



DIFFER

TU/e  
EINDHOVEN  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY

Nikhef

# Data-driven modeling voor thermische systemen in big science en industrie

**regeltechniek**  
systeem identificatie

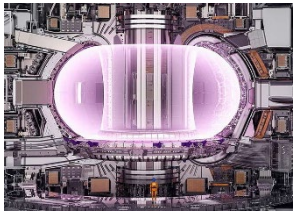
**thermisch**  
natuurkunde

Matthijs van Berkel  
namens

**DIFFER en Nikhef**  
**TU Eindhoven**



# Modelleren en regelen cruciaal voor thermische systemen in hightech industrie en big science



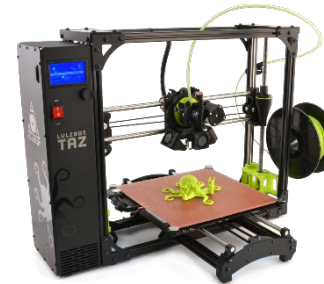
Kernfusie-  
reactoren  
DIFFER



Zwaartekracht-  
golfdetectie  
Nikhef



Chip-machine



2D/3D-printen



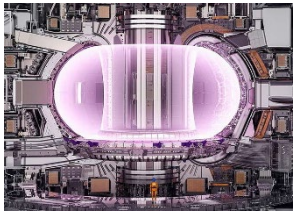
Elektronen-  
Microscop



Kankercellen en  
tumoren



# Verleggen technologische grenzen rekening houdend met thermische belastingen



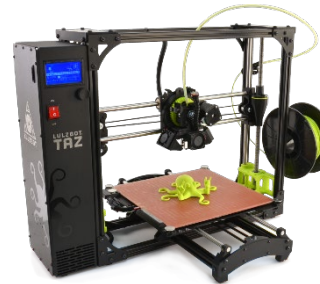
efficiëntie



gevoeligheid



< 13.5  
nanometer



sneller drogen en  
printen



reductie kalibratie  
tijd en precisie



nauwkeuriger lokaal  
verwarmen

Gemeenschappelijk: dezelfde wiskundige beschrijvingen



# Partieel differentiaal vergelijking voor thermisch transport

## kernfusie

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}} = \frac{1}{\rho} \underbrace{\frac{\partial}{\partial \rho}} \left( \underbrace{\rho D n \frac{\partial T}{\partial \rho}} + \underbrace{\rho V n T} \right) + \underbrace{KT} + \underbrace{Q(\rho, t)}$$

tijdsevolutie      diffusie      convectie      demping      verhitting  
e.g. microgolven

## lithografie

$$\underbrace{\rho c H \frac{\partial T}{\partial t}} = \underbrace{kH \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)} - \underbrace{hT} + \underbrace{Q_{exp}}$$

warmte-capaciteit      conductie      koeling      verhitting  
door licht

## medisch (weefsel)

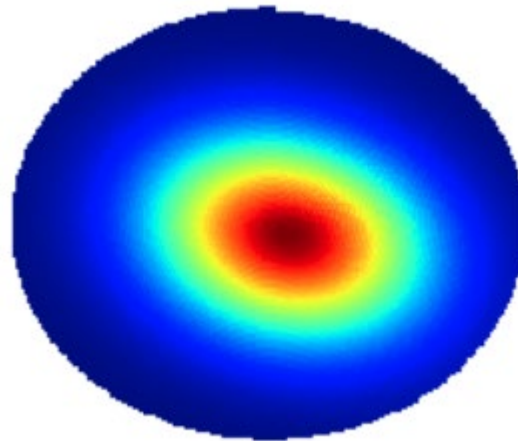
$$\rho c \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \underbrace{k \nabla^2 T(r, t)} - \underbrace{w_b(r) c_b (T(r, t) - T_b)} + \underbrace{Q(r, t)}$$

conductie      convectie (perfusie)      verhitting (echo)



## Detectie en correctie van laser wavefront in gravitatiegolfdetector (Einstein telescoop)

- verhoging van circulerend laser vermogen betere sensitiviteit
- verhoging van gedeponeerde hitte van de laser
- thermo-optische effecten en thermo-elastische deformatie
- wavefront distorsies die weggeregeld moeten worden



Toepassing regeltechnische modellen zal de prestaties en nauwkeurigheid verbeteren



# Dynamische metingen cruciaal voor modelvorming

Totale temperatuur verdeling gevolg van combinatie van componenten

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \underbrace{\rho D n \frac{\partial T}{\partial \rho}}_{\text{diffusie}} + \underbrace{\rho V n T}_{\text{convectie}} \right) + \underbrace{KT}_{\text{demping}} + \underbrace{Q(\rho, t)}_{\text{verhitting}}$$

tj: **statisch**  $\approx$  diffusie    convectie    demping    verhitting  
e.g. microgolven

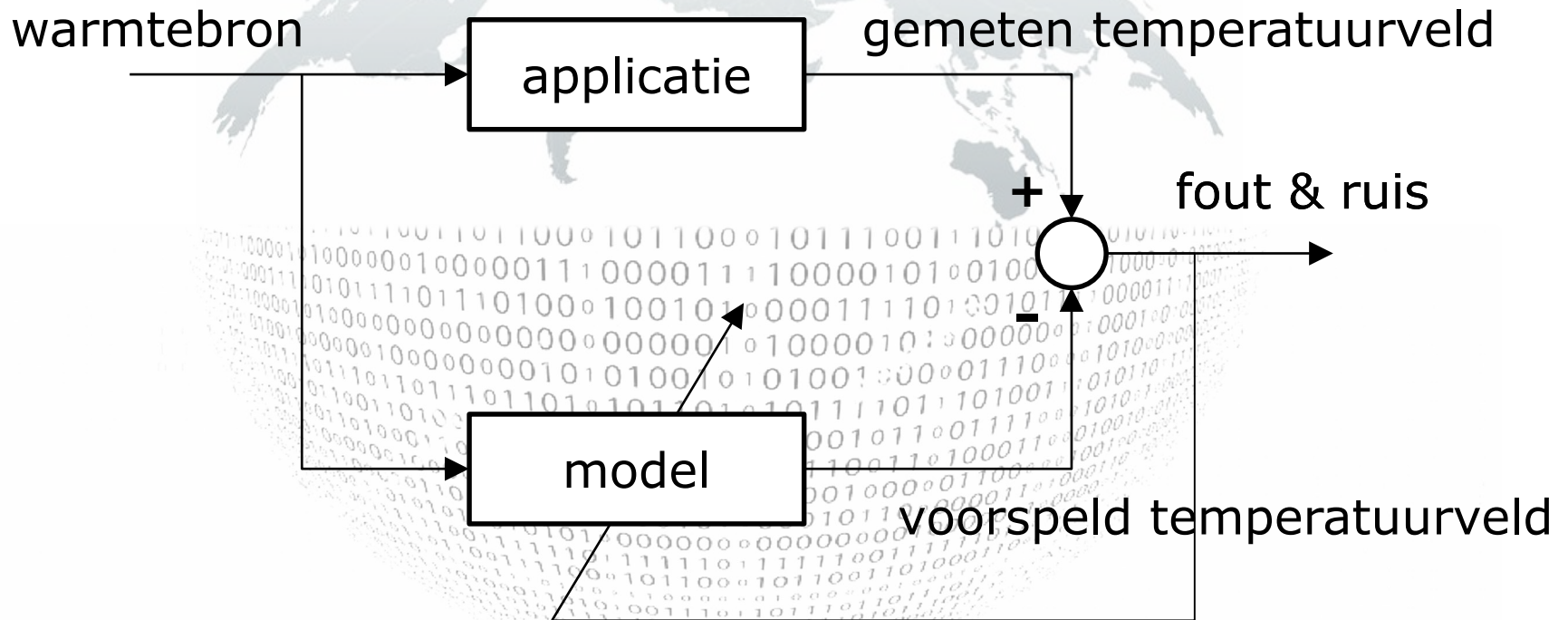
Individuele processen acteren op verschillende tijdschalen

Conclusie:

- (slimme) variatie in tijd identificatie van componenten
- regeltechniek gebaseerd op dynamische verandering van het systeem
- dynamische metingen beste karakterisatie van complexe systemen

80% modellen in regeltechniek: meetdata(-gestuurd)

# Identificatie van model (open-lus)



11 first author journal publications on this topic in control engineering journals and nuclear fusion journals

Highlights:

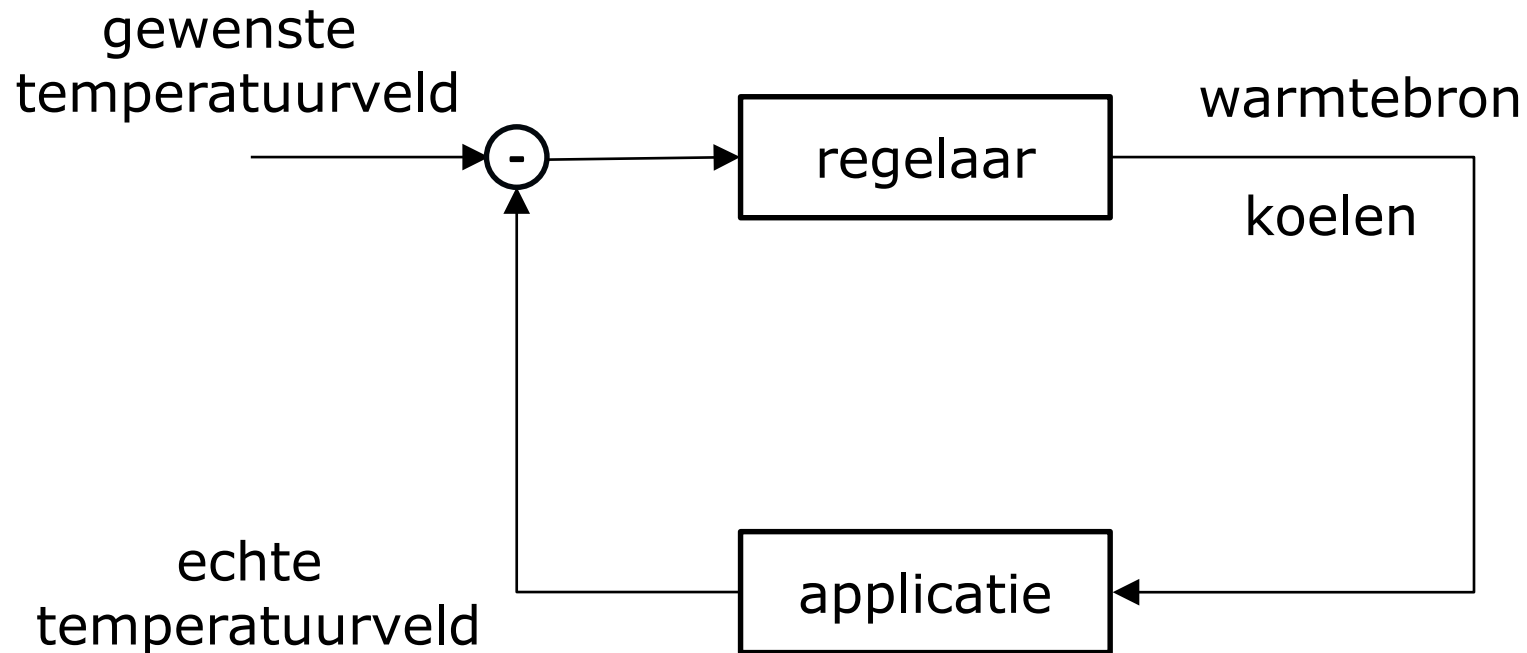
van Berkel, Vandersteen et al. *Automatica* 50 (8), 2014 (DIFFER, VUB, TU/e)

van Berkel, Kobayashi et al. *Nuclear Fusion* 58 (9), 2018 (DIFFER, NIFS)

Schneidewind, van Berkel et al. *Water Resources Research* 52 (8), 2016 (RWTH, DIFFER)



## Principe van regeltechniek (gesloten-lus)



Modelvorming voor regeltechniek (soms) complexer



# Modelvorming voor thermische systemen cruciaal

## grondbegrippen

white-box

(first-principles)

- finite element
- finite difference (ANSYS, COMSOL)
- model reductie
- regel modellen

## hybride

grey-box

dr.ir. M. van Berkel

- PDE estimation
- large-scale finite dimensional descriptions
- optimale sensor plaatsing
- maximum-likelihood
- Bayesian
- experimenteel ontwerp

## data-driven

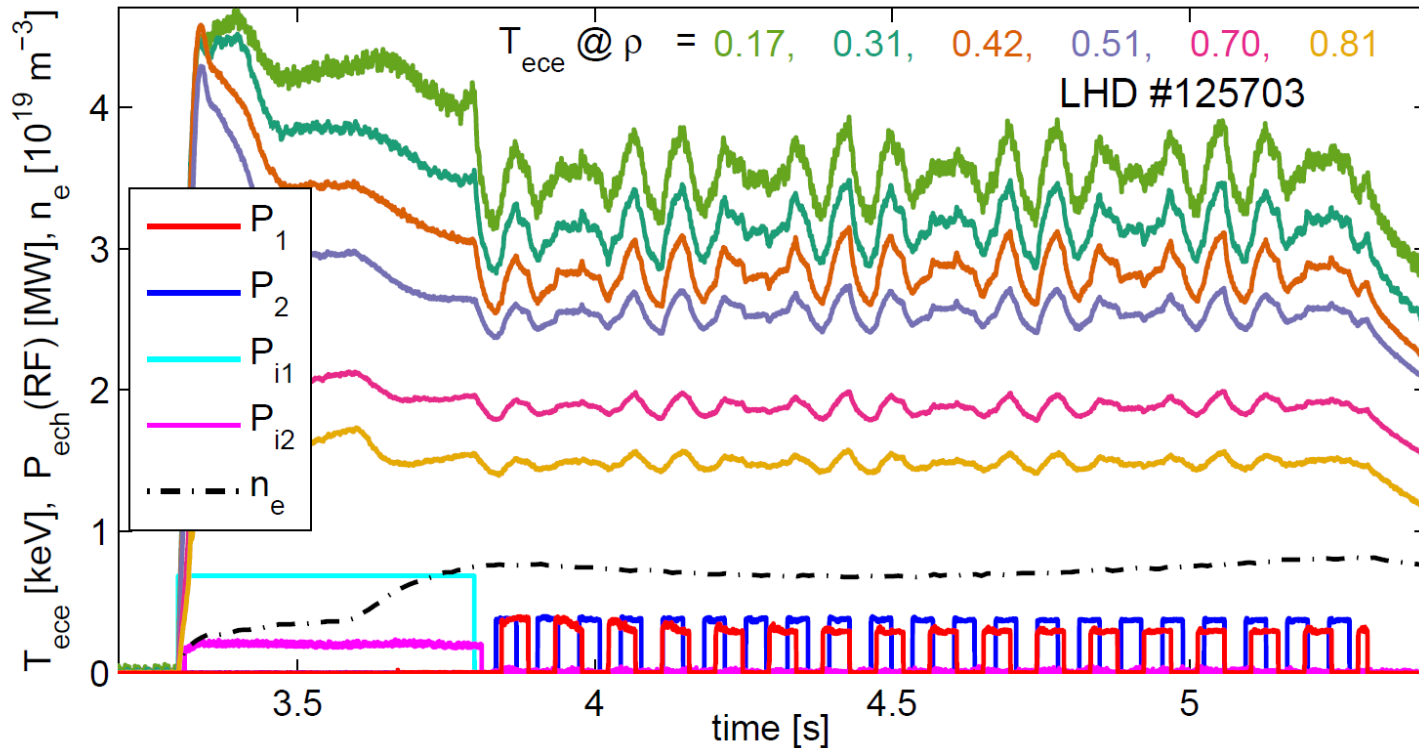
black-box

dr.ir. T. Oomen

- state-space estimation
- frequency response functions
- machine learning
- local parametric models (transients)

# Opgebouwde expertise

# Voorbeeld: hoe bepalen accurate thermische modellen (grey-box)



$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{tijdsevolutie}} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \underbrace{\rho D n \frac{\partial T}{\partial \rho}}_{\text{diffusie}} + \underbrace{\rho V n T}_{\text{convectie}} \right) + \underbrace{KT}_{\text{demping}} + \underbrace{Q(\rho, t)}_{\text{verhitting e.g. microgolven}}$$

tijdsevolutie

diffusie

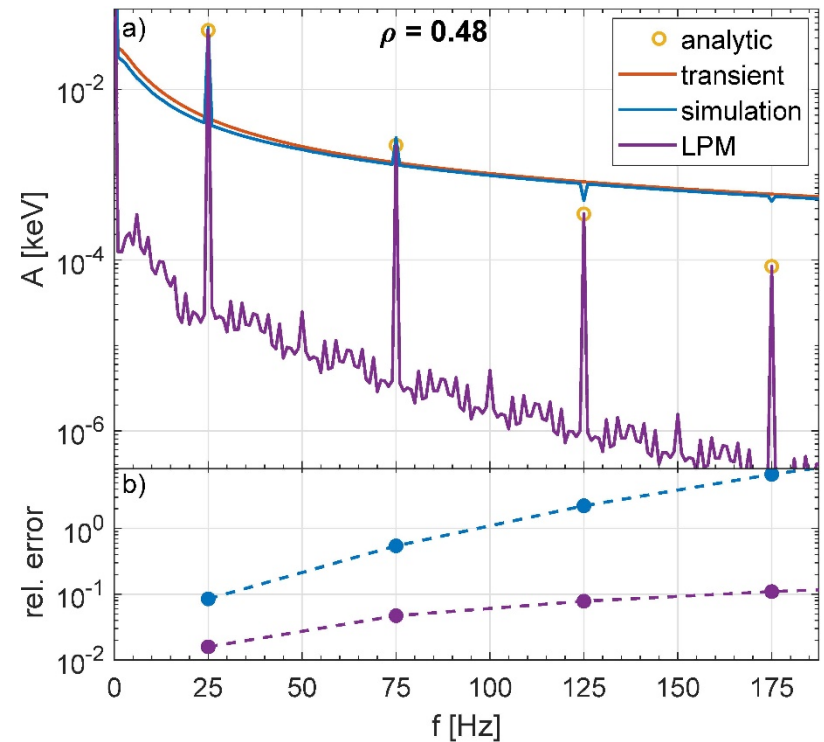
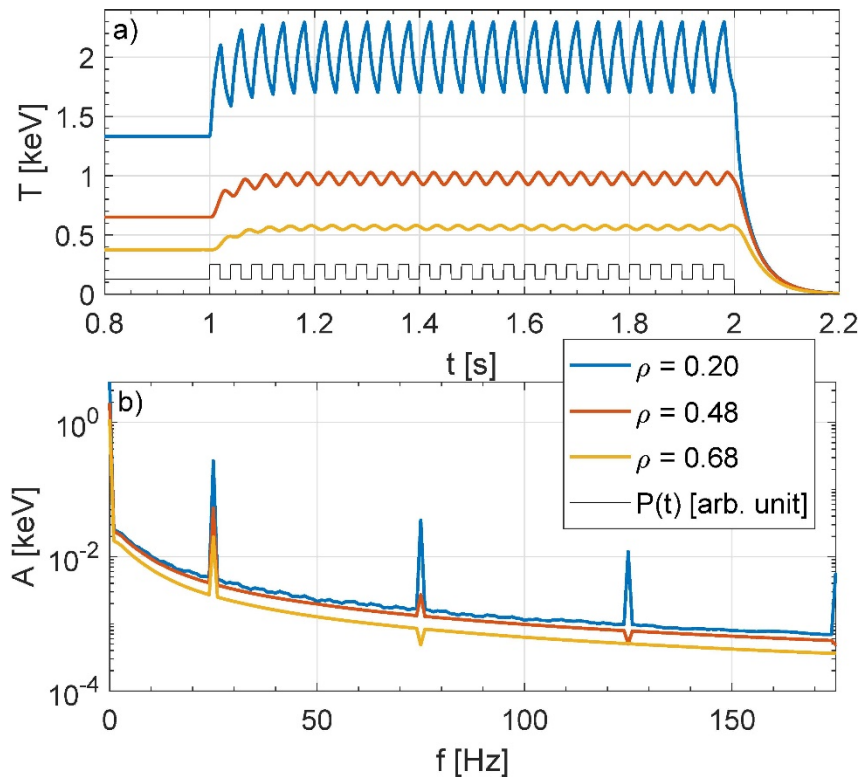
convectie

demping

verhitting  
e.g. microgolven

# Voorbeeld gemeenschappelijk probleem: transiënten

## Versnellen van modelvorming: local parametric methods



Kernfusie: van Berkel, Kobayashi et al. *Nuclear Fusion* 57 (12), 2018

Lithografie/FEM: Evers, de Jager et al. proceedings of 18th IFAC Symposium on System Identification, Sweden, 2018

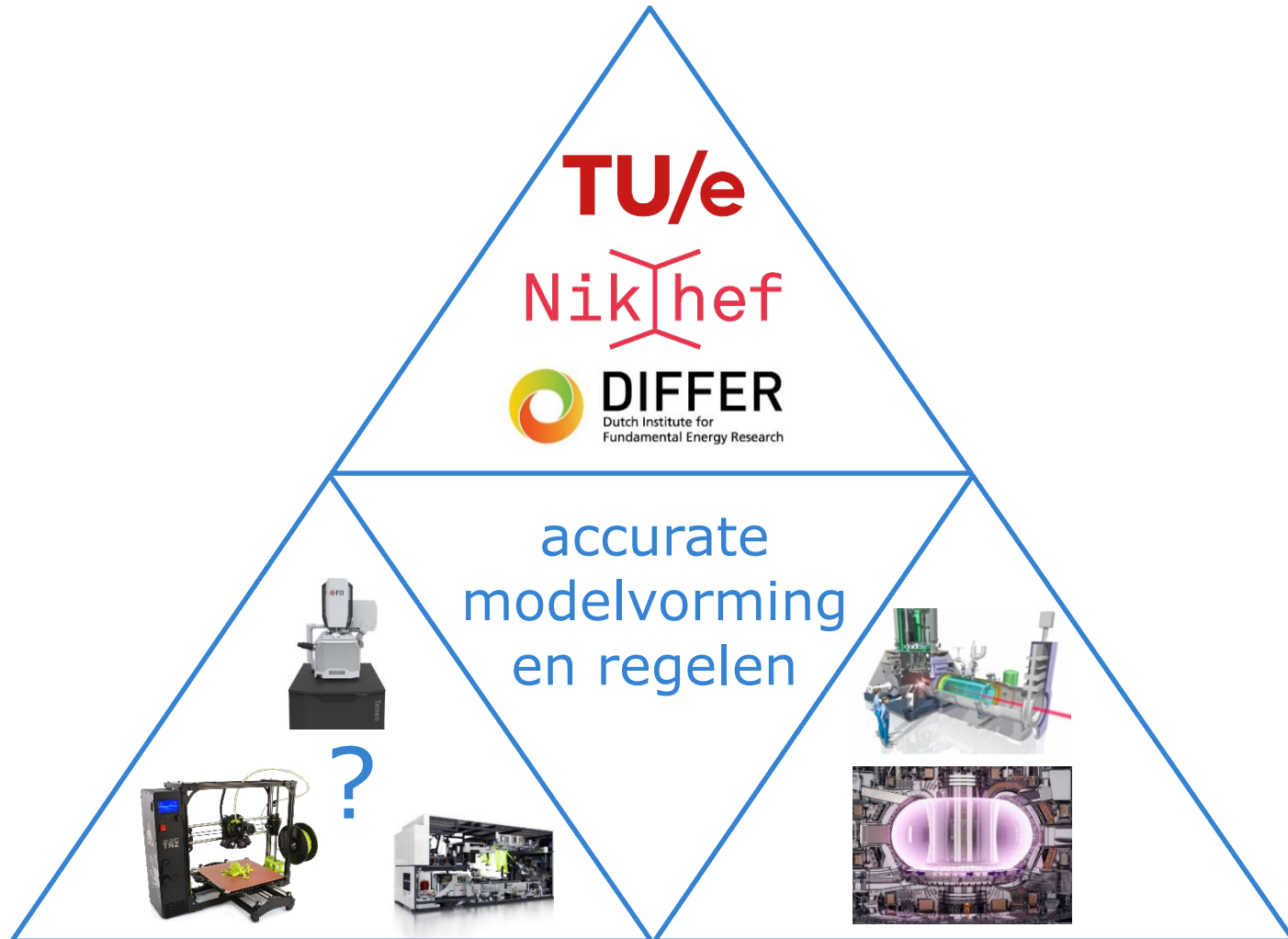
Hydrologie: Schneidewind, van Berkel et al. *Water Resources Research* 52 (8), 2016

# Uitdagingen thermisch transport

- plasma-gas-vloeistof-vast interfaces
- gekoppeld transport: thermo-mechanisch deeltjes – thermische koppeling
- snel meten (kalibreren) en regelen
- sensoren plaatsing
- regelen met limitatie op verwarmen/koelen
- regelen van distributies (large-scale)
- niet-lineair gedrag



# Gemeenschappelijke uitdagingen voor industrie en big science



## NWO perspectief-voorstel

Programma ongeveer 2,4 (1,5-5) miljoen euro totaal  
8 PhDs DIFFER, NIKHEF, TU/e, en industrie

- 2 PhDs (verdere) ontwikkeling van methodes voor thermisch modelleren
- 1 PhD toepassing van methodes voor kernfusie
- 1 PhD toepassing van methodes voor Einstein telescoop
- 4 PhDs toepassing en adaptatie van methodes industriële applicaties (intensieve samenwerking)

70% NWO

1,68 miljoen

30% industrie

0,72 miljoen (50% mag in kind!)

4 PhDs intensief met industrie

[M.vanBerkel@diffier.nl](mailto:M.vanBerkel@diffier.nl)