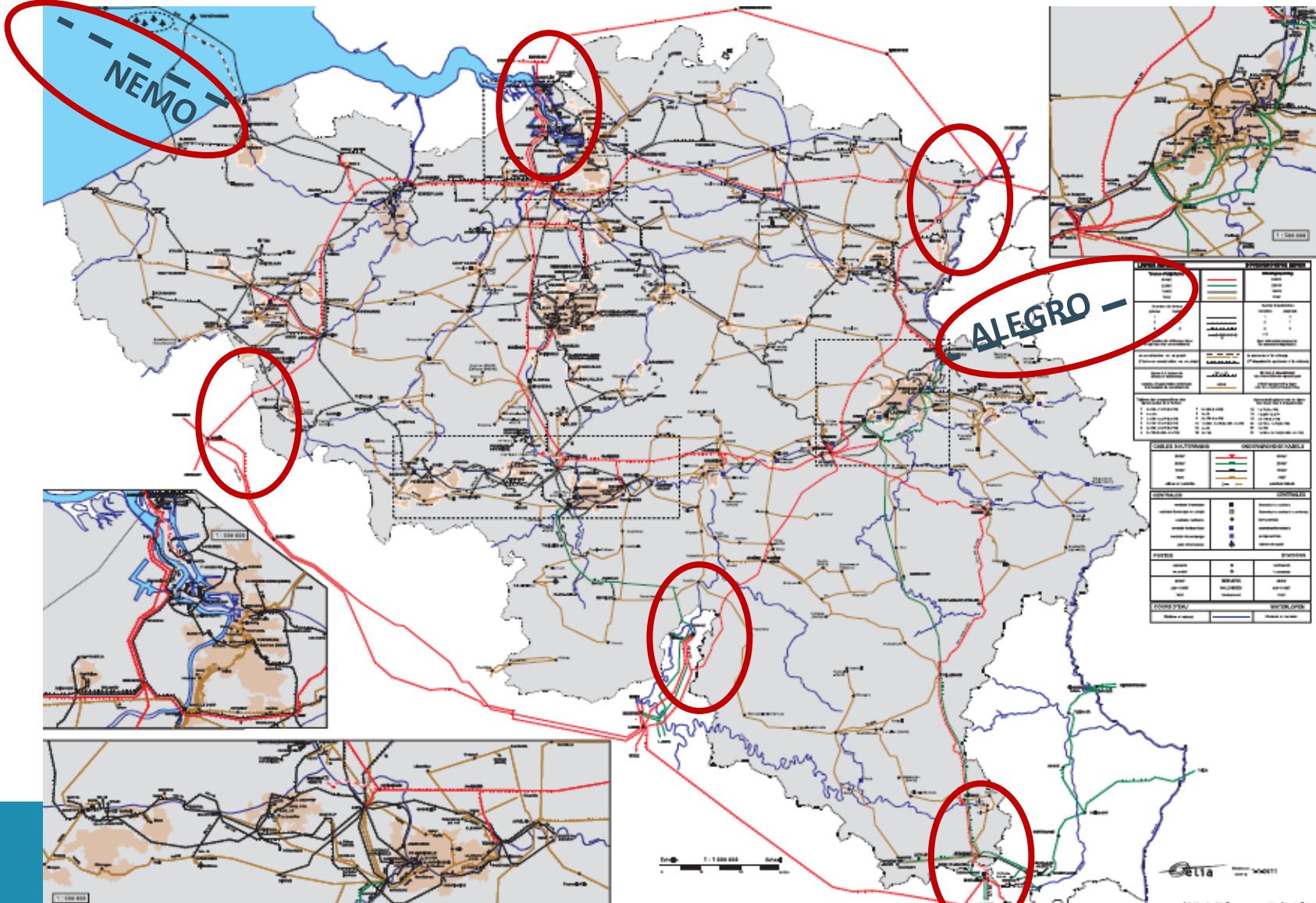




# Hoe geraakt elektriciteit tot in huis?



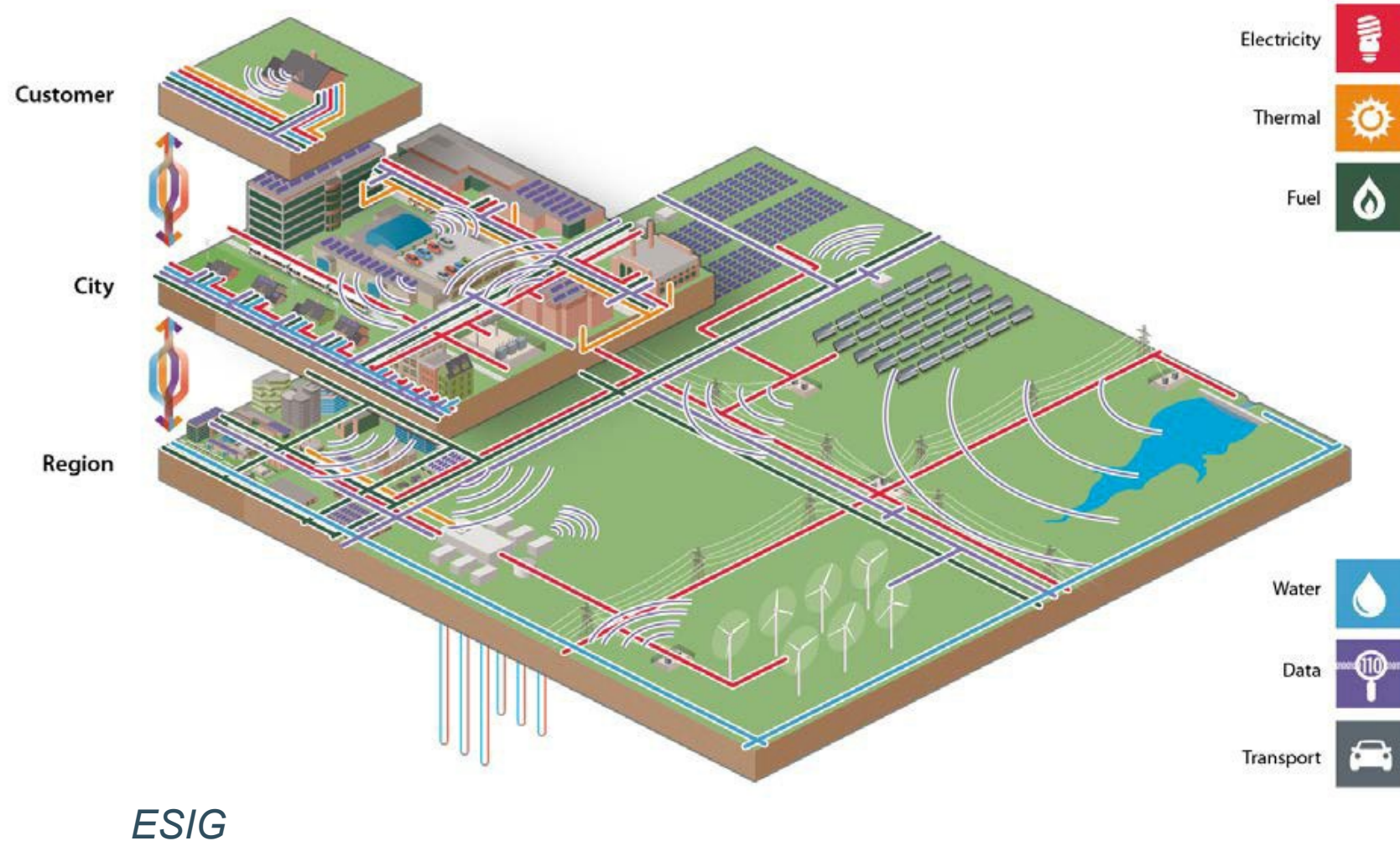
# Nationaal hoogspanningsnet



Elia

# Bronnen – eindverbruikers: verbindende netwerk(en)

- Elektriciteitsnet
- Warmtenet
- [Gasnet(ten)]
  
- Op verschillende schalen: straat, wijk, stad, regio, land, continent
  
- Noodzakelijk: datanetwerken



# Waterstof transport

## Electricity imports – hydrogen, ammonia, HVDC

Liebreich Associates

### Power – hydrogen – power



Electrolysis efficiency:	80%
Liquefaction efficiency	67%
Transport efficiency:	80%
Generation efficiency:	60%
<b>Total Efficiency:</b>	<b>26%</b>

### Power – ammonia – power



**Easier – but even less efficient**

Electrolysis efficiency:	80%
Haber Bosch efficiency:	70%
Liquefaction efficiency	90%
Transport efficiency:	90%
Generation efficiency:	50%
<b>Total efficiency:</b>	<b>23%</b>

### HVDC



**3.2 x as efficient**

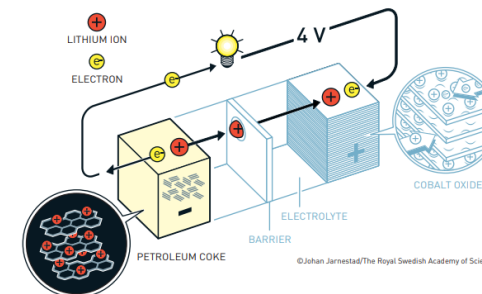
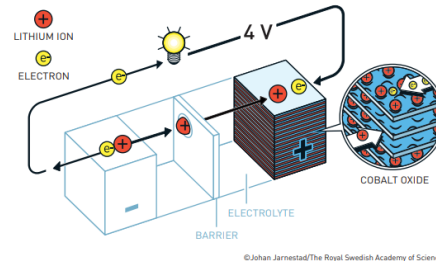
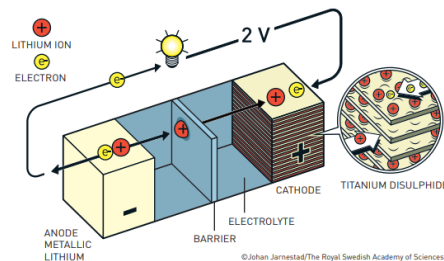
Conversion efficiency to HVDC:	97%
Transport efficiency (3% loss per 1000km)	88%
Conversion efficiency HVDC to grid:	97%
<b>Total efficiency:</b>	<b>82%</b>

Images: *Kawasaki Heavy Industries; NYK; Suncable* Source: Liebreich Associates

# Li-batterijen: de “missing link” in de energietransitie

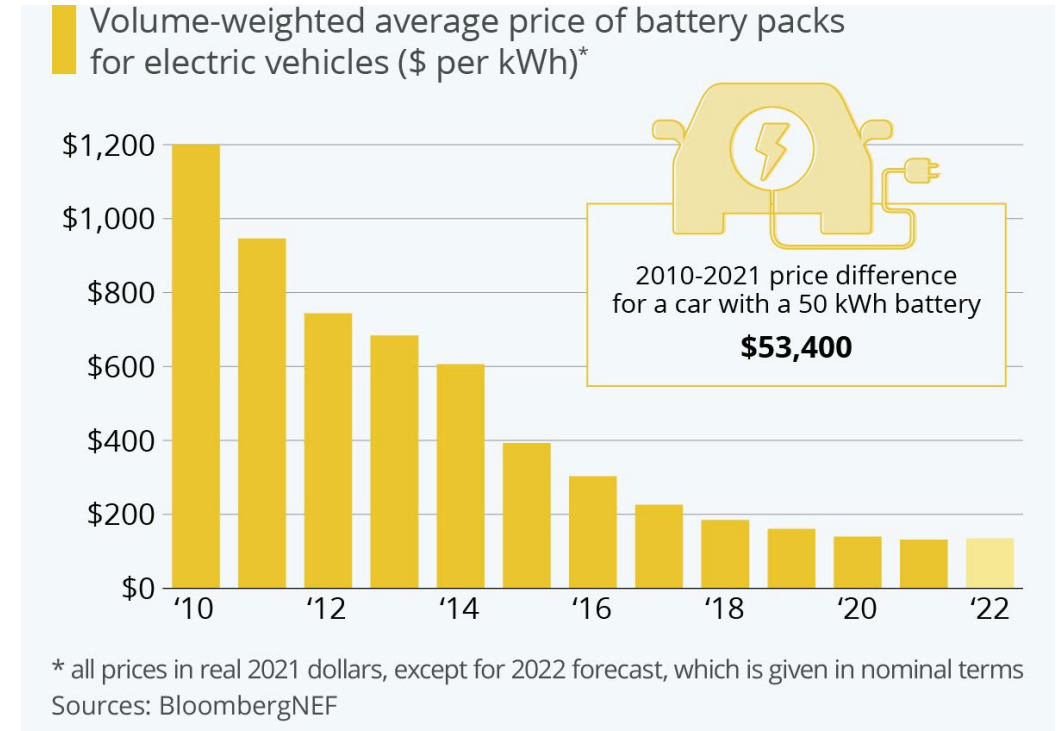


Nobel Prize in Chemistry 2019 for the development of lithium-ion batteries  
“They created a rechargeable world” (Royal Swedish Academy of Sciences)



# Batterijen: kritische blik?

- Prijs: sterk dalend
  - Op 10 jaar tijd, celprijs met factor 10 gedaald
  - Enorme opschaling productie in “gigafactories”
  - Gevolg: break-even prijs EV rond 2025 verwacht



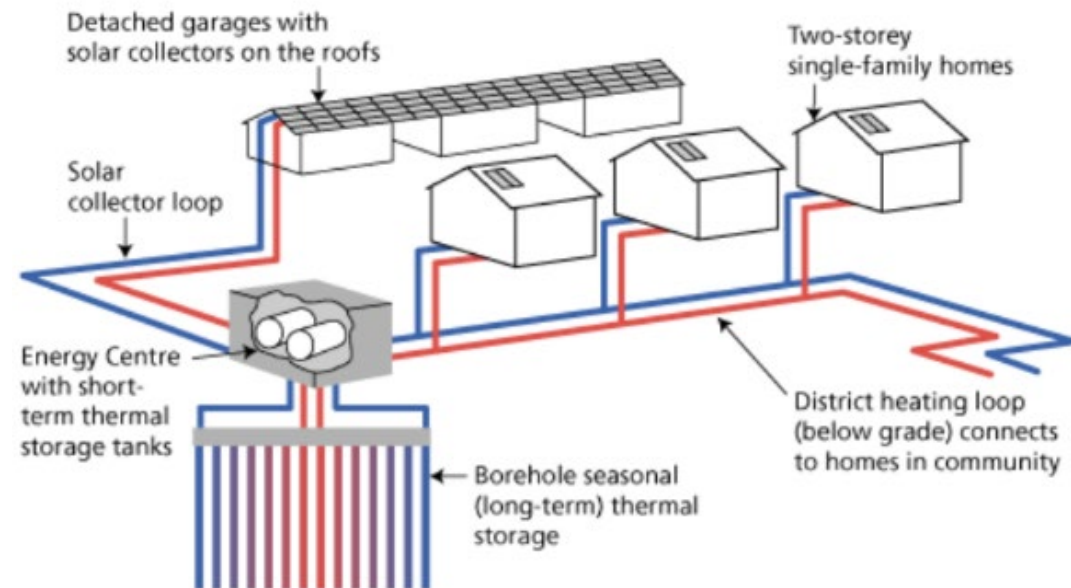
# Batterijen: kritische blik?



- Materialen: aandachtspunt
  - Kobalt: significante daling in gebruik (NMC → LFP types)
  - Ook nodig: Ni, mangaan, ... uit mijnbouw, maar mijnbouw Fe/Al/Cu en steenkool veel groter
  - Opportuniteit recyclage
  - Er lijken geen fundamentele tekorten, soms wel “strategische” problemen, maar vele alternatieve technologieën

# Thermische opslag

- onderdeel van warmtepompsysteem + ondergrondse opslag voor seizoensverschillen





# Tot slot

# Zal alles op elektriciteit werken?

- Als we maximaal willen decarboniseren... dan ja
  - Directe elektrificatie
    - Mobiliteit op land, sloop-/luchtvaart korte afstand
    - Verwarming gebouwen en industriële processen (lagere temperaturen)
  - Indirecte elektrificatie (via duurzame waterstof)
    - sloop-/luchtvaart lange afstand
    - Industriële processen op hoge temperatuur en/of als consument van “molecules”
    - NIET: gebouwenverwarming of korte afstand transport wegens inefficiënt en te duur

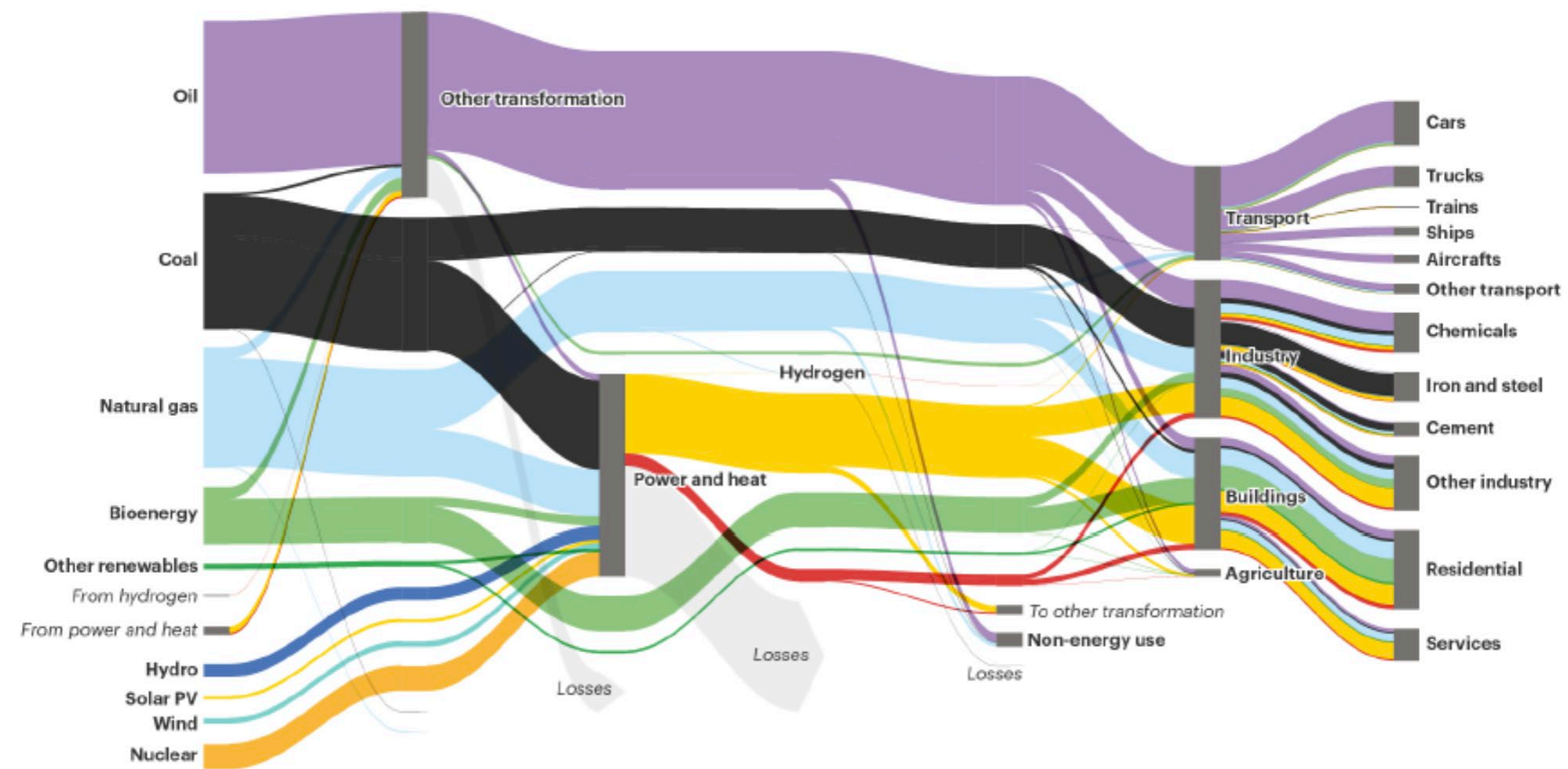


# “Competitie” tussen stroom en waterstof?

- Er is geen competitie; er is alleen complementariteit: geen of-verhaal, maar een en-verhaal
- Er zijn enorme hoeveelheden elektriciteit nodig, hoe dan ook
- Er zullen geen hoeveelheden stroom over zijn om hier alle waterstof mee te maken
- Verspil geen stroom of waterstof aan inefficiënte toepassingen
- Er zijn grenzen die we moeten bewaken:
  - Netwerken: elektriciteit + import van ‘moleculen’
  - Materialen: circulariteit
  - Economische modellen om de transitie voor iedereen mogelijk te maken
  - Human capital: opleiding technici, enz.
- De economische en sociale (jobs) impact van de energietransitie is te groot om ons te verliezen in emotionele of symbolische discussies

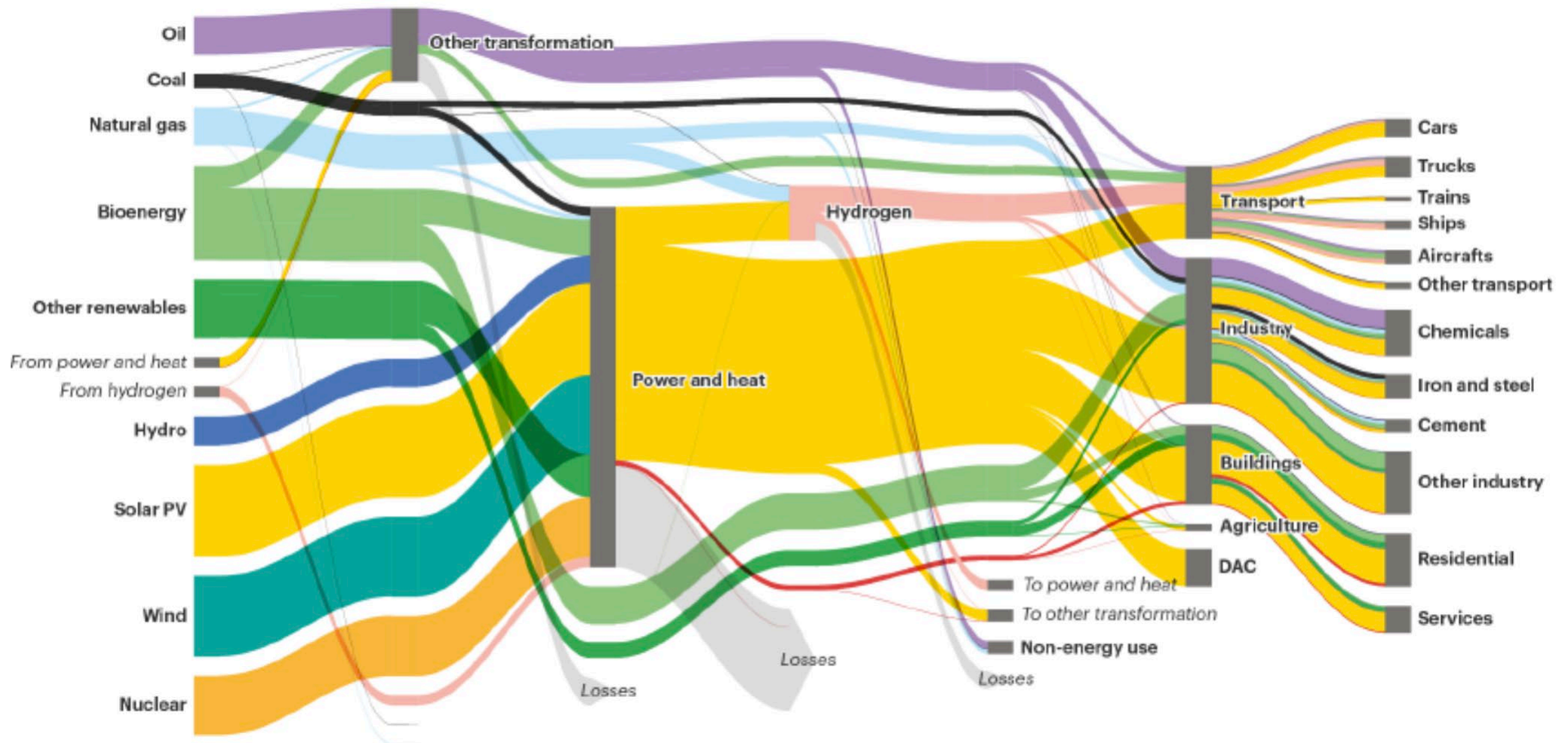
# Energietransitie: voor...

2021



# Energietransitie: na...

2050



# Vragen