LUND UNIVERSITY

Modeller av verkligheten. Modellbyggaren Polhem, seendet och det spatiala tänkandet

Dunér, David

Published in:
Vetenskapssocieteten i Lund. Årsbok 2009

2009

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

Link to publication

Citation for published version (APA):
Dunér, D. (2009). Modeller av verkligheten. Modellbyggaren Polhem, seendet och det spatiala tänkandet. I B. Jonsson (Red.), *Vetenskapssocieteten i Lund. Årsbok 2009* (s. 14-33). Vetenskapssocieteten i Lund.

Total number of authors:
1

Creative Commons License:
Ospecificerad

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Download date: 20. Jul. 2025

David Dunér

Modeller av verkligheten

Modellbyggaren Polhem, seendet och det spatiala tänkandet

UPPFINNAREN CHRISTOPHER POLHEM lär bara genom att se en maskin en enda gång i rörelse, oavsett hur invecklad den var, ha kunnat bygga en ny med alla konstruktionsdetaljer.[1] Det finns inte en uppfinning, sade han, som han inte genast skulle veta om den var möjlig att verkställa eller inte.[2] I det senare fallet skulle det inte heller finnas någon i hela världen som skulle kunna åstadkomma densamma. Matematikern Samuel Klingenstierna, som höll ett åminnelsetal över Polhem i Kungliga vetenskapsakademien 1753, var mäkta imponerad av hur han kunde föra hem till Sverige alla nya maskiner, ”redigt och tydeligen afbildade i sin förträffeliga Föreställnings-förmåga. Det är märkvärdigt, at Han aldrig brukade ritning eller beskrifning, at behålla en sådan myckenhet högeligen sammansatta machiner i minnet”.[3] Polhem tycktes ha ett fenomenalt tekniskt, spatialt tänkande, en blick för mekanik, rörelser och kraftöverföringar.

Blicken, seendet, erfarenheterna av världen är en källa ur vilken medvetandet kan hämta näring. Vad vi ser och upplever ingår i tänkandet. Hjärnan skapar inre representationer av händelser i omvärlden, bygger upp en inre mental värld av perceptioner eller tolkade sinnesintryck och föreställningar som samtidigt blir oberoende av om det de handlar om just för stunden är närvarande. Rumsupplevelsen utvecklas i en interaktion med omvärlden.[4] För det första utgår jag från autopsin, seendets och det självupplevdas betydelse för det tekniska tänkandet, för det andra från att det spatiala tänkandet är av vikt för uppfinnandet av ny teknik och förståelsen av mekanikens rörelser och kraftöverföringar. Man måste se, men också röra vid objekten omkring oss, gå runt, känna, använda sig av den taktila beröringen och kroppens erfarenheter. För att förstå hur en klocka fungerar måste man plocka isär den och bygga upp den igen. Det var så Polhem lärde sig teknik, genom seendets och handens erfarenheter i mötet

Vet soc inlaga 2009 4.indd 14 09-08-31 14.59.35

med tingen. Vad jag vill komma åt är hur uppfinnaren, teknikern, föreställer sig teknik i mentala bilder, både som mentala modeller och som representationer, men också med hjälp av distribuerad kognition, där tankar läggs ut i det yttre, som fysiska modeller av verkligheten i trä.

Vi tänker inte främst i ord utan i bilder, i bildscheman, strukturer av erfarenheter som föregår språket. I vår föreställningsförmåga skapar vi representationer av maskiner, skapar inre modeller av de verkliga maskinerna. Teknisk begåvning verkar till en del ha att göra med hur personen lyckas skapa framför allt inre, men också yttre representationer av mekaniska förhållanden i yttervärlden. En mekanikers spekulativa förstånd, menade Polhem själv, innefattade bland annat ”en skarpsinnig eftertancka och lyckligt minne at behålla hela machiners Structur i hufwudet qwar tils alt blir färdigt”.[5] Modelltänkandet handlar först och främst om hur vi representerar yttervärlden i den inre världen, i vårt medvetande, men användningen av materiella, skalenliga modeller har också pedagogiska syften som man finner i *det mekaniska laboratoriet* och det mekaniska alfabetet i visualisering av mekanik och tekniska idéer. Vidare finns det experimentella syften i att med parametervariationer pröva olika tekniska lösningar som i fallet med *den hydrodynamiska experimentmaskinen*, eller som i en artikel i tidskriften *Dædalus Hyperboreus* att i mindre skala pröva prototyper av olika skeppsmodeller i en vattenbalja. Slutligen, som när det gäller den *kungliga modellkammaren*, kan modellerna användas i stället för tvådimensionella ritningar, såsom tredimensionella förlagor i mindre skala. Man kan sätta modellerna i samband med ekonomiska intressen och drivkrafter, som en sorts reklam eller produktlansering, men modellerna kan även helt enkelt ses som ett rent nöje och en underhållning – en teknologisk fantastik.

I blickpunkten faller Christopher Polhem, uppfinnare och naturvetare, född på Gotland 1661. Tidigt utkastad i världen arbetade han sig fram från lilldräng till att som vuxen bli kommerseråd och adlad; han var vid sin bortgång 1751 en uppburen ledamot av Kungliga vetenskapsakademien.[6] En viktig händelse för Polhems teknologiska förkovran var när han och hans vän Samuel Buschenfelt i januari 1694 erbjöds ett stipendium av Kungliga bergskollegium för att företa sig en resa till England och kontinenten. Den ämnade vara dels en sorts bildningsresa, för att två lovande tekniker skulle kunna utveckla sina tekniska kunskaper och få tips om ny teknik, dels en statsangelägenhet då resan skulle kunna innebära att ny värdefull teknik kom till Sverige. Polhems receptiva begåvning var ovärderlig i en tid då exportförbud och tullar gjorde det svårt att få ut originalmaskiner och modeller från England och andra länder till Sverige. Genom att se maskinerna på plats och i verksamhet kunde han rekonstruera

Vet soc inlaga 2009 4.indd 15 09-08-31 14.59.35

dem. På ett sätt skulle man kunna säga att de, då de var kungliga stipendiater på uppdrag av svenska kronan, var ett slags industrispioner som samlade in kunskaper om ny teknik, innovationer och nya tillverkningsmetoder till det isolerade och inom många områden eftersatta Sverige. Särskilt studerade de olika industrier och mekaniska anläggningar, tog del av uppfinningar, manufakturer och gjorde sig bekanta med lärda män. Innovationer i äldre tid var just många gånger en historia om inflyttning av bärare av ny teknik, som skickliga hantverkare som lockades till landet eller skickliga tekniker som skickades ut på bildningsresa och tog med sig nya uppslag hem.

Tekniköverföringen skedde alltså till en inte obetydlig del genom introducerandet av tekniska nyheter från utlandet. Den kanske viktigaste faktorn för teknisk förändring var de små förbättringarna steg för steg, dag för dag, byggda på förvärvade erfarenheter. Radikala förändringar och revolutionerande uppfinningar var ovanliga. Tekniska förändringar, uppfinningar och innovationer, kan man säga, handlade om nyskapningsprocesser där man först uppfattade eller identifierade ett problem som behövde en lösning.[7] Det kunde också handla om att se en möjlighet, att göra något som tidigare uppfattats som omöjligt eller överhuvudtaget inte kunnat uppfattas utan legat bortom tänkandets horisont och livets nödtorft. Resan i Europa var just en resa i möjligheter, att se möjliga lösningar på kända och okända problem. När detta väl var gjort igångsattes ett arbete som skulle leda till en praktisk lösning av problemet, varvid följde insikt om handlingar och kritisk revision av den erhållna konstruktionslösningen.

Polhem skrev ingen resedagbok, men efter hemkomsten lämnade han den 26 oktober 1696 in en kortfattad reserapport till Bergskollegium. ”Hwad jag der wid har förrättat och inhämtat, kan fuller nu til pricka icke så noga beskrifwas”, erkänner han, men det som hör till de mekaniska kunskaperna säger han sig ha på bästa möjliga sätt försökt inhämta och noga betraktat och lagt på minnet, allehanda verk och maskiner som han under vägen kunde komma över på resan genom Holland, England, Brabant, Frankrike, Tyskland och Danmark:

> såsom åtskillige sätt och maner på allehanda wattuwärck och drifft konster, jämbwäl åtskillige manufacturer, och quarn-wärck, såsom wädersågar, ollioquarnar, pappersquarnar, sement- färg- och gipsquarnar, slijp- och polerquarnar, steens såg- och slijpquarnar, båhr- och reffell-quarnar, wäder hambrar, och smijdewärck; förutan wäderquarnar til miöl, gryn, tobak, senap etc. item finer- och spijl-wärcks sågar, samt nåhl- fingerborar- och syrings makerij, tegel- och kalckbruk, silkes spinnerij, och spoolwärck; så ok wäfstolar til tyg, sammet, band, knyttning, spetzer, strumpor etc. item pråmar, slysser, wind-bryggor, dammar, påhl- och ‹mu›derwärck, last- och bygningz-cranor; deßlijkest glas- och spegelmakerij,

Vet soc inlaga 2009 4.indd 16 09-08-31 14.59.35

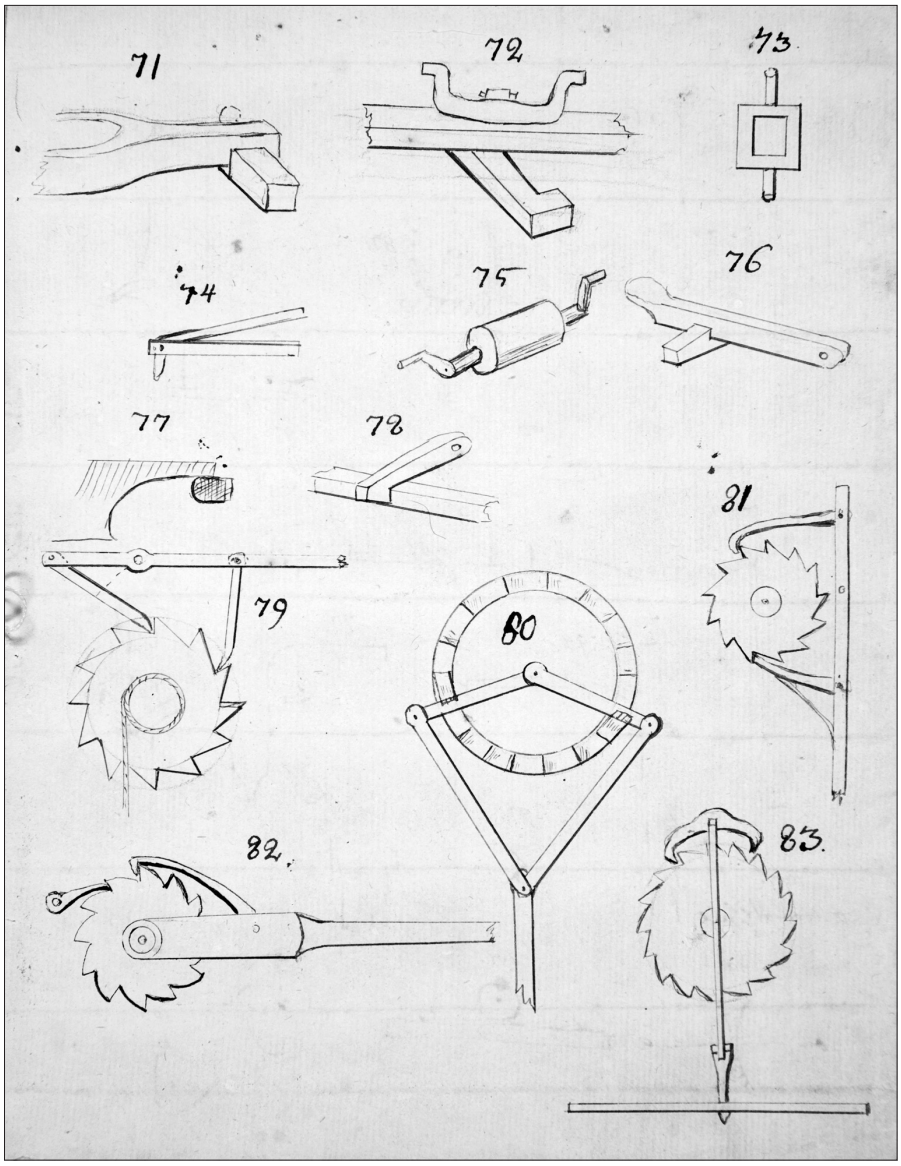
> astronomiske uhr och wijsare, klåck- och speluhr; mathematiske, astronomiske, och physicaliske instrumenter, etc. förutan en hop varieteter och konststycken i cabinet och konstkambrar, som eij hinner nämnas.

Nämnda ting säger han sig säkert kunna göra om så fordrades. Men det som hörde till svåra filosofiska saker samt hemliga konster hos lärda män och mästare, säger han, ”må jag beklagel. tilstå eij hafwa fådt giordt den nyttan, som jag gärna welat och åstundat, förmedelst min stadiga fölljeslagare fattigdomen, som har warit mine deseiner mycket hinderlig.”[8] Allt detta hade han noggrant och ”med flit” sett, men några anteckningar verkar han inte ha gjort under resan, inte heller några ritningar av maskinerna. Allt präglades i hans minne.

Det mekaniska laboratoriet

Resan som varade mellan åren 1694 och 1696 kom att få stor betydelse för Polhems fortsatta tekniska verksamhet. Många av de tekniska lösningar, maskiner och annat som han mötte under resan dyker senare upp i hans egen verksamhet. Efter hemkomsten satte han också genast igång med ett par projekt som kom att få stor betydelse för den tekniska och industriella förändringen i Sverige, som nya gruvmaskiner i Falun och grundandet av en manufaktur i Stjärnsund i Dalarna som byggde på fabriksmässig tillverkning och långt driven mekanisering. Ett intressant projekt för utvecklingen av modeller och den teoretiska mekaniken var hans Laboratorium mechanicum. För den höggrevlige excellensen och det Kungliga bergskollegiet föreslog Polhem hösten 1696 inrättandet av ett mekaniskt laboratorium för byggandet av modeller av maskiner och ”konstwärck”. En rad nyttigheter skulle följa med detta, menade han. De många ”wackra ingenia” – det vill säga begåvningar – som hade lust till allehanda spekulationer och som ville i detta gräva ner sina pund, kunde därigenom bli uppmuntrade till att utföra många vackra saker, särskilt ”emedan mechaniken är en grund och fundament til heela philosophien”.[9] Man skulle kunna ha ett stort förråd av både egna och andras uppfinningar ur vilket man efter hand kunde välja ut de som visade sig vara nyttigast för såväl det privata som för det allmänna. Hans majestät och andra överhetspersoner kunde därtill ha nöje av det och där se vad som användes och omtalades på andra orter. De personer som arbetade vid detta laboratorium skulle sedan bli lämpliga och skickliga i att förestå andra verk. Och slutligen skulle också främmande personer, som annars skulle ha fått en låg uppfattning om vår svenska nation i sådana saker, se att något kunde göras förutan deras hjälp och lärdom.

Vet soc inlaga 2009 4.indd 17 09-08-31 14.59.35



1. Polhems mekaniska alfabet. Teckning av Carl Johan Cronstedt, 1729. Foto: Tekniska museet, Stockholm.

Vet soc inlaga 2009 4.indd 18 09-08-31 14.59.36

Vid ett sådant laboratorium, fortsätter Polhem, kunde också göras olika instrument för att utföra experiment i fysik och mekanik, såsom luftpumpar och vattenpumpar. ”I synnerhet har jag inventerat några instrumenter”, säger han, med vilka man kan mäta graden av rörelse i eld, vatten och luft, som tidigare var okänd, men likväl mycket nyttig. ”Rare konststycken, såsom Astronomiske uhr, glober, armiller, klåckspel, lustkonster i trägårdar, Comoedie-machiner” kunde också komma ur en sådan verkstad.[10] Allt säger han sig kunna förfärdiga – enda undantagen skulle i så fall vara målningar och skulpturer – och i många fall skulle detta överträffa vad främmande skulle kunna åstadkomma, särskilt ifråga om vatten- eller lustkonster i trädgårdar. Sammantaget skulle det inte saknas arbete för att dagligen kunna sysselsätta åtta eller tio personer. Syftet var alltså att utveckla mekaniken, både teoretiskt och praktiskt. Såväl forskning som undervisning skulle bedrivas, och på samma gång kunde laboratoriet utgöra en permanent maskinutställning.

Det finns, förutom ekonomiska och nationella självhävdelsebehov, också en pedagogisk funktion i modellbyggandet. Med modeller kunde man lära sig hur mekaniken fungerade, då kraftöverföringarna kunde visuellt och taktilt erfaras. Det mest kända exemplet på pedagogiska modeller är annars Polhems mekaniska alfabet. [Bild 1] Det mekaniska alfabetet, som ingick i hans undervisning, utgjordes av en mängd enkla, pedagogiska trämodeller som visade de grundläggande mekaniska lagarna.[11] Modellerna representerade mekanikens enkla och odelbara element, helt enkelt byggstenarna i all ingenjörskonst. Det kunde handla om stålfjädern, kugghjulet, spärrhjulsmekanismen, vindspelet och andra mekaniska element som vart och ett motsvarade en ”bokstav” i det mekaniska alfabetet. De beskrev olika typer av mekaniska rörelser, som överföringen av en sorts rörelse till en annan, från en roterande rörelse till en rätlinjig, och andra roterande och fram- och tillbakagående rörelser, olika slags spärrhjulsmekanismer, kuggkonstruktioner, vindspel, blocktyg, universalkopplingar, excenterrörelser, stubbrytare med mera. Polhems mekaniska alfabet blev ett pedagogiskt system, lätt att lära, se och pröva.

Uppslag och inspiration till det mekaniska laboratoriet hade Polhem säkerligen fått under sin resa, men också under sin tid i Uppsala då han följde professor Olof Rudbeck d.ä:s inspirerande undervisning i teknik. Rudbeck hade 1665 anlagt ett manufakturhus i Uppsala vari Polhem med stor sannolikhet erhöll praktisk undervisning. Den rika samlingen av modeller av maskiner och andra uppfinningar som fanns där försvann emellertid i den stora Uppsalabranden den 16 maj 1702. Vidare hade medicinprofessorn Andreas Drossander kollegier i experimentalfysik på 1680-talet, och år 1686 föreslog därtill några läkare i Collegium

Vet soc inlaga 2009 4.indd 19 09-08-31 14.59.37

medicum inrättandet av ett ”collegium experimentale” där man skulle utföra försök med luftpumpen.[12] Urban Hiärnes Laboratorium chymicum var säkert ytterligare en inspirationskälla. Polhems laboratorium tilldelades lokaler i en större byggnad på Kungsholmen i Stockholm, som hade inköpts av staten 1694 genom Hiärne, det så kallade Gripenhielmska huset (där nuvarande Serafimerlasarettet ligger i dag). I samma hus var Hiärnes kemiska laboratorium inrymt. Lokalen i Gripenhielmska huset tycks inte ha tagits i bruk av Polhem, i stället förlades det mekaniska laboratoriet till Falun mellan åren 1701 och 1706, varvid det mesta snickeriarbetet säkerligen utfördes i konstplanket vid gruvan.[13]

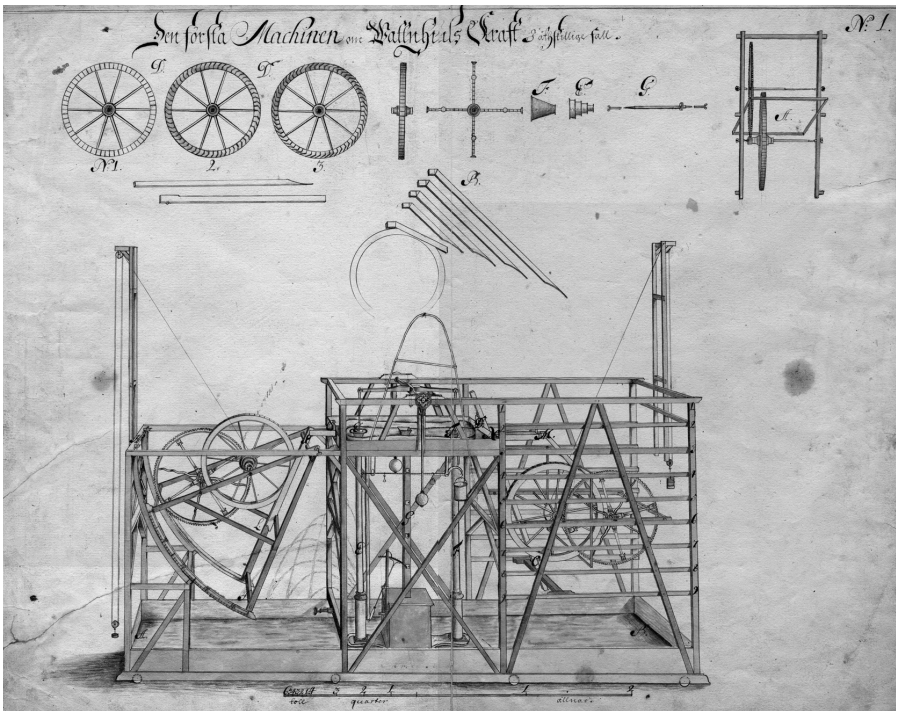
Den hydrodynamiska experimentmaskinen

En av avsikterna med det mekaniska laboratoriet var att konstruera maskinmodeller med vilka man kunde utföra mekaniska experiment, särskilt experiment rörande vattnets rörelse, men också aerodynamiska försök. Polhems gamle vän Buschenfelt skötte verksamheten som laboratoriets föreståndare. På Polhems uppdrag gjorde han en hydrodynamisk experimentmaskin som började byggas 1701 och stod färdig följande år. [Bild 2] Modellen var gjord i trä med vissa delar i metall. Den var 3,6 meter lång och 2,6 meter hög. Buschenfelt, biträdd av stipendiaten i mekanik Göran Vallerius, utförde med den en mängd systematiska försök för att pröva olika sorters vattenhjuls effekt genom att variera lutningen på fallrännorna, bedöma vattnets hastighet och vattenmängderna. Syftet var att finna det bästa sättet att inrätta ett vattenhjul, optimera skovelbladens form och antal, likaså tilloppsvattnets längd och höjd, vattenrännans lutning och anpassning till olika hjultyper med mera. Med de förvärvade kunskaperna skulle man kunna effektivisera bergsmekaniska och industriella anläggningar.

Med vattenmaskinen kunde de systematiskt, på rationella och mekaniska grunder, försöka hitta den bästa konstruktionen av vattenhjulen, tilloppsrännorna, skovellagen och vevarna. Det gällde, som Buschenfelt sade, att lära känna ”wattnetz rätta werkan, kraft och egenskap”.[14] Det var tre slags hjultyper som användes, skovlade för under-, bröst- respektive överfall, alla gjorda i päronträ och buxbom. Genom systematiska försök kunde de med denna maskin på ett mer exakt sätt komma fram till de mest fördelaktiga sätten att ordna hur vattnet skulle falla på hjulet, vad gällde längd, höjd och lutning i förhållande till vikt, hjultyper och andra faktorer.

Vattenlaboratoriet var ett tidigt och ovanligt försök att pröva vetenskapliga, systematiska och geometriska metoder på teknik. I stället för att gissa sig till eller spekulera i vad som var den effektivaste vattendriften försökte Polhem

Vet soc inlaga 2009 4.indd 20 09-08-31 14.59.37



2. Den hydrodynamiska experimentmaskinen. Göran Vallerius, ”Kårtt och ungefärlig relation …” (1705). Foto: Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

pröva och mäta sig fram till den optimala konstruktionen. Han var ute efter att rent praktisk få kunskap om *hur* man skulle göra, inte primärt att erhålla naturvetenskapliga och teoretiska allmängiltiga förklaringar om *varför* vattnet strömmade som det gjorde. Det intressanta med denna maskin var att den var ett av de allra första försöken i teknikens historia att utveckla tekniken genom att bedriva systematisk vetenskaplig forskning för att komma fram till den mest lämpliga konstruktionen. Större delen av teknikutvecklingen kom sig av dag för dag-förbättringar. Med förvärvade erfarenheter och med små steg i taget kunde man inte sällan komma fram till den fördelaktigaste konstruktionen. Polhems modell skulle i stället bli en genväg till den perfekta maskinen. Det fanns föregångare till liknande modellprovningar: den franske fysikern Edmé Mariotte hade några decennier tidigare försökt att experimentellt utröna hur vatten- och vindkraften inverkar på kvarndriften.

Polhems och hans medarbetares tillvägagångssätt är ett exempel på en teknisk metod med parametervariationer och optimering.[15] Systematisk parametervaria-

Vet soc inlaga 2009 4.indd 21 09-08-31 14.59.38

tion utgår från att man redan vet vilka parametrar som är väsentliga. I det här fallet var det fem parametrar som varierades. För det första hur skovelbladen var utformade, varvid tre slag av vattenhjul med en diameter av 18 tum användes, för det andra förhållandet mellan vattenhjulets diameter och veven. Tredje parametern var det vertikala fallet där hjulet placerades på åtta olika nivåer. Den fjärde var tilloppsrännans lutning, som varierade mellan 5 och 90 grader, och slutligen den femte parametern som var den vikt som vattenhjulet förflyttade. Experimenten utfördes på det sättet att man ställde in de fem parametrarna som man skulle undersöka. Därefter öppnade man vattentillflödet under en minut och räknade antalet varv som hjulet gjorde under denna tid, varvid man erhöll vattenhjulets hastighet. Detta kunde göras med en decimals noggrannhet då hjulen hade tio ekrar. Tiden mättes i sekunder och togs med hjälp av ett pendelur. Alla kvantitativa resultat i experimenten infördes sedan i ett diagram. Vad Polhem utförde är närmare bestämt en geometrisk metod för att finna den maximala effekten som en funktion av vikten. På så sätt gjordes mellan 20 000 och 30 000 försök från 1702 fram till hösten 1704 då arbetet avslutades. Man kan förstå Buschenfelt när han suckade och sade att försöken var ”wijdlyfftige och knåpsamme”.[16] En rapport skickades in slutligen till Bergskollegium 1705 sammanskriven av Göran Vallerius.[17]

Några år senare kom Polhem själv att se kritiskt på dessa experiment, liksom hans ballistiska experiment som hade gjorts vid samma tid. I brev till Vallerius i november 1710 påpekade han att experimenten var misslyckade på grund av felaktigheter i konstruktionen och förklarade att två kvantiteter hade blivit mätta felaktigt. Längden på tidtagarurets pendel var inkorrekt, vilket innebar att vattenhjulens hastighet hade fått missvisande värden. Mer problematiskt var att gradskivan som användes för att mäta fallets lutning gav olika värden när hjulet var placerat på olika nivåer, vilket gjorde att resultaten inte gick att jämföra med varandra och serien av experiment inte var möjliga att reprisera. Polhem anförtrodde sig därför inför Vallerius: ”In suma oss emelan sagt, ähr detta ahrbetet så nyttigt som 5:te Juhlet i vagnen.”[18] Två års arbete med närmare 30 000 försök hade varit förgäves. Om jag bara hade tid skulle jag göra om alltsammans bara för min egen nyfikenhet, sade han vidare. Men tala inte om dessa felaktigheter i experimentet för någon, bad han Vallerius vädjande.

Även om experimenten var misslyckade så var Polhems försök ett mycket tidigt exempel på ett vetenskapligt angreppssätt på teknikutveckling. Polhem anammade vetenskapliga metoder för att lösa tekniska problem, med hjälp av modeller och systematiska experiment där värdena uppmättes i bestämda enheter. Vad han saknade var emellertid precisionsinstrument, vilket innebar

Vet soc inlaga 2009 4.indd 22 09-08-31 14.59.38

att värdena blev missvisande. Det behövdes fler experiment, menade Polhem, innan han kunde komma fram till en slutsats om de allmänna reglerna för vattenkvarnars utformning. Men några allmänna slutsatser gjordes aldrig utifrån dessa experiment.

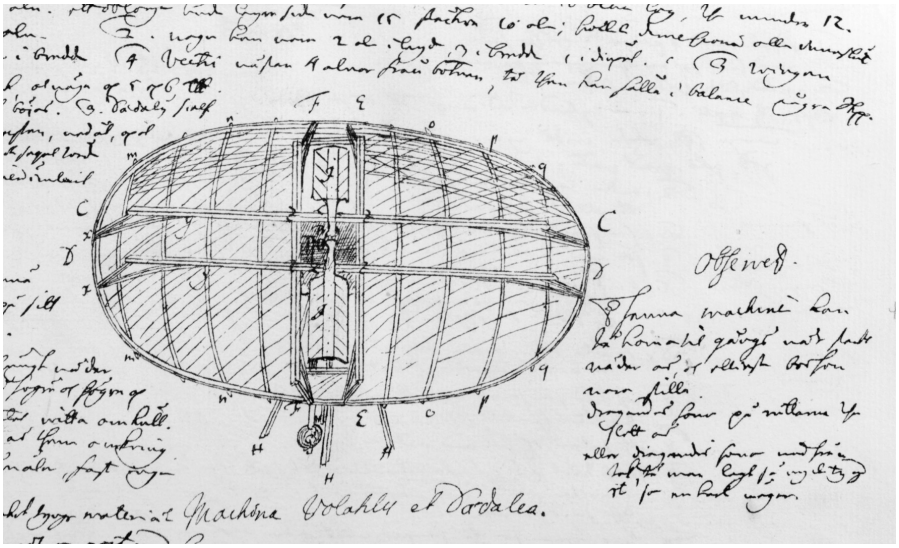
Polhems tidigare elev, teknikern och matematikern Pehr Elvius d.y., kom sedan att mer i detalj utreda de hydrodynamiska problemen. Efter samtal med Polhem lade Elvius fram en ny teori om vattendriften i en *Mathematisk tractat om effecter af vatndrifter*, utgiven av Vetenskapsakademien 1742. I den försökte han lösa Polhems problem angående hur vattenhjulets hastighet skulle anordnas. Polhem hade försökt att på induktiv väg formulera allmänna lagar utifrån systematiska experiment med hjälp av parametervariation och optimering. Elvius, som utgick från Newtons fysik, försökte i stället komma fram till allmänna regler deduktivt utifrån de grundläggande rörelselagarna med hjälp av matematisk analys i vilken han särskilt använde sig av differentialkalkylen. Samma år publicerade Polhem artikeln ”Fortsättning om Theoriens ock Practiquens sammanlämpning i Mechaniquen”, i vilken han lägger fram ett antal allmänna regler som grundar sig på hans egna praktiska erfarenheter om hur vattenkvarnar bör utformas för att erhålla bästa effekt. Syftande på Elvius metod säger Polhem att om ”icke noga observeras, så kan man lätteligen sila myggar ock swälja Cameler, som ordspråket lyder.”[19] Med andra ord, Elvius hade svalt en kamel, enligt Polhem, när han försökte lösa problemet med hjälp av ”modern matematik”.

Den nordiske Dædalus

För Polhem var mekaniken själva grunden för hela filosofin. Han ansluter sig till den cartesianska, mekanistiska naturfilosofin, som går tillbaka på den franske filosofen och matematikern René Descartes. Det var en värld av maskiner. Hela världen var som en enda gigantisk maskin. Mekaniken var densamma i det stora som i det lilla, i makrokosmos såväl som i mikrokosmos. Det fanns egentligen ingen skillnad mellan människans artificiella maskiner och Guds naturliga. Både mänskliga och gudomliga uppfinnare konstruerade sina alster utifrån samma grundlagar. Den lilla modellens förhållande till den fullskaliga verkligheten var dock inte helt oproblematisk. Proportionalitetsfaktorn för modeller var något att inberäkna.

Mellan åren 1716 och 1718 gav Polhems assistent, naturvetaren Emanuel Swedenborg, ut sex nummer av Sveriges första vetenskapliga tidskrift, *Dædalus Hyperboreus*. Tidskriften tillägnades ”wår Swenska Archimede Herr Assessor Christopher Polhammar”. Daidalos far genom luften, skrattar från ovan åt

Vet soc inlaga 2009 4.indd 23 09-08-31 14.59.38

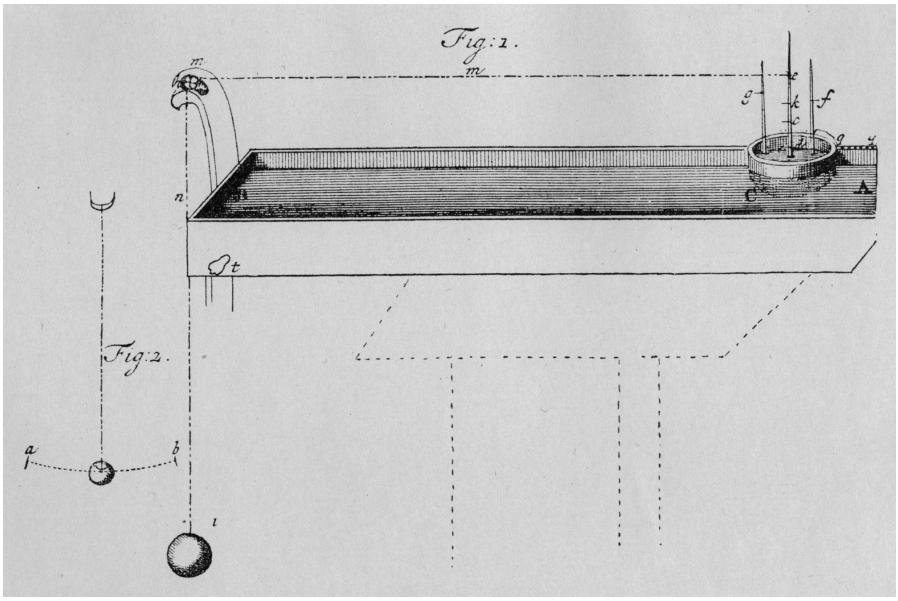


3. Maskin att flyga i vädret. Swedenborg, *Descriptio machinae Daedaleae sive volatilis* (1716). Teckning av Swedenborg förvarad vid Linköpings stiftsbibliotek.

Minos labyrinter, far över havet, deklamerar Swedenborg i en introduktionsdikt till första numret.[20] Det var mekaniken och Polhem, ”den svenska Dædalus”, som färdades till höjderna, men det var också en flykt från landets fiender. I *Dædalus Hyperboreus* fick Polhems tekniska innovationer och naturvetenskapliga rön stort utrymme, med artiklar om gruvmaskiner, taltuber, ljudet med mera. I andra numret finns en beskrivning av Polhems uppfordringskonst vid Blankstöten, det kända hakspelet, med upp- och nedåtgående trästänger med hakar som skulle vara effektivare än de gamla, bespara läderlinor och därigenom vara billigare och hållbarare. Ett påtagligt drag i de mekaniska beskrivningarna är den betydelse som läggs i den geometriska beskrivningen. Med geometrins termer, såsom cylindrar, distanser, proportioner, diametrar, radier, centra, ytor och andra, försöker de beskriva hur den rörliga geometrin, det vill säga mekaniken, måste vara i sin fullkomlighet.

Som beundrare av Polhems uppfinnarförmåga försöker även Swedenborg sig på en fantastisk uppfinning i ett ”Vtkast til en Machine at flyga i wädret” som han skissade på omkring 1714 och senare offentliggjorde i *Dædalus Hyperboreus* 1716. [Bild 3] Den är originell på det sättet att det är ett slags glidflygplan som är tyngre än luft, med fasta, bärande vingar i stället för ornitopternas imiterande av fåglarnas flaxande. Men Polhem blev inte imponerad av Swedenborgs lustiga

Vet soc inlaga 2009 4.indd 24 09-08-31 14.59.38



4. Experimentmaskin för prövande av skeppsmodeller. Emanuel Swedenborg, *Prodromus principiorum rerum naturalium sive novorum tentaminum chymiam et physicam experimentalem geometrice explicandi* (1721).

maskin: ”Betreffande flychten eller flyga artificialiter, så torde thet hafwa samma swårhet som giöra perpetuum mobile, gull &c. artificialiter, fast thet i första anseendet tycks icke mindre giörligit än begiärligit”.[21] Storleken har betydelse. Naturen förnekar nämligen en sak: alla maskiner behåller inte samma proportion i stort som i smått. Faktum är att vikten ökar proportionellt mot kuben, medan ytan endast tillväxer mot kvadraten. Polhem påvisade med andra ord problemet med skalan, svårigheten att överföra modellen till den fullskaliga verkligheten, alltså tanken om proportionalitetsfaktorn för modeller. Ett problem med skalmodeller är hur man ska kunna överföra de experimentdata man får till den fullskaliga maskinen. Men i princip var mekanikens lagar desamma i den stora världen som i den lilla, i människans verkstad och i Guds verkstad i naturen, i såväl den fullskaliga maskinen som i den lilla modellen av verkligheten.

En annan teknisk uppsats i *Dædalus Hyperboreus* handlar om ett tidigt exempel på teknisk utveckling genom modellprovningar. [Bild 4] Ibland har detta experiment med skeppsmodeller attribuerats till Polhem, men det visar sig i själva verket vara utfört av Swedenborg, även om man kan tänka sig att Polhem ligger bakom konceptet. Det var ett experiment rörande vattenmotståndet mot

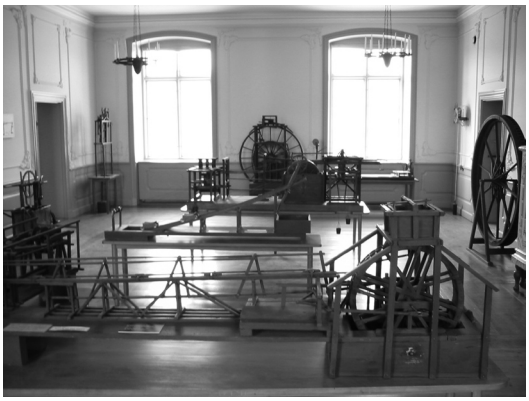
Vet soc inlaga 2009 4.indd 25 09-08-31 14.59.39

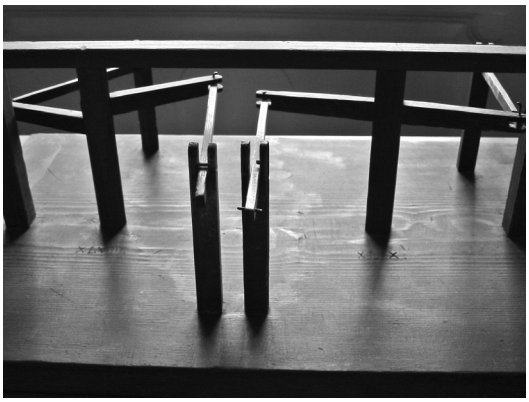
olika typer av skeppsmodeller för att finna den ideala skeppskonstruktionen av jakter, örlogsskepp, brigantiner och fregatter. Här beskrivs för första gången modellförsök i en vattenränna för att ta reda på fartygs motstånd i vatten. Det finns ingen mekanisk konst, säger Swedenborg, som är så högt kommen att inte något felas eller kan förbättras, så länge världen äger förståndiga och erfarna människor. Grundtanken är att de mekaniska konsterna kan tillskyndas med hjälp av geometrin och dess försök och prov, som här att försöka ta reda på skeppens obekanta ”boglinier”. Swedenborg föreslår att man bygger små modeller av samma vikt, men med olika form för att pröva skeppens egenskaper, ”then ena med spitzig, bred, flat, hyperbolisk eller parabolisk buk; thet andra med högt, lågt, spitsigt eller bredt bröst”.[22] Under detta ligger tankar om att det finns en överensstämmelse mellan den lilla och den stora världen. Små fartygsmodeller i en balja beter sig i stort sett på samma vis som stora skepp på havet. Av detta experiment skulle man kunna dra slutsatser om vilka former skepp bör ha. Skeppsbyggaren Gilbert Sheldon utförde senare liknande modellförsök med hänvisning just till Polhem.[23] Även den svenske amiralen och skeppsbyggmästaren Fredric Henric af Chapman redogjorde för modellprover i en vattenränna för att ta reda på vattnets motstånd. Han kom därigenom fram till att paraboliska skrov var att föredra. Skeppsbyggeriet menade han skulle bygga på erfarenhet, matematik och systematiska experiment.

Kungliga modellkammaren

Det mekaniska laboratoriet levde en ambulerande tillvaro. Laboratoriet följde Polhem där han var. Från Falun och Stjärnsund fördes Polhems modeller till Stockholm. [Bild 5] I mynthuset fick de trängas med Bergskollegium, Collegium medicum och Myntverket. År 1725, då de alltjämt förvarades i ett rum i Bergskollegiums kontor vid Mynttorget, oroade sig Swedenborg över att fönstren var i dåligt skick, så att snön föll in om vintern och regn om sommaren.[24] År 1748 utsågs en särskild plats i kungliga slottet. Efter en tid förflyttades modellerna vidare till det gamla kungshuset på Riddarholmen. I Vetenskapsakademien diskuterades 1754 om att återupprätta Laboratorium mechanicum. I juni 1756 skickade Sekreta utskottet, som framför allt behandlade ärenden inom utrikes- och försvarspolitik, en skrivelse till kungen, vilket ledde till beslut den 29 juni samma år om att återinrätta modellkammaren. Denna fick det officiella namnet ”Kongliga Modellkammaren” under Bergskollegiums överinseende och med sonen Gabriel Polhem som föreståndare.[25] Det rörde sig då om 29 modeller som förvarades i Kungliga modellkammaren, nu inhyst i Wrangelska

Vet soc inlaga 2009 4.indd 26 09-08-31 14.59.40





5. Modeller av Polhems gruvmaskiner. Stora Kopparbergs museum, Falun. Foto: David Dunér.

palatset, och vilka var tillverkade i det mekaniska laboratoriet ”tid efter annan”. År 1779 förtecknade den dåvarande föreståndaren Jonas Norberg inte mindre än 55 modeller gjorda av Polhem samt ett mekaniskt alfabet, tillsammans 80 olika pjäser.[26] I övrigt rörde det sig till stor del om lantbruksmaskiner som nu hade kommit att bli högsta mode. Modellerna stod uppdukade på borden i den stora salen, svåra att motstå för fingrande besökare.

Vet soc inlaga 2009 4.indd 27 09-08-31 14.59.41

Den tyske teknikern Johann Beckmann besökte modellkammaren under sin vistelse i Sverige 1765–1766.[27] Han leddes dit av professor Johan Carl Wilcke, som själv använde maskinmodellerna i sina föreläsningar. I en stor sal på slottet såg han hundratals modeller, och han säger, att de förtjänade att ses av varje älskare av fysik och matematik. Han såg en modell av Stockholms sluss, vilken Polhem hade planlagt, som den svenske kungen ville skänka till kungen av Spanien, men också det mekaniska alfabetet. Där fanns en fiol som spelade som ett klaver – det vill säga en nyckelharpa – och en maskin som bestod av ett skepp som drogs upp ur vattnet (antagligen Polhems skeppsupphalningsmaskin). En annan besökare var den venezuelanske frihetshjälten general Francisco de Miranda som såg ”Sala de modelos” den 16 oktober 1787.[28] Han såg, berättar han, en serie modeller, ”alphabeto de Polhaim”, som visade de enskilda rörelserna i mekaniken. Miranda fann även modeller av Polhems slussar i Trollhättan och skeppsdockan i Karlskrona.

Modellerna fångade den personliga, skapande processen. I hantverket fick produkten prägel av arbetarens personliga handlag till skillnad från maskinproduktionens opersonlighet, där spår och märken efter arbetaren skvallrade om hans delaktighet i tillverkningen och som kunde anses som defekter, avsteg från likformigheten. Maskinens formgivning låg i det personliga skapandet av modellen där den kreativa processen koncentrerades.[29] Det var i modellen uppfinnarens tankar prövades. Man prövade sig fram, begick misstag, gjorde rättelser, justerade och genomförde nya prov.

Tankemodeller utan ord

Polhem tänkte ut maskiner i sitt huvud. Han hade en speciell spatial förmåga genom vilken han i tanken kunde få maskindelarna att gå ihop med varandra och bilda komplexa maskiner. Han kunde se om en maskin fungerade eller inte genom att pröva den i sitt huvud. Inga ord behövdes, bara bilder, där den ena mackapären sattes ihop med en annan mackapär i den inre föreställningsförmågan, i mentala representationer och modeller av verkligheten. Vi behöver inga ord för att förstå. Om den ena grejen snurrar, så slår den till den där andra manicken, som griper tag i ytterligare en mojäng, som får det hela att funka … Det finns ett icke-verbalt inslag i detta tekniska tänkande. Modellernas rörelse kunde sparas i minnet för att sedan uppföras i större skala. Det var ett tredimensionellt, spatialt, rörligt tänkande, inte papperets tvådimensionella, förstelnade yta, eller som ord eller tecken. Maskinerna överskred alla beskrivningar i ord, appellerade i stället till seendet och tänkandet i rörliga bilder. När Polhem talade

Vet soc inlaga 2009 4.indd 28 09-08-31 14.59.42

om sina ”påfund” räckte inte språket till. Efter några rader tvingades han säga ”huru eljest detta verket är gjordt, låter sig ej lätteligen beskrifva”, eller ”såsom själfva verket bäst utvisar”.[30] Det handlade om seendet och den inre representationen i bilder av det yttre.

Fick han bara se en maskin en enda gång i rörelse kunde han när som helst bygga en kopia – i vart fall påstods det. Polhem såg med egna ögon ny teknik på plats i verkstäder, vid gruvor, bruk, kvarnar, kanaler, i städer och på landsbygden, som modeller i universitetssamlingar och kuriosakabinett. Polhem registrerade tekniken omkring honom i verkligheten, i bondkök såväl som i slottsträdgårdar. Resan genom Europas verkstäder och manufakturer var en resa genom teknikens landvinningar. Till en mindre del var det ett resultat av läsning och kammarstudier. Efter hemkomsten visade han Urban Hiärne ett exemplar, som han antagligen hade haft med sig från Paris, av Denis Papins nyligen utkomna *Recueil de diverses pièces touchant quelques nouvelles machines* (1695).[31] I några andra fall kan man belägga vilka böcker som han hade bläddrat i och kanske till och med läst. Han ögnade igenom tekniska böcker med illustrationer av fantastiska maskiner, som den tyske professorn Johann Christopher Sturms *Collegium experimentale* (1676–1685) vilken tar upp dykarklockor, luftpumpar, sifoner, tuber, de magdeburgska halvkloten, musklernas mekanik och andra förunderliga maskiner. En genre av böcker ibland kallade ”Theatra machinarum”, maskinernas skådeplatser, av Jacques Besson, Agostino Ramelli och Vittorio Zonca, excellerade i de mest sällsamma och fantasifulla, men ofta ändamålslösa tekniska bravurnummer. Polhem studerade sin tids största tekniska uppslagsbok, som just heter *Theatrum machinarum* (1724–1739) författad av Jacob Leupold. De tekniska bilderböckerna var snarare till för kommunikationen mellan ingenjörer och investerare och lärda, än mellan de som eventuellt skulle bygga maskinerna, ingenjörer och hantverkare. ”Uti de mechaniska kåpparstijkböcker”, sade Polhem, ”fins rijtningar på allahanda inventioner huar konstigare och krusigare öfver huar andra men tiäna mera att sätta okunigt fålk af vettskapen i diup förundran och inbillning alt vara guld som glimar, än att de i ringaste måtto skola kuna vara bättre till mera effect och mindre drifft än de aldra simpleste pump och trykvärk”.[32] Den främste svenske instrumentmakaren under det sena 1700-talet, Daniel Ekström, hade en tysk upplaga av italienaren Agostino Ramellis *Schatzkammer, mechanischer Künste* (1620), vari han hade antecknat auktoriteten hemmavids bedömning om Ramelli. Polhem bedömde de flesta av de avbildade maskinerna som ”icke alle practicable”.[33]

De fåtal verk som Polhem gav ut under sin levnad innehåller ytterst få illustrationer, delvis beroende på bristen på skickliga kopparstickare och delvis på

Vet soc inlaga 2009 4.indd 29 09-08-31 14.59.42

Polhems rädsla för extravaganta kostnader. Det viktigaste verket, *Kort berättelse om de förnämsta mechaniska inventioner som tid efter annan af commercie-rådet Christopher Polhem blifwit påfundne och til publici goda nytta och tienst inrättade, sampt om det öde, som en del af dem hafft genom tidernas oblida förändringar …* (1729), innehåller endast en enkel illustration. Som den långa titeln avslöjar går den mer ut på att framföra sin egen genialitet som han menade inte fått sin rättmätiga hyllning. Det finns dock en mängd bilder av hans lärjungar, vackra teckningar i bläck, laveringar och akvareller. I de flesta fall var det de maskiner som de verkligen såg på Stjärnsund eller på plats i Falun, Stockholm eller annorstädes, och som de studerade i syfte att förvärva kunskaper om Polhems teknik. Men det finns alltid en viss osäkerhet som kryper in i bilderna och inte sällan gör dem problematiska som historiska källor. Motsvarar bilderna den verkliga tekniken, den planerade eller den byggda tekniken, eller kanske i själva verket den tänkta tekniken?

Polhem gjorde själv aldrig några noggranna ritningar över sina maskiner, inga konstruktionsritningar, inga färgrika laveringar. Bland hans anteckningar finns dock snabba, enkla skisser, framför allt för att visualisera mekanik och naturvetenskap som materiens inre struktur och andra fenomen bortom seendets gräns.[34] Det finns inga belägg för att han använde sig av konstruktionsritningar. Vad han i stället nyttjade var modeller. ”Rijtningar ähro och väll goda generaliter, men specialiter göra modeller mehra till fyllest, särdeles om värket ähr opereust och vaanan att bygga ähr änu icke långlig.”[35] Med modellers hjälp kunde man lättare förstå teknik. Med modeller kunde man inte bara skapa förståelse för teknik utan också sprida ny teknik. Trots bristen på ritningar och exakta illustrationer tänkte han visuellt, fast inte i tvådimensionella, vilande bilder på en plan yta, utan i tre dimensioner i rörelse, i modeller som man kunde röra vid, gå runt, se i aktion. Det var en värld av modeller.

Det finns ett visionärt drag i denna uppfinningsrikedom. Det är i grunden ett spatialt, icke-verbalt tänkande som visar sig i Polhems tekniska uppfinningar. Tekniska lösningar och vetenskapliga idéer existerar först som visioner, som bilder utan ord i medvetandet. Därefter kan teknikern försöka översätta den mentala bilden till ord eller överföra den inre bilden till en teckning på ett papper eller till en skalmodell för att uppväcka liknande mentala bilder hos en annan konstruktör som slutligen konstruerar maskinidén i tre dimensioner.[36] Polhems uppfinningar bygger just på sådana mentala bilder. Detta spatiala tänkande ger ledtrådar till hur man tänker kring maskiner, hur man i inre bilder konstruerar ny teknik i tankarna, genom seendet, observationer och modeller. Att se och sedan bygga modeller i tanken.

Vet soc inlaga 2009 4.indd 30 09-08-31 14.59.42

Noter

1 Sten Lindroth, *Svensk lärdomshistoria. Stormaktstiden*, 2:a uppl., Stockholm 1989, 537.
2 Christopher Polhem, *Kort berättelse om de förnämsta mechaniska inventioner som tid efter annan af commercie-rådet Christopher Polhem blifwit påfundne och til publici goda nytta och tienst inrättade, sampt om det öde, som en del af dem hafft genom tidernas oblida förändringar. …*, Stockholm 1729, 76.
3 Samuel Klingenstierna, *Åminnelse-tal öfver Kongl. Vetensk. academiens framledne ledamot, commerce-rådet och commendeuren af Kongl. Nordstjerne-orden, herr Christopher Polhem, på Kongl. Vetenskaps acad. vägnar hållit i Stora Riddarhus-salen, d. 25. junii, år 1753*, Stockholm 1753, 14.
4 George Lakoff & Mark Johnson, *Philosophy in the flesh. The embodied mind and its challenge to western thought*, New York NY 1999, 30–36; Peter Gärdenfors, *Hur Homo blev sapiens. Om tänkandets evolution*, Nora 2000, 48; David Dunér, *Världsmaskinen. Emanuel Swedenborgs naturfilosofi*, Nora 2004, 27–30.
5 Polhem 1729, 14.
6 David Dunér, ”Polhems huvudvärk”, *Sjuttonhundratal* 2005, 5–12; David Dunér, ”Daedalus flykt”, *Polhem. Teknikhistorisk årsbok* 2005, 100–118.
7 Abbott Payson Usher, *A history of mechanical inventions*, Cambridge MA 1954; Vernon Ruttan, ”Usher and Schumpeter on invention, innovation and technological change”, i Nathan Rosenberg (red.), *The economics of technological change*, Harmondsworth 1971, 77 ff.; Bjørn Ivar Berg, *Gruveteknikk ved Kongsberg Sølvverk 1623–1914*, Kongsberg 1994, 42.
8 Christopher Polhem, ”Afskrift af Chr. Polhammars bref 1696 till Bergs Collegium ang. hans utländska resa och förslag till inrättandet af ett mekaniskt laboratorium”, KB, X 265:1, 1–3.
9 Polhem, X 265:1, 5.
10 Polhem, X 265:1, 8.
11 Polhem 1729, 75–77; Samuel E. Bring, ”Bidrag till Christopher Polhems lefnadsteckning”, *Christopher Polhem*, red. S. E. Bring, Stockholm 1911, 165; Michael Lindgren, ”Christopher Polhem. En 1700-talsvisionär”, *Polhem* 1989:1, 44–59; Michael Lindgren, ”Den Kongliga Modellkammaren – en trädimensionell upplevelse”, *Polhem* 1992:4a, 360–372; David Dunér, ”Språket i universum. Polhem och alfabetskonsten”, *Lychnos* 2007, 154–157.
12 Sten Lindroth, ”Urban Hiärne och Laboratorium chymicum”, *Lychnos* 1946–47, 69.
13 Sten Lindroth, *Gruvbrytning och kopparhantering vid Stora Kopparberget intill 1800-talets början* I, Uppsala 1955, 90.
14 Buschenfelt till Bergskollegium, 7/12 1701. RA, Bergskollegiums arkiv, Inkomna brev och suppliker, huvudserien.
15 Boel Berner, ”Experiment, teknikhistoria och ingenjörens födelse”, *Daedalus* 1982, 46, 48; Svante Lindqvist, *Technology on trial. The introduction of steam power technology into Sweden, 1715–1736*, Uppsala 1984, 67–74; Boel Berner, *Perpetuum Mobile? Teknikens utmaningar och historiens gång*, Lund 1999, 61–63.
16 Cit. i Sten Lindroth, *Christopher Polhem och Stora Kopparberget. Ett bidrag till bergsmekanikens historia*, Uppsala 1951, 83.
17 Göran Vallerius, ”Kårtt och ungefärlig relation med des derhoos tillhörige rijtningar, angående de fyra af Hr. Directeuren Påhlhammar Inventerade och af Hr. Markschei-

Vet soc inlaga 2009 4.indd 31 09-08-31 14.59.42

dern Buschenfelt förfärdigade mekaniske machiner med des experimenter och bijfogade tabeller. Hwilcka af bemelte Hr. Markscheider jemte mig undertecknad och flere äro genomgångne, och sedan efter Inventoris egen disposition och underrättelse på följande sätt deducerade af Giöran Vallerius Haraldson A:o 1705", KTH, MS Pf-38.

18 Polhem till Göran Vallerius, Stjärnsund 12/11 1710. *Christopher Polhems brev*, utg. A. Liljencrantz, Uppsala 1941–46, 38; Friedrich Neumeyer, "Christopher Polhem och hydrodynamiken", *Arkiv för matematik, astronomi och fysik* 28A:15, Stockholm 1942, 10.

19 Christopher Polhem, "Fortsättning om Theoriens ock Practiquens sammanlämpning i Mechaniquen", *KVAH* 1742, 157; se även Christopher Polhem, "Theoriens och practiquens sammanfogning i mechaniquen, och särdeles i ström-wärk", *KVAH* 1741; anon., "Recension af Herr Elvii Mathematiska Tractat om Watndrifter", *KVAH* 1742; Pehr Elvius d.y., "Theorien om vatten-drifter jämförd med försök", *KVAH* 1743.

20 Emanuel Swedenborg (red.), *Dædalus Hyperboreus: eller några nya mathematiska och physicaliska försök och anmerkningar: som wälborne herr assessor Polhammar och andre sinrike i Swerige hafwa giordt och nu tijd efter annan til almen nytta lemna* I–VI, Uppsala & Skara 1716–18; faks., Nils C. Dunér (utg.), *Kungliga vetenskaps societetens i Upsala tvåhundraårsminne*, Uppsala 1910; Emanuel Swedenborg, *Ludus Heliconius and other Latin poems*, utg. & övers. H. Helander, Uppsala 1995, 134 f.; Publius Ovidius Naso, *Metamorphoseon*; utg. F. J. Miller, *Metamorphoses* I–II, Cambridge MA & London 1984, 8.162–235; Dunér 2004, 237–241.

21 *Dædalus Hyperboreus* IV, 82; *Polhems brev*, 123.

22 Emanuel Swedenborg, "Ett experiment eller prof hwar med skepsbygnaden kan befordras", *Dædalus Hyperboreus* VI, 8; jfr Emanuel Swedenborg, "Modus mechanice explorandi virtutes et qualitates diversi generis et constructionis navigiorum", *Opera quædam aut inedita aut obsoleta de rebus naturalibus* III, utg. A. H. Stroh, Stockholm 1911, 222–224; Neumeyer 1942, 1 f., 16; Sten Lindroth, *Svensk lärdomshistoria. Frihetstiden*, 2:a uppl., Stockholm 1989, 118, 120; Berner 1999, 63 f.

23 Gilbert Sheldon, "Om centro gravitatis uti et Skep, ock om des fördelachtigare ställe, i anseende till skeppets fart", *KVAH* 1742, 81–92.

24 RA, Bergskollegiums arkiv, Brev och suppliker, 1725, vol. I, EIV:169, fol. 272 f.; RA, Bergskollegiums arkiv, Huvudarkivet, Protokoll 1725, AI:71, 136–140 (15/2 1725); *Opera* I, 233.

25 Bring 1911, 33; Arvid Bæckström, "Kongl. Modellkammaren", *Daedalus* 1959, 61; Lindgren 1992, 364; Anna Ekman, *Polhems pedagogiska trämodeller. Historien om modellsamlingen, dess förvaring och konservering vid Tekniska museet i Stockholm*, Göteborg 2005.

26 Jonas Norberg, *Inventarium öfver de mashiner och modeller, som finnas vid Kungl. Modell-Kammaren i Stockholm, belägen uti gamla Kongshuset på K. Riddareholmen*, Stockholm 1779; "Förteckning på de uti herr Commercie Rådet Polhems Laboratorio Mechanico sedan åhr 1739 förfärdigade machiner, författad i anledning af herr Commercie Rådetz til Manufactur Contoiret ingifne Specificationer" (avskrift), KB, I. p. 23:2.

27 Johann Beckmann, *Schwedische Reise nach dem Tagebuch der Jahre 1765–1766*, Lengwil 1995, 130 f.

28 Francisco de Miranda, *Archivo del general Miranda* III, Caracas 1929, 40 f.; övers. Stig Rydén, *Miranda i Sverige och Norge 1787. General Francisco de Mirandas dagbok från hans resa september–december 1787*, Stockholm 1950, 132, 198 f., 264.

29 Lewis Mumford, *Technics and civilization*, New York NY 1934; övers., *Teknik och civilisation*, Göteborg 1984, 282.

Vet soc inlaga 2009 4.indd 32 09-08-31 14.59.42

30 Herman Sundholm, ”Polhem som konstmästare”, i Bring 1911, 173.
31 Axel Liljencrantz, ”Polhem och grundandet av Sveriges första naturvetenskapliga samfund jämte andra anteckningar rörande Collegium Curiosorum” I, *Lychnos* 1939, 300 f., n. 7.
32 Christopher Polhem, ”Frågor om tryckvärk att föra vattnet up i högden”, *Christopher Polhems efterlämnade skrifter* I, utg. H. Sandblad, Uppsala 1947, 364.
33 Agostino Ramelli, *Schatzkammer, mechanischer Künste, …*, [Leipzig] 1620, pärmens insida, slutet av boken, SUB; Olov Amelin, *Medaljens baksida. Instrumentmakaren Daniel Ekström och hans efterföljare i 1700-talets Sverige*, Uppsala 1999, 101 f.
34 David Dunér, ”Bubblor, kanonkulor och en tunna ärtor. Polhem och Swedenborg om materiens struktur”, *Polhem. Tidskrift för teknikhistoria* 2000/2001, 6–14.
35 Christopher Polhem, ”Berättelse om Fahlu grufvas tillstånd”, i Polhem 1947, 40.
36 Eugene S. Ferguson, ”The mind’s eye. Nonverbal thought in technology”, *Science* 197:4306, 1977, 828.

Vet soc inlaga 2009 4.indd 33 09-08-31 14.59.42