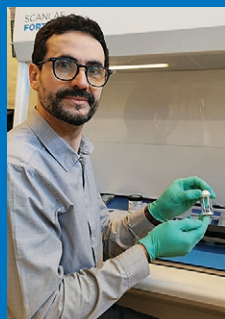


FLYDENDE FORBINDELSER GØR ELEKTRONIK MERE PÅLIDELIG

Effektive og pålidelige elektroniske komponenter er vigtige for brugen af el fra fx sol og vind i den grønne omstilling.
Foto: Shutterstock

Forfatteren



Francesco Iannuzzo har en kandidatuddannelse som elektronikingeniør og en ph.d.-grad indenfor halvledere fra Università di Napoli "Federico II", Italien. Han er nu professor og sektionsleder ved AAU Energi, Aalborg Universitet, hvor han også er en del af Center of Reliable Power Electronics (CORPE).

Han forsker i effektelektronik og pålideligheden af effektelektroniske komponenter, tilstandsmonitorering, fejlmodellering og test op til megawatt under ekstreme forhold
fia@energy.aau.dk

Effektelektronik bruges til styre og omdanne elektrisk energi i alle dele af el-systemet og har dermed en nøglerolle i den grønne omstilling. Derfor arbejder forskere på at udvikle bedre og mere pålidelig effektelektronik – for eksempel ved at bruge flydende metaller til at forbinde komponenterne.

En af vor tids helt store udfordringer er at omstille vores energiforbrug fra helt overvejende at basere sig på fossile brændstoffer til i meget højere grad at basere sig på vedvarende energikilder. Produktionen af energi fra vedvarende energikilder har det grundlæggende problem, at ingen vedvarende energikilde kan levere energi konstant. Når det ikke blæser, producerer vindmøllerne således ingen energi, og når solen ikke skinner, har vi ikke meget glæde af solceller. En energiforsyning baseret på vedvarende energi kræver derfor et energilagringssystem, som kan lagre energi, mens der produceres, og frigive den igen, når der er behov for det.

Grundlæggende finder der to typer af energilagringssystemer: batterier og elektrolysebrændstoffer. I bat-

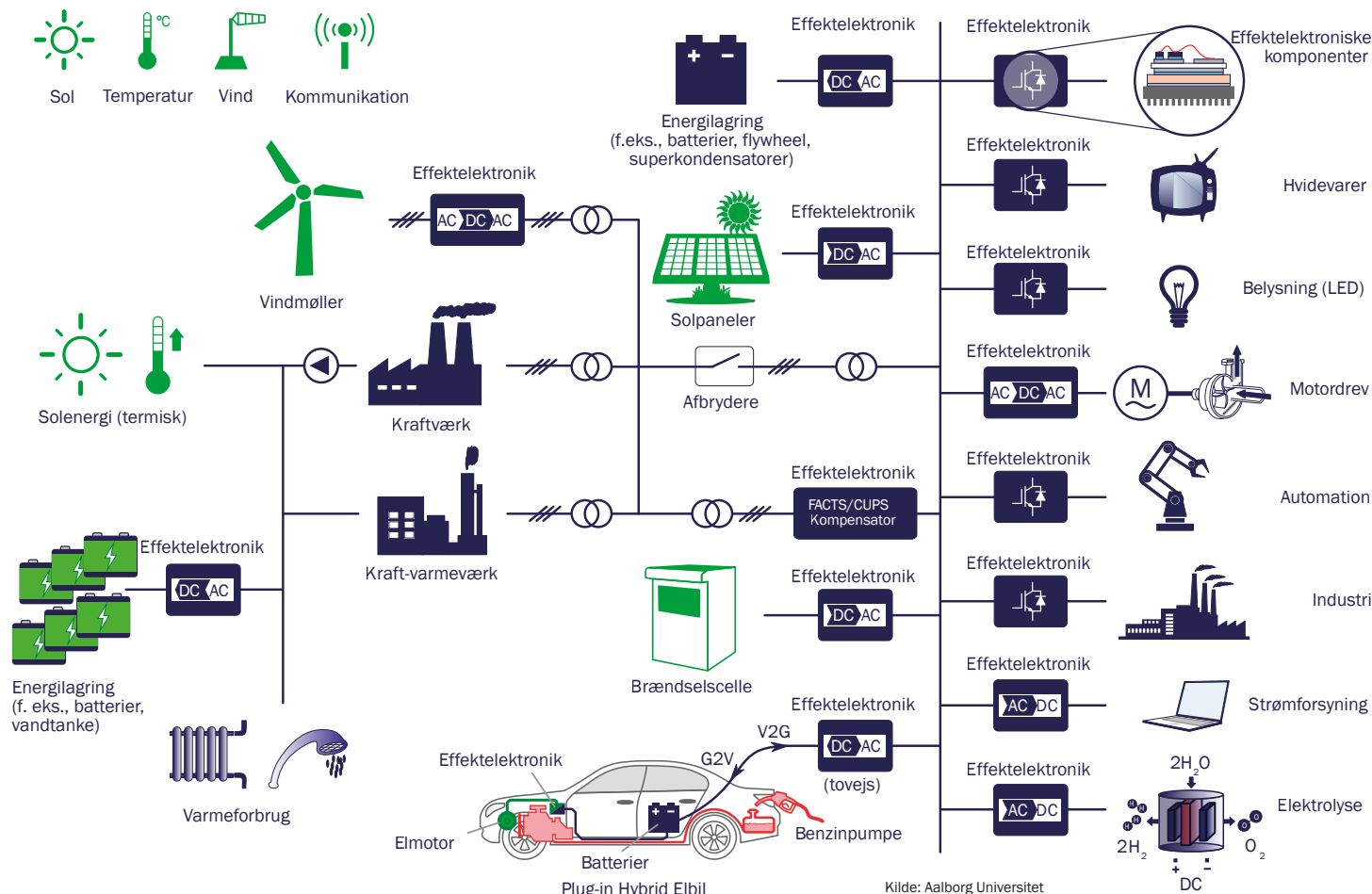
terier sker energilagring gennem elektroder, der omdanner lavenergikemikalier til højenergikemikalier. Denne reaktion kaldes elektrolyse, og den er reversibel, og derfor kan den akkumulerede elektriske energi genvindes ved omvendt elektrolyse. Elektrolysebrændstoffer som brint eller methanol laves ved hjælp af det samme elektrolyseprincip, som finder sted i batterier, men i stedet for at anvende det omvendte elektrolyseprincip, frigives den lagrede energi ved forbrænding, for eksempel i en bilmotor. Elektrolysebrændstoffer er CO₂-neutrale, fordi produktionen af brændstofferne fjerner den samme mængde CO₂ fra atmosfæren, som der udledes ved forbrænding.

Energi går tabt i konvertering

Når vi snakker om denne omstilling til en energiforsyning baseret på vedvarende energi er et helt

centralt koncept, det man kalder virkningsgraden (som har symbolet η). Når en energi omdannes fra en given form (for eksempel elektrisk) til en anden form (for eksempel kemisk), eller i samme form, men med forskellige karakteristika (eksempelvis fra elektrisk lavspænding til elektrisk højspænding), er der uundgåeligt et energitab, som kaldes konverteringstab. Virkningsgraden er dermed forholdet mellem den opnåede energi og den tilførte energi, og den er altid mindre end én, fordi der aldrig kan opnås mere energi, end der tilføres.

Virkningsgraden er typisk et meget højt tal, når der er tale om elektrisk energiomdannelse, for eksempel 0,9 eller endnu højere. Vi kan altså ud fra virkningsgraden umiddelbart aflæse den relative mængde energi, der går tabt i processen, idet



Figuren viser skematisk, hvordan der fra produktion af elektrisk energi til udnyttelse kan være flere trin, hvor der sker en konvertering. For eksempel kan konverteringen bestå i, at strømmen omformes fra jævnstrøm (DC) til vekselstrøm (AC) eller omvendt.

den blot er 1-η. I omstillingen til en vedvarende energiforsyning er det derfor meget vigtigt at reducere den mængde energi, der går tabt ved konvertering. Faktisk sker der i hele processen fra produktion, transport, distribution og forbrug af energi typisk 5-6 omdannelser, hver med en virkningsgrad mindre end 1 og dermed et tab. Hvis hver omdannelse eksempelvis sker med en virkningsgrad på 0,9, betyder 5 konverteringer således, at kun 0,9⁵, dvs. knap 60 % af den oprindelige energi er tilbage. Det forklarer, hvorfor der på globalt plan for hver produceret 10 kWh går mere end 5 kWh tabt på grund af konverteringstab.

Det betyder også, at der potentielt kan være meget at vinde ved at øge effektiviteten af elektriske energitransformationssystemer.

Strategier for at øge virkningsgraden

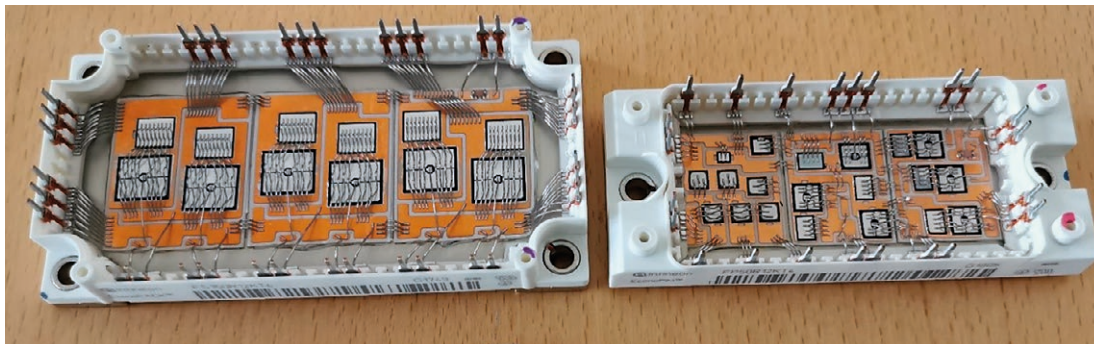
Men hvilke strategier har vi for at kunne øge virkningsgraden? Der er mange, men grundlæggende falder forskningen indenfor området i to hovedretninger. Den ene handler om at gøre de elektroniske kredsløb, der bruges til at ændre for eksempel spændingen eller strømmen i et elektrisk system, mere effektive. At øge virkningsgraden af et elektronisk kredsløb betyder, at kredsløbet vil producere mindre varme, mens det udfører sin funktion, hvilket betyder mindre tab af energi.

Den anden strategi går ud på at undgå store variationer i energiforbruget. Det skyldes, at konverteringstabene ikke er lineære. Med andre ord er konverteringstabene større ved højt forbrug end ved lavt

forbrug. Det er derfor bedre at have et konstant eller næsten konstant energiforbrug – og dermed konstant behov for energiproduktion – frem for et energiforbrug, der varierer meget i løbet af dagen og henover årstiderne.

På Aalborg Universitet har vi ved Institut for Energi (AAU Energy) to forskningsgrupper, der arbejder indenfor begge de nævnte retninger. Den ene gruppe arbejder således med at gøre elektroniske kredsløb mere effektive, mens den anden arbejder med at udvikle intelligente strategier for at balancere energiforbruget, så vi opnår energistømme, der er så konstante som muligt. Det sidste handler om på grundlag af prognoser og algoritmer baseret på kunstig intelligens at blive bedre til at forudsige energiforbruget i den betragtede periode, så man kan

Foto: Aalborg Universitet



Billedet viser et eksempel på kommercielle effektelektronikmoduler. Man ser en række firkantede chips af halvledermaterialer, som er forbundet med hinanden ved hjælp af metaltråde, såkaldte bond wirer. Chipsene er lodnet på et underlag af kobber, som kaldes substratet. Foto: Aalborg Universitet

Foto: Nick Baker, University of Alabama, US.

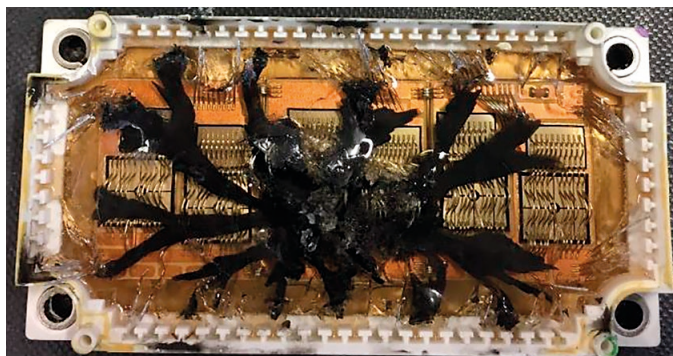
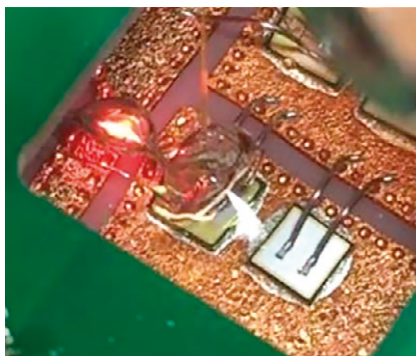


Foto: www.radarmuseum.co.uk/lifs.html

Billederne viser eksempler på ødelæggende svigt af strømforsyningsenheder. På billedet til venstre, som er optaget med et højhastighedskamera, ser man en overophedning, der får bond wirerne på den ene chip til at smelte. På billedet til højre er der simpelthen sket en eksplosion på grund af en termisk løbsk proces, der har ødelagt modulet.

vedtage strategier for at udskyde belastninger, det er muligt at udskyde, for eksempel opladning af elbiler.

Pålidelige komponenter

Når vi arbejder med at udvikle mere effektive elektroniske komponenter, handler det ikke kun om at opnå størst mulig effektivitet. Et ligeså vigtigt aspekt er, at komponenterne er *pålidelige*, det vil sige, at de ikke svigter og dermed holder længe. Alle teknologier indenfor vedvarende energi er baseret på elektroniske omformere, der gør det muligt at modulere og regulere den producerede energi over tid. I for eksempel en vindmølle eller en solcellegenerator er elektronikken nødvendig for at omdanne produktionen af variabel energi fra vinden eller solen til en energistrøm med faste parametre (typisk elektrisk spænding og elektrisk frekvens), der gør det muligt at distribuere energien i elnettet. Elektronik, der bruges til at styre og konvertere elektrisk energi, kaldes på fagsprog for effektelektronik. Da vedvarende energisystemer

er forholdsvis dyre, skal de elektroniske komponenter, der bruges indenfor dette område, helst kunne holde op til 25 eller endda 30 år. Det er naturligvis en stor udfordring at producere komponenter, der er pålidelige nok til at fungere over så lang en tidshorison.

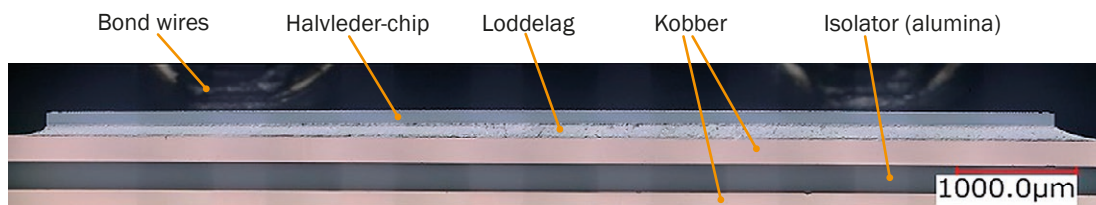
Jeg leder selv en forskergruppe på AAU Energy, hvor vi beskæftiger os

specifikt med effektelektroniske komponenters pålidelighed. Når man taler om pålidelighed i denne sammenhæng defineres det konkret som, hvor stor en andel af komponenterne, der stadig virker efter et givet antal år. Og her er man selvfølgelig interesseret i at rykke grænserne, så en stadig større andel virker i flere og flere år.

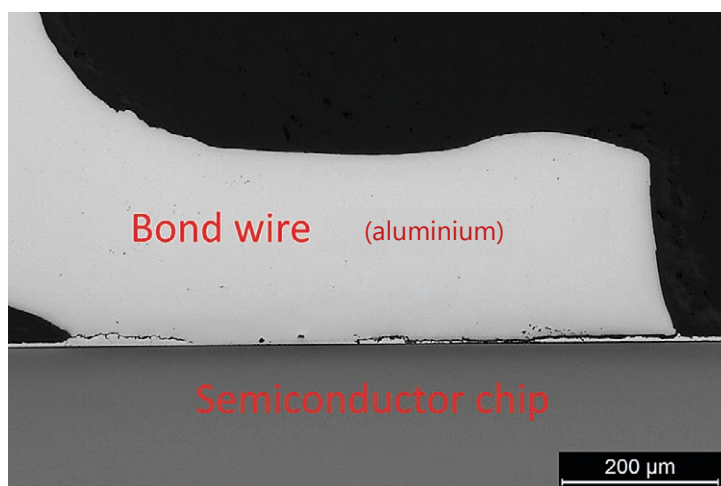
Men det er svært, og det er mere end nogensinde nødvendigt at tænke i komponenter, der kan holde i 20 år eller mere uden vedligeholdelse. Det kræver, at vi bygger komponenterne med materialer, der er robuste overfor de belastninger, de bliver udsat for ved den daglige drift samt variationer i temperatur og fugtighed på grund af klimatiske forhold. Det er en interessant udfordring, som kræver en tværfaglig indsats, der går fra viden om elektronik indenfor for eksempel drift af transistorer, over grundlæggende fysisk viden om materialer, til termisk teknik, som handler om håndtering af den



Der er fx effektelektronik i en inverter til et solcelleanlæg. Her skal jævnstrøm laves om til vekselstrøm. Elbiler bruger også en del effektelektronik.



De to billeder viser tværsnit af et effektelektronikmodul i henholdsvis intakt tilstand og efter belastning, hvor man ser tydelige huller (sorte) i loddelaget. Foto: Aalborg Universitet



Billedet viser et tværsnit af grænsefladen mellem en bond wire og en halvleder nedenunder. Der er tydelige sprækker i grænsefladen, og bond wiren er tæt på at løsne sig helt. Foto: Aalborg Universitet

tabsrelaterede varme, der produceres i komponenterne.

Løse forbindelser

Men hvad er hovedårsagerne til, at effektelektroniske komponenter bryder sammen?

Grundlæggende er der to kategorier af svigt. Den ene type kaldes "bond wire liftoff", hvor de metaltråde (på fagsproget kaldet bond wires), der bruges som ledninger til at skabe elektrisk forbindelse mellem halvleder-komponenterne i de effektelektroniske moduler, løsner sig. Dette sker, fordi kontaktfladen mellem bond wirerne og halvledermaterialerne gradvist svækkes for til sidst at revne. Hovedårsagen til dette fænomen er forskellen i termiske udvidelseskoefficienter for de to materialer, nemlig bond wiren og halvlederen. Når komponenten er i brug, får den kontinuerlige temperaturvariation de to materialer til at

udvide sig, men da forskellige materialer ikke udvider sig på nøjagtig samme måde, giver det mekaniske spændinger i overfladen, som med tiden får grænsefladen til at revne.

Den anden form for fejl sker tilsvarende ved brud, men her mellem halvlederen og det loddelag, som forbinder chippen med underlaget, som typisk er en kobberoverflade. Denne type fejl, som kaldes delaminering af loddelaget, skyldes ligeledes forskel i termiske ekspansionskoefficienter for de to materialer, der er i kontakt med hinanden. Det fører til spændinger ved grænsefladen mellem halvlederen og loddelaget, som i sidste ende kan danne hulrum under halvlederen eller løsne den helt.

Begge typer af fejl skyldes altså, at der opstår spændinger i kontaktfladen mellem materialer på grund af den temperaturdrevene

udvidelse af materialerne, når komponenterne er i drift. Hvis vi vil øge pålideligheden af strømelektroniske komponenter, er det altså nødvendigt at reducere de termiske belastninger, som grænsefladerne bliver udsat for. En mulighed er her at "overdimensionere" komponenten, hvilket betyder at man bruger en komponent af en højere kategori end nødvendigt for at styre det nødvendige effektniveau. Det er dog en dyr løsning og derfor ikke attraktiv.

Flydende forbindelser giver mere pålidelig elektronik

I vores forskergruppe ved AAU Energy forsøger vi derfor at gå en anden vej og finde løsningerne på materialeniveau. Mere specifikt, arbejder vi på at erstatte materialerne i grænsefladerne med metaller i en flydende tilstand, hvilket giver mulighed for total eliminering af stress.

Vi har udviklet en teknologi, hvor vi forbinder en chip med en kobberbro ovenfor chippen ved hjælp af en dråbe flydende galliumlegering (se foto næste side). Deponering af metallet sker gennem et hul lavet i kobberbroen, som tillader fordeling af den mængde metal, der er nødvendig for at etablere kontakten. Forbindelsen til den nederste del af chippen foregår stadig på konventionel vis ved hjælp af et loddelag, men det er dog planen med tiden at undersøge, om også denne forbindelse kan erstattes med en flydende metallegering.

Vi har med denne prototype opnået overraskende resultater med hensyn til pålidelighed. Således kunne

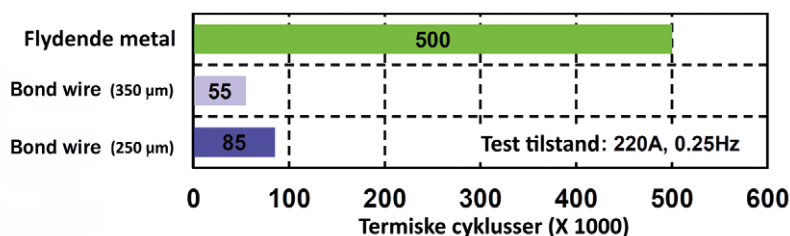
vores teknologi baseret på flydende metal klare 6-10 gange så mange termiske cyklusser – det vil sige gentagen opvarmning og nedkøling – som konventionelle bond wires, før forbindelsen svigtede. Dette lover godt for, at denne teknologi kan fremme udviklingen af effektelektroniske enheder, der er meget mere pålidelige end de hidtil kendte.

Der er dog endnu nogle ulemper ved teknologien, der især handler om, at galliumlegeringer på langt sigt kan reagere med de metalliseringer – dvs. overfladebehandlinger med metaller – der typisk anvendes på den øverste overflade af halvlederchippet. En sådan uønsket reaktion kan i sidste ende beskadige eller ødelægge den effektelektroniske komponent. Af denne grund fokuserer vi nu på at udvikle alternativer til de metalliseringer, der bruges på chipoverflader, der udviser ringe eller ingen reaktivitet med gallium. Vi forventer, at vi indenfor de næste tre år vil kunne få teknologien udviklet i en grad, så det vil være muligt at bruge den i kommercielle produkter. ■



Foto: Aalborg Universitet

Billedet viser vores prototype på en forbindelse baseret på en flydende galliumlegering. I det indrammede udsnit ser man chippen, der er forbundet med en kobberbro ovenfor ved hjælp af en dråbe flydende galliumlegering (her ses den adskilt for en god visnings skyld). Selve chippen er her loddet til underlaget på traditionel vis.



Figuren viser testresultater for en prototype på en forbindelse baseret på en flydende galliumlegering sammenlignet med traditionelle bond wires af to forskellige tykkelser. Pålideligheden kan aflæses som, hvor mange termiske cyklusser (det vil sige gentagen opvarmning og nedkøling) ved en given strømstyrke og frekvens, forbindelsen kan holde til, før den svigter. Det ses, at prototypen kan holde til mange flere cyklusser – 6-10 gange flere – end de traditionelle bond wires.

Mere information
N. Baker, S. Bekzowski, F. Iannuzzo, A. Lemmon, Su Gupta, A. Mshar, A. Jørgensen, T. Aunsborg, K. Pedersen, and R. Garcia, "Use of Liquid-Metal as the Frontside Interconnect in Power Semiconductors", IWIPP 2022 conference, August 24th – 26th, 2022, Toulouse, France.

Få mere at vide om testfaciliteterne for effektelektronik på Aalborg Universitet: www.xpower.aau.dk

Ny bachelor på SDU

Kunstig intelligens

Er du nysgerrig på optimering, logik, maskinlæring, programmering, etik, algoritmer og matematik?

Med en bachelor i Kunstig intelligens fra Syddansk Universitet får du kompetencer, som allerede nu er efterspurgt i virksomheder og organisationer i Danmark og udlandet.

Du behøver ikke kunne programmere, når du starter på uddannelsen. Du skal bare have interesse i at lære det, ligesom du skal have flair for at tænke logisk og matematisk.

Læs mere på sdu.dk/kunstig-intelligens