

Soldaterfluelarver (*Hermetia illucens*) er næringsrige og protein fra disse kan produceres mere bæredygtigt end fra traditionelle husdyr som kvæg og svin. I et fælles forskningsprojekt mellem forskere fra Aalborg Universitet og Aarhus Universitet undersøger vi måder, hvorpå vi kan optimere produktionen af insekter. Foto: Stine Frey Laursen.

Forfatterne



Stine Frey Laursen er ph.d., postdoc ved Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet. sfl@bio.aau.dk



Laura Skrubbeltrang Hansen er ph.d., postdoc ved Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning, Aarhus Universitet. ish@qgg.au.dk



Jesper Givskov Sørensen er professor ved Biologisk Institut, Aarhus Universitet jesper.soerensen@bio.au.dk



Torsten Nygård Kristensen er professor ved Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet. tnk@bio.aau.dk



SKAL VI LEVE AF LARVER?

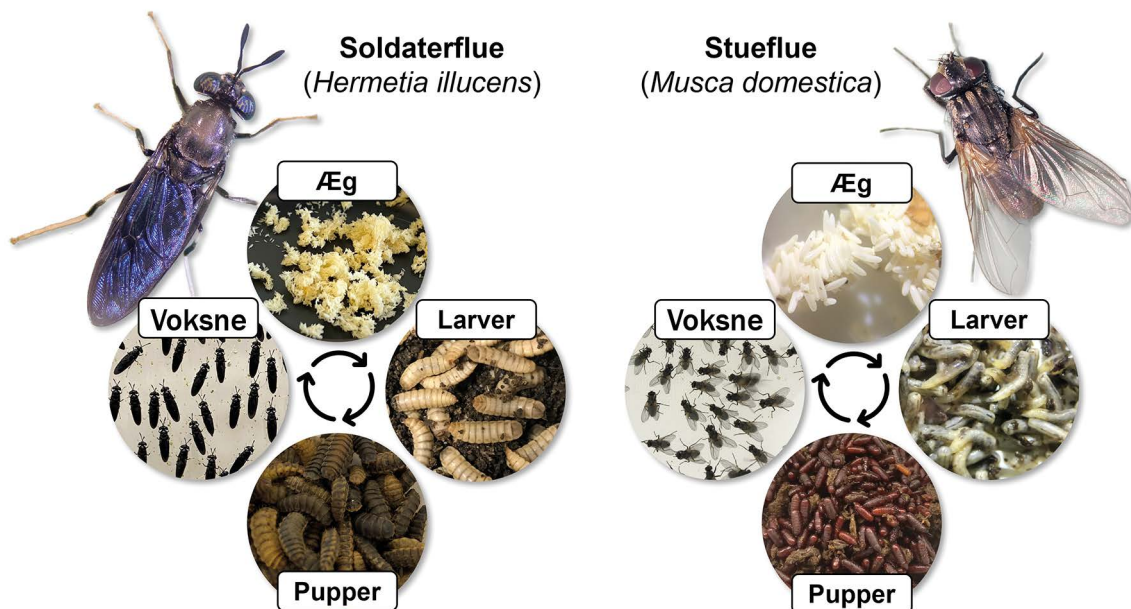
Insekter som en bæredygtig kilde til føde

Insekter kan bruges som føde til både dyr og mennesker, og det er potentielt muligt at producere dem med et lavere ressourceforbrug og miljøaftryk end traditionelle husdyr. Forskning viser nu, hvordan man kan tilpasse metoder fra traditionel husdyrproduktion til at "forbedre" insekter rent genetisk.

Vi er flere mennesker på jorden end nogensinde før: Nu 8 milliarder – og vi står overfor en kæmpe udfordring i forhold til at imødekomme en stigende fødevarerforspørgsel og samtidig minimere fødevarerproduktionens belastning af miljøet. Insektavl er et lovende redskab i værktøjskassen, fordi insekter har mange egenskaber, der gør dem egnede til brug som både

dyrefoder og mad til mennesker. De har højt proteinindhold og er gode kilder til vitaminer og mineraler. I modsætning til traditionelle husdyr er insekter vekselvarme, så de skal ikke bruge energi på at opretholde en konstant kropstemperatur. Det betyder, at en større andel af energien fra deres føde kan bruges til at vokse – og derfor er de enormt effektive til at omsætte deres foder til biomasse. Sammenlignet med

produktionen af traditionelle husdyr forbruger insekter færre ressourcer i form af land og vand, og der udledes også færre drivhusgasser per enhed protein produceret. Derudover kan insekter leve af en lang række rest- og biprodukter, såsom madaffald og gødning. Insekter kan derved indgå i en cirkulær fødevarerproduktion og omdanne affaldsprodukter af lav kvalitet til biomasse af høj kvalitet.



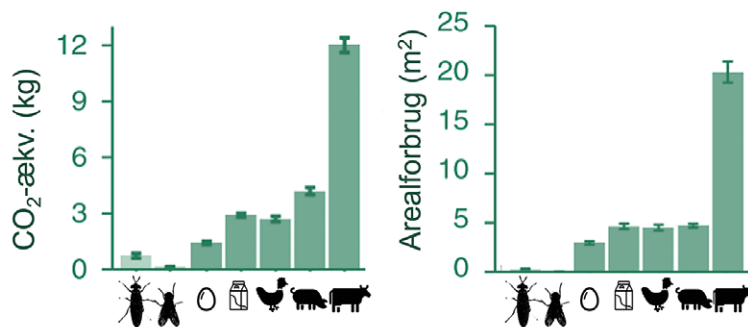
Livscyklus for soldaterfluen (*Hermetia illucens*) og stuefluen (*Musca domestica*). En hunflue af begge arter lægger typisk cirka 500-1000 æg i sit liv. For soldaterfluen tager udviklingen omkring seks uger fra æg til æg, mens denne proces tager cirka fire uger for stuefluen (udviklingstiden afhænger dog af miljøforhold som temperaturen, de holdes ved). Til sammenligning er generationsintervaller typisk 2 til 3 år i svin og kvæg. Fotos: Stine Frey Laursen.

For at gøre produktionen af denne nye proteinkilde endnu mere bæredygtig, har vi sat os for at undersøge forskellige måder at optimere produktionen af insekter. Det har vi gjort gennem et forskningsprojekt finansieret med midler fra Danmarks Frie Forskningsfond med involverede fra Aarhus Universitet og Aalborg Universitet.

Overordnet er der to måder at optimere produktionen af insekter på: Enten kan man forbedre miljøforholdene – det vil sige optimere på temperatur, foder eller andre miljøfaktorer, der har betydning for insekternes vækst og produktivitet. Eller også kan man “forbedre” insekterne rent genetisk. Det sidste indebærer, at man tilpasser og anvender de principper og værktøjer, som man i årtier har brugt på afgrøder og husdyr – nu blot på insekter. Det involverer blandt andet selektiv avl, hvor insektpopulationerne forbedres ved at udvælge insekter med ønskværdige egenskaber.

Fluer kan omdanne affald til mad

Nogle insekter har en naturlig evne til at udnytte affaldsprodukter af lav kvalitet, som ikke kan bruges som foder til traditionelle husdyr.



Udledningen af drivhusgasser (målt i CO₂-ækvivalenter) og arealforbrug forbundet med produktionen af insektprotein (fra venstre: soldaterflue og stueflue) sammenlignet med æg, mælk, kylling, svinekød og oksekød. Figuren er modificeret fra Parodi et al. (2018) *Nature Sustainability*.

Dermed har de potentialet til at producere værdi ud fra ressourcer, der typisk vil havne på lossepladser, blive brugt som gødning på marker eller blive brændt på forbrændingsanlæg. I vores projekt arbejder vi primært med to insektarter; soldaterfluen (*Hermetia illucens*) og stuefluen (*Musca domestica*), som netop er eminente til at omsætte affaldsprodukter. Men da der findes flere end en million beskrevne arter af insekter – og mange endnu ubeskrevne arter – kan der sagtens være arter, som kan gøre det endnu bedre.

I modsætning til traditionelle husdyr, der er blevet opdrættet af landmænd i tusinder af år, så er stor-

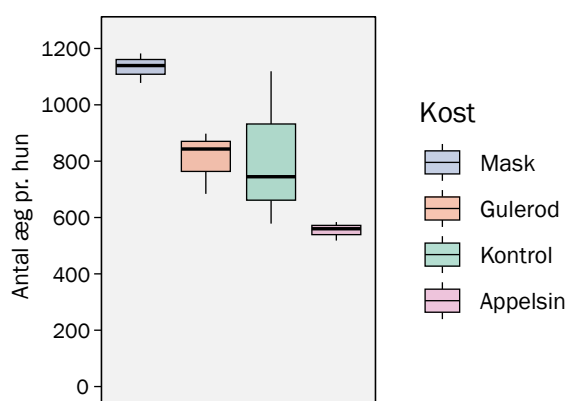
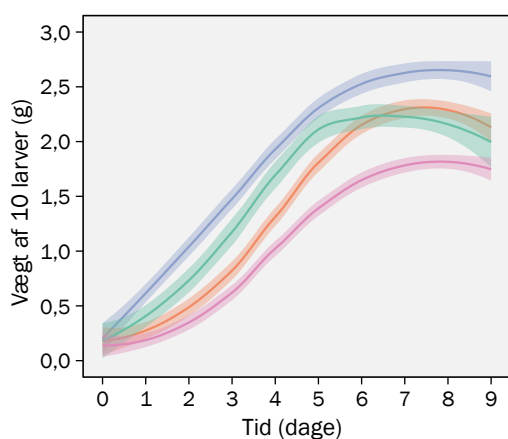
skala-insektopdræt stadig et relativt nyt område. Det betyder, at vi har begrænset viden om den grundlæggende biologi for de arter, der arbejdes med. Der er mange faktorer, der har betydning for insekters vækst og produktivitet. Det miljø, insekterne lever i, har stor indflydelse på vigtige egenskaber, såsom hvor hurtigt de vokser, hvor store de bliver, og hvor mange æg de producerer. Når insekterne fodres med næringsfattige fodertyper som husdyrgødning kan det påvirke deres produktivitet. Vi har i vores forskning for eksempel vist, at fodertype kan påvirke væksthastighed og størrelse af soldaterfluelarver samt antal æg, de kan producere som voksne fluer. En vigtig pointe fra forsøget er, at

Et insekt er ikke bare et insekt

Der findes mere end en million beskrevne arter af insekter – og mange flere, som endnu ikke er beskrevet. Insekter inkluderer både fluer, biller, sommerfugle, bier, myrer, bladlus, græshopper og mange flere vidt forskellige organismer. Faktisk er de genetiske forskelle mellem forskellige insekter meget større end mellem traditionelle husdyr såsom kvæg og grise. Den seneste fælles stamform for alle insekter levede for cirka 400 millioner år siden, mens den seneste fælles stamform for koen og grisen levede for cirka 50 millioner år siden. Forskellige insekter kan have meget forskellige præferencer i forhold til eksempelvis temperatur og føde. Ved at undersøge disse forskelle kan produktionen af insekter måske gøres endnu mere bæredygtig, for eksempel ved at opdage nye kombinationer af insekter og affaldsprodukter.



Foto: Line Holm Andersen



Figurerne viser vækst af soldaterflue-larver og gennemsnitligt antal æg produceret af voksne fluer i forsøg, hvor de blev fodret med fire forskellige fodertyper: Mask (et restprodukt fra brygningen af øl), gulerødder, appelsin og en kontrol (balanceret fødesammensætning optimal for vækst). Data efter Laursen et al. (2024) *Waste Management*.

Selvom produktiviteten er lavere på mere næringsfattige fodertyper, kan det stadig være meget bæredygtigt at anvende affaldsprodukter som larvefoder.

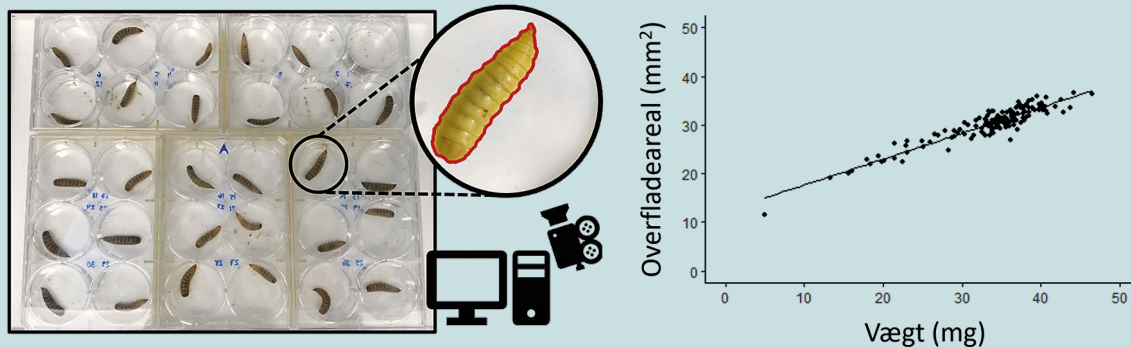
Udover at kende insekternes krav til næring er viden om optimale temperaturer og luftfugtigheder, sygdomme, og reproduktionsbiologi også vigtig for en effektiv og bæredygtig produktion. Desuden kan nogle af de rest- og biprodukter, som vi gerne vil fodre til insekter, potentielt indeholde sygdomsfremkaldende mikroorganismer eller sundhedsskadelige stoffer. Det og meget andet skal undersøges som en del af udvælgelsen af insektproduktion. Læg dertil hele lovgivningsområdet, hvor regelsæt skal tilpasses til at rumme en helt ny klasse af husdyr.

Udfordringer ved insektavl

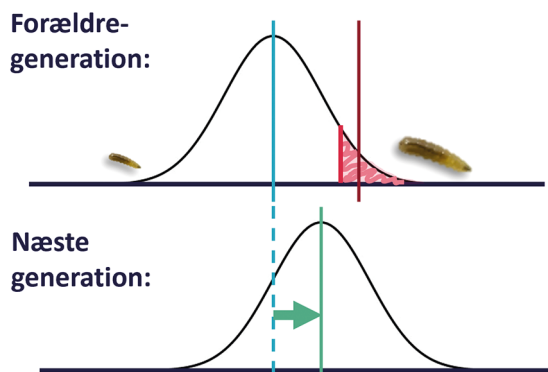
I vores forskning har vi fokuseret på at bidrage med værktøjer til at forbedre insekters genetik gennem selektiv avl. Det har vi primært gjort ved at bruge avlsværktøjer, som allerede er vidt anvendt i husdyr- og planteavl – men endnu ikke hos insekter. Vores mål er at forbedre vigtige egenskaber i insekterne, såsom væksthastighed og kropstørrelse, uden at det bliver på bekostning af deres sundhed og reproduktion. I den traditionelle husdyrproduktion har man med sådanne metoder for eksempel kunnet mere end fordoble mælkeproduktionen hos malkekvæg og vægten af slagtekyllinger i løbet af de seneste cirka 50 år. Selektiv avl er således en væsentlig årsag til, at vi kan købe høj kvalitetsfødevarer til lave priser i supermarkedet.

Selvom ideen med selektiv avl er enkel – nemlig at udvælge de individer, der har fordelagtige gener i forhold til de egenskaber, vi gerne vil fremme – er avl i insekter ikke uden udfordringer. Insekter har typisk meget korte generationsintervaller, og det tager kun få uger at gennemgå de forskellige livsstadier. På den ene side er det en fordel, når vi snakker avl, da vi kan opnå store genetiske ændringer på kort tid. Men den korte generationstid betyder også, at vi skal kunne måle de ønskede egenskaber meget hurtigt for at identificere de bedste individer – og ofte skal vi måle disse egenskaber i tusindvis af individer, hvilket kan være en stor udfordring. En anden udfordring er, at i modsætning til traditionelle husdyr, hvor enkelte dyr kan mærkes, for eksempel med øremærker, så er det vanskeligt at

Hvordan finder vi de største blandt hundredvis af larver?



En udfordring ved at arbejde med insekter er, at man ofte skal bestemme egenskaberne for mange individer på kort tid. Et eksempel er larvestørrelse, hvor man typisk vejer larverne for at bestemme deres størrelse, men det kan tage lang tid at veje flere tusinde larver. Vi har udviklet en metode til hurtigt at bestemme størrelsen på op til 30 individuelle larver ad gangen ved at måle overfladearealet ved hjælp af et kamera og et computerprogram. Vi fandt en god sammenhæng mellem larvernes vægt og overfladeareal (se graf), og med den nye metode kunne vi måle fem gange så mange larver på samme tid som ved at veje dem.



Figuren viser princippet i selektiv avl, hvor formålet for eksempel kan være at opnå større larver. Her udvælges de største larver i populationen (lyserød skravering), og kun de får lov at bidrage med afkom til næste generation. Afkommet i næste generation vil så i gennemsnit blive større end i forældrenes generation (grøn vs. lyseblå linje). Ændringerne sker fra generation til generation og er baseret på, at størrelsen af de udvalgte forældre skyldes deres gener – og at disse gener gives videre til deres afkom, der derfor også bliver store.

mærke et insekt. Det skyldes, at et insekt gennemgår en fuldstændig forvandling og smider sit exoskelet (et stivgørende strukturelement, der sidder uden på insektet), når det går fra et livsstadie til et andet.

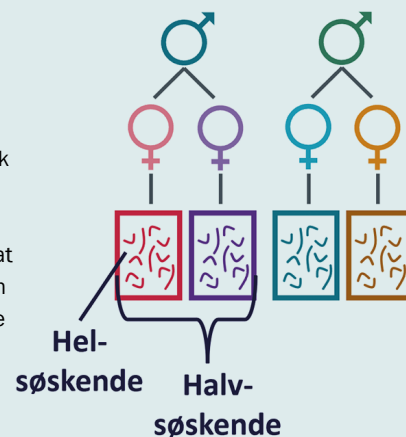
Vi har fundet gode løsninger på disse udfordringer. Blandt andet har vi udviklet metoder til effektivt at få præcis information om størrelse og stresstolerance på mange individer på kort tid, hvilket gør udvælgelsesprocessen hurtigere og mere pålidelig. Derudover benytter vi forsøgsdesign, hvor vi har styr på slægtskabet mellem individer.

Hvorfor vil vi kende fluernes stamtræ?

Avl kan foregå på mange måder, og den komplekse, men også mere effektive tilgang, som vi arbejder

Principper bag selektiv avl

For at selektiv avl skal fungere, er det nødvendigt, at der er genetisk variation – det vil sige genetiske forskelle mellem individerne. Der er større risiko for at miste genetisk variation i små populationer og i populationer med høj grad af indavl. Derfor er det vigtigt for avlere at holde øje med slægtskabet mellem individer, blandt andet for at kunne kontrollere indavl.



Dette kan gøres med et særligt forsøgsdesign, der netop giver os mulighed for at kende slægtskabet mellem alle individer. I praksis laver man en række familier med forskelligt slægtskab: En han parres med flere hunner, og på den måde genereres både helsøskende (afkom med samme far og samme mor) og halvsøskende (samme far men forskellige mødre). Dette design har flere fordele. Ved at undersøge i hvor høj grad helsøskende, halvsøskende og ikke-beslægtede individer ligner hinanden, kan vi bestemme, hvor arvelige forskellige egenskaber er og dermed forudsige, hvor "nemme" de vil være at ændre gennem avl.

Forbedring af larvestørrelse gennem selektiv avl i stuefluer



Vi har udført selektiv avl i en population af stuefluer med målet at øge størrelsen på larver. I hver generation udvalgte vi de bedste 60 hanner og 120 hunner, kontrollerede hvem der parrede sig, indsamlede æg og fordelte dem i rør med vækstmedie, målte størrelsen på larverne, og lod dem udvikle sig til voksne fluer, før vi igen udvalgte de bedste hanner og hunner. I hver eneste generation talte vi 3400 æg og fordelte dem i rør, målte størrelse på 1250 larver og talte og kønssorterede 850 fluer. Efter fem generationer med selektiv avl sammenlignede vi de selektede fluer med en kontrolpopulation. Det gjorde vi ved at opfostre larverne på både deres standard-kost og på en næringsfattig kost, og så målte vi størrelsen på larverne. Resultaterne viste, at larverne fra selektionslinjen var blevet større end kontrollarverne – især når de blev fodret med en næringsfattig kost.

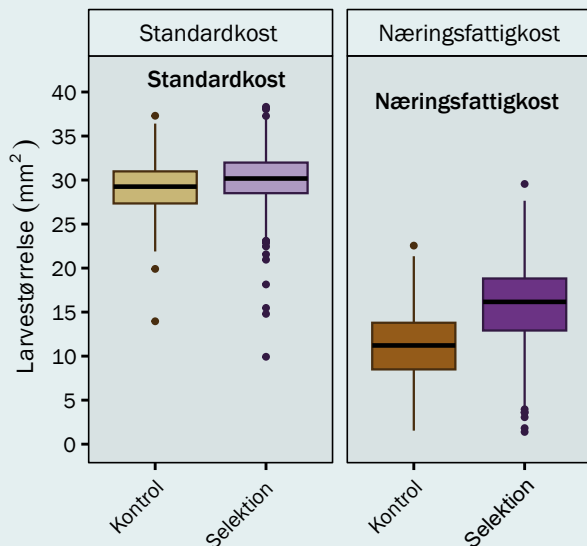


Foto: Stine Frey Laursen

med i vores forskning, er afhængig af viden om slægtskab mellem individer. Et simpelt alternativ er det, vi kalder fænotypisk selektion eller masseselektion. Princippet er her, at man i en population af insekter måler egenskaber (fænotyper), som ønskes ændret, og benytter indivi-

der med ønskede egenskaber som forældre til den næste generation. Her holder man ikke styr på slægtskabet mellem individer, og det har to negative konsekvenser:

1) Der er stor risiko for indavl. Det er der, fordi forældrene jo netop

udvælges, fordi de ligner hinanden, og derfor vil de i gennemsnit også være tættere beslægtet end tilfældigt udvalgte individer. Det kaldes assortativ parring og er noget skidt i avlssammenhæng, fordi det fører til indavl og såkaldt indavlsdepression, som kan udmønte sig i form af

blandt andet reduceret reproduktion, levealder og vækst.

2) Det er vanskeligt at selektere for flere egenskaber på samme tid. Et eksempel kan være, at man gerne vil øge væksthastigheden, men samtidig ønsker larver med et særligt proteinindhold. Måling af en larves proteinindhold kræver, at den moses, og derfor kan den ikke bidrage som forælder til næste generation.

Disse problemstillinger knyttet til fænotypisk selektion kan vi styre udenom i vores tilgang, da den netop er baseret på viden om slægtskab. Herved kan vi minimere indavl, og når en larve ofres til proteinmålinger, kan vi blot i stedet vælge individer, som er tæt beslægtet med den, til det videre avlsarbejde.

Vi skal lære at spise insekter

Insekter har været spist af mennesker og brugt som foder til husdyr i mange kulturer i århundreder. Men det er nyt i vores del af

verden, og som beskrevet i denne artikel er der meget at lære i forhold til at udvikle og optimere produktionen.

Vores forskning er et skridt på vejen og viser, at der er mange muligheder for, at insekter kan udgøre en af mange nye måder at producere foder og fødevarer på. Vi har blandt andet vist, at vigtige egenskaber kan ændres gennem selektiv avl, og dermed at der er et stort potentiale for, at vi i fremtiden kan udvikle mere effektive og højtydende insektpopulationer, der kan bidrage til en fødevarereproduktion med et lavere miljø- og klimaaftryk.

I fremtiden vil vi sandsynligvis se, at insekter i stigende omfang vil finde anvendelse som foder til kæledyr og som erstatning for eksempelvis importeret soja til vores husdyr. Men vi skal samtidig vænne os til, at insekter også kan være menneskeføde og ikke bare en sjov gimmick, vi finder frem i festlige sammenhænge. Vi skal med andre ord lære at spise insekter. ■

Forslag til yderligere læsning:

Hansen et al. (2024): The unpaved road towards efficient selective breeding in insects for food and feed—A review. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 00, 1-24.

Laursen et al. (2024): Genotype-by-environment interactions for mean performance and trait variation in house fly larvae reared on two diets. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 00, 1-15.

Hansen et al. (2024): Estimation of genetic parameters for the implementation of selective breeding in commercial insect production. *Genetics Selection Evolution*, 56, 21.

Laursen et al. (2024): Reproductive output and other adult life-history traits of black soldier flies grown on different organic waste and by-products. *Waste Management*, 181, 136-144.

Laursen et al. (2021): Contrasting manual and automated assessment of thermal stress responses and larval body size in black soldier flies and houseflies. *Insects*, 12, 380.

Udover forfatterne er følgende samarbejdspartnere involverede i projektet:

Fra Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet: Simon Bahndorff
Fra Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning, Aarhus Universitet: Hanne Marie Nielsen og Goutam Sahana

Kom til Science Camp

på Syddansk Universitet i Odense

Science Camp 8.-9. marts 2025 består af to dage, hvor du møder undervisere og studerende. Gennem oplæg, øvelser og forsøg kommer du tættere på dit studievalg og får indblik i, hvad det vil sige at være studerende.

Vælg mellem fem workshops:

Astro- og rumfysik

For dig der er interesseret i Fysik

Fra idé til virkelighed

For dig der er interesseret i Farmaci, Kemi og Medicinalkemi

Ai og cybersikkerhed - matematikken bag kryptering

For dig der er interesseret i Datalogi, Matematik og Kunstig intelligens

Bidt af havet

For dig der er interesseret i Biologi

CRISPR-genredigering i personlig medicin

For dig der er interesseret i Biomedicin og Biokemi og molekylær biologi

Alle camps er særligt tilrettelagt for 2. og 3. gymnasieår og dig, der holder sabbatår. Se program og tilmeld dig på sdu.dk/sciencecamp

Vi sørger for overnatning og forplejning - og selvfølgelig hygge og sjov!