Experiment, teknikhistoria och ingenjörens födelse

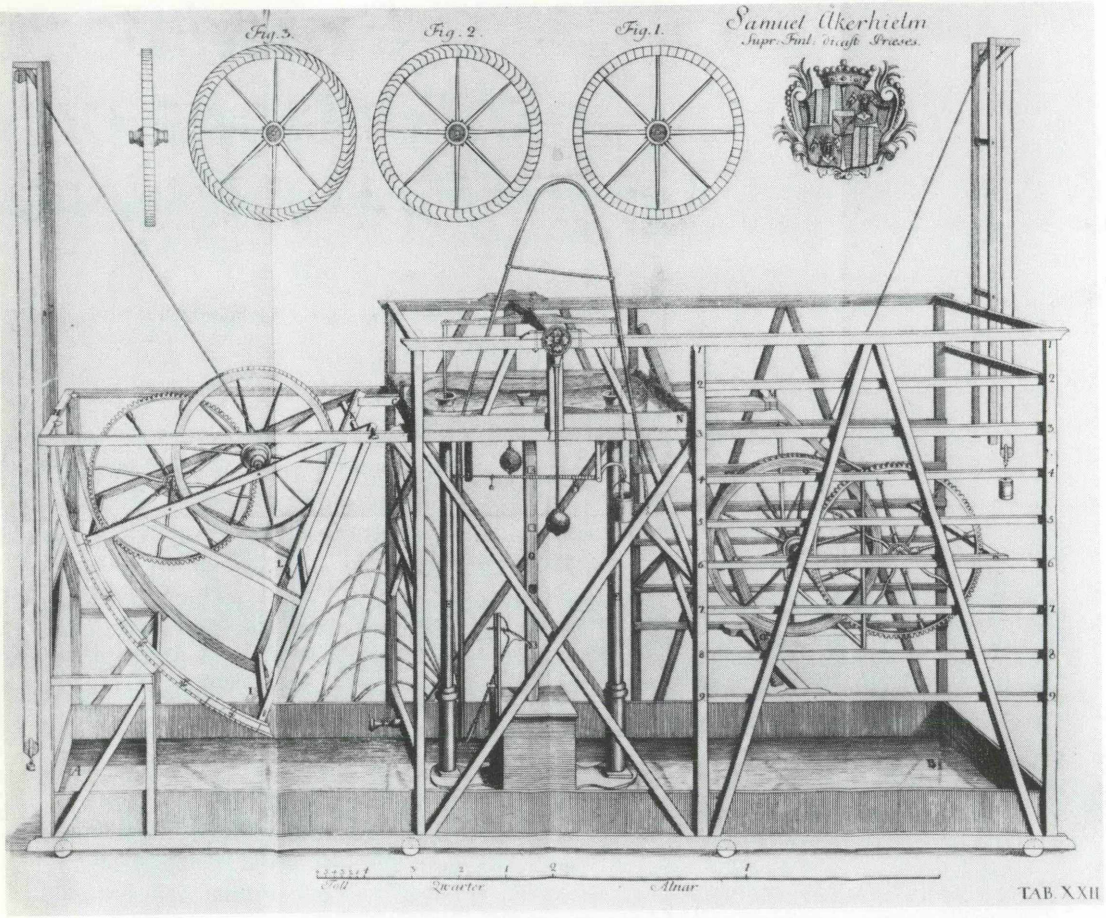
Av Boel Berner

> "Det wärsta som lärer yppas i deras Ektenskap, är, at hon, nemligen Theorien wil wara alt för granlaga och noga räknad i alt sit wäsende; men praxis deremot alt för owålig och slummeraktig, så att detta lärer åstadkomma mycken strid dem emellan . . .; men med tiden lärer dock umgänget och wanan så förena dem, at Oeconomien blir wäl betient." (1740)
>
> Jag vill "denna gången gå all theori förbij, som och elliest fodra en större wijdlyfftigheet, och i det steller skrijda till blåtta *experimentet* som huar och en i gemen best kan finna sig uthi, och wåra sinnen ej så läteligen bedraga kuna". (1712)

Orden är Christopher Polhems, tiden är början av 1700-talet och citaten visar att en ny epok inletts i naturvetenskapens och teknikens historia. Bara teori räckte ej för att nå vetenskapliga framsteg; den måste kombineras med experiment. Också inom tekniken började de gamla "på måfå"-metoderna att långsamt ersättas med experiment och systematiseringar. Experimentets inträde inom tekniken har gett oss snabba och oanade tekniska förändringar. Det har också möjliggjort en massproduktion av teknikens "bärare", av ingenjörer och tekniker i tekniska skolor av olika slag. Experimentets genombrott i teknikhistorien är därför också den moderne ingenjörens födelse, en utveckling som här skall tecknas i korta drag.

Varför experiment?

Frågan kan synas självklar för oss som är förtrogna med den s k vetenskapliga arbetsmetoden; bruket att under kontrollerade betingelser påverka naturen och noggrant iaktta och helst också kvantifiera resultaten. Men experimentets historia inom vetenskapen är relativt kort och dess betydelse för teknikens utveckling än mer avgränsad i tid och rum. Kombinationen av teoretiskt tänkande och empiriska undersökningar kom egentligen först vid den europeiska medeltidens slut. Då uppstod en ny syn på människans plats i naturen. Aktivt ingripande i och kontroll av naturkrafterna blev ett accepterat sätt att tjäna gud och föra mänskligheten framåt.



1. Den anordning som Christopher Polhem använde i början av 1700-talet för att prova effekten hos olika typer av vattenhjul. Hans resultat var dock föga tillförlitliga, då han inte insåg att förhållandet mellan vad modellförsöken gav och de resultat man skulle få vid försök med vattenhjul och maskiner i full skala är betydligt mer komplicerat än vad man skulle kunna tro. Det blev i stället engelsmannen John Smeaton som på 1750-talet utförde de första mer tillförlitliga undersökningarna av olika vattenhjuls effekt. Ur Mårten Triewald, Föreläsningar vid Riddarhuset i Stockholm över nya naturkunnigheten ... 1736.

Teknisk förändring hade fram till dess skett på grundval av människornas praktiska erfarenhet. Kunskap om material, metoder och bruksföremålens utformning byggde på ögats och handens skicklighet. Ny teknik uppkom långsamt, genom modifiering av sekelgammal praktik och på grundval av snilleblixtar, slump eller ''trial-and-error''försök.

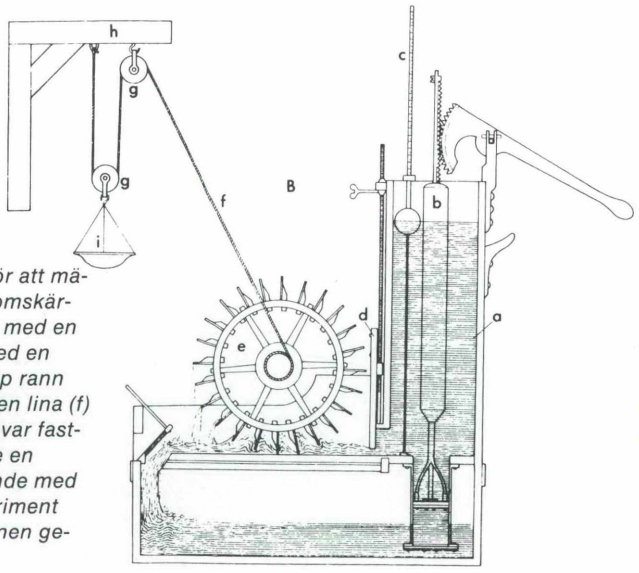
Från generation till generation överfördes kunskapen genom lärlingsskap eller deltagande i de dagliga sysslorna på gården eller i verkstaden. Kunskapens principer var ej öppet uttryckta eller sammanfattade i skriftlig form och därför ej möjliga att lära ut i en rent intellektuell lärprocess.

Individen och kunskapen var nära kopplade till varandra. I medeltidens skråväsende uttrycktes denna uppfattning i tanken om kunskap som privategendom, bunden till individer inom ett kollektiv. Olika yrken uppfattades som "mysterier" i vilka endast de yrkesmässigt invigda fick tränga in. Att avslöja hemligheterna för utomstående eller söka konkurrera ut sina yrkesbröder med nya metoder eller produkter betraktades då som förkastligt. "Ingen skall uttänka eller uppfinna något nytt, ej heller bruka eller använda något sådant, utan var och en skall av borgerlig och broderlig kärlek följa efter sin nästa", hette det i en svensk medeltida skråförordning.

Nya värderingar

Det medeltida skråväsendet började dock luckras upp under trycket av en växande kapitalism. Nya värderingar uppstod. Individuell driftighet, uppfinningsrikedom och framgång blev viktigare än traditionen bakåt och solidariteten inom skråt. Välkända innovationer från denna tid är papper, krut, kompass, tryckpress. Dessa uppfinningar gjordes av hantverkare på basis av erfarenhet och observationer, men utan teoretiska insikter.

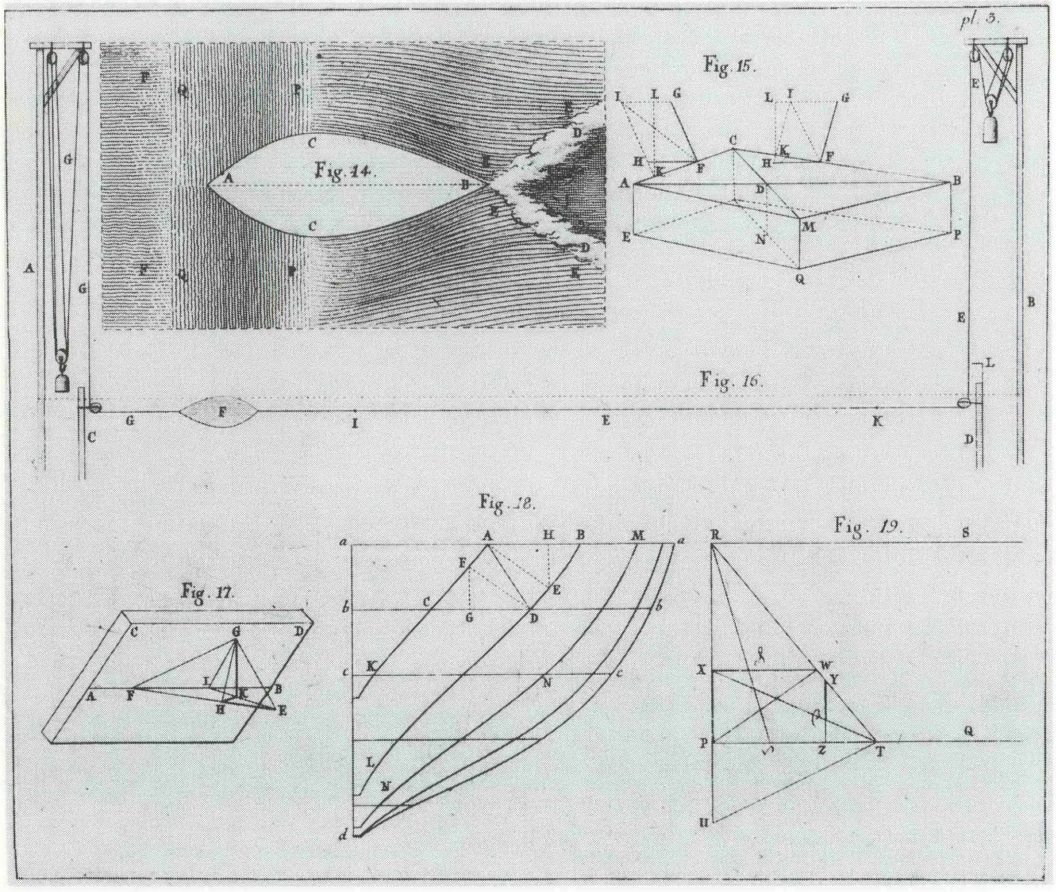
Gradvis uppstod dock, fr a i Italien, en grupp av skickliga och även teoretiskt intresserade handens arbetare: arkitekter, instrumentmakare, kirurger och andra, med viss kunskap i mekanik, optik, kemi, anatomi. De experimenterade, dissekerade och mätte. De använde kvantitativa tumregler. I sin vilja att aktivt ingripa i naturen, ställa frågor till den via experiment, skilde de sig från sina hantverkskollegor och deras mer passiva observationer. I viljan att skriva ner och systematisera sina resultat och göra kunskapen offentlig skilde de sig även från skråmästarnas hemlighetsmakeri. De var föregångare till de moderna, experimenterande vetenskapsmännen.

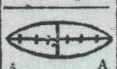
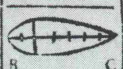
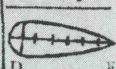
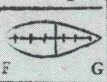


2. John Smeatons modell till en anordning för att mäta effekten hos underfallshjul visas här i genomskärning. Vatten pumpades upp i en behållare (a) med en kolvpump (b). I behållaren fanns en flottör med en graderad stång (c). När en lucka (d) drogs upp rann vattnet ut mot vattenhjulet (e), runt vars axel en lina (f) var lindad. Linan löpte över två block (g) och var fastgjord i en bjälke (h). I det ena blocket hängde en vågskål (i), som belastades. Anordningen kunde med mindre förändringar även användas för experiment med överfallshjul. Ur Sigvard Strandh, Maskinen genom tiderna, 1979.

Dessa skickliga hantverkare och tidiga ingenjörer uppnådde stora framgångar. De konstruerade kanaler, uppfordringsverk för gruvor, slussar, mätinstrument, gevär. Men deras experiment var ännu osystematiska, framstegen en samling briljanta men isolerade upptäckter. Detta gäller även för en så framgångsrik person som Leonardo da Vinci.

3. Ur F H af Chapmans 'Tractat om Skeppsbyggeriet' 1775 visas här illustrationerna till kap 4 'Om det motstånd som Skeppet i dess framfart lider af vattnet'. I figur 14 visas hur vågbildningen kring ett litet fartyg är fördelat i olika områden. Figur 16 visar af Chapmans försöksränna för motståndsförsök. Den var ca 30 m lång. Försöksmodellen F drogs av en vikt vid linan E:s ända fram genom vattnet. Vid linan G:s ända fanns en lättare vikt, som skulle utjämna modellens slingerrörelser under framdragandet (retarderande vikten). Modellens hastighet mättes när punkterna K och J på linan passerat ett märke. Modellerna var av trä, fyllda med bly så att de knappt kunde flyta, samt 70 cm långa, runda och maximalt 20 cm breda.



Kroppens Vigt		N:o 1	N:o 2		N:o 3		N:o 4		N:o 5		N:o 6		N:o 7	
		27 ſkålp:d	27 ſkålp:d		27 ſkålp:d		22 ſkålp:d		19¾ ſkålp:d		16¾ ſkålp:d		12 ſkålp:d	
Kropparnes Skepnad		 A	 C		 E		 G		 I		 P			
Tiden ſom åtgick då Kroppen gick 74 fots diſtance, för alla														
Dragande Vigten	Retarderande Vigten	Secund	Secund.		Secund.		Secund.		Secund.		Secund.		Secund.	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	O	P	R	P
¾ Af Kroppens tyngd	½ Kroppens tyngd	25 ½	26 ¼	24 ¼	27 ¾	26 ½	25 ¾	25 ½	27 ¼	24 ¼	30.	29 ¾	45	29 ½
Hela Kroppens tyngd	½:va Kroppens tyngd	14.	14.	14 ½	14 ½	16 ½	13 ¾	13 ¾	15.	16.	24 ½	24 ¼	38	24
1½ Kroppens tyngd	½ Kroppens tyngd	11	10 ½	11 ½	10 ½	13 ½	11	11	10 ¼	11 ½	12 ½	17 ½	30 ¾	19 ¼
37 ſkålp:d för alla	12 ⅓ ſkålp:d för alla	12 ½	Förlorades och ſjönk til bottnen.		11	14	10 ¾	11	10	11 ¼	12	16	—	—

4. Chapmans redovisning av motståndsförsöken med 7 olika kroppar, som släpades först med den ena, sedan den andra ändan främst, och med olika dragvikter. Varje försök gjordes 6 gånger och medelvärdet beräknades. Chapman fann bl a att vid låg fart går kroppen fortare med spetsiga ändan främst, vid större fart lika åt båda hållen, men vid hög fart fortare med trubbiga ändan först. Ur F H af Chapman, Tractat om Skepps-byggeriet 1775.

Naturvetenskapens uppkomst

De två källorna till kunskap om världen var länge åtskilda. Teoretisk skolning – fr a i retorik och teologiska resonemang – var förbehållen en överklass vid universiteten och hoven. Experiment och observation var de lägre klassernas, hantverkarnas, arbetsmetod. Först vid 1500-talets mitt började vissa lärde intressera sig för de ekonomiskt och militärt viktiga praktiska konsterna. Lärda verk skrevs om geografiska upptäckter, navigation, gruvdrift, lantmäteri. Och i början av nästa århundrade förenades det teoretiska intresset med ett praktiskt experimentarbete av personer som William Gilbert, Francis Bacon och Galileo Galilei. De hade akademisk skolning men också nära kontakter med instrumentmakare och ingenjörer. Gilbert inledde den experimentella fysiken med sitt verk *De Magnete* från 1600. Galileis vetenskapliga betydelse är välkänd; han studerade också pumpars funktionssätt, floders reglering och militär teknologi i vad som var världens kanske första tekniska laboratorium. Francis Bacon, slutligen, står som den store ideologen bakom tanken om mänskliga framsteg som ett resultat av systematiskt vetenskapligt experimentarbete.

Den experimenterande, kvantitativa naturvetenskap som nu uppstod gjorde stora, om än ojämna, framsteg under tiden före 1700-talets industriella revolution. Främst astronomi och mekanik utvecklades. Men ve-

tenskapens framgångar var i hög grad begreppsliga och matematiska och till föga nytta för de praktiska problem som t ex dåtidens skepps- och maskinbyggare stod inför. Deras arbete grundade sig långt efter 1600-talets vetenskapliga revolution på en kombination av manuell händighet, tumregler och tradition. Ingenjörer och hantverkare var anmärkningsvärt blinda för matematikens nytta. Endast sällan hade de en utbildning som gjorde det möjligt för dem att formulera sina problem på ett sätt som en matematiker eller fysiker kunde förstå. Än mindre kunde de själva begagna matematiska metoder i ett eget experimentarbete.

Men efter hand blev experimentet nödvändigt också för teknikens utveckling. Teoretiskt skolade praktiska män som Polhem och af Chapman i Sverige började systematiskt experimentera med maskiner och fartygsmodeller. Under 1700- och fr a 1800-talet började framtagningen av teknisk kunskap likna de naturvetenskapliga experimenten. Det är också nu som teoretiskt skolade ingenjörer börjar ersätta hantverkare och mästermän. Experimenten möjliggör ingenjören – som i sin tur ger experimenten en betydelse de inte har inom naturvetenskapen. Experimentets särart inom tekniken framträder bäst om vi nu gör en liten utvikning, som samtidigt belyser de viktiga skillnader som trots allt finns mellan naturvetenskap och teknik.

Två skilda verksamhetsområden

Vetenskapsmännen lever i en miljö där man vill veta hur naturen (eller samhället) *är* och där man söker komma fram till teorier som förklarar olika fenomen djupare och sannare än tidigare teorier. Målet är ökad kunskap och endast indirekt, om alls, praktisk nytta. Vetenskapsmännen handlar – dvs experimenterar – för att nå kunskap.

Teknikerna däremot söker kunskap, t ex genom experiment, för att kunna handla. De lever i en miljö där målet är att skapa produkter och prcesser som fungerar optimalt enligt på förhand givna önskemål. Kunskapen behövs för att finna ut vad som *bör göras* för att åstadkomma, förhindra eller förändra händelser på ett på förhand bestämt sätt. Kunskapen är alltid relaterad till konkreta problem eller uppgifter. Medan vetenskapsmannen söker efter generella lagbundenheter och testar hypoteser, söker teknikern komma fram till mer begränsade, men användbara *regler* och *normer* för hur han skall bete sig, samt tillämpa dem i sin praktiska verksamhet.

Syftet bakom arbetet skiljer sig alltså åt, vilket ger olika *arbetssätt* och olika syn på vad som utgör ett naturvetenskapligt respektive ett tekniskt *resultat.*

Arbetssätt

När teknikerna börjar experimentera är deras intresse från början begränsat till de delproblem som erfarenheten (eller uppdragsgivaren) sagt dem är väsentliga. Dessa delproblem är inte bara "rent" tekniska: militära, miljömässiga och fr a ekonomiska hänsyn måste också tas. I naturvetenskapen är antalet delproblem ej så strikt avgränsade från början. Inte

heller får utomvetenskapliga hänsyn avgöra hur man förklarar naturfenomen och lagbundenheter i naturen.

Det tekniska arbetet är på så vis mer "låst" och detaljspecificerat. De personer som skall förbättra eller förnya tekniken kan inte heller lämna den givna uppgiften och gå över till något lättare när de stöter på svårigheter. Inom naturvetenskapen är det fullt legitimt och möjligt för en forskare att om han inte lyckas lösa problem A, övergå till problem B och medan man studerar det plötsligt komma på en lösning till program C. Inom tekniken skall man komma på en lösning på problem A och inget annat. Tids- och kostnadspress innebär att teknikerna antingen måste lösa svårigheten på ett eller annat approximativt sätt – eller riskera stora förluster i tid och pengar.

Samtidigt är teknikerna ofta i den situationen att det varken finns användbar praktiskt kunskap eller teorier som kan ge svar på problemen. Även om det finns teoretiska modeller som beskriver de processer som är inblandade (t ex termodynamiska processer) är det mycket möjligt att ekvationerna antingen är olösbara eller så komplicerade när alla faktorer i verkligheten skall tas med i beräkningen att de är praktiskt oanvändbara.

Inom tekniskt arbete kan man, av finansiella, militära eller sociala skäl, i regel inte vänta tills en användbar vetenskaplig teori dyker upp. Inte heller kan man idag experimentera "på måfå" som medeltidens hantverkare. Man *måste* helt enkelt komma fram till en lösning på det aktuella problemet inom snäva tids- och resursramar. Här blir det systematiska experimentet speciellt viktigt och användbart. Metodens funktion inom tekniken är – litet tillspetsat – att befria produktionen från ett beroende av vetenskaper som ännu inte utvecklats tillräckligt för att kunna vara till hjälp.

Resultatets karaktär

Inom naturvetenskapen räcker det med att ge en lösning för ett idealiserat modellfall. Detta symboliserar den "rena" naturen; att verkligheten är mer komplicerad behöver naturvetaren ej direkt bry sig om. Den tekniska lösningen däremot måste ta hänsyn till dessa komplicerande faktorer i verkligheten. Bara när en installation eller en produkt har kunnat framställas och fungerar som tänkt kan vi tala om en lösning. Detta behöver inte innebära att alla aspekter är teoretiskt klarlagda (eller ens att tekniken baseras på en sann teori om verkligheten). Inte heller att alla enskilda delar av ett tekniskt system fungerar optimalt. Optimering är ändå en av de viktigaste komponenterna i ingenjörsarbetet – "ett etos, ett livssätt" som en ingenjör uttryckte det – som påverkar experiment och lösningar. Inom ramen för sociala och ekonomiska begränsningar skall tekniken fungera så effektivt som möjligt. Ändras ramen – genom oljekriser, attitydförändringar eller politiska beslut – kan det som var god teknik igår, plötsligt vara inaktuella eller dåliga lösningar idag. Några *sådana* omvärderingar drabbar inte naturvetenskapens resultat.

Det tekniska arbetet systematiserat

Låt oss nu återgå till teknikhistorien och till den period då det tekniska experimentarbetets två viktigaste drag börjar framträda. Det rör sig om systematisk parametervariation och användning av skalmodeller.

Systematisk parametervariation

Redan de grekiska katapultkonstruktörerna lär ha experimenterat genom att hålla en variabel konstant medan de varierade andra, iakttog och kanske även kvantifierade resultaten. Också konstruktörerna av kastmaskiner och kanoner från medeltiden och framåt lär ha arbetat på samma sätt. Men verkligt viktig och vidareutvecklad blev metoden först när ekonomiska intressen sällade sig till de militära för att få fram en mer lönsam teknologi.

Ett ovanligt tydligt exempel på tidig och ekonomiskt motiverad parametervariation är Christopher Polhems försök med en hydrodynamisk maskin i början av 1700-talet. Försöken utfördes av två assistenter (Samuel Buschenfelt och Göran Vallerius) efter Polhems anvisningar. De ägde rum vid det då nyinrättade *Laboratorium mechanicum* vid Stora Kopparberg.

Den vattenmaskin som Buschenfelt konstruerade efter Polhems anvisningar var en originell och märklig skapelse av trä och metall. Maskinen var så gjord att man kunde variera vattenhjulens läge, skovlarnas form och det strömmande vattnets tillförsel, hastighet och angreppspunkt. Alla de olika vattenfallsanläggningar som då fanns i bruk kunde därmed imiteras och deras effektivitet uppmätas. På så vis skulle man kunna utröna det bästa sättet att inrätta vattenhjul, något som kunde bli av stor praktisk betydelse för stångjärnshammare, kvarnar och andra vattendrivna anläggningar i stormaktstidens Sverige.

Polhems stora betydelse är att han sökte göra sig fri från rena spekulationer om vad som var den effektivaste vattendriften och i stället systematiskt pröva och mäta sig fram till ett optimum. Han var inte helt utan föregångare på området; vi kan hänvisa till fransmannen Edme Mariottes försök några årtionden tidigare att experimentellt bestämma vatten- och vindkraftens verkan vid kvarndrift.

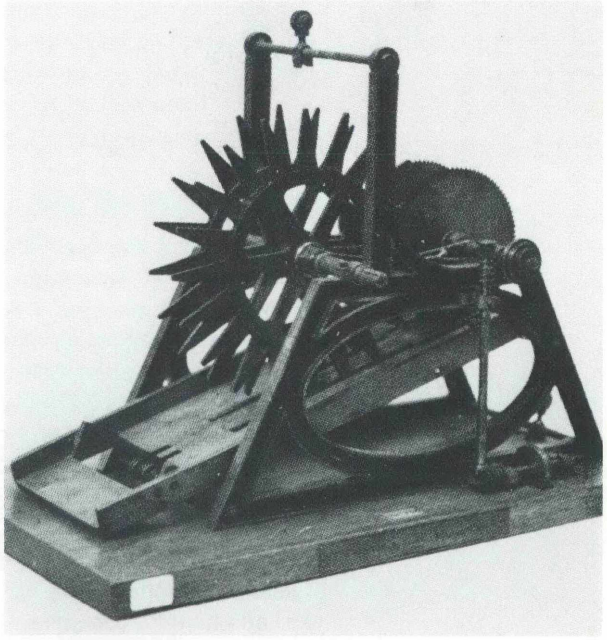
Vad Buschenfelt kallade de "wijdlyfftige och knåpsamme" proven innebar 20–30 000 mätningar, som redovisades i en berättelse, sedermera avtryckt i Mårten Triewalds Riddarhusföreläsningar. Polhem underlät tills vidare att behandla ämnet teoretiskt. Han ville finna den bästa lösningen på vissa rent praktiska problem, fr a dem som gällde hans reformer av uppfordringsverken vid Stora Kopparbergs gruva i Falun. Senare kom han dock att se mer kritiskt på försöken. De hade utförts felaktigt, resultaten var värdelösa och arbetet med vattenmaskinen ungefär "så nyttigt som 5:te Juhlet i vagnen". Han medgav dock att själva den experimentella metoden var värd all uppmärksamhet.

Polhems försök vidareutvecklades av hans lärjungar. Internationellt var de dock okända. Engelsmannen John Smeatons vattenhjulsförsök på 1750-talet brukar därför lyftas fram som ett av de tidigaste exemplen på systematisk parametervariation. Smeaton använde också denna metod för att förbättra Newcomens ångmaskin. "Han varierade därvid systema-

tiskt en komponent, medan han höll de andra konstanta och iakttog effekten, därefter upprepades proceduren för den ena komponenten efter den andra och på så sätt erhöll han den optimala totala effekten", sammanfattar den engelske historikern D S L Cardwell. På ett liknande sätt arbetade ungefär samtidigt den svenske amiralen och skeppsbyggmästaren F H af Chapman. Han sökte skapa klara regler för skeppsbyggeriet som skulle bygga på erfarenhet, matematik och systematiska experiment. I sina modellförsök (mer om dessa nedan) valde han sina modeller så att en storlek alltid hölls konstant – t ex huvudspantens storlek eller läge, modellängden eller tvärsnittsarean. På så vis sökte han isolera de olika invecklade faktorerna inom läran om vattenmotståndet och förklara deras inflytande på varandra. Detta systematiska, kontrollerande arbetssätt saknades hos Chapmans föregångare inom den experimentella hydrodynamiken.

"Ingenjörstänkandets" utveckling

Systematisk parametervariation förflyttades efter hand från de enstaka pionjärernas laboratorier och modellrännor till de praktiskt verkande ingenjörernas verkstäder. Metoden används för att ge praktiskt användbara konstruktionsdata, när man inte vet varför något fungerar på ett visst vis eller kan förutsäga resultatet med hjälp av en kvantitativ teori. Man får en approximativ lösning som dock är praktiskt användbar. Metoden har legat bakom många viktiga innovationer under 1800- och 1900-talet. Wilbur och Orville Wright använde den för att få användbara vingdata till sina flygmaskiner. Frederick Winslow Taylors ("taylorismens" upphovsman) försök med skärhastigheter under åren 1880 till 1906 byggde på samma principer. Hur han bar sig åt framkommer i Otto Bauers bok *Rationalisering – felrationalisering*, en skildring som väl illustrerar över-



5. Modell av kapsåg med automatisk inmatning. Elevarbete 1848 vid Chalmerska Slöjdskolan i Göteborg, utfört av C I Leffler, S Schive, A R Sundberg. Ur Dag W Scharp, Chalma Mater, 1967.

gången från tidigare personbundna, erfarenhetsbaserade produktionsmetoder till ett mer anonymt ingenjörsarbete, byggt på regler och experiment.

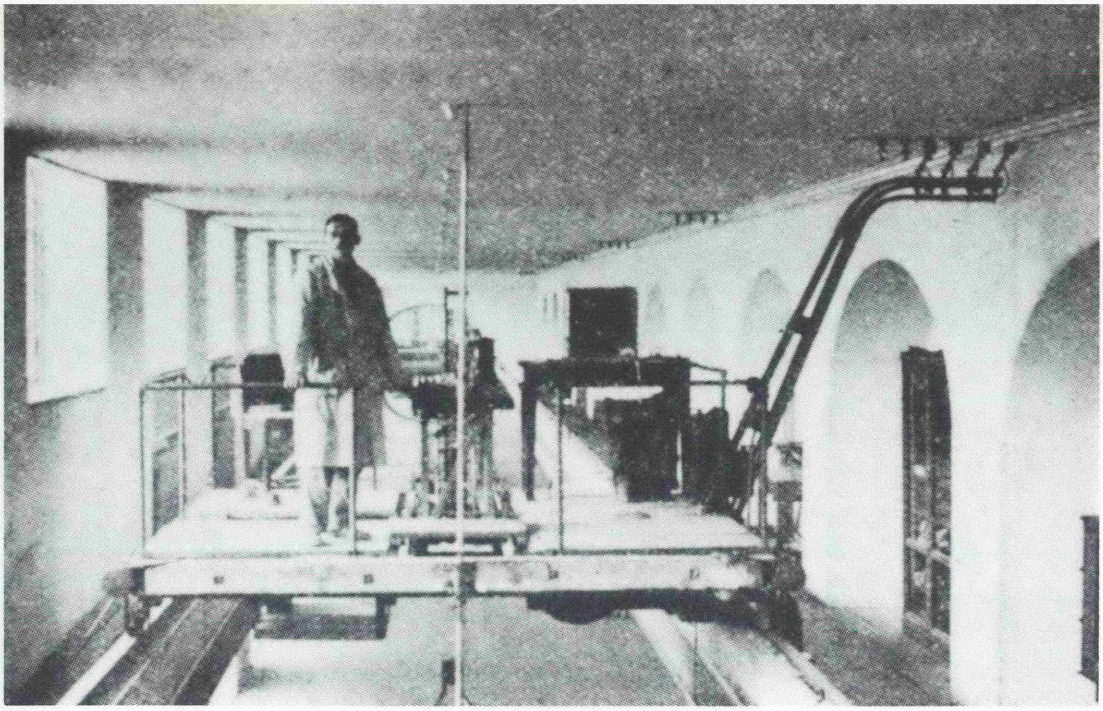
> "/Taylor/ började nu att planmässigt studera arbetarnas prestationer vid svarvstolarna. Den hastighet, varmed ett arbete kan utföras vid svarvstolen beror: 1) av det bearbetade styckets rotationshastighet, 2) av matningen, dvs av den fortskridande rörelsen hos verktyget, 3) av avskärningens tjocklek. Före Taylors undersökningar överlämnade man åt arbetarens skicklighet och individuella erfarenhet att bestämma rotationshastighet och matningstakt. Taylor åter använde de metoder för naturvetenskaplig forskning, varmed han som ingenjör var förtrogen, för att kvantitativt fastställa prestationens beroende av rotationshastighet och matning. Under genom årtionden fullföljda försök kunde han slå fast, vilken skärhastighet som allt efter valet av rotationstid och matning kunde uppnås med material av olika art och arbetsuppgifter av olika beskaffenhet. På grundvalen av resultatet av dessa försök kunde han och hans lärjungar i *ekvationer* uttrycka *lagarna* för skärhastigheten."

Taylors experiment hade varit omöjliga utan de skickliga, ofta teoretiskt oskolade, verktygsmakarnas verksamhet. Viktiga faktorer i tillverkningen kunde nu – med hjälp av nya, precisa skärverktyg och exakta mätinstrument – varieras på ett exakt och förutsägbart sätt och deras funktionssätt kvantifieras. Taylors "ingenjörsmässiga tänkande" (som Bauer kallade det) ledde till att kunskapen om "den bästa" arbetsmetoden förflyttades från verkstadsgolvet till ritkontor och planeringsavdelningar. Arbetarens kunskap gjordes överflödig. Samtidigt med ingenjören föddes den oskolade specialarbetaren, vars arbete bestämdes uppifrån. Bauer igen:

> "... Man har på grundval av dessa ekvationer utarbetat *tabeller* och konstruerat *räknestickor* som gör det möjligt även för den matematiskt oskolade arbetaren att för den ifrågavarande uppgiften bestämma resultaten. Matning och rotationshastighet bestäms sålunda icke längre på grundval av arbetarens individuella, instinktiva erfarenheter, utan på grundval av vetenskapliga, genom systematiska experiment vunna, i ekvationer vunna insikter ..."

Systematisk parametervariation bygger på att man redan vet vilka parametrar som är de väsentliga. Metoden lämpar sig bäst för gradvisa förbättringar, s k "piecemeal engineering" – något som trots allt är det vanligaste i det tekniska arbetet.

Jag skall ge ett sista, och ovanligt tydligt exempel på hur systematisk parametervariation använts i industriell teknisk verksamhet. Svenska Kullagerfabriken, SKF, fick strax efter första världskriget en beställning på nya rullager för Statens Järnvägars behov. Dessa rullager skulle tåla den hårda belastningen från järnvägsvagnarna och skenskarvarnas stötar. Existerande kul- och rullager slets snabbt ner och de teorier som fanns på området – Hertz' på 1880-talet framlagda elasticitetsteorier – var oanvändbara för beräkning av materialpåkänningar, hållfasthet och bärförmåga hos de önskade lagren.



6. Den hydrometriska rännan vid KTHs vattenbyggnadslaboratorium i början av 1920-talet. Rännan var ca 56 m lång, 3 m bred och 1,5 m djup och försedd med en löpvagn. Rännan användes, som på bilden, även av skeppsbyggnadsavdelningen för fartygsmodellförsök. Ur W Fellenius, Vattenbyggnadslaboratoriets vid Kungl Tekniska Högskolan utveckling . . . 1922.

Den teoretiska luckan fylldes inte förrän långt senare. Vid det akuta tillfället beslöt man att detaljanalysera problemet och systematiskt pröva sig fram. Ur dessa experiment med olika kombinationer och parallellmöjligheter uppstod det sfäriska radialrullagret. Det genomgick sina första praktiska prov vid SJ åren 1919–20 och SJ accepterade det 1923.

Mer än tjugo år senare publicerade Arvid Palmgren och Gustav Lundberg vid SKF en beräkningsformel för lagerlivslängden hos rullager – en formel som enligt Jan Hults minnesteckning över Palmgren ''får plats på baksidan av ett frimärke''. Teorin grundades på Hertz' och Palmgrens vetenskapliga studier och på en stor mängd provningsdata. Nu kunde konstruktörer över hela världen konstruera rullager med betydligt större bärförmåga och livslängd än tidigare.

Användning av skalmodeller

Systematisk parametervariation kombineras ofta med användning av *fysiska skalmodeller.* Vi är här mest intresserade av *arbetande* skalmodeller som är gjorda för att fungera på samma sätt som prototypen. De skiljer sig från de statiska skalmodeller som t ex arkitekter använder för att åskådliggöra rumsliga relationer.

Också här var Christopher Polhem en pionjär. Han var emellertid del av en bredare strömning under 1700-talet. Polhems mekaniska alfabet, Chapmans fartygsminiatyrer, Bergsskolans och Bergskollegii modeller

av maskiner, tröskverk, pumpar spred på ett handfast sätt kunskap till det praktiska livets män. Upplysning och nytta var lösenorden. Traditionen fördes vidare inom 1800-talets tekniska skolor, medan universiteten i romantikens anda ägnade sig åt filosofiskt och estetiskt spekulerande långt från den praktiska verkligheten.

Skalmodeller används inom teknologin för att spara kostnader och undvika misstag. Ofta är ju tekniken så unik och storskalig (skepp, telefonväxlar, värmeverk) att det är svårt att göra experiment i full skala. Före af Chapmans och hans utländska kollegors vattenränneförsök på 1770-talet byggdes fartygen efter "tycke, vana eller handlag" som Chapman uttryckte det. Skeppsbyggarnas kunskap om fartygslinjernas konstruktion byggde på tumregler och trial-and-error. Endast genom provresor kunde man få reda på fartygens egenskaper. Proven utföll ofta så att man delvis måste bygga om skeppen efter resan – om de alls kom hem! Dessa "experiment" i full skala blev dyrbara och förde endast långsamt utvecklingen framåt. Förändringar skedde osystematiskt och deras effekter kunde inte alltid förutses. Som Chapman skrev i *Tractat om Skeppsbyggeriet* 1775:

> "Det plägar så tillgå uti Skepps-byggnad, at man bjuder til den ena gången efter den andra, hvar och en efter den insigt han äger, at förbättra Skeppens Skapnad: nemligen, då man bygdt et Skepp, och sedan det blifvit försökt och befunnit äga en eller annan elak qualitet, har man vid byggnaden af et annat, efter bästa begrep så ändrat skapnaden, at det icke skulle få et dylikt fel; men det som oftast, eller nästan merendels icke bättre lyckats, än at det nya Skeppet därigenom fått et annat fel; ja, det har äfven händt, at det senare Skeppet fått samma fel i högre grad, än det förra Skeppet; och man har icke med visshet vetat om dessa fel härrörde utaf Skeppets Skapnad, eller af någon annan obekant omständighet."

Dessa problem blev akuta i den nya expansiva, industriella eran. Handelns män och statsmakten, fr a militären, krävde allt fler fartyg och nya, oprövade skeppstyper. Chapman satte sig före att med hjälp av omfattande sammanställningar av existerande fartygs fel och förtjänster, matematiska resonemang och modellförsök i vattenränna sätta skeppsbyggeriet på en mer rationell grund. Han ville komma fram till fasta regler och kontrollkalkyler som var så enkla att även en matematiskt oskolad och praktiskt oerfaren byggare skulle kunna göra en lyckad fartygskonstruktion. Chapmans tidiga släpförsök omnämndes i Tractaten. Tjugo år senare – på 1790-talet – tog han som pensionär men på K. Maj:ts bekostnad upp nya modellförsök i en tankanläggning på sin egendom Skärva utanför Karlskrona. Efter tre månaders experimenterande trodde han sig ha funnit rätta formen för en skeppskropp, där särskilt akterskeppts linjer var väsentliga. Med hjälp av vad han kallade "relaxationsmetoden" skulle nu ett skepp kunna formas på ett sätt som gav högsta värde i "välsegling", när längd, bredd, djup och deplacement var förutbestämda. Flera fartyg sjösattes också beräknade efter denna metod. Men resultaten var en besvikelse. Chapmans systematiska modellförsök är dock, tillsammans med Polhems, viktiga som pionjärgärningar i Sverige.

Den senare utvecklingen

Ett problem med användning av skalmodeller är hur experimentdata skall kunna översättas till den fullskaliga produktionen. Nya komplicerande faktorer tillkommer. Behovet av att kunna justera för skaleffekter är uppenbart i alla flödesprocesser – i samband med vattenhjul, propellrar, värmeverk osv. Här har sedan 1800-talets slut utvecklats likformighetslagar som anger när och under vilka förutsättningar en modell kan förväntas bete sig som en större anläggning. De ger hållpunkter för hur modellmätningarnas resultat skall kunna överföras till en prototyp eller till full skala. Engelsmannen William Froudes teorier inledde därför en ny epok inom modellbyggandet. Under hans ledning byggdes 1870 den första, systematiskt anordnade modellrännan av det Brittiska Amiralitetet. Vattenbyggnadslaboratorier med modellrännor infördes efter hand också i teknisk undervisning, med början 1898 i Dresden.

I Sverige kom de första systematiska vattenbyggnadsförsöken först 1912, i samband med Göta kanals ombyggnad. Då gjordes också omfattande försök med modellslussar för att finna ut de lämpligaste sätten att fylla och tömma de nya slussarna. Så småningom – och efter en hel del finansiella bekymmer – invigdes 1917 ett vattenbyggnadstekniskt laboratorium vid KTH. Vid Chalmers byggdes en modellränna för fartygsförsök strax före andra världskriget.

Modellförsök har således en lång om än sporadisk tradition. Sin stora betydelse har de fått först när matematiken har kunnat komma till hjälp, och stat och företag ansett sådan teknisk forskning vara värd kostnaderna. Detta skedde i de flesta industriländer först kring sekelskiftet 1900. Inom materieforskning, kemisk processteknik, konstruktion av telenät osv ”visualiseras” flöden och strukturer med hjälp av modeller. I vindtunnlar utprovas propellrar och vingmodeller – ett arbete som i Sverige inleddes vid Thulins aeroplanfabrik i Landskrona kring första världskriget. Dagens mer avancerade experiment sker dock främst i statliga laboratorier och högskolor.

Statiska modeller

Jag vill även säga några ord om *statiska* modeller, dock ej av arkitektarbetets typ. *Ritningar* är ett kommunikationsmedel mellan konstruktion och tillverkning. Men de kan också ses som modeller, på vilka man företar experiment. ”En maskin som har ritats är som ett idealiskt förverkligande av densamma, men i ett material som kostar litet och som är lättare att hantera än järn och stål”, skrev den tyske professorn F Redtenbacher 1852, skaparen av ”vetenskaplig maskinkonstruktion”. Objekten kan bedömas och modifieras innan de s a s finns till i verkligheten och i full skala, och till avsevärt billigare pris.

Jonas Hesselman – en av dieselmotorns skapare och en av de få svenska ingenjörer som beskrivit sin arbetsprocess – underströk i boken *Teknik och tanke* vikten av *tankeexperiment* inom tekniken. Ingenjören kunde i detalj tänka igenom och beräkna hur en konstruktion skulle kunna fungera under både normala och abnorma förhållanden. Effekten blev, skrev han ”som om den vunnits genom direkt iakttagelse men har den fördelen att den är ojämförligt mycket billigare”.

Härmed har vi kommit fram till tanken om den *teoretiska* modellen. Att verkligen bygga arbetande modeller är idag ofta mycket dyrt. Det kan bli

nödvändigt att variera många parametrar och göra en mängd försök. Också tillverkningskostnader för modeller och prototyper stiger i höjden med dagens komplicerade teknik.

I stället kan man med datorns hjälp simulera de situationer som tidigare studerats med hjälp av skalmodeller. Datorn har gjort det möjligt att hantera mer komplexa modeller än tidigare, liksom mycket mer omfattande beräkningar. Kostnaderna minskar och produkterna blir, hävdas det, av högre kvalitet. Men samtidigt försvinner något av den fysiska modellens handfasthet och begriplighet. Det tekniska arbetet sker allt mindre "genom ett språk som av alla kan förstås".

Resultat

De tekniska experimentens resultat är av två slag. Antingen fungerar det som en utprovning här och nu av en installation eller delkonstruktion. Utprovningen ger information som används för att modifiera konstruktionen, nya experiment företas osv, tills önskat funktionssätt uppnås.

Eller också används experimentet för att ge normer för *framtida* arbete inom ett visst teknikområde. Resultaten skall påskynda och förbättra arbetet, också för relativt oerfarna konstruktörer. Taylors försök med skärhastigheter, Chapmans och Polhems experiment, liksom deras efterföljares, var avsedda att basera tekniken på fasta regler. De har gett upphov till empiriska lagar om naturens och teknikens sätt att fungera. Mycken sådan information har sedan 1700-talets slut samlats i formler och handböcker som anger "the one best way" att lösa standardproblem.

Från 1800-talets mitt började den praktiske konstruktören få allt fler av sina kunskaper från sådant tekniskt-experimentellt arbete, snarare än från tradition och erfarenhet. Det blev möjligt att massproducera ingenjörer som kunde *läsa sig* till tekniska regler vid institut och läroverk, och som där också tränades i det "ingenjörsmässiga tänkandet". De flesta teknikers arbete baseras idag just på dessa "färdigheter" som går att träna in, snarare än på snilleblixtar som inte kan det, eller teori som ligger för långt från de praktiska problemen. Utan detta bidrag från de tekniska experimentens sida, skulle tekniken idag inte kunna förändras så snabbt och på så bred front – snillen och avancerade teoretiker är ju trots allt sällsynta, också inom teknikens värld.

Källor

Berner, Boel, *Teknikens värld. Teknisk förändring och ingenjörsarbete i svensk industri,* Lund 1981 (fr a kap 5–6, 9)

Lindroth, Sten, *Christopher Polhem och Stora Kopparberget,* Uppsala 1951

Neumeyer, Friedrich, "Den hydrodynamiska modellprovningen från Mariotte till Chapman" *Skrifter utgivna av Sjöhistoriska samfundet* 11, Uppsala 1941

Neumeyer, Friedrich, "Christopher Polhem och hydrodynamiken" *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik,* Bd 28A n:o 15, 1942

Nilsson, G A, "Aredynamiska laboratoriet" i *Sveriges första flygplansfabrik, Landskrona Museiförenings årsbok,* 1944.

Zilsel, Edgar, "Problems of Empiricism" *International Encyclopedia of Unified Science,* vol 2 no 8, 1941