

Budskaber om modellering i fysiklæreboøger

Martin Niss

The Dibner Institute for the History of Science and Technology, MIT, USA

Modeller og modellering er en væsentlig side af fysik som det ikke er ligegyldigt hvordan der undervises i. Nærværende artikel undersøger de budskaber om modellering som universitetslæreboøger på begyndende kandidatniveau i fysikdisciplinen statistisk mekanik sender til de studerende. Behandlingen af en bestemt model i fire lærebøger benyttes i artiklen til at analysere hvilke budskaber disse bøger sender om følgende emner: Hvad udgør en god model? Hvad skal en model kunne? Hvad vil det sige at forstå et fænomen? Der argumenteres for at selvom bøgerne stort set dækker det samme materiale om modellen, videregiver de vidt forskellige perspektiver på modellering. De didaktiske implikationer for fysikundervisningen diskuteres.

Introduktion

Modellering spiller en væsentlig rolle i fysik idet modeller ofte er den måde et fysisk fænomen indfanges på. I deres populærvidenskabelige bog om fysikkens natur, *Den Harmoniske Begejstring*, har fysikerne Ove Nathan og Henrik Smith således valgt at lade det sidste af bogens i alt fem kapitler hedde slet og ret "Modeller". Dette kapitel omhandler metodikken i matematisk modelbygning og følger efter et kapitel om fysikkens teoribygninger. Modeller indtager altså en fremtrædende position i bogen. De nylige kompetencebeskrivelser af matematik (Niss & Jensen, 2002) og naturfag (Dolin et al., 2003) tager konsekvensen af betydningen af modeller og modellering i disse fag og lader en af de otte henholdsvis fire kompetencer være *modelleringskompetencen*, som elever og studerende skal opnå gennem deres uddannelse, startende i de tidlige klasser i folkeskolen.

Modelleringskompetencen går kort sagt ud på evnen til at kunne opbygge og analysere modeller. En konkret udmøntning af lignende tanker kan findes på den Naturvidenskabelige Basisuddannelse på RUC. Her har man valgt at lade det ene af de fire semesterlange projekter som studenterne skal udarbejde, omhandle samspillet mellem teori, eksperiment og model i naturvidenskaberne.

I betragtning af modellerings betydning for fysik er det vigtigt hvordan der under-

vises i denne aktivitet. Jeg har i anden sammenhæng¹ opdaget at der er meget stor variation i hvordan forskellige lærebøger beskriver og behandler en bestemt model – den såkaldte Ising-model. Faktisk varierer disse lærebøger så meget på dette punkt at de giver læseren, dvs. studenten, meget forskellige opfattelser af hvad “god” model-
lering er. Nærværende artikel undersøger de budskaber om dette emne som lærebøger i deres anvendelse af Ising-modellen eksplicit eller implicit sender til studenten.² Mere præcist vil jeg analysere lærebøgernes budskaber om følgende spørgsmål: Hvad udgør en god model? Hvad skal en model kunne? Hvilken type træk ved den fysiske verden ønsker vi at fange med modellen? Og hvad vil det sige at forstå et fysisk fænomen?

Det er klart at læringsprocessen er et kompliceret samspil af forskellige faktorer som ud over lærebøger involverer den konkrete undervisning, opgaveregning etc. Det er naturligt at antage at alle disse faktorer sender budskaber til studenten, og at det derfor ikke kun er lærebøger som former studentens ideer om ovenstående spørgsmål. Ideelt set bør en fuldstændig undersøgelse af idédannelsen derfor ind-
drage alle faktorerne. Målet med denne artikel er imidlertid *ikke* en sådan fuldstændig kortlægning (et værdifuldt, men yderst omfattende projekt), men at påpege at der faktisk sendes meget forskellige modelleringsbudskaber i lærebøger og at udpege nogle af de spørgsmål hvor budskaberne divergerer.

Ising-modellen, der altså anvendes som eksempel i nærværende artikel, er en mikroskopisk model, og den optræder derfor i lærebøger i statistisk mekanik. Denne fysiske disciplin uddrager den makroskopiske opførsel af modeller der består af en stor mængde mikroskopiske byggesten. Ising-modellen anvendes til at beskrive faseover-
gange som sædvanligvis behandles på et begyndende kandidatniveau (evt. avanceret bachelorniveau), så de undersøgte lærebøger er på dette niveau. Enkelte lærebøger ind-
drager andre modeller i behandlingen af disse fysiske fænomener, som ligeledes bidra-
ger til bøgernes budskab. For at undgå en skævvridning ved at fokusere for ensidigt på Ising-modellen inddrager jeg også disse modeller i analysen hvor det er nødvendigt.

Alle de undersøgte *moderne* lærebøger sender, som vi skal se, de samme budskaber med hensyn til nogle af ovennævnte spørgsmål (men ikke til alle). Modellerings-
budskaberne kommer oftest indirekte til udtryk i lærebøgerne. Som kontrast har jeg derfor valgt at supplere moderne bøger med klassiske lærebøger; dertil kommer at sidstnævnte lærebøger stadig bruges visse steder. Hvad angår antallet af lærebøger, mener jeg at fire – to klassiske og to moderne – rammer en passende balance mellem at indfange nogle væsentlige pointer uden at gå for meget i detaljer. Disse fire bøger er udvalgt efter følgende kriterier: Bøgerne skal være bredt anerkendte, indeholde et

1 I forbindelse med min fysikhistoriske ph.d.-afhandling; se (Niss, 2005).

2 En mere omfattende – og mere teknisk – undersøgelse af samme problemstilling, omhandlende flere modeller end Ising-modellen, vil blive udgivet senere.

eller flere kapitler om faseovergange, i et vist omfang være artikulere om modellering og være repræsentative for en klasse af lærebøger, dvs. ikke være for idiosynkratiske i synsvinkel. De fire lærebøger er (Huang, 1963), (Pathria, 1972), (Wilde & Singh, 1998) og (Salinas, 2003).³ Adskillige andre, lige så relevante lærebøger kunne have været udvalgt, og hver af disse bøger kunne være udskiftet med andre bøger som ville give udtryk for de samme synspunkter.

Model og teori

Inden vi når til lærebøgerne, er det nødvendigt med nogle indledende bemærkninger om begreberne model og teori generelt, i fysikundervisningen og Ising-modellen.

En *model* er en bevidst forsimplet repræsentation af et udsnit af den fysiske virkelighed. Man forsimples f.eks. ved at udelade nogle træk ved det studerede system for at gøre det mere håndterbart. I en model for et svingende pendul ser man sædvanligvis bort fra gnidningsmodstand i pendulophængen og i form af luftmodstand. Man kan også forsimple repræsentationen af det fysiske system ved at forvrænge visse træk, f.eks. gøre pendulsnoren masseløs eller selve pendulet punktformet. Udtrykt metaforisk søger en model ikke en fotografisk gengivelse af systemet men at repræsentere det skematisk eller ligefrem karikaturisk, dog udformet på en sådan måde at man stadig kan genkende modellens objekt.

Fysikstudenten møder modellering i mange fysikdiscipliner (ikke mindst i klassisk mekanik, kvantemekanik og elektrodynamik), men i statistisk mekanik er de specielle træk ved modellering især accentueret. Alle statistisk-mekaniske modeller involverer per definition et stort antal partikler hvis repræsentation nødvendigvis må forsimples for at kunne undersøges. Forsimplinger er derfor et fundamentalt træk ved statistisk mekanisk modellering, hvis eksplicite eller implicite behandling i lærebøgerne uundgåeligt vil sende budskaber til studenten om modellering.

Modellering i statistisk mekanik følger en generel opskrift:

1. De mikroskopiske bestanddele, f.eks. atomkerne og elektroner som skal "bygge" et givent makroskopisk fænomen, udvælges.
2. Ud fra kvantemekanik (i visse tilfælde kan man klare sig med klassisk mekanik) bestemmes byggestenenes mikroskopiske opførsel og energier.
3. Den statistisk mekaniske formalisme bestemmer, i princippet, de termodynamiske størrelser som man er på jagt efter.

³ (Huang, 1963) har fået status af klassiker og (Pathria, 1972) er vidt udbredt, mens (Wilde & Singh, 1998) og (Salinas, 2003) er for nye til at have opnået en sådan status, men de har begge fået gode anmeldelser.

Hvis man i stand til at gennemføre alle trin, har man *løst* modellen. Fysikerne er enige om at mikroskopisk modellering involverer alle disse trin, men udførelsen af de to første trin varierer kraftigt fra lærebog til lærebog. Årsagen er at det simpelthen ikke er muligt matematisk at behandle langt de fleste samlinger af mikroskopiske byggesten man ønsker at undersøge. Dette betyder at kraftige forsimplinger er nødvendige, ikke mindst i forbindelse med faseovergange.

I fysik skelner man tit mellem model, teori og eksperiment. Begrebet “model” vil i artiklen fremover blive brugt til at beskrive de mikroskopiske byggesten, og hvilken slags mekanik de adlyder. Jeg vil bruge ordet “teori” i to forskellige betydninger. I den første betydning er teori den eller de love som styrer opførelsen af modellernes byggesten. Denne teoritype vil typisk være kvantemekanik. Den anden type, som jeg vil kalde fænomenteorien, er den forståelse af et bestemt fysisk system som opstår på baggrund af en model eller en række modeller af systemet. Et eksempel: Lad os sige at man vil modellere en magnet som en række små magneter placeret i et gitter. Disse små magneter opfører sig f.eks. i overensstemmelse med kvantemekanik som er den fundamentale teori, mens fænomenteorien er den indsigt som modellen giver anledning til. Sidstnævnte kunne f.eks. være at disse magneter har en præference for at pege i samme retning frem for i hver sin retning.

Modeller i fysikundervisningen

De to tidligere nævnte kompetencebeskrivelser kan bruges til at placere herværende undersøgelse. (Dolin et al. 2003) definerer kompetence generelt som: “Evne og vilje til handling, alene og sammen med andre, som udnytter naturfaglig undren, viden, færdigheder, strategier og metaviden til at skabe mening og autonomi og udøve medbestemmelse i de livssammenhænge hvor det er relevant.” (Dolin et al. 2003, s. 72). I artiklen nås der frem til at der er fire kompetencer som især er centrale og specifikke for naturfag, nemlig modelleringskompetence, eksperimentel kompetence, repræsentationskompetence og en perspektiveringskompetence (som inkluderes for at medtage dannelsesaspekterne af naturfag). I det følgende vil jeg udelukkende betragte modelleringskompetencen.

Denne kompetence består i evnen og viljen til at kunne analysere og opstille modeller. Ifølge (Dolin et al. 2003) skal den udvikles gennem hele uddannelsen: fra 1.-3. klasse (hvor eleverne skal se og opleve enkle afbildninger af naturens fænomener) over 7.-9. klasse (hvor eleverne bl.a. skal kunne anvende modeller til forklaring af fænomener) til 1.-2. g og videregående uddannelser. En elev der har gennemgået gymnasiets fysikundervisning, bør:

- Kunne opbygge og analysere modeller af simple fænomener. Dvs. kunne formulere et naturvidenskabeligt program og gøre det tilgængeligt for en undersøgelse, kunne

udvælge relevante variable, kunne anvende og selv opstille matematiske modeller og kunne afprøve og validere modeller.

- At kunne se modellers anvendelseegnhed i forskellige kontekster. (Dolin et al., 2003, s. 117)

Efter gennemførelsen af en videregående uddannelse skal en student kunne det samme, men mere selvstændigt og på “baggrund af en dybdegående teoretisk viden” (Dolin et al., 2003, s. 117).

Herværende undersøgelse siger ikke noget om hvordan man opnår modelleringskompetence, men er en beskrivelse af hvilke ideer universitetsstudenten får om hvad kompetencen består i. Det er naturligt at antage at lærebøgernes budskaber er en væsentlig faktor i dannelsen af studentens opfattelse af hvad god modellering er, og disse budskaber har derfor betydning for opbyggelsen af begge sider af studentens kompetencer i ovenstående beskrivelse: For det første er disse budskaber med til at skabe det grundlag studenten tager udgangspunkt i når han eller hun analyserer allerede eksisterende modeller. For eksempel vil ideer om acceptable og uacceptable modeltyper have betydning for vurderingen af allerede eksisterende modeller. For det andet er budskaberne med til at præge hvordan studenten selv vil opføre sig i en modelleringssituation, idet hans eller hendes forestillinger om god modellering vil være med til at forme hvordan modelleringen gribes an.

Det er klart fra ovenstående beskrivelse af progression i modelleringskompetencen at denne kompetence er væsentlig på alle niveauer. Selvom denne undersøgelse omhandler universitetslærebøger, vil artiklens overordnede pointer have betydning for de tidligere niveauer i uddannelsessystemet.

Ising-modellen

En ferromagnet – f.eks. de kendte rød-sorter stangmagneter fra fysikundervisningen – er sædvanligvis magnetisk ved stuetemperatur. Ved opvarmning vil den imidlertid gradvist blive mindre og mindre magnetisk og ved en bestemt temperatur, Curie-temperaturen, mister den helt sin magnetisering. Den går altså fra en magnetisk fase til en umagnetisk fase, og Curie-temperaturen kaldes en faseovergangstemperatur.

En ferromagnet er opbygget af atomer⁴ som igen består af kerner og elektroner. Dens magnetisering kommer mikroskopisk i stand ved bevægelse af ladede partikler: enten elektronernes banebevægelse om kernen eller elektronernes rotation om sig

4 I visse tilfælde består de af molekyler, men for nemheds skyld antager jeg i det følgende at byggestenene er atomer.

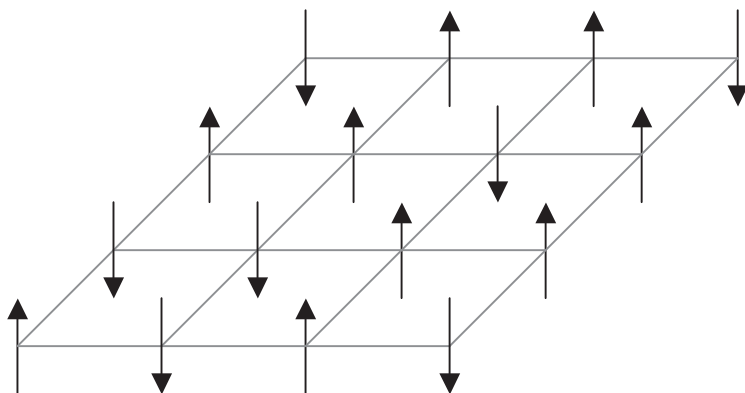
selv. Det sidste kaldes elektronens *spin*, og det kan kun forstås fuldstændigt ud fra kvantemekanik⁵ men har en roterende ladningskugle som klassisk analogi. Den klassiske analogi til banebevægelsen omkring kernen er en strømkreds. Disse to bevægelser resulterer i et magnetisk dipolmoment og skaber et magnetisk felt som giver anledning til ferromagnetens magnetisering. Detaljerede studier, både eksperimentelle og teoretiske, viser imidlertid at de ferromagnetiske egenskaber hovedsageligt skyldes elektronspinet.

Ferromagneter modelleres oftest ved et gitter hvor der placeres en elektron med spin i hvert gitterpunkt, hvorefter disse spin og deres vekselvirkninger behandles med det fulde kvantemekaniske apparat. En sådan model, hvor dog kun nærmeste naboer vekselvirker direkte (et forsøg på at indfange *kortrækkende* vekselvirkninger), kaldes *Heisenberg-modellen*. Det er en udbredt opfattelse at denne model fanger den korrekte mekanisme for ferromagnetisme. I praksis kan modellen kun undersøges ved at indføre nogle ukontrollable approksimationer. Dette gør det relevant at undersøge modeller som er forsimplede i en grad så man kan klare sig uden approksimationer, og det er her Ising-modellen kommer ind i billedet.

I Ising-modellen antages det (ligesom i Heisenberg-modellen) at der i ethvert punkt i et gitter er placeret en elektron med et spin, og at kun nærmeste naboer vekselvirker. Spinet forsimplet idet det kun kan være i to tilstande: op og ned. Dette betyder at modellens spin (i modsætning til Heisenberg-modellens) *ikke* opfører sig i overensstemmelse med kvantemekanikken. Dette er en bevidst forvrængning som gør at modellen bliver opfattet som en kraftig forsimpning af fysiske ferromagneter. Målet med modellen er imidlertid ikke at gøre os i stand til at forudsige deres mikroskopiske opførsel korrekt, men at tillade os at indfange deres overordnede træk, f.eks. hvordan magnetiseringen opfører sig som funktion af temperaturen.

Et eksempel på en spinkonfiguration i den todimensionale Ising-model er vist på figur 1. I den viste konfiguration er der flere spin der peger op, end spin der peger ned, så denne konfiguration har samlet set en magnetisering opad. Statistisk mekanik tildeler sandsynligheder til alle sådanne spinkonfigurationer og kan derfor bruges til at beregne den gennemsnitlige værdi af magnetiseringen for en given temperatur. Ved at beregne sådanne værdier for alle temperaturer kan det undersøges om modellen opfører sig "rigtigt", dvs. udviser de samme træk som virkelige ferromagneter. Et hovedmål med Ising-modellen er at reproducere faseovergange, altså påvise eksistensen af en temperatur som svarer til Curie-temperaturen for virkelige ferromagneter. Det

⁵ Den kvantemekaniske version afviger fra analogien, f.eks. ved at den har diskrete op-/ned-tilstande som ikke er beskrevet ved en vektor.



Figur 1. En konfiguration af spin i den todimensionale Ising-model.

viser sig at der optræder en faseovergang i modellen i to og tre dimensioner, men ikke i én dimension.⁶ Af oplagte grunde er tre dimensioner mest relevant for forståelsen af virkelige systemer.

Fysik som forenet teori – (Huang, 1963)

Den første lærebog jeg vil undersøge, er Kerson Huang's fra 1963. Hele bogens "ånd" er at man skal søge én generel, forenet beskrivelse af alle fysiske fænomener. I forordet skriver han f.eks.:⁷

Formålet med bogen er at undervise i statistisk mekanik som en integreret del af teoretisk fysik, en disciplin som sigter på at beskrive alle naturlige fænomener på basis af en eneste forenet teori. Denne teori er på nuværende tidspunkt kvantemekanik. (Huang, 1963, s. vii)

Denne holdning smitter af på bogens kapitel om faseovergange. Her ønsker Huang "at vise at inden for den generelle statistisk-mekaniske formalisme er faseovergange en *mulig* konsekvens af molekylære vekselvirkninger" (Huang, 1963, s. 313, fremhævelse i originalen). Dette gør han ved at undersøge en model (ikke Ising-modellen) der til en god approksimation er en beskrivelse af faktiske stoffer, som han skriver. Desuden giver Huang en forholdsvis generel beskrivelse af faseovergange, hvor han under forudsætning af visse antagelser er i stand til at give matematiske kriterier for forekomsten af faseovergange. Han er imidlertid ikke i stand til at redegøre for at

6 Det todimensionale resultat kan vises eksakt matematisk, mens det tredimensionelle endnu kun er vist approksimativt (men der er generel enighed om at resultatet er korrekt).

7 Fremover er alle citater mine oversættelser fra engelsk.

antagelserne holder vand, og konkluderer derfor at “det ikke er vist at beskrivelsen af faseovergange som vi har givet, er den eneste mulige.” (Huang, 1963, s. 319).

Det er her Ising-modellen kommer ind i billedet. Huang skriver at denne situation gør at “det er interessant at teste validiteten af vores beskrivelse med simple modeller.” (Huang, 1963, s. 320). Den todimensionelle Ising-model

er et groft [crude] forsøg på at simulere strukturen af en fysisk, ferromagnetisk substans. [...] Dens hoveddyd skyldes det faktum at den to-dimensionelle Ising-model giver efter for en eksakt statistisk mekanisk behandling. Den er det eneste ikke-trivielle eksempel på en faseovergang som kan udarbejdes med matematisk stringens. (Huang, 1963, s. 329)

Dette synspunkt, at Ising-modellen mangler fysisk realisme, gennemsyrrer hele bogen.

Efter at have introduceret Ising-modellen bestemmer Huang approksimative udtryk for dens magnetisering og specifikke varmekapacitet som funktion af temperaturen, men han sammenligner ikke resultaterne med eksperimenter. I det hele taget ligger vægten på matematiske udledninger frem for fysiske fortolkninger. Dette ses i det efterfølgende kapitel, hvor Huang gennemgår en matematisk løsning af den todimensionale variant af modellen. Efter et 24-siders kompliceret matematisk formelridt når han frem til et udtryk for modellens specifikke varmekapacitet, denne gang eksakt. Dette resultat fortolkes ikke, ud over at han pointerer at det viser at der optræder en faseovergang i modellen, og at approksimationer fra det foregående kapitel giver kvalitativt forkerte resultater.

Det syn på Ising-modellen som Huangs kapitler giver udtryk for, er altså at modellen er et “groft forsøg” på at repræsentere en ferromagnet, og at modellen hovedsageligt er interessant fordi den dels kan illustrere den generelle beskrivelse, dels kan undersøges matematisk. Der gøres ikke noget for at begrunde dens antagelser, ligesom den ikke konfronteres med eksperimenter. Der sendes således et budskab til studenten om at Ising-modellen er fysisk irrelevant fordi den er for simpel. Mere overordnet får studenten indtryk af at kun *realistiske* modeller, dvs. modeller som er i overensstemmelse med kvantemekanik, kan anvendes til at sige noget om virkelige systemer.

Hvad er de didaktiske konsekvenser for en student som læser Huang? Lad os forestille os en hypotetisk student hvis samtlige kilder (bøger, lærerforedrag etc.) til ideer om modellering sender de samme budskaber som Huang. Det er oplagt at antage at en sådan student i en fremtidig modelleringssituation (vel typisk i forbindelse med forskning) vil afvise andres karikaturmodeller som værende for forsimplede. Han eller hun vil desuden ikke selv opstille denne type modeller men udelukkende beskæftige sig med mere realistiske modeller. Hvordan kan en student som altid har hørt at karikaturmodeller ikke er brugbare, reagere anderledes? Hvis man mener at

karikaturmodeller ikke hører hjemme i fysik, er dette ikke et problem; det er imidlertid svært at påstå at denne type modeller ikke spiller en væsentlig rolle i moderne fysik (se (Niss, 2005)). Hvis fysiklæreren mener at karikaturmodeller er væsentlige, må han eller hun derfor søge at korrigere studentens opfattelse direkte i undervisningen eller ved at inddrage materiale med andre budskaber.

Forskellige modeltyper – (Pathria, 1972)

Det næste nedslag jeg vil foretage, er i R.K. Pathrias bog fra 1972. Denne bogs kapitel om faseovergange indeholder stort set det samme materiale som Huang's tre kapitler om faseovergange (den generelle beskrivelse af faseovergange, introduktionen af Ising-modellen og den matematiske løsning af denne model). Der er generelle overvejelser om matematikken bag faseovergange og en matematisk behandling af Ising-modellen. I første del af kapitlet beskriver Pathria desuden de samme realistiske modeller som Huang, og begge forfattere giver udtryk for opfattelsen af disse modeller som brugbare til at beskrive faseovergange. Men der er stor forskel på brugen af Ising-modellen som giver anledning til forskellige *perspektiver* på modellering i de to lærebøger.

I modsætning til hos Huang, hvor Ising-modellen spiller en meget begrænset rolle i forståelsen af virkelige systemer, er den gennemgående opfattelse i Pathrias kapitel at modellen kan spille en rolle i denne forbindelse. Modellen er f.eks. ikke som hos Huang henvist til en placering uden for kapitlet om faseovergange, men optræder i selve kapitlet. Dette syn på modellen videregives også da Pathria sætter scenen for beskrivelsen af faseovergange. Her kommer han ind på de "formidable" matematiske problemer der er forbundet med studiet af faseovergange:

For at muliggøre beregninger er man tvunget til at introducere modeller hvor vekselvirkningen mellem partikler i udstrakt grad er forsimplet, bibeholdende på samme tid de kooperative karakteristika som er væsentlige for problemet. Man håber dernæst at et statistisk studium af forsimplede modeller som stadig involverer alvorlige problemer, måske kan simulere de basale træk ved det faktiske fysiske systems fænomener. (Pathria, 1972, s. 375)

Pathrias introduktion af Ising-modellen afspejler denne generelle opfattelse. Modellen, skriver han, er netop sådan en model som "i udstrakt grad oversimplificerer det faktiske fysiske system som det forventes at repræsentere." (Pathria, 1972, s. 392). Ikke desto mindre bibeholder modellen de væsentligste træk ved systemet, så den viser sig at være god nok til at give en teoretisk basis for at forstå faseovergange. Denne opfattelse afviger kraftigt fra Huang's afskrivning af Ising-modellen som fysisk irrelevant.

Pathrias bemærkninger sender således følgende modelleringsbudskab: Fysikeren skal bruge en model, selvom den er en endog meget simplificeret repræsentation af

det virkelige system, i håb om at modellen fanger dets væsentligste træk. Modellen skal søge at isolere et lille antal hovedtræk som den forvrænger indtil det ekstreme. Sådanne modeller kan vi kalde *karikaturmodeller*, pga. deres lighed med karikaturtegninger som forstørrer visse træk ved de afbildede personer på bekostning af andre (men sådan at man stadig kan genkende personerne).

Ikke nok med at Ising-modellen ifølge Pathria kan give indsigt i faktiske fænomener, han giver også indtryk af at den er et af de vigtigste redskaber for forståelsen af faseovergange. Ud over at modellen optager 42 sider ud af faseovergangs-kapitlets 65, er der mere konkrete eksempler på dette budskab. Der er spredte kommentarer af typen: vores teoretiske forståelse med hensyn til nogle bestemte empiriske indices "er noget handicappet af det faktum" at vi endnu ikke har været i stand til at løse den tredimensionelle variant af modellen (Pathria, 1972, s. 432). Desuden sammenholder han resultater for modellen med empiriske resultater. I visse tilfælde er modellen i stand til at fange væsentlige træk ved disse data; for eksempel skriver han om den todimensionelle models varmekapacitet at "den minder meget om den faktiske situation i flere virkelig systemer." (Pathria, 1972, s. 428). Andre gange er modellen bare en første approksimation til virkelige systemer. Allervigtigst er det at kapitlets eneste tabel udelukkende sammenligner eksperimentelle værdier med værdier for Ising-modellen (og en approksimation til denne model). Selvom overensstemmelsen mellem de to slags værdier ikke beskrives, er det klart at denne prominente plads for Ising-modellen giver studenten indtryk af at modellen er et væsentligt redskab til at forstå faseovergange. På den anden side holder Pathria sig til spredte kommentarer og konkrete sammenligninger mellem model og eksperiment og afholder sig fra – i modsætning til moderne lærebøger som vi skal se – at skabe en mere systematisk fænomenteorier for faseovergange baseret på modellen.

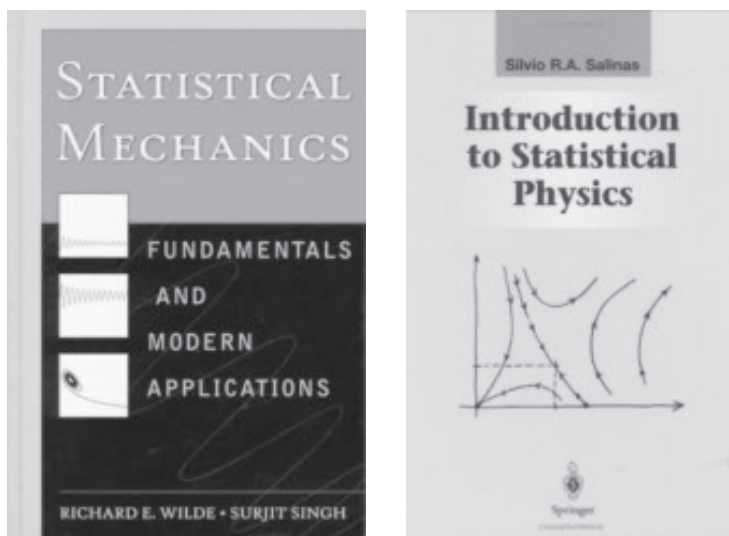
Der er en slags *tilgangspluralisme* i Pathrias kapitel om faseovergange som blander realistiske modeller med karikaturmodeller. Kapitlet starter som nævnt med en generel beskrivelse af faseovergange baseret på modeller som er mere realistiske end Ising-modellen. Han diskuterer f.eks. et N -partikel-system for kondensation, og han taler om at forstå "faseovergange som en speciel konsekvens af vekselvirkningen mellem partikler." (Pathria, 1972, s. 379). Selvom Pathria omtaler en variant af Ising-modellen som kan beskrive gasser, er denne model for karikeret til at forstå sådanne specifikke systemer. Denne brug af andre mere realistiske modeller sender et budskab om at Ising-modellen ikke kan stå alene i forståelsen af faseovergange. Det betyder at læseren modtager blandede budskaber fra bogen. På den ene side får han eller hun indtryk af at karikaturmodeller kan bruges, på den anden side at de ikke kan stå alene. Dertil kommer at placeringen af Ising-modellen efter de mere realistiske modeller gør at studenten kan få indtryk af at disse modeller er at foretrække frem for Ising-modellen.

Hvis den hypotetiske student fra før arbejder med Pathria i stedet for Huang, får han eller hun altså ikke de samme ideer om at karikaturmodeller ikke kan bruges. Studenten vil derimod i fremtidige situationer acceptere karikaturmodeller selvom han eller hun vil foretrække mere realistiske modeller. Det virker naturligt at antage at fraværet af en samlet fænomenteorier giver studenten et lidt forvirret billede af hvad det er vi vil opnå med modelleringen: Er det tilstrækkeligt med spredte bemærkninger, eller sigter vi efter en fænomenteorier som er funderet i mere realistiske modeller? Læreren bør tilrettelægge undervisningen så denne forvirring kommes til livs. Samtidig giver tilgangspluralismen læreren en oplagt chance til at diskutere fordele og ulemper ved de forskellige modelleringstilgange og således klargøre studentens forestillinger om modelleringsformål.

Det moderne synspunkt – (Wilde & Singh, 1998) og (Salinas, 2001)

Mens Pathrias bog var i trykken, fremkom den såkaldte renormalisationsgruppeteknik som ændrede teorien for faseovergange drastisk. Jeg vil ikke komme ind på hvad denne komplicerede teknik går ud på, men kun kort beskrive dens betydning for lærebøgernes budskaber om modellering. En af konsekvenserne er at behandlingen af faseovergange i de fleste moderne lærebøger i statistisk mekanik, dvs. fra ca. 1980 og frem, overordnet set er den samme. En anden konsekvens er at Ising-modellen spiller en mere fremtrædende rolle end tidligere og faktisk udgør den teoretiske basis for forståelsen af faseovergange. Disse lærebøger sender derfor et budskab om at Ising-modellen og dermed karikaturmodeller mere generelt ikke bare er brugbare men afgørende for teoribygningen. Der er imidlertid forskellige måder at argumentere for værdien af karikaturmodeller. To af dem kommer til udtryk i (Wilde & Singh, 1998) og (Salinas, 2001). Lad os starte med den ældste.

Richard E. Wilde og Surjit Singh begynder deres kapitel om faseovergange – det første kapitel i den del som omhandler anvendelsen af statistisk mekanik – lige på og hårdt med et forsvar for karikaturmodeller. De skriver at man ofte antager at opdagelsen af partiklernes bevægelseslove er det vigtigste og sværeste skridt i forståelsen af makroskopiske fænomener. Denne opfattelse “lader til at medføre at så snart de fundamentale love for partiklers bevægelse er opdaget, er resten let og består udelukkende i anvendelser.” (Wilde og Singh, 2001, s. 83). Imidlertid, fortsætter de, har faststoffysikeren Philip W. Anderson skudt dette synspunkt i sænk i en artikel fra 1972 med titlen *More is different* (“mere er anderledes”). Andersons hovedpointe er at selv hvis bevægelseslovene og Teorien for Alting er kendte, er der ikke kun “oprydningsarbejde” tilbage men også meget *fundamentalt* arbejde som angår systemers basale egenskaber. Årsagen er at systemer bestående af mange partikler har bestemte egenskaber som kun opstår når systemerne er tilstrækkeligt store og komplekse, og



Figur 2. De to moderne lærebøger af de fire udvalgte.

sådanne systemer opfører sig altså anderledes end summen af de individuelle partikler.

Til denne “mere er anderledes”-pointe føjer Wilde og Singh en pointe af en anden faststoffysiker, Michael E. Fisher. Han argumenterer for at vores mål *ikke* er at udarbejde modeller som efterligner virkelige systemer mest muligt. En efterligning som det er svært at skelne fra originalen, ville ikke give os forståelse fordi vi i givet fald ikke ville have opdaget noget vi ikke vidste i forvejen, men bare have reproduceret det virkelige system. I stedet for “skal vi gå udover beregninger og lede efter universel opførsel. Kun i det tilfælde vil vi finde at visse af systemets egenskaber er fundamentale for forståelsen af det, og at visse andre bare er uvæsentlige detaljer.” (Wilde og Singh, 1998, s. 84). Universalitet, forklarer Wilde og Singh, søger de væsentlige egenskaber som kun afhænger af nogle få basale parametre og er uafhængige af specifikke og irrelevante detaljer. For at opdage en sådan opførsel “må man studere så mange modeller som muligt. Kun fra sådanne studier kan ny opførsel som er fraværende i systemer bestående af få legemer, opstå.” (Wilde og Singh, 1998, s. 84). Til den ende er karikaturmodeller uundværlige. Wilde og Singh begrænser ikke dette forsvar for karikaturmodeller til faseovergange men lader det gælde alle systemer hvor mange partikler vekselvirker.

Silvio R.A. Salinas motiverer i sin lærebog brugen af karikaturmodeller på en anden måde. Han appellerer også til universalitet, men ikke som et ideal for vores forståelse. Derimod er universalitet et træk som er indbygget i fænomenerne uafhængigt af hvad det er vi kigger efter. Salinas begynder det første af sine tre kapitler om faseovergange med at skitsere historien bag denne del af fysikken. I 1960’erne afslørede eksperimen-

ter at flere termodynamiske størrelses afhængighed af temperaturen kan beskrives med potensfunktioner. Fysikerne fandt endvidere at forskellige fysiske systemer såsom væsker og magneter har samme værdier for disse potenser, de såkaldte *kritiske eksponenter*, og derfor i en vis betydning har samme opførsel. Desuden indikerede eksperimentelle data, såvel som en mængde teoretiske beregninger, eksistensen af klasser af universel opførsel hvor nogle få parametre (f.eks. dimensionen af systemet) er nok til at definere et sæt af kritiske eksponenter.

Fra denne korte historie drager han følgende konklusion: Pga. den universelle karakter af faseovergange “er det relevant at betragte forsimplede men ikke-trivielle statistiske modeller, såsom Ising-modellen [...]” (Salinas, 2001, s. 236). Universalitet viser at de individuelle træk ved systemerne som udviser faseovergange, ikke kan være afgørende. Dette betyder at man skal lede efter prototypiske systemer som repræsenterer hovedtrækkene ved de enkelte systemer. Så hvor Wilde og Singh anvender en slags ideologi til at argumentere for at vi *bør* anvende karikaturmodeller generelt, bruger Salinas teoretiske og eksperimentelle indsigter inden for det konkrete område til at sige at det er *tilstrækkeligt* at analysere sådanne modeller i konstruktionen af en mikroskopisk teori. Dette betyder at der faktisk er ret stor forskel på de beskeder de to lærebøger sender med hensyn til *hvorfor* karikaturmodeller er brugbare. En praktisk konsekvens af denne forskel er at hvis den hypotetiske student læser Salinas, vil han eller hun alt andet lige kun bruge karikaturmodeller i fremtidige situationer i fald der er redegjort for at der findes universelle træk i det empiriske materiale, mens en læser af Wilde og Singh derimod vil bruge denne type modeller i alle situationer. Den ensidige brug af karikaturmodeller i begge bøger har ikke samme konsekvenser som den ensidige brug af mere realistiske modeller i Huang (at udelukke andre typer modeller), fordi der ikke er samme behov for at argumentere for relevansen af realistiske modeller – det er klart at denne type modeller er brugbare. Der er derfor ikke en skævvridning for læreren at rette op på.

Der er ikke meget forskel på *hvordan* karikaturmodeller mere systematisk anvendes i de to bøger. Lad os tage (Wilde & Singh, 1998) som eksempel. De skriver at opgaven for enhver teori for faseovergange er to-foldig: På den ene side skal en sådan teori forklare eksponenternes universalitet, dvs. hvorfor eksponenterne for en række meget forskellige systemer antager de samme værdier. På den anden side skal en teori afgøre hvordan egenskaber ved energifunktionen for et systems mikroskopiske byggesten bestemmer værdien af eksponenterne.

Det første problem løses af renormaliseringsgruppeteori. Det eneste som er væsentligt i vores sammenhæng, er at Ising-modellen bruges i udstrakt grad i denne forbindelse. Det andet problem er mere interessant for nærværende undersøgelse. Løsningen på dette problem er at man ved at undersøge en række karikaturmodeller, herunder adskillige varianter af Ising-modellen, har fundet at eksponenterne

alene afhænger af nogle få parametre, nemlig (i) det fysiske systems dimension; (ii) dimensionen af spinnets vektorrepræsentation og (iii) rækkevidden af de mikroskopiske vekselvirkninger. Disse moderne lærebøger sender derfor et budskab om at teoretikerens opgave er systematisk at undersøge sammenhængen mellem model og naturen af faseovergangen på denne måde. God modellering er ikke et spørgsmål om at opnå en så præcis beskrivelse af et konkret fysisk fænomen som muligt, men at belyse universelle egenskaber. Hvis man er i stand til at give en sådan beskrivelse af hvordan træk ved energifunktionen fører til eksponenter, dvs. fænomenets universelle egenskaber, har man *forstået* fænomenet. Dette er en helt ny måde at organisere fænomenteorien for faseovergange på. Huang understreger at en fænomenteori skal være en integreret del af en forenet teori for hele fysikken, og for ham er sammenhængen med kvantemekanikken væsentlig. Ifølge Huangs synspunkt er de moderne lærebøgers teoriorganisering for forsimplet. Pathria på sin side bruger Ising-modellen til at fange de essentielle træk ved systemet men går ikke videre end til at konstatere om modellen er i stand til at beskrive trækkene eller ej. De moderne tilgange tager endnu et skridt og fremlægger en overordnet filosofi for hvornår vi kan sige at vi har forstået fænomenet. Denne filosofi er ret ensidig, og studenten vil i andre sammenhænge møde andre typer fænomenteorier. For at forberede studenten bør læreren altså diskutere fordele og ulemper ved den anvendte fænomenteori, så studenten ikke afviser teorier fremover.

Konklusion

En student som læser de fire bøgers behandling af Ising-modellen, lærer stort set det samme *faktuelle* stof om modellen (selvom der er nogle forskelle i behandlingen af visse emner, f.eks. om udledningen af den matematiske løsning er medtaget eller ej). At lære fysik er imidlertid ikke bare et spørgsmål om at kende de fundamentale fysiske teorier og hvordan de skal anvendes i problemsituationer, men også om at erhverve sig en række ideer og forestillinger om hvad fysik går ud på. Ovenstående analyse viser at de fire bøger, enten eksplicit eller implicit, sender forskellige budskaber til læseren, dvs. studenten, om fysisk modellering.

For det første er der forskellige budskaber om hvad en god model er. Fra Huang til de moderne lærebøger sker der et skift hen imod at Ising-modellen kan anvendes til at modellere faseovergange. Huang beskriver Ising-modellen som for forsimplet til at være af anden værdi for teorien for faseovergange end som en illustration. Han sender derfor et budskab om at kun teoretisk velfunderede modeller er acceptable. De tre andre lærebøger accepterer alle Ising-modellen, selvom de skriver at den i udstrakt grad forsimples den fysiske virkelighed. Studenten som læser disse lærebøger, modtager derfor et budskab om at *karikaturmodeller* kan bruges til at forstå virkeligheden. En student som har taget Huang's budskab til sig, vil fremover sandsynligvis afvise

andres karikaturmodeller og ikke selv opstille sådanne modeller, mens dette ikke gør sig gældende for en læser af de tre andre bøger.

De tre seneste lærebøger sender imidlertid forskellige budskaber om *hvorfor* vi kan anvende denne type modeller. Pathria henviser til at *matematiske problemer* gør at vi må undersøge karikaturmodeller. Wilde og Singh argumenterer for relevansen af disse modeller med et filosofisk argument om at vi *bør* benytte karikaturmodeller fordi vi i vores forsøg på at forstå et fænomen er på udkig efter dets universelle og ikke dets specifikke opførsel. Salinas bruger derimod det eksperimentelle og teoretiske faktum at faseovergange udviser universel opførsel, til at argumentere for at vi kan *nøjes* med at finde en karikaturmodel, idet mere komplicerede og realistiske modeller vil give anledning til den samme slags opførsel som denne karikaturmodel.

I alle bøgerne anvendes modeller til at skabe en fænomenteorier for faseovergange, men det er meget forskellige teorier de vil bygge. Huang sender et budskab om at vi er interesserede i en forenet teori for fysik baseret på kvantemekanik, og denne teori skal bruges til at forstå alle fysiske fænomener, herunder faseovergange. I de andre lærebøger er det i højere grad faseovergangsfænomenerne i sig selv som er i centrum, og statistiske mekaniske modeller benyttes operativt til at forstå disse fænomener. Pathria bruger i praksis en form for tilgangspluralisme: Han inddrager en række modeller, herunder Ising-modellen, som har vidt forskellig status. Nogle er realistiske repræsentationer af det fysiske system mens andre karikerer det. I de moderne lærebøger er der en helt bestemt opfattelse af hvordan teorien for faseovergange skal organiseres: Ud fra en mængde karikaturmodeller bestemmes sammenhængen mellem energifunktion og værdien af kritiske eksponenter, dvs. hvilken type faseovergang energifunktionen giver anledning til.

Dette betyder at der er en forskel i hvilke træk ved den fysiske virkelighed som teorianerne ønsker at indfange: De moderne lærebøger fokuserer ensidigt på de universelle træk ved en række fysiske systemer mens Pathria ud over disse træk også ønsker at beskrive de specifikke træk ved en konkret faseovergang, gaskondensation. Lærebøgerne vil derfor forme studentens opfattelse af hvad det er vi går efter i modelleringen, forskelligt – hvilket har betydning for hvordan studenten handler fremover.

I processen fra Huang til de moderne lærebøger sker der en ændring i opfattelse af hvad det vil sige at forstå et fænomen. Huang lægger op til at det er at kunne give en model som er i overensstemmelse med kvantemekanikken, og som er i stand til at reproducere trækkene ved den fysiske virkelighed. Pathria er mere vag i den forbindelse og giver udtryk for at flere forskellige modeltyper kan give indsigt. De moderne lærebøger er skarpere: At forstå systemet vil her sige at være i stand til at fange de universelle træk ved systemet, hvilket gøres ved den ovenfor nævnte teoriorganisering.

Ved først øjekast fremtræder de fire bøgers behandling af Ising-modellen ens fordi

de dækker det samme materiale, men ovenstående analyse viser at der er stor forskel på hvilke budskaber om modellering der bliver sendt i de fire bøger. I betragtning af betydningen af modellering i fysikundervisning er det derfor langt fra ligegyldigt hvilken bog der undervises efter. En student som læser en lærebog vil få en opfattelse af grundlaget for vurdering af modeller som på en række punkter er forskellige fra den opfattelse en læser af en anden lærebog opnår. Disse opfattelser har betydning for hvordan studenten vil opføre sig i fremtidige situationer.

Som nævnt spiller andre undervisningsfaktorer end lærebøger ind i dannelsen af studentens forestillinger om fysik. Alt efter lærerens opfattelse af god modellering skal han eller hun tilrettelægge undervisningen så der rettes op på skævvridninger som artiklerne giver udtryk for, enten ved direkte at modgå budskaberne i undervisningen eller ved at inddrage materiale som sender andre budskaber. Lærebøgernes budskaber bliver sjældent eksplicit beskrevet, og det kan derfor være svært at vide hvor der skal sættes ind, men jeg mener at ovenstående analyse kan bidrage til at udpege nogle pejlemærker for hvilke spørgsmål der er i spil.

Referencer

- Dolin, J., Krogh, L.B. & Troelsen, R. (2003). En kompetencebeskrivelse af naturfagene. I: H. Busch, S. Horst & R. Troelsen (red.), *Inspiration for fremtidens naturfaglige uddannelser. En antologi*. København: Undervisningsministeriet, Uddannelsesstyrelsen.
- Huang, K. (1963). *Statistical mechanics*. New York: Wiley.
- Nathan, O. & Smith, H. (1999). *Den harmoniske begejstring: Fysikkens natur, naturens fysik*. København: Gyldendal.
- Niss, M. (2005). *Models, phenomena, and understanding: The Lenz-Ising model and critical phenomena 1920-1971*. Roskilde: IMFUFA. Tekster fra IMFUFA 444.
- Niss, M., & Jensen, T.H. (2002). *Kompetencer og matematiklæring – ideer og inspiration til udvikling af matematikundervisningen i Danmark* (nr. 18). København: Undervisningsministeriet.
- Pathria, R.K. (1972). *Statistical mechanics*. Oxford: Pergamon Press.
- Salinas, S.R.S. (2001). *Introduction to statistical physics*. New York: Springer.
- Wilde, R.E. & Singh, S. (1998). *Statistical mechanics. Fundamentals and modern applications*. New York: Wiley.