

Actief schild tegen de hitte van een fusiereactor

De hitteontwikkeling in een operationele kernfusiereactor is dermate hoog dat actieve regeling nodig is om te voorkomen dat de reactorwand het begeeft. Het NWO-instituut DIFFER werkt samen met het Swiss Plasma Center van de Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) om meet- en regelmethodes te ontwikkelen die de reactorwand actief beschermen. Het fusieplasma dicht bij de wand moet continu worden gemonitord en er moet een gepaste hoeveelheid neutraal gas geïnjecteerd worden wanneer de wand oververhit dreigt te raken. Echter, het maken van een regelalgoritme dat de juiste hoeveelheid gas berekent vereist tijdsafhankelijke modellen en die zijn nog niet beschikbaar. Dit artikel geeft inzicht in de onlangs in *Nature Communications* verschenen publicatie [1] over de gezette stappen richting een werkbare oplossing en schetst een beeld van de toekomst van deze onderzoekslijn binnen kernfusie.

Jesse Koenders

Energy Systems and Control group, DIFFER, Dutch Institute for Fundamental Energy Research, Eindhoven

j.t.w.koenders@diffier.nl

zie ook de auteurslijst van [1]

Het de facto leidend ontwerp van een economisch rendabele kernfusiereactor is de *tokamak* (Russisch тороидальная камера с магнитными катушками: Toroïdale kamer met magnetische spoelen). In een tokamak wordt door middel van magnetische velden een plasma van geladen waterstofkernen opgesloten in een torusvormige vacuümkamer*. Als deze lang genoeg opgesloten blijven onder de juiste condities vinden er harde botsingen plaats tussen de kernen, waardoor deze samensmelten of 'fuseren'. Tijdens deze fusiereactie komt een grote hoeveelheid energie vrij. Het doel van een kernfusiereactor is om deze vrijgeko-

* Voor de tokamak ITER is dit een kamer van 1400 m³ met een druk van 1×10⁻⁴ Pa.

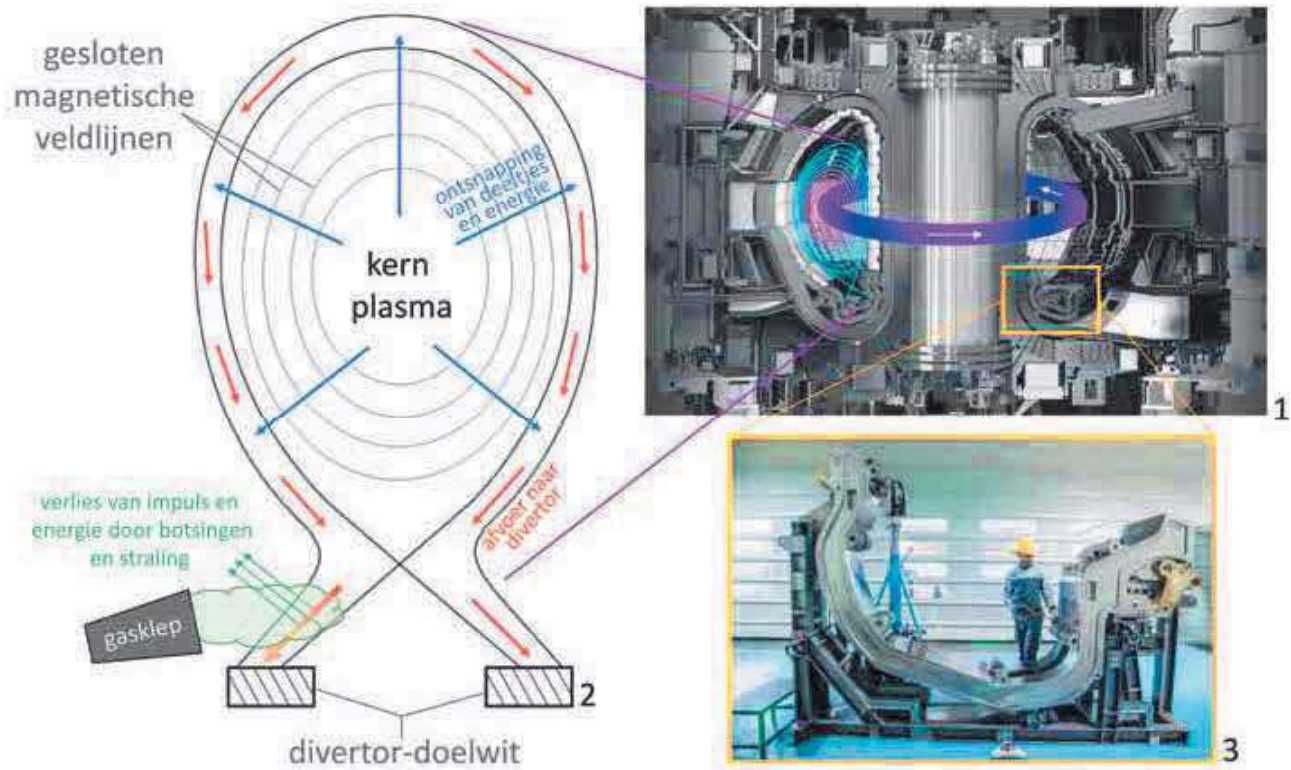
men energie te kunnen leveren aan het elektriciteitsnet, als schone en veilige energiebron.

Een van de benodigde condities voor voldoende fusiereacties is een hoge temperatuur: het kernplasma heeft een temperatuur van rond de 175 miljoen graden Celsius nodig om de fusiereacties op gang te houden. Het is duidelijk dat een interactie van zulke hete plasmadeeltjes met de reactorwand catastrofaal kan zijn, iets wat door middel van opsluiting met magnetische velden moet worden voorkomen. Helaas is de magnetische opsluiting in een tokamak niet perfect: deeltjes zullen na een bepaalde opsluiting ontsnapte deeltjes de reactorwand ongehinderd raken, dan zal deze onherroepelijk worden beschadigd.

Om deze plasma-wand-interactie gecontroleerd te laten verlopen wordt gebruikgemaakt van de zogenaamde *divertor*-configuratie. De hete ontsnapte deeltjes worden letterlijk *omgeleid*, ofwel *diverted*, naar een gedeelte van de wand dat specifiek ontworpen is voor deze extreme condities: het *divertor-doelwit*. In de tokamak ITER, die op dit moment in Zuid-Frankrijk wordt gebouwd, zal het divertor-doelwit bedekt worden met een bepantsering van wolfram (smeltpunt 3659 °C). Dankzij internationale onderzoeksinspanningen kan het ITER-divertordesign zeker 15 MW/m² incasseren [2]. Ter referentie, dit is 15 maal zo veel als het hiteschild van een space-shuttle. De verwachte belasting (zonder maatregelen zoals koelen) is echter 100 MW/m²; er moet dus nog een groot gedeelte van de inkomende energie worden weggenomen voor deze het doelwit raakt. De voorziene oplossing is het lokaal koelen van het plasma door middel van het injecteren van neutraal gas. Dit neutrale gas vermindert de energie (door straling) en impuls (door botsingen) van het plasma. Bij voldoende afname van energie en impuls komt het plasma in de zogenoemde *divertor detachment*-toestand terecht. Het actief regelen van deze *divertor detachment*-toestand is een noodzaak voor toekomstige fusiereactoren [3,4]. Figuur 1 laat een doorsnede zien van de ITER-reactor, met daarin het kernplasma en divertor, en de manier waarop ontsnapte deeltjes naar het divertor-doelwit worden geleid.

De regellus

De vraag is nu: hoeveel neutraal gas moet worden geïnjecteerd om de diver-



Figuur 1 Beeldvorming van het probleem. 1: Doorsnede van de ITER-reactor, de paarse band beeldt het plasma uit dat zich rond de torus verplaatst. De magnetische veldlijnen die het plasma opsluiten zijn weergegeven van roze (kern) naar lichtblauw (rand). 2: Uitvergroting van de doorsnede van het plasma: wanneer deeltjes en energie het kernplasma verlaten, worden deze afgevoerd langs magneetvelden naar de twee divertor-doelwitten. Door middel van gasinjectie kan zowel impuls als energie worden weggenomen van het plasma voor deze een divertor-doelwit raakt. 3: Productie van één van de 54 cassettes van de ITER-divertor, deze cassettes worden bekleed met wolfram. Beeldmateriaal verkegen van: www.iter.org

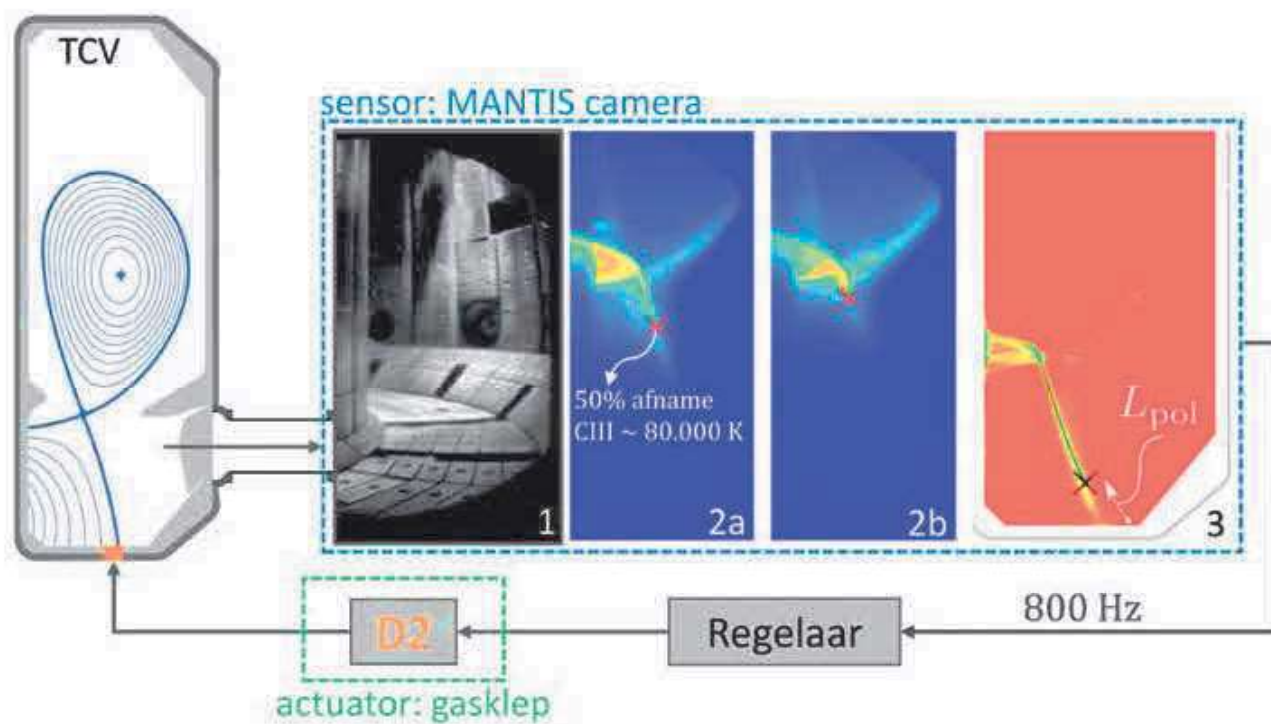
tor te beschermen? Bij te veel gasinjectie zal het kernplasma afkoelen, waardoor de fusiereacties stoppen. Echter, te weinig injectie zal ervoor zorgen dat het divertor-doelwit het begeeft, omdat het plasma met te veel energie en impuls de wand zal raken. Deze afweging kan perfect worden gecontroleerd door een meet- en regelsysteem. Zo'n systeem bestaat uit een sensor en een actuator gekoppeld aan een te regelen proces. Door middel van terugkoppeling van metingen ontstaat een zogenoemde regellus. Neem als voorbeeld de *cruise control* van een auto. Na het instellen van een gewenste snelheid kan continu met een snelheidsmeter (de sensor) de afwijking van de gewenste snelheid (referentie) worden gemeten. Een regelaar moet gepast ingrijpen door te remmen of te accelereren (de actuator). Het proces is hierbij de resulterende voertuigacceleratie als gevolg van een kracht tussen band en

wegdek. Een regelaar (bijvoorbeeld een PID) bepaalt de hoeveelheid ingrijpen die gepast is bij een bepaalde afwijking van de referentie. Generiek betekent dit: hoe groter de afwijking, hoe sterker zal worden ingegrepen. In de praktijk zullen meer condities worden meegenomen, in dit voorbeeld zullen onder andere gewenste rijcomfort en veiligheid invloed hebben op het ontwerp van de regelaar. De uiteindelijke prestaties van het regelalgoritme zijn een afweging tussen het volgedrag (wordt de gewenste referentie bereikt) en robuustheid (blijft de regelaar werken in verschillende omstandigheden).

In de tokamak bestaat het te controleren proces uit de vertaling van een hoeveelheid neutraal gas in de divertor en de resulterende afname van energie en impuls van het inkomende plasma. De actuator bestaat hierbij uit een gasinjectiemechanisme. Neutraal gas kan

worden toegevoegd als er te weinig gekoeld wordt. De reactorwand zelf werkt als een pomp en neemt het neutrale gas in zich op. De hoeveelheid neutraal gas in de divertor neemt dus af als de gas-klep dicht is. Als laatste is een sensor nodig om continu (honderden keren per seconde) te meten wat de huidige status van het inkomende plasma is. In de TCV-tokamak [5] bij de EPFL in Lausanne, Zwitserland, wordt dit gedaan door middel van een speciaal camera-systeem genaamd MANTIS [6]. MANTIS staat voor *Multispectral Advanced Narrowband Tokamak Imaging System* en is ontwikkeld door DIFFER, EPFL en MIT. Het systeem bestaat uit tien camera's die ieder een specifieke golflengte van het elektromagnetische spectrum bekijken.

Een van deze camera's bekijkt het licht van tweemaal geïoniseerde koolstofionen: C^{2+} . Dit wordt aangeduid met de



Figuur 2 Overzicht van de regellus. 1: Beeld van de MANTIS-camera [6]. 2: Spectraal gefilterd beeld met een CIII-filter waardoor enkel licht afkomstig van C^{2+} ionen te zien is. Het gevonden front door het beeldverwerkingsalgoritme [8] is aangegeven met een rood kruis. De positie van het front is hoger in 2b dan in 2a, wat een afkoeling van het divertorplasma weergeeft [1]. 3: Weergave van de regelvariabele L_{pol} , deze variabele is gedefinieerd als de totale afstand van het divertor-doelwit tot de positie van het koufront [1]. De regelvariabele L_{pol} wordt naar een regelaar verzonden welke vervolgens, afhankelijk van de gewenste positie, bepaalt hoeveel neutraal waterstofgas (D_2) in de TCV-tokamak wordt geïnjecteerd.

spectrale lijn CIII (koolstof III). Deze spectrale lijn geeft inzicht in de status van het plasma: de hoeveelheid licht is namelijk sterk afhankelijk van de lokale temperatuur. De afname van licht in een bepaalde richting kan worden gebruikt om een temperatuurschatting te maken. Specifiek de 50% afname van een heet gedeelte naar een koud gedeelte komt overeen met een temperatuur van rond de 80.000 °C [7], significant kouder dan het kernplasma. Dit kan worden gezien als een soort koufront. De positie van dit front geeft een beeld van de temperatuur van het divertorplasma. Hoe verder het front verwijderd is van het divertor-doelwit, hoe kouder het plasma dat het doelwit raakt. De positie van dit front wordt aangegeven met de variabele L_{pol} die 800 keer per seconde wordt bepaald door middel van een beeldverwerkingsalgoritme [8]. Figuur 2 geeft een overzicht van de regellus. In de volgende paragraaf gaan we in op het ontwerp van de regelaar.

Regelaarontwerp

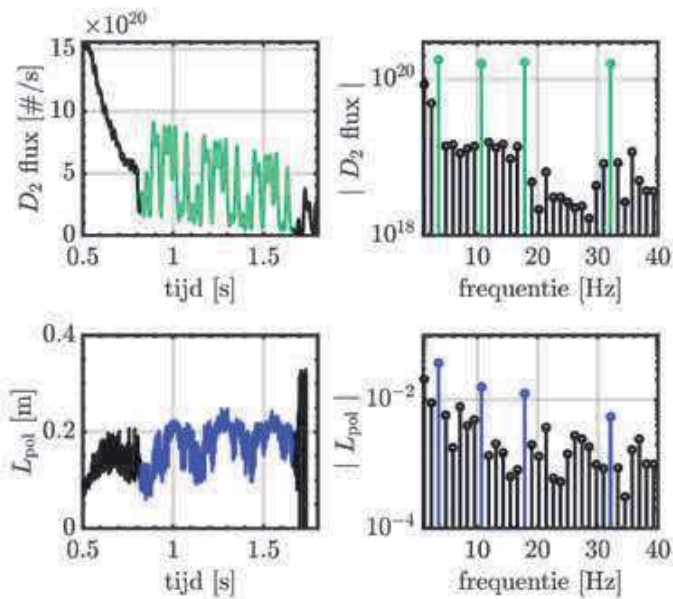
Nu de regellus bekend is, zal een regelaar moeten worden ontworpen die bepaalt hoeveel gas er zal worden geïnjecteerd afhankelijk van de conditie van het divertorplasma. Het ontwerpen van een regelaar is een vakgebied op zichzelf. Er bestaat een groot scala aan regeltheorie [9] waarmee een regelaar kan worden ontworpen, mits wiskundige modellen van het tijdsafhankelijke gedrag van het te regelen proces voorhanden zijn.

Een grote uitdaging bij het regelaarontwerp in TCV is het ontbreken van tijdsafhankelijke wiskundige modellen van het divertorplasma. Fusiefysici hebben al veel ervaring met dit proces, maar varen hierin deels op intuïtie en deels op ervaring uit voorgaande experimenten. Daarnaast wordt veel gebruikgemaakt van de code SOLPS-ITER [10], een eindige-elementenmethode die de standaard heeft gezet op het gebied van modelleren van het divertorplasma. Het ontwerp van de ITER-divertor is groten-

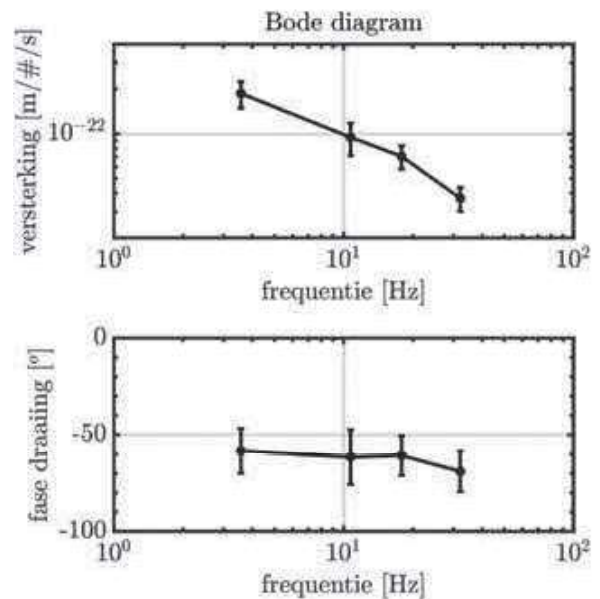
deels gebaseerd op deze code. SOLPS-ITER geeft echter enkel statische oplossingen, terwijl juist een model van de tijdsevolutie nodig is om een regelaar te ontwerpen. Het artikel in *Nature Communications* [1] beschrijft de toepassing van een systematische wijze waarmee toch een regelaar kan worden ontworpen, zonder een op voorhand beschikbaar wiskundig model. Door middel van een techniek genoemd *systeemidentificatie* [11] kan het tijdsafhankelijke gedrag van een proces experimenteel worden geïdentificeerd. Het resulterende model van het proces kan het effect van de actuator op de gemeten toestand omschrijven, zonder dat kennis nodig is van de onderliggende fysische processen. Dit model kan vervolgens worden gebruikt om een regelaar mee te ontwerpen.

Systeemidentificatie in TCV

De systeemidentificatie in TCV is gedaan door een nauwkeurig ontworpen verstoringssignaal naar de actuator (de gasklep)



Figuur 3 Systeemidentificatie experiment #65307. In de linker kolom worden de signalen in het tijddomein weergegeven. Boven staat het geïnjecteerde waterstofgas met de verzonden verstoring weergegeven in groen. Onder staat de positie van het front L_{pol} met de reactie tijdens de verstoring weergegeven in blauw. In de rechterkolom zijn het groene en blauwe signaal respectievelijk weergegeven in het frequentiedomein. De frequenties in het verstoringssignaal (groen) steken duidelijk uit boven de andere frequenties en zijn terug te zien in de frontpositie (blauw). Dit figuur is gebaseerd op de data gepubliceerd in [1].



Figuur 4 Bode-diagram van het te regelen proces. De relatieve versterking (boven) en fasedraaiing (onder) per frequentie tussen het verstoringssignaal en de gemeten positie van het front L_{pol} . Dit Bode-diagram geeft informatie over het tussenliggende proces en wordt gebruikt om een regelaar te ontwerpen. Dit figuur is gebaseerd op de data gepubliceerd in [1].

te sturen en vervolgens de reactie te meten op de sensor (de frontpositie L_{pol}) [12]. Bij kleine verstoringen zegt de relatieve versterkingsfactor en fasedraaiing (vertraging) tussen het verzonden verstoringssignaal naar de actuator en de gemeten frontpositie iets over het tijdsafhankelijke gedrag van het tussenliggende proces. Het resultaat is een wiskundig model van het systeem in het frequentiedomein: een overdrachtsfunctie. Deze overdrachtsfunctie is een zwarte-doosmodel van het proces en beschrijft het effect van gasinjectie op de positie van het front.

Figuur 3 laat de gemeten signalen tijdens het systeemidentificatie-experiment zien en de weergave daarvan in het frequentiedomein. Uit deze resultaten is duidelijk af te leiden dat de frequenties die in het verzonden verstoringssignaal zitten ook terug te zien zijn in het gemeten signaal L_{pol} , een voorwaarde voor een goede identificatie. Figuur 4 laat een zogenoemd Bode-diagram zien van het resultaat, een typische manier van weer-

gave van een overdrachtsfunctie. Deze overdrachtsfunctie is gebruikt om het regelalgoritme te ontwerpen.

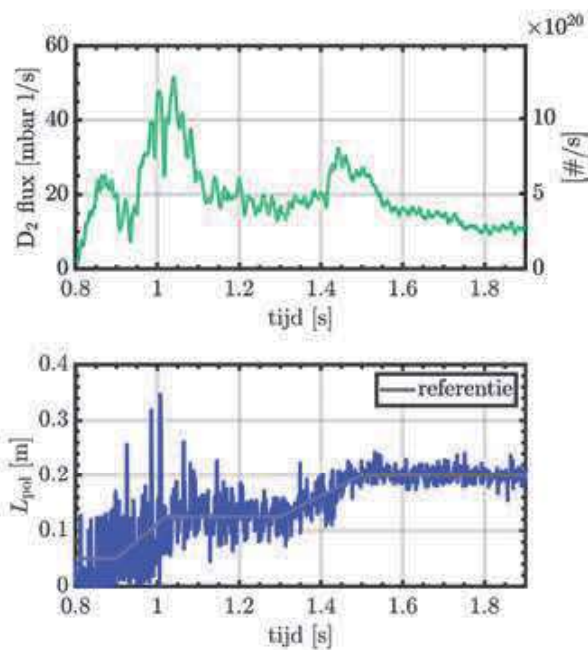
Resultaten van de regelaar

De ontworpen regelaar gebaseerd op de systeemidentificatie is toegepast tijdens meerdere experimenten. Het volgedrag van de regelaar is getest door een gewenste positie (referentie) van het front L_{pol} als functie van tijd naar de regelaar te versturen. Vervolgens is gemeten of de regelaar daadwerkelijk in staat is om de gasinjectie zo aan te passen dat deze gewenste frontpositie wordt gevolgd. Figuren 5 en 6 laten de resultaten van twee van deze experimenten zien. Het is duidelijk dat de regelaar in staat is om L_{pol} naar een gewenste positie te brengen. Met dit regelalgoritme is het dus duidelijk mogelijk het divertorplasma gecontroleerd af te laten koelen door middel van een regelaar die nauwkeurig bepaalt hoeveel neutraal waterstofgas op ieder moment nodig is.

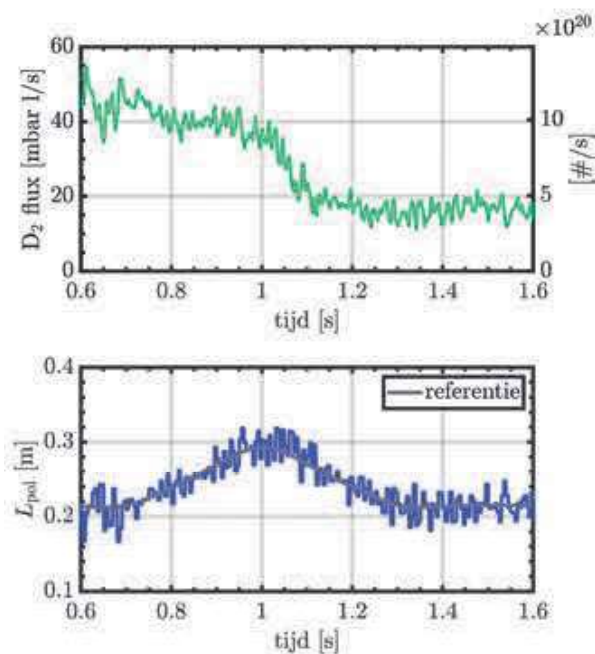
Conclusie en discussie

In dit artikel hebben we geprobeerd een behapbare samenvatting te geven van de recent gezette stappen richting de gecontroleerde afvoer van deeltjes en hitte in een kernfusiereactor. Door middel van een systematische aanpak van het probleem is een regelaar ontworpen die gecontroleerd het plasma in de divertor van de reactor kan afkoelen. Het tussenliggende proces tussen gasinjectie en afkoeling is hierbij gemeten door middel van systeemidentificatie. Deze methode geeft een accuraat genoeg model van het systeem om daarmee een regelaar te ontwerpen, zonder dat de exacte fysica achter het systeem bekend hoeft te zijn.

Let wel, de resultaten van dit onderzoek zijn enkel een kleine stap richting de uiteindelijke oplossing. De condities van het plasma, zowel in de kern als de divertor, zijn significant anders in ITER dan in de testreactor TCV. Het meten van een overdrachtsfunctie door middel van experimenten is, vanwege de zwarte-



Figuur 5 Resultaat van regelexperiment #65329. Geïnjecteerd waterstofgas tijdens het experiment (boven), en gemeten en gewenste frontpositie tijdens het experiment (onder). Dit figuur is gebaseerd op de data gepubliceerd in [1].



Figuur 6 Resultaat van regelexperiment #63193. Geïnjecteerd waterstofgas tijdens het experiment (boven), en gemeten en gewenste frontpositie tijdens het experiment (onder). Dit figuur is gebaseerd op de data gepubliceerd in [1].

dooskarakteristiek, niet extrapolerbaar naar grotere reactoren. Deze metingen zullen dus moeten worden uitgevoerd op verschillende testreactoren om verbanden te zoeken die inzicht geven in hoe de tijdsevolutie van processen schaal met reactorformaat. Dit kan worden gebruikt om tijdsafhankelijke wiskundige modellen van het divertorplasma te ontwikkelen en verifiëren die bruikbaar zijn voor regelaarontwerp.

Tot slot, in dit onderzoek is slechts één van de camera's van het systeem MANTIS gebruikt om een beeld te krijgen van het plasma in de divertor. Het MANTIS-systeem bestaat echter uit tien camera's. Door alle tien beelden te combineren kan een betere meting van het plasma worden verkregen. Ook zal in toekomstige reactoren meer dan één gassoort worden geïnjecteerd, ieder met een eigen effect op het divertorplasma. Het gebruik van meerdere gassen en camera's kan worden toegepast in een Meerdere-Ingang Meerdere-Uitgang regelconfiguratie om een nog beter resultaat te verkrijgen. Het vervolg van de samenwerking tussen DIFFER en EPFL richt zich op het

gebruik van meerdere gassen en camera's tegelijkertijd en is momenteel in volle gang.

Referenties

- 1 T. Ravensbergen et al., *Nat. Commun.* **12** (2021) 1105.
- 2 R.A. Pitts et al., *Nucl. Mater. Energy* **20** (2019) 100696.
- 3 H. Zohm et al., *Nucl. Fusion* **53** (2013) 073019.
- 4 A. Kallenbach et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **55** (2013) 124041.
- 5 S. Coda et al., *Nucl. Fusion* **59** (2019) 112023.
- 6 A. Perek et al., *Rev. Sci. Instrum.* **90** (2019) 123514.
- 7 C. Theiler et al., *Nucl. Fusion*, **57** (2017) 072008.
- 8 T. Ravensbergen et al., *Nucl. Fusion* **60** (2020) 066017.
- 9 Skogestad and Postlethwaite. *Multivariable Feedback Control, Analysis and Design* (2007).
- 10 S. Wiesen et al., *Nucl. Mater. Energy* **463** (2015) 480-484.
- 11 Pintelon & Schoukens, *System Identification: A frequency domain approach* (2012).
- 12 M. van Berkel et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **62** (2020) 094001.