

Evaluering av NTNUs studieprogram MTFYMA og BFY

Arbeidsgruppa består av:
Dag Kristian Dysthe (UiO),
Sverre Gullikstad Johnsen (SINTEF),
Morten Hjorth-Jensen (UiO),
Karl Yngve Lervåg (SINTEF),
Kari Schjøberg-Henriksen (GE Healthcare),
Ingve Simonsen (NTNU),
Paal Skjetne (SINTEF)

24. mai 2021

Sammendrag

Denne rapporten presenterer en ekstern arbeidsgruppes evaluering av dagens studieprogram for MTFYMA og BFY ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Arbeidsgruppens evaluering er basert på analyser av studieprogrammene for ferdighetsstrenene "numerisk fysikk og programmering" og "eksperimentell fysikk", gjeldende studieplan, og arbeidsgruppens egen erfaring fra relevant arbeidsliv. Rapporten konkluderer med flere anbefalinger som er basert på gruppens syn på hva som vil være behovene for fagkunnskap i fremtidens samfunn.

De evaluerte studieprogrammene gir studentene et solid grunnlag som gjør dem ettertraktet på arbeidsmarkedet. Likevel, endringer i både arbeidslivet og teknologi gjør at gruppen anbefaler å styrke noen temaer. En ny ferdighetsstreng innen numeriske beregninger er under etablering. Arbeidsgruppa ser dette som et meget positivt initiativ som bør videreføres. Initiativet vil gi alle MTFYMA og BFY studenter praktiske og fagrelevante ferdigheter innen beregningsorientert fysikk.

De viktigste anbefalingene fra arbeidsgruppen er:

- Studentene bør eksponeres for oppgaver og arbeid som integrerer beregningsorientert fysikk og eksperimentelt rettet fysikk.
- Studentene bør få mer trening i å skrive rapporter.
- Studentene bør gis en mer systematisk innføring i god dokumentasjonspraksis, som for eksempel journalføring, dokumentasjon av datainnsamling, kodedokumentasjon og versjonskontroll av kode.
- Undervisningen bør vektlegge læring av generiske laboratorieferdigheter som for eksempel måleteknikk, usikkerhet og praktisk bruk av måleinstrumenter på bekostning av å gjennomføre demonstrasjoner av nylig forelest teori.
- Studentene bør gis en mer helhetlig opplæring i praktisk bruk av numeriske beregninger.
- Det bør fokuseres mindre på bruk av ferdige oppsett og eksperimentmanualer og mer på laboratorieoppgaver der studentene selv må planlegge, etablere, gjennomføre, analysere og rapportere.
- Det bør vurderes om det er hensiktsmessig med et separat kurs for laboratorieundervisning som krediteres med selvstendige ECTS.

Fakultetet har tilgang til noen av de aller beste studentene på nasjonal basis. Arbeidsgruppen tror en revisjon av studieplanen i lys av arbeidsgruppens anbefalinger vil øke studentenes kompetanse, mestringsfølelse, handlekraft og selvtillit. Dette vil fagmiljøet dra nytte av såvel som næringslivet og samfunnet forøvrig.

Innhold

1	Introduksjon	5
1.1	Om arbeidsgruppa	5
1.2	Rapportens struktur	5
2	Dagens studieprogram	6
2.1	Sammenfatte resultater av en undersøkelse i en rapport	6
2.2	Erfaring med å jobbe både i prosjektform og selvstendig	6
2.3	Formulere en testbar hypotese	6
2.4	Kunnskap om god dokumentasjonspraksis	7
2.5	Kjennskap til risikoanalyse	7
2.6	Kunnskap om vanlig brukte måleteknologier	7
2.7	Kunnskap om eksperimentdesign	7
2.8	Kunnskap om beregningsmetoder og -verktøy	8
2.9	Kunnskap om programmering	8
3	Behov i fremtidens samfunn	10
3.1	Generiske ferdigheter	10
3.1.1	Sammenfatte resultater av en undersøkelse i en rapport	10
3.1.2	Erfaring med å jobbe både i prosjektform og selvstendig	10
3.1.3	Formulere et forskningsspørsmål eller en testbar hypotese	11
3.1.4	Kunne redegjøre for antagelser som ligger til grunn for modell/ eksperiment- utforming og gjeldende teorier/hypoteser	11
3.1.5	Kunnskap om god dokumentasjonspraksis	11
3.1.6	Kjennskap til risikoanalyse	12
3.2	Eksperimentell kompetanse	12
3.2.1	Kunnskap om eksperimentdesign	12
3.2.2	Kunnskap om vanlig brukte måleteknologier	13
3.3	Digital kompetanse og beregningsorientert fysikk	13
3.3.1	Kunnskap om naturvitenskapelige beregninger	13
3.3.2	Kunnskap om god kodeutviklingspraksis	15
3.4	Bærekraftsperspektiv	15
3.5	Etiske betraktninger	15
4	Sammenlikning med andre læresteder	16
4.1	Laboratorieundervisning ved EPFL, ETHZ og TUM	16
4.2	Computing in Science Education ved Universitetet i Oslo (UiO)	17
5	Anbefalinger	18
5.1	Fellesanbefalinger for begge ferdighetsstrenger	18
5.2	Eksperimentell fysikk	18
5.3	Beregningsorientert fysikk	19
5.4	Integrasjon av eksperimentell og beregningsorientert fysikk	20
A	Referat fra møter med EPFL, ETHZ og TUM	21
A.1	Læringsmål for laboratorieundervisningen	21
A.2	Struktur på den teoretiske fysikkundervisningen	21
A.3	Struktur og omfang av laboratorieundervisningen	21
A.3.1	Forelesninger i laboratoriearbeid	21
A.3.2	Praktiske laboratorieøvinger	22
A.3.3	Arbeidsbelastning og vurdering	23
A.4	Rapportskriving	23
A.5	Sammenheng mellom teoretisk fysikkundervisning og praktiske laboratorieøvinger	23

B	Mandat for ekstern arbeidsgruppe for evaluering av studieprogrammene MT- FYMA og BFY	24
B.1	Bakgrunn	24
B.2	Mål	24
B.3	Organisasjon	24
B.4	Gjennomføring/fremdrift/rapportering	24
B.5	Ressursbruk	24
C	Kurskoder fra studieplan for MTFYMA	25

1 Introduksjon

Eksperimenter, beregninger og teori er de sentrale bærebjelkene i dagens fysikkfag. Samspeilet dem i mellom har lagt grunnlaget for flere av våre innsikter om viktige naturvitenskapelige prosesser, for vår grunnleggende forståelse av sentrale naturlover og for utviklingen av vårt moderne teknologiske samfunn. En grunnleggende forståelse av eksperimenter, teori og beregninger er essensielt for teknologisk innovasjon og utvikling og danner grunnlaget for vårt fremtidige kunnskapsbaserte samfunn.

Denne rapporten er et resultat av en ekstern arbeidsgruppes analyse og evaluering av dagens studieprogram MTFYMA og BFY ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU).

Arbeidsgruppen er bedt spesielt om å se på og forsøke å besvare følgende punkter:

- I hvilken grad imøtekommer utdanningene samfunnets behov innenfor beregningsorientert og eksperimentell fysikk?
- Hvordan er den eksisterende og planlagte utdanningen sammenlignet med tilsvarende program på andre læresteder (både i Norge og internasjonalt)?
- Er det noe spesielt som mangler innenfor disse områdene i et bærekraftperspektiv?

1.1 Om arbeidsgruppa

Vurderingene og anbefalingene i denne rapporten er basert på den eksterne arbeidsgruppens kunnskap om behov i et moderne og høgteknologisk arbeidsliv. Medlemmene har erfaring fra både undervisning, forskning og teknologisk utvikling i offentlig og privat sektor. Alle har vært med å veilede nyansatte og studenter på både B.Sc.-, M.Sc.- og Ph.D.-nivå. Hovedtyngden av erfaringen i arbeidsgruppen er innenfor akademia og oppdragsforskning. Medlemmene i arbeidsgruppen har mindre erfaring som ansatte i industribedrifter og fra store konsulentselskaper innenfor IT og engineering. Især denne konsulentbransjen kan være svært aktuell som arbeidsplass for studentene som uteksamineres fra MTFYMA og BFY.

Arbeidsgruppen ønsket å ha med et medlem fra institutt for fysikk ved NTNU slik at man kunne få raske tilbakemeldinger på eventuelle spørsmål knyttet til dagens situasjon. Det var med dette for øye at Ingve Simonsen deltok i arbeidet til komiteen. Ingve Simonsen har ikke vært involvert i å bestemme arbeidsgruppens anbefalinger i seksjon 5.

1.2 Rapportens struktur

Rapporten inneholder en kort oppsummering av ferdigheter, kompetanser og kunnskaper som arbeidsgruppa ser dekkes av dagens studieprogram MTFYMA og BFY. Deretter blir disse satt i sammenheng med ferdighetene, kompetansene og kunnskaper som arbeidsgruppa ser som sentrale i nåværende og fremtidige naturvitenskapelige og teknologiske arbeidsmiljø.

Basert på dette presenterer vi anbefalinger om noen aspekter som kan vurderes for at studieprogrammene enda bedre imøtekommer fremtidige behov i et høgteknologisk arbeidsliv, enten det dreier seg om offentlig eller privat sektor.

2 Dagens studieprogram

For å gjøre en god evaluering av studieprogrammene MTFYMA og BFY er det nødvendig å ha en oversikt over hvordan programmene ser ut og fungerer i dag. I denne delseksjonen trekker vi frem noen av elementene ved studieprogrammene som vi har funnet spesielt interessant å kommentere. Noen av disse elementene er generelle, mens andre er trukket frem spesielt for eksperimentell fysikk eller beregningsorientert fysikk.

2.1 Sammenfatte resultater av en undersøkelse i en rapport

Det å kunne skrive en mer eller mindre vitenskapelig rapport er en svært nyttig egenskap i arbeidslivet. De fleste arbeidsoppgaver har krav til en form for objektiv rapportering eller journalføring.

Undervisningen ved MTFYMA og BFY ser ikke ut til å legge mye vekt på trening i å skrive vitenskapelige rapporter. Det er ikke nødvendigvis mangel på krav om at studenter må skrive rapport, men i mange tilfeller ser det ut som om rapportene består i å svare på forhåndsstilte spørsmål.

I enkelte fag blir studentene gitt gode ressurser og innføringer, slik som i faget TFY4260. Her skal studentene skrive en vitenskapelig rapport og får artikkelen av Ecartot et al. [2] som læremateriale. Artikkelen er en dekkende og tydelig innføring i prinsippene for og formelle krav til en vitenskapelig artikkel. Innholdet er svært relevant for vitenskapelige rapporter.

Vår observasjon er at det er litt ulikt hvordan rapportskrivning prioriteres og gjennomføres i de forskjellige studieretningene. Det virker som om det gis noe bedre trening i studieprogrammet “Biofysikk og medisinsk teknologi”, blant annet gjennom faget TBT4102.

Det ser ikke ut til at det brukes noe felles undervisningsmaterieell som forklarer studenter på alle studieprogrammene de grunnleggende reglene for en vitenskapelig rapport. Artikkelen som brukes i faget TFY4260 kan fungere som en slik felles materieell. Alternativt materieell kan også være den tilsvarende, men litt kortere artikkelen i Ref. [16].

2.2 Erfaring med å jobbe både i prosjektform og selvstendig

Studenter får erfaring både med selvstendig arbeid og det å jobbe i grupper. De fleste fag bærer likevel preg av at studentene jobber alene.

Det å jobbe i gruppe og med prosjektform er spesielt fokusert på i faget “Eksperter i Team”, et fag studentene ved MTFYMA har i fjerde klasse. Ellers har også mange av de eksperimentelle fagene undervisning som foregår i små grupper. I noen fag gjennomføres større arbeider som samarbeidsprosjekter (f.eks. TFY4185, TFY4190 og TBT4102). Sammen gir disse fagene relevant trening i å jobbe i prosjektform sammen med andre. Denne erfaringen er veldig nyttig i arbeidslivet.

Det er uklart om studentene ved BFY som ikke følger noen av fagene TFY4185, TFY4190 eller TBT4102 får tilsvarende trening i å jobbe i prosjektform sammen med andre over flere uker.

2.3 Formulere en testbar hypotese

Det å formulere en testbar hypotese eller et forskningsspørsmål er noe vi anser som veldig nyttig i arbeidslivet. Det kan være utfordrende å gjøre dette på en god måte, og de fleste trenger mye trening for å lære seg å formulere gode hypoteser.

De aller fleste av de eksperimentelle oppgavene i fagene TMT4110, FY1001, FY1003, TFY4163, TFY4165, TFY4185, TFY4220 og TFY4190 har formulerte læringsmål. Imidlertid er det få eller ingen av oppgavene i disse fagene som presenterer et klart formulert forskningsspørsmål eller testbar hypotese som grunnlag for eksperimentet. Det ser heller ikke ut til at noen eksperimentelle oppgaver i programmet MTFYMA trener studentene i selv å formulere en testbar hypotese. Mange av de eksperimentelle oppgavene har som læringsmål å “studere” eller “undersøke” en egenskap. Disse formuleringene er ikke testbare: det er ikke mulig å vite om målet er oppfylt eller ikke. Dette gjør at målet med selve eksperimentet er implisitt. Et implisitt mål er uklart, og gjør det senere vanskelig å skrive en god vitenskapelig rapport (se seksjon 2.1).

2.4 Kunnskap om god dokumentasjonspraksis

Undervisningen i eksperimentelle ferdigheter bruker en generell ressurs i Perssons kompendium [13], men også mange tilleggsskriv fra de forskjellige faglærerne. Eksempler på tilleggs-skriv er heftet til Persson i emnet FY1001 [14]. Det generelle kompendiet [13] ser ut til å beskrive at en personlig, håndskrevet journal er det foretrukne mediet for å dokumentere ideer, protokoller, planer, eksperimentelle oppsett, beregninger og resultatvurderinger. Siden dokumentasjonspraksis er i stor endring, kan denne beskrivelsen virke noe snever.

Kompendiet i TMT4110 gir gode forslag til hvordan studentene skal strukturere tabeller og journal for samtidig innsamling av måledata underveis i eksperimentet. Dermed gir labøvelsene i TMT4110 studentene mye trening i manuell datainnsamling. Faget gir studentene en grunnopplæring i manuell datainnsamling som er relevant og tilstrekkelig for arbeidsgivere. Studieprogrammet har ikke en liknende, veiledet trening i manuell datainnsamling i noen av fysikkfagene.

Ingen av kompendiene eller skrivene ser ut til å gi noen tydelige henvisninger til etablerte retningslinjer for “*good documentation practices*” (GDP) eller “*good laboratory practice*” (GLP). Praktiske henvisninger til GDP kan være f.eks. Wikipedia [20] eller kapittelet “Good Documentation Practices” i Ref. [1]. En praktisk henvisning til GLP kunne være f.eks. deler av OECD sine prinsipper [11].

2.5 Kjennskap til risikoanalyse

Kompendiet i faget TMT4110 gir en innføring i “*failure modes and effects analysis*” (FMEA) for risikoanalyse og viser risikomatriser. Kompendiet gir en innføring i merking av kjemikalier og bruk av “*material safety data sheets*” (MSDS). Helse, miljø og sikkerhet (HMS) er behandlet som eget punkt i hver labøvelse. Labøvelsene 5–10 i faget TFY4190 gir trening i å gjennomføre en risikoanalyse etter FMEA-metodikk. HMS blir nevnt i røntgendiffraksjonsoppgaven i TFY4220, der studentene skal måle røntgenstrålingen fra instrumentet. Til sammen gir disse fagene studentene en grunnopplæring i risikoanalyse som er relevant og tilstrekkelig for arbeidsgivere.

2.6 Kunnskap om vanlig brukte måleteknologier

Faget FY1001 gir studentene kunnskap om å logge data fra en sensor og bruke sensorprodusentens egne programvare. Fagene TFY4185 og TFY4190 utvikler disse kunnskapene betydelig og gir kunnskap om bruk av Labview og spesialsydd programvare for sensorer og datalogging. Disse kunnskapene er svært nyttige og direkte anvendbare i mange typer jobber innenfor forskjellige fagfelt.

Faget TFY4220 gir studentene kunnskaper om FTIR-spektrometri, røntgendiffraksjon og TEM. Alle disse teknikkene er vanlige å bruke innenfor forskning og utvikling og i enkelte typer industri. SEM er også mye brukt i flere bransjer i arbeidslivet. Faget TMT4110 gir studentene kunnskaper om et bredt spekter av vanlige teknikker i kjemisk laboratoriearbeid. Teknikkene er vanlige å bruke innenfor enkelte typer industri.

Faget TFY4260 gir studentene kunnskaper om cellekultivering, flowcytometri, måling av bioimpedans, farging, merking, og forskjellige mikroskopiteknikker. Mikroskopiteknikker er svært vanlige å bruke i mange typer jobber innenfor forskjellige fagfelt. Farging, merking, cellekultivering og flowcytometri er svært vanlige teknikker innenfor forskning og utvikling i biologi, medisin og biofysikk.

Faget TBT4102 gir studentene kunnskaper om kromatografi og elektroforese. Begge disse teknikkene er vanlige å bruke innenfor forskning og utvikling og i enkelte typer industri.

To av laboratorieoppgavene i faget FY1001 og alle laboratorieoppgavene i fagene FY1003, TFY4163 og TFY4165 har preg av å være demonstrasjoner. Laboratorieoppgavene ser ut til å være ment å støtte teoriundervisningen og ikke gi studentene faglige kunnskaper utover det som også formidles gjennom forelesningene.

2.7 Kunnskap om eksperimentdesign

Etter vår observasjon er undervisningen i eksperimentelle ferdigheter som regel organisert som en trinnvis øvelse som studentene ledes gjennom. Selv om studentene selv skal gjennomføre det praktiske arbeidet, legger undervisningen ikke til rette for at studentene selv skal finne et egnet

måleoppsett eller skrive protokoll. Vi noterte oss to unntak: TFY4190 og TBT4102. I TFY4190 skal studentene planlegge, og gjennomføre et eksperiment og skrive rapport, og i TBT4102 skal studentene skrive protokoll, gjennomføre eksperimentelt arbeid, og skrive rapport.

Opgaver med trinnvise instruksjoner kan egne seg for å skape forståelse av en fysisk egenskap eller mekanisme. Likevel, i arbeidslivet er det sannsynlig at mange studenter forventes å kunne omsette komplekse oppgaver eller problemstillinger til et eksperiment som kan hjelpe til å ta en beslutning, komme videre med oppgaven eller kaste lys over problemstillingen. Det kan være at studentene blir bedre forberedt på slike situasjoner med en laboratorieundervisning som i mindre grad bygger på trinnvise instruksjoner.

2.8 Kunnskap om beregningsmetoder og -verktøy

De obligatoriske fagene som inngår i studieprogrammene MTFYMA og BFY inneholder en klar basis innenfor beregningsmetoder. Dette introduseres hovedsaklig gjennom TMA4100 og TMA4320, men også lineær algebra-delen av TMA4110 er viktig (eller MA1202 for BFY). TMA4320 er valgbart på BFY. I fagretningen “Teknisk Fysikk” ved MTFYMA er også faget TFY4235 spesielt relevant. Det fremstår for oss som at studentene får en ganske god opplæring i det matematiske grunnlaget for beregningsmetoder og delvis også data-analyse.

Opplæring i bruk av generiske verktøy og metodikk ser ut til å være mer fraværende. Det vil si, den typiske fysikkstudent blir per idag ikke eksponert for revisjonskontrollsystemer, kodedokumentasjon og metoder for å besørge gjenbruk av kode, numerisk løsning av multifysikkproblemer eller bruk og programmering av HPC-systemer. Det er også lite eller ingen fokus på maskinlæringsmetoder (selv om disse undervises i faget TMA4268), som for tiden er populært i industrien. Maskinlæring er et eksempel på en metodikk hvor fysikkstudentene kunne hatt anvenderkompetanse fremfor det å kunne alle de statistiske og matematiske metodene som ligger bak. Maskinlæring og regresjon er og vil i fremtiden være viktige bestanddeler av all dataanalyse.

2.9 Kunnskap om programmering

Studentene på MTFYMA og BFY har ett eller flere obligatoriske programmeringsfag. Under begge programmene er faget TDT4110 (IT-grunnkurs) obligatorisk. Den varianten som fysikkstudentene følger er basert på programmeringsspråket Python¹. Studentene blir gitt en generell introduksjon til informasjonsteknologi. Videre lærer de grunnleggende Python-programmering som det å kunne definere og bruke variabler, tabeller, aritmetiske og logiske uttrykk, løkker, metoder/funksjoner, filbehandling med mer. Det ser ut som det er lite fokus på numeriske beregninger i dette faget. For eksempel får ikke studenten i faget TDT4110 kunnskap eller opplæring i bruk av kjernepakken NumPy, SciPy eller matplotlib. Disse pakkene er essensielle Python-pakker for numeriske beregninger og vitenskaplig data-analyse. Derfor blir disse pakkene kort innført i øvingsopplegget i flere fysikk-fag samt brukt i faget TMA4320 (som mange BFY studenter ikke tar), men dette er ikke tilstrekkelig til at studentene kan sies å ha god kjennskap til innholdet og bruken av disse viktige Python-pakkene for numeriske beregninger.

Studieprogrammet MTFYMA har ytterligere ett rent programmeringsfag: “Prosedyre- og objektorientert programmering” (TDT4102). Her blir studentene gitt en introduksjon til programmeringsspråket C++ og dets objektorienterte karakter. Også i dette faget synes det å være lite fokus på numeriske beregninger. Videre har MTFYMA-studentene på våren det andre året det obligatoriske faget “Introduksjon til vitenskapelige beregninger” (TMA4320) hvor store deler av faget består av programmering. Dette faget består av to hoveddeler. Den første delen gir en introduksjon til numerisk matematikk, mens den andre delen er beregningsorienterte hvor studentene på datamaskinen skal løse tre konkrete beregningsorienterte problemstillinger hentet fra fysikk, biofysikk og matematikk. Det bør bemerkes at BFY studentene ikke har fagene TDT4102 og TMA4320 som obligatoriske emner slik som er tilfelle for MTFYMA. Dog kan begge disse fagene velges av BFY studentene.

Historisk har det vært lite (og delvis ubetydelig) fokus på numeriske beregninger og data-analyse i den obligatoriske delen av studieprogrammene MTFYMA og BFY. Som et resultat av dette, ble det fra og med høsten 2019 innført en såkalt *ferdighetsstreng* i numeriske beregninger.

¹ Andre studieretninger bruker Matlab som programmeringsspråk i dette faget.

Hovedtanken som lå til grunn for denne revisjonen av studieprogrammene var at enkelte ferdigheter ikke utvikles best i enkeltemner men på tvers av emner, både i parallell og kronologisk. Man startet med å identifisere numeriske metoder og algoritmer som ble vurdert sentrale for studentene å ha kjennskap til, og så ble obligatoriske beregningsorienterte øvinger laget rundt problemstillinger som brukte disse metodene og plassert som en del av de obligatoriske fysikkemnene hvor den aktuelle tematikken passet best inn. Målet var at summen av disse aktivitetene skulle gi studentene en “numerical toolbox” når de var ferdige med studiet. Per utgangen av 2020 er denne modellen innført for fysikkemnene i første året og enkelte av fysikkemnene som blir tatt det andre året. Planen er å videreføre dette til å gjelde de fleste fysikkemnene som er obligatoriske for studieprogrammene MTFYMA og BFY. Eksempler på hva studentene blir eksponert for i de ulike emnene er som følger:

- FY1001 (Mekanisk fysikk): bruk av NumPy og enkel plotting med matplotlib, samt løsning av vanlige differensialligninger (ODEer) med framleings Euler.
- FY1003 (Elektrisitet og magnetisme): tegning av grafer i 3D og konturplott og løse Lapace’s likning i 2D via iterative metoder.
- TFY4163 (Bølgefysikk og fluidmekanikk): introduksjon til SciPy, løsning av 2. ordens ODEer via Euler-Cromer, samt Runge-Kutta metoder via en modul fra SciPy.

3 Behov i fremtidens samfunn

3.1 Generiske ferdigheter

Arbeidsgivere vil forvente og vil ha nytte av at uteksaminerte studenter fra MTFYMA har faglig kunnskap innenfor fysikk, kjemi, numerikk, matematikk, statistikk og programmering. Arbeidsgivere vil forvente at studentene har en solid teoretisk kunnskapsbase og at de kan gjøre avanserte beregninger, både analytiske og numeriske. Det vil forventes både evne til selvstendig arbeid og samarbeid i prosjekt-team.

3.1.1 Sammenfatte resultater av en undersøkelse i en rapport

Avhengig av fagfelt og arbeidssituasjon vil det i arbeidslivet kreves forskjellige typer rapporter. Ofte er forskningsspørsmålet fra industrikunden mer i retning av “*Hvordan kan vi forbedre prosessen vår?*” og rapporten er bygd opp som “*dette gjorde vi og dette fant vi ut*”. I yrkeslivet kommer man også borti blant annet rapporter om bygging av labutstyr, etablering av algoritmer, testing av kildekode, komparative studier, testing av reproduserbarhet, tilstandsrapporter, revisjonsrapporter og evalueringsrapporter. Noen rapporter er lange og omfattende (*monograph*) mens andre er ekstremt korte og konsise (e.g. *letter to the editor* og *technical notes*) og ofte er memo (i Powerpoint-format) den foretrukne rapporteringsformen til en kunde.

En vitenskapelig rapport er egnet til å dokumentere et arbeid på en strukturert måte som gjør det mulig å gjenskape hva som ble gjort og vurdert. Den vitenskapelige rapporten har som formål å gjøre det tydelig for leserne hvilket problem som er behandlet, hvilken metode som er brukt til å behandle problemet og hvilket resultat metoden ga. Videre skal rapporten gi en vurdering av resultatet og en konklusjon eller anbefaling.

Den vitenskapelige rapporten er mye brukt i industri og oppdragsforskning, selv om resultatene ikke nødvendigvis skal bli en vitenskapelig artikkel. Strukturen i en vitenskapelig rapport er godt egnet som skriftlig dokumentasjon i mange sammenhenger, for eksempel til å presentere valg av leverandør for et innkjøp, valg av arkitektur for en IT-applikasjon, valg av teknisk løsning for et problem i industriproduksjon, resultater av et vitenskapelig eksperiment. De formelle kravene til en vitenskapelig rapport er gode og nyttige verktøy for å sikre lesbarhet og sporbarhet i argumentasjonen. Noen eksempler på formelle krav er å ha figurtekst under figurer, tabelltekst (som oftest) over tabeller, å referere til alle figurer og tabeller i teksten, og å skrive referanseliste riktig.

En vitenskapelig rapport må også diskutere og tolke resultatene i lys av godt beskrevne antagelser, forutsetninger og betingelser, og sammenlikne dem med eventuelle resultater som er oppnådd av andre. Dette plasserer undersøkelsen/eksperimentet i sammenheng med allerede etablert kunnskap. Dette er igjen viktig for å vurdere resultatenes legitimitet. Til sist må metodikken som er benyttet for å oppnå resultatene beskrives tilstrekkelig detaljert til at andre kan reproducere rapportens resultater. Å kunne skrive en vitenskapelig rapport er derfor en generisk ferdighet som er etterspurt i arbeidslivet nesten uavhengig av fagfelt og arbeidsoppgaver.

Øvelse i å skrive vitenskapelige rapporter krever at arbeidet egner seg for rapportskriving. Mange av eksperimentene studentene gjør har preg av å være demonstrasjoner av fysiske effekter. Demonstrasjoner kan være gøy for studentene og det kan hjelpe med å forstå teori. Likevel, demonstrasjoner er ikke alltid godt egnet for å trene på rapportskriving. En vitenskapelig rapport er ofte skrevet for å besvare et klart formulert forskningsspørsmål eller hypotese. Det er svært få, om noen, av de oppgavene studentene får som formulerer et klart forskningsspørsmål eller hypotese. Da er det viktig at studentene får innføring i hva slags type rapport som kreves av dem.

3.1.2 Erfaring med å jobbe både i prosjektform og selvstendig

Mange oppgaver i arbeidslivet er organisert som et prosjekt med en prosjektleder og prosjektmedarbeidere. Dette gjelder også eksperimentelt arbeid. Det er nyttig for arbeidslivet at studentene får erfaring med å utføre eksperimentelt arbeid sammen med andre i prosjektform. Når et eksperiment er organisert som et prosjekt med flere medarbeidere settes det flere krav til dokumentasjonspraksis hos hver enkelt medarbeider.

Samtidig som prosjektet er en vanlig arbeidsform er arbeidsgivere også avhengig av at arbeidstakerne kan jobbe selvstendig. Evne til selvstendig arbeid kan bety å ha strategier for å kunne

angripe en kompleks problemstilling på en konstruktiv måte.

Å jobbe i prosjekt, der det totale arbeidsomfanget er delt opp i arbeidspakker/delprosjekter/delleveranser krever at den/de som har planlagt prosjektet klarer å se hvordan de ulike arbeidsoppgavene støtter opp om og avhenger av hverandre. Dette stiller krav til systematisk tenking og analyse av problemstillingen som skal løses og vil være en ettertraktet ferdighet i arbeidslivet. Risikoanalyse for å kunne planlegge for uforutsette hendelser er en kjernekompetanse i prosjektplanlegging. Herunder ligger bl.a. planer for å håndtere forsinkelser, uforutsette hendelser/effekter, feilaktige antagelser/forutsetninger, etc.

3.1.3 Formulere et forskningsspørsmål eller en testbar hypotese

Motivasjonen for et eksperiment kan ha forskjellige kilder, for eksempel:

- Å teste en ny teori.
- Å ha en kunde som betaler.
- Å velge en optimal teknologi for noe som skal utvikles.
- Å finne en løsning på et problem som har oppstått.

Hvilken motivasjon som er vanlig kan variere mellom sektorer og fagfelt. I mange situasjoner der behovet er å velge optimal teknologi eller løse et eksisterende problem vil det være mest kostnadseffektivt å gjøre eksperimenter fremfor å utvikle nye teorier. Det kan kreve store ressurser å utvikle teori for komplekse situasjoner som for eksempel fukting på overflater med varierende ruhet eller spredning av lys på en samling partikler med ujevn form og varierende størrelse. Eksperimentelle resultater kan gi den nødvendige innsikten direkte.

Når eksperimenter skal brukes som grunnlag for å velge teknologi eller løse eksisterende problem er det essensielt at eksperimentet bygger på en klart formulert problemstilling (forskningsspørsmål) eller en testbar hypotese. Uten et klart forskningsspørsmål er det usikkert hvorfor eksperimentet skal gjennomføres. I arbeidslivet er det vanligvis bare eksperimenter med en klar nytteverdi som blir gjennomført. Derfor er det nyttig for arbeidslivet at arbeidstakerne har trening i å omsette et komplekst spørsmål i en eller flere forskningsspørsmål eller klart formulerte hypoteser.

3.1.4 Kunne redegjøre for antagelser som ligger til grunn for modell/ eksperimentutforming og gjeldende teorier/hypoteser

Ved anvendelse av matematiske modeller og sammenlikning med eksperimentell data er det essensielt å kunne redegjøre for hvilke antagelser som ligger til grunn for modellen og eksperimentet og hvilken betydning antagelsene vil ha for tolkningen av resultatene. Dette stiller krav til innsikten i problemstillingen som studeres og vil kunne brukes for f.eks. å kritisere eller forbedre modellen når det er stort avvik mellom modell og eksperiment. Å kunne identifisere og gjøre rede for premissgivende antagelser både i eget og andres arbeid er vesentlig for objektiv tilnærming til både nye og gamle problemstillinger og debatter.

3.1.5 Kunnskap om god dokumentasjonspraksis

I en jobbsituasjon må eksperimentelt arbeid dokumenteres. Det er nyttig for arbeidslivet at arbeidstakerne har kjennskap til retningslinjer for god dokumentasjonspraksis (GDP), god laboratoriepraksis (GLP), og dataintegritet (DI) og vet hvor de kan finne oppdateringer av disse retningslinjene. Dette er viktig både for å sikre god faglig/vitenskapelig integritet ved at resultater og metoder er etterprøvbare, og for å kunne spore/dokumentere eventuell eksponering for f.eks. helseskadelige stoffer/kjemikalier, stråling etc.

Dokumentasjonspraksis er i stor endring for tiden. Ved noen arbeidsplasser brukes det kun elektroniske journaler som kan deles i et team mens andre steder kreves fortsatt håndskreven journal. Noen arbeidsplasser bruker Laboratory Information Management System (LIMS) systemer til dokumentasjon. De fleste som finansierer offentlig forskning og mange vitenskapelige tidsskrifter krever nå at alle data og kode fra et forskningsprosjekt skal lagres på en FAIR (findability, accessibility, interoperability, and reusability) måte. Samarbeidsverktøy for forskningsprosjekter har også

utviklet seg slik at det er enklere enn før å dele journal, data og kode i sanntid. Det er nyttig for arbeidsgivere at nyutdannede studenter er forberedt på denne virkeligheten. Det er vesentlig at studentene lærer og trenes i de grunnleggende prinsippene for dokumentasjon og så etterhvert lærer og trener på hele kjeden av sporbarhet i journaler, data, kode, tolkninger og så videre.

3.1.6 Kjennskap til risikoanalyse

Risikoanalyse bør ikke kun omhandle ulykkespotensiale/HMS på lab og verksted, men også: planlegging (tid, ressurser), forsinkelser, budsjettoverskridelser, avvikshåndtering, leveranseproblemer, etc. i prosjekter. Og i *risk analysis* ligger også å identifisere og utnytte uforutsette muligheter og gunstige effekter. Mange arbeidsplasser og bedrifter bruker standardiserte metoder for risikoanalyse, f.eks. “Failure Mode and Effect Analysis” (FMEA). Det er nyttig for arbeidsgivere at nye ansatte har kjennskap til konseptet risikoanalyse, og gjerne også kjennskap til en metodikk for å gjennomføre risikoanalyse. På grunnleggende nivå vurderes det at “kjennskap til risikoanalyse” bør handle mer om tankesett enn konkrete verktøy. Trening i risikoanalyse bør ikke begrenses til det som kan gå galt på lab, men bør også inkludere prosjektrisiko — f.eks. hendelser/forhold som kan medføre forsinkelser eller redusert kvalitet i prosjekt.

3.2 Eksperimentell kompetanse

I tillegg til de generiske ferdighetene som er beskrevet i seksjon 3.1 er det flere formål som er spesifikke for laboratorieundervisning i eksperimentelle ferdigheter. Formålet med undervisningen bør være tydelig for studentene i forkant av undervisningen. Mulige formål kan være for eksempel:

- Å lære å designe eksperimenter.
- Å lære måleteknikk eller bruk av spesielle apparaturer eller metoder.
- Å bidra til innlæring av teori som studentene har fått forelest. Labkurs kan brukes for å støtte opp under teoretiske kurs som går parallellt i tid eller ta opp igjen temaer som har vært berørt tidligere i utdanningen.
- Å lære om spesifikke fysiske lover/fenomener som ikke dekkes i de teoretiske kursene.
- Å lære om kausalitet og korrelasjon.
- Å erfare egenverdien av eksperimenter. Utviklingen av de fleste vitenskapelige teorier starter med observasjoner/eksperimenter som ikke kan forklares med eksisterende modeller/teori. Det virker avgjørende at studentene forstår hvorfor eksperimenter skal utføres og hvordan disse støtter opp om teori og beregningsaktiviteter i ikke bare det aktuelle kurset, men hele fysikkstudiet. Å erfare egenverdien av eksperimenter bidrar også til å bygge eksperimentell intuisjon og evne til å se hvilke erfaringer som kan generaliseres.

3.2.1 Kunnskap om eksperimentdesign

Et eksperiment bør være designet slik at det er egnet til å teste en gitt hypotese. Det må være en protokoll eller plan for eksperimentet. Et eksperiment må isolere den eller de egenskapene som vil gjøre det mulig å bekrefte eller avkrefte hypotesen. Det kan være vanskelig å designe et eksperiment som tester en gitt hypotese.

Det er nyttig for arbeidsgivere at arbeidstakerne har kunnskap om framgangsmåter som kan brukes for å designe et eksperiment, og at de har noe trening i å designe et eksperiment som gir den nøyaktigheten som er nødvendig for å kunne teste hypotesen. I en jobbsituasjon vil det vanligvis være begrensede ressurser som kan brukes på et eksperiment, f.eks. tid og/eller penger. Det er nyttig for arbeidsgivere at en arbeidstaker har opplæring i følgende ferdigheter:

- Bestemme hvilken nøyaktighet et eksperimentet må ha for å kunne avkrefte eller bekrefte en hypotese med en bestemt grad av sikkerhet.
- Diskutere alternative måleteknikker, identifisere hvilke(n) som er egnet, og finne egnet måleutstyr og oppsett.

- Å kunne identifisere kilder til feil i målinger og vite hvordan en kvantifiserer disse. Vurdere antall målinger/replikater som må finnes for å ha en akseptabel verdi for tilfeldig feil, beregne feilestimat for de målte verdiene, og vurdere om noen dominerende feilkilder kan/bør minkes.
- Å kunne behandle måledata gjennom statistisk behandling, og å tilpasse modeller til måledata med støy.
- Sørgje for at eksperimentoppsettet vil gi gyldige data: at måleutstyr er kalibrert og at oppsettet tilfredsstiller en “system suitability test” før det brukes til å samle inn data.
- Bruke automatiserte løsninger for datainnsamling og evt. data-analyse.
- Budsjettere målekampanje (tid, ressurser, kostnad) basert på fastsatte kriterier vedrørende måleteknikk, antall målinger/eksperimenter, nøyaktighet, etc.
- Planlegge og avpasse eksperimentet/målekampanjen etter begrensninger på tid og kostnad og ønsket nøyaktighet på resultatet.

3.2.2 Kunnskap om vanlig brukte måleteknologier

Også i fremtiden er det viktig at studentene kan bruke måleinstrumenter og teknikker som er mye brukt i fysikk. I tillegg er det nyttig at studentene er i stand til å sette opp automatisk datainnsamling fra et måleoppsett. Arbeidsgivere forventer ikke at nylig uteksaminerte studenter har detaljkunnskap om den nyeste teknologien og metodikken innenfor et smalt fagfelt eller bruksområde. I næringsliv og anvendt forskning forventes det at alle ansatte har grunnkunnskaper som setter dem i stand til å forstå og anvende ny teknologi og metodikk ettersom den blir tilgjengelig og er til nytte i arbeidsoppgavene som skal utføres. Innen academia forventes det at ansatte i tillegg selv er i stand til å utvikle ny teori, teknologi og/eller metodikk.

Det vil være naturlig at studentene kan måle grunnleggende fysiske størrelser som tid, lengde, masse, kraft, temperatur, strøm og spenning, og at de har prøvd ut forskjellige prinsipper for å måle disse størrelsene. Det er også naturlig at studentene kan noe om den historiske utviklingen av grunnlaget for måleenhetene våre (SI-enhetene) og hvilke fysiske prinsipper som i dag definerer enhetene og hvilke målinger som ligger til grunn for sentrale fysiske konstanter.

3.3 Digital kompetanse og beregningsorientert fysikk

I de foregående seksjonene har vi diskutert de generelle behovene og spesifikke behov for eksperimentell kompetanse for fremtidens samfunn. Her vil vi se mer spesifikt på behovene for digital kompetanse og beregningsorientert fysikk.

Kunnskapen om beregningsmetoder, algoritmisk tenkning, data-analyse og generiske verktøy for å bruke slike metoder blir stadig mer etterspurt i næringslivet og i forskning generelt. Slik kunnskap er nødvendig for eksempel i prosessen med å samle inn og analysere numeriske data, gjøre simuleringer, operere avanserte, teknisk utstyr, eller det å numerisk løse matematiske likninger. Kunnskapen er essensiell f.eks. innenfor felter som *kunstig intelligens* og *maskinlæring* som mange ser store potensielle muligheter innen. Mange bedrifter ønsker å bli mer “data-drevne”, noe som ofte betyr at såkalt *stordata* blir en del av de utfordringene man må forholde seg til. Stordata er betegnelsen på store og ofte *uorganiserte* datasett. Lesing og ikke minst analysen av stordatasett gjør ofte at tradisjonelle metoder, som fungerer utmerket for mindre datasett, ikke lenger fungerer på en hensiktsmessig måte. Alternative analysemetoder må derfor utvikles for slike forhold.

I de følgende delseksjoner vil vi se litt nærmere på aspekter rundt naturvitenskapelige beregninger og god kodeutviklingspraksis.

3.3.1 Kunnskap om naturvitenskapelige beregninger

Vitenskapelige beregninger har som mål å utvikle nøyaktige metoder og modeller som setter oss i stand til å studere komplekse naturvitenskapelige og teknologiske system og fenomen. Mange av disse er såpass komplekse at fysiske eksperimenter fort blir for kostbare eller nesten umulige å gjennomføre i et laboratorium. Det blir stadig mer vanlig å erstatte kompliserte eksperimenter med

numeriske beregninger. Numeriske beregninger, matematisk modellering, og evne til å behandle og analysere store datasett spiller dermed en sentral rolle i moderne vitenskap og teknologisk utvikling. Digital kompetanse og innsikt samt beregningsferdigheter bør dermed være naturlige elementer i et naturvitenskapelig studieprogram.

Med begrepet *naturvitenskapelige beregninger* mener vi det å løse vitenskapelige og teknologiske problem ved hjelp av datamaskiner. Med kompetanse i naturvitenskapelige beregninger sikter vi til en samlet kompetanse i det som på engelsk kalles for “computational science” og “data science”². For et studium i fysikk vil dette inkludere metoder for analyse av data, slik som behandling av data og statistisk analyse, metoder fra numerisk analyse, analytiske metoder, symbolske beregninger og mer. Slik vi bruker ordet *beregninger* i teksten her inkluderer det dermed metoder fra både beregningsvitenskap og datavitenskap, samt numeriske, symbolske og analytiske beregninger.

Matematisk modellering er ett av kjerneområdene for en fysiker. Det å observere et fysisk fenomen, ofte via eksperimenter, for så å kunne beskrive det via matematiske ligninger som man så løser analytisk og/eller numerisk er kunnskap som gjør mange fysikere ettertraktet i næringslivet. I mange tilfeller ender man opp med hva som idag blir referert til som multifysikk og/eller multiskala problemer. Løsningen av slike problemer er utfordrende og krevende. For eksempel eksisterer det flere veletablerte multifysikk-software (både kommersielle og gratis open source) som studentene kunne ha stor nytte av å bli kjent med. Man kunne for eksempel tenke seg at studentene lærte om et fysisk fenomen ved å studere dette via numeriske eksperimenter gjort via slike multifysikk programvare-pakker.

I dag ser man en trend hvor næringslivet i større og større grad ønsker å benytte mer og mer kompliserte simuleringmodeller. Dette skyldes delvis at det ofte er langt mer kostnadsaffektivt å benytte storskala simuleringer der hvor man tidligere kun hadde muligheter til å gjøre eksperimentelle studier. Mer bruk av store og tidkrevende simuleringer betyr også at behovet for “high-performance computing” (HPC)-ressurser og personer som kan bruke og programmere slike vil vokse i fremtiden. Selv en ganske ordinær datamaskin (desktop eller laptop) har idag flere beregningskjerner (CPU cores), slik at parallelle beregninger kan gjennomføres selv på ganske vanlige datamaskiner. I programmeringsrammeverket Python finnes modulen *multiprocessing* som muliggjør parallellisering av Python-kode. Studentene vil kunne ha nytte av å undersøke hvilke problemer (f.eks. problemets art og størrelse) som vil ha nytte av å parallelliseres på deres egne datamaskiner.

For å oppsummere, så mener vi at relevant kompetanse innenfor naturvitenskapelige beregninger, samt beregnings- og datavitenskap, inkluderer blant annet:

- Det å kunne utlede, verifisere og validere kjente algoritmer.
- En forståelse av en gitt algoritmes begrensninger.
- Kjennskap til sentrale algoritmer anvendt i naturvitenskapen.
- Forstå hvordan ulike algoritmer kan brukes i naturvitenskapelig modellering.
- Utvikle en algoritmisk tenkning for å tilegne seg en dypere innsikt om naturvitenskapelige og teknologiske problem.
- Kjennskap til sentrale algoritmer og numeriske metoder i data- og beregningsvitenskap.
- Kunnskap om hvordan disse kan implementeres med eksisterende programvare for å løse vitenskapelige problem.
- Evne til å utvikle og anvende avanserte numeriske metoder i vitenskapelige og teknologiske problemer.
- Evne til å generalisere matematiske algoritmer og anvende de på nye vitenskapelige og teknologiske problem.
- Kjennskap til symbolske beregningssystemer, slik som Maple, Mathematica, Python SymPy, og hvordan slike kan brukes til klassiske matematiske operasjoner.

²Vi har valgt henholdsvis **beregningsvitenskap** for det engelske begrepet “computational science” og **datavitenskap** for det engelske samlebegrepet “data science”.

- Gode ferdigheter i høynivå programmeringsspråk som Python eller liknende.
- Gode ferdigheter i kompilerte programmeringsspråk som feks C++ eller liknende.
- Bevissthet rundt eksekveringstid og flaskehalser i software. Herunder bl.a. å kjenne til nytten av å “benchmarkere” egenprogrammerte algoritmer mot optimaliserte standardbiblioteker og å undersøke skalerbarheten av parallellisert kode.

3.3.2 Kunnskap om god kodeutviklingspraksis

I et stadig mer digitalisert næringsliv bør studenter være kjent med verktøy for versjonskontroll av kildekode og rutiner for testing (f.eks. enhetstesting) og godkjenning av ny eller forbedret kode. Hvorvidt studenter bør være kjent med elementer av sikker kodedesign samt tungregning bør vurderes. I distribuerte kodeutviklingsprosjekter (i tid eller rom) bør studentene være kjente med ulike arbeidsformer som benyttes i industrien, samt metoder for “automatisk” dokumentasjon av kode (f.eks. doxygen).

God kodeutviklingspraksis er en norm innenfor mange deler av industrien. I deler av den vitenskapelige forskningen etterstreber man også lignende krav, men i akademia ser man et langt større spenn i kravene rundt slike aspekter. Det er likevel, etter vår mening, essensiell kunnskap. For eksempel, om man har gjennomført en analyse av et målt datasett, er det kritisk viktig å vite eksakt hvilken versjon av analysekoden som ble brukt når analysen ble gjennomført. Hvis det ikke blir gjort vil man i mange tilfeller ikke være istand til å reprodusere de opprinnelige analyseresultatene selv med de samme rådataene. Da mister analysen mye av sin verdi, siden man ikke kan dokumentere hvilke analysesteg som rent faktisk har blitt gjort på rådataene.

Det å kunne gjenbruke og dokumentere programkode er viktig i næringslivet, da andre enn de personene som opprinnelig skrev koden skal kunne bruke den på en riktig måte i fremtiden. På denne måten sikrer også bedriften kontinuerlig og forsvarlig drift selv om sentrale medarbeidere skulle slutte eller bli omplassert i bedriften.

3.4 Bærekraftsperspektiv

Norske og internasjonale bedrifters aktiviteter måles i økende grad mot FNs 17 bærekraftsmål for å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030 [5]. NTNU har forpliktet seg til å arbeide med bærekraftsmålene gjennom sin visjon *kunnskap for en bedre verden* og det tematiske satsningsområdet *bærekraft* [7, 8, 10]

Norsk Standard [17] inneholder en rekke verktøy som er egnet til å systematisere arbeidet med bærekraftsmålene innen ingeniørfaglige bransjer som f.eks. bygg og anlegg, petroleum, IKT, helse og matproduksjon. Noen generelle standarder er oppsummert på Standard Norges web-sider. Fremtidens ledere, forskere og ingeniører må påregne å måtte ha et aktivt forhold til disse. Det er hevet over tvil at fysikere vil ha en avgjørende rolle i oppnåelsen av FNs bærekraftsmål.

Der Norsk Standard har en naturlig plass i de bransjerrettede ingeniørutdanningene, er det uklart hvordan bærekraftsmålene naturlig kan introduseres i fysikkstudiet. Bærekraftsmålene er integrert i valgbare fag som for eksempel TMR2137, HIST3500 og TMMT4001. I tillegg er de valgbare fagene: FI3107, FI5205, FI5206 og IIKG3000 fokusert på etikk og personvern. Imidlertid bør det som et minimum forventes at bærekraftsmålene introduseres og arbeides med i fellesemnene (Ex.phil., Områdeemnet og Eksperter i Team) [9]. I tillegg kan man se for seg at tematikken kan belyses gjennom prosjektoppgaver og semesteroppgaver i øvrige fag.

3.5 Etske betraktninger

Følgende vitenskapsetiske moment kan gjerne implementeres i et studieløp:

- **Sikre sporbarhet til og reproduserbarhet av vitenskapelige resultat.** For kode og programvare: Ved hjelp av versjonskontrollprogramvare som Git og lignende, samt lagringsplass via tjenester som GitHub, GitLab, Bitbucket og andre, er det lett å opprettholde en historikk av vitenskapelig kodeutvikling. Her kan en også lagre resultat av bestemte kjøring og testresultat som letter reproduserbarhet av vitenskapelige resultat. Å gjøre kode

og resultat tilgjengelig, med god dokumentasjon, gjør det mulig for andre å teste og reprodusere publiserte resultat. Kunnskap om versjonskontrollprogramvare bør være inkludert i studieløpet.

For eksperimentelle data gir lagring av datasett i sentrale datalagre en tilsvarende mulighet for reproduksjon av resultater. Eksempler på slike lagre er *the European Open Science Cloud*, *Harvard Dataverse* og *Open Science Framework*. For eksperimentelle datasett med sensitive data er *Tjeneste for Sikker Datalagring* (TSD) utviklet ved UiO en velegnet tjeneste.

- **Korrekt sitering.** Studieløpet bør utvikle en god kultur i å sitere andres arbeid når vitenskapelige rapporter ferdigstilles, enten i kurs eller som en endelig avhandling eller prosjektarbeid. Biblioteksverktøy som Zotero, Mendeley og andre, gjør det enklere å sitere vitenskapelige arbeider og kan potensielt anbefales som verktøy.
- **Intellectual Property Rights (IPR), Medforfatterskap og riktig kredittering.** Studentene bør utvikle bevissthet rundt eierskap til intellektuelle verdier (IPR) samt kunne vurdere hvem som skal regnes som medforfattere på vitenskapelige rapporter og hvem som bør nevnes i f.eks. acknowledgements.
- **Regler ved samarbeid.** Studentene oppfordres til å utvikle samarbeidsprosjekter og jobbe i lag. Å kunne samarbeide med andre er en sentral ferdighet som er viktig i arbeidslivet. Programvare for vitenskapelig samarbeid og etiske retningslinjer for samarbeid bør integreres i studieløpet. Dette vil spesielt gjelde kurs der prosjektarbeid spiller en sentral rolle. Risikoanalyse ved planlegging av samarbeidsprosjekter bør bl.a. omhandle samarbeidsproblemer og hvordan slike skal løses. Studentene bør lære å sette opp enkle samarbeidsavtaler/kontrakter som regulerer bl.a. uenighet/konflikt i prosjektgruppen.
- **Vitenskapelig juks og plagiering.** Deling av data (se første kulepunkt) kan åpne for plagiering siden mange resultat vil være fritt tilgjengelige. Vitenskapelig juks, som for eksempel fabrikasjon av forskningsdata, kan forekomme på alle akademiske nivåer. Studieløpet bør derfor inneholde en diskusjon om temaer som juks og plagiering og deres følger. Programvare som Plagiarism Checker by Grammarly og liknende bør integreres i slike diskusjoner.

4 Sammenlikning med andre læresteder

Den eksperimentelle undervisningen og undervisning i numeriske beregninger ved NTNU er sammenlignet med andre læresteder.

4.1 Laboratorieundervisning ved EPFL, ETHZ og TUM

For å undersøke hvordan undervisningen i eksperimentelle ferdigheter er organisert ved andre europeiske læresteder, valgte vi å ta kontakt med tre utvalgte steder: *École Polytechnique Fédérale i Lausanne* (EPFL), *Eidgenössische Technische Hochschule i Zurich* (ETHZ) og *Technische Universität München* (TUM). Disse er alle blant de ti øverste på “QS World University Rankings” innenfor “Engineering and Technology” og har studieløp for bachelor- og mastergrad i fysikk og matematikk [3, 4, 18] som er sammenliknbare med MTFYMA ved NTNU. Vi organiserte videomøter på Zoom med lederne for laboratorieundervisningen ved disse tre europeiske lærestedene. Nedenfor står en oppsummering av diskusjonene i møtene. Mer detaljerte møtoreferater finnes i appendiks A.

Hovedtrekkene i tilbakemeldingene fra de tre europeiske lærestedene var like: de første to studieårene prioriterer de å lære studentene å bruke måleinstrumenter, å skrive rapporter, og å følge god laboratoriepraksis. Laboratorieoppgavene er basert på fysikk som studentene kan godt, og til dels på pensum fra videregående skole. Det å lære ny fysikk er ikke et uttalt mål de første studieårene. Det blir lagt stor vekt på rapportskrivning ved alle lærestedene. Studentene jobber i par som skriver 6 – 8 felles rapporter hvert semester. Rapportene skal følge oppsett og retningslinjer for vitenskapelige artikler. Alle rapportene blir rettet av laboratorieassistentene. Ved TUM går en laboratorieassistent nøye gjennom en rapport per semester sammen med studentene.

Ved alle de tre lærestedene synliggjøres laboratoriearbeid som et selvstendig fag i pensum. Faget blir mer omfattende utover i studiet og gir 4 - 8 ECTS per semester. Ved EPFL gis det karakter i faget mens ETHZ og TUM gir bestått/ikke bestått.

De tre europeiske lærestedene trakk også fram de samme to hovedutfordringene. Den første hovedutfordringen er å gi studentene klasseromsundervisning laboratoriearbeid, for eksempel i rapportskrivning, praktisk statistikk, feilanalyse, vitenskapelige siteringer, eller god laboratoriepraksis. Dette ble løst på forskjellige måter: med et eget kurs 4 timer/uke på EPFL, med en forelesning 1 time/uke ved ETHZ, og ved å gi ut kompendier og andre ressurser for selvstudium ved TUM.

Den andre hovedutfordringen er å etablere en sammenheng mellom de teoretiske fysikkforelesningene og laboratorieundervisningen. De tre lærestedene har alle svak kobling mellom tidspunktet for når en teori blir forelest og når den samme teorien eventuelt skal brukes i en laboratorieoppgave. Imidlertid unngår alle lærestedene de første studieårene at studentene skal gjøre laboratorieoppgaver som er basert på teori de ikke allerede har fått forelest. Laboratorieoppgavene baseres på kjent fysikk de første studieårene, slik at oppgavene fremstår som repetisjon av noe som er forelest på videregående skole eller en gang i løpet av forrige semester. Fra tredje studieår kan studentene risikere å få laboratorieoppgaver som baserer seg på fysikk de ikke allerede har fått forelest. Da får studentene *eksperimentmanualer* som beskriver den nødvendige teorien til hver oppgave slik at de får den forståelsen de trenger for å gjennomføre oppgaven og ha utbytte av den.

Dette betyr også at læringsmålene for laboratorieundervisningen endrer seg noe fra og med tredje studieår. Da blir det lagt mer vekt på at studentene skal lære avansert og ny fysikk gjennom laboratorieundervisningen. Samtidig må rapportene ha høyere kvalitet for at studentene skal bestå laboratoriekurset. Ingen av lærestedene har mange oppgaver som kombinerer eksperimenter og beregningsorientert fysikk i dag, men flere uttrykte ønske om å lage flere slike oppgaver. Ved ETHZ finnes det noen laboratorieoppgaver der det eksperimentelle arbeidet gjøres med simuleringer.

4.2 Computing in Science Education ved Universitetet i Oslo (UiO)

Numeriske beregninger har blitt integrert på et systematisk og helheltig vis ved Universitetet i Oslo siden 2003 via prosjektet *Computing in Science Education* (CSE).

Alle Bachelorprogrammer ved det Matematisk-Naturvitenskapelige fakultetet ved universitetet i Oslo har flere kurs som integrerer numeriske beregninger. "Fysikk og Astronomi"-programmet er i en særklasse, da alle sentrale fysikkurs i Bachelorgraden har numeriske oppgaver og prosjekter som teller ved endelig evaluering. Introduksjonen av numeriske metoder er integrert på et koordinert vis med grunnleggende matematikk- og informatikkurs ved UiO (kalkulus, flervariabel analyse, numeriske metoder, lineær algebra og programmering). De fleste studentene velger også, enten på slutten av Bachelorgraden eller ved begynnelsen av mastergradstudiet, et eller flere mer avanserte kurs i beregningsfysikk (FYS3150/FYS4150) og/eller kurs i numerisk matematikk, statistisk data-analyse og informatikk (FYS-STK3155/FYS-STK4155, STK-IN4300, MAT4110, IN3331, IN3200, IN5270).

CSE-prosjektet har vært og er avgjørende i en gjennomgående digitalisering og ved introduksjon av programmering og numeriske metoder ved UiO. Senteret for fremragende utdanning *Center for Computing in Science Education* [19] spiller nå en sentral koordinerende rolle i digitalisering av flere studieprogram ved UiO, med det nye Honors-programmet som et eksempel (<https://www.uio.no/studier/program/honours-programmet/>). Senteret har også utviklet over tid et stort forskningsprogram om beregninger og digital kompetanse ved universitets utdanning. Studentene ved "Fysikk og Astronomi"-programmet ved UiO har fått en gjennomgående introduksjon til betydningen av numeriske simuleringer og sentrale algoritmer i datavitenskap og beregningsvitenskap.

Fra og med høsten 2022 vil Bachelorprogrammet "Fysikk og Astronomi" (FA) ved UiO gjennomgå en større revisjon med en systematisk integrasjon av teori, eksperiment og beregninger. For et eksperimentelt fag som fysikk, åpner det seg også mange nye pedagogiske muligheter i integrasjonen av numeriske beregninger, data-analyse og eksperiment. Mange eksperiment kan nå gjennomføres ved hjelp av f.eks. enkle applikasjoner i smarttelefoner [15] og enkle apparater som Arduino [12]. Dette åpner for en tettere integrasjon av beregninger, teori, data-analyse og eksperiment i utdanningsløpet. På sikt muliggjør dette en dypere forståelse av fysikkfagets egenart og den vitenskapelige metode på et tidligere stadium i studieløpet. Første studieår ved FA-programmet ved UiO vil

nå inkludere to kurs i mekanikk, et grunnleggende i første semester som også introduserer sentrale numeriske metoder brukt i fysiske fag samt eksperiment som kan utføres ved hjelp av enkle måleeksperiment. Integrasjonen av teori, eksperiment og numeriske metoder blir videreført i andre semester med et kurs i statistikk, sannsynlighetslære og statistisk data-analyse for fysikere samt et mer avansert kurs i mekanikk. Læringsmål og kursinnhold er nærmere beskrevet her: <https://mhjensen.github.io/FirstYearPhysicsUiO/doc/pub/proposal/html/proposal-bs.html>. Grunnlaget fra første studieår i integrasjonen av teori, beregninger og eksperiment er tenkt videreført til senere studieår.

5 anbefalinger

Den eksterne arbeidsgruppen ser noen mulige gap mellom innholdet i det nåværende undervisningsopplegget (seksjon 2) og behovene til samfunnet og arbeidsgivere nå og i fremtiden (seksjoner 3.1–3.4).

Gruppens erfaring er at de kandidatene som konsistent gir best inntrykk ved ansettelse, som raskt blir verdsatt og kan få en “rask” karriereprogresjon har fire fellestrekk: de kan presist omsette en problemstilling i testbar(e) hypotese(r), bryte disse ned i konkrete oppgaver, bidrar i den praktiske gjennomføring av oppgavene, og sammenfatte og rapportere resultatene. De som utmerker seg har en *trygghet i at de selvstendig og/eller i team* kan levere på den *praktiske gjennomføringen*; det være seg oppsett og gjennomføring av forsøk, identifisering av de underliggende fenomener og matematisk beskrivelse av disse, eller numerisk implementering og løsning av disse modellene.

Basert på vår analyse fremmer vi i det følgende noen konkrete anbefalinger relatert til de forskjellige ferdighetsstrengene.

5.1 Fellesanbefalinger for begge ferdighetsstrenger

- Arbeidsgruppen anbefaler at det vurderes å styrke studentenes trening i å skrive vitenskapelige rapporter, både med tanke på antall rapporter og tilbakemelding på rapportene som skrives. Etter arbeidsgruppens syn ville det være nyttig for studentene å bli presentert for strukturen i en vitenskapelig rapport samtidig som de skal gjennomføre eksperimenter. Strukturen og krav til en vitenskapelig rapport kan gjerne presenteres gjennom utdrag fra eksisterende bøker eller artikler. Det vil også være nyttig for studentene å få tilbakemelding på sine skriftlige rapporter, slik at de forstår i hvilken grad rapportene de skriver oppfyller kravene til en vitenskapelig rapport. Det ville være nyttig for studentene at det gis konsistent tilbakemelding på rapportene uavhengig av hvilken faglærer som gir den teoretiske undervisningen. Etter arbeidsgruppens syn kan det være nyttig for studentene å få et eksplisitt formulert forskningsspørsmål for det aktuelle eksperimentet når studentene skal lære seg å skrive vitenskapelig rapport.
- Arbeidsgruppen anbefaler at studentene gis en systematisk opplæring i god dokumentasjonspraksis. Basert på prinsippet om sporbarhet omfatter dette både laboratoriebasert og beregningsbasert arbeid. Lærerkollegiet bør gjøre et utvalg av den omfattende serien av varierende praksiser innen alt fra journalføring og versjonskontroll til rapportskrivning og FAIR datalagring. En systematisk opplæring vil innebære en koordinering av undervisningen i de forskjellige laboratorie- og beregningskursene.
- Arbeidsgruppen anbefaler at det vurderes å gjennomføre noen laboratorieoppgaver og/eller vitenskapelige rapporter som individuelt arbeid. Etter arbeidsgruppens syn kan individuelt arbeid forberede studentene på den grad av selvstendighet som de kan forvente å møte i arbeidslivet.

5.2 Eksperimentell fysikk

- Arbeidsgruppen anbefaler at det vurderes å gi laboratoriekursene egne ECTS eller liknende kreditering, slik som det gjøres ved de utenlandske lærestedene som gruppen har vært i kontakt med. En selvstendig kreditering av laboratoriearbeidet kan bidra til å synliggjøre hvor

viktig dette arbeidet er, og vil gi en indikasjon på hvor stor arbeidsinnsats det er forventet at studentene skal legge i kursene.

- Hovedhensikten ved laboratorieundervisningen kan synes noe uklart formulert. Arbeidsgruppen foreslår en gjennomgang og prioritering av hensiktene med undervisningen. Mulige hensikter inkluderer f.eks. å støtte innlæringen av den teoretiske undervisningen, å undervise fysikk som ikke blir forelest, å undervise i måleteknikk og måleusikkerhet, å trene på praktisk bruk av måleinstrumenter, å trene på kommunikasjon av eksperimentelle resultater, å utvikle studentenes evne til samarbeid, å gi studentene mulighet til å se egenverdien av eksperimenter, og å vise at fysikk er et eksperimentelt fag. Det finnes også andre mulige hensikter med undervisningen. Det kan være vanskelig å oppnå alle hensiktene slik at det kan være nødvendig å prioritere noen hensikter foran andre. Det ser ut til å være en del nyere litteratur om i hvilken grad laboratorieundervisning ser ut til å være egnet for å oppnå forskjellige hensikter. For eksempel viser Holmes and Wieman [6] at tradisjonell laboratorieundervisning ser ut til å ha neglisjerbar støtteeffekt for innlæring av den teoretiske undervisningen.
- Arbeidsgruppen foreslår en gjennomgang av de eksisterende laboratorieoppgavene for å evaluere i hvilken grad de støtter hensikten med undervisningen og benytter et egnet pedagogisk opplegg. En slik gjennomgang ville forutsette at det er etablert en prioritering av hensikter med laboratorieundervisningen. Litteratur om hva slags pedagogisk opplegg som er egnet til å oppnå de forskjellige hensiktene kan være en støtte i en slik gjennomgang. Etter arbeidsgruppens oppfatning tyder litteraturen på at opplegg der studentene skal gjennomføre et eksperiment på et ferdig oppsett ved å følge en eksperimentmanual har lite læringsutbytte sammenliknet med andre pedagogiske opplegg.
- Det er arbeidsgruppens oppfatning at det nåværende undervisningsopplegget i liten grad inkluderer elementer av eksperimentdesign og protokollskrivning i laboratorieoppgavene. Arbeidsgruppen anbefaler at det vurderes muligheten for å inkludere noen slike elementer i allerede eksisterende laboratorieoppgaver. Noen mulige aktuelle elementer er beskrevet i listen nedenfor:
 - På forhånd bestemme hvilken nøyaktighet måleresultatet må ha for at resultatet skal ha verdi. Eksempel: hvor nøyaktig må eksperimentet “bestemme vekt på koffert” være for at en er sikker på å ikke måtte betale for overvektig bagasje på flyet.
 - Vurdere alternativer for eksperimentelle metoder: hvilke kan og hvilke kan ikke gi den nødvendige nøyaktigheten i målingene. I arbeidslivet vil det være naturlig å vurdere nøyaktighet i eksperimentet på forhånd for å kunne avgjøre om den eksperimentelle metoden kan brukes eller ikke.
 - Sammenlikne ressursbruk ved alternative eksperimentelle metoder: hvor mye ressurser trengs for å gjennomføre eksperimentet?
 - Bestemme det nødvendige antall paralleller/replikater som må gjøres av et eksperiment for å få størrelsen på tilfeldig feil til å bli “lav nok” og bestemme hva som er “lavt nok”.
 - Finne om det er én verdi i et beregnet uttrykk som dominerer usikkerheten i måleresultatet. Vurdere om det er et annet måleutstyr som bør skiftes ut for å bedre nøyaktigheten. Eksempel: en mer nøyaktig vekt, en sensor med høyere oppløsning.
 - Se effekten av å bruke kalibrerte måleinstrumenter og mulig konsekvens av ikke-kalibrerte måleinstrumenter. Ingen av laboratorieoppgavene gir en demonstrasjon av mulig konsekvens av å bruke ikke-kalibrerte måleinstrumenter, selv om flere oppgaver nevner at måleutstyret er kalibrert.

5.3 Beregningsorientert fysikk

- Arbeidsgruppen anbefaler at ulike beregningsalgoritmer presenteres og brukes på et systematisk og koherent vis gjennom hele studieløpet, gjerne i tett samarbeid med andre institutt. Et synkronisert studieløp letter også introduksjonen og bruken av ulike beregningsmetoder i et gitt fysikkfag.

- Arbeidsgruppen anbefaler at det legges inn økt fokus på god kodeutviklingspraksis, for eksempel ved bruk av versjonskontrollprogramvare.
- Arbeidsgruppen anbefaler at studentene blir introdusert til optimalisering og parallelisering av kode. Eksempler på nyttige øvelser er å teste skalerbarhet ved bruk av flere prosessorer og å sammenligne eksekveringstid for ulike algoritmer/fremgangsmåter/kodebiblioteker.
- Arbeidsgruppen anbefaler at programmeringsfag inkluderer løsning av numeriske problemstillinger (egenprogrammert og gjennom bruk av standardbiblioteker) i tillegg til grunnleggende programmeringsferdigheter.
- Arbeidsgruppen anbefaler at studentene introduseres til veletablerte simulerings-software (kommersielle eller gratis open source) for å løse komplekse oppgaver.

5.4 Integrasjon av eksperimentell og beregningsorientert fysikk

- Arbeidsgruppen anbefaler at det vurderes å integrere beregningsorientert fysikk og eksperimentelt rettet fysikk i større grad enn i det nåværende undervisningsopplegget. Det kan vurderes å etablere laboratorieoppgaver der bruk av beregningsalgoritmer og simuleringer inngår som to av flere verktøy som kan brukes for å løse en oppgave, på linje med andre måleinstrumenter. Det kan også vurderes å etablere laboratorieoppgaver der numeriske beregninger eller simuleringer brukes som et verktøy for å optimalisere et fysisk måleoppsett.

A Referat fra møter med EPFL, ETHZ og TUM

Deltakerne på og tidspunktene for møtene står i listen nedenfor.

- TUM: Andreas Hauptner og Martin Sass, Paal Skjetne, Dag Dysthe, Magnus Lilledahl, Ingve Simonsen, Jonas Persson, Kari Schjølberg-Henriksen, avholdt 20. november 2020.
- ETHZ: Alexander Eichler, Andreas Eggenberger og Martin Kroner, Paal Skjetne, Dag Dysthe, Sverre Johnsen, Magnus Lilledahl, Ingve Simonsen, Jonas Persson, Kari Schjølberg-Henriksen, avholdt 20. november 2020.
- EPFL: Daniele Mari, Ingve Simonsen, Kari Schjølberg-Henriksen, avholdt 23. november 2020.

Ved ETHZ er det 155 studenter i 3. semester og 140 studenter i 5. semester. Ved TUM er det 200 studenter på bachelornivå og 200 på masternivå, altså ca 130 grupper som skal ha laboratorieundervisning. Ved EPFL er det 120 studenter i 2. årskurs, 90 studenter i 3. årskurs, og 80 studenter på masternivå.

A.1 Læringsmål for laboratorieundervisningen

Laboratorielederne ved alle de tre lærestedene understreket at det viktigste læringsmålet med laboratorieundervisningen er å mestre laboratoriearbeid. Dette innebærer evne til å velge mellom og bruke forskjellige måleinstrumenter, se fordeler og ulemper ved forskjellige eksperimentelle oppsett, kunnskap om kalibrering, skrive protokoll, innhente data, og skrive rapport. Hovedmålet med undervisningen er at studentene skal få kunnskaper som setter dem i stand til å gjøre egne eksperimenter senere.

I de første 3–4 semestrene er det ikke et mål at studentene skal lære ny fysikk gjennom laboratorieundervisningen. Ved ETHZ og EPFL bygger eksperimentene på fysikk som er godt kjent for studentene, og til dels på fysikk de lærte på videregående skole. Ved TUM er det et mål med undervisningen å repetere fysikken som ble undervist forrige semester. De eksperimentelle temaene er forskjøvet slik at eksperimentene i mekanikk gjennomføres semesteret etter at emnet ble forelest. Læringsmålene endrer seg fra ca. 5. semester ved alle lærestedene. Da det blir et uttalt mål også å lære ny fysikk gjennom eksperimentelt arbeid og også et mål å bli kjent med forskjellige fagfelt innenfor fysikken.

A.2 Struktur på den teoretiske fysikkundervisningen

Fysikkundervisningen er lagt opp litt forskjellig ved de tre lærestedene. Ved EPFL og ETHZ undervises det et kurs i faget “Fysikk”. Dette kurset går over flere semestre, og dekker mekanikk, termisk fysikk, bølgefysikk, elektrisitetsteori, magnetisme, og relativitetsteori. Ved EPFL inngår fluidmekanikk også i kurset “Fysikk”, mens ved ETHZ inngår kvantemekanikk og atom- og kjernefysikk. Ved TUM er studiet lagt opp på en måte som likner mer på NTNU sitt studieprogram, med egne kurs i forskjellige fysikkfagene som f.eks. mekanikk, elektromagnetisme, termodynamikk, elektrodynamikk, optikk og atomfysikk.

A.3 Struktur og omfang av laboratorieundervisningen

A.3.1 Forelesninger i laboratoriearbeid

Det er stor variasjon mellom lærestedene i hvor mye forelesninger studentene får om laboratoriearbeid. Ved EPFL gis det forelesninger hele 2. semester. Forelesningene handler om vitenskapelig metode, god laboratoriepraksis, datainnsamling, og gir en introduksjon til feilanalyse i praksis og formelverk for dette. I parallell med forelesningene skal studentene gjennomføre en praktisk oppgave der de skal bygge sitt eget vakuumkanne med oppsett for å måle motstand. Ved ETHZ gis det forelesning 1 time pr uke parallellt med hele labundervisningen. Forelesningen behandler data-analyse, rapportskrivning, en introduksjon til Latex, grunnleggende praktisk statistikk og regresjonsanalyse. Studentene må bestå et separat kurs i HMS før de får tilgang til laboratoriet. Ved TUM gis det kun én time forelesning. Den gis i første semester og handler om anvendt statistikk til bruk i analyse av eksperimentelle data. Imidlertid får studentene skriftlig læremateriell

som de bruker gjennom hele laboratorieundervisningen. De får et hefte om dagens praksis av god laboratoriepraksis og god dokumentasjonspraksis. Dette heftet inneholder tips til videre litteratur. De får også et hefte om anvendt statistikk og feilanalyse, og et hefte om rapportskriving og en introduksjon til strukturen i en vitenskapelig artikkel. Studentene må ta et nettbasert HMS-kurs før de får tilgang til laboratoriet.

A.3.2 Praktiske laboratorieøvinger

Ved **EPFL** gjør studentene eksperimenter 2–6 semester. Eksperimentet det første studieåret består i å bygge et oppsett for å måle motstand, se kapittel A.3.1. Det andre og tredje studieåret jobber studentene i par. Studentene får presentert en stor meny med eksperimenter som dekker mange felt i fysikk. Det andre studieåret skal studentene gjennomføre sju eksperimenter per semester. I hovedsak er disse eksperimentene basert på teori som studentene er godt kjent med fra før. Studentene får tildelt en pakke med eksperimenter fra menyen. Det tredje studieåret skal studentene gjennomføre tre eksperimenter per semester. Disse eksperimentene blir ikke avsluttet i én økt, men går over fire uker. Studentene søker om plass på eksperimentene på menyen og får tildelt eksperimenter etter ønske så godt det lar seg gjøre.

Studentene får en “eksperimentmanual” som beskriver teorien bak eksperimentet og selve eksperimentet. Det andre studieåret kommer studentene til ferdige oppsett. Det tredje studieåret er det eksperimentelle oppsettet tegnet og beskrevet i eksperimentmanualen, men det varierer litt fra eksperiment til eksperiment om det er satt opp ferdig eller må settes opp av studentene.

Ved **ETHZ** gjør studentene praktiske eksperimenter i 3–6 semester. De jobber i grupper på to personer. Studentene får presentert en stor meny med eksperimenter som dekker alle fysikkfeltene som er forelest i de første studieårene. Det andre studieåret gjennomfører studentene en blanding av obligatoriske og valgte eksperimenter. Laboratorielederne sørger for at studentene gjennomfører eksperimenter som til sammen dekker alle fysikkfeltene som tilbys. Det tredje studieåret har studentene færre obligatoriske og flere egenvalgte eksperimenter. Studentene oppfordres studentene til å fortsette å velge eksperimenter fra varierte felt, men har frihet til å ikke gjøre det.

Eksperimentene er for en stor del ferdige oppsett med en oppskrift som studentene skal følge. Imidlertid holder laboratorielederne på med en fornyelse av eksperimentene. De ønsker å utvikle eksperimenter med ferdige, kompliserte og perfektionerte oppsett. I stedet vil de legge til eksperimenter som viser reelle utfordringer med eksperimentelt arbeid, som for eksempel å opplinjere et optisk måleoppsett. Det er nok progresjon i eksperimentene, f.eks. innenfor elektronikk bygger eksperimentene på hverandre og blir mer komplekse etter hvert. ETHZ tilbyr eksperimenter som utføres med simuleringer. Disse eksperimentene er godt egnet for å generere store datamengder og for å illustrere statistikk.

Studentene får en “eksperimentmanual” som beskriver teorien bak eksperimentet og selve eksperimentet. Laboratorielederne kunne gjerne ønsket å ha flere eksperimenter der studentene får en «boks» med en del utstyr og selv skal sette opp eksperimentet. Imidlertid er dette ofte vanskelig å få til innenfor tidsbegrensningen på 4 timer.

Ved **TUM** har studentene praktiske eksperimenter i 2–6 semester. I første og andre studieår jobber studentene i grupper på to personer. De skal gjennomføre et forhåndsbestemt program med seks eksperimenter per semester. (<https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/>). Eksperimentene er innenfor fysikken som ble undervist det foregående semesteret. I tredje studieår jobber studentene i grupper på tre. De velger seks eksperimenter fra en meny, men fire av eksperimentene må være innenfor deres egne valgte studieretning. Studentene har en diskusjon med labassistenten i forkant av eksperimentet og de får en “eksperimentmanual” med teoribakgrunnen for eksperimentet. Hovedtyngden av alle eksperimentene er å samle eksperimentelle data og sammenlikne dem med en teoretisk verdi. Tredje studieår tilbys det eksperimenter basert på simuleringer. Ved TUM er instrumentene som trengs for å gjennomføre eksperimentet tilgjengelige i laboratoriet. For noen eksperimenter må studentene sette opp oppsettet selv, og noen ganger er det ferdig satt opp til studentene. Oppsett med elektriske kretser bygger studentene selv fra bunnen av. Det vurderes å være for krevende for studentene, ta for lang tid og koste for mye om studentene skal designe et oppsett fra bunnen av.

A.3.3 Arbeidsbelastning og vurdering

Ved EPFL får studentene 4 ECTS per semester i semester 2–4 og bruker 4 timer per uke. Det tredje studieåret får de 8 ECTS og bruker omtrent en dag per uke på eksperimentelt arbeid. Arbeidet dokumenteres i rapporter og ved presentasjon. Andre studieår gir studentene en 10–15 minutters muntlig presentasjon. Tredje studieår skal studentene både gi en muntlig presentasjon og lage en poster som presenteres på en mini-konferanse. Studentene får karakter på laboratoriearbeidet. Karakteren er basert på rapporter/presentasjon/poster og kvaliteten på det eksperimentelle arbeidet (forberedelser, labarbeid og resultater). Studentene gir god tilbakemelding på laboratorieundervisningen i tredje studieår. I andre studieår mener studentene at de får for få ECTS i forhold til hvor mye arbeid rapportene krever.

Ved ETHZ er det en økende belastning fra 3. til 6. semester med 5 ECTS det 3. semesteret til 8 ECTS det 6. semesteret. Et eksperiment krever et skriftlig forarbeid som skal vises til labassistenten, og det skal skrives en rapport etterpå. Eksperimentene tar 3–4 timer i labben det andre studieåret og studentene gjør 8–9 eksperimenter per semester. Det tredje studieåret tar eksperimentene opptil 2 dager, men studentene skal bare gjøre fire eksperimenter per semester. Studentene bruker mye mer tid på å skrive rapporten enn på å gjøre selve eksperimentet. Det gis ikke karakter, men bestått/ikke bestått. Labundervisningen får blandet tilbakemelding fra studentene. Laboratorieledernes klare vurdering er at labassistenten er helt avgjørende for om studenten liker labundervisningen eller ikke.

Ved TUM får studentene 5 ECTS i semester 2–4 og 6 ECTS per semester det tredje studieåret. Det er vanlig å bruke omtrent 3 timer på det eksperimentelle arbeidet og mye mer tid på rapporten. Labundervisningen er godt likt av studentene, særlig i semester 2–4. Det tredje året er labundervisningen godt likt av eksperimentalistene.

A.4 Rapportskriving

Ved EPFL skriver studentene rapporter fra hvert eksperiment i andre og tredje studieår. I andre studieår skriver de individuelle rapporter, det vil si 14 rapporter. Studentene får se eksempler på gode rapporter for å forstå hvordan de skal skrive.

Ved ETHZ skriver studentene rapporter i par etter hvert eksperiment. Dette betyr 17 rapporter i andre studieår og åtte rapporter det tredje studieåret. Studentene må gjøre selvstendige beregninger og feilanalyse i rapportene. Rapportene rettes og kommenteres av labassistentene. Laboratorielederne forteller at diskusjonen om de konkrete rapportene er en av de viktigste læringssituasjonene i laboratorieundervisningen.

Ved TUM skriver studentene rapport i par etter hvert eksperiment. De tre første semestrene blir dette 18 rapporter. Alle rapportene gjennomgås og rettes av en labassistent, men tre av rapportene gjennomgås nøye sammen med assistenten. Studentene bruker mye tid på å organisere og skrive rapporten sin, og de trenger også mye tid på å øve seg på å plote figurer, lage kurvetilpasninger og å presentere statistikk. Også ved TUM anses kommentarene på rapportene som en svært viktig del av laboratorieundervisningen. Labassistentene blir litt strengere med rettingen etter hvert som studentene har gjennomgått flere semestre.

A.5 Sammenheng mellom teoretisk fysikkundervisning og praktiske laboratorieøvinger

Ved ETHZ og EPFL har ikke eksperimentene noen direkte sammenheng med den teoretiske undervisningen. Imidlertid er eksperimentene i 3. og 4. semester bygget på teori som studentene er godt kjent med fra før, slik at de ikke er avhengige av å ha hatt noen bestemte forelesninger først for å ha utbytte av eksperimentet. Ved TUM er laboratorieundervisningen i semester 2–4 forskjøvet med et semester slik at eksperimentene bygger på teori som ble forelest forrige semester.

Ved alle lærestedene kan studentene i 5. og 6. semester oppleve at eksperimentet bygger på teori som ennå ikke er forelest. Studentene får utdelt “eksperimentmanualer” som skal gi dem tilstrekkelig teoribakgrunn for eksperimentet. Laboratorieleder ved EPFL understreker at studentene kan oppleve å mangle teoretisk bakgrunn i arbeidslivet også, og at det er greit å forberede studentene på denne situasjonen.

B Mandat for ekstern arbeidsgruppe for evaluering av studieprogrammene MTFYMA og BFY

B.1 Bakgrunn

I henhold til NTNUs system for kvalitetssikring skal alle studieprogram evalueres hvert femte år. Arbeidsgruppen er en del av en slik periodisk evaluering. Fra høsten 2019 innførte Institutt for fysikk såkalte ferdighetsstrenger innen 1) numerisk fysikk og programmering (NP) og 2) eksperimentell fysikk (XF). Hensikten er å få til en mer planmessig utvikling av studentenes ferdigheter innenfor disse områdene.

B.2 Mål

Studieprogrammene ønsker å kartlegge eksisterende aktivitet innenfor disse områdene, samt få en ekstern evaluering, for å bruke dette som grunnlag for videreutvikling av ferdighetsstrengene. Vi ønsker spesielt å få vurdert

- I hvilken grad imøtekommer utdanningene samfunnets behov innenfor beregningsorientering og eksperimentell fysikk.
- Hvordan sammenlikner den eksisterende og den planlagte utdanningen med hvordan dette adresseres på andre læresteder (både i Norge og internasjonalt).
- Er det noe spesielt som mangler innenfor disse områdene i et bærekraftperspektiv?

B.3 Organisasjon

Den eksterne arbeidsgruppa består av minst 6 representanter, 3 fra hvert av fagområde (beregningorientering og eksperimentell fysikk). Det skal være minst en fra akademia og en fra industri innen hvert fagområde. Ett av medlemmene i gruppa utpekes som leder og er ansvarlig for gjennomføring i henhold til mandatet.

B.4 Gjennomføring/fremdrift/rapportering

Studieprogrammene gjennomfører først en intern kartlegging av nåværende innhold i emnene relatert til ferdighetsstrengene. Studieprogramlederne systematiserer data og skriver et kort sammendrag. Denne kartleggingen ble ferdigstilt primo september 2020. Den eksterne arbeidsgruppa baserer sin evaluering basert på den interne kartleggingen. En studentgruppe vil arbeid parallelt med den eksterne komiteen med samme tema. Om ønskelig kan den eksterne arbeidsgruppen arrangere et møte med studentgruppen for å få studentenes perspektiv på innholdet av beregningsorientering og eksperimentell fysikk i utdanningene. Det anbefales å gjøre dette møtet digitalt. Hvert medlem i arbeidsgruppa skriver en egen vurdering av innholdet av ferdighetsstrengene innenfor sitt tema. Denne vurdering er basert på dokumentasjon fra den interne kartleggingen og skal besvare spørsmålene stilt over. Den interne kartleggingen inneholder også en del konkrete spørsmål som ønskes besvart (se kartleggingsdokument). I tillegg skal leder for arbeidsgruppa utarbeide ett sammendrag av arbeidsgruppas vurderinger, inkludert studentenes perspektiv på utdanningen. Frist for endelig rapport er 15. desember 2020. Arbeidsgruppa forventes å ha minst ett møte før sammendrag og endelig rapport sammenstilles. Arbeidsgruppa forventes å delta på et seminar i Trondheim for å legge frem arbeidsgruppas rapport og diskutere funn. Dette vil gjennomføres i løpet av januar 2021.

B.5 Ressursbruk

Medlemmer i arbeidsgruppa honoreres etter gjeldende satser. Utgifter til angitte reiser og opphold dekkes.

C Kurskoder fra studieplan for MTFYMA

Nedenfor er en liste av kurskodene for MTFYMA nevnt i denne rapporten, hvor mange studiepoeng som gis for kurset, og om kurset er obligatorisk (O) eller valgbart (VB) innenfor gitt studieløp.

Kurskode	Kursnavn	SP	BFY	TFY	MA
EXPH0004	Examen philosophicum for naturvitenskap og teknologi	7.5	O		
FY1001	Mekanisk fysikk	7.5	O		
TDT4110	Informasjonsteknologi, grunnkurs	7.5	O		
TMA4100	Matematikk 1	7.5	O		
FY1003	Elektrisitet og magnetisme	7.5	O		
TMT4110	Kjemi	7.5	O		
TFY4165	Termisk fysikk	7.5	O		
TDT4102	Prosedyre- og objektorientert programmering	7.5	O		
TMA4320	Introduksjon til vitenskapelige beregninger	7.5	O		
TFY4185	Måleteknikk	7.5	O	O	
TBT4102	Biokjemi 1	7.5	O		
TFY4190	Instrumentering	7.5	O	O	
TFY4220	Faste stoffers fysikk	7.5	VA	O	
TFY4260	Cellebiologi og cellulær biofysikk	7.5	O		
FI3107	Bioteknologi og etikk	7.5	VB	VB	VB
FI5205	Corporate Responsibility and Ethics	7.5	VB	VB	VB
FI5206	Technology for a Good Society	7.5	VB	VB	VB
IKG3000	Introduksjon til informasjonssikkerhet og personvern	7.5	VB	VB	VB
TIØ4201	Risikohåndtering, samfunnssikkerhet og kritisk infrastruktur	7.5	VB	VB	VB
TMR4137	Bærekraftig utnyttelse av marine ressurser	7.5	VB	VB	VB
TIØ4306	Strategier for industriell bærekraft	7.5	VB	VB	VB
HIST3500	Bærekraftig over tid. Miljø- og samfunnsutvikling for teknologer	7.5	VB	VB	VB
TMMT4001	Bærekraftig matproduksjon	7.5	VB	VB	VB
TMA4268	Statistisk læring	7.5			VA

Referanser

- [1] B. Davani. *Pharmaceutical Analysis for Small Molecules*. J. Wiley and Sons, 2017.
- [2] F. Ecarnot, M.-F. Seronde, R. Chopard, F. Schiele, and N. Meneveau. Writing a scientific article: A step-by-step guide for beginners. *European Geriatric Medicine*, 6(6):573–579, 2015. ISSN 1878-7649. DOI:10.1016/j.eurger.2015.08.005.
- [3] EPFL. <https://www.epfl.ch/schools/sb/education/sph/>.
- [4] ETHZ. <https://www.phys.ethz.ch/de/studium.html>.
- [5] FN. <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/>.
- [6] N. G. Holmes and C. E. Wieman. Introductory physics labs: We can do better. *Physics Today*, 71(1):38, 2018. DOI:10.1063/pt.3.3816.
- [7] NTNU. <https://www.ntnu.no/baerekraft/>, .
- [8] NTNU. <https://www.ntnu.no/baerekraftmaal/>, .
- [9] NTNU. <https://www.ntnu.no/studier/fellesemner/>, .
- [10] NTNU. <https://www.ntnu.no/ntnus-strategi/>, .
- [11] OECD. OECD principles of good laboratory practice. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/mc/chem\(98\)17&doclanguage=en](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/mc/chem(98)17&doclanguage=en), 1998.
- [12] G. Organtini. *Physics Experiments with Arduino and Smartphones*. Springer, Berlin, 2021.
- [13] J. Persson. Å skrive laboratoriejournal. NTNU, 2020.
- [14] J. Persson. Laboratorium i emne fy1001 mekanisk fysikk. NTNU, 2020.

- [15] PhyPhox. <https://phyphox.org/sensors/>.
- [16] S. D. Senturia. How to avoid the reviewer's axe. *Journal of Micro Electro Mechanical Systems*, pages 1–7, 2003.
- [17] Standard Norge. <https://www.standard.no/toppvalg/om-oss/baerekraft/>.
- [18] TUM. <https://www.ph.tum.de/academics/>.
- [19] UiO. <https://www.mn.uio.no/ccse/english/>.
- [20] Wikipedia contributors. Good documentation practice — Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Good_documentation_practice&oldid=962188497, 2020. [Online; Accessed 2020-10-18].