

# NORTH – det varmeste sted i Skandinavien

Alexander S. Thrysøe, Asger S. Jacobsen, Thomas Jensen, Martin Jessen, Søren B. Korsholm, Jesper Rasmussen, Mirko Salewski, Mads G. Senstius, Volker Naulin, Raheesty D. Nem, Jens Juul Rasmussen, Mikhail Gryaznevich og Stefan K. Nielsen, *Sektionen for Plasmafysik og Fusionsenergi, DTU Fysik*

I et donutformet vakuumkammer, som befinder sig på Institut for Fysik ved Danmarks Tekniske Universitet, fastholdes et plasma med en temperatur på over  $100.000^{\circ}\text{C}$ . Stærke magnetfelter holder det flygtige plasma i skak, imens to magnetroner opvarmer plasmaets elektroner, så den høje temperatur opretholdes. Faciliteten kaldes NORTH og med denne kan forskere og studerende undersøge plasmadynamikken i det indesluttede plasma og dermed bidrage til udviklingen af fusionsenergi som en fremtidig energikilde her på Jorden.<sup>1</sup>

Fusion er den fysiske proces, som frigiver energi fra sammensmeltning af lette grundstoffer i Solen og de andre stjerner. Hvis vi kan skabe betingelserne for fusion i en reaktor her på Jorden, er potentialet for fusionsenergi enormt, da det vil udgøre en energikilde, som er ren, bæredygtig og sikker. Solen fusionerer primært brint, som gennem flere trin omdannes til helium. Processen er dog meget langsom, alt for langsom til at det kan betale sig at efterligne denne reaktion i en reaktor. I stedet fusioneres de tungere isotoper af brint, deuterium ( $^2\text{H}$ ) og tritium ( $^3\text{H}$ ), i reaktionen

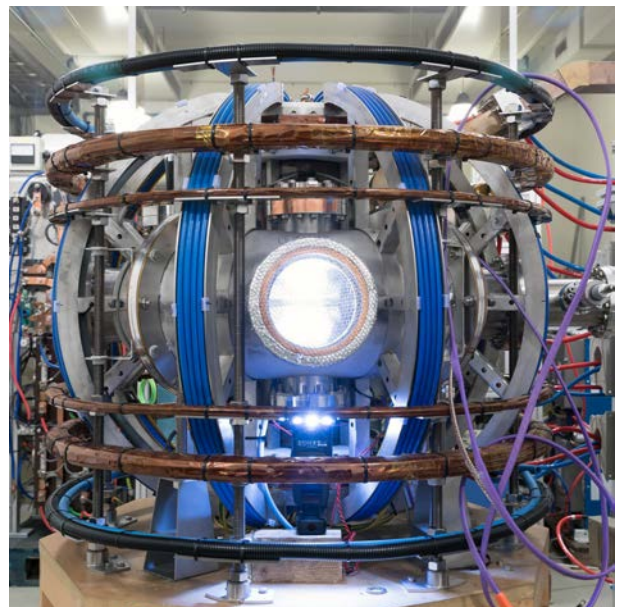


Processen frigiver en energi på 17,6 MeV, som primært bæres af den frie neutron. I et fremtidigt fusionskraftværk vil de producerede neutroner bremses og derved afgive deres energi som varme i en kølevæske, som kan bruges til at drive en turbine og generere strøm, nøjagtig som i alle andre termiske kraftværkstyper.

Reaktionen i ligning (1) er i sin enkelthed simpel, men der er store tekniske udfordringer forbundet med at skabe de forhold, hvor denne forløber ofte nok, til at det kan skabe et overskud af energi. Den måske mest centrale udfordring ligger i indeslutningen af fusionsmaterialet. For at optimere reaktionstværsnittet skal brintisotoperne opvarmes til en temperatur i omegnen af 150 mio. grader. Det er 10 gange højere end temperaturen i Solens kerne. Ved denne temperatur vil brintisotopgassen være overgået til plasmaform. I et plasma er den atomare struktur nedbrudt, og de positive kerner og negative elektroner er ikke længere bundet i atomer, men bevæger sig som i en gas af ladede partikler. Den høje temperatur er altså nødvendig for at få nok fusionsreaktioner, men skaber også store udfordringer, da fusionsplasmaet så vidt muligt skal afholdes fra at røre ved væggene i det kammer, som det indesluttet i, for ikke at miste sin energi [1].

Det er imidlertid muligt at fastholde det varme plasma, uden at det kommer i kontakt med andre materialer. Netop fordi et plasma består af ladede partikler, påvirkes det af elektromagnetiske felter. Et stærkt magnetfelt vil tvinge partiklerne i spiralbevægelser rundt om magnetfeltlinjerne, og lukkes disse som i en donutform,

er plasmaet (i højere grad) indesluttet. Et design, hvor plasmaet indesluttet ved at sætte magnetfeltspoler omkring et toroidalt vakuumkammer, kaldes en tokamak. På figur 1 ses DTU Fysiks nye tokamak NORTH [2].



**Figur 1.** NORTH-tokamakken på DTU Fysik. Igennem åbningen ses lyset fra et plasma, der indesluttet magnetisk af de blå feltspoler, som ses viklet omkring det donutformede vakuumkammer.

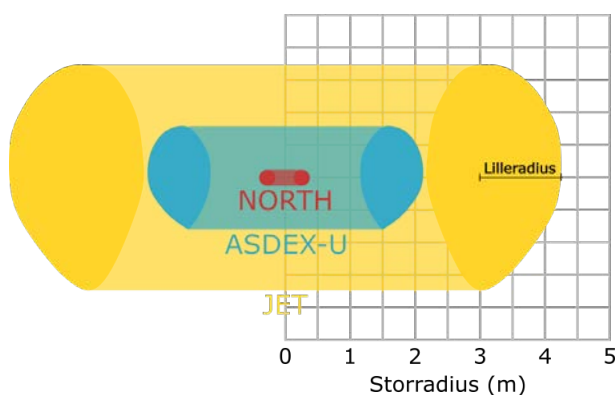
På store tokamakker, som fx Joint European Torus (JET) [3] i Storbritannien og ASDEX Upgrade [4] i Tyskland, arbejder forskere blandt andet på at opnå tilstrækkeligt høje temperaturer og indeslutningstider for plasmaudladninger. JET er den nuværende største tokamak, med en storradius på knap 3 m og en lille-radius på 1,25 m, se figur 2. Meget andet fusions- og plasmaforskning kan imidlertid også foretages på mindre tokamakker som NORTH, der med fordel også kan bruges til undervisning og uddannelse af studerende og unge forskere frem for de større maskiner, som er mindre tilgængelige.

I det følgende beskrives tokamakken NORTH mere detaljeret og nogle af maskinens første resultater præsenteres.

<sup>1</sup>Forfatterne vil gerne takke Tokamak Energy for at have leveret kritisk udstyr til NORTH. Derudover takkes Novo Nordisk Fonden (grant NNF200C0062340) og Villum Fonden (grant 15483) for deres økonomiske bidrag.

## De første resultater fra NORTH

NORTH i sin nuværende form er forholdsvis ny. De primære dele kommer fra det private fusionsforskningsfirma Tokamak Energy [5] og er permanent udlånt til DTU Fysik, hvor NORTH blev indviet i august 2019. NORTH har en storradius på 25 cm og en lilleradius på 12,5 cm. Forholdet mellem de to tal betegnes  $A$  og kaldes for tokamakens *aspect ratio*. Med en værdi på  $A = 2$  tilhører NORTH således gruppen af såkaldte sfæriske tokamakter, modsat ASDEX Upgrade og JET, som har værdier på hhv.  $A = 2,4$  og  $A = 3,3$ . Magnetfeltet i centrum af plasmaet,  $B_0$ , i NORTH kan nå værdier op til 0,4 T, og plasmaet opvarmes af i alt 7 kW mikrobølgeopvarmning. Opvarmningen giver en central temperatur i plasmaet på mellem 10 og 20 eV, eller hvad der svarer til mellem 100.000 og 250.000°C og en partikeltæthed på omkring  $0.1 - 1.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ . Med de forestående opgraderinger af NORTH forventes der endnu højere temperaturer på 50 – 100 eV.



**Figur 2.** Geometrien for et tværsnit af det donutformede plasma i tokamakkerne NORTH, ASDEX Upgrade og JET.

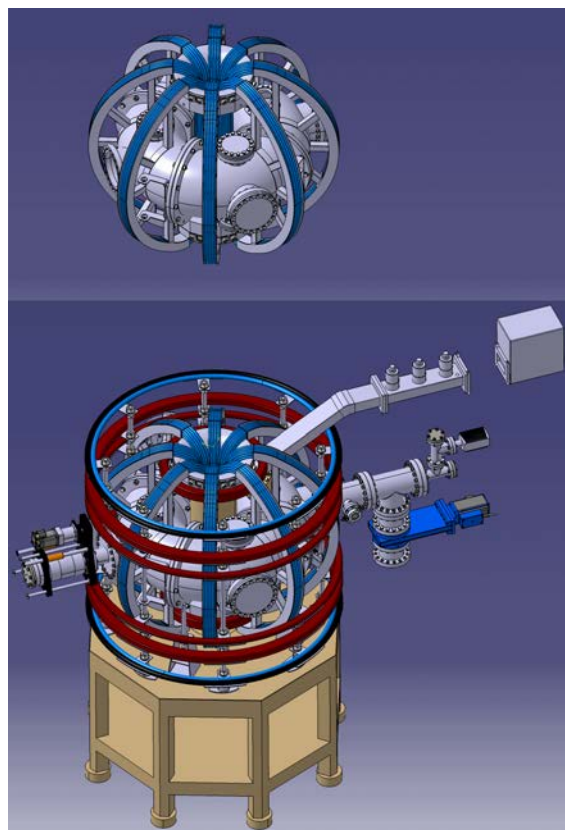
Eftersom forskningen på NORTH, og næsten alle andre nuværende tokamakter, drejer sig mere om plasmafysik end fusionsfysik, er det sjældent, at de tunge brintisotoper fra ligning (1), specielt  $^3\text{H}$ , anvendes. På NORTH dannes der plasma af enten argon, helium eller en af de to lettere brintisotoper. Fælles for alle tokamakter er, at plasmaudladningerne ikke kan opretholdes i uvilkarlig lang tid. For NORTH varer et plasma op til 20 sekunder. En tegning af NORTH og dens komponenter ses i figur 3.

Den plasmafysikforskning, som primært vil beskæftige forskere og studerende på NORTH, omhandler især studier af mikrobølgeopvarmede plasmaer, ikke-lineære vekselvirkninger mellem plasma og bølger og plasmaturbulens på kanten af de indesluttede plasma. Vi præsenterer her nye resultater fra to typer målinger på NORTH. Udstyret til at foretage målingerne, hhv. Langmuirprobe [6] og Rogowskispole [7], er udviklet på DTU Fysik.

### Målinger med Langmuirprobe

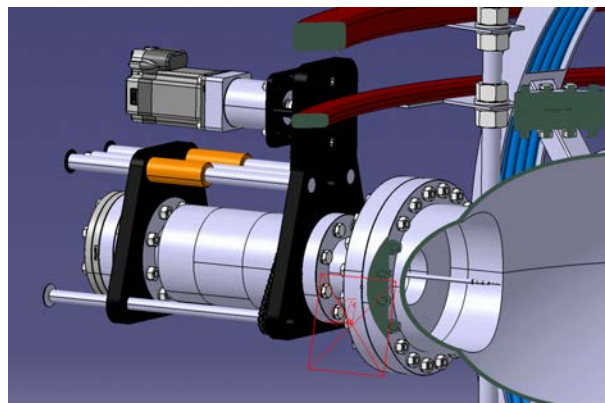
Hvordan ville du måle temperaturen på et fusionsplasma, som er hundredvis af millioner grader varm, eller bare 100.000°C som i NORTH? Grundstoffet med det højeste kendte smeltepunkt er wolfram, som smelter ved 3.414°C, og selvom det er muligt at lave materialer,

som overgår dette, kommer de ikke i nærheden af at kunne modstå fusionsplasmaernes høje temperaturer.



**Figur 3.** Tegning af NORTH. Øverst ses vakuumkanteret med dets observationsporte og de toroidale magnetfeltspoler (blå) omkring kammeret. Nederste billede viser yderligere de ydre poloidale magnetfeltspoler (røde). Langmuirproben ses til venstre i billedet og forbindelsen til vakuumpumpen til højre.

På de store tokamakter kan den centrale temperatur kun måles med avancerede laser-systemer. På kanten af de store maskiners og NORTHs indesluttede plasma, er det muligt at bruge en såkaldt Langmuirprobe til at måle blandt andet temperaturen. En tegning af NORTHs Langmuirprobe ses i figur 4.



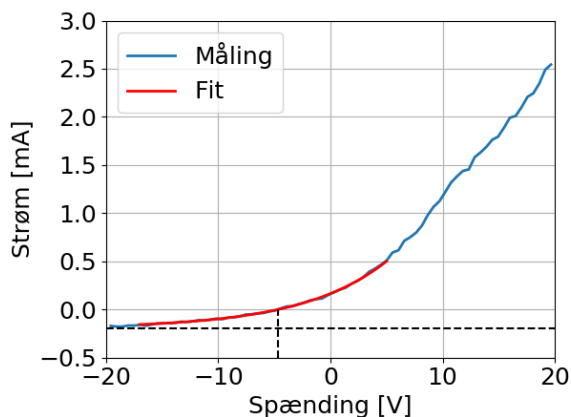
**Figur 4.** Tegning af Langmuirproben på NORTH. Proben kan bruges til at bestemme plasmaets tæthed og elektron-temperatur og sidder på en bevægelig arm, så dens radielle position i plasmaet kan ændres.

Selve proben består af en keramisk beklædt metaltråd med en diameter på 5 mm med en 3 mm lang probespids, hvis diameter er 1 mm. Den keramiske

beklædning af proben sikrer, at denne vekselvirker mindst muligt med plasmaet. Probens radielle placering kan styres, så den måler på forskellige positioner i plasmaet, helt ude fra den yderste kant og ind til 5 cm fra den inderste væg i vakuumkammeret. Det er vigtigt at kunne måle forskellige steder i plasmaet, da der er store tætheds- og temperaturgradienter, og plasmadynamikken ændrer sig på tværs af plasmaet.

Det smalle område mellem et plasma og en materialoverflade, fx vakuumkammerets væg eller Langmuirprobens spids, kaldes for et *sheath*. I sheath-området ændrer det elektriske potential sig fra det omkringliggende afhængig af probens og plasmaets relative spændingsforskel, da plasmaets partikler forsøger at "skærme" probens potential. Der vil løbe en strøm i proben, som afhænger af dens påtrykte spænding og ud fra strøm-spændings  $(I-V)$ -kurven kan plasmaets tæthed og temperatur omkring probespidsen bestemmes.

I figur 5 ses en  $I-V$ -kurve for NORTHs Langmuirprobe. Ved en høj negativ spænding over proben i forhold til plasmapotentialet løber per definition en negativ strøm, som vender fortegn og stiger i takt med, at probens positive spændingsforskel øges. Strømmen er negativ ved en høj negativ probespænding, fordi proben her tiltrækker de positivt ladede ioner i plasmaet, som ved en tilstrækkelig høj negativ spænding vil strømme med den såkaldte ionmætningsstrøm. Omvendt tiltrækker proben plasmaets elektroner ved en positiv spændingsforskel.



**Figur 5.** Strøm-spændings- $(I-V)$ -kurve (blå) for Langmuirproben på NORTH. Fra den fittede kurve (rød) kan værdierne for elektrontemperatur  $T_e = 7,1 \pm 0,8$  eV og -tæthed  $n_e = 6,7 \pm 0,8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$  ved probens spids bestemmes. De stiplede linjer angiver ionmætningsstrømmen  $(-0,14 \pm 0,01 \text{ mA})$  og det flydende elektriske potential  $(-5,09 \pm 0,33 \text{ V})$ .

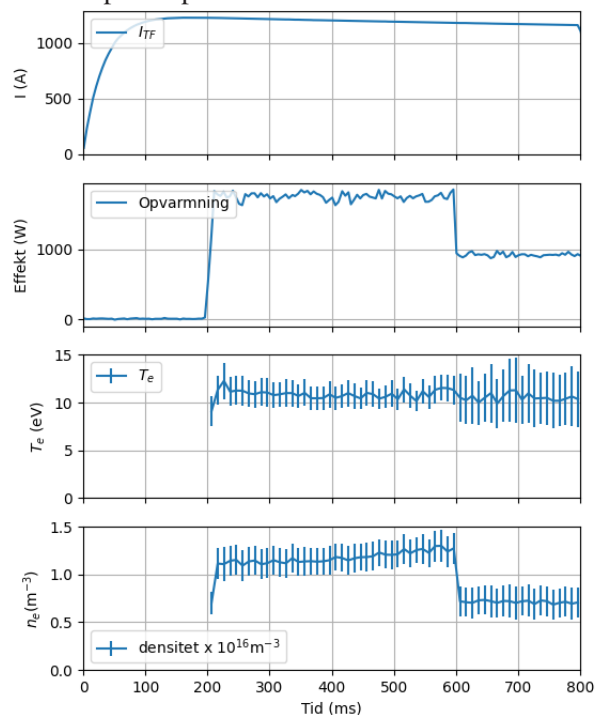
På grund af ionernes og elektronernes store masseforskel er deres dynamik på forskellige tidsskalaer, hvilket bl.a. viser sig i en  $I-V$ -kurve ved, at elektronernes mætningsstrøm er langt større end ionernes. Masseforskellen gør også, at selv om spændingsforskellen er 0, vil der løbe en positiv (elektron) strøm, da elektronerne statistisk set rammer proben oftere. Ved det såkaldt flydende elektriske potential løber der ingen strøm i proben. Sammenhængen mellem det flydende potential  $(V_f)$ , plasmapotentialet  $(V_p)$  og elektrontemperaturen  $(T_e)$  er

$$V_f = V_p + \frac{kT_e}{e} \ln \sqrt{\frac{1}{4\pi} \frac{m_i}{m_e}}, \quad (2)$$

hvor  $k$  er Boltzmanns konstant,  $e$  er elementarladningen og  $m_i$ ,  $m_e$  er henholdsvis ionernes og elektronernes masse. Ud fra det flydende potential og ionmætningsstrømmen kan elektronernes temperatur og tæthed bestemmes. Elektrontemperaturen kan, sammen med ionmætningsstrømmen  $(I_{\text{sat}})$ , bruges til at bestemme ion- og elektrontætheden  $(n_i = n_e)$  ved proben, idet ionmætningsstrømmen afhænger af elektrontemperaturen og -tætheden ved

$$I_{\text{sat}} = 0,6en_i \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} A, \quad (3)$$

hvor  $A$  er probespidsens areal.

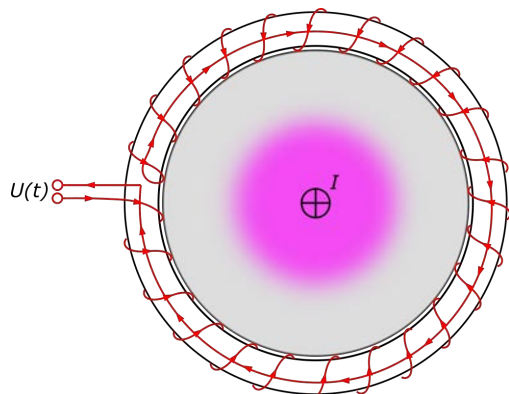


**Figur 6.** Målinger på et heliumplasma i NORTH over en periode på 800 millisekunder. Graferne viser (fra toppen): (1) Strømmen i de toroidale magnetfeltspoler, (2) mikrobølgeeffekten sendt ind i plasmaet fra (3) elektrontemperaturen og (4) elektrontætheden. Elektrontemperaturen og -tætheden er målt med Langmuirproben 1,5 cm fra kammerets ydervæg.

Målinger på et heliumplasma i NORTH, hvor elektrontætheden og -temperaturen er målt med Langmuirproben, er vist i figur 6. Her ses, hvordan strømmen i de toroidale magnetfeltspoler øges til 1,2 kA, hvilket svarer til et magnetfelt på 92 mT i midten af plasmaet, i løbet af de første 100 ms. Ved  $t = 200$  ms tændes to mikrobølgekilere, begge på 900 W, og heliumgassen i tokamakken ioniseres til et plasma. Elektrontemperaturen og -tætheden er målt i den ydre kant af plasmaet, 1,5 cm fra kammerets væg, ved at variere spændingsforskellen over proben lineært fra -20 V til +20 V og tilbage 100 gange i sekundet. Dette giver en tidsopløsning på probesignalet på 10 ms. Elektrontemperaturen forbliver nogenlunde konstant på 11 eV over hele forsøget, mens tætheden starter på lidt over  $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  og senere falder en smule, da den ene mikrobølgekilde slukkes, og der derfor genereres mindre plasma. Ved det målte tryk ville et fuldt ioniseret heliumplasma have en tæthed i omegnen af  $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , hvorfor det må antages, at det målte plasma kun er svagt ioniseret.



Langmuirproben er et eksempel på en såkaldt aktiv diagnostik, hvor der måles på plasmaet ved at sende noget, fx en probe eller laserlys, ind i dette. Den anden kategori af diagnostikker kaldes passive diagnostikker, hvor der måles på signaler, som plasmaet selv udsender uden nogen anden ydre påvirkning. Rogowskispolen er et eksempel på en passiv diagnostik.



**Figur 7.** Princippet bag en Rogowskispole (rød). Spolen er viklet omkring tokamakens vakuumkammer, så den omslutter plasmastrømmen.

### Målinger med Rogowskispole

Vikles en spole omkring vakuumkammeret, som vist i figur 7, vil ændringer i strømmen i plasmaet, som er et udtryk for partikeldynamikken heri, inducere en spænding i spolen. Spolens spænding som funktion af tid ( $U(t)$ ) er givet ved

$$U(t) = -\frac{AN\mu_0}{L} \frac{dI(t)}{dt}, \quad (4)$$

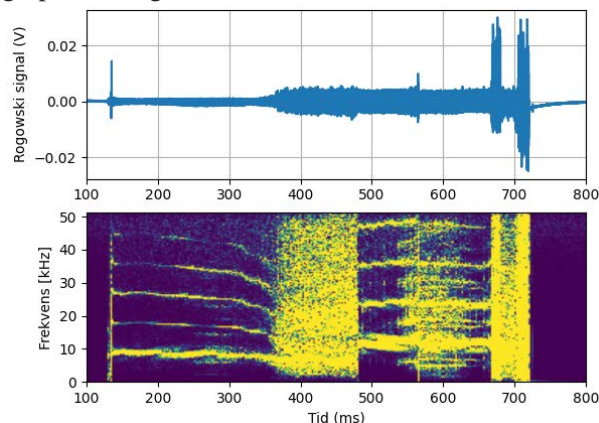
hvor  $A$  er det omviklede areal af en af spolens løkker,  $N$  er antallet af vindinger,  $\mu_0$  er vakuumpermeabiliteten,  $L$  er spolens omkreds og  $\frac{dI(t)}{dt}$  raten hvormed strømmen i plasmaet ændres. Ligning (4) giver således sammenhængen mellem den målte spænding i spolen og ændringen i plasmastrømmen. Denne type spoler kaldes for Rogowskispoler.

I figur 8 ses målingerne fra Rogowskispolen på et andet NORTH-plasma end det, som betragtes i figur 6. Efter  $t = 0,1$  s genereres plasmaet og et klart 10 kHz signal fremkommer. Signalets frekvens falder frem mod  $t = 0,35$  s, hvor det erstattes af en mere bredbåndet struktur. Ved  $t = 0,5$  s fremkommer nye strukturer, frem til plasmaudladningen stoppes ved  $t = 0,7$  s. Signalet i perioden  $t = 0,5 - 0,7$  s er meget dynamisk og har adskillige frekvensskift, som i fremtiden vil blive undersøgt i nærmere detaljer, når der installeres flere Rogowskispoler, samt en såkaldt Mirnovspole. Mirnovspolen er en anden passiv diagnostik, som kan måle fluktuationer i det magnetiske felt, der også forårsages af dynamik i plasmaet.

### Opsummering

Skandinaviens eneste tokamak, NORTH, er placeret på DTU Fysik, og godt et år efter indvielsen måles der interessante signaler på det indesluttede plasma. NORTH hører til familien af mindre tokamakker, men arbejdet på denne maskine vil supplere forskningen på

de større maskiner som ASDEX Upgrade eller stellaratoren Wendelstein 7-X [8], og endda fusionsforskningens flagskib, tokamakken ITER [9]. Specielt ikke-lineær bølgefysik, samt plasmaturbulens og hurtig-ionfysik, er oplagte emner at forske i på NORTH, hvor der allerede nu er vist tilstedeværelsen af dynamik i plasmaet. Andre forskningsemner, som er i kikkerten for NORTH, er udviklingen af nye plasmadiagnostikker og opvarmningsmetoder.



**Figur 8.** Øverst: Rogowskispolens spænding som funktion af tid under en plasmaudladning i NORTH. Nederst: Spektrogram af spolens signal, hvor der ses stærke signaler ved specifikke frekvenser i perioderne 0,1–0,35 s og 0,5–0,7 s.

Derudover vil det være muligt at bruge NORTH til at uddanne unge fysikere og ingeniører på et internationalt niveau. Således er de forberedt til fremtidig deltagelse i forskning på ITER og andre tokamakker og kan bidrage til realiseringen af fusionsenergi som fremtidig energikilde.

Er du gymnasieelev eller -lærer, så tilbyder DTU Fysik en række aktiviteter, hvor I kan få inspiration til at bruge fusionsenergi som emne i projekter eller undervisningen, og muligheden for at komme på DTU, hvor I kan se NORTH med jeres egne øjne og måske endda lave eksperimenter på tokamakken. Aktiviteterne tilbydes under projektet *Fusionsenergi til Alle*, som er finansieret af en bevilling fra Novo Nordisk Fonden. Læs mere om aktiviteterne for gymnasieelever og -lærere på [fusionsenergi.dk](http://fusionsenergi.dk).

### Litteratur

- [1] A.S. Thrysøe (2017) Kan vi bygge en sol på Jorden?, *Kvant*, bind 28, nr. 2, side 3–6.
- [2] <https://www.fysik.dtu.dk/english/research/ppfe>
- [3] <https://ccfe.ukaea.uk/research/joint-european-torus/>
- [4] <https://www.ipp.mpg.de/16195/asdex>
- [5] <https://www.tokamakenergy.co.uk/>
- [6] R.L. Merlino (2009) Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics, *American Journal of Physics*, bind 75, side 1078.
- [7] M.H. Samimi m.fl. (2014) The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review, *IEEE Sensors Journal*, bind 15, side 651.
- [8] <https://www.ipp.mpg.de/w7x>
- [9] <https://www.iter.org/>