

# Modelltenkning og fenomenologi

En kommentar til Markus Lindholm, av Arne Nicolaisen

## Innledning

I nr. 54 av Meddelelser, des. 2016, s. 25-35, har Markus Lindholm (ML) en tankevekkende artikkel om naturfagsundervisningen i steinerskoler, fortrinnsvis rettet mot mellomtrinnet og ungdomstrinnet, slik jeg forstår det. I mangt og meget kan jeg følge ML, fremfor alt i hans engasjement for en forbedring av naturfagsundervisningen. Hans inndeling av undervisningen i modell, naturhistorie og empiri fortjener en grundig gjennomgang. Synspunktene hans har fått meg til å tenke videre, riktignok da for en del om forhold på videregående trinn, og i den delen av naturfagsundervisningen som ML bare i liten grad berører, nemlig fysikk. Men også det han sier om geologi og kjemi på mellomtrinnet og i ungdomstrinnet har interessante aspekter som fortjener en fordypning.

Jeg ønsker her skisseaktig å trekke frem visse punkter hvor jeg har stilt spørsmål og ikke helt kan følge ML, og oppfordre til en diskusjon om disse, og vil så gjerne komme tilbake med en grundigere redegjørelse ved en senere anledning. For hans synspunkter vil ha vidtrekkende konsekvenser og betydning for den daglige praksis.

ML begynner artikkelen oppløftende, med sitater fra "Den lille prinsen", om det å knytte vennskapsbånd. Det er noe vi alle kan forbinde oss med. Men så påstår han at slike bånd "...handler ikke om kunnskap i det hele tatt, men om troskyldighetens betatthet". Men innebærer ikke dette å oppfatte kunnskap på en nokså begrenset måte? For har ikke barnet kunnskap om hunden eller katten, som det elsker? Barnet vet tidlig at hunden tigger ved bordet, og det kan godt lese dens kroppsspråk. Det vet at hunden trofast står ved døren og venter når vi er inne på butikken, mens katten går sine egne veier osv. Hvorfor skal ikke dette telle som kunnskap?

Han illustrerer sitt poeng (om at det gjelder fantasi, ikke kunnskap) ved å henvise til fortellinger "der rare ting kan skje". Her er Askeladden nevnt ved siden av Tommy og Tigeren. Om det er folkeeventyr eller Gubben og Katten er ikke så viktig. Det viktigste er at det skjer "rare ting".

Er det virkelig dette ML mener? Jeg er sikker på at også han ser en vesentlig forskjell, pedagogisk sett, mellom eventyrene og fortellingen om Gubben og Katten, mellom Askeladden og Tommy og Tigeren, men akkurat her i denne argumentasjonen gjør han gåtefullt nok ingen distinksjon.

Etter visse interessante generelle synspunkter på naturfagsundervisningen går teksten over til en gjennomgang av den første geologiundervisningen som et eksempel. ML annonserer ganske raskt et program: Modelltenkning må introduseres i naturundervisningen i mye større grad enn det som er praksis i dag.

Begrunnelsen for dette programmet er klar:

*«Modeller.... gir nytt lys og ny forståelse til fenomenene. Det viktige er deres evne til å veilede tankene og sette dem på sporet av ny forståelse og nye fortolkningsmåter. Slik skaper de stier for barnets famlende, sannhetssøkende tanker. Noen modeller... tilhører fellesskapet og utgjør en vesentlig del av en sivilisasjons felles forståelse. Og videre: Evolusjonsteorien, lys som elektromagnetisk stråling, stoffer som bestående av atomer og molekyler, eller Big Bang, er også velkjente modeller.»*

ML stiller også modelltenkningen opp som en motsetning til fenomenologi, som slik han ser det ikke gir «...elevene mulighet til å øve sin analytiske tankekraft og sin kløkt, noe som er helt nødvendig i årene frem mot puberteten. ....Men det er ikke bare de analytiske evnene som blir liggende brakk om modellene forsømmes. Også selve læringsverdien blir betydelig redusert. For det er modellene som

*bygger elevenes fremtidige forståelseshorisont, som skaper overordnet kontekst, og uten modellenes orienteringshjelp blir natur lett stående som punktuelle rare enkeltfenomener, der læring av detaljer og enkeltheter kan fremstå som meningsløst, fordi de ikke får orienteringshjelp fra noen generaliserende modell.... Alle de vitenskapelige modellene som vår sivilisasjon er veiledet av – naturlig seleksjon i biologi, atomteorien i fysikk eller bindingsmodeller i kjemi – er fellesskapets forståelsesramme, og uten en sikker kjennskap til disse blir elevene stengt ute fra sin samtid.»*

Det er mye i dette programmet jeg kan slutte meg til. Særlig gjelder det viktigheten av også før puberteten å føre elevene inn en generaliserende lærebygning, at de setter enkelterfaringer inn i en systematisk tankemessig sammenheng. Men jeg har ikke hatt de samme negative erfaringene med fenomenologi.

### **Erkjennelsesteoretiske problemer ved rådende trend innen modelltenkningen**

Det er blitt en trend i naturvitenskaplig forskning å kalle det meste av tankemessig ordning av naturfenomener for modell. Dette gjelder i stor grad i fysikken. Et eksempel er Galileis falllov:  $s_1/s_2 = t_1^2/t_2^2$ . En av de ledende tyske fysikk-didaktikere har beskrevet en behandling av ulike eksempler av fritt fall ved hjelp av software-modeller (Mikelskis-Seifert et al, 2005), men angir dessuten selve Galileis falllov som et eksempel på en modell av det idealiserte frie fall. Også andre fysikere betrakter selve falloven som et eksempel på modellering av virkeligheten.

Men denne loven er bare en konsekvens av en begrepsmessig bearbeidelse av å ha iaktatt fallende gjenstander. Den matematiske beskrivelsen er likeverdig med å si: «Hastigheten øker jevnt med tiden». Man kunne selvfølgelig tenkt seg andre lovmessigheter for det frie fall, f.eks.: 2) «Hastigheten øker jevnt med fall-lengden». 3) «Hastigheten øker først jevnt med tiden, men avtar så etter hvert til den har nådd et metningspunkt, hvor den ikke øker lenger, men holder jevn fart.»

Alle disse alternativene ble nøye vurdert av Galilei, og i mekanikkundervisningen i Vg1 er det absolutt på sin plass å undersøke disse alternativene, fordi disse forestillingene forefinnes hos elevene som såkalte prekonsepter. Alternativ 2) og 3) er imidlertid lette å falsifisere. De duger ikke som «modeller» for fritt fall.

Imidlertid er det mange fysikere som ikke er villige til å kalle Galileis falllov for en modell av det frie fall. De ville heller kalle det en naturlov. Innenfor fenomenologien mener jeg at man kunne kalt denne loven for et urfenomen. – «I det frie fall øker hastigheten jevnt med tiden», er urfenomenet for det frie fall. Det er ikke noe ubestemt eller uklart ved denne formuleringen. Den er helt presis. Hva slags unntak finnes? I prinsippet ingen. Innenfor en idealisert virkelighet uten luftmotstand, med konstant gravitasjon, hastigheter langt unna lyshastighet, gjelder Galileis falllov uinnskrenket, og ingen fysikere ville tenke på å betvile den, selv mer enn 400 år etter at den ble oppdaget. Det samme kan sies om Newtons gravitasjonslov, Newtons 2. lov for akselerert bevegelse ( $K = ma$ ), Faradays induksjonslov, vektstangsloven, Gay-Lussacs lover for ideelle gasser, bevegelsesmengdens bevaring ved støt, tilstandsligningen osv. osv.

Alle disse naturlovene kan på samme måte som Galileis falllov betraktes som urfenomener. I utgangspunktet kan man ikke komme bakom disse lovene. Det inngår ikke i noen fysikkundervisning å forklare disse lovene ved noe som er enda mer fundamentalt, og i undervisningssammenheng besitter de dermed et av urfenomenets viktigste kjennetegn. Innenfor fysikken kan altså urfenomenene i mange tilfeller formuleres matematisk. Det er ikke noe ubestemt eller unøyaktig ved dette, og behandlingen av disse urfenomenene i praksis utfordrer i høyeste grad elevenes analytiske og begrepsmessige evner. Men av de ovennevnte eksempler er det bare vektstangloven som hører hjemme i grunnskolen (8- klasse). Men det finnes nok av eksempler innenfor akustikk, varmelære og optikk som kan behandles presist og begrepsmessig i ungdomstrinnet, uten å introdusere modeller.

Jeg mener det er berettiget å betrakte disse naturlovene eller urfenomenene som begreper. I eksempelet ovenfor om Galileis falllov mener jeg å ha påvist at når man har funnet falloven, så har

man funnet det begrep som svarer til det man kan iaktta, nemlig en gjenstand som faller. Før man har dette begrep har man ikke hele virkeligheten. For da har man ikke skjelnet det frie fall fra andre typer bevegelse med økende fart, f.eks. en kajakk som flyter nedover en elv, en bil som akselererer i et lyskryss etter at det er blitt grønt lys, en person som løper 60 m, eller en ørn som stuper nedover. Til iakttagelsen av den fallende sten føyer man begrepet som er uttrykt ved falloven, og da har man den totale virkelighet «fritt fall».

Det er vesentlig å erkjenne at ved ethvert fall, følger bevegelsen et bestemt mønster, nemlig den konstante økning av hastighet, som man ikke finner i andre tilfelle (eksemplene ovenfor). Det er ikke så lett å merke, fordi falloven nettopp ikke gjelder for ethvert fall, men skjuler seg når luftmotstand spiller en rolle.

Jeg mener derfor det er problematisk å kalle Galileis falllov for en modell av det frie fall, for det finnes ikke noen virkelighet å lage modell av. Å kalle Galileis lov for en modell av virkeligheten vil måtte forutsette at det finnes en ferdig virkelighet som avbilder seg i vår bevissthet som forestilling, omtrent som sanseiakttagelser uten noen spesiell anstrengelse fra vår side, men selv en overfladisk refleksjon vil avsløre at det ikke foregår slik. Vi erfarer alle at vi må tilkjempe oss våre begreper gjennom indre arbeid. De kommer ikke av seg selv, slik som hos englene.

I det øyeblikk vi har med «falllov» å gjøre, og ikke om bevegelsesligningen «for den stenen som jeg akkurat lot falle», presenterer man en lovmessighet for tenkningen og inn i iakttagelsen. Det er en betydelig anstrengelse som mange elever ikke helt makter. Derfor er fysikk et meget vanskelig fag.

Med modell forstår vi jo vanligvis en kunstig konstruksjon som avbilder virkeligheten på en forenklet måte, f.eks. en modell av et hus. Vi vet at modellen ikke er huset. Vi kan gå til huset og lære det å kjenne. Vi danner oss visse forestillinger om dette huset. Et utsnitt av disse forestillingene søker vi å realisere i modellen. Men vi bruker f.eks. isopor istedenfor murstein. Hard papp istedenfor trebjelker. Det går ikke an å få vann ut av modellkranen på badet. Det går ikke an å bo i modellen. Det er ikke virkeligheten. Men det er fornuftig å lage en slik modell. Vesentlige elementer i huset er mye lettere å få oversikt over i en slik modell. Et raskt blikk på modellen gir oss verdifull kunnskap om huset. Og en byggmester kan lettere bruke modellen som utgangspunkt hvis han skulle bygge et nytt hus. Det viktige ved denne detaljerte beskrivelse av en slik anskuelsesmodell er å klarlegge at en modell alltid må være en representasjon av en virkelighet. Den er aldri virkeligheten selv.

Imidlertid omfatter modellbegrepet en rekke forskjellige og ikke beslektede ting. Det finnes **anskuelsesmodeller**, for eksempel skjelettet i biologiundervisningen, den ovennevnte arkitekturmodell eller globusen, **funksjonsmodellen**, for eksempel modellfly med fjernstyring, **analogimodellen** (transistoren er for elektrisiteten det som ventilen er for vannstrømmen i rør) og **matematiske modeller** (angrepspunktet til en kraft, et massepunkt, lysstrålen). En viktig klasse av modeller er det jeg vil kalle **forklaringsmodeller**. De forklarer fenomener ved hjelp forenklete eller idealiserte systemer, gjerne ved hjelp av erfaringer og begreper vunnet innenfor et annet sanseområde. Her ville jeg klassifisere lys som elektromagnetisk stråling (elektromagnetiske begreper istedenfor synsintrykk), varmeerfaringer som statistisk mekanikk (bevegelse istedenfor varmeintrykk) og ulike atommodeller (mekaniske, kvantemekaniske og elektromagnetiske begreper istedenfor en rekke ulike sanseopplevelser).

Også andre typer modellbegreper spiller en rolle i vitenskapen og er drøftet i litteraturen, men jeg tar de ikke opp her, idet de ikke har noen relevans for resten av denne artikkelen.

De ovennevnte modeller må altså skjelnes fra det som ofte kalles modeller, men som representerer virkeligheten og kan betegnes som naturlover eller urfenomener.

Modeller kan forstås som abstrakte og forenklete representasjoner av virkeligheten, og må ikke forveksles med den. Selv har jeg opplevd hvordan endog reflekterte og dyktige fysikere ikke passer nøye nok på her. En gang var jeg tilstede ved et foredrag av en anerkjent elementærpartikkelfysiker som i starten av foredraget poengterte modellkarakteren av elementærpartikkelfysikken, men i løpet

av foredraget ble han til de grader overmannet av sitt eget engasjement, at flere av elementærpartiklene ble fremstilt som materiens virkelighet.

I lys av ovenstående inndeling vil jeg betegne Steiners strekskisse av mennesket i form av kule, månesigd og påsatte strek-lemmer som en anskuelsesmodell. Steiner bruker imidlertid ingen steder i foredraget betegnelsen modell. Det er det ML som innfører. I tilknytning til denne modellen foreslår Steiner at elevene så langt de klarer, knytter et knippe av forestillinger og oppfordrer, som ML ganske riktig nevner, til at elevene endog utvider denne strekskissen til en tredimensjonal skulptur. Dette er selvfølgelig et klokt pedagogisk grep, og innføring av slike anskuelige billedmodeller av en kompleks virkelighet, som jo det tredelte menneske representerer, vil ganske sikkert være fruktbart. Der er jeg helt på linje med ML. Slike modeller vil ikke kunne forveksles med virkeligheten, og adskiller seg således vesentlig fra atom-modellen.

Men ML kaller også det 4-delte og det 3-delte menneske for en modell: *Rudolf Steiner brukte mange modeller i sin antroposofi, for eksempel inndelingen av mennesket i det han hevder er "fysisk legeme", "eterlegeme", "astrallegeme" og "jeg" eller sjelens tre grunnkrefter og deres fysiologiske motsvar i nerve-sanse-organisasjon, rytmisk organisasjon og stoffskifte-lemme-organisasjon - en modell han for øvrig mente også kunne brukes til å forklare et samfunns strukturer og organisering.*

Det er muligens ikke uberettiget å kalle det 3-delte mennesket som en analogi-modell for de tre samfunnsstrukturer. Man kan for eksempel si at nerve-sanse-systemet er for mennesket det åndslivet er for samfunnet, altså en analogimodell, jfr. ovenfor. Et samfunns strukturer fremtrer som en sosial virkelighet. Denne virkelighet kan være i likevekt, eller representere en skjevutvikling. Vi trenger ikke gå lenger enn til vårt eget nasjonale samfunn for å innse at rettslivet har tatt overhånd over åndslivet. Men dette kan ikke forklares ved at en stor gruppe mennesker skulle ha utviklet det rytmiske system for sterkt i forhold til nerve-sanse-systemet eller eventuelt ved en hvilken som helst annen form for tilbakeføring til det 3-delte mennesket. Det 3-delte menneske kan altså ikke fungere som forklaringsmodell for samfunnsstrukturene. Steiner selv brukte vel heller ikke her betegnelsen «modell». Ordet «modell» er innført av ML.

Derimot mener jeg det ikke stemmer at det 3-delte mennesket eller det 4-delte mennesket selv kan betraktes som modell. Jeg mener vi må se dette fra en annen side: For eksempel når det gjelder det 4-delte menneske gjør Steiner bestemte iakttagelser. Om disse danner han seg begrepet eterlegeme og forbinder det med disse iakttagelsene. Tilsvarende for fysisk legeme, astrallegeme og jeg. Da har han en virkelighet: Det 4-delte menneske som forestilling, en sammenføyning av bestemte iakttagelser med deres tilhørende begreper. Den nominalistiske erkjennelsesteoretiske tilnærming som ligger til grunn for å kalle det 4-delte eller 3-delte mennesket for en modell av virkeligheten, ville Steiner formodentlig ha avvist.

Men finnes det da ikke modeller innenfor fysikken? Jo da, mange. ML nevner noen av dem: Lys som elektromagnetisk stråling, atommodellen, Big Bang. Men det finnes også mange andre modeller, f.eks. varme som bevegelse av atomer/molekyler (såkalt kinetisk gassteori eller statistisk mekanikk), lyd som longitudinelle trykksvingninger i luften, himmelens blåfarge som et resultat av Rayleigh-spredning i atmosfærens nitrogenmolekyler osv.

Disse modellene forklarer fenomener innenfor et bestemt sanseområde ved hjelp av fenomener og begreper tatt fra et annet sanseområde, og da helst ved hjelp av mekanikk.

Dette henger sammen med den gåtefulle inndelingen av våre sanseområder i subjektive og objektive sansekvaliteter som i sin tid ble foretatt av Galilei.

### **Eksempel: Modeller av lys - en kompleks situasjon**

Modellforestillinger om lyset har gjennomgått ulike nivåer gjennom tidene. Kepler gjorde billedoptiske erfaringer og forklarte mange av disse ved stråleoptiske konstruksjoner. Filosofen René

Descartes innførte «stokkemodellen»: «Lyset er som en stokk», sa han. «Stokken er rett. Når jeg dytter i den ene enden og presser den andre enden mot skulderen din, da kjenner du det i samme øyeblikk som jeg dytter. Slik er lyset også. Erfaringer fra skyggecasting viser at det går i rette linjer. Når jeg tenner et lys et sted i rommet, blir det i samme øyeblikk lys på veggen».

Dette er selvfølgelig en meget primitiv modell, men den gjengir to aspekter ved spredning av lys.

Men modellen duger ikke til å forklare lysets brytning. Newtons korpuskelmodell går noe lenger, den er designet for å forklare spektret som oppstår ved brytning. Men den duger ikke til å forklare interferensfarger i tynne hinner og fuglefjær eller lysets bøyning, såkalt diffraksjon. Det gjør imidlertid Youngs bølgemodell for lyset (1802). Denne modellen var nærmest enerådende frem til 1905 da Einstein innførte kvantemodellen (eller fotonmodellen) for lys for å forklare den fotoelektriske effekt som i dag utnyttes i solceller. Nyere forskning har nok vist at bølgemodellen også ville kunne forklare fotoelektrisk effekt. Fotoner blir bare en aktuell forklaringsmodell for situasjoner som stort sett er kunstig frembrakt, som f.eks. i lasere, eller i den såkalte Compton-effekt (1923) som riktignok dreier seg om røntgenstråling og ikke synlig lys. Nick Thomas har utviklet en fotonmodell der fotonene matematisk er dobbeltkjegler som strekker seg i det uendelige i et «Counter Space», mens rådende fotonmodeller betrakter fotonet som et uhyre sammenpresset lite «bølgetog», slik at det får karakter av å være tilnærmet punktformet. For Nick Thomas er lys noe eterisk og kan da bare få en adekvat matematisk/geometrisk representasjon i «Counter Space» eller i motrommet, som han kaller det.

I billedoptikken har vi ingen modell. Da har vi virkeligheten i sanseverdenen. Billedoptikken fastlegger de grensebetingelser som alle modeller må tilfredsstillende for å bli tatt alvorlig som modeller. I stråleoptikken eller den geometriske optikken arbeides det med strålen som matematisk modell. Stokkemodellen til Descartes er en primitiv analogi-modell. Bølge- og partikkelmodellene er det jeg har kalt for forklaringsmodeller.

Ved de sistnevnte forklaringsmodeller forekommer det meg imidlertid at de ikke er modeller av lyset, men av lysets utbredelse. Er ikke elektromagnetiske bølger bærere av lys på samme måte som trykksvingninger i luften er bærere av lyd, språket er bærer av mening?

Man kunne også lage en analogimodell av lys: Maratonløperen som bærer av budskapet om at perserne er slått ved Marathon. Løperen er vakuemet, oppdraget er lyset (det som driver løperen fremover, og som derfor bringer løperen i løpemodus, og som fører til at han blir andpusten og sliten. Dette svarer til forstyrrelsen av vakuemet som lyset forårsaker) og budskapet svarer til moduleringen av lyset etter en fastlagt syntaks. Altså, budskapet er ikke selve lyset. Jeg stiller det som forslag for å illustrere kompleksiteten i problemet.

Jeg trekker frem disse momentene for å poengtere at modelltenkning ikke uten videre kan anses som uproblematisk. Man må tenke svært nøye igjennom hvilken virkelighet man faktisk har laget en modell av, hvilken type modell man opererer med, og hvilke begrensninger modellen har, eller hvor grensene for dens gyldighetsområde ligger. Slike presiseringer skaper igjen problemer når de brukes i undervisningsøyemed.

### **Pedagogiske problemer ved fysiske modeller**

ML trekker frem atommodellen som et eksempel på en modell som det er viktig å innføre i undervisningen.

Jeg er enig med ham i at atommodeller er sentrale kulturfrembringelser som elevene må få kjennskap til. Hvis ikke, vil de mangle en viktig referanseramme for kommunikasjon med leg og lærd. Atommodellen er en omfattende modell som brukes til å forklare mange ulike fenomener. Mikelskis-Seifert har gjort en grundig undersøkelse over hvordan elever i 10.kl og Vg1 responderer på undervisning om modeller på mikronivå (Mikelskis-Seifert et al, 2003). Elevene har allerede lært en god del om atommodellen på lavere trinn. Men en ganske stor prosentandel av dem tilordner de

atomære objektene egenskaper som hører hjemme i den makroskopiske verden, altså f.eks. at atomene har et utseende, er runde kuler, har en farge o.l. Forskerne gir så et 10-timers kurs i atommodeller. Selv etter denne innføringen er det en vesentlig prosentandel av elevene som fremdeles forbinder atomære objekter som elektroner og kjerner med makroskopiske egenskaper. Elevene gjennomgår så et slags erkjennelsesteoretisk kurs om modelltenkning i forhold til tenkning direkte relatert til makroverden. Etter dette reduseres andelen elever som blander inn irrelevante makroskopiske forestillinger signifikant, men fremdeles er det over 10% av elevene som ikke klarer å innskrenke seg til et begrenset spekter av mekaniske forestillinger som romforhold, hastighet, masse, energi og dessuten ladning.

Er det så farlig? Tja, kanskje ikke. Uansett kan atommodellen bare undervises til et visst nivå. For elever som tar fysikk fordypning på høyeste trinn kan helt elementære elementer av kvantefysikken gjennomgås. Men bølgeligningen til Erwin Schrödinger (1927) eller matrisemekanikken til Werner Heisenberg (1926) er utelukket på videregående trinn. Det ville kreve behandling av komplekse funksjoner og beherskelse av egenverdiproblemer i matrisematikken. Dessuten beherskelse av sannsynlighetsregning på høyt nivå. De fleste elever kommer ikke lenger enn til en forenklet fremstilling av Bohrs atommodell, og den gjelder som kjent bare for hydrogenatomet. Alain Aspect, den berømte franske fysikeren som i 1982 avgjorde eksperimentelt problemet som Einstein i 1935 hadde stilt til Niels Bohr om sammenfildrede fotoner (den berømmelige Einstein, Podolski, Rosen – artikkelen, eller forenklet EPR), uttalte i et fjernsynsprogram som også ble sendt på NRK i 1983, at ethvert bilde av atomet som henter elementer fra sanseverdenen, blir på et eller annet punkt feil. Og da menes også forestillingen om en kjerne i midten med elektroner i baner, eller i en sky, rundt. Et slikt bilde, og endog Schrödingerligningen, inneholder romforestillinger som er hentet fra den sansbare verden.

Dermed blir læreren stilt overfor det problem at det er påkrevd å gi eleven innsikt i en forenklet atommodell for eksempel Bohrs atommodell, og burde da beflitte seg på å fremheve ideen om de stasjonære energitilstander, og nedtone visualiseringer av elektronbaner og desslige som han vet en moderne forsker ikke ville akseptere.

Deretter kan han gå over til anvendelse i kjemien ved å føre de tallmessige forhold mellom grunnstoffer i en kjemisk forbindelse tilbake til antallet valenselektroner. Noe dypere må man gå for å forklare de ulike typer bindinger. Men igjen, jeg tror at ML har rett i at det kan være viktig å gjøre dette for å føre elevene inn i den felles forståelsesramme som er dominerende i den naturvitenskaplige kultur.

Et siste problemkompleks til eksemplet om atommodell: Undersøkelsen til Mikelskis-Seifert (Mikelskis-Seifert et al, 2003) skjelner ikke mellom de elever som virkelig har forstått tenkningen som gjelder for den atomistiske mikroverden, og de som bare lærer dette utenat. Undersøkelsen er i bunn og grunn et typisk eksempel på at det ikke kan komme ut mer enn det man har lagt inn i den. Holdningen til den som spør, påvirker svarene. Empirikerne vet selvfølgelig dette godt, og anstrenger seg kraftig når spørreformularene som elevene får, utformes. Men de har også sitt eget syn på tingene, som de alltid anser som det riktige.

Skal denne tenkemåte innenfor modeller av mikroverdenen virkelig forstås, måtte elevene til syvende og sist ha vært i stand til å iaktta sin egen tenkning. De må selvstendig oppfatte når de tenker makroskopisk og når de tenker mikroskopisk. Dette er en spesiell selvkritisk evne som etter min erfaring i over 30 år med ungdommer ikke utvikles før i 17-18 årsalderen. Som i alle andre tidsangivelser av denne type, er det stor spredning for et slikt sjelelig modningsnivå. Noen elever utvikler denne evnen enda tidligere, noen først i 19-20 årsalderen, noen elever enda senere, noen aldri. Dermed er det forståelig med denne restprosenten av elever som selv etter en inngående beskrivelse av de to ulike tenkemåter, ikke helt klarer å skjelne mellom modell og virkelighet. Kan det være så farlig? Vel, det er jo ganske utbredt at mennesker ikke skjelner klart mellom sine følelser for en sak og saken selv, eller i en opphetet diskusjon ikke skjelner mellom sak og person, som man

uttrykker det, eller verre: De skjeler ikke helt mellom drøm og virkelighet. Da oppstår problemer med virkelighetsforståelsen, og man kan stille spørsmål ved om de faktisk har forstanden i behold.

På Oslo By Steinerskole, som for øyeblikket har en søkermasse på ca. 300 elever der ca. 50% kommer fra off. grunnskole, 45% fra steinerskoler og 5% fra andre privatskoler, har jeg hatt god anledning til å studere resultatet av ulike innlæringer av atom- og molekylmodeller. Elever fra steinerskoler er etter min erfaring jevnt over mer bevegelig i forestillingsdannelsen, slik at de lettere er mottagelig for nye måter å tenke på. (Dette stemmer godt overens med erfaringene til min gode venn professor i fysikkdidaktikk Jan-Peter Meyn som bl.a. har undervist i fysikk hovedfag på 10. klasse-nivå ved steinerskolen i Erlangen, og har kunnet sammenligne dette med mange erfaringer med grupper fra off. skole) Elever fra off. skole som er opplært i molekyl- og atommodell i ungdomsskolen anvender disse modellene til dels i utide. For eksempel ved at kinetisk gassteori brukes som forklaring når det hadde greid seg med enkle termodynamiske begreper, eller molekylmodeller anføres når det gjelder å forstå enkle varmeprosesser ved faseoverganger, der begreper som *latent varme* og *spesifikk varmekapasitet* hadde gjort nytten, og ville vært viktig å utvikle. De er da i en situasjon hvor en tidlig innprenting av molekylmodeller innebærer en forestillingsfiksering og blir et hinder for ny læring, og det blir vanskelig for dem å finne de rette begrepene for det de kan iakttå i enkle demonstrasjonsforsøk. Slike erfaringer har gjort meg skeptisk til å innføre noen som helst modell av varmeprosesser. Historisk sett har termodynamikken utviklet seg til en sammenhengende systematisk vitenskapelig gren, før kinetisk gassteori ble utviklet som en likeverdig modell der termodynamiske størrelser erstattes med modellforestillinger av molekyler i bevegelse, molekyler som støter mot hverandre og mot vegger i det avlukket som gassen er innestengt i. En videreutvikling av kinetisk gassteori er Statistisk Mekanikk som utvides også til faste stoffer og væsker, men denne fysikkgrenen omfatter modellbetraktninger som først hører hjemme på mastergradstudiet i fysikk på et universitet. Termodynamikken inneholder de begreper som skal til for å forstå alle typer varmeprosesser, inkludert endringer av trykk, temperatur og volum, og uttrykker den virkelighet som modelleres i de beslektede grenene kinetisk gassteori og statistisk mekanikk. Da jeg i sin tid gikk på realgymnaset, besto varmelæren bare av termodynamikk. Behandlingen av disse begrepene i beregningsoppgaver og teoretiske utledninger var sannelig vanskelig nok og krevde en årvåken og presis begrepsdanning, samtidig som den dannet et systematisk og forståelig hele.

I optikken har jeg stått overfor tilsvarende problemer som i termodynamikken. Elever som i ungdomsskolen er blitt innprentet at lys er elektromagnetiske bølger, anvender en slik modell også når en enkel strålekonstruksjon hadde vært adekvat for å forklare det de kan iakttå. I elektrisitetslæren er det en tendens til å foreslå at hendelsene skyldes strømmen eller opphopninger av elektroner, mens en forklaring ved hjelp av strømstyrke og spenning hadde vært på sin plass. Det å plukke ut riktig modell eller skjeler klart mellom modell og virkelighet for et bestemt fenomenområde krever erkjennelsesevner som få elever har utviklet på dette alderstrinnet.

### **Materielle gjenstander består av molekyler**

En følge av utilstrekkelig skjelling mellom atom- og molekylmodeller og virkeligheten er også den meget utbredte oppfatning at den sansbare verdens materielle gjenstander består av molekyler. Dette er i beste fall en upresis talemåte. For det bordet jeg nå sitter og skriver ved, et eikebord, med alle de egenskaper som er karakteristisk for uhøvlet eik: Den har en bestemt hardhet, det er vekslinger mellom lyse og mørke felter, den er brennbar, brungul farge osv; kan ikke utledes av det jeg vet om molekyler. De sansbare egenskapene til eik finner man ingen steder i de organiske molekylene som man analytisk kan dele eiken inn i. Det er ingen sansbare egenskaper i molekylforestillingen til eikemolekyler. Ut av formelen for vann:  $H_2O$  kan man aldri utlede at stålisen som dannes tidlig om høsten, er glattere og hardere enn vårisen. Det må føyes noe mer til. Jeg ville derfor være forsiktig med talemåter som at dette eikebordet består av molekyler. Ved bestemte

prosesser, kjemiske og mekaniske, kan jeg analytisk produsere visse molekyler av eik, men jeg kan tankemessig ikke gå den andre veien: Utlede eikens sansbare egenskaper av de molekyler jeg derved fant formelen på.

Å løse materiens gåte ved å si at den består av molekyler og atomer, kan synes opplagt, men forskyver vel bare problemet. Da ville jeg foretrukket å si at materie er kondensert lys, men heller ikke en slik setning hører hjemme i skoleverket.

Foreløpig disse antydninger rundt modellbetraktninger i fysikken.

## **Modeller i geologien**

I geologien anfører ML tre modeller for å forklare fjell og stein-dannelse: magmatisme, metamorfisme og sedimentasjon. Jeg tviler på om dette kan kalles modeller, men mener det heller representerer begreper. For hva skulle sedimentasjon for eksempel være en modell av? Dette er da en faktisk prosess som finner sted i utformingen av jordoverflaten. Jeg tror kanskje det akkurat her ikke er så avgjørende hvordan man betegner disse tre prosessene. Jeg har selv strukturert geologiperioder rundt disse prosessene, og er enig med ML i det han anfører her. Merkelig nok går ML ikke inn på hvordan han pedagogisk benytter seg av disse prosessene i sin undervisning. Det virker litt merkelig i og med at han allerede har annonsert sitt program om viktigheten av mer «modeller» i undervisningen. Han anfører bare at dette er nøye beskrevet i de fleste lærebøker. Det hadde nemlig vært spennende å få innsikt i ML's måte å anvende disse prosessene på i undervisningen. Han ville utvilsomt gjort dette på en mye mer pedagogisk inspirerende måte enn det man kan lese om i noen lærebok. I stedet for går han altså nøye inn på den empiri som kan knyttes til geologiperioder på mellomtrinnet. Det er jo interessant stoff. Jeg går her ikke nærmere inn på MLs beskrivelser fra pedagogiske eksempler på dette området. Dette synes jeg er glimrende pedagogikk og lite kontroversielt.

## **Naturhistorie og empiri.**

Fenomenologi klassifiserer ML merkelig nok til naturhistorie: *Naturhistorie ligger nært det som i steinerskoler gjerne omtales som fenomenologi, av og til også som goetheanisme.* Jeg mener den hører med som en nødvendig del av empirien. Fenomenologi er empiri. Dette er veldig tydelig i Goethes fargelære. I min undervisning har jeg alltid skjelnet mellom naturhistoriske erfaringer som har et sterkt motiverende aspekt, og som gjør elevene åpne og interessert i å erfare fenomener innenfor det samme erfaringsfelt og bygge opp en empiri. Sammenfatningen til lovmessigheter foregår i klassen som helhet, og er selvfølgelig lærerstyrt, men det forhindrer ikke at elevene for hvert lille skritt som tas, er bidragsytere. De er i hvert fall i like stor grad medskapende her som når det gjelder å bygge opp en modell.

## **Læren om elementene**

Underveis gjengir ML Robert Boyles synspunkter på elementlæren og de konsekvenser det har f.eks. for alkymien. Han skriver: *Man mente jo lenge at verden var bygd opp av ild, luft, vann og jord (til en viss grad er det jo slik den fremstår for det naive blikk), og at stoffer kunne forvandle seg til andre - derfor trodde også alkymistene at de kunne lage gull. Det var Robert Boyle som for første gang avviste at de fire elementene formidlet pålitelig kunnskap (1661). Han mente at de verken var varige og stabile, noe de ulike tilstandene av vann også tydet på. Dermed var tanken om grunnstoffene født. Verden bestående av de fire elementer er altså ikke hele virkeligheten. Det er mye mer komplisert!*

At Robert Boyles tankegang for å utarbeide begrepet grunnstoff, er viktig, er lett å forstå. Men jeg stiller spørsmål ved om han var tilstrekkelig inne i den greske elementlæren slik den forekommer f.eks. hos Aristoteles. Gresk tenkning var jo helt annerledes enn den man hadde på 1600-tallet. Siden undervisningen i elementene på barnetrinnet i steinerskolene (6. klasse f.eks.) har stått under press



utenifra, vil jeg gjerne knytte noen bemerkninger til dette. Det er fullt mulig å utarbeide en moderne elementlære i overensstemmelse med Aristoteles som vil være gyldig enn i dag. Man kunne kalle det en lære om *aggregat-tilstander*. Å forvandle gammel visdom til moderne kunnskap er etter min oppfatning en mer fruktbar tilnærming fremfor å forkaste denne visdommen helt og holdent. Det skjer ofte på bakgrunn av manglende innsikt i tidligere tiders tenkemåte og moderne fordommer. Det ville sprengte denne artikkelens rammer å utvikle en moderne elementlære, men jeg kan antyde et par momenter som kunne vært med: Elementlæren representerer fremtredelsesformer av den sansbare verden. I stedet for jord, vann, luft og ild kunne vi kalle dem faste stoffer, væske, gass og varme.

Alle faste stoffer har en fast form og et fast volum, eller sagt på en annen måte: Alle faste objekter har sin egen, spesifikke form. Væsker har ikke lenger sine individuelle former, men en felles form: Kulen. Mangelen på fast form representerer imidlertid en ny kvalitet. Som Aristoteles ville si: En mangel er også en egenskap. Den nye egenskapen som vann (væske) får, er en dynamisk overflate. I en viss forstand kan man ikke berøre en vannoverflate. I samme øyeblikk man tar på den, er den en annen, for da settes overflaten i en bølgebevegelse. Vannoverflaten er dermed en størrelse som eksisterer i tiden. Men gjennom alle formforvandlinger (og ved en konstant temperatur) beholder vannet, lik det faste stoffet, sitt faste volum. I luften (gassen) er heller ikke volumet konstant. Den mangler et konstant volum, men har til gjengjeld fått et dynamisk indre. Hele volumet kan lett presses sammen på et mindre volum, eller fortynnes til et større volum. Også luftens indre utfolder sitt vesen i tiden. Derfor dannes longitudinale trykksvingninger seg lett i luft. Slike svingninger kjenner vi som lydbølger. I varme kan vi ikke lenger snakke om volum i det hele tatt. I varmens lovmessigheter er, som fysikerne ynder å uttrykke det, tidens pil skjult.

Det ML heller ikke trekker frem er at de 4 elementer på et bestemt alderstrinn henvender seg direkte til barnas sjelsfylte verdensoppfatning ved at de her opplever noe sjelelig-kvalitativt ved naturen.

Å forbinde mennesket med naturen gjør vi ved å knytte an til naturens kvaliteter — slike kvaliteter som barnet også kan gjenfinne hos seg selv. Dette poengterer også ML både i sine innledende bemerkninger og i sine beskrivelser av naturhistorie og empiri.

Langs slike linjer kunne man utvikle en konsistent, presis og moderne elementlære, helt i overensstemmelse med moderne vitenskap. En slik elementlære ville naturlig høre hjemme i naturfagsundervisningen i 6. klasse. Det er etter min oppfatning god grunn til å betvile at Boyle hadde rett i at en slik elementlære ikke formidler pålitelig kunnskap, selv om han selvfølgelig har rett i at den bare i meget begrenset grad gir kunnskap om stoffene og deres forbindelser, men det intenderte den vel egentlig heller ikke i utgangspunktet. Kanskje yter den elementlære beskrevet rudimentært ovenfor ikke det man i eldre tider forventet av en elementlære, men den yter noe ut over kjemien, og det på en måte som svarer til de pedagogiske utfordringer og analytiske evner på et bestemt stadium i barnets utvikling.

## **Alkymien**

I samme avsnitt som ML siterer Boyles tvil til verdien av en elementlære, kommer også påstanden om at alkymistene trodde de kunne lage gull. ML har rett i at enkelte fyrster lot seg overtale eller friste til å ansette folk som påsto de kunne lage gull. Det ville jo tilsynelatende løst mange problemer. Men det er tvilsomt om disse menneskene kunne kalles ekte alkymister. De representerer et slags skyggeaktig ekko av den opprinnelige alkymi som gikk ut på noe helt annet, nemlig å utvikle seg sjelelig, moralsk ved å studere stoffprosesser i naturen. Det gjaldt å leve seg inn i disse prosessene. Gjennom den type skoloring som utgikk fra rosenkreuzerimpulsen, kunne alkymisten delvis løse det sjelelige fra det legemlige, og dermed oppleve det sjelelige i disse prosessene. Den kunnskapen de derved tilegnet seg, ble brukt til å produsere medisiner. Alle de opprinnelige rosenkreuzerne utdannet seg og praktiserte som leger. Hvis man studerer den gruppe mennesker som utga de tre opprinnelige Rosenkreuzerskrifter i 1614-1616 vil man finne en type mennesker med enorm

kunnskap og innsikt, mennesker med den høyeste utdanning som fantes på den tiden, innen språk, naturvitenskap, teologi, medisin, historie, politikk, osv. I tillegg til denne overveldende erkjennelsesdrift og kunnskapstørst dette vitnet om, var de opplært i alkymiens hemmeligheter. En klasse av de stoffprosesser som alkymistene studerte, besto i en foredling av stoffene i retning av noe som var mer rent, mindre jordisk. Man kunne kanskje bruke reduksjon av kobberoksid til rent kobber som et eksempel på dette. Dette opplevde alkymisten som en renselse, en kultivering av det sjelelige, befridd fra jordiske, sanselige begjær. Det reneste stoff man kunne tenke seg, var gull. Det forbinder seg så å si ikke med noe annet stoff. I den forstand er det det edleste av alle metaller. Denne klasse av prosesser kunne således kalles for gullprosesser, og ble symbolisert med gull. Da den alkymistiske kunnskap kom på avveie, degenererte dette aspektet til gullmakeri. Å mene at alkymistene trodde de kunne lage gull, stemmer således dårlig med en dypere innsikt i alkymiens opprinnelige impuls.

Etter å ha blitt kjent med rosenkreuzerlegen og alkymisten Friedrich Metz da han som dødsyk 21-åring ble leget ved hjelp av rosenkreuzernes berømte universalmedisin som bare måtte anvendes i nødsfall, satte Goethe seg nøy inn i rosenkreuzerskrifter og begynte selv med alkymistiske eksperimenter. Denne aktiviteten fortsatte han med da han flyttet til Strassbourg, der han hadde mye omgang med Herder, men han holdt sin alkymistiske aktivitet skjult for Herder, for han ville ikke risikere å utsette seg for den bitende ironi som Herder ville ha møtt en slik virksomhet med. I 1786 skriver han til Frau von Stein om sine studier av «Die Chymische Hochzeit des Christian Rosenkreutz Anno 1459». Han nevner at beretningen er meget interessant og viktig, men er skrevet på et slikt gammelmodig språk og en slik måte at den er lite „erfreulich“, så den må skrives om. Boken handler som kjent om innvielsen til Christian Rosenkreutz i 1459. Det var en *chymisk*, altså en alkymistisk, innvielse, og ikke en *mystisk* innvielse. Forskjellen er at i den *chymiske* innvielse oppnås åndelige erfaringer ved at adepten løsner fra det legemlige og hengir seg til verden rundt, dvs. makrokosmos, mens i den *mystiske* innvielse inngår adepten en sterkere forbindelse enn normalt med det legemlige ved å leve seg inn i sitt indre, men opplever ad denne vei også den åndelige verden. Dette svarer til den gamle inndeling i de nordlige og de sydlige mysterier. I 1794/95, etter å ha lest Schillers estetiske brev om den menneskelige oppdragelse, kommer så Goethes nyskriving av «Die Chymische Hochzeit des Christian Rosenkreutz» i form av «Eventyret om den grønne slange og den skjønne lilje». Eventyret er breddfullt av rosenkreuzer- og alkymistiske symboler og har tydelig karakter av å være en innvielsesbok. Gullprosesser inngår som et sentralt ledd i mange sammenhenger i historien: Irrlysene som skjødesløst rister ut av seg gullstykker; fergemannen som ikke vil ha gullstykker som lønn; elven som ikke tåler gull, men vil svulme veldig opp hvis et gullstykke havner i vannet; slangen som begjærlig slikker i seg gullstykkene, føler et usigelig velbehag ved å fordøye dem, og begynner å produsere et eget lys som gjør synsinntrykkene sterkere og mer levende, fargene mer intense; mopsen som faller om og blir forvandlet til en onyx ved å spise gull; den gamle mannens lampe som legger et lag av gull på veggene når den lyser alene; gullkongens visdom; stripene av gull i blandingskongen. Alt dette og mere til illustrerer de mangefasetterte gullprosessene hos de ekte alkymistene. Det er derfor ikke uten grunn at Steiner starter sin esoteriske virksomhet i 1902 med en dypere gjennomgang av Goethes eventyr i form av en erkjennelsesmessig redegjørelse for symbolene og karakterene.

## Avslutning

Jeg har tatt for meg enkelte aspekter ved MLs artikkel. Det berører først og fremst hans program om å innføre mer modelltenkning i steinerskoler, endog langt ned på mellomtrinnet og i ungdomstrinnet. Jeg gjør oppmerksom på at modellbegrepet er mangefasettert, og at ML benytter seg av ulike modellbegreper uten å skjelne mellom dem, og derved innfører en sammenblanding. Jeg har komplettert MLs synspunkter særlig fra fysikkfaget, som han bare overfladisk berører. Mine erfaringer er at innen fysikkfaget vil elevene ha mer enn nok systematisk og analytisk materiale å arbeide med, også uten modeller.

Jeg har tatt for meg noen av de modeller som ML nevner og dokumentert at en innføring på lavere alderstrinn innebærer store pedagogiske utfordringer og kan skape hindringer for videre læring. Dette er på ingen måte et resultat av «synsing», men hviler på erfaringer oppsamlet gjennom et 40-årig langt lærerliv og på nyere forskning. Jeg påviser dessuten at ML's nedtoning av fenomenologi og dens vaghet på mange områder ikke er berettiget. Jeg har en mistanke om at dersom ML skulle begynne å undervise mer i fysikk, ville han snart ha fraveket sitt program om mer modelltenkning, og ha innsett at dette ville ha vært forfeilet, i hvert fall i grunnskolen. Han skjeller dessuten ikke mellom fenomenologi i fysikk/kjemi og i biologi. I «Grunntrekk av en erkjennelsesteori....» fra 1886 har Rudolf Steiner meget tydelig gjort oppmerksom på at det skal en annen type tenkning til i biologien enn i naturvitenskapene om den døde materie. Urfenomenene i fysikk er vesensforskjellig fra urplanten i biologien.

Jeg argumenterer dessuten for at mye av den modelltenkning som er rådende i naturfagsdidaktikk, hviler på et lite gjennomtenkt og opplagt feilaktig erkjennelsesteoretisk grunnlag og må av den grunn avvises. Det fører også til at jeg må avvise MLs tolkning av at Steiners menneskekunnskap består av en rekke ulike modeller av mennesket. Dette er selvfølgelig et veldig viktig punkt. At Steiner selv benytter seg av anskuelsesmodeller og analogimodeller i denne sammenheng, slik ML gir eksempler på uten å spesifisere modellbegrepet det her er snakk om, endrer ikke på dette. Slike modeller kan gjøre god nytte i pedagogisk sammenheng, og skulle benyttes i større grad langt ned på mellomtrinnet og på ungdomstrinnet, og jeg tror også på videregående trinn. (Bl.a. har jeg konstruert et eksempel på en analogimodell av lys som hører hjemme i Vg3). Disse modellene står ikke i fare for å bli forvekslet med den virkelige verden. Her er jeg helt på linje med ML.

Jeg deler MLs synspunkt på at det er viktig at elevene får øvet sine analytiske evner og danner seg systematiske kunnskaper. Jeg er også enig med ham i at dette er det nok for lite av i dagens norske steinerskoler, spesielt fra 7. til 10. klasse. Jeg kan langt på vei følge ham i hans synspunkter på naturhistorie og empiri, og synes han her har mye å fare med, men mener at fenomenologien hører hjemme i empirien og ikke i naturhistorien.

Jeg har selvfølgelig ikke argumentert mot bruken av modeller i forutsigelsen og undersøkelsen av komplekse systemer som i evolusjonsteori, meteorologi, samfunnsøkonomi og klimamodeller. Her har bruken av komputermodeller sin berettigelse. Der innsikt tidligere oppsto ved en iterativ prosess mellom teoretisering og eksperimenter, spiller i dag i mange tilfeller undersøkelse og endring av modeller eksperimentets rolle. Anvendelse av komputermodeller ved eksperimentelt vanskelig tilgjengelige systemer utenfor vårt mesokosmos (spesielt store, for langt unna, for komplekse systemer) har knapt alternativer.

Jeg er enig med ML i at elevene må få et innblikk i de modeller som er rådende innen naturvitenskap i dag, slik at de ikke stiller seg utenfor det som naturvitenskaplige forskere driver med, og det som ellers foregår innen utdanningssystemet. Men en fysikkundervisning f. eks. som skal avbilde det som fysikk innebærer i dag, vil alltid komme i motsetning til goetheanistisk fysikk, fordi sistnevnte ikke spiller noen rolle i moderne forskning. Jeg er av den oppfatning at en god steinerskole *må* undervise goetheanistisk (eller fenomenologisk) fysikk og *samtidig* slå en bro til moderne forskning. Når man oppstiller et slikt krav, må man ikke legge listen for høyt, slik at man blir stilt overfor en umulig oppgave. Da følger det nødvendigvis at det finnes flere alternativer og forskjellige meninger om hvordan dette skal gjennomføres. Programmet «mer modeller» kommer nok til dels fra intensjonen om å intensivere forbindelsen til moderne fysikk. Elevene skal lære mer om hvordan forskere i dag snakker. Det er en viktig oppgave, men man skulle ikke glemme det vi egentlig har som mål. Det oppstår lett misforståelser når man skal lære unge mennesker talemåten til voksne eksperter. I stedet for å spørre om «Hva er den vitenskapelige verdi av modeller?», kunne det være på sin plass i sterkere grad å stille spørsmålet: «Hva er den pedagogiske verdi av modeller?»

Til slutt har jeg tatt for meg et synspunkt ML fremfører i forbindelse med alkymi, der han i en slags rustbevissthet gjengir en fable convenu om alkymistenes såkalte gullproduksjon, selv om artikkelen hans ellers gjennomgående er gjennomsyret av gullkorn og mangslungne gullprosesser, og dermed henspiller på den tankeretning han har sine røtter i. Jeg kan ikke fri meg fra å sitte igjen med det inntrykk at han ikke helt vil vedkjenne seg denne idéstrømning, men istedenfor går ned i spagaten mellom to motsatte strømninger.

Henvisninger:

Mikelskis-Seifert, Silke; Fischler, Helmut: „Die Bedeutung des Denkens in Modellen bei der Entwicklung von Teilchenvorstellungen – Empirische Untersuchung zur Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption“, *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*; Jg. 9, 2003, s. 89-103

Mikelskis-Seifert, Silke; Thiele, Marco; Wünscher, Thilo: „Modellieren – Schlüsselfähigkeit für physikalische Forschungs- und Lernprozesse“, *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1/4 (2005), s. 30 – 46