

Distans- och hemlaborationer – vad säger den ämnesdidaktiska litteraturen?

Jonte Bernhard

Sammanfattning— Laborationer ses vanligtvis som ett väsentligt inslag i teknisk- och naturvetenskaplig utbildning. Ett av de många syftena med laborationer är att stärka, utveckla och fördjupa studenternas förståelse av verkliga fenomen (det vill säga objekt och händelser) och sambandet mellan verkliga fenomen och teoretiska modeller och teorier. Ett annat huvudsyfte med laborationer är att utveckla studenternas förmåga att samarbeta i experiment och empiriskt undersöka och beskriva tekniska system, naturliga och tekniska föremål och naturliga och artificiella fenomen.

I samband med distansutbildning är det generellt en utmaning att utforma laborationer på ett bra sätt så att de avsedda lärandemålen uppnås. Detta gäller inte bara specifikt situationen med ”påtvungad” distansundervisning som uppstod i samband med COVID-19-pandemin, utan det gäller i allmänhet alla typer av av undervisning ”off campus”.

I denna artikel beskrivs preliminära resultat från en litteraturstudie i syfte att få en översikt av vad som rapporteras i den ämnesdidaktiska forskningslitteraturen om laborationer som utförs som distanslaborationer eller som hemlaborationer inom naturvetenskapliga och tekniska utbildningar. Det finns en rätt omfattande litteratur som beskriver fjärrlaborationer och onlinelaborationer. Men, med få undantag är litteraturen främst inriktad på de tekniska aspekterna av att fjärrstyra laborationer och mindre på den pedagogiska utformningen och studenternas lärande. Förutom olika former av ”onlinelaborationer” och fjärrstyrda laborationer lyfts olika former av hemlaborationer och laborationer med digital utrustning som kan införskaffas till en så låg kostnad att studenterna själva kan äga eller låna den som intressanta alternativ för framtiden.

Nyckelord — Laborationsundervisning, distanslaborationer, hemlaborationer, litteraturstudie

I. INTRODUKTION

FÖR nästa 80 år sedan hävdade Müller [1] att ”there is little evidence to show that the mind of modern man is superior to that of the ancients. His *tools* are incomparably better” (min kursivering). Han påminner oss ”that the history of physical science is largely the history of instruments and their intelligent use” (ibid.). Laborationer ses ofta ha en ”central and distinctive role” inom naturvetenskaplig och teknisk utbildning [e.g. 2, 3] och som en inlärningsmiljö som ”sets science apart from most ... subjects” [4].

A. Laborationer i teknisk och naturvetenskaplig utbildning

Laborationer ses därför vanligtvis som ett väsentligt inslag i ingenjör- och naturvetenskaplig utbildning. Under

laborationer förväntas studenterna *använda* eller *lära sig att använda* symboliska och fysiska verktyg (såsom begrepp, teorier, modeller, representationer, inskriptioner, matematik, instrument och apparatur) för att både utveckla förståelse för de fenomen som studeras och för att utveckla färdigheter samt förmågor att använda de symboliska och materiella verktygen [5]. Ett mål är att studenterna ska utveckla en förståelse för *förhållandet* mellan å ena sidan teorier och modeller och å andra sidan objekt och händelser samt att de ska utveckla holistisk begreppslig förståelse och kunskap [6]. Detta ses ofta som det grundläggande syftet med laborationsundervisning [7].

Användningen av laborativa inslag i reguljär undervisning i naturvetenskap och teknik har en nära koppling till teknikförbättrat lärande (technology-enhanced learning). Under de senaste decennierna har intresset för ”teknikförbättrat lärande” ökat: det vill säga användningen av ny teknik för att stödja inläringen inom naturvetenskap och teknik. Kyza, et al. [8] har föreslagit följande kategorier för de inläringsteknologier som stöder meningsfullt lärande i naturvetenskap och teknik: a) *vetenskapliga visualiseringsverktyg*, b) *databaser*, c) *datainsamlings- och analysverktyg*, d) *datorbaserade simuleringar* och e) *modellering*.

Det bör observeras att Kyza et al. inkluderar datainsamlings- och analysverktyg i sin redogörelse, det vill säga hon inkluderar utrustning för insamling och bearbetning av mätdata. Enligt min mening glöms ofta bort att laborationer är en form av ”technology-enhanced-learning”.

En vanlig fråga i samband med laborationer i kontexten ”teknikförbättrat lärande” är om ”datorsimuleringar kan ersätta riktiga experiment”? Tidigare forskning visar snarlika laborationer med verkliga (fysiska) respektive virtuella experiment har jämförts visar på motsägelsefulla resultat. Vissa studier har rapporterat bättre inlärningsresultat med simuleringar [9, 10], medan andra studier har rapporterat att det finns en risk att simuleringar blir en ”värld i sig” frikopplad från verkligheten med resultat att studenterna s inte utvecklar kopplingar mellan teorier och modeller till objekt och händelser i fysisk verklighet [11, 12]. De senaste resultaten från denna forskning tyder på att laborationer där ”riktiga” fysiska laborationsmoment och virtuella moment kombineras eller laborationer där ”riktiga” fysiska laborationsmoment och datorbaserad modellering kombineras ger bättre inlärningsresultat än om enbart ”riktiga” fysiska eller virtuella utförs [13-17]. Dessutom måste ingenjörer kunna arbeta med verkliga, komplexa

system, olinjära effekter och icke-idealiserade komponenter [18, 19]. Sådana system kan oftast inte enkelt modelleras med hjälp av grundläggande naturvetenskapliga lagar och därför bör en blivande ingenjör utveckla kompetens för att empiriskt kunna undersöka beteendet hos verkliga system.

B. Laborationer i distansutbildning

Rent allmänt är det en utmaning i samband med distansutbildning att utforma laborationer på ett bra sätt så att de avsedda inlärningsresultaten som nämns tidigare uppnås [20-24]. Detta gäller inte bara specifikt situationen med "tvångs distansundervisning" som har uppstått vid många universiteter världen över och i samband med COVID-19-pandemin, utan gäller i allmänhet för alla typer av undervisning och lärande "off campus".

När jag skriver denna uppsats verkar det som att COVID-19-pandemin är någorlunda under kontroll i Sverige och centralt påbjudna restriktioner har upphävts. Men samtidigt vet vi inte hur snabbt och effektivt den nuvarande COVID-19-pandemin kan kontrolleras och stoppas över *hela* världen eller om några mutationer kan komma att minska effekterna av pågående och genomförda (mass-) vaccinationer.

Det ligger utanför denna uppsats ram att spekulera i olika tänkbara scenarior. Däremot, vad vi rätt säkert kan förutse är att mänskligheten även i någon framtid kommer att uppleva utbrottet av någon, nu okänd, pandemi. Dessutom är det värt att notera att inte bara utbrott av pandemier och sjukdomar, utan också naturkatastrofer, bränder och andra störningar kan resultera i ett behov av snabba förändringar till distansundervisning (se till exempel Potgieter et al. [25]). Således måste universitetsvärlden vara förberedd. Vidare så finns det i många länder ett ökat intresse för att öka tillgången till högre utbildning genom distansutbildning. I detta sammanhang är det en utmanande uppgift att designa inlärningsmiljöer som också inkluderar de lärande studenterna vanligtvis bibringas genom att utföra laborationer och andra liknande praktiska uppgifter. I detta sammanhang kan nämnas att termen MOOL (Massive Open Online Lab) har myntats [se till exempel 26]).

De krav och utmaningar som nämnts ovan har lett till följande forskningsfråga: Vad finns rapporterat i naturvetenskaplig och teknisk ämnesdidaktisk forskningslitteratur om laborationer som utförs som distanslaboratorier eller som hemlaboratorier?

II. METOD

För att besvara forskningsfrågan har jag sökt efter artiklar och bokkapitel med hjälp av databasen Scopus som är rätt heltäckande med hjälp av söktermer som till exempel "remote lab", "distance education" AND "lab", "home experiment", "'take home' lab". Olika synonymer användes och till exempel "experiment" och "practical work" användes som alternativ till sökordet "lab". Titel, sammandrag och nyckelord för artiklarna söktes och en begränsning var att artiklarna behövde vara skrivna på engelska eller tyska. En annan begränsning var att ämnesområdet var begränsat till ämnen som vanligtvis undervisas i på en teknisk högskoleutbildning, det vill säga artiklar relaterade till någon ingenjörsvetenskap, inklusive materialvetenskap, fysik, kemi och miljö- eller geovetenskap. Eftersom fokus var på (praktiska) laborationsarbete inkluderades inte matematik

och för att få ett mer hanterbart antal träffar ingick inte farmaci, medicin och hälso- och livsvetenskaper i sökningen, även om jag vet att det finns intressanta publikationer inom dessa områden. Även om onlinelaboratorier kan anpassas till inläring på distansläge inkluderade jag medvetet inte onlinelaboratorier i min söksträng. En anledning till detta är att för närvarande pågår arbete med att publicera ett specialnummer av European Journal of Engineering Education med inriktning mot onlinelaboratorier. En annan anledning är att jag ville fokusera på distanslaboratorier, det vill säga laborationer som studenterna när de inte är på campus. Därmed räknade jag med att mina söktermer troligen skulle finna de artiklar som beskriver onlinelaboratorier för distansundervisning. Jag satte medvetet inga begränsningar för publiceringsåret i kraft eftersom jag ville hitta äldre artiklar som beskriver hemlaboratorier med utnyttjande av enkla material då jag bedömde att sådana artiklar fortfarande kunde vara relevanta.

Merparten av sökningen utfördes i maj till mitten av juli 2020 med en kompletterande sökning för att hitta nyligen publicerade artiklar utfördes 2 maj, 2021. Hittills har genom sökning i Scopus 513 artiklar hittats (Av dessa var 73 artiklar sådana som hittades i samband den kompletterande sökning i början av maj 2021, det vill säga de indexerades i Scopus under perioden 19 juli 2020 till 1 maj 2021).

I ett första steg lästes titlar och sammanfattningar för de artiklar som hittades i sökningen. Artiklar som uppenbart inte matchade forskningsfrågan uteslutes i detta skede. Till exempel sökordet "home lab" hittade också artiklar som innehöll frasen "smart home lab" (eller liknande) i titlar eller sammanfattningar, det vill säga (forsknings) laboratorier som undersökte utformningen och egenskaperna för "smarta hem" och inte laborationer för utbildningsändamål. I detta skede uteslöts medvetet inte artiklar som var fokuserade på skolnivå (och inte på högskolenivå i enlighet med forskningsfrågan) eftersom det kunde inte a priori uteslutas att de kunde innehålla användbara idéer.

De artiklar som återstod efter den här första sällningen och som kunde nås i sin helhet via Linköpings universitetsbibliotek laddades ner för en första snabb och översiktlig genomläsning att få en första, utforskande, översikt över materialet. I denna (översiktliga) läsning noterades (i den utsträckning information fanns i artikeln) ämnet för laborationen, typen av laboration, den utrustning och de tekniker som användes, målgrupp, den pedagogiska utformningen, gjorda erfarenheter och studenternas lärande. Eftersom denna konferensrapport rapporterar ett pågående arbete kommer jag i det följande inte att rapportera någon kvantitativ analys av materialet eftersom analysen ännu inte är klar. I stället kommer jag som ett resultat av min första undersökande granskning i de följande avsnittet att rapportera mina allmänna fynd och observationer från att läsa artiklarna. Jag kommer också att, som exempel, nämna några artiklar från min litteratursökning.

III. RESULTAT

A. Typer av laborationer och kategorisering

Något förenklat kan laborationer ses som uppdelade i de som utförs i form av en simulering och/eller modellering "virtuellt" och de som utförs genom att observera något

TABELL I
TYPER AV LABORATORIEEXPERIMENT (ANPASSAD FRÅN [27, 28])

Typ av laborieutrustning och resurser	Studenternas tillgång till nödvändig utrustning eller resurser	
	Lokal åtkomst	Fjärranslutning
Fysisk (verklig)	"Hands-on" laboration	Fjärrstyrd laboration
Virtuell (simulerad / modellerad)	(Lokal) Virtuell laboration	(Distribuerad) Virtuell laboration

"reellt" fenomen i verkligheten. För enkelhetens skull ignorerar jag här att det kan vara framgångsrikt för studenternas lärande att under kurslaborationer kombinera datorsimuleringar med verkliga mätningar (jfr [13-17]). Dessutom kan studenternas tillgång till de resurser eller utrustning som är nödvändiga för att utföra en laboration antingen vara i form av lokal (direkt) åtkomst eller via fjärrstyrning. I tabell 1 visas en typisk kategorisering av laborationer [27, 28].

Med laborieutrustning och resurser menas den utrustning eller de resurser som är väsentliga för att utföra en viss specifik laboration. Till exempel, i en *distribuerad virtuell laboration* får studenter vanligtvis tillgång till en specifik, dedikerad webbsida via en webbläsare för att köra en simulering av vissa specifika fenomen. De måste fortfarande ha lokal åtkomst till en dator, en surfplatta eller en smartphone för att köra simuleringen (alla simuleringar går dock inte att köra på alla hårdvaror utan de kan vara beroende av specifik hårdvara eller specifikt operativsystem med mera) och de kan behöva en dator eller en surfplatta för att skriva en rapport. I en *lokal virtuell laboration* kan simuleringen eller modelleringen köras lokalt, "off-line", på studenternas (eller lab- eller datorsalens) datorer (eller surfplattor/smartphones) och tillgång till internet är inte nödvändig. Men, i och med att allt fler resurser läggs i "molnet" vill jag hävda att skillnaden mellan lokala och distribuerade virtuella laborationer blir allt mer diffus. Faktum är att både lokala och distribuerade virtuella laborationer ofta kallas onlinelaborationer.

I en fjärrstyrd laboration (remote lab) styr och samlar studenterna in mätdata från ett experiment som utförts med verklig, fysisk utrustning på någon avlägsen plats (det vill säga inte i samma rum som varifrån experimentet styrs). Denna avlägsna plats kan vara allt från någon närliggande lokal på samma campus till att vara en plats belägen på avsevärd distans som till och med kan ligga i ett annat land. Oftast, men inte alltid, kan experimentet också observeras genom någon kamera under utförandet. Precis som med distribuerade virtuella laborationer behöver studenterna fortfarande ha en (lokal) dator för att styra experimentet, för att ta emot mätdata från experimentet och för att analysera dessa data. I en "hands-on" laboration utförs experimentet av studenterna i omedelbar närhet till utrustningen. Det är viktigt att notera att experimenten i "hands-on" laborationer numera ofta styrs av en lokal dator och mätningar utförs digitalt av sensorer eller annan utrustning som är ansluten till en dator.

En omedelbar iakttagelse från läsningen av artiklarna är att

flera termer ganska ofta är sammanflätade eller sammanblandade med oklara (eller olämpliga) distinktioner. Jag har redan nämnt att termen "online" ofta används för både lokala och distribuerade virtuella laborationer. En annan sammanblandning av termer är användningen av termen "virtuell" för både virtuella laborationer och fjärrstyrda ("riktiga") laborationer. "Digital" används ibland för att skilja virtuella laborationer och fjärrlaborationer från "verkliga" laborationer fastän frekvent användning av digital utrustning för mätning, insamling av mätdata och kontroll av experiment är mycket vanligt numera i "hands-on" laborationer. Termen "digital" används dessutom när man egentligen menar distansutbildning eller distansmöten.

För att undvika förvirring när man diskuterar laborationer i distansutbildning (i det följande inkluderar jag också "distansläge" i denna kategori) föreslår jag att kategoriseringen som föreslås i tabell 2 är lämplig. Typerna av laborationerna i den högra kolumnen "fjärranslutning") i tabell 1 kan lätt tolkas som de typer av laborationer som är lämpliga för distansutbildning. Men som kommer att framgå av det följande hävdar jag (och litteraturen) att alla typer av laborationer i det gråa området i tabell 2 bör övervägas för laborationer i distansutbildning (Traditionellt har vid distansutbildningar det också förekommit att studenterna också har rest till ett universitetscampus för att få en koncentrerad, praktisk, laborationskurs. Men detta har av många skäl varit besvärligt [20] och under tiden för covid-19 inte lämpligt). I det följande kommer jag att kort beskriva (preliminära) observationer från min undersökande litteraturöversikt.

En allmän utmaning inom distansutbildning, oavsett typ av labb, är att studenterna är arbetar ensamma i samband med laborationer och att fruktbart samarbete mellan studenter är mycket svårare att uppnå. Mycket av de positiva lärandevinsterna i framgångsrika laborativa kurser på campus har tillskrivits att studenterna får gemensamma erfarenheter och kan diskutera dessa gemensamt i ett kollaborativt lärande [5, 29].

TABELL II
FÖRESLAGEN KATEGORISERING AV LABB FÖR EN DISKUSSION RELATERAD TILL
DISTANSUNDERVISNING. DE LABORATORIER SOM ÄR RELEVANTA FÖR
DISTANSUTBILDNING ÄR MARKERADE MED EN GRÅ BAKGRUND.

	Laborationen genomförs			
	På campus		Hemma	
Typ av laborieutrustning och resurser	Studenternas tillgång till nödvändig utrustning eller resurser		Studenternas tillgång till nödvändig utrustning eller resurser	
	Lokal åtkomst	Fjärranslutning	Lokal åtkomst	Fjärranslutning
Fysisk (verklig)	"Hands-on" laboration	Fjärrstyrd laboration	Hemlab. ("hands-on")	Fjärrstyrd laboration
Virtuell (simulerad / modellerad)	(Lokal) Virtuell laboration	(Distribuerad) Virtuell lab.	(Hem) Virtuell lab.	(Distribuerad) Virtuell lab.

B. Virtuella laborationer

Virtuella simulerings- och modelleringslaborationer kan relativt enkelt (tekniskt) utföras på distans och det finns en ganska omfattande litteratur [se till exempel 30]. Det kan dock ställas krav på vilken datorutrustning studenterna har och det kan finnas problem med licenser som inte tillåter att program installeras på studenters datorer eller körs utanför universitetets nätverk. Detta kan kringgås genom att använda studenternas datorer som en fjärrterminal, men är lite krångligt. En ytterligare komplikation är att alla studenter kanske inte har tillgång till en snabb internetuppkoppling. Inom i synnerhet fysik finns det färdiga program och moduler som har utvecklats särskilt för undervisningsändamål [31], men även ”professionella” program som Matlab, Simulink eller Circuitlab kan med fördel användas. Som tidigare nämnts presenterar litteraturen motstridiga resultat när det gäller studenternas lärande när de deltar i virtuella laborationer. Framför har det anförts att det finns en risk att simuleringarna blir en ”värld i sig” med liten eller ingen koppling till verkligheten.

C. Fjärrstyrda laborationer (remote labs)

Det finns också ganska omfattande litteratur för fjärrstyrda laborationer (remote labs) [till exempel 32-38]. Förutom beskrivningar av projekt där flera universitet har slagit samman kring fjärrstyrt laboratoriearbete med flera användare och flera experiment, finns det en rik litteratur som beskriver hur fjärrkontroll kan skapas med relativt enkel utrustning som Arduino-kort. Med några få undantag är dock fokus i litteraturen på tekniska aspekter och inte på pedagogiska frågor. De resurser (material och personal) som krävs för att bygga och underhålla system är ofta inte tydligt beskrivet. Förutom de pedagogiska frågorna och underhåll av system så nämns i litteraturen skalning, kommunikationsprotokoll och bristen på standardisering som utmaningar som behöver lösas.

D. Hemlaborationer

Som en kuriositet kan nämnas att den äldsta artikeln jag hittade i min litteratursökning var en från 1938 vari det beskrivs hur ett kemilaboratorium i form av ett mindre kabinet kunde byggas i ett hem [39]. Hemlaborationer är dock mindre väl beskrivna i litteraturen. Denna form av laborationer kan grovt delas in i tre kategorier: Laborationer som kan utföras med enkla material, laborationer som använder de inneboende funktionerna i moderna digitala verktyg såsom smartphones och surfplattor, och laborationer som använder digital utrustning som numera kan införskaffas till en relativt låg kostnad.

Det finns en rätt omfattande äldre litteratur som beskriver laborationer som kan utföras med enkel utrustning och med sådana enkla material som ofta finns tillgängliga i ett hem, i vardagen eller i miljön [till exempel 40]. Även om det finns publikationer som riktar sig mot högre utbildning riktar sig litteraturen främst mot experiment lämpliga för barn och unga i skolåldern eller yngre. Enligt min mening är dock denna litteratur värd att studera för att få inspiration till lämpliga experiment som kan anpassas. Genom krav på en annan och mer avancerad analys av studerade fenomen kan de göras lämpliga för universitetsnivå. Förutom den äldre litteraturen verkar det som att distansläget under pandemin har lett till

återupplivning av hemlaborationer som företeelse. Exempel är användning av vanligt tillgängliga material och resurser för laborationer i fysik [41], förvandling av köket till ett kemilaboratorium [42, 43] eller till ett elektromagnetiskt laboratorium [44].

Utvecklingen av alltmer avancerade digitala verktyg som samtidigt har sjunkit i pris möjliggör hemlaborationer av en annan typ än tidigare med möjlighet till mer avancerade mätningar och till databehandling. De inbyggda kameror och sensorer som olika smartphones såsom iPhone och surfbrädor såsom iPad kan användas för olika experiment. I min litteraturstudie har jag sett att det ständigt publiceras nya exempel på sätt att använda smartphones och surfbrädor [45, 46]. Förutom de inbyggda sensorerna i smartphones och surfbrädor finns sensorer och mätutrustning som kan anslutas till dessa via Bluetooth. På så sätt kan laborationer utföras som tidigare krävde en dator och studier i fält kan genomföras som tidigare var besvärliga att utföra.

Den digitala utvecklingen har också lett till utvecklingen av specifik mätutrustning som nu är tillgänglig till ett överkomligt pris - vissa tekniska universitet har utvecklat lådor med prisvärd utrustning som de låter studenter låna för eget bruk eller köpa den [47]. Jag har redan nämnt att Arduino-kort har använts för att styra fjärrlaborationer. Sådana kort kan också användas för hemlaborationer och det börjar komma litteratur som beskriver detta [48]. Andra exempel är Digilent Analog Discovery som är en liten mätutrustning (mått ca 8 x 8 x 2 cm) som ansluts till en dators USB-ingång och har möjlighet att fungera både som en avancerad signalgenerator och ett som ett flerkanaligt oscilloskop med spektrumanalysator och med många andra funktioner. Den är därför lämplig för laboratoriearbete inom elektroteknik [49]. Ett annat exempel är iOLab som är en liten vagn (3 x 7,5 x 13 cm) som inte bara har inbyggda sensorer (position, hastighet, acceleration, kraft, rotation) som gör den lämplig för experiment i mekanikundervisningen [50]. Den har också har sensorer för magnetfält, ljus, ljud, temperatur, tryck och spänning och kommunikation med värddatorn sker trådlöst. För närvarande är litteratur som beskriver användning av Digilent Analog Discovery och iOLab i undervisning rätt begränsad, men det finns redan exempel på att iOLab har använts med bra inlärningsresultat (enligt begreppstest) i fysikkurser genomförda på distans [50].

IV. SAMMAFATTNING OCH DISKUSSION

Sammanfattningsvis finns det ganska omfattande litteratur om fjärrstyrda laborationer och ”virtuella” laborationer som kan användas för inspiration av den som vill utveckla laborationer. Dock ligger fokus mer på tekniska aspekter än på studenternas lärande och pedagogiska aspekter. Vidare är det en ojämn fördelning mellan olika ämnesområden med flest publikationer relaterade till undervisning i elektronik, kontrollteori, mekatronik och fysik. Specifikt för distanslaborationer hävdar jag att det är ännu viktigare att tänka igenom vilka syften och avsedda lärandemål som en viss laboration har fokusera laborationens utformning på det. Dessutom pekar litteraturen på att den pedagogiska utformningen av en laboration är viktigare än själva tekniken och det är viktigt att inse att kostnaderna för att utveckla bra kurslaborationer och för underhålla utrustning för

fjärrstyrda laborationer inte bör underskattas.

Personligen tror jag att laborationer som använder lågkostnadsutrustning (som Digilent, iOLab och liknande) som studenterna kan låna eller äga är något vi kommer att få allt större betydelse och något vi kommer att se mer av i framtiden. Sådan utrustning är också av värde för campusundervisning eftersom det ger studenterna möjlighet att arbeta utanför schemalagda laboratorier. Det ger också flexibilitet för att möta olika utvecklingar av den aktuella pandemin och (möjliga) framtida pandemier. Slutligen noterar jag att laboratorier som använder denna typ av utrustning kommer att göra det möjligt för studenter att arbeta ”för hand och med dator” [jämför 51]. Det motsvarar faktiskt det "postdigital perspective [in education], in which the digital makes up part of an *integrated totality*" som Fawns [52] hävdar. Det vill säga en helhet i vilken digitala såväl som analoga tekniker och verktyg har sin plats sida vid sida med kroppsligt lärande och utnyttjande av mänskliga sinnen.

REFERENSER

- [1] R. H. Müller, "American apparatus, instruments, and instrumentation," *Industrial and Engineering Chemistry: Analytical Edition*, vol. 12, no. 10, pp. 571-630, 1940.
- [2] A. Hofstein and V. N. Lunetta, "The role of the laboratory in science teaching: Neglected aspects of research," *Review of Educational Research*, vol. 52, no. 2, pp. 201-217, 1982.
- [3] A. Hofstein and V. N. Lunetta, "The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century," *Science Education*, vol. 88, no. 1, pp. 28-54, 2004.
- [4] R. T. White, *Learning science*. Oxford: Basil Blackwell, 1988.
- [5] J. Bernhard, "Insightful learning in the laboratory: Some experiences from ten years of designing and using conceptual labs," *European Journal of Engineering Education*, vol. 35, no. 3, pp. 271-287, 2010, doi: 10.1080/03043791003739759.
- [6] A. Tiberghien, "Labwork activity and learning physics - an approach based on modelling," in *Practical Work in Science Education*, J. Leach, Paulsen, A. C. Ed. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 1999, pp. 176-194.
- [7] D. Psillos and H. Niedderer, Eds. *Teaching and learning in the science laboratory*. Dordrecht: Kluwer, 2002.
- [8] E. A. Kyza, S. Erduran, and A. Tiberghien, "Technology-enhanced learning in science," in *Technology-Enhanced Learning: Principles and Products*, N. Balacheff, S. Ludvigsen, T. de Jong, A. W. Lazonder, and S. Barnes Eds.: Springer, 2009, pp. 121-134.
- [9] J. J. Chini, A. Madsen, E. Gire, N. S. Rebello, and S. Puntambekar, "Exploration of factors that affect the comparative effectiveness of physical and virtual manipulatives in an undergraduate laboratory," *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, vol. 8, no. 1, p. 010113, 2012, doi: 10.1103/PhysRevSTPER.8.010113.
- [10] N. D. Finkelstein *et al.*, "When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment," *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, vol. 1, no. 1, p. 010103, 10/06/ 2005.
- [11] O. Lindwall and J. Ivarsson, "Differences that make a difference: Contrasting the local enactment of two technologies in a kinematics lab," i *Learning across sites: New tools, infrastructures and practices*, S. Ludvigsen, A. Lund, I. Rasmussen, and R. Säljö Eds. Amsterdam: Elsevier, 2010, pp. 364-380.
- [12] E. Jensen, "Does teaching students how to explicitly model the causal structure of systems improve their understanding of these systems?," *European Journal of Engineering Education*, vol. 39, no. 4, pp. 391-411, 2014/07/04 2014, doi: 10.1080/03043797.2014.881320.
- [13] M. Ronen and M. Eliahu, "Simulation - a bridge between theory and reality: the case of electric circuits," *Journal of Computer Assisted Learning*, vol. 16, no. 1, pp. 14-26, 2000.
- [14] G. Olympiou and Z. C. Zacharia, "Blending physical and virtual manipulatives: An effort to improve students' conceptual understanding through science laboratory experimentation," *Science Education*, vol. 96, no. 1, pp. 21-47, 2012, doi: 10.1002/sce.20463.
- [15] Z. C. Zacharia, G. Olympiou, and M. Papaevripidou, "Effects of experimenting with physical and virtual manipulatives on students' conceptual understanding in heat and temperature," *Journal of research in science teaching*, vol. 45, no. 9, pp. 1021-1035, 2008.
- [16] Z. C. Zacharia and G. Olympiou, "Physical versus virtual manipulative experimentation in physics learning," *Learning and Instruction*, vol. 21, no. 3, pp. 317-331, 2011, doi: 10.1016/j.learninstruc.2010.03.001.
- [17] J. Bernhard and A.-K. Carstensen, "'Real' experiments or computers in labs - opposites or synergies? - Experiences from a course in electric circuit theory," uppsats presenterad på *SEFI annual conference*, Azoreerna, Portugal, 18-21 september, 2017.
- [18] J. Bernhard and A.-K. Carstensen, "'Real' Experiments or Simulated Experiments in Labs - Opposites or Synergies? Experiences from a Course in Electric Circuit Theory," uppsats presenterad på *6:e Utvecklingskonferensen för Sveriges ingenjörutbildningar*, Göteborg, 22-23 november, 2017.
- [19] S. Lavelle, "Technology and engineering in context: Analytical, phenomenological and pragmatic perspectives," i *Engineering in context*, S. Hyldgaard Christensen, B. Delahousse, and M. Meganck Eds. Aarhus: Academica, 2009, pp. 75-95.
- [20] J. Bernhard, "Engineering education research as engineering research," in *International perspectives on engineering education: Engineering education and practice in context, volume 1*, S. Hyldgaard Christensen, C. Didier, A. Jamison, M. Meganck, C. Mitcham, and B. Newberry Eds. Cham: Springer, 2015, pp. 393-414.
- [21] R. G. Holmberg and T. S. Bakshi, "Laboratory work in distance education," *Distance Education*, vol. 3, no. 2, pp. 198-206, 1982.
- [22] J. Walkington, P. Pemberton, and J. Eastwell, "Practical work in engineering: A challenge for distance education," *Distance Education*, vol. 15, no. 1, pp. 160-171, 1994.
- [23] M. A. M. Meester and P. A. Kirschner, "Practical work at the Open University of the Netherlands," *Journal of Science Education and Technology*, Article vol. 4, no. 2, pp. 127-140, 1995, doi: 10.1007/BF02214053.
- [24] D. Kennepohl and A. M. Last, "Teaching Chemistry at Canada's Open University," *Distance Education*, vol. 21, no. 1, pp. 183-197, 2000, doi: 10.1080/0158791000210111.
- [25] P. Gustafsson, "Physics teaching at a distance," *European Journal of Physics*, vol. 23, no. 5, pp. 469-474, 2002, doi: 10.1088/0143-0807/23/5/303.
- [26] M. Potgieter, L. A. Pilcher, R. R. Tekane, I. Louw, and L. Fletcher, "Lessons Learnt from Teaching and Learning During Disruptions," i *Research and Practice in Chemistry Education: Advances from the 25th IUPAC International Conference on Chemistry Education 2018*, M. Schultz, S. Schmid, and G. A. Lawrie Eds. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 89-107.
- [27] C. Salzmann and D. Gillet, "Next Steps in Supporting More Students in MOOL for Control Education," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 184-189, 2018.
- [28] R. Heradio, L. de la Torre, and S. Dormido, "Virtual and remote labs in control education: A survey," *Annual Reviews in Control*, vol. 42, pp. 1-10, 2016.
- [29] S. Kocdar, A. Bozkurt, and T. Goru Dogan, "Engineering through distance education in the time of the fourth industrial revolution: Reflections from three decades of peer reviewed studies," *Computer Applications in Engineering Education*, 2020, doi: 10.1002/cae.22367. 1
- [30] J. Bernhard, J. Davidsen, T. Ryberg, A.-K. Carstensen, and J. Rafn Abildgaard, "Engineering students' shared experiences and joint problem solving in collaborative learning," uppsats presenterad på SEFI Annual Conference, Köpenhamn, 2018.
- [31] B. Balamuralithara and P. C. Woods, "Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 17, no. 1, pp. 108-118, 2009, doi: 10.1002/cae.20186.
- [32] J. Lincoln, "Virtual labs and simulations: Where to find them and tips to make them work," *The Physics Teacher*, vol. 58, no. 6, pp. 444-445, 2020.
- [33] B. Hanson *et al.*, "ReLOAD: Real Laboratories Operated at a Distance," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 331-341, 2009, doi: 10.1109/TLT.2009.35.
- [34] S. Gröber, M. Vetter, B. Eckert, and H.-J. Jodl, "Experimenting from a distance—remotely controlled laboratory (RCL)," *European Journal of Physics*, vol. 28, no. 3, pp. S127-S141, 2007, doi: 10.1088/0143-0807/28/3/s12.
- [35] M. Cooper and J. M. M. Ferreira, "Remote Laboratories Extending Access to Science and Engineering Curricular," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 342-353, 2009, doi: 10.1109/TLT.2009.43.
- [36] M. A. Bochicchio and A. Longo, "Hands-On Remote Labs: Collaborative Web Laboratories as a Case Study for IT Engineering

- Classes," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 320-330, 2009, doi: 10.1109/TLT.2009.30.
- [37] U. Hernandez-Jayo and J. Garcia-Zubia, "Remote measurement and instrumentation laboratory for training in real analog electronic experiments," *Measurement*, vol. 82, pp. 123-134, 2016.
- [38] C. Viegas *et al.*, "Impact of a remote lab on teaching practices and student learning," *Computers & Education*, vol. 126, pp. 201-216, 2018.
- [39] R. Tirado-Morueta, R. Sánchez-Herrera, M. A. Márquez-Sánchez, A. Mejías-Borrero, and J. M. Andujar-Márquez, "Exploratory study of the acceptance of two individual practical classes with remote labs," *European Journal of Engineering Education*, vol. 43, no. 2, pp. 278-295, 2018, doi: 10.1080/03043797.2017.1363719.
- [40] M. A. Coler, "The home lab as a hobby," *Journal of Chemical Education*, Article vol. 15, no. 3, pp. 143-144, 1938.
- [41] R. D. Edge, *String and sticky tape experiments*. College Park, MD; USA: American Association of Physics Teachers, 1987.
- [42] F. Bouquet, C. Dauphin, F. Bernard, and J. Bobroff, "Low-cost experiments with everyday objects for homework assignments," *Physics Education*, vol. 54, no. 2, p. 025001, 2019, doi: 10.1088/1361-6552/aaf6d6.
- [43] W. Al-Soufi, J. Carrazana-Garcia, and M. Novo, "When the Kitchen Turns into a Physical Chemistry Lab," *Journal of Chemical Education*, vol. 97, no. 9, pp. 3090-3096, 2020.
- [44] S. Maqsood, S. M. Kilpatrick, C. D. Truong, and S. R. Lefler, "Analysis of Amylase in the Kitchen: An At-Home Biochemistry Experiment for the COVID-19 Pandemic," *Journal of Chemical Education*, vol. 98, no. 3, pp. 858-865, 2021.
- [45] Z. Popovic, G. Artner, G. Lasser, and C. F. Mecklenbraeuer, "Electromagnetic-Wave Fun Using Simple Take-Home Experiments," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 62, no. 2, pp. 100-106, 2020, doi: 10.1109/MAP.2020.2971133.
- [46] E. Momox and C. Ortega De Maio, "Computer-based learning in an undergraduate physics course: Interfacing a mobile phone and matlab to study oscillatory motion," *American Journal of Physics*, vol. 88, no. 7, pp. 535-541, 2020.
- [47] J. Lincoln, "Five smartphone experiments that don't need apps," *The Physics Teacher*, vol. 56, no. 9, pp. 652-653, 2018/12/01 2018, doi: 10.1119/1.5080595.
- [48] J. DeBoer, C. Haney, S. Z. Atiq, C. Smith, and D. Cox, "Hands-on engagement online: using a randomised control trial to estimate the impact of an at-home lab kit on student attitudes and achievement in a MOOC," *European Journal of Engineering Education*, vol. 44, no. 1-2, pp. 234-252, 2019, doi: 10.1080/03043797.2017.1378170.
- [49] E. Irigoyen, E. Larzabal, and R. Priego, "Low-cost platforms used in Control Education: An educational case study," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 17, pp. 256-261, 2013.
- [50] M. Radu and M. Dabacan, "Active Learning: Improving Student Learning using Portable Computer-Based-Test-Equipment," *The ASEE Computers in Education (CoED) Journal*, vol. 8, no. 4, 2018.
- [51] E. Bodegom, E. Jensen, and D. Sokoloff, "Adapting RealTime Physics for Distance Learning with the IOLab," *The Physics Teacher*, vol. 57, no. 6, pp. 382-386, 2019, doi: 10.1119/1.5124277.
- [52] J. Bernhard, J. Davidsen, and T. Ryberg, "By hand and by computer – a video-ethnographic study of engineering students' representational practices in a design project," i *Educate for the future: PBL, Sustainability and Digitalisation 2020*, A. Guerra, J. Chen, M. Winther, and A. Kolmos Eds. Aalborg, Denmark: Aalborg University Press, 2020, pp. 561-570.
- [53] T. Fawns, "Postdigital Education in Design and Practice," *Postdigital Science and Education*, vol. 1, no. 1, pp. 132-145, 2019,