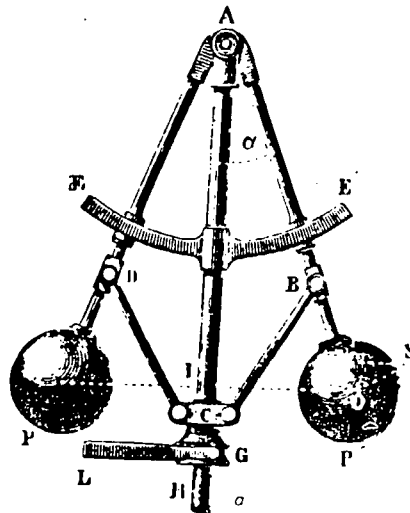


TEKST NR 85

1984

CENTRIFUGALREGULATORER OG MATEMATIK

- et historisk eksempel på samspillet mellem
teknologi og videnskab.



VEJLEDER
STIG ANDUR PEDERSEN

PER HEDEGÅRD ANDERSEN
CARSTEN HOLST-JENSEN
ELSE MARIE PEDERSEN
ERLING MØLLER PEDERSEN

TEKSTER fra

IMFUFA

ROSKILDE UNIVERSITETSCENTER

INSTITUT FOR STUDIET AF MATEMATIK OG FYSIK SAMT DERES
FUNKTIONER I UNDERVISNING, FORSKNING OG ANVENDELSER

CENTRIFUGALREGULATORER OG MATEMATIK

- et historisk eksempel på samspillet mellem teknologi og videnskab.

IMFUFA tekst nr. 85/84

159 sider

ISSN 0106-6242

Projektet undersøger samspillet mellem teknologi og videnskab i en konkret historisk case. Teknologien er udviklingen af centrifugalregulatorerne i sidste århundrede. Disse blev brugt til hastighedsregulering af dampmaskiner. Videnskaben er den matematisk-fysiske beskrivelse af regulatorerne, hvor det nye i matematikken er lineariseringsteknikken og undersøgelse af stabilitetsforhold i et lineært differentiallygningsystem. J.C.Maxwells og I.A.Vyshnegradskiis artikler herom behandles.

Den almindelige opfattelse er, at videnskab og teknologi gik hånd i hånd under industrialiseringen, og projektet viser i hvor høj grad dette gør sig gældende i det konkrete tilfælde.

Udviklingen i England tyder på, at der intet samspil har været, mens udviklingen på kontinentet tyder på et kraftigt samspil. Videnskabsudviklingen de to steder forløber parallelt og uafhængigt af hinanden.

Forklaringerne på det forskellige forhold mellem teknologi og videnskab søges i forskelligheder i uddannelses- og forskningsinstitutioner og forskelligheder i filosofi og videnskabsopfattelser.

Endelig ses de forskellige "årsager" til videnskabens udvikling i forhold til forskellige videnskabsteoretiske forklaringer på videnskabsudviklingen.

INDHOLDSFORTEGNELSE.

INDLEDNING	1
KAPITEL 1. TEKNOLOGI-VIDENSKAB.	
FORSKELLIGE VIDENSKABSTEORETISKE POSITIONER:	4
Indledning	4
Eksternalistiske videnskabsteoretiske positioner	6
Videnskabssociologiske positioner af eksternalistisk tilsnit	10
Internalistiske videnskabsteoretiske positioner	16
Kuhn og den videnskabelige erkendelsesproces	21
Videnskabssociologiske positioner, der hverken er eksternalistiske eller internalistiske	24
KAPITEL 2.	
MAXWELL OG VYSHNEGRADSKII'S ARTIKLER OM REGULATOREN.	31
Nogle reguleringsprincipper	31
Regulatorsteknologiens historiske udvikling	35
Maxwells og Vyshnegradskii's artikler:	45
Indledende bemærkninger om Maxwell og Vyshnegradskii	45
Præsentation af Maxwell	47
Gennemgang af Maxwells artikel	57
Sammenfatning	75
Præsentation af Vyshnegradskii	79
Gennemgang af Vyshnegradskii's artikel	80
Et gennemregnet eksempel - Porters regulator	90
Sammenfatning	103
Sammenligning af de to artikler	104
Kort rids af den videre udvikling af reguleringsteknologi og -teori i England og på kontinentet	110

KAPITEL 3.

VIDENSKABSEKSTERNE FORHOLDS BETYDNING FOR VIDENSKABS- UDVIKLINGEN.	116
Indledning	116
Uddannelsesinstitutionerne i England og på kontinentet	117
Det tyske uddannelsessystem	117
Det engelske uddannelsessystem	121
Sammenligning mellem det engelske og tyske uddannel- sessystem	128
Videnskabsopfattelser i England i midten af det 19. århundrede	132
To opfattelser af videnskabens formål og funktion: Siemens og Maxwell	132
Den sociale og intellektuelle baggrund	137
 KONKLUSION	 144
 Bilag til gennemgangen af Maxwells artikel (gennemregninger)	 148
Litteraturliste	154

INDLEDNING.

Det forrige projekt, som gruppen lavede, handlede om hvorledes man kunne og burde benytte anvendt matematik i gymnasieundervisningen, for at gøre faget mere virkelighedsnært og umiddelbart relevant for eleverne. Det var nemlig et gennemgående træk i elevernes vurdering af faget, at de mente, det var for abstrakt, og at man ikke kunne se, hvad man skulle bruge det til. Det viste sig imidlertid, at der ikke eksisterede særlig meget tilgængeligt materiale om matematikkens anvendelser, som man umiddelbart kunne bruge i undervisningen, og at forholdet mellem matematik og samfund i øvrigt er så uigennemskueligt, at matematikkens samfundsmæssige funktion og betydning er vanskelig at formidle til eleverne. Vi erkendte, at der hvor matematikken virkelig har en betydning, er indenfor teknologiudvikling. Vi besluttede følgelig at lave et projekt om matematik og teknologi i håbet om herigennem bedre at kunne gennemskue matematikkens samfundsmæssige betydning.

Det område vi valgte var styringssystemer, fordi vi havde hørt, at matematik spillede en væsentlig rolle indefor dette område, og fordi vi mente, at styringssystemer blev brugt på mange niveauer i samfundet.

Den røde tråd i projektet er således samspillet mellem teknologi og videnskab - matematik - , og vi har indkredset undersøgelsen til følgende problemstilling:

Hvorledes påvirker matematikken teknologien og dermed samfundet? og hvorledes påvirker samfundet - via teknologien - matematikken? Ud fra denne synsvinkel ønskede vi at finde et eksempel, der kunne belyse problemstillingen omkring matematik og samfund.

Det var vores "dåseåbner" til emnet, men undervejs kom vi - naturligvis - til at diskutere bredere om, hvad der generelt var drivkraft for matematikkens og videnskabens udvikling.

Vi havde hørt, at sidste halvdel af det 19. århundrede var en periode, der netop var karakteriseret ved et nært og frugtbart samspil mellem naturvidenskab og teknologi. Vi mente derfor, det ville være en velegnet periode at vælge, til at finde eksempler på matematikkens samfundsmæssige betydning.

Da vores vejleder var løbet ind i en artikel af J.C. Maxwell, som af Norbert Wiener var blevet udnævnt til at være en af den moderne kontrolteori (kybernetikkens) grundlæggende skrifter, lå projektet lige for: Med udgangspunkt i denne historiske case om centrifugalregulatorens udvikling og den videnskabelige beskrivelse af den, ville vi konkret undersøge samspillet mellem matematik og samfund. De elementer, der umiddelbart gjorde artiklen velegnet til at belyse vores problemstilling var, 1) at den var skrevet i 1868, perioden hvor samspillet mellem videnskab og teknologi efter sigende skulle være stort, 2) ved at være en af kybernetikkens grundpiller havde den også indirekte betydning i dag, 3) det var en matematisk behandling af et teknologisk emne - regulatorer, som i samtiden spillede en stor rolle i industrien.

Vores idé var altså at tage udgangspunkt i Maxwells artikel og på denne baggrund trække tråde til henholdsvis teknologi og matematik i almindelighed. Under vores arbejde med at forstå Maxwell løb vi ind i en russer, Vyshnegradskii, som i samme periode - og tilsyneladende uafhængigt af Maxwell - havde behandlet det samme emne og var nået frem til tilsvarende matematiske resultater. Det var påfaldende, og vi tænkte, at vi ved at gå i dybden med disse to parallelle arbejder, der var blevet til i to vidt forskellige videnskabelige miljøer - Maxwell var videnskabsmand, Vyshnegradskii var rektor for et ingeniørakademi - kunne afdække nogle centrale faktorer i samspillet mellem teknologi og videnskab. De to artikler om regulatorer, publiceret henholdsvis af Royal Society og i et tysk ingeniørtidsskrift, blev således kroppen i vores projekt.

Disposition.

Projektet fik følgende form:

I første kapitel undersøger vi forskellige videnskabsteoretikeres vurdering af, hvad der betinger videnskabens udvikling med særlig henblik på deres vurdering af forholdet mellem videnskab og teknologi, og i hvilken grad det er eksterne eller interne faktorer, der bringer den videnskabelige udvikling fremad.

Andet kapitel opridser først regulatorteknologiens og teoriens udvikling frem til den periode, hvor de to artikler produceres, dels for at give baggrunden for tilblivelsen af de to artikler, og dels for at kunne vurdere, hvilken placering artiklerne får i denne udvikling.

Dernæst gennemgås de to artikler, og matematikudviklingen og dens samspil med teknologiudviklingen beskrives. Samtidig har afsnittet det pædagogiske formål, at det kan levere tilgængelige eksempler på, hvorledes matematikken kan beskrive fysiske fænomener.

Endelig slutter kapitlet med et kort historisk rids af, hvad der videre skete med matematikken og regulatorteknologien, for på denne baggrund at kunne vurdere artiklernes matematiske og teknologiske betydning.

Tredje kapitel prøver at indkredse nogle af de faktorer, der har betydning for videnskabsudviklingen og samspillet mellem teknologi og videnskab. Første del handler om uddannelseinstitutionerne i England og på kontinentet, mens anden del handler om filosofiens og ideologiens indflydelse på videnskabsudviklingen.

Endelig afsluttes projektet med en konklusion.

På denne baggrund håber vi at kunne sige noget om forholdet mellem teknologi og matematik, og om, hvad der betinger udviklingen af matematik og videnskab.

KAPITEL 1.

TEKNOLOGI-VIDENSKAB.

FORSKELLIGE VIDENSKABSTEORETISKE POSITIONER.

Indledning.

Projektet omhandler samspillet mellem teknologi og videnskab i et konkret historisk tilfælde, og vi har valgt centrifugalregulatorens udvikling i det 19. århundrede som eksempel på teknologiudvikling, og den matematisk-fysiske beskrivelse af regulatoren og dens stabilitetsforhold som eksempel på videnskabsudvikling.

For at få en fornemmelse af samspillet karakter og hvilke forklaringer, der kan være på udviklingen af videnskab og teknologi, har vi tyet til videnskabshistorien. Her ser vi på forskellige bud på samspillet generelt og ser nærmere på, hvad videnskabshistorikerne mener specielt om udviklingen i det 19. århundrede.

Herigennem håber vi at finde forskellige angrebsvinkler til vores historiske undersøgelse og forskellige mulige forklaringer på videnskabs- og teknologiudvikling. En nærmere analyse af den konkrete udvikling skulle så vise, hvad der i vores tilfælde forklarer udviklingen og samspillet bedst.

Med andre ord - for at tale i en på instituttet kendt metafor - stilles kanonerne op i dette afsnit, og den konkrete analyse vil så vise, om der bliver skudt andet end døde gråspurve.

En afgrænsning.

Undersøgelsen kommer til at koncentrere sig om samspillet mellem teknologi og videnskab og i anden række om videnskabsudviklingen. Vi vil se på teknologiens rolle for videnskabsudviklingen, men også på andre faktorerers betydning, da teknologiudviklingen ikke umiddelbart forekommer os at være en tilstrækkelig forklaring. Det er derfor, vi er tyet til videnskabshistorien. Hvad angår teknologiudviklingen

vil vi kun se på den betydning videnskaben har herfor. Vi vil altså ikke grave i teknologihistorien og finde frem til forklaringer på teknologiens udvikling. Årsagen hertil er - ud over den rent pragmatiske: at arbejdet bliver for omfattende - at teknologiens sammenhæng med samfundets økonomiske og sociale udvikling er forholdsvis nem at frem-analysere - hvilket også sker i rigt mål netop i disse år -, mens videnskabens forbindelse med teknologien og dermed med samfundets økonomiske og sociale udvikling straks er sværere at få hold på.

Begreberne videnskab og teknologi.

Videnskab og teknologi defineres på mange måder, hvilket har betydning for den måde samspillet skildres på. Især begrebet videnskabsbaseret teknologi får tillagt forskellige betydninger alt efter definitionerne.

Otto Mayr - hvis navn vil dukke hyppigt op, da han er en af dem, der har beskæftiget sig mest med centrifugalregulatoren og reguleringens historie - mener endda i en mindre artikel "The science-technology relation", at det ikke er muligt at definere videnskab og teknologi i forhold til hinanden.

De to begreber refererer til fænomener på mange forskellige niveauer (f.eks. viden, aktiviteter, mål og motivation, uddannelse, institutioner mv.) og afgrænsningerne på de forskellige niveauer er arbitrære. Derfor mener han, at begreberne ikke kan adskilles:

"It is becoming clear, then, that practically usable criterion for making sharp and neat distinctions between science and technology simply does not exist."
(s.159)

Hans konklusion bliver, at nutidige forsøg på at skildre forholdet mellem videnskab og teknologi oftest bliver meget ideologisk prægede, og at en rigtigere vej er, historiske analyser af debatterne om videnskab og teknologi. Det der er vigtigt er, hvordan man i tidligere historiske perioder har opfattet begreberne.

"His (historikerens) task, in other words, would be not to discover what the science-technology relationship actually has been in history but what previous eras and cultures have thought it to be." (s.162)

Mayrs opfattelse er meget præget af en hermeneutisk historieopfattelse, som først og fremmest Dilthey står som eksponent for, hvor metoden til at sætte sig ind i historien er en intuitiv indfølt tolkning af historien på historiens egne præmisser. Mayr - som andre hermeneutikere - løber derfor ind i den modsigelse, at de selv i forvejen er udstyret med begreber og et sprog, der er nutidigt bestemt, ved hjælp af hvilket de bliver nødt til at forstå fortiden. Den kan ikke forstås umiddelbart på dens egne præmisser.

Vi mener derfor, at vi må have defineret begreberne teknologi og videnskab, og at vi må have nogle ideer om, hvorledes samspillet mellem dem kan foregå, før vi kaster os ud i den historiske analyse.

Forskellige videnskabsteoretiske positioner.

Da den historiske analyse ikke springer ud af historien af sig selv, vil vi i dette afsnit se på forskellige definitioner af begreberne videnskab og teknologi og på forskellige skildringer af samspillet samt på forskellige forklaringer på videnskabsudviklingen.

Eksternalistiske videnskabsteoretiske positioner.

Debatten om årsagerne til videnskabens udvikling har ofte drejet sig om, hvorvidt interne eller eksterne forhold har været de væsentligste for udviklingen.

Et bud på videnskabs og teknologis udvikling findes hos de klassiske eksternalister. Deres udgangspunkt er den historiske materialisme, som den er fortolket først og fremmest i Sovjetunionen før 2. verdenskrig. Denne noget håndfaste historiske materialisme, som i en vis udstrækning kan tilskrives de kanoniserede opfattelser under Stalin, er der senere gjort op med til dels i Sovjetunionen, men især

blandt marxister i Vesteuropa.

Derfor har denne position i sig selv kun historisk interesse, men den gav anledning til en del nytænkning, især om videnskab og teknologis samfundsmæssige rolle, da den kom frem. De klassiske eksternalisme blev lanceret på en videnskabshistorisk kongres i London i 1931. Det var den russisk delegation og især Boris Hessen, der oprørte sine med det efterhånden berømte indlæg om Newton. På trods af det meget firkantede og unuancerede historie- og videnskabssyn, fik det sovjetiske indlæg betydning for senere fremtrædende videnskabshistorikere som Bernal og Merton.

Den mest fremtrædende repræsentant for den klassiske eksternalisme er J.D.Bernal, hvis hovedværk "Science in History", 1954 her vil være grundlag for behandling. Værket har været en stor publikumssucces med 5 udgaver i England, 3 i USA, og værket er oversat til omkring 14 sprog (Ravetz 1972 1, s.394). Vi tager selv udgangspunkt i den norske udgave "Vitenskabens historie", 1978, der er en oversættelse af 4. udgave (1969) af "Science in History".

Grunden til bogens succes er dens evne til tilsyneladende at give overblik og sammenhæng i den historiske udvikling, og dens evne til at anbringe teknologien og videnskaben i sammenhæng med samfundets økonomiske og sociale udvikling. Det er en global syntetiserende historie, og den står der ved i modsætning til mange tidligere videnskabshistoriske skrifter, der oftest er meget begrænsede i perspektiv.

Desuden er den velskrevet, og giver mange forklaringer, der især sætter teknologiudviklingen i perspektiv. Som et eksempel på en sådan perspektivering nævnes f.eks. i forbindelse med kabellægningen over Atlanten i 1865/66 det politisk/økonomisk vigtige i at sammenknytte Wall Street i New York med City i London. (Bernal 1978, bd.2, s.553).

vi vil imidlertid her se nærmere på, hvorledes Bernal beskriver sammenhængen mellem teknologi og videnskab, og hvorledes han forklarer videnskabsudviklingen.

Målet med bogen er for Bernal at afdække forholdet mellem udviklingen i den intellektuelle udformning af videnskaben, de tekniske forandringer i industrien og kapitalismens økonomiske og politiske herredømme. Det er just ikke noget beskedent mål at sætte sig, hvilket Bernal er klar over:

"Forholdet mellom dem er likevel på ingen måte lett å avdekke." (Bernal 1978, bd2.,s.509)

Omkring forholdet mellem teknik og videnskab er målet at vise, hvorledes videnskaben bidrager til de tekniske og økonomiske forandringer og vise, hvorledes disse forandringer indvirker på videnskabens vækst og karakter.

I Bernals behandling af udviklingen i det 19. århundrede er det især teknikens udnyttelse af de videnskabelige resultater, der lægges vægt på. Det konstateres, at videnskaben blev en hovedfaktor, når det galt om at sætte gang i den tekniske udvikling (bd.2,s.511), og videnskaben bliver ved indgangen til det 19. århundrede karakteriseret som et af hovedelementerne i menneskenes produktivkræfter (bd.2,s.548). Den praktiske brug af videnskaben betones kraftigt i beskrivelsen af udviklingen i det 19. århundrede (f.eks. bd.2,s.552,554,561,565,566,567,572), og det konkluderes til sidst, at industrien og den økonomiske udvikling påvirkes kraftigt af videnskaben og dens anvendelser.

Hvorledes de økonomiske og sociale forhold og teknologien påvirker videnskaben, er der imidlertid ikke gjort så meget ud af. Den stigende videnskabelige aktivitet er der givet en forklaring på. Der er i denne fase af kapitalismens udvikling en stadig stigende mængde kapital til disposition, som kan financiere det tekniske og videnskabelige fremskridt. Da det er industrien, der har pengene, bliver videnskaben styret over i områder, hvor industrien har behov for praktiske løsninger. Vi får altså en økonomisk forklaring på videnskabens vækst og til dels dens retning, men økonomiske, sociale eller teknologiske forklaringer på videnskabens karakter gives kun vagt.

Som et eksempel kan nævnes, at det nye kapitalistiske samfund - ifølge Bernal - ideologisk var lagt an på frihed og det frie initiativ, hvilket krævede en ny type ideer til at beskrive og retfærdiggøre dette samfund. Disse ideer fandtes i stor udstrækning i metoderne og resultaterne i de nye videnskaber, idet

.. "de (videnskaberne) på sin side ubevisst ble sterkt påvirket av herskende sociale oppfatninger i utformningen av sine teorier." (bd.2, s.511).

Det bliver imidlertid ikke nærmere fulgt op, hvorledes videnskaben præges af at være ideologisk legitimering for det eksisterende samfund.

Begreberne videnskab og teknologi.

Bernal opfatter sammenhængen mellem videnskab og teknologi som værende meget tæt, og opfatter videnskab som et meget bredt begreb. Videnskaben leverer en lang række anvendelser og teknikker til samfundet og udvikler sig i tæt forbindelse hermed.

Selv om både teknik og videnskab får tildelt et selvstændigt liv, ses de dog mere overordnet - eller i lidt længere tidsperspektiv - som et symbiotisk par, hvor videnskaben stort set er reduceret til en leverandør af teknologi. Derfor gives der ikke i værket egentlige forklaringer på videnskabens udvikling ud over forklaringerne om bedre økonomiske muligheder for videnskabsdyrkelse.

Bernal's værk bibringer derfor ikke så meget nyt til videnskabshistorien, og den norske oversættelse "Videnskabens historie" er lidt af en tilsnigelse i forhold til den originale titel "Science in History", der lover knap så meget.

Kritik af Bernal's videnskabshistorie.

J.R.Ravetz - som kan placeres inden for en New Left sociologisk tradition - har en mere overordnet kritik af Bernal's værk i sin artikel "Bernal's Marxist Vision of History".

Han mener bl.a., at Bernal's forklaringsramme er utilstrækkelig, fordi Bernal negligerer de politiske aspekter til fordel for de økonomiske. Bernal ser f.eks. ikke statens

rolle for videnskabsudviklingen, og dermed heller ikke hvorledes videnskabens institutionalisering kan have betydning. Ravetz kritiserer ligeledes Bernals teknologioptimisme, og mener han ser bort fra videnskabens anvendelse indenfor f.eks. krigsteknologi og teknikker til at udnytte primærprodukter i kolonierne. Årsagerne til disse mangler ser Ravetz i Bernals historieteoretiske grundlag fra før 2. verdenskrig. Havde Bernal sat sig ind i den marxistiske tænkning efter verdenskrigen kunne resultatet have være blevet anderledes. (Ravetz 1972, s.396-98).

Vores brug af Bernals videnskabshistorie.

Konklusionerne om den klassiske eksternalisme i forhold til vores projekt bliver da - ikke overraskende - at dens begreber om videnskab og teknologi ikke kan bruges og at samspillet mellem teknologi og videnskab ikke er tilstrækkeligt beskrevet og forklaret. Endelig er forklaringerne på videnskabsudviklingen helt utilstrækkelige.

Videnskabssociologiske positioner af eksternalistisk tilsnit.

Hessens indtog på scenen i 1931 inspirerede også videnskabshistorikere, der ikke tilhørte eller tilsluttede sig den historisk materialistiske tradition. En af de vigtige af disse er R.K. Merton, hvis hovedværk "Science, Technology and Society in Seventeenth-Century England" udkom i 1938.

Mertons formål med værket ligner meget Bernals. Han vil vise, hvorledes naturvidenskabens udvikling er afhængig af eksterne samfundsmæssige forhold, men ud over økonomisk tekniske faktorer opererer han - til forskel fra Bernal - med en række socio-kulturelle faktorer og herunder især med religionens betydning for naturvidenskabens udvikling. Mertons metode er til forskel fra Bernals sociologisk, hvorved økonomiske, sociale og kulturelle forhold alle har betydning for samfundets og for naturvidenskabens udvikling. Der er ikke tale om enkle mono-kausale forhold, hvor

årsagsfaktorerne er hierakisk ordnet, som Bernals fremstilling kan bære præg af.

Mertons metode er også empirisk, og hans konklusioner fremsættes på baggrund af omfattende kildemateriale, dels om næsten alle videnskabsmænd i England i århundredet, og dels mødereferater fra Royal Society's møder i udvalgte år.

Merton fremhæver kristendommens udvikling og puritanismens fremvækst som værende af stor betydning for naturvidenskabernes opblomstring i det 17. århundrede. Nyttefilosofien - utilitarismen - går hånd i hånd med protestantismen, og naturvidenskab bliver en legitim og nyttig beskæftigelse. Merton søger også at vise den puritanske etiks betydning ved empirisk at undersøge den religiøse og sociale baggrund for de ledende grundlæggere af Royal Society. Han finder her, at et overvældende flertal af disse mænd var puritanere.

Ud over den puritanske etik og utilitarismen som væsentlige faktorer for naturvidenskabens generelle vækst, undersøger Merton, hvilke områder naturvidenskaben beskæftiger sig med, og hvorledes naturvidenskaben forholder sig til teknologien og samfundets økonomiske behov.

Han undersøger her alle de forskningsprojekter, der har været diskuteret på Royal Societys møder i fire udvalgte år. Projekterne placeres i forhold til følgende kategorier:

Minedrift (f.eks. ventilation, dræning)

Transport og navigation (f.eks. bestemmelse af længdegrad)

Militærteknik (f.eks. ballistik)

Tekstilindustri (f.eks. farvning)

Generel teknologi

"Ren" videnskab

(s.201-02)

Den "rene" videnskab udgør ca. 50% af alle projekterne i perioden, mens de øvrige er direkte eller indirekte afledt af teknologiske problemer. Merton konkluderer, at en stor del af forskningsprogrammerne forsøger at lede forskningen over på områder, der er vigtige for teknologien og økonomien. Eksempelvis nævnes, at ca. 18% af de projekter,

der er diskuteret ved Royal Society's møder i 1686/1687 drejer sig om minedrift og metallurgi.

Sammenhængen mellem teknologi og videnskab er tæt. Med et eksempel om dampmaskinens forhistorie illustrerer Merton samspillet mellem teknologi og videnskab. Den videnskabelige interesse omkring atmosfærisk tryk viser sig samtidig med at atmosfærisk tryk er et umiddelbart praktisk problem, både i forbindelse med dampmaskinens udvikling og i forbindelse med pumpning. I minerne skulle mere og mere vand pumpes væk efterhånden som skakterne blev dybere. Dette sammenfald af videnskabelig og teknisk interesse var ikke tilfældigt og både videnskaben og teknologien havde gensidige fordele af sammenfaldet. (s.152).

Merton hævder, at en vis del af den teoretiske "rene" videnskab direkte eller inddirekte beskæftiger sig med problemer, der er afledt af praktiske problemer. De enkelte videnskabsmænds egen forståelse af deres forsknings placering og formål er her ligegyldigt, idet det er forskerens sociale rolle i samfundet, der analyseres. Merton udtrykker det bedst selv:

"The significant point is that much of scientific research of this period was orientated - not always with deliberate intent on the part of the scientist - toward subjects which were profoundly useful for technical development: subjects which because of the social and economic emphasis of the period came to attention of scientists as worthy of further study." (s.155)

Vi ser her et eksempel på, hvor forsigtigt Merton formulerer sig. Der er stadig plads til forskning, der ikke dirrigeres af tekniske og økonomiske problemer, og til forskning, der følger internt videnskabelige veje.

Vores brug af Merton.

Merton definerer ikke eksplicit begreberne videnskab og teknologi, men han betragter både videnskaben og teknologien som havende et selvstændigt liv, men mener også, at sammenhængen mellem dem for det meste er tæt. Videnskaben udvikler sig tit omkring de problemer, der også giver anledning til praktisk tekniske problemer, og den udvikler

sig ofte samtidig med og i vekselvirkning med den tekniske udvikling.

Mertons historisk konkrete analyse er en nuanceret og begrundet fremstilling af rammerne for videnskabsudviklingen og indeholder en ekstern begrundelse for mange af videnskabens interesseområder. Hans inddragelse af ikke økonomiske, dvs. kulturelle og religiøse forhold, som befordrende for videnskabens udvikling virker overbevisende.

Da hans formål er at afdække eksterne forholds indflydelse, fokuserer han ikke på interne videnskabsforhold. Disses betydning for videnskabsudviklingen behandles ikke, men på den anden side benægtes det ikke, at de kan have en betydning. Hans fortjeneste er det sociologiske perspektiv, hvor videnskabens samfundsmæssige rolle analyseres, og hvor videnskabens "objektive" funktion beskrives adskilt fra videnskabsmændenes egne opfattelser af deres videnskab.

"Scientometri".

En anden videnskabshistoriker, der i en vis forstand ligger i forlængelse af Merton, er D. de Solla Price. Vi tager her udgangspunkt i hans nyeste artikel "The parallel structure of science and technology", 1982, der er en udmærket opsummering og gentagelse af tidligere arbejder.

Price metode er sociologisk, men i forhold til Mertons mere sensitive empiriske tilgang er Price's metode strengt kvantitativ. Alle begreber skal operationaliseres, så de kan danne baggrund for en kvantitativ statistisk analyse. En sådan tilgang kaldes også "scientometri".

Til en sådan analyse kræves håndfaste begreber, og definitionerne af videnskab og teknologi er da også helt eksplícitte. Videnskab er: Det, der er publiceret i videnskabelige artikler/værker. Disse artikler/værker kan så defineres nærmere alt efter formålet med undersøgelsen - jo mere eksklusiv en kreds man ønsker at analysere, jo snævrere bliver kriterierne for, hvad et videnskabeligt værk/artikel er. (Price, 1982, s.167)

Teknologi er den forskning, hvor produktet ikke er "papir", men istedet et produkt, en maskine, kemikalier eller en proces (s.170). Disse definitioner begrundes med, at videnskabsmændenes måde at producere på er at skrive artikler mv. Hele formålet med forskningen er at få den på papir, ligesom produktionen af artikler mv. er en nødvendighed for at gøre karriere. Videnskabsmændene er papyrocentriske, mens teknologer er papyrofobiske, idet tekniske innovationer somregel af konkurrencehensyn ikke skal offentliggøres vidt og bredt. Teknikere skriver derfor ugerne, de læser hellere. (s.169)

Price's hypotese er, at videnskab og teknologi er to parallelle systemer med meget ensartede karakteristika. De har nogenlunde samme eksponentielle vækst og forskningsfronten udvikler sig først og fremmest på baggrund af tidligere resultater indenfor systemet - dvs. videnskaben udvikler sig hovedsagelig af tidligere videnskab og teknologi af tidligere teknologi. Videnskab og teknologi står i et eller andet forhold til hinanden, og teknologi som anvendt videnskab er et for naivt billede.

Videnskab og teknologi interagerer, men interaktionen er svag, idet der er en tidsforskel, således at resultaterne fra forskningsfronten i det ene system først efter nogen tid finder "anvendelse" i det andet system. Forklaringen herpå er, at forskere ved fronten, kun kender til den frontvidenskab i det andet system, der eksisterede, da de selv blev uddannede, hvis de overhovedet kender den.

Price's konklusion bliver:

"We can all agree, however, that there is a considerable lag in the weak interaction between science and technology, and that this is in contrast to the rapidity with which new technology arises directly in strong interaction from old technology and to the similar proces by which old science generates new". (s.172)

Vores brug af Solla Price's videnskabsteori.

Man kan stille spørgsmålstegn ved Price's definitioner, idet det der normalt regnes for teknologisk udvikling in-

denfor de mest dynamiske sektorer af moderne industri - elektronik, kemisk industri, rumfart - her bliver medregnet under videnskab. Skellet mellem teknologi og videnskab bliver ualmindeligt skarpt og forbindelsen mellem dem bliver svagere. Endvidere er det svært at fange imaterielle teknologiske produkter som f.eks. styringsteknologier. Solla Price har ingen bud på, hvorfor videnskaben udvikler sig. Han konstaterer blot, at den fortrinsvis udvikler sig på baggrund af tidligere videnskabelige resultater - altså internt - men også indimellem i vekselvirkning med teknologien.

Price's definitioner og analysetilgang vil vi ikke benytte os af, da vi tror en Merton'sk sociologi vil kunne bringe os længere end en ren kvantitativ analyse efter de Price'ske principper. Muligvis når Price til en rimelig beskrivelse af forholdet mellem teknologi og videnskab - ifølge H.Kragh/S.Andur Pedersen, 1981, 1 s.270-71 - men det forbliver dog blot en beskrivelse, der siger, at videnskab og teknologi udvikler sig relativt selvstændigt, og at de på forskellige tidspunkter kan vekselvirke kraftigt. Nogle har kaldt dette for "fase-teorien", hvor faserne oftest er forskudt, men hvor de en gang imellem falder sammen til stor fordel for udviklingen i begge systemer.

Videnskabssociologi med focus på videnskabsinstitutionerne.

Et andet forsøg på at bruge en Merton'sk tilgang og samtidig en Kuhn'sk - vi vender tilbage til Kuhn i næste afsnit - findes i et speciale fra Århus fra 1983 af Christensen og Thomsen: "Matematik i Tyskland i det 19. århundrede". De forsøger en analyse af den måde videnskaben blev institutionaliseret på for at finde eksternalistiske forklaringer på den matematikudvikling, der fandt sted i Tyskland i det 19. århundrede. Deres tese er - alt for kort og groft gengivet - at de politiske magtforhold, der lå bag den førte uddannelsespolitik og dominerende ideologiske strømninger (nyhumanismen) var årsag til gunstige

muligheder, for at mange kunne dyrke matematik for matematikkens egen skyld. Det skete gennem oprettelse af uddannelser og uddannelsesinstitutioner, hvor matematikfaget i sig selv blev anset for det rette dannelsesfag sammen med klassiske sprog. Dette var en del af baggrunden for den kendte tyske grundlagsforskning i perioden. Specialet er et forsøg på at anvende en Merton'sk metode på videnskabsinstitutionerne, eller at lave en bredere sociologisk analyse af det Kuhn'ske videnskabelige samfund.

De når gennem specialet at sandsynliggøre, at der skabes rammer for en grundlagsforskning i den tyske matematiker-verden, men hvorfor forskningen fik den karakter og det indhold den gjorde, begrundes ikke eksternalistisk.

Specialet omhandler ikke forholdet mellem videnskab og teknologi, men det er et konkret forsøg på at udvide den sociologiske metode til også at omhandle forskningsinstitutionerne, og til at analysere de politiske magtforhold, der ligger bag disse institutioners udvikling. Herigennem kan der yderligere findes eksterne faktorer af betydning for videnskabsudviklingen.

Internalistiske videnskabsteoretiske positioner.

De eksternalistiske positioner har beskæftiget sig med eksterne faktorerers betydning for videnskabens vækst og for hvilke emner og områder, videnskaben rettede sine interesser mod. Vi har imidlertid ikke set nogle forsøg på at forklare den indre videnskabelige udvikling, selve erkendelsesudviklingen, hverken eksternalistisk eller internalistisk. Vi vender os derfor nu mod de internalistiske positioner, for at se på deres bud på forklaringer på den indre videnskabelige udvikling.

Som et eksempel på en rendyrket internalist kan nævnes franskmanden Koyré, der i sin bog - "From the Closed World to the Infinite Universe", 1957, om den videnskabelige revolution i det 17. århundrede - forklarer udviklingen indenfor astronomien, som en ren åndelig proces tæt sammenknyttet til filosofiens og religionens udvikling.

Han nævner ikke andre faktorer, som f.eks. økonomiske og politiske samfundsforhold, som betydende for videnskabens udvikling.

En mere betydende videnskabsteoretiker som også må betegnes som internalist er T.S. Kuhn.

Det vil være for omfattende og ikke særlig hensigtsmæssigt at skrive en længere parafrase over Kuhns teori og om den debat, den medførte. Vi har derfor valgt, at beskrive teoriens hovedpunkter kort - med de risici dette indebærer for forkortninger.

Kuhns teori er fremstillet i bogen "Videnskabens revolutioner", 1973, der dels indeholder 2. udgaven af Kuhns oprindelige værk "The Structure og Scientific Revolution" fra 1962, og dels et efterskrift til 2. udgaven fra 1970, hvor Kuhn søger at uddybe og præcisere forskellige begreber på baggrund af den debat, hans 1. udgave gav anledning til. Vi tager i det følgende udgangspunkt i "Videnskabens revolutioner".

Et af de vigtige begreber hos Kuhn er paradigmebegrebet. Et paradigme betegner et mønster, der kendetegner det videnskabelige arbejde i en periode. Et paradigme indeholder et sammenhængende system af love, teorier og antagelser, samt et sæt af forskningsmetodikker, der er fælles for videnskabsmændene. Dels betegner paradigmet det videnskabelige indhold i teorierne - de fælles værdier, problemstillinger og metodikker - og dels betegner det sociologisk det videnskabelige samfunds fælles opfattelse. Det videnskabelige samfund betegner den gruppe videnskabsmænd, der arbejder under samme paradigme (s.183). Paradigmet omfatter en videnskabsdisciplin, hvor disciplinen er opfattet meget bredt, f.eks. kan den være et mere omfattende teorisystem, hele mekanikken eller elektricitetslæren.

Normalvidenskab er et begreb, der defineres i tæt tilknytning til paradigmet, idet det er den videnskab, der udføres af videnskabsmænd, der har accepteret paradigmet. Normalvidenskabens arbejde er kumulativt, idet forskningen udbygger og forfiner erkendelsen indenfor det område paradigmet afgrænser. Kuhn taler her om "rengøringsarbejde"

(s.59), hvor paradigmet sikrer en dybtgående behandling indenfor det afgrænsede område. Samtidig betragter han de rammer, paradigmet sætter, som begrænsende for udviklingen af nye teorier.

Men der udvikles nye teorier, hvilket videnskabshistorien viser, og nye paradigmer afløser da også eksisterende. Der kan opstå kriser indenfor et paradigme, hvis der ophobes for mange anomalier, dvs. hvis for mange resultater bliver uforklarlige eller modstridende med paradigmets grundlag eller hidtidige resultater. Disse kriser kan have forskellige udgange (s.108). Enten kan normalvidenskab klare problemet, enten ved forskellige ad-hoc løsninger, eller ved at affeje problemet som værende uvæsentligt, eller problemet kan stuves af vejen til senere generationer med bedre redskaber. En tredje mulighed er etableringen af et nyt paradigme, hvor modsigelserne er overvundet. Et nyt paradigme kan godt eksistere side om side med et "gammelt" og kæmpe med det, om at blive antaget. Men diskussionerne dem imellem kan ikke afgøre, hvilket paradigme der er det "rigtige", da de ikke har mange grundliggende fælles præmisser og værdier.(s.116). Kriser, der medfører paradigmeskift, kalder Kuhn videnskabelige revolutioner.

Svagheder i Kuhns teori.

Der er to svagheder i Kuhns fremstilling af paradigmeskift. Ikke alle anomalier bringer paradigmet i krise, og Kuhn gør ikke rede for, hvordan krisefremkaldende uregelmæssigheder adskiller sig fra andre uregelmæssigheder. Kuhn anfører selv, at krisefremkaldende uregelmæssigheder er de, der sætter klare spørgsmålstejn ved eksplicitte og grundliggende generalisationer i paradigmet (s.106). Langt fra alle eksempler i videnskabshistorien er imidlertid af denne art, og af andre typer forklaringer nævner Kuhn bl.a., at hvis et paradigme hindrer nogle anvendelser, der har speciel praktisk betydning, kan dette også være medvirkende til nedbrydning af paradigmet. Vi ser at eksterne forhold - videnskabens anvendelse - her kan spille en rolle.

Den anden svaghed ligger omkring afgørelsen af en paradigme-
mestrid, idet Kuhn skriver, at intet overordnet princip
kan afgøre en sådan strid. Verifikation af et paradigme
kan ikke begrundes med overensstemmelse mellem teori og
kendsgerninger, idet alle historiske teorier har været i
overensstemmelse med kendsgerningerne, men kun mere el-
ler mindre. Ligeledes kan striden ikke afgøres ved bevi-
ser af før omtalte grunde - de manglende fælles præmisser.
(s.159-60).

Men Kuhn skriver, at eksterne forhold kan have betydning
for udfaldet af striden. Det paradigme, der kan løse de
problemer, der er vigtigst at få løst, kan overleve.

Hvilke problemer, der er de vigtigste, kan

"kun besvares ud fra kriterier, der ligger helt uden
for videnskaben, og det er denne tilflugt til ydre
kriterier, der tydeligst gør paradigmediskussionerne
revolutionerende." (s.129)

Et tredje sted, hvor eksterne faktorer tillægges betyd-
ning, er i førparadigmiske perioder, hvor paradigmet eta-
bleres. Her leverer teknologien og naturvidenskaberne
kendsgerningerne, som videnskaben mere tilfældigt udvæl-
ger og tolker på bestemte måder. Dette kan give anledning
til mere sammenhængende teoridannelser, og et paradigme
kan etableres.

Så snart paradigmet imidlertid er etableret og normalvi-
denskaben indstiftet, bliver videnskaben helt afsondret
fra det omgivende samfund. Kuhn udtrykker dette klarest i
en lidt nyere artikel "The History og Science", 1968 trykt
i "The Essential Tension", 1977 :

"Early in the developement of a new field, ... , social
needs and values are a major determinant of the pro-
blems on which the practitioners concentrate." (s.118)

Men så snart paradigmet er etableret:

"The problems om which such specialists work are no
longer presented by the external society but by an
internal challenge to increase the scope and pre-
cision of the fit between existing theory and na-
ture." (s.119).

Vi har placeret Kuhn blandt internalisterne, da eksterne
forhold kun er antydnet og ikke nærmere behandlet i forbin-

delse med paradigmedannelse og -skift. I de normalvidenskabelige perioder udvikler videnskaben sig udelukkende internt, og er afsondret fra det omgivende samfund. Oftest bliver de efterhånden ophobede anomalier beskrevet som interne teoretiske modsigelser, selv om eksterne forhold antydes som værende mulige medvirkende årsager til kriserne for paradigmet. Vi må - sammen med H.Kragh i H.Kragh/S. Andur Pedersen, 1981,2, s.74 - konstatere, at årsagerne til paradigmeskift er utilstrækkeligt forklarede først og fremmest på grund af Kuhns manglende lyst eller evne til at inddrage eksterne faktorer som f.eks. teknologi, økonomi, ideologi, militær mv.

Ligeledes vil vi sætte spørgsmålstegn ved normalvidenskabens isolation fra samfundet og igen tilslutte os H.Kragh, når han skriver:

"Indenfor et grundvidenskabeligt (og p.t. normalvidenskabeligt) felt som faststoffysik er det fx. meget tydeligt, at opgaver, formåen og prioritering i meget høj grad fastlægges af de krav som IBM, Philips, Texas inc. osv. stiller til den videnskabeligt -industrielle udvikling. Disse krav smitter af på hele det faststoffysiske samfunds videnskabelige værdier og standarder, også selv om de involverede fysikere ikke erkender denne styring." (s.73-74).

En eksternalistisk vurdering af Kuhn.

Hvis vi herefter skal se på Kuhns forklaringer på videnskabens udvikling og herunder teknologiens rolle, og hans opfattelse af samspillet mellem teknologi og videnskab, så er der ikke meget at hente for os. Dette hænger i sidste ende sammen med Kuhns definition af videnskab - der ligger helt i forlængelse af den anglo-amerikanske tradition, han tilhører - som Grundvidenskaben og dens store Videnskabsmænd. Det er "Big Science", altså kun en meget snæver og eksklusiv del af den samlede videnskabelige aktivitet, der er under behandling. Den videnskab, der f.eks. udvikles i forbindelse med industri, militær eller ingeniørvirksomhed er udeladt.

Et sådant snævert begreb om videnskab - der stort set fornægter ethvert samspil mellem teknologi og videnskab, og

som næsten udelukkende ser videnskaben internt begrundet - vil vi ikke bruge i vores undersøgelse.

Kuhn og den videnskabelige erkendelsesproces.

Kritikken af Kuhn er imidlertid hidtil set ud fra en eksternalistisk position, hvilket er bestemt af vores eftersøgning af teknikens rolle for videnskabsudviklingen. De tidligere eksternalistiske positioner har mest beskæftiget sig med økonomiske, politiske og ideologiske rammer for videnskabsudviklingen og på samfundets indflydelse på, hvilke forskningsområder der prioriteredes højt. Ingen af disse positioner har fokuseret på selve erkendelsesprocessen, på "spring" i videnskabens teorier og metoder. Det er dette område, Kuhn søger at behandle, og derfor er den eksternalistiske kritik blot en påpegning af utilstrækkeligheden ved Kuhns forklaring på videnskabens udvikling, og ikke en kritik af indholdet i hans undersøgelse af forskningsprocessen. Kuhn siger selv herom i en senere udgivelse (forordet til "The Essential Tension", 1977):

Kuhn kritiseres for at "my account of scientific development is too exclusively based on factors internal to the sciences themselves; ... ; and that I therefore appear to believe that scientific development is immune to the influences of the social economic, religious and philosophical environment in which it occurs. Clearly my book has little to say about such external influences, but it ought not to be read as denying their existence." (s.xv)

Bogen skal læses således, at den udviklede videnskab er mere isoleret - men ikke fuldstændig isoleret - fra sit sociale miljø end andre discipliner som f.eks. ingeniørvirksomhed, medicin, jura og kunst.

"Furthermore, if read in that way, the book may supply some preliminary tools to those who aim to explore the way in which and the avenues through which external influences are made manifest." (s.xv)

Kuhns ærinde er et andet end de eksterne faktorer. Det er selve forskningsprocessen på nært hold, der er genstand for undersøgelsen.

Kuhns beskrivelse af forskningsprocessen fremtræder tydeligst i efterskriften til "Videnskabens revolutioner" fra

1970 og "Second Thought on Paradigms" fra 1974.

Det vigtigste begreb her er den faglige matrix. I den oprindelige "Videnskabens revolutioner" blev et videnskabeligt samfund og et paradigme defineret udelukkende i forhold til hinanden. Kuhn mener nu, at det videnskabelige samfund skal defineres sociologisk, og at det kan afgrænses empirisk.

De elementer, der bevirker, at medlemmerne i et videnskabeligt samfund kan kommunikere uproblematisk og er enige i faglige bedømmelses- og vurderingskriterier mm., defineres nu som elementer i den faglige matrix. Tidligere defineredes de som elementer i et paradigme.

De vigtigste elementer - blandt mange andre - i den faglige matrix er:

1) Symbolske generalisationer.

Er de formelle udsagn om naturen, der er accepteret af de videnskabelige samfund. Det er de udtryk, der tages for givet, de er nærmest naturlove og er at opfatte som tautologiske udsagn.

Grunden til selve navnet er, at generalisationer oftest findes i symbolsk form. Som eksempel nævnes Newtons 2. bevægelseslov ($f=ma$) som en symbolsk generalisation indenfor klassisk mekanik.

2) Modeller.

Er en fælles tro på bestemte modeller både af heuristisk og ontologisk art. Modellerne udstyrer det videnskabelige samfund med foretrukne analogier og metaforer, og er dermed med til at bestemme hvad, der kan accepteres som forklaring på eller løsning af et problem. De er også med til at bestemme relevansen af forskellige problemer. Modellerne i den tidlige bog er beskrevet som de metafysiske paradigmer.

3) Værdier.

Er den fælles opfattelse af, hvilke kriterier, der gælder for at teorier er attraktive og acceptable. Disse kan være om teorier skal kunne forudsige, om

teorisystemer skal være modsigelsesfri eller forenlige med andre teorier. Ligeledes kan det være teoriernes brugbarhed og nyttevirkning, der kan være afgørende for, om de anses for attraktive.

4) Eksempler (forbilleder).

Er de mønstereksempler på problemløsning medlemmerne i det videnskabelige samfund gennemgår i deres uddannelse og praksis i det hele taget. Man kan kalde det reproduktionsmønstret for den normalvidenskabelige problemløsning.

Disse elementer er de vigtigste i den faglige matrix, og ændringer i disse kan medføre ændringer i den videnskabelige opførsel både med hensyn til emnet for forskningen og verifikationspraksis.

Problemløsning.

Den faglige matrix erstatter et af paradigmebegreberne i Kuhns oprindelige bog. I efterskriftet indrømmer Kuhn, at han har anvendt paradigmebegrebet på flere måder, som dog i det store og hele kan reduceres til to. Den ene er den faglige matrix, den anden er det fjerde element i matricen "eksempler".

Forskningen, dvs. problemløsningen foregår ved, at man som grundlag har de symbolske generalisationer og derudover en række konkrete problemløsninger, hvor generalisationerne er i spil gennem en anvendelsesmåde, en eller anden udviklet formalisme. Der findes ikke faste regler for, hvorledes de symbolske generalisationer skal "bruges", man kan ikke deducere sig frem til løsning af nye problemer.

Løsning af disse sker ved, at de betragtes som analoge til tidligere problemer, hvorved tidligere metoder kan bruges. Man udvikler herved en ny egnet formalisme, der kan forklare de nye problemer. Vurderingen af tilladeligheden af de nye formalismer er op til det videnskabelige samfunds bedømmelse.

Denne problemløsning er den, der foregår indenfor nor-

malvidenskaben, og det at designe nye formalismer er ikke det samme som at etablere en ny teori og nye symbolske generalisationer.

Den normalvidenskabelige problemløsningsmetode genfindes i uddannelsen, hvor de studerende stilles overfor forbilledlige problemløsninger, og hvor de i praksis selv skal løse problemer, der er analoge til lærebogens eksempler.

I og med der ikke findes faste regler for problemløsning, er normalvidenskaben også uforudsigelig. Udviklingen af nye versioner af formalismerne giver anledning til forskellige prioriteringer af problemerne og forskellige mønstre i follow-up forskningen.

Vores brug af Kuhns beskrivelse af forskningsprocessen.

Denne skitsering af Kuhns beskrivelse af forskningsprocessen er her ret forkortet, men forhåbentlig træder hovedpunkterne frem. Vi vil i vores konkrete undersøgelse af forskningen omkring centrifugalregulatoren undersøge, om denne forskning med rimelighed kan beskrives i den kuhn'ske model.

Kuhn giver imidlertid ikke mange bud på drivkræfterne bag forskningen, og på hvilke faktorer, der påvirker den. Han betragter den som meget isoleret fra det omgivende samfund.

En position, der opfatter forskningsprocessen på næsten samme måde som Kuhn, og som samtidig prøver at afdække interne såvelsom eksterne forholds indflydelse på forskningsprocessen er en videnskabssociologisk tradition, der hverken kan karakteriseres som eksternalistisk eller internalistisk.

Videnskabssociologisk position, der hverken er eksternalistisk eller internalistisk.

Barry Barnes kan stå som eksponent for denne position, der først og fremmest er udviklet omkring universitetet i Edinburgh. Vi tager udgangspunkt i hans to bøger "Scientific knowledge and sociological Theory", 1974 og "T.S.Kuhn and Social Science", 1982.

Barnes mener, at videnskabelig erkendelse er et sæt af ideer, der omhandler det, man tror om naturen. Der eksisterer intet universelt rationalitetskriterium, der kan afgøre, om denne tro er rigtig eller ej. Den eksisterende erkendelse er derfor den normale tro på området, en del af kulturen - en subkultur - og derfor er den tilgængelig for sociologisk analyse. Barnes skriver selv:

"The manifest variability in institutionalized natural beliefs is to be made intelligible by being set against an unproblematic baseline of normality, not "truth" or rationality. It is possible for the sociologist to identify normal patterns of belief by investigation of human collectivities in the light of existing sociological theory." (Barnes, 1974, s.41-42)

Denne opfattelse af videnskab er meget lig Kuhns, der heller ikke mener, at paradigmer kan være sande eller falske i absolut forstand.

Barnes vil ikke definere, hvad videnskab er. Han vil finde ud af, om og hvordan samfundets aktører selv definerer og afgrænser videnskaben i forhold til den øvrige kultur. Hvis der eksisterer en grænse mellem videnskaben og den øvrige kultur bliver spørgsmålet så, hvor gennemtrængelig den er, og i hvilken grad eksterne determinanter kan krydse den.

"To the extent that actors define it (videnskaben) as a bounded set of meanings, beliefs and activities with an "inside" and an "outside", we may enquire about the strength of the boundary, and the degree to which external determinants operate across it." (Barnes, 1974, s.99).

Positionens program er altså, at se i hvor høj grad eksterne faktorer har indflydelse på selve forskningsprocessen. Dette skal gøres ved en sociologisk undersøgelse af den/de videnskabelige subkultur(er).

Barnes går herefter over til at skildre, hvorledes aktiviteterne i en videnskabelig subkultur kan blive påvirket af eksterne faktorer. Han skelner her mellem direkte eksterne faktorer og filosofisk indflydelse.

De direkte eksterne faktorerers indflydelse på nutidig forskning er indiskutabel:

"Social, technical and economic determinants routinely affect the rate and direction of scientific growth."
(Barnes 1974, s.102)

Den moderne videnskab er for en stor dels vedkommende meget dirigeret og formålsrettet i forhold til industriens eller statens behov, herunder militærets. Selv omkring den uvildige (disinterested) forskning har eksterne faktorer betydning. De faktorer, som Barnes opfatter som direkte eksterne er stort set de samme, som tidligere eksternalistiske positioner har arbejdet med.

Barnes stiller nu spørgsmålet om, i hvor høj grad de eksterne faktorer har været vigtige, specielt i tidligere epoker. Svaret gives ved en behandling af forskellige videnskabshistorikers forklaringer på den videnskabelige revolution i det 16.-17. århundrede. Barnes mener her, at de direkte eksterne faktoreres rolle er uklar. Dels er det for nogle videnskabsområders vedkommende umuligt at afgrænse videnskaben som subkultur i forhold til den øvrige kultur, og dels er det måske umuligt at rekonstruere den sociale kontekst, videnskabsmændene arbejdede i. Hans konklusion bliver, at jo længere tilbage i historien man går, jo vanskeligere bliver det at afgrænse videnskaben fra den øvrige kultur, hvorved ekster/interne betragtninger bliver meningsløse.

Den anden type faktorer Barnes nævner er filosofisk indflydelse. Han er ikke i tvivl om, at filosofisk og metafysisk indflydelse på videnskaben må ændre den videnskabelige praksis betydeligt. Men hvis den filosofiske indflydelse igen er betinget af andre mere generelt socio-kulturelle faktorer, kan filosofien alene ikke forklare den videnskabelige udvikling. Og det er den, hvilket imidlertid ikke er problemfrit:

"Attempts to relate ideas to social structure and social context have had only very limited succes, although it is this approach which must eventually explain their differential impact." (Barnes 1974, s.115)

Årsagen til den begrænsede succes er tendensen til kun at se en sammenhæng mellem én social klasse eller interessegruppe og ét sæt af ideer. Barnes mener, at man bør se ideer som et værktøj, med hvilket mange socialgrupper prøver at opnå deres mål i bestemte situationer. Ideer passer til hensigter, ikke på grund af en logisk sammenhæng, men

fordi de naturligt passer til bestemte formål indenfor et eksisterende system af normer og ideer.

"Hence, ideas are related to social structure by examining the perceived situation of actors in particular collectivities, and their perceived problems and aims. ... The connection between interest and ideas is contextually mediated."

(Barnes 1974, s. 116)

Ideer er altså relateret til sociale strukturer og til aktørerne i bestemte grupper omend ikke på nogen simpel måde. Barnes har et ikke uinteressant eksempel på en sådan sammenhæng fra det 19. århundrede. Dette århundredes naturfilosofi kan ikke relateres kun til aktørernes hensigter:

".but it is still very easy to argue that conceptions of natural law, uniformity and evolution could perform important functions for the beneficiaries of the emergent competitive industrial order, and that this is why they became prominent." (Barnes 1974, s.116)

Barnes bud på, hvorledes denne sammenhæng mellem ideer og social struktur skal fremanalyseres er imidlertid ikke særlig præcise. Det afhænger af - skriver han - ens teori om forholdet mellem ideer og sociale strukturer. Endvidere er effekten af filosofiens indflydelse på videnskaben også meget generel og svær at vise. Endelig henviser han til specifikke historiske studier for at få afklaret problemerne.

Endelig nævnes to andre indirekte måder eksterne faktorer kan indfluere på videnskabsudviklingen. Eksterne forhold kan skabe og stimulere videnskabelig fantasi, og eksterne forhold kan levere råmaterialet til videnskabelig bearbejdelse. Som eksempel herpå nævnes Carnots arbejde med termodynamik, der for en stor del var forårsaget af dampmaskinens udvikling.

Barnes tilslutter sig stort set Kuhns opfattelse af normalvidenskaben, men ser den ikke - som Kuhn - isoleret fra de sociale strukturer.

Barnes teser om de eksterne forholds indflydelse på den videnskabelige erkendelsesproces lyder besnærende, idet de bygger bro mellem tidligere eksternalistiske og internalistiske positioner, og ser erkendelsesprocessen som værende socialt betinget. Anvisninger på hvordan mere konkrete hi-

storske analyser, der viser vejen fra "det ydre" til det "indre", skal foretages er imidlertid få og sporadiske.

Opsummering og konklusion.

Vi har nu gennemgået nogle vigtige videnskabsteoretiske positioner og set specielt på, hvorledes teknologi og videnskab og samspillet dem imellem behandles.

Begreberne om videnskab og teknologi bliver defineret meget forskelligt. I de internalistiske positioner er der tendens til, at teknologien kun spiller en ganske beskedne rolle, hvis overhovedet nogen for videnskabens udvikling. Videnskaben bliver defineret meget snævert, som "Big Science".

I de eksternalistiske og eksternalistisk sociologiske positioner er der en tendens til, at samspillet bliver meget tæt, dog med forskelle i, hvor stor selvstændighed videnskaben tillægges. Fra Bernal, hvor videnskaben reduceres til teknikleverandør til Solla Price, hvor videnskaben er et selvstændigt system i svag vekselvirkning med teknologien, bortset fra de perioder, hvor systemet er i "fase". Videnskab bliver indenfor de fleste af disse positioner defineret meget bredt.

Forklaringer på videnskabens udvikling er også meget forskellige i de forskellige positioner. Den internalistiske ser videnskabens udvikling som et indre videnskabeligt anliggende, hvor videnskaben udvikler sig kumulativt af tidligere videnskab og i sammenhæng med filosofien, og hvor ophobningen af anomalier eller skift i ideer kan give anledning til "spring" i videnskaben.

Den klassiske eksternalisme og den eksternalistiske sociologiske tradition ser den videnskabelige udvikling på baggrund af økonomiske og sociale samfunds faktorer, og den sociologiske derudover på baggrund af politiske, sociokulturelle og videnskabsinstitutionelle faktorer. Indenfor de sociologiske traditioner lykkes det at forklare rammerne for videnskabsudviklingen og videnskabernes udviklingsretning - dvs mange af de emneområder videnskaben

videnskaben opdyrker - ud fra eksterne faktorer. Selve forskningsprocessen, de enkelte erkendelsesspring og videnskabsmetoderne behandles meget lidt i denne tradition.

Forskningsprocessen og erkendelsesudviklingen tages imidlertid og af Kuhn, der giver en beskrivelse af den uden at beskæftige sig med eksterne faktoreres betydning for forskningen.

Dette bliver så hovedemnet for Barnes, der søger at vise, hvorledes eksterne forhold kan have indflydelse på erkendelsesudviklingen, og som herefter overlader sine ideer til efterprøvelse i konkrete historiske undersøgelser. Barnes behandling er meget generel, og han beskæftiger sig ikke specielt med teknik og teknologi-videnskabsforhold.

Vi ser, at det er vanskeligt at definere videnskab og teknologi, og at definitionerne får konsekvenser for, hvorledes samspillet kan beskrives. Ingen af de definitioner, vi har gennemgået synes helt tilfredsstillende, og vi vil derfor føre nogle andre i marken, som ad-hoc definitioner på begreberne i vores projekt. Videnskab er den aktivitet, der principielt er orienteret mod kognitive formål (know-why), mens teknologi er den aktivitet, der principielt er rettet mod praktiske formål (know-how) (H.Kragh/S.Andur Pedersen 1981,1,s.254). Selv om disse definitioner også har svagheder - det kan i visse konkrete tilfælde være svært at skelne om formålet er det ene eller det andet, hvis formål der er tale om, og hvad der ligger i principielt? - mener vi de kan bruges i vores tilfælde.

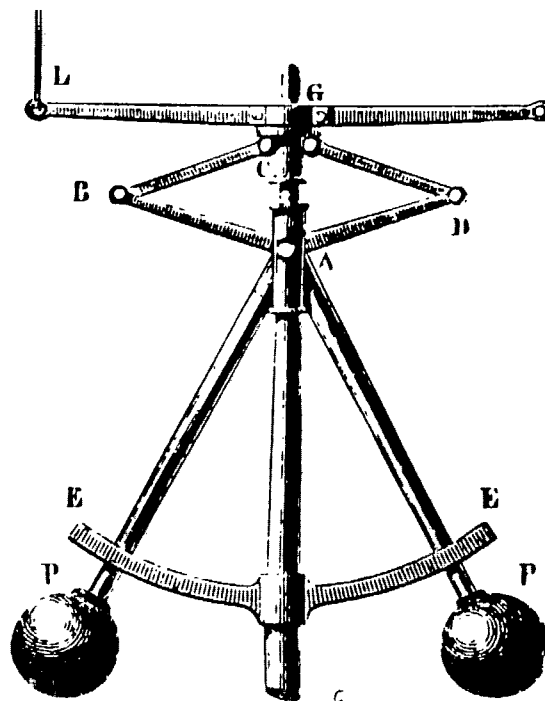
Vi har en mængde centrifugalregulatorer, der i praksis regulerer en skare af dampmaskiner i midten af forrige århundrede, og vi har regulatorkonstruktører og passere, som ved hvordan de fungerer, og som ved stadig eksperimenteren får dem til at fungere bedre. Dette er teknologien (know-how).

Omkring 1870 bliver regulatoren videnskabelig beskrevet, idet mekanikken og matematikken er så udviklet, at regu-

latoren kan beskrives i et differentiallyigningssystem, hvis stabilitetsforhold kan bestemmes. Man får klarhed over, hvorfor systemet opfører sig, som det gør. Dette er videnskab (know-how).

Vi vil analysere samspillet mellem teknologi og videnskab historisk konkret omkring centrifugalregulatorens udvikling og videnskabelige beskrivelse. Er videnskaben blot leverandør af teknologi, er der tale om fasesammenfald eller er teknologi og videnskab næsten helt adskilt? Yderligere vil vi se på, om der er andre faktorer end teknologiens udvikling, der spiller en rolle for videnskabsudviklingen. Her vil vi forsøge en videnskabssociologisk tilgang.

Endelig vil vi se på, hvilke forhold, der virker ind på den indre videnskabelige udvikling, på erkendelsesprocessen. Vi vil her forsøge at beskrive udviklingen i videnskaben i forbindelse med beskrivelsen af regulatoren i Kuhnske termer, og se på hvilken indflydelse eksterne faktorer kan have herpå. De eksterne faktorer vi ser på, er de Barnes'ke direkte eksterne faktorer, hvori bl.a. teknikken indgår, videnskabsinstitutionelle faktorer og filosofiske faktorer.



KAPITEL 2.

MAXWELL OG VYSHNEGRADSKII'S ARTIKLER OM REGULATORER.

Indledning.

Dette kapitel vil først og fremmest beskæftige sig med de teknisk-matematiske beskrivelser af centrifugalregulatorerne, der blev udarbejdet i 1870'erne og 80'erne af henholdsvis skotten J.C. Maxwell og russeren I.A. Vyshnegradskii.

Kapitlet falder i fire dele, hvoraf den første er "nogle reguleringsprincipper". Her beskrives de to typer regulatorer projektet handler om, og bevægelsesligningerne for et reguleret system opstilles. Dette sker i moderne blokdiagrammer og ingeniørnotation, og er ment som en hjælp, idet de historiske beskrivelser nemmere kan forstås på baggrund af denne generelle beskrivelse.

Derefter kommer et afsnit om regulatorsteknologiens historiske udvikling op til den periode hvor Maxwells og Vyshnegradskii's artikler skrives, som beskriver den scene vores hovedpersoner træder ind på.

Så kommer hovedafsnittet i kapitlet, hvor Maxwell's og Vyshnegradskii's beskrivelser af centrifugalregulatorerne gennemgås. Samtidig med at det teknisk-matematiske indhold i deres artikler beskrives ses der på deres interesse i og motiver til at beskæftige sig med regulering.

Endelig afsluttes kapitlet med en kort beskrivelse af reguleringsteknologiens videre udvikling, især om den videreudvikling af stabilitetsteorien, som bl.a. Maxwell's og Vyshnegradskii's artikler gav anledning til..

I kapitel 3 vender vi så tilbage til samspillet mellem teknologi og videnskab og til videnskabens udvikling på baggrund af den konkrete udvikling i regulator-teknologien og -videnskaben i sidste halvdel af forrige århundrede.

NOGLE REGULERINGSPRINCIPPER:

Vi vil i dette kapitel gennemgå nogle almene reguleringsprincipper, beskrevet i moderne termer. Formålet med afsnittet er først og fremmest at lette forståelsen af de senere afsnit.

Endrer man belastningen i f.ex. en dampmaskine ved at tilkoble en spindemaskine eller andet, vil dampmaskinens output målt som f.ex. omdrejningshastighed naturligvis formindskes som følge af den forøgede belastning. Det er en regulators opgave - så hurtigt og præcist som muligt - at bringe maskinens output tilbage på den ønskede normalværdi.

De regulatorer, der var i brug i det 18. og 19. århundrede, kan praktisk taget alle - på trods af vidt forskellige udseender og konstruktionsprincipper - henføres til een af to typer: proportionalregulatorer (P-reg.) eller proportional-integral-regulatorer (PI-reg.).

Vi vil i det følgende kort gennemgå principperne bag disse to typer.

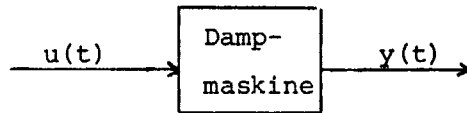
2.1. Dampmaskinen.

Dampmaskinen kan beskrives ved en andenordens lineær differentiaalligning:

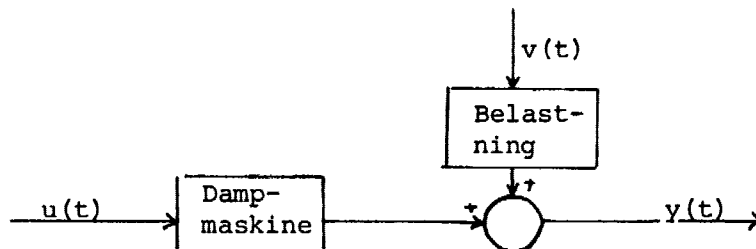
$$\ddot{y}(t) + a\dot{y}(t) + by(t) = u(t), \text{ hvor}$$

$y(t)$ er maskinens output-signal, f.ex. dens hastighed

$u(t)$ er input-signalet, f.ex. åbningen af ventilen i damptilførslen:

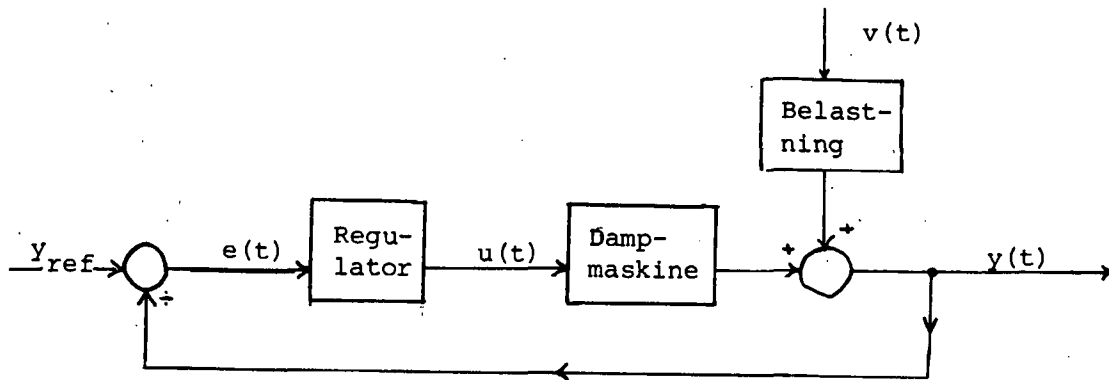


Vi indfører nu en belastning, f.ex. i form af en spindemaskine, som påvirker output-signalet:



En sammenhæng som den viste, kaldes et open loop-system (sml. nedenfor).

Derefter indfører vi en regulator, der er i stand til at påvirke input-signalet samt en tilbagekobling:



$y(t)$ dvs. output-signalet, sammenlignes ved tilbagekoblingen med y_{ref} der er den ønskede output-værdi (setpunktet). Forskellen mellem de to $y(t) - y_{ref} = e(t)$ er fejl-signalet. På basis af dette bestemmer reguleratoren $u(t)$ styresignalet.

På grund af tilbagekoblingen får vi altså et lukket system, hvorfor en sammenhæng som den viste også kaldes et closed loop-system.

Et reguleringssystem, der virker på den viste måde, siges at virke ved negativ feed back. Grundlæggeren af moderne kontrolteori, Norbert Wiener, definerer det som "en metode til at kontrollere et system ved at genindsætte resultaterne af systemets tidligere arbejde (performance) i det." American Institute of Electrical Engineers' mere formelle definition lyder: "Et feed back kontrolsystem er et system, der stræber mod at opretholde et forud givet forhold mellem een systemvariabel og en anden ved at sammenligne funktioner af disse variable og bruge forskellen mellem dem til kontrol."

Formålet med et sådant system er altså automatisk at udføre en eller anden kontrolopgave, og det fungerer ved at opretholde den kontrollerede variable (output) på samme niveau som referenceværdien (input) til trods for enhver uforudseelig forstyrrelse udefra. Output-signalets størrelse måles af et følelegeme, som føder det tilbage til input-siden. Her trækkes det fra referenceværdien, og hvis differencen er forskellig fra nul, svarer systemet korrigerende med en reaktion, hvis størrelse og retning afhænger af differencens størrelse og fortegn. Fejl- og styresignalets evne til at skifte fortegn er helt afgørende for systemets stabilitet, idet der ellers ville opstå en ond cirkel, hvor afvigelser i output ville give anledning til endnu større afvigelser fra den ønskede værdi (positiv feed back).

2.2 Proportional-regulatorer.

Proportional-regulatorer kaldes i ældre litteratur for henholdsvis modera-
torer (Siemens, Maxwell), statiske regulatorer (Tyskland) og nonisochrone
regulatorer (Frankrig).

Det karakteristiske for typen er, at dampmaskinens styresignal er proportio-
nalt med det aktuelle fejlsignal:

$$u(t) = K \cdot e(t)$$

Closed loop-systemet beskrives således af:

$$\ddot{y}(t) + a\dot{y}(t) + by(t) = u(t) = K \cdot e(t) = K(y_{ref} - y(t))$$

$$\Leftrightarrow \ddot{y}(t) + a\dot{y}(t) + (b+K)y(t) = K \cdot y_{ref}$$

I ligevægtstilstanden (steady state), dvs. når $\dot{y}(t) = \ddot{y}(t) = 0$, er

$$y(t) = \frac{K}{b+K} \cdot y_{ref}$$

dvs. at der er en forskel mellem den ønskede værdi og den realiserede. Denne
afvigelse kaldes off-set.

Jo kraftigere forstærkning (K), jo mindre off-set. Kraftig forstærkning
giver imidlertid også svingninger af højere frekvens, hvilket som regel er
uønsket af andre årsager.

2.3 Integral-regulatorer.

I denne type regulatorer, der i ældre litteratur benævnes henholdsvis
govenors, astatiske regulatorer og isochrone regulatorer, er styresignalet
proportionalt med integralet af fejlen:

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int e(t) dt \quad T_I = \text{integrationstiden}$$

Ligningen bliver i dette tilfælde

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) + a\dot{y}(t) + by(t) &= \frac{1}{T_I} \int (y_{ref} - y(t)) dt \\ \Downarrow \\ \ddot{y}(t) + a\dot{y}(t) + b\dot{y}(t) + \frac{1}{T_I} \cdot y(t) &= \frac{1}{T_I} \cdot y_{ref} \end{aligned}$$

I steady state ($\ddot{y} = \dot{y} = y = 0$) ses det, at der ikke er off-set, men af andre
årsager, bl.a. langsom reaktion, er rene integral-regulatorer uegnede.

2.4 PI-regulatorer.

Her er styresignalet både proportionalt med fejlen selv og integralet på fejlen:

$$u(t) = K \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt \right]$$

Denne type er både rimeligt hurtig og næsten uden off-set.

2.5 PID-regulatorer.

Til sidst skal blot nævnes, at mange moderne regulatorer har koblet et differentialled på:

$$u(t) = K \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Der er således indbygget en form for prognose, idet allerede ændringer i fejlsignalet får indflydelse på styresignalet. PID-regulatorer er derfor naturligvis meget hurtige.

Skal man afgøre, hvilken af ovennævnte typer, en konkret foreliggende regulator tilhører, gør man i moderne ingeniørteknik det, at man LaPlace-transformerer differentialligningen, hvorefter man direkte af det fremkomne udtryk kan kategorisere regulatoren.

REGULATORTEKNOLOGIENS HISTORISKE UDVIKLING.

De mennesker, der arbejdede med reguleringsteknik i det 19. århundrede stod overfor to hovedproblemer:

- 1) problemet med at finde betingelser for dynamisk stabilitet i feed back-systemer
- 2) problemet med at konstruere regulatorer uden off-set (se afsnittet om reguleringsprincipper).

Det første problem er nært forbundet med problemet med at bestemme nulpunkterne i et polynomium, dvs. de karakteristiske rødder. Dette problem vil ikke blive behandlet nærmere i dette afsnit.

Det andet problem vil blive behandlet på den måde, at vi her vil give et rids af de tekniske nyskabelser indenfor hastighedsregulering, som førte frem til de centrifugalregulatorer, der er beskrevet i Maxwells og Vyschnegradskiis artikler.

Først med udviklingen af mekaniske ure i middelalderen prøvede man systematisk at udvikle metoder til regulering af hastigheder. De tidligste mekaniske ure blev drevet af vægte og reguleredes af en roterende vinge eller fane, der var forbundet med urværket. Modstanden, som den roterende vinge gav på grund af luftmodstanden, afhang af rotationshastigheden, og modstanden indgik således i en feed back-sløjfe. (Man kan iøvrigt stadig træffe dette reguleringsprincip f.ex. i mekanisk legetøj, hvor en propel øver en stadig mindre modstand, efterhånden som den spændte drivfjeder slappes).

I sidste del af det 17. århundrede lavede Chr. Huygens og Robert Hooke omfattende undersøgelser af nøjagtig tidsmåling. På dette tidspunkt var der på grund af den øgede skibsfart en enorm interesse i at udvikle ure, der med tilstrækkelig præcision kunne bruges til søs, således at man kunne bestemme skibets nøjagtige position. Der blev udlovet enorme pengesummer til dem, der først løste problemet.

Huygens (1626-1695) var sandsynligvis den første, der lavede et praktisk virkende pendulur, og hans paraboliske koniske pendul (beskrevet 1673) er formodentlig det første kontrolsystem, der tilsigtet prøvede at eliminere off-set (Fuller, 1976 a). Det paraboliske koniske pendul var en videreudvikling af det såkaldte cycloide pendul (også beskrevet 1673).

Et penduls svingningstid er næsten uafhængig af svingningens amplitude, når pendulet svinger i en cirkulær bane. Huygens satte sig for at finde den bane, et legeme skal bevæge sig i, for at gøre svingningstiden fuldstændig uafhængig af amplituden. Løsningen viste sig at være en såkaldt ^{cykloide}, dvs. den bane, som et

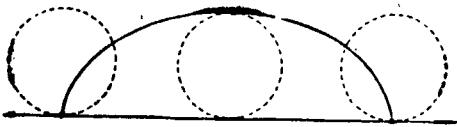


Fig. 1. Cykloide.

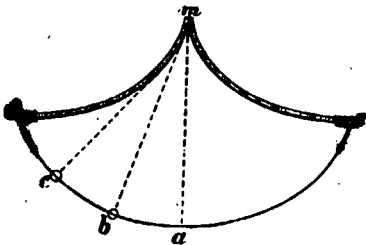


Fig. 2.

Et pendul, der følger en cykloide.

punkt på en cirkel vil beskrive, når cirklen rulles (afvikleren, se fig. 1). Vendes denne afvikler, fås den søgte bane (se fig. 2). En kugle bruger nøjagtig samme tid til at nå punktet a, hvadenten den starter i b, c, eller d. Huygens fandt endvidere ud af, at han kunne få kuglen til følge den cycloide bane ved at ophænge den i en snor i punktet m, hvor to faste skabeloner af afviklere støder sammen. (Huygens brugte faktisk et sådant pendul til regulering af et ur, men for de fleste praktiske formål er indretningen for besværlig og et almindeligt pendul tilstrækkeligt præcist). (Poul la Cour et al, 1966).

Huygens udnyttede dette princip i udviklingen af det paraboliske koniske pendul. Når man overhovedet brugte koniske penduler til regulering af ure, var det for at undgå de spring, som tandhjulet forårsager. I det almindelige koniske pendul, hvor dette beskriver horisontale cirkler, er rotationstiden afhængig af pendulets længde. Huygens ønskede at gøre rotationstiden uafhængig af pendulets længde. Til dette konstruerede han det paraboliske koniske pendul, der vises i fig. 3. Den lodrette akse DH drejes ved hjælp af tromlen K, der drives af det urværk, der skal reguleres. Som det ses, ligger det bøjelige pendul delvis på den bøjede metalplade AB, som er afvikleren til den ønskede parabelbue EF. Når pendulet på grund af centrifugalkraften svinger ud, gør det det derfor langs buen EF. Pendulet, siger Huygens, beskriver en horisontal cirkel, og denne vil være større eller mindre afhængig af de kræfter, der driver hjulene, som er forbundet med tromlen K. Denne antagelse holder imidlertid kun, hvis man tager gnidningsmodstanden og luftmodstanden med i betragtningerne. Gør man ikke det, vil pendulet ophobe kinetisk energi og fortsætte bevægelsen i den cirkel, hvor det sættes i gang. Man kan naturligvis ikke helt eliminere gnidning og luftmodstand. Derfor bliver systemet lukket. Man kan desuden vise (Fuller, 1976a), at regulatoren har integral virkning, hvorfor off-set ikke kan eksistere.

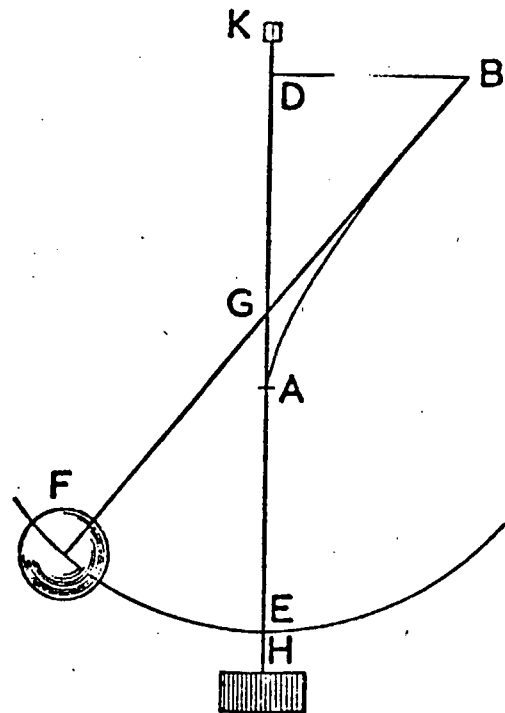


Fig. 3. Huygens koniske pendul.

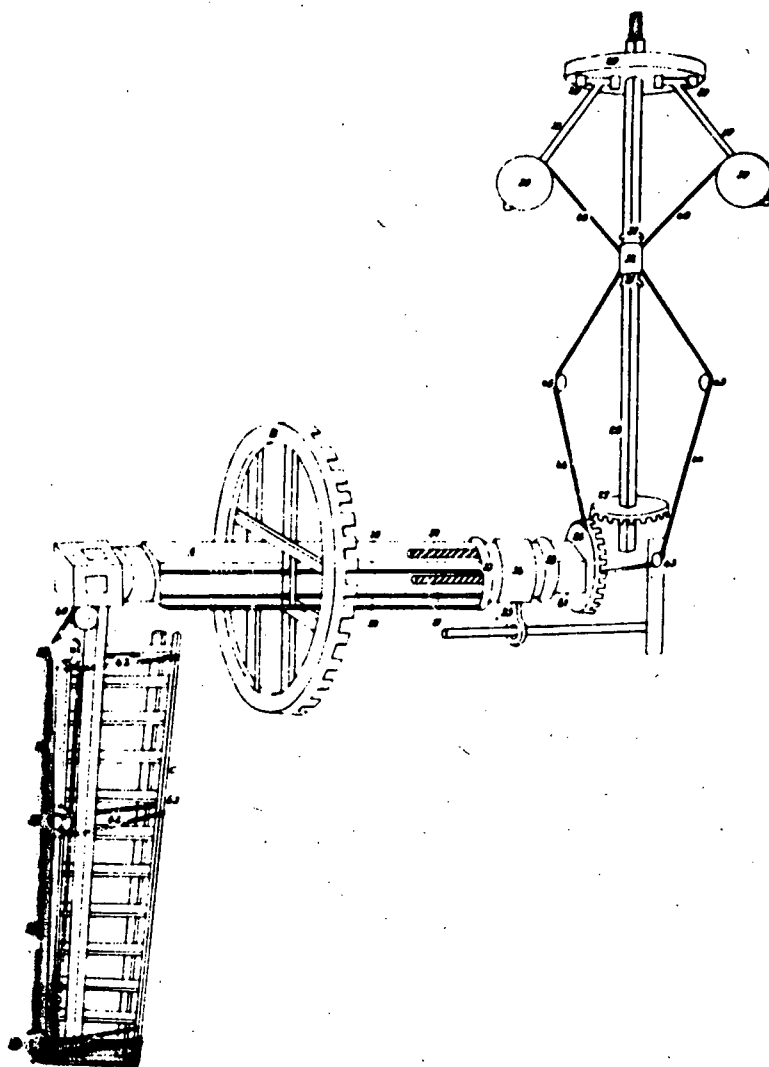
Robert Hooke hævdede hårdnakket, at han allerede i 1667 havde brugt det koniske paraboliske pendul til at gøre et urs hastighed uafhængig af drivkraften. I 1677 beskrev Hooke iøvrigt en centrifugalregulator til et ur, hvor der blev brugt to penduler samt fjedre til at afbalancere centrifugalkraftens træk i kuglerne. Når kuglerne beskriver en cirkel med konstant vinkelhastighed, er centrifugalkraften proportional med cirkelns radius. Hvis fjedrenes træk i kuglerne ligeledes gøres proportional med radius, kan der opnås en balance mellem kræfterne ved enhver radius. Systemet giver således konstant vinkelhastighed uden off-set.

Efter Huygens og Hooke kom der en periode, hvor udviklingen var mere praktisk end teoretisk orienteret. I løbet af det 18. årh. blev der udviklet regulatorer til vindmøller. Møllebyggerne var håndværkere, der kun efterlod få vidnesbyrd om deres opfindelser, bortset fra patenter og opfindelserne selv. Det antages ofte, at de gjorde deres opfindelser helt uafhængigt af hinanden. En anden - og nok så sandsynlig teori - går ud på, at de dels på deres rejser fra mølle til mølle har stiftet bekendtskab med Huygens' og Hookes regulatorer via forbindelser indenfor urbranchen, dels at Hooke der var interesseret også i vindmøller, selv har bedt dem afprøve hans ideer.

I 1745 fik Edmund Lee patent på en såkaldt fan-tail, der er endnu et tidligt eksempel på en integrator i et feed back-system. Fan-tail'en er en ekstra lille mølle, der ligesom de egentlige møllevinger er monteret lodret på møllehatten, men vinkelret på de store vinger. Den er beregnet på at dreje møllehatten. Når fan-tail'en står parallelt med vinden, holder hatten op med at dreje, og de store vinger kan nu udnytte vinden optimalt, da de nu står direkte op mod vinden. (meget tyder iøvrigt på, at Hooke allerede 40 år tidligere havde opfundet en lignende mekanisme).

Et af møllernes største problemer på den tid var, at afstanden mellem de to møllesten ændredes i takt med møllevingernes hastighed, idet øget hastighed fik den øvre sten til at løfte sig, hvorved melet blev grovere. Der krævedes derfor en person til hele tiden at overvåge og kontrollere processen. I 1787 fik Thomas Mead patent på en regulator, der kunne regulere denne proces. Den bestod af et dobbelt konisk pendul, hvor kuglernes jøjde afhang direkte af møllens hastighed. Ved hjælp af et vægtstangssystem blev ændringer i kuglernes højde transmitteret til møllestenene. Det ses således, at der er tale om et open loop-system, idet der ikke forekommer tilbagekobling til møllens hastighed. På samme tid fik Mead imidlertid patent på en centrifugalregulator, der kunne regulere møllens hastighed (se figur). Ændringerne i kuglernes højde på grund af centrifugalkraften bevæger en glidende muffe på regulatoraksen, og via snoretræk rebes sejlene på vingerne i takt med regulatorens (og derfor møllens) hastighed, hvorved hastigheden reduceres.

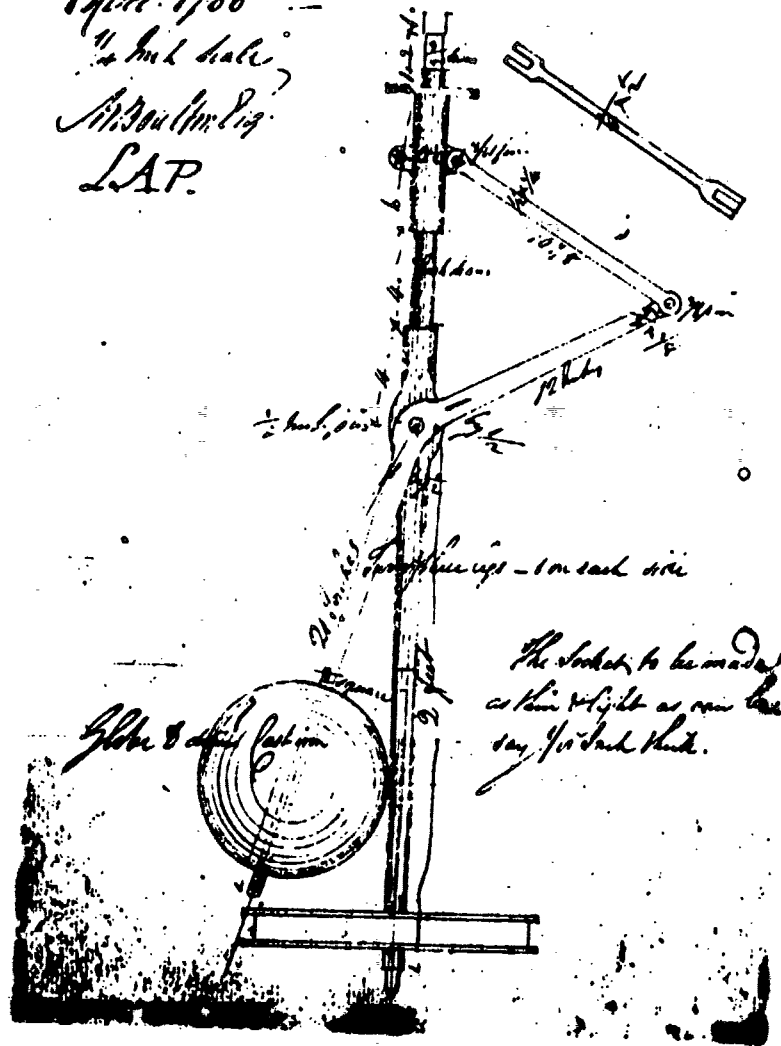
Meads hastighedsregulator til vindmøller.



James Watt, der jo er mest berømt for at have udviklet dampmaskinen, opfandt altså ikke centrifugalregulatoren, som det ellers ofte hævdes. De første af hans dampmaskiner blev reguleret "i hånden", men dette var ikke tilstrækkeligt, hvor arbejdsprocessen krævede en konstant hastighed, som f.ex. i forbindelse med bomuldsspinderi. Watt hørte om vindmølleregulatorerne i forbindelse med en dampmaskine, han havde installeret i Albion Flour Mills, en mølle, han delvis i reklameøjemed havde bygget i London. Han indså, at princippet i disse regulatører sammen med et dampspjæld, han selv havde opfundet, kunne regulere maskinens hastighed automatisk. Regulatoren bestod af en lodret akse, der drives af dampmaskinen. Nær aksens top hænger to jernstænger, som i deres nedre ende bærer to tunge metalkugler. Disse er ved et system af vægtstænger forbundet med dampspjældet. Når kuglerne på grund af centrifugalkraften svinger ud, lukkes der mere eller mindre for dampspjældet afhængigt af kuglernes stilling og dermed af maskinens hastighed. Der er således intet principielt nyt i Watts regulator eller i hans brug af den, men han henledte senere teoretikeres opmærksomhed på kontrolteori.

Tegning af regulator til
Watts berømte LAP maskine.
Dec, 1788.

AGM.
17 Dec 1788
1/2 inch ball
Mr. Boulton's Reg.
LAP.



Allerede tidligt i 1800-tallet blev det påpeget, at Watts regulator havde flere mangler, hvoraf nogle har mere principiel interesse:

1) systemet har indbygget off-set, således at dampmaskinens hastighed ikke reguleres tilbage til normalhastigheden (bl.a. Farey, 1827). Man argumenterede med, at en belastningsændring skulle medføre en ændring af dampspjældets åbning, men centrifugalregulatoren kunne kun give en sådan ændring, hvis dens hastighed ændredes. En belastningsændring måtte derfor nødvendigvis medføre en hastighedsændring. Datidens konstruktører søgte derfor efter reguleringsmekanismer, hvor dampspjældet kunne være i ligevægt i enhver stilling, når maskinen kørte med normalhastigheden.

2) hunting, dvs. at regulatorarmene svinger mellem maksimalt og intet udslag.

Derudover var der problemer med den i mere specielle tilfælde. F.ex. var output-signalet ikke kraftigt nok, hvad der især var problematisk i forbindelse med reguleringen af tilløbet til vandmøller, hvor sluseportene var for tunge til at blive påvirket af regulatoren.

Allerede i 1790 havde G.R.deProny beskrevet en regulator uden off-set som kunne bruges til regulering af dampmaskiner. Den virkede ved, at dampmaskinen

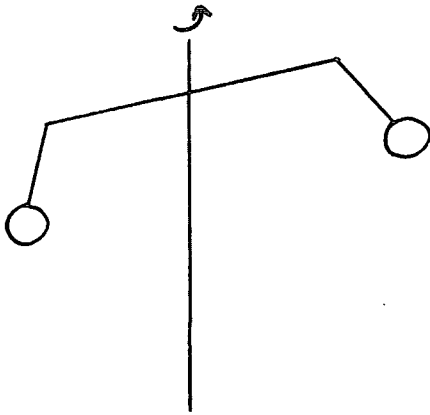
pumpede vand op i en tank, der samtidig drænedes via et rør. Hvis dampmaskinen kører for hurtigt, vil vandstanden stige, hvorved en flyder-reguleret vægtstang lukker af for damptilførslen og vice versa. (Muligvis er det i virkeligheden Watt, der har opfundet denne regulator, idet han brugte flere slags regulatorer, mens deProny blot har beskrevet den).

Den franske bomuldsfabrikant Louis Molinié konstruerede i 1837 en såkaldt pneumatisk regulator, der i princippet virkede på samme som dePronys, blot brugte han i stedet for vand og en tank, luft og et oppusteligt reservoir. Vi skal derfor ikke her komme nærmere ind på konstruktionen, men blot konstatere, at regulatoren ligesom dePronys havde integral virkning, og derfor ingen off-set. Det var dog næppe på grund af dette, maskinen fik en relativt stor udbredelse i Frankrig, men snarere fordi den udviklede en betydelig kraft, hvorved den kunne bruges til regulering af vandmøller.

Iøvrigt er de første empiriske undersøgelser over en regulators præstationer formentlig foretaget på netop Moliniés regulator af franskmanden Combes (Fuller, 1976b), der viste, at regulatoren ved nogle belastningsændringer var flere minutter om at vende tilbage til steady state, således at systemet var tæt på at være ustabil. Pneumatiske regulatorer er iøvrigt stadig udbredt indenfor især kemisk industri.

Den franske matematiker og maskiningeniør Jean-Victor Poncelét (1788-1867) foreslog i 1836, efter et studium af Watts regulator og dens mangler, hastighedsregulering efter et helt andet princip, nemlig feed forward. Her måler man ændringer i den belastning, maskinen skal overkomme. Ændringer i belastningen medførte en kompenserende regulering af dampspjældet. Det giver i princippet en meget hurtig regulering, men måtte i dette tilfælde opgives bl.a. fordi feed forward generelt kræver små og/eller langsomme ændringer.

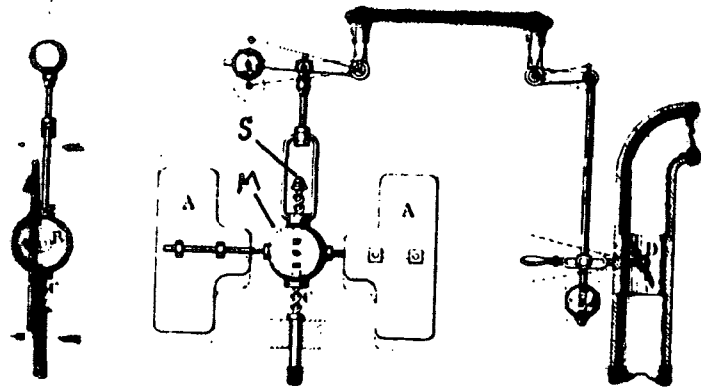
Af kronologiske hensyn skal det her nævnes, at det var i 1840, at George Airy (1801-92), udsendte sin artikel, der som noget nyt indenfor kontrolteori, omhandlede dynamiske systemer. Airy, der var professor i matematik og astronomi ved Cambridge og senere kgl. astronom ved Greenwich, konstruerede selv flere regulatorer til styring af teleskoper. I artiklen henleder han især opmærksomheden på dynamisk ustabilitet og antyder, at dette er det normale. Årsagen til dette er, at i praksis beskriver centrifugalregulatorens kugler ikke horisontale cirkler, men de kan ses at beskrive stort set elliptiske baner, hvilket igen bevirker, at vinkelhastigheden svinger omkring ligevægtshastigheden. I praksis vil friktionen dog altid reducere disse oscillationer. Airy foreslår to alternative metoder til at reducere ustabilitet: enten ved et reducere svingningsfrekvensen, så teleskopet kun langsomt afviger fra det ønskede (til dette forsynes regulatorens lodrette akse med et svinghjul) eller også ved at øge svingningsfrekvensen, indtil amplituden bliver forsvindende (hertil



Airy's regulator.

konstruerer han en regulator, hvor kuglerne er ophængt i korte stænger, der igen sidder på en tværstang, der er fæstnet på den lodrette hovedakse, se fig.). Airy går derefter over til en matematisk undersøgelse af disse regulatorer under forskellige omstændigheder. Vi skal ikke her komme nærmere ind på disse, men blot konkludere, at Airy viste, at man kunne redegøre for instabiliteten ved at undersøge systemets differentiaalligninger, og at han derved grundlagde den moderne kontrolteori (Fuller 1976b).

Samme år, som Airy publicerede sin artikel, fik Benjamin Hick patent på en regulator, der virker efter et noget andet princip end de tidligere nævnte. Han prøvede at udtænke regulatorer, hvor maskinens aktuelle og ønskede hastigheder sammenlignedes direkte. Hertil måtte han have en konstant hastighed som referencevær-

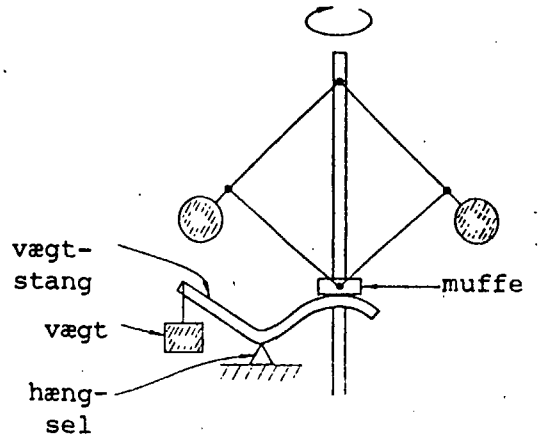


Hicks regulator.

di. Fig. viser den ene af de tre regulatorer, han udviklede. Den tunge møtrik (M), som er løst fastgjort på den lodrette skrue (S), vil på grund af tyngden bevæge sig nedad i en roterende bevægelse. Rotationen kontrolleres af to store vinger (A) fastgjort på møtrikken, som derfor roterer med stort set konstant hastighed, og denne bruges som reference. Hvis den lodrette aksel, der drives af maskinen, roterer med samme hastighed, vil møtrikken forblive i en bestemt højde. Hvis imidlertid de to hastigheder er forskellige, vil møtrikken ^{bevæge} sig op eller ned, og denne bevægelse kan bruges til at regulere dampspjældets stilling. Møtrikkens vertikale hastighed er proportional med forskellen mellem møtrikkens og akslens vinkelhastigheder. Møtrikkens lodrette forskydning (vej) er derfor integralet af afvigelsen (fejlen) på maskinens hastighed. Hicks regulator har derfor integral virkning.

Watts regulator blev af bl.a. Charbonnier (1843) modificeret for at fjerne off-set. Han indså, at i Watts regulator kunne kuglernes højde h kun forblive konstant i en bestemt højde h_0 , når maskinen kørte med normalhastigheden. Hvis $h > h_0$ vil tyngdekraftens træk i kuglerne være større end centrifugalkraftens, og kuglerne vil derfor synke. For $h < h_0$ vil det omvendte være tilfældet, og kuglerne

vil stige. For at opnå ligevægt ved alle h-værdier lagde Charbonnier en ekstra, lodret virkende kraft på kuglerne. Denne kraft ændredes med h på en sådan måde, at forskellen mellem tyngdekraftens og centrifugalkraftens træk elimineredes. Han lagde denne ekstra kraft på kuglerne ved hjælp af en vægt og en hængsel vægtstang, der var bøjet på en sådan måde, at den kraft, den udøvede på muffen, forøgedes med h (se figur).



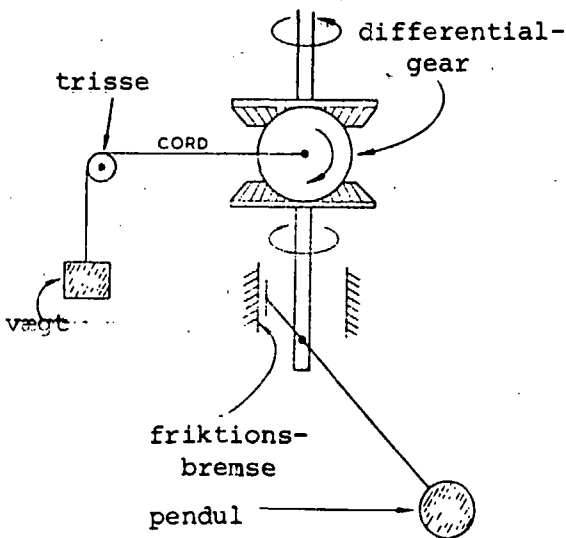
Charbonniers regulator.

Efter 1843 blev regulatorer med integral virkning genopfundet mange gange, uden at de - ud fra et teoretisk synspunkt - bidrog med noget nyt (Fuller, 1976b).

Trods dette vil^{vi} kort gennemgå Siemens' kronometriske regulator og kort omtale Foucault, da de har bidraget med modeller, som Maxwell har brugt i sin analyse.

De tyske brødre Werner (1816-92) og William (1823-83)^{Siemens} har også bidraget til udviklingen af reguleringsteknikken. I 1845 publicerede Werner en artikel om "den kronometriske" regulator, som brødrene havde udviklet sammen. De benyttede samme princip som Hick, dvs, regulatoren subtraherede maskinens hastighed fra en konstant reference-hastighed og bevægede dampspjældet proportionalt med hastighedsfejlen. Dampspjældets stilling er således integralet af hastighedsfejlen. De tekniske detaljer er imidlertid noget forskellige fra Hicks. (se fig.) Hastighedsreferencen var et konisk pendul, der blev trukket af en faldehæde vægt. Centrifugalkraften fik pendulet til at svinge ud, indtil det rørte ved en fast, bremsende overflade. Den forøgede gnidning bremsede

pendulet, så dets rotationshastighed blev konstant og bestemt af bremsens position. Til at subtrahere maskinens hastighed fra referencehastigheden brugte brødrene bl.a. et differentialgear, der bestod af tre smig-hjul. De to horisontale hjul roteres i modsat retning af henholdsvis maskinen og hastighedsreferencen. Det tredje hjul roterer omkring de to andres periferi, og dets vinkelhastighed omkring den vertikale akse, er den ønskede hastighedsafvigelse. Vægten søger at trække pendulet rundt ved at udøve en kraft på det mellemste hjul. Hvis derfor det øverste hjul holdes fast, trækker vægten det midterste hjul rundt om den lodrette akse og roterer dermed det nedre hjul og pendulet. Hvis nu



Siemens' kronometriske regulator.

det øverste hjul roteres med normalhastigheden af dampmaskinen, forbliver det midttertse hjul fast i dets stilling omkring den lodrette akse, men roterer om dets egen vandrette akse og driver derved pendulet rundt. Den kraft, der kræves for at holde pendulet i omdrejninger mod gnidningen kommer således fra maskinen. Til trods for dette forbliver referencehastigheden næsten uafhængig af maskinens hastighed, forudsat at bremsens gnidning forøges kraftigt, når pendulet svinger ud fra den lodrette stilling.

Siemens-brødrene hævdede, at deres "differential"-regulator regulerede betydeligt hurtigere end den gamle centrifugalregulator og altså uden off-set. Til trods for dette var den udfra en praktisk synsvinkel utilfredsstillende, sikkert på grund af varmedannelse og slid i friktionsbremsen. De konstruerede derfor i 1866 en ny udgave, hvor de benyttede en hydraulisk bremse.

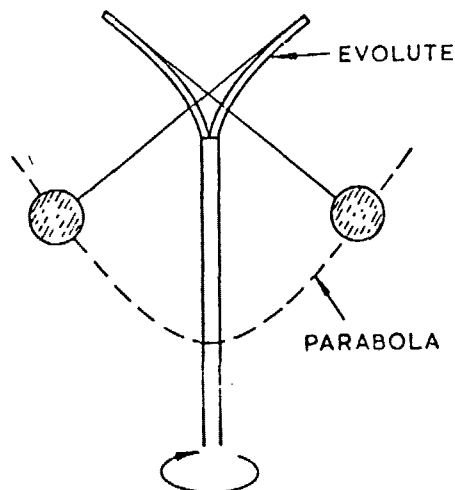
Jean Bernhard Foucault (1819-68) optræder i enhver oversigt over regulerings-teknikkens udvikling. Dette skyldes dog nok mere det ry, han har skaffet sig på grund af sin evne til at kombinere teorimed resultater fra egne opfindsomme forsøg, især indenfor fysikken. Det siges, at han beskæftigede sig med reguleringsteknik i det håb at blive økonomisk uafhængig, så han kunne koncentrere sig udelukkende om sine undersøgelser indenfor fysik. Han beskæftigede sig første gang med regulering i 1847, da han foreslog at bruge et konisk pendul til regulering af urværket i et teleskop. Han overså tilsyneladende fuldstændig bl.a. Airys lignende og tidligere arbejde. Dette syntes at skulle blive et mønster for Foucaults arbejde, da også alle hans andre opfindelser indenfor dette felt var blevet gjort tidligere af andre.

Vi vil slutte den historiske gennemgang op til 1868 med at præsentere nogle regulatorer, som dels kombinerer flere af de tidligere nævnte opfindelser, dels slutter ringen tilbage til Huygens.

De er alle konstrueret af Marie Joseph Farcot i 50'erne og 60'erne og eliminerer alle off-set. Den første, der patenteredes i 1854, virkede stort set som Charbonniers. Den anden metode var mere eller mindre direkte lånt fra Huygens' koniske paraboliske pendul, blot brugte Farcot to penduler i stedet for et (se fig.).

I 1862 modificeredes denne regulator.

I stedet for det bøjelige ophæng brugtes stive stænger, der var hængslet på bestemte steder i forhold til den lodrette akse. Pen-



Farcots modifikation af Huygens' regulator.

dulerne vil således beskrive cirkler, når de svinger udaf, men ved en passende placering af hængslerne kan bevægelsen approksimeres til en parabel indenfor regulatorens arbejdsområde, hvorved off-set (næsten) elimineres. Farcot skriver, at hans regulator undertiden "went mad", dvs. blev ustabil-et problem, der var udbredt på den tid. Man klarede disse problemer ved at forbinde muffen med olie- eller luftdæmpere.

I 1868, da Maxwell publicerede sin artikel, var der over 75000 Watt-regulatorer i brug i England til regulering af dampmaskiner, vandmøller, teleskoper, olie- og gasdrevne maskiner m.m. Med dette store marked kan det ikke undre, at der blev opfundet og udviklet

en uoverskuelig jungle af regulatorer (eksempelvis blev der udstedt 1000 patenter i USA i perioden 1836-1900, Bennett, 1982)), hvoraf størsteparten dog aldrig fik nogen praktisk betydning. Det kan måske undre, at Watts udgave var den mest udbredte til trods for dens mangler, men til mange formål var den tilstrækkelig præcis, samtidig med at dens ekstreme enkelhed gjorde den let både at installere og vedligeholde.

Vi kan således opsummere forholdene på regulatormarkedet o. 1868:

- 1) man var i stand til at konstruere regulatorer uden off-set, hvilket dog til mange formål var unødvendigt,
- 2) regulatorer med integral virkning (uden off-set) blev konstrueret efter prøv-og-fejl-metoden, idet man ikke havde stor forståelse for systemernes dynamik,
- 3) mange integral-regulatorer var ustabile, og konstruktørerne var forvirrede over denne tilsyneladende konflikt mellem stabilitet og ingen off-set.

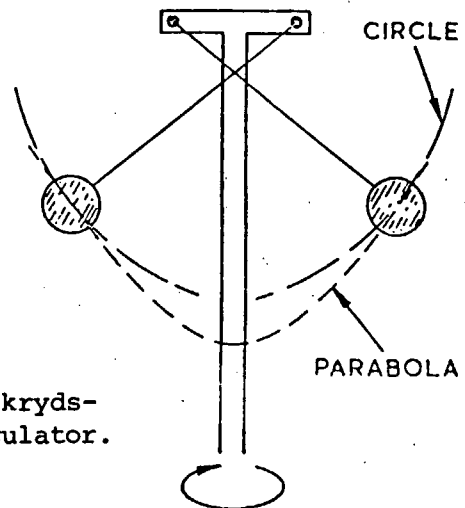


Fig.
Farcots kryds-
arms regulator.

MAXWELL OG VYSHNEGRADSKII'S ARTIKLER.

Indledende bemærkninger til Maxwell og Vyshnegradski.

Norbert Wiener udnævner i sin bog "Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine", 1948, Maxwell som den, der producerer "the first significant paper on feedback mechanisms" (Mayr s. 425)¹ i sin artikel "On Governors", fra 1868. Siden da, hævder Otto Mayr, er Maxwell blevet hyldet som den automatiske kontrolteoris fader.

Richard Bellman og Robert Kalaba hævder i deres artikelsamling om kontrolteoriens udvikling, at Maxwell var den første der gav en matematisk analyse af de i tiden aktuelle reguleringsprincipper omkring off-set og stabilitet.

"It appears that Maxwell was the first to realize that these phenomena could be analyzed in mathematical terms, and that there were some subtle mathematical problems contained in the engineering questions." (indl.).

Videre hævder Bellman og Kalaba om Maxwells indsats:

"Using standard techniques and perturbation theory Maxwell thus reduces the design problem to that of determining the location of the roots of algebraic polynomials." (indl.).

Og Maxwell selv henvender sig i indledningen i sin artikel, eksplicit til ingeniører, der arbejder med regulering:

"I propose at present, without entering into any details, to direct the attention of engineers and mathematicians to the dynamical theory of such governors." (s. 271).

På denne baggrund var det vores umiddelbare indtryk, at denne artikel måtte være et smukt eksempel på, hvorledes teknologiske problemer blev taget op, bearbejdet og løst matematisk. Et eksempel på, hvorledes matematikken kan bidrage på afgørende vis til den teknologiske udvikling, ved at løse problemer, som teknologien selv må give op over for.

I samme artikelsamling nævner Bellman og Kalaba, at den russiske ingeniør J. Vyshnegradskii, samtidig med - og uafhængigt af Maxwell - i en artikel fra 1876 behandler de samme problemer som Maxwell.

1) Hvor intet andet er nævnt refererer 'O. Mayr' til "Maxwell and the Origins of Cybernetics".

Hvor den vestlige tradition udnævner Maxwell til kontrolteoriens fader, betragter man i den sovjetiske tradition tilsvarende Vyshnegradskii som den, der har æren af denne titel. I sin bog om differentiallyigninger beskriver den sovjetiske matematiker Pontryagin de historiske forudsætninger for Vyshnegradskiis arbejde således:

"The centrifugal governor, which at the end of the 18th and the first half of the 19th centuries handled its task quite adequately, began to operate unreliably because of design changes in the middle of the 19th century. A number of theoreticians and engineers sought a way out of the crisis that had arisen." (s.213)

Og om Vyshnegradskiis rolle i denne søgning efter løsningen på reguleringsproblemerne hedder det videre:

"The problem was solved with complete clarity and simplicity by the outstanding Russian engineer Vyshnegradskiy, one of the originators of the theory of automatic control. Vyshnegradskiy's work, Direct-action governors (1876) was one of the first studies in the theory of machine control which sought to answer questions raised by industrial practice."

Det samme udtrykkes endnu skarpere af Grigorian i Dictionary of Scientific Biography, New York 1970:

"Through his research Vyshnegradsky established the mathematical bases for his general scientific principles of automatic regulation. Prior to his work the machine and the regulator had been examined individually and only the statics of the regulator had been studied."

Til belysning af samspillet mellem teknologi og videnskab, som er vores hovedærinde i dette projekt, satte vi os derfor for, at undersøge disse to forskellige tilgange til en matematisk behandling af et teknologisk problem - dels fra et videnskabeligt udgangspunkt (Maxwell) - dels fra et ingeniørmæssigt udgangspunkt (Vyshnegradskii).

Afspejler denne forskellighed i udgangspunktet sig i det videnskabelige produkt? Hvilken betydning får de to artikler for henholdsvis teknologien og matematikken?

Præsentation af Maxwell

James Clerk Maxwells (1831-79) plads i historien som fysiker er, hævder man i Dictionary of Science Biography (N.Y. 1970), først og fremmest bestemt af hans udforskning af elektromagnetisme og luftarters kinetiske energi. Herudover har han også sat sig spor i historien med væsentlige bidrag indenfor andre områder, bl.a. med teorier om Saturns ringe og om regulering af dynamiske systemer. Om Maxwells betydning indenfor kontrolteorien hedder det bl.a.:

"Maxwells paper "On Governors" is generally regarded as the foundation of control theory" (p.227).

Denne vurdering kommer også til udtryk i Norbert Wiener's bog "Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine" (1948), som er den første samlede teori om reguleringssystemer. Wiener vælger således navnet, kybernetik, til Maxwells ære:

"In choosing this term, we wish to recognize that the first significant paper on feedback mechanisms is an article on governors, which was published by Clerk Maxwell in 1868 " (fra O.Mayr: "Maxwell and the Origins of Cybernetics", p.425).

Det var Maxwell som introducerede ordet "governor", som er udviklet af den latinske omformning af det græske ord for "styrmand". Dette græske ord er netop "kybernetik".

Det er denne status, som kontrolteoriens fader, der har vores interesse i dette projekt, idet vi ønsker at undersøge en teoris kilde.

Baggrunden for tilblivelsen af "On Governors".

Maxwell kom fra et akademisk miljø og blev optaget på Edinburgh University i 1847, hvo han bl.a. kom under indflydelse af fysikerne J.D. Forbes og Sir W.Hamilton.

I 1850 startede han på Cambridge, og i 1854 afsluttede han som "second wrangler". Fra 1856 til 1865 havde han et professorat ved Marichal college, Aberdeen, og ved Kings College, London. Fra 1866 til -70 arbejdede han først og

fremmest på sit hovedværk: "Treatise on Electricity and Magnetism", samtidig med at han fungerede som examiner ved de matematiske eksaminer ved Cambridge. I 1871 blev han den første professor i eksperimentel fysik ved Cambridge.

Dynamisk stabilitet

I 1855 blev "Adams Price" ved Cambridge annonceret som en udforskning af Saturns ringe mht. deres bevægelser og stabilitetsforhold. Denne udfordring tog Maxwell op, og i forlængelse af La Places arbejde med samme emne, bestemte han kriterierne for ringenes stabilitet. Disse resultater blev udgivet i et essay: "On the Stability of the Motion of Saturn's Rings" (1856). Maxwells metode til at bestemme disse stabilitetskriterier var, at han ud fra hypotetiske modeller for ringene, ved at antage små forstyrrelser reducerede bevægelsesligningerne til lineære differentiaalligninger med konstante koefficienter, som kunne løses forholdsvis let. Idet han ræsonnerede sig frem til, at bevægelsen kun kunne være stabil, hvis denne løsning konvergerede, dvs. at de reelle rødder og realdelene af de irrationelle rødder skulle være negative, udledte han betingelserne for ringenes stabilitet.

Dynamisk stabilitet interesserede også andre berømte samtidige. W.Thomson og P.G.Tait introducerede således i deres "Treatise on Natural Philosophy", et afsnit om kinetisk stabilitet med følgende erklæring:

"There is scarcely any question in dynamics more important for Natural Philosophy than the stability or instability of motion" (Oxford 1867, p.282), citeret fra O.Mayr p.429)

Thomson og Tait var, i flg. Mayr begge nære venner med Maxwell.

Dynamisk stabilitet var altså et populært emne i de videnskabelige kredse på den tid.

Regulering

Airys direkte anledning til at beskæftige sig teoretisk med regulering var, at han i sit arbejde med astronomiske observationer havde brug for en præcis regulering af sine kikkerter, således at de automatisk og kontinuert fulgte stjernerne.

Tilsvarende var den direkte anledning til Maxwells artikel om regulatorer, at han i forbindelse med andet videnskabeligt arbejde havde behov for en effektiv hastighedsregulering. I 1863 arbejdede Maxwell sammen med Balfour Stewart og H.C. Fleeming Jenkin på, ad eksperimentel vej, at bestemme det absolutte mål for elektrisk modstand. Til disse målinger brugte de et apparat, konstrueret af William Thomson, som bestod af en induktionsspole, der roterede om en vertikal akse og var drevet af et nedhængende lod (O.Mayr, p.426). For at opnå præcise måleresultater var konstant hastighed af afgørende betydning. Til dette formål brugte de en centrifugalregulator, opfundet af F. Jenkin, og denne regulator skulle, i flg. Mayr, have gjort et stort indtryk på Maxwell.

De forudsætninger, som Maxwell skrev "On Governors" ud fra, var altså dels en generel teoretisk ballast om stabilitets-teori, fra hans arbejde om Saturns ringe, dels konkrete erfaringer med regulatorer fra eksperimentelt arbejde.

Om artiklen

At Maxwells kendskab til regulatorer er begrænset til de regulatorer man kendte og brugte i de videnskabelige kredse kommer klart til udtryk i artiklen. Fælles for de regulatorer han refererer til i artiklen gælder, at de ikke havde nogen betydning i industrien. På det tidspunkt, hvor Maxwell skrev sin artikel, var der 75.000 fungerende Watt-regulatorer i England. Denne type regulator ofrer Maxwell kun et par linjer på. De regulatorer, han behandler, er opfundet af videnskabsmænd i kredsen omkring Royal Society (O.Mayr p.426), og de er så utilstrækkeligt beskrevet, at de ikke er til at rekonstruere for udenforstående.

Skønt Maxwell eksplicit henvendte sig til reguleringsingeniører i sin artikel, idet han ønskede "to direct the attention of engineers and mathematicians to the dynamical theory of (...) governors" (On Governors p.271), så er hans reelle målgruppe inderkredsen omkring Royal Society, som kendte de beskrevne regulatorer gennem personlig information. Kun de, hævder Mayr, havde mulighed for at forstå artiklen til bunds.

Dette forhold gav os store problemer i arbejdet med artiklen. Vi gennemgik flere bøger og artikler om regulatorer, bl.a. Röntrops store og grundige gennemgang af de mest anvendte regulatorer, uden at finde de regulatorer, som Maxwell refererede til. Først da vi fandt Mayrs artikel i Isis, (1971) fandt vi forklaringen på, hvorfor vi ikke kunne finde de omtalte regulatorer. Det var imidlertid lykkedes Mayr at finde oplysninger om dem fra hhv. en russisk, en fransk og en skotsk tekst. Jenkins governor fandt han på Cambridgeuniversitetets museum.

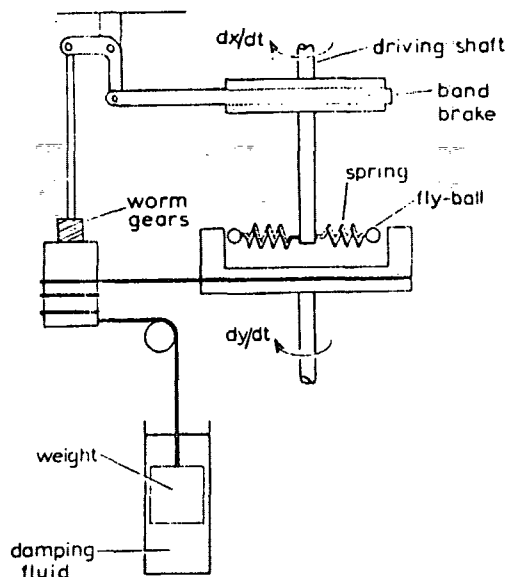
Vores rekonstruktioner af de refererede regulatorer er således baseret dels på Mayrs artikel, dels på oplysninger fra en artikel af A.T.Fuller om samme emne, fra 1976. Endelig fandt vi også nogle af regulatorerne i S.Bennets bog om kontrolteknologiens udvikling, fra 1979.

De sidste to sider af Maxwells artikel omhandler differentialgearing, som kun sjældent blev brugt i forbindelse med regulatorer, men som interesserede Maxwell af andre grunde. Han opfattede æteren mekanisk, som sammensat af hvirvler, der greb ind i hinanden som tandhjul. Differentialgearing brugte han til at få bevægelsen mellem hvirvlerne til at passe, således at han kunne forklare, hvordan det elektriske felt står vinkelret på det magnetiske. Da vores hovederinde er at undersøge regulatorer, vil vi ikke beskæftige os med denne del af artiklen.

De behandlede regulatorer

Jenkins governor

fig.1



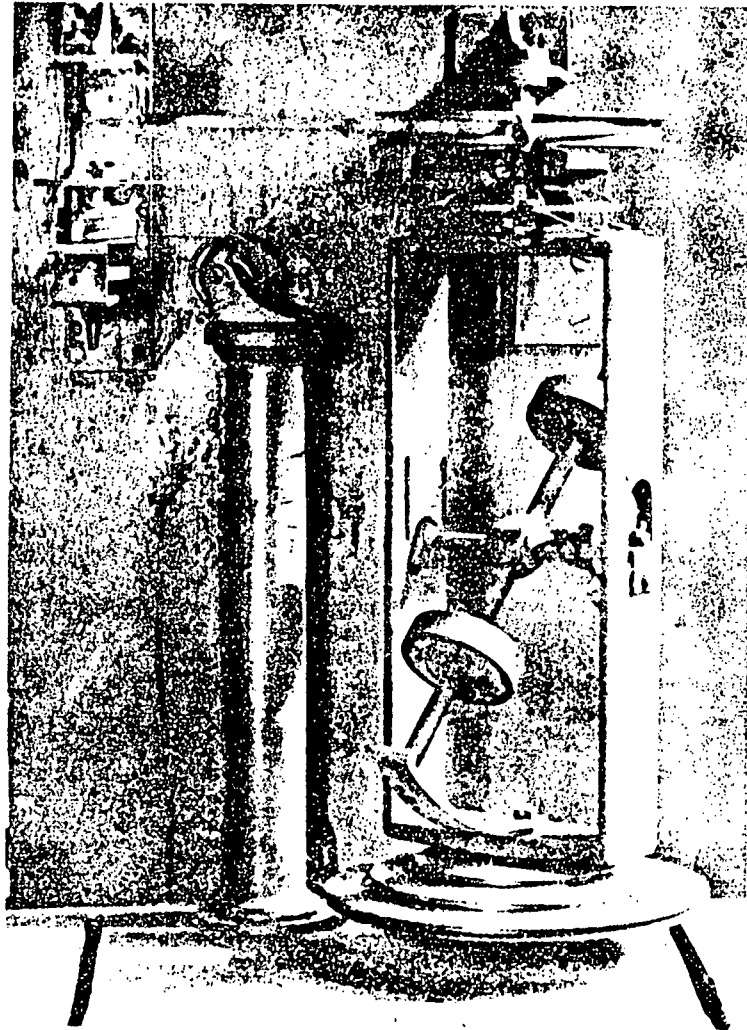
Kuglen er begrænset af en fjeder, og centrifugalkraften bringer den i kontakt med kanten af et hjul. Den resulterende gnidningsmodstand forsøger at dreje hjulet, og denne kraft modvirkes af en konstant kraft, der er suppleret af en vægt i en snor - nedhængt i en træg væske.

Hvis denne konstante kraft overvindes, ved hastighedsforøgelse, vil hjulet sætte sig i bevægelse. Denne rotation tilkobler hhv. frakobler en båndbremse, som virker direkte på hovedakslen.

Denne regulator har integraleffekt, fordi reguleringskraften øges indtil hastighedsafvigelsen er ophørt, dvs. bremskraften er proportional med tidsintegralet af hastighedsafvigelsen. Modsat en proportionalregulator ("moderator"), hvor reguleringskraften er proportional med hastigheden, dvs. den bliver mindre når hastigheden nærmer sig normalhastigheden.

Fig. 2 (fra O.Mayr: Maxwell and the origins of cybernetics
ISIS 1971)

Jenkins governor



J. Clerk Maxwell's first attack on the problem of governor instability was based on H. C. Fleeming Jenkin's governor used in the British Association for the Advancement of Science experiments for the determination of the ohm in 1863. (Courtesy of the Whipple Science Museum, University of Cambridge.)

Fig. 3 (ibid. p.433)

Thomsons regulator

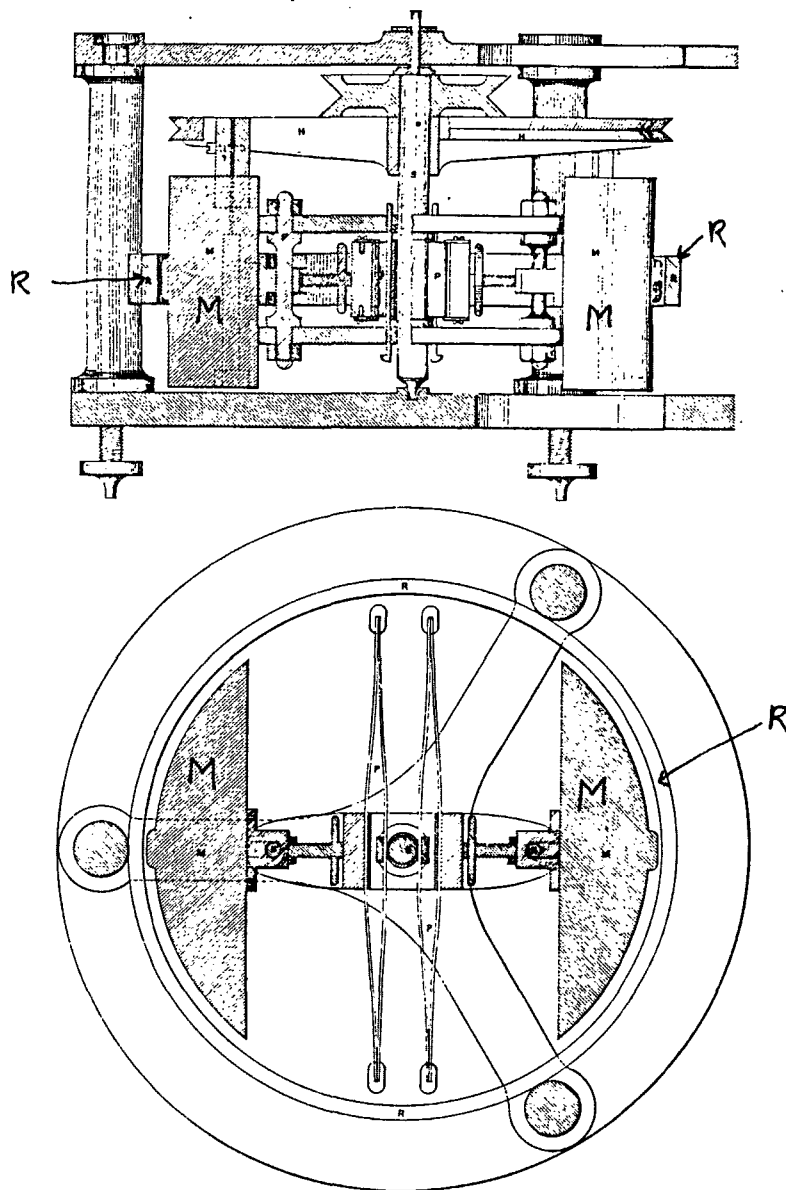


FIGURE 1. *William Thomson's friction governor, 1868, used to regulate the speed of weight-driven apparatus. At overspeed, the rotating weights M, restrained by the leaf springs P, press against the stationary ring R. (From Transactions of the Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland, 1868, 12, Plt. 3.)*

Jenkin/Thomson regulator

Fig.5

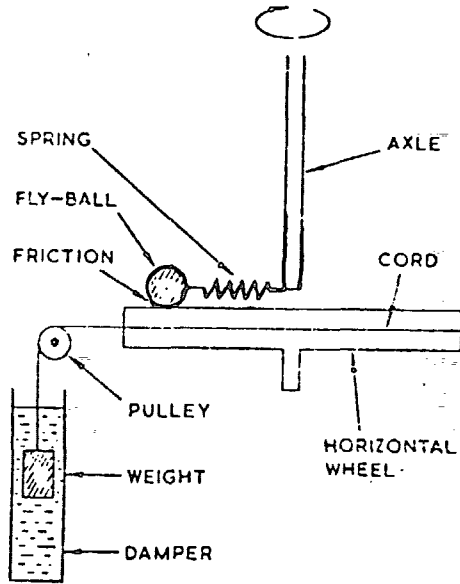


Fig. 11 Compound governor

"Fuller II" (1976)
p. 232

Fig.6

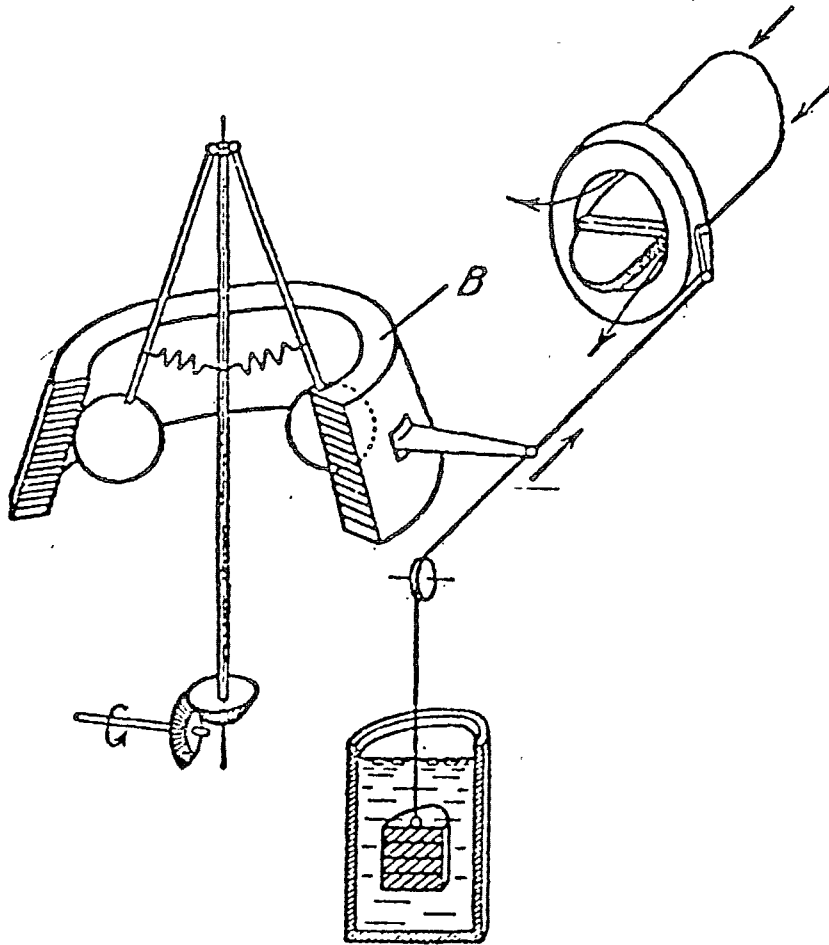


FIGURE 3. H. C. Fleming Jenkin's modification of William Thomson's governor, 1868; conjectural reconstruction. (From A. A. Andronov, I. N. Voznesenski, et al., J. C. Maxwell, I. A. Vyshnegradskii, A. Stodola: Teoriia avtomaticheskogo regulirovaniia, Moscow: Akademia Nauk SSSR, 1949, p. 371.)

Thomsons regulator (fig.3)

Denne type regulator blev brugt til at regulere vægt-drevne maskiner. Ud fra de sparsomme oplysninger, vi har om denne regulator, ser det ud til, at det er en proportional-regulator, det som Maxwell kalder en "moderator", idet den ring "R", som centrifugalstykkerne gnider imod, er stationær. Maxwells eget kriterie for en governor er netop, at denne overflade er bevægelig. For Thomsons regulator må der gælde, at gnidningsmodstanden i sig selv er den regulerende kraft, som virker direkte på hovedakslen, og dermed må det, i Maxwells termer, være en moderator. Hvorfor Maxwell omtaler denne regulator som en governor ved vi ikke, men det er formodentlig blot udslag af den skødesløshed overfor de tekniske detaljer, som præger hele artiklen.

Foucaults regulator (fig.4)

Denne regulator er konstrueret til at regulere en fjeder-dreven motor. Bremseanordningen er en luftbremse. Når hastigheden øges hæves muffen (C), og denne bevægelse bevirker, at luftbremsens klapper reguleres således, at modstanden øges, og dermed reguleres hastigheden.

Jenkins modifikation af Thomsons regulator

Fuller og Mayr giver to forskellige bud på hvordan denne regulator ser ud (se fig.5 hhv.6). Fuller mener, at denne regulator adskiller sig fra Jenkins derved, at centrifugalstykkerne her er frit bevægelige - kun begrænset af en fjeder. Mayr sammenligner ikke eksplicit de to regulatorer. Maxwell antyder forskellen således:

"If the break of Thomsons governor is applied to a moveable wheel, as in Jenkin's governor, and if this wheel works a steamvalve, or a more powerful break, we have to consider the motion of three pieces,..."
"On Governors", p.278).

Denne sparsomme beskrivelse stemmer bedst overens med

Mayrs bud på, hvordan denne regulator ser ud. Og forskellen mellem Jenkins regulator og den modificerede er altså, at hvor den første regulerer direkte på hovedakslen i kraft af båndbremsen, der regulerer den anden indirekte, ved at regulere krafttilførslen v.hj.af et spjæld, der åbnes og lukkes.

"ON GOVERNORS"

Det problem som Maxwell i sin artikel tager udgangspunkt i er, at samtidens bestræbelser på at konstruere regulatorer uden off-set, ofte resulterede i, at regulatoren blev ustabil. Det problem som Maxwell matematificerer er således forholdet mellem off-set og stabilitet.

Moderator/governor

Indledningsvis skelner Maxwell mellem to typer af regulatorer, som han betegner som hhv. moderator og governor, (en skelnen, som han har fra sin gode ven Siemens).

De to typer karakteriserer han således:

Moderator:

"the resistance is increased by a quantity depending on the velocity" (p.271)

og om moderatorers funktion hedder det:

"an increase of driving-power produces an increase of velocity, though a much smaller increase than would be produced without the moderator" (p.271)

Dvs. hvis drivkraften permanent er blevet større, vil den nye ligevægtshastighed også permanent være blevet større. Med andre ord: en moderator giver off-set. Her refererer Maxwell til den udbredte Watt-regulator, som ikke nævnes senere i artiklen.

Heroverfor stiller han den type regulatorer, som han kalder governors:

"But if the part acted on by the centrifugal force, instead of acting directly on the machine, sets in motion a contrivance which continually increases the resistance as long as the velocity is above its

normal value, and reverses its action when the velocity is below that value, the governor will bring the velocity to same normal value whatever variation (within the working limits of the machine) be made in the drivingpower or the resistance." (p.271)

Med andre ord, en regulering uden off-set, er en indirekte regulering, og reguleringskraften er ikke proportional med den aktuelle hastighed, og dermed af drivkraftens og modstandenes størrelse, som en moderator er. En governors reguleringskraft øges kontinuert indtil hastighedsafvigelsen er ophørt.

Maxwell eksemplificerer denne forskel med en regulator, der er konstrueret således, at centrifugalstykket har en konstant afstand fra hovedakslen, men således at dets tryk på en overflade, som det gnider mod, varierer når hastigheden varierer:



For en moderator vil der gælde, at gnidningsmodstanden i sig selv er den regulerende (bremsende) kraft, mens det for en governor vil gælde, at den overflade, som centrifugalstykket gnider mod, er gjort bevægelig omkring akslen. Gnidningsmodstanden vil tendere mod at bevæge overfladen, og når denne bevæger sig aktiverer den en bremse, som hæmmer maskinen. Den bevægelige overflade er samtidig påvirket af en konstant kraft, som virker i modsat retning af centrifugalkraften. Denne kraft slår bremsen fra, når hastigheden er mindre end en given størrelse. Som eksempel på en sådan governor nævner Maxwell Jenkins governor. (p.272)

Som en anden type governors nævner han Foucaults og Thomsons regulatorer. Her er centrifugalstykkerne frit bevægelige, dog er deres udslag begrænset af fjedre (Thomson) eller af vægte tilføjet centrifugalstykket (Foucault). Uden disse begrænsninger, hævder Maxwell, ville centrifugalstykkerne give fuldt udslag for den mindste hastighedsændring. Ved normalhastighed vil centrifugalstykkerne være i ligevægt i enhver position.

Den tredje type regulatorer, som Maxwell nævner, er "væske-regulatorer", bl.a. konstrueret af W.Siemens. Da de bygger på samme principper, som de andre regulatorer, og da de er så forskellige fra de teknologisk anvendte regulatorer i deres udformning, vil vi ikke gå nærmere ind på disse typer.

Stabilitet

Det er governors, der har Maxwells interesse. En del samtidige regulatorkonstruktører mente, at regulatorer uden offset, nødvendigvis måtte blive ustabile. Det er Maxwells hovederinde, at undersøge stabilitetsforholdene for disse governors.

En maskine med regulator har en bevægelse, som Maxwell karakteriserer som en ensartet bevægelse kombineret med en forstyrrelse, som kan udtrykkes som summen af forskellige bevægelseskomponenter:

1. The disturbance may continually increase.
2. It may continually diminish.
3. It may be an oscillation of continually increasing amplitude.
4. It may be an oscillation of continually decreasing amplitude." (p.271)

Det er 2 og 4 der karakteriserer en stabil bevægelse. Med andre ord: en regulator er ustabil, hvis dens output (den regulerede hastighed) i stedet for at vende tilbage til en ligevægtshastighed i stedet øges kontinuert eller går ind i en svingende bevægelse med voksende amplitude. Efter således at have defineret det tekniske stabilitetsbegreb'oversætter'Maxwell dette til matematik":

"This condition is mathematically equivalent to the condition that all the possible roots, and all the possible parts of the impossible roots, of a certain equation, shall be negative." (p.271).

Og Maxwell giver et eksempel på, hvorledes disse stabilitetsforhold kommer til udtryk i den konkrete regulering:

"If, by altering the adjustments of the machine, its governing power is continually increased, there is generally a limit at which the disturbance, instead of subsiding more rapidly, becomes an oscillating and jerking motion, increasing in violence till it reaches the limit of action of the governor. This takes place when the possible part of one of the impossible roots becomes positive." (p.272).

Maxwell har konkret iagttaget dette fænomen i forbindelse med Jenkins governor, hvor man gjorde reguleringen stadig kraftigere, indtil "a dancing motion of the governor, accompanied with a jerking motion of the main shaft, showed that an alteration had taken place among the impossible roots of the equation." (p.272).

På denne baggrund udstikker Maxwell sit formål med artiklen:

"The mathematical investigations of the motion may be rendered practically useful by pointing out the remedy for these disturbances." (p.272)

Her stiller Maxwell således sine matematiske undersøgelser til rådighed for reguleringskonstruktører, men som omtalt andetsteds, gjorde artiklens form resultaterne utilgængelige for andre end den videnskabelige inderkreds.

Efter således at have gjort rede for sit tekniske og teoretiske udgangspunkt, går Maxwell så i gang med selve den matematiske undersøgelse.

Først giver han en generel matematisk karakteristik af forskellen mellem en moderator og en governor.

Moderator

Maxwell opstiller følgende ligning for en bevægelse, der er reguleret af en moderator:

$$1) \quad \frac{d}{dt} \left(M \frac{dx}{dt} \right) = P - R - F \left(\frac{dx}{dt} - V \right) \quad (1) *$$

hvor M = hele systemets inertimoment, reduceret til en given akse, idet $M = \sum_i m R_i^2$ (hvor R_i er afstanden fra akse til en given masse m). (For nærmere beskrivelse af roterende legemers fysik se: "Alonso Finn", Fundamental university, volume 1. Mechanics.)

$M \frac{dx}{dt}$ = impulsmomentet ($I\omega$) (ω = vinkelhastighed)

$\frac{d}{dt} \left(M \frac{dx}{dt} \right)$ = kraftmomentet om akse = tilvækst i impulsmomentet pr.tid.

P = maskinens kraftmoment

R = modstande i systemet (i praktisk anvendte systemer kunne det være væve o.l.)

V = normalhastighed (vinkelhastighed)

$\frac{dx}{dt}$ = aktuel vinkelhastighed

* () refererer til Maxwells nummerering, mens \bigcirc betyder at de oprindelige ligninger, der refereres til er omformede.

$F\left(\frac{dx}{dt} - V\right)$ = regulatorens bremskraft, proportional med den aktuelle hastighed (hastighedsafvigelsen)
 F = koefficient for regulatorens bremseeffekt.

Ved at betragte dette system i steady-state, dvs. i en ligevæghastighed, hvor kraftmomentet $\frac{d}{dt}\left(M\frac{dx}{dt}\right) = 0$, finder Maxwell udtrykket for den nye ligevægtshastighed:

$$2) \quad \frac{dx}{dt} = V + \frac{P-R}{F} \quad (2)$$

Denne nye ligevægtshastighed afviger fra den oprindelige ligevægtshastighed (før der indtraf en ændring i forholdet mellem krafttilførslen P og modstanden R), med en størrelse $\frac{P-R}{F}$, som er proportional med P og R , og som udtrykker størrelsen af reguleringens off-set. En permanent ændring af P og/eller R giver altså en permanent hastighedsafvigelse.

Governor

Derefter gennemgår Maxwell tilsvarende princippet i det, han kalder en governor.

I \checkmark moderator virker reguleringskraften $F\left(\frac{dx}{dt} - V\right)$ direkte på hovedakslen. Ved i stedet at lade den være drivkraft for et 'hjul' B , som med sin bevægelse aktiverer en reguleringsmekanisme, der kontinuerligt øger sin reguleringskraft så længe hjulet bevæger sig, da vil man undgå off-set. Dvs. man vil opnå en ligevægtshastighed, der er uafhængig af P og R . Dermed vil en permanent ændring af krafttilførslen og/eller modstandene i systemet ikke give en permanent hastighedsafvigelse.

Hjælpehjulet antages at have inertimomentet B og vinkelhastigheden $\frac{dy}{dt}$. Hjælpehjulets (hj.hj.) bevægelsesligning bliver da:

$$3) \quad B\frac{d^2y}{dt^2} = F\left(\frac{dx}{dt} - V\right) \quad (3)$$

Dette hjul tilføjer en kraft (modstand), Gy , til hovedakslen, og maskinens ligning bliver da:

$$4) \quad \frac{d}{dt}\left(M\frac{dx}{dt}\right) = P - R - F\left(\frac{dx}{dt} - V\right) - Gy \quad (4)$$

* Maxwells eksempel på en

Integration af 3 giver

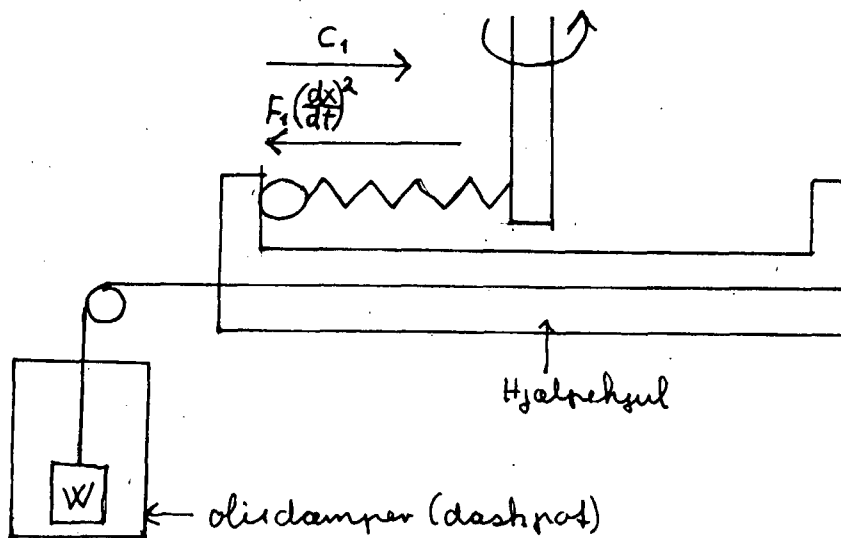
$$5) \quad B \frac{dy}{dt} = F(x - vt) + c \quad (5)$$

Ved steady-state er $B \frac{dy}{dt} = 0$ (hjulet bevæger sig ikke), og det betyder at $x = vt - \frac{c}{F} \Rightarrow \underline{\frac{dx}{dt} = v}$.

Dvs. at systemet ikke har off-set, hastigheden er reguleret tilbage til normalhastigheden.

Jenkins governor

Maxwell eksemplificerer nu dette generelle resultat med Jenkins governor. Her skematisk fremstillet på baggrund af Fullers artikel ("Fuller II"): (se i øvrigt fig.1)



Den kraft, som hj.hj. i Jenkins tilfælde påvirkes af - centrifugalkraften ($= m\omega^2 R$) - er proportional med kvadratet på vinkelhastigheden. Centrifugalkraften fra kuglernes tryk kan altså til en givet hastighed $\frac{dx}{dt}$ udtrykkes som $F_1 \left(\frac{dx}{dt}\right)^2$, hvor F_1 er en konstant idet såvel kuglernes masse som deres afstand (R) fra akse er konstant.

Fjederens modsatte træk i kuglerne kalder Maxwell C_1 . Den resulterende kraft, der påvirker hj.hj. bliver da:

$$6) \quad F_1 \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - C_1$$

Dette udtryk lineariserer Maxwell, uden at gøre rede for hvordan han gør det, så det får flg. form¹

$$7) \quad F\left(\frac{dx}{dt} - V_1\right)$$

hvor V_1 er den største hast. systemet kan antage før hj.hj. vil sættes i bevægelse, dvs. hvis $\frac{dx}{dt} > V_1$ vil hjulet bevæge sig. Ligningen for hj.hj.s bevægelse svarer nu til det generelle udtryk (lign.3):

$$8) \quad B \frac{d^2y}{dt^2} = F\left(\frac{dx}{dt} - V_1\right)$$

Desuden er der i Jenkins regulator til hj.hj. tilføjet en båndbremse med kontravægt, der er nedsænket i en "dashpot" (en cylinder med en træg væske), og hj.hj.s ligning bliver da

$$9) \quad B \frac{d^2y}{dt^2} = F\left(\frac{dx}{dt} - V_1\right) - Y \frac{dy}{dt} - W \quad (6)$$

hvor W = tyngdens træk i kontravægten (mg)

$Y \frac{dy}{dt}$ = dashpottens modstand, som afhænger af

$\frac{dy}{dt}$ = hj.hj.s vinkelhastighed og af

Y = koefficient for de modstande, (herunder væskens viskositet,) der afhænger af hj.hj.s hastighed.

Maxwell undersøger nu steadystate tilstanden for Jenkins governor. Ved at integrere 9 og sætte venstresiden lig med 0 får han

$$10) \quad x = \left(\frac{W}{F} + V_1\right)t + \left(\frac{Y}{F}\right)y - \frac{C}{F} \quad (2)$$

Ligevægtshastigheden bliver da:

1) se bilag, hvor vi har foretaget lineariseringen. Tilsvarende refererer de flg. tal, der er rykket op, til bilag, hvor vi har foretaget nogle af de gennemregninger, som Maxwell selv har udeladt.

$$11) \quad \frac{dx}{dt} = \frac{W}{F} + V_1, \quad \left(\frac{Y}{F} \right) \frac{dy}{dt} \text{ er udeladt, da } \frac{dy}{dt} = 0 \text{ i steady-state.}$$

Denne hastighed afhænger ikke af hverken P eller R, men kun af konstanterne W, F og V_1 , så der er teoretisk set ingen off-set. I praksis er det imidlertid vanskeligt at holde gnidningskoefficienten, F, helt konstant.

Stabilitet.

Maxwell går nu i gang med at undersøge stabilitetsforholdene ved Jenkins regulator. Ud fra de to ligninger, der beskriver hhv. hovedakslens bevægelse (4) og hj.hj.s bevægelse (9) hvor den sidste er blevet integreret:

$$* \quad M \frac{d^2x}{dt^2} = P - R - F \left(\frac{dx}{dt} - V_1 \right) - G y \quad (10)$$

$$B \frac{dy}{dt} = F(x - V_1 t) - Y y - W t + C \quad (7)$$

opstiller han nu det karakteristiske polynomium²⁾ for systemet:

$$12) \quad MBn^3 + (MY + FB)n^2 + FYn + FG = 0 \quad (12)$$

Maxwell ræsonnerer nu på forholdet mellem polynomiets rødder og systemets stabilitetsforhold.

Løsningen til differentiaalligningssystemet har formen:

$$13) \quad x = A_1 e^{n_1 t} + A_2 e^{n_2 t} + A_3 e^{n_3 t} + V t \quad (11)$$

hvor A_1, A_2, A_3 er konstanter og n_1, n_2, n_3 er rødder i det karakteristiske polynomium. De tre første led er løsning til det homogene system, og Vt (normalhastighed gange tid) er den konstante løsning til det inhomogene system.

At Vt er en løsning ses af ligning 9:

$$B \frac{d^2y}{dt^2} = F \left(\frac{dx}{dt} - V_1 \right) - Y \frac{dy}{dt} - W$$

Ved den oprindelige ligevægtstilstand vil $\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dy}{dt} = 0$.

$$F \left(\frac{dx}{dt} - V_1 \right) = W, \quad \frac{dx}{dt} = \frac{W}{F} + V_1 = V \quad \text{og } x = Vt + \text{en konstant.}$$

* Når Maxwell her kan tillade sig at sætte $\frac{d}{dt} \left(M \frac{dx}{dt} \right) = M \frac{d^2x}{dt^2}$, skyldes det at systemets inertimoment M er konstant, fordi kuglernes afstand til akse i Jenkins governor er konstant.

Hvis systemet skal være stabilt, skal x konvergere mod Vt . Det gør x , hvis realdelen af rødderne er negativ, idet hvis $t \rightarrow \infty$ vil $nt \rightarrow -\infty$; e^{nt} vil da gå mod nul, og dermed vil løsningen konvergere mod Vt og systemet være stabilt.

Maxwell udleder nu betingelserne for stabilitet, men først en ekskurs til stabilitet for 3. ordens differentiaalligninger generelt.

Ekskurs til stabilitet for 3.ordens differentiaalligninger, generelt.

Vi så at den fuldstændige løsning havde formen:

$$x = A_1 e^{n_1 t} + A_2 e^{n_2 t} + A_3 e^{n_3 t} + Vt$$

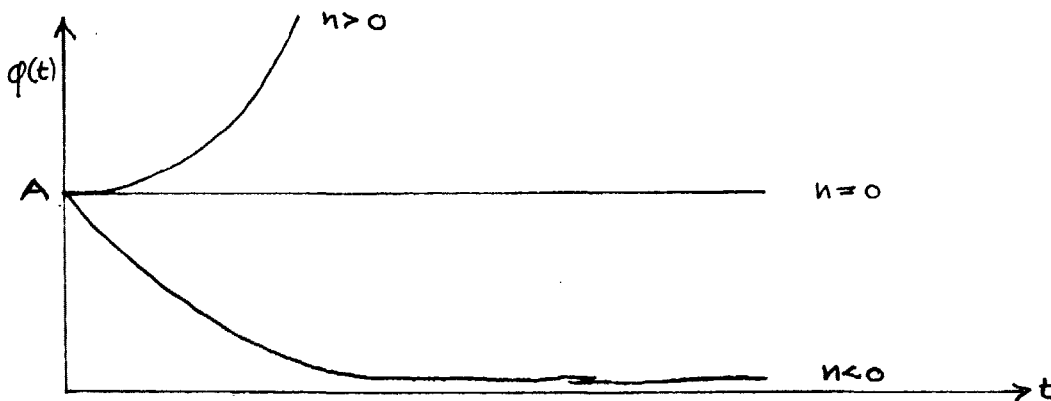
Vi forenkler ved blot at se på en løsning af typen,

$$x = Ae^{nt} \quad \text{eller} \quad \varphi(t) = Ae^{nt}$$

idet den samlede løsning blot er en sum af tre sådanne led plus en konstant. A forudsættes positiv.

Reelle rødder:

Hvis roden n i det karakteristiske polynomium er reel, ses det let at $\varphi(t)$ vil have et af tre følgende forløb:



Systemet vil være ustabil for $n > 0$, idet hastigheden vil stige exponentielt med tiden. For $n < 0$ vil hastigheden nærme sig udgangshastigheden (hos Maxwell Vt), og for $n = 0$ vil hastigheden blive i det nye leje A .

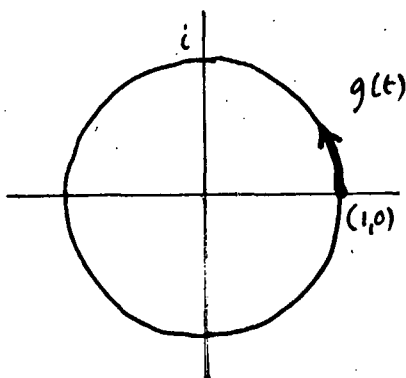
Komplekse rødder:

Hvis roden er kompleks vil løsningen se således ud:

$$n = \alpha + i\beta \Rightarrow \varphi(t) = Ae^{(\alpha + i\beta)t} = Ae^{\alpha t} e^{i\beta t}$$

$$= \underbrace{Ae^{\alpha t}}_{f(t)} \underbrace{(\cos \beta t + i \sin \beta t)}_{g(t)}$$

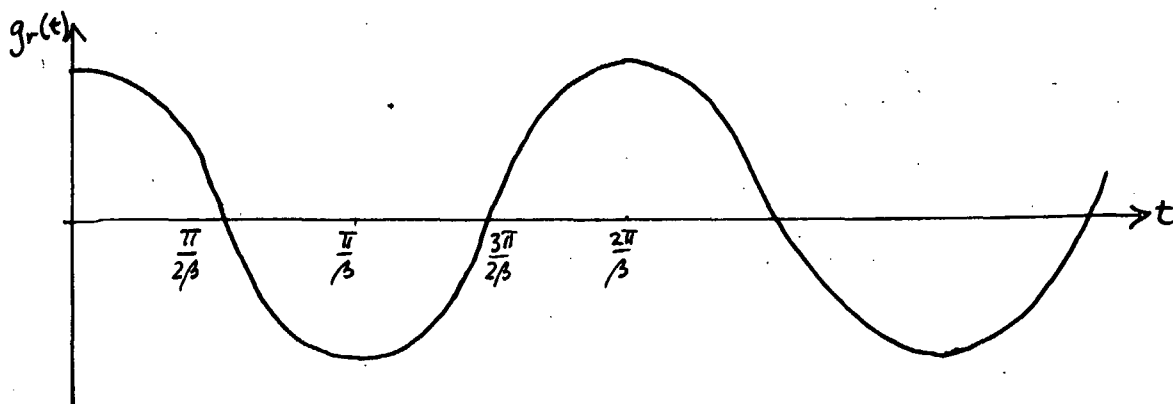
Lad os se nærmere på den komplekse funktion $g(t)$:



Den vil starte i $(1, 0)$ og køre rundt i enhedscirklen. Hvis $\beta < 0$ vil omløbsretningen blot ændres.

t	0	$\frac{\pi}{2\beta}$	$\frac{\pi}{\beta}$	$\frac{3\pi}{2\beta}$	$\frac{2\pi}{\beta}$
$g(t)$	$(1, 0)$	$(0, 1)$	$(-1, 0)$	$(0, -1)$	$(1, 0)$

Afsættes funktionens reelle komponent, $g_r(t) = \cos \beta t$, afhængig af tiden fåes:



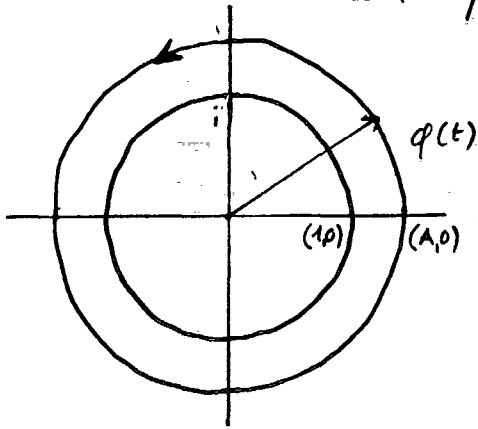
Det ses at $g_r(t)$ er en svingning med svingningstiden

$$T = \frac{2\pi}{\beta} \text{ og frekvens } \gamma = \frac{\beta}{2\pi}.$$

I det samlede udtryk $\varphi(t) = f(t)g(t)$ angiver $g(t)$ en harmonisk svingning og $f(t) = Ae^{\alpha t}$ angiver amplituden af φ .

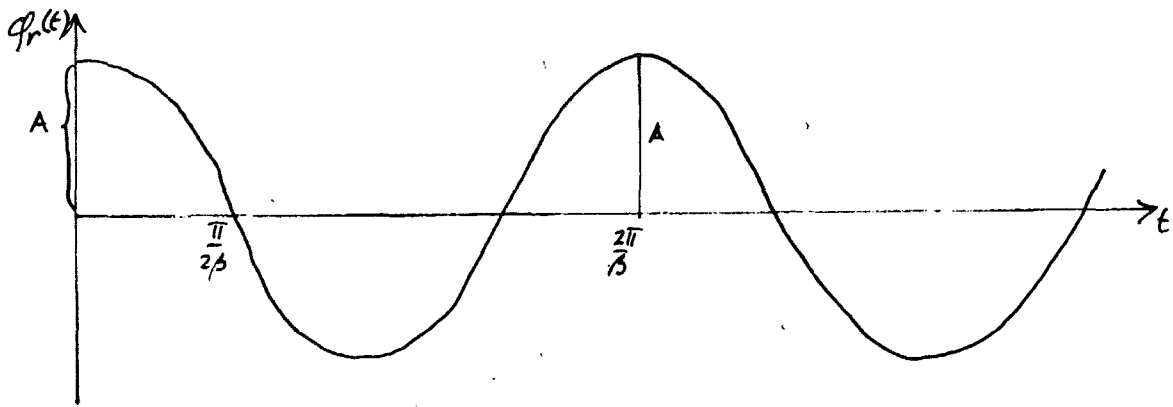
Lad os se på de tre muligheder, at det karakteristiske polynomiums rødders realdel α er positiv, negativ eller lig nul.

(1) $\alpha = 0$ $\varphi(t) = Ae^{\alpha t} (\cos \beta t + i \sin \beta t)$
 $= A (\cos \beta t + i \sin \beta t)$

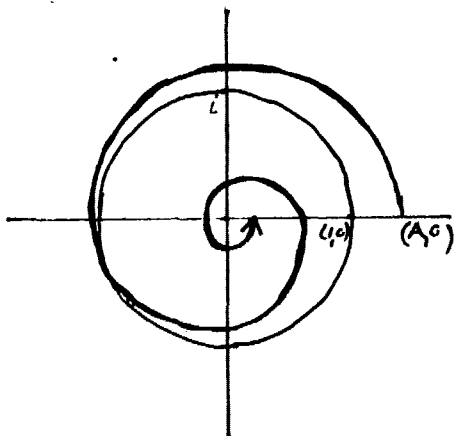


Amplituden vil være konstant lig A og i det komplekse plan vil $\varphi(t)$ køre rundt i cirklen med radius lig A og realdelen, $\varphi_r(t) = f(t)g_r(t)$, køre frem og tilbage på den reelle akse.

Afsættes den reelle komponent afhængig af tiden fåes:



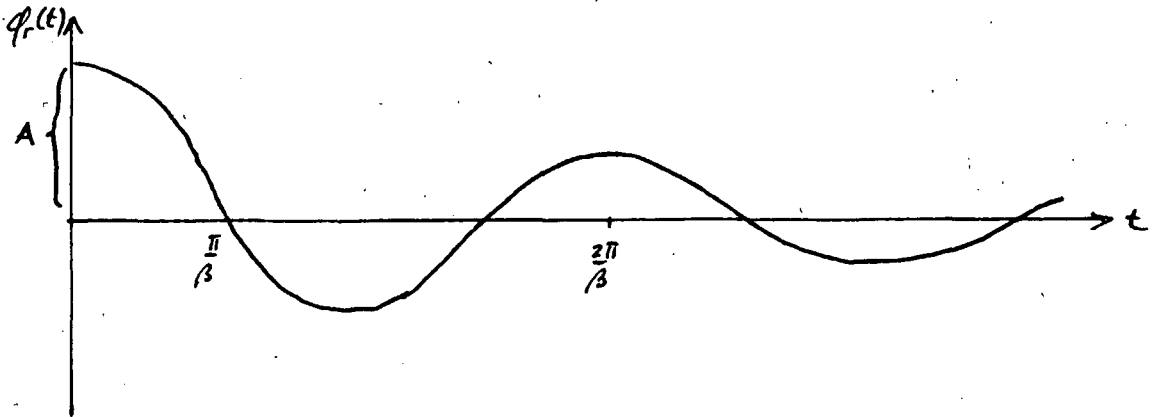
(2) $\alpha < 0$



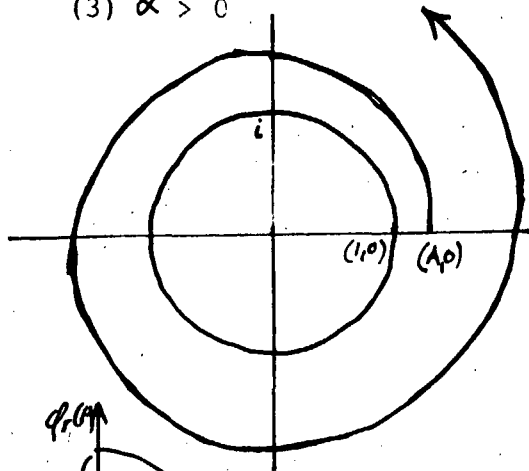
$\varphi(t) = Ae^{\alpha t} (\cos \beta t + i \sin \beta t)$

Amplituden $f(t) = Ae^{\alpha t}$ vil nærme sig nul, og i det komplekse plan vil $\varphi(t)$ følge en spiral ind mod origo.

Denne dæmpede svingning er vist i det reelle plan nedenfor:

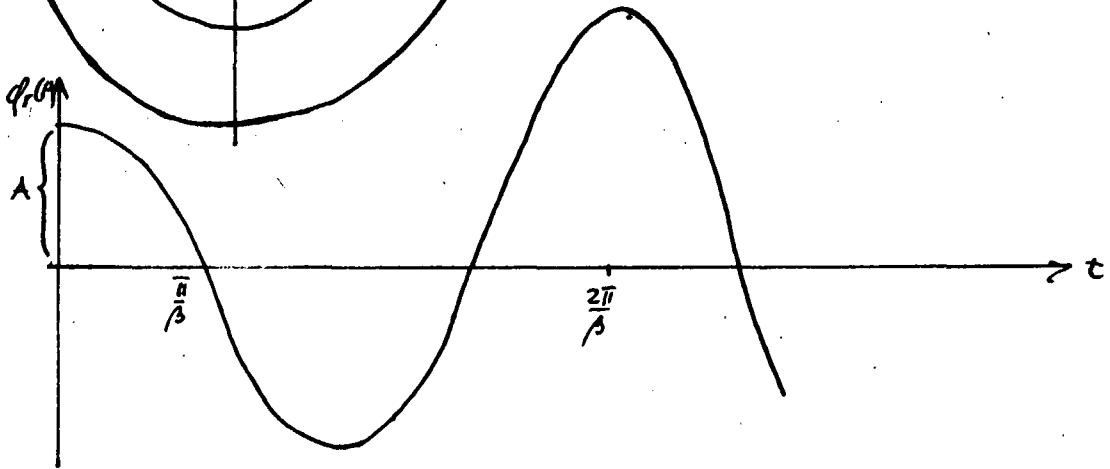


(3) $\alpha > 0$



$$\varphi(t) = Ae^{\alpha t} (\cos \beta t + i \sin \beta t)$$

Amplituden vil vokse eksponentielt, og $\varphi(t)$ vil fjerne sig mere og mere fra nul-punktet.



Den fuldstændige løsning $x = A_1 e^{n_1 t} + A_2 e^{n_2 t} + A_3 e^{n_3 t} + Vt$ fås da ved at kombinere tre løsninger af typen $\varphi(t) = Ae^{\alpha t} (\cos \beta t + i \sin \beta t)$ - de reelle rødder er jo blot specialtilfældet $\beta = 0$ - med udgangstilstanden Vt . Man vil få en sammensat svingning omkring Vt . Det ses, at blot én af rødderne er positive vil x bevæge sig mod ∞ . Ved sammenfaldende rødder bliver situationen speciel og er ikke medregnet her.

Da et stabilt system blev defineret, som et hvor forstyrrelser aftog lineært eller oscillerede med faldende amplitude, vil stabilitetskravene betyde, at de reelle rødder og de komplekse rødders realdel skal være negative.

Efter denne ekskurs vil vi nu gå tilbage til Maxwell og se hvoledes han bestemmer stabilitetskriterierne for Jenkins governor.

Da alle koefficienterne i det karakteristiske polynomium

$$14) MBn^3 + (MY + FB)n^2 + FYn + FG = 0$$

er positive, vil alle reelle rødder være negative, så hvis blot de komplekse rødders realdele er negative vil systemet være stabilt.

Maxwell påstår, uden at gøre nærmere rede for det, at denne betingelse kan udledes af koefficienterne for det kar. pol. således, at alle realdele vil være negative, hvis flg. ulighed er opfyldt:

$$15) \left(\frac{F}{M} + \frac{Y}{B}\right) \frac{Y}{B} - \frac{G}{B} > 0 \quad 3'$$

hvilket svarer til det kriterie, som Routh formaliserede samme år, men Maxwell var tilsyneladende den første, der formulerede disse kriterier.

Maxwell har nu opstillet de matematiske betingelser for at opnå regulering uden off-set, som samtidig er stabil. Herudfra udleder han som regulator-teknisk konsekvens, ved at se på koefficientkriteriet, at trægheden (modstanden) i systemet skal være stor (Y) i forhold til reguleringskraften (hvis koefficient er lig med G).

Generel teori om governors.

Maxwell går nu over til at beskrive en anden type governors, inspireret af Thomsons og Foucault regulatorer, der har det til fælles at centrifugalstykkerne ikke er fastholdt i en konstant afstand til aksen, men kan bevæge sig frit, dog begrænses udslaget med vægte og fjederanordninger (se fig.3 og 4). Dette har bl.a. som praktisk konsekvens, at systemets samlede inertimoment ikke er konstant, men varierer med centrifugalstykkernes udslag, idet inertimomentet, som tidligere omtalt, afhænger af massens (kugle-massen) afstand til rotationsaksen. (vi vil i det følgende benævne centrifugalstykkerne som

'kugler'). Denne type regulatorer beskriver han i energitermer, således at denne teori er af mere generel karakter end gennemgangen af Jenkins.

Det kraftmoment, der tilføjes hovedakslen ved ændring i impulsmomentet (inertimoment gange vinkelhastighed - også kaldet bevægelsesmængdemoment) er:

$$16) \quad \frac{d}{dt} \left(A(\varphi) \frac{d\theta}{dt} \right) = L \quad \textcircled{1} \text{ p.277) .}$$

hvor θ = hovedakslens rotationsvinkel

A = systemets inertimoment

φ = kugleudslaget (vinkeludslag (Foucault), afstand fra akse (Thomson))

L = kraftmomentet, der tilføjes hovedakslen

Kraftmaskine og regulator har som dynamisk system 2 frihedsgrader: rotation (om hoved-aksen) og vinkeludslag, der begge giver bidrag til systemets kinetiske energi. Rotationen involverer hele systemets inertimoment A , og dens bidrag til den samlede kinetiske energi bliver da $\frac{1}{2} A \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2$ (se igen "Alonso-Finn).

Vinkeludslaget involverer kun kuglernes inertimoment $B: \frac{1}{2} B \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2$
Systemets samlede kinetiske energi bliver da

$$17) \quad \frac{1}{2} A \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} B \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2$$

A = hele systemets inertimoment, afhænger af vinkeludslaget φ , idet inertimomentet varierer med massens afstand fra rotationsaksen, og denne afstand ændres jo netop, når kuglerne slår ud. Derfor skriver vi A som en funktion af φ : $A(\varphi)$. Maxwell gør det ikke, hvilket er meget forvirrende, da nogle af hans ligninger fremkommer ved partielle differentieringer, uden at han gør rede for det.

B = kuglernes inertimoment om hængslingspunktet P kan afhænge af udslagsvinklen, hvis kuglerne f.eks. er tilhæftet en muffe på hovedaksen (fig.1).

fig.1

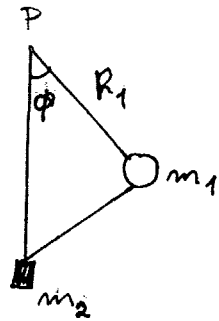
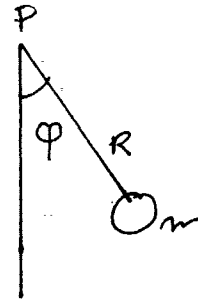


fig.2



Idet m_2 's tilskud til den samlede masse m da er lig $m_2 \sin \varphi$ (tyngdens træk i m_2 projiceret op på m_1 - se 'Porter s.91) Inertimomentet bliver da

$$B(\varphi) = R_1^2 (m_1 + m_2 \sin \varphi)$$

Men B kan også være uafhængig af vinkeludslaget, som det er tilfældet i fig. 2, hvor $B = mR^2$ er en konstant størrelse.

Maxwell gør ikke rede for disse forhold, men siger blot, at B "may also be a function of φ , if the centrifugal piece is complex (p.277).

Idet systemets potentielle energi, som også varierer med φ , sættes lig med P , får Maxwell flg. udtryk for hele systemets energi:

$$18) E = \frac{1}{2} A \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} B \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + P = \int L d\theta \quad (2)$$

idet systemets samlede energi er lig med summen af det arbejde, som kraften L har udført (Alonso Finn)

Ved at differentiere mht. t , og derefter eliminere L ⁴⁾, kommer Maxwell frem til flg. ligning for systemet:

$$19) \frac{d}{dt} \left(B \frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{1}{2} \frac{dB}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{dB}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - \frac{dP}{d\varphi} \quad (4)$$

Igen undersøger Maxwell steady-state, ved at sætte den aktuelle hastighed $\frac{d\theta}{dt}$ lig med en konstant: ω (normalhastighed), og vinkeludslaget $\varphi =$ en konstant. Ved at indsætte disse antagelser i 19, hvilket giver

$$\frac{dP}{d\varphi} = \frac{\omega^2}{2} \frac{dB}{d\varphi}$$

når han ved integration frem til at flg. relation gælder, hvis hastigheden er reguleret tilbage til normalhastigheden:

$$20) \quad P = 1/2 A \omega^2 + \text{konstant} \quad (5)$$

Dvs regulering uden off-set forudsætter, at systemets potentielle energi, ved kugleudslag, øges proportionalt med systemets inertimoment A.

Ved at indsætte denne forudsætning i den samlede energiligning (19), kommer han frem til flg. generelle udtryk for et reguleringsystem uden off-set:

$$21) \quad \frac{d}{dt} \left(B \frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{1}{2} \frac{dB}{d\varphi} \left\{ \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - \omega^2 \right\} + \frac{1}{2} \frac{dB}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \quad (6)$$

En aksel med et centrifugalstykke arrangeret på dette princip, hævder Maxwell, har kun en ligevægtshastighed, dvs. en permanent hastighedsafvigelse kan ikke forekomme. Han fortsætter nu med at undersøge, hvad der sker ved hastighedsafvigelser:

"If there be a small disturbance, the equations for the disturbances θ and φ may be written

$$A \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{dA}{d\varphi} \omega \frac{d\varphi}{dt} = L \quad (7)$$

$$B \frac{d^2\varphi}{dt^2} - \frac{dB}{d\varphi} \omega \frac{d\theta}{dt} = 0 \quad (8) \text{ " (p.277)}$$

Hvad der gemte sig bag dette "may", gjorde Maxwell ikke rede for overhovedet, til trods for at udledningen af de to ligninger absolut ikke er selvindlysende - tværtimod. Det lykkedes således ikke for O. Mayr, som har gennemgået artiklen, at gennemskue opstillingen af den sidste ligning.

Fremkomsten af de to ligninger er især sløret af, at Maxwell her anvender betegnelserne ' φ ' og ' θ ' anderledes end i de andre ligninger, uden at gøre opmærksom på denne nye betydning.

Udredningen af de to ligninger, som er medtaget her fordi den er helt uigennemskuelig ud fra Maxwells artikel, er

udarbejdet på baggrund af Fullers gennemgang af artiklen ("Fuller II, p.231).

Ved at sætte $\varphi = \alpha + \varphi_1(t)$ og $\frac{d\theta}{dt} = \omega + \frac{d\theta_1}{dt}$ ($\dot{\theta} = \omega + \dot{\theta}_1$)

hvor φ_1 og $\frac{d\theta_1}{dt}$ er meget små størrelser og α og ω er konstanter. får man ved indsættelse i ligning 16 (her udtrykt i Newtons mere overskuelige notation):

$$22) L = \frac{d}{dt}(A\dot{\theta}) = A\ddot{\theta} + \frac{dA}{dt}\dot{\theta} = A\ddot{\theta} + \frac{dA}{d\varphi}\dot{\varphi}\dot{\theta}$$

(idet A jo afhænger af φ) følgende udtryk:

$$L = A \frac{d}{dt}(\omega + \dot{\theta}_1) + \frac{dA}{d\varphi} \cdot \frac{d(\alpha + \varphi_1(t))}{dt} (\omega + \dot{\theta}_1) \Leftrightarrow$$

$$L = A\ddot{\theta}_1 + \frac{dA}{d\varphi} \dot{\varphi}_1 (\omega + \dot{\theta}_1) = A\ddot{\theta}_1 + \frac{dA}{d\varphi} \omega \dot{\varphi}_1 + \frac{dA}{d\varphi} \dot{\varphi}_1 \dot{\theta}_1$$

idet α og ω jo er konstanter.

Ved at linearisere, dvs. smide udtrykket $\frac{dA}{d\varphi} \dot{\varphi}_1 \dot{\theta}_1$ væk, idet det er en meget lille størrelse da både $\frac{dA}{d\varphi}$ og $\dot{\theta}_1$ er meget små størrelser, når man frem til følgende ligning

$$23) A\ddot{\theta}_1 + \frac{dA}{d\varphi} \omega \dot{\varphi}_1 = L \quad \Leftrightarrow \quad A \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + \frac{dA}{d\varphi} \omega \frac{d\varphi_1}{dt} = L \quad (7)$$

som svarer til den første af de to ligninger.

Ved at gøre de samme antagelser og indsætte dem i ligning 21, og ved igen at linearisere (smide de meget små størrelser væk), fremkommer den ligning, der svarer til Maxwells ligning 8:

$$24) B \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} - \left(\frac{dA}{d\varphi} \omega \right) \frac{d\theta_1}{dt} = 0 \quad (8)$$

Maxwell har nu med disse ligninger fået beskrevet et generelt dynamisk system, med små hastighedsændringer, som ikke har off-set.

Stabilitet

Maxwell undersøger nu systemets stabilitetsforhold og konstaterer, at det beskrevne system vil foretage en oscillerende bevægelse med en fast amplitude - altså være ustabil.

Af 23 og 24 kan det karakteristiske polynomium opstilles⁵⁾:

$$25) \quad m(n^2 + (\frac{dA}{d\varphi} \omega)^2 \frac{1}{AB}) = 0$$

som ses at have rødderne $n = 0$ eller $n = \pm \sqrt{(\frac{dA}{d\varphi} \omega)^2 (-\frac{1}{AB})} = \pm \frac{dA}{d\varphi} \omega \sqrt{-\frac{1}{AB}} = \pm i (\frac{dA}{d\varphi} \cdot \omega \cdot AB^{-\frac{1}{2}})$

Da de komplekse rødders realdel er = 0, vil systemet foretage en svingende bevægelse med fast amplitude.

Den komplekse del = $\frac{dA}{d\varphi} \omega AB^{-\frac{1}{2}}$ udtrykker omløbshastigheden.

Denne sætter Maxwell = $\frac{dA}{d\varphi} AB^{-\frac{1}{2}}$, men vi (og Fuller II) mener, at det må være en forglemmelse, at Maxwell ikke har ω med.

For at gøre systemet stabilt, det vil på 'matematisk'sige at operere på ligningssystemet således, at rødderne i det tilsvarende karakteristiske pol. bliver negative, tilføjer Maxwell forskellige størrelser og opnår flg. ligningssystem: (idet vi nu vender tilbage til Maxwells notation)

$$26) \quad A \frac{d^2\varphi}{dt^2} + X \frac{d\varphi}{dt} + K \frac{d\varphi}{dt} + G\varphi = L \quad (9)$$

$$27) \quad B \frac{d^2\varphi}{dt^2} + Y \frac{d\varphi}{dt} - K \frac{d\varphi}{dt} = 0 \quad (10)$$

idet $X \frac{d\varphi}{dt}$ = modstand, der afhænger af hovedaksens hast.

$G\varphi$ = modstand tilføjet hovedaksen, afhængig af kugleudslaget

$Y \frac{d\varphi}{dt}$ = modstande, der afhænger af kuglernes udslags hast. (f.eks. modstanden fra en dashpot)

og endelig har han sat $\frac{dA}{d\varphi} \omega = K$ fordi det er en konstant størrelse ved små hast.afvigelser.

Ud fra disse reviderede ligninger opstiller han igen det karakteristiske polynomium⁶⁾:

$$28) \quad ABn^3 + (AY + BX)n^2 + (XY + K^2)n + KG = 0 \quad (11)$$

og opstiller på tilsvarende måde, som i behandlingen af Jenkins governor, kriterierne for stabilitet:

$$29) \left(\frac{X}{A} + \frac{Y}{B} \right) (XY + K^2) > GK \quad (12)$$

Jenkin/Thomson - regulatoren (fig.6)

For at beskrive denne udbyggede regulator, kræves der, hævder Maxwell, nu 3 ligninger, hvilket giver et karakteristisk pol. af 5.orden, som Maxwell erkender, at han ikke er i stand til at bestemme de tilstrækkelige stabilitetskriterier for.

Resten af artiklen handler om Siemens "Liquid Governor", og differentialgearing, som vi ikke vil behandle her.

Sammenfatning

Et gennemgående træk i artiklen er, som tidligere nævnt, at de behandlede regulatorer ikke er alment kendte og - benyttede og så mangelfuldt beskrevet, at de ikke kan rekonstrueres af udenforstående.

Der sker gennem artiklen et skred fra det forholdsvis konkrete udgangspunkt i problematikken omkring off-set og stabilitet, eksemplificeret med Jenkins governor, hen mod en stadig større generalisering, med større vægt på stabilitetsproblemer generelt, hvilket interesserede Maxwell fra hans arbejde med astronomi. Det er en generalisering som måske gør artiklen mere interessant for videnskabsmændene i kredsen om Royal Society, men som gør den mindre anvendelig i konkrete reguleringssammenhænge. De konstruktionsmæssige konsekvenser, man kan finde i denne artikel, er yderst sparsomme. At der skulle være en forholdsvis stor modstand

i systemet, vidste man fra det konkrete arbejde med regulatorer. Desuden ville en udenforstående ingeniør, slet ikke være i stand til at læse og forstå artiklen, på grund af dens utilgængelige form.

Maxwells bevæggrunde for at skrive denne artikel var ikke, at regulatorer spillede en væsentlig rolle i samtidens industri, selv om det naturligvis kan have været en indirekte tilskyndelse. Han kendte til den udbredte brug af regulatorer, hvilket bl.a. kommer til udtryk i, at han henvender sig til ingeniører. Hans egentlige motivation var interesse for stabilitetsproblemer og det fænomen, at han løb ind i konkrete reguleringsproblemer i forbindelse med andet videnskabeligt arbejde. Regulatorer blev således for Maxwell en konkret mekanisk eksemplificering af de stabilitetsbetingelser, han havde udviklet i forbindelse med Saturns Ringe.

"On governors" kan således nærmest karakteriseres som et biprodukt af hans 'egentlige' videnskabelige arbejde, men alligevel er det væsentlige resultater, han når frem til:

- 1) han lineariserer regulatorens bevægelsesligninger direkte (hvad Airy ikke havde været i stand til)
- 2) han formulerer stabilitetskriterier for 3.ordens systemer, udtrykt ved koefficienterne i det karakteristiske pol.
- 3) han henleder opmærksomheden på problemet med at finde tilsvarende stabilitetskriterier for systemer af højere orden.
- 4) hans eksempler viser, at man kan eliminere off-set, uden at systemet bliver ustabil.
- 5) hans artikel er den første systematiske undersøgelse af reguleringsdynamik.

Når artiklen, disse resultater til trods, alligevel stort set blev ignoreret af samtiden, skyldes det den indforståede form.

Denne indforståethed kommer bl.a. til udtryk i, at Maxwell stort set ikke gør rede for, hvordan han kommer fra den ene ligning til den næste - overgange som absolut ikke er selv-

indlysende.

Om den direkte linearisering , som netop skulle være det, der først og fremmest bringer denne artikel videre i forhold til Airy, hedder det bl.a.:

"The force acting on B to turn it round is therefore

$$F \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - C'$$

and if we remember that the velocity varies within very narrow limits, we may Write the expression:

$$F \left(\frac{dx}{dt} - V_1 \right)$$

where F is a new constant, and V₁ is the lowest limit of velocity within the governor will act." (p.275)

Andre kommentarer eller forklaringer er der ikke knyttet til den nye lineariseringsteknik. Også fremkomsten af ligning 7 og 8 (p.277) er, som vist, baseret på lineariseringer, som Maxwell ikke nævner et ord om.

Havde man derimod haft kendskab til artiklen om Saturns ringe, ville man have haft en chance. Her er Maxwell klar og præcis, og han gør nøje rede for sine metoder. Det kunstgreb, som er afgørende for hans lineariseringer: at sætte de variable lig med en konstant + en lille afvigelse, gør han klart rede for her;

Prob. II. To find the equations of the motion when slightly disturbed.

Let $r=r_0$, $\theta=\omega t$ and $\phi=\phi_0$ in the case of uniform motion, and let

$$\begin{aligned} r &= r_0 + r_1, \\ \theta &= \omega t + \theta_1, \\ \phi &= \phi_0 + \phi_1, \end{aligned}$$

when the motion is slightly disturbed, where r_1 , θ_1 , and ϕ_1 are to be treated as small quantities of the first order, and their powers and products are to be

neglected. We may expand $\frac{dV}{dr}$ and $\frac{dV}{d\phi}$ by Taylor's Theorem,

En fuld forståelse af artiklen kræver en vis konsensus omkring disse metoder og notationer. En konsensus som dengang kun eksisterede i snævre videnskabelige kredse, hvor man diskuterede himmelmekanik og stabilitet.

Otto Mayr har gennemgået den britiske, franske, tyske og amerikanske ingeniørlitteratur op til 1.verdenskrig uden - på ganske få undtagelser nær - at finde henvisninger til artiklen. Artiklen var ellers offentligt tilgængelig. I

1868 blev den trykt i "Proceedings of the Royal Society", samme år blev den optrykt i "Philosophical Magazin" og i 1890 blev den genoptrykt i Maxwells samling af "Scientific Papers".

Artiklen var altså uden betydning for den samtidige teknologiske udvikling, til trods for det teknologisk relevante emne.

Artiklens betydning for matematikken

Til gengæld fik artiklen en vis betydning for matematikken. Det matematiske problem, som Maxwell rejser i artiklen: at give en matematisk bestemmelse af stabilitetskriterier for dynamiske systemer af højere orden end 3, fik E.J.Routh til at arbejde videre med - og løse problemet.

Emnet for Adams Prize i 1877, som Maxwell, sammen med tre andre medlemmer af pris-komiteen, formulerede, var: "The Criterion of Dynamic Stability".

Som svar på denne opgave præsenterede Routh en endelig løsning på problemet i sin essay: "On the Stability of a Given State of Motion". Denne essay gav ham prisen - og en plads i matematikkens historie.

Præsentation af Vyshnegradskii

Ivan Alekseëvich Vyshnegradskii, født i 1831 i Rusland, tog eksamen som tyveårig ved fakultetet for matematik og fysik på St. Petersborgs Central Pædagogiske Institut, og startede straks efter som matematik lærer ved St. Petersborgs Militær Skole. Han tog embedseksamen ved Universitet i St. Petersborg som 23 årig og begyndte som matematikinstruktor ved tekniske kurser på Mikhalovsky Artilleri Akademiet. Denne institution sendte ham på en toårig studierejse rundt i Europa (Tyskland, Frankrig, Belgien og England, 1860-62) og udnævnte ham ved sin tilbagekomst til professor i anvendt mekanik. I 1875 blev Vyshnegradskii direktør for den første skole for mekaniske ingeniører i Rusland og senere iøvrigt også finansminister.

Vyshnegradskii beskrives som både en enestående teoretiker og en begavet praktiker, der var ansvarlig for mange fabriksrekonstruktioner og for bygning af jernbanestrækninger, og han var desuden i en periode artilleriets specialist i mekanik og ingeniørspørgsmål. Hans vigtigste videnskabelige indsats er indenfor automatisk kontrolteori, hvor artiklen "Ueber directwirkende Regulatoren" fra 1877 er centralt placeret. (Grigorian 1970, i Dictionary of scientific Biography)

Baggrunden for "Ueber directwirkenden Regulatoren"

Vyshnegradskiis interesse for matematik og mekanik og hans placering i det russiske uddannelsessystem, som først professor i anvendt ved et artilleri akademi og siden direktør for den første russiske uddannelsesinstitution for mekaniske ingeniører, gør det sandsynligt, at hans motivation for at beskæftige sig teoretisk med regulering og stabilitetsforhold var af teknologisk oprindelse.

Hans studierejse har bragt ham i kontakt med det europæiske forskermiljø. På kontinentet havde J.Luders i 1861 analyseret steady-state tilstanden for simple regulatorer og fundet et udtryk for "irregularitetsgraden". Han forsøgte senere (1865) at beskrive de dynamiske forhold, men kun-

ne kun opstille ændringerne i den kinetiske energi. (Bennett 1978).

L.Kargl, senere professor ved Zürichs polytekniske læreanstalt, opstillede i 1871 differentiaalligninger for Watts og Porters regulatorer. Han medregnede gnidningsmodstand i regualtoeren og forbindelsesstængerne til dampspjældet og var ikke istand til at finde den analytiske løsning til ligningerne. (Bennett 1978). Ligesom Airy betragtede han systemet dynamisk og kunne ikke finde løsninger.

Gennemgang af Vyshnegradskiis artikel*

Vyshnegradskii ønsker at beskrive den bevægelse, en kraftmaskines regulator antager når ligevægten mellem den bevægende kraft og belastningen forskydes.

Forudsætninger (p.95-98)

Han behandler først problemet generelt, men begrænser sig til systemer, der opfylder følgende betingelser:

- (1) Maskinen har en roterende bevægelse og belastningens "arm" (Q) er konstant og intensiteten af den bevægende kraft kun ændres som følge af regulatorens aktivitet.
- (2) Regulatoren er direkte virkende, dvs at maskinens hastighedsændringer overføres lineært til den mekanisme, der påvirker den bevægende krafts intensitet. (På dampmaskinen er denne mekanisme dampspjældet.)

Dette svarer til en proportionalregulator.

Disse to første betingelser var opfyldt af langt de fleste datidige centrifugalregulatorer. (fodnote p.97)

- (3) Regulatoren er udstyret med en katarakt, dvs en indretning, der dæmper regulatormuffens bevægelse med en kraft afhængig af muffens hastighed. Katarakten var oftest en oliedæmper.

Udover disse generelle betingelser begrænser Vyshnegradskii sig også til kun at beskæftige sig med "velfungerende" regulatorer, der karakteriseres ved:

- (1) at den relative forskel mellem maskinens normalhastig-

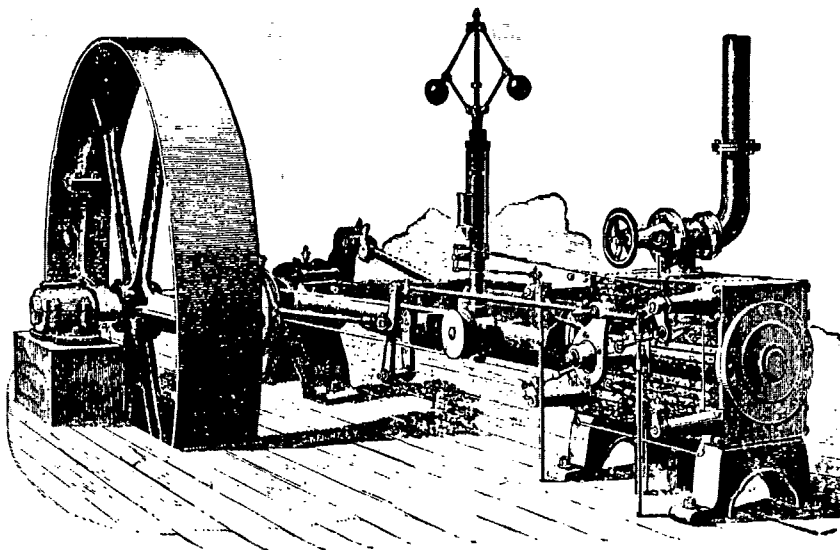
* Denne gennemgang er summarisk og sine steder vanskelig at forstå, men metoden konkretiseres i afsnittet om Porters regulator, hvor alle mellemregninger er medtaget (her p.90). Iøvrigt refererer alle sidehenvisninger i dette afsnit til Vyshnegradskiis artikel, medmindre de starter med et "her", der henviser til denne rapport.

hed (ω_0) og aktuelle hastighed (ω) er lille. ($\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ er lille).

(2) at muffens udslag (u) er lille.

(3) at muffens hastighed ($\frac{du}{dt}$) ved dette udslag er lille.

Disse betingelser gør at Vyshnegradskii i den senere opstilling og omformning af bevægelsesligninger kan tillade sig at linearisere.



Opstilling af differentiallyigning (p.99-105)

Vyshnegradskii opstiller nu (§4) en differentiallyigning, der beskriver muffens bevægelse, idet alle på regulatoren virkende kræfter og modstande er projiceret over på muffen. Kraften på muffen (masse · acceleration) er lig summen af alle enkeltkræfterne, her tre:

$$(A + Bu) \frac{d^2u}{dt^2} = AKg \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - A\lambda(R' + R'') - AM \frac{du}{dt}$$

Den samlede bevægelige regulatormasse skrives som en stor konstant del A og en lille del B, der er afhængig af u . Da u er lille betragtes afhængigheden som lineær.

A : den del af regulatorens bevægelige masse, der er uafhængig af muffens stilling (og dermed regulatorudslaget) overført til muffen.

Bu : tilsvarende for den del af massen
der er afhængig af muffens stilling.

$\frac{d^2u}{dt^2}$: muffens acceleration.

$AKg \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$: de kræfter maskinen påvirker regulatoren med,
idet ω : aktuel vinkelhastighed

ω_0 : normal ligevægts vinkelhastighed

ω_n : ny ligevægts vinkelhastighed

g : tyngdens acceleration

K : en dimensionsløs konstant, regulato-
rens bevægelighedsgrad

$A\lambda(R'+R'')$: den modstand, der er i regulatorens hængsler
og led ($A\lambda R'$) og i forbindelsesstængerne til
dampmaskinens kraftregulering ($A\lambda R''$), idet

λ : ± 1 , afhængig af retningen af muffens
bevægelse

$AM \frac{du}{dt}$: modstand mod muffens bevægelse bibragt af ka-
tarakt, idet

M : en konstant, kataraktens "kraft"
(dimension ssv T^{-1})

I opstillingen af højresiden, dvs summen af alle kræfterne,
er der argumenteret i hvert tilfælde for udeladelsen af de
led, der indeholdt Bu . (linearisering)

Ved substitution, rækkeudvikling, linearisering og differen-
tiering omformes udtrykket. Bl.a. indføres bevægelseslig-
ningen for dampmaskinen

$$I \frac{d\omega}{dt} = (p-Q)g - Lu \quad (\text{lign. (4) p.103})$$

og tilsidst fåes en differentiaalligning i én variabel u af-
hængig af tiden t :

$$\frac{d^3u}{dt^3} + M \frac{d^2u}{dt^2} + N \frac{du}{dt} + \frac{KgL}{I\omega_0} u = \frac{Kg}{I\omega_0} (p-Q)g \quad (\text{lign. (5) p.104})$$

N : regulatorens stabilitetsgrad = $\frac{Kg}{u} \frac{\omega_n - \omega_0}{\omega_0}$ (dim. T^{-2})

L : regulatorens "kraft", en konstant, der afhænger af
transmissionen fra muffen via forbindelsesstænger til
dampspjæld, idet $Lu = (p-F)g$, hvor højresiden er æn-

dringen i drejningsmomentet (kraftmomentet) som følge af muffens bevægelse.

I : maskinens inertimoment, reduceret til hovedaksen

p : maskinens normalkraft

F : den ændrede maskinkraft

Q : den ændrede belastning (NB Q=F i steady state, dim.kraft)

Betydningen af de indførte konstanter, som Vyshnegradskii navngiver, diskuteres, især:

K : regulatorens bevægelighedsgrad

$\frac{Kg}{R+R'}$: regulatorens følsomhedsgrad

L : regulatorens kraft

N : regulatorens stabilitetsgrad

KL: regulatorens "energi"

M : kataraktens "kraft"

Løsningens stabilitet (p.105-107)

Løsningerne til den generelle ligning opskrives, og deres stabilitet diskuteres:

$$\frac{d^3 u}{dt^3} + M \frac{d^2 u}{dt^2} + N \frac{du}{dt} + \frac{KgL}{I\omega_0} u = \frac{Kg}{I\omega_0} (p-Q)q$$

(1) Løsningen til den konstante ligning $u(t)=k$ findes:

$$u = k \Rightarrow \frac{du}{dt} = \frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{d^3 u}{dt^3} = 0$$

$$\frac{KgL}{I\omega_0} k = \frac{Kg}{I\omega_0} (p-Q)q$$

$$k = u = \frac{(p-Q)q}{L}$$

(2) Den fuldstændige løsning til differentiallyingningen (den konstante løsn. + løsn. til den homogene ligning) er da:

$$u = \frac{(p-Q)q}{L} + C e^{\lambda_1 t} + D e^{\lambda_2 t} + E e^{\lambda_3 t} \quad (\text{lign. (6) p.106})$$

hvor λ_1, λ_2 og λ_3 er rødderne i det karakteristiske polynomium for den homogene ligning:

$$\lambda^3 + M\lambda^2 + N\lambda + \frac{KLg}{I\omega_0} = 0 \quad (\text{lign. (1) p.106})$$

Da koefficienterne i det karakteristiske polynomium er positive, må rødderne λ_1, λ_2 og λ_3 , hvis de er reelle, være negative, og løsningen vil være stabil og bevæge sig hen mod ligevægtstilstanden $\lim u = \frac{(p-Q)q}{L}$

Hvis to af rødderne er komplekse fåes:

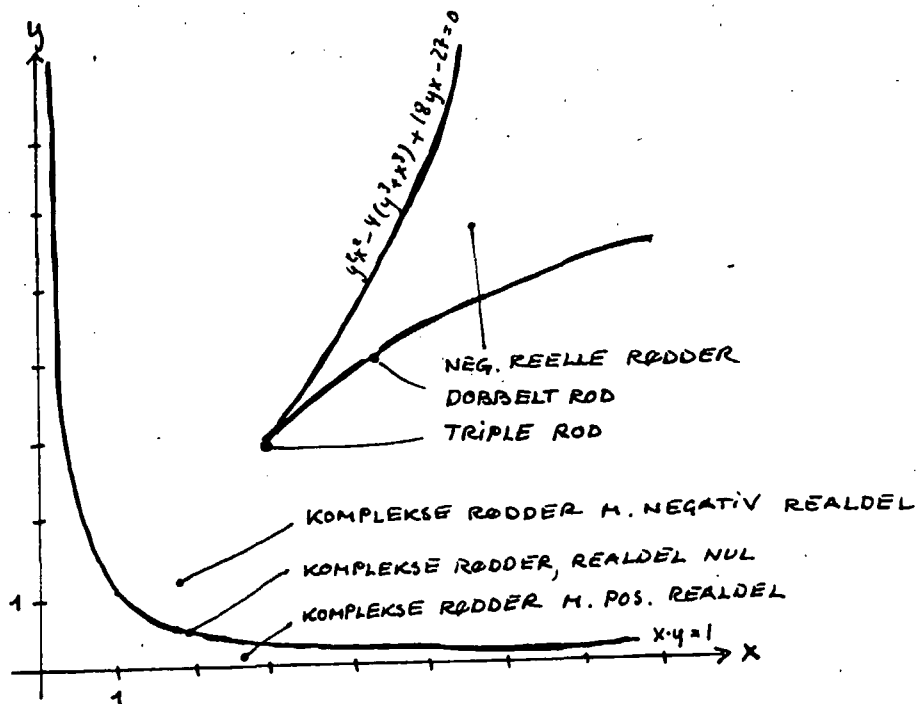
$$u = \frac{(p-Q)q}{L} + C e^{\lambda_1 t} + e^{\alpha t} (D \cos \beta t + E \sin \beta t) \quad *$$

idet $\lambda_2 = \alpha + \beta i$ og $\lambda_3 = \alpha - \beta i$ og her vil betingelsen for at løsningen er stabil være, at de komplekse rødders realdel også er negativ.

For at kunne afgøre under hvilke betingelser det karakteristiske polynomium har komplekse rødder (p.107-112), og i særdeleshed hvornår de komplekse rødder har negativ realdel, ændres det karakteristiske polynomium ved valg af passende konstanter til:

$$\varphi^3 + x\varphi^2 + y\varphi + 1 = 0 \quad (\text{lign. (10) p.108})$$

og betingelserne illustreres således:



* Her er $D=D+E$ og $E=D-E$, hvilket jo er tilladt da de er arbitrære konstanter.

Betingelsen for stabilitet er da at $x \cdot y > 1$. X og y kaldes i senere tysk litteratur for Vyshnegradskii parametrene. (Bennett 1978 p.72). Tilbageført til det oprindelige karakteristiske polynomium bliver stabilitetsbetingelsen (at de komplekse rødders realdel er negativ) :

$$N M - \frac{KLg}{I \omega_0} > 0 \quad (a_2 a_1 > a_3 a_0)$$

Konklusioner (p.112)

På baggrund af det foranstående når Vyshnegradskii til sine vigtige konklusioner:

- (1) Den astatiske regulator (stabilitetsgrad $N = \frac{\omega_n - \omega_0}{\omega_0} \frac{Kg}{u}$ = 0, hvilket svarer til at off-set = $\frac{\omega_n - \omega_0}{\omega_0} = 0$) vil altid være ustabil. $0 \cdot M - \frac{KLg}{I} < 0$.
- (2) En statisk regulator ($N \neq 0$) vil uden katarakt ($M = 0$) altid være ustabil.
- (3) For en given statisk regulator vil man kunne konstruere en katarakt, der gør den stabil.

Off-set (p.107)

I det følgende diskuteres stabiliteten yderligere. Da muligheden for at konstruere en proportional regulator uden off-set, dvs en astatisk proportionalregulator, er udelukket, diskuteres hvordan off-set kan minimeres.

Off-set er den relative forskel mellem gammel (ω_0) og ny (ω_n) ligevægtshastighed:

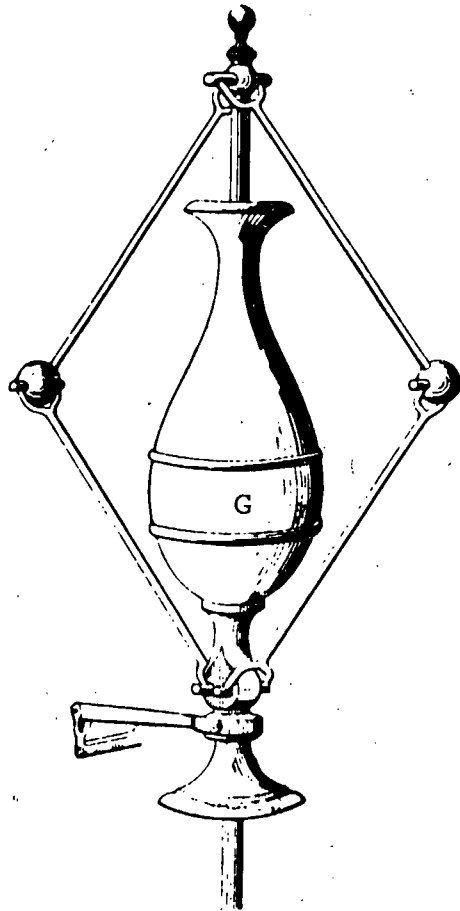
$$\text{off-set} : \frac{\omega_n - \omega_0}{\omega_0} = \frac{N}{K} \frac{mE}{Lg\omega_0}$$

(fra lign.(1) p.101 idet ændringen i maskinens effekt $mE = (p-Q)g\omega_0$ svarer til Vyshnegradskiis 75mPS p.115-116)

Det ses at off-set mindskes med: lille N, dvs når regulatoren nærmer sig en astatisk regulator, og jo mindre ændringen i maskinens arbejde mE er, og jo større maskinens vinkelhastighed (ω_0) er, og jo større regulatorens energi KL er.

Et eksempel, "Porters regulator"

Vyshnegradskii eksemplificerer nu den generelle teori, ved at gennemregne en af datidens mest anvendte regulatorer, Porters regulator, der er karakteriseret ved at have en stor modvægt (G) på muffen. Gennengangen her er nærmest en disposition for den fuldstændige gennemregning, her p.90.



Først beskrives regulatorens opbygning, og dernæst opstilles ligningen for en ligevægtstilstand, hvor regulatoraksen roterer med en jævn hastighed ($q\omega_0$), og kuglernes udslag er konstant, dvs de resulterende kræfter på muffen er nul (tyngdekraft = centrifugalkraft):

$$(q\omega_0)^2 = \frac{P+G}{P} \frac{2g}{h} \quad (\text{se Ligevægtstilstand her p.90-92})$$

Et udtryk for en ny ligevægtstilstand opstilles, og forholdet mellem de to ligevægtshastigheder bliver:

$$\frac{\omega_n - \omega_0}{\omega_0} = \frac{u}{2h} \quad (\text{se Ny ligevægtstilstand her p.92-93})$$

På baggrund af disse to statiske tilstande beskrives (§18) den dynamiske situation, hvor systemet bevæger sig fra udgangstilstanden ($q\omega_0$) mod den ny ligevægtshastighed ($q\omega_u$). Da tilvækst i systemets kinetiske energi er lig summen af det udførte arbejde fåes ved substitution, rækkeudvikling, linearisering og differentiering differentiaalligningen fra det generelle afsnit (her p.82):

$$\frac{d^3 u}{dt^3} + M \frac{d^2 u}{dt^2} + N \frac{du}{dt} + Kg \frac{L}{I\omega_0} u = Kg \frac{(p-Q)g}{I\omega_0} \quad (\text{p.123-24})$$

men med en konkret karakteristik af konstanterne:

$$K = \frac{2(P+G)}{G + \frac{P}{2(1 - \frac{h^2}{4a^2})}}$$

$$N = \frac{P+G}{G + \frac{P}{2(1 - \frac{h^2}{4a^2})}} \frac{g}{h} \quad (\text{se På vej til...her p.94-99})$$

$$M = \frac{S}{G + \frac{P}{2(1 - \frac{h^2}{4a^2})}}$$

Stabilitet - Porter

Herefter omsættes stabilitetskravet fra det generelle afsnit

$$N M - \frac{KLg}{I\omega_0} > 0$$

til det konkrete tilfælde, som et krav til katarakten, idet

$$S > \frac{2h}{I\omega_0} \left(G + \frac{P}{2(1 - \frac{h^2}{4a^2})} \right)$$

hvor S indgår i udtrykket for kataraktens modstand reduceret til muffen: $\frac{S}{g} \frac{du}{dt}$ og har dimensionen kraft/tid.

Off-set - Porter

I det generelle udtryk for off-set

$$\frac{\omega_u - \omega_0}{\omega_0} = \frac{N}{K} \frac{mE}{Lg\omega_0}$$

indsættes værdierne for N og K dvs $\frac{N}{K} = \frac{g}{2h}$

$$\frac{\omega_u - \omega_0}{\omega_0} = \frac{mE}{L\omega_0 2h}$$

og det ses, at off-set, med en given ændring af maskinens effekt, bliver lille når regulatorens kraft L er stor, og regulatorens højde (h) er stor, og når maskinens vinkelhastighed (ω_0) er stor. Det ses også at off-set er uafhængig af kuglernes og modvægtens vægt.

Konstruktionsanvisning - Porter (§§18,19.1&19.2)

Herefter diskuterer Vyshnegradskii de enkelte konstanter sammenhæng med regulatorens konstruktion. Han foretager nogle meget detaljerede gennemregninger af regulatorens følsomhedsgrad, bevægelighedsgrad, "stabilitet" og kataraktens "kraft" samt normalhastigheden. Som et eksempel på disse udregninger gennemgås på side 99 V!^S undersøgelse af bevægelighedsgraden. Vyshnegradskii slutter med at opskrive hvilke størrelser, man på forhånd må kende ved konstruktion af en stabil regulator, eller ved vurdering af en given regulators stabilitet:

- (1) maskinens normale vinkelhastighed, ω_0
- (2) den største belastningsændring, som sandsynligvis kan forekomme under maskinens arbejde, mE ,
- (3) den forlangte regulatorfølsomhedsgrad $k = \frac{\omega_0}{\omega' - \omega_0}$, hvor ω' er den hastighed, hvor regulatormuffen begynder at bevæge sig,
- (4) den forlangte regelmæssighedsgrad $i = \frac{\omega_0}{\lim \omega - \omega_0}$, hvor $\lim \omega$ er den hastighed, som maskinen nærmer sig ved den største sandsynlige belastningsændring.

Med disse størrelser kendt kan man med nedenstående formelapparat beregne/konstruere regulatoren.

$$(1) \frac{g^2 \omega_0^2}{g} = \frac{1+z}{1-z} \frac{2}{h}, \text{ hvor } z = \frac{G}{2P+G} \quad (\text{lign. (B) p.121})$$

dvs z er modvægtens andel af den samlede masse.

$$(2) \frac{1}{k} = \frac{2f\delta}{h \sin} + \frac{R_2}{T(1+z)} = \text{ufølsomhedsgraden}$$

$$(3) \frac{1}{i} = \frac{mE}{2Lh} = \text{uregelmæssighedsgraden}$$

$$(4) S > \frac{Lh}{I\omega_0} T(\beta + (2-\beta)z), \text{ der angiver kravene til kataraktens egenskaber.}$$

Man skal dog uafhængigt af disse betingelser sørge for, at muffens udslag (u) er meget lille. Der angives retningslinier for hvordan dette opnåes.

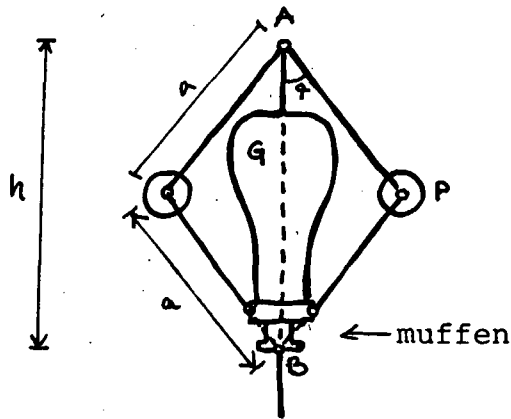
Generel opsamling og konklusion (p.132)

Vyshnegradskii opsummerer artiklens vigtigste teoretiske og anvendelsesorienterede resultater således:

- (1) En katarakt er en nødvendig bestanddel af en velfungerende proportionalregulator, og den har ingen skadelig virkning på regulatorens følsomhedsgrad eller regelmæssighedsgrad.
- (2) Selv med en katarakt kan en astatisk proportionalregulator aldrig fungere.
- (3) Regulatorens regelmæssighedsgrad er meget afhængig af de modstandsændringer maskinen skal kunne overvinde.
- (4) De i artiklen opstillede teoretiske størrelser: regulatorens følsomhedsgrad, "energi" og stabilitet har stor indflydelse på regulatorens virkemåde, og da der er redegjort for begrebernes sammenhæng med regulatorens konstruktion, er de nyttige ved bedømmelse af dens egenskaber.

Et gennemregnet eksempel - Porters regulator

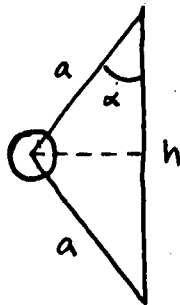
Regulatorens opbygning



P = tyngdekraften virkende på en kugle
P/g = en kugles masse
G = tyngdekraften virkende på modvægten
G/g = modvægtens masse

Det forudsættes at:

- (1) stængernes masse er meget lille i forhold til P/g og G/g , og der ses foreløbigt bort derfra,
- (2) stængernes tilhæftning under modvægten G betragtes som værende på selve regulator akslen og
- (3) regulatoren er forsynet med en katarakt.



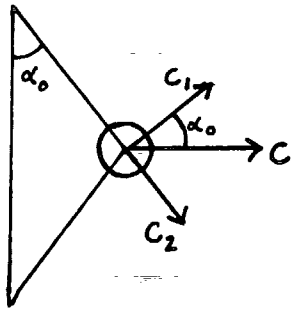
$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{1}{2}h/a \\ h &= 2a \cos \alpha \\ \sin \alpha &= \frac{r}{a} \\ r &= a \sin \alpha \end{aligned}$$

Ligevægtstilstand

I ligevægtstilstanden roterer maskinens aksel med en jævn hastighed (ω_0) og regulatorakslens med hastigheden $q\omega_0$. Kuglernes udslag er konstant α_0 og regulatorakslens højde er h. Den resulterende kraft (af centrifugalkraft og tyngdekraft) på kuglerne er nul.

(1) Centrifugalkraft: $C = F_N = m \omega^2 R$, her

$$C = P/g(q\omega_0)^2 a \cdot \sin \alpha_0$$

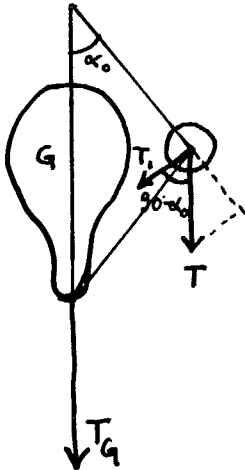


Centrifugalkraften opløses i komponenter C_1 og C_2 hvor C_2 ingen indflydelse har på kuglernes bevægelse, da den blot overføres som et træk i armens tilhæftning til regulatorakslen.

$$C_1: \cos \alpha_0 = C_1/C$$

$$C_1 = P/g(q\omega_0)^2 a \sin \alpha_0 \cos \alpha_0$$

(2) Tyngdekraft: $T = m \cdot g$, her $T = P/g \cdot g = P$

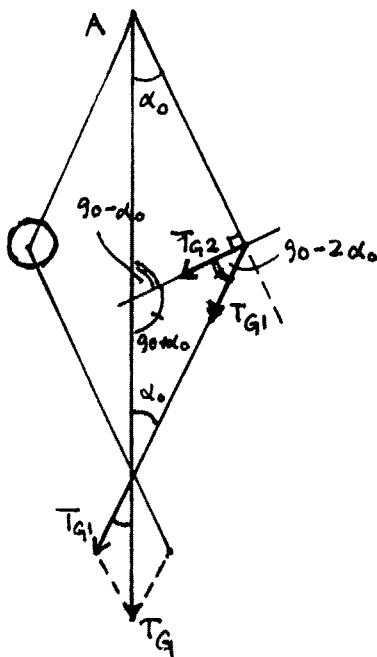


Tyngdens træk i kuglerne opløses ligeledes, og kun den komponent (T_1), der indflydelse på systemets bevægelse, findes.

$$T_1: \cos(90 - \alpha_0) = T_1/T$$

$$T_1 = P \sin \alpha_0$$

Tyngdens træk i modvægten opløses, og den komponent,



der har indflydelse på én kugles bevægelse beregnes. Først opløses T_G i kræfter, der trækker i forbindelsesstængerne fra kugle til mufte. (T_{G1})

$$\cos \alpha_0 = \frac{\frac{1}{2} T_G}{T_{G1}}$$

$$T_{G1} = \frac{T_G}{2 \cos \alpha_0}$$

T_{G1} forskydes til én kugle og opløses, og den komponent (T_{G2}), der

ikke modsvarer af et træk fra hængslet ved A, men som har indflydelse på kuglens bevægelse findes.

$$\cos(90-2\alpha_0) = \frac{T_{G2}}{T_{G1}} = \frac{T_{G2} 2\cos\alpha_0}{T_G}$$

$$\begin{aligned} T_{G2} &= \frac{\cos(90-2\alpha_0) T_G}{2\cos\alpha_0} \\ &= \frac{\sin 2\alpha_0 T_G}{2\cos\alpha_0} \\ &= \frac{2\sin\alpha_0 \cos\alpha_0 T_G}{2\cos\alpha_0} \end{aligned}$$

$$T_{G2} = \sin\alpha_0 T_G = \sin\alpha_0 G$$

Tyngdekraftens træk i modvægten bidrager altså på hver af kuglerne med en komponent $T_{G2} = \sin\alpha_0 G$ til kuglernes bevægelse.

Summen af de kræfter der virker på kuglerne i ligevægtstilstanden bliver da (idet T_1 og T_{G2} er modsatrettede C_1): $C_1 - T_1 - T_{G2} = 0$

$$P/g(q\omega_0)^2 \sin\alpha_0 \cos\alpha_0 = P \sin\alpha_0 + G \sin\alpha_0$$

$$(q\omega_0)^2 = (P + G)g/\frac{1}{2}h P$$

$$\boxed{(q\omega_0)^2 = (P + G)2g/P h}$$

Ny ligevægtstilstand

Vi ønsker nu at udtrykke en nyligevægtshastighed (ω_u) ved den oprindelige (ω_0).

α = udslagsvinkel i ny ligevægtstilstand

u = ændring i afstanden AB

$$h - u = 2a \cos\alpha$$

$$q^2 \omega_u^2 = \frac{P+G}{P} \frac{2g}{h-u}$$

$$q \omega_u = \sqrt{\frac{(P+G)2g}{P h}} \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u}{h}}}$$

l.r.udv. Udtrykket rækkeudvikles efter den eneste variable, u (Taylor for $(1+x)^{-\frac{1}{2}} = 1-\frac{1}{2}x+\dots$) og alle højere ordens led udelukkes.

$$q\omega_u = \sqrt{\frac{(P+G) \cdot 2g}{P \cdot h}} \left(1 + \frac{u}{2h}\right) = q\omega_0 \left(1 + \frac{u}{2h}\right)$$

$$\omega_u = \omega_0 \left(1 + \frac{u}{2h}\right)$$

$$\boxed{\frac{\omega_u - \omega_0}{\omega_0} = \frac{u}{2h}}$$
, hvilket udtrykker den relative hastigheds-

forskell mellem de to ligevægtstilstande.

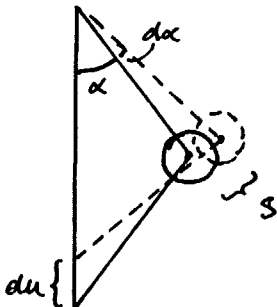
På vej til den ny ligevægtstilstand

Hvis man forudsætter, at der til flytning af muffen vejen u svarer en vinkelhastighed ω , som ikke er en ligevægts-hastighed, vil det arbejde, der flytter muffen et lille stykke, du , være lig tilvæksten i systemets kinetiske energi.

Først kinetisk energi

Tilvækst i kinetisk energi: $dE_{kin} = d(\frac{1}{2}mv^2)$

$$(1) \text{ kuglerne: } d\left(\frac{1}{2} \cdot 2\frac{P}{g} \left(\frac{s}{dt}\right)^2\right)$$



$s = \text{vejen} = a \sin d\alpha$, men
for små vinkler er

$$\sin x \approx x, \text{ dvs } s = a \cdot d\alpha$$

$$\text{Begge kugler: } dE_{kin} = d\left(\frac{P}{g} \left(\frac{a d\alpha}{dt}\right)^2\right)$$

$$(2) \text{ modvægten: } dE_{kin} = d\left(\frac{1}{2} \frac{G}{g} \left(\frac{du}{dt}\right)^2\right)$$

Samlet tilvækst i kinetisk energi:

$$dE_{kin.tot} = d\left(\frac{G}{2g} \left(\frac{du}{dt}\right)^2 + \frac{P}{g} \left(\frac{a d\alpha}{dt}\right)^2\right)$$

Vinkeltilvæksten $d\alpha$ udtrykkes nu ved u :

$$h-u = 2a \cos \alpha$$

$$u = h-2a \cos \alpha$$

$$\frac{du}{d\alpha} = -2a(-\sin \alpha) = 2a \sin \alpha$$

$$d\alpha = \frac{du}{2a \sin \alpha}$$

$$\frac{a d\alpha}{dt} = \frac{1}{2 \sin \alpha} \frac{du}{dt}$$

$$= \frac{1}{2\sqrt{1-\cos^2 \alpha}} \frac{du}{dt}, \quad \cos \alpha = \frac{h-u}{2a} \text{ indsættes}$$

$$\frac{a d\alpha}{dt} = \frac{1}{2\sqrt{1-\left(\frac{h-u}{2a}\right)^2}} \frac{du}{dt}$$

Dette indsættes i udtrykket for tilvækst i kin.energi.

$$dE_{kin.tot} = d\left(\frac{1}{2} \frac{G}{g} \left(\frac{du}{dt}\right)^2 + \frac{P}{g} \left(\frac{1}{2\sqrt{1-\left(\frac{h-u}{2a}\right)^2}} \frac{du}{dt}\right)^2\right)$$

$$dE_{kin.tot} = d\left(\frac{1}{2} \frac{G}{g} \left(\frac{du}{dt}\right)^2 + \frac{P}{g} \frac{1}{4\left[1-\left(\frac{h-u}{2a}\right)^2\right]} \left(\frac{du}{dt}\right)^2\right)$$

$$\left(\frac{dE_{kin.tot}}{dt}\right) dt = \left(\frac{1}{2} \frac{G}{g} \cdot 2 \frac{du}{dt} \cdot \frac{du}{dt^2} + \frac{P}{4g} \left[\frac{\left[1-\left(\frac{h-u}{2a}\right)^2\right] \cdot 2 \frac{du}{dt} \cdot \frac{d^2u}{dt^2} - \left(\frac{du}{dt}\right)^2 \cdot \left(-2 \frac{h-u}{2a}\right) \cdot \left(\frac{-2a \frac{du}{dt}}{4a^2}\right)}{\left[1-\left(\frac{h-u}{2a}\right)^2\right]^2} \right] \right) dt$$

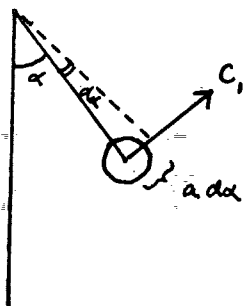
$$dE_{kin.tot} = \left(\frac{du}{dt} \cdot \frac{d^2u}{dt^2} \left[\frac{G}{g} + 2 \frac{P}{g} \cdot \frac{1}{4\left[1-\left(\frac{h-u}{2a}\right)^2\right]}\right] - \left(\frac{du}{dt}\right)^3 \cdot 2 \frac{P}{g} \cdot \frac{1}{4\left[1-\left(\frac{h-u}{2a}\right)^2\right]} \cdot \frac{h-u}{2a}\right) dt$$

Vi har således et udtryk for systemets tilvækst i kinetisk energi, og ønsker nu at udtrykke dette arbejde ved de kræfter, der har udført det. Der ses bort fra gnidningsmodstand i regulator og forbindelsesstænger (til dampspjæld og katarakt).

Så arbejdet.

Arbejde = kraft x vej

(1) Arbejdet udført af centrifugalkraften på begge



kugler : A_1

$$A_1 = C_1 a \cdot d\alpha$$

$$A_1 = 2 \frac{P}{g} (q\omega)^2 a \sin\alpha \cos\alpha a d\alpha$$

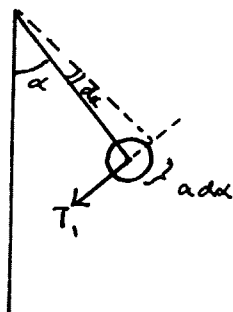
$$d\alpha = \frac{du}{2a \sin\alpha} \text{ og } \cos\alpha = \frac{h-u}{2a}$$

indsættes:

$$A_1 = 2 \frac{P}{g} (q\omega)^2 a \sin\alpha \frac{h-u}{2a} a \frac{du}{2a \sin\alpha}$$

$$A_1 = \frac{P}{g} (q\omega)^2 \frac{1}{2} (h-u) du$$

(2) Arbejdet udført af tyngdekraften på kuglerne: A_2



$$A_2 = 2(-T_1 \cdot a \cdot d\alpha)$$

$$A_2 = -2P \cdot \sin\alpha \cdot a \cdot d\alpha$$

$$d\alpha = \frac{du}{2a \sin\alpha} \text{ indsættes}$$

$$A_2 = -2P \sin\alpha a \frac{du}{2a \sin\alpha}$$

$$A_2 = -P du$$

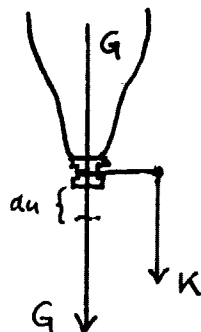
$$A_2 = -P \frac{du}{dt} dt$$

(3) Arbejdet udført af tyngdekraften på modvægten G: A_3

$$A_3 = - \frac{G}{g} g du$$

$$A_3 = - G \frac{du}{dt} dt$$

(4) Arbejdet udført af katarakten: A_4



Kataraktens kraft er afhængig af mufflebevægelsens hastighed $\frac{du}{dt}$

$$K = \frac{S}{g} \frac{du}{dt} \quad (\text{dim}(S) = \text{kraft/tid})$$

$$A_4 = - \frac{S}{g} \frac{du}{dt} du$$

$$A_4 = - \frac{S}{g} \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt$$

Arbejdet lig ændring i kinetisk energi.

Sættes nu summen af disse arbejder lig tilvæksten i kinetisk energi fåes: $dE_{\text{kin.tot}} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$

$$\left[\frac{du}{dt} \cdot \frac{d^2u}{dt^2} \left(G + 2P \frac{1}{4 \left[1 - \left(\frac{h-u}{2a} \right)^2 \right]} \right) \frac{1}{g} - \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \cdot 2P \frac{1}{4 \left[1 - \left(\frac{h-u}{2a} \right)^2 \right]^2} \cdot \frac{h-u}{(2a)^2} \frac{1}{g} \right] dt =$$

$$\frac{P}{g} (q\omega)^2 \frac{1}{2} (h-u) \frac{du}{dt} \cdot dt - P \frac{du}{dt} \cdot dt - G \frac{du}{dt} dt - \frac{S}{g} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt$$

$\frac{du}{dt}$ dt forkortes væk på begge sider, og der ganges igenem med g:

$$\frac{d^2u}{dt^2} \left(G + 2P \frac{1}{4 \left[1 - \left(\frac{h-u}{2a} \right)^2 \right]} \right) - \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \cdot 2P \frac{1}{4 \left[1 - \left(\frac{h-u}{2a} \right)^2 \right]^2} \cdot \frac{h-u}{(2a)^2} = P(q\omega)^2 \frac{1}{2} (h-u) - g(P+G) - S \frac{du}{dt}$$

Ligning (B) p.121 giver: $g(P+G) - q^2 \omega_u^2 \cdot \frac{1}{2} (h-u) P = 0$ og denne størrelse indføres:

$$P(q\omega)^2 \frac{1}{2} (h-u) - g(P+G) + \underbrace{g(P+G) - q^2 \omega_u^2 \frac{1}{2} (h-u) P}_{=0} - S \frac{du}{dt} + \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \cdot 2P \frac{1}{4 \left[1 - \left(\frac{h-u}{2a} \right)^2 \right]^2} \cdot \frac{h-u}{(2a)^2} =$$

$$\frac{d^2u}{dt^2} \left(G + 2P \frac{1}{4 \left[1 - \left(\frac{h-u}{2a} \right)^2 \right]} \right)$$

$$Pq^2(\omega^2 - \omega_u^2) \frac{h-u}{2} - S \frac{du}{dt} + \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \cdot 2P \frac{1}{4 \left[1 - \left(\frac{h-u}{2a} \right)^2 \right]^2} \cdot \frac{h-u}{(2a)^2} = \frac{d^2u}{dt^2} \left(G + 2P \frac{1}{4 \left[1 - \left(\frac{h-u}{2a} \right)^2 \right]} \right)$$

1.lin. Da $\frac{du}{dt}$ er lille kan led med $\left(\frac{du}{dt} \right)^2$ udelades.

Et mellem spil, hvor $\omega^2 - \omega_u^2$ omformes:

$$\omega^2 - \omega_u^2 = (\omega - \omega_u)(\omega + \omega_u) = \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} \frac{\omega + \omega_u}{\omega_0} = \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} \frac{2\omega_0 + \omega - 2\omega_0 + \omega_u}{\omega_0}$$

$$= \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} \left(2 + \frac{\omega - 2\omega_0 + \omega_u}{\omega_0} \right) = 2\omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} + \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} \left(\frac{\omega - 2\omega_0 + \omega_u}{\omega_0} \right)$$

$$= 2\omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} + \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - \frac{\omega_0 - \omega_u}{\omega_0} \right)$$

$$= 2\omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} + \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} \cdot \frac{\omega_0 - \omega_u}{\omega_0}$$

$\frac{\omega - \omega_u}{\omega_0}$ og $\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$ og $\frac{\omega_0 - \omega_u}{\omega_0}$ er alle meget små størrelser og

2.lin. følgelig indeholder de to sidste led af udtrykket for $\omega^2 - \omega_u^2$ meget små størrelser kvadreret, hvorfor de udelades.

$\omega^2 - \omega_u^2 = 2\omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0}$ indsættes i

$$Pq^2 (\omega^2 - \omega_u^2) \frac{h-u}{2} - S \frac{du}{dt} = \frac{d^2 u}{dt^2} (G + 2P \frac{1}{4(1 - (\frac{h-u}{2a})^2)})$$

$$Pq^2 \omega_0^2 (h-u) \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} - S \frac{du}{dt} = \frac{d^2 u}{dt^2} (G + 2P \frac{1}{4(1 - (\frac{h-u}{2a})^2)})$$

Der rækkeudvikles efter potenser af u og alle led af højere orden, der indeholder u , $\frac{du}{dt}$ og $\frac{\omega - \omega_u}{\omega_0}$ udelades.

3.lin. $u \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0}$ udelades:

$$Pq^2 \omega_0^2 h \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} - S \frac{du}{dt} = \frac{d^2 u}{dt^2} (G + 2P \frac{1}{4(1 - (\frac{h-u}{2a})^2)})$$

$$Pq^2 h \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} 4(1 - (\frac{h-u}{2a})^2) - S \frac{du}{dt} 4(1 - (\frac{h-u}{2a})^2) = \frac{d^2 u}{dt^2} G 4(1 - (\frac{h-u}{2a})^2) + \frac{d^2 u}{dt^2} 2P$$

4.lin. Ekskurs: $(1 - (\frac{h-u}{2a})^2) = (1 - \frac{h^2 - 2hu + u^2}{4a^2}) = (1 - \frac{h^2}{4a^2} - \frac{hu}{2a^2})$, da

sidste led i parentesen indeholder u , vil det kunne udelades, hver gang det ganges på en størrelse, der indeholder u , $\frac{du}{dt}$ eller $\frac{\omega - \omega_u}{\omega_0}$:

5.lin.

$$4Pq^2 h \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} (1 - \frac{h^2}{4a^2}) - 4S \frac{du}{dt} (1 - \frac{h^2}{4a^2}) = 4G \frac{d^2 u}{dt^2} (1 - \frac{h^2}{4a^2} + \frac{hu}{2a^2}) + 2P \frac{d^2 u}{dt^2}$$

$$= 4 \frac{d^2 u}{dt^2} (G(1 - \frac{h^2}{4a^2}) + \frac{Ghu}{2a^2} + \frac{P}{2})$$

$$Pq^2 h \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} - S \frac{du}{dt} = \frac{d^2 u}{dt^2} (G + \frac{Ghu}{2a^2(1 - \frac{h^2}{4a^2})} + \frac{P}{2(1 - \frac{h^2}{4a^2})})$$

$\omega_u = \omega_0 \frac{u}{2h} + \omega_0$ (fra lign(C) p.121) indsættes:

$$Pq^2 h \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_0 \frac{u}{2h} - \omega_0}{\omega_0} - S \frac{du}{dt} = \text{højresiden som ovenfor}$$

$$Pq^2 h \omega_0^2 \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - Pq^2 h \omega_0^2 \frac{u \omega_0}{2h \omega_0} - S \frac{du}{dt} = \text{højresiden som ovenfor}$$

$$Pq^2 \omega_0^2 h \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - \frac{1}{2} Pq^2 \omega_0^2 u - S \frac{du}{dt} = \text{højresiden som ovenfor}$$

Ekskurs: For at isolere $\frac{d^2 u}{dt^2}$ skal der divideres med den store parentes, der kan opfattes som en toleddet størrelse således:

$$G + \underbrace{\frac{P}{2(1-\frac{h^2}{4a^2})}}_A + \underbrace{\frac{Gh}{2a^2(1-\frac{h^2}{4a^2})}}_B u = A+Bu$$

og isolering af $\frac{d^2 u}{dt^2}$ opnåes da ved at gange med

$\frac{1}{A+Bu}$. Dette udtryk rækkeudvikles og højere ordens led udelades:

2.r.udv.

$$\begin{aligned} \frac{1}{A+Bu} &= \frac{1}{A} - \frac{B}{A^2} u \quad \text{idet } (a+x)^n = a^n + na^{n-1}x + \dots \\ &= \frac{1}{G + \frac{P}{2(1-\frac{h^2}{4a^2})}} - \frac{Gh}{2a^2(1-\frac{h^2}{4a^2}) \left(G + \frac{P}{2(1-\frac{h^2}{4a^2})}\right)^2} u \end{aligned}$$

$\frac{d^2 u}{dt^2}$ isoleres ved multiplikation med $\left(\frac{1}{A} - \frac{B}{A^2} u\right)$:

$$Pq^2 \omega_0^2 h \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \left(\frac{1}{A} - \frac{B}{A^2} u\right) - \frac{1}{2} Pq^2 \omega_0^2 u \left(\frac{1}{A} - \frac{B}{A^2} u\right) - S \frac{du}{dt} \left(\frac{1}{A} - \frac{B}{A^2} u\right) = \frac{d^2 u}{dt^2}$$

6.lin. Alle højere ordens led af u , $\frac{du}{dt}$ og $\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$ udelades:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{P}{A} q^2 \omega_0^2 h \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - \frac{P}{2A} q^2 \omega_0^2 u - \frac{S}{A} \frac{du}{dt}$$

Udtrykket med de tidsvariable ω og u differentieres mht. tiden:

$$\frac{d^3 u}{dt^3} = \frac{P}{A} q^2 \omega_0^2 h \frac{d\omega}{dt} - \frac{P}{2A} q^2 \omega_0^2 \frac{du}{dt} - \frac{S}{A} \frac{d^2 u}{dt^2}$$

$$\boxed{\frac{d\omega}{dt} = \frac{(p-Q)q}{I} - \frac{L}{I} u} \quad (\text{fra lign. (4) p.103) indsættes:}$$

$$\frac{d^3 u}{dt^3} = \frac{P}{A} q^2 \omega_0^2 h \frac{(p-Q)g}{I \omega_0} - \frac{P}{A} \frac{q^2 \omega_0^2}{2} \frac{du}{dt} - \frac{S d^2 u}{A dt^2} - \frac{P}{A} q^2 \omega_0^2 \frac{Lh}{I \omega_0} u$$

$$\boxed{q^2 \omega_0^2 = \frac{P+G}{P} \frac{2g}{h}} \quad (\text{fra lign. (A) p.120) indsættes:}$$

$$\frac{d^3 u}{dt^3} = \frac{2(P+G)}{A} g \frac{(p-Q)g}{I \omega_0} - \frac{P+G}{A} \frac{g}{h} \frac{du}{dt} - \frac{S d^2 u}{A dt^2} - \frac{2(P+G)}{A} g \frac{L}{I \omega_0} u$$

Følgende størrelser indsættes:

$$K = \frac{2(P+G)}{A} = \frac{2(P+G)}{G + \frac{P}{2(1 - \frac{h^2}{4a^2})}}$$

$$N = \frac{P+G}{A} \frac{g}{h} = \frac{P+G}{G + \frac{P}{2(1 - \frac{h^2}{4a^2})}} \frac{g}{h}$$

$$M = \frac{S}{A} = \frac{S}{G + \frac{P}{2(1 - \frac{h^2}{4a^2})}}$$

$$\frac{d^3 u}{dt^3} = Kg \frac{(p-Q)g}{I \omega_0} - N \frac{du}{dt} - M \frac{d^2 u}{dt^2} - Kg \frac{L}{I \omega_0} u$$

$$\frac{d^3 u}{dt^3} + M \frac{d^2 u}{dt^2} + N \frac{du}{dt} + Kg \frac{L}{I \omega_0} u = Kg \frac{(p-Q)g}{I \omega_0}$$

Bevægelighedsgraden

Efter den generelle gennemgang af Porters regulator, foretager Vyshnegradskii nogle meget detaljerede gennemregninger af følsomhedsgraden, bevægelighedsgraden, "stabiliteten", kataraktens "kraft" og normalhastigheden. Som et eksempel på disse udregninger gennemgår vi her V.¹⁵ undersøgelse af bevægelighedsgraden.

Den betegnes med K. Stor bevægelighedsgrad giver stor acceleration af hylstret^x ved en lille relativ ændring af vinkelhastigheden: $Kg \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - Nu = \frac{d^2 u}{dt^2}$, der ses altså her

^x hylster = muffe

bort fra modstanden i regulator, oliedæmper og forbindelsesstænger.

I bevægelsesligningen udtrykkes K ved (se siden før):

$$K = \frac{2(P+G)}{G + \frac{P}{2(1-\frac{h^2}{4a^2})}}$$

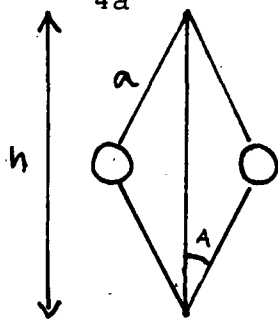
Sættes $\frac{1}{(1-\frac{h^2}{4a^2})} = \beta$ og $\frac{G}{2P+G} = z$ fåes:

$$K = \frac{2(P+G)}{G+\frac{1}{\beta}P} = \frac{2(\frac{1}{2}G(\frac{1}{z}-1)+G)}{G+\frac{1}{\beta}G(\frac{1}{z}-1)} = \frac{\frac{1}{z}-1+z}{1+\frac{1}{\beta}(\frac{1}{z}-1)} = \frac{2(1+z)}{\beta+(2-\beta)z}$$

$$\frac{dK}{dz} = \frac{2(\beta+(2-\beta)z) - (2+2z)(2-\beta)}{(\beta+(2-\beta)z)^2} = \frac{4(\beta-1)}{(\beta+(2-\beta)z)^2}$$

Bevægelighedsgraden undersøges nu for forskellige udformninger af regulatoren:

$$\beta > 1 \Rightarrow 2(1-\frac{h^2}{4a^2}) < 1 \Rightarrow h^2 > 2a^2$$

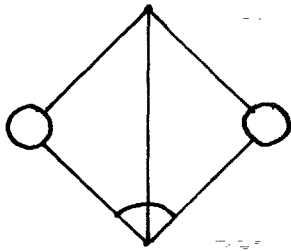


$$\angle A < 45^\circ \Rightarrow \cos A > \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} < \frac{a^2+h^2-a^2}{2ah} \Rightarrow h^2 > 2a^2$$

$$(\text{idet } c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos C)$$

For voksende z, dvs. når hylstrets vægt vokser på bekostning af kuglernes vægt, vil bevægelighedsgraden og dermed regulatorens "energi" (=KL, hvor L = "regulatorens kraft") vokse.



Når $\beta < 1$ svarende til, at vinklen mellem pendularmene er større end 90° , er tælleren i udtrykket negativ, hvorfor bevægelsesgraden og dermed regulatorens "energi" vil aftage, når muffens vægt vokser på bekostning af kuglernes vægt.

Endelig for $\beta = 1$, svarende til ret vinkel mellem pendularmene, bliver tælleren 0 og K altså u-

afhængig af z . Ved indsættelse i udtrykket for K ses, at bevægelsesgraden bliver konstant 2.

Af sidstnævnte ses endvidere, at når β vokser, dvs. $\frac{h^2}{4a^2}$ vokser, hvilket igen vil sige, at vinklen mellem pendularmene bliver spidsere, vil bevægelsesgraden og "energien" vokse. Denne indflydelse aftager imidlertid i takt med at z nærmer sig 1 (dvs. at muffens masse er meget stor i forhold til kuglernes masse, som ved Porters regulator), idet bevægelsesgraden bliver uafhængig af β . På Porters regulator er $z \ll 1$ af hensyn til følsomhedsgraden og β , som jo varierer, når regulatoren regulerer, får derfor kun ringe indflydelse på K.

Blokdiagram af dampmaskine med Porters regulator

I dette afsnit opskrives regulering med Porters regulator i det symbolsprog, der anvendes i nutidig kontrolteori. Notationen bygger på indførelse af differentialoperatoren s , således at multiplikation med s svarer til differentiation og division til integration.

Bevægelsesligningen for regulatoren (lign. (2) p.102) omformes:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + M \frac{du}{dt} + Nu = Kg \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - \lambda (R' + R'') \quad \text{til}$$

$$s^2 u + Msu + Nu = \frac{Kg}{\omega_0} (\omega - \omega_0) - \lambda (R' + R'')$$

$$u = \left(\frac{Kg}{\omega_0} (\omega - \omega_0) - \lambda (R' + R'') \right) \left(\frac{1}{s^2 + Ms + N} \right)$$

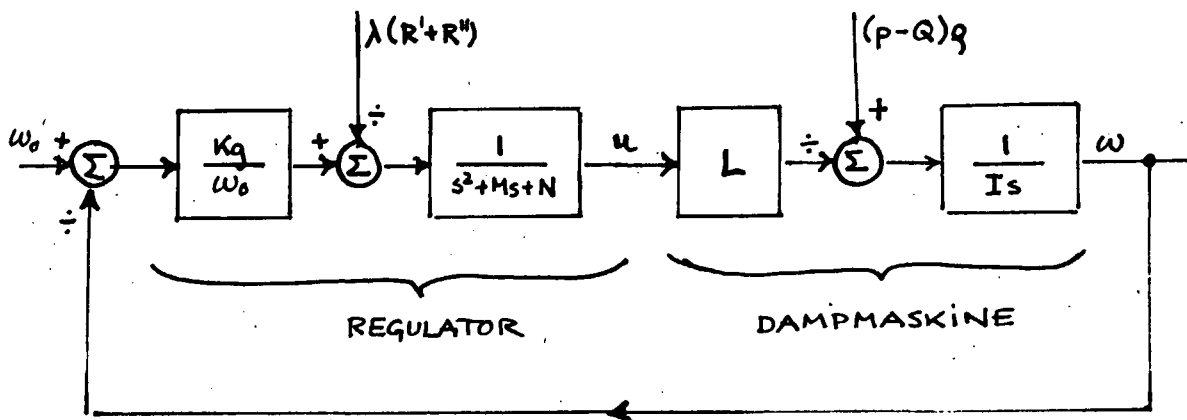
Bevægelsesligningen for dampmaskinen (lign.(4) p.103) omformes:

$$I \frac{d\omega}{dt} = (p-Q)q - Lu$$

$$Is\omega = (p-Q)q - Lu$$

$$\omega = ((p-Q)q - Lu) \frac{1}{Is}$$

og blokdiagrammet opstilles:



(fig.fra Bennett(1978) p.72)

Sammenfatning af Vyshnegradskiis artikel.

Baggrunden for V's arbejde med regulatorer var dels hans placering i det russiske samfund som direktør for en polyteknisk læreanstalt og dels hans kontakt med det europæiske videnskabelige miljø, hovedsagelig i Tyskland og Schweitz, der på den tid var meget optaget af reguleringsproblemer og stabilitet.

I artiklen "Ueber directwirkenden Regulatoren" starter V. med helt klart at explicitere sit mål og begrænse det felt han vil undersøge. Han beskriver den regulatorstype artiklen omhandler, velfungerende proportionalregulatorer af "Watt-typen". Skridt for skridt opstiller han differentialligninger, der beskriver systemet, diskuterer betingelserne for stabilitet og binder disse tilbage til ingeniørtermer knyttet til regulatorkonstruktion. For at tydeliggøre resultaterne fra det teoretiske afsnit, vælger han en af datidens mest brugte regulatorer, gennemregner den og konkretiserer alle de indførte begreber.

Artiklens stil er pædagogisk og klar, og det virker som om, det har ligget Vyshnegradskii på sinde, at artiklen kom ud over en snæver kreds af indforståede.

I forhold til udviklingen på kontinentet er Vyshnegradskiis væsentligste bidrag:

- (1) at han betragter et samlet system bestående af dampmaskine og regulator,
- (2) at han ved at se bort fra friktion, forudsætte små ændringer i regulatorudslaget og linearisere, får opstillet en 3.ordens differentialligning med konstante koefficienter, som han løser,
- (3) at han grundigt diskuterer sammenhængen mellem regulatorens stabilitet og koefficienterne i det karakteristiske polynomium,
- (4) at han definerer begreber, som regulatorens energi, stabilitet, følsomhedsgrad og uregelmæssighedsgrad og sætter dem i relation til regulatorens konstruktion. Nogle af begreberne var defineret tidligere, men ikke

sat i relation til konstruktionen. Begreberne er vigtige, da de omsætter de teoretiske stabilitetsovervejelser til praksis.

Sammenligning af de to artikler.

Kernen i de to artikler er temmelig ens. De bygger begge på forgængere, der betragtede kontrolsystemer dynamisk og beskrev dem med differentiaalligninger, som de ikke kunne løse. De når begge igennem ved at linearisere. Maxwell havde brugt denne metode tidligere i sin artikel om Saturns ringe (Maxwell 1856 p.299), der, så vidt vi ved, er et af de første steder, hvor differentiaalligninger lineariseres. Der er en mindre teknisk forskel mellem Maxwells og Vyshnegradskii's metode, idet Maxwell lader regulatorens vinkelhastighed være den ubekendte og dermed bruger loven om roterende legemers mekanik, mens Vyshnegradskii lader muffens retlinede bevægelse på regulatoraksen være den ubekendte og bruger dermed Newtons anden lov direkte. De når begge, ved brug af samme metode frem til at udtrykke systemets stabilitetsforhold ved hjælp af koefficienterne i det karakteristiske polynomium.

Et centralt tema for begge artikler er at klarlægge forholdet mellem off-set og stabilitet. Vyshnegradskii konkluderer, at uden off-set vil en direktevirkende regulator altid være ustabil. Det mener Maxwell også, men han viser desuden, at stabil regulering uden off-set kan opnås med andre regulatorer, og han angiver som betingelse, at den potentielle energi er lig $\frac{1}{2}A\omega^2 + \text{en konstant}$ (lign. (5) p. 277). De viser begge, at en stabil regulering forudsætter forholdsvis stor modstand, en katarakt.

Maxwell:

"To ensure this stability, the value of Y must be sufficiently great, as compared with G, by placing a weight W in a viscous liquid if the viscosity of the lubricating materials at the axle is not sufficient." (p.276)

Y er koefficient for væskens træghed og andre modstande,

der er afhængig af hastigheden, W er vægten nedsænket i en væske, og G er den modstand, der tilføjes når hjælpe-hjulet bevæger sig (et mål for regulatorens kraft).

Vyshnegradskii:

"...der Katarakt einen integrierenden Bestandtheil eines empfindlichen und gut arbeitenden directwirkenden Regulators bildet." (p.132).

Maxwell og Vyshnegradskii's problemløsninger adskiller sig fra forgængernes, ved at de approximerer og lineariserer. Det er i følge Kuhn en normalvidenskabelig udvikling, idet der laves nye problemløsningstyper, uden at der rokkes ved de grundliggende antagelser i paradigmet, de symbolske generalisationer i den faglige matrix. Der er altså ikke tale om noget paradigmeskift, men de nye problemløsninger indeholder nye betragtningsmåder og sammenføjninger af tidligere adskilte videnskabelige metoder. Maxwell og Vyshnegradskii er de første, der har opstillet en teori for stabiliteten i et feed-back system, og kommer således med et præparadigmatisk tilskud til en egentlig automatisk kontrolteori. Som vi senere skal se, var effekten af deres arbejder meget forskellig.

Inden vi ser nærmere på de faglige matricer, de to erkendelser er blevet til under, lidt om aktørerne:

De to videnskabsmænds baggrund var ret forskellig. Maxwell var fysiker/matematiker i et universitetsmiljø, og langt hovedparten af hans produktion var af teoretisk karakter. Hans artikel om regulering er en biting i forhold til hans øvrige produktion. Vyshnegradskii var fysiker/matematiker/ingeniør i et teknologisk miljø og hans hovedarbejde var af teknologisk karakter, hvor artiklen om regulering indtager en central plads.

Det første element i den faglige matrix, symbolske generalisationer forstået som de accepterede formelle udsagn om naturen, har de to videnskabsmænd til fælles. De bruger begge den mekaniske fysik og differentiaalligningsteori, der var veludviklede og alment accepterede teoristrukturer på den tid.

De virkelighedsbilleder, modeller - andet element i Kuhns faglige matrix, de to videnskabsmænd bruger udviser forskellige. Maxwells modeller er rent videnskabelige modeller. Hans elektrodynamiske teori har tydeligt en mekanisk model, hvor differentialgear indgår i æterens opbygning jvf. p. 50, og i behandlingen af regulatorer er analogierne hentet fra astronomien. Han overførte i store træk sin metode fra artiklen om Saturns ringe til regulatorer, og de problemer, der førte til, at han interesserede sig for reguleringsstabilitet, stammede fra eget eksperimentelt arbejde og kontakten med kredsen af videnskabsmænd omkring Royal Society. Hans arbejde sammen Stewart og Jenkins på at bestemme det absolutte mål for elektrisk modstand krævede en spole med konstant rotationshastighed, astronomiske teleskoper behøvede en regulering, der kunne sikre, at de drejede med jævn hastighed, og endelig var der i datidens videnskabelige samfund en generel interesse for dynamiske systemers stabilitet, som udtrykt i citatet fra Thomson og Tait's "Treatise on Natural Philosophy" på side 48.

Vi ved meget mindre om Vyshnegradskiis virkelighedsbilleder, men det er nærliggende at antage, at de er mere teknologiske i deres oprindelse. Dels på grund af hans baggrund og placering i samfundet og dels på grund af den måde han strukturerer og systematiserer problemet på, med anvendelse af hjælpebegreber, grafer og figurer.

Man kan lidt plat sige, at Maxwell havde planeter i hovedet og Vyshnegradskii maskiner.

I det tredje element i den faglige matrix, værdielementet, træder forskellen mellem Maxwell og Vyshnegradskii tydeligt frem. De værdier eller kriterier, der gør en teori attraktiv og acceptabel, afspejler sig i fremstillingsform, valg af eksempler, hvilke dele af konklusionerne, der lægges vægt på, og hvad de bruges til.

Maxwells form er kort og knap. Fremstillingen er uden figurer eller diagrammer og uden ordentlige beskrivelser

af, endsige henvisninger til de behandlede regulatorer. Regulatorerne illustrerer forskellige principper, og var oftest bygget til et specielt eksperimentelt formål, og havde det tilfælles, at de overhovedet ingen rolle spillede i industrien. Artiklen er desuden samlet af blandet gods, idet det sidste afnit, hvor der bruges en anden matematisk udformning af mekanikken (LaGrange formalismen), handler om differentialgearing, som ikke har noget med regulatorstabilitet at gøre, men som interesserede Maxwell meget, og som indgår i den mekaniske model, der ligger bag hans elektrodynamiske teori.

Alt i alt er "On Govenors" vanskelig at læse, og vi er enige med Mayr (1972 p.427), der siger: "The paper could be fully understood only by insiders, who knew these mechanisms through personal information." Det skal dog retfærdigvis nævnes, at forklaring af linearisering af differentiaalligninger og diskussion af stabilitetskriterier var gjort grundigt og klart tidligere i afhandlingen om Saturns ringe.

Vyshnegradskiis form er udførlig og klar. Han vælger den regulatorstype, der var en af de vigtigste i industrien, redegør for dens opbygning, bruger figurer og forklarer skridt for skridt hvordan han når frem til resultatet. Maxwell og Vyshnegradskii når til de samme stabilitetskriterier, men den måde, de bruger resultaterne på er uhyre forskellig. Maxwell udvider de teoretiske overvejelser til differentiaalligningssystemer af højere orden end 3. og ser, at han ikke kan finde stabilitetsbetingelserne. Det medfører, at han får udvirket, at emnet for den næste Adams Prize bliver kriterier for dynamisk stabilitet, en opgave Routh, som vi senere skal se, besvarer og dermed løser problemet generelt. Vyshnegradskii laver et letaflæseligt stabilitetsdiagram for 3.ordens systemer, indfører ingeniørbegreber, der kan omsætte de teoretiske stabilitetsovervejelser til praksis og slutter sin artikel med at slå konkvenserne for regulatorkonstruktion fast i nogle få hovedpunkter.

Det fremstår altså, som om hovedelementer i Maxwells værdibegreb har været teoriens modsigelsesfrihed og forenelighed med andre teorier, mens det for Vyshnegradskii har været lige så vigtigt, at teorien var anvendelig, effektiv til at løse problemer og i overensstemmelse med empirien.

Det sidste element i den faglige matrix er eksemplerne. Vi har ringe baggrund for at vide, hvilke mønstereksempler Maxwell og Vyshnegradskii er blevet opdraget med i deres uddannelse, men det er sandsynligt, at Maxwell i begyndelsen af sin karriere har regnet på ting i hjertet på engelsk matematik og fysik på den tid, arbejder af hans senere venner. Vyshnegradskii har nok mere været optaget af matematiske problemer knyttet til anvendt mekanik. Der er næppe tvivl om, at begge selv har leveret eksempler til eftertiden. F.eks. fremdrager Pontryagin (1962) i sin bog "Ordinary differential equations" beregnet bl.a. for ingeniørstuderende Vyshnegradskiis arbejde med centrifugalregulatoren, som et sådant mønstereksempel på problemløsning.

Selvom der er mange ligheder, kan vi konstatere, at der også er forskelligheder i de paradigmer Maxwell og Vyshnegradskii arbejder under, og det kan måske være med til at forklare, at Vyshnegradskii løser samme problem som Maxwell ni år efter denne og ssv uafhængigt af og uden at kende til Maxwells arbejde om regulatorer. Vyshnegradskii var på studierejse til England inden han skrev sin artikel, og det kan ikke udelukkes, at han har haft kontakt med Maxwell. Kilderne til artiklerne er ikke synlige, da man havde den uskik på den tid ikke at lave litteraturhenvisninger - de har begge kun én. Man forudsattes at vide, hvad der foregik på feltet, når man læste afhandlinger. De har dog begge været helt fortrolige med den mekaniske fysik, og løsningen af differentiallyingningerne og stabilitetsundersøgelsen lå ret lige for, og som vi vil se af udviklingen, der fulgte, er der meget, der taler for, at ud-

viklingen i England og på kontinentet har været uafhængig og paralleltløbende. Dette ville være utænkeligt, hvis der på den tid havde været udviklet et egentligt kontrolteoretisk paradigme.

Kort rids af den videre udvikling af reguleringsteknologi og -teori i England og på kontinentet.

Vi vil nu give et kort rids af, hvad der videre skete med matematikken og reguleringsteknologien, efter Maxwells og Vyshnegradskiis arbejder, for at få et mere nuanceret billede af samspillet mellem matematik og teknologi.

England

Rouths essay fra 1877: "The Criterion of Dynamic Stability" var, som tidligere omtalt, direkte foranlediget af det matematiske problem, som Maxwell opstillede i "On Governors". Denne essay udnævner Fuller i sin bog fra 1975: "Stability of Motion" (p.1), til at være et af fundamentene for videnskaben om kontrol, feedback og stabilitet. På stabilitetssiden var essayet en videreudvikling af Airys og Maxwells arbejder. Den matematiske side, med at finde rødder til polynomier af højere grad, byggede især på Cauchys og Sturms arbejder. A.L.Cauchy (1789-1857) viste allerede i 1831 i en ikke publiceret artikel, hvoledes man i et givet polynomium kunne finde antallet af rødder med hhv. positive og negative realdele ("Stability of Motion", p.4). Og i 1836 publicerer C.Sturm (1803-55) nye beviser for - og en videreudvikling af Cauchys teorem. Dvs. allerede Cauchys og Sturms arbejder indeholdt metoder, omend komplicerede, til løsning af Maxwells matematiske problem, med at finde betingelser for, at rødderne, i polynomier af højere grad end 3, havde negative realdele. Men disse arbejder var udsprunget af en intern matematisk interesse for at løse et algebraisk problem, og selv om Maxwell var velbevandret i det matematiske landskab, og interesserede sig meget for grænserne mellem fysik og matematik, har han åbenbart ikke kendt til disse resultater, eller han har ikke været i stand til umiddelbart at overføre dem til løsning af hans eget problem, da disse arbejder var meget komplicerede. Det var Rouths fortjeneste at simplificere Cauchys og Sturms resultater og dermed gøre dem anvendelige. Rouths berømte bidrag til udviklingen af stabilitetsteori blev altså til i et samspil mellem fysikken og den 'rene' matematik.

Rouths betydning for stabilitetsteorien kommer bl.a. til udtryk i Liapounovs berømte doktorafhandling fra 1892:

"The general problem of the stability of motion", hvor han jævnligt refererer til Rouths arbejde.

Til gengæld er Rouths betydning for samtidens teknologiske udvikling af kontrolsystemer tilsyneladende lig nul. Almindelige ingeniører kendte intet til dette teoretiske arbejde om stabilitetskriterier.

Bennet forklarer dette generelt med, at kløften mellem teori og praksis var stor i England gennem hele det 19. årh. (p.81). Denne kløft eksemplificerer han med citater fra Rouths bog, der illustrerer, at hvis ingeniører havde kigget i bogen ville de ikke have fået brugbare oplysninger ud af den. F.eks. ville de kunne læse at

"A common defect of governors is that they act too quickly, and thus produce considerable oscillation of speed in the engine... This fault may be very much modified by applying some resistance to the motion of the Governor." (Bennet p.81 (note 89)).

På dette tidspunkt var ^{oliedæmperens} virkning almindelig kendt i ingeniørkredse, nemlig at den gjorde reguleringen mere træg, og reducerede svingningerne.

Videre kunne man læse:

"In the case of Watt's Governor if any permanent change be made in the relation between the driving power and the load, the state of uniform motion which the engine will finally assume is different from that which it had before the change ... This defect may be considerable decreased by the use of Huygens parabolic pendulum." (ibid p.81, (note 90)).

At en Watt-regulator havde off-set vidste enhver, der beskæftigede sig konkret med regulatorer. Men man vidste også, vist af W.Siemens i 1871, at det parabolske pendul ikke fungerede til regulering i praksis. Systemet ville blive ustabil, med mindre man ødelagde netop den isokrone egenskab, som skulle eliminere off-seten. Ingeniører havde i 25 år forsøgt at bruge Huygens pendul uden held.

Den slags praktisk uanvendelige teoretiske skrivebordsovervejelser indbød ikke ingeniører til at gå ombord i det teoretisk vanskeligt tilgængelige stof.

Denne 'skyden ved siden af' de teknologiske behov afspejler

dels Rouths manglende kendskab til den eksisterende regulator-teknologi, dels at de reguleringserfaringer, man havde i kredsen omkring Royal Society, var baseret på specielle regulatorer, som kun fungerede i et laboratorie, men ikke i industrielle anvendelser.

I øvrigt var stabilitetsproblemet stort set løst i praksis, da Rouths bog kom frem og gav den teoretiske løsning.

Det problem, der nu optog regulatorkonstruktørerne, var at bestemme den nødvendige størrelse af regulatorens dele for at få en bestemt steady-state præcision (ibid. p. 82).

Det ser altså ud til at teknologien her er et hestehoved foran videnskaben, den kan ikke hente ny viden fra matematikken, som bringer den teknologiske udvikling videre.

Den første artikel der blev udgivet i England, som beskæftigede sig med analyser af dynamiske systemer, set fra en ingeniørsynsvinkel blev udgivet i 1940, og da var referencen en tysk bog (Tolles: "Regulierung der Kraftmaschinen").

De ganske få ingeniører, der refererede til Rouths resultater, var beskæftiget indenfor helt andre områder af reguleringsteknologien, nemlig elektriske maskiner og flyvemaskiner. I en analyse af flyvemaskiners (svævefly) vertikale stabilitet brugte G.H. Bryan og W.E. Williams i 1903 eksplicit Rouths kriterier til stabilitetsbestemmelse ud fra et 4. grads polynomium (ibid. p. 88). Og B. Hopkinson brugte Rouths kriterier i en artikel om vekselstrømsmaskiner. (ibid. p. 82).

Maxwells og Rouths teoretiske tilgang til regulerings- og stabilitetsproblemer gjorde deres arbejder utilgængelige og uanvendelige for samtidens reguleringsteknikere. Til gengæld er det måske den samme tendens til at se bort fra de praktiske omstændigheder, for i stedet at koncentrere sig om det generelle, der gjorde det matematisk 'anvendeligt' og dermed videreudviklede matematikken, som det f.eks. kom til udtryk i Liapounovs arbejde, og i Wieners brug af Maxwell. I hvert fald må man sige, at Maxwell og Routh lagde nogle grundsten til den moderne reguleringsteori.

Kontinentet

Vyshnegradskiis stabilitetskriterier - ækvivalente med Maxwells - fik, i modsætning til dennes, forholdsvis stor praktisk betydning i samtiden. Vyshnegradskiis artikel blev allerede året efter sin udgivelse oversat til Tysk i et ingeniørtidsskrift, og allerede samme år blev hovedideerne offentliggjort på fransk. De parametre, som Vyshnegradskii udtrykte koefficientkriteriet med, blev i den tyske og russiske litteratur kendt som 'Vyshnegradskiis parametre'.

Indholdsmæssigt var Vyshnegradskiis bidrag til løsning af dynamiske stabilitetsproblemer stort set det samme som Maxwells, men formen gjorde det tilgængeligt og anvendeligt for de ingeniører, der beskæftigede sig med regulering. Hans arbejde var således et væsentligt bidrag til den udvikling af maskinregulering, der foregik i Tyskland frem til begyndelsen af det 20. årh. (ibid. p. 74).

Stodola

En meget central figur i denne udvikling var A.B. Stodola. Da han som 33-årig blev professor ved "Federal Institute of Technology" i Zürich, havde han 10 års erfaring som ingeniør, og derudover havde han studeret i Budapest, Zürich, Charlottenborg og Paris. En mand med stor både teknisk og videnskabelig viden. Umiddelbart efter sin ansættelse i 1892, gik han i gang med at undersøge reguleringen af en højtryksvandturbin, hvor han bl.a. brugte Vyshnegradskiis kriterier til at teste stabilitetsforholdene. Idet han forsøgte at inkludere effekterne af regulatorens inertie, dæmpning og servomotorens forsinkede reaktion voksede differentialligningssystemet fra et 3.ordens - til et 7.ordens system. Stodola var på dette tidspunkt ubekendt med Rouths arbejde (ibid p. 84), men han formodede, at stabilitetsproblemet kunne løses, uden at man behøvede at finde den fuldstændige løsning til systemet. Stodola publicerede sine resultater i 1893 og præsenterede problemet for sin kollega, matematikeren A. Hurwitz. Denne offentliggjorde en løsning i 1895. Hurwitz kendte heller ikke Rouths resultater, men udviklede nogle tilsvarende kriterier, som

italieneren Bompiani i 1911 viste var ækvivalente med Rouths (ibid p.88).

Længe før publiceringen gav Hurwitz resultaterne videre til Stodola, som brugte ^{den} i konstruktionen af reguleringen "at the Davos Spa Turbine Plant with brilliant succes" (ibid p.87), som Hurwitz selv udtrykker det. Dette arbejde - udført i 1894 - var formodentlig den første anvendelse af stabilitetskriterier i den praktiske udformning af et fungerende reguleringssystem. Fuller hævder, at Stodola lagde fundamentet for det, man kalder klassisk kontrolteori ("Fuller I", p.119). Det er således hans metoder, som Tolle bygger sit store værk om kontrolteori og regulering på i begyndelsen af det 20vårh. Stodola udgav i perioden 7 artikler i forskellige tidsskrifter om regulering.

Stodolas hovedbidrag til reguleringsteorien var, at han simplificerede ligningerne for de dynamiske systemer og gjorde dem overførbare. Generelt for Stodolas arbejde gjaldt, at til trods for at hans overvejelser var af generel og abstrakt karakter, fremstillede han dem altid således, at de var fysiks genkendelige og gennemskuelige. På denne måde gjorde han kontrolteori tilgængeligt og interessant for både matematikere og ingeniører, idet han gav dem "an elegant theoretical tool which up to this day has only been supplemented or completed but never replaced", som Fuller udtrykker det (Fuller I, p.119). Det ser således ud til, at Stodola repræsenterer det optimale samspil mellem teknologi og matematik.

Den reguleringsteknologi og -teori, der blev udviklet af Vyshnegradskii, Stodola, Hurwitz og de tyske ingeniører spredte sig til USA, gennem de nyoprettede universiteter, som havde stærke forbindelser til Tyskland. Til England nåede denne viden tilsyneladende først i 1940 via referencer til Tolles bog.

Rusland

Også i Rusland beskæftigede man sig med stabilitetsforhold i dynamiske systemer. Arbejdet med dette emne blev startet af Vyshnegradskii i 1870-erne ved "Praktisk Teknologisk Institut" i Skt. Petersborg, og i 1892 kom Liapouov med sin berømte doktorafhandling "The general problem of the stability of motion" (Bennet p. 89). Liapouov var opmærksom på det arbejde,

der var lavet udenfor Rusland, og han citerer således jævnligt Routh. Til gengæld forblev hans eget værk stort set ukendt i den vestlige verden indtil efter 2.verdenskrig (ibid p.89), til trods for, at det indeholdt meget væsentlige og kvalitativt nye bidrag til stabilitetsteorien. Han udviklede således metoder til stabilitetsvurderinger, som kunne overføres til ikke-lineære systemer.

Liaponovs arbejde er imidlertid så væsensforskelligt fra Rouths og Hurwitz, at vi ikke vil gå nærmere ind på det her, men blot konstatere, at den videnskabelige kommunikation i slutningen af forrige århundrede og helt op til midten af det 20.årh, indenfor stabilitetsteorien, tilsyneladende kun gik fra Europa til Rusland - men ikke den anden vej.

Generelt om udviklingen af reguleringsteknologi og - teori i England og på kontinentet, ser det altså ud til, at der i England var en total adskillelse af teknologi og videnskab, mens der på kontinentet var et tæt samspil. Stort set ækvivalente matematiske resultater blev til i et rent videnskabeligt miljø i England og et teknologisk orienteret miljø i Tyskland. Hvor de matematiske resultater var ens var anvendelsen af disse resultater vidt forskellig. I England får disse resultater ingen teknologisk betydning, hvor de i Tyskland integreres i den generelle reguleringsteknologi. Matematikkens teknologiske betydning er således ikke først og fremmest bestemt af de resultater den frembringer, men af den form den præsenterer disse resultater i, og af de formidlingskanaler der eksisterer. Generelt er forholdet mellem teknologi og videnskab i England og Tyskland imidlertid ikke så entydigt, som det her kommer til udtryk i forhold til reguleringsteknologi og -teori. I Tyskland havde man således i denne periode en stor gruppe matematikere - grundlagsforskere som Dedekin og Kantor - som kun beskæftigede sig med den rene matematik, og som absolut ikke havde nogen kontakt med den teknologiske udvikling.

Disse forskellige russiske, tyske og engelske bidrag til beskrivelse og analyse af reguleringssystemer afrunder og afpudser Norbert Wiener i 1948, og videreudvikler dem til en samlet, selvstændig videnskab - kybernetikken. De forskellige bidrag har således, hver på deres måde, været forløbere for et nyt paradigme.

KAPITEL 3.

VIDENSKABSEKSTERNE FORHOLDS BETYDNING FOR VIDENSKABSUDVIK- LINGEN.

Indledning

I forrige kapitel blev det vist, at nogle af de elementer i den faglige matrix, der har betydning for den indre videnskabelige udvikling, er meget forskellige hos Vysnegradski og Maxwell. Vi så også, at de samme forskelle gik igen hos Routh og Hurwitz.

Vi vil i dette kapitel - i forlængelse af af Barnes program - undersøge, hvorvidt videnskabseksterne forhold kan forklare nogle af disse forskelle.

De eksterne forhold, vi vil fremdrage, er institutionaliseringen af videnskaben i England og på kontinentet og filosofiske forhold, som især får betydning i England.

Vi vil ikke udstrække undersøgelsen til også at omfatte yderligere eksterne forhold af økonomisk, politisk eller social karakter, men vi mener, at forbindelserne hertil forholdsvis let kan trækkes. Vi mener - som Barnes - at de filosofiske forhold også er samfundsmæssigt bestemt, hvorved filosofien betragtes som en ekstern faktor i forhold til videnskabsudviklingen.

Afsnittet om forskningens placering i uddannelsesinstitutionerne omhandler en gennemgang af uddannelsessystemet på kontinentet (det tyske) og i England, hvor vi specielt koncentrerer os om de videregående uddannelser, forskningen og videnskabens forhold til teknikken.

Afsnittet om filosofiens rolle for videnskabens udvikling omhandler den forskningstradition, hovedpersonerne tilhører og ser på disse personers egen opfattelse af videnskaben. Disse forhold ses så på baggrund af de mere generelle filosofiske strømninger i tiden, og afsnittet vil vise, om der er sammenfald mellem herskende filosofier og forskernes egen opfattelse af deres forskning og forskningstradition og med den indre videnskabelige udvikling.

Uddannelsesinstitutionerne i England og på kontinentet.

I dette afsnit vil vi behandle uddannelsessystemerne i England og på kontinentet, især Prøjsen og Tyskland i det 19. århundrede. Vi vil koncentrere os om de højere uddannelser og om matematikkens og de øvrige naturvidenskabelige fags placering i systemet. Endelig vil vi se på videnskabens forhold til teknologien.

Formålet med afsnittet er, at finde ud af om uddannelsesinstitutionelle forhold har betydning for Maxwells og Vyshnegradskiis opfattelse af videnskab. Dvs. om eksterne videnskabsforhold har betydning for den indre videnskabelige udvikling, som er beskrevet i den faglige matrix. Ligeledes vil vi se, om uddannelsesmæssige forhold har betydning for videnskab-teknologi samspillet.

Vores undersøgelse af uddannelsessystemerne hviler udelukkende på sekundært materiale. Vi bruger især D.S.L.Cardwells bog "The Organisation of Science in England", 1957, der også indeholder en sammenligning af det engelske og tyske uddannelsessystem. Derudover bygger vi på en række forskellige tidsskriftsartikler og endelig på A.S.Christensen/K.Thomsen: "Matematik i Tyskland i det 19. århundrede", 1982.

Det tyske uddannelsessystem.

Det tyske uddannelsessystem blev reorganiseret i 1809-10 efter napoleonskrigene. I Prøjsen, der var den største og mest toneangivende stat, blev Wilhelm v. Humboldt sat til at lede den afdeling i indenrigsministeriet, hvorunder uddannelserne sorterede. Han var tilhænger af en dominerende ny-humanistisk kulturstrømning, og uddannelsernes indhold kom til at bære præg heraf.

Skolesystemet bestod af et maksimalt 9 årigt gymnasium eller en realskole af maksimalt tilsvarende længde. Der var forskellige afgangstrin, alt efter det antal år man gik i skole. Af højere uddannelser fandtes tekniske skoler, handelsskoler og universiteter.

Det nyhumanistiske dannelsesideal fordrede stort kendskab til den klassiske verden.

"I princippet var studiet af klassikerne den eneste vej til dannelse af det oprindelige sande menneske."
(Christensen/Thomsen s.58)

Klassiske sprog og matematik blev derfor det væsentligste indhold i gymnasiet. Naturfag rangerede lavt, og denne ringe placering holdt sig til over midten af århundredet. Naturfag betyder her og i det følgende de naturvidenskabelige fag bortset fra matematik.

Sideløbende med gymnasierne - og i opposition til dem - fremvoksende stadig flere borger- og realskoler, der i højere grad afspejlede mere pragmatiske interesser. Skolerne skulle varetage almene uddannelser til forskellige borgerlige hverv. Fagene i disse skoler var derfor også moderne sprog og naturfag ved siden af matematik og klassiske sprog, der var nedtonet i forhold til gymnasiet.

Realskolerne opnåede ministeriets godkendelse i 1832 efter en hård kamp om ligeberettigelse med gymnasierne. I 1859 ændredes pensum således, at forskellene mellem gymnasierne og realskolerne blev mindre, og således at eksamen fra realskoler af 1. orden gav adgang til universiteterne.

Nedenstående skema viser samlede antal ugentlige timer i 9 år i de forskellige skoletyper, fordelt på fag:

Schule	Stundenbezeichnung	1816	1837	1856	1859	1868	1882	1892	1902
Gymnasium	Gesamtzahl	320	258	268	-	-	268	252	259
	davon: Mathematik	60	32	32	-	-	34	34	34
	Naturwissenschaft	20	16	14	-	-	18	18	18
	Alle Sprachen	126	128	128	-	-	117	98	104
	Neue Sprachen	-	12	17	-	-	21	19	20
Realgymnasium	Gesamtzahl	-	-	-	285	-	280	259	262
	davon: Mathematik	-	-	-	47	-	44	42	42
	Naturwissenschaft	-	-	-	34	-	30	29	29
	Alle Sprachen	-	-	-	44	-	54	43	49
	Neue Sprachen	-	-	-	54	-	54	49	47
Oberschule	Gesamtzahl	-	-	-	-	326	276	258	262
	davon: Mathematik	-	-	-	-	76	49	47	47
	Naturwissenschaft	-	-	-	-	46	36	36	36
	Alle Sprachen	-	-	-	-	-	-	-	-
	Neue Sprachen	-	-	-	-	80	80	72	72

Stundenverteilung bei den verschiedenen Schularten.

(Christensen/Thomsen s.71)

I løbet af århundredet nærmede de to skoleformer sig hinanden, men realskolerne havde stadig flest naturfagstimer ved århundredeskiftet, og antallet af matematiktimer overgik også gymnasiets.

Realskolerne sigtede traditionelt mod tekniske skoler, handelsskoler og tekniske højskoler, men gav også adgang til universiteterne efter 1869. Gymnasiet sigtede først og fremmest mod universiteterne. Realskolernes betydning og antal steg mere end gymnasieskolernes i århundredets løb, hvilket

kan ses på baggrund af den stigende industrialisering og de mere utilitaristiske krav denne stillede til uddannelserne.

Universiteterne.

Universiteternes vigtigste opgave var fra 1831 at uddanne lærere til gymnasier og realskoler. De lærere, der skulle undervise de ældste klasser i gymnasiet, skulle have kendskab til geometri og infinitesimalregning, den højere mekanik, og de skulle kunne anvende matematikken i astronomi og fysik. I 1866 ændredes kravene og der forlangtes nu samme kvalifikationer for at undervise i gymnasier og realskoler. En vigtig ændring var, at de studerende skulle gennemføre et speciale af forskningsmæssig karakter for at afslutte deres uddannelse.

Princippet for universiteternes undervisning var Lehr-und Lernfreiheit, hvilket medførte en stor frihed for de enkelte studerende. Princippet betød, at lærere og studerende i stor udstrækning selv kunne vælge, hvilke emner og områder de ville beskæftige sig med indenfor fagene. Det var hermed muligt også for de studerende at beskæftige sig med nye ekspanderende områder indenfor forskningen. Eksamensformen var derudover mundtlige eksaminer.

Det var dog stadig matematikken og ikke de øvrige naturvidenskaber, der var dominerende på universiteterne. Matematikken blev adskilt fra andre naturvidenskabelige fag, og fra 1860 svandt naturfagenes betydning yderligere til fordel for matematikkens. Tyskland blev da også det førende land i Europa indenfor den "rene" matematik i perioden 1870-90, og når resultater først og fremmest indenfor grundlagsforskningen.

Tekniske skoler.

I begyndelsen af århundredet grundlagdes en række tekniske skoler i Tyskland. Berlin (1821), Darmstadt (22), Karlsruhe (25), München (27), Dresden (28), Nürnberg (29), Kassel (30), Hannover (31) og Augsburg (33). Skolerne var oprindeligt fagskoler, hvor håndværksmæssige fag kombineredes med teoretiske fag, bl.a. matematik.

De større tekniske skoler - bl.a. ovennævnte - udviklede sig

til tekniske højskoler i midten af århundredet, og det teoretiske niveau hævedes, dels på grund af gymnasiernes og realskolernes stigende standard, og dels fordi universitetsuddannede lærere varetog undervisningen i de teoretiske fag. Omkring midten af århundredet var der tendenser til, at undervisningen i matematik blev for abstrakt - netop på grund af udviklingen på universiteterne - således at det blev svært at forbinde matematikken med teknikken.

Reaktionen mod disse tilstande på højskolerne kom omkring 1870, hvor der blandt andet etableredes laboratorier, og hvor den empiriske del af aktiviteterne optrappedes. I 90'erne fortsatte denne tendens og matematikken blev skåret ned, idet matematikkens rolle nu skulle reduceres til at være et hjælpemiddel i forhold til teknikken. Naturfagene havde en langt større udbredelse på de tekniske højskoler end på universiteterne.

Industrielle forskningscentre.

I slutningen af 1880'erne blev Physikalische-Technische Reichanstalt ved Charlottenburg oprettet. Centret var et teknologisk udviklingscenter, der skulle være rådgivende overfor industrien, men som også havde selvstændige forskningsopgaver. Institutionen blev et af centrene for den elektrotekniske udvikling omkring århundredeskiftet. Centret blev anlagt efter et stort forarbejde af blandt andre ledende industrifolk, hvor Werner Siemens spillede en vigtig rolle. (D.Cahan: "Werner Siemens and the origin of the Physikalisch-Technische Reichanstalt, 1872-1887." omhandler instituttets etablering).

Det tyske uddannelsessystem er karakteriseret ved central styring både indholdsmæssigt og økonomisk. Det omfatter en bred vifte af uddannelser på mange niveauer, både indenfor teoretiske og tekniske områder. Det udmærker sig ved at have en række institutioner - de tekniske højskoler og det teknisk-fysiske forskningscenter - hvor den teoretiske og tekniske forskning kan mødes.

De højere uddannelsers relative selvstændighed qua Lehr- und Lernfreiheit og kravet om selvstændigt forskningsarbejde i

universitetsuddannelsen er også bemærkelsesværdig.

Det engelske uddannelsessystem.

Det engelske uddannelsessystem i det 19. århundrede prægedes af den herskende liberalisme. Der fandtes ingen central styring af uddannelsessystemet og heller ingen offentlig finansiering. De enkelte uddannelsesinstitutioner styrede selv undervisningens indhold og eksisterede økonomisk ved hjælp af lån, gaver og skolepenge fra de studerende.

Systemet bestod af underskolen: primary og secondary school, der ifølge en række kommissionsrapporter op gennem hele århundredet var på et meget ringe fagligt niveau og stort set ikke indeholdt naturvidenskab. Disse uddannelser blev - på trods af talrige reformforslag især efter 1870 - ikke reformeret nævneværdigt før i begyndelsen af det 20. århundrede.

Universiteterne og de tekniske skoler før 1867.

I 1820'erne oprettedes forskellige universitets colleges (University College og London, King's College, Durham University). Klassiske sprog og matematik optog, som traditionen bød, en stor plads i læseplanerne, men der oprettedes også naturvidenskabelige fag som fysik, kemi, biologi m.fl.

Formålet med uddannelserne var at give en bred liberal uddannelse. Der var krav om viden indenfor matematik, naturfilosofi, klassisk filologi, biologi og logik og etik, for at bestå eksamen og opnå en grad. Målet med universitets uddannelse var ikke specialisering og at give de studerende en kompetent viden på ét område, tværtimod var idealet en bred harmonisk almendannelse. Cardwell beskriver bl.a. den liberale uddannelse således:

"But knowledge of facts was not the main end; balanced and harmonious development was the ideal, and one aptitude was not to be forced above the other. The value of science lay in the habits of observation, accuracy and logical thought that they inculcate."

(Cardwell, 57, s.38)

Der blev i 1850'erne - mest på privat initiativ - åbnet nogle tekniske skoler, hvoraf de største var Technical College i South Kensington og Owens College i Manchester. De blev imidlertid ikke den store succes i starten, da de af forskellige grunde ikke tiltrak særlig mange studerende, og fordi de især

i begyndelsen havde store økonomiske problemer.

De gamle universiteter.

Oxford og Cambridge universiteterne bliver i begyndelsen af perioden beskrevet som stedet, hvor overklassens børn fik en social opdragelse og liberal uddannelse. Universiteterne bestod af en række colleges, der var de økonomiske enheder. Hertil blev skolepengene betalt og hertil gik mange af donationerne. Selve universitetet var mindre velhavende og dets professorer mindre indflydelsesrige i forhold til lederne af collegierne.

Om den liberale uddannelse skriver Sviedry i "The Rise og Physical Science at Victorian Cambridge":

"The goal of Cambridge education was the production of a social type, and tutors accordingly infused their students with the values and beliefs that characterized the British gentleman." (s.128)

Den liberale uddannelse på Oxford og Cambridge var begrundet i et klassisk dannelsesideal, hvor klassiske sprog, matematik, filosofi, logik og etik havde en fremtrædende plads i uddannelserne.

Allerede i 30'erne blev Oxford tabt for naturvidenskaberne:

"But shortly after these happenings Oxford was lost to science for a number of years; the great *Tractarian Movement commenced and men's minds were turned to other matters." (Cardwell, 57, s.41)

I modsætning hertil blev der på Cambridge i disse år lagt stor vægt på matematikken. Den mest ansete matematikuddannelse i landet fandt sted på Cambridge's matematikkurser - Mathematical Tripos - og blandt kandidaterne herfra finder vi bl. a. Green (1837), Stoke (41), Thompson (45), Tait (53), Maxwell og Routh (54).

Andre naturvidenskabelige fag blev optaget på læseplanen i begyndelsen af 1850'erne, idet der ved siden af Mathematical Tripos blev afholdt Natural Science Tripos. Den naturvidenskabelige undervisnings succes var imidlertid begrænset i begyndelsen på grund af matematikkens høje prestige.

Udviklingen på universiteterne og de højere læreanstalter frem til 1867 kan kort beskrives således:

* Høj Kirkelig anglikansk bevægelse.

Uddannelserne var almendannende, hvor matematik havde en fremtrædende placering, mens de andre naturvidenskabers betydning var lille.

Uddannelserne var ikke specialiserede, og de studerende blev ikke trænet i selvstændigt forskningsarbejde. Eksamensformen var skriftlig eksamen.

De tekniske uddannelsesinstitutioner var få, og uddannelserne her byggede mest på håndværkeres erfaringer. Der var ingen større kontakt mellem de tekniske skoler og universiteterne, og der blev kun uddannet få "videnskabelige" teknikere på universiteterne.

Der var i perioden ikke mangel på reformforslag, både angående universiteterne og de tekniske skoler, men den liberale regerings laissez-faire politik bevirkede, at centrale reformer ikke blev gennemført og at institutionerne ikke fik statsstøtte. Lokale reformer var det også småt med, dels på grund af de små midler, men også på grund af indre institutionelle magtforhold og konservatisme.

Tekniske uddannelser efter 1867.

Årsagen til at 1867 her er sat som skæringspunkt er, at verdensudstillingen i Paris i dette år klart viste, at England havde tabt terræn i den teknologiske udvikling. De forskellige europæiske lande og USA havde på de fleste områder indhentet og endda mange steder overhalet England. Det galdt både indenfor det kemiske og mekaniske område. En engelsk ingeniør J.S.Russel udtrykte det således:

"..it was not that we were equalled, but that we were beaten, not on some points, but by some nation or another at nearly alle those points on which we had prided ourselves." (Cardwell, 57, s.85).

Dette var sket på blot 16 år, idet den engelske teknologi havde været overlegen på alle punkter ved verdensudstillingen i London i 1851.

L.Playfair, der var englænder og medlem af bedømmelseskomiteen ved udstillingen i Paris, skrev om den engelske stagnation;

"That our engineers and chemists lamented this and ascribed our failure - if indeed, that was the case, to the system of technical education developed in European countries for the masters and managers of industry." (Cardwell, 57, s.85)

Diskussionerne om tekniske uddannelser og forholdet mellem naturvidenskab og teknologi var startet langt tidligere. Samme Playfair hævdede allerede i 1852 efter en udenlandsrejse, at man i England i industrien havde en "overweening respect for practice and a contempt for science", og han beklager sig over:

"in this country we have eminent "practical" men and eminent "scientific" men, but they are not united and generally walk in path wholly distinct"
(Cardwell, 57, s.68)

Efter 1867 accentueredes diskussionerne og diverse kommiteer og kommissioner blev nedsat, dels af regeringen og dels af de forskellige videnskabelige selskaber. De mere betydningsfulde var Devonshire kommissionen i 1872 og Royal Commission i 1881-84. Der blev foreslået tekniske universiteter, statsstøtte til tekniske colleges, reformering af secondary school, så naturvidenskab og teknik blev fremmet der mm., men der skete ikke meget på grund af regeringens manglende indgriben.

I 1870'erne blev der oprettet en del nye tekniske colleges, både i London og i en række provinsbyer, og disse blev til dels støttet af industrien. Uddannelserne var dog mangelfulde i begyndelsen, da man manglede uddannede lærere, og da man manglede tilstrækkelige midler til at opbygge laboratoriefaciliteter mv. De lave niveau i secondary school lagde også begrænsninger på niveauet i de tekniske colleges.

Først i 1889 blev der bevilget penge fra det offentlige, og først herefter kunne de tekniske colleges begynde at udvikle sig hen imod mere videnskabelige institutioner med selvstændigt eksperimentalarbejde.

En anden hindring for ekspansionen indenfor de tekniske uddannelser var, at industrien kun i meget lille omfang ansatte teknisk-"videnskabeligt" uddannede folk. Royal Commission fandt i deres undersøgelse af forholdene på kontinentet, at managere og direktører på kontinentet dels besad en stor naturvidenskabelig viden, og dels mente, at industriel succes ikke kunne opnås uden høj teknisk instruktion, original forskning og en generel anerkendelse af uddannelse og forskning.

Og

"The Commissioners did not feel that the value of high scientific training was generally appreciated in Eng-

land."The englishman is accustomed to seek for an imidiat return and has yet to learn that an extended and systematic education, up to and including the methods of original research is now a necessary preliminary to the fullest developement of industry." (2nd Report, Vol I p. 525, 1884)." (Cardwell, 57, s.104)

Denne adskillelse mellem industriens ansatte og ledere på den ene side, der for det meste var faglærte eller uddannet som sådanne og de videnskabeligt uddannede på den anden side, genfindes mange steder i England i perioden. Som eksempel kan nævnes B.Hunts artikel: "Practice vs. Theory", der skildrer modsætningerne mellem de, der har det praktiske arbejde med elektriciteten - elektrikerne - og teoretikerne - videnskabsmændene og senere elektroingeniørerne - , hvor det tog tre års debat (1888-91) før elektrikerne måtte erkende, at videnskabsmændenes teorier var rigtige, og at deres egen traditionelle praksis var utilstrækkelig. En anden debattør skrev i 1868, at det var mangelen på videnskabelig uddannelse, der bevirkede

"that reliance on the rule of thumb should characterise English, as opposed to German, industrial practice; even in the engineering industries, where one has supposed that we led the world, there prevailed a miserable system of "blunder and plunder". (Cardwell, 57, s.111).

Vi kan konkludere, at op til slutningen af forrige århundrede var de tekniske uddannelser i England ikke videnskabelige, og mange af de teknikere, der arbejdede i industrien var faglærte håndværkere, der blev oplært gennem egne og læremestres erfaringer. Der fandtes også naturvidenskabeligt uddannede ingeniører, men de var få, og deres uddannelse indeholdt kun i de færreste tilfælde egentlig forskningsarbejde.

Den eneste undtagelse herfra var kemiingeniører, der i højere grad var forskningsuddannede, og som blev ansat til forskningslignende arbejde i industrien.

Den engelske industris interesse i naturvidenskabeligt uddannet arbejdskraft er begrænset, og det var kun meget få virksomheder, der før 1900 oprettede egne forskningslaboratorier. Der er kun eksempler på sådanne indenfor den kemiske industri. Men industriens mistro til de videnskabeligt uddannede kunne også hænge sammen med de kvalifikationer, universiteterne udstyrede sine kandidater med.

Universiteterne efter 1867.

Det nye der skete på universiteterne efter 1867 var indførelsen af eksperimentel fysik, hvilket skete i perioden 1870-76. Cavendish laboratoriet ved Cambridge blev f.eks. oprettet i 1872.

Undervisningsmetoden og indlæringsmetoden i forbindelse med det eksperimentelle arbejde var helt forskellig fra tidligere, idet det var selvstændigt arbejde af forskningsmæssigt karakter. Der var ingen faste regler for eksperimenterne, og de studerende opfordredes til selv at lave deres apparater og udføre egne undersøgelser.

De øvrige fag afsluttedes stadig med skriftlige eksaminer i et fastlagt pensum. Eksperimentalfysikken fik da også i begyndelsen kun en begrænset plads i læseplanerne, og der var også modstand mod denne nye "selvstændige" arbejdsmetode. (Cardwell 57, s.108).

De eksperimentelle studiers betydning var dog stadig lille, dels fordi mange universiteter ikke havde råd til særlig store laboratorier, og dels fordi man stadig holdt fast ved at uddannelserne ikke skulle specialiseres.

På Cambridge eksisterede der to slags kurser: Mathematical Tripos, der indeholdt teoretisk matematik og hvor eksperimenter var upassende, og Natural Science Tripos, hvor den højere matematik så til gengæld blev anset for upassende. Til langt op i 80'erne var højere matematik på den ene side og naturvidenskaber og eksperimentelt arbejde på den anden adskilt i uddannelsen, og kun studerende, der tog begge dele blev kvalificeret til at lave egentlig forskning. Først i 90'erne blev den højere matematik inddraget i naturvidenskabsundervisningen. Planer om at oprette en ingeniør "gren" på universitet, Mechanical Science Tripos, blev afslået i 1887. Denne adskillelse og de manglende muligheder for specialisering hindrede derfor i nogle årtier, at uddannelsen i højere grad kunne blive en forskeruddannelse. Uddannelserne på Cambridge var da også stadig de brede liberale uddannelser, der sigtede mod erhverv som lærere ved højere uddannelser eller ved secondary school. Derudover sigtedes mod medicin, jura, præsteembeder og ingeniørjob.

Kandidaterne i perioden 1871-1900 fra Natural Science Tripos (119 ialt) fordelte sig således på følgende erhverv:

Cambridge karriere	11,3%
Højere uddannelsesinst.+sec.school	50,0%
Medicin	5,9%
Jura	4,6%
Ingeniør	4,6%
Kirken	5,9%
Andre	5,0%
Ukendt	12,6%

(Sviedrys, D 70, s.144)

I den forskning, der foregik på Cavendish laboratorierne blev matematik og fysik i høj grad integreret, men det var de færreste studerende, der kunne specialisere sig tilstrækkeligt til at få glæde af det. Forskningen drejede sig mest om teoretisk fysik og matematik og studiet af forskellige fysiske systemers dynamiske forhold stod i forgrunden. Forskningen rettede sig ikke mod forhold, der umiddelbart kunne være til glæde for industriens teknologivikling.

Det engelske uddannelsessystem kan kort karakteriseres således:

De tekniske uddannelser i England er håndværksprægede til langt op i det 19. århundrede. Først med statsstøtten og etableringen af laboratorier i slutningen af århundredet blev grunden lagt til kompetente tekniske uddannelsesinstitutioner med selvstændig forskning og uddannelse til forskning. Niveauet i de tekniske uddannelser hævedes først efterhånden som secondary school blev reformeret, og som der blev uddannet kompetente lærere. Den sene udvikling af de tekniske uddannelser skyldtes ikke mangelen på reformforslag, men skyldtes dels regeringens manglende styring, økonomisk såvel som indholdsmæssigt, og dels den store afstand, der var mellem industriens praktiske folk og de videnskabeligt uddannede.

Universitetsuddannelsernes manglende specialisering og almindendannende indhold, samt deres manglende oplæring til eksperimentel forskning samt endelig deres manglende kontakt

til tekniske institutioner og problemer, medførte at adskillelsen mellem universitet og industri blev opretholdt, og at de forskningsmiljøer, der eksisterede, arbejdede med udelukkende teoretisk-videnskabelige problemer.

Sammenligning mellem det engelske og tyske uddannelsessystem.

Gennemgangen af uddannelsessystemerne i England og Tyskland viser, at det tyske uddannelsessystem var det mest sammenhængende og det mest udbyggede. Det tostrengede system med gymnasieskoler og realskoler med centralt fastsat pensum, også i matematik og naturfag, adskiller sig væsentlig fra den engelske primary og især secondary school, der fagligt var på et ret lavt niveau, og hvor naturvidenskaben havde en uhyre underordnet placering.

Dette gav i Tyskland et højere fagligt begyndelsesniveau ved de videregående uddannelser, især ved de tekniske. Det tostrengede system fortsatte med tekniske skoler, handelsskoler og tekniske højskoler på den ene side og universiteterne på den anden. Den tyske uddannelsesstruktur producerede en bred vifte af forskelligt uddannede folk fra senior ingeniører og forskere over mellemteknikere til kontorfolk og sælgere. (Cardwell, 72, s194).

Eksistensen af de tekniske uddannelsesinstitutioner er med til at sikre, at afstanden mellem industri og videnskab på disse institutioner ikke blev for stor. Den teoretiske videnskab og teknologien mødtes på de tekniske skoler, hvor universitetsfolk underviste, og den differentieret kvalificerede arbejdskraft i industrien bevirkede, at der ikke opstod den store kløft mellem industri og videnskab som i England.

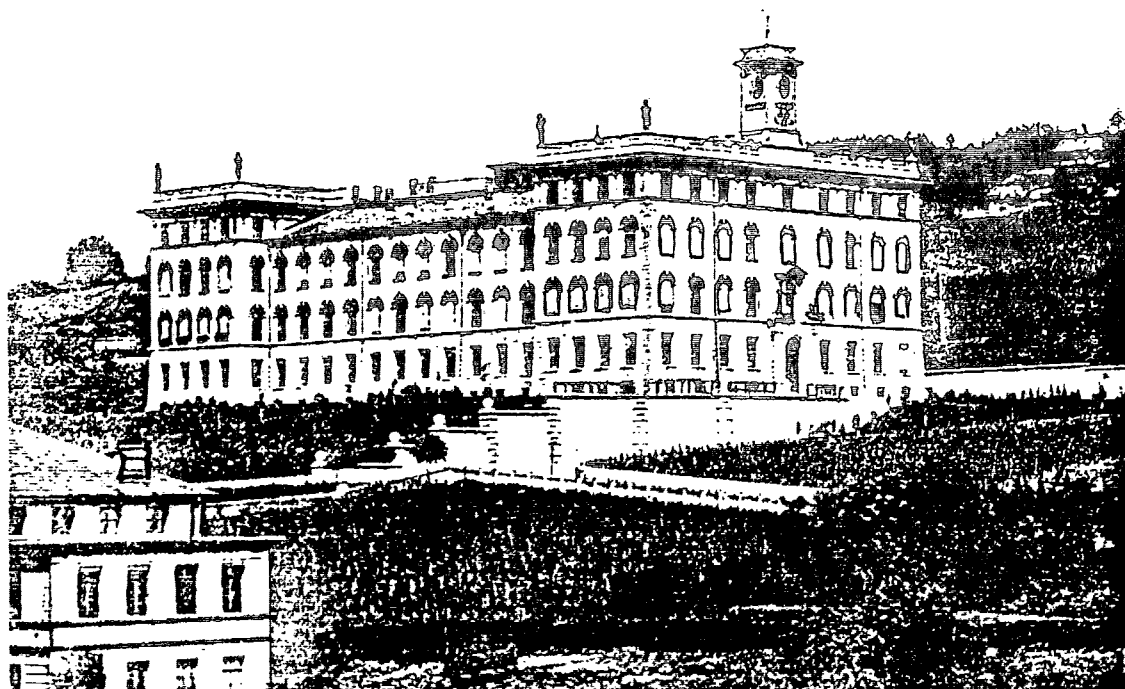
I Tyskland var det en udbredt fælles erkendelse i industriens førende lag, at industriens vækst og konkurrenceevne var afhængig af den teknologiske udvikling, og at denne igen afhang af videnskaben og forskningen.

En sådan erkendelse dukkede først sent op i England, da den engelske industri blev overhalet teknisk af bl.a den tyske. Først da erkendte man, at erfaringer ikke var tilstrækkelige til en konkurrencedygtig teknologisk udvikling.

I England blev de tekniske uddannelser ikke udviklet særlig hurtigt, der eksisterede kun meget få institutioner, hvor der kunne ske en formidling mellem teknologi og videnskab. Universiteterne var ikke opmærksomme på industrien, og industrien nærede stor mistro til videnskaben.

Nogle tal kan vise forskelle i udbredelsen af de tekniske uddannelsesinstitutioner. I Tyskland og Schweiz eksisterer følgende større tekniske højskoler i 1868 med antallet af professorer og forelæsere angivet i parentes:

Zürich Polytechnik (60), Karlsruhe (47), Dresden (23), Hannover (24), Wien (57), mens de største tekniske colleges i England er: South Kensington College (12) og Owens College (17). (Cardwell, 57, s.90)

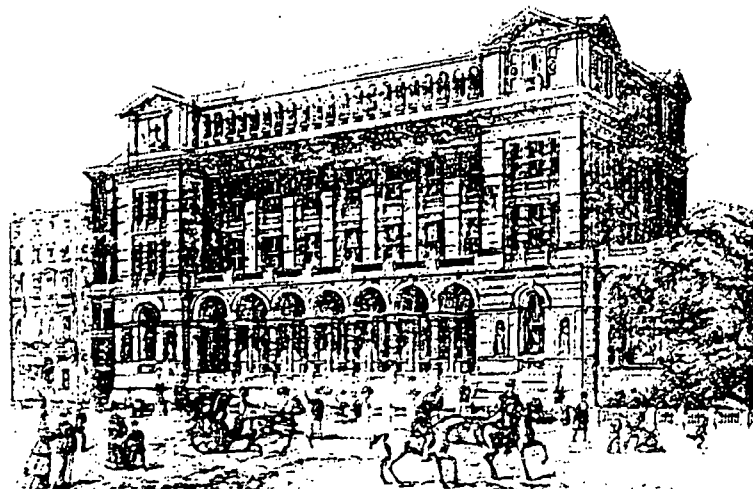


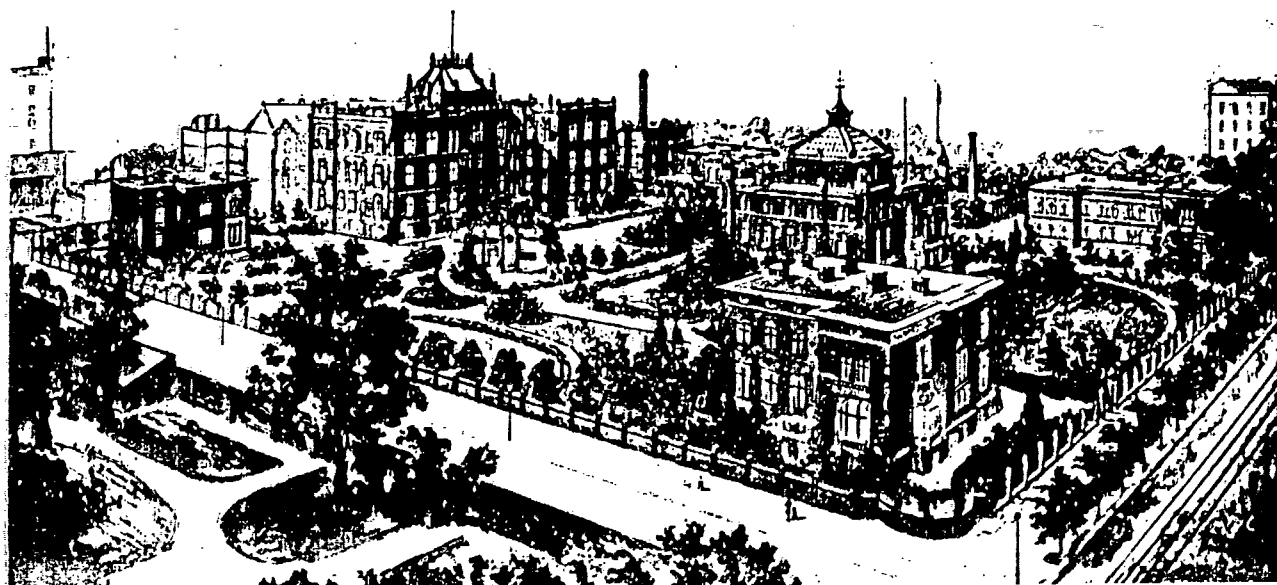
The Physical Institute of the Zurich Polytechnic circa 1900.
(Festschrift zur Feier des fünfzigjährigen Bestehens des eidg.
Polytechnikums: Zurich, 1905), 2, 336.)

Indholdet i uddannelserne var også forskelligt. Mens indholdet i de tyske og engelske universiteter lignede hinanden - vægten på klassisk dannelse - var naturvidenskabsindholdet noget mere fremtrædende i de tyske realskoler og på de tekniske skoler og højskoler. Uddannelserne i Tyskland blev også specialiserede hurtigere end uddannelserne i England. Arbejdsmåden på universiteterne i de to lande var også forskellig. I Tyskland blev der lagt vægt på træning til selvstændig forskning og princippet var Lern- og Lehrfreiheit. I England eksisterede et stivere eksamenssystem og fastlagte pensa. Først sent kom eksperimentalfysikken til at betyde noget i England.

En af de væsentligste årsager til forskellighederne i systemerne lå i den tyske centrale styring og finansiering af uddannelsessystemet, der stod i krads modsætning til den engelske liberalistiske holdning, hvor regeringen hverken styrede eller støttede. Den tyske industri satsede bevidst og kraftigt på at overvinde den engelske industrielle dominans ved at satse på teknologisk udvikling. Industriborgerskabet havde et lydøørt statsapparat til en sådan strategi. Den britiske hidtidige konkurrenceoverlegenhed gav helt op til midten af århundredet ikke anledning til at anfægte liberalismen, og først efter 1867 viste laissez-faire politikens utilstrækkelighed sig. Det var først i slutningen af århundredet, man i England erkendte at pro-

165. «New Science School», Exhibition Road, South Kensington. Nå del av London University, bygd i 1872 av overskuddet etter utstillingen i 1851. Fra *Illustrated London News*, 1872.





The proposed PTR, drawn sometime between 1884 and 1887. Photograph courtesy of Siemens-Museum, Munich.

fessionel forskning i forbindelse med teknologiudviklingen var nødvendig, og at den koster penge. Følgende tal kan give en fornemmelse af, hvad det er man i England skal råde bod på:

Statsstøtte til universiteter
og højere læreanstalter

	England	Prøjsen
1897-98	£ 26.000	
1900-01		£ 476.000
1902-03	£ 40.000	

(Cardwell, 57, s.155)

Videnskabsopfattelser i England omkring midten af det 19. århundrede.

Vi vil i dette afsnit først forsøge at fremdrage nogle forskellige holdninger til videnskabens funktion og dens legitimering hos nogle af de mennesker, som beskæftigede sig med reguleringsteknik i England omkring midten af 1800-tallet og som er blevet omtalt i de foregående afsnit.

Det er næppe nogen overraskelse, at videnskabelige aktiviteter afspejler den sociale sammenhæng, de udføres i. Der er allerede tidligere i projektet gjort rede for de institutionelle sammenhænge, videnskaben blev udført i. I dette afsnits anden halvdel vil vi mere generelt prøve at give nogle eksempler på den sociale og intellektuelle kontekst, videnskabsmændene arbejdede i, samt prøve at illustrere, hvordan den kulturelle baggrund slog igennem i deres arbejde.

Sådan som projektet iøvrigt er opbygget, ville det have været naturligt at give en lignende redegørelse for Tysklands vedkommende. Når vi kun gør det meget kort, er det dels fordi udviklingen i Tyskland efter vores fornemmelse overvejende er bestemt af institutionelle forhold, nemlig udbygningen af uddannelsessystemet, men også fordi vi først sent i projektforløbet har fundet litteratur, der omhandler dette emne.

To opfattelser af videnskabens formål og funktion: Siemens og Maxwell.

Når den tekniske og videnskabelige udvikling, der foregik indenfor reguleringsområdet i det 19. århundrede har tiltrukket sig stor opmærksomhed i de senere år, er det først og fremmest fordi emnet er interessant udfra en videnskabshistorisk og -teoretisk synsvinkel, idet det med især Airys og Maxwells arbejder var i denne periode, moderne kontrolteori blev grundlagt.⁺

Emnet er tillige interessant, fordi det dels optog tusinder af opfindere og ingeniører, hvis navne for de flestes vedkommende er gået

⁺ Med moderne kontrolteori menes normalt, at man direkte regner på de differentiaalligninger, der beskriver systemet, mens klassisk kontrolteori i højere grad benytter sig af "værktøj", såsom grafiske afbildninger og senere også Laplace-transformationer etc. Der er således mening i at sige, at den moderne kontrolteori blev grundlagt i midten af 1800-tallet, men at den lå i dvale til o. 1940'erne, hvor der var udviklet computere, der kunne håndtere differentiaalligningerne.

i graven sammen med personerne, dels optog nogle af tidens mest prominente videnskabsfolk, såsom Airy, Maxwell, Lord Kelvin, Foucault, brødrene Siemens, Vyshnegradskii m.fl. Man kan spørge sig selv, om de sidstnævntes interesse i problemet udelukkende var af ren teoretisk karakter, eller om de tillige bidrog med opfindelser og/eller teoretisk arbejde, der kunne bruges praktisk i industrien. Spørgsmålet kan ikke besvares generelt, hvilket leder til næste spørgsmål, som er det, vi først vil belyse nærmere, nemlig: afspejler disse menneskers interesse for reguleringsteknik og kontrolteori en mere dybtliggende holdning til, hvorfor og for hvem, man driver videnskab?

Af primært pladsmæssige hensyn vil vi prøve at besvare dette spørgsmål eksemplarisk ved blot at behandle William Siemens⁺ og Maxwell. Der ved går vi imidlertid glip af en pointe: udover videnskabelig nysgerrighed og andre mere private motiver til at beskæftige sig med emnet, er det iøjnefaldende, at alle de ovennævnte på nær Vyshnegradskii kendte hinanden personligt. F.ex. var de alle Fellows of Royal Society. Det er derfor nærliggende at antage, at kendskabet til og bevidstheden om, at "de andre" beskæftigede sig med beslægtede emner og den deraf følgende mulighed for gensidig inspiration (og konkurrence?) også har været et vigtigt motiv for dem.

C. William Siemens (1823-83) kom til London i 1844 primært for at markedsføre sin kronometriske regulator (se afsnittet "Historisk oversigt"), som han havde opfundet sammen med sin bror Wilhelm - den berømte elektroingeniør. PR-kampagnen fik bl.a. til følge, at Airy med succes anvendte nogle af Siemens' regulatorer til regulering af teleskoper o.a. videnskabelige instrumenter, men nogen kommerciel, industriel gennemslagskraft fik de aldrig.

William havde fået, hvad der meget ligner en moderne, naturvidenskabelig ingeniøruddannelse. Efter 3 år på den tekniske højskole i Magdeburg (1838-41) studerede han matematik, fysik og kemi i 1 år på Göttingens universitet og var endelig 1½ år lærling på en dampmaskinefabrik. Denne

Det havde naturligvis været mere oplagt at eksemplificere ved hjælp af Vyshnegradskii, men da det historiske kildemateriale på tilgængelige sprog er meget begrænset, har vi valgt at se bort fra ham i denne sammenhæng. Udfra tilgængeligt materiale er der dog meget, der tyder på, at hans baggrund og intentioner på flere måder ligner Siemens', hvorfor konklusionerne i vidt omfang kan overføres til Vyshnegradskii.

sammensmeltning af praktiske og videnskabelige kvalifikationer videreførte han i sin senere karriere. Hans formidable succes indenfor industrien skyldtes evnen til at bruge naturvidenskabelig erkendelse på praktiske, tekniske problemer parret med en veludviklet forretningssans. Men samtidig trængte han altid efter en status som videnskabsmand. Hans "Scientific Works" fylder tre bind, og han spillede ledende roller både i diverse ingeniørsammenslutninger og i British Association for the Advancement of Science og Royal Society. Han henviste da også til sig selv, som en "der hele livet igennem kun har slidt med naturlovene og deres praktiske anvendelse". Da han senere indså, at den enhed mellem videnskab og praksis, som han selv søgte at repræsentere, var en saga blot, skrev han: "The advancement of the last fifty years...has rendered theory and practice so independent, that an intimate union between them is a matter of absolute necessity for our progress." (Begge citater efter Mayr, 1971).

Denne sammensmeltning mellem teknologen og videnskabsmanden, praktiker og teoretiker, havde Siemens i større eller mindre grad tilfælles Airy, Foucault og William Thomson (Lord Kelvin). Men hvor vejen hos Siemens først og fremmest gik fra den naturvidenskabelige erkendelse til dens anvendelser, gik den hos Kelvin især den modsatte vej. Hans bidrag til den teknologiske udvikling udsprang - i det mindste indirekte - fra hans arbejde med nedlægningen af det atlantiske telegrafkabel. Hvad han især værdsatte ved ingeniørverdenen, var dens evne til at forsyne den videnskabelige verden med interessante problemer og empiriske data.

Kelvins engagement i reguleringsteknikken stammer fra de selvsamme forsøg til bestemmelse af ohm'en, som formentlig indirekte førte til Maxwells "On Governors". Meget tyder på, at Kelvin konstruerede den regulator, der blev brugt i forsøget, sammen med Fleemin Jenkin. (Denne regulator var for øvrigt en modificeret Siemens-regulator). Udover denne konstruerede Kelvin flere andre regulatorer - alle dog uden interesse udenfor videnskabelige kredse!

Der er tidligere i projektet redegjort for, at Maxwells motiver til at beskæftige sig med hastighedsregulering, dynamisk stabilitet og differentialgearning var rodfæstet i hans videnskabelige tænkning og ikke i et ønske om at bidrage til praktiske fremskridt, hvilket synes at afspejle hans generelle holdning. Han gav sin største ros til videnskabelige arbejder, der indeholdt videnskabsdannende ("science-forming") ideer, og hans publikationer og taler indeholdt talrige overvejelser om forholdet

mellem fysik og videnskabelige nabodiscipliner, specielt matematik. Matematificering og kvantificering var ønskelig på alle niveauer. John Herschel, der var en af 1820'ernes og 30'ernes mest fremtrædende og indflydelsesrige videnskabsmænd, havde i 1830 i bogen "Preliminary discourse on the study of natural philosophy" givet en opsummering af naturvidenskabens hidtidige resultater og dens metoder og havde tillige opstillet målene for den fremtidige fysikforskning. Dette arbejde fik meget stor betydning for undervisningen og forskningen på Cambridge og dermed for Maxwells og Kelvins arbejder. Herschel skriver bl.a:

By far the most general problem with which we are acquainted, and that which occurs most constantly, in every inquiry into which we enter, is motion and its communication. Dynamics, then, or the science of force and motion, is thus placed at the head of all sciences.

(citeret efter Wilson, 1982).

Indenfor fysikdisciplinerne var astronomien naturligvis hovedeksemplet på en matematificeret, dynamisk videnskab. Af arbejder i forlængelse af Herschels retningslinjer kan nævnes Stokes' dynamiske diffraktionsteori (1849), Kelvins dynamiske varmeteori (1851) og Maxwells dynamiske elektromagnetiske feltteori (1865).

At Maxwells egen opfattelse af fysikkens hovedproblemer og -formål lå meget tæt op ad Herschels, viser f.ex. hans klassifikation af fysikvidenskaberne i "Encyclopaedia britannica" fra 1870'erne:

When a physical phenomenon can be completely described as a change in the configuration and motion of a material system, the dynamical explanation of that phenomenon is said to be complete. We cannot conceive any further explanation to be either necessary, desirable, or possible, for as soon as we know what is meant by the words configuration, mass, and force, we see that the ideas which they represent are so elementary that they cannot be explained by means of anything else.

(citeret efter Wilson, 1982).

I hele den victorianske periode tilstræbte man på Cambridge at matematificere fysikvidenskaberne, især ved at reducere fysiske fænomener til dynamiske systemer for derigennem at få den dybeste forståelse af den fysiske natur.

Maxwells arbejder indeholdt aldrig henvisninger til ingeniørmæssige eller industrielle anvendelser og heller ikke overvejelser om forholdet mellem fysik og teknologi (hvilket naturligvis ikke betyder, at han så ned på teknologien eller at han var en fummelfingret, verdensfjern teoretiker - han konstruerede tværtimod mange af sine måleinstrumenter selv). Teknisk brugelighed var formodentlig blot ikke en drivende kraft for hans arbejde. Hans store engagement i videnskabeligt arbejde har snarere filosofiske overtoner, jvf. hans overvejelser om "Science and Free Will" m.m. (Mayr, 1971). Dette er tendenser, som kan spores tilbage til hans studentertid på Cambridge, hvor han bl.a. var med i et diskussionsforum, hvor man beskæftigede sig med konsekvenserne af den klassiske filosofi (Paradis et al, 1981).

Til trods for de mange kompetente videnskabsmænd, der har beskæftiget sig med reguleringsteknik og konstruktion af regulatorer, må man konstatere, at deres praktiske betydning har været meget ringe, ja nærmest den totale fiasko. Nok diskuteredes Foucaults og Siemens' regulatorer i årevis i ingeniørtidsskrifter, men de blev aldrig brugt på fabrikkerne, ligesom de øvrige konstruktioner aldrig nåede udenfor videnskabelige kredse. Det er ikke for meget sagt, at disse menneskers teoretiske indsigt ikke gav dem nogle fordele på det kommercielle marked i forhold til "håndværkerne".

Eksemplarisk kan de behandlede videnskabsfolk fortælle en del om de forskellige holdninger til videnskabens begrundelse og funktion, som var udbredt på den tid. Siemens og med ham Airy, Foucault og til en vis grad Kelvin, som indtager en mellemposition, synes i forskellig grad at tro på en grundlæggende enhed mellem videnskab og teknologi. De kan således siges at fortsætte en tradition fra Huygens, Hooke og Watt, gående ud på, videnskab nødvendigvis må føre til samfundsmæssige fremskridt, og at opnåelsen af disse er videnskabens retfærdiggørelse. Et sådant videnskabssyn var meget udbredt i det 17. og 18. århundrede og dybt rodfæstet i kristen, vesteuropæisk tradition.

For Maxwell derimod er videnskaben legitimeret etisk, og jo bedre, jo renere videnskaben var. Som konsekvens af dette er forskerne ikke ansvarlige overfor samfundet, men kun overfor det arbejde, de laver. Da teknisk fremskridt desuden ikke er noget mål i sig selv, men snarere tilfældige biprodukter, krævede disse forskere total frihed for forsk-

ningen. Jo større frihed, jo bedre forskning og dermed i sidste ende større materielle fremskridt for samfundet. Dette videnskabssyn, som jo er meget udbredt i vore dage, synes også at have været det mest udbredte i det 19. århundrede.

Konkluderende kan vi altså konstatere, at der hos de personer, vi har behandlet, rent faktisk er tale om ret så forskellige holdninger til spørgsmålet om videnskabens formål og funktion. Man kan derfor spørge, om det skifte - eller måske snarere brud - i holdninger, der er beskrevet, afspejler nogle dybereliggende ændringer i samfundet?

Man kan i hvert fald sige, at Maxwells synspunkter er i smuk overensstemmelse med de liberalistiske tankegange - liberalistisk forstået bredt, som troen på frihed i alle livets forhold - som hånd i hånd med kapitalismen spirede frem i tilknytning til den industrielle revolution. Omvendt kan man ikke sige, at det mere pragmatiske synspunkt, som bl.a. Siemens repræsenterer, er i modstrid med kapitalistiske krav til arbejdskraften. Der var snarere tale om en endelig spaltning af den traditionelle, omnipotente videnskabsmand - eller naturfilosof, som han kaldtes - i en ingeniør, med en uddannelse, der havde sit eget formål, indhold og retning og i en i moderne forstand specialiseret og professionaliseret videnskabsmand. Vi vil i næste afsnit give nogle eksempler på, hvad det er for en udvikling, der fører frem til denne sprængning.

Den sociale og intellektuelle baggrund.

Spørgsmålet om, hvilke nye visioner, der kunne skabe håb for fremtiden for de forskellige sociale klasser, nu hvor kristendommen lå i søttesengen, var måske et af de mest afgørende i hele Vesteuropa i første halvdel af det 19. århundrede. De store lande havde hver deres svar på denne udfordring, og den måde, videnskaben udviklede sig på i disse lande, var grundlæggende påvirket af de respektive svar.

Omkring århundredskiftet udgjorde idealismen i Tyskland et forsøg på at realisere en ny religiøs mening med livet. Dette afspejler een af hovedforskellene mellem Tyskland og de øvrige europæiske lande. Først med Feuerbach (1804-72) kommer materialistiske tanker for alvor frem i Tyskland.

I modsætning til i England var højfinans og store virksomhedsforetagen-

der sjældne i Tyskland i denne periode, og mange af fabrikkerne var statsejede. Håndværkere og små købmænd udgjorde hovedparten af den tyske bybefolkning. De tysktalende stater havde ikke en selvsikker og selvbevidst middelklasse, som var stolt af sine egne evner og sine bidrag til statens velfærd, og den forsøgte ikke at opnå politiske rettigheder. Middelklassen underlagde sig nærmere den absolutisme og autoritet, som karakteriserede de tyske staters politiske struktur. Da kirken og skolen var statsinstitutioner, var præster, professorer og lærere statstjenestemænd, og de var blandt de mest indflydelsesrige i det offentlige liv. Tankefrihed (freiheitslehre) var disse tjenestemænds vigtigste, politiske krav til staten.

Frihedsbegrebet står netop i centrum for den tyske idealistiske samfundsteori, som den kommer til udtryk hos f.ex. Fichte (1762-1814) og hos Hegel (1770-1831). Det er imidlertid ikke et individualistisk frihedsbegreb, der opereres med. Fra Kant hentede man princippet om, at det der kan begrunde indskrænkninger i det enkelte menneskes frihed, er hensynet til andres frihed. Dette princip suppleredes med, at staten har pligt til at sikre ikke blot denne frihed, men også borgernes velfærd ved at skaffe dem arbejde. Staten skal kontrollere erhvervslivet, og borgerne henvises til bestemte beskæftigelser indenfor de fire stænder: landbrug, håndværk og handel eller som statsfunktionærer. Nationen opfattes som en åndelig enhed, der holdes sammen af tradition og sprog. Begrebet frihed kommer herved til at betyde individets udfoldelse i overensstemmelse med helheden - staten. Det er væsentligt for friheden, at man er sig den bevidst og frivilligt accepterer de moralske principper, der indebærer, at man ikke følger enhver impuls. Ureflekteret given efter for enhver irrationel impuls, der dukker op i en, er ikke frihed.

Det er indlysende, at staten i denne situation får en uhyre stor indflydelse på uddannelsessystemets indretning, sådan som der tidligere er redegjort for.

I England var man ikke tilfreds med blot tankefrihed, men kapitalisterne krævede frihed i alle forhold. Selvhjælp, laissez-faire, individualisme var kodeord. Hvis blot alle ville følge deres eksempel, ville skoler, hospitaler, plejehjem osv. skyde op på privat initiativ. Denne individualisme og atomisering prægede også uddannelsesinstitutioner og universi-

teter samt lærerne og professorerne indenfor disse.

En person, der tilhørte den intellektuelle elite i den tidlige victorianske periode omkring 1830, mestrede typisk alt, hvad der var værd at vide noget om. Minimumsstandarden var "en mand, der vidste noget om alt, og alt om noget" (August Morgan, her citeret efter Paradis et al, 1981). Disse egenskaber gav naturfilosoffen hans særlige sociale status og prestige. Videnskaben havde været med til at ændre det verdensbillede, folk havde, i en aldrig tidligere set udstrækning, og naturfilosofferne fik af borgerskabet en stor del af æren for den sociale, kommercielle og intellektuelle fremgang, som dette oplevede. Han blev symbolet på den nye æra.

I sin egen selvforståelse var naturfilosoffen bærer af en tradition, der indbefattede en tilegnelse og udbredelse af al tilgængelig viden, samt deltagelse i det almindelige kulturliv i en grad, der ikke sås andre steder i Europa. Dette skete imidlertid i en vis udstrækning på bekostning af hans egentlige funktion: produktion af ny erkendelse.

Denne selvopfattelse hos naturfilosofferne var medvirkende årsag til den i forhold til Tyskland forsinkede reform af uddannelserne. Nogle har endda set det som "a national attitude towards both specialized knowledge and professional norms" (Paradis, op.cit.). Først i sidste halvdel af århundredet fremstår videnskaberne i deres moderne form.

Op gennem ^{første halvdel af århundredet} skete en enorm vækst i produktiviteten, men videnskaben spillede kun en mindre rolle i denne udvikling. Det var ikke radikale, tekniske forandringer, der prægede udviklingen, men snarere en støt og jævn udvikling af produktionsmetoderne, sådan at der kunne opereres i stadig større stil. Selv om konkurrenterne dukkede op i udlandet, forøgede England i denne periode det forspring, det havde haft siden den industrielle revolution,

Denne stagnation i videnskaberne indflydelse på produktionslivet har naturligvis flere årsager. Den fremvoksende ingeniør- og bureaukratstand efter især tysk og fransk mønster, fik en stigende indflydelse. Perioden 1825-50 er netop den, hvor man får den kraftigste påvirkning fra Tyskland. Siemens er allerede nævnt som eksempel. Som et andet kan nævnes datidens mest energiske og fremgangsrige lokomotivfabrik Beyer, Peacock & Co. der grundlagdes i 1854. Beyer var tysker og uddannet på en teknisk højskole. Af 8 ingeniører, der var ansat på fabrikken, var i star-

ten 3 tyskere (Cardwell, 1972). Der er således tegn på allerede før midten af århundredet, at England er ved at miste den teknologiske førerposition - et forhold, der dog først bliver klart for enhver i midten af 60'erne.

Som en anden faktor kan man trække den tidligere nævnte organisering af det videnskabelige liv samt naturfilosoffernes selvforståelse indenfor dette, frem. Omkring 1830 begyndte en gruppe videnskabsmænd med bl.a. Chales Babbage (1792-1871) i spidsen at kritisere regeringen og Royal Society for deres manglende evne til at omstille sig på nye behov. Royal Society havde udviklet sig til noget nær en officersklub, hvor flertallet af medlemmerne kun havde et overfladisk kendskab til videnskab - og de var ikke engang særlig villige til at punge ud! Babbage fremsatte bl.a. sine synspunkter i bogen "Reflections on the Decline of Science" (!) i 1830, hvori han især ser videnskabens manglende specialisering og professionalisering som årsag til stagnationen (eller ligefrem tilbagegangen). Året efter oprettedes "The British Association for the Advancement of Science" (BAAS) som en organisation, der dels skulle fremme og financiere forskning indenfor naturvidenskaberne, dels skulle popularisere og udbrede kendskabet til disse. Det synes paradoksalt, at langt hovedparten af medlemmerne i starten var "interesserede amatører", men på den anden side havde man en langt mere progressiv og dynamisk holdning til videnskaben end de ærværdige gentlemen i Royal Society, og omkring midten af 1800-tallet var det i BAAS, alle de vigtige videnskabelige kontroverser foregik. Meget rammende er det blevet sagt, at ordet naturvidenskab (science) begyndte at få sin moderne betydning med BAAS' fødsel. I virkeligheden udførte BAAS frem til slutningen af århundredet på privat initiativ det, som andre steder var statens opgave.

Igen er det iøvrigt iøjnefaldende, at modellen for BAAS er det tyske Deutsches Naturforscher Versammlung, der blev grundlagt i 1822 af L.Oksen. Han havde i 1819 frasagt sig sin lærestol i Jena, for at hans tidsskrift ISIS ikke skulle underkastes censuren. Den reformbevægelse, han startede, skulle blive en forløber for den videnskabelige renaissance i Tyskland omkring midten af århundredet.

Som en sidste faktor skal nævnes det verdensbillede, videnskaben fremstillede. Man skulle måske tro, at den økonomiske, sociale og tekniske fremgang, borgerskabet oplevede i kølvandet på den industrielle revolution (i den fremvoksende arbejderklasse herskede sult, sygdom og social

og økonomisk nød og elendighed), medførte en tro på menneskets ubegrænsede muligheder. Men i den midt-victorianske periode var teknologien og de udviklingsmuligheder, den frembød, i virkeligheden begrænset af det videnskabelige verdensbillede. Generelt sagt var der indenfor naturvidenskaberne hverken tvivl om, i hvilken retning erkendelsesudviklingen gik, eller om de begrebsmæssige og metodiske rammer, man arbejdede indenfor. De grundlæggende paradigmer forekom med andre ord helt fastlagte. Det var ikke tiden for de store revolutionerende opdagelser, men derimod for syntetiseringen af de store ophobede vidensmængder.

Specielt indenfor fysikken mente man omkring midten af århundredet, at man nu havde opnået en definitiv forståelse af naturlovene (især med opstillingen af de thermodynamiske love og med Maxwells teori om lysets elektromagnetiske natur (1862)). Det var blot et spørgsmål om at slibe ujævnhederne med det fine slibepapir.

Kemien var ikke så veludviklet som fysikken, men man kendte dog de grundlæggende kemiske processer, og de analytiske redskaber var til stede. Godt nok var de kemiske modeller temmelig ufuldstændige, men i årene 1850-75 gjorde man store fremskridt bl.a. med hensyn til forståelsen af kemiske forbindelsers struktur og med hensyn til atomteori (Mendeleevs opstilling af det periodiske system 1869). Kemien var måske det 19. århundredes mest fremgangsrige naturvidenskab, og den gav ophav til en uhyre ekspanderende kemisk industri - især i Tyskland! - indenfor farvestoffer, sprængstoffer, medicin, kunstgødning m.m. Man skulle således måske nok bruge det grove slibepapir, men noget revolutionerende nyt skulle man ikke forvente at finde. "Mendeleev, like Maxwell, looked like the last word in an old discussion rather than the first in a new one." (Hobsbawn, 1977).

Sammen med den næsten totale geografiske kortlægning af hele jordkloden, indicerede den nye videnskab geologi, hvad man kunne forvente sig af råstofreserverne. Det var stort set de samme, man fandt overalt, og selv om man kunne bringe underlige skærver og andre mærkværdigheder med hjem fra kolonierne, var det ikke noget, der kunne forrykke det grundlæggende verdensbillede.

Indenfor biologien skete på lignende måde en lang række vigtige opdagelser i løbet af det 19. århundrede, f.ex. indenfor fysiologi ved Bernard og indenfor mikrobiologi ved Pasteur og Robert Koch. Den mest dramatiske og betydningsfulde begivenhed var dog nok Darwins og Russell Wal-

lace's fremsættelse af evolutionsteorien i 1859. Principielt var der i for sig ikke noget nyt i denne tanke. Evolutionsteorier var blevet fremsat flere gange tidligere, bl.a. Lamarck i 1809. Det nye var "blot" det kolossale og uomgængelige dokumentationsmateriale samt forklaringsmodellen, der blev fremlagt. Teorien skabte virkelig røre i andedammen, både indenfor de naturvidenskabelige kredse, hvor den bl.a. gav anledning til skænderier mellem fysikere, geologer, biologer m.fl. om jordens alder, men naturligvis også indenfor de religiøse kredse. Evolutionsteoriens helt fundamentale betydning lå da også i, at den tilførte videnskaben et historisk element, og dermed brød med de evige sandheder og fastlagte arter, som det kendes fra Det Gamle Testamente, Platon og Aristoteles. Et nyt paradigme var blevet dannet!

På den anden side var evolutionsteorien i smukkeste overensstemmelse med den herskende ideologi i samfundet. Darwins teori var da også inspireret af og udformet på samme grundlag som de liberale kapitalisters egen forståelse. Eksempelvis havde Malthus og Ricardo - begge nære bekendte til Darwin - få år tidligere fremsat teorier om, hvordan henholdsvis befolkningstilvæksten blev begrænset af landbrugsproduktionen og hvordan lønningerne blev betstemt af udbuddet af arbejdskraft. Omvendt kunne Darwins teori nu legitimere den herskende samfundsorden. Den gjorde det muligt at retfærdiggøre praktisk taget alt, hvad der foregik i det kapitalistiske samfund: *laissez-faire*, selvhjælp, udbytning af arbejdere og kolonier med slagordet "survival of the fittest".

Wallace er tilsyneladende blevet inspireret andre steder. Da han skal forklare den naturlige selektion i sin afhandling, skriver han, at "the action of this principle is exactly like that of the centrifugal governor of the steam engine." (citeret efter Bennett, 1979).

Allerede Adam Smith havde i "The Wealth of Nations" (1776), kaldet liberalismens bibel, gjort rede for de *feed back*-sammenhænge, der er mellem udbud og efterspørgsel på et marked, der styres af den frie markedsøkonomi. Disse tanker om samfundet som et selvregulerende system, var kraftigt inspireret af dampmaskinen.

Dampmaskinen og reguleringsteknikken iforbindelse med den samt evolutionsteorien er således gode eksempler på, hvordan tankegodset i de videnskabelige samfund kan modtage inspiration fra omgivelserne, og hvordan de filosofiske tanker og politisk/økonomiske teorier omvendt kan blive påvirket af de videnskabelige teorier.

Alt i alt stod man altså i sidste halvdel af forrige århundrede med en i hvert fald kvalitativ beskrivelse af de tilgængelige ressourcer, og man mente i store træk at have afdækket de fysiske og kemiske naturlove, der bestemmer over omdannelsen af disse råstoffer. Ingen maskine var eller kunne gøres bedre end dampmaskinen. Den udvikling, som videnskaben stillede i udsigt, og som teknikken skulle opfylde, kunne måske nok ende i det perfekte samfund, men vejen til dette skulle være "naturlig" - det skulle foregå i et roligt tempo, evolutionært. Det er således ikke blot en tilfældighed, at Kelvin og P.G.Tate i 1867 skrev:

"There is scarcely any question in dynamics
more important for Natural Philosophy than
the stability or instability of motion."

(citeret efter Bennett, 1979).

KONKLUSION.

Det er en almindelig antagelse - som bl.a. findes hos Bernal - at der under den engelske industrialisering var en tæt forbindelse mellem videnskab og teknologi. I vores konkrete undersøgelse af den videnskabelige og teknologiske udvikling i forbindelse med centrifugalregulatoren har det imidlertid vist sig, at antagelsen er forkert. Regulatorerne i industrien blev konstrueret af håndværkere eller ingeniører, hvis uddannelse først og fremmest var oplæring i praktiske erfaringer og ikke i teori. Den tekniske videreudvikling af regulatorerne skete på baggrund af en "trial and error" metode, som resulterede i stort set vel-fungerende regulatorer, selv om konstruktørerne ikke kendte den teoretiske baggrund for systemernes mekanik.

Videnskabsmændenes interesse for regulatorerne skyldtes ikke interesse for industriens teknologi, men skyldtes en generel interesse i dynamiske systemer og en konkret interesse i regulatorer til videnskabelige forsøg med elektricitet og astronomi.

Maxwells videnskabelige beskrivelse af regulatorens dynamik og stabilitetsforhold får ingen umiddelbare nedslag i regulator-teknologien, hvilket også gælder for Routh's behandling af reguleringsspørgsmål.

Vi ser altså, at der på dette område hersker en fuldstændig adskillelse mellem teknologi og videnskab.

Vi mener også, at adskillelsen ikke blot gælder for regulatorerne, men også for maskinproduktion generelt, altså for hele det mekaniske område. Vi har ikke undersøgt det direkte, men alt hvad vi er stødt ind i i den forbindelse taler for det.

På kontinentet viser samspillet mellem teknologi og videnskab sig at være anderledes på de tekniske højskoler. Både i Skt. Petersburg (Vyshnegradskii) og i Zürich (Stodola-Hurwitz) går videnskab og teknologi hånd i hånd. Vyschnegradskiis arbejde er motiveret - efter alt at dømme - af ingeniørmæssige problemer med regulatoren. Den videnskabelige

forklaring på regulatorens virke udmøntes i konkrete anvisninger på, hvorledes den skal konstrueres i et sprog, der kan forstås af ingeniører. Der er altså her tale om en vekselvirkning, hvor teknologien giver videnskaben et problem, hvis videnskabelige løsning teknologien kan arbejde videre med.

Skulle man beskrive samspillet i en Solla Price'sk terminologi, kan man sige, at videnskab og teknologi er ude af fase i England og i fase på kontinentet. Den videnskabelige udvikling, der er den samme de to steder, er altså uafhængig af fasetilstanden, hvorved fasetilstanden i vores tilfælde bliver uden betydning som forklaring på videnskabelig udvikling.

Den indre videnskabelige udvikling.

Vi har set, at de to beskrivelser af regulatoren i princippet er ens. Det nye i forhold til tidligere beskrivelser er betragtningen af regulatoren som et lineært system, hvor den nye teknik bliver lineariseringen. Derudover er det en redegørelse for stabilitetsforholdene i systemet. Ser vi på de elementer, som Kuhn opstiller som væsentlige for den videnskabelige udvikling, er der imidlertid forskelligheder på en række punkter.

"Modellerne" er forskellige, idet Maxwells grundlæggende naturopfattelse er, at naturen er dynamiske systemer, der skal afdækkes, Målet med forskningen er en udvidet erkendelse af naturen. Analogier til mekaniske systemer, som kendes fra astronomien, bruges på andre områder som f.eks. beskrivelsen af det elektromagnetiske felt. Interessen er at afdække disse områder videnskabeligt og at udvikle videnskabelige måleinstrumenter som f.eks. ohm-regulatoren og astronomiske teleskoper.

Vyshnegradskiis grundlæggende holdning er - som ingeniør - at maskinerne skal forstås og forbedres. Derfor indeholder hans arbejde grafer og præcise operationelle begreber, som ingeniører kan bruge.

"Værdierne" er også forskellige. For Maxwell er de mest at-

traktive teorier de, der er videnskabeligt modsigelsesfri og forenlige med andre teorier, så de kan danne en større videnskabelig syntese om naturens indretning. Vyshnegradskiis krav til teorierne er i højere grad deres anvendelighed og effektivitet.

Disse forhold kan i stor udstrækning forklares af forhold, der er eksterne i forhold til videnskabsudviklingen. De videnskabelig-tekniske uddannelsesinstitutioner på kontinentet er stærkt medvirkende til det nære samspil, og præger derfor videnskabsmændenes "modeller" og "værdier", og dermed den retning forskningen tager i disse institutioner.

I England mangler disse formidlende institutioner og videnskabsmændenes "modeller" og "værdier" er præget af herskende overvejende interne videnskabstraditioner, der falder godt i tråd med dominerende ideologiske strømninger.

Paradigmebrud?

Imidlertid var der også elementer i den faglige matrix, der var ens. De "symbolske generalisationer" er de samme. Den grundlæggende mekanik og matematik er fælles gods for de to beskrivelser. Ligeledes er "eksemplerne" ens. Lineariseringsteknikken samt problemløsningsmetoden med at analogisere andre mekaniske systemer med regulatoren er den samme i de to tilfælde.

Der er derfor ikke tale om en videnskabelig revolution, men om en normalvidenskabelig udvikling, hvor problemløsningen foregår ved at analogisere løsningsmetoder fra andre mekaniske systemer, kombinere med løsningsmetoder fra differentiaalligningssystemer og stabilitetsanalyser, samt endelig anvendelsen af linearisering.

Der er altså ikke tale om et paradigmebrud, men i Maxwells og Vyshnegradskiis artikler, ligger nogle betragtninger, der ikke optages i samtidens paradigmer, men som senere bliver grundlæggende i et nyt paradigme. Det er betragtningen over et selvregulerende system, feed-back mekanismen. Disse betragtninger bliver senere udfoldet og teoretisk be-

skrevet, og i 1940'erne fremstår de som et større sammenhængende teorisystem, et paradigme, der kaldes kybernetikken.

Maxwells og Vyshnegradskiis arbejder om regulatoren kan derfor i forhold til kybernetikken karakteriseres som præparadigmatiske, og de er det første bidrag til, hvad der senere opstår som et selvstændigt paradigme.

Afsluttende bemærkninger.

Projektet har vist, at to videnskabsmænd med vidt forskellige baggrunde og motiver er kommet frem til den samme videnskabelige erkendelse uafhængigt af hinanden. Vi har nærmere analyseret deres forskelligheder, men vi har endnu ikke besvaret spørgsmålet om, hvorfor de udviklede samme videnskab uafhængigt af hinanden og med så forskellige baggrunde.

Vi ved kun, at "redskaberne" var til stede - mekanikken og differentialregningen - og at koblingerne har været mulige for mange.

Men det er stadig et spørgsmål, om det er en tilfældighed, at en ingeniør i Rusland beskæftiger sig med et reguleringsproblem i industrien samtidig med at en videnskabsmand i England - i forbindelse med forskning i elektricitet - beskæftiger sig med samme reguleringsproblem?

Eller er regulatorens tilstedeværelse og stigende behov for regulering på stadig flere områder en tilstrækkelig forklaring på, at det ikke kan være det rene tilfælde?

$$I \quad F_1 \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - C_1$$

Idet vi udtrykker den aktuelle hastighed, som den største hastighed for kuglet bevæger sig (V_1) + en lille tilvækst $\frac{dy}{dt}$: $\frac{dx}{dt} = V_1 + \frac{dy}{dt}$ får vi:

$$F_1 \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - C_1 = F_1 \left(V_1 + \frac{dy}{dt} \right)^2 - C_1 =$$

$$F_1 \left(V_1^2 + 2V_1 \frac{dy}{dt} + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right) - C_1. \quad \text{og vi får:}$$

$$II \quad F_1 \left(V_1^2 + 2 \frac{dy}{dt} V_1 \right) - C_1$$

Da kuglet ikke bevæger sig for $\frac{dx}{dt} = V_1$ (de to modsatte kræfter ophæver hinanden) må der gælde at:

$$F_1 V_1^2 - C_1 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \underline{V_1^2 = \frac{C_1}{F_1}}$$

Ved indsættelse i II fås:

$$F_1 \left(\frac{C_1}{F_1} + 2 \frac{dy}{dt} V_1 \right) - C_1 = 2 F_1 V_1 \frac{dy}{dt} = 2 F_1 V_1 \left(\frac{dx}{dt} - V_1 \right)$$

(i flg. omskrivning $\frac{dx}{dt} = V_1 + \frac{dy}{dt}$)

Idet $2 F_1 V_1 = \text{konstant}$, som vi sætter lig med F_1 får vi udtrykket

$$\underline{F \left(\frac{dx}{dt} - V_1 \right)}$$

$$\left. \begin{aligned} B \frac{dy}{dt} &= F(x - vt) - Yy - wt \Leftrightarrow By' + Yy - Fx = K_1 \\ M \frac{dx}{dt^2} &= P - R - F \frac{dx}{dt} - Fv_1 - Gy \Leftrightarrow Mx'' + Fx' + Gy = K_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

Vi smider konstanterne væk fordi vi kun søger en løsning til det homogene system. Til det inhomogene system "gætter" vi en løsning (vt) .

$$y' = \frac{F}{B}x - \frac{Y}{B}y$$

$$x'' = -\frac{F}{M}x' - \frac{G}{M}y$$

$$y = -\frac{M}{G}x'' - \frac{F}{G}x'$$

Ved at differentiere udtrykket for x'' får vi:

$$x''' = -\frac{F}{M}x'' - \frac{G}{M}y' \quad \text{ved substitution fåes:}$$

$$x''' = -\frac{F}{M}\left(-\frac{F}{M}x' - \frac{G}{M}y\right) - \frac{G}{M}\left(\frac{F}{B}x - \frac{Y}{B}y\right) \Leftrightarrow$$

$$x''' = -\frac{F}{M}\left(-\frac{F}{M}x' - \frac{G}{M}\left(-\frac{M}{G}x'' - \frac{F}{G}x'\right)\right) - \frac{G}{M}\left(\frac{F}{B}x - \frac{Y}{B}\left(-\frac{M}{G}x'' - \frac{F}{G}x'\right)\right) \Leftrightarrow$$

$$x''' = -\frac{F}{M}\left(-\frac{F}{M}x' + x'' + \frac{F}{M}x'\right) - \frac{G}{M}\left(\frac{F}{B}x + \frac{YM}{BG}x'' + \frac{YF}{BG}x'\right) \Leftrightarrow$$

$$x''' = -\frac{F}{M}x'' - \frac{GF}{MB}x - \frac{Y}{B}x'' - \frac{YF}{MB}x' \Leftrightarrow$$

$$x''' = \left(-\frac{F}{M} - \frac{Y}{B}\right)x'' - \frac{YF}{MB}x' - \frac{GF}{MB}x \Leftrightarrow$$

$$MBx''' + (BF + MY)x'' + YFx' + GFx = 0$$

I det vi sætter $u = \text{differentialoperator } \frac{d}{dt}$ får vi det karakteristiske polynomium:

$$10) \quad \underline{MBu^3 + (MY + FB)u^2 + FYu + FG = 0}$$

③

Maxwell brüger kriteriet $a_2 \cdot a_1 > a_0 \cdot a_3$

$$MBn^3 + (MY + FB)n^2 + FYn + FG = 0$$

$$\Leftrightarrow n^3 + \left(\frac{Y}{B} + \frac{F}{M}\right)n^2 + \frac{FY}{MB}n + \frac{F \cdot G}{M \cdot B} = 0$$

Ved at brüge kriteriet:

$$\left(\frac{Y}{B} + \frac{F}{M}\right)\left(\frac{FY}{MB}\right) - \left(\frac{F \cdot G}{M \cdot B}\right) > 0$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{Y}{B} + \frac{F}{M}\right)\left(\frac{Y}{B}\right) - \frac{G}{B} > 0$$

$$E = \frac{1}{2} A \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} B \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + P = \int L d\theta$$

Da θ er en funktion af t kan $d\theta$ skrives som $\frac{d\theta}{dt} dt$;

$$\int L \frac{d\theta}{dt} dt = \int L d\theta$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dA}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} A 2 \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right) + \frac{1}{2} \frac{dB}{dt} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} B \cdot 2 \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \left(\frac{d^2\varphi}{dt^2} \right) + \frac{dP}{dt} = \underline{L \frac{d\theta}{dt}}$$

Da $L = \frac{d}{dt} \left(A \frac{d\theta}{dt} \right)$ fåes ved indsættelse:

$$\textcircled{I} L \frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{dA}{dt} \cdot \frac{d\theta}{dt} + A \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \frac{d\theta}{dt}$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dA}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + A \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right) + \frac{1}{2} \frac{dB}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + B \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \left(\frac{d^2\varphi}{dt^2} \right) + \frac{dP}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = L \frac{d\theta}{dt}$$

$$\textcircled{II} \Leftrightarrow L \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \left(\frac{1}{2} \frac{dA}{d\varphi} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{dB}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{dP}{d\varphi} \right) + A \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right) + B \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \left(\frac{d^2\varphi}{dt^2} \right)$$

Ved at sætte $I = II$ fåes:

$$\frac{dA}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + A \frac{d^2\theta}{dt^2} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = \underline{II} \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{2} \frac{dA}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \frac{d\varphi}{dt} \left(\frac{1}{2} \frac{dB}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{dP}{d\varphi} \right) + B \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \left(\frac{d^2\varphi}{dt^2} \right) \Leftrightarrow$$

$$\textcircled{III} \frac{1}{2} \frac{dA}{d\varphi} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{dB}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{dP}{d\varphi} + B \frac{d^2\varphi}{dt^2}$$

$$\text{idet: } \frac{d}{dt} \left(B \frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{dB}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \frac{d\varphi}{dt} + B \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{dB}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + B \left(\frac{d^2\varphi}{dt^2} \right) \Leftrightarrow$$

$$\textcircled{IV} B \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\varphi}{dt} B \right) - \frac{dB}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2$$

Indsættes IV i III

$$\frac{1}{2} \frac{dA}{d\varphi} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = -\frac{1}{2} \frac{dB}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{dP}{d\varphi} + \frac{d}{dt} \left(B \frac{d\varphi}{dt} \right), \text{ hvilket giver}$$

$$\text{Max 4: } \underline{\frac{d}{dt} \left(B \frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{1}{2} \frac{dA}{d\varphi} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{dB}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - \frac{dP}{d\varphi}}$$

$$A \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} + \left(\frac{dA}{d\varphi} \omega \right) \frac{d\varphi_1}{dt} = L$$

$$B \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} - \left(\frac{dB}{d\varphi} \omega \right) \frac{d\theta_1}{dt} = 0$$

Om det $\left(\frac{dA}{d\varphi} \omega \right)$ kan sättas lig en konstant K (för små hast. o.s.v.)
och L smides vak, får vi systemet:

$$\left. \begin{aligned} A \ddot{\theta}_1 + K \dot{\varphi}_1 &= 0 & \Leftrightarrow & \ddot{\theta}_1 = -K \dot{\varphi}_1 \cdot \frac{1}{A} \\ B \ddot{\varphi}_1 - K \dot{\theta}_1 &= 0 & \Leftrightarrow & \ddot{\varphi}_1 = K \dot{\theta}_1 \cdot \frac{1}{B} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\ddot{\varphi}_1 = K \dot{\theta}_1 \cdot \frac{1}{B} \quad \Leftrightarrow$$

$$\ddot{\varphi}_1 = K \left(-K \dot{\varphi}_1 \cdot \frac{1}{A} \right) \frac{1}{B} \quad \Leftrightarrow$$

$$\ddot{\varphi}_1 + K^2 \cdot \frac{1}{AB} \dot{\varphi}_1 = 0$$

Hvilket giver det karakteristiske polynomium:

$$m^3 + \left(\frac{dA}{d\varphi} \omega \right)^2 \frac{1}{AB} m = 0 \quad \Leftrightarrow$$

$$\underline{m \left(m^2 + \left(\frac{dA}{d\varphi} \omega \right)^2 \frac{1}{AB} \right) = 0}$$

$$\left. \begin{aligned} A\ddot{\theta} + X\dot{\theta} + K\dot{\phi} + G\varphi &= L \\ B\ddot{\phi} + Y\dot{\phi} - K\dot{\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta} &= -\left(\frac{X}{A}\right)\dot{\theta} - \left(\frac{K}{A}\right)\dot{\phi} - \left(\frac{G}{A}\right)\varphi + \frac{L}{A} \\ \ddot{\phi} &= -\left(\frac{Y}{B}\right)\dot{\phi} + \left(\frac{K}{B}\right)\dot{\theta} \\ \dot{\theta} &= \frac{B}{K}\ddot{\phi} + \frac{Y}{K}\dot{\phi} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{her } \frac{L}{A} \text{ smides væk.}$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{Y}{B}\dot{\phi} + \frac{K}{B}\dot{\theta} \Leftrightarrow$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{Y}{B}\left(-\frac{Y}{B}\dot{\phi} + \frac{K}{B}\dot{\theta}\right) + \frac{K}{B}\left(-\frac{X}{A}\dot{\theta} - \frac{K}{A}\dot{\phi} - \frac{G}{A}\varphi\right) \Leftrightarrow$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{Y}{B}\left(-\frac{Y}{B}\dot{\phi} + \frac{K}{B}\left(\frac{B}{K}\ddot{\phi} + \frac{Y}{K}\dot{\phi}\right)\right) + \frac{K}{B}\left(-\frac{X}{A}\left(\frac{B}{K}\ddot{\phi} + \frac{Y}{K}\dot{\phi}\right) - \frac{K}{A}\dot{\phi} - \frac{G}{A}\varphi\right) \Leftrightarrow$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{Y}{B}\left(-\frac{Y}{B}\dot{\phi} + \ddot{\phi} + \frac{Y}{B}\dot{\phi}\right) + \frac{K}{B}\left(-\frac{XB}{AK}\ddot{\phi} - \frac{XY}{AK}\dot{\phi} - \frac{K}{A}\dot{\phi} - \frac{G}{A}\varphi\right) \Leftrightarrow$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{Y}{B}\ddot{\phi} - \frac{X}{A}\ddot{\phi} - \frac{XY}{AB}\dot{\phi} - \frac{K^2}{AB}\dot{\phi} - \frac{KG}{AB}\varphi \Leftrightarrow$$

$$AB\ddot{\phi} = -AY\ddot{\phi} - BX\ddot{\phi} - XY\dot{\phi} - K^2\dot{\phi} - KG\varphi \Leftrightarrow$$

$$AB\ddot{\phi} + (AY + BX)\ddot{\phi} + (XY + K^2)\dot{\phi} + KG\varphi = 0$$

Dette giver det karakteristiske pol. i
diff. operatoren m :

$$\underline{ABm^3 + (AY + BY)m^2 + (XY + K^2)m + KG = 0}$$

- Cardwell, D.S.L.: Technology, Science and History, London 1972.
- Checkland, A.E.: The Growth of British Industry, London 1978.
- Cristensen, A.S./Thomsen, K.: Matematik i Tyskland i det 19. århundrede, Aarhus 1983.
- Coughanowr/Koppel: Process System Analysis and Control, New York 1965.
- Dictionary of Scientific Biography, New York 1970.
- Fuller, A.T. ed.: Stability of Motion, London 1975.
- Fuller, A.T.: The Early Development of Control Theory, ASME (Journal of dynamic systems, measurement and control), New York 1976, s.109-24. (Fuller I)
- Fuller, A.T.: The Early Development of Control Theory II. ASME, New York 1976, s. 224-235. (Fuller II)
- Gade E. m.fl.: Til en historieteori om naturerkendelse, teknologi og samfund, IMFUFA-tekst 38, Roskilde 1981.
- Haeder, H.: Dampfmaschinen, Duisburg 1895.
- Hunt, B.: Practice vs. Theory. The British Electrical Debate 1888-1891. ISIS, vol. 74 (1983), nr. 273.
- Jensen, J.R.: Automatisk kontrol 1, Kbh. 1974.
- Jespersen, P.H.: The technological and Scientific Base for the use of Process Control. Arbejds-papir, Kbh. 1981.
- Klemm, F.: Die Rolle der Mathematik in der Technik des 19. Jahrhundert, Technikgeschichte 33 (1966).
- Koyré, A.: From the Closed World to the Infinite Universe, London 1957.
- Kragh, H./Pedersen, S.Andur: Videnskab, teori, samfund, IMFUFA-tekst 42, Roskilde 1981, 1.

LITTERATURLISTE.

- Automatic Control, Scientific American Book, London 1957.
- Alonso-Finn: Fundamental University Physics, I Mechanics, Massachusetts, 1967.
- Barnes, B.: Scientific Knowledge and Social Theory, London 1974.
- Barnes, B.: T.S. Kuhn and Social Science, London 1981.
- Bellman R./Kalaba R.: Selected papers on mathematical trends in control theory. New York 1964.
- Ben-David, J./Zioczower, A.: The Growth of Industrialized Science in Germany, i Sociology of Science, ed. Barnes, Middlesex 1972, s. 45-60.
- Bennet, S.: A History of Control Engineering 1800-1930, London 1978.
- Bernal, J. D.: Science and Industry in the Nineteenth Century, London 1953.
- Bernal, J. D.: Videnskabens historie, Oslo 1978
- Borch, S. C.: Forelæsninger om Maskinlære, Kbh. 1895
- Buchheim, G.: Zur Weschelwirkung von Naturwissenschaften und Technikwissenschaften in ihren historischen Entwicklung, NTM (Schriftenreihe für Geschichte der Naturwissenschaften, Technik und Medicin), nr. 15 (1978) hft. 2, s.113-19.
- Cahan, D.: Werner Siemens and the Origin of the Physikalisch-technische Reichanstalt 1871-1887, Historical Studies in the Physical Sciences, bd. 12, 1982, s. 72-109.
- Cannon, S.F.: Science in Culture: The Early Victorian Period, New York 1978.
- Cardwell, D.S.L.: The Organisation of Science in England, London 1957.

c) Thomson's og Foucault's governor.

$$\xi = \varphi_1 \text{ og } \mu = \frac{d\theta_1}{dt}$$

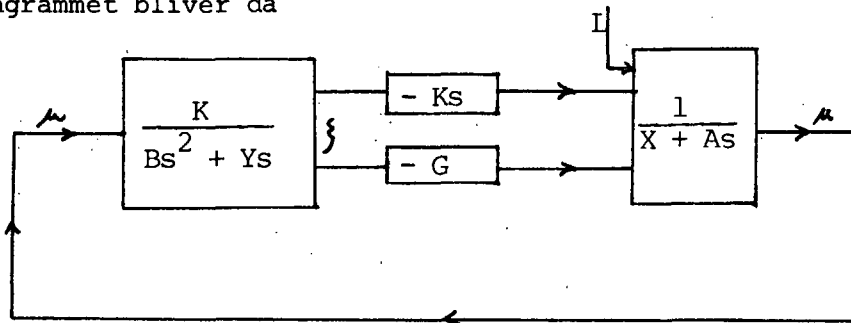
Systemet beskrives i dette tilfælde af

$$(1) \quad B \frac{d^2 \xi}{dt^2} + Y \frac{d\xi}{dt} - K\mu = 0 \Rightarrow (Bs^2 + Ys)\xi = K\mu \Rightarrow \xi = \frac{K}{Bs^2 + Ys} \mu$$

$$(2) \quad A \frac{d\mu}{dt} + X\mu + K \frac{d\xi}{dt} + G\xi = L \Rightarrow (As + X)\mu + (Ks + G)\xi = L \Rightarrow \mu = \frac{L}{(As + X)} - \frac{(Ks + G)\xi}{(As + X)}$$

$$\mu = \frac{L}{(As + X)} - \frac{(Ks + G)\xi}{(As + X)}$$

Bokdiagrammet bliver da



Regulatorerne fra Maxwell's "On Governors" opstillet i blokdiagrammer.

Kaldes differentialoperatoren $\frac{d}{dt}$ for s bliver integraloperatoren $\int = s^{-1}$.

a) Maxwell's første system ("moderatorer").

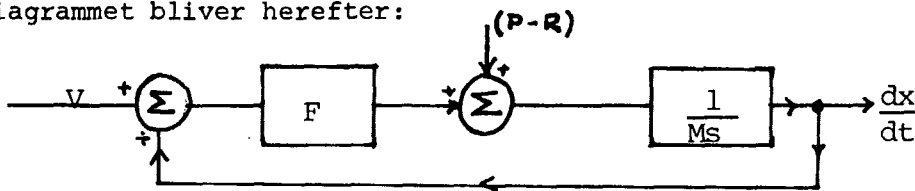
Bevægelsesligningen er $M \frac{d^2 x}{dt^2} = -F \left(\frac{dx}{dt} - V \right) + (P-R)$,

hvor $\frac{dx}{dt}$ er maskinens output og V er nominalhastigheden (setpunktet).

Fejlsignaelt $e(t)$ bliver $(V - \frac{dx}{dt})$ og styresignalet $F(V - \frac{dx}{dt}) + (P-R)$

$M s^2 = F(V - \frac{dx}{dt}) + (P-R) \Rightarrow s = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{Ms} \left[F(V - \frac{dx}{dt}) + (P-R) \right]$

Blokdiagrammet bliver herefter:



b) Maxwell's andet system ("simpel governor").

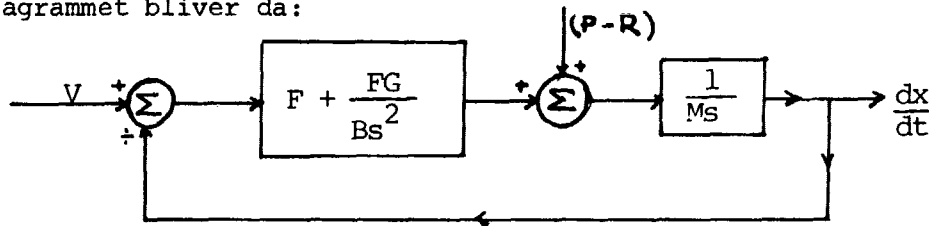
Bevægelsesligningen for hjælpehjulet gives ved $B \frac{d^2 y}{dt^2} = F \left(\frac{dx}{dt} - V \right)$, (1)

mens maskinens ligning er $M \frac{d^2 x}{dt^2} = -F \left(\frac{dx}{dt} - V \right) - Gy + (P - R)$ (2)

(1) omskrives til $B s^2 y = F \left(\frac{dx}{dt} - V \right) \Rightarrow y = \frac{F}{Bs^2} \left(\frac{dx}{dt} - V \right)$

(2) bliver derefter $M s^2 = -F \left(\frac{dx}{dt} - V \right) - G \frac{F}{Bs^2} \left(\frac{dx}{dt} - V \right) + (P - R)$

Blokdiagrammet bliver da:



c) Jenkins governor.

For denne bliver de tilsvarende ligninger

$B \frac{d^2 y}{dt^2} = F \left(\frac{dx}{dt} - V \right) - Y \frac{dy}{dt} - W \Rightarrow B s^2 y = F \left(\frac{dx}{dt} - V \right) - Y s y - W \Rightarrow$

$y (B s^2 + Y s) = F \left(\frac{dx}{dt} - V \right) - W \Rightarrow y = \frac{F \left(\frac{dx}{dt} - V \right) - W}{(B s^2 + Y s)}$

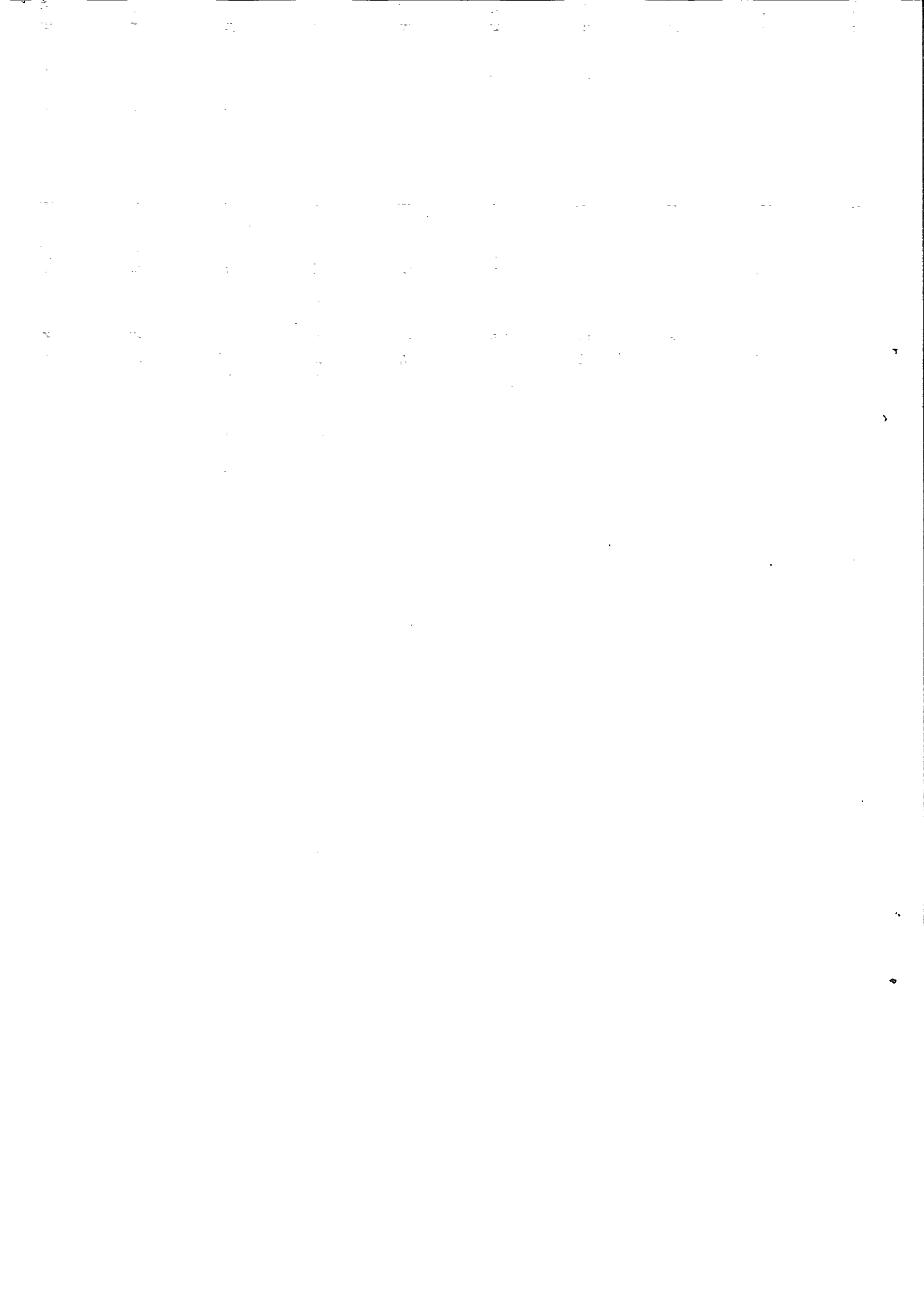
Ved sammenligning med b) ses, at overførselsfunktionen i dette tilfælde bliver

$\frac{FG}{Bs^2 + Ys} + F$, men at blokdiagrammerne iøvrigt er ens.

- Kragh, H./Pedersen, S.Andur: Naturvidenskabsteori, Kbh.
1981, 2.
- Kuhn, T.S.: Videnskabens revolutioner, Kbh. 1973.
- Kuhn, T.S.: Scientific Paradigms (1962), i Sociology of
Science, ed. Barnes, Middlesex 1972.
- Kühn, T.S.: Energy Conversation as an Example of Simulta-
nious Discovery, i Critical Problems in the
History of Science, ed. M.Cladgett, Madison
1962, s. 321-356.
- Kuhn, T.S.: The Essential Tension, Chicago 1977.
- Landcraft D.H./Richardson H.W.: The British Economy 1870-
1939, London 1969.
- Landes, D.S.: The Unbound Prometheus, Cambridge 1969.
- Macleod, R./Collins P. ed: The Parliament of Science,
Science Rewievs 1981.
- Mayr, O.: Zur Frühgeschichte der techniscen Regelung,
München 1968.
- Mayr, O.: The Origins of Feedback Control, Scientific Ame-
rican, vol. 223, nr. 4 (1970), s. 111-18.
- Mayr, O.: Feed-back Mechanisms, Washington 1971.(a)
- Mayr, O.: Maxwell and the Origins of Cybernetics, ISIS,
vol. 62 (1971).(b)
- Mayr, O.: Adam Smith and the Consept of Feedback System,
Technology and Culture 12, 1971.(c)
- Mayr, O.: Victorian Physicists and Speed Regulation: An
Encounter between Science and Technology, Notes
and Records of the Royal Society of London,
vol. 26, 1971, s. 205-228.(d)
- Mayr, O.: Introduction, i ed. O.Mayr: Philosophers and
Mashines, New York 1976, s. 1-4.
- Mayr, O.: The Science-technology Relation, i Science in
Context, ed. Barnes/Edge, Milton Keynes 1982.

- Merton, R.K.: Science, Technology and Society in Seventeenth Century England, New York 1970.
- (først offentliggjort i OSIRIS, vol 4, 1938)
- Merton, R.K.: The institutional Imperatives of Science, i ed. B.Barnes: Sociology of Science, s.65-79.
- Maxwell, J.C.: On Govenors, Proceedings of the Royal Society of London, vol. 16, 1868, s. 270-83.
- Maxwell, J.C.: The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, ed. W.D. Niven, New York 1965.
- Musson, A.E.: The Growth og British Industry, London 1978.
- Newman, J.R.: James Clerk Maxwell, i Mathematics in the Modern World, Readings from Scientific American, New York 1968.
- Paradis, J./Postlewaitz, T. ed.: Victorian Science and Victorian Values, Annals of the New York Academy of Science, bd. 360, New York 1981.
- Pontryagin, P.S.: Ordinary Differential Equation, London 1962.
- Price, D.d S.: Little Science Big Science, New York 1963.
- Price, D.d S.: Science and Technology: Distinctions and Interrelationships; i Sociologi of Science, ed. B.Barnes, Middlesex 1972, s. 166-80.
- Price, D.d S.: The Parallel Structures of Science and Technology, i Science in Context, ed. B.Barnes/Edge, Milton Keynes 1982, s. 164-76.
- Röhrentrop, K.: Entwicklung der Modernen Regelungstechnik, München 1971.
- Rösing, I.S./Price D.d S. ed.: Science, Technology and Society, London 1977.
- Routh, E.J.: Dynamics of a System of Rigid Bodies, London 1884.
- Ravetz, J.: Science in History, i Technology and Culture bd, 13 (1971) nr. 4, s. 664-66.

- Ravetz, J.: Bernal's Marxist Vision of History, ISIS, bd. 72, (1981), nr. 263, s. 393-402.
- Schlote, K.H.: Einige Aspekte der Verstärkten Hinwendung der Mathematik zur Praxis in der Zeit um 1900, NTM, 17. årg. hft. 2, Leipzig 1980, s. 15-21.
- Schneider, I.: Der Einfluss der Praxis auf die Entwicklung der Mathematik vom bis 17. Jahrhundert, Zentralblatt für Didaktik der Mathematik, 9, 1977, s. 195-205.
- Siemens, C.W.: On Uniform Rotation, London 1866.
- Sviedrys, R.: The Rise of Physical Science at Victorian Cambridge, Historical Studies in the Physical Sciences, vol. 2, 1970, s. 127-151.
- Tobies, R.: Zur Internationalen Wissenschaftsorganisatorischen Tätigkeit von Felix Klein (1849-1925) auf dem Gebiet des Mathematikunterrichts, NTM, årg. 16, hft. 1, 1979, s. 12-29.
- Tolle, M.: Beiträge zur Beurteilung der Zentrifugalpendelregulatoren, Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 1895-96.
- Wilson, D.B.: Experimentalists among the mathematicians: Physics in the Cambridge Natural Science Tripos 1851-1900, Historical Studies in the Physical Sciences, bd. 12, 1982, s. 325-71.
- Wise, M.N.: The Maxwell Litterature and British dynamical Theory, Historical Studies in Physical Sciences, bd. 13, 1983, s. 175-205.
- Wischnegradski, J.: Ueber Directwirende Regulatoren, Der Civilingenieur, vol. 23, 1877, s. 95-132.
- Hobsbawm, E.J.: The age of capital 1848-1875, London 1977
- La Cour, P./ Appel, J.: Historisk fysik, København 1966



- 1/78 "TANKER OM EN PRAKSIS" - et matematikprojekt.
Projektrapport af Anne Jensen, Lena Lindenskov, Marianne Kesselhahn og Nicolai Lomholt.
Vejleder: Anders Madsen.
- 2/78 "OPTIMERING" - Menneskets forøgede beherskelsesmuligheder af natur og samfund.
Projektrapport af Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen, Gert Kreinøe og Peter H. Lassen.
Vejleder: Bernhelm Booss.
- 3/78 "OPGAVESAMLING", breddekursus i fysik. Nr. 3 er a jour ført i marts 1984
Lasse Rasmussen, Aage Bonde Kræmmer, Jens Højgaard Jensen.
- 4/78 "TRE ESSAYS" - om matematikundervisning, matematiklæreruddannelsen og videnskabsrindalismen. Nr. 4 er p.t. udgået.
Mogens Niss.
- 5/78 "BIBLIOGRAFISK VEJLEDNING til studiet af DEN MODERNE FYSIKS HISTORIE". Nr. 5 er p.t. udgået.
Helge Kragh.
- 6/78 "NOGLE ARTIKLER OG DEBATINDLÆG OM - læreruddannelse og undervisning i fysik, og - de naturvidenskabelige fags situation efter studenteroprøret".
Karin Beyer, Jens Højgaard Jensen og Bent C. Jørgensen.
- 7/78 "MATEMATIKKENS FORHOLD TIL SAMFUNDSØKONOMIEN". Nr. 7 er udgået.
B.V. Gnedenko.
- 8/78 "DYNAMIK OG DIAGRAMMER". Introduktion til energy-bound-graph formalismen.
Peder Voetmann Christiansen.
- 9/78 "OM PRAKSIS' INDFLYDELSE PÅ MATEMATIKKENS UDVIKLING". - Motiver til Kepler's: "Nova Stereometria Doliorum Vinarioum".
Projektrapport af Lasse Rasmussen.
Vejleder: Anders Madsen.
-
- 10/79 "TERMODYNAMIK I GYMNASIET".
Projektrapport af Jan Christensen og Jeanne Mørtensen.
Vejledere: Karin Beyer og Peder Voetmann Christiansen.
- 11/79 "STATISTISKE MATERIALER"
red. Jørgen Larsen
- 12/79 "LINEÆRE DIFFERENTIALLIGNINGER OG DIFFERENTIALLIGNINGSSYSTEMER". Nr. 12 er udgået
Mogens Brun Heefelt
- 13/79 "CAVENDISH'S FORSOEG I GYMNASIET".
Projektrapport af Gert Kreinøe.
Vejleder: Albert Chr. Paulsen

- 14/79 "BOOKS ABOUT MATHEMATICS: History, Philosophy, Education, Models, System Theory, and Works of Reference etc. A Bibliography".
Else Høyrup.
- 15/79 "STRUKTUREL STABILITET OG KATASTROFER i systemer i og udenfor termodynamisk ligevægt".
Specialeopgave af Leif S. Striegler.
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.
- 16/79 "STATISTIK I KRÆFTFORSKNINGEN".
Projektrapport af Michael Olsen og Jørn Jensen.
Vejleder: Jørgen Larsen.
- 17/79 "AT SPØRGE OG AT SVARE i fysikundervisningen".
Albert Christian Paulsen.
- 18/79 "MATHEMATICS AND THE REAL WORLD", Proceedings of an International Workshop, Roskilde University Centre, Denmark, 1978. Preprint.
Bernhelm Booss & Mogens Niss (eds.).
- 19/79 "GEOMETRI, SKOLE OG VIRKELIGHED".
Projektrapport af Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen og Per H.H. Larsen.
Vejleder: Mogens Niss.
- 20/79 "STATISTISKE MODELLER TIL BESTEMMELSE AF SIKRE DOSER FOR CARCINOGENE STOFFER".
Projektrapport af Michael Olsen og Jørn Jensen.
Vejleder: Jørgen Larsen.
- 21/79 "KONTROL I GYMNASIET - FORMAL OG KONSEKVENSER".
Projektrapport af Crilles Bacher, Per S. Jensen, Preben Jensen og Torben Nysteen.
- 22/79 "SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (1)".
1-port lineært response og støj i fysikken.
Peder Voetmann Christiansen.
- 23/79 "ON THE HISTORY OF EARLY WAVE MECHANICS - with special emphasis on the role of reality".

-
- 24/80 "MATEMATIKOPFATTELSE HOS 2.G'ERE".
a+b 1. En analyse. 2. Interviewmateriale.
Projektrapport af Jan Christensen og Knud Lindhardt Rasmussen.
Vejleder: Mogens Niss.
- 25/80 "EKSAMENSOPGAVER", Dybdemodulet/fysik 1974-79.
- 26/80 "OM MATEMATISKE MODELLER".
En projektrapport og to artikler.
Jens Højgaard Jensen m.fl.
- 27/80 "METHODOLOGY AND PHILOSOPHY OF SCIENCE IN PAUL DIRAC'S PHYSICS".
Helge Kragh.
- 28/80 "DIELEKTRISK RELAXATION - et forslag til en ny model bygget på væskernes viscoelastiske egenskaber".
Projektrapport, speciale i fysik, af Gert Kretnøe.
Vejleder: Niels Boye Olsen.

- 29/80 "ODIN - undervisningsmateriale til et kursus i differentiaalligningsmodeller".
 Projekt rapport af Tommy R. Andersen, Per H.H. Larsen og Peter H. Lassen.
 Vejleder: Mogens Brun Heefelt
- 30/80 "FUSIONSENERGIEN - - - ATOMSAMFUNDETS ENDESTATION".
 Oluf Danielsen. Nr. 30 er udgået.
 Udkommer medio 1982 på Fysik-, Matematik- og Kemilærernes forlag.
- 31/80 "VIDENSKABSTEORETISKE PROBLEMER VED UNDERVISNINGSSYSTEMER BASERET PÅ MENGDELÆRE".
 Projekt rapport af Troels Lange og Jørgen Karrebæk.
 Vejleder: Stig Andur Pedersen. Nr. 31 er p.t. udgået
- 32/80 "POLYMERE STOFFERS VISCOELASTISKE EGENSKABER - BELYST VED HJÆLP AF MEKANISKE IMPEDANSMÅLINGER OG MOSSBAUER-EFFEKTMÅLINGER".
 Projekt rapport, speciale i fysik, af Crilles Bacher og Preben Jensen.
 Vejledere: Niels Boye Olsen og Peder Voetmann Christiansen.
- 33/80 "KONSTITUERING AF FAG INDEN FOR TEKNISK-NATURVIDENSKABELIGE UDDANNELSER. I-II".
 Arne Jakobsen.
- 34/80 "ENVIRONMENTAL IMPACT OF WIND ENERGY UTILIZATION".
 ENERGY SERIES NO.1. Nr. 34 er udgået.
 Bent Sørensen. Publ. i "Renewable Sources of Energy and the Environment", Tycooli International Press, Dublin, 1981.
- 35/80 "HISTORISKE STUDIER I DEN NYERE ATOMFYSIKS UDVIKLING".
 Helge Kragh.
- 36/80 "HVAD ER MENINGEN MED MATEMATIKUNDERVISNINGEN ?".
 Fire artikler.
 Mogens Niss.
- 37/80 "RENEWABLE ENERGY AND ENERGY STORAGE".
 ENERGY SERIES NO.2.
 Bent Sørensen.
-
- 38/81 "TIL EN HISTORIETEORI OM NATURERKENDELSE, TEKNOLOGI OG SAMFUND".
 Projekt rapport af Erik Gade, Hans Hedal, Henrik Lau og Finn Physant.
 Vejledere: Stig Andur Pedersen, Helge Kragh og Ib Thiersen. Nr. 38 er p.t. udgået
- 39/81 "TIL KRITIKKEN AF VÆKSTØKONOMIEN".
 Jens Højgaard Jensen.
- 40/81 "TELEKOMMUNIKATION I DANMARK - oplæg til en teknologivurdering".
 Projekt rapport af Arne Jørgensen, Bruno Petersen og Jan Vedde.
 Vejleder: Per Nørgaard. Nr. 40 er p.t. udgået
- 41/81 "PLANNING AND POLICY CONSIDERATIONS RELATED TO THE INTRODUCTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO ENERGY SUPPLY SYSTEMS".
 ENERGY SERIES NO.3.
 Bent Sørensen.

- 42/81 "VIDENSKAB TEORI SAMFUND - En introduktion til materialistiske videnskabsopfattelser".
Helge Kragh og Stig Andur Pedersen.
- 43/81 1. "COMPARATIVE RISK ASSESSMENT OF TOTAL ENERGY SYSTEMS".
2. "ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF DECENTRALIZATION".
ENERGY SERIES NO.4.
Bent Sørensen.
- 44/81 "HISTORISK UNDERSØGELSE AF DE EKSPERIMENTELLE FORUDSÆTNINGER FOR RUTHERFORDS ATOMMODEL".
Projektrapport af Niels Thor Nielsen.
Vejleder: Bent C. Jørgensen.
-
- 45/82.
- 46/82 "EKSEMPLARISK UNDERVISNING OG FYSISK ERKENDELSE - I+II ILLUSTRERET VED TØ EKSEMPLE".
Projektrapport af Torben O. Olsen, Lasse Rasmussen og Niels Dreyer Sørensen.
Vejleder: Bent C. Jørgensen.
- 47/82 "BARSEBACK OG DET VÆRST OFFICIELT-TÆNKELIGE UHELD".
ENERGY SERIES NO.5.
Bent Sørensen.
- 48/82 "EN UNDERSØGELSE AF MATEMATIKUNDERVISNINGEN PÅ ADGANGSKURSUS TIL KØBENHAVNS TEKNIKUM".
Projektrapport af Lis Eilertzen, Jørgen Karrebæk, Troels Lange, Preben Nørregaard, Lissi Pedersen, Laust Rishøj, Lill Røn, Isac Showiki.
Vejleder: Mogens Niss.
- 49/82 "ANALYSE AF MULTISPEKTRALE SATELLITBILLEDER".
Projektrapport af Preben Nørregaard.
Vejledere: Jørgen Larsen & Rasmus Ole Rasmussen.
- 50/82 "HERSLEV - MULIGHEDER FOR VEDVARENDE ENERGI I EN LANDSBY". ENERGY SERIES NO.6.
Rapport af Bent Christensen, Bent Hove Jensen, Dennis B. Møller, Bjarne Laursen, Bjarne Lillethorup og Jacob Mørch Pedersen.
Vejleder: Bent Sørensen.
- 51/82 "HVAD KAN DER GØRES FOR AT AFHJÆLPE PIGERS BLOKERING OVERFOR MATEMATIK?"
Projektrapport af Lis Eilertzen, Lissi Pedersen, Lill Røn og Susanne Stender.
- 52/82 "DESUSPENSION OF SPLITTING ELLIPTIC SYMBOLS"
Bernhelm Booss & Krzysztof Wojciechowski.
- 53/82 "THE CONSTITUTION OF SUBJECTS IN ENGINEERING EDUCATION".
Arne Jakobsen & Stig Andur Pedersen.
- 54/82 "FUTURES RESEARCH" - A Philosophical Analysis of Its Subject-Matter and Methods.
Stig Andur Pedersen & Johannes Witt-Hansen.

55/82 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde
Universitetsbibliotek.
En bibliografi.
Else Høyrup.

Vedr. tekst nr. 55/82:
Se også tekst 62/83.

56/82 "ÉN - TO - MANGE" -
En undersøgelse af matematisk økologi.
Projektrapport af Troels Lange.
Vejleder: Anders Madsen.

57/83 "ASPECT EKSPERIMENTET" -
Skjulte variable i kvantemekanikken?
Projektrapport af Tom Juul Andersen.
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.

Nr. 57 er udgået.

58/83 "MATEMATISKE VANDRINGER" - Modelbetragtninger
over spredning af dyr mellem småbiotoper i
agerlandet.
Projektrapport af Per Hammershøj Jensen &
Lene Vagn Rasmussen.
Vejleder: Jørgen Larsen.

59/83 "THE METHODOLOGY OF ENERGY PLANNING".
ENERGY SERIES NO. 7.
Bent Sørensen.

60/83 "MATEMATISK MODEKSPERTISE" - et eksempel.
Projektrapport af Erik O. Gade, Jørgen Karrebæk og
Preben Nørregaard.
Vejleder: Anders Madsen.

61/83 "FYSIKS IDEOLOGISKE FUNKTION", som et eksempel på
en naturvidenskab - historisk set.
Projektrapport af Annette Post Nielsen.
Vejledere: Jens Høyrup, Jens Højgaard Jensen og
Jørgen Vogelius.

62/83 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde
Universitetsbibliotek.
En bibliografi. 2. rev. udgave
Else Høyrup

63/83 "CREATING ENERGY FUTURES: A SHORT GUIDE TO
ENERGY PLANNING".
ENERGY SERIES No. 8
David Crossley & Bent Sørensen

64/83 "VON MATHEMATIK UND KRIEG".
Bernhelm Booss og Jens Høyrup

65/83 "ANVENDT MATEMATIK - TEORI ELLER PRAKSIS".
Projektrapport af Per Hedegård Andersen, Kirsten
Habekost, Carsten Holst-Jensen, Annelise von Moos,
Else Marie Pedersen, Erling Møller Pedersen.
Vejledere: Bernhelm Booss & Klaus Grünbaum

66/83 "MATEMATISKE MODELLER FOR PERIODISK SELEKTION I
ESCHERICHIA COLI".
Projektrapport af Hanne Lisbet Andersen, Ole
Richard Jensen og Klavs Frisdahl.
Vejledere: Jørgen Larsen og Anders Hede Madsen

- 67/83 "ELIPSOIDE METODEN - EN NY METODE TIL LINEÆR
PROGRAMMERING?"
Projektrapport af Lone Biilmann og Lars Boye
Vejleder: Mogens Brun Heefelt
- 68/83 "STOKASTISKE MODELLER I POPULATIONSGENETIK"
- til kritikken af teoriladede modeller.
Projektrapport af Lise Odgård Gade, Susanne Han-
sen, Michael Hviid, Frank Mølgård Olsen.
Vejleder: Jørgen Larsen.
- 69/83 "ELEVFORUDSÆTNINGER I FYSIK"
- en test i 1.g med kommentarer
Albert Chr. Paulsen
- 70/83 "INDLÆRINGS- OG FORMIDLINGSPROBLEMER I MATEMA-
TIK PÅ VOKSENUNDERVISNINGSNIVEAU"
Projektrapport af Hanne Lisbet Andersen, Tor-
ben J. Andreasen, Svend Åge Houmann, Helle
Glerup Jensen, Keld Fl. Nielsen, Lene Vagn
Rasmussen.
Vejleder: Klaus Grünbaum & Anders H. Madsen
- 71/83 "PIGER OG FYSIK"
- et problem og en udfordring for skolen?
Karin Beyer, Sussanne Blegaa, Birthe Olsen,
Jette Reich & Mette Vedelsby
- 72/83 "VERDEN IFØLGE PEIRCE" - to metafysiske
essays, om og af C.S. Peirce.
Peder Voetmann Christiansen
- 73/83 "EN ENERGIANALYSE AF LANDBRUG"
- økologisk contra traditionelt
ENERGY SERIES No. 9
Specialeopgave i fysik af
Bent Hove Jensen
Vejleder: Bent Sørensen
-
- 74/84 "MINIATURISERING AF MIKROELEKTRONIK" - om vi-
denskabeliggjort teknologi og nytten af at
lære fysik
Projektrapport af Bodil Harder og Linda Szko-
tak Jensen.
Vejledere: Jens Højgaard Jensen og Bent C.
Jørgensen
- 75/84 "MATEMATIKUNDERVISNINGEN I FREMTIDENS GYMNASIUM"
- Case: Lineær programmering
Projektrapport af Morten Blomhøj, Klavs Fris-
dahl, Frank Mølgård Olsen
Vejledere: Mogens Brun Heefelt & Jens Bjerneboe
- 76/84 "KERNEKRAFT I DANMARK?" - Et høringssvar indkaldt
af miljøministeriet, med kritik af miljøstyrelsens
rapporter af 15. marts 1984.
ENERGY SERIES No. 10
Af Niels Boye Olsen og Bent Sørensen
- 77/84 "POLITISKE INDEKS - FUP ELLER FAKTA?"
Opinionsundersøgelser belyst ved statistiske mo-
deller
Projektrapport af Svend Åge Houmann, Keld Niel-
sen, Susanne Stender
Vejledere: Jørgen Larsen & Jens Bjerneboe

78/84 "JÆVNSTRØMSLEDNINGSEVNE OG GITTERSTRUKTUR I
AMORFT GERMANIUM"

Specialerapport af Hans Hedal, Frank C. Lud-
vigsen og Finn C. Physant

Vejleder: Niels Boye Olsen

ISSN 0106-6242