

Kvartvejsrapport for projektet

**SCENARIER FOR SAMLET
UDNYTTELSE AF BRINT SOM
ENERGIBÆRER I DANMARKS
FREMTIDIGE ENERGISYSTEM**

AUGUST 1999

Projektleder: Bent Sørensen

Projektdeltagere:

DONG: Aksel Hauge Petersen, Ole Sundman

ELKRAFT: Thomas Engberg Pedersen, Hans Ravn, Peter Simonsen

RISØ Systemanalyseafd.: Kaj Jørgensen*, Poul Erik Morthorst, Lotte Schleisner

RUC: Bent Sørensen, Finn Sørensen

*** Indtil 15/6 DTU Bygninger & Energi**

Projekt 1763/99-0001 under Energistyrelsens Brintprogram

TEKSTER
IMFUFA

fra energi & miljøgruppen, Institut 2

ROSKILDE UNIVERSITETSCENTER

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

ROSKILDE UNIVERSITY, P O BOX 260, DK-4000 ROSKILDE, DENMARK
INSTITUTE OF STUDIES IN MATHEMATICS AND PHYSICS, AND THEIR FUNCTIONS
IN EDUCATION, RESEARCH AND APPLICATIONS
ENERGY AND ENVIRONMENT GROUP
TEL: +45 4674 2000, FAX: +45 4674 3020, WEBSITE: <http://mmf.ruc.dk/energy>

AUGUST 1999

**Kvartvejsrapport for projektet SCENARIER FOR SAMLET UDNYTTELSE AF BRINT SOM
ENERGIBÆRER I DANMARKS FREMTIDIGE ENERGISYSTEM**

Aksel Hauge Petersen, Ole Sundman, Thomas Engberg Pedersen, Hans Ravn,
Peter Simonsen, Kaj Jørgensen, Poul Erik Morthorst, Lotte Schleisner, Bent Sørensen,
Finn Sørensen

IMFUFA text 368, 50 pp

ISSN 0106 6242

Abstract:

This is an early report from a project performed for the Danish Energy Agency under its Hydrogen Programme. The project period ends January 2001, so only few of the intended investigations have yet been carried out. However, in September 1999, the Energy Agency organises a conference aimed at presenting all the projects under the hydrogen programme, and for this occasion, the following may serve as a description of the work to be done, in more detail than can be found in the published information sheet based on the project application.

The project, which within the project group goes by the abbreviated title "Hydrogen as an energy carrier", will construct and analyse different total energy scenarios for introducing hydrogen as an energy carrier, as energy storage medium and as a fuel in the future Danish energy system.

System-wide aspects of the choice of hydrogen production technologies, distribution methods, infrastructure requirements and conversion technologies will be studied. Particularly, the possibility of using in the future the existing Danish natural gas distribution grid for carrying hydrogen will be assessed.

The outcome of the analysis will be used to identify the components in an implementation strategy, for the most interesting scenarios, including a time sequence of necessary decisions and technology readiness.

Some details of the methodology selected and preliminary accomplishments are presented. The report is in Danish, because it is part of the dissemination effort of the Hydrogen Committee, directed at the Danish population in general and the Danish professional community in particular.

Kvartvejsrapport for projektet

SCENARIER FOR SAMLET UDNYTTELSE AF BRINT SOM ENERGIBÆRER I DANMARKS FREMTIDIGE ENERGISYSTEM

AUGUST 1999

Projektleder: Bent Sørensen

Projektdeltagere:

DONG: Aksel Hauge Petersen, Ole Sundman

ELKRAFT: Thomas Engberg Pedersen, Hans Ravn, Peter Simonsen

RISØ Systemanalyseafd.: Kaj Jørgensen*, Poul Erik Morthorst, Lotte Schleisner

RUC: Bent Sørensen, Finn Sørensen

*** Indtil 15/6 DTU Bygninger & Energi**

Projekt 1763/99-0001 under Energistyrelsens Brintprogram

0. Introduktion

Bent Sørensen, RUC

Siden projektets opstart i marts 1999 har projektgruppen afholdt tre projektmøder og flere møder i undergrupper, hvor projektforslagets ramme er blevet udfyldt med konkrete arbejdsopgaver og valg af metoder, data og struktur, f.eks. af scenarierne og deres tidsprofiler. Disse konkretiseringer vil blive beskrevet i det følgende. Efter at databehovet var blevet fastlagt, er der truffet aftaler om levering af data fra flere kilder. Flere af disse er allerede kommet gruppen i hænde, og arbejdet med at verificere datastruktur og kvalitet pågår i samarbejde med leverandørene. Generelt må det siges, at adgangen til digitale data for det overordnede danske energisystem er forholdsvis gode, mens mere detaljerede data vedr. forbrugets tidslige og rumlige fordeling lader en del tilbage at ønske. Også supplerende data vedr. befolkning, bygninger og industristruktur er af ret lav kvalitet, sammenlignet med andre lande hvis data RUC gruppen tidligere har arbejdet med. F.eks. findes generelle befolkningsoplysninger kun på gade/husnummer basis og ikke på geografisk baseret niveau, ligesom forbruget af forskellige energiformer kun findes aggregeret i tid og rum, bortset fra enkeltstående spørgeskema-undersøgelser. Dette er dog ikke til hinder for, at meningsfulde scenarier kan opstilles, da der jo under alle omstændigheder skal males med en bred pensel, når forskellige forbrugs- og forsyningsmuligheder langt ind i det næste århundrede opstilles og vurderes.

1. Teknologikatalog og -vurdering

Lotte Schleisner, Poul Erik Morthorst, Risø

1.1. Metode

Teknologikataloget vil som udgangspunkt bygge på eksisterende litteratur på området. Kun teknologier, der vil være med til at nedbringe drivhusgaseffekten, bliver analyseret, dvs. konventionelle produktionsteknologier på basis af kul og naturgas ikke vil blive analyseret i denne sammenhæng.

Teknologikataloget vil udover en analyse af relevante teknologier for produktion, lagring og anvendelse af brint på længere sigt, også indeholde en vurdering af de eksisterende teknologiers muligheder for anvendelse af brint. Dette er nødvendigt for at kunne vurdere, hvorledes brint kan implementeres over tiden.

Teknologikataloget vil ydermere indeholde overvejelser vedrørende krav til renhed af brinten og den derved krævede rensning inden anvendelse. Der vil således blive givet et overblik over mulige rensningsmetoder med tekniske og økonomiske nøgletal.

Med udgangspunkt i de i teknologikataloget analyserede teknologier vil der blive foretaget en Delphianalyse for at verificere de forventninger, der er blevet skitseret specielt for fremtidens teknologi, effektivitet og omkostninger.

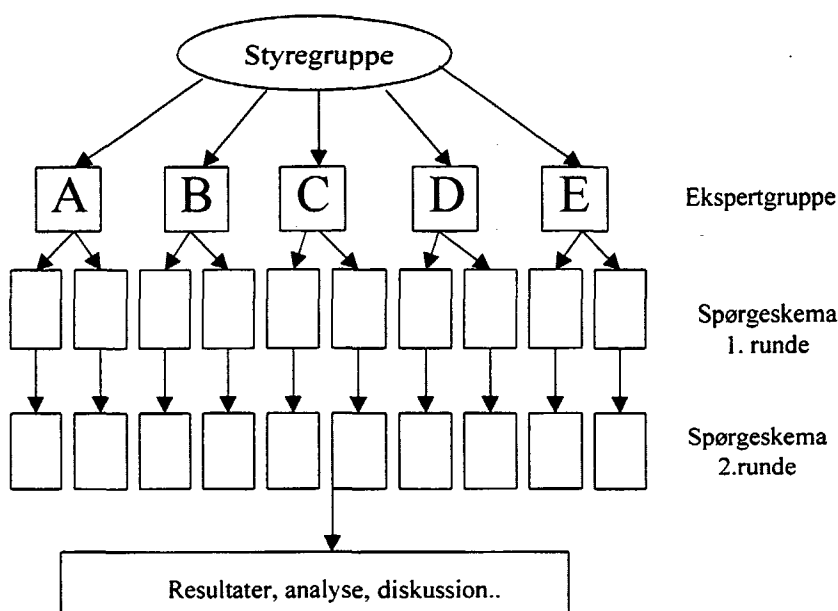
Delphi metoden er en ofte benyttet metode indenfor Technology Foresight (TF), hvor TF kan defineres som en systematisk metode til at vurdere den langsigtede udvikling for videnskab, teknologier, økonomi og samfund. TF kan i en brintsammenhæng bruges til at vurdere den tekniske og økonomiske udvikling for aktuelle brintteknologier og hvilken forskning, der er nødvendig, for at nå disse mål. I forbindelse med TF vil det også være muligt at påpege områder indenfor brintteknologien, hvor Danmark står stærkt, eller hvad der skal til, for at vi kan gøre os gældende på området.

Delphi metoden er en iterativ proces, der går ud på at udsende et sæt af spørgeskemaer til eksperter, at bringe deres meninger tættere på hinanden ved diskussion og endelig at opnå nogenlunde enighed om spørgsmålene. Den principielle opsætning af en Delphi proces er vist i Figur 1.1.

En styregruppe udpeger nogle eksperter, der i fællesskab formulerer en lang liste spørgsmål baseret på en mindre række nøglespørgsmål, som enten kan være formuleret som individuelle spørgsmål eller som multiple-choice spørgsmål. Spørgsmålene sendes ud til specialister indenfor det pågældende område, svarene evalueres af ekspertgruppen og sendes derefter ud til den samme gruppe specialister igen. I anden runde bliver specialisterne bedt om at revurdere deres svar, idet de kan sammenligne dem med svarene fra deres kolleger. For at opnå de nødvendige informationer ved en Delphianalyse bør mange eksperter involveres. Det vil derfor i forbindelse med brintteknologien være nødvendigt at basere Delphianalysen på såvel danske som udenlandske eksperter.

I teknologikataloget vil teknologier indenfor fremstilling af brint i mindre og større anlæg, lagring af brint, transport og distribution af brint samt stationære og mobile anvendelser af brint blive analyseret med henblik på potentiale, energieffektivitet, miljøforhold, økonomisk og teknisk udvikling samt sikkerhedsmæssige perspektiver.

Nedenstående teknologier vil blive analyseret gennem litteraturstudier med henblik på potentiale, energieffektivitet, miljøforhold, økonomisk og teknisk udvikling samt sikkerhedsmæssige perspektiver. På basis af dette vil der blive udformet et spørgeskema til Delphi analysen.



Figur 1.1 Princippet i opbygning af Delphi analyse

1.2 Produktionsteknologier

Der findes idag forskellige metoder til produktion af brint, primært på basis af fossile brændsler eller el. Derudover forskes der imidlertid i mange andre teknologier, der kan have interesse i forbindelse med anvendelsen af brint som energibærer i et fremtidigt energisystem. I teknologikataloget er det kun de produktionsteknologier, der vurderes at kunne have interesse i denne forbindelse, dvs. de teknologier, der vil være med til at nedbringe drivhusgaseffekten, der vil blive analyseret, og de konventionelle produktionsteknologier på basis af kul og naturgas vil derfor ikke blive analyseret i denne sammenhæng.

For alle de analyserede produktionsteknologier vil mulighederne for en central/ decentral produktion blive vurderet.

1.2.1 Fremstilling af brint i større og mindre anlæg

Produktion af brint på basis af biomasse og affald

Produktion af brint på basis af biomasse er en oplagt mulighed for at omsætte vedvarende energi til brint. Der findes dog endnu ikke nogen kommerciel teknologi til fremstilling af brint på basis af biomasse, men der er forskellige processer, der hver især er på forskellige stader i udviklingen.

Forgasning af biomasse er en af de nye teknologier, der forskes i i forbindelse med produktion af brint. Processen er idag under betydelig udvikling og forventes at kunne blive en konkurrencedygtig proces indenfor en overskuelig fremtid. Ud fra den erfaring der idag er med kulforgasning, forventes

biomasseforgasning at blive kommerciel tilgængelig i løbet af 2-3 år. Det er således en realistisk proces til fremstilling af brint på basis af vedvarende energi i et grønt scenarie.

Forskellige forgasningsprocesser vil blive analyseret i teknologikataloget, og det blive vurderet hvilke former for biomasse, der kan anvendes til forgasningsprocessen, og potentialet for anvendelse af biomassen til brintfremstilling vil blive afvejet mod andre anvendelser af den.

Forgasningsprocessen kan i princippet også benyttes på organisk affald. Med de problemer der i de kommende år forventes i Danmark med hensyn til affalds håndtering og deponering, vil denne proces være en interessant mulighed for at reducere affaldsproblemerne og i stedet anvende det organiske affald til fremstilling af miljøvenligt brint. Processen forventes dog realistisk set ikke at kunne blive kommerciel før et stykke tid efter, at biomasseforgasningen er blevet almindelig anvendelig.

Forgasning af organisk affald vil blive analyseret og potentialet for fremstilling af brint på basis af organisk affald i Danmark vil blive opgjort i teknologikataloget.

En biologisk proces der ligger lidt længere ude i fremtiden er produktion af brint ud fra alger, der udsættes for solindstråling. Denne proces er stadig under teknisk udvikling, men det forventes at den kan demonstrere sig teknisk mulig i løbet af et par år. På basis af de investeringer, der er gjort indtil nu, forventes det at brint vil kunne produceres til under 1 kr/kWh ved denne proces. Et markedskoncept forventes at være klar indenfor de næste 5-8 år.

Algeprocessen er således længere ude i fremtiden, men mulighederne og potentialet for anvendelsen af denne teknik i Danmark vil blive analyseret.

Brintproduktion på basis af naturgas

Den eneste proces til fremstilling af brint ud fra naturgas uden en afledt CO₂ produktion er Kvaernerprocessen.

Kvaerner processen, der er opkaldt efter det norske firma Kvaerner, er en proces, hvorved det er muligt at producere brint og rent kulstof på basis af naturgas eller olie samt elektricitet uden CO₂ produktion. Processen er stadig i demonstrationsfasen.

Processen vil blive gennemgået og analyseret i teknologikataloget, og potentialet for anvendelse af teknikken til brintproduktion uden afledt CO₂ fremstilling vil blive vurderet.

Produktion af brint på basis af elektrolyse

Følgende typer for elektrolyse vil blive analyseret i teknologikataloget:

- Konventionel elektrolyse
- Højtrykselektrolyse
- Højtemperaturolektrolyse

Den konventionelle elektrolyse er en velkendt metode, der anvendes kommercielt til brintfremstilling, men der forskes stadig i at udvikle membraner af nye materialer for at være i stand til at følge en fluktuerende drift.

Såvel højtryks- som højtemperaturolektrolyse er teknologier under udvikling. Højtrykselektrolysen

fokuserer specielt på at kunne fremstille brint under højt tryk med en varierende strømkilde, og er derfor en produktionsmetode, der specielt kan være interessant i forbindelse med vedvarende energi. Formålet med højtemperaturelektrolysen er, at brint vil kunne produceres på basis af højtemperatur varme samt et mindre el-input, og denne proces vil derfor specielt have interesse, hvor der er højtemperaturvarme til rådighed.

Potentialet for de forskellige former for elektrolyse vil blive analyseret i teknologikataloget, og ressourceforbruget for hver enkel type vil blive vurderet. Ligeledes vil mulighederne for anvendelse af den sideløbende produktion af ilt blive analyseret.

Produktion af brint på basis af solenergi i fotoelektrokemiske celler

Fotoelektrokemiske celler er et alternativ til et solcelle/elektrolyse system, hvor halvleder og elektrolysesystem er samlet i en enkel enhed. Der foregår et stort forskningsarbejde for at udvikle et sådant stabilt og økonomisk system, der med solen som eneste energiinput danner brint på basis af vand.

Det fotoelektrokemiske system vil blive analyseret som et interessant alternativ til elektrolysesystemet på længere sigt, hvor det dog er en forudsætning af prisen på solceller falder.

Reversible brændselsceller

De reversible brændselsceller vil blive analyseret som et interessant element, hvor produktion og anvendelsessiden er kombineret i et system. Teknologikataloget vil indeholde en vurdering af pris, effektivitet, ressourceforbrug, trykforhold o.lign. samt overvejelser over, hvor de reversible brændselsceller kan have interesse.

1.3 Teknologier til lagring, transport og distribution

Kondensationsanlæg til produktion af flydende brint

Der findes forskellige fortætningsprocesser til produktion af flydende brint, der dog alle bygger på en kompressionsproces efterfulgt af en form for ekspansion enten irreversibelt ved hjælp af en reguleringsventil eller delvis reversibelt ved brug af en ekspansionsmaskine.

De forskellige former for fortætningsprocesser vil blive analyseret, og krav til tryk, renhed o.lign. for de forskellige processer vil blive vurderet i forhold til anvendelse i det danske energisystem. I den forbindelse vil der også blive givet et overblik over mulige rensningsmetoder med tekniske og økonomiske nøgletal.

Ligeledes vil kataloget indeholde overvejelser vedrørende komprimering. Komprimering af brint foregår på samme måde som naturgas og er derfor anerkendt teknik, der i flere tilfælde umiddelbart kan benyttes til begge gasser. Komprimeringen medfører en omkostning og et energitab som oftest overses i systemsammenhæng, men som kan have en betydelig størrelse.

1.3.1 Lagring af brint i stationære og mobile anlæg (bidrag fra DTU integreres bl.a. her)

Stationære lagre

Brint kan lagres såvel gasformigt under tryk som flydende. Til lagring af gasformig brint i stor skala kan typisk benyttes salthorste eller aquiferer, hvilket også benyttes idag til lagring af naturgas. Disse

former for lagre vil blive vurderet med hensyn til kapacitet, trykforhold, spildprocent/effektivitet, ligesom teknologikataloget vil indeholde overvejelser vedrørende lagerets egnethed til lagring af en blanding af naturgas og brint.

Til lagring af gasformig brint i mindre skala kan anvendes såvel cylindriske tanke som flasker. Begge former for stationær lager analyseres med hensyn til effektivitet, kapacitet, trykforhold og andre tekniske krav. Ligeledes vurderes det optimale pris/kapacitets forhold.

I gassektoren tages der idag højde for korttids fluktuationer i gasleverancen pga af trykvariationer i distributionssystemet ved bufferlagre i form af lavtryks sfæriske tanke. Der er endnu ingen driftserfaringer med denne form for bufferlager ved brintdistribution, men krav til tryk, materiale og andre forhold vil blive vurderet.

Lagring af flydende brint foregår i store lagringstanke med perlit vacuum isolering. Teknologien er velkendt i forbindelse med rumfart. I mindre form lagres flydende brint i containere med en form for super isolering og vedvarende køling med en kold gas. Begge former for lagringsanlæg vil blive vurderet med hensyn til effektivitet, kapacitet, trykforhold og andre tekniske krav.

Mobile lagre

Forskellige former for lagre til anvendelse i køretøjer vil blive analyseret med hensyn til effektivitet, vægt, trykforhold, pris og sikkerhed. Såvel ståltanke og komposittanke for lagring af gasformig brint, tanke til lagring af flydende brint som metalhydrider vil blive analyseret.

Andre lagringsteknikker

Både i Europa og USA foregår der forskning i en jernoxid (svampe) lagringsmetode, hvor lagrings- og rensningsforhold kan kombineres. Metoden forventes at forbedre energidensiteten og lagringsomkostningerne. Metoden forventes at være klar på markedet i løbet af 3-5 år.

Derudover foregår der specielt i USA forskning indenfor adsorptionslagring ved brug af karbon mikrofibre. Denne metode giver forventninger til en fordobling af lagringsdensiteten med højere lagringsdensitet end for flydende brint, og vil således kunne medføre et gennembrud indenfor lagringsteknologien.

En anden metode under udvikling er højtryks lagring af brint i såkaldte mikrosfærer, bestående af små glaskugler der kan modstå meget højt tryk. Denne lagringsmetode er endnu på et meget tidligt stade.

Alle de nævnte lagringsteknikker vil blive analyseret grundigt for at vurdere udviklingsstade, forventninger til de forskellige lagringsmetoders effektivitet og omkostninger samt under hvilke forhold de forskellige typer for lagre vil være anvendelige (se mere om lagring i afsnit 3.11).

1.4 Distribution af brint, herunder brug af naturgasnet (se også afsnit 1.7)

Anvendelse af naturgasnettet til brint

Teknologikataloget vil indeholde en analyse af naturgasnettets egnethed til distribution af brint, herunder vil såvel transmissionsnettet som distributionsnettet blive vurderet. Der vil ligeledes blive vurderet, hvor store mængder brint der kan tilsættes naturgassen uden problemer med hensyn til ventiler o.lign.

1.5 Anvendelsesteknologier

Brint kan i det danske energisystem anvendes såvel i kraftvarmesystemet som i transportsektoren.

1.5.1 Stationære anvendelser (herunder reversible brændselsceller) (evt. med tilkommende bidrag fra ELKRAFT)

Kraftvarmesystemet

Relevante teknologier til anvendelse af brint indenfor kraftvarmesystemet, der vil blive analyseret i teknologikataloget, vil være brændselsceller, gasturbiner, motorer og kedler. Det vil blive vurderet hvilke former for brændselsceller, der specielt kan have interesse i forskellige sammenhæng, og hvilke typer der kan anvendes centralt, decentralt og lokalt.

Specielt i forbindelse med gasturbiner, motorer og kedler vil der blive foretaget en vurdering af i hvilket omfang eksisterende teknologier kan benyttes til brint direkte eller ved en tilsætning af brint til naturgassen. Teknologikataloget vil indeholde overvejelser vedrørende væsentlige ændringer, der skal foretages for at kunne anvende eksisterende teknologi ved en løbende overgang til brint som energibærer.

1.5.2 Mobile anvendelser (forbrænding, brændselsceller, metanol reformering) (DTU bidrag integreres bl.a. her)

Transportsektoren

Det vil i teknologikataloget blive analyseret, hvorledes brint bedst kan anvendes i transportsektoren: ved direkte forbrænding, i brændselsceller direkte, i brændselsceller ud fra løbende metanolomdannelse, eller i metanolbrændselscelle.

Ligeledes vil teknologikataloget indeholde en analyse af anvendelsen af brint i forskellige transportmidler som biler, busser, tog, skibe og fly.

1.6 Resultater

I teknologikataloget vil de respektive teknologier blive beskrevet og afslutningsvis opstillet med nøgletal for effektivitet, kapacitet, omkostninger, ressourcekrav, trykforhold og potentiale.

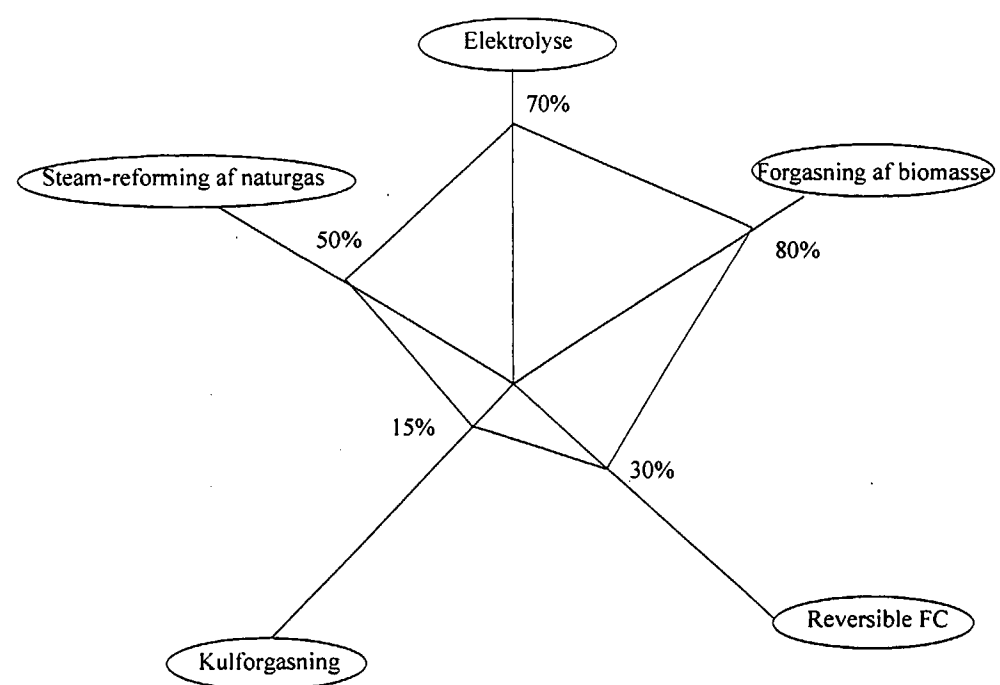
Resultatet af Delphi analysen vil blive præsenteret i form af en tabel som vist i Tabel 1.1. Tabellen er et eksempel på resultatet af Delphi undersøgelse i forbindelse med produktion af brint.

Tabellen viser, at der er nogenlunde enighed om hvornår elektrolyse bliver en økonomisk attraktiv produktionsteknologi, hvorimod der er stor uenighed om hvornår reversible brændselsceller bliver konkurrencedygtige.

På basis af Delphianalyserne vurderes det hvilke produktionsteknologier, der bør satses på indenfor den næste årrække for at gøre teknologierne konkurrencedygtige. Figur 1.2 viser, at 70% har vurderet at elektrolyse er en vigtig produktionsteknologi, 80% har også ment at forgasning af biomasse er vigtig, mens kun 15% har ment at kulforgasning er vigtig.

Tabel 1.1. Resultat af Delphi analyse

	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2030	efter 2030
50% af elforsyningen er baseret på VE							
Elektrolyse når en virkningsgrad på 94%							
Reversible FC bliver konkurrencedygtige							
Brintproduktion på basis af naturgas bliver dominerende							
Nye metoder på basis af biomasse							
Elektrolyse bliver økonomisk attraktiv							



Figur 1.2. Hvilke teknologier skal der satses på indenfor den næste årrække?

Data fra teknologikataloget suppleret med resultatet af Delphianalysen vil blive brugt ved opstilling af scenarier for fremtidens energisystem.

1.7. Anvendelse af det eksisterende naturgasnet til brint (selvstændigt afsnit om distribution af brint, herunder brug af naturgasnet, vil fremkomme senere). Celia Juhl og Aksel Hauge Petersen, DONG

DONG er i gang med en litteraturundersøgelse, som skal afdække den eksisterende viden om mulighederne for konvertering af naturgasledninger til ledninger, som kan transportere ren brint eller brint-naturgasblandinger. DONGs del af undersøgelsen dækker alene stålledninger. Anlæg, ventiler, rør, komponenter, fittings mm er ikke dækket. Da denne statusrapport er stilet til Brintudvalget, vil kun den del af undersøgelsen, der omhandler ren brint, blive omtalt nedenfor.

Det har længe været kendt, at brint, der absorberes i stål (brintindtrængning), kan give sprødhed. Forudgående transport af naturgas giver en forurening af rørvæggen, som fremmer brintindtrængning i stålet, og derudover kan brintindtrængning ske, hvis stålet udsættes for langsom plastisk deformation. Ved overskridelse af en for stålet karakteristisk brintflux-værdi vil der kunne dannes revner.

Allerede ved planlægningen af det danske naturgasnet blev det undersøgt, om stålrørene kunne vælges af en kvalitet, som sikrede, at rørledningen senere kunne anvendes til transport af brint. Anbefalingerne blev imidlertid ikke fulgt, da det ville betyde en væsentlig fordyrelse af projektet.

Det danske naturgassystem er forholdsvis nyt og bygget med moderne rørmaterialer med en høj grad af kvalitetssikring, og det vil derfor, alt andet lige, være bedre egnet end mange udenlandske ledninger. Litteraturundersøgelsen viser, at konvertering af store højtryksledninger endnu ikke er prøvet i praksis, hverken til ren brint eller til blandinger af brint og naturgas. Den viser også, at der trods mange undersøgelser, stadig er mange ubesvarede spørgsmål. Det er derfor ikke muligt på nuværende tidspunkt entydigt at konkludere, om konvertering af det danske system til ren brint er realistisk. Undersøgelsen viser f.eks. at nedenstående punkter mangler en afklaring. Det første punkt skal klares i Danmark, men resten kræver en international indsats.

Stålene er valgt på basis af deres mekaniske egenskaber, men på det tidspunkt hvor hovedparten af ledningerne blev lagt, var det ikke almindeligt at inkludere målinger af stålenes brudmekaniske egenskaber, hverken for rør eller for svejsninger. Disse oplysninger vil være nødvendige, ligesom det også er nødvendigt, at bestemme brintens indflydelse på de brudmekaniske egenskaber. Det vil gøre det muligt at beregne stålets kritisk revnelængde og brudstopegenskaber.

Udviklingen indenfor inline intelligent pigging af rør går stærkt i disse år, og det er sandsynligt, at man om nogle år vil være i stand til, med rimelig stor nøjagtighed, at bestemme fejlstørrelser (længde, bredde og dybde) i rørmaterialet og i svejsninger. Ved at sammenholde målingerne med den kritiske revnelængde kan man vurdere risikoen for brud.

Laboratorieforsøg har vist, at tilsætning af ilt i små mængder, virker inhiberende på brintindtrængning, men da det er ikke forsøgt i praksis, kender man ikke effektiviteten af tilsætningen og dermed heller ikke den nødvendige koncentration.

Det vil ved brinttransport være nødvendigt at tage en række driftmæssige forholdsregler som nedsættelse af trykket, begrænsninger i trykudsving, stramning af kontrol- og sikkerhedsprocedurer mm. Der er dog endnu ikke erfaringsgrundlag til at fastlægge hverken tilladeligt tryk eller graden af trykudsving, ligesom der mangler viden om de nødvendige skærper på det sikkerhedsmæssige område.

2. Opstilling af scenarier

Bent Sørensen (baseret på drøftelser i den samlede projektgruppe)

Projektet sigter på at opstille 3-4 scenarier for Danmarks fremtidige energisystem. De to scenarier refererer til år 2050, hvor det antages at hele energisystemet har været igennem en cyklus af naturlig udskiftning (undtagen langtlevende bygninger) og det derfor er muligt at antage installation af nye teknologier uden ekstraudgiften ved forceret udskiftning.

2050 scenarierne er baseret på en efterspørgselsmodel af "bottom-up" typen (Kuemmel, Nielsen og Sørensen, 1997; Sørensen, Kuemmel og Meibom, 1999). Basisantagelser er høj behovstilfredsstillelse og en teknisk gennemsnitseffektivitet i 2050 lig den højeste tilgængelige effektivitet i dag.

Det ene 2050 scenarie antager et meget decentraliseret energisystem, hvor den enkelte bygning producerer energi ved hjælp af solpaneler integreret i facade og tag og/eller (lavtemperatur-) brændselsceller baseret på brint distribueret gennem et opgraderet naturgasnet. Energiproduktionen omfatter såvel elektricitet som varme, men der antages kun begrænset lagringskapacitet i den enkelte bygning: For varme kun et mindre lager i tilfælde af at der ikke er tilslutning via fjernvarmenet til centralt lager, for elektricitet kun effektudjævrende lagring og lagring ved opladning af batterier til brug i bygningen eller i relaterede køretøjer. Transportmidler anvendt af bygningens beboere eller brugere antages optanket med brint og el via tilslutning til bygningens energisystem.

Det andet 2050 scenarie bygger på antagelsen om bevaring af et antal centrale konverteringssteder, omfattende f.eks. kraftvarme-værker og brændstof-stationer (svarende til nuværende benzinstationer). Kraftvarmeværkerne kan baseres på (højtemperatur-) brændselsceller, som anvender brint produceret udfra vedvarende energi, og "tankningen" af brint på brændstoftankene kan bestå i udskiftning af lagringsenheder baseret på brint lagret i metalhydrid eller nanofiber-lagre. Den eksisterende, fint-forgrenede del af naturgasnettet er i dette scenario en overflødig "fejlinvestering", mens fjernvarmenettet i begge scenarier tjener nyttige formål.

Det tredje scenario bygger på regeringens plan ENERGI 21, så vidt det er muligt. Hermed menes, at kravet om at indpasse brint produceret i perioder med overskud af vindkraft kan føre til ændringer i f.eks. den decentrale kraft-varme produktion, i den udstrækning brinten ikke kan beholdes transportsektoren. Hvis det sidste er tilfældet, skønnes der ikke at være behov for ændringer i ENERGI 21, idet transportsektoren her er afkoblet fra det øvrige energisystem.

Man kan forestille sig det med brint modificerede ENERGI 21 scenario som et mellemstadium på vej mod et 2050 scenarie med endnu større andel af vedvarende energi. Dette forekommer mest sandsynligt i forbindelse med det andet 2050 scenario med bevaret central produktionsstruktur. Et problem er ENERGI 21's lave energieffektivitet.

Endelig overvejer projektgruppen at lave to 2030 scenarier eller varianter, hvor det alternative (til ovenstående) adskiller sig ved at benytte udlandsforbindelserne (især for el-transmission men evt. også for naturgas/brint) til at håndtere indpasningen af el-overløb anderledes end ved kun at benytte det til brintproduktion. Dette kan bruges til at vurdere fordele og ulemper ved at integrere det danske energisystem mere fundamentalt i det europæiske, fremfor at søge en principiel mulighed for selvforsyning.

3. Data fremskaffelse (GIS baseret, i.e. med geografisk fordeling)

Bent Sørensen m.fl.

Det er et centralt metodevalg for dette projekt at repræsentere forbrug og forsyning i en geografisk baseret model, altså at opgive energistrømme per arealenhed. Det er derfor nødvendigt at repræsentere data i geografisk form (ofte benævnt GIS = geografisk informations system) for både ind- og ud-data. For at kunne besvare spørgsmål vedrørende systemets opførsel, som tillader en teknisk vurdering af mere og mindre decentraliserede strukturer, skønnes opløsningen at skulle være omkring 2 km eller finere. De fleste grundlæggende data har bekvemt kunnet fremskaffes netop i opløsninger på 500 m til 2 km (dvs. basis-celler som i tilfælde af at de er kvadratiske er f.eks. 1 km × 1 km; i praksis forekommer også irregulære celler, bestemt af eksempelvis bygrænser eller grænser for skovbevoksning). Nogle data findes med endnu finere opløsning, men ved at vælge ovennævnte undgår vi register-problemer med at navngivne forbrugere ville kunne identificeres.

Den primære tidslige opløsning er valgt som månedlige middelværdier. Imidlertid udviser såvel energiforbrug som –produktion svingninger på ugebasis, på døgnbasis, på timebasis og så videre. Nogle af disse variationer er vigtige for bedømmelsen af systemets opførsel, ikke mindst i relation til energilager-behov. Imidlertid er det ikke praktisk muligt at foretage en tidslig meget fintmasket simulering, samtidig med at den runlige opløsning er høj. Istedet arbejder vi med forskellige modelleringsniveauer:

- System-implementeringsanalyser foretages med rumligt aggregerede data og tidsskridt på et år.
- Generel systemopførsel simuleres med fuld rumlig opløsning og med tidslige middelværdier for måneder eller årstider.
- For hver af de 4 årstider foretages en uges simulering med tidsskridt på 1 time og formentlig fuld rumlig opløsning.

Nedenfor beskrives de enkelte data-kategorier og valget af data-kilder.

3.1 Befolkning

Bent Sørensen

Danske befolkningsdata findes kun aggregeret på sogne eller udspecificeret på vej-adresser. Danmarks Statistik har tilbudt os at omregne sidstnævnte data til GIS format for en sum af størrelsesordenen hundrede tusende kroner, hvilket vi fandt lå udover dette projekts økonomiske rammer og iøvrigt er temmelig urimeligt for en datastruktur som allerede findes i de lande som omgiver os og som DS derfor skønnes nødt til at lave under alle omstændigheder.

Imidlertid er det muligt at lave tilnærmelser, som vi skønner er gode nok til den anvendelse vi gør af befolkningstallene. De for projektet interessante befolkningstal er under alle omstændigheder for 2030 eller 2050, og selvom den totale befolkning kan fremskrives ret sikkert, så er netop den geografiske fordeling om 30 til 50 år behæftet med betydelig usikkerhed, eftersom den afhænger af udviklingen i erhvervsstruktur, i den løbende udvikling af tekniske forudsætninger for decentral virksomhed, af transport-strukturens udvikling, samt ikke mindst af politiske forhold omkring begunstiggelse eller straf (f.eks. fredningslove eller andre forhindringer for etablering i naturskønne områder) for udflytning af aktiviteter. Med denne usikkerhed finder vi at anvendelsen af simple modeller for den geografiske

fordeling af befolkningen i fremtiden er rimelig.

En model som vi overvejer er følgende: Et groft skøn over den nuværende fordeling af befolkning findes udfra fordelingen af varmemeforbrug, som vi har adgang til fra bygningsregistret (BBR-data). Ved at antage befolkningen fordelt som varmemeforbruget ses bort fra forskelle i forbrugsmønstre og i bygningers isoleringsgrad, samt etage-areal per beboer. Men modellen tillader afprøvning af antagelser om migration i fremtiden, hvor den ovenfor omtalte decentraliserings-tendens skønnes at dominere, i modsætning til tidligere tiders migration fra land til by (som idag ses at pågå i tredje verdens lande). Udgangspunktet i dagens data kan justeres til at give de rigtige totaler på regions eller sognebasis, således at kun lokale variationer af de nævnte typer forbliver skjult i modellen.

Endelig må det siges, at vi jo faktisk ikke er interesseret i befolkningens fordeling i sig selv, men kun i at kunne vurdere energiforbrug og -forsyningsruter. For varme har vi således de data vi skal bruge, mens det for elforbrug og transport er nødvendigt at modellere forbruget, hvilket vi forestiller os i en række tilfælde vil involvere brug af per capita data. Det er af denne årsag, at befolkningens fremtidige lokalisering er af interesse. F.eks. vil vi udfra spørgeundersøgelser om elforbrugsvaner kunne opstille modeller for fremtidigt forbrug i forskellige befolkningskategorier, og skal da bruge bosætningsmønstret til at udregne el-forbruget på geografisk basis. Elselskaberne kan jo ikke idag måle den enkelte forbrugers tidlige fordeling af forbruget, men kun den totale mængde strøm som sendes ud fra et givet kraftværk (eller måske en sub-station). Elmålere aggregerer forbruget i tid, og forbrugsmåling via signaler over nettet er stadig en fremtidsdrøm.

3.2 Varmeforbrug

Bent Sørensen

Det samlede varmemeforbrug i 1998 er vist i Figur 3.1, baseret på geokodning af oplysninger fra BBR-registeret i en varmemeforbrugsmodel opstillet af Energistyrelsen (P. Kristensen og M. Slettebjerg, 1999). For hver celle haves en opdeling på dels anvenderens status (boligtype, kontortorbygning, fremstillingsvirksomhed, institution osv.), dels på typen af varmeinstallation (f.eks. centralvarme med olie, gas, varmepumpe eller fjernvarme, elvarme eller brændefyr). Desuden er det samlede kvadratmeterareal i hver celle anvendt til beboelse og erhverv kendt. Herudfra kan som nævnt i afsnittet ovenfor andre modeller for beregning af andre størrelser opstilles.*

Fremskrivningen af varmemeforbruget vil blive baseret på en model for løbende forbedringer i eksisterende bygningers skal, samt antagelser og fremtidige krav til nybyggeri. Over de seneste 25 år er Danmarks varmemeforbrug ca. halveret i forhold til hvad det ville have været med uændret teknologi. Imidlertid er kun omkring en tredjedel af de eksisterende bygninger renoveret substantielt for så vidt angår varmetab, og der er derfor basis for endnu en halvering eller mere, uden at medtage bygninger af historisk værdi, hvor isoleringstiltag/vinduesudskiftning må begrænses til tiltag som ikke ændrer udseendet. I dag er den frivillige renovering af eksisterende bygninger for at mindske varmetabet stort set ophørt, og bygningsreglementet stiller kun krav til nybygninger. Der vil derfor være brug for enten regler for eksisterende bygninger eller kraftige prissignaler.

* Figur 3.1 indeholder nogle unøjagtigheder, som vi opdagede gennem en række krydscheck, og som skyldtes fejl i det udtræk af data som Energistyrelsen havde leveret. Der er ikke fejl i Energistirelsens basisdata, og vi har nu modtaget rettede data, som vil blive brugt fremover.

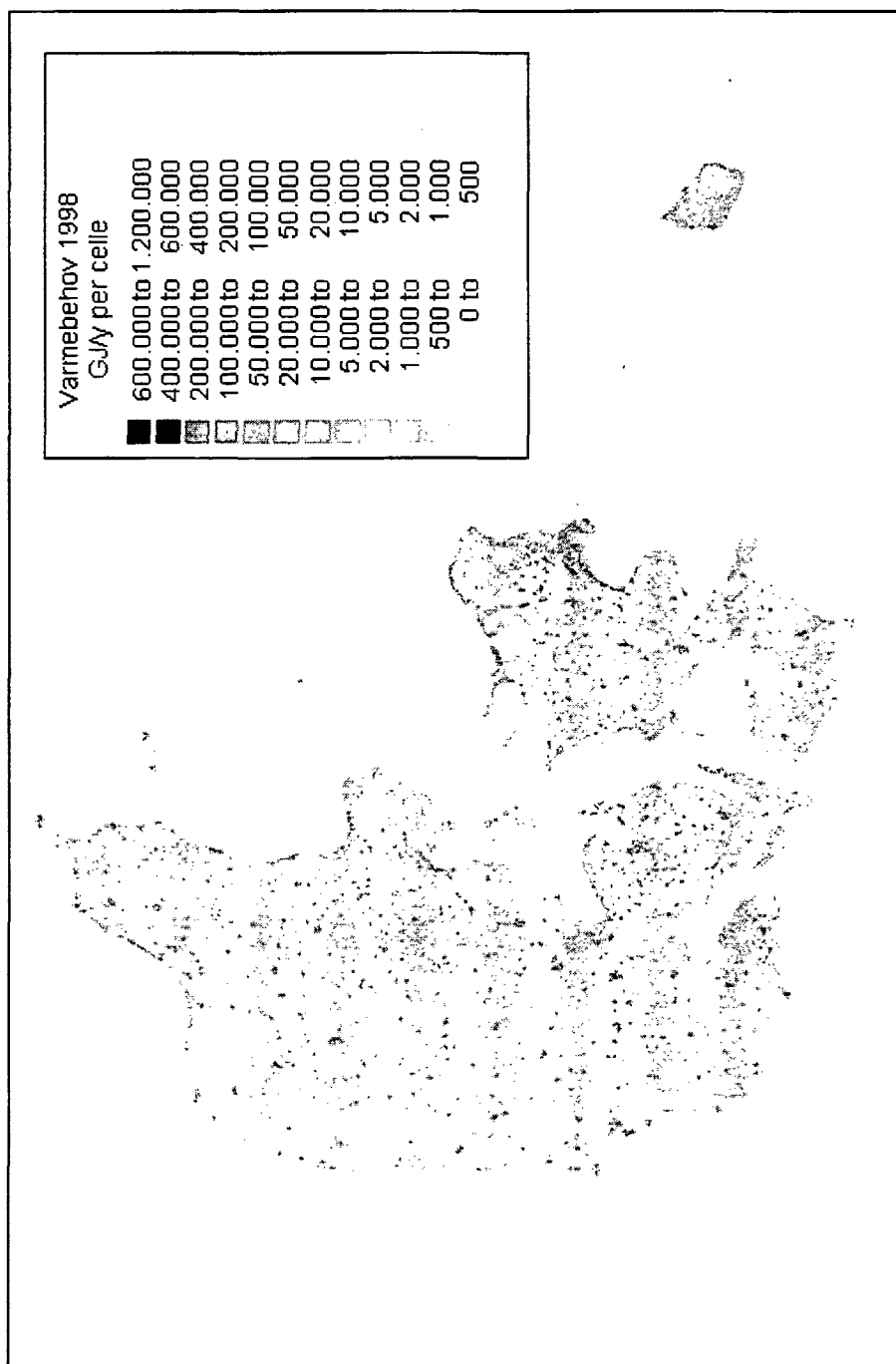


Fig. 3.1. Nuværende varmebehov i Danmark.

3.3 Elforbrug

Thomas Engberg Pedersen

3.3.1. Geografisk og tidsmæssig fordeling af elforbrug

I forbindelse med projektet er der behov for en geografisk og tidsmæssig opdeling af elforbruget. Af hensyn til behandling/præsentation af data i GIS-format* skal den geografiske opdeling finde sted på kvadrater ("grids") uafhængigt af amter, kommuner, elselskaber m.v.

Geografisk fordeling.

BBR-registret

I BBR-registret findes oplysninger om, hvordan det samlede danske bygningsareal er fordelt geografisk. På baggrund heraf kan foretages en skønsmæssig geografisk fordeling af elforbruget, idet det indenfor de enkelte kategorier af elforbrug antages, at elforbruget er proportionalt med bygningsarealet.

Da ikke alle typer bygninger er lige elforbrugsintensive, er det nødvendigt, at skelne imellem f.eks. produktionserhverv og husholdninger. Hvis oplysningerne i BBR-registret gør det muligt, vil det være bekvemt at anvende samme opdeling, som den der anvendes i Energistyrelsens Energistatistik.

Energistatistik 1997

Af Energistyrelsens "Energistatistik 1997" fremgår det, hvordan elforbruget i Danmark er fordelt på kategorier. Af tallene for 1997 fås:

	TJ	%
Transport	1.044	0,9
Produktionserhverv	41.769	36,5
Handels- og servicevirksomhed	33.631	29,4
Husholdninger	38.086	33,3
I alt	114.531	100,0

Tabel 3.1 : Elforbrug i Danmark 1997 opdelt på kategorier

Denne "fordelingsnøgle" kan evt. fastfryses og anvendes for fremtidige beregningsår.

Metode

Det foreslås på baggrund heraf, at elforbruget i de relevante beregningsår fordeles på kategorier på baggrund af "fordelingsnøglen" fra 1997. Hermed antages det, at den relative udvikling i elforbruget er den samme i alle kategorier.

I forlængelse heraf opdeles elforbruget geografisk i de enkelte kategorier på baggrund af oplysningerne i BBR-registret. Hermed antages det, at elforbruget i de enkelte kategorier er proportionalt med bygningsarealet.

* GIS: Geografiske Informations Systemer

Metoden er forbundet men en vis usikkerhed, hvortil den væsentligste kilde nok er antagelsen om, at fordele elforbrug efter bygningsareal – særligt for fremstillingsvirksomheder kan der være store forskelle i elforbruget. Men metoden gør det muligt, at lave en geografisk opdeling af elforbruget uden at gøre dette til et projekt i sig selv. Senere i projektet kan det være, at de mange målinger som Eltra og Elkraft System foretager fra den 1. januar 2000 til brug for afregninger kan bidrage til en revurdering/opdatering af metoden.

Tidsmæssig fordeling

Den tidsmæssige variation i elforbruget kan illustreres dels som en variation over året i form af månedsværdier og dels i form af nogle timeværdier for udvalgte uger. Da forbrugsmønstret er forskelligt i de enkelte kategorier af forbrugere, er det nødvendigt at skelne mellem disse.

Fra DEFU er foreløbigt indhentet oplysninger om årsvariationen i de enkelte kategorier baseret på historiske tal for Sjællandsområdet. I DEFU's tal er elforbruget opdelt på følgende kategorier:

Boliger
Landbrug
Industri
Privat handel & service
Offentlig sektor

– og i forhold til Energistyrelsens opdeling på kategorier gælder følgende sammenhæng:

Kategorier, ENS	Kategorier, DEFU
"Husholdninger"	"Boliger"
"Produktionserhverv"	"Landbrug" + "Industri"
"Handels- og servicevirksomhed" + "Transport"	"Privat handel og service" + Offentlig service

Tabel 3.2 : Sammenhæng mellem elforbrugskategorier, ENS og DEFU

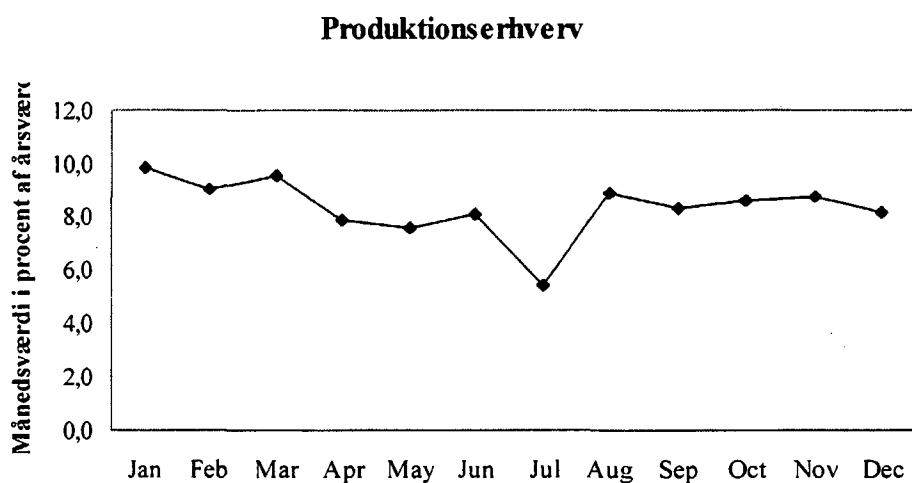
Det fremgår heraf, at der ved en kombineret anvendelse af Energistyrelsens fordeling af elforbruget på kategorier og DEFU's tal for den tidsmæssige fordeling af elforbruget i kategorier kan skelnes mellem tre "hovedkategorier". Disse tre kategorier svarer til Energistyrelsens kategorier – blot er transportforbruget lagt sammen med "Handels- og servicevirksomhed". Årsvariationen i de tre kategorier er angivet i tabelform i Tabel 3.1 og grafisk i Figurene 3.2-3.4.

Hvad angår variationen i forbrug over ugen og over døgnet, så forventes denne variation repræsenteret vha. af nogle repræsentative ugeprofiler på timebasis. For hver forbrugskategori kan uge- og døgnvariationen f.eks. repræsenteres vha. en ugeprofil for hver sæson i året.

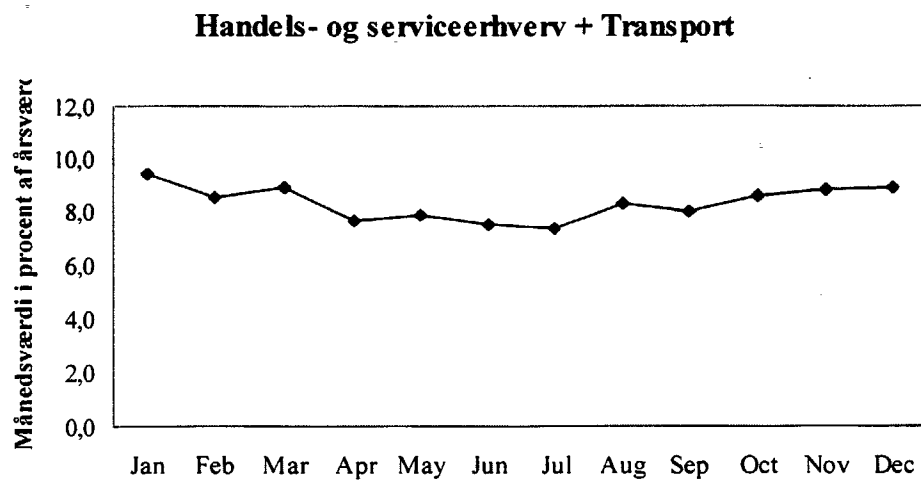
Tabel 3.1.

Årsvariation elforbrug - månedsværdier i procent af årsværdier

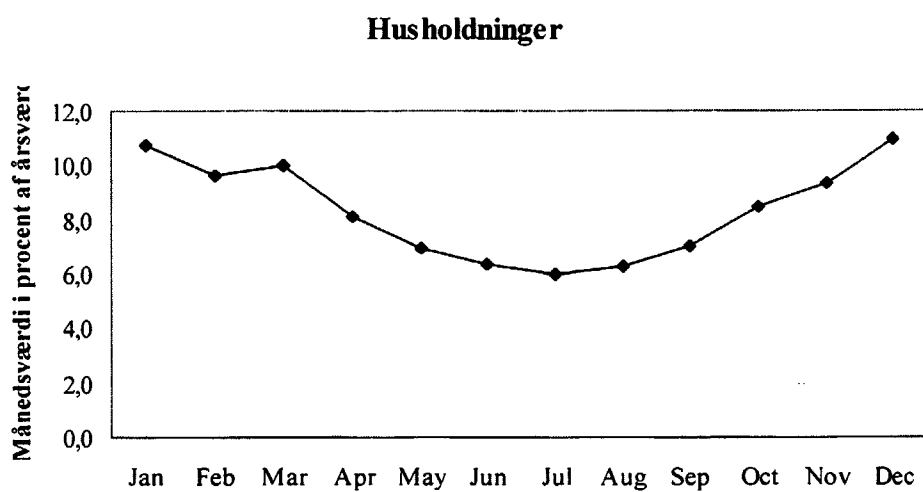
	Januar	Februar	Marts	April	Maj	Juni	
Produktionserhverv	9,9	9,0	9,5	7,9	7,5	8,1	
Handels- og serviceerhverv + Transport	9,5	8,5	8,9	7,7	7,9	7,5	
Husholdninger	10,8	9,7	10,0	8,1	7,0	6,4	
	Juli	August	September	Oktober	November	December	I alt
Produktionserhverv	5,4	8,9	8,3	8,6	8,7	8,2	100,0
Handels- og serviceerhverv + Transport	7,4	8,3	8,0	8,6	8,8	8,9	100,0
Husholdninger	6,0	6,3	7,0	8,5	9,4	11,0	100,0



Figur 3.2 Elforbrug i prproduktionserhverv



Figur 3.3. Elforbrug i handel, service og transportsektorerne.



Figur 3.4. Elforbrug i husholdninger.

3.4 Transportenergiforbrug

Kaj Jørgensen m.fl.

Dette afsnit skal beskrive dagens transportenergiforbrug ud fra statistisk materiale, og så vidt muligt i GIS format. Dette kan gøres ud fra slutforbrugslokaliteten, dvs. ud fra statistik over trafiktætheder. Alternativt kan forbruget placeres der hvor brændstoffet aftappes, dvs. benzinstationer mv. Endelig stillingtagen til hvilket valg vi vil foretage fremkommer når tilgængeligheden af data er analyseret nøjere.

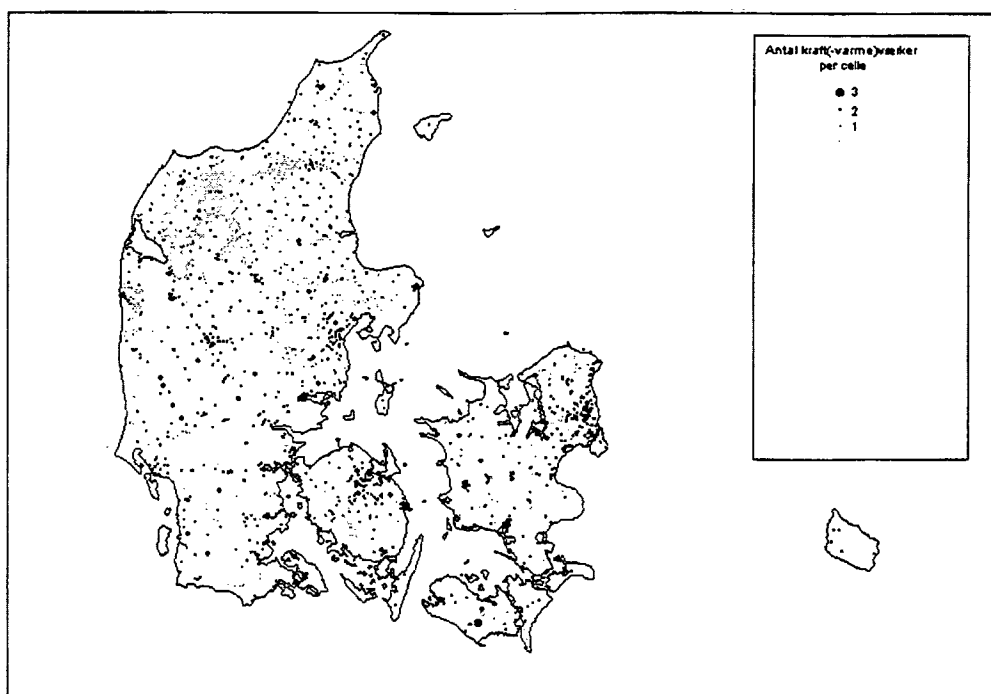
Fremskrivning til scenarie-fremtiderne sker ud fra ENERGI 21 (Energiministeriet, 1998; 1999), og for 2050 scenarierne ud fra den tidligere opstillede behovsmodel (Kuemmel et al., 1997; Sørensen et al., 1999).

3.5 Nuværende el og varme produktion, transmission og distribution

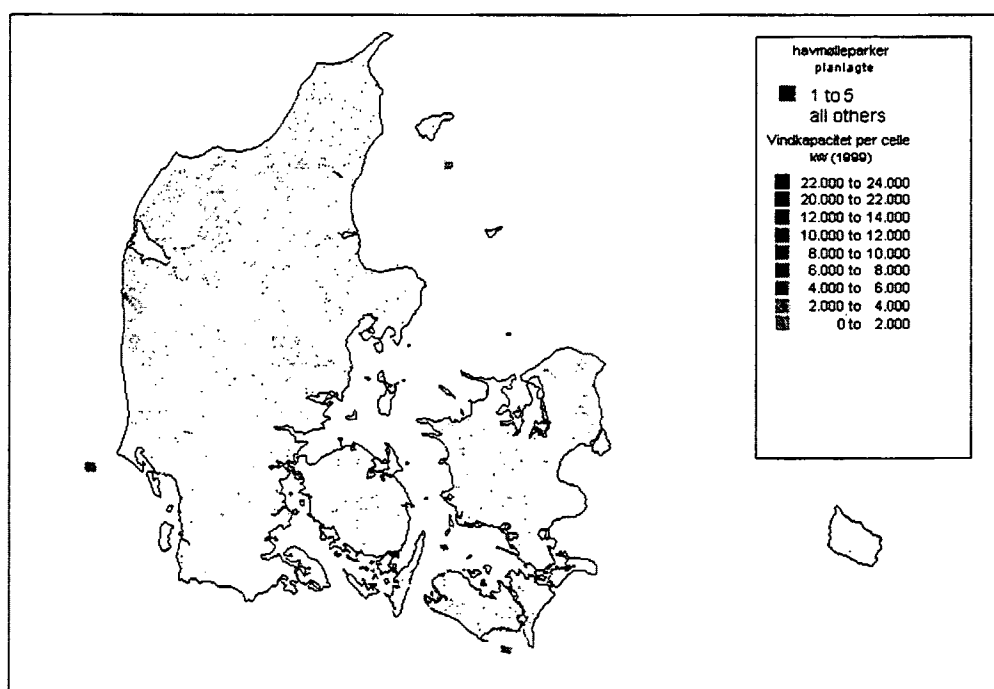
Finn Sørensen, Bent Sørensen og Thomas Engberg Pedersen

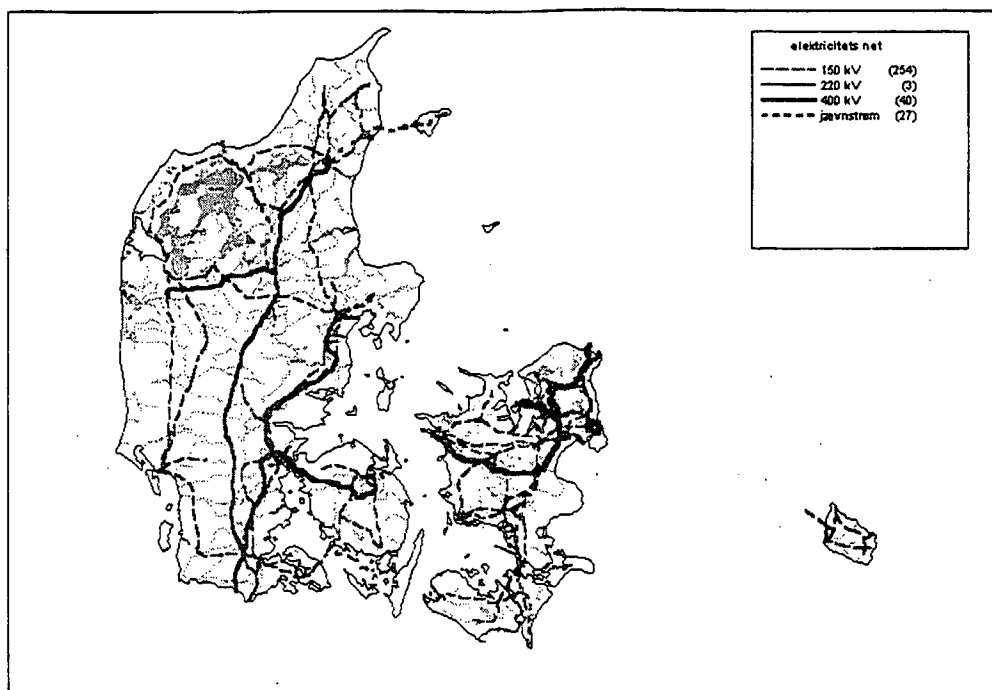
Elforbruget dækkes idag gennem et antal centrale og decentrale kraftvarmeværker, enkelte rene kraftværker, der som brændsel benytter fossile brændsler (kul, naturgas og olie) eller biobrændsler, samt et stort antal vindkraftanlæg. Lokaliseringen er vist på Figur 3.5. Det overordnede transmissionsnet for elektricitet er vist på Figur 3.6.

Varmebehovet dækkes af samproduceret varme fra centrale og decentrale kraftvarmeværker, af naturgas samt olie, brænde, termiske solfangere og elvarme. Fjernvarme og naturgasområderne er vist på Figur 3.7. Da lovgivningen ikke omfatter fuld tilslutningspligt til de kollektive forsyningsformer, findes de øvrige opvarmningsformer også i disse områder, samt naturligvis i "rest-områderne". Det overordnede naturgastransmissionsnet er vist på Figur 3.6. Varmeproduktionen svarer til forbruget (Figur 3.1) plus transmissionstab. Elforbruget vil blive estimeret som beskrevet i afsnit 3.3.

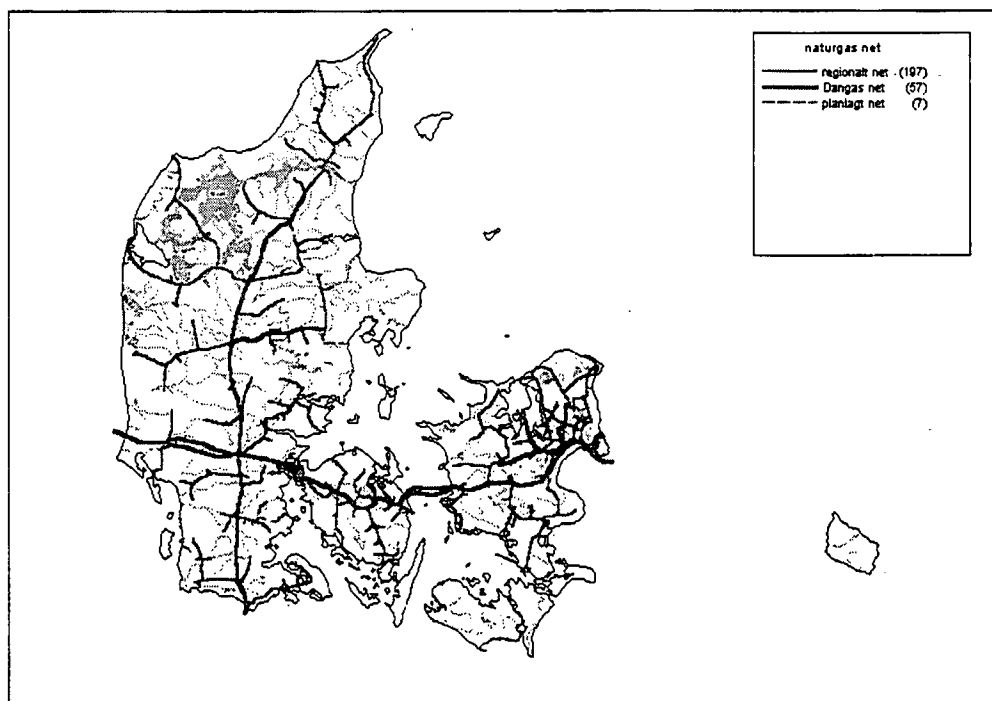


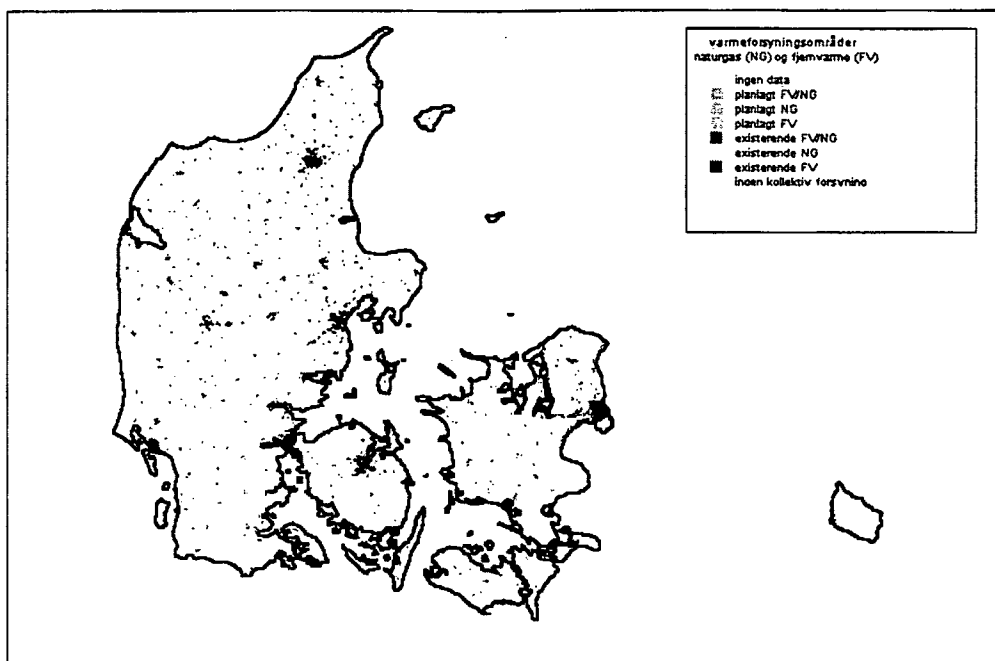
Figur 3.5. El-produktionskapacitet (1999). Brændselsbaseret (ovenfor) og vindkraftbaseret, inkl. indikation af arealer afsat til havmølleparker (nedenfor).



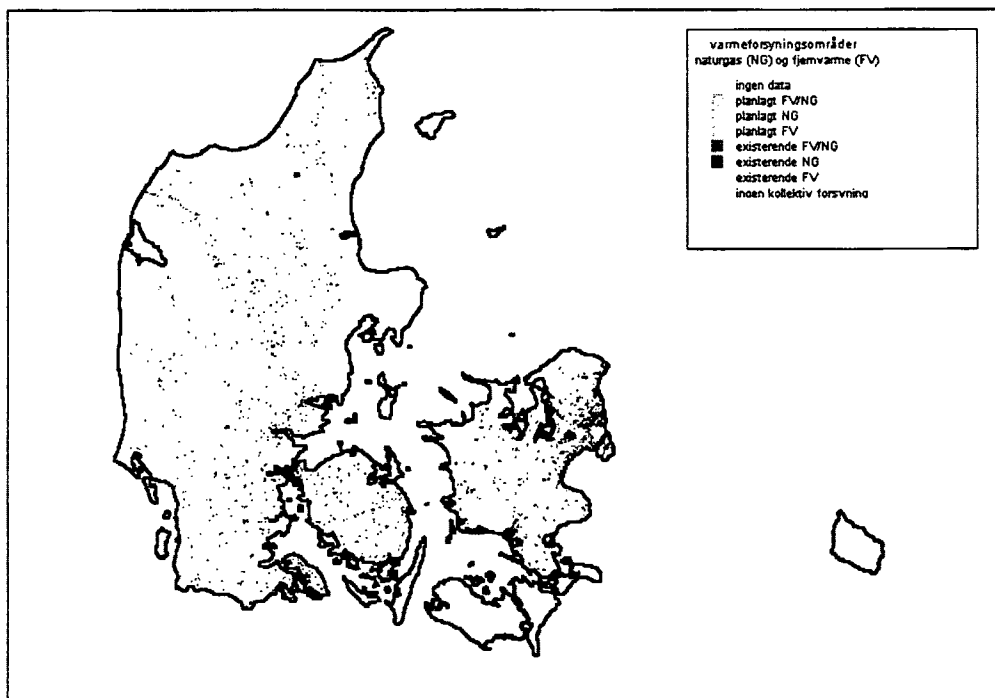


Figur 3.6. Overordnet transmissionsnet (1999) for elektrisitet (ovenfor) og naturgas (nedenfor).





Figur 3.7. Fjernvarmeområder (ovenfor) og naturgasområder (nedenfor) 1999.



3.6 Nuværende naturgasproduktion, transmission og distribution

Aksel Hauge Petersen

Dette afsnit opsummerer naturgasoplysninger fra Energistatistikken, med vægt på de distributionsforhold som kan være af interesse for et brint/metanol scenarie.

3.7 Nuværende produktion af olieprodukter, distribution for brug i transportsektoren

Aksel Hauge Petersen og Kaj Jørgensen

Som ovenfor, med vægt på de distributionsforhold som kan være af interesse for et brint/metanol scenarie.

3.8 Vindkraftressourcer og produktion

Bent Sørensen, og Risø?

Vurderingen af danske vindkraftressourcer er baseret på Energistyrelsens seneste projekt for opgørelse af vindressourcer (Mortensen et al., 1999), fra hvilket data er indkøbt (Nielsen, 1999). Basismaterialet er et detaljeret ruhedskort over Danmark, som tager hensyn til topografi helt ned til læhegn. Udfra disse data kan modeller for potentiel produktion opstilles. Figur 3.8 viser (baseret på EMD, 1999) forventet effekt i vinden i 70 m højde (over terræn), baseret på en geostrofisk vind vurderet udfra data for en enkelt lokalitet (Beldringe Lufthavn), dog med regionale korrektioner, og lokalt beregnet med benyttelse af en række Weibull fordelinger, hvis parametre for hver af 12 sektorer er bestemt af ruhedskortet.

Vi har mulighed for at undersøge andre modeller, idet meteorologiske referencedata sammen med ruhedskortet tillader beregning med andre modeller end den baseret på 12 Weibull profiler. Selve produktionen fås ved at folde vindeffekterne med effektkurven for den påtænkte vindturbine. Typisk giver dette en produktion på ca. en tredjedel af effekten i vinden.

Kortet vist i Figur 3.8 omfatter kun landarealer. EMD materialet er af ringe kvalitet for havområder, men vi regner alligevel med at kunne vurdere produktionen i de udvalgte havmølleområder med rimelig sikkerhed, da de jo er simple topografisk set.



Figur 3.8. Middeleffekt i vinden 70 meter over terræn, over landområder.

3.9 Solenergipotentiale og produktion

Bent Sørensen

Solenergidata tages fra Sørensen, Kuemmel og Meibom (1999) og det danske referenceår. Effektiviteter af forskellige solfanger moduler til el og varmeproduktion fastsættes, evt. med benyttelse af samme kilde som for data.

3.10 Bioenergi potentiale og produktion

Bent Sørensen, Kaj Jørgensen

Potentiel biomasseproduktion kan igen tages fra Sørensen, Kuemmel og Meibom, såvel som typiske effektiviteter i omdannelse til biogas eller metanol. Biomasseproduktionen inkluderer fødevareafgrøder, og kilden har en indgående diskussion af den mængde af "residuer" (sometider kaldt "affald") der kan overføres til energianvendelser.

[Følgende afsnit er et notat forfattet i anden sammenhæng. Dele af det vil kunne indgå i teknologiafsnit, mens diskussionen af brints indpasning i fremtidens energisystem skal tillempes til de aktuelle scenarieantagelser].

3.11 Brint og metanol i transportsektoren

Kaj Jørgensen, DTU

[bemærk af afsnitsnummerering og sidetal ikke er konsistente i dette afsnit]

Indholdsfortegnelse for afsnit 3.11	27
3.11.1. Indledning	298
3.11.2. Notatets problemstilling	298
3.11.3. Teknologioversigt	29
3.11.3.1. Brintdrift – brændselscelle	29
3.11.3.2. Brintdrift – forbrændingsmotor	31
3.11.3.3. Brintlagring ombord i køretøjet	31
3.11.3.4. Metanol i brændselscelle – ekstern reformer	34
3.11.3.5. Direkte metanol brændselscelle	34
3.11.4. Sammenligning af udvalgte faktorer	35
3.11.4.1. Infrastruktur	35
3.11.4.2. Vægt og volumen af drivsystem	37
3.11.4.3. Driftsmæssige forhold	38
3.11.4.4. Energieffektivitet	39
3.11.5. Udviklingsforløb	41
3.11.5.1. Brint som drivmiddel	42
3.11.5.2. Metanol som drivmiddel	43
3.11.6. Delkonklusion	45
3.11.7. Referencer til afsnit 3.11	46

1 Indledning

Dette notat indgår i projektet "Brint som energibærer i fremtidens danske energisystem", der gennemføres af Roskilde Universitetscenter, Forskningscenter Risø og Danmarks Tekniske Universitet med støtte fra Miljø- og Energiministeriets brintprogram.

Notatet beskæftiger sig specielt med muligheder for at bruge brint til at fremme brugen af vedvarende energi i transportsektoren. Nærværende notat præsenterer og belyser problemstillingen mere overordnet – med specielt fokus på overgangsperioden. Senere gennemføres en mere detaljeret analyse i problemstillingen om brintdrift i transportsektoren.

2 Notatets problemstilling

I forbindelse med omstilling af transportsektoren til brintdrift er ét af de centrale problemstillinger hvorledes overgangen til brintdriften sker:

- Hvordan udbygges infrastrukturen (optankningsmuligheder, service) og brintafsætningen side om side? De er gensidigt hinandens forudsætninger.
- Hvordan opbygges markedet når teknologien ikke nødvendigvis er fuldt udviklet?

For begge spørgsmål er der en gensidig indbyrdes sammenhæng mellem opbygningen af brintafsætningen på den ene side og henholdsvis infrastruktur og teknologisk udviklingsstade på den anden: samtidig med at infrastruktur og udviklingsstade er forudsætning for opbygning af et marked, er opbygningen af markedet også en vigtig forudsætning for at infrastrukturen udbygges og for at teknologien udvikles.

Problemstillingen er specielt udtalt for personbiler, fordi der her er behov for den mest decentrale forsyningsstruktur. De fleste andre transportmidler er kendetegnet ved at have større andele af storkunder, hvilket giver bedre betingelser for at opbygge et nyt marked. Desuden er personbilmarkedet i særlig grad kendetegnet ved en teknologiudvikling under skarp konkurrence mellem de vigtigste firmaer, en konkurrence der kan gøre det særlig svært for nye teknologier at trænge ind på markedet. På denne baggrund tegner der sig forskellige strategiske valg i forbindelse med forsøget på at overvinde de forskellige barrierer.

Den direkte vej til brintdrift er at benytte brinten som drivmiddel i transportmidlerne, i hvis drivsystem de omsættes til mekanisk energi (og andre energiforbrug ombord). Dette er forbundet med ulemper, specielt i forbindelse med en forholdsvis hurtig omlægning til brintdrift: manglende infrastruktur i form af et udbygget net af optankningsmuligheder, utilstrækkeligt udviklet teknologi til lagring af brinten ombord i køretøjet (hvis der skal opnås lignende rækkevidde pr. optankning som for dagens biler).

En anden vej er derfor at satse på systemer hvor brinten tilføres køretøjet i form af et andet drivmiddel der først omdannes til brint ombord i køretøjet. Fra bilindustriens synsvinkel ville det ideelle være at benytte benzin eller diesel, idet man så kan bruge den eksisterende infrastruktur, men teknologien til at omdanne disse brændstoffer til brint ombord i køretøjet er mindre teknologisk udviklet og byder i det hele taget på mange problemer. I forbindelse med et brændselscellesystem baseret på benzin eller diesel er det ikke usandsynligt at der under alle omstændigheder vil blive stillet langt skrapere krav til drivmidlet end til dagens benzin/diesel. Derfor arbejdes der også muligheden for at bruge metanol (evt. etanol) som drivmiddel, der på den ene side er nemmere at omdanne til brint (ved steam

reforming) og på den anden side er nemmere med hensyn til udbygning af infrastruktur og ombordlagring end brint.

Der er dog også problemer ved tekniske løsninger baseret på metanol. Konverteringsteknologien vejer og (især) fylder for meget og har reguleringsmæssige problemer (ved opstart og lastfølge). Desuden er der energitab forbundet med processen, ligesom køretøjet ikke kommer så langt ned i skadelige emissioner som det er muligt med brint som drivmiddel. Denne strategi er endvidere (i praksis) begrænset til ressourcer baseret på biomasse, mens elektrolysebrint næppe vil komme ind i billedet, med mindre man konverterer brint til metanol og tilbage igen, hvilket giver store energitab. Dette begrænser de tilgængelige VE-ressourcer.

Det antages på baggrund af den aktuelle hurtige udvikling af teknologien at drivsystemer baseret på brændselsceller bliver altdominerende, og at der derfor kan ses bort fra forbrændingsmotoren. Hvorvidt der i den periode der ses på, af sig selv sker en fuldstændig erstatning af forbrændingsmotoren med brændselscellebaserede drivsystemer i konventionelle biler, er stadig et åbent spørgsmål. Selv de mest optimistiske forudsigelser vedrørende bilproducenternes produktion af brændselscellemotorer taler kun om nogle få hundrede tusinde pr. år inden for det nærmeste tiår, hvilket er i størrelsesordenen 5-10% af den samlede produktion af motorkøretøjer. I et udviklingsforløb der satser på en omlægning til brint vil det dog være sandsynligt at der sker en yderligere forcering af udviklingen af brændselsceller, således at det er rimeligt at antage at brinten og/eller metanolen på langt sigt bruges i sådanne systemer.

I en markedsopbygningsfase kan det dog overvejes at benytte brinten i drivsystemer baseret på forbrændingsmotorer - primært med henblik på at kunne udbygge et marked tidligere med lavere omkostninger. Med metanol som drivmiddel vil denne mulighed næppe være relevant, idet behovet for markedsopbygning i dette tilfælde er mindre udtalt.

3 Teknologioversigt

Dette afsnit indeholder en oversigt over de tekniske løsninger der er relevante i forbindelse med notatets problemstillinger. Det drejer i afsnit 3.1 til 3.3 sig om teknologier til brintdrift (dvs. hvor drivmidlet tilføres køretøjet i form af brint), i afsnit 3.4 og 3.5 om teknologier til metanoldrift. Da brintlagringsteknologien er et nøgleproblem i sammenhængen er denne behandlet i et specielt afsnit (3.3).

3.1 Brintdrift – brændselscelle

Grundelementerne i et brændselscelledrevet transportmiddel baseret på brint er:

- Brændselscellesystemet, dvs. selve brændselscellen samt hjælpeudstyr til dens drift.
- Det elektriske drivtog: elmotor, motorstyring samt transmission
- Brintlageret
- Et evt. ellager (fx. batteri)

Brændselscellesystemet, det elektriske drivtog samt eventuelt ellager betegnes tilsammen ”brændselscellemotor” i overensstemmelse med amerikanske faglitteratur (fuel cell engine)*.

* Jf. fx. Kalhammer mfl. (1998).

Brændselscelle mv. Der er udbredt konsensus om at faststof-polymerbrændselscellen - forkortet PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) – er den mest oplagte kandidat til transportanvendelser, men andre muligheder har også været inde i billedet. Frem til ca. 1990 blev alkali-brændselscellen (AFC) betragtet som den mest oplagte brændselscelle til køretøjer, og i det amerikanske energiministeriums brændselscelleprogram har man tidligere satset på fosforsyre-brændselsceller (PAFC) som kortsigtet mulighed til busser og andre tunge køretøjer. I sammenhæng med den meget kraftige tekniske udvikling af PEMFC-teknikken i de seneste 5-10 år er denne blevet altdominerende, også hvad angår prioritering med hensyn til forsknings- og udviklingsindsats*.

Udover selve cellen er der behov for forskelligt udstyr af hensyn til dens drift, specielt til regulering af luft- og vandstrømme og temperaturniveauer samt styring af det samlede brændselscellesystem. Dette udstyr bidrager til at forøge systemets samlede vægt og volumen og bidrager samtidig til dets energitab. Ikke mindst udvikling af turboladere til at sikre et passende højt driftstryk for cellen har været en teknologisk blokering†. Hvad angår selve brændselscellesystemet vurderes der dog ikke at være fundamentale tekniske hindringer for en anvendelse af dem i biler. Derimod er der meget stor usikkerhed vedrørende de økonomiske forhold, ikke mindst på baggrund af at forbrændingsmotorer til biler er særdeles billige.

Brintlager. Status og udviklingstendenser vedrørende teknologier til lagring af brinten ombord i transportmidlet er beskrevet i et selvstændigt afsnit (afsnit 3.3). Det er et centralt problem for vurderingen af de forskellige systemløsninger. Der er en lang række forskellige løsninger med hver sine fordele og ulemper. Flere af disse løsninger er udviklet til et niveau så de direkte kan anvendes, men der findes ikke i dag lagre der kan give samme rækkevidde som konventionelle køretøjer. Den løsning der er tættest på, flydende brint, har til gengæld problematiske energiforhold.

Elmotor mv. Hvad angår elmotor, motorstyring og transmission ligner brændselscellebiler el- og hybridbiler. Der kan være én eller flere motorer i bilen. Motoren kan monteres på samme måde som i et konventionelt køretøj, men ofte placeres den som en integreret bestanddel af den drivende aksel eller tilmed i hjulnavene. Transmissionen (der overfører motorens mekaniske energi til de drivende hjul) kan forenkles sammenlignet med konventionelle biler, eller evt. helt elimineres (i forbindelse med navmotorer). Traditionelt har motorene typisk været konventionelle DC-motorer, men i stigende omfang vinder andre motortyper frem ikke mindst på baggrund af en hastig udvikling af styrings- og effektelektronikken. I første omgang drejer det sig især om asynkrone AC-motorer, men på længere sigt er permanentmagnet-synkronmotoren (PM-motoren) samt evt. SR-motoren (switched reluktans) muligheder.

Ellager. Det fleste brændselscellekøretøjer har – ligesom i øvrigt de fleste øvrige køretøjer – et 12 V batteri til lagring af el til hjælpeudstyr ombord, men derudover indgår der også et ellager i en del brændselscellebaserede drivsystemer. Det kan give forskellige fordele: ellageret kan klare spidsbelastningen (så man kan reducere investeringerne) og kan desuden sikre en hurtig respons ved hurtige belastningsvariationer samt en hurtigere opstart. Endvidere får man mulighed for at genvinde bremseenergi. Til gengæld vil et ellager alt andet lige gøre drivsystemet mere kompliceret og dyrere, om end sidstnævnte aspekt helt eller delvis kan opvejes af besparelser på brændselscellen.

Ellageret vil typisk være et batteri, men der kan også være tale om svinghjul eller superkapacitorer. På grund af de driftsforhold det udsættes for vil det ofte være nødvendigt at vælge typer der kan tåle

* U.S. Department of Energy (1997)

† Kalhammer mfl. (1998).

høje effektbelastninger.

3.2 Brintdrift – forbrændingsmotor

Brint kan anvendes direkte i konventionelle forbrændingsmotorer, og der findes en række udviklingsprogrammer der går tilbage til begyndelsen af 1970'erne. I de seneste år er der dog sket en voldsom opbremsning af aktiviteterne i takt med at udvikling af brændselsceller i høj grad synes at have trukket interessen og midlerne væk fra forbrændingsmotordriften. Almindeligvis benyttes gnisttændingsmotorer (dvs. motorer af samme type som benzinmotorer), men der er også andre muligheder, fx Wankel-motorer. Kompressionsmotorer (dieselmotorer) kan ikke anvendes til ren brintdrift, da brintens selvantændelsestemperatur er høj. Derfor fremmes antændelsen, fx ved at tilætte diesel. Hovedparten af F&U-indsatsen på området har beskæftiget sig med gnisttændingsmotorer – som ren brintdrift, som tobrændstofmotor med mulighed for at skifte mellem brint og et andet brændstof (enten/eller) eller som blandingsdrift med brint og andet brændstof (normalt benzin eller naturgas)*.

Brintmotorer har ofte problemer med NO_x-emissionerne, motorydelse samt motorens driftforhold. NO_x-emissionerne var i nogle af de tidligste projekter på samme niveau som benzinbiler uden katalysatorer, men i senere projekter er det lykkedes at bringe dem meget langt ned, men samtidig er emissionskravene til nye biler (herunder vedrørende NO_x) også blevet skærpet voldsomt, ligesom yderligere skærper er planlagt. NO_x-emissionerne kan nedbringes ved leanburndrift (hvilket til gengæld kan give problemer med motorydelsen) eller med en trevejskatalysator (ved stœkiometrisk drift). Driftproblemerne vedrører især bankning og forskellige former for ukontrolleret antænding af brændstoffet. Der er gennem årene ofret betydelige F&U-midler på disse problemer, og en række forskellige koncepter for fødesystemet er blevet afprøvet. Interessen har især samlet sig om indirekte sekventiel indsprøjtning (dvs. systemer hvor brændstof og luft blandes i indsugningsmanifolden og hvor indsprøjtningen sker i bestemte tidsintervaller i forhold til motorens omdrejninger)[†] samt direkte indsprøjtning af brændstoffet i cylinderen (svarende til de GDI-motorer der for øjeblikket vinder frem til benzinbiler). Der er dog ikke koncepter der er fuldt tilfredsstillende, og der stilles generelt store krav til udstyret (specielt motorstyring og indsprøjtningsteknikken).

Selvom det principielt er relativt enkelt at ombygge en benzinmotor til brintdrift, er det i praksis ikke nogen helt nem opgave hvis man ikke skal renoncere på de forskellige krav der stilles (NO_x, motordrift, motorydelse, energieffektivitet). For at kunne udnytte brintdriftens fordele fuldt ud er det også nødvendigt at motoren specialbygges til brint. Omvendt betyder dette at motoren kun kan fungere til dedikeret brintdrift, dvs. at man ikke kan bruge benzin som reservemulighed.

Til brintmotorer bruges de samme brintlagringsmuligheder som for brintdrevne brændselscellekøretøjer (se afsnit 3.3). Dog vil disse drivsystemers dårligere effektivitet betyde at der er behov for større lagre for at sikre en given rækkevidde, hvilket gør problemet med at finde et passende lager mere påtrængende.

3.3 Brintlagring ombord i køretøjet

Der er en lang række brintlagringsmuligheder med forskellige fordele og ulemper[‡]. Et generelt problem

* Jørgensen (1996)

† Das (1990), Das (1991)

‡ Peschka (1992), Arthur D. Little, Inc. (1995), Jørgensen (1996), Jørgensen og Nielsen (1998), Kalhammer mfl. (1998)

er at energitætheden pr. vægt og volumen er lave, således at rækkevidden pr. optankning er relativt kort med realistiske dimensioneringskriterier – om end rækkevidden typisk er større end for elbiler. Blandt dagens teknologier giver lagring som flydende brint den største rækkevidde med energitætheder på 18-22 MJ/kg og 7-9 MJ/liter. Til gengæld er energieffektiviteten af denne løsning lav, fordi der går megen energi til at bringe brinten på flydende form, ligesom der er relativt store tab ved håndteringen af den flydende brint samt fra lageret ombord i køretøjet.

De andre lagringsmåder giver generelt væsentlig bedre energieffektivitet, men også lavere energitæthed og dermed kortere rækkevidde. Den mest lovende mulighed aktuelt er lagring som gas i tryktanke ved tryk på 200-350 bar, som har høstet fordel af det udviklingsarbejde der er udført i forbindelse med naturgasdrevne biler. Med aluminiums/glasfibertanke er energitætheden pr. vægtenhed fordoblet sammenlignet med ståltanke (fra ca. 1,5-2,0 MJ/kg til ca. 3-3,5 MJ/kg). Derimod er energitætheden pr. volumen stadig problematisk lav (1,5-2,0 MJ/kg), og der er ikke tegn på at dette vil blive bedre.

Udover disse lagertyper, hvor brinten opbevares i fri form i tanke, findes der også lagertyper der bygger på at brinten indgår i kemiske eller fysiske forbindelser. Disse lagre er generelt kendetegnet ved at brinttætheden pr. volumen principielt kan blive meget høj. Den vigtigste af disse lagringstyper er lagring i metalhydrider, hvor brinten lagres i brintforbindelser i metaller eller metallegeringer. Der har tidligere været store forventninger til denne lagringsform, men dens udvikling har været problematisk, ikke mindst vedrørende energitæthed og omkostninger. Dagens hydrider til mobile lagre kan typisk lagre 1-2 vægt-% brint (i forhold til hydridets samlede vægt), hvilket giver en energitæthed på mindre end 2 MJ/kg (inkl. vægten af tryktank, varmeveksler mv., der typisk forøger vægten med 10-25%). Derimod er hydridlagrenes volumetriske energitæthed typisk 2-3 gange så høj som gaslagrenes. Der kræves varmetilførsel til hydriderne for at frigive brint, men denne kan typisk tages fra drivsystemets overskudsvarme, forudsat at temperaturkravene kan honoreres. De hydrider der bruges i dag, stiller typisk ikke større temperaturkrav. I øvrigt frigives varmen ved optankning og kan (principielt) bruges til eksempelvis opvarmningsformål.

Brinten kan også lagres i form af flydende, brintrige forbindelser, fx metanol, ammoniak eller såkaldte "flydende hydrider"*. Generelt er denne lagringsmåde opgivet til mobile anvendelser† på grund af lav energieffektivitet, komplekst og voluminøst konverteringsudstyr mv.

En anden – formentlig mere perspektivrig – metode er lagring i kulstof-strukturer af forskellig art. Det drejer sig om en række forskellige metoder, der har det til fælles at brinten forbinder sig reversibelt med kulstoffet. Der har været arbejdet med denne metode i mange år, tidligere især med fokus på adsorption under tryk (og ofte ved lave temperaturer, hvilket gav ekstra potentialer men også flere problemer)‡. I de seneste år er det især nanoteknologiske muligheder interessen har samlet sig om. Fælles for metoderne er at de synes at give særdeles høj volumetrisk energitæthed (bedre end de øvrige kendte metoder), hvorimod der er stor spændvidde på løfterne vedrørende energitæthed pr. masse. Blandt de vigtigste metoder er§:

- Nanotubes, der er en rørstruktur i nanostørrelse, som bl.a. gennem en årrække er blevet analyseret

* Dvs. kulbrinter der reversibelt kan transformeres til andre kulbrinter med samme antal kulstofatomer men færre brintatomer, hvorved der frigives brint. Jf. Arthur D. Little, Inc. (1995).

† Bortset naturligvis fra den situation hvor man har metanol i udgangspunktet, jf. nedenfor.

‡ Arthur D. Little, Inc. (1995), Hynek mfl. (1997)

§ NREL (1995), Skolnik & DiPietro (1998)

i et projekt gennemført af NREL (National Renewable Energy Laboratory) i USA*. Drives ved atmosfæreforhold vedrørende temperatur og tryk. Forventet brinttæthed: 5-10 vægt-%, hvilket er relativt højt men langt fra opsigtsvækkende.

- Nanofibre, der har form af grafitplader i nanostørrelse†. Formentlig ved stuetemperatur og tryk på ca. 100 bar. Bliver ikke mindst analyseret af Northeastern University, Boston (Nelly M. Rodriguez) med forskningsresultater der har vakt stor opsigt (og er stærkt kontroversielle). Uformelt hævdes der at være opnået brinttætheder på helt op til 75 vægt-%, men det har været svært at kontrollere resultaterne fordi de er omgivet af megen hemmelighed på grund af kommercielle interesser. DaimlerChrysler har arbejdet sammen med Rodriguez, men samarbejdet blev afbrudt sommeren 1998, idet DaimlerChrysler dog sagde at man ikke havde opgivet teknologien‡. Under alle omstændigheder er der – også ifølge Rodriguez – mange hurdle der skal overvindes, før en eventuel praktisk anvendelse kan komme på tale.

Generelt for dagens lagringsteknologier er der et dilemma mellem energieffektivitet og rækkevidde, i hvert fald hvis der ønskes tilsvarende rækkevidder som for konventionelle køretøjer. Der tegner sig forskellige interessante, men usikre, udviklingsperspektiver.

For det første fortsat udvikling af letvægtstanke til lagring af brint under tryk (bl.a. tanke helt af kompositmaterialer) – hvilket formentlig vil give en acceptabel energitæthed pr. vægt (5-7 MJ/kg), men ikke nødvendigvis forbedring af volumenforholdene. Den volumetriske energitæthed kan forbedres ved at forøge lagringstrykket, forudsat at dette ikke opsluges af krav om øget godstykkelse mv. Gastankes lagringspotentiale/vægtenhed kan beskrives ved den såkaldte "Performance Factor" (PF): (maksimalt tryk x nyttevolumen)/tankvægt§. For avancerede tanke kan PF være op til 7-9 gange så stor for avancerede lagre som for ståltanke og 4-6 gange så stor som for dagens aluminiumstanke**. Dog kan PF ikke uden videre omsættes til øget energitæthed, da brintens massefylde (og dermed energiindhold pr. volumen) ikke vokser proportionalt med trykstigningen (fordi brint ikke opfører sig som en ideal gas). Energitætheden kan også øges ved at reducere lagertemperaturen: fx vil massefylden ca. fordobles ved nedkøling til -120°C, men til gengæld kræves isolering af tank samt forskelligt ekstraudstyr i forbindelse med nedkølingen††.

Der kan ske et gennembrud for metalhydridlagre med større energitæthed. Der arbejdes med hydrider der kan lagre op til 7-8 vægt-% brint, svarende til energitætheder på op til 7-9 MJ/kg‡‡. Der er dog en række problemer med disse hydrider, herunder at de generelt kræver varmetilførsel ved højere temperaturer (hvilket kan være specielt svært at levere i et brændselscellekøretøj). Den tekniske udvikling der er sket de seneste par årtier har bragt en del fremskridt vedrørende omkostninger og driftsmæssige forhold, mens der stort set ikke er sket fremskridt af energitætheden. Udviklingen af metalhydriderne kan dog nyde godt af at de indgår i en meget udbredt batteritype (nikkel-metalhydridbatteriet).

Ikke mindst kan der ske et gennembrud for brug af nanotubes/nanofibre til lagring. Hvis blot en brøkdel

* Skolnik (1997a)

† Skolnik (1997b), Rodriguez (1998)

‡ Hydrogen & Fuel Cell Letter, December 1998.

§ Dvs. effektivt nyttevolumen pr. tankvægt.

** Arthur D. Little, Inc. (1995)

†† Arthur D. Little, Inc. (1995)

‡‡ Arthur D. Little, Inc. (1995), Kong mfl. (1998)

af løfterne i specielt de forsøg der laves med nanofibre indfries, bliver der tale om teknologisk gennembrud der giver brintdrift helt nye muligheder. Resultaterne er dog meget omdiskuteret, ligesom mulighederne for at omsætte resultaterne til praktisk anvendelse må betegnes som særdeles usikre.

3.4 Metanol i brændselscelle – ekstern reformer

Hvad angår selve brændselscellen og elmotor adskiller denne løsning sig principielt ikke fra løsningen med brintbaseret brændselscelledrift. Dog vil metanolløsningen normalt kræve at der findes et ellager i drivsystemet, idet systemet ellers ikke kan leve op til de driftsmæssige krav der stilles til det (vedrørende tid til opstart og mulighed for at følge hurtige belastningsvariationer) – i hvert fald ikke på dagens teknologiske stade.

Den mest oplagte teknologi til omformning af metanolen ombord i køretøjet er steam reforming, hvor metanol og vanddamp omdannes til brint, CO og CO₂. Processen kræver tilførsel af højtemperaturvarme, der typisk ikke findes som overskudsvarme i brændselscellebaserede drivsystemer. Den fås i stedet ved forbrænding af metanol, hvilket dels forringer systemeffektiviteten, dels gør systemet langsommere ved opstart. Da den brint der tilføres en PEMFC, skal have et meget lavt indhold af CO (under 10 ppm), er det nødvendigt at rense den brint der kommer ud af reforming-enheden – som regel gennem en kombination af flere processer.

Steam reforming teknikken har en række problemer der skal løses, før den kan tages i anvendelse til mobile formål*. Det drejer sig bl.a. om anlæggets vægt og (især) volumen, der skal reduceres betydeligt, da der jo er tale om udstyr i tilgift til selve brændselscellemotoren. Også anlæggets kompleksitet er et problem oveni brændselscellens i sig selv komplicerede opbygning. Sidst, men ikke mindst, skal de driftsmæssige forhold forbedres både i forbindelse med opstart af anlægget, der kan tage flere minutter, og anlæggets respons under driften.

Der er også en række projekter baseret på omdannelse ved partiel oxidation (POX-anlæg)†. Denne teknik kræver ikke varmetilførsel, hvorfor den principielt kan gøres mere effektiv og hurtigere (specielt ved opstart) end steam reforming. Dertil kommer at den kan bruge et bredere spektrum af brændstoffer; herunder benzin, diesel, metan og etanol. Dens tekniske udvikling er dog også mere problemfyldt, og det er endnu usikkert om de lykkes at realisere dens muligheder. I visse systemer kombineres steam reforming og POX-anlæg, således at sidstnævnte leverer varme til førstnævnte (kaldes "autotermisk reforming")‡.

Lagringen af metanolen ombord i køretøjet er stort set uproblematisk. Dog er metanol giftig og stærkt korroderende.

3.5 Direkte metanol brændselscelle

Den såkaldte "direkte metanol brændselscelle" (DMFC) er en speciel variant af PEMFC der er kendetegnet ved at metanolen kan tilføres direkte til brændselscellen uden at gå via en ekstern reformer§. I visse tilfælde arbejdes der med driftstemperaturer, men som regel benyttes der nogenlunde samme temperaturniveauer som i en almindelig PEMFC.

* Ren mfl. (1995), Kalhammer mfl. (1998), Ogden mfl. (1998)

† Mitchell mfl. (1996), Kalhammer mfl. (1998), Ogden mfl. (1998)

‡ Espino & Robbins (1997), Kalhammer mfl. (1998)

§ Ren mfl. (1995), Kalhammer mfl. (1998)

Denne teknologi åbner således i princippet for en væsentlig enklere systemopbygning. Til gengæld er denne teknologi endnu på forskningsstadiet, og det er endnu usikkert om det lykkes at overvinde de problemer der er med teknologien – i givet vurderes den tidligst at blive klar til praktisk anvendelse om 10-15 år. Blandt de primære problemer med teknologien er effekttæthed (kW/kg), energieffektivitet og omkostninger.

4 Sammenligning af udvalgte faktorer

I dette kapitel omtales udvalgte faktorer af særlig stor betydning for sammenligningen mellem brint- og metanolløsningen. Der er ikke tale om en total sammenligning, men derimod en belysning af faktorer af særlig betydning for notatets problemstillinger. Der ses ikke på omkostninger i notatet. I sine studier af infrastruktur til brintdreven transport er Joan Ogden, Princeton University nået frem til at omkostningerne ved henholdsvis brint- og metanolløsning er af samme størrelsesorden, idet de omkostninger der spares til brintinfrastruktur i metanolløsningen, opsluges af ekstraudstyr ombord i køretøjet*.

4.1 Infrastruktur

Opbygningen af en infrastruktur for et nyt drivmiddel omfatter forskellige elementer: et tilstrækkeligt fintmasket net af offentlige og private optankningssteder (tankstationer mv.), opbygning af en produktionsstruktur samt distributionen af drivmidlet mellem produktionssteder og optankningssteder. I praksis kan det være svært at holde de to sidstnævnte faktorer ude fra hinanden, og de behandles derfor sammen.

Optankningssteder. Behovet for optankningsmuligheder afhænger af forskellige faktorer, herunder køretøjets tekniske specifikation (specielt hvad angår rækkevidde pr. optankning), anvendelsesmønster samt den organisatoriske sammenhæng køretøjet indgår i (privatejet, flådekøretøj).

Størst krav til infrastrukturen stilles der for privatejede køretøjer, idet der ideelt set kræves samme netværk af tankstationer som i dag – idet det dog skal bemærkes at der sker en betydelig omstrukturering i retningen af at salget samles på færre tankstationer. Så godt som al motorbenzin sælges i dag via tankstationer, mens det for dieselolie er ca. 1/3†. I dag er der ca. 2500 tankstationer i Danmark‡, svarende til en reduktion på mere end 70% sammenlignet med begyndelsen af 1970'erne. Det er en udbredt forventning i branchen at antallet fortsat reduceres, måske til helt ned omkring 1000 stationer. I gennemsnit sælges der årligt ca. 1000 m³ motorbenzin (33 TJ) pr. tankstation, hvortil kommer salg af dieselolie (gennemsnitligt 300-400 m³/år eller 11-14 TJ) og andre produkter. Benzinstationer med butik (der er kendetegnet ved at benzintankning sker ved selvbetjening, men samtidig at der er personale tilstede) tegner sig for ca. 2/3 af stationerne og ca. 85% af benzinsalget svarende til et middelsalg på 1300 m³ benzin/år (43 TJ) pr. tank. Automatstationer (uden personale) tegner sig for hovedparten af resten af salget. Når salg af dieselolie medregnes, kan en typisk tankstations brændstofsalg sættes til 40-50 TJ/år. Da det altovervejende er personbiler der betjenes, svarer dette til i størrelsesordenen 100 optankninger pr. dag - tilstrækkeligt til at betjene ca. 800-1000

* Ogden (1997), Ogden mfl. (1998)

† Jørgensen (1996)

‡ Oliebranchens Fællesrepræsentation (1998).

personbiler på årsbasis*.

Tages højde for den igangværende centraliseringstendens for tankstationerne samt den omstændighed at man sandsynligvis vil lave relativt store brinttankstationer, kan den typiske brinttank sættes til et årligt salg på 50-100 TJ (svarende til ca. 5-10 mio. Nm³ brint pr. år). Det er tilstrækkeligt til at betjene 2-4000 personbiler på årsbasis, såfremt forventningerne om at brintdrevne brændselscellebiler dels får et mindre lager (efter energiindhold), dels bliver væsentlig mere effektive pr. kørt km holder stik†.

En detaljeret teknisk-økonomisk analyse af forskellige brintforsyningsmuligheder gennemført af Center for Energy and Environmental Studies (CEES) ved Princeton University (Joan Ogden mfl.) tyder på at enhedsomkostningerne stiger markant for tankstationer under 20-30 TJ/år, mens der over denne grænse er mere begrænset forskel‡. Dermed er de tankstationer der vil være aktuelle i Danmark, klart over knæpunktet i CEES' analyse.

Infrastruktur-udbygningen for brint kan blive kompliceret ekstra såfremt der bliver tale om flere forskellige koncepter for lagringen ombord i køretøjet, idet disse adskiller sig en del i teknisk henseende. Dette gælder i særdeleshed for lagring på flydende form. På grund af dens dårlige energieffektivitet vil der næppe blive satset på denne lagringsform på længere sigt, men den kan tænkes at få en rolle på kortere sigt, fordi den muliggør relativt lange rækkevidder allerede med dagens teknologi.

Opbygningen af et marked for brint kan lettes ved at starte med storkunderne, i første række sige dieselkunderne, hvor ca. 2/3 sælges direkte til private§. Heraf sælges ca. 1/3 til busselskaber og andre vognmænd, knapt 1/6 til togdrift og de resterende 1/2 til landbrug, gartneri og fremstillingsvirksomheder**.

For metanol er der heller ikke en infrastruktur af tankstationer, men opbygningen heraf er teknisk set lettere.

Produktionssteder og distributionssystem. I forbindelse med en brintløsning kan brinten enten produceres decentralt i forbindelse med de enkelte tankstationer eller på mere centrale lokaliteter, hvorfra den distribueres til optankningsstederne. Ved decentral produktion undgår man omkostningerne ved at etablere et distributionssystem for brint og man eliminerer også distributionstabene (bortset fra tabene ved distribution af de energiresourcer der skal bruges). Til gengæld bliver brintproduktionsanlæggene mindre og dermed (som regel) med højere enhedsomkostninger og større energitab. For de centrale produktionsenheder forholder det omvendt, og dertil kommer at man med en central produktionsstruktur kan udnytte brint fra forskellige industrielle processer.

De vigtigste produktionsmuligheder for brint er elektrolyse og steam reforming af metan, der begge er mulige for både den centrale og den decentrale løsning, samt forgasning af biomasse, der kun er relevant i forbindelse med centraliseret brintproduktion. For både steam reforming og elektrolyseanlæg gælder at der ses interessante eksempler på små-skalaanlæg††. På længere sigt kan andre produktionsmåder (fx. fotobiologisk eller fotoelektrokemiske) blive relevante muligheder.

* Baseret på en gennemsnitstank på 55 liter og gennemsnitligt tankning når tanken er 1/3 fyldt.

† Det vil betyde at der kan betjenes relativt flere biler set i forhold til den solgte energimængde.

‡ Ogden (1997), Ogden mfl. (1998). Analysen omfatter tankstationer i intervallet 10-200 TJ/år (svarende til ca. 1-20 mio. Nm³ brint).

§ Jørgensen (1996)

** Hvor den i vid udstrækning benyttes til formål der ikke statistisk opgøres som transportenergi.

†† Ogden mfl. (1998)

Hvis brintproduktionen ikke sker i forbindelse med optankningsstederne, kan brinten enten distribueres via tanktransport (med lastbil, skib eller lignende) eller via et ledningsnet (evt. opblandet i naturgas). Betingelsen for at få en bare nogenlunde økonomisk sammenhæng i førstnævnte mulighed er at brinten kan transporteres med høj energitæthed pr. vægt og volumen, da der ellers vil blive tale om små energimængder pr. transport. I dag er det kun flydende brint der kan leve op til kravet, men dette er en problematisk løsning på grund af de store energitab ved at bringe brinten på flydende form. I en tidlig opbygningsfase med få brinttankstationer kan det dog være en attraktiv mulighed fordi den kræver færre overordnede investeringer end et ledningsnet til brint, samtidig med at den er mindre investeringskrævende på tankstationerne end løsninger baseret på decentral brintproduktion.

Metanolfremstillingen i forbindelse med metanolløsningen vil sandsynligvis på længere sigt bygge på centralt produceret metanol, da der i forvejen findes et distributionssystem for handelsmetanol. Metanolproduktion på basis af biomasse kræver også – med dagens teknologi – store anlæg, hvorfor en eventuel overgangsfase med mere decentral produktion formentlig vil bygge på steam reforming af naturgas.

4.2 Vægt og volumen af drivsystem

Drivsystemets volumen har betydning for mulighederne for at indpasse det i et givet køretøj, mens dets vægt påvirker køretøjets samlede energieffektivitet. Der er tre hovedelementer af særlig stor betydning vægt og volumen af drivsystemet: selve brændselscellen, steam reforming anlæg og lagring. Da brændselscellen (stort set) er den samme for brint og metanolløsningen, bliver afvejningen mellem de to løsninger primært et spørgsmål om at sammenligne reforming-anlæg (i metanolløsningen) og lagring (primært brintløsningen).

Brændselscelle. Brændselscellens effekttæthed pr. volumen og vægt (kW pr. liter og pr. kg) er inden for de seneste 5-10 år blevet forøget med ca. en faktor 10 (til mobile formål), og selvom dens hjælpeudstyr ikke helt har haft den samme forbedring, er vægt og volumen for det samlede brændselscellesystem dog reduceret 3-4 gange. For brændselscellesystemet, inkl. hjælpeudstyr, kan effekttætheden sættes til 0,25 kW/kg (i forhold til den leverede effekt fra brændselscellen), mens den for brændselscellemotoren (dvs. inkl. elmotor) kan sættes til 0,20 kW/kg (i forhold til effekten der leveres fra elmotoren)*. En brændselscellemotor til en gennemsnits-personbil vil på den baggrund typisk veje 200-250 kg.

Lagring i køretøj. Lagringen af drivmidlet ombord i køretøjet er relativt uproblematisk for metanolløsningen, selvom metanolen har en mindre energitæthed end benzin. For brintløsningen er lagringen dermed et af de centrale problemer, specielt hvis der stilles krav om tilsvarende rækkevidde på en optankning som for konventionelle biler. Der findes i dag forskellige muligheder, hvoraf ingen dog er fuldt tilfredsstillende. Med dagens lagringsteknologi er det kun lagring i form af flydende brint der giver mulighed for rækkevidder i samme størrelsesorden som for konventionelle biler, men dette koncept giver dårlig energieffektivitet. De øvrige lagringsmåder giver typisk mulighed for rækkevidder på op til 200-250 km. Nanotubes/nanofibre kan blive en løsning på dette dilemma, men først på længere sigt, og dets muligheder er under alle omstændigheder meget usikre.

Reforming. I de størrelser der typisk anvendes i personbiler, er reforming anlægs effekttæthed mere følsom over for størrelsen end tilfældet er for brændselsceller. Der kan regnes med følgende

* Ogden mfl. (1998)

effekttætheder*:

- til personbiler (30-75 kW): 0,45-0,65 kW/kg
- til varebiler og minibusser (75-100 kW): 0,65-0,70 kW/kg
- til busser og lastbiler (150-300 kW): 0,75-0,85 kW/kg

Baseret på disse værdier vil reforming-anlæggene typiske veje ca. halvt så meget som brændselscellen. Et større problem er at der for dagens mobile reforming-anlæg er vanskeligheder med at reducere volumenbehovet til et acceptabelt niveau.

4.3 Driftsmæssige forhold

Der er tre altdominerende driftsmæssige problemer i forbindelse med brændselscellebaserede drivsystemer: opstartstid, respons under kørsel (lastfølgeegenskaber) samt sårbarhed over for brændstoffets renhed. Alle tre problemer optræder især for metanolløsningen, idet de knytter sig til driften af det reforming-anlæg der omformer metanolen.

Opstartstiden for et mobilt reforming-anlæg er den tid der går fra anlægget startes til det er i fuld drift. Der ofres mange forsknings- og udviklingsressourcer på at nedbringe denne, men endnu i dag er den typisk i størrelsesordenen adskillige minutter. I dette tidsrum kan køretøjet drives fra batteriet, man da en stor del af bilturene er korte, får batteridriften herved en stor andel af den samlede kørsel.

Respons-egenskaberne vedrører bilens evne til at kunne følge lastændringer under drift, og de er således vigtige af hensyn til at brændselscellebilen skal opleves som en almindelig bil. Det er først og fremmest den enhed der omformer metanolen (steam reforming enheden), som giver problemer. I forbindelse med udviklingen af den brændselscelle-drevne forsøgsbil, Necar†, har DaimlerChrysler bragt responstiden så langt ned at 90% af maksimal effekt kan nås i løbet af ca. 2 sekunder‡, hvilket dog stadig er for meget i praktisk drift. I et køretøj med så lang respons-tid vil det være nødvendigt med et ellager til at klare hurtige belastningsændringer, og det vil i praksis få en betydelig rolle i køretøjets daglige drift.

Problemet med sårbarhed overfor forurening af den brint der tilføres brændselscellen hænger sammen med at den foretrukne brændselscelletype - PEMFC - er meget sårbar over for specielt brintens indhold af CO. Den brint der produceres af reformeren har et CO-indhold som normalt overskrider det acceptable niveau med adskillige størrelsesordner. Derfor skal det reduceres, hvilket som regel sker i flere procestrin. Det er ikke et uoverstigeligt problem at reducere CO-indholdet til det nødvendige niveau, men teknikken hertil bidrager til at komplicere det i forvejen komplicerede brændselscellesystem, ligesom vægt og volumen forøges.

4.4 Energieffektivitet

Med de forskellige løsnings energieffektivitet menes her drivmidlets energikædeeffektivitet fra primærkilde til endeligt forbrug. Det betyder fx at hvis bestemte løsninger i køretøjet "påtvinger" den stationære del af energikæden særlig store tab, indgår dette. Egentlige livscyklusanalyser af

* Ogden mfl. (1998)

† Til Necar 3, en metanoldrevet brændselscellebil der blev lanceret i september 1997. Necar er baseret på Mercedes' A-klasse model.

‡ Hoffmann (1997)

teknologierne indgår ikke.

De vigtigste bidrag til tab i køretøjets drivsystem er: brændselscellemotoren, evt. brintlager og evt. reformer. I den stationære del af energikæden drejer det sig først og fremmest om tab ved fremstilling af drivmidlet (brint, metanol), inkl. tab ved at bringe drivmidlet på den rette form (fx komprimering af gasformig brint eller tab ved at bringe brint på flydende form) samt håndteringstab (især for brint).

Brændselscellemotoren. Energieffektiviteten af selve brændselscellemotoren adskiller sig principielt ikke for henholdsvis brint og metanol som drivmiddel, med mindre sidstnævnte bruges direkte i direkte metanol-brændselsceller (DMFC). For de øvrige løsninger er brændselscellemotoren typisk 2-3 gange så effektiv som forbrændingsmotorer - specielt hvis der sammenlignes med benzinmotorer og specielt hvis der er tale om kørselsmønstre med mange stop og megen tomgang. Men effektiviteten for brændselscellesystemet varierer meget. Ikke mindst belastningsforholdene spiller en vigtig rolle, idet effektiviteten - modsat for forbrændingsmotoren - aftager med voksende belastning af cellen. Dette kan komme i konflikt med at andre faktorer - ønsket om lavest mulig vægt, volumen og omkostninger - tilsiger at trække så stor effekt ud af en given brændselscelle som muligt. Det må formodes at denne konflikt især er påtrængende i de nærmeste år, mens den teknologiske udvikling i takt med at brændselscellen bliver mere udbredt vil gøre det nemmere at overvinde konflikten på længere sigt. Samlet for brændselscellemotoren kan effektivitet af energiomsætningen sættes til 38% på kort sigt og til 50-55% på længere sigt*. I denne effektivitet er medregnet tab i selve brændselscellen, i dens hjælpeudstyr samt i elmotorerne.

Metanol-omdannelse i køretøj. Den mest oplagte - og mest teknologisk udviklede - løsning til at omforme metanol ombord i køretøjet er steam reforming. Dennes effektivitet forringes dog som følge af at der er tale om en endoterm proces. Partiel oxidation (POX), der har potentiale til at blive mere energieffektiv, er til gengæld mindre udviklet. For steam reforming kan energieffektiviteten sættes til 62%†. Såfremt det lykkes at løse POX-teknikkens problemer, kan denne forventes at få en energieffektivitet på ca. 70%.

Lagring ombord. Lagringstab af betydning ombord i køretøjet optræder især for flydende brint. For flydende brint optræder der dels et boil-off tab i forbindelse med varmetransmission gennem tankens vægge, dels håndteringstab i forbindelse med optankningen‡. Førstnævnte hænger sammen med at det er nødvendigt at lukke brint ud når trykstigningen i forbindelse med varmeindtrængningen bliver kritisk i forhold til tankens specifikationer. Når køretøjet bruges, opnås dette ved motorens brintforbrug, og derfor er der kun efter en vis tids - med dagens tankteknologi 5-7 dage - stilstand at det er nødvendigt at bortventilere brinten. Et større problem er tabene i forbindelse med optankning, og der er investeret mange udviklingsressourcer i at reducere problemet. For de øvrige af de kendte lagringsmåder og for metanollagring ombord er der ikke tab af betydning.

Fremstillings- og håndteringstab. Der kan regnes med følgende energieffektiviteter for de relevante metoder til fremstilling af brændstof§:

- elektrolyse har i mange år typisk haft effektiviteter i intervallet 55-70%, men dagens bedste systemer

* Arthur D. Little, Inc. (1995), U.S. Department of Energy (1997). Den kortsigtede værdi bygger på resultaterne fra det amerikanske energiministeriums brændselscelleprogram.

† Kalhammer mfl. (1998), Ogden mfl. (1998).

‡ Peschka (1992), Cannon (1995)

§ Ogden & DeLuchi (1993), Cannon (1995), Espino & Robbins (1997), Borgwardt (1998), Mann mfl. (1998), Wagner mfl. (1998)

ligger typisk omkring 80-85%. I fremtidige anlæg kan effektiviteten formentlig bringes op omkring 90%. Der er en interessant udvikling af små elektrolyseanlæg med rimelig effektivitet

- brint ved steam reforming af metan (i ikke-mobile anlæg): 70-80%
- brint ved forgasning af biomasse : 70-75%
- metanolfremstilling fra naturgas og biomasse: 65-70%

Udover konverteringstab ved fremstillingen kan der være energitab i forbindelse med at drivmidlet bringes på en passende form til den konkrete anvendelse. Det kan være:

- flydendegørelse af brint: mindst 10-11 kWh el/kg brint, eller 30-35% af brintens nedre brændværdi*
- komprimering af gasformig brint: elbehov svarende til 7-15% af brinten nedre brændværdi, afhængigt af trykniveau, størrelse af lager mv.†

Desuden kan der være håndteringstab i forbindelse med distributionen (gælder først og fremmest for flydende brint, hvor det kan være betydeligt) eller energiforbrug til transport (for tankbaseret distribution).

Tabellen en oversigt over de forskellige løsningers samlede effektivitet, fordelt på henholdsvis den stationære effektivitet (energisystem-effektivitet) og mobil effektivitet (energieffektivitet ombord i køretøjet). Tabellen omfatter brint fremstillet ved henholdsvis elektrolyse og steam reformning af naturgas samt metanol fremstillet ud fra biomasse eller naturgas. For brint er vist henholdsvis flydende brint og øvrige lagertyper. For energisystemet er tabene i forbindelse med konvertering af solenergi til VE-ressource – biomasse eller elektricitet – samt udvinding af fossile energiresourcer ikke medtaget i tabellen. Tabene i forbindelse med konvertering af solenergi til VE-ressource spiller en vigtig rolle, fordi de bestemmer arealforbruget i forbindelse med drivmidlet – hvilket videre indvirker på de tilgængelige ressourcer. Der er ikke nødvendigvis en direkte sammenhæng mellem de to, fordi et areal kan bruges flere gange. Men generelt vil der være en vis sammenhæng mellem de to som gør at en VE-ressource med et stort arealforbrug vil hurtigere vil løbe ind i ressourcebegrænsninger. For VE-baserede drivmidler er der især en markant forskel mellem energikæder der går via biomasse og de øvrige, idet fotosyntesen trækker energikædens energieffektivitet ned‡.

* Peschka (1992), Specht mfl. (1998)

† Jørgensen (1996)

‡ Jørgensen & Nielsen (1998)

	Energisystem- effektivitet (stationære)	Køretøjs- effektivitet (mobile)	Samlet effektivitet
Brint-brændselscelle (flydende brint, elektrolyse)	35-55%	30-45%	12-25%
Brint-brændselscelle (øvrige lagertyper, elektrolyse)	55-75%	38-55%	20-40%
Brint-brændselscelle (flyd. brint, NG steam reforming)	30-50%	30-45%	9-22%
Brint-brændselscelle (øvrige lagre, NG steam reforming)	50-65%	38-55%	19-36%
Metanol-brændselscelle (ekstern reforming/POX + FC)	65-70%	25-35%	16-25%

5 Udviklingsforløb

I dette afsnit beskrives to udviklingsforløb hvor der satses på henholdsvis brint og metanol som drivmiddel. De to udviklingsforløb betegnes i det følgende "brintforløb" og metanolforløb". I praksis er kombinationer af disse to muligheder sandsynlige, og beskrivelserne i det følgende skal derfor opfattes som illustrationer af de "rendyrkede".

Udviklingsforløbene har år 2030 som sigtepunkt. For hvert af de to drivmidler beskrives først slutpunktet og dernæst et muligt forløb frem mod dette slutpunkt. I år 2030 antages alle drivsystemer at være baseret på brændselsceller – og det antages i forbindelse med de respektive forløb at der sker en 100% omlægning til brint/metanol bortset togdrift, der antages at være eldrevet*. Endvidere ses der bort fra flytransport der udgør en meget beskeden del af det indenlandske transportarbejde.

Omfanget af eldrift af de transportmidler der her er på tale, afhænger stærkt af hvorledes teknologien til ellagring ombord i transportmidlerne udvikler sig. I dag er rækkevidden pr. opladning begrænset til mindre end 100 km for de fleste elbiler, men hvis lagringsteknologien udvikler sig – bl.a. forceret af det californiske mandat om at 10% af de solgte personbiler i år 2003 skal være såkaldte "nulemissions-køretøjer" – er det ikke usandsynligt at rækkevidder på 300 km kan blive aktuelt om 10-15 år. Idet elkøretøjer normalt (alt andet lige) er mere energieffektive end brintkøretøjer (selv baseret på brændselsceller), er de normalt at foretrække hvor deres begrænsninger tillader det. Man får således en opdeling af det fremtidige potentiale på et "eldriftspotentiale" og et "brintdriftspotentiale", hvor grænsen mellem de to afhænger af den tekniske og økonomiske udvikling af både batteri- og brintteknologi†. Med dagens rækkevidde vil eldriftspotentialet formentlig højst være 5-10% af person- og varebilerne,

* På mindre befærdede strækninger, hvor det er sværere at forrente investeringer i elektrificering af jernbanenettet, kan brint- og/eller metanolbaseret brændselscelledrift være et alternativ også til togdrift. Der er dog set bort fra denne mulighed.

† Jørgensen (1999)

mens det med mere avancerede batterier (og mere energieffektive elbiler) kan dreje sig om op til 40-50% af person- og varebilerne. Den benyttede bilprognose, hvor andelen af familier med mere end én bil forventes at vokse markant, vil i sig selv medvirke til at forøge eldriftpotentialet. I overgangsperioden frem mod slutpunktet kan systemer baseret på forbrændingsmotorer spille en rolle for brintforløbet.

Grundlaget for udviklingsforløbene er en relativt grov fremskrivning af de samlede indenlandske transportarbejde samt fordeling af dette på transportmidler. Senere i projektet vil der blive lavet analyse baseret på en mere detaljeret modellering af transportenergiforbrugets udvikling. I denne fremskrivning antages persontransportarbejdet at stige med knapt 60% frem til år 2030 og godstransportarbejdet at stige med ca. 2/3.

5.1 Brint som drivmiddel

I år 2030 antages drivsystemerne at være baseret på brintdrevne brændselsceller. Ombord i transportmidlerne antages brinten at blive lagret i enten tryktanke (på gasform), metalhydrider eller eventuelt nanofibre/nanotubes. Rækkevidden på en optankning antages at være så stor at drivsystemerne er generelt anvendelige i transportsektoren. Der forventes ikke brugt flydende brint som lagringsmedium.

Brint - PJ/år an forbrugssted	Tankstation	Privat forsyning	I alt
Personbil	48	2	50
Last- og varebil	15	35	50
Bus	0	4	4
Skib	0	8	8
Total	63	49	112

Det antages at transportmidlerne i år 2030 principielt ser ud som dagens transportmidler, bortset fra at de understøttes med væsentlig mere effektive drivsystemer. Dermed forudsættes det at der ikke sker en vækst i kravene til det enkelte køretøj vedrørende transportstandard, dvs. at væksten alene sker i transportarbejde. Der gøres følgende antagelser om det brintbaserede drivsystems energieffektivitet i sammenligning med de drivsystemer der fortrænges*: Personbiler (overvejende benzin): 60%; busser (diesel): 43%; vare- og lastbiler (overvejende diesel): 43%; skibe/færger (diesel/fuelolie): 20%.

På den baggrund viser tabellen et overslag over den årlige afsætning af brint til transportsektoren i år 2030, med en overslagsmæssig fordeling på distribution via offentlige tankstationer og direkte leverance til storforbrugere.

Det antages som udgangspunkt at omstillingen til brintdrift sker i forbindelse med den naturlige udskiftning af transportmidlerne. Hvis omstillingen påbegyndes i løbet af ca. 5 år, der af mange

* Opgjort som forholdet mellem brint-transportmidlets specifikke energiforbrug og det specifikke forbrug for et tilsvarende transportmiddel drevet af benzin/diesel (i begge tilfælde opgjort an køretøj). Baseret på bl.a.: Ogden & DeLuchi (1993), Ogden (1997), Jørgensen & Nielsen (1998)

bilfabrikker angives som det tidligste tidspunkt for markedsføring af brændselscellebiler, kan en fuldstændig omstilling ske i løbet af de næste ca. 15 år. Men i praksis vil også opbygningen af et marked for brændselscellekøretøjer tage mindst 5-10 år, med mindre der gøres en ekstraordinær indsats for at accelerere processen. På den baggrund kan omstillingen tidligst ske i løbet af 20-25 år. Det omstillingsforløb der skitseres i det følgende, bygger på denne tidsplan, men det vil ikke påvirke den afgørende at tidshorizonten strækkes.

Men der skal også være optankningsmulighed for de tidlige brintdrevne transportmidler. Det vil være hensigtsmæssigt at den tidligste omstilling (dvs. om ca. 5 år efter ovennævnte tidsplan) sker af køretøjer i flåder med egen optankning. Optankningsfaciliteterne kan forsynes med brint der distribueres fra en central produktionsenhed med tanktransport. Egentlige privatejede biler kan i første omgang udbydes (om ca. 8-10 år) i bestemte geografiske områder, fx Hovedstaden og/eller Århusområdet. I hvert af disse områder etableres mindst én offentlig tankstation med mulighed for brintoptankning. De tidligste tankstationer kan ligeledes forsynes via tankdistribueret brint, mens næste generation kan have en lokal brintproduktion baseret på steam reforming af naturgas, men elektrolyseanlæg kan også være en mulighed, hvis økonomien tillader det. På længere sigt (i løbet af 10-15 år) kan der ske en egentlig udbygning med lokale elektrolyseanlæg baseret på vedvarende energi eller med VE-brint distribueret via centralt netværk - eller en kombination heraf.

Hvis omstillingen skal forceres uden at accelerere salget, er det nødvendigt at omstille eksisterende transportmidler. Det er først og fremmest en interessant mulighed for transportmidler med lang levetid (fx skibe), mens det for biler og busser først og fremmest har betydning som et middel til at få erfaringer med brintdrift.

5.2 Metanol som drivmiddel

Det antages at metanolforløbet bygger på ekstern omdannelse af metanolen ombord i transportmidlet (dvs. at der ikke er tale DMFC). I dag er det usikkert om DMFC bliver udviklet til mobile formål, men såfremt dette lykkes vil dens energieffektivitet næppe blive bedre end brændselsceller med ekstern omdannelse.

Metanol – PJ/år an forbrugssted	Tankstation	Privat tank	I alt
Personbil	55	2	57
Last- og varebil	18	40	58
Bus	0	4	4
Skib	0	9	9
Total	73	55	128

Ved opgørelsen af potentialet for metanolafsætning til transportsektoren gøres følgende antagelser om det metanolbaserede drivsystems energieffektivitet i sammenligning med de drivsystemer der

fortrænges*: Personbiler (overvejende benzin): 65%; busser (diesel): 50%; vare- og lastbiler (overvejende diesel): 50%; skibe/færger (diesel- og fuelolie): 20%.

Overgangsfasen til dette forsynin

6 Delkonklusion

Notatet sammenligner to mulige løsninger med henblik på en langsigtet introduktion af brint i transportsektoren (år 2030), nemlig dels at bruge brinten direkte som drivmiddel og dels at bygge på metanol som drivmiddel. I begge tilfælde antages det transportmidlerne i udstrakt grad vil være drevet af drivsystemer baseret på brændselsceller.

De to løsninger har forskellige fordele og ulemper, der sammenfattes i det følgende. Der er ikke tale om en total sammenligning af alle væsentlige aspekter (bl.a. indgår der ikke nogen økonomivurdering). Desuden vil det ikke nødvendigvis være et spørgsmål om at vælge mellem de to løsninger, idet de udmærket kan kombineres.

Hovedpunkterne af sammenligningen af de to løsninger er:

- Udbygning af infrastruktur er et centralt problem for brintløsningen, mens der for metanol findes ansatser til en infrastruktur (om end der er langt til en færdig infrastruktur)
- Baseret på dagens lagerteknologi kan brintløsningen kun få rækkevidde som konventionelle personbiler hvis lagringen sker i flydende brint, der er energimæssigt problematisk. Derimod er rækkevidden uproblematisk med metanol. På længere sigt tegner der sig perspektivrige, men usikre, muligheder for brintlagringen.
- Energieffektiviteten er langt bedre for brintløsningen end for metanolløsningen, forudsat at der ikke anvendes flydende brint som lagring.
- Metanolløsningen vil normalt være begrænset til biomasse som ressource-udgangspunkt (med mindre man konverterer brint til metanol og tilbage igen ombord i transportmidlet). Brintløsningen er mere fleksibelt med hensyn til de drivmidler der benyttes.
- Indpasningen i køretøjet er et problem for metanolløsningen på grund af den eksterne reformer. For brint er der, bortset fra brintlageret, ikke i dag problemer med indpasningen
- Metanol-brændselscellen har problemer med at leve op til de driftsmæssige krav, mens dette ikke er tilfældet for brint

Det er således svært at udpege en bestemt løsning som den gunstigste, hvilket også giver sig udslag i at bilfabrikkerne satser på forskellige løsninger. Fx er DaimlerChryslers "ideal-scenari" at der bruges metanol (evt. benzin) til biler og brint til busser og andre flådekøretøjer, men på grund af den tekniske usikkerhed omkring teknikken til metanolløsningen, veksler man mellem brint og metanol til personbiler†. Samtidig har man et ønske om at være i front på begge områder.

Et nøglepunkt ved sammenligningen er hvor megen vægt der lægges på at kunne konkurrere med dagens drivmidler, specielt for personbiler.

* Vedrørende forudsætninger for beregningen se det foregående afsnit 5.1 om brintforløbet.

† Panik & Dietrich (1998), CALSTART-Weststart News Analysis (1999)

Det bør bemærkes at uanset om den ene eller den anden løsning vælges vil omstillingen til brint/metanol tidligst være tilendebragt omkring år 2020-2025. Omstillingen kan forceres på forskellig vis, men næppe med afgørende effekt på det samlede resultat - og samtidig skal det erindres at udviklingsforløbene beskrevet i kapitel 5 bygger på såkaldte "100% succes-scenarier", dvs. udviklingsforløb hvor alt går godt. Derfor kan det ikke udelukkes at der sker forsinkelser i udviklingen. Dette betyder at med den prognosticerede vækst i transport- og trafikarbejde, vil brint-/metanolforløbene ikke i sig selv kunne forhindre en kraftig vækst i transportsektorens energiforbrug og CO₂-emissioner.

7 Referencer til afsnit 3.11

- Arthur D. Little, Inc. (1995): "Multi-fuel Reformers for Fuel Cells Used in Transportation: Assessment of Hydrogen Storage Technologies. Phase 2: Final Report" (DOE/CE/50343-3). Cambridge, Massachusetts.
- Borgwardt, Robert H. (1998): "Methanol Production from Biomass and Natural Gas as Transportation Fuel". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 37, pp. 3760-67.
- CALSTART-WestStart News Analysis (1999): "DaimlerChrysler Still Leads on Fuel Cells – But Fueled by Hydrogen or Reformed Methanol?". CALSTART, Inc., Pasadena, Californien.
- Cannon, James D. (1995): "Harnessing Hydrogen. The Key to Sustainable Transportation". Inform, Inc., New York.
- Das, L. M. (1990): "Hydrogen Engines: a View of the Past and a Look into the Future". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 15, No. 6, pp. 425-443.
- Das, L. M. (1991): "Exhaust Emission Characterization of Hydrogen-Operated Engine System: Nature of Pollutants and their Control Techniques". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 16, No. 11, pp. 765-75.
- Espino, R. L. & J. L. Robbins (1997): "Fuel Infrastructure Considerations for Fuel Cell Vehicles". 30th ISATA, Electric, Hybrid and Alternative Fuel Vehicles, Firenze, 19.-24. juni, pp. 187-194.
- Hoffmann, Peter (1997): "Toyota, Daimler-Benz Introduce Methanol PEM Fuel Cars at Frankfurt Auto Show". *Hydrogen & Fuel Cell Letter*, Vol. 12, No. 10, oktober.
- Hynek, Scott m.fl. (1997): "Hydrogen Storage by Carbon Sorption". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.22, No. 6, pp. 601-610.
- Jørgensen, Kaj (1996): "Analyse af brintdrift i det danske trafiksystem". Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Bygninger og Energi, Lyngby.
- Jørgensen, Kaj (1999): "Renewable Energy and Efficiency Improvements in the Transport Sector". ECEEE 1999 Summer Study, Mandelieu, Frankrig, 31.5. – 4.6.
- Jørgensen, Kaj & Lars Henrik Nielsen (1998): "Alternative drivmidler og bæredygtig udvikling - el-, hybrid- og brintdrift i Danmark" (sagsrapport SR-9822). Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Bygninger og Energi, Lyngby.
- Kalhammer, Fritz R. m.fl. (1998): "Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines. A Report of the Fuel Cell Technical Advisory Panel". State of California Air Resources Board (CARB), Sacramento, Californien.

- Kong, V. C. Y. mfl. (1999): "Development of Hydrogen Storage for Fuel Cell Generators. I: Hydrogen Generation Using Hydrolysis Hydrides". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 24, No. 7, pp. 665-675.
- Mann, M. K. mfl. (1998): "Technoeconomic Analysis of Different Options for the Production of Hydrogen from Sunlight, Wind, And Biomass" (NREL/CP-570-25315). *Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review*. Washington, DC.
- Mitchell, William L. (1996): "Development of Fuel Cell Processors for Transportation and Stationary Fuel Cell Systems". Arthur D. Little, Inc., Cambridge, Massachusetts.
- Ogden, Joan M. (1997): "Infrastructure for Fuel Cell Cell Vehicles: a Southern California Case Study". *World Car Conference '97*, Riverside, Californien, 19.-22. januar, pp. 316-330.
- Ogden, Joan M. (1998): "A Technical and Economic Assessment of Hydrogen Energy Systems with CO2 Sequestration". *12th World Hydrogen Energy Conference*, Buenos Aires, 21.-25. juni.
- Ogden, Joan M. & Mark DeLucchi (1993): "Solar Hydrogen Transportation Fuels". I: Greene & Santini (red.): "Transportation and Global Climate Change". ACEEE, Washington, DC, pp. 189-240.
- Ogden, Joan M mfl. (1998): "Hydrogen Energy System Studies" (NREL/CP-570-25315). *Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review*. Washington, DC.
- Oliebranchens Fællesrepræsentation (1998): "Olieberetning 1997". København.
- Panik, F & G. Dietrich (1998): "Brennstoffzellenbusse im Feldtest". *VDI Breichte Nr. 1418*, pp. 69-92.
- Peschka, Walter (1992): "Liquid Hydrogen. Fuel of the Future". Springer Verlag, Wien – New York.
- Ren, X. mfl. (1995): "On Direct and Indirect Methanol Fuel Cells for Transportation Applications". *Proceedings of the 1st International Symposium on Proton Conducting Membrane Fuel Cells*.
- Skolnik, Edward G. (1997a): "Carbon nanotubes for hydrogen storage as being studied by the National Renewable Energy Laboratory. Technical Evaluation Report". Energetics, Inc., Columbia, Maryland.
- Skolnik, Edward G. (1997b): "Carbon nanotubes for hydrogen storage as being studied by Northeastern University. Technical Evaluation Report". Energetics, Inc., Columbia, Maryland.
- Skolnik, Edward G. & J. Philip DiPietro (1998): "Technical and Systems Evaluations" (NREL/CP-570-25315). *Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review*. Washington, DC.
- Specht, M. mfl. (1998): "Comparison of the Renewable Transportation Fuels, Liquid Hydrogen and Methanol, with Gasoline – Energetic and Economic Aspects". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.23, No. 5, pp. 387-396.
- U.S. Department of Energy (1997): "Fuel Cells for Transportation. Program Implementation Strategy". Washington, DC.
- Wagner, U. mfl. (1998): "Energy Life Cycle Analysis of Hydrogen Systems". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.23, No. 1, pp. 1-6.

4. Scenarier: simulering og –analyse (med input og debat fra alle deltagere)

4.1 Modelopbygning

Finn Sørensen og Bent Sørensen

De overordnede modelvalg er beskrevet i afsnit 2. De anvendte GIS data har typisk en opløsning på 500 meter og er nu implementeret i programmet MAPINFO, med scenarieberegninger delegeret til en række Visual-Basic 7.0 små-rutiner. Første fulde version af modellen planlægges at være klar november 1999.

4.2 ENERGI-21 med brint indpasset

(Risø)

Risø har data for Energi 21, som vil blive omsat til GIS format for anvendelse i projektet, med de i afsnit 2 omtalte justeringer til at kunne omfatte brint i systemet. Model ventes færdig november 1999, produktionssimuleringer startes januar 2000 efter diverse testkørsler.

4.3 Vedvarende energi scenario

Finn Sørensen og Bent Sørensen

Dette scenario tænkes baseret på den danske del af "centralised renewable energy" scenariet i Sørensen, Kuemmel og Meibom (1999). Tidsforløb som overstående.

5. Implementerings-analyse

5.1. Tidssimulering af implementeringsfase

Risø

Her vil blive anvendt en aggregeret regnearksmodel med et tidsskridt på et år. Forventet start på denne fase: august 2000.

5.2. Vurdering af forceret implementering

(Risø, ELKRAFT,...)

Energistyrelsens brintudvalg har bedt om en analyse af en hurtigere indføring af brint i det danske energisystem, end hvad der kan afstedkommes ved naturlig udskiftning. Ideen bag denne variant er Nordvestjysk Folkecenters forslag om at eksisterende biler ombygges til at kunne køre på brint. Vi vil forsøge at opgøre de økonomiske og samfundsmæssige konsekvenser af en sådan forcering. Tidsmæssigt lægges dette punkt i efteråret 2000, hvor konkrete simuleringsresultater foreligger og kan benyttes som støtte.

5.3. Tekniske krav

(Risø, ELKRAFT, DONG, DTU)

Hvilke teknologier skal være udviklet og markedsklare hvornår? Efterår 2000.

5.4 Politiske krav

(alle)

Hvilke politiske beslutninger er krævet for at brintscenarierne kan virkeliggøres? Hvornår skal ændret lovgivning og regler (f.eks. Bygningsreglement) være på plads for ikke at sinke programmet? Efterår 2000.

6. Identifikation af konkurrerende løsninger

(RUC, alle)

Overordnet sammenligning med konkurrerende teknologier (elbiler, udlands-handel med el, osv.). Efterår 2000.

Slutrapport fra hele projektet skal foreligge ultimo 2000, og vil i færdig redigeret form blive sendt til trykning ultimo januar 2001.

Litteratur mv.

EMD, 1999. Windresource Mapper. CD-R juni '99 fra Energi- og Miljødata, Aalborg.

Energiministeriet, 1998. Energi 21 (Planscenarie fra Energistyrelsen og handlingsplan fra ministeriet)

Energiministeriet, 1999. Energi 21 opfølgning (revurderet handlingsplan).

Kristensen, P. og M. Slettebjerg, 1999. Udtræk af GIS data om energiproducenter, ledningsføring og varmekonsum fra Energistyrelsens databaser. Energistyrelsens datakontor.

Kuemmel, B., Nielsen, S. og Sørensen, B., 1997. Life-cycle analysis of energy systems. Roskilde Universitetsforlag, København.

Mortensen, N., Nielsen, P., Landberg, L., Rathmann, O. og Nielsen, M., 1999. A detailed and verified wind resource atlas for Denmark, In "1999 European Wind Energy Conference, Nice", pp. ???

Nielsen, P., 1999. Udtræk af vind-ressource beregninger og ruhedsdata tilvejebragt af Risø og Energi & Miljødata i projekt for Energistyrelsen. Energi & Miljødata, Aalborg.

Sørensen, B., Kuemmel, B. and Meibom, P., 1999. Long-term scenarios for global energy demand and supply. Tekster fra IMFUFA nr. 359, Roskilde University, Roskilde.

Liste over tidligere udkomne tekster
tilsendes gerne. Henvendelse herom kan
ske til IMFUFA's sekretariat

tlf. 46 74 22 63

-
- 217/92 "Two papers on APPLICATIONS AND MODELLING
IN THE MATHEMATICS CURRICULUM"
by: Mogens Niss
- 218/92 "A Three-Square Theorem"
by: Lars Kadison
- 219/92 "RUPNOK - stationær strømning i elastiske rør"
af: Anja Boisen, Karen Birkelund, Mette Olufsen
Vejleder: Jesper Larsen
- 220/92 "Automatisk diagnosticering i digitale kredsløb"
af: Bjørn Christensen, Ole Møller Nielsen
Vejleder: Stig Andur Pedersen
- 221/92 "A BUNDLE VALUED RADON TRANSFORM, WITH
APPLICATIONS TO INVARIANT WAVE EQUATIONS"
by: Thomas P. Branson, Gestur Olafsson and
Henrik Schlichtkrull
- 222/92 On the Representations of some Infinite Dimensional
Groups and Algebras Related to Quantum Physics
by: Johnny T. Ottesen
- 223/92 THE FUNCTIONAL DETERMINANT
by: Thomas P. Branson
- 224/92 UNIVERSAL AC CONDUCTIVITY OF NON-METALLIC SOLIDS AT
LOW TEMPERATURES
by: Jeppe C. Dyre
- 225/92 "HATMODELLEN" Impedansspektroskopi i ultrarent
en-krystallinsk silicium
af: Anja Boisen, Anders Gorm Larsen, Jesper Varmer,
Johannes K. Nielsen, Kit R. Hansen, Peter Bøggild
og Thomas Hougaard
Vejleder: Petr Viscor
- 226/92 "METHODS AND MODELS FOR ESTIMATING THE GLOBAL
CIRCULATION OF SELECTED EMISSIONS FROM ENERGY
CONVERSION"
by: Bent Sørensen

- 227/92 "Computersimulering og fysik"
af: Per M. Hansen, Steffen Holm,
Peter Maibom, Mads K. Dall Petersen,
Pernille Postgaard, Thomas B. Schrøder,
Ivar P. Zeck
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
- 228/92 "Teknologi og historie"
Fire artikler af:
Mogens Niss, Jens Høyrup, Ib Thiersen,
Hans Hedal
- 229/92 "Masser af information uden betydning"
En diskussion af informationsteorien
i Tor Nørretranders' "Mærk Verden" og
en skitse til et alternativ baseret
på andenordens kybernetik og semiotik.
af: Søren Brier
- 230/92 "Vinklens tredeling - et klassisk
problem"
et matematisk projekt af
Karen Birkelund, Bjørn Christensen
Vejleder: Johnny Ottesen
- 231A/92 "Elektron_diffusion i silicium - en
matematisk model"
af: Jesper Voetmann, Karen Birkelund,
Mette Olufsen, Ole Møller Nielsen
Vejledere: Johnny Ottesen, H.B. Hansen
- 231B/92 "Elektron_diffusion i silicium - en
matematisk model" Kildetekster
af: Jesper Voetmann, Karen Birkelund,
Mette Olufsen, Ole Møller Nielsen
Vejledere: Johnny Ottesen, H.B. Hansen
- 232/92 "Undersøgelse om den simultane opdagelse
af energiens bevarelse og isærdeles om
de af Mayer, Colding, Joule og Helmholtz
udførte arbejder"
af: L. Arleth, G.I. Dybkjær, M.T. Østergård
Vejleder: Dorte Posselt
- 233/92 "The effect of age-dependent host
mortality on the dynamics of an endemic
disease and
Instability in an SIR-model with age-
dependent susceptibility
by: Viggo Andreasen
- 234/92 "THE FUNCTIONAL DETERMINANT OF A FOUR-DIMENSIONAL
BOUNDARY VALUE PROBLEM"
by: Thomas P. Branson and Peter B. Gilkey
- 235/92 OVERFLADESTRUKTUR OG POREUDVIKLING AF KOKS
- Modul 3 fysik projekt -
af: Thomas Jessen
-

- 236a/93 INTRODUKTION TIL KVANTE
HALL EFFEKTEN
af: Anja Boisen, Peter Bøggild
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
Erland Brun Hansen
- 236b/93 STRØMSSAMMENBRUD AF KVANTE
HALL EFFEKTEN
af: Anja Boisen, Peter Bøggild
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
Erland Brun Hansen
- 237/93 The Wedderburn principal theorem and
Shukla cohomology
af: Lars Kadison
- 238/93 SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (2)
Vektorbånd og tensorer
af: Peder Voetmann Christiansen
- 239/93 Valgsystemer - Modelbygning og analyse
Matematik 2. modul
af: Charlotte Gjerrild, Jane Hansen,
Maria Hermannsson, Allan Jørgensen,
Ragna Clauson-Kaas, Poul Lützen
Vejleder: Mogens Niss
- 240/93 Patologiske eksempler.
Om sære matematiske fiske betydning for
den matematiske udvikling
af: Claus Dråby, Jørn Skov Hansen, Runa
Ulsøe Johansen, Peter Meibom, Johannes
Kristoffer Nielsen
Vejleder: Mogens Niss
- 241/93 FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 1
af: Bent Sørensen
- 242/93 Brovedligeholdelse - bevar mig vel
Analyse af Vejdirektoratets model for
optimering af broreparationer
af: Linda Kyndlev, Kare Fundal, Kamma
Tulinus, Ivar Zeck
Vejleder: Jesper Larsen
- 243/93 TANKEEKSPERIMENTER I FYSIKKEN
Et 1.modul fysikprojekt
af: Karen Birkelund, Stine Sofia Korremann
Vejleder: Dorthe Posselt
- 244/93 RADONTRANSFORMATIONEN og dens anvendelse
i CT-scanning
Projektrapport
af: Trine Andreassen, Tine Guldager Christiansen,
Nina Skov Hansen og Christine Iversen
Vejledere: Gestur Olafsson og Jesper Larsen
- 245a+b
/93 Time-Of-Flight målinger på krystallinske
halvledere
Specialerapport
af: Linda Szkotak Jensen og Lise Odgaard Gade
Vejledere: Petr Viscor og Niels Boye Olsen
- 246/93 HVERDAGSVIDEN OG MATEMATIK
- LÆREPROCESSER I SKOLEN
af: Lena Lindenskov, Statens Humanistiske
Forskningsråd, RUC, IMFUFA
- 247/93 UNIVERSAL LOW TEMPERATURE AC CON-
DUCTIVITY OF MACROSCOPICALLY
DISORDERED NON-METALS
by: Jeppe C. Dyre
- 248/93 DIRAC OPERATORS AND MANIFOLDS WITH
BOUNDARY
by: B. Booss-Bavnbek, K.P.Wojciechowski
- 249/93 Perspectives on Teichmüller and the
Jahresbericht Addendum to Schappacher,
Scholz, et al.
by: B. Booss-Bavnbek
With comments by W.Abikoff, L.Ahlfors,
J.Cerf, P.J.Davis, W.Fuchs, F.P.Gardiner,
J.Jost, J.-P.Kahane, R.Lohan, L.Lorch,
J.Radkau and T.Söderqvist
- 250/93 EULER OG BOLZANO - MATEMATISK ANALYSE SET I ET
VIDENSKABSTEORETISK PERSPEKTIV
Projektrapport af: Anja Juul, Lone Michelsen,
Tomas Højgård Jensen
Vejleder: Stig Andur Pedersen
- 251/93 Genotypic Proportions in Hybrid Zones
by: Freddy Bugge Christiansen, Viggo Andreassen
and Ebbe Thue Poulsen
- 252/93 MODELLERING AF TILFÆLDIGE FÆNOMENER
Projektrapport af: Birthe Friis, Lisbeth Helmgård,
Kristina Charlotte Jakobsen, Marina Mosbæk
Johannessen, Lotte Ludvigsen, Mette Hass Nielsen
- 253/93 Kuglepakning
Teori og model
af: Lise Arleth, Kåre Fundal, Nils Kruse
Vejleder: Mogens Niss
- 254/93 Regressionsanalyse
Materiale til et statistikkursus
af: Jørgen Larsen
- 255/93 TID & BETINGET UAFHÆNGIGHED
af: Peter Barremoës
- 256/93 Determination of the Frequency Dependent
Bulk Modulus of Liquids Using a Piezo-
electric Spherical Shell (Preprint)
by: T. Christensen and N.B.Olsen
- 257/93 Modellering af dispersion i piezoelektriske
keramikker
af: Pernille Postgaard, Jannik Rasmussen,
Christina Specht, Mikko Østergård
Vejleder: Tage Christensen
- 258/93 Supplerende kursmateriale til
"Lineære strukturer fra algebra og analyse"
af: Mogens Brun Heefelt
- 259/93 STUDIES OF AC HOPPING CONDUCTION AT LOW
TEMPERATURES
by: Jeppe C. Dyre
- 260/93 PARTITIONED MANIFOLDS AND INVARIANTS IN
DIMENSIONS 2, 3, AND 4
by: B. Booss-Bavnbek, K.P.Wojciechowski

- 261/93 OPGAVESAMLING
Bredde-kursus i Fysik
Eksamensopgaver fra 1976-93
- 262/93 Separability and the Jones
Polynomial
by: Lars Kadison
- 263/93 Supplerende kursusbemateriale til
"Lineære strukturer fra algebra
og analyse" II
af: Mogens Brun Heefelt
- 264/93 FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 2
af: Bent Sørensen
-
- 265/94 SPHERICAL FUNCTIONS ON ORDERED
SYMMETRIC SPACES
To Sigurdur Helgason on his
sixtyfifth birthday
by: Jacques Faraut, Joachim Hilgert
and Gestur Olafsson
- 266/94 Kommensurabilitets-oscillationer i
laterale supergitre
Fysikspeciale af: Anja Boisen,
Peter Bøggild, Karen Birkelund
Vejledere: Rafael Taboryski, Poul Erik
Lindelof, Peder Voetmann Christiansen
- 267/94 Kom til kort med matematik på
Eksperimentarium - Et forslag til en
opstilling
af: Charlotte Gjerrild, Jane Hansen
Vejleder: Bernhelm Booss-Bavnbek
- 268/94 Life is like a sewer ...
Et projekt om modellering af aorta via
en model for strømming i kloaker
af: Anders Marcussen, Anne C. Nilsson,
Lone Michelsen, Per M. Hansen
Vejleder: Jesper Larsen
- 269/94 Dimensionsanalyse en introduktion
metaprojekt, fysik
af: Tine Guldager Christiansen,
Ken Andersen, Nikolaj Hermann,
Jannik Rasmussen
Vejleder: Jens Højgaard Jensen
- 270/94 THE IMAGE OF THE ENVELOPING ALGEBRA
AND IRREDUCIBILITY OF INDUCED REPRE-
SENTATIONS OF EXPONENTIAL LIE GROUPS
by: Jacob Jacobsen
- 271/94 Matematikken i Fysikken.
Opdaget eller opfundet
NAT-BAS-projekt
vejleder: Jens Højgaard Jensen
- 272/94 Tradition og fornyelse
Det praktiske elevarbejde i gymnasiets
fysikundervisning, 1907-1988
af: Kristian Hoppe og Jeppe Guldager
Vejledning: Karin Beyer og Nils Hybel
- 273/94 Model for kort- og mellemdistanceløb
Verifikation af model
af: Lise Fabricius Christensen, Helle Pilemann,
Bettina Sørensen
Vejleder: Mette Olufsen
- 274/94 MODEL 10 - en matematisk model af intravenøse
anæstetikas farmakokinetik
3. modul matematik, forår 1994
af: Trine Andreasen, Bjørn Christensen, Christine
Green, Anja Skjoldborg Hansen. Lisbeth
Helmgaard
Vejledere: Viggo Andreasen & Jesper Larsen
- 275/94 Perspectives on Teichmüller and the Jahresbericht
2nd Edition
by: Bernhelm Booss-Bavnbek
- 276/94 Dispersionsmodellering
Projektrapport 1. modul
af: Gitte Andersen, Rehannah Borup, Lisbeth Friis,
Per Gregersen, Kristina Vejro
Vejleder: Bernhelm Booss-Bavnbek
- 277/94 PROJEKTARBEJDSPEDAGOGIK - Om tre tolkninger af
problemorienteret projektarbejde
af: Claus Flensted Behrens, Frederik Voetmann
Christiansen, Jørn Skov Hansen, Thomas
Thingstrup
Vejleder: Jens Højgaard Jensen
- 278/94 The Models Underlying the Anaesthesia
Simulator Sophus
by: Mette Olufsen(Math-Tech), Finn Nielsen
(RISØ National Laboratory), Per Føge Jensen
(Herlev University Hospital), Stig Andur
Pedersen (Roskilde University)
- 279/94 Description of a method of measuring the shear
modulus of supercooled liquids and a comparison
of their thermal and mechanical response
functions.
af: Tage Christensen
- 280/94 A Course in Projective Geometry
by Lars Kadison and Matthias T. Kromann
- 281/94 Modellering af Det Cardiovasculære System med
Neural Puls kontrol
Projektrapport udarbejdet af:
Stefan Frello, Runa Ulsøe Johansen,
Michael Poul Curt Hansen, Klaus Dahl Jensen
Vejleder: Viggo Andreasen
- 282/94 Parallell algoritmer
af: Erwin Dan Nielsen, Jan Danielsen,
Niels Bo Johansen

- 283/94 Grænser for tilfældighed
(en kaotisk talgenerator)
af: Erwin Dan Nielsen og Niels Bo Johansen
- 284/94 Det er ikke til at se det, hvis man ikke
lige ve' det!
Gymnasie matematikkens begrundelsesproblem
En specialerapport af Peter Hauge Jensen
og Linda Kyndlev
Vejleder: Mogens Niss
- 285/94 Slow coevolution of a viral pathogen and
its diploid host
by: Viggo Andreasen and
Freddy B. Christiansen
- 286/94 The energy master equation: A low-temperature
approximation to Bässler's random walk model
by: Jeppe C. Dyre
- 287/94 A Statistical Mechanical Approximation for the
Calculation of Time Auto-Correlation Functions
by: Jeppe C. Dyre
- 288/95 PROGRESS IN WIND ENERGY UTILIZATION
by: Bent Sørensen
- 289/95 Universal Time-Dependence of the Mean-Square
Displacement in Extremely Rugged Energy
Landscapes with Equal Minima
by: Jeppe C. Dyre and Jacob Jacobsen
- 290/95 Modellering af uregelmæssige bølger
Et 3.modul matematik projekt
af: Anders Marcussen, Anne Charlotte Nilsson,
Lone Michelsen, Per Mørkegaard Hansen
Vejleder: Jesper Larsen
- 291/95 1st Annual Report from the project
LIFE-CYCLE ANALYSIS OF THE TOTAL DANISH
ENERGY SYSTEM
an example of using methods developed for the
OECD/IEA and the US/EU fuel cycle externality study
by: Bent Sørensen
- 292/95 Fotovoltaisk Statusnotat 3
af: Bent Sørensen
- 293/95 Geometridiskussionen - hvor blev den af?
af: Lotte Ludvigsen & Jens Frandsen
Vejleder: Anders Madsen
- 294/95 Universets udvidelse -
et metaprojekt
Af: Jesper Duelund og Birthe Friis
Vejleder: Ib Lundgaard Rasmussen
- 295/95 A Review of Mathematical Modeling of the
Controlled Cardiovascular System
By: Johnny T. Ottesen
- 296/95 RETIKULER den klassiske mekanik
af: Peder Voetmann Christiansen
- 297/95 A fluid-dynamical model of the aorta with
bifurcations
by: Mette Olufsen and Johnny Ottesen
- 298/95 Mordet på Schrödingers kat - et metaprojekt om
to fortolkninger af kvantemekanikken
af: Maria Hermannsson, Sebastian Horst,
Christina Specht
Vejledere: Jeppe Dyre og Peder Voetmann Christiansen
- 299/95 ADAM under figenbladet - et kig på en samfunds-
videnskabelig matematisk model
Et matematisk modelprojekt
af: Claus Dræby, Michael Hansen, Tomas Højgård Jensen
Vejleder: Jørgen Larsen
- 300/95 Scenarios for Greenhouse Warming Mitigation
by: Bent Sørensen
- 301/95 TOK Modellering af træers vækst under påvirkning
af ozon
af: Glenn Møller-Holst, Marina Johannessen, Birthe
Nielsen og Bettina Sørensen
Vejleder: Jesper Larsen
- 302/95 KOMPRESSORER - Analyse af en matematisk model for
aksialkompressor
Projektrapport af: Stine Bøggild, Jakob Hilmer,
Pernille Postgaard
Vejleder: Viggo Andreasen
- 303/95 Masterlignings-modeller af Glasovergangen
Termisk-Mekanisk Relaksation
Specialerapport udarbejdet af:
Johannes K. Nielsen, Klaus Dahl Jensen
Vejledere: Jeppe C. Dyre, Jørgen Larsen
- 304a/95 STATISTIKNOTER Simple binomialfordelingsmodeller
af: Jørgen Larsen
- 304b/95 STATISTIKNOTER Simple normalfordelingsmodeller
af: Jørgen Larsen
- 304c/95 STATISTIKNOTER Simple Poissonfordelingsmodeller
af: Jørgen Larsen
- 304d/95 STATISTIKNOTER Simple multinomialfordelingsmodeller
af: Jørgen Larsen
- 304e/95 STATISTIKNOTER Mindre matematisk-statistisk opslagsværk
indeholdende bl.a. ordforklaringer, resuméer og
tabeller
af: Jørgen Larsen

- 305/95 The Maslov Index:
A Functional Analytical Definition
And The Spectral Flow Formula
By: B. Booss-Bavnbek, K. Furutani
- 306/95 Goals of mathematics teaching
Preprint of a chapter for the forthcoming International Handbook of Mathematics Education (Alan J. Bishop, ed)
By: Mogens Niss
- 307/95 Habit Formation and the Thirdness of Signs
Presented at the semiotic symposium
The Emergence of Codes and Intensions as a Basis of Sign Processes
By: Peder Voetmann Christiansen
- 308/95 Metaforer i Fysikken
af: Marianne Wilcken Bjerregaard, Frederik Voetmann Christiansen, Jørn Skov Hansen, Klaus Dahl Jensen, Ole Schmidt
Vejledere: Peder Voetmann Christiansen og Petr Viscor
- 309/95 Tiden og Tanken
En undersøgelse af begrebsverdenen Matematik udført ved hjælp af en analogi med tid
af: Anita Stark og Randi Petersen
Vejleder: Bernhelm Booss-Bavnbek
-
- 310/96 Kursusmateriale til "Lineære strukturer fra algebra og analyse" (E1)
af: Mogens Brun Heefelt
- 311/96 2nd Annual Report from the project
LIFE-CYCLE ANALYSIS OF THE TOTAL DANISH ENERGY SYSTEM
by: Hélène Connor-Lajambe, Bernd Kuemmel, Stefan Krüger Nielsen, Bent Sørensen
- 312/96 Grassmannian and Chiral Anomaly
by: B. Booss-Bavnbek, K.P. Wojciechowski
- 313/96 THE IRREDUCIBILITY OF CHANCE AND THE OPENNESS OF THE FUTURE
The Logical Function of Idealism in Peirce's Philosophy of Nature
By: Helmut Pape, University of Hannover
- 314/96 Feedback Regulation of Mammalian Cardiovascular System
By: Johnny T. Ottesen
- 315/96 "Rejsen til tidens indre" - Udarbejdelse af a + b et manuskript til en fjernsynsudsendelse + manuskript
af: Gunhild Hune og Karina Goyle
Vejledere: Peder Voetmann Christiansen og Bruno Ingemann
- 316/96 Plasmaoscillation i natriumklynger
Specialerapport af: Peter Meibom, Mikko Østergård
Vejledere: Jeppe Dyre & Jørn Borggreen
- 317/96 Poincaré og symplektiske algoritmer
af: Ulla Rasmussen
Vejleder: Anders Madsen
- 318/96 Modelling the Respiratory System
by: Tine Guldager Christiansen, Claus Dråby
Supervisors: Viggo Andreassen, Michael Danielsen
- 319/96 Externality Estimation of Greenhouse Warming Impacts
by: Bent Sørensen
- 320/96 Grassmannian and Boundary Contribution to the -Determinant
by: K.P. Wojciechowski et al.
- 321/96 Modelkompetencer - udvikling og afprøvning af et begrebsapparat
Specialerapport af: Nina Skov Hansen, Christine Iversen, Kristin Troels-Smith
Vejleder: Morten Blomhøj
- 322/96 OPGAVERSAMLING
Bredde-Kursus i Fysik 1976 - 1996
- 323/96 Structure and Dynamics of Symmetric Diblock Copolymers
PhD Thesis
by: Christine Maria Papadakis
- 324/96 Non-linearity of Baroreceptor Nerves
by: Johnny T. Ottesen
- 325/96 Retorik eller realitet ?
Anvendelser af matematik i det danske Gymnasiums matematikundervisning i perioden 1903 - 88
Specialerapport af Helle Pilemann
Vejleder: Mogens Niss
- 326/96 Bevist teori
Eksemplificeret ved Gentzens bevis for konsistensen af teorien om de naturlige tal
af: Gitte Andersen, Lise Mariane Jeppesen, Klaus Frovin Jørgensen, Ivar Peter Zeck
Vejledere: Bernhelm Booss-Bavnbek og Stig Andur Pedersen
- 327/96 NON-LINEAR MODELLING OF INTEGRATED ENERGY SUPPLY AND DEMAND MATCHING SYSTEMS
by: Bent Sørensen
- 328/96 Calculating Fuel Transport Emissions
by: Bernd Kuemmel

- 329/96 The dynamics of cocirculating influenza strains conferring partial cross-immunity and
A model of influenza A drift evolution
by: Viggo Andreassen, Juan Lin and Simon Levin
- 330/96 LONG-TERM INTEGRATION OF PHOTOVOLTAICS INTO THE GLOBAL ENERGY SYSTEM
by: Bent Sørensen
- 331/96 Viskøse fingre
Specialerapport af:
Vibeke Orlien og Christina Specht
Vejledere: Jacob M. Jacobsen og Jesper Larsen
-
- 332/97 ANOMAL SWELLING AF LIPIDE DOBBELTLAG
Specialerapport af:
Stine Sofia Korremann
Vejleder: Dorthe Posselt
- 333/97 Biodiversity Matters
an extension of methods found in the literature on monetisation of biodiversity
by: Bernd Kuemmel
- 334/97 LIFE-CYCLE ANALYSIS OF THE TOTAL DANISH ENERGY SYSTEM
by: Bernd Kuemmel and Bent Sørensen
- 335/97 Dynamics of Amorphous Solids and Viscous Liquids
by: Jeppe C. Dyre
- 336/97 PROBLEM-ORIENTATED GROUP PROJECT WORK AT ROSKILDE UNIVERSITY
by: Kathrine Legge
- 337/97 Verdensbankens globale befolkningsprognose - et projekt om matematisk modellering
af: Jørn Chr. Bendtsen, Kurt Jensen, Per Pauli Petersen
Vejleder: Jørgen Larsen
- 338/97 Kvantisering af nanolederes elektriske ledningsevne
Første modul fysikprojekt
af: Søren Dam, Esben Danielsen, Martin Niss, Esben Friis Pedersen, Frederik Resen Steenstrup
Vejleder: Tage Christensen
- 339/97 Defining Discipline
by: Wolfgang Coy
- 340/97 Prime ends revisited - a geometric point of view -
by: Carsten Lunde Petersen
- 341/97 Two chapters on the teaching, learning and assessment of geometry
by Mogens Niss
- 342/97 LONG-TERM SCENARIOS FOR GLOBAL ENERGY DEMAND AND SUPPLY
A global clean fossil scenario discussion paper prepared by Bernd Kuemmel
Project leader: Bent Sørensen
- 343/97 IMPORT/EKSPORT-POLITIK SOM REDSKAB TIL OPTIMERET UDNYTTELSE AF EL PRODUCERET PÅ VE-ANLÆG
af: Peter Meibom, Torben Svendsen, Bent Sørensen
- 344/97 Puzzles and Siegel disks
by Carsten Lunde Petersen
-
- 345/98 Modeling the Arterial System with Reference to an Anesthesia Simulator
Ph.D. Thesis
by: Mette Sofie Olufsen
- 346/98 Klyngedannelse i en hulkatode-forstøvningsproces
af: Sebastian Horst
Vejledere: Jørn Borggren, NBI, Niels Boye Olsen
- 347/98 Verificering af Matematiske Modeller - en analyse af Den Danske Eulerske Model
af: Jonas Blomqvist, Tom Pedersen, Karen Timmermann, Lisbet Øhlenschläger
Vejleder: Bernhelm Booss-Bavnbek
- 348/98 Case study of the environmental permission procedure and the environmental impact assessment for power plants in Denmark
by: Stefan Krüger Nielsen
Project leader: Bent Sørensen
- 349/98 Tre rapporter fra FAGMAT - et projekt om tal og faglig matematik i arbejdsmarkedsuddannelserne
af: Lena Lindenskov og Tine Wedege
- 350/98 OPGAVESAMLING - Bredde-Kursus i Fysik 1976 - 1998
Erstatter teksterne 3/78, 261/93 og 322/96
- 351/98 Aspects of the Nature and State of Research in Mathematics Education
by: Mogens Niss

- 352/98 The Herman-Swiatec Theorem with applications
by: Carsten Lunde Petersen
- 353/98 Problemløsning og modellering i en almindelig matematikundervisning
Specialerapport af: Per Gregersen og Tomas Højgaard Jensen
Vejleder: Morten Blomhøj
- 354/98 A GLOBAL RENEWABLE ENERGY SCENARIO
by: Bent Sørensen and Peter Meibom
- 355/98 Convergence of rational rays in parameter spaces
by: Carsten Lunde Petersen and Gustav Ryd
- 356/98 Terrænmodellering
Analyse af en matematisk model til konstruktion af terrænmodeller
Modelprojekt af: Thomas Frommelt, Hans Ravnkjær Larsen og Arnold Skimminge
Vejleder: Johnny Ottesen
- 357/98 Cayleys Problem
En historisk analyse af arbejdet med Cayley problem fra 1870 til 1918
Et matematisk videnskabsfagsprojekt af: Rikke Degn, Bo Jakobsen, Bjarke K.W. Hansen, Jesper S. Hansen, Jesper Udesen, Peter C. Wulff
Vejleder: Jesper Larsen
- 358/98 Modeling of Feedback Mechanisms which Control the Heart Function in a View to an Implementation in Cardiovascular Models
Ph.D. Thesis by: Michael Danielsen
- 359/99 Long-Term Scenarios for Global Energy Demand and Supply Four Global Greenhouse Mitigation Scenarios
by: Bent Sørensen
- 360/99 SYMMETRI I FYSIK
En Meta-projektrapport af: Martin Niss, Bo Jakobsen & Tine Bjarke Bonné
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
- 361/99 Symplectic Functional Analysis and Spectral Invariants
by: Bernhelm Booss-Bavnbek, Kenro Furutani
- 362/99 Er matematik en naturvidenskab? - en udspring af diskussionen
En videnskabsfagsprojekt-rapport af Martin Niss
Vejleder: Mogens Nørgaard Olesen
- 363/99 EMERGENCE AND DOWNWARD CAUSATION
by: Donald T. Campbell, Mark H. Bickhard and Peder V. Christiansen
- 364/99 Illustrationens kraft
Visuel formidling af fysik
Integreret speciale i fysik og kommunikation
af: Sebastian Horst
Vejledere: Karin Beyer, Søren Kjørup
- 365/99 To know - or not to know - mathematics, that is a question of context
by: Tine Wedege
- 366/99 LATEX FOR FORFATTERE
En introduktion til LATEX og IMFUA-LATEX
af: Jørgen Larsen
- 367/99 Boundary Reduction of Spectral invariants and Unique Continuation Property
by Bernhelm Booss-Bavnbek