

## Erfarenhetens och reflektionens betydelse för lärandet av molekylära processer

Caroline Larsson<sup>a\*</sup> och Mari Stadig Degerman<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Institutionen för teknik och naturvetenskap, Linköpings universitet;* <sup>b</sup>*Akademien för utbildning, kultur och kommunikation, Mälardalens högskola*

Lärande om molekylära processer kan innebära vissa svårigheter dels för att dessa processer inte går att direkt erfara och dels för att de är dynamiska i sin natur. Ett sätt att överbrygga problematiken är att använda sig av olika representationer, vilket i sig medför ytterligare utmaningar. Studenters förkunskaper och intuitiva idéer som härstammar från vardagserfarenheter kan också ge upphov till svårigheter i meningsskapandet. Syftet med denna artikel är att diskutera erfarenhetens och reflektionens betydelse för undervisning och lärande med representationer av molekylära fenomen i högre utbildning. I artikeln presenteras empiriska resultat från forskningsstudier som ligger till grund för de idéer och resonemang som förs fram. Vi presenterar två exempel där studenter arbetar i grupp med representationer av de molekylära processerna ATP-syntes och självassociation. Grunden för grupparbetet och meningsskapandet är fokuserade frågor där egna tankar och idéer får ta plats. Reflektionen i grupparbetet ger också studenterna möjligheter att generalisera sina erfarenheter (abstrakt tänkande) och underlättar förståelsen av tröskelbegrepp.

*Nyckelord:* Abstrakt tänkande, erfarenheter, externa representationer, lärande, molekylära

### INLEDNING

Hur kan vi skapa mening kring molekylära fenomen, som vi varken kan se, höra eller känna? Hur kan studenter erfara något så litet och abstrakt<sup>1</sup> som molekyler? Kunskap om molekylära processer är grundläggande för att skapa sig en förståelse av världen. I naturvetenskapen använder sig olika aktörer (exempelvis forskare, lärare och studenter) av representationer för att jämföra och kontrastera molekylära fenomen eller förklara olika samband hos det som inte är direkt observerbart (Phillips, Norris & Macnab, 2010). Representationer gör det möjligt för studenter att få en erfarenhet av de fenomen som inte direkt går att erfara. För ett meningsfullt lärande måste representationerna också tolkas och förstås på rätt sätt. En tänkbar svårighet i studenters lärande av molekylära processer är därför deras förmåga att tolka och förstå olika representationer. Även om representationer är viktiga konceptuella verktyg för studenters lärande så måste de användas på lämpligt sätt med avseende på studenter förkunskaper, kognitiva färdigheter och inlärningsfärdigheter.

---

1 Abstrakta objekt kan inte uppfattas via våra sinnen och är motsatsen till konkreta objekt som är möjliga att uppfatta i flera modaliteter. Ett abstrakt begrepp kan dock bli konkret för en individ om meningsfulla associationer till begreppet skapas (Wilensky, 1991).

---

\* Författarkontakt: caroline.larsson@liu.se

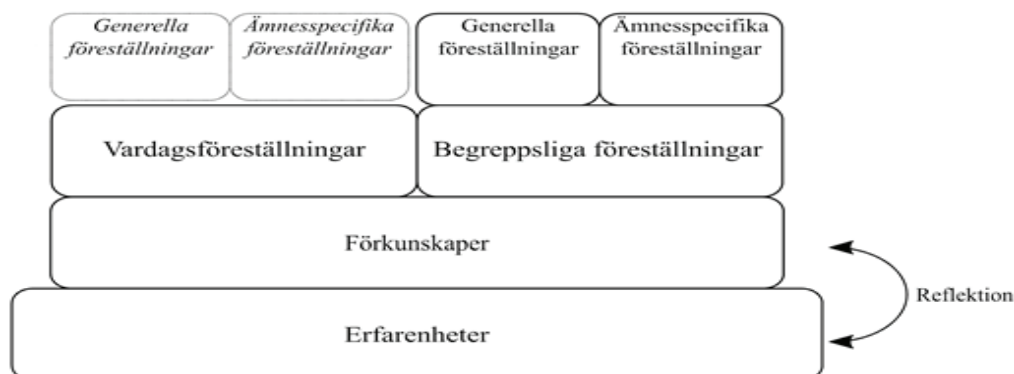
Artikeln tar avstamp i lärandet av abstrakta molekyllära fenomen. Tidigare forskning inom de molekyllära livsvetenskapernas didaktik beskriver hur studenters svårigheter bland annat härrör från: studenters tolkningar av representationer i undervisning (ex. Stadig Degerman, Larsson & Anward, 2012; Kozma & Russell, 2000), studenters förkunskaper och intuitiva idéer som härstammar från vardagserfarenheter (ex. Cousin, 2006; Nussbaum & Novick, 1982; Perkins, 1999) och brist på tid för reflektion i undervisningen (ex. Odom, 1995; Odom & Barrow, 2007; Tekkaya, 2003). Ett sätt att bemöta studenters svårigheter med att förstå molekyllära fenomen är att lyfta fram betydelsen av att erfara och reflektera kring abstrakta molekyllära fenomen för att skapa ett meningsfullt lärande. Ausubel (1963) beskriver att ett meningsfullt lärande sker då studenter bland annat har en känslomässig anknytning till innehållet och då lärandet bygger vidare på något man känner till. Det man redan känner till behöver inte ligga inom samma domän utan bygger på hela den kunskap studenten bär med sig. Ett meningsfullt lärande är därmed kopplat till en erfarenhet av det fenomen som ska förstås. För att erfarenheter ska bli del av en persons individuella ontologi och tänkande krävs dessutom reflektion. Enligt Wilensky (1991) så kan abstrakta fenomen bli konkreta på ett personligt plan om rätt associationer mellan objektet och den lärande skapas.

#### SYFTE

Vi vill diskutera studenters lärande av abstrakta fenomenen för att ge lärare möjlighet att skapa en meningsfull lärandemiljö. Texten utgår från empiriska resultat som publicerats i artiklar och manuskript som delar av avhandlingarna Stadig Degerman (2012) och Larsson (2013) inom utbildningsvetenskap och naturvetenskapernas didaktik. Gemensamma beröringspunkter i avhandlingarna är hur representationer påverkar studenters konceptuella förståelse av molekyllära fenomen, som processerna mitokondriell ATP-syntes och självassociation (engelskans *self-assembly*). Både ATP-syntesen och självassociation innehåller centrala begrepp, som exempelvis kemisk reversibilitet och partiklars rörelse, som historiskt sett varit problematiska för studenter att förstå (ex. Banerjee, 1995; Novick & Nussbaum, 1978). Syftet med denna artikel är att belysa och diskutera två exempel (lärande av ATP-syntes och självassociation) då studenter interagerar med två olika externa representationer varav en animation och en handgriplig modell. Diskussionen bör vara intressant för undervisning och lärande av olika molekyllära fenomen i högre utbildning (t.ex. livsvetenskapliga utbildningar, ingenjörutbildningar, lärarutbildningar och läkarutbildningar) samt forskarutbildning och forskning med inriktning mot lärande och undervisning.

#### FÖRKUNSKAPER OCH BEGREPPSLIGA SVÅRIGHETER

Förkunskaper bottenar i erfarenheter och utgörs av både vardagsföreställningar och begreppsliga föreställningar (se Figur 1). Vardagsföreställningar konstrueras av vardagliga erfarenheter på samma sätt som begreppsliga föreställningar konstrueras av erfarenheter från en vetenskaplig kontext. De begreppsliga föreställningarna kan vara mer eller mindre generella eller ämnesspecifika. De kan också anses vara korrekta eller felaktiga i relation till den rådande vetenskapliga förklaringen av fenomenet.



Figur 1. Figuren beskriver hur förkunskaper bottenar i erfarenheter. Erfarenheter blir via reflektion del av förkunskaperna och relationen växelverkar dynamisk. Förkunskaper i sin tur utgörs av både vardagsföreställningar och begreppsliga föreställningar. Vi har valt att dela upp dessa i generella eller ämnesspecifika föreställningar. Artikeln fokuserar de rutor med svart ram och rak stil i figuren.

Ämnesdidaktisk forskning inom de molekylära livsvetenskaperna har identifierat en rad begreppsliga svårigheter kopplade till hos molekylära fenomen. ATP-syntes<sup>2</sup> framhålls som en av de centrala processerna i undervisningen eftersom den är komplex och betydelsefull för den generella förståelsen för cellens energimetabolism (Stadig Degerman & Tibell, 2012). Självassociation<sup>3</sup> är också en central process inom biokemi och är utpekad som en av nio övergripande idéer i de molekylära livsvetenskaperna som är viktiga för studenter att lära sig och förstå (Howitt, Anderson, Costa, Hamilton & Wright, 2008; Sears, 2008). I själva verket innehåller båda processerna en rad centrala begrepp som har visat sig vara svåra för studenter att förstå, exempelvis kemisk reversibilitet, kausalitet, kemisk jämvikt samt partiklars rörelser och interaktion med andra partiklar (t.ex. Banerjee, 1995; Grayson & Anderson, 2001; Novick & Nussbaum, 1978; Villafañe, Loertscher, Minderhout & Lewis, 2011). En möjlig källa till studenters många svårigheter föreslås vara deras förkunskaper och intuitiva idéer som härstammar från de vardagserfarenheter som studenterna har med sig in i lärandet, vardagsföreställningar som inte alltid stämmer överens med skeenden i den molekylära världen (Cousin, 2006; Nussbaum & Novick, 1982; Perkins, 1999).

Som en reaktion på de många begreppsliga svårigheter som har identifierats i litteraturen har Meyer och Land (2003) föreslagit att det existerar vissa tröskelbegrepp inom varje domän som är avgörande för studenters förståelse och utveckling. Man menar att dessa tröskelbegrepp bland annat är speciella och extra svåra att förstå. I Meyer och Lands definition av tröskelbegrepp framgår också att de är irreversibla och transformativa i sin natur samt att de gör det möjligt för den lärande att

2 ATP är en energirik molekyl som tillfälligt kan lagra energi som snabbt kan transporteras till andra delar i cellen. ATP-syntes sker på olika sätt i cellen och är del av en cells metabolism. I det här fallet sker syntesen via proteinet F<sub>0</sub>/F<sub>1</sub>-ATPas i mitokondrier.

3 Självassociation är en term som hänvisar till den process där molekylära strukturer av högre ordning formas spontant och reversibelt genom slumpmässiga kollisioner mellan dess delar, exempelvis viruskapsider, membran eller ribosomer.

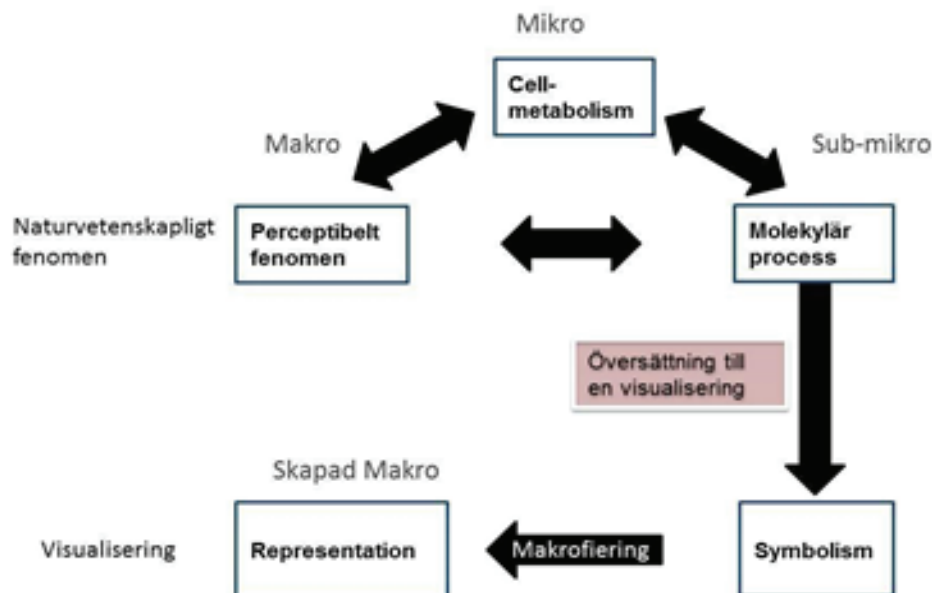
konstruera ny kunskap på andra sidan tröskeln. De beskriver det som att man äntrar en portal där det mesta inom domänen faller på plats då mening skapas om tröskelbegreppet. Föreslagna tröskelbegrepp vid lärande av molekylära fenomen är bland andra: slumpmässigheten hos molekylära interaktioner, dynamiken som finns representerad i kemiska reaktioner, jämviktsreaktioner, allmän förståelse om energitransformationer samt termodynamiska förlopp (Kinchin, 2010; Ross mfl., 2010). Dessa begrepp är inte specifika för enskilda molekylära fenomen utan är av generell karaktär, de kan även vara så pass generella att de gäller i andra domäner (Meyer & Land, 2003).

#### *Representationer och lärande*

Representationer är viktiga begreppsliga verktyg för all vetenskaplig verksamhet, inte bara för lärare och studenter men också för experter som ställer hypoteser och letar efter vetenskapliga förklaringar till olika fenomen (Coll, France & Taylor, 2005; Kozma, Chin, Russell & Marx, 2000). Representationer i fysisk form (ex. bilder, modeller eller animationer) har vi valt att benämna *externa representationer*, medan en individs inre mentala representationer benämns som *interna representationer* (Zhang & Norman, 1994). Externa representationer företräder olika aspekter av världen genom att de utnyttjar likheterna mellan sig och den aspekt som de representerar (Giere, 2004). Även *analogier* och *metaforer* är en form av representation som skapas medvetet eller omedvetet. Metaforerna och analogierna blir ett sätt att skapa en konkret föreställning av ett abstrakt innehåll som bottnar i sådant som den lärande redan har erfarenhet. Metaforer och externa representationer är därmed av liknande karaktär och de ligger till grund för konstruktionen av den interna representationen.

Att skapa en representation av en molekylär verklighet innebär i praktiken att man via symboler skapar en makroskopisk och extern representation utifrån de kunskaper man har om hur de molekylära processerna ser ut (se Figur 2). Motsatsen till makrofiering är mikrofiering, det vi gör i våra modeller av universum där de abstrakta och stora avstånden bland annat mäts i tid i ett försök att förmedla en mer fattbar bild av universum. Båda idéerna är ett sätt att tillskriva abstrakta fenomen mer konkreta egenskaper. Representationer blir på detta vis det vi kan erfara och det kunskapsstoff vi får förlita oss på i vårt lärande av molekylära fenomen (Stadig Degerman, 2012/2013).

Även om alla typer av representationer är viktiga verktyg för lärandet så måste studenter inse att de korresponderar till något annat, att de är modeller av en viss process eller ett begrepp. Den lärandes färdigheter att tolka representationen, bland annat förkunskaper och attityder till lärandet, blir avgörande för meningsskapandet. Hur effektiv en representation är som lärandeverktyg beror både på skaparen och åskådaren (Phillips mfl., 2010). Relationen mellan representationen och vad den representerar utgör därmed en kritisk punkt för studenters konstruktion av kunskap.



Figur 2 Modell över hur molekylära fenomen som inte är direkt observerbara kan göras tillgängliga i en makrofieringsprocess. Molekylerna existerar i den sub-mikroskopiska värld vi inte kan uppleva, dock kan vissa egenskaper hos molekylerna ändå upplevas via representationer. Vi skapar representationerna utifrån fantasin, förkunskaper och den symbolism som används inom vetenskapen.

**ERFARENHET OCH REFLEKTION LEDER TILL ETT MENINGSFULLT LÄRANDE**  
 Det kan låta självklart att hänvisa till erfarenhetens betydelse för lärandet. Vi vill därför ta hjälp av John Deweys teoretiska ansats för att problematisera och tydliggöra vår tolkning av erfarenhetens betydelse i relation till lärande av abstrakta molekylära fenomen. Dewey (1915) framhöll att erfarenheten ofta uppfattas som tudelad i en aktiv och en passiv del. Den aktiva erfarenheten utgår från ett fysiskt görande, som t.ex. att experimentera. Den passiva erfarenheten består i att man utstår och finner sig i en situation; man skapar erfarenheter genom att ständigt befinna sig i och interagera med sin omvärld. Dewey (1915) menade att den aktiva och den passiva erfarenheten växelverkar och båda skapar tillsammans en djupare form av erfarenhet. Genom att praktiskt hantera ett konkret material skapas förutsättningar för lärandet, men vi måste också reflektera över det som har skett för att ett meningsfullt lärande ska ske.

Under de senaste två årtionden har man fört ett samtal kring reflektion inom lärarutbildningen. Diskussionen har handlat om att det är viktigt att reflektera över genomförd undervisning i syfte att utveckla det kritiska tänkandet (Dahlstedt, 2011). Med hjälp av reflektion påverkas studenterna att själva utveckla sin förståelse av undervisningsinnehållet. Men begreppet reflektion har under de senaste 15-20 åren tappat sin mening. Rodgers (2002) uttrycker det som att "in becoming everything to everybody, it has lost its ability to be seen". Reflektion är något man förväntas göra på egen hand och klara av på egen tid utanför högskolans/universitetens undervisning. Reflektionen

blir därmed en förutsättning för att en individ själv ska kunna konstruera sin kunskap. Vår tolkning av Deweys resonemang kring reflektion sammanfaller med Rodgers (2002) tolkning av hur Dewey använder begreppet. Dewey (1933) definierar reflektion som en meningsskapande process där den lärande går från en erfarenhet till en annan med djupare kunskap kring dess relation till andra erfarenheter och idéer. Reflektionen är systematisk och rigorös samt sker i interaktion med andra människor. Vi vill därför argumentera för att reflektion är den mentala process som krävs för att studenter ska kunna skapa sig en intern representation av ett molekylärt fenomen och göra kunskapen till sin egen. Rodgers (2002) beskriver även hur Dewey uppmärksammade den affektiva dimensionen av lärande genom att prata om attityders betydelse för reflektionen. Konkreta erfarenheter tillsammans med reflektion krävs i mötet mellan den nya kunskapen och personliga förkunskaper (Dewey, 1915; Wilensky, 1991).

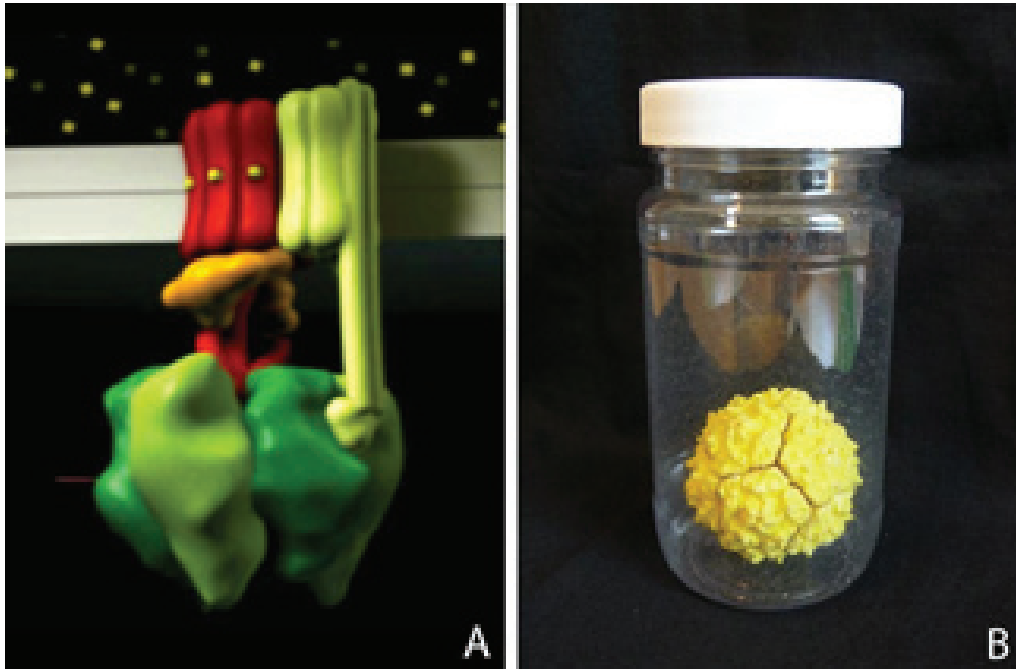
Reflektion är också att kunna urskilja vad som kommer att ske i en viss situation genom att tidigare ha reflekterat över liknande erfarenheter (Dewey, 1915). Denna aspekt av reflektion är nära kopplad till abstrakt tänkande och abstrakta idéer. Med abstrakt tänkande och abstrakta idéer menas förmågan att generalisera och se helheter utifrån den information som finns tillgänglig. Detta genom att uppfatta det väsentliga hos ett fenomen eller en situation och finna gemensamma egenskaper mellan situationer, men även att lösa problem med hjälp av abstrakta begrepp och logiska tankelagar.

#### METOD

Vi presenterar två olika lärandesituationer där studenter arbetar med en extern representation av en molekylär process. Grupsituationen, där studenterna uppmanas att arbeta med och reflektera över ämnesinnehållet, är *per se* ett sätt att utmana studenterna till ett abstrakt tänkande. Grupsituationerna föranleds i samtliga fall av en individuell fas för att studenterna ska ha introducerats till ämnet och den externa representationen. På så sätt har den individuella tankeprocessen påbörjats och grupsituationen blir ett sätt att testa sina idéer i den reflekterande praktiken.

#### VAL AV EXTERNA REPRESENTATIONER

Läroböcker och undervisningen innehåller en mängd bilder, men trots detta så är kunskapsförmedlingen inte alltid lyckosam. Bland andra anser McClean m.fl. (2005) att detta är en konsekvens av att man använder sig av tvådimensionella externa representationer för att för illustrera något som egentligen sker i fyra dimensioner (tre spatiala dimensioner och tiden). En animation är däremot en film som visualiserar dynamiska processer i fyra dimensioner. Det dynamiska och spatiala språket som används inom biokemi, speciellt de metabola reaktioner som sker i celler, gör att ämnet är lämpligt att visualisera med hjälp av animationer. Jämfört med statiska bilder kan animationer bidra med en annan typ av information som den lärande behöver för att skapa mening om dynamiska processer, till exempel rörelser/dynamik och kausala förlopp (Gordon & Pea, 1995; Höffler & Leutner, 2007; Marbach-Ad, Rotbain & Stavy, 2008; Rundgren & Tibell, 2009). Vidare har forskningen påvisat att handgripliga tredimensionella modeller också är en möjlig lösning på problemen med att visualisera ett molekylärt ämnesinnehåll. Att använda konkreta modeller i undervisning har förslagits för mer än ett århundrade sedan (t.ex. Montessori, 1912) och blev populära inom kemiundervisningen i början av 1900-talet (Petersen, 1970), exempelvis 'ball-and-stick' modeller. Att handgripligt manipulera modeller har visat sig vara positivt för studenters förståelse av biomolekylära ämnen och öka den lärandes förståelse över längre tid (ex. Gabel & Sheerwood, 1980; Harris m.fl., 2009; Roberts, Hagedorn, Dillenburg, Patrick & Herman, 2005). Med detta som motivation har vi valt att fokusera på en animation och



en handgriplig modell som representerar två skilda molekylära dynamiska processer, ATP-syntes via mitokondriellt ATPas och bildningen av en polioviruskapsid via självassociation (se Figur 3).

*Figur 3 A. Animationen är animerad utifrån elektronmikroskopiska bilder för att uppnå ett trovärdigt utseende. Strukturen föreställer proteinet ATPas som genomsöker ett mitokondriellt innermembran (grått/vitt) och de gula kvadraterna (upptill i bilden) representerar protoner som transporteras genom proteinet för att skapa en roterande rörelse och då katalysera ATP-syntesen. B. Den handgripliga modellen består av en behållare och 12 subenheter som har magneter fästa utmed kanterna. Genom att skaka modellen med en optimal kraft så associerar subenheterna till en viruskapsid föreställande en polioviruskapsid.*

#### *Datainsamling*

Materialet som presenteras är baserat på tre olika datainsamlingar som är del av avhandlingarna Stadig Degerman (2012) och Larsson (2013). Sammantaget så är alla respondenter universitetsstudenter från naturvetenskapliga ämnesprogram och/eller gymnasieläroprogram och har genomgått grundläggande kemi- och biologikurser, bl.a. biokemi. Gruppdiskussionerna och de individuella moment som ligger till grund för det empiriska materialet var del av studenternas ordinarie undervisning. I tabellen nedan redovisas antalet respondenter som har arbetat med respektive extern representation samt insamlingsmetod och vilket empiriskt material som alstrats (Tabell 1).



Tabell 1. Sammanställning av de studier vi hänvisar till i denna artikel uppdelat på vilken extern representation/naturvetenskapligt fenomen som studerades. Totalt sett har 78 studenter uppdelade på 12 grupper deltagit i våra studier.

Naturvetenskapligt fenomen	Extern representation	Antal	Insamlingsmetod	Empiriskt material
ATP-syntes	Animation	43 studenter	Enkät (45 min)	Skriftliga svar
Självassociation	Handgriplig modell	43 studenter (6 grupper)	Gruppdiskussion (30-45 min)	Ljudupptagning
		5 studenter	Intervju (30-50 min)	Ljudupptagning
		35 studenter (6 grupper)	Gruppdiskussion (30-90 min)	Ljudupptagning

I samtliga gruppdiskussioner interagerade studenterna med de externa representationerna och varandra för att besvara frågorna. Uppgiften i gruppdiskussionerna var att arbeta tillsammans för att formulera ett svar på ett antal skriftliga frågor som berörde det naturvetenskapliga innehållet. Att gemensamt formulera ett svar är en reflekterande process som ger studenterna möjlighet att synliggöra sina egna ståndpunkter, både för sig själv och för andra. Studenterna blir därmed aktiva subjekt i lärandesituationen (Dahlstedt, 2011). Grupsituationen är därmed ett sätt att få studenterna att medvetet reflektera över den lärandesituation de befinner sig i. Författarna Tekkaya (2003), Odom och Barrow (2007) och Odom (1995) skriver bland annat att det saknas tid och utrymme för studenter att debattera och reflektera över ämnesinnehållet och det kan vara nyckeln till att svårigheter förekommer.

I animationsstudien föregicks gruppdiskussionerna av en enkät med öppna frågor där studenternas individuella tolkningar av animationen undersöktes. Innan enkäten fylldes i studerades animationen individuellt. I studierna med den handgripliga modellen så genomfördes semi-strukturerade individuella intervjuer efter gruppdiskussionerna. En intervjuguide låg till grund för vilka frågor som ställdes till studenterna under intervjuerna. Metoden att medvetet få arbeta med ämnesinnehållet innan diskussionerna gör att gruppdiskussionerna fokuseras till ämnesinnehållet och ger studenterna tid att samla sina egna tankar innan de ska argumentera för sin sak. Gruppdynamiska problem kan dock uppstå vid en gruppdiskussion, exempelvis kan ett visst maktspel äga rum vilket kan resultera i att alla inte kommer till tals. Vi har ingen möjlighet att kontrollera gruppdynamiken men då analysen berör innehållet på gruppnivå är detta av mindre betydelse. Det empiriska materialet har sedan tidigare analyserats och kategoriserats med det naturvetenskapliga lärandet i fokus (Höst m.fl., 2013; Larsson, 2013; Larsson & Tibell, 2014; Stadig Degerman, 2012; Stadig Degerman mfl., 2012; Stadig Degerman & Tibell, 2011).

#### *Urval av citat*

De utvalda citaten i artikeln representerar vanligt förekommande situationer i det empiriska materialet. Detta för att tydligt visa vad vi baserar de teoretiska resonemangen på men också för att skapa en förståelse och ett intresse för de budskap som förs fram i texten. Artikelns resonemang bygger på en konstruktivistisk syn på lärande där vi anser att studenter och andra lärande personer själva konstruerar sin kunskap men med stöd från omgivningen. Lärandet är individuellt men sker i interaktion med den sociala, kulturella och lingvistiska omgivningen (Taber, 2006; Sjøberg, 2010).



## RESULTAT

*Studenters användning av deras erfarenheter och förkunskaper*

Förkunskaper sprungna ur vardagen och tidigare undervisning kan stödja studenterna i deras lärande då ny kunskap kan relateras till redan känd kunskap. I följande citat får vi följa studenter i en gruppdiskussion där de diskuterar energiomvandlingar och att molekylen ATP faktiskt kan beskrivas som en energirik molekyl (Stadig Degerman & Tibell, 2011). En gruppmedlem (S3) använder sin ämneskunskap inom mekanik för att försöka förklara energiomvandlingen, hon använder också ett metaforiskt språk (fjäders) för att skapa en konkret upplevelse av det abstrakta innehållet hon arbetar med.

*Citat 1: gruppdiskussion (Stadig Degerman & Tibell, 2011)*

S1: Men energiomvandlingen, här är det ju från det här vad ska man säga, kemisk energi eller vad ska vi kalla det för, gradienten finns här.

S2: Mmm.

S1: till faktiskt rörelseenergi när det faktiskt börjar snurra.

S3: Ja.

S1: och sen då här nere vet jag inte vilken typ av energiomvandling det är men.

S4: Jaaa, det är väl att det blir potentiell energi igen då?

S1: Och den energin gör att dom kan slås ihop ADP och P till ATP.

S3: Kan man tänka så här först är det en kemisk energi som blir mekanisk energi och den här mekaniska energin blir om man trycker ihop en fjäder ungefär, man sätter ihop fosfatgruppen men en di-fosfatgrupp då tillför man energi trycker ihop fjädern och den ligger där en ihoptryckta fjädern och när som helst kan man släppa på fjädern och då blir det energi igen.

Relationen mellan fjädern och ATP-syntes kan ses som en beskrivning av hur kemisk energi omvandlas till mekanisk energi och sen tillbaka till kemisk energi. Även om metaforen kan kännas vilseledande så är det ett sätt att beskriva energiomvandlingarna med stöd från tidigare erfarenheter och förkunskaper. Följande exempel är taget från samma gruppdiskussion som ovan och illustrerar hur studenterna själva förstår att deras kunskap måste konstrueras och botten i deras ämnesmässiga förkunskaper. Studenterna diskuterar vilka molekyler som finns med i animationen och varför de vet att det är ett protein de observerar.

*Citat 2: Gruppdiskussion (Stadig Degerman & Tibell, 2011)*

S3: Men eftersom vi vet att proteinet är konstruerat så där som små lockar så tycker inte vi att bilden är så konstig men skulle man inte veta det så skulle man inte förstå alls vad det där var för nåt, att det var insidan.

S1: Nej.

S3: Nej, det är sant kanske att dom där korkskruvarna kanske om man inte vet att ett protein är små korkskruvar. Man måste ha en del förförståelse för att förstå bilden.

De två citaten exemplifierar hur studenter använder sina vardagliga och begreppsliga förkunskaper när de studerar en animation för att förstå ett nytt ämnesinnehåll. Men detta är inte alltid en bekymmersfri process. I studien kring ATP-syntesen har vi exempelvis sett att studenterna har

svårt att använda sina baskunskaper från allmänkemi om jämviktsreaktioner och applicera det på en ny biokemisk situation. Till exempel visade enkäterna (Tabell 1) att endast 5 av 43 studenter korrekt kunde förutse att ATP-syntesen är en reversibel reaktion och 16 studenter uppgav felaktigt att processen borde stanna (Stadig Degerman & Tibell, 2011). En vanlig föreställning om jämviktsreaktioner är att vid jämvikt står allting stilla, vilket troligen har sitt ursprung i fysikens definition om att ett jämviktsläge är då en gungbräda står och väger helt stilla (Banerjee, 1995). I själva verket är det reaktionshastigheterna i den reversibla reaktionen som är lika, det betyder att reaktionerna fortgår men i samma takt så att nettoreaktionen blir noll.

Larsson & Tibell (2014) fokuserar på hur lärandet påverkas när ämnesinnehållet står i strid med studenternas tidigare kunskaper. I studien diskuterar studenter processen självassociation med hjälp av den handgripliga modellen. Studenterna upplever till en början att det är något som är konstigt, dvs. att en ordnad biologisk struktur borde inte formas från slumpmässiga kollisioner mellan subenheter. I den här studien upplevde studenterna en kognitiv konflikt när de interagerade med den handgripliga modellen, dvs. de stötte på en situation som stod i konflikt med deras tidigare kunskaper (Berlyne 1965; Hewson & Hewson 1984). Dels så rör sig partiklar på en submikroskopisk nivå annorlunda jämfört med objekt på makronivå (krafter som exempelvis gravitationen är försumbara på en mikroskopisk nivå) och dels så tenderar människor att se slumpmässighet som en motsats till ordning samt att en agent krävs för att initiera en händelse (Resnick, 1996). Det sistnämnda är en intuition från våra vardagliga erfarenheter, exempelvis om en boll rör sig så förutsätter vi att någon har påverkat den. Citaten nedan illustrerar hur studenternas intuitiva idéer inte stämmer överrens med den molekylära processen självassociation och skapar en kognitiv konflikt:

*Citat 3: Intervju (Larsson & Tibell, 2014)*

Student (S): ... Jag tänkte att hm, hur kan molekyler bara komma in och bara blandas och bara skapa en struktur?

S: För man skulle föreställa sig att någonting så pass strukturerat skulle i själva verket vara framkallat av hm, några faktorer, att det kommer hållas ihop av några faktorer och att det skulle skapas på ett speciellt sätt...

Intervjuare (I): Ja.

S: ... för att vara säker på att strukturen blir likadan varje gång.

I: Mm.

S: Så det är det begrepp som jag brottas med...

*Citat 4: Gruppdiskussion (Larsson & Tibell, 2014)*

S1: Men mitt bekymmer är att hur vet du för att du förstår att viruset när det sätts samman är väldigt specifikt, som du sa det är väldigt specifikt. Så hur kan de då perfekt orientera sig själva?

*Studenters tolkningar av representationer*

Både externa representationer och metaforer är viktiga konceptuella verktyg för studenter, men de kan potentiellt skapa svårigheter beroende på hur de tolkas. Vi menar att representationer erbjuder studenterna ett antal olika sätt att förstå det som den representerar, där vissa sätt är felaktiga och andra är vetenskapliga sanktionerade som korrekta förklaringar. I en av våra studier använde sig många studenter av maskin-fokuserade metaforer för att beskriva ATP-syntesen (Stadig Degerman m.fl., 2012). Nedan ses ett citat av en student som beskriver processen som en cykellampa/dynamo.

*Citat 5: Gruppdiskussion (Stadig Degerman m.fl., 2012)*

Student 2: Kan man inte säga att det är som ett cykellyse typ så att du trampar å så lagrar den energi... så lyser lampan liksom...

Svårigheter uppstår om studenter tillämpar hela metaforen istället för att endast använda relevanta egenskaper hos metaforen. Studenterna måste här veta vilka egenskaper hos metafor som stämmer överens med den molekylära processen. Det finns alltså egenskaper i en metafor som inte överensstämmer med den vetenskap som representationen är tänkt att förmedla och detta kan ställa till problem och metaforen bryts ner (Stadig Degerman m.fl., 2012). Exempelvis så skriver Stadig Degerman (2012) i sin avhandling att svårigheten med att förstå att kemiska processer är reversibla kan komma från det metaforiska bildspråket som används i den animation som har studerats. Där animationen visar en enkelriktad reaktionsväg.

Tidigare visade vi hur en kognitiv konflikt kan skapa svårigheter för studenterna i deras lärande. För att hjälpa studenterna att integrera denna nya och motsägande kunskap har vi visat att det är fördelaktigt att tillhandahålla en erfarenhet av det molekylära fenomenet som åskådliggör den motsägande kunskapen (Larsson, 2013; Larsson & Tibell, 2014). Nedan ses ett exempel där studenter lyfter fram vikten av att erfara självassociation via modellen för att verkligen tro på och förstå dess motsägande natur (Larsson & Tibell, 2014).

*Citat 6: Intervju (Larsson & Tibell, 2014)*

Student: Det var faktiskt bra att se en 3D-version av den, det va verkligen, verkligen bra.

Intervjuare (I): Mm.

S: Och om du hade sagt till mig att, du vet när vi blev tillfrågade om den kunde sättas samman på egen hand?

I: Ja.

S: Jag hade aldrig trott på er om jag inte hade sett det på riktigt... [skratt]... jag var som, åh det kan inte stämma.

Studenterna använde sig av modellen för att testa olika idéer och skapa sig en föreställning av processen. I själva verket har båda undersökta externa representationerna i gruppdiskussioner visat sig vara bra lärandeverktyg och utvecklar särskilt studenters konceptuella förståelse av de molekylära processernas dynamiska natur (Höst, Larsson, Olson & Tibell, 2013; Stadig Degerman & Tibell, 2011). Men även andra faktorer påverkade deras konceptuella förståelse av processen. I en intervju så uttryckte en student betydelsen av att diskutera med kamrater.

*Citat 7: Intervju (Larsson & Tibell, 2014)*

Student: Jag tror att vi kunde interagera med den, vi behövde faktiskt ta isär modellen och sätta ihop den igen och vi var faktiskt tvungna att göra det i grupp och jag tror att det va bra.

Alla fem studenter som blev intervjuade i Larsson & Tibell (2014) underströk vikten av att diskutera tillsammans med sina kamrater och att detta var viktigt för att skapa mening kring modellen och processen. I en gruppdiskussion i Stadig Degerman & Tibell (2011; se citat 1 och 2) framgick det även att alla studenterna inte var medvetna om att de observerade ett protein

innan de fick diskutera och reflektera över animationens innehåll. Dessutom visade analysen i Höst m.fl. (2013) att en kollaborativ lärandemiljö genererar en gynnsam miljö för elever att engagera sig och utveckla sin begreppsförståelse. Studien (Larsson & Tibell, 2014) lyfte även fram intresse och engagemang som en möjlig faktor som påverkar studenters förmåga att integrera ny och motstridig kunskap med redan befintlig kunskap. Följande citat illustrerar den positiva atmosfär som infann sig när studenterna interagerade med modellen för att skapa sig en förståelse för självassociation.

*Citat 8: Gruppdiskussion (Larsson & Tibell, 2014)*

[Gruppen har tagit isär subenheter och placerat dem i behållaren för att börja skaka modellen]

S3: *Coolt!*

(*Skrattar*)

.../.../...

[Studenterna fortsätter att skaka modellen och diskuterar]

S1: *Skaka, skaka, skaka!*

S2: Det kanske är för hårt... men det ska inte vara (oklart) ja kanske (oklart).

S3: Du borde prova.

S1: (*Skratt*) Prova! Nu är det verkligen varmt...

S2: Nej, du borde prova, det funkar, det kommer bli bra.

S1: Men du har rätt metod, alltså.

S1: (oklart) *Nice!* Nu fuskar jag (S2: skrattar) Jag måste prova lite slumpmässigt här, annars skulle det vara att fuska (S2: *Skrattar*) ja.

## DISKUSSION OCH IMPLIKATIONER

Syftet med artikeln var att lyfta fram studenters lärande av molekylära fenomen, som inte är direkt observerbara, för att diskutera betydelsen av erfarenheter och reflektion i undervisningen. Detta har vi gjort genom att exemplifiera med empiriskt material från våra forskningsstudier kring studenters lärande av molekylära processer. Resonemangen som förs fram bör vara applicerbara även inom andra ämnesområden innehållande begrepp av abstrakt karaktär.

### *Betydelsen av studenters förkunskaper och reflektion*

Förkunskaper påverkar hur man förutspår och förstår nya och obekanta situationer, samt ligger till grund för studenters meningsskapande. Vi har i resultaten sett exempel på hur studenters förkunskaper och erfarenheter är betydelsefulla, om inte avgörande, för deras konstruktion av ny kunskap. Studenterna använder förkunskaper både från en vardaglig kontext och från tidigare undervisning som stödjer dem i deras lärande, ex. fjädern och energiomvandlingar. Men studenternas förkunskaper kan också utgöra ett hinder för deras kunskapsinhämtning. Vilket vi har sett i våra tidigare forskningsartiklar; studenters förståelse av begreppet reversibilitet och jämvikt (Stadig Degerman & Tibell, 2011) och när molekylära processers natur står i strid med studenters tidigare kunskaper, dess spontana och slumpmässiga natur (Larsson, 2013; Larsson & Tibell, 2014). En möjlig förklaring till det förstnämnda skulle kunna vara att även om en student klarar av att överföra sina kunskaper från en domän till en annan så följer även de för måldomänen felaktiga föreställningar med (Villafañe m.fl., 2011). Vad gäller det sistnämnda så föreslår Cousin (2006), Nussbaum & Novick (1982) och Perkins (1999) att en möjlig förklaring

kan vara studenters intuitiva idéer. Till skillnad från Deweys definition av reflektion, fokuserar man idag i högre utbildning på att utnyttja intuitiva tankar eller icke-vetenskapliga tankar hos de lärande för att leta i det som redan skett efter motiv som stödjer den egna tanken (Fendler, 2003). Detta sammantaget blir ett problem då studenter ska lära sig begrepp som till och med ibland går emot intuitionen. För att förekomma problemet bör den högre utbildningen utbilda studenter i att reflektera. Reflektion är ett sätt att omvandla erfarenheter till att bättre förstå abstrakta idéer och därmed också en förutsättning för förmågan att generalisera sina kunskaper. Reflektionen kan också ses som en medveten strävan att upptäcka specifika samband mellan det vi gör och de konsekvenser som följer, men också att lyfta fram kritiska aspekter i vår erfarenhet samt tydliggöra dem. Erfarenheter via reflektion är på detta sätt en förutsättning för att kunna skapa teoretiska abstrakta idéer. Vi vill därför lyfta fram diskussionens betydelse för lärandet av abstrakta molekylära fenomen. Sammantaget lyfter de citat som finns exemplifierade i resultatet fram vikten av att diskutera och reflektera tillsammans med kamrater för att skapa mening kring representationerna och det ämnesinnehåll som är i fokus. Reflektionen tillsammans med kamrater fungerade som ett stöd för deras tänkande och lärande kring processerna ATP-syntes och självassociation. Vilket också stöds av att reflektion bör ske i interaktion med andra människor (Dahlstedt, 2011; Dewey, 1933; Rodgers, 2002). Att aktivt arbeta med representationer i grupp har dessutom visat sig främja lärandet av komplexa och abstrakta begrepp i naturvetenskap (Glasson, 1989; Vesilind & Jones, 1996).

#### *Att tolka, erfara och reflektera kring representationer*

För att hjälpa studenterna att förstå molekylära fenomen blir det nödvändigt att transformera ett abstrakt innehåll till någonting konkret (Wilensky, 1991), vilket kan göras via makrofiering (Figur 2) till representationer (Stadig Degerman, 2012/2013). Representationer av molekylära fenomen finns mellan fenomenet som sådant och studenters lärande av dynamiska molekylära begrepp och påverkar tolkningsprocessen (Stadig Degerman m.fl., 2012).

I resultatet såg vi att en kognitiv konflikt skapades när studenterna interagerade med den handgripliga modellen av den molekylära processen självassociation. Deras intuitiva idéer stod i konflikt med processen. För att studenter skall förstå och lösa konflikten måste de ges rätt lärandeverktyg. Larsson & Tibell (2014) visar hur den handgripliga modellen kan tillhandahålla en erfarenhet av den molekylära processen självassociation, vilket gjorde det möjligt för studenterna att tro på och acceptera konstraintuitiva aspekter av processen. Erfarenheten av det som vi normalt inte kan uppleva blev här en nyckelfaktor för studenternas lärande. Larsson & Tibell (2014) lyfte även fram intresse och engagemang som en betydelsefull faktor när studenterna möter ny och motstridig kunskap. Olika affektiva värden har tidigare lyfts fram som betydelsefullt för studenters konstruktion av ny kunskap (t.ex. Duit & Treagust 2012; Hadjiachilleos, Valanides & Angeli, 2013; Pintrich & Schrauben 1992). Enligt Dewey (1915) och Rodgers (2002) är utgången av en reflektion beroende av attityder och ett personligt intresse för hur och varför en händelse har skett samt vilken konsekvens en händelse får. Dahlstedt (2011) beskriver också vikten av att *vilja* reflektera. Just länken mellan kognition och emotioner är extra viktig då den i många former av konstruktivism vanligtvis är eftersatt (Zembylas, 2005).

Även metaforer, i relation till representationer, som används i undervisning måste tolkas och förstås av studenterna för att skapa ett meningsfullt lärande. Överföringen från källdomänen till måldomänen sker via de likheter som finns. Om det sker en överföring av egenskaper som inte överensstämmer så finns det stor risk att metaforen feltolkas och faller sönder. Förmågan

att kunna avgöra vilka egenskaper hos metaforer som ska tillämpas för att förklara ett ämnesinnehåll blir därmed direkt avgörande för om en representations syfte når fram till studenterna (Stadig Degerman m.fl., 2012).

Det existerar inte en ”fulländad” representation utan studenterna måste själva upptäcka vad den representerar. Reflektionen blir här ett sätt för dem att bli medvetna om representationerna och hur väl de beskriver det naturvetenskapliga ämnesinnehållet. Dessutom kan en specifik representation på ett fördelaktigt sätt förklara vissa aspekter av ett fenomen medan en annan lämpar sig bättre för att förklara andra aspekter. En utmaning för didaktikforskningen är att utreda vilka representationer och delar ur representationer som hjälper merparten av studenterna att förstå ett ämnesinnehåll även om tidigare erfarenheter och förkunskaper varierar (Stadig Degerman, 2012; Larsson, 2013). Valet av representationer är också avgörande för det bildspråk som görs tillgängligt för studenterna och påverkar i sin tur deras tolkningar av representationen.

#### *Tröskelbegrepp och abstrakt tänkande*

Både ATP-syntesen och självassociation innehåller tröskelbegrepp samt konceptuellt svårbegripliga begrepp (bl.a. reversibla och kausala förlopp). Tröskelbegrepp spänner över flera ämnesområden och är dessutom konceptuellt svåra begrepp (Meyer & Land, 2003). Vi vill påstå att förståelsen för ett tröskelbegrepp beror på en persons förmåga att generalisera sina erfarenheter från olika källdomäner. I de studier som presenteras i Stadig Degerman (2012) och Larsson (2013) ser vi exempel på hur många studenter lyckosamt, genom att interagera med externa representationer i gruppdiskussioner, skapar sig en förståelse för tröskelbegrepp såsom slumpmässighet, dynamik och kemisk jämvikt. Genom att erfa de molekylära processerna genom externa representationer i ett socialt sammanhang och aktivt reflektera över dessa erfarenheter kan ett meningsfullt lärande ske. Erfarenheten är således både individuell men också socialt konstruerad. Genom att skapa sig en förståelse av ett tröskelbegrepp, genom aktiv reflektion av erfarenheter, bör studenters förmåga att formulera abstrakta ideér inom fältet underlättas. En god förmåga till abstrakt tänkande borde även leda till att bättre förmåga att upptäcka och förstå tröskelbegrepp. På detta sätt blir tröskelbegrepp mycket viktiga för studenters lärande och utveckling.

Sammanfattningsvis så har vi belyst betydelsen av att studenter ges möjlighet att erfa och reflektera kring molekylära processer. För ett meningsfullt lärande krävs det dessutom att lärandesituationen är intressant och utmanande för den lärande. Ger vi studenter rätt konceptuella och representativa verktyg kan vi hjälpa dem att använda sina förkunskaper till att konstruera en förståelse för abstrakta fenomen som är kognitivt svårbegripliga.

#### TACK

Författarna vill rikta ett tack till docent Nicklas Gerike, Karlstad universitet, och docent Per Sund, Mälardalens högskola, för goda kommentarer i skrivprocessen.

#### REFERENSER

- Ausubel, D. P. (1963). *The psychology of meaningful verbal learning: an introduction to school learning*. New York: Grime & Stratton.
- Banerjee, A. C. (1995). Teaching chemical equilibrium and thermodynamics in undergraduate general chemistry classes. *Journal of Chemical Education*, 72(10), 879-881.
- Berlyne, D. E. (1965). Curiosity and education. I J. D. Krumboltz (Red.), *Learning and the Educational Process*. Chicago: Rand McNally & Co.



- Coll, R. K., France, B., & Taylor, I. (2005). The role of models/and analogies in science education: implications from research. *International Journal of Science Education*, 27(2), 183-198.
- Cousin, G. (2006). An introduction to threshold concepts. *Planet*, 17 (December), 4-5.
- Dahlstedt, M. (2011). Var god reflektera!: Reflektioner kring lärandeideal och lärarutbildning i förändring. I *Utbildning-Undervisning-Utmaning-Utveckling: En rapport från LiU: s utvecklingskonferens 10 mars 2011*, 11-23.
- Dewey, J. (1933). *How we think*. New York: Prometheus Books.
- Dewey, J. (1915). *Demokrati och utbildning*. Göteborg: Daidalos.
- Duit, R. H., & Treagust, D. F. (2012). Conceptual change: still a powerful framework for improving the practice of science instruction. I K. Chwee, D. Tan & M. Kim (Red.), *Issues and Challenges in Science Education Research: Moving Forward* (43-54). Nederländerna: Springer.
- Fendler, L. (2003). Teacher reflection in a hall of mirrors: Historical influences and political reverberations. *Educational Researcher*, 32(3), 16-25.
- Gabel, D., & Sherwood, R. (1980). The effect of student manipulation of molecular models on chemistry achievement according to piagetian level. *Journal of Research in Science Teaching*, 17(1), 75-81.
- Giere, R. N. (2004). How models are used to represent reality *Philosophy of Science*, 71, 742-752.
- Glasson, G. E. (1989). The effects of hands-on and teacher demonstration laboratory methods on science achievement in relation to reasoning ability and prior knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 26(2), 121-131.
- Gordon, D. N., & Pea, R. D. (1995). Prospects for scientific visualization as an educational technology. *Journal of Learning Sciences*, 4(3), 249-279.
- Grayson, D. J., Anderson, T. R. & Grossley, L. D. (2001). A four-level framework for identifying and classifying student conceptual and reasoning difficulties. *International Journal of Science Education* 23(6), 611-622.
- Hadjiachilleos, S., Valanides, N., & Angeli, C. (2013). The impact of cognitive and affective aspects of cognitive conflict on learners' conceptual change about floating och sinking. *Research in Science and Technological Education*, 31(2), 133-152.
- Harris, M. A., Peck, R. F., Colton, S., Morris, J., Neto, E. C., & Kallio, J. (2009). A combination of hand-held models and computer imaging programs helps students answer oral questions about molecular structure and function: a controlled investigation of student learning. *CBE-Life Science Education*, 8(1), 29-43.
- Hewson, P. W., & Hewson, M. G. A. B. (1984). The role of conceptual conflict in conceptual change and the design of instruction. *Instructional Science*, 13(1), 1-13.
- Howitt, S., Anderson, T. R., Costa, M., Hamilton, S., & Wright, A. (2008). A concept inventory for molecular life sciences: How will it help your teaching practice? *Australian Biochemist*, 39(3), 14-17.
- Höffler, T., & Leutner, D. (2007). Instructional animation versus static pictures: A meta-analysis. *Learning and Instruction*, 17(6), 722-738.
- Höst, G.E., Larsson, C., Olson, A. & Tibell, L.A.E. (2013). Student learning about biomolecular self-assembly using two different external representations. *CBE – Life Sciences Education*, 12(3), 471-482.
- Kinchin, I. M. (2010). Solving cordelia's dilemma: Threshold concepts within a punctuated model of learning. *Journal of Biological Education*, 44(2), 53-57.
- Kozma, R. & Russell, J. (2000). Multimedia and understanding: expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(9), 949-968.
- Kozma, R., Chin, E., Russell, J., & Marx, N. (2000). The roles of representations and tools in the chemistry laboratory and their implications for chemistry learning. *The Journal of the Learning Sciences*, 9(2), 105-143.
- Larsson, C. (2013). *Experiencing molecular processes: the role of representations for students' conceptual understanding*. (Doktorsavhandling) Institutionen för samhälls- och välfärdsstudier, Linköpings universitet.



- Larsson, C., & Tibell, L. A. E. (2014). Challenging students' intuitions – the influence of tangible model of virus assembly on students' conceptual reasoning about the process of self-assembly. *Research in Science Education*, 1-28.
- Marbach-Ad, G., Rotbain, Y., & Stavy, R. (2008). Using computer animation and illustration activities to improve high school students' achievement in molecular genetics. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(3), 273-292.
- McClellan, P., Johnson, C., Rogers, R., Daniels, L., Reber, J., Slator, B. M., Terpstra, J. & White, A. (2005). Molecular and cellular biology animations: development and impact on student learning, *Cell Biology Education*, 4(2), 169-179.
- Meyer, J. H. F., & Land, R. (2003). Threshold concepts and troublesome knowledge: linkages to ways of thinking and practising within the disciplines. I C. Rust (Red.), *Improving students learning - ten years on*. Oxford: OCSLD.
- Montessori, M. (1912). *The montessori method*. Frederick A. Stokes Company, New York.
- Novick, S. & Nussbaum, J. (1978). Junior high school pupils' understanding of the particulate nature of matter: an interview study. *Science Education*, 62(3), 273-281.
- Nussbaum, J., & Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11(3), 183-200.
- Odom, A. L. (1995). Secondary & college biology students' misconceptions about diffusion & osmosis. *The American Biology Teacher*, 57(7), 409-415.
- Odom, A. L., & Barrow, L. H. (2007). High school biology students' knowledge and certainty about diffusion and osmosis concepts. *School Science and Mathematics*, 107(3), 94-101.
- Perkins, D. (1999). The many faces of constructivism. *Educational Leadership*, 57(3), 6-11.
- Petersen, Q. R. (1970). Some reflections on the use and abuse of molecular models. *Journal of Chemical Education*, 47(1), 24-29.
- Phillips, L. M., Norris, S. P., & Macnab, J. S. (2010). *Visualization in mathematics, reading and science education* (Vol. 5 av *Models and Modeling in Science Education*). Springer Science and Business Media.
- Pintrich, P. R., & Schrauben, B. (1992). Students' motivational beliefs and their cognitive engagement in classroom academic tasks. I D. H. Schunk & J. L. Meece (Red.), *Student perceptions in the classroom* (s. 149-183). Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Resnick, M. (1996). Beyond the centralized mindset. *Journal of the Learning Sciences*, 5(1), 1-22.
- Roberts, J. R., Hagedorn, E., Dillenburg, P., Patrick, M., & Herman, T. (2005). Physical models enhance molecular three-dimensional literacy in an introductory biochemistry course. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 33(2), 105-110.
- Rodgers, C. (2002). Defining reflection: another look at John Dewey and reflective thinking. *Teachers College Record*, 104(4), 842-866.
- Ross, P. M., Taylor, C. E., Huges, C., Whitaker, N., Lutze-Mann, L., Kofod, M., & Tzioumis, V. (2010). Threshold concepts in learning biology and evolution. *Biology International*, 47, 47-54.
- Rundgren, C.-J., & Tibell, L. A. E. (2009). Critical features of visualizations of transport through the cell membrane—an empirical study of upper secondary and tertiary students' meaning-making of a still image and an animation. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8(2), 223-246.
- Sears, D. (2008). Moving toward a biochemistry concept inventory. *American Society for Biochemistry and Molecular Biology* (September), 19-21.
- Sjøberg, S. (2010). Constructivism and learning. I P. Peterson, E. Baker & B. McGaw (Red.), *International Encyclopaedia of Education* (s. 485-490). Oxford: Elsevier.
- Stadig Degerman, M. (2012). *Att hantera cellmetabolismens komplexitet – meningsskapande genom visualisering och metaforer*. (Doktorsavhandling) Institutionen för teknik och naturvetenskap, Linköpings universitet.
- Stadig Degerman, M. (2013). Molekylära metaforer. I F. Jeppsson & J. Haglund (Red.), *Modeller, analogier och metaforer i naturvetenskapsundervisning* (137-154). Lund, Sverige: Studentlitteratur.

- Stadig Degerman, M., Larsson, C., & Anward, J. (2012). When metaphors come to life: at the interface of external representations, molecular phenomena, and student learning. *International Journal of Environmental and Science Education*, 7(4), 563-580.
- Stadig Degerman, M. & Tibell, L. A. E., (2011). *Critical aspects and how students concretize their molecular understanding: benefits and potential pitfalls with an animation*. Paper presented at the European Science Education Research Association (ESERA) 2013 Conference, 5-9 september, Lyon, Frankrike.
- Stadig Degerman, M. & Tibell L. A. (2012). Learning goals and conceptual difficulties in cell metabolism: an explorative study of university lectures' views. *Chemistry Education Research and Practice*, 13(4), 447-461.
- Taber, K. S. (2006). Beyond constructivism: The progressive research programme into learning science. *Studies in Science Education*, 42(1), 125-184.
- Tekkaya, C. (2003). Remediating high school students' misconceptions concerning diffusion and osmosis through concept mapping and conceptual change text. *Research in Science & Technological Education*, 21(1), 5-16.
- Vesilind, E. M., & Jones, G. M. (1996). Hands-on: science education reform. *Journal of Teacher Education*, 47(5), 375-385.
- Villafañe, S. M., Loertscher, J., Minderhout, V., & Lewis, J. E. (2011). Uncovering students' incorrect ideas about foundational concepts for biochemistry. *Chemistry Education: Research and Practice*, 12(2), 210-218.
- Wilensky, U. (1991). *Abstract meditations on the concrete and concrete implications for mathematics education*. Norwood, N.J.: Ablex Publishing Corp.
- Zembylas, M. (2005). Three perspectives on linking the cognitive and the emotional in science learning: conceptual change, socio-constructivism and poststructuralism. *Studies in Science Education*, 41(1), 91-115.
- Zhang, J., & Norman, D. A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18(1), 87-122.