

Den 30. juli 2020 blev Marsroveren Perseverance opsendt fra Cape Canaveral ombord på en Atlas V raket. Roveren er en del af NASA's Mars Exploration Program. Foto: NASA/Joel Kowskyab.



REJSEN UD I RUMMET

Af Carsten R. Kjaer, redaktør, Aktuel Naturvidenskab

Rumforskning og rumrejser hænger uløseligt sammen. Raket- og rumteknologi sætter således grænserne for, hvad forskerne overhovedet kan undersøge, og rummissioner designs omvendt 100 % ud fra, hvilket formål de har. Aktuel Naturvidenskab har interviewet astrofysikeren Hans Kjeldsen om fascinationen ved rumfart.



Om forskeren
Hans Kjeldsen er professor i astrofysik ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.
hans@phys.au.dk

Den 5. december 2018 var en særlig dag for Hans Kjeldsen. Den dag blev den lille satellit Delphini-1 sendt op i rummet fra Kennedy Space Center i USA. Det var ikke fordi, at netop denne lille satellit skulle udføre noget særlig interessant sammenlignet med de rummissioner, Hans ellers har været involveret i. Nej, det var fordi, det var første gang, han havde været så dybt involveret i al det praktiske forbundet med at sende

en satellit ud i rummet og at kommunikere med den. For hele projektet med Delphini-1 var udtænkt og styret fra Aarhus Universitet, hvor Hans har sin daglige gang som professor.

Når man som Hans Kjeldsen forsker i astrofysik, sker det ofte i samspil med rummissioner – for eksempel har han været meget engageret i at finde planeter omkring andre stjerner, såkaldte exoplaneter, ved hjælp af NASA's Kepler- og

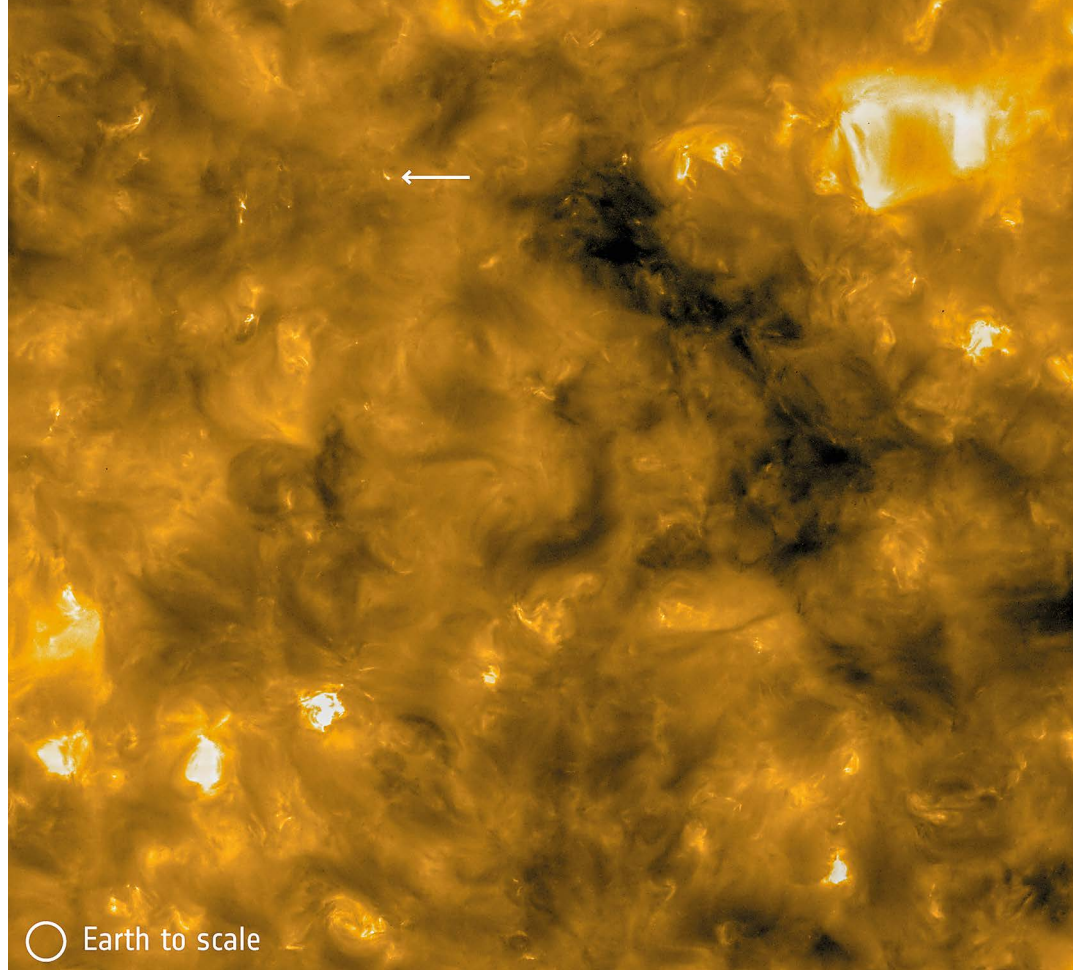
TESS-missioner. Derfor har han en naturlig interesse for al den teknologi og fysik, der ligger bag kunsten at sende en satellit i kredsløb om Jorden eller en rumsonde ud til andre planeter i vores Solsystem.

»Selvom vi astrofysikere sjældent arbejder direkte med "raketvidenskab" eller udvikler rumteknologi, spiller teknologien så stor en rolle for os, at vi bliver nødt til at vide en del om den. For teknologien sætter nemlig grænserne for, hvilke obser-

De første billeder fra rumsonden Solar orbiter kom i juli måned i år, og de rummede en videnskabelig overraskelse. Billederne viste nemlig et enormt antal små energiuudladninger i Solens ydre atmosfære (kaldet coronaen), som forskerne har døbt lejrbål (camp-fires). Disse lejrbål er små slægtninge til de kæmpemæssige energiuudladninger, man kan observere fra Jorden, men er millioner eller milliarder gange mindre.

Forskerne ved endnu ikke, om de blot er små udgaver af de store energiuudladninger, eller om de er drevet af andre mekanismer. Hver især er de små lejrbål ubetydelige, men den kombinerede effekt af dem, kan muligvis være forklaringen på en af de største uløste gåder om Solen, nemlig opvarmningen af Solens corona.

Foto: Solar Orbiter/EUI Team/ESA & NASA



vationer vi overhovedet er i stand til at lave,« siger han.

Det var også en af grundene til, at Delphini-1-projektet blev til, da det giver de studerende "hands on" erfaring med teknologien i en rummission. Og det er også en af grundene til, at Hans blandt de mange foredrag, han holder hvert år, gerne fortæller om de helt basale principper i at opsende raketter og designe rummissioner, selvom det ikke nødvendigvis direkte handler om hans egen forskning.

»Raketvidenskab og rummissioner er bare spændende og derfor rigtig gode emner til at vække interesse for al den forskning, som teknologien baner vejen for,« siger han.

Ud i rummet

Rummissioner går hånd i hånd med forskningen, fordi missionerne designes 100 % efter, hvad man ønsker at opnå med dem – hvilket kan være vidt forskellige ting såsom at lede efter exoplaneter, studere Solen eller undersøge Mars.

»I nogle tilfælde vil man faktisk

kunne gøre de samme observationer fra jorden ved for eksempel at bygge et større teleskop. Så det er altid en overvejelse, om man ikke hellere burde gøre det, da rummissioner er ekstremt dyre«, fortæller Hans. »Men der er også masser af tilfælde, hvor det er helt nødvendigt at flytte instrumenterne udenfor Jordens atmosfære for overhovedet at kunne foretage de observationer, som man ønsker at gennemføre, ligesom der nogle gange ikke er nogen vej udenom at "tage ud og se efter"«.

Delphini-1 var som allerede antydnet ikke en mission drevet af et behov for at få bestemte forskningsdata, men en mission, der skulle give studerende og forskere ved Aarhus Universitet erfaringer med at gennemføre satellitmissioner og dermed bane vejen for mere avancerede rumaktiviteter ved universitetet.

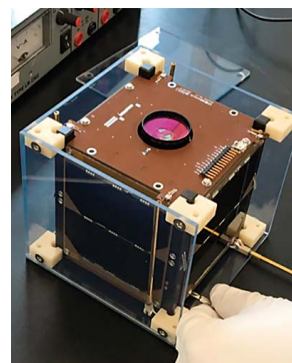
Delphini-1 er en såkaldt mikrosatellit, der ikke vejer mere end cirka et kilo og som derfor populært sagt kan medbringes som håndbagage, når en raket for eksempel

skal bringe udstyr og mandskab til den Internationale Rumstation. Men selv en så lille satellit giver adgang til, at studerende og forskere kan samarbejde om udviklingen af projektet og lære at styre og nedtage data. Satellitten er udstyret med et avanceret kamera, som kan bruges til at lave observationer af Jorden.

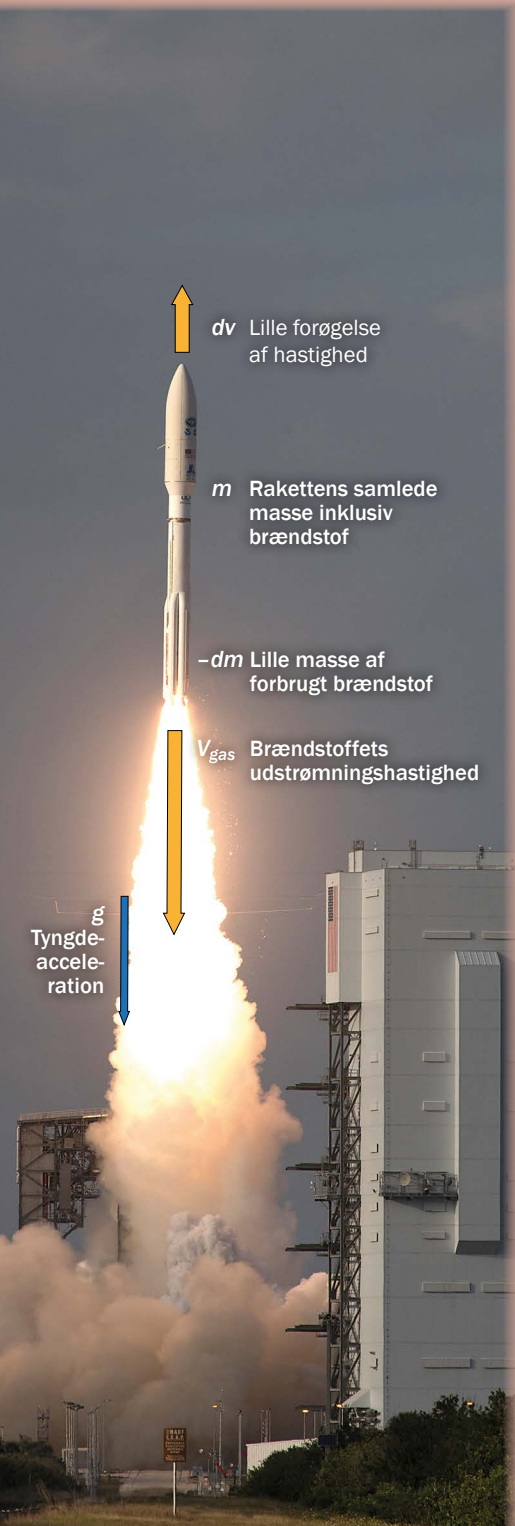
Hans Kjeldsen sender i den forbindelse et anerkendende nik i retning af Aalborg Universitet, hvor man har stor ekspertise i mikrosatellitmissioner, og hvor forskere og studerende selv har udviklet de mikro-satellitter, som er sendt i kredsløb. Virksomheden Gom Space, som har bygget komponenterne til Delphini-1, er således en spin off virksomhed af satellit-aktiviteterne på Aalborg Universitet.

Tæt på Solen

En langt mere kompleks mission end Delphini-1 er *Solar orbiter*, som Det Europæiske Rumagentur (ESA) står bag sammen med NASA. Missionen går ud på at studere Solen, og selvom det ikke er en mission, Hans er involveret i, synes han den



Delphini-1 i en acrylboks.



Baggrundsfoto: NASA

Ud i rummet

En rakets acceleration bygger på det fysiske princip, vi kalder bevarelse af bevægelsesmængden. I fysikken er bevægelsesmængden givet ved masse gange hastighed. Bevarelse af bevægelsesmængden betyder, at når raketten skyder en lille del af sit brændstof ud med stor fart, vil hele raketten bevæge sig i modsat retning og forøge sin hastighed svarende til den bevægelsesmængde, som skydes bagud.

Hvis vi kalder den lille mængde brændstof, som raketten skyder bagud og mister for $-dm$ (minus fordi raketten bliver lettere), og vi kalder brændstoffets hastighed for v_{gas} , vil det være i balance med rakettenes masse (inklusive alt det brændstof, som er tilbage), som vi kalder m og den lille hastighedsforøgelse, raketten oplever, som vi her kalder dv .

I fysikken opskrifter vi dette som en matematisk ligning:

$$m \cdot dv = -dm \cdot v_{gas}$$

Denne kan let omskrives til:

$$dv = \frac{-dm}{m} \cdot v_{gas}$$

Denne ligning for en rakets bevægelse gælder kun, når raketten ikke er påvirket af tyngdeaccelerationen (for eksempel fra Jorden) og af luftmodstanden fra Jordens atmosfære.

For den masse m bliver mindre, når raketten afbrænder sit brændstof, vil det i praksis betyde, at hastighedsforøgelsen dv bliver større og større, efterhånden som raketten bruger mere og mere af sit brændstof. En raket vil derfor typisk accelerere mindst i starten, og mest når brændstoffet er næsten opbrugt. Den totale forøgelse af rakettenes hastighed, som vi kalder Δv , findes ved at lægge alle de små hastighedsændringer dv sammen, når der samtidigt tages højde for, at massen m bliver mindre og mindre, når raketten afbrænder sit brændstof.

Rent matematisk beregner vi den samlede hastighedsændring Δv fra starttidspunktet, hvor hastigheden er v_0 (typisk 0) til tidspunktet t , hvor hastigheden er v , ud fra et integral – summen over alle de små led – og den matematiske ligning, vi kan opstille, ser sådan ud:

$$\Delta v = \int_{v_0}^v dv = \int_{m_0}^m \frac{-dm}{m} \cdot v_{gas}$$

og løsningen til dette er:

$$\Delta v = \ln\left(\frac{m_0}{m}\right) \cdot v_{gas}$$

hvor m_0 er rakettenes samlede startmasse (inklusive brændstof), og m er den samlede masse af raketten (inklusive det tilbageværende brændstof), når raketmotoren slukkes (til tidspunktet t). $\ln$ er en funktion kaldet den naturlige logaritme. Denne sidste ligning kaldes raketligningen.

Når man starter en rumrejse, eksempelvis fra Jordens overflade, må man tage højde for den måde, tyngdeaccelerationen bremser raketten. Det gøres ved at fratrække den hastighed, som raketten mister, fordi tyngdeaccelerationen får raketten til at falde tilbage mod Jorden. Hvis vi kalder det lille tidsrum, hvor raketten afbrænder $-dm$ af brændstoffet, for dt , og vi kalder størrelsen af tyngdeaccelerationen for g , kan vi opstille følgende sammenhæng, hvor $g \cdot dt$ er den hastighed, som raketten taber på grund af tyngdeaccelerationen.

Hermed får vi:

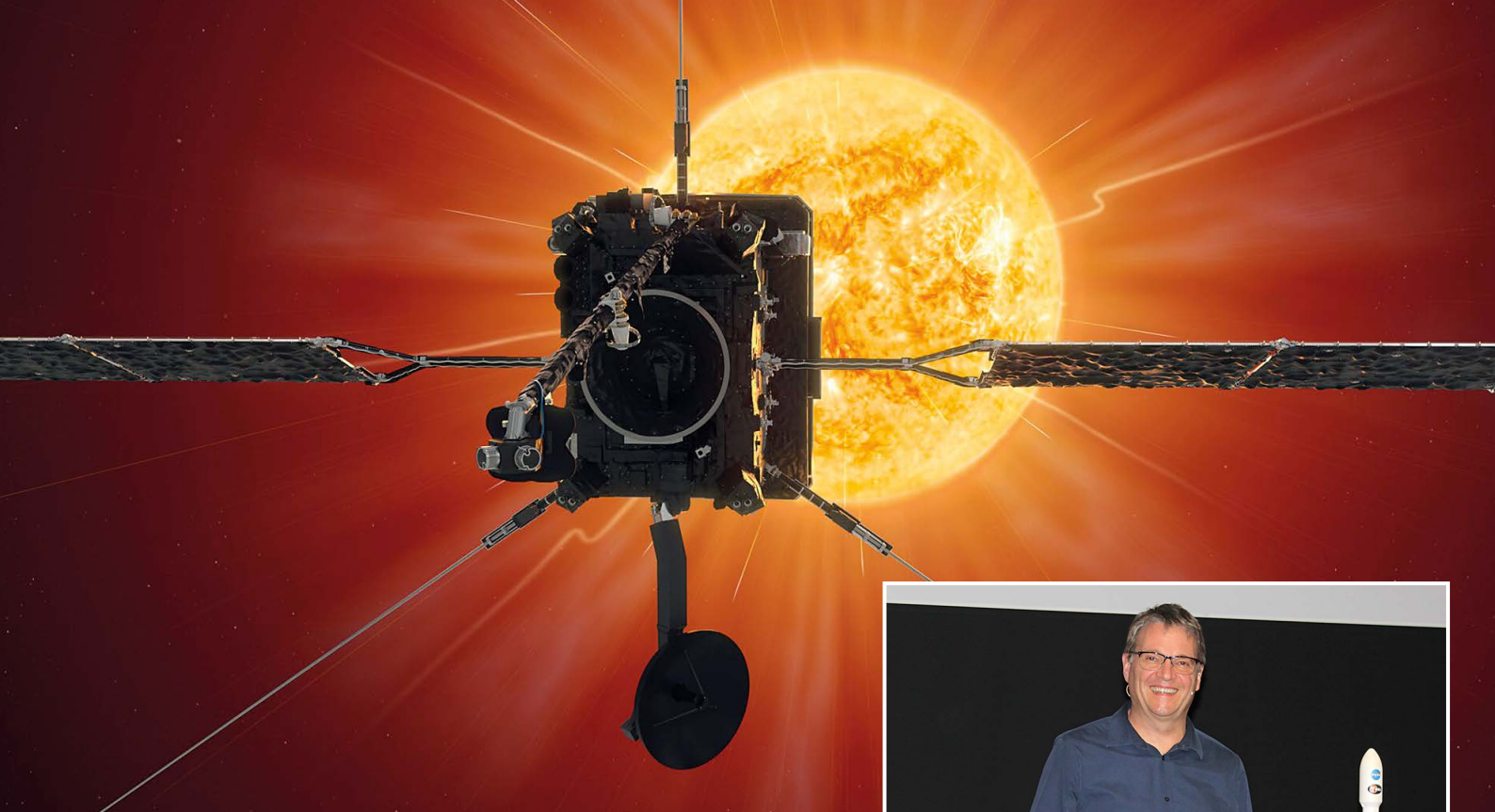
$$dv = \frac{-dm}{m} \cdot v_{gas} - g \cdot dt$$

og løses denne ligning finder vi:

$$\Delta v = \ln\left(\frac{m_0}{m}\right) \cdot v_{gas} - g \cdot \Delta t$$

hvor Δt er tidsrummet fra raketten startes til den slukkes.

Det kan ud fra denne matematiske sammenhæng ses, at for at få den størst mulige hastighedsændring Δv for raketten skal en raketdesigner gå efter at få mest muligt brændstof med ombord (så m_0 bliver så stor som muligt) og gå efter, at gassen skydes ud med så stor hastighed (v_{gas}) som muligt. Desuden er det en fordel, og også i mange tilfælde en forudsætning, at brændstoffet brændes af på så kort tid (Δt) som muligt (så raketten bremses mindst muligt af tyngdeaccelerationen).



er fagligt interessant, fordi han også selv beskæftiger sig med Sol- og stjernefysik.

Rumsonden blev opsendt i februar 2020, og den skal i et ellipseformet kredsløb om Solen, der vil bringe den tættere på Solen end nogen anden rumsonde har været før – nærmere betegnet ind til en afstand af cirka 42 millioner kilometer (Jorden befinder sig gennemsnitligt knap 150 millioner kilometer fra Solen). Herfra skal rumsonden blandt andet optage billeder og foretage målinger af sammensætningen af den tynde strøm af gas, der hele tidens udstødes fra Solens overflade – den såkaldte solvind – og knytte det til, hvor på Soloverfladen, solvinden kommer fra.

Forskerne håber, at disse observationer vil hjælpe med at besvare en række meget fundamentale spørgsmål om Solen såsom, hvad der driver 11-årscyklusen i Solens magnetiske aktivitet, hvad der opvarmer Solens øverste atmosfære (coronaen) til flere millioner grader celsius, og hvad der driver dannelsen af solvinden og accelererer den op til flere hundrede kilometer i sekundet.

Svært at flyve ind i Solen

»Når man vil undersøge Solen tæt på, er en af udfordringerne selvfølgelig, hvordan man undgår, at instrumenterne bliver ødelagt«, siger Hans

Den udfordring kan man håndtere ved at rette instrumenterne direkte mod Solen i relativt kort tid gennem varmeskjold, og ved at udnytte tiden, hvor sonden er længere væk fra Solen i den elliptiske bane til at køle instrumenterne ned.

»De færreste vil nok tænke over, at det at sende en rumsonde til Solen i sig selv kan være en meget stor udfordring«, siger Hans. »Hvis vi havde ambitioner om at sende en rumsonde helt ind i Solen, ville det i praksis være næsten umuligt.«

Han forklarer, at dette er let nok at indse, når man har forstået sammenhængen mellem hastigheden i omløbsbanerne og afstanden til Solen. Langt ude i rummet bevæger alting sig langsomt om Solen, mens det omvendt går hurtigere og hurtigere i omløbsbanerne, jo tættere man kommer på Solen. Når vi sender en sonde ud i rummet her fra Jorden, vil den – hvis ikke vi gør andet end at få den ud i rummet



– blot følge med rundt i Jordens bane omkring Solen. Da Jorden jo ikke falder ind i Solen, skal vi altså af med hastighed, for at få den ind i en omløbsbane tættere på Solen. Og jo tættere, man ønsker at komme på Solen, jo mere skal man bremse for at komme tættere på.

»Hvis vi vil flyve helt ind i Solen, skal sonden bremses med ikke mindre end 107.200 km/t – det er helt vildt!«, siger Hans. »De fleste satellitter bevæger sig til sammenligning med en fart af cirka 7,7 km/s, dvs. 27.700 km/t.«

Et vilkår for rummissioner er, at den raketmotor, man har med, kræver meget brændstof for at ændre hastigheden – og den hastighedsændring, man kan lave, er givet ved den mængde brændstof, man har med. Den samme raketmotor vil dermed have vidt forskellig indflydelse, afhængig af, om man befinder sig langt ude i rummet

↑ Øverst: Et kunstnerisk indtryk af rumsonden Solar orbiter i færd med at undersøge Solen. Illustration: ESA/Medialab.

↑ Hans Kjeldsen på scenen ved de offentlige i Naturvidenskab. Foto: Michael B. Christiansen

I kredsløb

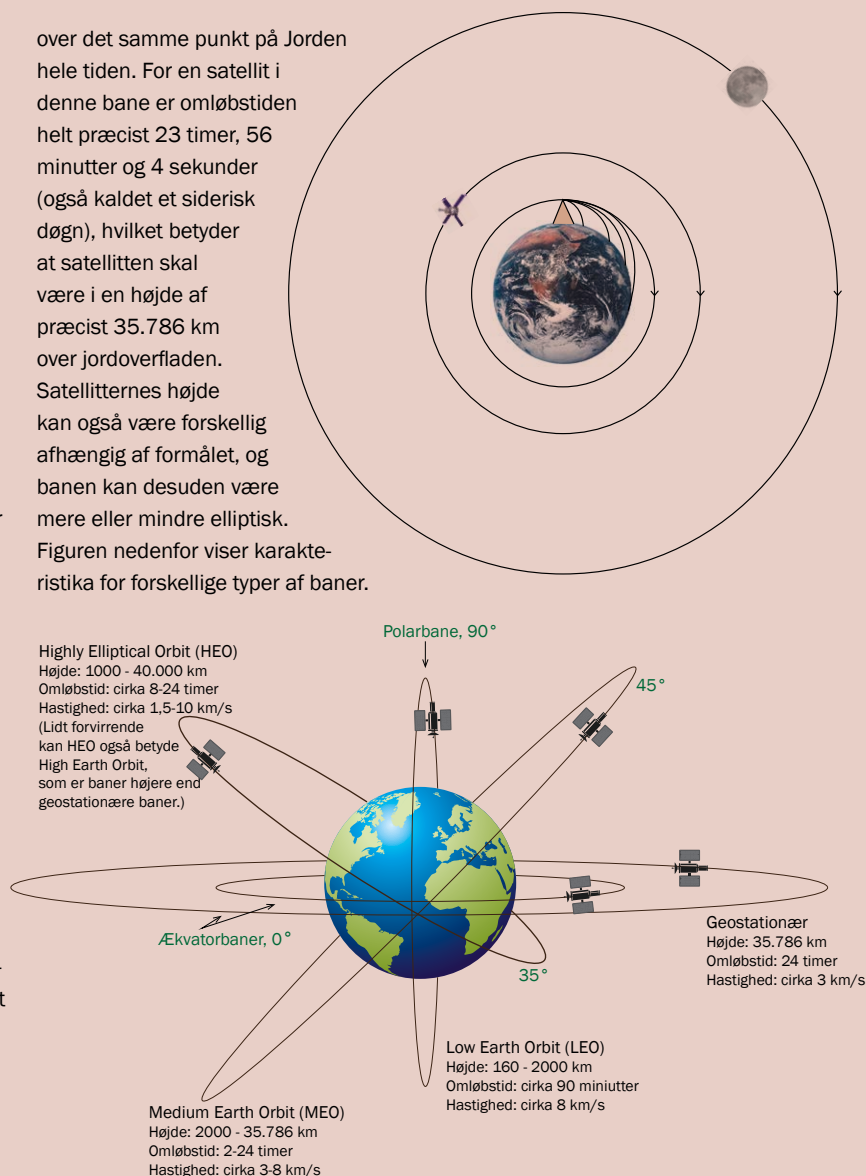
Videnskabsmanden Isaac Newton var den første til at forstå, at hvis man kaster et objekt ud fra et tilstrækkeligt højt bjerg med tilstrækkelig stor hastighed, vil det ikke ramme Jorden, men fortsætte sit fald i det uendelige (hvis man ser bort fra atmosfærens bremsende effekt). Når en satellit er i kredsløb om Jorden er den derfor i praksis i konstant frit fald, fordi dens fart præcist er balanceret med Jordens tyngdekraft i den givne højde.

Når man i dag beregner baner for satellitter i kredsløb om Jorden eller sender rumsonder på langfart i Solsystemet, er det grundlæggende stadig Newtons bevægelseslove, der regnes på i de avancerede computere.

Satellitbaner kan have forskellige banehældninger afhængig af, hvad satellitten skal bruges til. De to yderpunkter er ækvatorbaner, der ligger i Jordens ækvatorplan og polarbaner, som fører satellitten hen over Jordens syd- og nordpol. Satellitter i en polarbane vil "se" forskellige områder på Jorden for hvert omløb, da satellittens bane ikke følger Jordens rotationsretning.

Den geostationære bane gør det muligt at have satellitten placeret

over det samme punkt på Jorden hele tiden. For en satellit i denne bane er omløbstiden helt præcist 23 timer, 56 minutter og 4 sekunder (også kaldet et siderisk døgn), hvilket betyder at satellitten skal være i en højde af præcist 35.786 km over jordoverfladen. Satellitternes højde kan også være forskellig afhængig af formålet, og banen kan desuden være mere eller mindre elliptisk. Figuren nedenfor viser karakteristika for forskellige typer af baner.



eller tæt på Solen. Langt ude i rummet bevæger alting sig langsomt i banerne, og derude kan en lille hastighedsændring derfor have stor indflydelse på banen, mens det omvendt er meget svært at ændre noget tæt på Solen, fordi alting bevæger sig rasende hurtigt.

Man kan dog også komme af med hastighed ved at give lidt energi til eksempelvis Venus – altså det omvendte af, hvad man gør, når man "låner" ekstra fart fra de andre planeter, når man skal længere ud i Solsystemet. Solar Orbiters bane er designet sådan, at den jævnlige vil komme i nærheden af Venus' tyngdefelt, som sonden kan udnytte

til at ændre størrelsen af eller hældningen af rumsondens bane.

Landingens kunst

Når man ikke bare vil sende rumsonder til andre planeter, men også lande på dem, stiger kompleksiteten i missionerne. For der findes ikke en standardløsning på at lande et fartøj på et fremmed himmellegeme, så løsningen er helt og aldeles dikteret af det specifikke miljø, man skal lande i. At lande på Jorden er i den sammenhæng relativt enkelt, fortæller Hans.

»Man skal blot medbringe brændstof nok til, at man kan nå ned og ramme Jordens atmosfære, så

klarer den faktisk resten af arbejdet. Man skal blot huske også at medbringe et varmeskjold og en faldskærm til den sidste del af nedstigningen, hvis ikke landingen skal blive for hård!«, siger han.

At lande på Mars er til sammenligning en langt større udfordring, selvom Mars for en overfladisk betragtning ligner Jorden en del. At lande på Mars har man gjort mange gange – blandt andet med de to Mars-rovere *Opportunity* og *Spirit* i 2004. En ny og større rover – *Perseverance* – er i skrivende stund på vej til Mars. Den blev opsendt 30. juli 2020, og hvis alt går vel, lander den på Mars 18. februar 2021.



Illustration af den manøvre kaldet "sky crane", som bragte Marsroveren Curiosity sikkert ned på planeten i 2012. Den samme metode skal bruges til Perseverance, der når frem til Mars i februar 2021. Illustration: NASA/JPL-Caltech.

Når roveren er landet sikkert på Mars, skal den søge efter tegn på mikroskopisk liv på planeten og skal blandt andet også indsamle borekerner af klipper og sedimenter på Mars, der bliver opbevaret i forseglede rør i roveren med henblik på engang i fremtiden at blive fragtet tilbage til Jorden. Missionen medbringer også en lille helikopter (med navnet *Ingenuity*), som er et teknologiekperiment. Det er nemlig usikkert, om det giver mening at bruge helikoptere på Mars, da det svarer til at skulle flyve med en helikopter i 25 kilometers højde på Jorden. Og det kunne ingen ansvarlig helikopterpilot finde på!

Sky-kranen

Men hvordan lander man sikkert på Mars? Udfordringen er, at tætheden af Mars' atmosfære kun er cirka 1,5 % af, hvad den er på Jorden. Derfor virker den slet ikke opbremsende på samme måde som Jordens.

»Det er især den sidste del af nedstigningen, der er problematisk, for selvom man godt kan bruge en faldskærm på Mars, vil man smadre ind i planeten med omkring 300 kilometer i timen,« fortæller Hans.

Ved tidligere missioner til Mars har man brugt forskellige løsninger til at bringe fartøjerne intakt ned på overfladen: Man har brugt raketmotorer, "airbags" og en kombination af de to. Den nye rover *Perseverance*, der nu er på vej til Mars, skal landes med en metode, som også blev benyttet til at lande Mars-roveren *Curiosity* på Mars i august 2012. Landingsmanøvreren inkluderer et særligt raketdrevet nedstigningsfartøj, en faldskærm og så til allersidst en helt speciel manøvre kaldet sky-crane, hvor selve roveren hejses ned i kabler under raketmotorerne. På den måde vil hele herligheden flyve det sidste stykke vej ned mod overfladen, mens hjul og andre dele af roveren folder sig ud. Så snart roveren får kontakt med overfladen, klippes kablerne, og raketten flyver væk.

»Når man hører om den landingsprocedure, tænker man umiddelbart: Det lyder da virkelig mere som fancy science fiction end som den mest smarte måde at lande et rumfartøj på. Men det er altså den bedste løsning, men har kunnet finde til at lande en så tung rover stabilt i dette miljø,« siger Hans.

Det hele skal samtidig være for-

programmeret, da afstanden til Mars gør, at der er en tidsdifferens på cirka 20 minutter. Så når vi sidder og ser manøvreren "live" på computerskærmen, er det hele i virkeligheden overstået.

Fra første parket

En af de mest fascinerende sider af rumfart og rumforskning er alle de nye og spændende opdagelser, som gøres – enten ved observationer af objekter fjernt fra Solsystemet eller på de spændende rejser, som ubemandede rumsonder foretager i Solsystemet.

»Det er moderne opdagelsesrejser til nye og ukendte egne, men i modsætning til tidligere tiders opdagelsesrejser, hvor man måtte vente på nyheder og beretninger fra rejse til den opdagelsesrejsende var kommet sikkert hjem, kan vi følge med på første parket, når ESA eller NASA sender rumsonder og rovere ud i Solsystemet. Når *Perseverance*-roveren forhåbentlig lander på Mars torsdag den 18. februar 2021 kl. 21:30 om aftenen, vil vi alle kunne følge med direkte fra kontrolrummet i USA. Det bliver en utrolig spændende aften og også nervepirrende! For lykkes det?« spørger Hans.

Denne artikel bygger på foredraget *Rejsen ud i rummet*, som Hans Kjeldsen holdt i foredragsserien Offentlige foredrag i Naturvidenskab den 6. oktober 2020. På Aktuel Naturvidenskabs hjemmeside kan du finde undervisningsmateriale, der knytter an til emnet for foredraget og artiklen.

Artikel og undervisningsmateriale er lavet som led i projektet *Brobygning på første række*, finansieret af Novo Nordisk Fonden.

Videre læsning
Om Delphini-1
DELPHINI-1 – Aarhus Universitets første satellit. Aktuel Naturvidenskab nr. 1/2019.

Om Solar Orbiter
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter

Om Mars 2020
<https://mars.nasa.gov/mars2020/>