

Aarhus i rummet

Mads Fredslund Andersen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet,
Andreas Dideriksen, Arctic Research Center, Aarhus Universitet,
og Oliver Millinge, Institut for Elektro- og Computerteknologi, Aarhus Universitet

Siden 2019 har Aarhus Universitet haft studentersatellitter i kredsløb om Jorden, og det har sat gang i en rivende udvikling, som bl.a. har ført til det nationale studentersatellitprogram DISCO.

I 2015 blev Andreas Mogensen den første dansker i Rummet. Dette var en milepæl for Danmark og dansk rumforskning og blev startskuddet på Aarhus Universitets rumprogram¹. Universitetet fik tilbudt en gratis opsendelse og udsendelse af en lille satellit fra den Internationale Rumstation (ISS) som en direkte konsekvens af Andreas Mogensens tur.

Udviklingen i "cubesats", dvs. små terningformede satellitter i enheder af $10 \times 10 \times 10 \times \text{cm}^3$ (1U), har i løbet af de seneste ca. 20 år gjort, at man i dag kan opsende en forholdsvis kompleks satellit til en overkommelig pris. Dette skyldes blandt andet private firmaer som SpaceX, som tilbyder "rideshare" missioner, som kan sende mange små satellitter i rummet på samme tid. Aarhus Universitet købte derfor en 1U-satellit fra det danske firma GomSpace ved Aalborg. Denne satellit fik navnet Delphini-1, med henvisning til delfinerne i Aarhus Universitets segl, og den blev udsendt fra ISS den 31. januar 2019. Delphini-1 missionen blev en stor succes, og det lille kamera om bord på satellitten leverer den dag i dag stadig nogle af de bedste billeder fra en 1U-studentersatellit på verdensplan. Den store succes med Delphini-1 samt Aalborg Universitets fremtrædende position inden for udvikling af studentersatellitter førte efterfølgende til det nationale studentersatellitprogram DISCO (DanIsh Student Cubesat prOgramme). DISCO-1, som er en 1U-cubesat, blev opsendt i foråret 2023, og den mest ambitiøse danske studentersatellit til dato, DISCO-2, skal efter planen opsendes i slutningen af 2024.

Aarhus Universitets interesse inden for udforskning af rummet og rumteknologi har siden rumprogrammets start ført til opstarten af det interdisciplinære tematiske center Aarhus Space Centre, *SpaCe*², som skal samle aktiviteterne, der omhandler rummet, rumforskning og rumteknologi, herunder bl.a. DISCO-2 og den mere videnskabeligt drevne STEP (STars and ExoPlanets)-mission.

Delphini-1

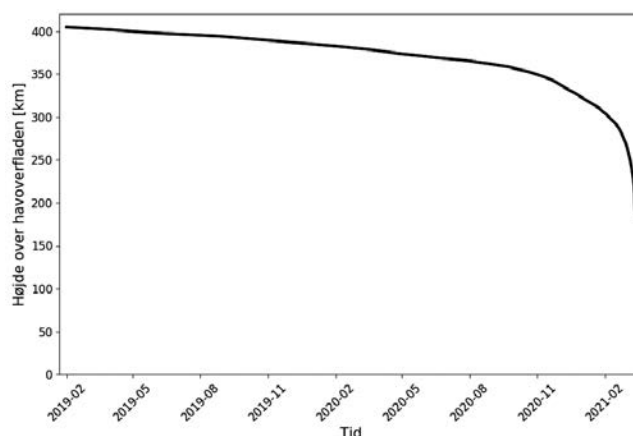
Delphini-1 missionen blev startet i 2016, da det europæiske rumagentur, ESA, tilbød en gratis opsendelse og efterfølgende udsendelse fra ISS. Denne takkede Aarhus Universitet ja tak til. Efterfølgende blev samarbejdet med GomSpace etableret, og studerende blev trænet i blandt andet satellitkommunikation ved dedikerede workshops. I 2017 blev satellitten samlet, testet og i 2018

transporteret til USA og afleveret til firmaet NanoRacks. Delphini-1 blev sendt i rummet med en SpaceX Falcon-9 raket den 5. december 2018 og ankom kort tid efter til ISS. Herfra blev den via NanoRacks robotarm sendt alene ud i rummet den 31. januar 2019. På figur 1 ses Delphini-1 lige efter udsendelsen fra ISS.



Figur 1. Delphini-1's udsendelse fra den Internationale Rumstation den 31. januar 2019. Satellitten blev udsendt fra NanoRacks robotarm, som ses øverst til højre, og Delphini-1 ses lige under solpanelet i bunden af billedet (NASA, NanoRacks).

Siden kredse Delphini-1 omkring Jorden i lidt over 2 år, før den brændte op i atmosfæren den 14. marts 2021. Figur 2 viser satellittens gennemsnitshøjde over havoverfladen i løbet af dens tid i rummet.



Figur 2. Delphini-1's gennemsnitshøjde over havoverfladen fra udsendelse fra ISS til den brændte op i atmosfæren.

¹Marslab-gruppen på AU har tidligere sendt hardware i rummet. Se marslab.au.dk

²space.au.dk

Missionsmål

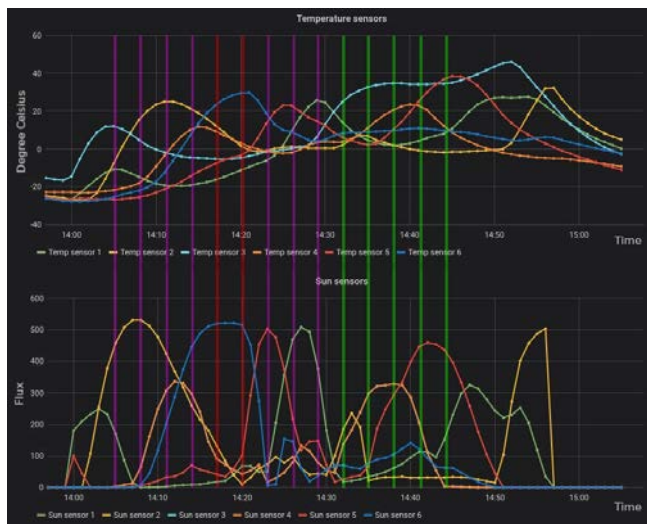
Delphini-1 missionen havde til hovedformål at vise, hvad det indebærer at gennemføre en satellitmission. Selvom selve satellitten var lille ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$), så skal den fremstilles, testes, opsendes og opereres. Desuden er der mange formaliteter og tilladelser, som skal være i orden, før en satellit kan sendes i rummet. Derudover var Delphini-1 en studentsatellit, hvilket betød at studerende var med i mange aspekter af missionen. Det var dem, der samlede satellitten, det var dem, der stod for den daglige kontakt til satellitten, og dem der planlagde, hvad der skulle tages billeder af og hvilke billeder, der skulle hentes ned via den dedikerede jordstation. Denne havde studerende også samlet og sat op på taget af en universitetsbygning i Aarhus.

Payload og data

Ud over computer, UHF-radio til kommunikation, batterier og solpaneler til strøm, og "magnetorquer rods", som er elektromagneter, der kan bruges til at stabilisere satellitten i forhold til Jordens magnetfelt, var Delphini-1 udstyret med et lille kamera (NanoCam 1CU) fra GomSpace. Dette havde en CMOS-farvesensor med 2048×1536 pixels på $3,2 \mu\text{m}$. Kameraet var udstyret med en 35 mm linse, som fra en højde på 400 km over havoverfladen vil give en opløsning per pixel på Jorden på ca. 40 m, den såkaldte "Ground Sampling Distance - GSD".

Uden aktiv kontrol skulle man være "heldig", at kameraet pegede mod det, man ønskede, når man ville tage et billede.

Den meget spændende og kritiske "første kontakt" tog lidt længere end håbet pga. en defekt på jordstationen. Da dette blev løst, blev der hurtigt skabt kontakt, og de studerende begyndte at tage billeder.

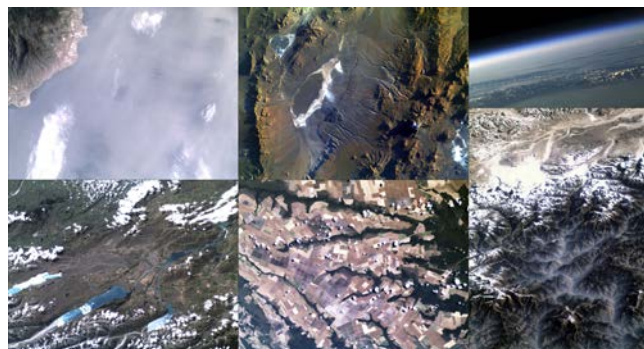


Figur 3. Delphini-1 temperatur- (øverst) og solsensor- (nederst) data fra ét kredsløb, hvor kun delen, hvor satellitten er i sollys, vises (fra 13:59 til 14:57). De farvede lodrette markeringer viser tidspunkter, hvor der blev taget et billede. De lille markeringer indikerer, at et billede pegede ud i det tomme rum (sort). De røde er, hvor kameraet pegede mod solen og de grønne er, hvor kameraet har taget billeder af Jorden (Delphini-1-holdet).

I løbet af de lidt over 2 år Delphini-1 var i rummet, blev banen og bevægelsen af satellitten analyseret for

bedre at kunne forstå, hvor og hvornår man bedst kunne tage billeder af Jorden. Data fra sensorer ombord på satellitten blev brugt i samspil med kameraet, som kunne verificere orienteringen. På figur 3 ses temperatur- og solsensordata for en periode på ca. en time i Delphini-1's kredsløb omkring Jorden. I denne time, hvor satellitten bevæger sig på den soloplyste side af Jorden, blev der systematisk taget billeder hvert fjerde minut, som kunne bruges til verificering af satellittens orientering.

Forståelsen af satellittens bevægelse i rummet blev kort tid inden missionens endeligt brugt til at afprøve en manøvre, som skulle ændre orienteringen. Det havde forinden vist sig, at det kun var muligt at tage billeder af Jorden på den sydlige halvkugle. Dette skyldes, at satellitten ret præcist orienterede sig i forhold til Jordens magnetfelt omkring aksens med kameraet. Manøvren i slutningen af missionens levetid blev en succes, og i månederne inden Delphini-1 efter planen brændte op i Jordens atmosfære, blev mange flotte billeder fra den nordlige halvkugle taget. Se eksempelvis figur 4 eller se flere på <http://projects.au.dk/da/ausatdk/delphini1dk/billeder>.



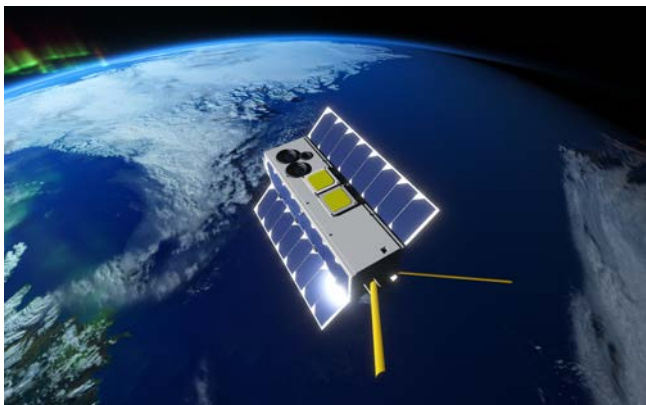
Figur 4. Billeder taget med Delphini-1 satellittens kamera. Øverst fra venstre: Gran Canaria, Chile, Horisonten over Himalaya. Nederst fra venstre: New Zealand, Brasilien, Nepal/Himalaya (Delphini-1-holdet).

DISCO-2

Det danske studentsatellitprogram DISCO (Danish Student Cubesat prOgramme) blev lanceret den 18. november 2020 og bidrager til at fastholde Danmarks position som en af de førende nationer inden for udvikling og produktion af CubeSats. Programmet lader studerende fra Aarhus Universitet, IT Universitetet i København og Syddansk Universitet være en del af alle aspekter af en satellitmission med henblik på at skabe dygtige kandidater med flair for rumteknologi til de voksende danske og europæiske rumvirksomheder. Derudover har programmet til formål at øge interessen for STEM-uddannelser i Danmark, og prioriterer derfor også, at de studerende besøger gymnasier og deltager i formidlingsevents. På denne måde skal DISCO sikre, at Danmark forbliver konkurrencedygtigt samt skabe fundamentet for fremtidige startups for ESABIC DK.

DISCO-2 bliver den anden satellit i DISCO-programmet, og den mest avancerede studentsatellit udviklet på dansk jord til dato. Studerende ønskede at bygge videre på erfaringerne gjort med Delphini-1. Dermed blev den ambitiøse mission om studiet af

klimaforandringer valgt den 7. juni 2021, efterfulgt af en lang periode med fundraising og forhandlinger med dansk industri. I januar 2023 blev satellitten bestilt hos Space Inventor A/S, og studerende er nu i gang med de sidste designdetaljer inden fremstillingen, tests og integration af hardware og software. De studerende bruger erfaringerne fra tidligere missioner samt ny viden til at presse de teknologiske grænser for CubeSats. Det endelige konceptdesign er en $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}^3$ (3U)-satellit med 3 kameraer, som skal benyttes i studiet af klimaforandringer. Dertil forventes det, at DISCO-2 kan levere data med højere tidslig opløsning, end hvad der er muligt med data fra andre satellitter, som fx fra Copernicus Sentinel-2-satellitten. Efter planen skal DISCO-2 opsendes i efteråret 2024 med Momentus / SpaceX og blive bragt i et solsynkront polært kredsløb mellem 500 og 600 km's højde over havoverfladen. Et solsynkront kredsløb betyder, at en satellit i et sådant kredsløb vil flyve over samme sted på Jorden på samme tid hver dag. At banen er polær betyder, at DISCO-2 passerer over et punkt nær Nordpolen omtrent 15 gange i døgnet, imens Jorden roterer en omgang under satellitten. Netop dette kredsløb er valgt, da det giver mulighed for studerende og forskere at benytte satellittens kameraer til affotografering af områder på og omkring Arktis flere gange dagligt. Det forventes, at satellitten vil forblive operationel i 2–5 år, alt afhængigt af bl.a. solaktiviteten og specielt den præcise højde for udsendelsen.



Figur 5. Illustration af DISCO-2 i kredsløb. (Grafik: Marcus Marcussen).

Missionsmål

For at bidrage til arktisk klimaforskning er DISCO-2 designet til at kunne måle og observere strukturer og dynamiske effekter i og omkring Grønland. Et af de videnskabelige mål for DISCO-2 er derfor at kunne foretage fotogrammetriske observationer, hvor der kan konstrueres et 3-dimensionelt billede af fx gletsjere og fjordsystemer m.m. Ved gentagne fotogrammetriske observationer forventes det derfor, at der kan beregnes, hvor hurtigt og hvor meget gletsjere i området formindskes. Ved fotogrammetriske observationer tager man en serie billeder af det samme objekt fra forskellige vinkler (fx ved en satellitoverflyvning af en gletsjerfront). Disse 2D-billeder kan herefter sammensættes til et 3D-billede for at opnå viden om størrelserne af de observerede objekter.

Foruden at se på gletsjerdynamik skal DISCO-2 også se på overfladetemperaturer ved hjælp af et termisk kamera. Især omkring gletsjerfronter kan overfladetemperaturen i fjorden variere meget og med meget veldefinerede grænser, da smeltevand fra gletsjere kan løbe ud i fjordene fra bunden af gletsjerne og derefter blandes med de dybereliggende og koldere vandlag. Pga. smeltevandets lave saltindhold vil dette skabe såkaldt subglaciale plumes, som "skubber" koldere vand op til overfladen og undervejs blander smeltevandet med fjordvandet. Et eksempel på en sådan plume kan ses både visuelt og termisk på figur 6. Observationer af disse subglaciale plumes er vigtige for at forbedre forståelsen af interaktionen i varmetransporten mellem hav/ocean og isen. Yderligere spiller subglaciale plumes også en rolle ved gletsjerkælvninger, hvilket igen påvirker afsmeltningen af gletsjere [2].

I samspil med eksisterende målestationer placeret på forskellige lokationer i Nordøstgrønland skal DISCO-2 også bidrage med at opskalere lokale "ground-truth"-observationer til større områder ved hjælp af satellitobservationer. Disse målestationer vil fungere som kalibreringspunkter for DISCO-2 samtidig med at DISCO-2 vil kunne benyttes til at forbedre forståelsen af klimaforandringerne i Nordøstgrønland på en større skala og over større arealer.



Figur 6. Visuel og termisk droneobservation af subglacial plume (grå cirkel i venstre billede) foran Hissingergletsjeren i Nordøstgrønland. Bemærk den tydelige temperaturforskel mellem plume og det omkringliggende overfladevand. (Jeffrey Taylor Kerby).

Payload og opbygning

De tre kameraer på DISCO-2 har hvert sit fokusområde og er sammensat ud fra et ønske om at kunne bidrage til arktisk klimaforskning og samtidig have mulighed for andre projektidéer for studerende fra de deltagende universiteter. To af kameraerne observerer i det visuelle spektrum og har ens CMOS-sensorer (Alvium 1800 U-2040 med Sony IMX541), men med forskellige optikker. Dette giver muligheden for at have både et vidvinkelkamera med et relativt stort synsfelt, hvilket gør det nemmere at genkende de områder, DISCO-2 observerer, samtidig med at det andet kamera med et mindre synsfelt giver mulighed for en bedre opløsning på $\approx 22 \text{ m/px}$. Det sidste er et termisk kamera fra FLIR, som observerer infrarøde bølgelængder mellem $7,5 \mu\text{m}$ og $13,5 \mu\text{m}$, og skal benyttes til at måle overfladetemperaturer. Se tabel 1 for nøgleparametre på de 3 kameraer. Udover de tre kameraer omfattes payloaden på DISCO-2 også af et SOM (System-on-Module)-modul, hvor observationer kan analyseres allerede inden billederne er sendt til

jordstationen ved hjælp af machine learning. Denne analyseproces skal hjælpe med at sortere i billederne, således at de mest anvendelige/bedste observationer bliver prioriteret i forhold til at blive downloadet først.

For at optimere brugen af DISCO-2 til videnskabelige observationer er satellitten foruden computer, UHF-radio, batterier, solpaneler og sensorer også udstyret med både en højhastigheds S-båndsradio og aktiv styring i form af 4 momenthjul. Disse hjul består af en motor med et fastmonteret svinghjul, hvor der ved at spinne op og ned på hastigheden af svinghjulet tilføjes et drejningsmoment, der får satellitten til at rotere langs en given akse. Udnyttes momenthjulenes fire akser, kan satellittens orientering styres med en nøjagtighed på 1°. Udover at orientere satellitten opstår der ved konstant rotation af momenthjulene også en impuls, som virker stabiliserende for satellitten, hvilket i sidste ende forbedrer muligheden for at opnå brugbare observationer.

Den store mængde data fra disse observationer kan så sendes til jordstationen, når DISCO-2 passerer over denne. S-båndsradioen giver mulighed for at opnå downloadhastigheder på flere Mbps, så alle billederne hurtigt kan blive hentet og analyseret på Jorden.

	Sensor str. [px]	Pixel [μm]	Fokal l. [mm]	FoV [km]	GSD [m/px]
Alvium	4512×4512	2,74	70	97×97	22
Alvium	4512×4512	2,74	16	42×425	94
Flir	640×512	12	36	117×94	183

Tabel 1: Nøgleparametre for de 3 kameraer på DISCO-2. Field of View (FoV) og GSD er beregnet ud fra en kredsløbshøjde på 550 km.

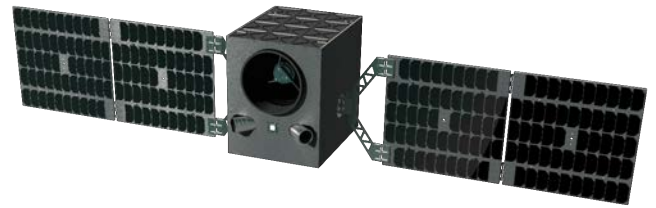
STEP

STEP (STars and ExoPlanet)-missionen, som hovedsageligt er finansieret via Dansk Roadmap for Forskningsinfrastruktur 2020 [1] og ESA's PRODEX-program, er en planlagt videnskabelig mission, der skal styrke dansk forskning og dansk rumindustri. Missionen, som er ledet af Hans Kjeldsen fra Aarhus Universitet, er delt op i to faser: STEP-A, som efter planen skal opsendes i andet kvartal af 2025, og STEP-B, som er et større internationalt samarbejde med Massachusetts Institute of Technology og Lawrence Livermore National Laboratory, som forventes opsendt i slutningen af 2026. STEP-A udvikles i tæt samarbejde med dansk rumindustri, hvor satellitten leveres af Space Inventor A/S og Terma udvikler og leverer detektoren. Et større nationalt og internationalt konsortium står bag missionen til den videnskabelige anvendelse.

STEP-A

STEP-A er en prototype, som skal demonstrere egen-skaberne for den ultraviolette (UV)-detektor som efterfølgende også skal bruges på STEP-B. STEP-A vil fra et lavt jordkredsløb (LEO) i ca. 500–600 km højde

være i en polær solsynkron bane, hvorfra den vil benytte et 25 cm teleskop til at fokusere lys fra stjerner ned på UV-detektoren. Data vil blive sendt til jorden via en dedikeret X-bånds-jordstation, hver gang STEP-A passerer forbi Danmark. På figur 7 ses en illustration af STEP-A.



Figur 7. Illustration af STEP-A (Space Inventor A/S).

STEP-B

Efterfølgeren STEP-B bliver en større satellit i et tæt samarbejde med MIT og LLNL, hvor STEP-delen bliver UV-detektoren, imens satellitten vil indeholde flere forskellige teleskoper med forskellige detektorer; fx et reserve kamera fra TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)-missionen. STEP-B (som nok får et andet navn i sidste ende) skal efter planen sendes i et geostationært kredsløb i ca. 35.000 km højde over havoverfladen, hvor den vil kredse med Jordens daglige rotation og dermed være over det samme punkt på Jorden hele tiden. Dette giver mulighed for kontinuert kontakt til satellitten fra en enkelt jordstation.

Litteratur

- [1] Uddannelses- og Forskningsstyrelsen (2021) "Dansk roadmap for forskningsinfrastruktur 2020", <https://ufm.dk/publikationer/2021/filer/roadmap-for-forskningsinfrastruktur-2020>
- [2] I. J. Hewitt (2020) "Subglacial plumes", *Annual Review of Fluid Mechanics*, bind 52, side 145–169.



Mads Fredslund Andersen (t.v.) er teleskop- og satellit-manager ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet, og var leder af Delphini-1 missionen fra primo 2020. Han er nu leder af DISCO-2-missionen. Andreas Kjær Dideriksen (midt) er ph.d.-studerende ved Arctic Research Center, Aarhus Universitet, og Oliver Millinge (t.h.) studerer til bachelor i elektroteknologi ved Aarhus Universitet.