

EN SANDWICH I RUMMET

Sandwichpanelet er opbygget med et kerne-materiale, som danner en "bikagestruktur", og kulfiberepoxyplader udenom. Foto: Shutterstock

Små satellitter udvikles i dag på baggrund af krav, der er opstillet for mere end 20 år siden. Ved at udnytte en smart sammensætning af kul og plastik, som kaldes en "sandwich", er det muligt at halvere vægten på en satellitstruktur.

Satellitdata er blevet en integreret del af vores hverdag her på jorden. Med en stigende efterspørgsel på at nå rummet hurtigere, billigere og med øget frekvens, oplevede rumfartsindustrien et paradigmeskift fra traditionel rumfart til det, der i dag kaldes "New Space". Her har standardiserede komponenter indtaget verdensrummet i såkaldte CubeSats. Ved introduktionen af denne nye teknologi fulgte en industrialisering af rumfartsindustrien, der gjorde det muligt for private aktører at stifte start-ups, og i dag er New Space en industri, der er tilgængelig for enhver med interesse for rummet.

CubeSats er en miniature-satellit, som består af flere enheder, hvoraf én enhed (1 Unit) måler 10 x 10 x 10 cm.



CubeSats i forskellige størrelser. (Fra venstre: 12U, 6U, 3U, 2U, 1U).

Illustration: Radius Space.

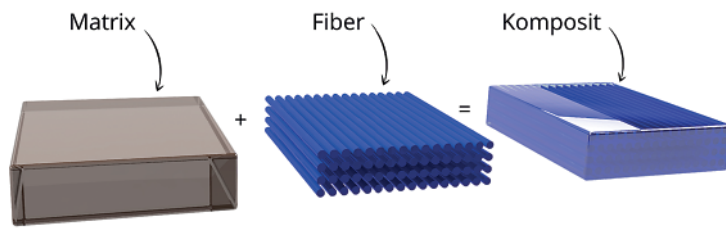
Grundet deres kompakte design og udvikling, baseret på eksisterende komponenter, er det lykkedes at minimere omkostninger for udvikling af de små højteknologiske kuber og samtidig sende dem i rummet på "ryggen" af større raketopsendelser. Den første CubeSat blev udviklet af California State Polytechnic University tilbage i 1999. Sammen med Stanford

University Space Development Laboratory udarbejdede de en standard med generelle krav og processer for at kunne udføre en succesfuld CubeSat-mission. Siden da er mange start-ups accelereret fra dette første skridt mod CubeSats, der blandt andet dikterer, at der skal benyttes specifikke aluminiumslegeringer til strukturelle komponenter.

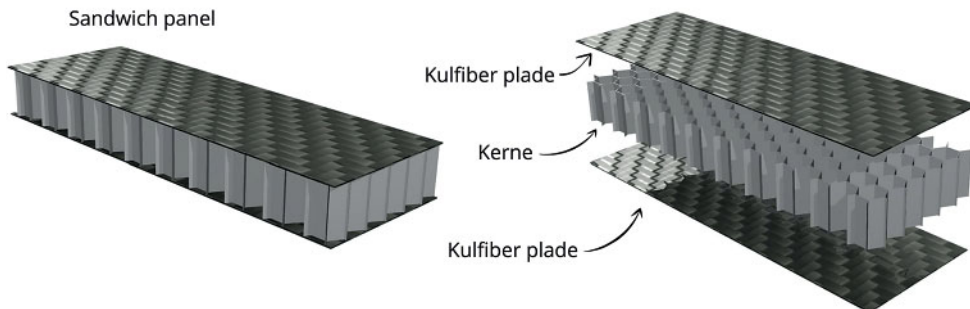
Om forfatteren



Nicolai Iversen er maskiningeniør og arbejder med forskning ved Maersk McKinney Møller Institutet på Syddansk Universitet. Han har publiceret artikler og præsenteret sin forskning på anerkendte konferencer indenfor robotter til sundhedssektoren, automatisering, drone-teknologi, rumfart samt etikken bag teknologisk udvikling. Han er medstifter af SDU Galaxy, som er et initiativ på Syddansk Universitet med fokus på rummet og kobling af uddannelse, forskning og industri. niiv@mmpi.sdu.dk



Et kompositmateriale kan som her være opbygget af en matrix og ensrettede fibre.
Illustration: Nicolai Iversen.

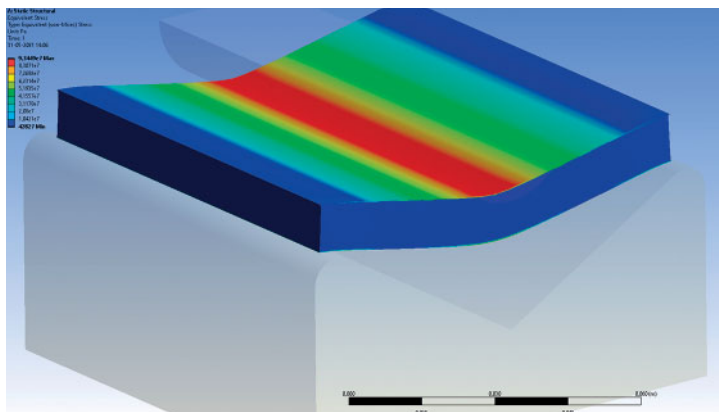


Sandwichpanelet er opbygget med et kernemateriale, som danner en "bikagestruktur", og kulfiberepoxyplader udenom. Det samlede materiales stivhed og styrke kan forøges ved at øge tykkelsen af kernematerialet, som tabellen viser.

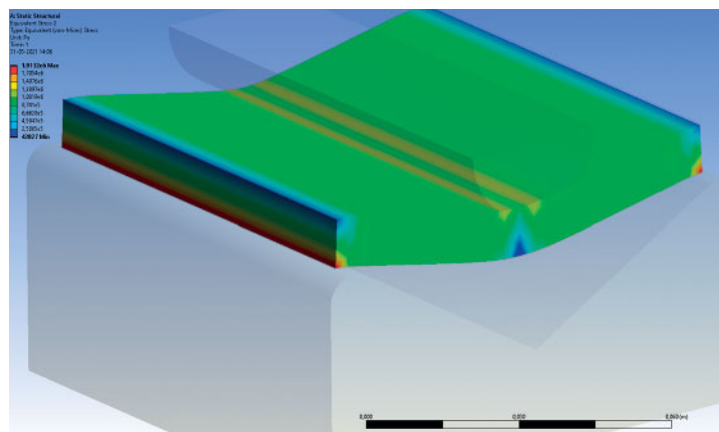
Illustration: Nicolai Iversen

	Kernetykkelse	Stivhed	Bøjningsstyrke	Vægt
t	-	1.0	1.0	1.0
2t	t	7.0	3.5	1.03
4t	3t	37.0	9.2	1.06

Figuren viser øverst en grafisk simulering af, hvordan spændinger fordeles igennem panelet, når det bøjes. Den røde farve illustrerer de højeste spændinger i midten af kulfiberepoxy-pladen på 93,4 MPa.



Nederst fokuseres analysen til kun at illustrere spændingsfordelingen igennem kernen af panelet. Som ønsket er spændingerne her noget lavere på kun 1,9 MPa.



Når der designes mekaniske strukturer, er materialevalg altid et kompromis imellem stivhed, styrke samt vægt. En robust struktur sikrer det nødvendige miljø for, at øvrige komponenter overlever en given missions levetid. Strukturer med øget styrke, stivhed, miljømæssig stabilitet osv. kan bidrage til øgede opsendelsesmuligheder for CubeSats og samtidig åbne op for udforskningen af det ydre rum. Lavere vægt gør desuden en satellit mere smidig. Det betyder, at levetiden for en CubeSat-mission kan forlænges fra 1-2 år op til 4-5 år. Denne forøgelse kræver indbyggede fremdriftssystemer, for at satellitten forbliver i sin kredsløbsbane, hvilket ofte er forbundet med tunge elektriske systemer eller butangas-tanke og trykdyser.

Kompositmaterialer i en sandwich

Der kan altså være flere gode grunde til, at der bør afviges fra den mere end 20 år gamle specifikation, og på Syddansk Universitet (SDU) i Odense forsker vi nu i muligheden for at benytte fiberforstærkede kompositmaterialer til CubeSats. Et kompositmateriale er fremstillet af to eller flere materialer med væsentligt forskellige fysiske eller kemiske egenskaber, der, når de kombineres, skaber et materiale med egenskaber, der adskiller sig fra de enkelte komponenter.

De enkelte komponenter forbliver adskilte i det færdige emne, hvilket adskiller kompositter fra blandinger og faste opløsninger. Materialerne kan skræddersys til at skabe unikke egenskaber, der er optimeret til at modstå mekaniske belastninger og andre påvirkninger fra det barske miljø. Fiberforstærkede kompositmaterialer består af fibre som hovedbærende element indlejret i et andet materiale – en matrix – der fungerer som et medium, der overfører belastninger mellem fibrene. Blandt de mest udbredte sammensætninger af kompositmaterialer findes glasfiber-epoxy (fiber-matrix), som ofte ses i både konstruktion og vindmøllevinger, el-

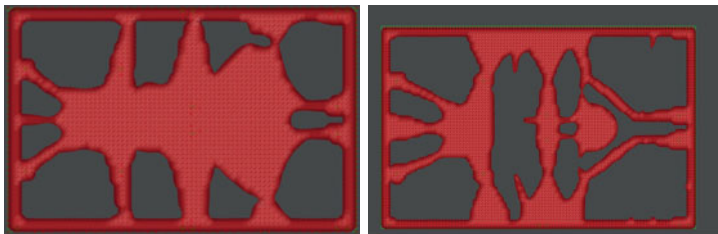
ler kulfiber-epoxy (CFRE), der indgår i produkter med høje krav til styrke, stivhed og vægt som golfudstyr og racerbiler. Med udgangspunkt i en plade kan egenskaberne optimeres yderligere ved at opbygge pladen som et sandwich-panel, hvor tynde kulfiber-epoxy-plader omslutter et yderst let kernemateriale i midten (ofte med en kubisk struktur som en bikage).

De tynde, stive plader danner et effektivt spændingspar eller modstandsmoment, der gør det svært at bøje den samlede plade. Det lette kernemateriale sørger for, at kræfter kan forskydes i materialet og stabiliserer pladerne mod at "rynke" ved at overføre belastninger mellem hver side af panelet.

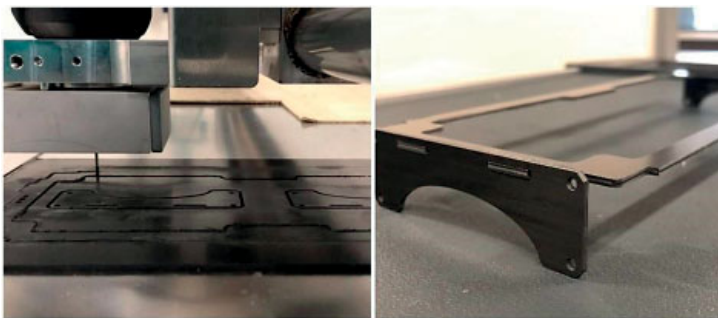
Her fordeles spændingerne i de stærke og stive kulfiber-epoxy-plader, der nu har øget indflydelse på stivheden grundet afstanden mellem dem (jo større afstand, desto større effekt). Samtidig sikres lav belastning i det svage og lette kernemateriale. Resultatet er altså et panel, der er både stivere, stærkere samt lettere end en tilsvarende plade af et massivt kompositmateriale – smart!

Konstruktion af en CubeSat-struktur

Satellittens struktur består naturligvis af andre dele end blot de smarte sandwich-paneler. Den endelige konfiguration består af en top- og bundplade samt fire vinkelskiner i hvert hjørne for at binde sandwichpanelerne sammen. Vinkelskinerne vil være i kontakt med raketens udløsningsmodul, der med en fjeder sørger for, at satellitten skubbes forsigtigt ud i sin rette bane. For yderligere at minimere vægten på den færdige struktur, har vi på SDU udarbejdet en såkaldt *topologi-optimering*. Her beskrives matematisk, hvordan strukturen belastes, hvorefter en numerisk analyse gradvist reducerer materialet i de områder, hvor spændingerne er lavest. Her identificeres altså, hvor der kan spares materiale mest effektivt.



Figuren viser, hvordan en numerisk analyse kan afsløre, hvordan det ideelle panel bør fremstilles for at opnå den mest effektive vægtbesparelse og samtidig maksimere styrke samt stivhed. De to resultater stammer fra to forskellige belastningsscenerier, der kan variere alt efter satellittens payload. Denne type analyse kaldes en topologi-optimering.

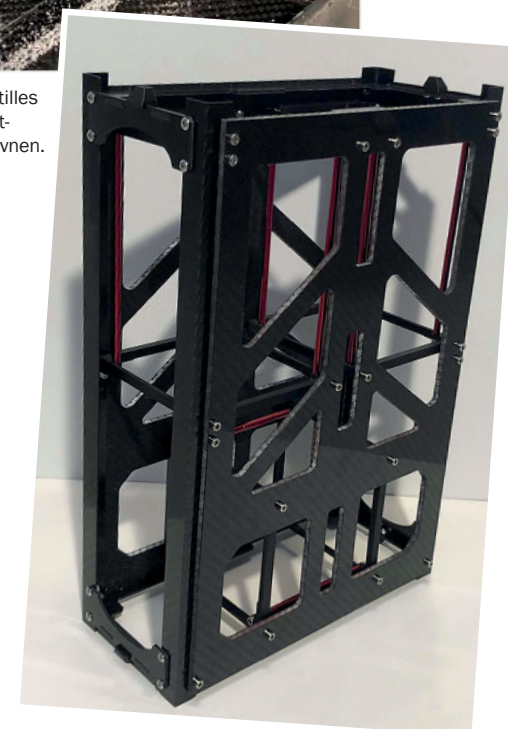


Komponenterne til satellit-strukturen fremstilles og samles i SDU's højteknologiske kompositlaboratorie i Hans Christian Andersen Lufthavnen. Fotos: Nicolai Iversen.

Herefter genereres et endeligt design, som både fremstilles og efterbearbejdes i SDU's eget højteknologiske kompositlaboratorie i Hans Christian Andersen Lufthavn.

En sandwich i rummet er ikke "bare lige..."

Egenskaberne for en kulfiber-epoxy-sandwich lyder lovende, men de kommer med en pris. Når der afviges fra en specifikation med mere end 20 års erfaring, kræves der yderligere dokumentation, test og verifikation for at sikre sig en billet ombord på en raket mod rummet. At introducere den avancerede materialekombination i satellit-designet byder på fremstillingsudfordringer, og vi konfronteres med begreber som anisotropi, glasover-



gangstemperatur, brudkriterier samt tomrum-analyse. På rejsen gennem jordens atmosfære oplever raketten, og satellitterne ombord, ekstreme belastninger. Heldigvis har virksomheder som SpaceX og

Videre læsning:
www.sdu.dk/galaxy
www.discosat.dk
www.cubesat.org

Rocketlab sendt mange raketter i rummet, og belastningerne er hermed kendte, hvilket gør det muligt at analysere, hvordan strukturen vil opføre sig under de voldsomme vibrationer. Det er dog mere komplekst en som så, da sandwich-panelet består af et *anisotropisk* materiale. Det betyder, at materialet ikke har de samme egenskaber i alle retninger i modsætning til et metal, som er *isotropisk* og dermed har samme egenskaber i alle retninger. Det kræver derfor både numeriske analyser og avancerede test at bestemme, hvornår og hvordan strukturen vil bryde (brudkriterier). Når analyserne har fastlagt de forventede brudkriterier er prototyperne klar til test. Testresultaterne verificerer de numeriske analyser og bekræfter, om strukturen kan rejse sikkert ud i rummet.

Men rejsen ud i rummet er kun første skridt for den avancerede struktur. Satellitten skal nu tilbringe årevis i et rummiljø fyldt med udfordringer. Den mest åbenlyse udfordring er rummets vakuum. Fordi kernematerialet i sandwich

består af pentagon-formede kamre, er det vigtigt, at disse perforeres så der ikke skabes uønskede luftlommer i panelet, som kan medføre eksplosioner.

En anden udfordring er at sørge for, at satellitten holder sig indenfor det rette temperaturinterval, som er bestemt af den konkrete mission. Da satellitten befinder sig i et miljø med vakuum er den eneste måde at opvarme strukturen på gennem stråling. Der tilføres energi til satellitten igennem tre generelle former for stråling i rummet: Infrarød stråling fra Jorden, direkte stråling fra solen samt reflekteret sol-stråling fra Jorden (som varierer med Jordoverfladens beskaffenhed og skydække). Satellitten stråler samtidig selv energi ud i rummet. På grund af satellittens bane rundt om Jorden vil den på nogle tidspunkter befinde sig i Jordens skygge og kun modtage infrarød stråling fra Jorden. Her kan det ske, at strålingsbalancen for satellitten bliver negativ, så der netto stråles energi ud fra satellitten, og der risikeres yderst lave temperaturer. Det er derfor vigtigt

at analysere temperaturstabiliteten for materialerne samt deres varmeledningkoefficienter, så man er sikker på, at satellitten kan modstå turen igennem skyggen. Specielt for matrixen er det vigtigt at kende det temperaturinterval, hvor materialet kan overgå til såkaldt glastilstand, idet materialets hårdhed, stivhed og styrke reduceres signifikant i denne tilstand. Glasovergangstemperaturen er afgørende for et kulfiber-epoxy panel, da matrixen anses som det svageste led i strukturen.

Der er altså mange faktorer, der tages i betragtning, før vi sender et nyt materiale ud i rummet, og igennem The Danish Student CubeSat Programme (DISCO) er dette lige netop ambitionen. Her udvikles tre 1U-satellitter, hvoraf SDU i samarbejde med Aalborg Universitet har hovedansvaret for den såkaldte DISCO-III-satellit. Det er nu op til de nuværende og kommende studerende med tilknytning til kompositlaboratoriet på SDU at videreudvikle og tilpasse strukturen, så opsendelse af satellitten kan ske som planlagt i sommeren 2024. ■

Study Mathematical Bioscience

Roskilde University offers a unique integrated master's programme for students with a deep interest in mathematics and biology.

Specialize in mathematical modeling of health and disease developments, ecology, or mathematical methods.

→ **Mathematical Bioscience**

ruc.dk/en/master/programmes



RUC