Modul 1 – Introduktion til fusion

FuseNet undervisningsmateriale til gymnasiale uddannelser

Lærervejledning v.1.1

Introduktion

Energi er en del af fundamentet for vores moderne samfund. Antallet af teknologier og antallet af brugere af alle disse teknologier er stigende, og dette medfører, at det globale energibehov også forventes at stige kontinuert. Hvis vi ønsker at blive ved med at genere energi – og det gør vi – så vil energibehovet en dag overstige energiproduktionen. Derfor vil dette undervisningsmateriale give indsigt i en af fremtidens muligt energikilder: Fusion.

Samlet set består undervisningsmaterialet af fem forskellige moduler. Det første modul begynder med en bred introduktion til energiproblemet, og går derefter over til en forklaring af fysikken bag fusion. De næste fire moduler handler om fire forskellige aspekter af fusion: Vejen til fusion, Plasmakontrol, Fusionsmaterialer og Implementering. Efter modul 1 kan man begynde på disse moduler i vilkårlig rækkefølge. Man kan fx vælge rækkefølgen modul 1 -> modul 3 -> modul 2.

Undervisningsmaterialet er ment til gymnasiale uddannelser: Niveau ISCED 3-4.

Hvordan modulerne kan bruges

Hovedteksten består af forskelligt undervisningsmateriale: De lyse, farvede bokse, som kaldes 'bemærkninger', giver yderligere indsigt i udvalgte emner. Det er muligt at springe disse over i undervisningen.

Et modul består samlet set af:

- Hovedteksten
  - Indeholder også opgaver
- Ekstraopgaverne
- En PowerPoint-præsentation
  - Indeholder også opgaverne fra hovedteksten
- Lærervejledningen
  - Hvor følgende bilag kan ses:
    - Tabel med naturkonstanter og enhedskonvertering
    - Løsninger på opgaverne fra hovedteksten / slides
    - Løsninger på ekstraopgaverne

Indholdsfortegnelse

Introduktion 1
Kapitel 1: Læringsmål 3
Kapitel 2: Nærtbeslægtede emner 3
Kapitel 3: Emnerne i Modul 1 pr. kapitel 3
Kapitel 4: Kort resume af Modul 1 4
Kapitel 5: Undervisningsforløb 5
Kapitel 6: Brugen af PowerPoint og andre resurser 13
Kapitel 7: Yderligere resurser til læring og sjov for Modul 1: 13
Bilag A: Tabel med naturkonstanter og enhedskonvertering 16
Bilag B: Løsninger til opgaverne 17
Bilag C: Løsninger til ekstraopgaverne 21

Kapitel 1: Læringsmål

Efter dette modul er den studerende i stand til at:

A. Forstå sammenhængen mellem klimaforandring og energiproblemet
B. Forklare det basale fysik bag fusion

- Forstå reaktionsskemaer for fusionsreaktioner
- Forklare, hvad plasma består af og kan bruges til
- Basalt forstå magnetisk indeslutning
- Forstå en tokamaks geometri
- Forklare forskellen mellem de tre forskellige feltspoler i en tokamak
- Basalt forstå magnetfelterne i en tokamak

Kapitel 2: Nærtbeslægtede emner

Indholdet I dette modul kan bruges som et eksempel eller en demonstration af anvendelsen af emner, de studerende tidligere har arbejdet med. Dette er især tilfældet, hvis disse emner inkluderer en eller flere af følgende:

- Atomfysik
- Elektricitet
- Magnetisme
- Idealgasligningen
- Energi og energibevarelse

Viden om disse emner er dog *ikke* et krav for at begynde på dette modul. Hvis de studerende allerede har erfaring med ovenstående, kan dette modul bruges delvist som repetition.

Kapitel 3: Emnerne i Modul 1 pr. kapitel

Dette modul åbner op med en bred introduktion til energiproblemet og de relevante emner i fysik:

1. Energi
    - Problemer og løsninger til energibehovet
        - Klimaforandring
        - Stigende befolkningstal
        - Energiforbrug og produktion
    - Fusion
    - Kinetisk energi
2. Astrofysik
    - Solen
    - Atomfysik
        - Rutherfords atommodel
        - Kernereaktioner med hydrogen
        - Isotoper og ioner
3. Plasma: Den fjerde tilstandsform
    - Gasparametre
        - Densitet / tæthed / stofmængde
        - Temperatur
    - Elektrostatisk vekselvirkning

        - Ladninger
        - Elektriske felter
    - Elektrisk ladede partikler i magnetfelter
        - Magnetfelter
        - Lorentzkraften
4. Fusionsmaskinen
    - Elektricitet
        - Strøm
        - Transformere
            - Ideelle transformer
    - Elektromagnetisme
        - Spoler
        - Elektromotorisk kraft (EMF)
        - Magnetisk flux
        - Magnetisk feltstyrke
        - Magnetisk indeslutning (magnetic confinement fusion, MCF)
    - En torus' geometri
        - Tokamak

Kapitel 4: Kort resume af Modul 1

Formålet med dette modul er at introducere eller repetere en række emner, som er relevante for forståelsen af fusion og konteksten bag fusion. Minimal eller ingen baggrundsviden vedr. emnerne ovenfor er nødvendig for at anvende dette modul i undervisningen.

Kapitel 1 i hovedteksten: Det antages, at de studerende har hørt om klimaforandring, dog er dybdegående viden om drivhuseffekten eller den politiske debat ikke er nødvendig. Klimaforandring bruges som et springbræt til at forklare og diskutere det globale energiproblem.

Kapitel 2 i hovedteksten: Basal atomfysik forklares. Hvis de studerende allerede har baggrundsviden herom, kan dette kapitel anvendes primært som repetition. Hvis dette ikke er tilfældet, kan dette kapitel bruges som en introduktion til emnet. Elektriske ladninger, og hvordan disse er relateret til atomer og atomkerner, forklares på et basalt niveau. Dette kapitel kan bruges som en alternativ introduktion til atomfysik på gymnasieniveau fremfor det sædvanlige pensum. Temperatur og densitet – dvs. (partikel)tæthed – diskuteres.

Kapitel 3 i hovedteksten: Plasma introduceres. Det antages, at ordet 'plasma' er kendt pga. indflydelsen af popkultur eller teknologi som plasmabaseret TV, men konceptet med plasma fra et videnskabeligt synspunkt antages at være ukendt. Igen er der et fokus på elektriske ladninger og tiltrækningen og frastødningen mellem elektriske ladninger.

Kapitel 4 i hovedteksten: Tokamakken introduceres. Geometrien og magnetsystemerne, der bruges til at danne magnetfeltet inde i tokamakken, forklares. Disse er de toroidale feltspoler, den centrale solenoide og de poloidale feltspoler. Kombinationen af disse spoler resulterer i et spiralformet magnetfelt. En kort, basal forklaring af spoler, og hvad disse kan bruges til, gives. Hvis de studerende ikke har erfaring med dette, kan man med fordel begynde med bemærkningen 'Solenoider'.

Kapitel 5: Undervisningsforløb

Der gives nu fire mulige undervisningsforløb for dette modul. Hvert forløb vil afhænge af tiden, der er til rådighed, og hvor meget erfaring de studerende har. Der gives både 15 minutter lange forløb og 1 time lange forløb for henholdsvis 'gennemsnitlige' studerende og 'erfarne' studerende.

Forløbene for de 'gennemsnitlige' studerende kan bruges hvis flere eller alle af de tidligere nævnte emner er ukendte for de studerende. Forløbene for de 'erfarne' studerende kan bruges, når de studerende har erfaring med de vigtigste emner vedr. fysikken bag fusion. Derfor har disse forløb også en kortere introduktion og dedikere mere tid til diskussion og opgaver.

Alle undervisningsforløb givet her er naturligvis eksempler, og du er meget velkommen til at vælge kun de emner og kapitler, som er passende i din undervisning.

For alle undervisningsforløb er de studerendes aktiviteter: At lytte til underviser, diskussion af emnerne, at stille spørgsmål og arbejde med opgaverne.

15 min introduktionslektion for gennemsnitlige studerende

Der er to formål med denne lektion: Først at introducere klimaforandring og energiproblemet og dernæst at skabe entusiasme og nysgerrig for emnet (og i forlængelse fusion).

Her dækkes kun det første kapitel i hovedteksten dvs. side 1 til 8 samt opgave 1.1. I forlængelse kan PowerPoint-slides 1 til 6 også anvendes. Videoen 'do we need nuclear energy to stop climate change?'[1] og ekstraopgaver med * kan også tages i brug. De relevante ekstraopgaver er A.1 til A.3.

Et forslag er at have en diskussion i klasseværelset efter at have introduceret emnet eller at danne grupper og lade de studerende diskutere emnet og præsentere deres konklusioner. Efter introduktionen og / eller diskussionen kan de studerende læse kapitel 1 i hovedteksten og arbejde med opgaverne.

Forarbejdet til denne lektion involverer:

- Downloade PowerPoint'en
- At gøre dette modul og øvelserne tilgængelige for de studerende
- Forberede opgave 1.1 (se bilag B)

[1] Se kapitel 7 i lærervejledningen for flere videoer og eksperimenter!

Varighed	Undervisers aktiviteter	Stof	De studerendes aktiviteter
3 min	Introduktion til emnet	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 1 og 2 **Og /eller video** Kurzgesagt - in a nutshell: Do we need nuclear energy to stop climate change?	Lyt til underviser
5 min	Diskuter opgave 1.1	Kapitel 1 i hovedteksten Opgave 1.1 PowerPoint-slide: 3 og 4	Diskussion i klasseværelset / i grupper af fire
3 min	Præsenter kapitel 1: Energiens rolle i vores verden	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 5 og 6	Lyt til underviser, stil spørgsmål
5 min		Kapitel 1 i hovedteksten Ekstraopgaver A.1 til A.3	Læs kapitel 1 i hovedteksten Arbejd på ekstraopgaverne i grupper / individuelt i undervisningen eller derhjemme

15 min introduktionslektion for erfarne studerende

Der er tre formål med denne lektion. Det første er kort at introducere klimaforandring og energiproblemet. Det andet er at skabe entusiasme og nysgerrig for emnet (og i forlængelse fusion). Det tredje er kort at repetere fysik, der relaterer sig til energiproblemet.

Her dækkes det første kapitel i hovedteksten dvs. side 1 til 8 samt opgave 1.1. I forlængelse kan PowerPoint-slides 1 til 6 også anvendes. Derefter kan man arbejde med et andet kapitel i hovedteksten fx kapitel 3 om plasma (opgave 1.3 og slides 18 til 29). Desuden kan ekstraopgaver med * og ** tages i brug. De relevante ekstraopgaver er A.1 til A.3 og A.9 til A.10. Der er også YouTube-videoer, der kan anvendes, se kapitel 7 i lærervejledningen.

Forarbejdet til denne lektion involverer:

- Downloade PowerPoint'en
- At gøre dette modul og øvelserne tilgængelige for de studerende
- Forberede opgave 1.1 (se bilag B)

De studerendes aktiviteter involverer: At lytte til underviser, diskussion og opgaver. Efter lektionen kan de studerende læse kapitel 1 og 3 i hovedteksten og arbejde med opgaverne. De studerende kan også danne grupper og vælge et emne i hovedteksten og diskutere dette.

Varighed	Undervisers aktiviteter	Stof	De studerendes aktiviteter
1 min	Introduktion til emnet	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 1 og 2	Lyt til underviser
3 min	Diskuter opgave 1.1	Kapitel 1 i hovedteksten Opgave 1.1 PowerPoint-slide: 3 og 4	Diskussion i klasseværelset / i grupper af fire
2 min	Præsenter kapitel 1: Energiens rolle i vores verden	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 5 og 6	Lyt til underviser, stil spørgsmål
4 min	Præsenter et valgfrit kapitel, fx kapitel 3: Plasma	Kapitel 3 i hovedteksten PowerPoint-slide: 18 til 21	Lyt til underviser, stil spørgsmål
2 min	Diskuter opgave 1.3	Kapitel 3 i hovedteksten Opgave 1.3 PowerPoint-slide: 22 og 23	Diskussion i grupper
5 min	Præsenter et valgfrit kapitel, fx kapitel 3: Plasma	Kapitel 3 i hovedteksten PowerPoint-slide: 24 til 29	Lyt til underviser, stil spørgsmål
	Lektier	*Kapitel 1 og 3 i hovedteksten* *Ekstraopgaver: A.1 til A.3 og A.9 til A.10*	*Læs kapitel 1 og 3 i hovedteksten* *Arbejd på ekstraopgaverne i grupper / individuelt i undervisningen eller derhjemme*

FuseNet
The European Fusion Education Network

1 time lektion for gennemsnitlige studerende

Målet for denne lektion er at skabe nysgerrighed og entusiasme for fusion og undersøge fysikken bag fusion. Fokusset er atommodellen, atomfysik og forståelse af kernereaktioner. I en mindre grad undersøges plasma og magnetfelter.

Her dækkes kapitel 1, 2 og 3 i hovedteksten samt opgaverne 1.1, 1.2, 1.3 og 1.4. I forlængelse kan PowerPoint-slides 1 til 29 også anvendes. Desuden kan ekstraopgaver med * og muligvis ** tages i brug. De relevante ekstraopgaver er A.1 til A.10. Der er også YouTube-videoer, der kan anvendes, se kapitel 7 i lærervejledningen.

The material needed covers the whole of module 1, with a focus on chapter one, two and a part of chapter four. From the additional exercises * and possibly ** could be used. The asides material is reading material for the students. The whole PowerPoint can be used.

Forarbejdet til denne lektion involverer:

- Downloade PowerPoint'en
- At gøre dette modul og øvelserne tilgængelige for de studerende
- Forberede opgave 1.1 (se bilag B)

Afhængigt af de studerende kan man enten køre igennem alle slides uden afbrydelser, eller man kan splitte undervisningen op i forskellige dele, hvor de studerende imellem delene har tid til at lave opgaver og diskutere i grupper. Nedenstående er et eksempel på det sidstnævnte.

Varighed	Undervisers aktiviteter	Stof	De studerendes aktiviteter
3 min	Introduktion til emnet	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 1 og 2 **Og /eller video** Kurzgesagt - in a nutshell: Do we need nuclear energy to stop climate change?	Lyt til underviser
5 min	Diskuter opgave 1.1	Kapitel 1 i hovedteksten Opgave 1.1 PowerPoint-slide: 3 og 4	Diskussion i klasseværelset / i grupper af fire
3 min	Præsenter kapitel 1: Energiens rolle i vores verden	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 5 og 6	Lyt til underviser, stil spørgsmål
5 min		Kapitel 1 i hovedteksten Ekstraopgave A.1	Arbejd i grupper / individuelt
10-15 min	Præsenter kapitel 2: Fusion i Solen	Kapitel 2 i hovedteksten PowerPoint-slide: 7 til 13	Lyt til underviser, stil spørgsmål
5 min	Diskuter opgave 1.2	Kapitel 2 i hovedteksten Opgave 1.2 PowerPoint-slide: 14 og 15	Diskussion i klasseværelset / i grupper af fire
2 min	Præsenter kapitel 2: Fusion i Solen	Kapitel 2 i hovedteksten PowerPoint-slide: 16 og 17	Lyt til underviser, stil spørgsmål

5 min		Kapitel 2 i hovedteksten Ekstraopgave A.4	Arbejd i grupper / individuelt
10-15 min	Præsenter kapitel 3: Plasma	Kapitel 3 i hovedteksten PowerPoint-slide: 18 til 21 **Og video** Ted-ed – Solid, liquid, gas and … plasma	Lyt til underviser, stil spørgsmål
2 min	Diskuter opgave 1.3	Kapitel 3 i hovedteksten Opgave 1.3 PowerPoint-slide: 22 og 23	Diskussion i grupper
5-7 min		Kapitel 3 i hovedteksten PowerPoint-slide: 24 til 27	Lyt til underviser, stil spørgsmål
2 min	Diskuter opgave 1.4	Kapitel 3 i hovedteksten Opgave 1.4 PowerPoint-slide: 28 og 29	Diskussion i grupper
	Lektier	*Kapitel 1 til 3 i hovedteksten*	*Læs kapitel 1 til 3 i hovedteksten*

1 time lektion for erfarne studerende

Målet for denne lektion er at skabe nysgerrighed og entusiasme for fusion og undersøge fysikken bag fusion. For erfarne studerende kan man starte med repetition af emner, de studerende allerede har erfaring med, og derefter undersøge plasma og magnetfelter.

Her dækkes kapitel 1, 2, 3 og 4 i hovedteksten samt opgaverne 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 og 1.8. I forlængelse kan alle PowerPoint-slides anvendes. Desuden kan ekstraopgaver med * og ** og *** tages i brug. De relevante ekstraopgaver er A.1 til A.11. Der er også YouTube-videoer, der kan anvendes, se kapitel 7 i lærervejledningen.

Forarbejdet til denne lektion involverer:

- Downloade PowerPoint'en
- At gøre dette modul og øvelserne tilgængelige for de studerende
- Forberede opgave 1.1 (se bilag B)

Hvis de studerende allerede er familiære med nogle af emnerne, kan det være en idé at lade de studerende præsentere i stedet. Fx kan underviser udelukkende stille spørgsmål og lade de studerende diskutere, hvis de er uenige.
Opgaverne kan bruges til at introducere de studerende til emnet og lade de studerende tænke selv, inden selve undervisers præsentation begynder.

Varighed	Undervisers aktiviteter	Stof	De studerendes aktiviteter
2 min	Introduktion til emnet	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 1 og 2	Lyt til underviser
3 min	Diskuter opgave 1.1	Kapitel 1 i hovedteksten Opgave 1.1 PowerPoint-slide: 3 og 4	Diskussion i klasseværelset / i grupper af fire
2 min	Præsenter kapitel 1: Energiens rolle i vores verden	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 5 og 6	Lyt til underviser, stil spørgsmål
5 min	Diskuter opgave 1.2	Kapitel 2 i hovedteksten Opgave 1.2 PowerPoint-slide: 14 og 15	Diskussion i klasseværelset / i grupper af fire
10 min	Byt roller sådan, at de studerende underviser. Vis dem slides 7 til 11 og lad dem forklare! Lyt og stil spørgsmål	Kapitel 2 i hovedteksten PowerPoint-slide: 7 til 11	Lad de studerende (kort) forklare emnet og slides 7 til 11
5 min	Præsenter kapitel 2: Fusion i Solen	Kapitel 2 i hovedteksten PowerPoint-slide: 12, 13, 16 og 17	Lyt til underviser, stil spørgsmål
5 min	Præsenter kapitel 3: Plasma	Kapitel 3 i hovedteksten PowerPoint-slide: 18 til 21	Lyt til underviser, stil spørgsmål
3 min	Diskuter opgave 1.3	Kapitel 3 i hovedteksten Opgave 1.3 PowerPoint-slide: 22 og 23	Diskussion i grupper

5 min	Præsenter kapitel 3: Plasma	Kapitel 3 i hovedteksten PowerPoint-slide: 24 til 27	Lyt til underviser, stil spørgsmål
5 min	Diskuter opgave 1.4	Kapitel 3 i hovedteksten Opgave 1.4 PowerPoint-slide: 28 og 29	Diskussion i grupper
15 min	Præsenter kapitel 4: Fusionsmaskinen	Kapitel 4 i hovedteksten PowerPoint-slide: 30, 31, 36, 39 til 45 og 48	Lyt til underviser, stil spørgsmål
	Lektier	*Kapitel 1 til 4 i hovedteksten* *PowerPoint-slide: 32 til 35, 37 og 38 og 46 og 47* *Opgaverne 1.5, 1.6, 1.7 og 1.8*	*Læs kapitel 1 til 4 i hovedteksten* *Se PowerPoint-slides givet til venstre* *Lav opgaverne givet til venstre*

Kapitel 6: Brugen af PowerPoint og andre resurser

Der er en PowerPoint-præsentation (for hvert modul) til rådighed på FuseNets hjemmeside. https://fusenet.eu/education/material.

Præsentationerne består af det faglige indhold i deres respektive moduler (hovedtekster), hvilket også inkluderer opgaverne og løsningerne – men ikke ekstraopgaverne. De indeholder også yderligere figurer til at illustrere stoffet. Du er velkommen til at tilpasse præsentationerne efter behov. I kapitel 7 i lærervejledningen findes en liste over hjemmesider, YouTube-videoer og 'Phet'-simuleringer, som kan anvendes til at øge udbyttet af undervisningen.

For at introducere de forskellige emner i Modul 1 kan det være en idé at tildele de studerende en eller flere forberedelsesopgaver, som de har lavet hjemmefra. Dette kan fx være en ekstraopgave markeret med *. Det kan også være en af resurserne nævnt i hovedtekstens afsnit 'Yderligere læsning' eller i kapitel 7 i lærervejledningen.

Kapitel 7: Yderligere resurser til læring og sjov for Modul 1:

For undervisere

Det følgende indeholder generel baggrundsviden på dansk og engelsk for undervisere, der vil undervise med dette modul. Dette er ment primært til at forbedre din egen viden og forståelse af emnet. Det er muligt at anvende dette stof i undervisningen, men det skal muligvis tilpasses de studerendes niveau.
Nogle sider vil uddybe indholdet i dette modul. Andre sider indeholder opgaver (med og uden løsninger), illustrationer og ekstra information, der ikke dækkes af dette modul. Under hver URL er der en kort beskrivelse af sidens formål / indhold.

a. FuseNet hjemmeside (engelsk) - https://www.fusenet.eu/education/material
   Her findes de fire andre moduler i serien om fusion. Der findes også videnskabelige artikler, kurser og eksperimenter om fusion.

b. Fusionsenergi til Alle (dansk) - https://www.fusionsenergi.dk
   Her findes viden om fusion på dansk. Information om SRP- og SOP-forsøg på DTU, en årlig lærercamp, sommercamp for gymnasieelever og meget mere kan findes her.

c. MIT Open Course Ware (engelsk) - https://ocw.mit.edu/search
   På denne side kan du finde forelæsningsnotater, gamle eksamenssæt og opgaver omkring atomfysik og 'nuclear magnetic resonance'. Du kan med fordel slå 'Filters' til og vælge 'Departmens' -> 'Nuclear Science and Engineering'.

d. EUROFusion (engelsk) - https://www.euro-fusion.org/
   Indeholder brugbar information for både undervisere og studerende. Til førstnævnte kan yderligere grundlæggende viden om fusion findes samt en Q&A. Der er også PowerPoint-præsentationer, der er frit tilgængelige. Til sidstnævnte kan der også findes mere viden om fusion, der går lige til sagen. Niveauet er bredt, og siden kan derfor bruges af mange studerende.

e. Fusion for energy (engelsk) - https://fusionforenergy.europa.eu/
Her findes nogle flotte animationer, der kort og tydeligt fortæller om fusion og fusionsreaktoren ITER. Der er godt overlap mellem Modul 1 og denne side.

For undervisere og studerende

De følgende sider kan sider kan bruges til at forklare, illustrere, eksemplificere, perspektivere og uddybe emnerne fra Modul 1. Nogle af siderne kan muligvis bruges i stedet for en PowerPoint-præsentation – eller blot som tillæg. Der findes også de såkaldte 'Phet'-simuleringer, som nemt kan tilgås af alle. Siderne er inddelt efter hvilket kapitel, de relaterer til. Under hver URL er der en kort beskrivelse af sidens formål / indhold.

Fusionsenergi til Alle (dansk) - https://www.fusionsenergi.dk
Her findes viden om fusion på dansk. Information om SRP- og SOP-forsøg på DTU, en årlig lærercamp, sommercamp for gymnasieelever og meget mere kan findes her.

Kapitel 1: Energiens rolle i vores verden

- Kurzgesagt - in a nutshell: Do we need nuclear energy to stop climate change?
  https://www.youtube.com/watch?v=EhAemz1v7dQ
  Varighed: 10 minutter
  Den første del af videoen kan bruges som en introduktion til modulet (indtil 2:49). Hvis du afspiller indtil 6:00, kan videoen bruges som en explainer-video til dele af kapitel 1.

Kapitel 2: Fusion i Solen

- Phet - atoms, ions and charge
  https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom_en.html
  Denne 'Phet' kan bruges til at forstå forholdet mellem og effekten af et atoms byggeklodser: Protoner, neutroner og elektroner. Det er drag and drop og meget basalt. Kan anvendes af alle studerende.
- Phet - relationship between pressure, volume and temperature
  https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_en.html
  Vælg 'Ideal'. Denne 'Phet'-simulering viser sammenhængen mellem tryk, temperatur og volumen af en gas ved at illustrere gaspartiklernes bevægelse. Parametrene kan ændres undervejs, og det hele er meget intuitivt.

Kapitel 3: Plasma

- Phet - effect of charges within a field
  https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html
  De studerende kan placere en eller flere ladninger i en 2D plan og observere, hvilke elektriske feltlinjer der bliver dannet. Teknisk set vises det elektriske felt som vektorfelt.
- Phet - electrical field hockey
  https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/electric-hockey/latest/electric-hockey.html?simulation=electric-hockey
  Sjovt og meget illustrativt 'spil' for de studerende. Det handler om at føre en ladning hen til et mål ved kun at bruge andre ladninger. Indeholder overraskende meget fysik.

- Ted-ed – Solid, liquid, gas and … plasma by Michale Murillo
  https://www.youtube.com/watch?v=tJplytSR-ww
  Varighed: 3:15
  En kort YouTube-video, der forklarer plasma. Meget tydelig. Skal måske understøttes af forklaringer fra undervisers side afhængigt af de studerendes niveau.

Kapitel 4: Fusionsmaskinen

- Kurzgesagt - in a nutshell: Fusion power explained
  https://www.youtube.com/watch?v=mZsaaturR6E
  Varighed: 6:15
  YouTube-video som forklarer 'inertial confinement fusion' og 'magnetic confinement fusion' samt giver en kort gennemgang af en fusionsmaskine og potentialet af denne. Dette kan bruges som repetition eller muligvis som introduktion til dette modul.
- TSG Physics Lenz's law with copper pipe
  https://www.youtube.com/watch?v=N7tIi71-AjA
  Varighed: 1:39
  YouTube-video uden lyd. Viser et fænomen, som skyldes magnetisk induktion. Faldtiden for henholdsvis en lille jernkugle og en lille magnetisk kugle, der falder igennem et kobberrør, sammenlignes. Efter eksperimentet forklares fænomenet kort.
- Simon Lloyd - demonstrating Lenz's law with a copper tube and a neodymium magnet
  https://www.youtube.com/watch?v=nrkOZsECrZI
  Varighed: 2:40
  En længere YouTube-video, der også illustrerer magnetisk induktion. Denne video forklarer mere grundigt, hvordan magnetisk induktion påvirker systemet, og kan derfor bruges af mere erfarne studerende.

Bilag A: Tabel med naturkonstanter og enhedskonvertering

Størrelse	Enhed	Konvertering til SI-enheder
Energi[2]	1 kalorie (cal)**	4.184 J
Energi[3]	1 toe*	$4.2 * 10^{10}$ J
Energi[1]	1 kWh*	$3.6 * 10^{6}$ J
Masse[1]	1 ton	$1.0 * 10^{3}$ kg
Masse [1]	1 amu/u/ame	$1.66 * 10^{-27}$ kg
Temperatur[1]	0 °C	273.15 K
Tryk[1]	1 bar	$1.0 * 10^{5}$ Pa

Tabel A.1 Enhedskonvertering

*De studerende skal finde disse i ekstraopgave A.2
**De studerende skal finde disse i ekstraopgave A.5

Størrelse	Værdi
Temperatur i Solens kerne[2]	$1.571 * 10^{7}$ K
Temperatur ved Solens overflade[1]	5780 K
Gennemsnitlig densitet i Solen[3]	1408 kg/m^3
Densitet i Solens kerne[2]	$1.622 * 10^{5}$ kg/m^3
Tryk i Solens kerne[2]	$2.477 * 10^{11}$ bar
Temperatur ved Jordens overflade[1]	295 K
Gennemsnitlig densitet i Jorden[2]	5514 kg/m^3
Elektron, masse[1]	$9.109 * 10^{-31}$ kg
Elektron, ladning[1]	$-1.602 * 10^{-19}$ C
Proton, masse[1]	$1.673 * 10^{-27}$ kg
Proton, ladning[1]	$1.602 * 10^{-19}$ C
Neutron, masse[1]	$1.675 * 10^{-27}$ kg

Tabel A.2 Naturkonstanter

[1] Noordhoff uitgevers & NVON (2021). *Binas HAVO/VWO Informatieboek 6de editie (6e havo/vwo)* (01 ed.). Groningen, Nederland: Noordhoff Uitgevers.

[2] Sun Fact Sheet. (2018). Retrieved 13 July 2021, from https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html

[3] IEA Unit converter and glossary, for common energy units. From https://www.iea.org/reports/unit-converter-and-glossary

Bilag B: Løsninger til opgaverne

Opgave 1.1
Svaret afhænger af, hvilket land de studerende vælger. Størstedelen vil nok vælge Danmark, men hvis den studerende ikke mener, at han/hun er dansk, er der mulighed for at vælge andre lande via opgavens åbne formulering. Dette kan også være lærerigt, hvis den studerende vil vide mere om andre landes energiforbrug.

Generel (global) statistik kan findes her: https://ourworldindata.org/energy-mix
For specifikke lande: https://ourworldindata.org/energy#energy-country-profiles
For Danmark: https://ourworldindata.org/energy/country/denmark#energy-mix
På disse sider kan energimixet for forskellige lande m.m. findes. Energiforbruget opdelt efter energikilde er nemt at tilgå, og det er oplagt at lade de studerende undersøge hjemmesiden selv.

Opgave 1.2
Energitætheden fra højest til lavest
Deuterium – uran – kul – olie – benzin – ætanol – træ – hydrogen (gas)

Energitætheden af deuterium afhænger af de fysiske omstændigheder for fusionsreaktionen. Fusionsreaktioner har dog normalt den højeste energitæthed af alle brændstoffer inklusive fissionsreaktioner. Energien frigivet i 1 fusionsreaktion er dog mindre end energien frigivet i 1 fissionsreaktion, fordi atomerne involveret i fission er meget større end atomerne i fusion. Til gengæld er frigivet energi pr. masse (eller tilsvarende pr. nukleon) meget større for fusion, hvilket du kan overbevise dig selv om ved at betragte D-T fusion med frigivet energi 17.6 MeV og U-235 fission med frigivet energi ca. 200 MeV. Derfor er det næppe overraskende, at hvis man fylder et volumen med kun deuterium og på en måde får alle kernerne til at fusionere samtidig, så ville dette frigive mere energi, end hvis man havde fyldt volumenet med uran, som undergår fission samtidig. De tre fossile brændstoffer (kul, olie, benzin) har relativt ens energitætheder. Her er de øvre grænser for energitæthederne af disse valgt ud fra data.
Uran: 1 539 842 000 MJ/L, kilde: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density
Kul: 34-43 MJ/L (antracit) eller 26-49 MJ/L (bitumen) kilde: Se ovenstående
Olie: 37 MJ/L kilde: Se ovenstående
Benzin: 34.2 MJ/L, kilde: Se ovenstående
Ætanol: 24 MJ/L, kilde: Se ovenstående
Træ: 2.56-21.84 MJ/L, kilde: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_content_of_biofuel)
Hydrogen (gas): 0.01005-0.01188 MJ/L, kilde: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density

Opgave 1.3
Svar B

Pga. rekombination vil de frie elektroner og ioner 'rekombinere' og blive til neutrale atomer (almindelige gaspartikler), og i denne proces udsendes lys. Afhængigt af typen af ioner kan forskellige rekombinationsprocesser finde sted. Siden ioner (og atomer) har specifikke energiniveauer, kan kun bestemte fotoner udsendes (fotonenergien er bestemt ud fra ionen). Derfor afhænger farven af det synlige lys fra plasmaet af typen af ioner i plasmaet.
Et plasma er normalt ustabilt siden plasmapartiklerne naturligt rekombinerer og bliver til gaspartikler. Gaspartiklerne skal ioniseres kontinuert for at holde plasmaet stabilt. Hvis en neutral gaspartikel kolliderer med en ioniseret partikel, er der sandsynlighed for, at gaspartiklen bliver ioniseret igen.

Mht. svar A: Ikke alle plasmaer har høj temperatur – der eksisterer også kolde plasmaer. Varme er én måde at ionisere en gas på, men der er flere metoder, som ikke rigtigt diskuteres i dette modul. Kolde plasmaer kan stadig lyse (fx neonlys!).
Mht. svar C: Kernereaktioner i plasma er ikke en selvfølge udover i stjerner. De fleste kernereaktioner udsender desuden ikke lys fx D-D eller D-T fusion, hvor ingen fotoner udsendes som direkte resultat af reaktionen.

Opgave 1.4

a. Strømmen peger ud af papiret
   Magnetfeltet snor sig mod uret omkring ledningen

Ved at bruge højrehåndsreglen kan vi konkludere, at hvis strømmens retning er ud af papiret, så snor magnetfeltet sig mod uret omkring ledningen. Hvis strømmens retning er ind i papiret, så snor magnetfeltet sig med uret omkring ledningen.

b. Magnetfeltet inde i cirklen peger **ud af** papiret
   Magnetfeltet udenfor cirklen peger **ind i** papiret

Hvis vi tegner en cirkelformet ledning med en strøm mod urets retning, så kan vi med højrehåndsreglen konkludere, at magnetfeltets retning inde i cirklen er ud af papiret, mens magnetfeltets retning uden for cirklen er ind i papiret.

c. Grundet den modsatte ladning og modsatte bevægelsesretning peger begge partiklers magnetfelter i samme retning

Hvis vi tegner elektronens cirkulære bevægelsesbane, hvor elektronen bevæger sig med urets retning, så peger magnetfeltet inde i cirklen ud af papiret, og uden for cirklen peger magnetfeltet ind i papiret. Hvis vi tegner protonens cirkulære bevægelsesbane, hvor protonen bevæger sig mod urets retning, så peger magnetfeltet inde i cirklen ud af papiret, og uden for cirklen peger magnetfeltet ind i papiret. Dvs. protonens magnetfelt og elektronens magnetfelt er identiske mht. retningen. Dette skyldes, at protonen har den modsatte ladning af elektronen. Hvis en elektron og en proton bevæger sig i samme retning, ville de generere modsatrettede magnetfelter. Så hvis man ændrer fortegnet på både ladningen og partiklens retning, så er magnetfeltet uændret.
Magnetfelternes retning i denne opgave er altså den samme retning som magnetfeltet for en cirkelformet ledning med en strøm mod urets retning! Hvis strømmens retning er den samme som protonens (positiv partikel) bevægelsesretning, så har magnetfeltet samme retning i begge scenarier. En strøm i en cirkulær ledning er præcis det samme som ladede partikler, der bevæger sig i en cirkelbane, og derfor har magnetfelterne samme retning.

d. Magnetfeltets retning er altid vinkelret på strømmens retning

Magnetfeltets retning er altid vinkelret på ladningernes bevægelsesretning (og derfor også altid vinkelret på strømmens retning).

Opgave 1.5

a. Tegn en torus med en stor storeradius og med en lille lilleradius. Hvordan ser denne ud?

Ligner en donut.

b. Tegn en torus med en lille storeradius og en stor lilleradius. Hvorfor kan denne være sværere at tegne?

Torussen er nu mere sfærisk; lilleradius må ikke være større end storeradius (ellers er det ikke længere en torus!).

c. Hvad ville der ske, hvis du bliver ved med at sænke storeradius, mens lilleradius forbliver den samme? Hvilken form ender du med?

Hvis vi lader lilleradius vokse meget større end storeradius, ender vi med en kugle.

d. Hvad ville der ske, hvis størrelsesforholdene ændrede sig?

Torussen ændrer form.

e. Hvad er den mindst mulige værdi af en torus' størrelsesforhold?

Lilleradius kan ikke være større end storeradius. Hvis de er lig hinanden, så er størrelsesforholdet minimeret dvs. størrelsesforhold = 1.

Opgave 1.6

Toroidale tværsnit:

Poloidale tværsnit

3D-torus:

a. Det toroidale tværsnit er torussen set fra toppen: En rund donut.
   Det poloidale tværsnit er et snit igennem torussen set fra siden: To cirkler.
b. Den poloidale retning er vinkelret på normalvektoren til det poloidale tværsnit. Den toroidale retning er vinkelret på normalvektoren til det toroidale tværsnit.

De toroidale feltspoler er viklet rundt om torussen i den poloidale retning. Disse elektromagneter danner derfor 'loops' i det poloidale tværsnit og fører en strøm i den poloidale retning, som forårsager et magnetfelt i den toroidale retning: Heraf navnet – toroidale feltspoler.
På samme måde følger de poloidale feltspoler den toroidale retning ved toppen og bunden af torussen. Strømmen i disse spoler danner altså toroidale 'loops', hvilket fører til et 'vertikalt' magnetfelt (vertikalt = samme retning som aksen igennem torussens centrum), der delvist peger i den poloidale retning.

Opgave 1.7

a. Toroidale feltspoler – ses tydeligt i det poloidale tværsnit.

De toroidale feltspoler er viklet rundt om torussen i den poloidale retning. Disse elektromagneter danner derfor 'loops' i det poloidale tværsnit og fører en strøm i den poloidale retning, som forårsager et magnetfelt i den toroidale retning (vinkelret på den poloidale retning): Heraf navnet – toroidale feltspoler.
Bemærk, at det er nemt at (fejlagtigt) tro, at toroidale feltspoler er viklet rundt om torussen i den toroidale retning ud fra navnet alene. Her kan man med fordel huske, at 'felt'-delen af feltspoler indikerer, at 'toroidale' refererer til, hvilken vej selve magnetfeltet peger!

b. Centrale solenoide – befinder sig i torussens centrum.
   Poloidale feltspoler – befinder sig ved toppen og bunden af torussen.

Den centrale solenoide befinder sig i torussens centrum og er en solenoide/spole. Det giver god nok mening.
De poloidale feltspoler er en anelse mere komplicerede. De poloidale feltspolers primære formål er ikke at danne et poloidalt magnetfelt, som navnet ellers indikerer. Det poloidale magnetfelt skyldes primært den centrale solenoide og plasmastrømmen. De poloidale feltspoler danner dog et magnetfelt, som <u>delvist</u> peger i poloidale retning, hvorved navnet bedst kan forstå.

Opgave 1.8

a. Induktion afhænger af ændringen i magnetisk flux.
   Derfor kan man fx blive ved med at øge strømstyrken i den centrale solenoide for at opretholde plasmastrømmen. Men den magnetiske flux kan ikke kontinuert blive ved med at ændre sig – på et tidspunkt kan man ikke øge strømstyrken i den centrale solenoide mere. Når dette sker, så stopper induktionen, og det poloidale magnetfelt forsvinder.
   Netop derfor opereres den centrale solenoide (og dermed hele tokamakken) i pulser.

b. Ideelt vil en fusionsreaktor generere strøm nonstop. Hvis den er pulseret, er der tidsintervaller, hvori ingen energi genereres.

Bilag C: Løsninger til ekstraopgaverne

Ekstraopgave A.1

a. Undersøg online, hvordan man udtrykker en joule i SI-enheder. Hvad betyder dette? Sammenlign med enhederne for hastighed (m/s) og acceleration (m/s^2). Måske kan det være nyttigt at tænke på, hvordan en newton (N) udtrykkes i SI-enheder.

$1\,\mathrm{J} = 1\frac{\mathrm{kg\,m^2}}{\mathrm{s^2}}$. *Så* $1\,\mathrm{J}$ *er mængden af påkrævet energi for at accelerere et* $1\,\mathrm{kg}$ *legeme med accelerationen* $1\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}$ *over en længde på* $1\,\mathrm{m}$. *Bemærk, at arbejde er kraft · forskydning, som har enheden* $\mathrm{N\,m}$ *eller i SI-enheder:* $\frac{\mathrm{kg\,m}}{\mathrm{s^2}}\,\mathrm{m}$. *Arbejde betegner energien overført til et legeme, når legemet påvirkes af en kraft(komposant) i samme retning, som legemet bliver forskudt. Så 1 joule kan også betragtes som energien, der overføres under den konstante påvirkning af en kraft langs en bestemt forskydning.*

b. [Multiple choice] Hvilke af de følgende scenarier repræsenterer ca. 1 joule energi?

D, alle de ovenstående. Afhængigt af parametrene (fx æblets vægt) kan man beregne energier lidt større eller mindre end 1 joule. Afvigelsen for realistiske parametre burde dog aldrig være så stor, at man snakker om fx 10 J *eller 0.1* J.

c. Hvor mange joule forventer du, at det globale energiforbrug er? Find det globale energiforbrug i joule online, og sammenlign det med dit estimat. Var du tæt på?

Det globale energiforbrug (primær energi, se ekstraopgave A.2) i 2021 var ca. 595.15 exajoule, hvilket svarer til $595.15 * 10^{18}$ J. *Kilde: BP statistical review of world energy 2022 (side 8).*

Ekstraopgave A.2

a. Hvor fandt du dine data? Hvordan ved du, om du kan stole på dine data? Forklar, hvorfor du stoler på dine data.

-

b. Hvilke enheder er dine data udtrykt i?

-

c. Sammenlign en joule (J), en kilowatt-time (kWh) og et ton olieækvivalenter (toe). Hvor mange joule er en kWh? Hvor mange joule er en toe? Hvor mange joule er en Mtoe?

1 kWh = 3 600 000 J, 1 toe $= 41.868 * 10^9$ J *(eller* 41.868 GJ*)*, 1 Mtoe $41.868 * 10^{15}$ J *eller* 41.868 PJ.

d. Hvad betyder primær energi? Søg evt. på engelsk 'primary energy'.

Primær energi defineres på engelsk som: 'Energy in the form that it is first accounted for in a statistical energy balance, before any transformation to secondary or tertiary forms of energy'. Eksempel: Kul kan konverteres til syntetisk gas, som kan konverteres til elektricitet. I dette eksempel er kul primær energi, syntetisk gas er sekundær energi og elektricitet er tertiær energi (kilde: U.S. Energy Information Administration, https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=Primary%20energy).

Man kan også sige, at primær energi betegner en energiform, som kan findes i naturen, men som ikke har været udsat for nogen menneskabte konverteringsprocesser. Dvs. det er energien, der kan findes i naturen, i ting såsom brændstoffer, der ikke er blevet påvirket af mennesker. Fx kul, naturgas og naturligt uran. Disse kan konverteres til sekundær energi ved at "flytte energien" over i en mere brugbar energikilde, fx når råolie omdannes til det mere brugbare benzin. Hvis benzinen så bruges til at generere elektricitet, så er elektricitet tertiær energi her. Primær energi bruges bl.a. i størrelsen 'total primary energy supply' (TPES), som beskriver et lands energiforsyning mht. primær energi opdelt efter energikilde.

e. For de fleste lande udgør **fossile brændstoffer** størstedelen af energikilderne. Sammenlign forskellige landes energiforbrug. Hvor meget anvendes vedvarende energikilder såsom sol- og vindenergi?

Afhænger af landet. For de fleste lande udgør fossile brændstoffer dog stadigvæk størstedelen af energikilderne. Norge og Island er eksempler på det modsatte.

f. Stammer en stor mængde af energimixet fra bæredygtige energikilder? Hvad med vedvarende kilder?

Afhænger af landet og hvilke energikilder, der anses som værende bæredygtige. Biobrændsel kan klassificeres som en bæredygtig energikilde – ligesom fission – afhængigt af ens synspunkter. Kategorien 'bæredygtige energikilder' inkluderer ofte vedvarende energikilder og andre kilder såsom fission og biobrændsel. Derfor er andelen af bæredygtig energi ofte større end andelen af vedvarende energi. I nogle lande er atomkraft meget udbredt, og disse lande har derfor lavere CO2-udledning, end lande der fx har en større andel af sol- og vindenergi men er mere afhængige af fossile brændstoffer. I sidste ende er det samfundet, som bestemmer, hvad der acceptabelt, og hvad der klassificeres som bæredygtigt.

Ekstraopgave A.3

Bemærk: *Siden denne opgaves primære formål er at undersøge størrelsesordenen af energiforbruget i forskellige scenarier, er tallene nedenfor estimater. Der er mange forskellige (og til tider modsigende) kilder vedr. fx globale eller nationale energiforbrug, siden disse størrelser kan være udfordrende at måle præcist bl.a. pga. de store mængder individuelle målinger. Derfor kan man nemt komme frem til andre svar på opgaven end dem givet nedenfor, men så længe logikken bag disse svar er acceptabel, så må svaret anses som værende korrekt. Derfor handler opgaven om forståelse og ikke selve værdierne.*

a. Estimer, så godt du kan, energiforbruget i joule af følgende: En husholdning, en by, et land og hele verden.

Ved at bruge data fra ODYSSEE-MURE, Our World in Data og University of Ontario: Det gennemsnitlige energiforbrug af en husholdning varierer mellem EU-lande (se også https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/households/average-energyconsumption-dwelling.html). I gennemsnit var det 1.3 toe/husholdning i EU i 2019 (pr. år), hvilket svarer til 1.3 toe/husholdning × 41.868 GJ/toe = 54.4 GJ/husholdning. Så i gennemsnit kan vi sige, at en husholdning i EU bruger ca. 54.4 GJ pr. år.

Siden byer varierer meget i størrelse og energiforbrug, så er det svært at finde en repræsentativ værdi for energiforbruget af en by i EU. Men ved at tage det gennemsnitlige energiforbrug pr. husholdning fra før og finde antallet af husholdninger i en by kan vi finde et estimat for byens energiforbrug. Berlin har fx næsten 2 millioner husholdninger (ifølge Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Demographics_of_Berlin), så vi får Berlins årlige energiforbrug til at være: 54.4 GJ/år × 2 000 000 = $1.09 * 10^{17}$ J/år. *Sammenlignet med en værdi, der kan findes online (kilde: https://www.cleanenergywire.org/factsheets/energy-use-city-berlin), på 263.2 PJ =* $2.632 * 10^{17}$ J/år *er vores estimat indenfor en faktor 3. Tyskland havde i 2021 et energiforbrug på ca. 286 Mtoe/år =* $1.20 * 10^{19}$ J/år *(kilde: https://www.enerdata.net/estore/energy-market/germany), og givet at Berlin er en af de større byer i Tyskland, og at der er måske 50-200 større byer i Tyskland, så lader vores tidligere estimat til at være acceptabelt (*$100 * 1.09 * 10^{17}$ J/år $\approx 1.20 * 10^{19}$ J/år *).*

Det globale energiforbrug er fundet i ekstraopgave A.1 spørgsmål c.

b. Estimer, så godt du kan, det globale energiforbrug, der skyldes henholdsvis industrien og husholdninger.

Vi bruger data fra: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-10/assessment (bemærk, at vi bruger en gammel version, da de nyere versioner ikke viser energiforbrug pr. sektor). Her er energiforbruget fordelt over fem sektorer: Transport, industri, husholdninger, kommercielle + offentlige tjenester og 'andre'. Siden husholdning og industri er opdelt i hver deres sektor, kan de nemt sammenlignes. Ved at bruge disse data fra 2017 får vi følgende tal for EU:

- *Kommercielle og offentlige tjenester: 154 Mtoe*
- *Husholdninger: 288 Mtoe*
- *Industri: 261 Mtoe*
- *Transport: 327 Mtoe*
- *Andre: 30 Mtoe*

Altså et samlet energiforbrug på 1060 Mtoe i 2017 for EU (bemærk: Dette er det endelige energiforbrug dvs. ikke baseret på primær energi. 1060 Mtoe virker jo som for lidt sammenlignet med Tysklands forbrug på 286 Mtoe alene. Energiforbruget mht. primær energi vil nok være betydeligt højere, hvilket viser, hvor mange forskellige tal man kan finde, og hvor svært det kan være at kende forskellen på disse tal, som på overfladen lader til at beskrive det samme). Hvis vi ser bort fra, at transport kan betragtes som en del af husholdningernes og / eller industriens energiforbrug, så er husholdningernes procentdel af det samlede energiforbrug ca. 288/1060 × 100 = 27%. For industrien får vi: 261/1060 x 100 = 25%. Bemærk, at disse udregninger kraftigt afhænger af, hvordan energien kategoriseres fx mht. transport osv.

c. Hvilke kilder fandt du?

Alle kilder er givet ovenfor.

d. Hvordan passer kilderne med dine tidligere estimater?

De tjek, vi har lavet undervejs – fx da vi sammenlignede Berlins årlige energiforbrug med estimatet for dette, som vi havde fundet ud fra det gennemsnitlige energiforbrug pr. husholdning – har vist, at vores logik er nogenlunde fornuftig. Givet at vi arbejder med grove approksimationer her, så kan svar, der varierer med måske op til en faktor 10 fra hinanden, betragtes som "det samme". Hvis variationen er større end dette, er det værd at undersøge, om der er noget galt med beregningerne, eller om tallene faktisk beskriver det samme. I sidste ende er det svært at lave gode tjek.

e. Hvilke udfordringer mødte du i denne opgave?

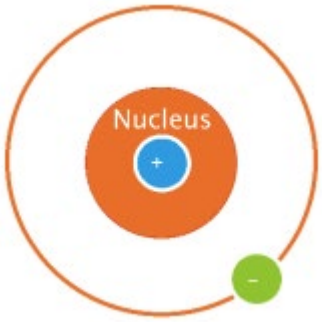
Det er tydeligt, at det kan være svært at finde præcise tal for energiforbruget af et land, en by eller hele verden. Udfordringerne skyldes bl.a. den statistiske variation, hvor nogle hjem fx bruger meget mere energi end andre, og hvor nogle byer er større end andre. At holde styr på energiforbruget fordelt udover energikilderne er udfordrende og bliver kun sværere, jo større systemer vi arbejder med. Nogle lande holder måske styr på deres energiforbrug på en helt anden måde end andre lande eller kategoriserer energikilder anderledes osv. Derfor bruger journalister fx meget forskellige tal, hvor nogle af tallene bruges korrekt, og andre måske ikke bruges helt korrekt. At bruge pålidelige kilder er klart bedst, men det kan være udfordrende, hvis man leder efter meget specifikke data. Givet de store datamængder, der kan findes online, kan det være svært at vide, hvilke data man bør anvende. Officielle institutioner er altid et godt bud.

Ekstraopgave A.4

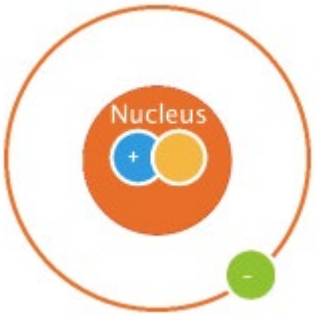
a. Hvilket grundstof kan ses i figur 4 i hovedteksten til dette modul? Hvilken isotop er det? Er det en ion? Undersøg, hvad dette grundstof kan bruges til.

Beryllium (Be-9, ikke en ion). Beryllium bruges til mange forskellige ting såsom røntgenstrålingsrør (X-ray tubes) og indenfor luftfartsteknik pga. dets minimale vægt. Beryllium bruges også til atomkraft! Det bruges som en neutronreflektor i fissionsreaktorer og er et vigtigt materiale for fremtidens fusionsreaktorer, hvor det bruges til at bygge tokamakkens vægge.

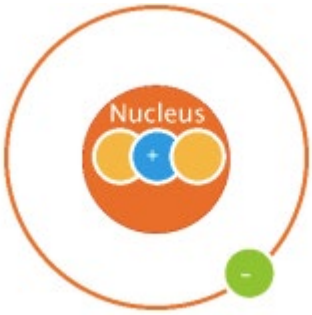
b. Lav en tegning, ligesom figur 4, af et hydrogenatom.



c. Lav en tegning, ligesom figur 4, af et deuteriumatom.



d. Lav en tegning, ligesom figur 4, af et tritiumatom.



Ekstraopgave A.5

Energiskalaer: Find ud af, hvor mange joule der er pr. kalorie (cal) og pr. kilokalorie (kcal). Find energien i en Mars bar (altså energien, der står i næringsindholdet). Vha. vægten af en Mars bar beregn / find en værdi for den specifikke energi (energi pr. masse, J/kg) af en Mars bar, og sammenlign med den specifikke energi af: Benzin, kul, fission (uran) og fusion (D-T fusion). Den engelske Wikipedia-side for 'Energy density' kan måske være brugbar.

I hverdagssprog bruges kalorier og kcal bruges måske i flæng, men de er ikke det samme! 1 kcal = 4184 joule og 1 kalorie (cal) = 4.184 joule. En Mars bar vejer 51 gram og har en energi (næringsindhold) på 450 kcal / 100 g. Vha. dette kan vi se, at én Mars bar indeholder en energi på: 450 kcal / 100 g x 51 g = 229.5 kcal. Så ca. 230 kcal pr. Mars bar. Den specifikke energi af en Mars bar kan omregnes til 450 kcal / 100 g = 18.83 MJ/kg.

Nu kan vi sammenligne denne med den specifikke energi af: Benzin, kul, fission (uran) og fusion (D-T fusion). Vi bruger de specifikke energier, der kan ses på:
https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density#List_of_material_energy_densities:

- *Benzin: 46.4 MJ/Kg*
- *Kul: 24-35 MJ/Kg*
- *Fission (uran): 80 620 000 MJ/kg*
- *D-T fusion: 337 387 388 MJ/kg*
- *Mars bar: 18.83 MJ/kg*

Som du kan se, så indeholder en Mars bar temmelig meget energi. Men denne energi kan naturligvis ikke frigives uden videre. Kroppen anvender mange forskellige kemiske processer til at frigive energien i en Mars bar, mens benzin eller kul bare skal brænde for at frigive energi. Uran og D-T fusion har meget større specifikke energier end en Mars bar eller fossile brændstoffer, eftersom der

er langt større mængder af energi involveret i kernereaktioner ift. kemiske reaktioner. Fusion har umiddelbart en større specifik energi end fission.

Ekstraopgave A.6

a. Forklar forskellen mellem fusion og fission på et atomart niveau.

fusion substantiv, fælleskøn

BØJNING -en, -er, -erne

UDTALE [fu'ɕoʔn]

OPRINDELSE fra latin *fusio* (genitiv *-onis*) 'udflydning', af *fundere* 'hælde ud, flyde sammen'

Betydninger

FYSIK kernereaktion hvorved lette atomkerner forener sig til tungere atomkerner under frigørelse af energi

SE OGSÅ fission

ORD I NÆRHEDEN kernereaktion ...vis mere

fission substantiv, fælleskøn

BØJNING -en, -er, -erne

UDTALE [fi'ɕoʔn]

OPRINDELSE fra latin *fissio* (genitiv *-onis*) 'spaltning', af *findere* 'spalte, kløve, dele'

Betydninger

reaktion hvorved en stor atomkerne spaltes til to eller flere mindre atomkerner under frigørelse af energi

SYNONYM kernespaltning SE OGSÅ fusion

ORD I NÆRHEDEN kernereaktion | atomspaltning...vis mere

Ovenstående er hentet fra ordnet.dk. Forskellen ligger i, at enten forener to eller flere atomkerner sig til en tungere kerne, eller så spaltes en tung atomkerne til to eller flere mindre partikler. Fusion er at forene atomkerner, mens fission er at spalte atomkerner.

b. Beskriv vha. bindingsenergien, hvorfor tungere atomkerner er mere ustabile.

Atomkerner består af protoner og neutroner, men massen af en atomkerne er altid mindre end summen af masserne af de individuelle protoner og neutroner hver for sig. Masseforskellen – også kaldet massedefekten – beskriver bindingsenergien, som holder atomkernen sammen. Bindingsenergien kan beregnes ud fra formlen $E = \Delta mc^2$, hvor E er bindingsenergien, Δm er masseforskellen / massedefekten, og c er lysets hastighed (kilde: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/nucbin.html).

Kort sagt er der to slags kræfter på spil i en atomkerne. Der er den elektriske frastødningen mellem protonerne (elektromagnetiske kraft), og så er der den stærke kernekraft – som navnet hentyder til, så er denne kraft temmelig stærk. Den elektromagnetiske kraft bliver svagere, i takt med at partiklerne bevæger sig længere væk fra hinanden, men selv på afstande, der sammenlignet med en proton er store, vil partiklerne mærke hinanden og blive frastødt. Den stærke kernekraft virker kun over meget små afstande mellem partiklerne: Når protonerne og neutronerne er tætte på hinanden, er der en meget stærk kraft, der holder dem sammen. Eftersom den stærke kernekraft er meget stærkere end den elektromagnetiske kraft (på meget små afstande!), så kan atomkerner eksistere.

To protoner vil fx frastøde hinanden, men hvis vi tilføjer en neutron mellem dem (så proton-neutron-proton), vil frastødningen være lidt mindre voldsom. Den stærke kernekraft mellem protoner og neutroner er den samme som for protoner og protoner eller neutroner og neutroner, men neutronerne skaber mere plads mellem protonerne, så frastødningen er mindre, og derfor siges det til tider, at neutroner er en slags "lim" for atomer. Derfor bliver atomkerner meget tungere, når atomnummeret stiger: Vi har flere protoner, og derfor har vi brug for flere neutroner til at øge den stærke kernekraft og sænke den elektriske frastødning (se evt.: https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron%E2%80%93proton_ratio).

(Bemærk: Protoner og neutroner kaldes for nukleoner, så en atomkerne består af nukleoner). Bindingsenergien i en atomkerne kan forstås som den stærke kernekraft minus den elektriske frastødning. I takt med at atomkerner bliver tungere, så stiger bindingsenergien pr. nukleon, indtil den når sit maksima omkring Fe-56. Når man tilføjer nukleoner til atomkernen, kan det godt være, at bindingsenergien bliver større (eftersom nukleonerne vil tiltrække hinanden via den stærke kernekraft), men den elektriske frastødning vil også stige, når flere protoner tilføjes. Når man tilføjer flere nukleoner til Fe-56, så begynder den elektriske frastødning at betyde mere end den stærke kernekraft. Det medfører altså, at de tungere grundstoffer bliver mere ustabile (kilde: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy).

c. Beskriv, hvor på grafen fusion finder sted, og hvor fission finder sted. Hvor er overgangen fra fusion til fission? Kan du forklare hvorfor?

Overgangen mellem fusion og fission sker på grafens maksima altså ved Fe-56. Fusion kan i teorien finde sted for isotoper med lavere nukleontal end Fe-56, og fission kan i teorien finde sted for isotoper med større nukleontal end Fe-56. Energi bliver frigivet af samme årsag i begge tilfælde: Bindingsenergien pr. nukleon stiger via kernereaktionen.

d. Baseret på grafen hvilket stof forventer du er almindeligt at finde i store mængder i meget gamle stjerner?

Jern! I kernen af stjerner foregår der fusion, hvilket begynder med protoner (hydrogen). Hvis omstændighederne i stjernen tillader det, så vil helium også begynde at fusionere og så videre med de tungere atomkerner. Denne proces kan fortsætte op til jern (Fe-56), hvor det ikke længere er muligt for atomkernerne at fusionere, og derfor begynder jern at hobe sig op i kernen i meget gamle stjerner.

Ekstraopgave A.7

a. Beregn massedefekten og dermed den frigivne energi via Einsteins ligning for en D-T fusionsreaktion.

D-T fusionsreaktionen er: D + T → α + n + energi (17.6 MeV). Massedefekten for reaktionen kan beregnes ved at sammenligne den samlede masse af venstresiden og højresiden af reaktionen. Fx vejer et deuteriumatom 2.01410177785 u, men vi skal huske at trække vægten af elektronen fra (elektroner indgår ikke i fusionsreaktionen), så selve deuteriumkernen vejer kun: 2.01410177785 u - 0.000548579909 u = 2.013553198 u. Nu kan bruge Einsteins ligning $E = mc^2$ til at beregne energien af deuteriumkernen, som bliver: 2.013553198 u × $c^2 = 3.00506526 * 10^{-10}$ J = 1875.61 MeV. Hvis vi foretager de samme beregninger for de andre partikler i fusionsreaktionen, kan vi lave følgende tabel:

Før	*Masse*	*Energi*
Deuteriumkerne	*2.013553198 u*	*1875.61 MeV*
Tritiumkerne	*3.015500700 u*	*2808.92 MeV*
Total før reaktion	*5.029602478 u*	*4684.53 MeV*
Efter		
Alfapartikel (He-4)	*4.001503448 u*	*3727.38 MeV*
Neutron	*1.008664212 u*	*939.57 MeV*
Total efter reaktion	*5.010167660 u*	*4666.95 MeV*

Dette giver en massedefekt = 5.029602478 u - 5.010167660 u ≈ 0.019 u.
Energien der er frigivet: 4684.53 MeV - 4666.95 MeV ≈ 17.6 MeV.
Som forventet frigiver D-T fusion altså ca. 17.6 MeV pr. reaktion.

b. Beregn massedefekten og dermed den frigivne energi via Einsteins ligning for en (valgfri) fissionsreaktion for uran-235.

For uran-235 er situationen en anelse mere kompliceret, da denne kan henfalde via mange forskellige fissionsreaktioner. Derfor kan de frigivne energier også variere ret meget, selvom gennemsnittet er omkring 200 MeV. Lad os her fokusere på et naturligt, spontant henfald af U-235:

U-235 → Th-231 + α.

Altså henfalder en U-235-kerne spontant til en Th-231-kerne og en alfapartikel.
Et U-235-atom vejer 235.0439299 u, og siden uran har atomnummeret 92, skal vi trække massen af 92 elektroner fra: 235.0439299 u - (92 × 0.000548579909 u) = 234.993460548 u. Energien kan så findes via Einsteins ligning: 234.993460548 u × c^2 = $3.507087298 * 10^{-8}$ J = 218895 MeV.

Den samme beregning kan laves for thorium-kernen, hvor vi trækker vægten af 90 elektroner fra:
231.03630 u - (90 × 0.000548579909 u) = 230.986927808 u
230.986927808 u × c^2 = 215163 MeV

Før	*Masse*	*Energi*
U-235-kerne	*234.993460548 u*	218895 *MeV*
Total før reaktion	*234.993460548 u*	218895 *MeV*
Efter		
Alfapartikel (He-4)	*4.001503448 u*	*3727.38 MeV*
Neutron	*230.986927808 u*	215163 *MeV*
Total efter reaktion	*234.9884312 u*	*218890.38 MeV*

Frigivet energi: 218895 MeV - 218890.38 MeV = 4.62 MeV

Ekstraopgave A.8
Find temperaturen og densiteten i Solens kerne, temperaturen ved Solens overflade, den gennemsnitlige densitet i Solen samt temperaturen og densiteten i en fusionsreaktor på Jorden. Sammenlign disse. Hvorfor er det nødvendigt, at en fusionsreaktor på Jorden har en meget højere temperatur end Solen?

For at afgøre hvorvidt fusion kan finde sted, er tre parametre vigtige at overveje: partikeltætheden, temperaturen og indeslutningen af partiklerne. Samlet set skal tætheden og temperaturen være stor nok til, at partiklerne i gennemsnit har en god sandsynlighed for at fusionere. Indeslutningstiden er

vigtig, fordi hvis de varme partikler forlader fusionsreaktoren, så skal vi hele tiden tilføje nye partikler til reaktoren og varme dem op, sådan at fusionsprocessen ikke stopper. I Solen er indeslutningen rigtig god pga. tyngdekraften – den er meget bedre, end det vi kan opnå på Jorden med magneter. I gennemsnit er Solens densitet ikke særlig høj: ca. 1.4 g/cm^3, mens Jorden har en gennemsnitlig densitet på omkring 5.5 g/cm^3. Men i Solens kerne er densiteten meget højere: ca. 160 g/cm^3. I vores fusionsreaktorer er densiteten meget lavere – normalt bruger man maksimalt et par gram brændstof (deuterium, tritium), og tokamakken ITER vil have et volumen på ca. 830 m^3. Så ift. dette er 160 g/cm^3 enormt meget. Det er tydeligt, at ift. Solens kerne (hvor fusion jo finder sted) så har en fusionsreaktor på Jorden meget lavere densitet og indeslutningstid.

Men hvis man kigger på temperaturerne, så er situationen anderledes. Temperaturen i Solens kerne er på omkring 15 millioner grader celsius, mens temperaturen ved overfladen kun er på omkring 6000 grader celsius. Baseret på dette er det nemt at forstå, hvorfor fusion ikke finder sted ved Solens overflade: Temperaturen og densiteten ved overfladen er alt for lave. I kernen derimod danner kombinationen af høj densitet, høj temperatur og god indeslutning gode forudsætninger for fusion. Så mht. fusionsreaktorerne på Jorden er det tydeligt, at vi skal øge temperaturen til endnu mere end de 15 million grader i Solens kerne for at kompensere for vores meget "ringere" densitet og indeslutningstid (Husk: Vi bruger hydrogengas i reaktorerne, og ved stuetemperatur er densiteten af denne 0.0899 g/cm^3, hvilket er meget lavere end densiteten i Solen. Husk også, at ved at opvarme gassen så udvider den sig, og densiteten falder. Vi bruger faktisk meget lidt gas og varmer det op, sådan at plasmaet fylder hele volumenet inde i reaktoren). Hvis fusionsreaktorerne på Jorden derfor skal have gode forudsætninger for fusion, så er den optimale temperatur tættere på omkring 150 millioner grader celsius – altså ca. 10 gange større end i Solens kerne!

Ekstraopgave A.9

Et velkendt eksempel på anvendelse af plasma i den virkelige verden er plasma-TV. Undersøg online, hvordan et plasma-TV fungerer, og hvad forskellen er på plasmaet i et plasma-TV og et fusionsplasma som beskrevet i kapitel 3 i hovedteksten.

Info om hvordan et plasma-TV fungerer kan findes online, fx her: https://www.explainthatstuff.com/plasmatv.html. Et Plasma-TV består af et gitter af røde, grønne og blå pixels ligesom LCD-skærme. Men i et plasma-TV er hver pixel fyldt med en gas, som kan ioniseres og blive til et plasma vha. et stort spændingsfald over to elektroder. Gassen – eller rettere plasmaet – udsender så ultraviolet lys (som ikke kan ses med øjet!). Hver pixel er dækket af et stof, som absorberer det ultraviolette lys og derefter udsender lys med en bestemt farve (rød, grøn eller blå). Derfor kan man få hver pixel til at lyse ved at tænde for spændingen over elektroderne.

Kort sagt er forskellen mellem et fusionsplasma (plasma hvori der foregår fusion) og plasmaet inde i et plasma-TV plasmaernes egenskaber. Der foregår ikke fusion inde i et plasma-TV, her ioniserer en spænding bare en gas, som så udsender lys og får en pixel til at lyse med den rigtige farve. Plasmaet i et plasma-TV er slet ikke lige så varmt som fusionsplasmaer. Der er mange forskellige typer af plasma: Lave temperaturer, lave tætheder, høje temperaturer, høje tætheder osv. Plasma er en meget varieret tilstandsform.

Ekstraopgave A.10

a. Plasmaer lyser ofte (tænk fx på neonlys). Men hvorfor lyser plasmaer?

Når noget lyser, udsender det lys. Atomer har forskellige energiniveauer, som dets elektroner kan befinde sig i. Når en elektron bliver exciteret, så siger vi, at dets atom befinder sig i en exciteret tilstand. Elektronen kan så 'falde ned i' et lavere energiniveau, hvorved en foton (lys) bliver udsendt. Farven af det udsendte lys afhænger af fotonens energi og derfor af forskellen i energi mellem det exciterede energiniveau, som elektronen befandt sig i, og det energiniveau, som elektronen nu befinder sig i. Afhængigt af hvordan et atom bliver exciteret, så kan elektronen blive exciteret til forskellige energiniveauer og falde tilbage til forskellige energiniveauer, hvilket fører til et farvespektrum, der er unikt for hvert stof (jf. fx emissionsspektret for hydrogen https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_spectral_series). Energiniveauerne for et bestemt grundstof er altid de samme, så hydrogenatomer har altid de samme energiniveauer og kan derfor kun udsende de samme farver af lys. På samme måde afgør disse energiniveauer også hvilke kvantespring mod højere energi, som elektronen kan lave. En laser lyser med en bestemt bølgelængde, dvs. fotonerne har en bestemt energi. Hvis du lyser på hydrogen med en laser, og fotonenergien i laserlyset svarer til forskellen mellem to energiniveauer for en elektron i hydrogen, så kan man excitere en elektron i hydrogenatomet. Ligeledes kan en elektron også exciteres, hvis en hurtig partikel kolliderer med et atom og overfører energi til atomet. Elektronen kan så rykke op i et højere energiniveau. Hvis partiklen er hurtig nok, kan atomet også blive ioniseret.

For at danne et plasma skal vi ionisere partikler. Så når vi har et plasma, vil der (næsten) altid være kollisioner, som enten kan føre til ionisering eller blot excitere en elektron. Den exciterede elektron vil på et tidspunkt henfalde til et lavere energiniveau og derved udsende lys. Denne proces kan få plasmaer til at lyse.

For at perspektivere til opgave 1.3 tilføjer vi, at rekombination og processen beskrevet ovenfor er to forskellige processer, og at de begge kan bidrage til, at et plasma lyser. Det hele afhænger af energiniveauerne af ionerne / atomerne i plasmaet!

b. Hvis et plasma er fuldt ioniseret, kan det så stadig lyse? Hvorfor?

Hvis vi varmer et plasma så meget op, at det bliver fuldt ioniseret, så kan elektronerne ikke længere exciteres, da de ikke længere er bundet til atomer. Så i centrummet af et fusionsplasma, hvor plasmaet er fuldt ioniseret, kan der ikke udsendes lys ved at excitere elektroner. Rekombination kan dog stadig finde sted. Nær væggen af plasmabeholderen vil de ioniserede plasmapartikler kollidere med metalvæggen og rekombinere. I denne proces bliver nogle atomer exciteret, og disse vil udsende lys, hvilket forklarer, hvorfor plasmaet i en fusionsreaktor lyser ved væggene!

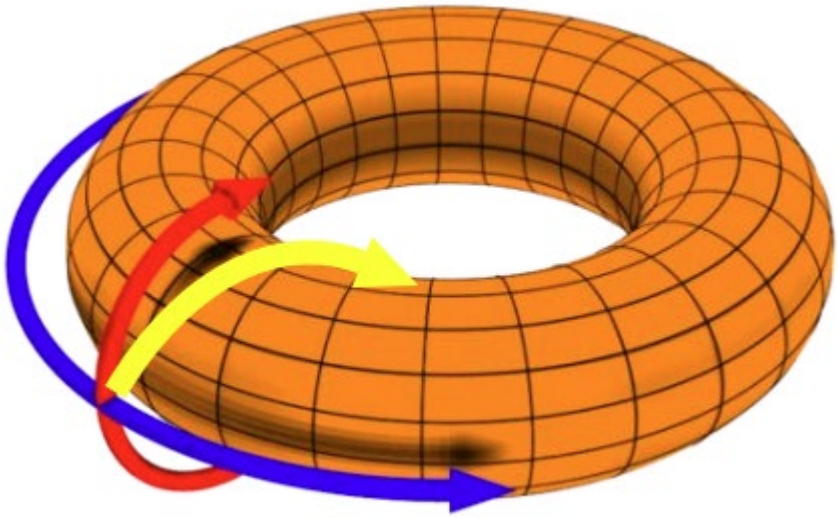
Ekstraopgave A.11

a. Tegn en pil (vektor) i en tilfældig retning.
b. Tegn en ny pil (vektor) i en anden retning, der starter ved slutningen af den første pil.
c. Tegn en tredje pil, der starter samme sted som den første pil og slutter samme sted som den anden pil.

Blå pil + orange pil = grøn pil. Den grønne vektor er resultatet af additionen af den blå og den orange vektor.

Hvis vi gør det samme for en poloidal pil (vektor) og en toroidal pil (vektor), hvad er så resultatet?

Når vi gør dette for en poloidal pil (rød) og en toroidal pil (blå), får vi en "spiralformet" pil (gul), der snor sig rundt om torussen!



This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

FuseNet
The European Fusion Education Network