

# IJZERsterke energietransitie met behulp van vuurwerk

CONRAD HESSELS

Foto's: Bart van Overbeeke

Faculteit werktuigbouwkunde / onderzoeksgroep "Power and Flow"



# Inhoud

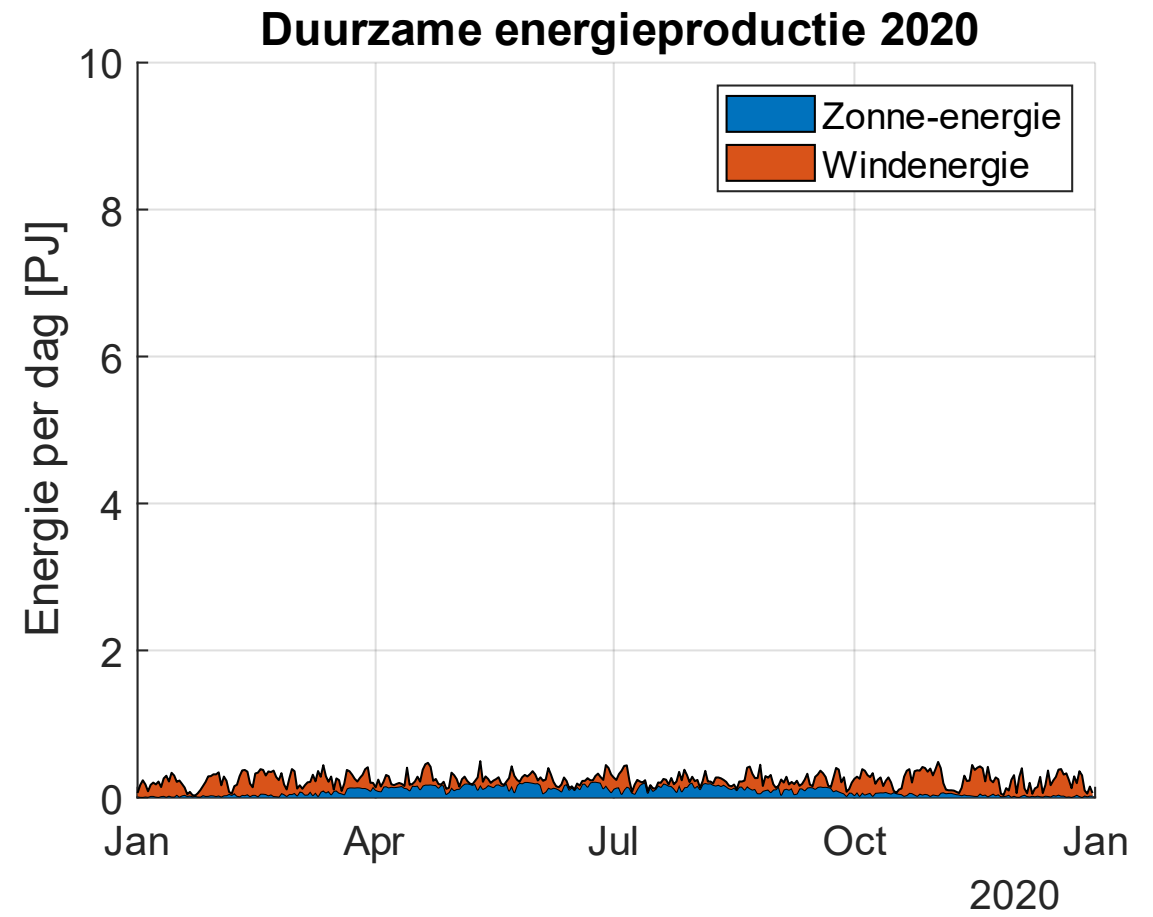
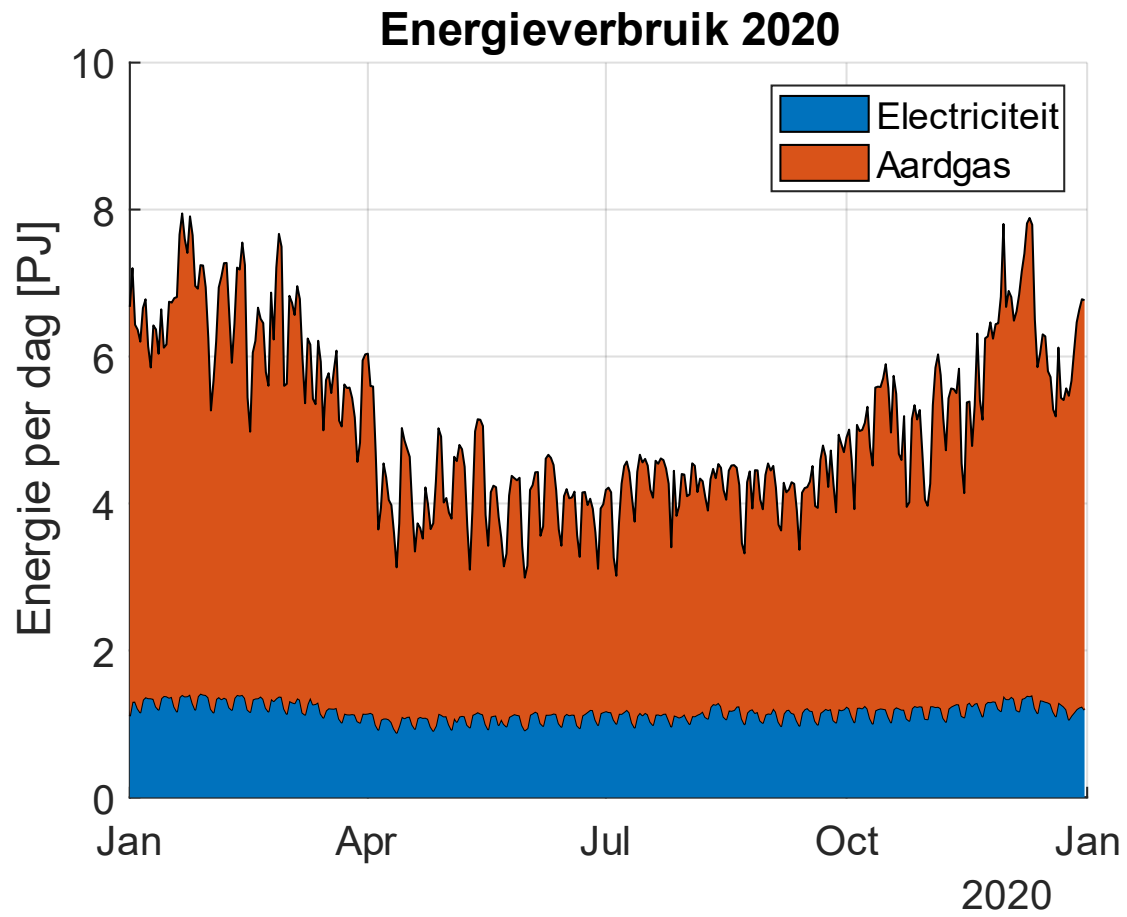
- **Probleem:** opslag en transport van duurzame energie
- **Oplossing:** ijzerpoeder-cyclus
- **Onderzoek:** huidig onderzoek aan de TU/e
- **Praktijk:** toekomstperspectief van ijzerpoeder

# Het probleem



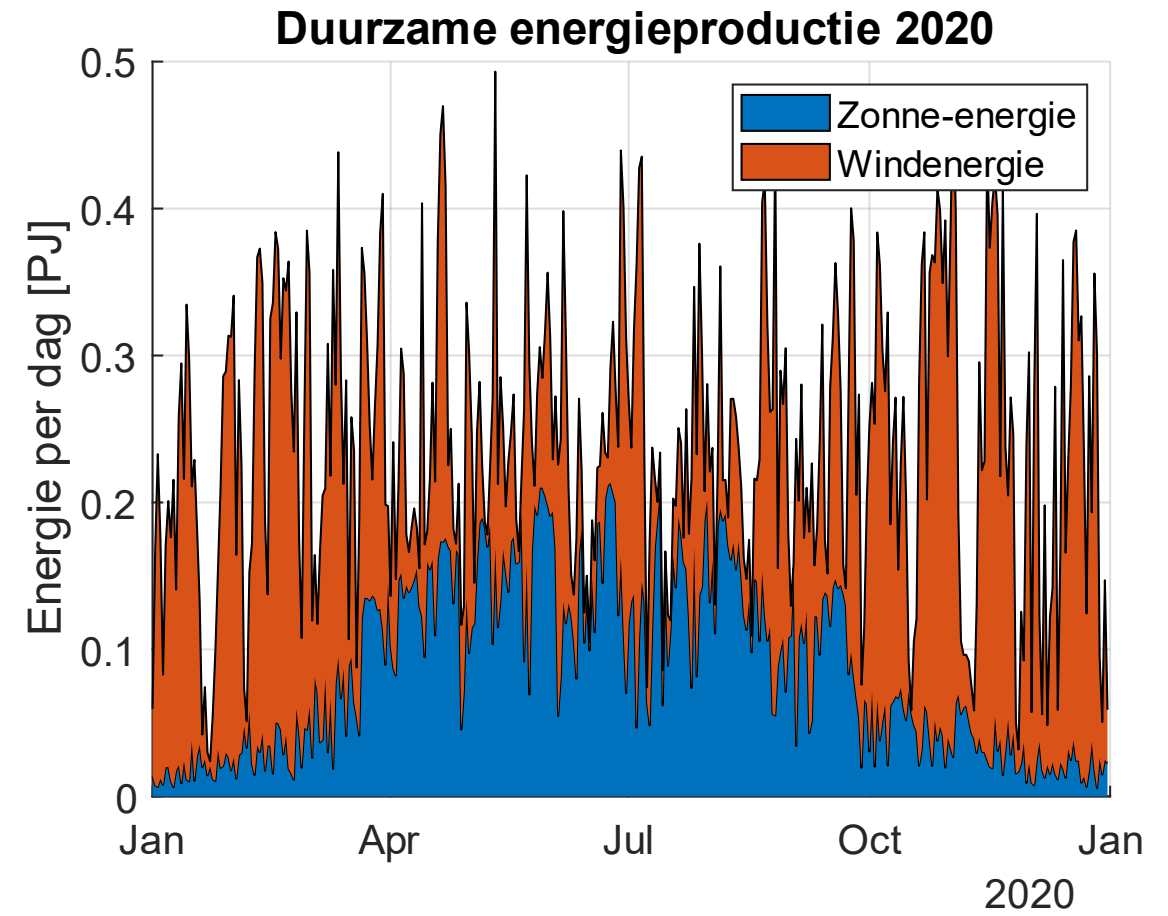
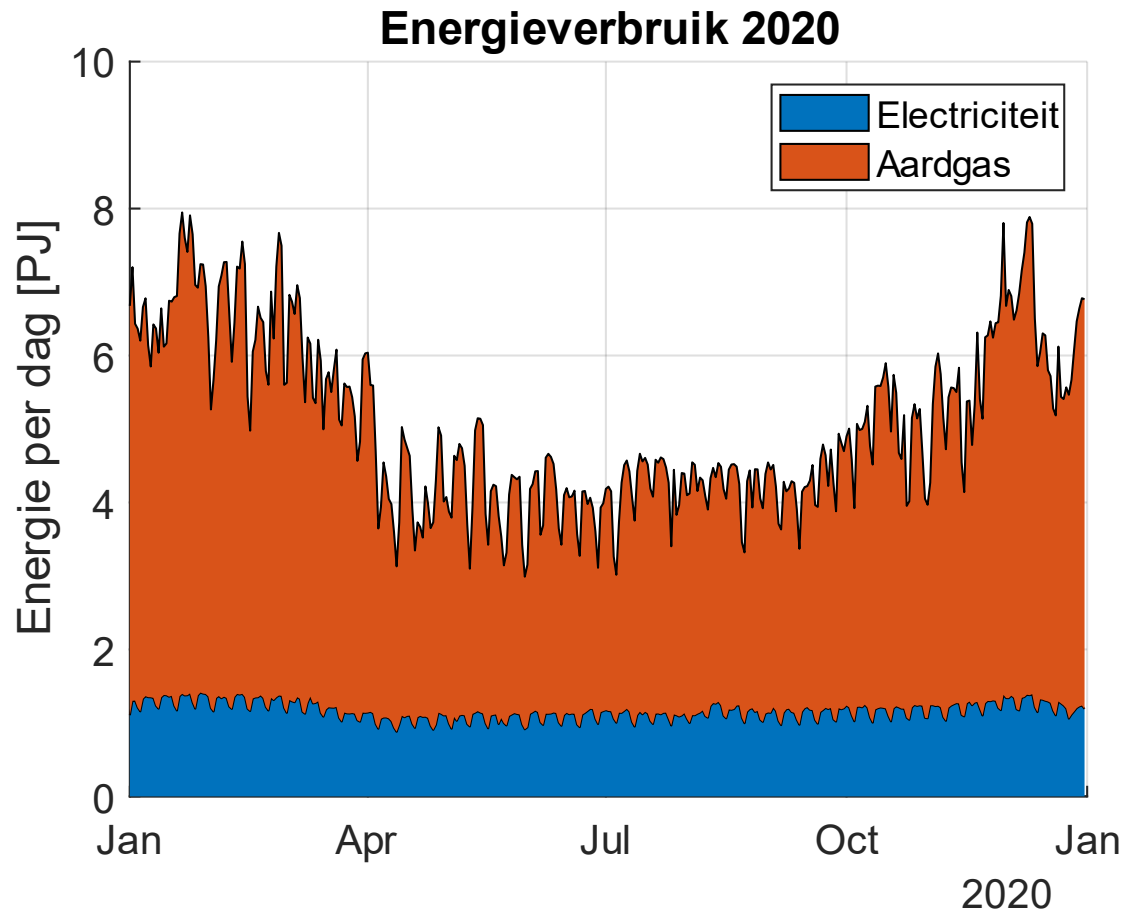
# Energieverbruik Nederland 2020

1 PJ = 278 miljoen kWh



# Energieverbruik Nederland 2020

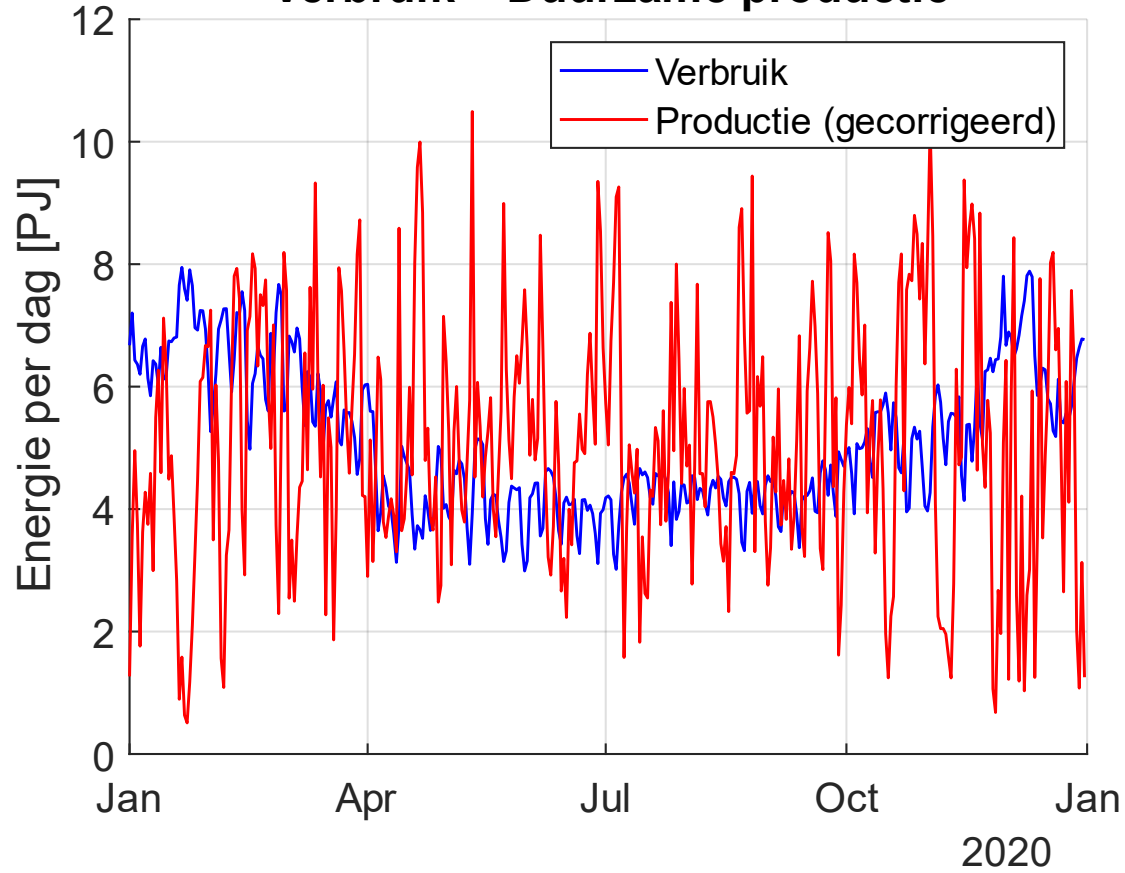
1 PJ = 278 miljoen kWh



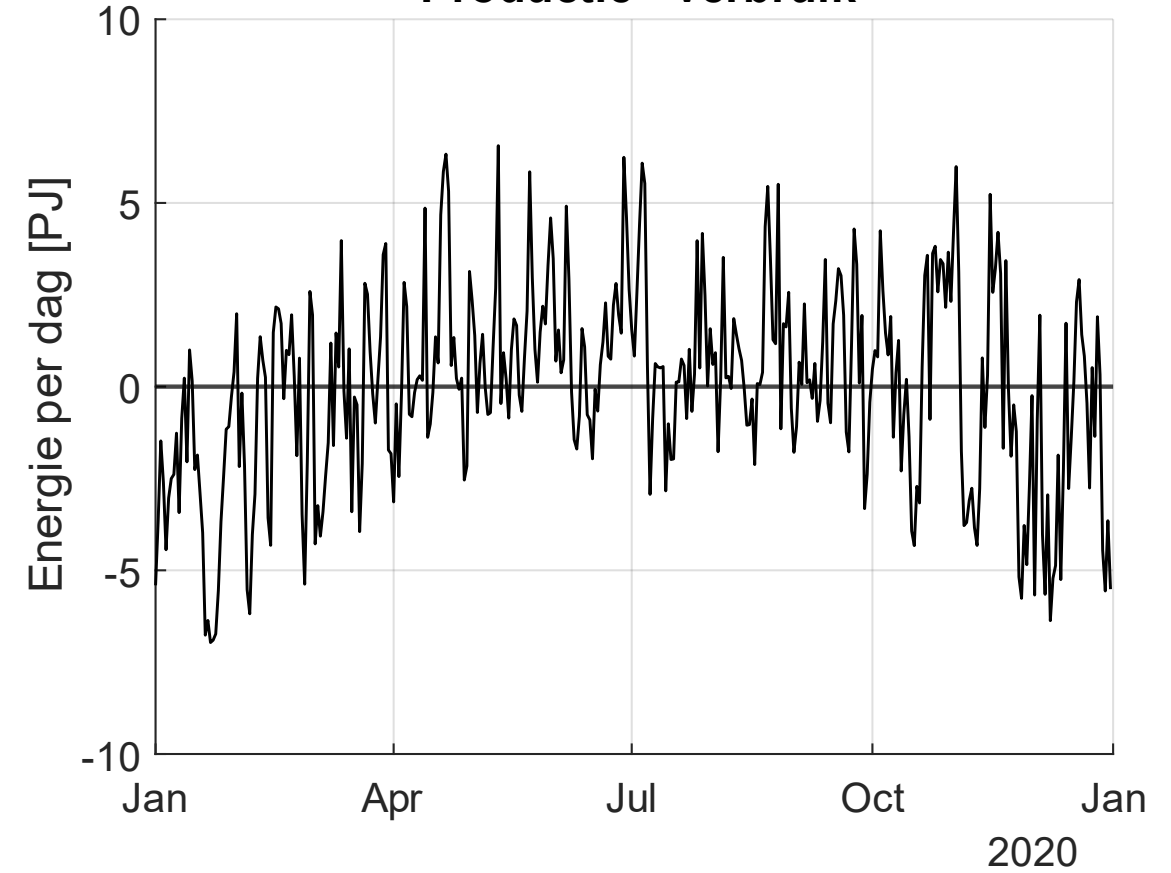
# Energieverbruik = Duurzame productie

1 PJ = 278 miljoen kWh

## Verbruik = Duurzame productie



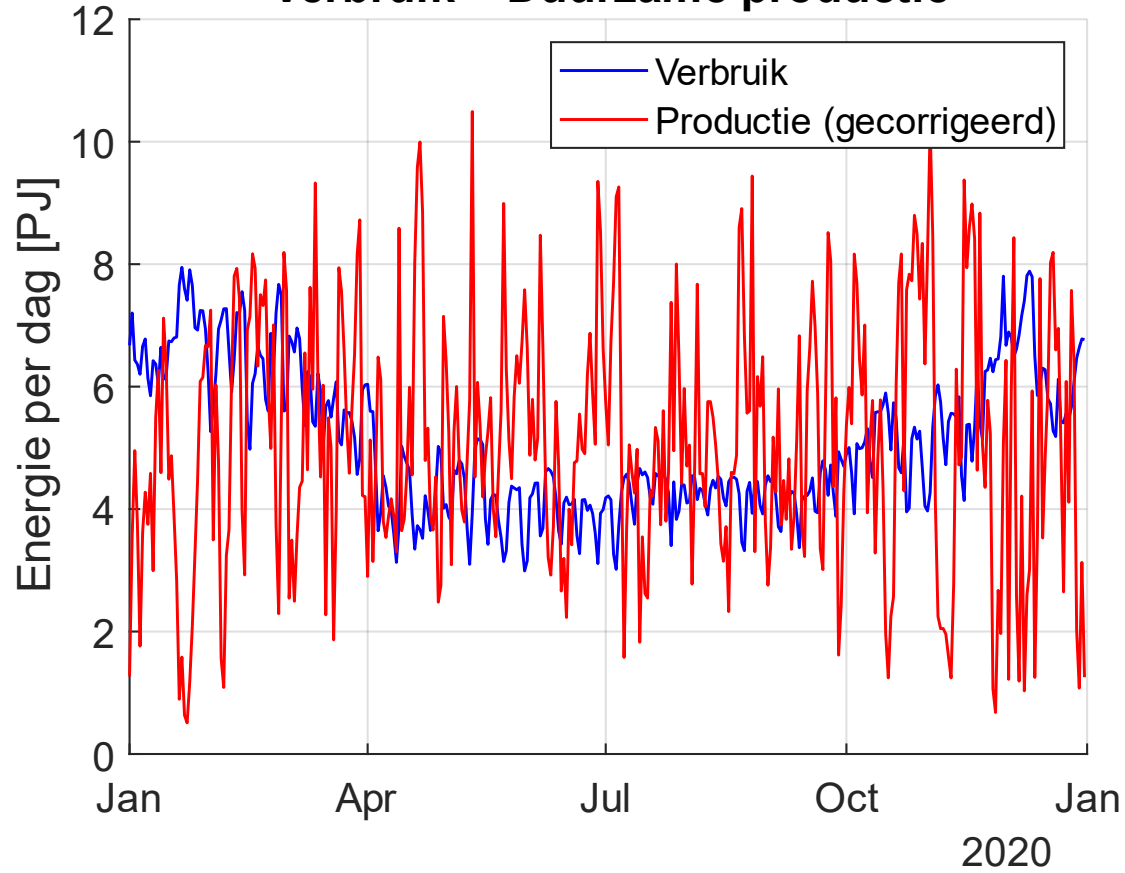
## Productie - verbruik



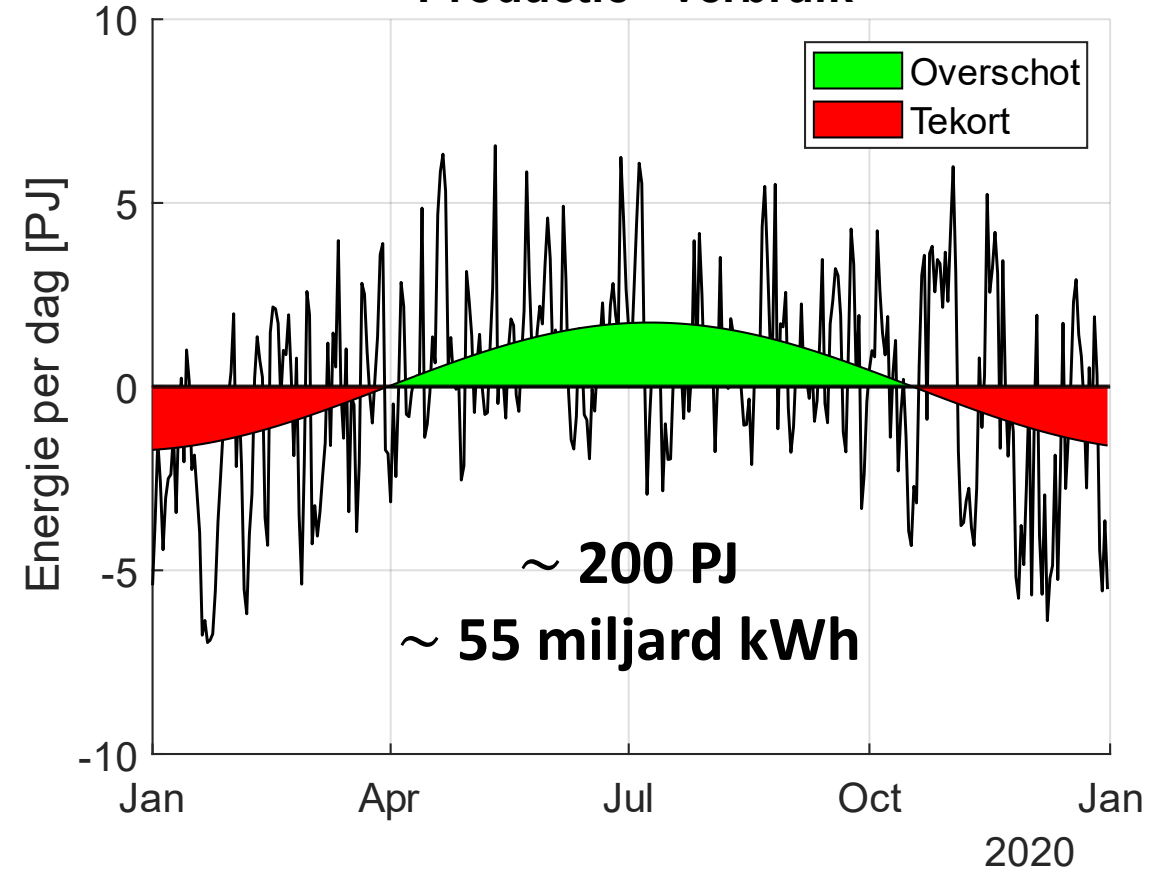
# Energieverbruik $\neq$ Duurzame productie

1 PJ = 278 miljoen kWh

## Verbruik = Duurzame productie

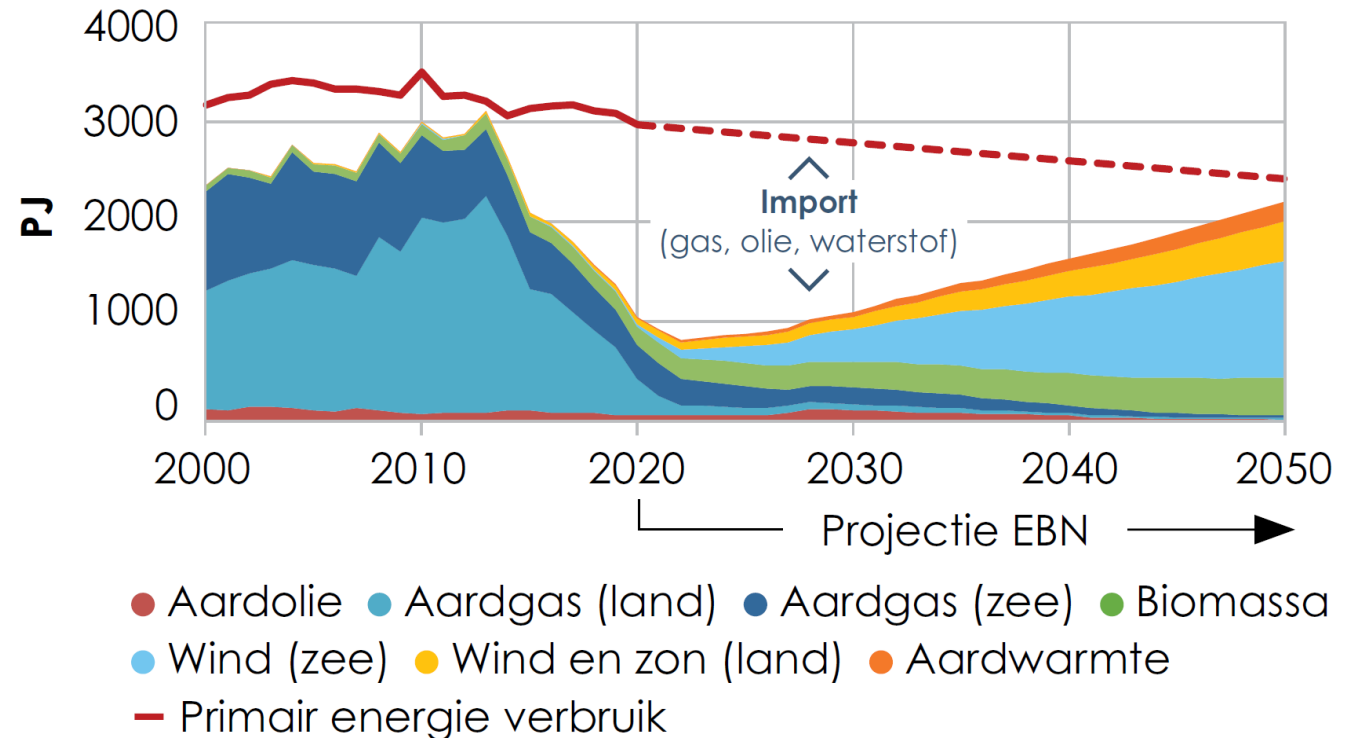


## Productie - verbruik



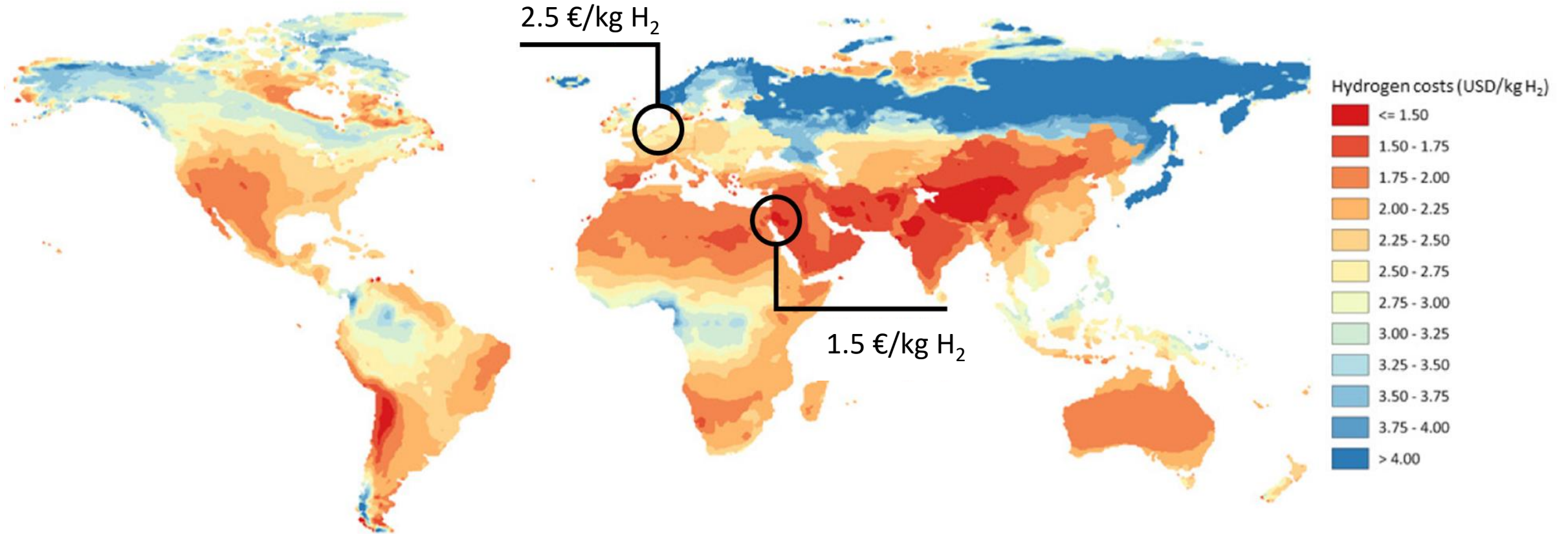
# Energieverbruik ≠ Duurzame productie

- Zonne- en windenergie bouwen kost:
  - **Tijd**
  - **Materiaal**
  - **Ruimte**
- Daar plaatsen waar:
  - Veel **zon** is
  - Veel **wind** is
- Overbelast elektriciteitsnet





# Potentie voor duurzame energie productie



# Het probleem

## 1. Verbruik $\neq$ duurzame productie

- Tijd (dag, week, maand, seizoen, jaar)
- Locatie (gemeente, Nederland, Europa, wereld)

## 2. Energie “efficiënt” produceren

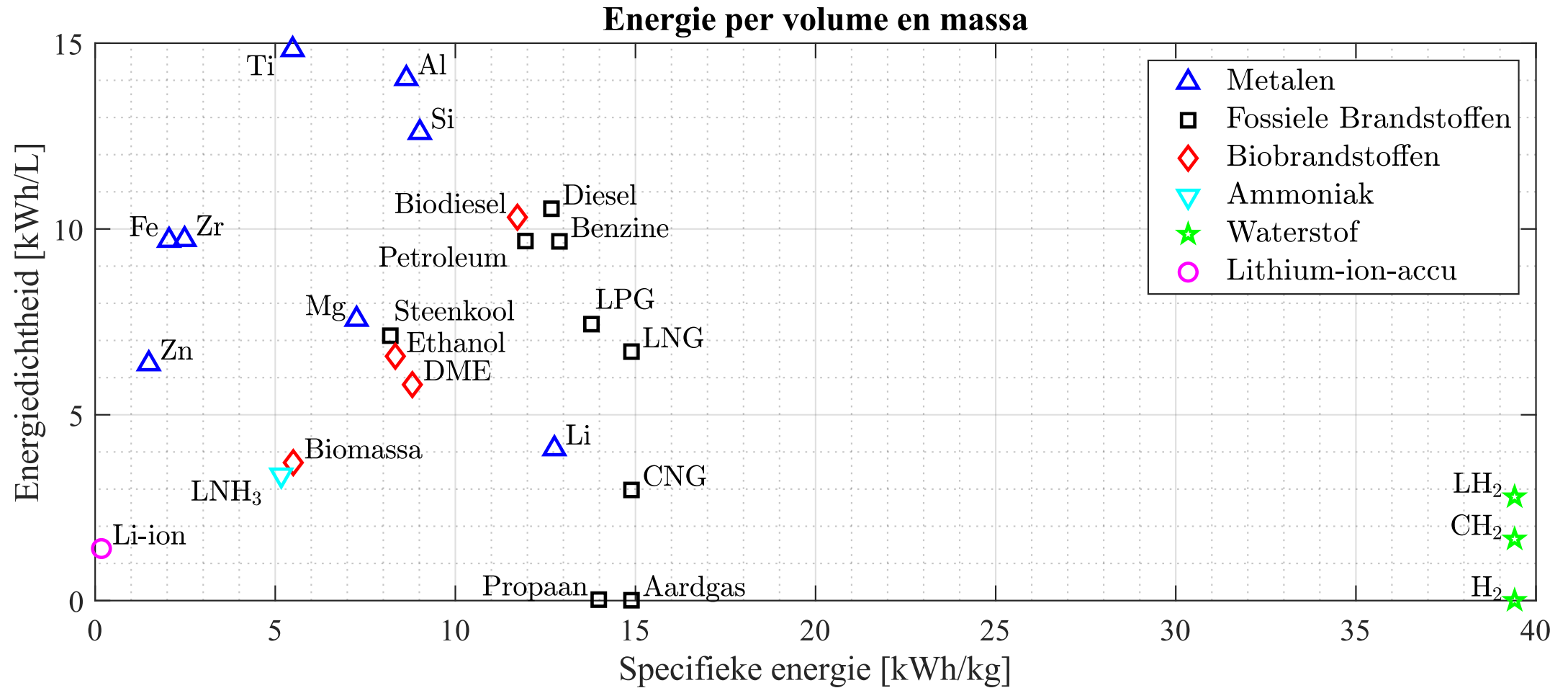
- Zon  $\rightarrow$  evenaar
- Wind  $\rightarrow$  kust

## 3. Intercontinentaal transport en seizoensopslag van enorme hoeveelheden energie

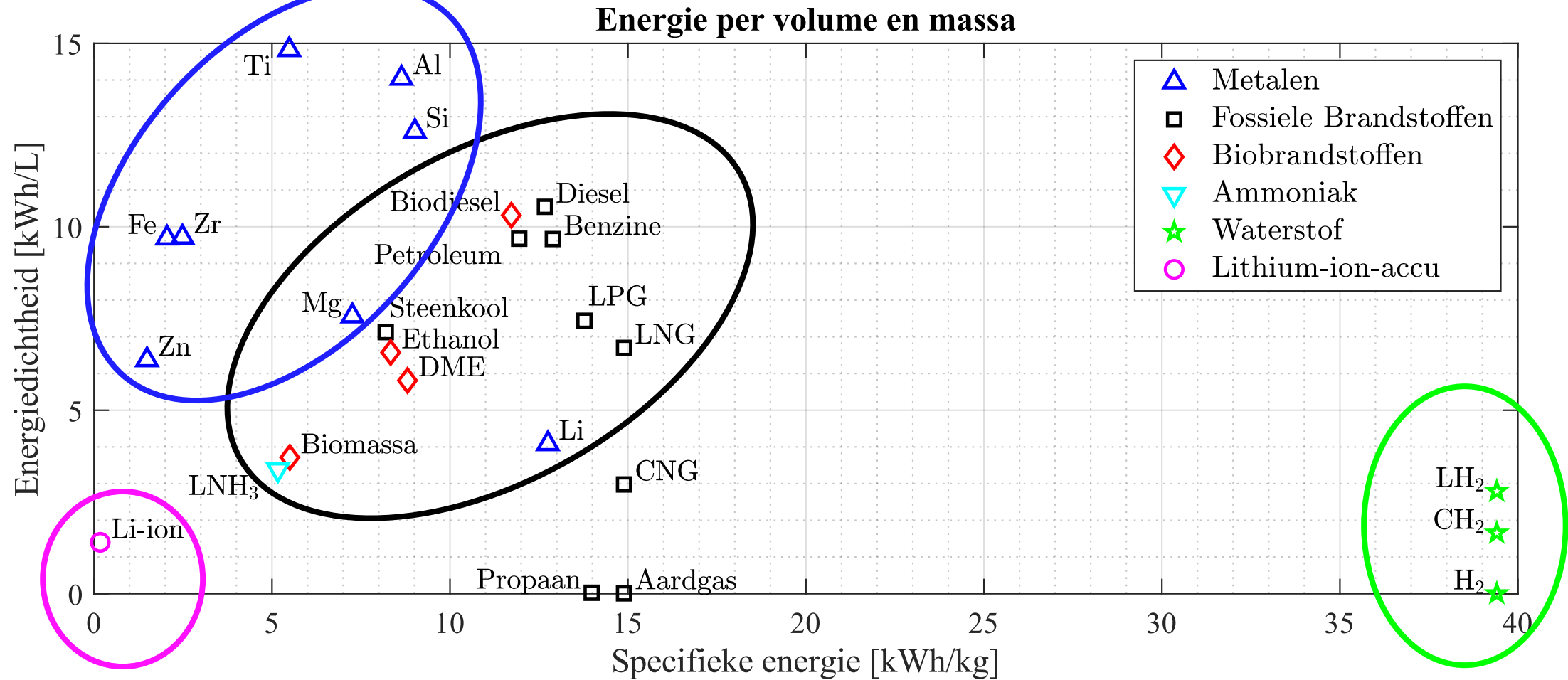
# De oplossing



# Energiedragers



# Energiedragers



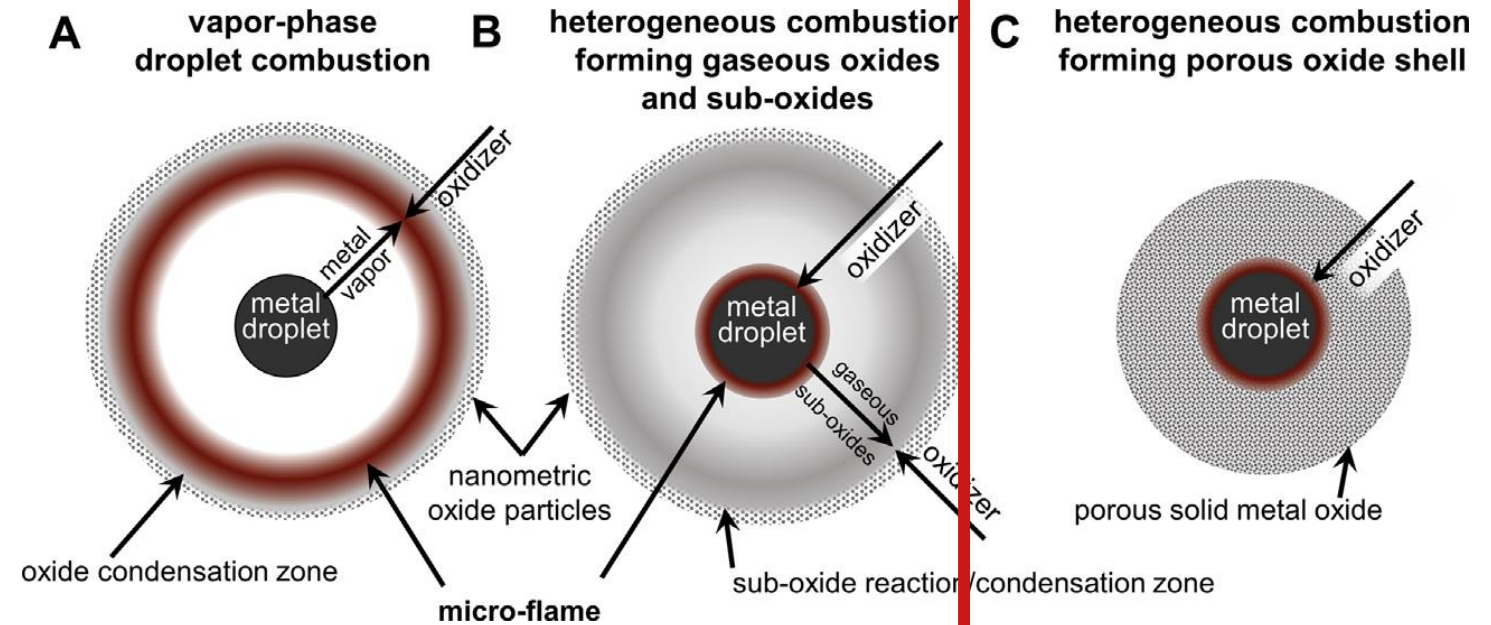
# Voorbeelden metaalverbranding



# Waarom ijzer

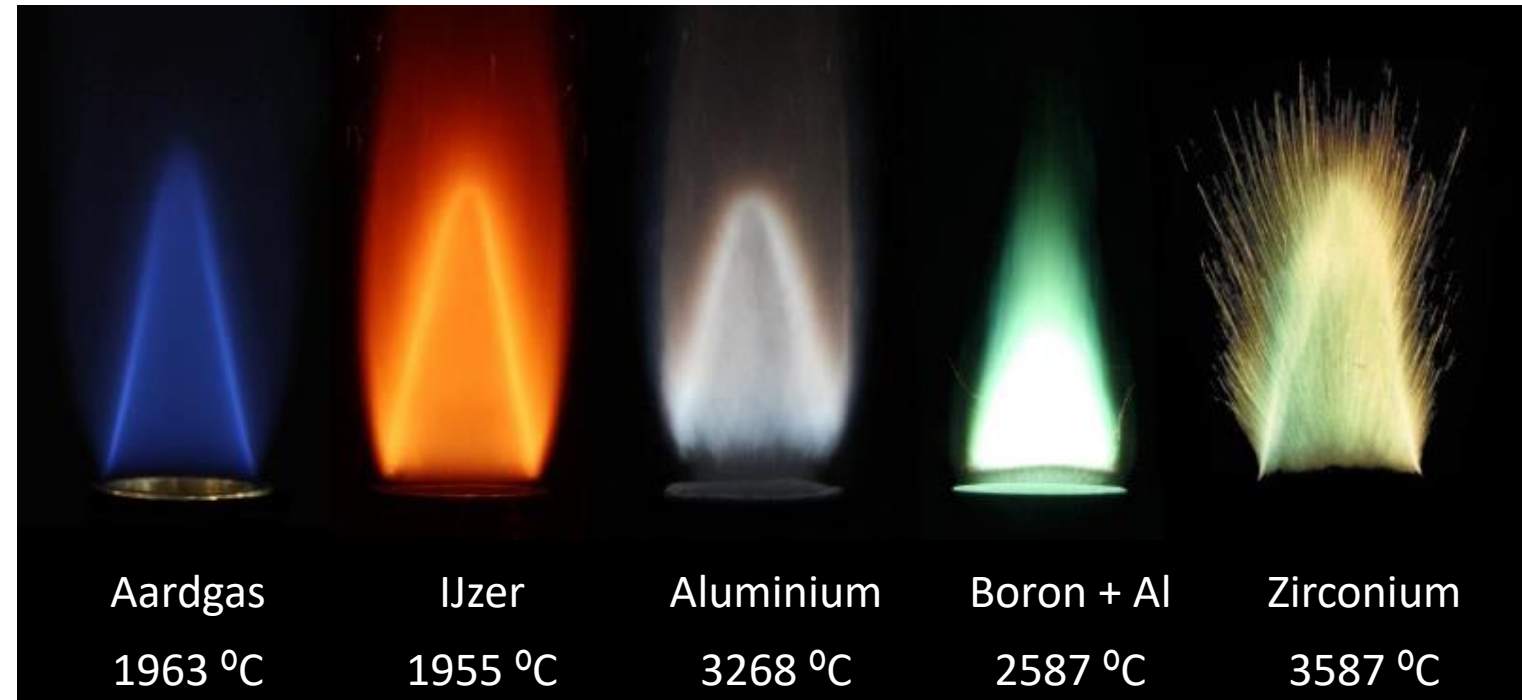
## 1. Verbrand in vloeibare staat

- Makkelijk af te vangen
- Weinig tot geen fijnstofproductie



# Waarom ijzer

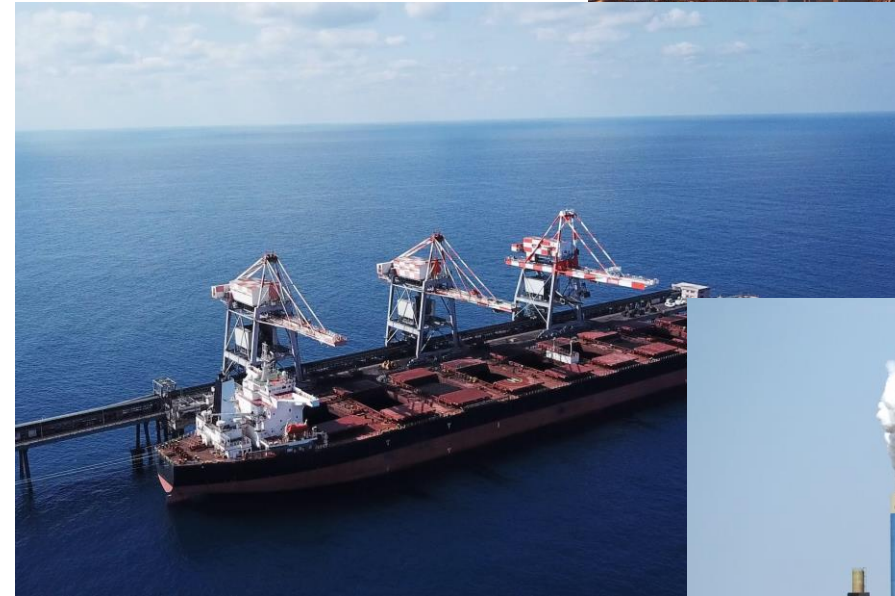
1. Verbrand in vloeibare staat
2. Lage verbrandingstemperatuur
  - Vergelijkbaar met fossiele brandstoffen
  - Weinig tot geen stikstof-uitstoot





# Waarom ijzer

1. Verbrand in vloeibare staat
2. Lage verbrandingstemperatuur
3. Bestaande infrastructuur
  - Staalindustrie
  - Bestaande kolencentrales









# Waarom ijzer

1. Verbrand in vloeibare staat
2. Lage verbrandingstemperatuur
3. Bestaande infrastructuur
4. Duurzame regeneratie met H<sub>2</sub>



# Waarom ijzer

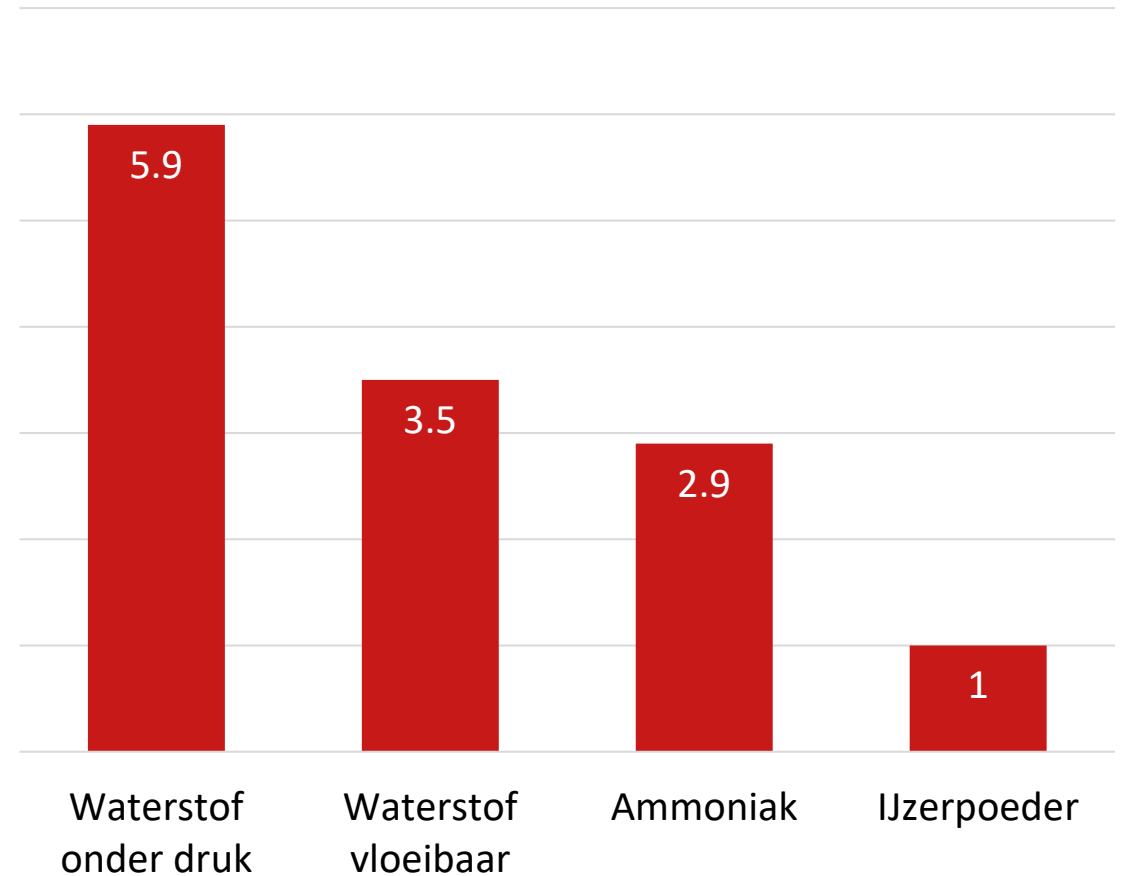
1. Verbrand in vloeibare staat
2. Lage verbrandingstemperatuur
3. Bestaande infrastructuur
4. Duurzame regeneratie met  $H_2$
5. Veilig

	Flammable	Acute Toxic	Health Hazard	Corrosive	Environmental	Pressured Gas
						
<b>Heavy Fuel Oil (HFO)</b>			X		X	
<b>Methanol (<math>CH_3OH</math>)</b>	X	X	X			
<b>Hydrogen (<math>H_2</math>)</b>	X					X
<b>Ammonia (<math>NH_3</math>)</b>		X		X	X	X
<b>Iron (Fe) and <math>Fe_2O_3</math></b>	X					

# Waarom ijzer

1. Verbrand in vloeibare staat
2. Lage verbrandingstemperatuur
3. Bestaande infrastructuur
4. Duurzame regeneratie met H<sub>2</sub>
5. Veilig
6. Compact

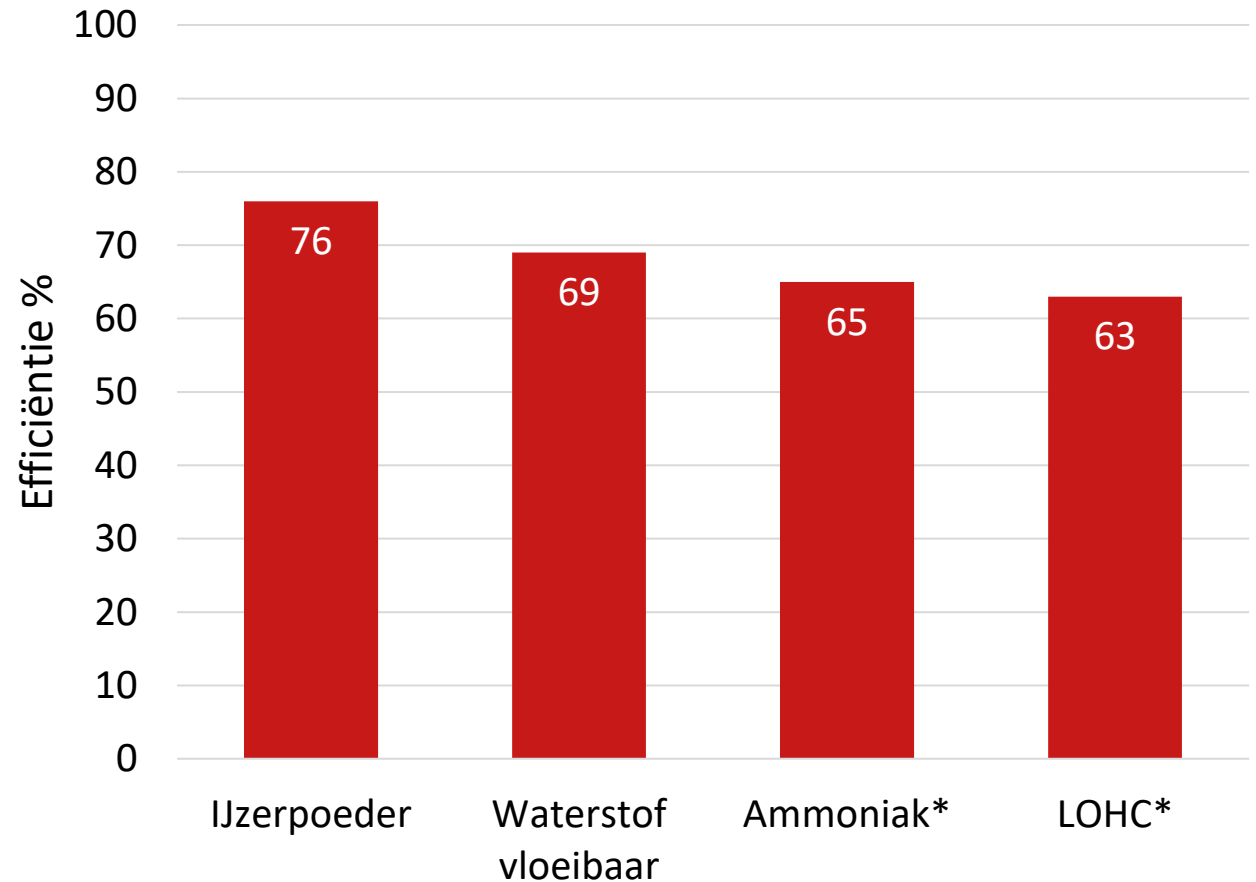
Relatieve energiedichtheid



# Waarom ijzer

1. Verbrand in vloeibare staat
2. Lage verbrandingstemperatuur
3. Bestaande infrastructuur
4. Duurzame regeneratie met  $H_2$
5. Veilig
6. Compact
7. Efficiënt

Cyclus efficiëntie (\*met terug omzetting naar  $H_2$ )



# IJzer-energiedrager-cyclus

## 1. Duurzame productie/regeneratie

- Met behulp van bijv. groen waterstof
- Waar duurzame energie geproduceerd wordt
- Zonnekrachtcentrales & windparken

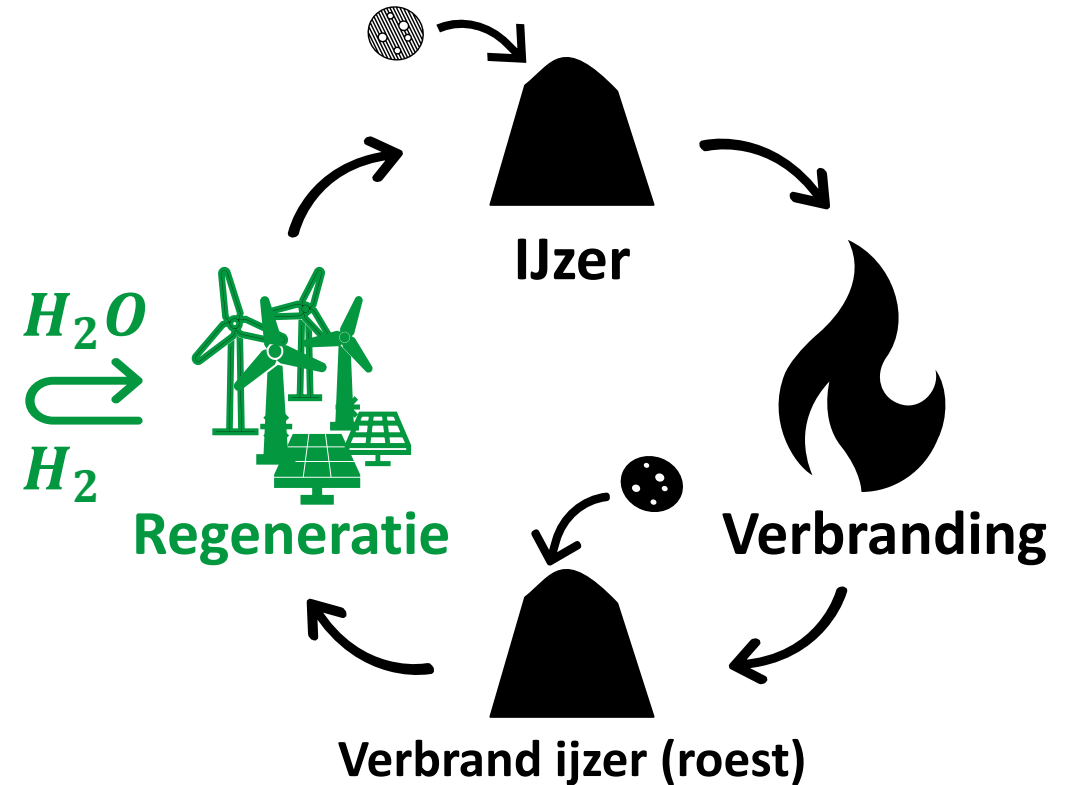
## 2. Transport en opslag van bulk poeder

- Vrachtschepen en treinen
- Rotterdam + binnenvaart

## 3. Verbranding in bestaande/nieuwe branders

- Industrie, warmtenetten en kolencentrales

**Regeneratie:** ijzeroxide + waterstof → ijzer + waterdamp



**Verbranding:** ijzer + zuurstof → ijzeroxide

# Het onderzoek @ TU/e



# Multi-dimensionaal

Experimenten



Één deeltje

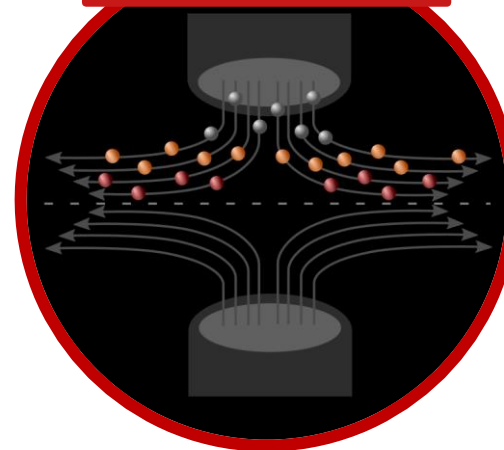
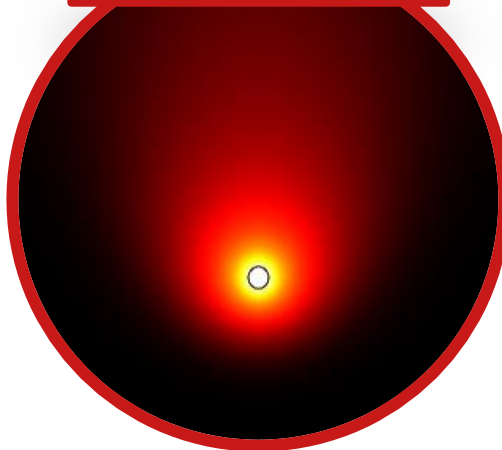


1D vlammen



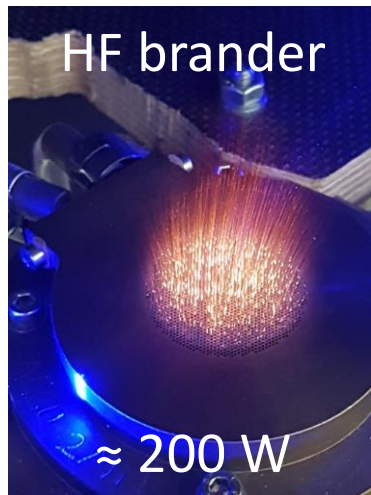
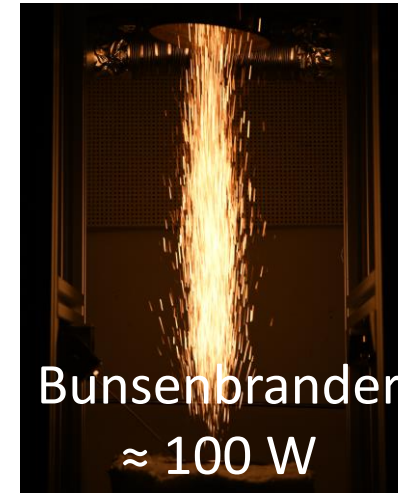
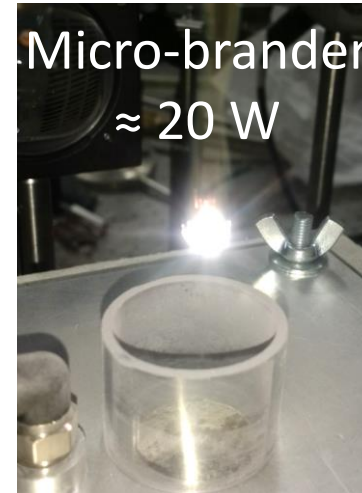
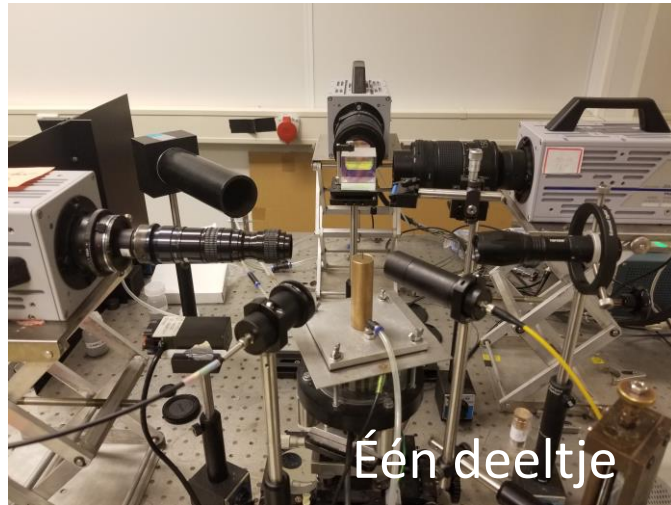
3D vlammen

Modellen



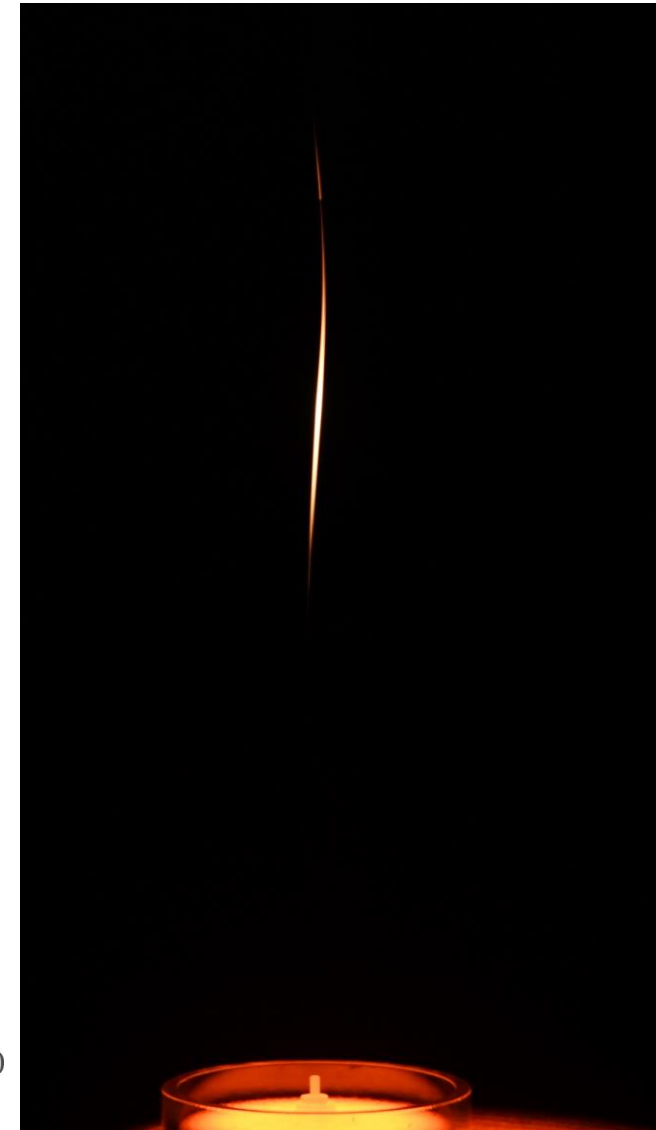
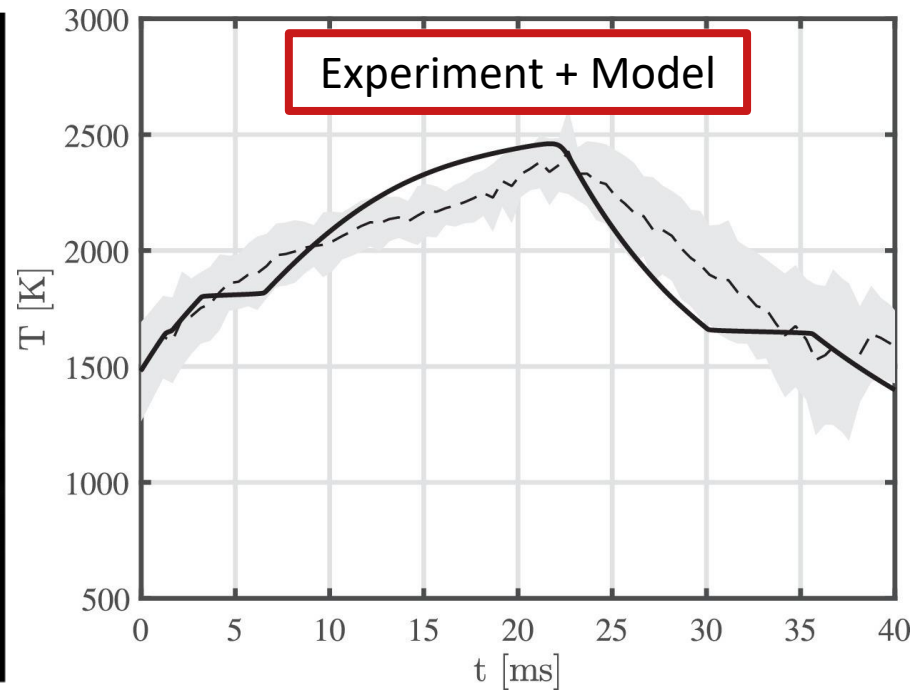
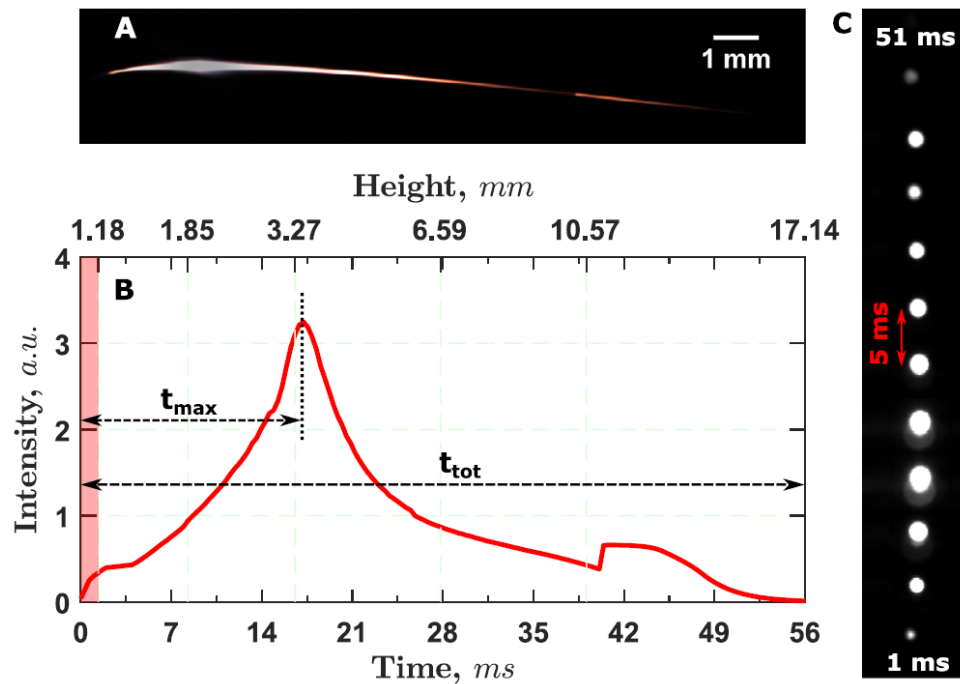


# IJzer-verbrandingsonderzoek



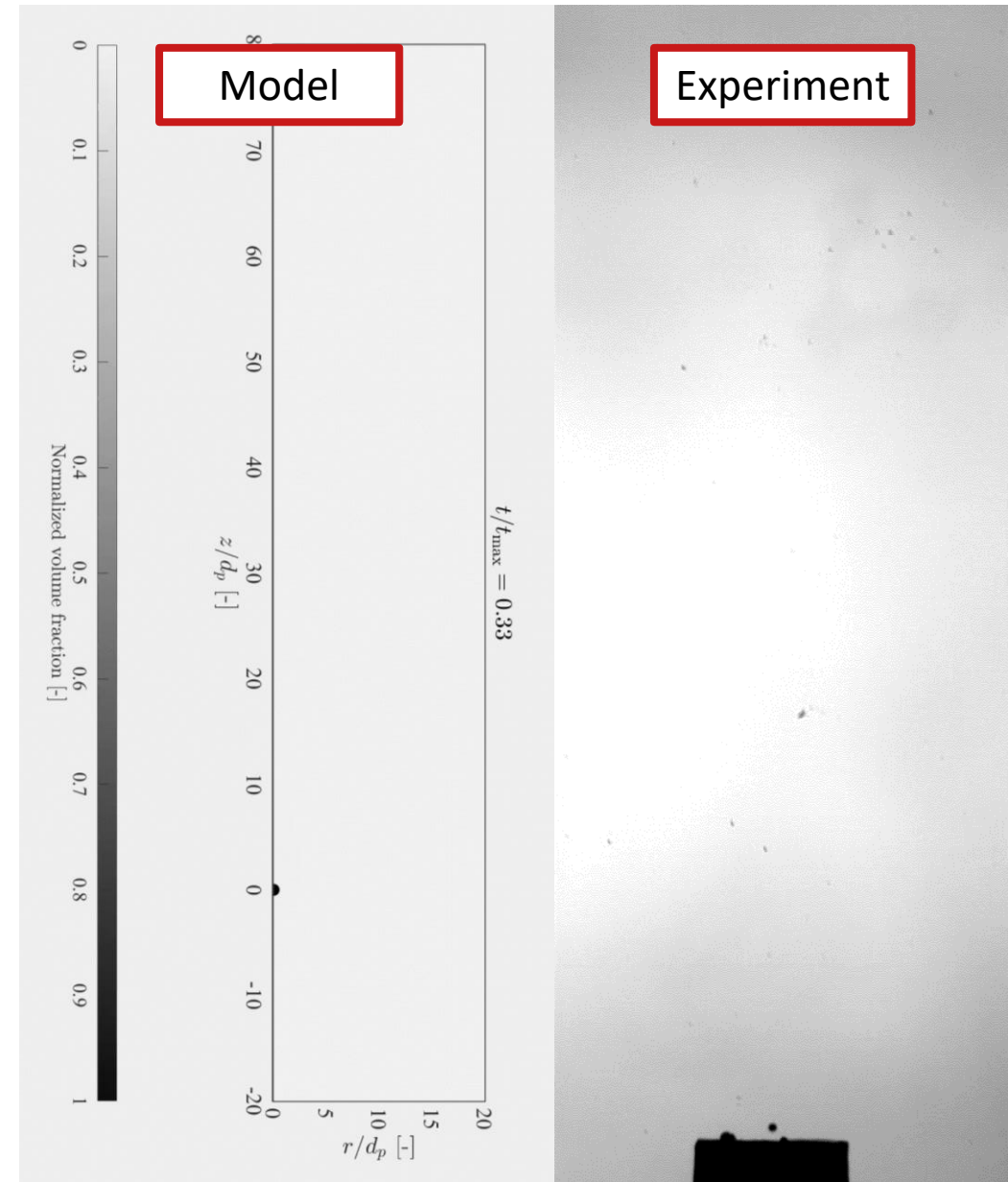
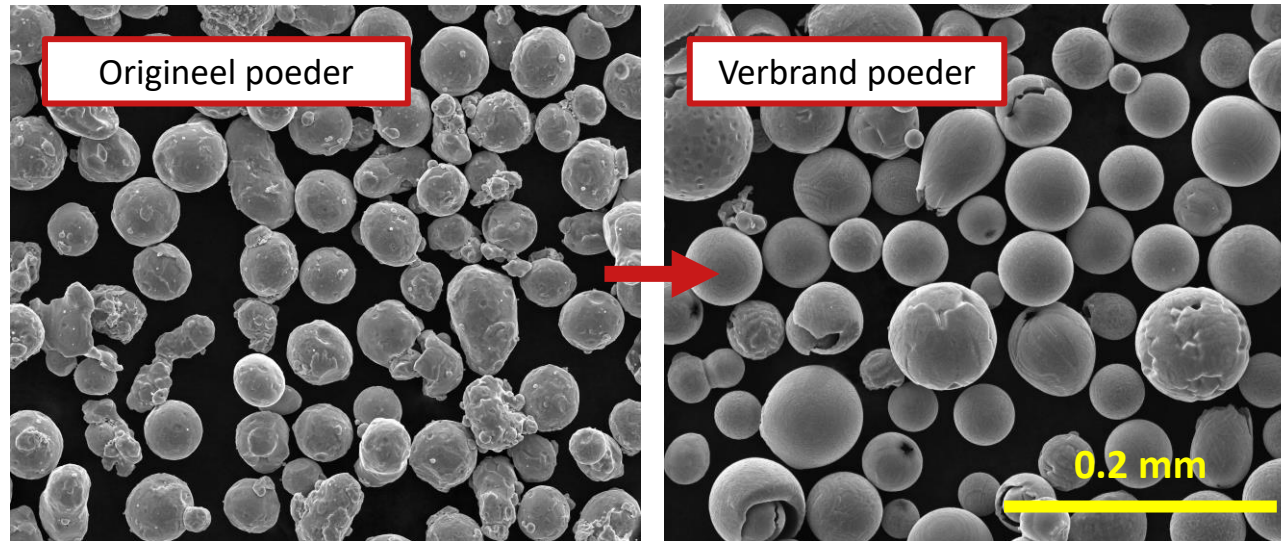
# 1 Deeltje: Temperatuur

- Laser-ontstoken
- Invloed deeltjesgrootte & zuurstof concentratie



# 1 Deeltje: Fijnstof

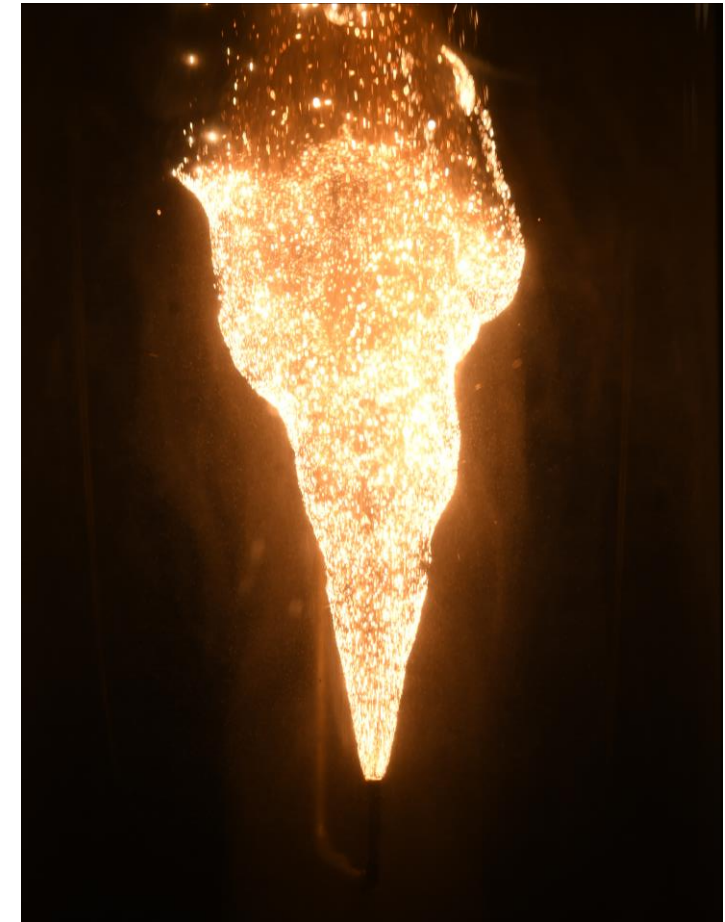
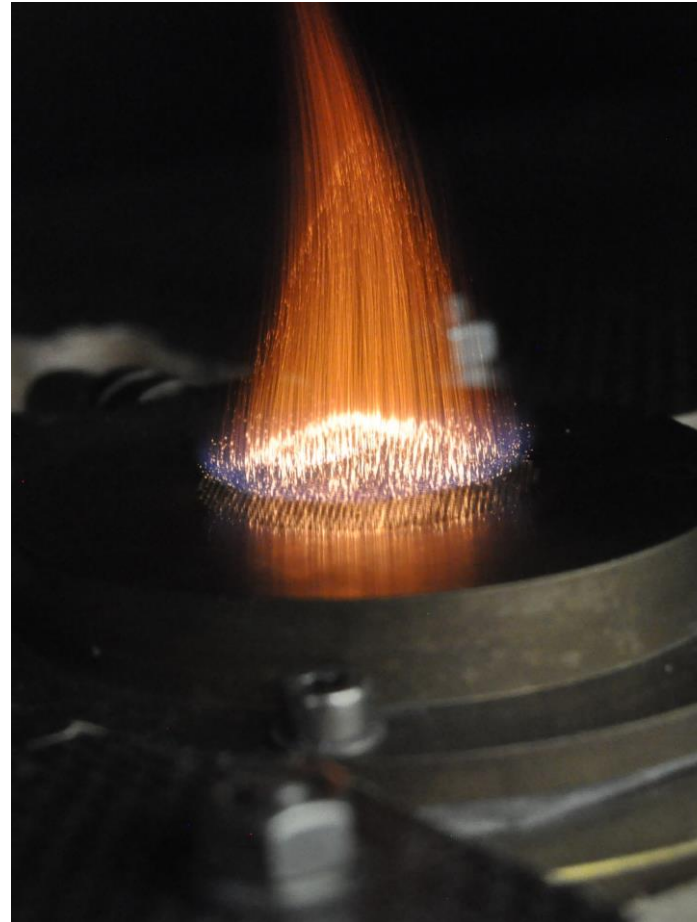
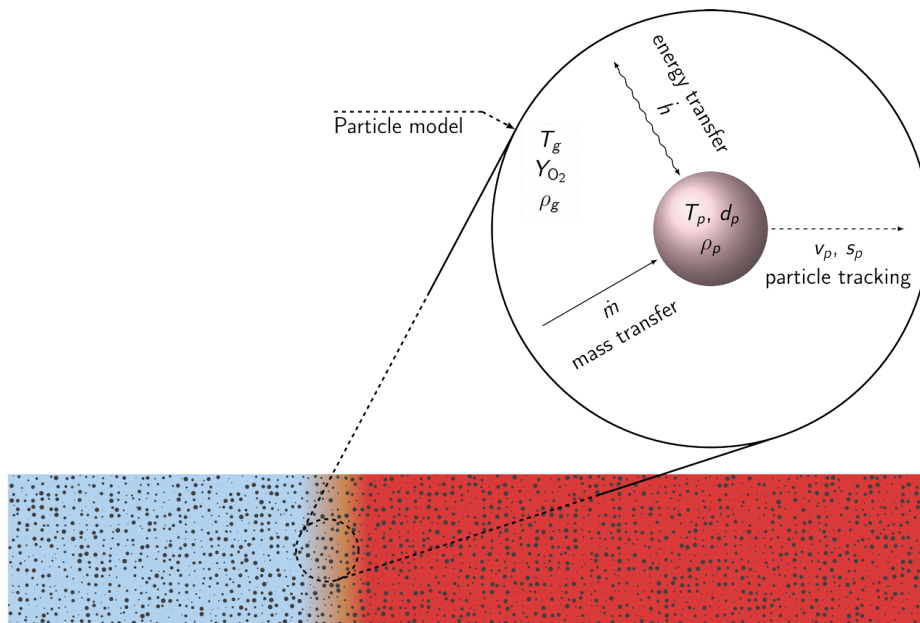
- Verdamping van ijzer
- Alleen bij hoge verbrandingstemperatuur
- Oplossing → lagere zuurstof concentratie



Thijs et al. Proceedings of the Combustion Institute (2022)  
Ning et al. Combustion and Flame 244 (2022)  
Linkerfoto's: Conrad Hessels

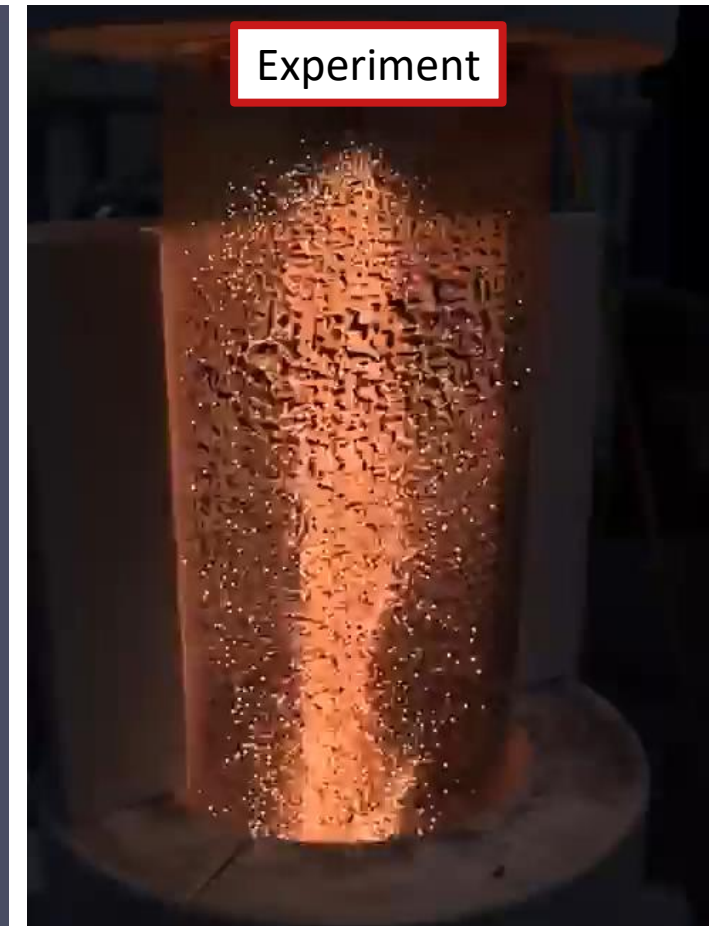
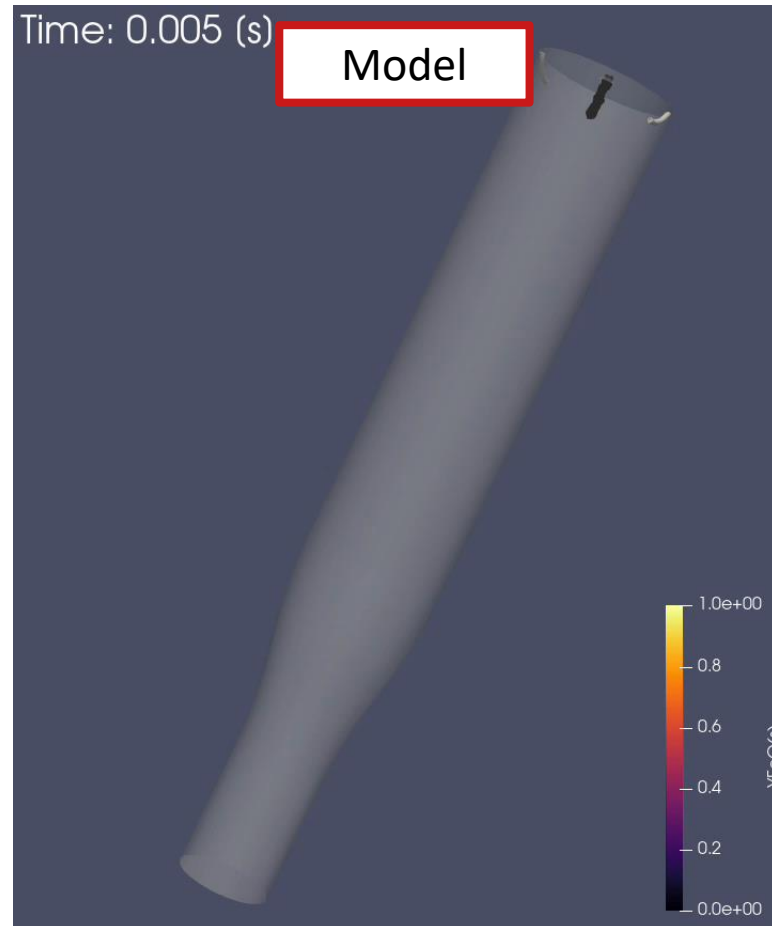
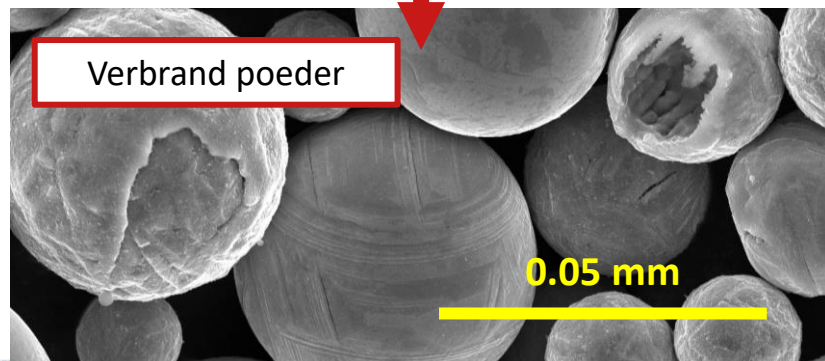
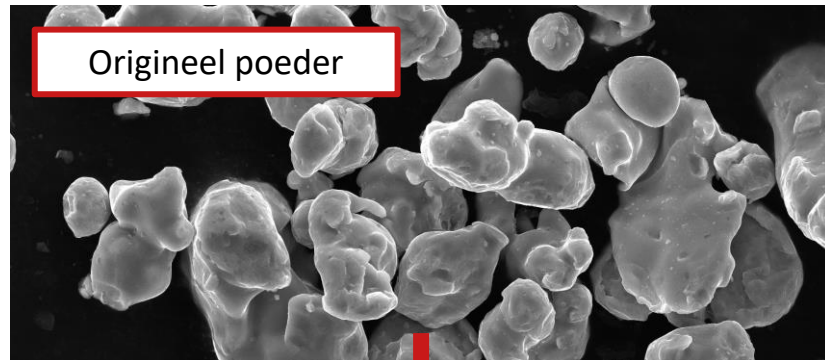
# “1D” vlammen

- “Vlamsnelheid”
- Invloed deeltjes-concentratie
- Model-validatie

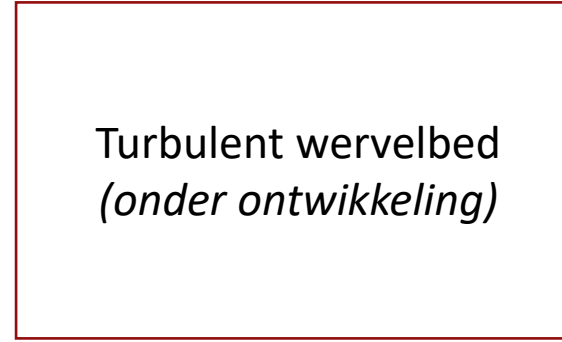


# 3D vlammen

- Invloed turbulentie
- Invloed recirculatie

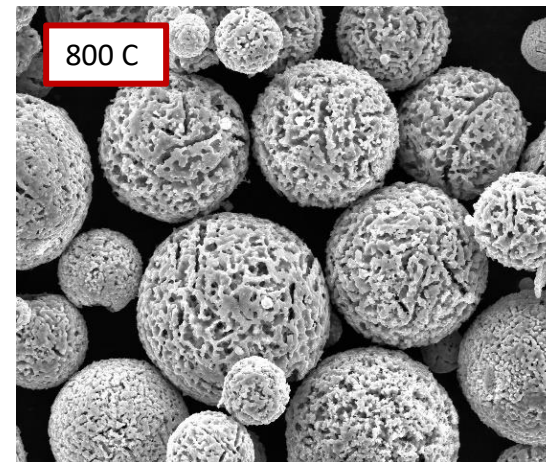
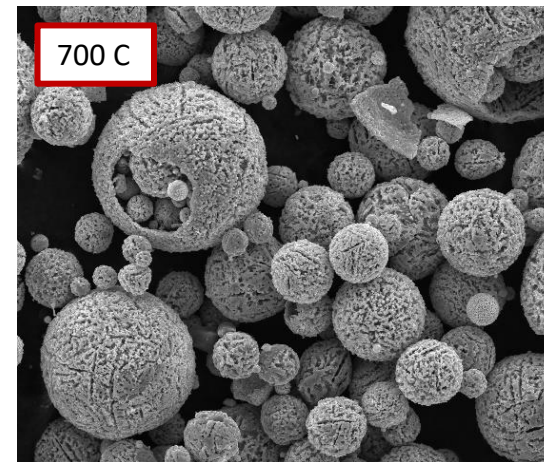
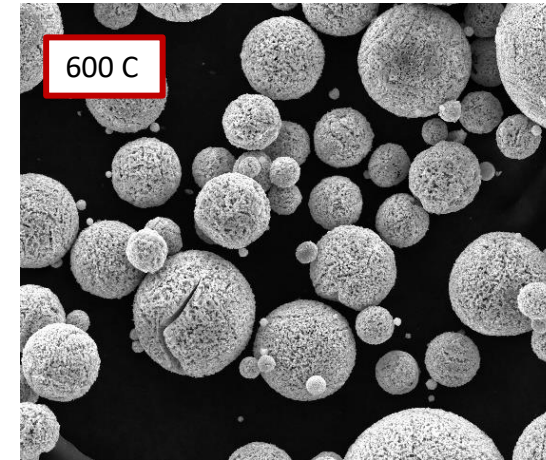
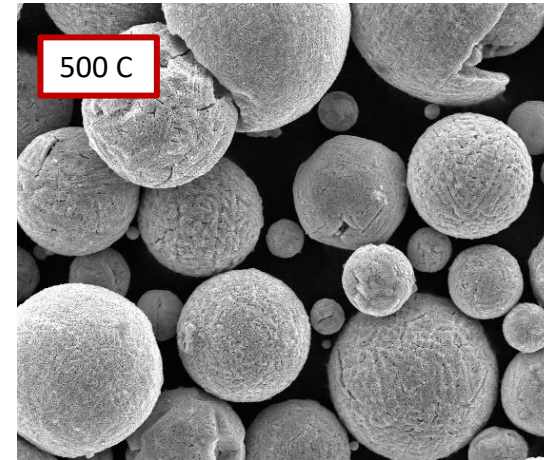
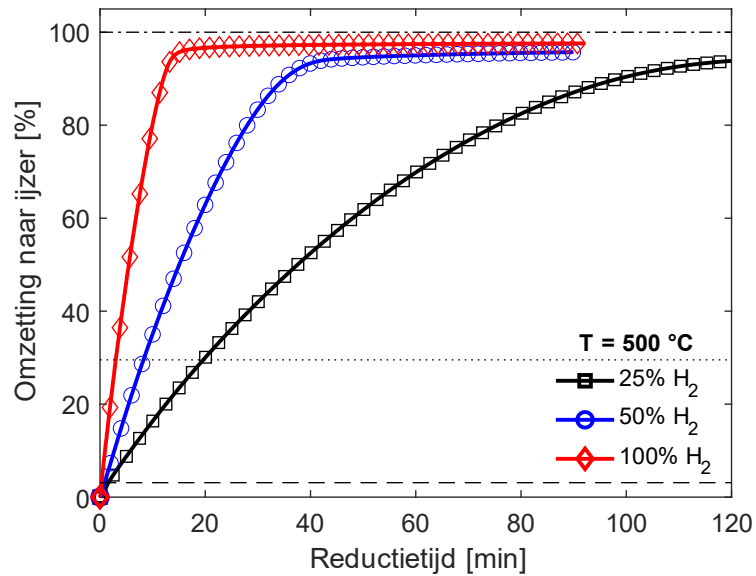


# IJzer-regeneratieonderzoek @ TU/e



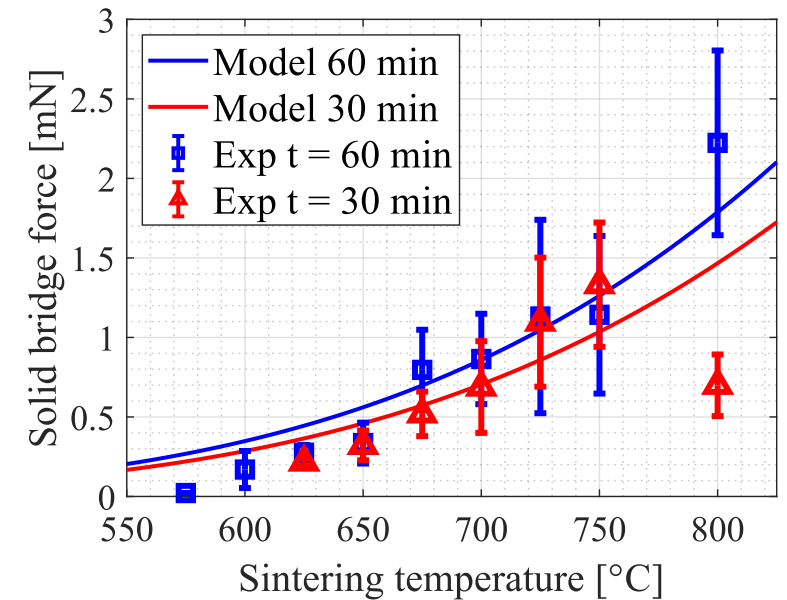
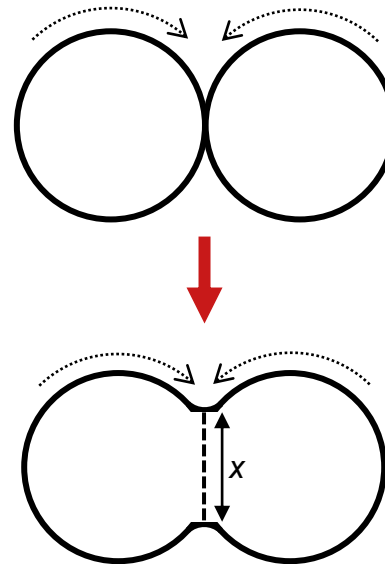
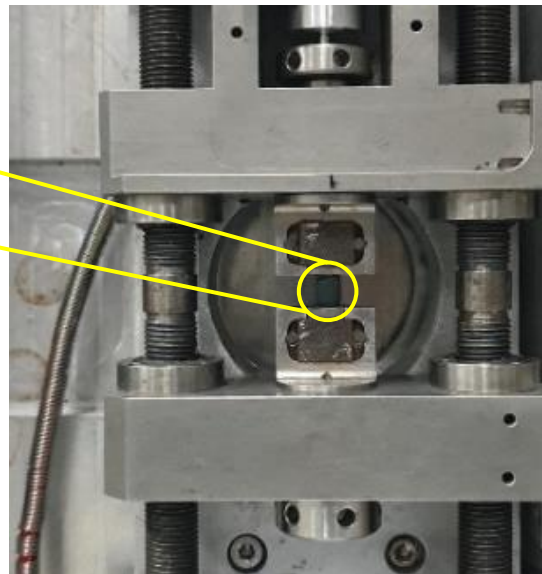
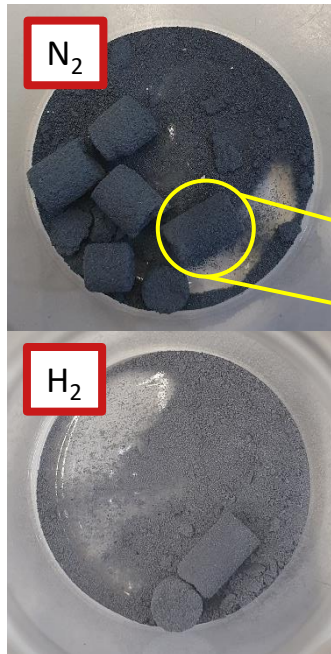
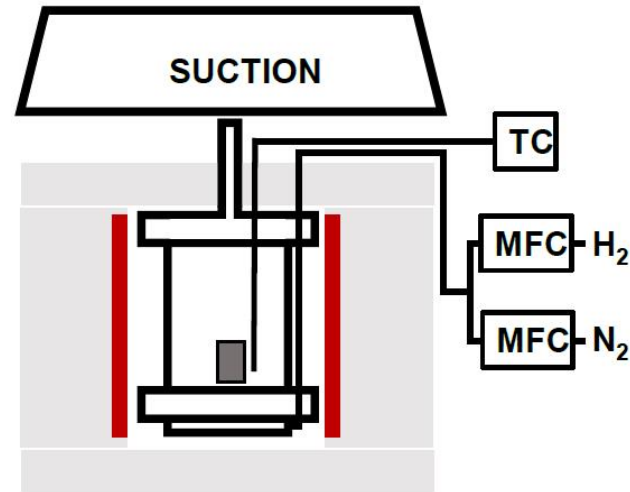
# Thermogravimetrie

- Invloed temperatuur
- H<sub>2</sub> concentratie
- Reactiesnelheid in tijd



# Gepakte kolom

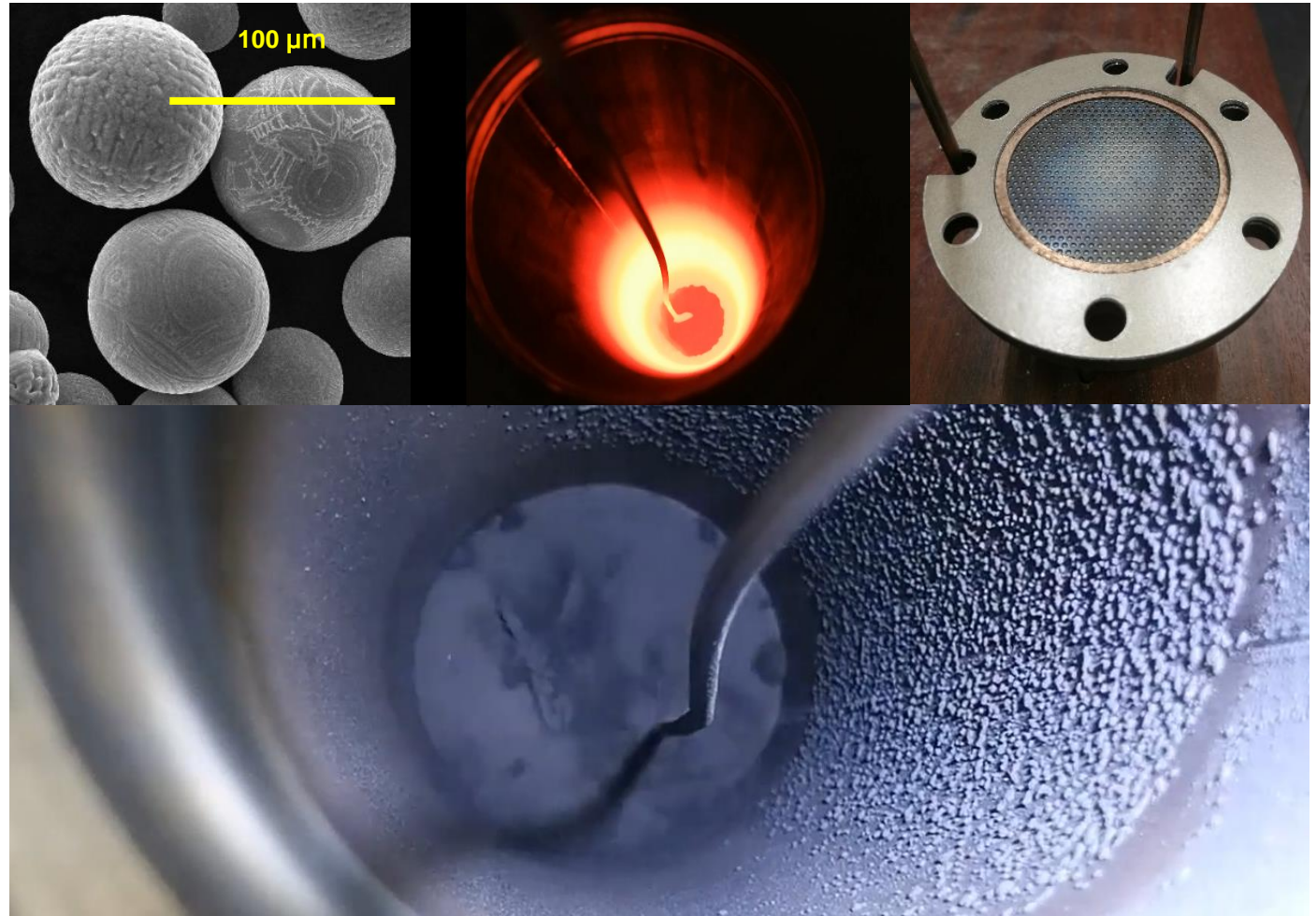
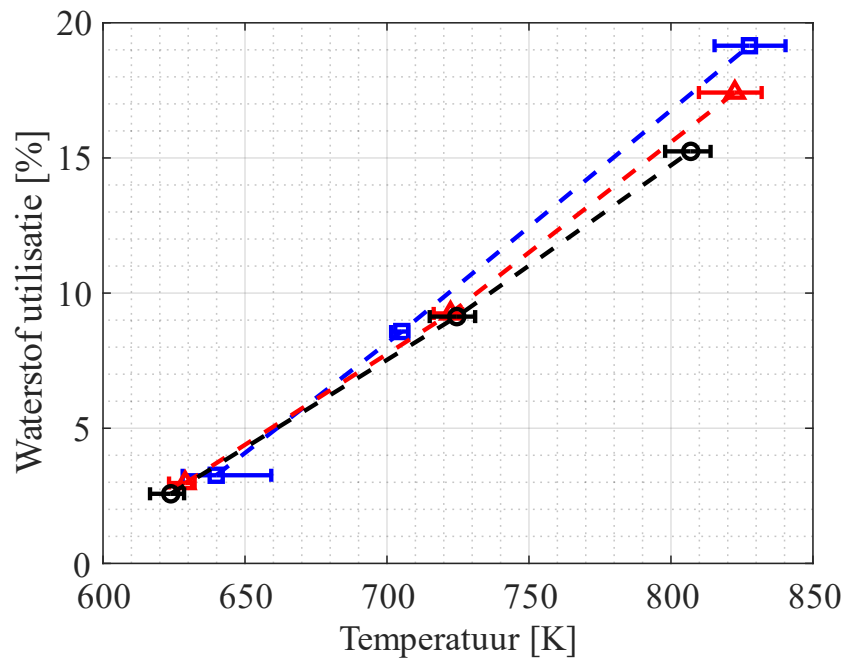
- Agglomeratie-/sintergedrag
- In stikstof en waterstof





# Bubbelend wervelbed

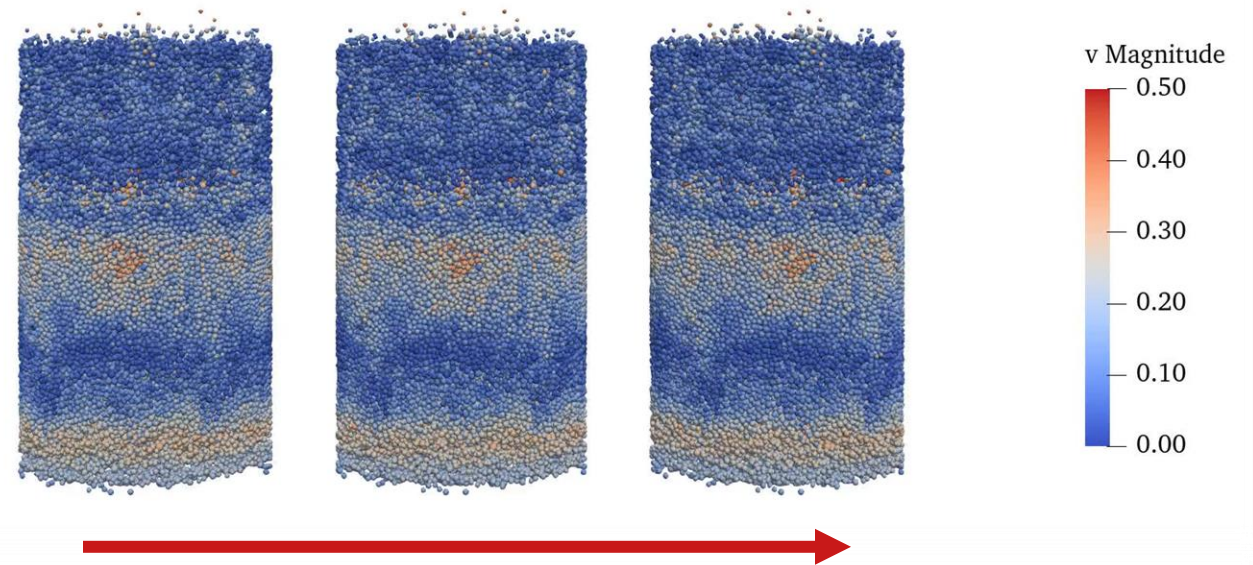
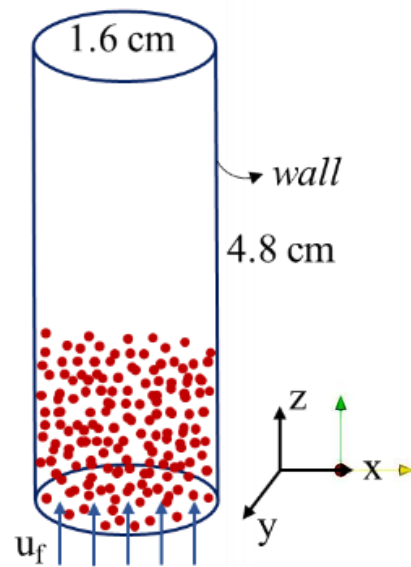
- Menging van poeder
- Efficiëntie van H<sub>2</sub> gebruik



# Modellen

- CFD-DEM methode
- Modelleren van sintergedrag

Time: 0.01



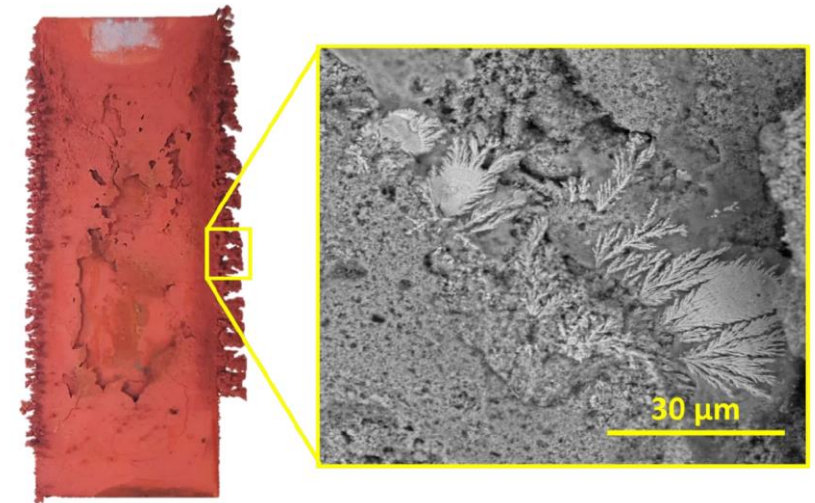
Meer sintering

# Directe elektrolyse

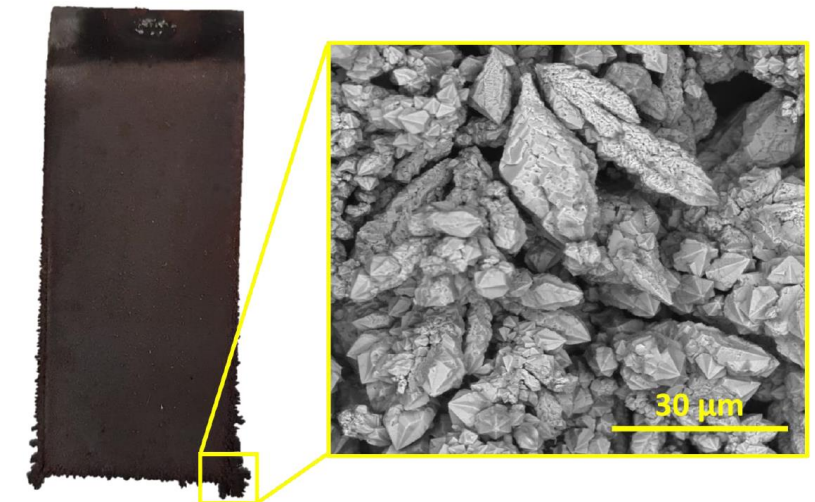
- Geen waterstof nodig
- IJzer groeit op elektrode



Zuur-systeem



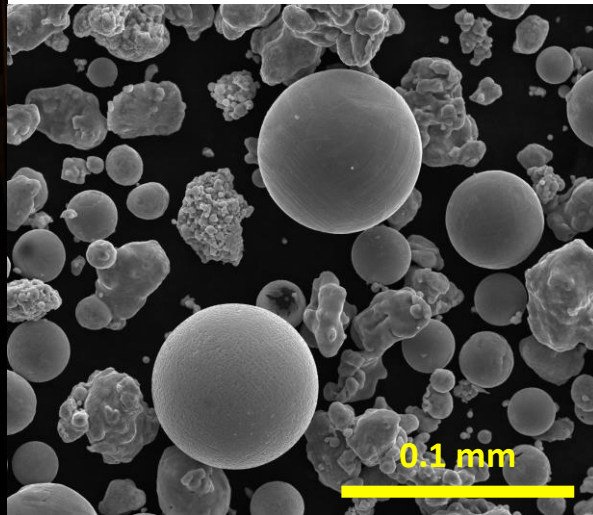
Base-systeem



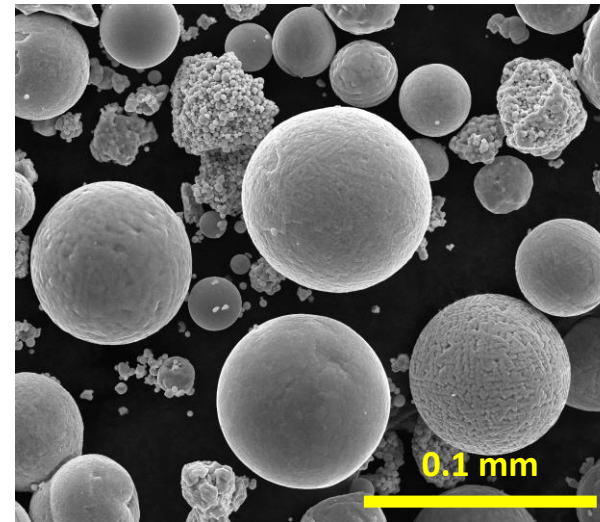
# Verbranding van geregenereerd poeder → cycliciteit

Origineel

- Verschil tussen commercieel & geregenereerd poeder
- Vergelijking van regeneratie-methodes



Geregenereerd



# De Praktijk



# Drie lagen

1. Fundamenteel onderzoek @ TU/e  
(in samenwerking met allerlei universiteiten)

TU/e



2. Ecosysteem ontwikkeling @ Metalot

metalot

3. Demonstratie & implementatie @ Iron+ & RIFT

Iron+

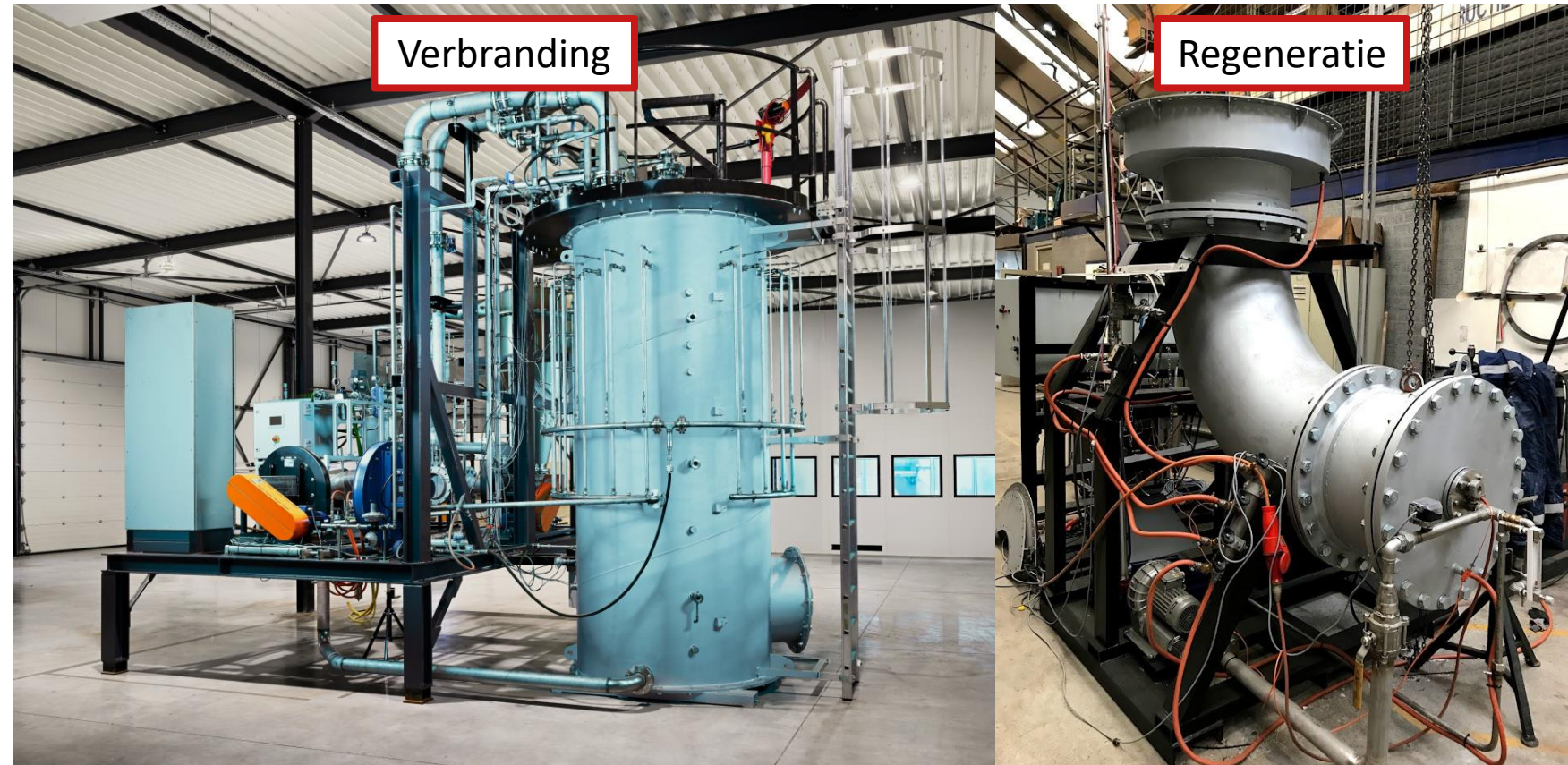


RIFT

TU/e

# Metalot

- Link tussen onderzoek en bedrijven
- Future energy laboratorium
- Start-up generatie



# Tijlijn



2020



Lighthouse MP

Swinkels (Bavaria)

0.1 MW

2023



OPZuid MP

LaTrappe (Swinkels)

1.0 MW

2024



MF & Stadswarmte

Uniper (Maasvlakte)

5 MW

2028



MF International

Uniper & Swinkels

5+5 MW

>2030



Grootschalige MF

Industrie & Energie

10-2000 MW



# RIFT



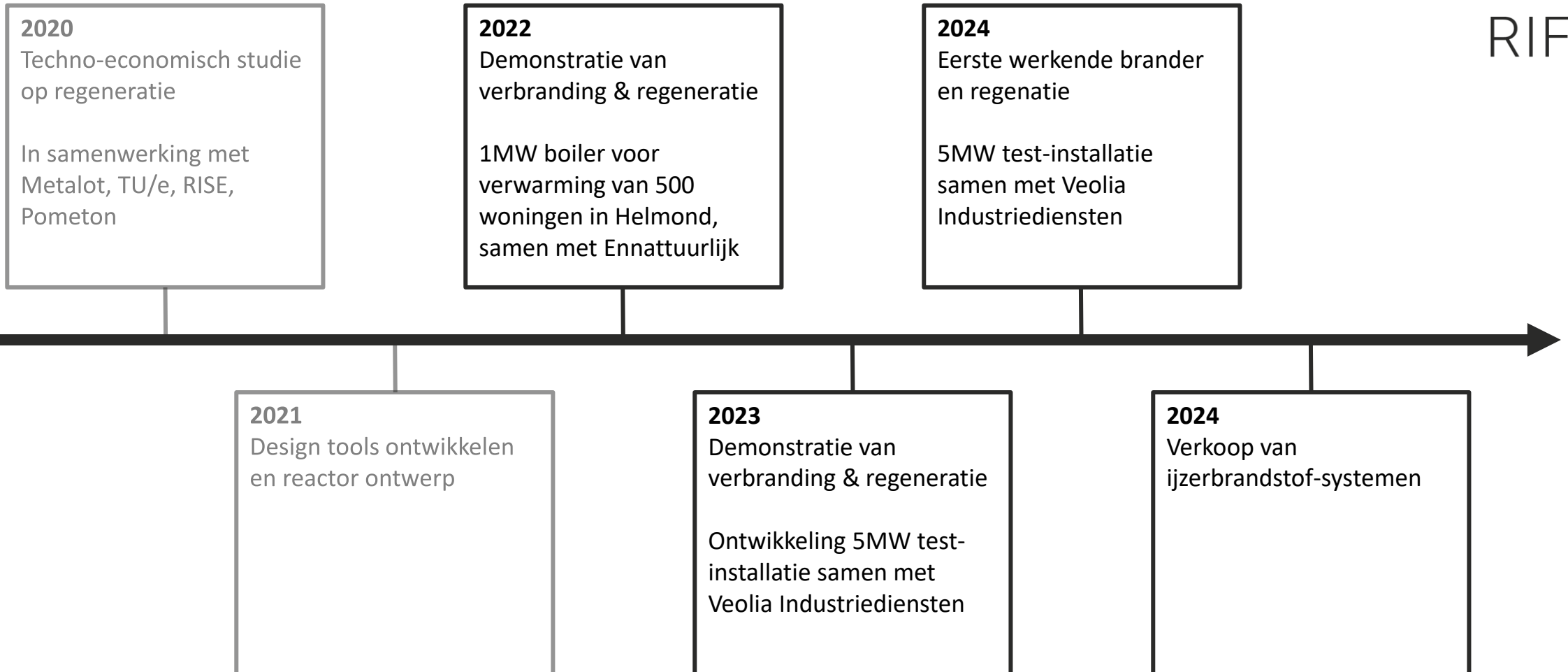
- Start-up vanuit de TU/e (studententeam Solid)
- Ontwikkeling van branders en regeneratie-reactoren
- Bill Gates “Breakthrough Energy” fonds
- Voorlopige focus op stadsverwarming en industrie



# Tijlijn



RIFT



# Samenvatting

1. Duurzame energieopslag is een grote uitdaging
2. IJzerpoeder is uitermate geschikt voor intercontinentaal transport en seizoensopslag
3. Technische universiteit Eindhoven loopt voorop in het onderzoek
4. Binnen 10 jaar kunnen delen van Nederland mogelijk al op ijzer stoken

# Het Team @ TU/e

- Mike Golombok
- Jeroen van Oijen
- Nico Dam
- Niels Deen
- Benedicte Cuenot
- Giulia Finotello
- Yali Tang
- Tess Homan
- Xiaocheng Mi
- Yuriy Shoshyn
- Giel Ramaekers
- Roy Hermanns
- Philip de Goey
- Mohammadreza Baigmohammadi
- Daoguan Ning
- Mark Hulsbos
- Aravind Ravi
- Leon Thijs
- Muhammed Abdallah
- Helen Prime
- Toos van Gool
- Jesse Hameete
- Willie Prasadha
- Victor Kornilov
- Swagnik Guhathakurta
- Conrad Hessels
- Akmal Irfan Majid
- Niek van Rooij
- Mohammad Sohrabi
- Tim Spee
- Nicole Stevens
- Xin Liu
- Team Solid (30 students) + many BSc/MSc grads**

# Partners



# Financiële steun

This research has received funding from the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme Grant agreement No. 884916, the Dutch Research Council (NWO) Grant agreement No. 17688, the China Scholarship Council (CSC) Grant agreement 201806160050, Opzuid (stimulus) Grant agreement No. PROJ-02594, Province Noord-Brabant Grant agreements No. C2255267/4615563 and C2236274/4446537.



European Research Council  
Established by the European Commission



Netherlands Enterprise Agency

Provincie Noord-Brabant





**Contact:**

Conrad Hessels

[c.j.m.hessels@tue.nl](mailto:c.j.m.hessels@tue.nl)

**Bedankt voor uw aandacht!**