

BILAG A: Teknologikatalog

- en oversigt over teknologier anvendt i scenarierne samt brintteknologier generelt.

Kaj Jørgensen og Lotte Schleisner (13.12.00)

1.	INDLEDNING.....	92
2.	DATABLADE.....	92
2.1.	GENERELLE FORHOLD	92
2.2.	DATABLADE FOR PRODUKTIONSTEKNOLOGIER.....	93
	<i>Brintfremstilling ved biomasseforgasning.....</i>	<i>93</i>
	<i>Brintfremstilling ved biomassepyrolyse</i>	<i>94</i>
	<i>Metanolfremstilling fra biomasse.....</i>	<i>95</i>
	<i>Metanolfremstilling fra naturgas.....</i>	<i>96</i>
	<i>Brintfremstilling ved alkalisk elektrolyse.....</i>	<i>97</i>
	<i>Brintfremstilling ved faststof-polymerelektrolyse</i>	<i>98</i>
	<i>Brintfremstilling ved højtrykselektrolyse</i>	<i>99</i>
	<i>Brintfremstilling ved fotoelektrokemiske celler (PEC).....</i>	<i>100</i>
2.3.	DATABLADE FOR LAGRINGSTEKNOLOGIER.....	100
	<i>Stor tryktank (gasform) - stationær brintlagring</i>	<i>100</i>
	<i>Lille tryktank (gasform) - stationær brintlagring.....</i>	<i>101</i>
	<i>Tryktank (gasform) - brintlagring i transportmidler.....</i>	<i>102</i>
	<i>Grafitlagre - brintlagring i transportmidler.....</i>	<i>103</i>
	<i>Underjordiske lagre - stationær brintlagring</i>	<i>104</i>
	<i>Tank til flydende brint - stationær brintlagring.....</i>	<i>105</i>
	<i>Tank til flydende brint - brintlagring i transportmidler</i>	<i>106</i>
	<i>Metanoltank - metanollagring i transportmidler.....</i>	<i>107</i>
	<i>Metalhydridler - stationær brintlagring</i>	<i>108</i>
	<i>Metalhydridler - brintlagring i transportmidler</i>	<i>109</i>
2.4.	DATABLADE FOR TEKNOLOGIER TIL TRANSPORT , DISTRIBUTION OG OPTANKNING AF BRINT OG METANOL	109
	<i>Distribution af brint i rørledning - gasform.....</i>	<i>109</i>
	<i>Distribution af brint i tank - gasform.....</i>	<i>111</i>
	<i>Distribution af brint i tank, flydende form.....</i>	<i>112</i>
	<i>Distribution af metanol i tank</i>	<i>113</i>
	<i>Optankningsfacilitet til gastanklagre i transportmidler</i>	<i>114</i>
	<i>Optankningsfacilitet til metalhydridlagre i transportmidler</i>	<i>115</i>
	<i>Optankningsfacilitet til flydende brintlagre i transportmidler.....</i>	<i>116</i>
	<i>Optankningsfacilitet til metanol i transportmidler.....</i>	<i>117</i>
2.5.	DATABLADE FOR ANVENDELSESTEKNOLOGIER.....	117
	<i>Stationær kraftvarme - forbrændingsmotor/generator.....</i>	<i>117</i>
	<i>Stationær kraftvarme - gasturbine</i>	<i>118</i>
	<i>Stationær kraftvarme - smeltekarbonatbrændselscelle (MCFC).....</i>	<i>119</i>
	<i>Stationær kraftvarme - fosforsyrebrændselscelle (PAFC).....</i>	<i>120</i>
	<i>Stationær kraftvarme - faststofoxid-brændselscelle (SOFC).....</i>	<i>121</i>
	<i>Stationær kraftvarme - alkalisk brændselscelle (AFC).....</i>	<i>122</i>
	<i>Stationær kraftvarme - faststof-polymerbrændselscelle (PEMFC).....</i>	<i>123</i>
	<i>Stationær kraftvarme - individuel faststof-oxidbrændselscelle (SOFC).....</i>	<i>124</i>
	<i>Reversibel brændselscelle - faststof-polymer (PEMFC).....</i>	<i>125</i>
	<i>Mobilt drivsystem - brintdrevet forbrændingsmotor, gnisttænding.....</i>	<i>126</i>
	<i>Mobilt drivsystem - direkte-brintbrændselscelle, PEMFC.....</i>	<i>127</i>
	<i>Mobilt drivsystem - direkte-brintbrændselscelle, AFC.....</i>	<i>128</i>
	<i>Mobilt drivsystem - indirekte-metanolbrændselscelle, PEMFC.....</i>	<i>129</i>
	<i>Mobilt drivsystem - direkte-metanolbrændselscelle, DMFC</i>	<i>130</i>
	<i>Mobilt drivsystem - fly</i>	<i>131</i>
3.	REFERENCESYSTEMER	131
3.1.	REFERENCE FOR DRIVSYSTEMER - ENERGIMÆSSIGE VIRKNINGSGRADER.....	131
3.2.	REFERENCE FOR DRIVSYSTEMER - ØKONOMI.....	132
3.3.	REFERENCER FOR LAGRE - ØKONOMI.....	133
4.	TERMINOLOGI OG FORKORTELSER.....	133
5.	REFERENCER.....	134

1 Indledning

Dette katalog sammenfatter data for teknologier der anvendes, eller kunne være anvendt, i scenarier i projektet, "Brint i fremtidens energisystem i Danmark". Katalogets primære funktion er at fungere som dokumentation for data, først og fremmest vedr. energiomsætning, miljøforhold, centrale funktionsmæssige forhold samt økonomi. Derimod er der lagt mindre vægt på at beskrive teknologierne.

Der er i første række fokuseret på teknologier der er - eller kunne være - aktuelle i brintprojektets sammenhæng. Blandt andet er der kun teknologier med der kan forventes at bidrage til reduktion af CO₂-udslippet, eller som kan få en funktion i forbindelse med det planforløb der lægges op til i den officielle danske energiplan Energi 21). Det betyder fx at brintfremstilling på basis af kul ikke er medtaget. Også teknologier der vurderes at være meget usikre er udeladt, med mindre de funktionsmæssigt spiller en meget vigtig rolle for scenarierne (som fx de reversible brændselsceller gør det).

Data er i første række dokumenteret gennem referencer til litteraturen. Der refereres til en fælles litteraturliste bag i kataloget.

2 Datablade

2.1 Generelle forhold

Databladene viser tekniske og økonomiske data for forskellige typer af systemer der realistisk kan forventes at indgå i scenarier for brint i det danske energisystem, opdelt på følgende hovedkategorier:

- teknologier til produktion af brint
- teknologier til lagring (stationær og mobil) af brint
- teknologier til distribution og transport af brint
- teknologier til forskellige former for anvendelse af brint

De primære data i databladene vedrører dels status, dels en prognostisering for 2030-50, mens data for 2015 tjener som demonstration af udviklingen. På grund af den store usikkerhed der nødvendigvis må være på det meget lange sigt, vurderes det ikke er være rimeligt at skelne mellem årene 2030 og 2050. Prognostiseringerne bygger på litteraturstudier. For en meget stor del af de vurderinger af udviklingsmulighederne der findes i litteraturen, er der ikke knyttet et tidsperspektiv på - dvs. at det angives kun at bestemte forbedringer vurderes at være opnåelige uden at angive hvornår. Der er dog så godt som altid tale om kortere tidshorisonter end år 2030, hvorfor det generelt kan antages at forbedringerne er opnået i tide til at kunne være implementeret i 2030/2050.

De effektiviteter der angives i kataloget er energieffektiviteter, dvs. at de er opgjort på energibasis som forholdet mellem energiindhold i output og i input. I mange tilfælde vil det være relevant at skelne mellem virkningsgraden for det centrale output (fx brint) og for det totale output, inkl. tab/biprodukter. I så fald fremgår det af de pågældende elementer. Der er generelt anvendt nedre brændværdier, dvs. den effektive brændværdi 100°C, eksklusiv energiindholdet til kondensering af damp i forbindelse med brændstoffets vandindhold. Følgende brændværdier benyttes:

- Brints nedre brændværdi: 120 MJ/kg (33,3 kWh/kg), svarende til 10,06 MJ/Nm³ (2,79 kWh/Nm³). Dens øvre brændværdi til 0°C er 142 MJ/kg (39,4 kWh/kg), svarende til 11,90 MJ/Nm³ (3,31 kWh/Nm³).
- Metanols nedre brændværdi: 19,9 MJ/kg (5,53 kWh/kg), svarende til 15,9 MJ/liter (4,42 kWh/liter). Dens øvre brændværdi er 22,7 MJ/kg (6,31 kWh/kg), svarende til 18,1 MJ/liter (5,03 kWh/liter)

Omkostninger er generelt opgjort som direkte omkostninger, ekskl. moms og afgifter og uden at inddrage bidrag for afledte omkostninger mv. Der er generelt tale om store usikkerheder på disse omkostningsvurderinger, da der i vid udstrækning er tale om teknologier der er under udvikling.

Der opereres med specifikke investeringsomkostninger pr. kapacitetsenhed for den pågældende teknologi, idet kapacitetsenheden er leveret effekt for produktions- og forbrugsteknologier og GJ lagerkapacitet for lagre. For at beregne teknologiens omkostninger i den konkrete anvendelse skal disse specifikke omkostninger sammenholdes med benyttelsesmønstret:

- for produktions- og forbrugsteknologier kan benyttelsestiden¹ benyttes til at sætte investeringsomkostningerne i forhold til årsproduktion eller -forbrug
- for lagringsteknologier er den relevante faktor antallet af gange lagret benyttes pr. år, der begrænses af den gennemsnitlige lagringstid.

¹ Dvs. tidsforbrug ved fuldlast for at få årsproduktion eller -forbrug.

Dermed kan der udregnes specifikke investeringsomkostninger pr. årlig produktion, forbrug eller lagring. Prisoverslag i udenlandske valutaer er omregnet til danske kroner med følgende kurser: 730 for US\$ og 375 for DEM².

Der er ikke angivet omkostninger for drift- og vedligeholdelse, der i stedet kan beregnes som en procent af investeringsomkostningerne. Som generelt talstørrelse for et samlet brintscenario kan regnes med at de årlige drifts- og vedligeholdelsesomkostninger udgør 3-5% af de samlede investeringerne i scenariet.

2.2 Datablade for produktionsteknologier

2.2.1 Brintfremstilling ved biomasseforgasning

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		direkte forgasning ⁹	indirekte forgasning ¹⁰	indirekte forgasning
Tryk, output H ₂	bar	30-40	30-40	30-40
Råmateriale		biomasse	biomasse	biomasse
Anlægsstørrelse ³				
- output, brint	MW	10-500	5-500	5-500
- input, biomasse	tons/dg	90-4.400	40-4.400	40-4.200
Andet forbrug		vand	vand	vand
Levetid ⁴	år	20	20	20
Virkningsgrad ⁵				
- brinteffektivitet ^{6,7}	%	52	55	57
- energikonvertering ⁸	%	58	80	80
Øvrig produktion		varme (damp)	varme (damp)	varme (damp)
Renhed				
Miljøforhold				
Emissioner ¹¹	kg/GJ	0	0	0
Materialeaffald				
Økonomi ¹²				
Investeringsomkostninger ¹³	kr./kW _{ud}	5.600	3.200	3.000

² Niveau i november 1999. Dollarkursen er siden steget markant, men det er valgt at fastholde kursen fra november, da det er tvivlsomt om den meget høje kurs ultimo 2000 er udtryk for en varig position. De fleste prisangivelser bygger i øvrigt på kilder der er angivet pr. 1999 eller før.

³ Grænserne er ikke fysiske grænser men indeholder en afvejning af dels investeringsomkostninger, der vokser meget for små anlæg, dels forskellige logistiske forhold vedrørende både meget små og meget store anlæg. Endnu større anlæg end de her viste grænser kan tænkes, men dette er de grænser der almindeligvis refereres til i litteraturen.

⁴ Energistyrelsen 1996b

⁵ Ogden et al 1994; Chen et al 1995; Hansen et al 1997; Mann & Spath 1997; Mann et al 1998a; Adamson & Pearson 2000

⁶ Forholdet mellem energiindhold i produceret brint og energiindhold i biomasse.

⁷ I meget store anlæg kan virkningsgraden formentlig blive 2-3 procentpoint højere.

⁸ Forhold mellem samlet energiindhold i henholdsvis output- og inputprodukter.

⁹ Koncept hvor procesvarmen til forgasningen tilføres ved forbrænding af en del af biomassen. Hidtil har der været fokuseret mest på dette koncept, der er velegnet til kulforgasning, men ikke optimalt til forgasning af biomasse.

¹⁰ Koncept hvor procesvarmen til forgasningen overføres via et medium, fx sand. Dette koncept er velegnet til forgasning af biomasse, der er mere reaktiv end kul, men det er ikke så langt fremme i udviklingen som indirekte forgasning.

¹¹ Mann & Spath 1997

¹² Larson & Kartofsky 1992; Chen et al 1995; Mann et al 1998a; Spath & Mann 1998; Padró & Putsche 1999; Adamson & Pearson 2000.

¹³ Ifølge en undersøgelse af NREL, USA kan prisen antages nogenlunde konstant over anlægsstørrelser på ca. 100 MW (ud), mens der herunder er stigende specifikke anlægsinvesteringer med aftagende anlægsstørrelser (Padró & Putsche 1999). Prisen dækker et anlæg på ca. 100 MW eller mere.

2.2.2 Brintfremstilling ved biomassepyrolyse

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Proces		pyrolyse + ²⁰ steam reforming	pyrolyse + steam reforming	pyrolyse + steam reforming
Temperatur	°C	ca. 500	ca. 500	ca. 500
Tryk, output H ₂ (efter komp.)	bar			
Råmateriale		biomasse	biomasse	biomasse
Anlægsstørrelse ¹⁴				
- output, brint	MW	10-500	5-500	5-500
- input, biomasse	tons/dg	100-5.000	50-4.600	50-4.600
Andet forbrug		vand	vand	vand
Levetid ¹⁵	år	20	20	20
Virkningsgrad ¹⁶				
- brinteffektivitet ^{17,18}	%	48	52	52
- energikonvertering ¹⁹	%	67	70	75
Renhed				
Miljøforhold				
Emissioner	kg/GJ	0	0	0
Økonomi²¹				
Investeringsomkostninger ²²	kr./kW	3.000	2.800	2.700

¹⁴ Grænserne indeholder en afvejning af dels investeringsomkostninger, der vokser meget for små anlæg, dels forskellige logistiske forhold der forværres både for meget små og meget store anlæg. Endnu større anlæg end de her viste grænser kan tænkes, men dette er de grænser der almindeligvis refereres til i litteraturen.

¹⁵ Energistyrelsen 1996b

¹⁶ Chen et al 1995; Hansen et al 1997; Mann et al 1998a; Bridgwater 1999; Bridgwater et al 1999; Markevich et al 1999

¹⁷ Forholdet mellem energiindhold i produceret brint og energiindhold i biomasse. Virkningsgraden inkluderer tabene i forbindelse med konverteringen af biomassen til bio-olie (pyrolyse-trinnet). Hvis man har bio-olie i udgangspunktet kan virkningsgraden blive væsentlig højere.

¹⁸ Virkningsgraden er stærkt temperaturafhængig, men samtidig trækker andre procesforhold i en vis udstrækning i modsat retning af hensynet til virkningsgraden. Derfor er de faktiske udviklingsmuligheder en afvejning mellem disse hensyn

¹⁹ Forhold mellem energiindholdet i output- og inputprodukter.

²⁰ Råmateriale (biomasse) omdannes til et flydende biomasse-produkt (bio-olie), der dernæst konverteres til brint ved hjælp af konventionel steam reforming. En alternativ proces giver forskellige biprodukter sammen med brinten, men da den giver et lavt brintudbytte (25-30% af energiinput), er der set bort fra den i denne sammenhæng.

²¹ Larson & Kartofsky 1992; Chen et al 1995; Mann 1995; Mann et al 1998a; Spath & Mann 1998; Padró & Putsche 1999

²² Ifølge en undersøgelse af NREL, USA er den specifikke anlægspris pr. MW stigende med aftagende anlægsstørrelser (Padró & Putsche 1999). Prisen her er for et anlæg på ca. 100 MW. Ved vurderingen af prisudviklingen er der taget udgangspunkt i en antagelse om at udviklingsindsatsen går til dels at forbedre effektiviteten, dels at reducere omkostningerne. Derfor antages der en relativt begrænset forbedring vedrørende sidstnævnte aspekt.

2.2.3 Metanolfremstilling fra biomasse

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		direkte forgasning ²⁷ biomasse	indirekte forgasning ²⁸ biomasse	indirekte forgasning biomasse
Råmateriale				
Anlægsstørrelse ²³	MW			
- output, metanol	tons/dg	200-1.000	100-1.000	100-1.000
- input, biomasse		2.100-10.000	900-9.100	900-8.700
El (jævn/vekselstrøm)				
Andet forbrug	år	vand	vand	vand
Levetid				
Virkningsgrad ²⁴	%			
- metanoleffektivitet ^{25,26}		44	48	51
Øvrig produktion		varme	varme	varme
Renhed				
Miljøforhold				
Emissioner	kg/GJ	0	0	0
Materialeaffald				
Økonomi ²⁹				
Investeringsomkostninger ³⁰	kr./kW	8.000	5.000	4.500

²³ Grænserne er ikke fysiske grænser men indeholder en afvejning af dels investeringsomkostninger, der vokser meget for små anlæg, dels forskellige logistiske forhold vedrørende både meget små og meget store anlæg. Endnu større anlæg end de her viste grænser kan tænkes, men dette er de grænser der almindeligvis refereres til i litteraturen.

²⁴ Breinholt et al 1992; Larson & Kartofsky; Chen et al 1995; Lange 1997; Borgwardt 1998; Adamson & Pearson 2000

²⁵ Forholdet mellem energiindhold i produceret metanol og energiindhold i biomasse.

²⁶ I meget store anlæg kan virkningsgraden formentlig komme et par procentpoint højere op på lang sigt.

²⁷ Koncept hvor procesvarmen til forgasningen tilføres ved forbrænding af en del af biomassen. Hidtil har der været fokuseret mest på dette koncept, der er velegnet til kulforgasning, men ikke optimalt til forgasning af biomasse.

²⁸ Koncept hvor procesvarmen til forgasningen overføres via et medium, fx sand. Dette koncept er velegnet til forgasning af biomasse, der er mere reaktiv end kul, men det er ikke så langt fremme i udviklingen som indirekte forgasning.

²⁹ Larson & Kartofsky 1992; Chen et al 1995; Borgwardt 1998; Adamson & Pearson 2000

³⁰ Udviklingen i de specifikke investeringsomkostninger bygger på den forudsætning at der mellem i dag og 2015 sker et skift til et koncept byggende på indirekte forgasning, og at dette derefter omkostningseffektiviseres frem til 2030. Dette er forklaringen på det store omkostningsspring mellem i dag og 2015.

2.2.4 Metanolfremstilling fra naturgas

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type				
Råmateriale		naturgas	naturgas	naturgas
Anlægsstørrelse				
- output, metanol	MW	300-3.000	300-3.000	300-3.000
- input, naturgas	Nm ³ NG/h	0,9-9	0,9-9	0,9-9
El (jævn/vekselstrøm)				
Levetid	år	20	20	20
Virkningsgrad ³¹				
- metanoleffektivitet ³²	%	70	72	75
Renhed				
Miljøforhold				
Emissioner	kg/GJ	0	0	0
Materialeaffald				
Økonomi ³³				
Investeringsomkostninger ³⁴	kr./kW	4.000	4.000	4.000

³¹ Chen et al 1995; Lange 1997; Borgwardt 1998; Adamson & Pearson 2000

³² Forholdet mellem energiindhold i produceret metanol og energiindhold i biomasse.

³³ Larson & Kartofsky 1992; Chen et al 1995; Borgwardt 1998; Adamson & Pearson 2000

³⁴ Der er tale om en veludviklet teknologi uden store omkostningsmæssige udviklingsmuligheder.

2.2.5 Brintfremstilling ved alkalisk elektrolyse

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elektrolyt		KOH	KOH	KOH
Driftstemperatur	°C	70-90	70-90	70-90
Tryk, output H ₂ (efter komp.)	bar	1 – 250		
Anlægsstørrelse, brintoutput	MW	1-100	1-100	1-100
El (jævn/vekselstrøm)		jævnstrøm		
Andet forbrug	l vand /Nm ³ H ₂	0,63		
Levetid ³⁵	år	20	20	20
Virkningsgrad ^{36,37}	%	76	78	80
Øvrig produktion		ilt, varme	ilt, varme	ilt, varme
Renhed		99,9 ± 0,1 %		
Miljøforhold				
Emissioner	kg/GJ	0	0	0
Materialeaffald				
Økonomi ^{38,39}				
Investeringsomkostninger	kr./kW	3000	2200	2000

³⁵ Energistyrelsen 1996a

³⁶ Vanhanen et al 1997; Bartmels et al 1998; Specht et al 1998; Dutton et al 2000. Virkningsgraden forringes markant hvis anlægget belastes hårdt. Alkaliske elektrolyseanlægs effektivitet trækkes ned af energiforbrug til hjælpeudstyr.

³⁷ Andre - fx Energistyrelsen 1996a - angiver fremtidige virkningsgrader på over 90%, men dette må set fra dagens teknologiske perspektiv anses for urealistisk med konventionelle alkaliske anlæg.

³⁸ Energistyrelsen 1996a; Zittel & Wurster 1996; Mann et al 1998b; Specht et al 1998; Padró & Putsche 1999.

³⁹ Der er storskala-gevinster for alle anlæg i det beskrevne interval, jf. Padró & Putsche 1999, og små anlæg kan være langt dyrere pr. kW.

2.2.6 Brintfremstilling ved faststof-polymerelektrolyse

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Driftstemperatur	°C	80-100	80-100	80-100
Tryk, output H ₂ (efter komp.)	bar	5-10		
El (jævn/vekselstrøm)		jævnstrøm		
Kritisk materialeforbrug		Nafion		
Andet forbrug	l vand /Nm ³ H ₂			
Anlægsstørrelse, output	MW	10-50	5-50	5-50
Levetid	år	20	20	20
Virkningsgrad ⁴⁰	%	50 ⁴¹	92	94
Øvrig produktion		ilt, varme	ilt, varme	ilt, varme
Renhed		høj	høj	høj
Miljøforhold				
Emissioner	kg/GJ	0	0	0
Materialeaffald				
Økonomi ⁴²				
Investeringsomkostninger	kr./kW	3.000	1.300	1.200

⁴⁰ Ledjeff et al 1994; Hollenberg et al 1995; Vanhanen et al 1998. Virkningsgraden forringes markant hvis anlægget belastes hårdt.

⁴¹ Dagens polymer-faststofelektrolyseanlæg ligger med virkningsgrader på ca. 50% eller lavere, mens potentialet for virkningsgrader over 90% i dag kun er dokumenteret af Fuji (og for disse på et usikkert grundlag på manglende praktisk driftsgrundlag).

⁴² Padró & Putsche 1999.

2.2.7 Brintfremstilling ved højtrykselektrolyse

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elektrolyt				
Driftstemperatur	°C			
Tryk, output H ₂ (efter komp.)	bar	30		
El (jævn/vekselstrøm)				
Kritisk materialeforbrug				
Andet forbrug	l vand /Nm ³ H ₂			
Anlægsstørrelse, output	MW			
Levetid	år			
Virkningsgrad ⁴³	%	80-94		
Brintproduktion				
Øvrig produktion				
Renhed				
Miljøforhold				
Emissioner	kg/GJ	0	0	0
Materialeaffald				
Økonomi ⁴⁴				
Investeringsomkostninger	kr./kW	30.000	10.000	8.000

⁴³ Virkningsgraden forringes markant hvis anlægget belastes hårdt.

⁴⁴ Zittel & Wurster 1996

2.2.8 Brintfremstilling ved fotoelektrokemiske celler (PEC)

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik ⁴⁵				
Driftstemperatur	°C			
Tryk, output H ₂ (efter komp.)	bar			
Kritisk materialeforbrug	kWh/Nm ³	Si, Ga		
Andet forbrug	l vand /Nm ³ H ₂			
Anlægsstørrelse	MW			
Levetid	år			
Virkningsgrad ⁴⁶	%	7	9	14
Øvrig produktion		ilt	ilt	ilt
Renhed				
Miljøforhold				
Emissioner	kg/GJ	0	0	0
Materialeaffald				
Økonomi ⁴⁷				
Investeringsomkostninger	kr./kW			

2.3 Datablade for lagringsteknologier

2.3.1 Stor tryktank (gasform) - stationær brintlagring

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		klokke	klokke	klokke
Tankmateriale		stål	stål	stål
Lagringsmateriale		luft	luft	luft
Driftstemperatur	°C	atmosfærisk	atmosfærisk	atmosfærisk
Tryk	bar	10-15	10-15	10-15
Tab ⁴⁸				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab	%	0	0	0
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ⁴⁹	% af H ₂ ind	100	100	100
Supplerende energi ⁵⁰	kWh el/Nm ³	0,10	0,09	0,08
Total VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind	96	96	97
Anlægsstørrelse	GJ	50-100	50-100	50-100
Levetid	år	30	30	30
Opfyldningstid	minutter			
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ^{51,52}				
Investeringsomkostninger	kr./MJ	45	40	40

⁴⁵ Rocheleau et al 1996; Kocha et al 1997; Mann et al 1999

⁴⁶ Rocheleau et al 1996; Kocha et al 1997; Mann et al 1998b. Virkningsgraden angiver forholdet mellem energi i solindstråling og el fra anlæg.

⁴⁷ Kocha et al 1997; Mann et al 1998b; Mann et al 1999

⁴⁸ Wurster 1997b; Amos 1998

⁴⁹ For typiske benyttelsesmønstre

⁵⁰ Kompressionsenergi mv., der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels trykniveauet.

⁵¹ Amos 1998; Padró & Putsche 1999

⁵² Den specifikke investering pr. GJ er stærkt afhængig af lagringstryk. Højere tryk betyder højere energiindhold for en given fysisk størrelse, hvilket alt andet lige betyder lavere investeringer pr. GJ. Til gengæld fordyres prisen af krav om kraftigere dimensionering.

2.3.2 Lille tryktank (gasform) - stationær brintlagring

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		Tryktank	Tryktank	Tryktank
Tankmateriale		stål	stål	stål
Lagringsmateriale		luft	luft	luft
Driftstemperatur	°C	atmosfærisk	atmosfærisk	atmosfærisk
Tryk	bar	100-200	100-200	100-200
Tab ⁵³				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab	%	0	0	0
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ⁵⁴	% af H ₂ ind	100	100	100
Supplerende energi ⁵⁵	kWh el/Nm ³	0,24	0,22	0,19
Total VG, inkl. suppl. energi		91	92	93
Anlægsstørrelse ⁵⁶	GJ	<0,1	<0,1	<0,1
Levetid ⁵⁷	år	30	30	30
Opfyldningstid	minutter			
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ^{58,59}				
Investeringsomkostninger	kr. pr. MJ	50	45	45

⁵³ Wurster 1997b; Amos 1998

⁵⁴ For typiske benyttelsesmønstre

⁵⁵ Primært kompressionsenergi, der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels trykniveauet der komprimeres til.

⁵⁶ Energistyrelsen 1996a

⁵⁷ Energistyrelsen 1996a

⁵⁸ Energistyrelsen 1996a; Amos 1998; Padró & Putsche 1999

⁵⁹ Den specifikke investering pr. GJ er stærkt afhængig af lagringstryk. Højere tryk betyder højere energiindhold for en given fysisk størrelse, hvilket alt andet lige betyder lavere investeringer pr. GJ. Til gengæld fordyres prisen af krav om kraftigere dimensionering. Små lagre er alt andet lige dyrere pr. volumenenhed end større, men dette kan opvejes af mulighed for volumenproduktion.

2.3.3 Tryktank (gasform) - brintlagring i transportmidler

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		Tryktank	Tryktank	Tryktank
Tankmateriale		Alu/viklet	Komposit	Komposit
Lagringsmateriale		Luft	Luft	Luft
Driftstemperatur	°C	Atmosfærisk	Atmosfærisk	Atmosfærisk
Tryk ⁶⁰	bar	300	400	500
Energitæthed ⁶¹				
- pr. volumen	MJ/liter	2	3,0	3,3
- pr. masse	MJ/kg	4	6	8
- brinttæthed, brutto	vægt-% H ₂	3,5	5	7
Tab ⁶²				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab	%	4	2	2
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ⁶³	% af H ₂ ind	96	98	98
Supplerende energi ⁶⁴	kWh el/Nm ³	0,24	0,28	0,30
Total VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind	88	88	87
Anlægsstørrelse	GJ	0,4-2,5	0,5-3,5	0,6-4,5
Levetid	år			
Opfyldningstid ⁶⁵	minutter	3-5	3-5	3-5
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ⁶⁶⁶⁷⁶⁸				
Investeringsomkostninger	kr. pr. MJ	28	18	10

⁶⁰ Der findes vurderinger af mulige lagringstryk på op til ca. 700 bar, men af hensyn til den usikkerhed der knytter sig hertil, benyttes her mere konservative skøn.

⁶¹ Lipman & DeLuchi 1996; Wurster 1997b; Ogden et al 1999b

⁶² Lipman & DeLuchi 1996

⁶³ For typiske benyttelsesmønstre

⁶⁴ Primært kompressionsenergi, der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels trykniveaue.

⁶⁵ Lipman & DeLuchi 1996

⁶⁶ Lipman & DeLuchi 1996; Zittel & Wurster 1996 (dagens værdi); Ogden et al 1999b (fremtidig).

⁶⁷ Den specifikke investering pr. GJ er stærkt afhængig af lagringstryk. Højere tryk betyder højere energiindhold for en given fysisk størrelse, hvilket alt andet lige betyder lavere investeringer pr. GJ. Til gengæld fordyres prisen af krav om kraftigere dimensionering. Små lagre er alt andet lige dyrere pr. volumenend større, men dette kan opvejes af mulighed for volumenproduktion.

⁶⁸ Udviklingen forudsætter volumenproduktion af komposittanke, også til andre formål end dette.

2.3.4 Grafitlagre⁶⁹ - brintlagring i transportmidler

	Enheder	Status ⁷⁰	2015 ⁷¹	2030-50 ⁷²
Energi / Teknik				
Type ⁷³			nanotubes	nanofibre grafit
Lagringsmateriale				
Driftstemperatur	°C			
Tryk	bar			40-50
Energitæthed ⁷⁴				
- pr. volumen	MJ/liter			25
- pr. masse	MJ/kg		8	24
- brinttæthed, brutto	vægt-% H ₂		6,5	20%
Tab ⁷⁵				
- ind/ud-forskel	%		0	0
- påfyldningstab	%		0	0
- stationære tab	% pr. døgn		0	0
Total virkningsgrad (VG) ⁷⁶	% af H ₂ ind		100	100
Supplerende energi ⁷⁷	kWh el/Nm ³		{}	0,15
Total, VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind		{}	95
Anlægsstørrelse	GJ			
Levetid	år			
Opfyldningstid	minutter			
Krav til brintrenhed			høje	høje
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi⁷⁸				
Investeringsomkostninger	kr. pr. MJ			

⁶⁹ Elementet dækker over en række forskellige varianter af lagring i kulstof-strukturer, fx nanotubes og nanofibre.

⁷⁰ Endnu på meget tidligt udviklingsstade og findes ikke tilgængelig i dag. Udviklingsmulighederne er derfor særdeles usikre. Opnåelsen af det kortsigtede potential (jf. note 2) må betegnes som relativt sandsynlig, hvorimod der knytter sig væsentlig større usikkerhed til det langsigtede (jf. note 3), både om det indhøstes og i givet fald i hvilket omfang.

⁷¹ På det relativt korte sigt antages teknologien at svare til U.S. Department of Energys målsætning for arbejdet med nanotubes.

⁷² På langt sigt antages der at være tale om nanofibre, svarende til de resultater der er nået ved Singapore National University.

⁷³ Skolnik 1997a; Skolnik 1997b; Skolnik & DiPietro 1998, Dillon et al 1999; Wu et al 2000.

⁷⁴ Wurster et al 1997b; Park et al 1998; Wu et al 2000

⁷⁵ Endnu vides det ikke med sikkerhed om der vil optræde flere tab når lagertypen kommer nærmere praktisk anvendelse.

⁷⁶ For typiske benyttelsesmønstre

⁷⁷ Kompressionsenergi mv., der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels det trykniveau der komprimeres til.

⁷⁸ Padró & Putsche 1999

2.3.5 Underjordiske lagre - stationær brintlagring

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik ⁷⁹				
Type		Underjordisk luft	Underjordisk luft	Underjordisk luft
Lagringsmateriale		30-100	30-100	30-100
Driftstemperatur	°C			
Tryk	bar	atmosfærisk	atmosfærisk	atmosfærisk
Tab ⁸⁰				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab	%	3	2	2
- stationære tab	% pr. døgn	0,01	0,005	0,005
Total virkningsgrad (VG) ⁸¹	% af H ₂ ind	90	94	94
Supplerende energi ⁸²	kWh el/Nm ³	0,17	0,16	0,14
Total VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind	84	88	89
Anlægsstørrelse ⁸³	GJ	100-10.000	100-10.000	100-10.000
Levetid	år			
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ⁸⁴				
Investeringsomkostninger	kr. pr. MJ	0,20	0,15	0,12

⁷⁹ Der er store variationer for de underjordiske lagre afhængigt af lokale betingelser.

⁸⁰ Wurster 1997b; Amos 1998

⁸¹ For typiske benyttelsesmønstre

⁸² Kompressionsenergi mv., der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels det trykniveau der komprimeres til.

⁸³ Typisk interval, anlæggene kan være både langt mindre og langt større

⁸⁴ Amos 1998; Padró & Putsche 1999

2.3.6 Tank til flydende brint - stationær brintlagring

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		flydende brint	flyd. brint	flyd. brint
Tankmateriale		Isoleret stål	Isoleret stål	Isoleret stål
Lagringsmateriale		Nedkølet luft	Nedkølet luft	Nedkølet luft
Driftstemperatur	°C	-253	-253	-253
Tryk	bar	1-2	1-2	1-2
Tab ⁸⁵				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab	%	5	3	3
- stationære tab ⁸⁶	% pr. døgn	0,5	0,2	0,15
Total virkningsgrad (VG) ⁸⁷	% af H ₂ ind	89	94	95
Supplerende energi ⁸⁸	kWh el/Nm ³	0,95	0,85	0,85
Total VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind	58	65	66
Anlægsstørrelse ⁸⁹	GJ	0,05-100	0,05-100	0,05-100
Levetid	år			
Opfyldningstid	minutter	30	15	10
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ^{90,91}				
Investeringsomkostninger ⁹²				
- lille beholder (5 kg H ₂)	kr. pr. MJ	30	24	24
- stor beholder (1000 kg H ₂)		1,50	1,40	1,40

⁸⁵ Peschka 1992; Dietzler 1997; Wurster et al 1997b; Peschka 1998

⁸⁶ Det stationære tab for denne lagertype er i første række afkogningstab (boil-off), der hænger sammen med at varmetransmission ind gennem tankens vægge medfører stigende tryk i lageret og dermed, hvis det maksimale tilladte tryk overstiges, at der opstår behov for at reducere brintmængden i lageret. Dette sker normalt gennem bortventilering til omgivelserne, med mindre driftforholdene tillader at brinten nyttiggøres. Derfor er spiller benyttelsesmønstret en vigtig rolle for det stationære tabs størrelse.

⁸⁷ For typiske benyttelsesmønstre

⁸⁸ Lipman & Deluchi 1996; Padró & Putsche 1999

⁸⁹ Evt. langt større (dagens største)

⁹⁰ Amos 1998; Peschka 1998; Padró & Putsche 1999

⁹¹ Små lagre er alt andet lige dyrere pr. volumenenhed end større, men dette kan opvejes af mulighed for volumenproduktion.

⁹² De største reduktionspotentialer findes for små lagre.

2.3.7 Tank til flydende brint - brintlagring i transportmidler

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		flydende brint isoleret stål nedkølet luft	flydende brint isol. komposit nedkølet luft	flyd. brint isol. kompos nedkølet luft
Lagringsmateriale				
Driftstemperatur	°C	-253	-253	-253
Tryk	bar			
Energitæthed ⁹³				
- pr. volumen	MJ/liter	7	8	8
- pr. masse	MJ/kg	20	22	22
- brinttæthed, brutto	vægt-% H ₂	17	18	18
Tab ⁹⁴				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab ⁹⁵	%	15	10	7
- stationære tab ⁹⁶	% pr. døgn	2,0	1,5	1,0
Total virkningsgrad (VG) ⁹⁷	% af H ₂ ind	78	85	89
Supplerende energi ⁹⁸	kWh el/Nm ³	0,95	0,85	0,85
Total, VG, inkl. suppl. energi	% af H ₂ ind	51	60	62
Anlægsstørrelse	GJ	1-3,5	1-5	2-6
Levetid	år			
Opfyldningstid ⁹⁹	minutter	<30	<15	<10
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ¹⁰⁰¹⁰¹				
Investeringsomkostninger	kr. pr. MJ	11	10	10

⁹³ Wurster et al 1997b; Peschka 1992; Peschka 1998; Bünger 1999

⁹⁴ Peschka 1992; Bünger & Owren 1998; Peschka 1998; Bünger 1999

⁹⁵ Baseret på tankning fra anlæg der benyttes af forskellige brugere (hvad enten der er tale om offentlige eller private anlæg). For tankning af fly kan påfyldningstab for 2030-50 sættes til 5% fordi der er mulighed for at udvikle specielle påfyldningssystemer der minimerer tabene.

⁹⁶ Det stationære tab for denne lagertype er i første række afkogningstab (boil-off), der hænger sammen med at varmetransmission ind gennem tankens vægge medfører stigende tryk i lageret og dermed, hvis det maksimale tilladte tryk overstiges, at der opstår behov for at reducere brintmængden i lageret. Dette sker normalt gennem bortventilering til omgivelserne, med mindre det er muligt at nyttiggøre brinten (fx hvis der er tale om køretøj i drift). Derfor er spiller benyttelsesmønstret en vigtig rolle for det stationære tabs størrelse, og det er især et problem for køretøjer med længere stilstandsperioder. For fly, hvor der er tale om store lagre og hvor brinten typisk påfyldes i forbindelse med brugen af flyet (og derfor ikke opbevares ombord i længere tid uden at flyet bruges), kan de stationære tab antages at være forsvindende.

⁹⁷ For typiske benyttelsesmønstre for køretøjer.

⁹⁸ Energi til at bringe brinten på flydende form

⁹⁹ Lipman & DeLuchi 1996

¹⁰⁰ Lipman & DeLuchi 1996; Padró & Putsche 1999

¹⁰¹ Prisudviklingen forudsætter at der findes en volumenproduktion af tanke til lagring af flydende brint.

2.3.8 Metanoltank - metanollagring i transportmidler

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		flydende org. stål	flydende org. stål	flyd. org. stål
Tankmateriale		metanol	metanol	metanol
Lagringsmateriale		atmosfærisk	atmosfærisk	atmosfærisk
Driftstemperatur	°C			
Energitæthed ¹⁰²				
- pr. volumen	MJ/liter	12	12	12
- pr. masse	MJ/kg	15	15	15
- brinttæthed, brutto	vægt-% H ₂	12,5	12,5	12,5
Virkningsgrad ¹⁰³¹⁰⁴				
- ind/ud-forskel ¹⁰⁵	%	0	0	0
- påfyldningstab	%	2	1	1
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ¹⁰⁶	% af H ₂ ind	100	100	100
Supplerende energi ¹⁰⁷	kWh el/Nm ³	0	0	0
Total VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind	100	100	100
Anlægsstørrelse ¹⁰⁸	GJ	1-5	1-5	1-5
Levetid	år			
Opfyldningstid	minutter	2-3	2-3	2-3
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi¹⁰⁹				
Investeringsomkostninger ¹¹⁰	kr. pr. MJ	0,35	0,35	0,35

¹⁰² Wurster 1997b

¹⁰³ Eventuelle konverteringstab for at fremstille metanolen er ikke medtaget

¹⁰⁴ Ogden et al 1999b

¹⁰⁵ Angiver tab ved konvertering af metanol til brint, men medtager ikke tab ved fremstillingen af metanolen

¹⁰⁶ For typiske benyttelsesmønstre

¹⁰⁷ Kompressionsenergi og lignende, der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels det trykniveau der komprimeres til.

¹⁰⁸ Bygger på den antagelse at systemet ikke benyttes i store køretøjer som busser og lastbiler (der antages udstyret med direkte brintdrift).

¹⁰⁹ Lipman & DeLuchi 1996; Jung 1999

¹¹⁰ Baseret på en pris der antages at være dobbelt så høj som en benzinbeholder på grund af dels metanols lavere energitæthed (der skal en ca. dobbelt så stor tank til at indeholde samme energimængde, men omkostningerne vokser mindre end proportionalt med volumen), og dels den omstændighed at metanol er korroderende. Der er tale om en veludviklet teknologi med begrænsede muligheder for omkostningseffektiviseringer, og ikke mindst begrænsede incitamentter til at indhøste disse effektiviseringsmuligheder på grund af disse tankes lave pris.

2.3.9 Metalhydrider - stationær brintlagring

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		metalhydrid	metalhydrid	metalhydrid
Tankmateriale		stål	komposit	komposit
Lagringsmateriale		metalhydrid	metalhydrid	metalhydrid
Driftstemperatur	°C	50-100	50-100	50-100
Tryk	bar	30-60	30-60	30-60
Tab ¹¹¹				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab	%	0	0	0
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ¹¹²	% af H ₂ ind	100	100	100
Supplerende energi ¹¹³	kWh el/Nm ³	0,17	0,16	0,14
Total VG, inkl. suppl. energi	% af H ₂ ind	94	94	95
Anlægsstørrelse ¹¹⁴	GJ	0,5-10	0,5-25	0,5-60
Levetid	år			
Opfyldningstid	minutter	20	10	10
Krav til brintrenhed		moderate	moderate	moderate
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ¹¹⁵¹¹⁶				
Investeringsomkostninger	kr. pr. MJ	50	40	40

¹¹¹ Gamo et al 1998; Sapru et al 1998; Vanhanen et al 1996; Thomas et al 1999

¹¹² For typiske benyttelsesmønstre

¹¹³ Kompressionsenergi mv., der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels det trykniveau der komprimeres til.

¹¹⁴ Dagens største er på 27 kg H₂ (Amos 1998)

¹¹⁵ Amos 1998; Padró & Putsche 1999.

¹¹⁶ Der er meget stor variation på prisoverslagene, ifølge to undersøgelser fra NREL i USA henholdsvis 30-130 kr./MJ (Padró & Putsche 1999) og 50 - ca. 500 kr./MJ (Amos 1998). Der er valgt værdier fra den nedre del af dette spektrum idet disse antages at være udtryk for potentialerne. Generelt er datagrundlaget for økonomiske forhold omkring stationære metalhydridlagre meget sparsomt. Da hovedparten af kapitalomkostningerne vedrører selve hydridet, er der ikke nogen større økonomisk gevinst ved større anlæg. Der kan være betydelige omkostningsreduktioner hvis kravene til lagrene tillader valg af billigere hydrider.

2.3.10 Metalhydrider - brintlagring i transportmidler

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		metalhydrid	metalhydrid	metalhydrid
Tankmateriale		stål	komposit	komposit
Lagringsmateriale		metalhydrid	metalhydrid	metalhydrid
Driftstemperatur	°C	50-100	50-100	50-150
Tryk	bar	30-60	30-60	30-60
Energitæthed ¹¹⁷				
- pr. volumen	MJ/liter	4	7	14
- pr. masse	MJ/kg	1,7	3,0	4,8
- brinttæthed, brutto	vægt-% H ₂	1,4	2,5	4
Tab ¹¹⁸				
- ind/ud-forskel	%	1	1	1
- påfyldningstab	%	0	0	0
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ¹¹⁹	% af H ₂ ind	99	99	99
Supplerende energi ¹²⁰	kWh el/Nm ³	0,17	0,16	0,14
Total VG, inkl. suppl. energi	% af H ₂ ind	96	97	98
Anlægsstørrelse	GJ	0,4-1,0	0,7-2	1-3,5
Levetid	år			
Opfyldningstid ¹²¹	minutter	25	15	10
Krav til brintrenhed		moderate	moderate	høje
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ¹²²				
Investeringsomkostninger ¹²³	kr. pr. MJ	50	50	45

2.4 Datablade for teknologier til transport, distribution og optankning af brint og metanol

2.4.1 Distribution af brint i rørledning¹²⁴ - gasform

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type				
Driftstemperatur	°C	atmosfærisk	atmosfærisk	atmosfærisk
Tryk	bar	10-30	10-30	4-80
Levetid	år			

¹¹⁷ Wurster 1997b

¹¹⁸ Thomas et al 1999

¹¹⁹ For typiske benyttelsesmønstre

¹²⁰ Kompressionsenergi mv., der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels det trykniveau der komprimeres til.

¹²¹ Lipman & DeLuchi 1996

¹²² Lipman & DeLuchi 1996; Zittel & Wurster 1996; Padró & Putsche 1999.

¹²³ Da hovedparten af kapitalomkostningerne vedrører selve hydridet, er der ikke nogen større økonomisk gevinst ved større anlæg, ligesom mobile anlæg ikke nødvendigvis er dyrere end stationære. Der kan være betydelige omkostningsreduktioner hvis kravene til lagrene tillader valg af billigere hydrider. Dette er der dog begrænsede muligheder for med hydrider til transportmidler, hvor ikke mindst kravene om høj energitæthed, lave driftstemperaturer og hurtig opfyldning lægger bånd på mulighederne. Det antages at udviklingsindsatsen i første omgang rettes mod at få hydrider med bedre egenskaber (specielt energitæthed) og dernæst mod at få lavere omkostninger. Hydridet der anvendes i år 2030-2050, er alt andet lige dyrere end det fra i dag, men samtidig har det en højere energitæthed, ligesom der forventes at ske en teknologisk udvikling.

¹²⁴ Elementet er generelt baseret på en ny rørledning. Der findes i dag rørledninger til distribution af brint i flere lande, herunder et system der går på tværs af flere europæiske landegrænser.

¹²⁵ For typiske benyttelsesmønstre

¹²⁶ Kompressionsenergi mv., der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels det trykniveau der komprimeres til.

Tab				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab	%	0	0	0
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ¹²⁵	% af H ₂ ind	100	100	100
Supplerende energi ¹²⁶	kWh el/Nm ³	0,10-0,20	0,08-0,17	0,07-0,15
Total VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind	93-96	94-97	95-97
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi				
Investeringsomkostninger ^{127,128}	kr. pr. (TJ/år x km)	250	250	250

¹²⁷ Amos 1998; Iannucci et al 1999; Mann et al 1999; Padró & Putsche 1999

¹²⁸ Baseret på etablering af transmissionsledning med kapacitet på 1 GW eller mere

2.4.2 Distribution af brint i tank - gasform

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Lagringsprincip		tryktank ¹³¹	tryktank	tryktank
Transportmiddel	°C	lastbil ¹³²	lastbil	lastbil
Driftstemperatur	bar	atmosfærisk	atmosfærisk	atmosfærisk
Tryk	år	200-500	200-500	200-500
Levetid				
Tab	%			
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab	% pr. døgn	2	1	1
- stationære tab	% af H ₂ ind	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ¹²⁹	kWh el/Nm ³	98	99	99
Supplerende energi ¹³⁰	% af H ₂ ind	0,23-0,40	0,20-0,35	0,17-0,30
Total VG, inkl. suppl. energi		86-92	87-93	89-94
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ¹³³				
Investeringsomkostninger ¹³⁴	kr. pr. (TJ/år x km)	500	450	400

¹²⁹ For typiske benyttelsesmønstre

¹³⁰ Kompressionsenergi mv., der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels det trykniveau der komprimeres til.

¹³¹ Baseret på såkaldte "tube-trailers", dvs. en række sammenspændte tryktanke.

¹³² Alternative transportmidler kan være skib eller tog.

¹³³ Amos 1998; Iannucci et al 1999; Mann et al 1999; Padró & Putsche 1999.

¹³⁴ Baseret på en overførsel af amerikanske tal. Gælder for transportafstande af afstande på mindst ca. 100 km og for brintmængder i intervallet 46TJ/år til 46 PJ/år. Distribution i små mængder og over kort afstand bliver betydeligt dyrere pr. energienhed og pr. km. Selve brintdistributionsteknologien er velkendt teknologi, og derfor er der set bort fra muligheder for at reducere omkostningerne i fremtiden. Der kan dog ved brintudbygning i stor skala tænkes udviklet nye systemer, herunder brintdistribution via tog eller skib, der er billigere end de viste i dette element.

2.4.3 Distribution af brint i tank, flydende form

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik¹³⁵				
Lagringstype		flydende brint	flydende brint	flyd. brint
Transportmiddel		lastbil ¹⁴¹	lastbil	lastbil
Driftstemperatur	°C	-253	-253	-253
Tryk	bar	1-2	1-2	1-2
Levetid	år			
Tab ¹³⁶				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab ¹³⁷	%	15	10	6
- stationære tab ¹³⁸	% pr. døgn	0,3-0,5	0,2-0,5	0,1-0,4
Total virkningsgrad (VG) ¹³⁹	% af H ₂ ind	84	85	92
Supplerende energi ¹⁴⁰	kWh el/Nm ³	0,95	0,85	0,85
Total VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind	56	62	65
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Økonomi¹⁴²				
Investeringsomkostninger ¹⁴³	kr. pr. (TJ/år x km)	250	250	200

¹³⁵ Peschka 1992; Abe et al 1998

¹³⁶ Peschka 1992; Abe et al 1998; Specht et al 1998

¹³⁷ Amos 1998

¹³⁸ Afkogningstab fra transportlagertank. Hænger sammen med at varmetransmission ind gennem lagerets vægge resulterer i stigende tryk i tanken, hvilket kan betyde at der må bortventileres brint hvis lagerets maksimale tryk overstiges.

¹³⁹ For typiske benyttelsesmønstre

¹⁴⁰ Primært til at bringe brinten på flydende form

¹⁴¹ Alternative transportmidler er skib og tog

¹⁴² Amos 1998; Specht et al 1998; Mann et al 1999; Padró & Putsche 1999

¹⁴³ Baseret på amerikanske tal. Gælder for transportafstande på mindst ca. 100 km, mens distribution over væsentlig kortere afstand bliver betydeligt dyrere pr. km.

2.4.4 Distribution af metanol i tank

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Lagringsprincip		tank	tank	tank
Transportmiddel		lastbil ¹⁴⁴	lastbil	lastbil
Atmosfærisk	°C	atmosfærisk	atmosfærisk	atmosfærisk
Levetid	år			
Tab				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- påfyldningstab	%	1	1	1
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG)	% af metanol in	99	99	99
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ¹⁴⁵				
Investeringsomkostninger	kr. pr. (TJ x km)	100	100	100

¹⁴⁴ Alternative transportmidler kan være skib eller tog.

¹⁴⁵ {}

2.4.5 Optankningsfacilitet til gastanklagre i transportmidler

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		Trykslange atmosfærisk	Trykslange atmosfærisk	Trykslange atmosfærisk
Driftstemperatur	°C			
Tryk	bar	300	400	500
Anlægsstørrelse ¹⁴⁶	GJ/d			
Levetid	år			
Tab ¹⁴⁷ ¹⁴⁸				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ¹⁴⁹	% af H ₂ ind	100	100	100
Supplerende energi ¹⁵⁰	kWh el/Nm ³	0,24	0,27	0,25
Total VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind	91	90	91
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ¹⁵¹ ¹⁵²				
Investeringsomkostninger	kr. pr. MJ/dg	45	40	30

¹⁴⁶ Angiver den dimensionerende kapacitet, mens den faktiske belastning typisk vil være lavere

¹⁴⁷ Påfyldningstab ved optankning er medregnet under de relevante teknologier til lagring ombord.

¹⁴⁸ Ogden et al 1994; Ogden 1999

¹⁴⁹ For typiske benyttelsesmønstre

¹⁵⁰ Kompressionsenergi mv., der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels det trykniveau der komprimeres til.

¹⁵¹ Lipman & DeLuchi 1996; Ogden et al 1999; Padró & Putsche 1999, Ogden et al 1999b

¹⁵² Opgjort pr. leveret MJ/døgn fra optankningsfacilitet. Gælder for relativt store tankstationer (med en kapacitet på mindst 200 biler/døgn). For tankningsanlæg til busser, lastbiler mv. gælder at de på den ene side typisk har en mindre kapacitet end offentlige tankstationer til biler (hvilket alt andet lige øger den specifikke pris pr. kapacitetsenhed) og på den anden side kan udføres simplere fordi der ikke er tale om anlæg med offentlig adgang (der alt andet lige reducerer prisen). Samlet kan der benyttes samme pris som den her angivne.

2.4.6 Optankningsfacilitet til metalhydridlagre i transportmidler

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		trykslange + kølevandsledn.	trykslange + kølevandsledn.	trykslange + køleledn.
Driftstemperatur	°C	50-100	50-100	50-150
Tryk	bar	30-60	30-60	30-60
Anlægsstørrelse ¹⁵³	GJ/døgn			
Levetid	år			
Tab ¹⁵⁴				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ¹⁵⁵	% af H ₂ ind	100	100	100
Suppl. energi ¹⁵⁶	kWh el/Nm ³	0,17	0,16	0,14
Total VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind	94	94	95
Overskudsvarme	MJ/MJ H ₂			
Krav til brintrenhed		moderate	moderate	store
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ^{157/158}				
Investeringsomkostninger	kr. pr. MJ/dg	60	50	40

¹⁵³ Angiver den dimensionerende kapacitet, mens den faktiske belastning typisk vil være lavere.

¹⁵⁴ Påfyldningstab ved påfyldning af transportmidler er medregnet under de relevante lagerelementer.

¹⁵⁵ For typiske benyttelsesmønstre

¹⁵⁶ Kompressionsenergi mv., der afhænger af dels det tekniske udviklingsstade, dels det trykniveau der komprimeres til.

¹⁵⁷ Lipman & DeLuchi 1996; Mann et al 1999; Padró & Putsche 1999

¹⁵⁸ Tankningsanlæg til metalhydridlagre er dyrere i anlæg end et tilsvarende anlæg til tankning af gastanke fordi der også skal være systemer til at tage vare på varmen der afgives. Størrelsen af denne ekstra investering afhænger af om der sættes på at udnytte varmen til opvarmning eller lignende eller den blot bortkøles. Denne pris er baseret på at det antages at varmen udnyttes.

2.4.7 Optankningsfacilitet til flydende brintlagre i transportmidler

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		isol. slange	isol. slange	isol. slange
Driftstemperatur	°C	-253	-253	-253
Tryk	bar	1-2	1-2	1-2
Anlægsstørrelse ¹⁵⁹	GJ/døgn			
Levetid	år			
Virkningsgrad ¹⁶⁰ ¹⁶¹				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- stationære tab ¹⁶²	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ¹⁶³	% af H ₂ ind	100	100	100
Supplerende energi ¹⁶⁴	kWh el/Nm ³	0,95	0,85	0,85
Total VG, inkl. suppl. energi	% af H ₂ ind	64	61	61
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ¹⁶⁵				
Investeringsomkostninger	kr. pr. MJ/døgn	35	25	20

¹⁵⁹ Angiver den dimensionerende kapacitet, mens den faktiske belastning typisk vil være lavere

¹⁶⁰ Påfyldningstab i forbindelse med optankning af transportmidler er medregnet under de relevante lagerelementer

¹⁶¹ Tachtler & Szyszka 1994; Specht et al 1998

¹⁶² Spild i forbindelse med overflytning mellem forskellige led i brændstofkæden er opgjort i forbindelse med lagringselementerne, ligesom boil-offtab fra lagre er omtalt i beskrivelsen af disse teknologi-elementer.

¹⁶³ For typiske benyttelsesmønstre

¹⁶⁴ Flydendegørelse af brinten

¹⁶⁵ Lipman & DeLuchi 1996; Specht et al 1998; Syed et al 1998; Padró & Putsche 1999

2.4.8 Optankningsfacilitet til metanol i transportmidler

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Type		slange	slange	slange
Anlægsstørrelse ¹⁶⁶	GJ/døgn	{}		
Levetid	år			
Virkningsgrad ¹⁶⁷¹⁶⁸				
- ind/ud-forskel	%	0	0	0
- stationære tab	% pr. døgn	0	0	0
Total virkningsgrad (VG) ¹⁶⁹	% af H ₂ ind	100	100	100
Total VG, inkl. supplerende energi	% af H ₂ ind	100	61	61
Miljøforhold				
Materialeaffald				
Økonomi ¹⁷⁰				
Investeringsomkostninger	kr. pr. MJ/døgn	15	10	10

2.5 Datablade for anvendelsesteknologier

2.5.1 Stationær kraftvarme - forbrændingsmotor/generator

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elproduktionsteknik		generator	generator	generator
Motortype		Otto-motor	Otto-motor	Otto-motor
Brændstof		brint, naturgas	brint, naturgas	brint, ngas
Anlægsstørrelse				
- input	Nm ³ /h	ca. 200-5000	ca. 150-4000	ca. 150-4000
- output (el)	kW _{el}	200-5000	200-5000	200-5000
Levetid	år			
Virkningsgrad				
- el	%	45	46	46
- varme ¹⁷¹	%	50	50	50
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
NOx-emissioner	g/Nm ³ H ₂			
Økonomi ¹⁷²¹⁷³				
Investeringsomkostninger	kr. pr. kW _{el}	5.500	5.000	4.000

¹⁶⁶ Angiver den dimensionerende kapacitet, mens den faktiske belastning typisk vil være lavere

¹⁶⁷ Påfyldningstab i forbindelse med optankning af transportmidler er medregnet under de relevante lagerelementer

¹⁶⁸ Specht et al 1998

¹⁶⁹ For typiske benyttelsesmønstre

¹⁷⁰ Lipman & DeLuchi 1996; Specht et al 1998;

¹⁷¹ En endnu højere varmeudnyttelse kan opnås, men til høje marginale omkostninger.

¹⁷² Iannucci et al 1999; Padró & Putsche 1999.

¹⁷³ Baseret på omkostningstal fra naturgasdrevne gasturbiner.

2.5.2 Stationær kraftvarme - gasturbine

	Enheder	Status ¹⁷⁴	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elproduktionsteknik		generator	generator	generator
Brændstof		brint/naturgas	brint, ngas	brint, ngas
Driftstemperatur	°C			
Tryk	bar			
Anlægsstørrelse				
- input	Nm ³ /h	ca. 3-15000	ca. 3-15000	ca. 3-15000
- output (el)	kW _{el}	3000-15000	3000-15000	200-5000
Levetid	år			
Virkningsgrad ¹⁷⁵				
- el	%	36	44	48
- varme	%	55	46	44
Krav til brintrenhed		lave	lave	lave
Miljøforhold				
NOx-emissioner	g/Nm ³ H ₂			
Økonomi ¹⁷⁶¹⁷⁷				
Investeringsomkostninger	kr. pr. kW _{el}	8.000	8.000	7.000

¹⁷⁴ I dag ikke 100% brintdrift af gasturbiner

¹⁷⁵ Værdierne for 2015 og 2030-50 gælder for flymotor-afledede gasturbiner, der er i dag er under udvikling. Den langsigtede målsætning for total-virkningsgraden for gasturbiner er 92%.

¹⁷⁶ Zittel & Wurster 1996; Iannucci et al 1999; Padró & Putsche 1999.

¹⁷⁷ Omkostningstal baseret på oplysninger vedr. dieselmotorer til transportformål.

2.5.3 Stationær kraftvarme - smeltekarbonatbrændselscelle (MCFC)

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elektrolyt		smeltet karbonat	smeltet karbonat	smelt.karb
Brændstof		brint, ngas mv.	brint, ngas mv.	brint, ngas
Driftstemperatur	°C	650	650	650
Tryk	bar			
Kritisk materialeforbrug				
Anlægsstørrelse				
- input	Nm ³ /h	750-75000	750-75000	750-75000
- output (el)	kW _{el}	500-50.000	500-50.000	500-50.000
Levetid				
Virkningsgrad ¹⁷⁸	år			
- el		47	55	55
- varme	%	35	30	30
Krav til brintrenhed	%	moderate	moderate	ingen
Miljøforhold				
NOx-emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0
Materialeaffald				
Økonomi ¹⁷⁹				
Investeringsomkostninger ¹⁸⁰	kr. pr. kW _{el}	-	14.000	8.000

¹⁷⁸ Heimig & Kraus 1996; Wurster 1997a; Bosio et al 1998;

¹⁷⁹ Okken et al 1994; Iannucci et al 1999; Padró & Putsche 1999

¹⁸⁰ Forudsætter at målsætningen om en pris på \$1000/kW nås inden 2030.

2.5.4 Stationær kraftvarme - fosforsyrebrændselscelle (PAFC)

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elektrolyt		fosforsyre	fosforsyre	fosforsyre
Brændstof		brint	brint	brint
Driftstemperatur	°C	200-220	160-210	160-210
Tryk	bar	1-10	1-10	1-10
Anlægsstørrelse				
- input	Nm ³ /h	20-5000	5-5000	5-5000
- output (el)	kW _{el}	20-5000	5-5000	5-5000
Effekttæthed				
- volumen pr. effektenhed	liter/kW	15	12	10
Levetid	år			
Virkningsgrad ¹⁸¹				
- el	%	40	45	45
- varme	%	45	45	45
Krav til brintrenhed		høje	høje	høje
Miljøforhold				
NOx-emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0
Økonomi				
Investeringsomkostninger ¹⁸²	kr. pr. kW _{el}	22.000	17.000	12.000

¹⁸¹ Brenscheidt et al 1997; Wurster 1997a

¹⁸² Iannucci et al 1999; Padró & Putsche 1999

2.5.5 Stationær kraftvarme - faststofoxid-brændselscelle (SOFC)

	Enheder	Status ¹⁸³	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elektrolyt		keramisk	keramisk (fast)	keramisk
Brændstof		naturgas	brint, ngas mv.	brint, ngas
Driftstemperatur	°C	850-1000	750-1000	750-1000
Tryk	bar			
Kritisk materialeforbrug				
Anlægsstørrelse				
- input	Nm ³ /h		2-80.000	2-80.000
- output (el)	kW _{el}	100-200	2,5-100.000	2,5-100.000
Levetid	år			
Virkningsgrad ¹⁸⁴				
- el	%	46	54	58
- varme	%	34	36	32
Krav til brintrenhed		moderate	moderate	moderate
Miljøforhold				
NOx-emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0
Økonomi ¹⁸⁵				
Investeringsomkostninger ¹⁸⁶	kr. pr. kW _{el}		14.000	8.000

¹⁸³ Ikke markedsført i dag. Dagens værdier baseret på demonstrationsanlæg.

¹⁸⁴ Wurster 1997a; Riensche 1998a; Riensche 1998b

¹⁸⁵ Ippommatsu et al 1996; Iannucci et al 1999; Padró & Putsche 1999

¹⁸⁶ Forudsætter at målsætning om \$1000/kW nås inden 2030.

2.5.6 Stationær kraftvarme - alkalisk brændselscelle (AFC)

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elektrolyt		alkali-opløsning	alkali-opløsning	alkali-opløsning
Brændstof		brint	brint	brint
Driftstemperatur	°C	70-100	70-100	70-100
Tryk	bar			
Anlægsstørrelse				
- input	Nm ³ /h	<50	<75	<75
- output (el)	kW _{el}	<75	<100	<100
Effektæthed				
- volumen pr. effektenhed	liter/kW			
Levetid	år			
Virkningsgrad ¹⁸⁷				
- el	%	50	60	60
- varme	%	40	30	30
Krav til brintrenhed		meget høje	meget høje	meget høje
Miljøforhold				
NOx-emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0
Økonomi ¹⁸⁸				
Investeringsomkostninger	kr. pr. kW _{el}	50.000 ¹⁸⁹		

¹⁸⁷ Ogden et al 1994; Bartmels et al 1998; Kalhammer et al 1998; Ogden et al 1999

¹⁸⁸ Ogden et al 1994

¹⁸⁹ Skønnet værdi for 100 kW anlæg, på basis af et fra et konkret tilbud for et 5 kW-anlæg - inkl. hjælpeudstyr, inverter, integration af stak mv.

2.5.7 Stationær kraftvarme - faststof-polymerbrændselscelle (PEMFC)¹⁹⁰

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elektrolyt		polymer brint	polymer brint	polymer brint
Brændstof		50-100	50-100	50-100
Driftstemperatur	°C			
Tryk	bar			
Anlægsstørrelse				
- input	Nm ³ /h	5-500	5-500	5-500
- output (el)	kW _{el}	10-700	10-750	10-750
Levetid	år			
Virkningsgrad ¹⁹¹				
- el	%	50	57	57
- varme	%	40	33	33
Krav til brintrenhed		høje	høje	høje
Miljøforhold				
NOx-emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0
Økonomi				
Investeringsomkostninger ¹⁹²¹⁹³	kr. pr. kW _{el}	150.000	14.000	8.000

¹⁹⁰ For Proton-Exchange-Membrane - er også, især tidligere, blevet betegnet SPFC (Solid Polymer Fuel Cell).

¹⁹¹ Cleghorn et al 1997; Wurster 1997a

¹⁹² Barbir & Gomez 1997; Iannucci et al 1999; Padró & Putsche 1999

¹⁹³ Forudsætter at mål om \$1000/kW nås inden år 2030.

2.5.8 Stationær kraftvarme - individuel faststof-oxidbrændselscelle (SOFC)

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elektrolyt				
Brændstof		brint	brint	brint
Driftstemperatur	°C	50-100	50-100	50-100
Tryk	bar			
Anlægsstørrelse				
- input	Nm ³ /h	0,1-15	0,1-15	0,1-15
- output (el)	kW _{el}	0,1-20	0,1-20	0,1-20
Levetid	år			
Virkningsgrad ¹⁹⁴				
- el	%	48	55	55
- varme	%	32	25	25
Krav til brintrenhed		moderate	moderate	moderate
Miljøforhold				
NOx-emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0
Økonomi				
Investeringsomkostninger ¹⁹⁵	kr. pr. kW _{el}	35.000	29.000	15.000

¹⁹⁴ Wurster 1997a

¹⁹⁵ Okken et al 1994; Iannucci et al 1999; Padró & Putsche 1999

2.5.9 Reversibel brændselscelle - faststof-polymer (PEMFC)

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Elektrolyt		polymer brint	polymer brint	polymer brint
Brændstof		50-100	50-100	50-100
Driftstemperatur	°C			
Tryk	bar			
Anlægsstørrelse				
- input	Nm ³ /h			
- output	kW			
Levetid	år			
Virkningsgrad ¹⁹⁶¹⁹⁷	%			
- elektrolyse		50	60	90
- brændselscelle		30	40	50
Krav til brintrenhed		høje	høje	høje
Miljøforhold				
NOx-emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0
Økonomi				
Investeringsomkostninger ¹⁹⁸¹⁹⁹	kr. pr. kW	-	6.000	4.200

¹⁹⁶ Mitlitsky et al 1998; Mitlitsky et al 1998; Molter 1999; Ruhl 2000

¹⁹⁷ Det er usikkert om denne udvikling kan realiseres, men i modsat fald vil den reversible brændselscelle næppe have nogen fremtidig rolle at spille - og den reversible brændselscelle vil så erstattes af adskilte anlæg. I dag er problemet at opnå høje effektiviteter såvel som elektrolyse- og som brændselscelleanlæg i samme anlæg.

¹⁹⁸ Molter 1999; Ruhl 2000

¹⁹⁹ Baseret på at det amerikanske udviklingsmål (U.S. Department of Energy) for specifikke investeringsomkostninger, nemlig \$600/kW nås på langt sigt (dvs. senest i år 2030). Dette mål bygger, ligesom antagelserne om effektivitet, på analyser af de principielle muligheder, men der knytter sig stor usikkerhed til om disse muligheder vil blive realiseret i den faktiske udvikling. Dette afhænger ikke mindst af om der vil blive opnået et tilstrækkeligt stort effektivitetsmæssigt udviklingsgennembrud til at motivere en udviklingsindsats med henblik på omkostningsreduktion.

2.5.10 Mobilt drivsystem - brintdrevet forbrændingsmotor, gnisttænding

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Drivsystem		Otto-motor brint	Otto-motor brint	Otto-motor brint
Drivmiddel				
Forbrændingstemperatur	°C			
Tryk	bar			
Anlægsstørrelse				
- input (brint)	Nm ³ /time	40-200	35-175	30-150
- output (mek.) ²⁰⁰	kW	20-100	20-100	20-100
Effekttæthed				
- volumen pr. effektenhed	liter/kW	{ }	{ }	{ }
- vægt pr. pr. effektenhed	kg/kW	0,9-1,5	1,1-1,5	0,9-1,2
Levetid	år	15	15	15
Virkningsgrad, tank til hjul ²⁰¹²⁰²	%	15	18	20
Krav til brintrenhed		ingen	ingen	ingen
Miljøforhold				
NOx- emissioner	g/Nm ³ H ₂			
Økonomi ²⁰³				
Investeringsomkostninger	kr. pr. kW	300	250	250

²⁰⁰ Ab motoraksel, dvs. før transportmidlets transmission.

²⁰¹ Virkningsgrad fra lagertank ombord til de drivende hjul (eller modsvarende) - ekskl. eventuelle tab i forbindelse med ombordlagring, og inkl. påvirkningen som følge af at behovet for krafttilførsel an hjul ændres (fx som følge af øget vægt). Da tab i transportmidlets transmission er inkluderet, er det ikke direkte denne virkningsgrad der angiver sammenhængen ovenfor i skemaet mellem anlægsstørrelsen opgjort som henholdsvis brændstofinput og motoreffekt ab motoraksel.

²⁰² Dagens værdi bygger på konvertering af eksisterende gnisttændingsmotorer til dedikeret brintdrift med styringssystemer mv. der er optimeret til brintdrift (der herved kan forventes at være en anelse mere energieffektive en tilsvarende benzinmotorer). Fremtidens motorer forudsætter motorer baseret på det såkaldte GDI-princip (med direkte indsprøjtning af brændstof i forbrændingskammeret).

²⁰³ Padró & Putsche 1999

2.5.11 Mobilt drivsystem - direkte-brintbrændselscelle²⁰⁴, PEMFC²⁰⁵²⁰⁶

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Drivmotor		asynkron	PM-motor	PM-motor
Batteri?		ja	nej	nej
Drivmiddel		brint	brint	brint
Driftstemperatur	°C	50-100	50-100	50-100
Tryk	bar	3	3	3
Anlægsstørrelse ²⁰⁷				
- input (brint)	Nm ³ /time	40-200	15-200	15-180
- output (mek.) ²⁰⁸	kW	40-200	20-250	20-250
Effektæthed ²⁰⁹²¹⁰				
- volumen pr. effekt, FC-stak	liter/kW	0,75	0,65	0,60
- volumen pr. effekt, FC-system	liter/kW	2,0	1,5	1,0
- volumen pr. effekt, FC-motor	liter/kW	5,5	4,5	3,7
- vægt pr. effekt, FC-stak	kg/kW	0,90	0,85	0,8
- vægt pr. effekt, FC-system	kg/kW	4,0	3,7	3,5
- vægt pr. effekt, FC-motor	kg/kW	6,0	4,5	4,3
Levetid	år	15	20	20
Virkningsgrad, tank til hjul ²¹¹²¹²	%	36	47	50
Krav til brintrenhed		moderate	moderate	moderate
Miljøforhold				
NOx- emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0
Økonomi ²¹³²¹⁴				
Investeringsomkostninger	kr. pr. kW		900	480

²⁰⁴ Dvs. et drivsystem baseret på brint tilført transportmidlet som drivmiddel.

²⁰⁵ Dvs. faststof-polymerbrændselscelle

²⁰⁶ Elementet omfatter det samlede drivsystem, inkl. selve brændselscellen, dennes hjælpeudstyr, elmotor og eventuel transmission, men ekskl. brintlager og eventuelt batteri.

²⁰⁷ Mindste størrelse svarer til personbil, mens den største svarer til bus/lastbil.

²⁰⁸ Ab motoraksel, dvs. før transportmidlets transmission

²⁰⁹ Ogden et al 1994; Kalhammer et al 1998; Ogden et al 1999; Jost 2000

²¹⁰ For dagens niveau tages udgangspunkt i Ballards Mark 900 celle. For FC-enheden antages hovedparten af den fremt idige udviklingsindsats at være rettet mod reduktion af volumen snarere end vægt, og det er i første række for hjælpeudstyr mv. at der er potentialer herfor. Skiftet fra asynkron- til PM-motor forventes dog at give en vægtbesparelse, der giver en bedre effektæthed for FC-motoren.

²¹¹ Virkningsgrad fra lagertank ombord til de drivende hjul (eller modsvarende) - ekskl. eventuelle tab i forbindelse med ombordlagring, og inkl. påvirkningen som følge af at behovet for krafttilførsel an hjul ændres (fx som følge af øget vægt). Da tab i transportmidlets transmission er inkluderet, angiver denne virkningsgrad ikke direkte sammenhængen ovenfor i skemaet mellem anlægsstørrelsen opgjort som hhv. brændstofinput og motoreffekt ab motoraksel.

²¹² Ogden et al 1999b

²¹³ Lipman & DeLuchi 1996; Pradó & Putsche 1999; Ogden et al 1999b

²¹⁴ I dag er der ikke samlede PEMFC-baserede drivsystemer til salg

2.5.12 Mobilt drivsystem - direkte-brintbrændselscelle²¹⁵, AFC²¹⁶²¹⁷

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Drivmotor		asynkronmotor	PM-motor	PM-motor
Batteri?		ja	nej	nej
Drivmiddel		brint	brint	brint
Driftstemperatur	°C	70-100	70-100	70-100
Tryk	bar			
Anlægsstørrelse ²¹⁸				
- input (brint)	Nm ³ /time	40-75	15-150	15-180
- output (mek.) ²¹⁹	kW	40-75	20-170	20-170
Effekttæthed ²²⁰				
- volumen pr. effekt, FC-stak	liter/kW	1,3	1,1	0,9
- volumen pr. effekt, FC-system	liter/kW	2,5	2,0	1,3
- volumen pr. effekt, FC-motor	liter/kW	6,0	5,0	4,0
- vægt pr. effekt, FC-stak	kg/kW	2,9	2,0	1,2
- vægt pr. effekt, FC-system	kg/kW	6,0	4,9	3,9
- vægt pr. effekt, FC-motor	kg/kW	8,0	5,7	4,7
Levetid	år	15	20	20
Virkningsgrad, tank til hjul ²²¹	%	35	47	50
Krav til brintrenhed		meget høje	meget høje	meget høje
Miljøforhold				
NOx- emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0
Økonomi				
Investeringsomkostninger	kr. pr. kW			

²¹⁵ Dvs. et drivsystem baseret på brint tilført transportmidlet som drivmiddel.

²¹⁶ Alkalisk brændselscelle.

²¹⁷ Elementet omfatter det samlede drivsystem, inkl. selve brændselscellen, dennes hjælpeudstyr, elmotor og eventuel transmission, men ekskl. brintlager og eventuelt batteri.

²¹⁸ Mindste størrelse svarer til personbil, mens den største svarer til større varebil, mellemstor bus eller lign.

²¹⁹ Ab motoraksel, dvs. før transportmidlets transmission

²²⁰ For FC-enheder antages hovedparten af den fremtidige udviklingsindsats at være rettet mod reduktion af volumen snarere end vægt, og det er i første række for hjælpeudstyr mv. at der er potentialer herfor. Skiftet fra asynkron- til PM-motor forventes dog at give en vægtbesparelse, der påvirker effekttætheden for FC-motoren. AFC har potentialer for at opnå høje effekttætheder, men hvorvidt det nås afhænger af udviklingsindsatsen, der i dag er relativt begrænset på grund af PEMFC's dominans på dette felt.

²²¹ Virkningsgrad fra lagertank ombord til de drivende hjul (eller modsvarende) - ekskl. eventuelle tab i forbindelse med ombordlagring, og inkl. påvirkningen som følge af at behovet for krafttilførsel an hjul ændres (fx som følge af øget vægt). Da tab i transportmidlets transmission er inkluderet, er det ikke direkte denne virkningsgrad der angiver sammenhængen ovenfor i skemaet mellem anlægsstørrelsen opgjort som henholdsvis brændstofinput og motoreffekt ab motoraksel.

2.5.13 Mobilt drivsystem - indirekte-metanolbrændselscelle²²², PEMFC²²³²²⁴

	Enheder	Status	2015	2030-50
Energi / Teknik				
Drivmotor		asynkron	PM-motor	PM-motor
Batteri?		ja	ja	ja
Drivmiddel		metanol	metanol	metanol
Konvertering af drivmiddel		reformer	partiel oxid	partiel oxid.
Driftstemperatur	°C	80-90		
Tryk	bar			
Anlægsstørrelse				
- input (metanol)	liter/time	45-80	15-100	15-90
- output (mek.) ²²⁵	kW	40-75	20-125	20-125
Effektæthed ²²⁶²²⁷				
- volumen/effekt, FC-stak	liter/kW	0,80	0,7	0,65
- volumen/effekt, FC-enhed	liter/kW	2,1	1,6	1,1
- volumen/effekt, FC-motor	liter/kW	5,5	4,6	3,8
- volumen/effekt, FC-system	liter/kW	8,1	6,5	5,5
- vægt/effekt, FC-stak	kg/kW	0,95	0,9	0,85
- vægt/effekt, FC-enhed	kg/kW	4,1	4,0	3,8
- vægt/effekt, FC-motor	kg/kW	6,1	4,8	4,6
- vægt/effekt, FC-system	kg/kW	8,1	6,7	6,1
Levetid	år	20	25	25
Virkningsgrad, tank til hjul ²²⁸²²⁹	%	22	32	35
Miljøforhold				
NOx- emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0
Økonomi				
Investeringsomkostninger ²³⁰	kr. pr. kW		1250	600

²²² Dvs. et drivsystem hvor metanolen konverteres til brint ombord i transportmidlet i en ekstern reformer.

²²³ Faststof-polymerbrændselscelle

²²⁴ Elementet omfatter det samlede drivsystem, inkl. selve brændselscellen, dennes hjælpeudstyr, elmotor og eventuel transmission, men ekskl. brintlager og eventuelt batteri.

²²⁵ Ab motoraksel, dvs. før transportmidlets transmission

²²⁶ Ogden et al 1994; Kalhammer et al 1998; Ogden et al 1999; Jost 2000

²²⁷ For dagens niveau tages udgangspunkt i Ballards Mark 900 celle. For FC-enheden antages hovedparten af den fremt idige udviklingsindsats at være rettet mod reduktion af volumen snarere end vægt, og det er i første række for hjælpeudstyr mv. at der er potentialer herfor. Skiftet fra asynkron- til PM-motor forventes dog at give en vægtbesparelse, hvilket påvirker effektætheden for FC-motoren.

²²⁸ Virkningsgrad fra lagertank ombord til de drivende hjul (eller modsvarende) - ekskl. eventuelle tab i forbindelse med ombordlagring, og inkl. påvirkningen som følge af at behovet for krafttilførsel an hjul ændres (fx som følge af øget vægt). Da tab i transportmidlets transmission er inkluderet, angiver denne virkningsgrad ikke direkte sammenhængen ovenfor i skemaet mellem anlægsstørrelsen opgjort som henholdsvis brændstofinput og motoreffekt ab motoraksel.

²²⁹ Ogden et al 1999b

²³⁰ I dag findes der ikke kommercielt tilgængelige drivsystemer baseret på dette koncept.

2.5.14 Mobilt drivsystem - direkte-metanolbrændselscelle, DMFC²³¹²³²

	Enheder	Status ²³³	2015	2030-50		
Energi / Teknik						
Drivmotor		metanol intern reformer	PM-motor metanol intern reformer	PM-motor metanol intern reformer		
Drivmiddel						
Konvertering af drivmiddel						
Anlægsstørrelse						
- output (mek.) ²³⁴	kW				5-20	5-50
Effekttæthed ²³⁵²³⁶						
- volumen pr. effekt, FC-stak	liter/kW				1	1,2
- volumen pr. effekt, FC-enhed	liter/kW				4	2,8
- volumen pr. effekt, FC-motor	liter/kW				7	4,5
- vægt pr. effekt, FC-stak	kg/kW				4	0,8
- vægt pr. effekt, FC-enhed	kg/kW				8,2	4,2
- vægt pr. effekt, FC-motor	kg/kW				9	5
Levetid	år				20	25
Virkningsgrad, tank til hjul ²³⁷²³⁸²³⁹	%	22	32			
Miljøforhold						
NOx-emissioner	g/Nm ³ H ₂	0	0	0		
Økonomi						
Investeringsomkostninger ²⁴⁰	kr. pr. kW		-	500		

²³¹ Direct Methanol Fuel Cell: Brændselscellebaseret drivsystem hvor metanolen tilføres direkte til brændselscellen.

²³² Elementet omfatter det samlede drivsystem, inkl. selve brændselscellen, dennes hjælpeudstyr, elmotor og eventuel transmission, men ekskl. brintlager og eventuelt batteri.

²³³ Er endnu på laboratorieniveau, og det er usikkert om teknologien bliver udviklet til et praktisk anvendeligt niveau. I givet fald bliver det tidligst om 15-20, ifølge Kalhammer et al (1998). Værdierne i dette skema, hvor DMFC antages at nå et praktisk anvendeligt niveau (på forsøgsbasis) i 2015 og et generelt anvendeligt niveau inden 2030, angiver på den baggrund et optimistisk forløb, der angiver en nødvendig udvikling hvis DMFC skal have en fremtidig rolle. Blandt de førende inden for udviklingen af teknologien er henholdsvis JPL (Surampudi et al 1994; Valdez et al 1997; Watson 1997), LANL (Ren et al 1995; Ren et al 2000) og Siemens (Baldauf & Preidel 1999).

²³⁴ Ab motoraksel, dvs. før transportmidlets transmission

²³⁵ Shukla et al 1998; Scott et al 1999; Baldauf & Preidel 2000; Ren et al 2000

²³⁶ Principielt bør volumen og evt. vægt pr. effektenhed kunne reduceres i forhold til indirekte-metanolbrændselscellen, men dette forudsætter løsning af forskellige tekniske problemer, ikke mindst vedrørende elektrode-egenskaberne, da disse lægger begrænsning på strømtætheden og dermed den effekt der kan trækkes ud af en given celle. Der ydes en betydelig forskningsindsats med henblik på at overvinde disse problemer, og det forudsættes at de løses inde 2030, så volumen reduceres og vægten holdes på indirekte-metanolbrændselscellens niveau i 2030.

²³⁷ Virkningsgrad fra lagertank ombord til de drivende hjul - ekskl. eventuelle tab i forbindelse med ombordlagring, og inkl. påvirkningen som følge af at behovet for krafttilførsel an hjul ændres (fx som følge af øget vægt). Da tab i transportmidlets transmission er inkluderet, er der ikke direkte denne virkningsgrad der angiver sammenhængen ovenfor i skemaet mellem anlægsstørrelsen opgjort som henholdsvis brændstofinput og motoreffekt ab motoraksel.

²³⁸ Selv baseret på de mest optimistiske forudsætninger forventes det at DMFC alt andet lige bliver lidt mindre effektiv end indirekte-metanolbrændselsceller. Denne udvikling følger på langt sigt forventningen fra JPL, der kan betragtes som en optimistisk prognose, mens der i 2015 er regnet med en delvis opnåelse heraf. I dag er effektiviteten hæmmet af problemer med uønsket metanol-diffusion (der giver en kortslutningseffekt).

²³⁹ Narayan 1996; Ren et al 1996; Scott et al 2000; Ren 2000.

²⁴⁰ Principielt har DMFC potentiale for omkostningsreduktioner i forhold til indirekte-metanolbrændselsceller. Det forudsætter imidlertid en betydelig teknisk udvikling for at realisere potentialet. Der forventes ikke at kunne være kommercielt tilgængelige DMFC-systemer i 2015.

2.5.15 Mobilt drivsystem - fly

	Enheder	Status ²⁴¹	2015 ²⁴²	2030-50
Energi / Teknik				
Drivmotor			turbojet	turbojet m. højt BPR ²⁴⁸
Drivmiddel			flydende brint	flydende brint
Anlægsstørrelse				
- input (flydende brint ²⁴³)	Nm ³ /time			
- output (mekanisk)	kW			
Levetid	år			
Samlet virkningsgrad ^{244,245}				
- udenrigsfly ²⁴⁶	%		42	57
- indenrigsfly ²⁴⁷	%		30	52
Miljøforhold				
NOx- emissioner	g/Nm ³ H ₂			
Økonomi				
Investeringsomkostninger	kr. pr. kW			

3 Referencesystemer

3.1 Reference for drivsystemer - energimæssige virkningsgrader

Tabellen viser gennemsnitsværdier for transportmidlers energieffektivitet, dels i dag og dels forventet udvikling baseret på henholdsvis udviklingen i Energi 21's Planforløb (E21-Plan)²⁴⁹ og på skønnet maksimal teknisk udvikling med dagens drivsystemer²⁵⁰. Effektiviteterne for E21-Plan er skønnet ud fra det opgivne datamateriale, idet det ikke er opgivet hvorledes planens energibesparelser er fordelt på forskellige faktorer.

%	Drivmidler	Status	2030-50 (E21-Plan)	2030-50 (maks. udvikling)
Konventionelle transportmidler				
Personbil	benzin/diesel ²⁵⁸	15	20	28
Bus ²⁵¹	diesel	20	25	31
Lastbil ²⁵²	diesel	22	26	32
Varebil	diesel/benzin	16	21	29
Skibsfart	diesel/fuel	40	41	42

²⁴¹ I dag findes der ikke praktisk tilgængelige drivsystemer baseret på dette koncept, og det forventes tidligst at blive markedsført i løbet af 10-20 år

²⁴² Det må betegnes som usikkert om der kan nå at være brintfly tilgængelige i 2015, og i givet fald vil der være tale om fly der er langt fra at have indhøstet potentialerne for energieffektivisering mv.

²⁴³ Omregnet til Nm³ brint på energibasis.

²⁴⁴ Contreras et al (1997); Pohl et al (1997)

²⁴⁵ Tab i forbindelse med lagring (der sker på flydende form) er ikke medregnet.

²⁴⁶ Værdierne bygger på at effektiviteten for brintdrevne turbojetfly på mellemlangt sigt (2015) antages at være 20% bedre end for tilsvarende fly drevet af jetpetroleum (Contreras et al 1997). På længere sigt, hvor det antages at hovedparten af potentialerne for forbedring af jetmotorernes energieffektivitet er udnyttet, er der kun beskedne muligheder for yderligere forbedring gennem skift til brintdrift.

²⁴⁷ For brintdrift anvendes der også jetmotorer til indenrigsruter, men for disse vil der være mindre økonomisk incitament til at sigte efter meget høj energieffektivitet. Endvidere giver indenrigsruterne dårligere betingelser for høj energieffektivitet end udenrigsruterne.

²⁴⁸ BPR = Bypass Ratio

²⁴⁹ Energistyrelsen (1996c); Trafikministeriet (1996)

²⁵⁰ Jørgensen (2000)

²⁵¹ Relativt stor andel bykørsel

²⁵² Relativt stor andel kørsel på overordnede veje

Fly, indenrigs ²⁵³²⁵⁴	jetpetroleum	38	42	43
Fly, udenrigs ²⁵⁵²⁵⁶	jetpetroleum	35	45	55
Jernbane	el	70	80	85
Jernbane	diesel	40	42	45
Øvrige transportmidler				
Elbil ²⁵⁷	el	55	70 ²⁵⁹	80

3.2 Reference for drivsystemer - økonomi

{}

Der er generelt tale om veludviklede teknologier, der for flere transportmidlers vedkommende produceres i meget store antal. Derfor er potentialet for yderligere omkostningsreduktioner for drivsystemerne i de konventionelle transportmidler begrænset.

kr./kW	Drivmidler	Status	2030-50 (reference)	2030-50 (maks. udvikling)
Konventionelle transportmidler				
Personbil	benzin	250	250	{}
	diesel	400	400	
Bus	diesel			
Lastbil	diesel			
Varebil	diesel			
Skibsfart	benzin			
	diesel/fuel			
Fly, indenrigs	jetpetroleum			
Fly, udenrigs	jetpetroleum			
Øvrige transportmidler				
Elbil	el			

²⁵³ Lewis & Niedzwiecki (1999); Jørgensen 2000

²⁵⁴ For indenrigsruter kan der generelt anvendes propelfly der typisk er mere energieffektive end forskellige varianter af jetmotorer - og de angivne værdier bygger på at dette er tilfældet. Til gengæld har jetmotorer større potentialer for energieffektivisering, hvorfor de på længere sigt kan forventes at fortrænge propelflyene også til kortere ruter. Flyene til disse ruter (de såkaldte regionale fly) har dog næppe økonomi til at finansiere de største energibesparelses-foranstaltninger, idet et vigtigt incitament for langdistance-fly er at rækkevidden forøges. De relativt korte ruter for indenrigsfly giver, alt andet lige, dårligere betingelser for energieffektivitet end udenrigsfly.

²⁵⁵ Lewis & Niedzwiecki (1999); Jørgensen 2000

²⁵⁶ For den typisk internationale rute er det i praksis urealistisk at anvende propelfly på grund af det ugunstige vægt/ydelsesforhold for disse flys motorer. Derfor anvendes normalt jetmotorer (af forskellige varianter), der i dag har dårligere energieffektivitet end stempelmotorer, men som også har større potentialer for forbedring af energieffektiviteten. Udenrigsfly har også generelt mere gunstige flyvemønstre fra et energiøkonomi-synspunkt.

²⁵⁷ Effektiviteten angiver udnyttelsen af el ombord i køretøjet, inkl. udnyttelse af bremseregenerering. Dvs. tab i elsystemet er ikke medregnet. Forudsætter at der opereres med stærkt begrænsede rækkevidder pr. opladning: ca. 100 km for dagens teknologi, 150-200 km for "2030-2050 Plan" og 300 km for "2030-2050 maksimal udvikling".

²⁵⁸ Ca. 90% benzin

²⁵⁹ Baseret på effektivisering af dagens traktions- og lagringsteknologi, herunder reduktion af køretøjets vægt. For elbiler er der et indbygget incitament til at forbedre køretøjseffektiviteten for at forbedre køretøjets rækkevidde.

3.3 Referencer for lagre - økonomi

Tabellen viser specifikke priser som kr. pr. MJ lager for ombordlagre til dagens typiske transportmidler i de forskellige kategorier. Da egenskaberne for de typiske drivmidler - benzin, dieselolie, fuelolie, jetpetroleum - kun viser mindre afvigelser, er betydningen af om der fx er tale om benzin- eller dieseldrevne biler klart inden for usikkerheden. LPG, der er under udbredelse i bussektoren, har derimod noget anderledes karakteristika, og det samme gælder i endnu højere grad naturgas og biogas, der dog stort set ikke findes i den danske transportsektor. Alkoholer har væsentlig lavere volumetrisk energitæthed end den benzin og diesel, hvorfor der kræves en større beholder for at dække et givet energiindhold, og desuden er metanol kendetegnet ved at være stærkt korroderende hvilket stiller specielle krav til tankens udformning. Rapsolie og RME adskiller sig næsten ikke fra dieselolie.

Det har stor betydning for de specifikke lagerpriser hvor store transportmidler der er tale om, idet prisen for et givet volumen, og dermed for et givet energiindhold, aftager kraftigt. Derfor er der angivet et interval for de transportmidler der har store variationer i størrelsen.

kr./MJ	Drivmidler	Status	2030-50 (E21-Plan)
Konventionelle transportmidler			
Personbil	benzin/diesel ²⁶⁰	150	150
Bus	diesel	{}	
Lastbil	diesel		
Varebil	diesel/benzin	125-150	125-150
Skibsfart	diesel/fuel		
Fly, indenrigs	jetpetroleum		
Fly, udenrigs	jetpetroleum		
Jernbane	diesel		
Øvrige transportmidler			
Elbil	el		

4 Terminologi og forkortelser

- AFC: Alkalisk brændselscelle
- Alu/viklet: Aluminiumstank beviklet med kulfibre eller lignende.
- Direkte-brintbrændselsceller: Drivsystem baseret på brændselscelledrift med brint som drivmiddel.
- Direkte-metanolbrændselsceller (DMFC): Drivsystem baseret på brændselscelle-teknologi med direkte tilførsel af metanol til brændselscellen uden ekstern reformer.
- Effekttæthed: Sammenhæng mellem teknologis maksimale ydelse og volumen eller vægt, specificeret som vægt eller volumen pr. effektenhed
- FC-motor: Det samlede drivsystem, inkl. brændselscellesystem (FC-enhed), drivmotor(er) og eventuel transmission, men ekskl. brint-/metanollager, eventuelt batteri og eventuel ekstern konverter-teknologi for metanol.
- FC-stak: serier af enkeltceller i en sammenhængende række (stak), ekskl. påbygninger til samling i moduler og ekskl. brændselscellens hjælpeudstyr, styring mv.
- FC-enhed: det samlede brændselscellesystem, inkl. FC-stak, hjælpeudstyr, styring mv.
- FC-system: det samlede integrerede brændselscellesystem, inkl. FC-motor, eventuelt batteri og eventuel konverter-teknologi til metanol. For drivsystemer med direkte brintdrift og uden batteri er FC-system lig med FC-motor.
- GDI: Gasoline Direct Injection, dvs. benzinmotor med direkte indsprøjtning af brændstof i cylinder
- ICE: forbrændingsmotor
- Indirekte-metanolbrændselsceller: Drivsystem baseret på brændselscelledrift med metanol som drivmiddel og konvertering af denne til brint i en ekstern reformer ombord i transportmidlet.
- KOH: kalium hydroxid

²⁶⁰ Ca. 90% benzin

- JPL: Jet Propulsion Laboratory (amerikansk forskningsinstitution)
- Kompressionsmotor: forbrændingsmotor der antænder brændstof-/luftblandingen ved kompression, som det kendes fra dagens dieselmotor
- MK: Ekstern konverter for metanol til brint (ombord i transportmiddel)
- MCFC: smeltekarbonat brændselscelle
- LANL: Los Alamos National Laboratory (amerikansk forskningsinstitution)
- LPG: autogas (en blanding af butan og propan)
- Nafion: polymermembran der ofte benyttes i faststof-polymerbrændselsceller og elektrolyseanlæg
- Nm³: Normal-kubikmeter, dvs. 1 m³ ved 1 atmosfæres tryk og en temperatur på 20°C
- NG: naturgas
- NREL: National Renewable Energy Laboratory (F&U-institution vedrørende vedvarende energi under det amerikanske energiministerium)
- Otto-motor: forbrændingsmotor der fungerer efter gnisttændingsprincip (dvs. med tændrør), som det kendes fra dagens benzinmotorer.
- PAFC: Fosforsyrebrændselscelle
- PEC: Fotelektrokemiske celler
- PEMFC: Faststof-polymerbrændselscelle
- PM-motor: Elmotortypen "permanentmagnet synkronmotor"
- RME: Raps-methylester (også kaldet biodiesel) - den form hvor rapsolie normalt anvendes direkte i dieselmotorer.
- SOFC: Faststof-oxidbrændselscelle
- Supplerende energi: Energiforbrug der er nødvendigt i brændselskæden for at bringe brændstoffet på den rette form, men som ikke nødvendigvis falder i forbindelse med det pågældende element - fx energiforbrug til at bringe brinten på flydende form eller til at komprimere den til et nødvendigt tryk (dvs. det højeste nødvendige tryk i brændselskæden).
- Transmission: mekanisk/elektrisk overføring af kraft mellem drivmotor og hjul
- VG: Virkningsgrad

5 Referencer

- Abe, A. et al (1998): "Studies of the Large-Scale Sea Transportation of Liquid Hydrogen". International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 2, pp. 115-121.
- Adamson, Kerry-Anne & Peter Pearson (2000): "Hydrogen and Methanol: a Comparison of Safety, Economics, Efficiencies and Emissions". Journal of Power Sources, Vol. 86, pp. 548-555.
- Amos, W. (1998): "Costs of Storing and Transporting Hydrogen" (TP-570-25106). NREL, Department of Energy, Golden, Colorado.
- Baldauf, M. & W. Preidel (1999): "Status of the Development of a Direct Methanol Fuel Cell". Journal of Power Sources, Vol. 84, No. 2, pp. 161-166.
- Barbir, F & T. Gomez (1997): "Efficiency and Economics of Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells". International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 22, No. 10/11, pp. 1027-1037.
- Barthels, H. et al (1998): "Phoebus-Jülich: an Autonomous Energy Supply System Comprising Photovoltaics, Electrolytic Hydrogen, Fuel Cell". International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 4, pp. 295-301.
- Berry, Gene D. & Salvador M. Aceves (1998): "Onboard Storage Alternatives for Hydrogen Vehicles". Energy & Fuels, Vol. 12, No. 1, pp. 49-55.
- Borgwardt, Robert H. (1998): "Methanol Production from Biomass and Natural Gas as Transportation Fuel". Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 37, pp. 3760-3767.
- Bosio, Barbara et al (1998): "Industrial Experience on the Development of the Molten Carbonate Fuel Cell Technology". Journal of Power Sources, Vol. 74, pp. 175-187.
- Brand, Christian et al (1997): "Fantasie Deliverable 9: Forecast of New Technologies with Major Impacts". ETSU, Harwell, England.
- Brenscheidt, Th. et al (1998): "Performance of ONSI PAFC Cogeneration Plant". International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 1, pp. 53-56.

- Bridgwater, A.V. (1999): "Principles and Practice of Biomass Fast Pyrolysis Processes for Liquids". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 51, No. 1-2, pp. 3-22.
- Bridgwater, A.V. et al (1999): "An Overview of Fast Pyrolysis of Biomass". *Organic Geochemistry*, Vol. 30, No. 12, pp. 1479-1493.
- Bünger, Ulrich (1999): "Neue Entwicklungen der LH₂- und LNG-Kryotechnik für die Einsatz in Kraftfahrzeugen". VDI-Seminar Kryotechnik, Karlsruhe, 24.-26. februar.
- Bünger, Ulrich & Geir Owren (1998): "Development Potentials for Small Mobile Storage Tanks with Vacuum Powder Insulations". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 4, pp. 273-279.
- Cannon, James D. (1995): "Harnessing Hydrogen. The Key to Sustainable Transportation". Inform, Inc., New York.
- Chahine, R. & P Bernard (1998): "Transport Applications - Adsorption Storage of Gaseous Hydrogen at Cryogenic Temperatures". *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 43, Part B, pp. 1257-1264.
- Chen, J. et al (1995): "Methanol and Hydrogen from Biomass for Transportation, With Comparisons to Methanol and Hydrogen from Natural Gas and Coal" (Center Report No. 292). Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, New Jersey.
- Cleghorn, S.J.C. et al (1997): "PEM Fuel Cells for Transportation and Stationary Power Generation Applications". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 22, No. 12, pp. 1137-1144.
- Contreras, A. et al (1997): "Hydrogen as Aviation Fuel: a Comparison with Hydrocarbon Fuels". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 22, No. 10/11, pp. 1053-1060.
- Das, L. M. (1996): "On-Board Hydrogen Storage Systems for Automotive Application". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 21, No. 9, pp. 789-800.
- Davison, Paul et al (1997): "Fantasie Deliverable (: A Structured State-of-the-Art Survey and Review". ETSU, Harwell, UK, England.
- Dietzler, U. (1997): "Contribution to the Design of Storage Units for Liquid Hydrogen as a Fuel for Cogeneration Units for Heat and Power". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 22, No. 7, pp. 689-696.
- Dillon, A.C. et al (1999): "Carbon Nanotube Materials for Hydrogen Storage" (NREL/CP-570-26938). Proceedings of the 1999 U.S. DOE Hydrogen Program Review, Golden, Colorado, USA.
- Dutton, A.G. et al (2000): "Experience in the Design, Sizing, Economics, and Implementation of Autonomous Wind-Powered Hydrogen Production Systems". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 25, No. 8, pp. 705-722.
- Energistyrelsen (1996a): "Teknologidata for vedvarende energianalæg. Del 1". København.
- Energistyrelsen (1996b): "Teknologidata for vedvarende energianalæg. Del 2. Biomasseteknologier". København.
- Energistyrelsen (1996c): "Energi 21. Forudsætninger og resultater". København.
- Gamo, T. mfl. (1998): "Hydrogen Transport and Storage Technologies using Metal Hydrides". Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference, Buenos Aires, Argentina, 21.-25. juni, pp. 1105-1114.
- Hagstrom, M.T. et al (1995): "Metal hydride hydrogen storage for near-ambient temperature and atmospheric pressure applications, a PDSC study". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 20, No. 11, pp. 897-909.
- Hansen, M.W. et al (1997): "Pyrolyse og forgasning af biomasse i en to-trins fluid bed forgasser" (rapport nr. ET-ES 97-02). Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Energiteknik, Lyngby.
- Hart, D. (1997): "Hydrogen Power, The Commercial Future of 'the Ultimate Fuel'". Financial Times Energy, London.
- Heiming, A. & P. Kraus (1996): "Stand der weltweiten Brennstoffzellenentwicklung mit der Schwerpunkt "Karbonatschmelze-Brennstoffzellen". *Gas Erdgas - GWF*, Vol. 137, Nummer 4, pp. 189-195.
- Hollenberg, J.W. et al (1995): "Development of a Photovoltaic Energy Conversion System with Hydrogen Energy Storage". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 20, No. 3, pp. 239-243.
- Hynek, Scott et al. (1997): "Hydrogen Storage by Carbon Sorption". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.22, No. 6, pp. 601-610.
- Institute of Gas Technology (1996): "Compressed Natural Gas Storage Optimization for Natural Gas Vehicles" (Report GRI-96/0364). Gas Research Institute, Des Plaines, Illinois.
- Ippommatsu, M. et al (1996): "Evaluation of the Cost Performance of the SOFC Cell in the Market". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 21, pp. 129-135.

- Jost, Kevin (2000): "Fuel Cell Concepts and Technology". *Automotive Engineering International*, Vol. 108, No. 3, pp. 170-185.
- Jung, Patrick (1999): "Technical and Economic Assessment of Hydrogen and Methanol Powered Fuel Cell Vehicles". Chalmers Tekniska Högskola, Avdelningen för Fysisk Resursteori, Göteborg.
- Jørgensen, Kaj (1994): "Hydrogen for Local Distribution of Goods in Vans and Light Trucks". In: D. L. Block & T. N. Veziroglu (red.): "Hydrogen Energy Progress X. Proceedings of the 10th World Hydrogen Energy Conference. Cocoa Beach, Florida, USA. 20.-24 June 1994", Vol.3, pp. 1377-1387.
- Jørgensen, Kaj (1996a): "Analyse af brintdrift i det danske trafiksystem". Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Bygninger og Energi, Lyngby.
- Jørgensen, Kaj (1996b): "Hydrogen in Vans and Light Duty Trucks in Denmark". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 21, No. 7, pp. 597-606.
- Jørgensen, Kaj (2000): "Teknologikatalog over tekniske muligheder for energibesparelser i transportsektoren". Energistyrelsen, København.
- 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. et al (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.
- Kocha, S. et al (1997): "Photoelectrochemical Based Direct Conversion Systems for Hydrogen Production". Proceedings of the 1997 U.S. DOE Hydrogen Program Review. Herndon, Virginia, USA, 21.-23. maj.
- 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.
- 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.
- Kordesch, K. & G. Simader (1996): "Fuel Cells and their Applications". Wiley-VCH, Weinheim, Tyskland.
- Kruhl, Jorg (1997): "Einsatz von PAFC-Brennstoffzellen in der dezentrale Energieg". *BWK - Brennstoff Warme Kraft*, Vol. 49, Nummer 6, pp. 60-63.
- Kunz, R & R. Golde (1999): "High-Pressure Conformable Hydrogen Storage for Fuel Cell Vehicles" (NREL/CP-570-26938). Proceedings of the 1999 U.S. DOE Hydrogen Program Review, Alexandria, Virginia.
- Lange, J.P. (1997): "Perspectives for Manufacturing Methanol at Fuel Value". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 36, pp. 4282-4290.
- Larson, E.D. & R.E. Katofsky (1992): "Production of Methanol and Hydrogen from Biomass" (PU/CEES Report No. 217). Princeton University, Center for Energy & Environmental Studies, Princeton, New Jersey.
- Ledjeff, K. et al (1994): "Development of Pressure Electrolyser and Fuel Cell with Polymer Electrolyte". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 19, pp. 453-455.
- Lewis, Jerry S. & Richard W. Niedzwiecki (1999): "Aircraft Technology and Its Relation to Emissions". I: "Aviation and the Global Atmosphere", IPCC, Cambridge, pp. 219-270.
- Lipman, T.E. & Mark DeLucchi (1996): "Hydrogen-fuelled Vehicles". *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 17, No. 5-6, pp. 562-589.
- Mann, M.K. (1995): "Technical and Economic Analysis of Hydrogen Production via Indirectly Heated Gasification and Pyrolysis" (CP-430-20036). Proceedings of the 1995 US DOE Hydrogen Program Review, Vol. 1. Coral Gables, Florida, 18.-21. april.
- Mann, M.K. & P.L. Spath (1997): "Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined-Cycle System". U.S. DOE, NREL, Golden, Colorado, USA.
- Mann, Margaret K. et al (1998a): "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, Alexandria, Virginia, USA, 28.-30. april.

- Mann, Margaret K. et al (1998b): "Exploring the Technical and Economic Feasibility of Producing Hydrogen from Sunlight and Wind". 12th World Hydrogen Energy Conference, Buenos Aires, Argentina, 21.-26. juni, pp. 337-346.
- Mann, Margaret K. et al (1999): "Studies on the Production and Delivery of Hydrogen from Renewable Sources" (NREL/CP-570-26938). Proceedings of the 1999 U.S. DOE Hydrogen Program Review, Golden, Colorado, USA.
- Marquevich, Maximiliano et al (1999): "Hydrogen from Biomass: Steam Reforming of Model Compounds of Fast-Pyrolysis Oil". *Energy & Fuels*, Vol. 13, pp. 1160-1166.
- Michel, F. et al (1998): "On-board Equipment for Liquid Hydrogen Vehicles". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 3, pp. 191-199.
- Mitchell, William L. (1996): "Development of Fuel Cell Processors for Transportation and Stationary Fuel Cell Systems". Arthur D. Little, Inc., Cambridge, Massachusetts.
- Mitlitsky, Fred et al. (1998): "Regenerative Fuel Cell Systems". *Energy & Fuels* Vol. 12, No. 1, pp. 56-71.
- Mitlitsky, Fred et al. (1999): "Vehicular Hydrogen Storage Using Lightweight Tanks (Regenerative Fuel Cell Systems)" (NREL/CP-570-26938). Proceedings of the 1999 U.S. DOE Hydrogen Program Review, Alexandria, Virginia.
- Molter, Trent M. (1999): "Regenerative Fuel Cell Technology and Applications". 1999 Joint Fuel Cell Technology Review Conference, Chicago, Illinois, 3.-5. august.
- Morthorst, Poul Erik mfl. (1993): "Brint som energibærer" (Risø-R-675(DA)). Forskningscenter Risø, Roskilde.
- Narayanan, S.R. (1996): "Recent Advances in High Performance Direct Methanol Fuel Cells". 1996 Fuel Cell Seminar, Atlanta, Georgia, USA, 19. november.
- National Renewable Energy Laboratory (1995): "Hydrogen Energy for Tomorrow: Advanced Hydrogen Transport and Storage Technologies". U.S. Dept. of Energy, Washington, DC.
- Ogden, Joan M. (1997): "Infrastructure for Fuel 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. (1999): "Developing an Infrastructure for Hydrogen Vehicles: a Southern California Case Study". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 24, No. 8, pp. 709-730
- Ogden, Joan M. et al (1994): "A Technical and Economic Assessment of Renewable Transportation Fuels and Technologies". Center for Energy & Environmental Studies, Princeton University, Princeton, New Jersey.
- Ogden, Joan M. et al (1999a): "Hydrogen Energy System Studies" (NREL/CP-570-26938). Proceedings of the 1999 U.S. DOE Hydrogen Program Review, Golden, Colorado, USA.
- Ogden, Joan M. et al (1999b): "A Comparison of Hydrogen, Methanol and Gasoline as Fuels for Fuel Cell Vehicles: Implications for Vehicle Design and Infrastructure Development". *Journal of Power Sources*, Vol. 79, pp. 143-168.
- Padró, C.E.G. & V. Putsche (1999): "Survey of the Economics of Hydrogen Technologies" (NREL/TP-570-27079). NREL, Department of Energy, Golden, Colorado.
- Park, C. et al (1998): "Hydrogen Storage in Graphite Nanofibers" (NREL/CP-570-25315). Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review. Alexandria, Virginia, 28.-30. april.
- Park, C. et al (1999): "Further Studies of the Interaction of Hydrogen with Graphite Nanofibers". *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 103, pp. 10553-10728.
- Peschka, W. (1992): "Liquid Hydrogen, Fuel of the Future". Springer Verlag, Wien - New York.
- Peschka, W. (1998): "Hydrogen: The Future Cryofuel in Internal Combustion Engines". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 1, pp. 27-43.
- Pohl, Hans W. & Valentin V. Malychev (1997): "Hydrogen in Future Civil Aviation". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 22, No. 10/11, pp. 1061-1069.
- Quadflieg, H (1988): "From Research to Market Application? Experience with the German Hydrogen Fuel Project". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 13, No. 6, pp. 363-374.
- Ramachandran, Ram & Raghu K. Menon (1998): "An Overview of Industrial Uses of Hydrogen". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 7, pp. 593-598.

- Ren, Xiaoming et al (1995): "On Direct and Indirect Methanol Fuel Cells for Transportation Applications". I: A.R. Landgrebe et al (red.): "Proceedings of the 1st International Symposium on Proton Conducting Membrane Fuel Cells", The Electrochemical Society, Chicago.
- Ren, Xiaoming et al (2000): "Recent Advances in Direct Methanol Fuel Cells at the Los Alamos National Laboratory". *Journal of Power Sources*, Vol. 86, No. 1-2, pp. 111-116.
- Riensch, Ernst et (1998a): "Optimization of a 200 kW SOFC Cogeneration Power Plant. Part I: Variation of Process Parameters". *Journal of Power Sources*, Vol. 73, pp. 251-256.
- Riensch, Ernst et (1998b): "Optimization of a 200 kW SOFC Cogeneration Power Plant. Part II: Variation of the Flow Sheet". *Journal of Power Sources*, Vol. 74, pp. 306-314.
- Rosen, M. A. (1995): "Energy and Exergy Analyses of Electrolytic Hydrogen Production". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 20, No. 7, pp. 547-553.
- Rocheleau, Richard et al (1996): "Photoelectrochemical Hydrogen Production". *Proceedings of the 1996 U.S. DOE Hydrogen Program Review*. Miami, Florida, 1.-2. maj.
- Ruhl, Robert C. (2000): "Low Cost Reversible Fuel Cell System". *Proceedings of the 2000 U.S. DOE Hydrogen Program Review*, Washington, DC.
- Sapru, K. mfl. (1998): "An Integrated Hydrogen Production/Storage System Based on PV/Electrolysis/Metal Hydrides for Near-Term Applications". *Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference*, Buenos Aires, Argentina, 21.-25. juni, pp. 1211-1219.
- Scherer, G.W.H. & E. Newson (1998): "Analysis of the Seasonal Storage of Hydrogen in Liquid Organic Hydrides". *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 23, No. 1, p 19-25.
- Scherer, G.W.H. et al (1999): "Economic Analysis of the Seasonal Storage of Electricity with Liquid Organic Hydrides". *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 24, No. 5, p 1157-1169.
- Scott, K. et al (1999): "Engineering Aspects of the Direct Methanol Fuel Cell System". *Journal of Power Sources*, Vol. 79, No. 1, pp. 43-59.
- Sherif, S. A. mfl. (1997): "Liquid Hydrogen: Potential, Problems, and a Proposed Research Program". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 22, No. 7, pp. 683-688.
- Shukla, A. K. et al (1998): "Direct Methanol Fuel Cells for Vehicular Applications". *Journal of Solid State Electrochemistry*, Vol. 2, No. 2, pp. 117-122.
- 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.
- Spath, P. & M. Mann (1998): "Technoeconomic Assessment of Four Biomass-to-Hydrogen Conversion Technologies". *12th World Hydrogen Energy Conference*, Buenos Aires, Argentina, 21.-26. juni, pp. 2057-2069.
- Peschka, W. (1992): "Liquid Hydrogen, Fuel of the Future". Springer Verlag, Wien - New York.
- Specht, M. et al (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, p 387-396.
- Sperling, Daniel (1995): "Future Drive. Electric Vehicles and Sustainable Transportation". University of California Press, Berkeley, Californien.
- Surampudi, S. et al (1994): "Advances in Direct Oxidation Methanol Fuel Cells". *Jep Propulsion Laboratory*, California Institute of Technology, Pasadena, Californien.
- Syed, M.T. et al (1998): "An Economic Analysis of Three Hydrogen Liquefaction Systems". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 7, pp. 565-576.
- Tachtler, J. & A. Szyszka (1994): "Car Fuelling with Liquid Hydrogen (Neunburg vorm Wald Solar Hydrogen Project: Experience and Results of First Project Phase, Concept for Second Phase)". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 19, No. 4, pp. 377-385.
- Thomas, G. et al (1999): "Hydride Development for Hydrogen Storage" (NREL/CP-570-26938). *Proceedings of the 1999 U.S. DOE Hydrogen Program Review*, Alexandria, Virginia.
- Trafikministeriet (1996): "Regeringens handlingsplan for reduktion af transportsektorens CO2-udslip". København.

- Valdez, T. et al (1997): "Direct Methanol Fuel Cell for Portable Applications". Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Vanhanen, J.P. & P.D. Lund (1995): "Computational Approaches for Improving Seasonal Storage Systems based on Hydrogen". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 20, No. 7, pp. 575-85.
- Vanhanen, J.P. et al (1996): "Feasibility Study of a Metal Hydride Hydrogen Storage for a Self-Sufficient Solar Hydrogen Energy System". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 21, No. 3, pp. 213-221.
- Vanhanen, J.P. et al (1997): "Operation Experience of a Phosphoric Acid Fuel Cell in a Solar Energy System". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 22, No. 7, pp. 707-714.
- Vanhanen, J. P. et al (1998): "Electrolyser-Metal Hydride-Fuel Cell System for Seasonal Energy Storage". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 4, pp. 267-271.
- Vanhanen, J.P. et al (1999): "Combined Hydrogen Compressing and Heat Transforming through Metal Hydrides." *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 24, No. 5, pp. 441-448.
- Vosen, S.R. & J.O. Keller (1999): "Hybrid Energy Storage Systems for Stand-Alone Electric Power Systems: Optimization of System Performance and Cost Through Control Strategies". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 24, No. 12, pp. 1139-1156.
- Watson, John (1997): "Fuel Cell Shows Promise for Zero-Emission Vehicles". *Jet Propulsion Laboratory Universe*, Vol. 27, No. 5, March 7.
- Wiese, W. et al (1999): "Methanol Steam Reforming in a Fuel Cell Drive System". *Journal of Power Sources*, Vol. 84, Issue 2, pp. 187-193.
- Wu, X.B. (2000): "Hydrogen Uptake by Carbon Nanotubes". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 25, No. 3, pp. 261-265
- Wurster, Reinhold (1997a): "PEM Fuel Cells in Stationary and Mobile Applications: infrastructural requirements, environmental benefits, efficiency advantages and economical implications". *Electric and Lighting Industry Biennial*, 29.9.-4.10., Buenos Aires, Argentina.
- Wurster, Reinhold (1997b): "Wasserstoffspeicher und Brennstoffzellensysteme für dezentralen stationären und für mobilen Einsatz". *Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH*, Ottobrunn, Tyskland.
- Wurster, Reinhold (1999): "PEM Fuel Cells in Stationary and Mobile Applications. Pathways to Commercialization". *Sixth International Technical Congress - BIEL '99*, 13.-19. september.
- Zittel, Werner & Reinhold Wurster (1996): "Wasserstoff in der Energiewirtschaft". *Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH*, Ottobrunn, Tyskland.

B. Særlig undersøgelse: Det eksisterende naturgasnets egnethed for brint

Celia Juhl og Aksel Hauge Petersen, DONG

DONG har udført 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. Her vil kun den del af undersøgelsen, der omhandler transport af ren brint, blive omtalt.

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 stålrorene 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 skærpelser på det sikkerhedsmæssige område.

B.1 Undersøgelsens vigtigste resultater

De foretagne litteraturstudier kan opdeles i:

A: Ledningsnettes egnethed for transport af brint

B: Øvrige komponenters egnethed i forbindelse med brinttransport.

Som det fremgår af nedenstående skal en lang række supplerende undersøgelser og analyser iværksættes før der kan gives et klart svar på betingelserne for, at det danske naturgassystem skal kunne transportere ren brint. Af en undersøgelse, udført af Dansk Gasteknisk Center i 1999, fremgår at brintblandinger på 5 - 10% til eksisterende naturgassystemer, har været forsøgt flere steder uden større problemer ("Brint som energibærer", DGC, November 1999). For transport af ren brint, i systemer oprindeligt udlagt for transport af naturgas, er erfaringsmaterialet dog yderst sparsomt. Det synes dog klart at ikke uvæsentlige udskiftninger af rør og komponenter vil blive nødvendige.

Langtidsafprøvninger af eksisterende naturgasnet, med tilsætning af ren brint, vil kunne besvare mange af de rejste spørgsmål. Der vil derfor som en videreførelse af nævnte litteraturstudium, blive vurderet de økonomiske og tekniske

muligheder for i EU sammenhæng (EU's 5te rammeprogram) at gennemføre et projekt med titlen: "Europæiske parallel forsøg med brintforsyning til mindre områder, via anvendelse af oprindelige naturgas systemer".

Hvad angår specielle problemstillinger som f.eks:

- Inhibitorers anvendelse for at reducerer brints på virkning af stålrør
- Permeabilitet og ældning af PE rør ved brintransport
- Odoranters anvendelse i naturgassystemer med varierende brint/naturgas blandingsforhold
-

forsøges at få optaget emnerne som forslag til eksamensprojekter, afløsningsopgaver m.v. på DTU o.a. naturvidenskabelige uddannelsesinstitutioner.

Ad A:

Stålleddninger (4 - 80 bar):

Litteraturundersøgelsen har omfattet en afdækning af den eksisterende viden for mulighederne for konvertering af naturgasledninger til ledninger, som kan transportere ren brint eller brint-naturgasblandinger.

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 kritiske 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 brintransport være nødvendigt at tage en række driftmæssige forholdsregler som nedsættelse af trykket, begrænsninger i trykudsving, straming 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.

PE ledninger (0-4bar):

De danske gasselskabers lavtryksnet (0 - 4 bar) er hovedsageligt udført af PEM-rør produceret og anlagt i perioden fra 1980 og frem til nu.

Nærværende afsnits konklusioner bygger primært på amerikanske undersøgelser, som er gennemført omkring 1980, og som alene baserer sig på laboratorieskabte testmiljøer. Når her tales om tæthed, er der tale om at undersøge såvel diffusionstab som tab igennem diverse samlinger og eventuelle utætheder. Hvad angår styrke har undersøgelserne gået ud på at afprøve materialstyrken efter de 6 måneders testperiode. Ud over litteraturstudium for nævnte amerikanske forsøg, er der rettet forespørgsel til danske leverandører af PE-rør med henblik på at indhente deres eventuelle viden og erfaring om PE-materialers egnethed til naturgas/brint-drift.

Diffusionstab

Der er foretaget diffusionsmålinger på 11 PE-rør af 3 forskellige typer fra 7 fabrikker. Målingerne viser at der diffunderer 4-5 gange mere brint end naturgas gennem rørvæggen på PE-rør. Beregninger af diffusionstab af naturgas fra 248.000 km PE-rør i USA viser imidlertid, at det udgør mindre end 0,01% af det samlede gastab i USA. Der er

foretaget undersøgelser af lækagetab fra utætte samlinger og fra lækager i selve rørmaterialet. Lækagemålingerne omfatter såvel PE-rør som støbejernsrør med de dertil hørende muffesamlinger. Konklusionen er at lækagetabet vil blive ca 3 gange større hvis man skifter fra ren naturgas til ren brint. Generelt er det dog en forudsætning for ovennævnte resultater, at her er tale om distributionssystemer, som er vedligeholdt, og at der er foretaget regelmæssige lækagesøgninger idet meget store lækager vil give forholdsvis større lækagetab ved iblanding af brint.

Materialepåvirkning, styrkemålinger

Der er foretaget styrkemålinger på 3 forskellige PE-rør fra 7 fabrikker. Målingerne er foretaget på helt nye rør, som enten har transporteret ren naturgas eller ren brint i 2 måneder. Målingerne viser, at styrken af de rør som har transporteret brint afviger mindre end 3% fra styrken af de rør af samme type og fabrikat, der har transporteret ren naturgas.

Sikkerhedsaspekter ved distribution af naturgas/brint i PE-rør

Generelt har man næsten ingen praktiske erfaringer med distribution af brint i PE-rør, men med baggrund i ovennævnte synes al mulig grund til forsigtighed. Supplerende undersøgelser må nødvendigvis udføres før der kan gives et endegyldigt svar, og det er på baggrund af den viden der findes, sandsynliggjort at der alt andet lige vil blive et større lækagetab end det kendes i dag for naturgas. Et specielt risikoområde skyldes her at eksplosionsgrænserne udvides væsentligt ved iblanding af brint, og derfor vil der være større risiko for antændelse ved lækageudslip og ved arbejde på idriftværende ledninger.

Et andet risikoområde er odoreringen, hvor det indtil videre er uklart, hvor meget brint der kan tilsættes, inden det begynder at påvirke odorantens virkning.

Anbefalinger af forhold som bør undersøges videre

Mulig sammenhæng mellem PE-materialets alder og permabilitet.

Brinttilsætnings indflydelse på odorisering.

Øvre grænse for brinttilsætning af hensyn til risikoen for antændelse ved gasudslip og driftsindgreb.

Afprøvning af brinttilsætning i et afgrænset pilotområde.

Ad B:

Komponenter

Vurderingen af eksisterende komponenters egnethed bygger ligeledes på amerikanske undersøgelser, som er gennemført omkring 1980, og som igen er baseret på laboratorieskabte testmiljøer. Her er afprøvet en række almindeligt anvendte naturgaskomponenter, som i en periode på op til 6 måneder har været udsat for naturgas/brint-blandinger i forskellige blandingsforhold og under forskellige driftstryk. Ud over litteraturstudium er rettet henvendelse til en enkelt dansk leverandør.

Forbrugsmålere og øvrige komponenter

Rent materialemæssigt er der ikke, i den relative korte tid laboratorieprøverne stod på, konstateret problemer med at anvende gængse naturgasmålere til naturgas/brint-blandinger, men afhængigt af hvor meget brint der iblandes, vil der med stigende brintmængde forholdsvis hurtigt opstå kapacitetsproblemer. Et kendt og konstant blandingsforhold er selvfølgelig en forudsætning for, at der kan foretages en korrekt forbrugsafregning, men det er derudover uklart om brinttilsætning vil medføre dårligere målenøjagtighed. Det har ikke været muligt at fremskaffe information om mulige problemer, hvad angår andre komponenter og pakningsmaterialer.

Klæbe- og smøremidler

Det eneste område hvor de gennemførte undersøgelser peger på materialeproblemer er for en ikke nærmere specificeret gruppe af klæbe- og smøremidler. Her er tale om nedsat klæbeevne for visse klæbere og ændringer af udseende og viskositet for visse smøremidler. Af mulige problemområder i det danske system kunne her i denne forbindelse være tale om "strømpe-renoverede" ledninger, hvor der indgår klæbestoffer eller om kompressorer og ventiler, hvor der benyttes smøremidler.

Konklusion

Den indsamlede viden, som er desværre er meget begrænset, peger ikke umiddelbart på større materialeproblemer på komponentsiden. De indhentede oplysninger er dog af et sådan omfang og beskaffenhed at der skal udføres supplerende analyser før et klart billede kan tegnes. Eksempelvis er påvirkningen af komponenter i M/R stationer, fittings, ventiler o.a. komponenter ikke omtalt i de nævnte undersøgelser. IGA som er dansk leverandør af målere og husregulatorer har i forbindelse med undersøgelsen oplyst, at deres produkter ikke er fremstillet til brint som energibærere, og at de derfor ikke kan give nogen garantier. Men IGA er bekendt med at produkter fra American Meter bliver anvendt, hvor brint er energibærere, og er villige til at gå ind i en mere detaljeret behandling af spørgsmålet, hvis et specifikt projekt bliver aktuelt.

Anbefalinger af forhold som bør undersøges videre

Mulig sammenhæng mellem alder af diverse materialer der indgår i forskellige komponenter og deres funktionalitet og tæthed ved brinttilsætning.

Måleres målenøjagtighed ved brinttilsætning.

En analyse af hvilke klæbe- og smøremidler der benyttes i det danske distributionssystem og en afprøvning af deres egnethed til brintdistribution.

Afprøvning af brinttilsætning i et afgrænset pilotområde, hvor de forskellige komponenttyper er repræsenteret.

Litteraturliste: se nedenfor.

B.2 Brint som energibærer: metalliske materialer og lagre.

Celia Juhl, DONG A/S

Dette afsnit består af to dele, hvor beskrivelsen af det danske naturgassystem i afsnit B.2.2 er en forudsætning for forståelse af analysen vedrørende mulighederne for at transportere brint i stålledninger i afsnit B.2.3. Sidstnævnte beskriver den eksisterende viden om virkningen af metan-brintblandinger og af ren brint på stål samt forskellige overvejelser, som er refereret i litteraturen.

B.2.1 Indledning og konklusion

Bygas, som indeholder ca. 50 % brint, er blevet transporteret i støbejernsledninger i ca. 100 år og ren brint i stålledninger i de sidste 50 år. I dag anvendes mere end 1000 km stålledning til transport af brint [1, 2, 3], og heraf har enkelte, mindre ledninger tidligere været anvendt til naturgas [4]. Frankrig og England har desuden erfaring med lagring af bygas og brint i kaverner og udtjente naturgasfelter [3, 5]. Selv om brintledninger således har været anvendt i mange år, eksisterer der ikke noget officielt anerkendt regelsæt, som kan anvendes ved konstruktion og drift af rørledninger til brint eller blandinger af naturgas og brint. I mangel af sådanne anvendes de eksisterende standarder for naturgas, f.eks. den amerikanske ANSI B31.8 [6] eller den canadiske CSA Z184 [7], suppleret med krav, der tager højde for de specielle risici ved brint. Enkelte gasselskaber har desuden udviklet deres egne specifikationer for transportledninger til brint [1, 4].

Alle stål er i større eller mindre grad følsomme overfor brintindtrængning, og så godt som alle mekaniske egenskaber, som måles ved laborietests, udviser forringede værdier, når stålet udsættes for brint. Trækstyrken for kulstofstål påvirkes f.eks. kun lidt, medens sejhed og udmattelse, som har væsentlig betydning for transmissionsledninger, påvirkes meget.

Allerede ved planlægningen af det danske naturgasnet blev det undersøgt, om transmissionsnettet kunne bygges, så det senere, når naturgasressourcerne var opbrugte, kunne anvendes til transport af brint. Overvejelserne vedrørende valg af stål til rørledningerne er behandlet i en rapport fra Risø [8], men anbefalingerne blev ikke fulgt, da det ville betyde en væsentlig fordyrelse af projektet.

Med ca. 10 års mellemrum genopstår diskussionen i faglitteraturen om risiko for brintskader i stål ved en eventuel konvertering af naturgasanlæg til anlæg med brint eller brint-metanblandinger. I den sidste bølge af diskussioner har vicepræsidenten for forskning ved Worldwatch Institute, Washington, D.C. udtalt [9] at: "According to our estimates, the world will need to begin the transition [fra naturgas til brint] by 2010 at the latest, before the use of natural gas peaks, and the shift will likely accelerate the next 2 decades", og han konkluderer: "During the transition, hydrogen can be mixed with methane in concentrations of up to 15% without altering today's gas pipelines, furnaces, or burners".

I forbindelse med udarbejdelsen af dette delnotat er en del af den nyere litteratur blevet gennemgået. Kun litteratur, som er nyere end ca. 1980 indgår, selv om der eksisterer store mængder især ældre amerikansk litteratur om emnet. Grunden til dette valg er, at hovedparten af den ældre litteratur fokuserer på trykbeholdere, som fremstilles af stål med højere styrke eller af højere legerede stål end gasledninger, og at disse resultater/erfaringer ikke umiddelbart kan overføres til gasledninger.

Litteraturundersøgelsen viser, at man endnu ikke kan konkludere, om det er muligt at konvertere til brint, da det endnu ikke er prøvet under driftforhold, der svarer til naturgas, og da der endnu er en række forhold, der ikke er undersøgt til bunds. Efter overvejelser vedrørende det danske naturgasnet vil det dog på nuværende tidspunkt være rimeligt at konkludere følgende:

Iblanding af små mængder brint (op til ca. 10%) vil ikke give materialemæssige problemer for stålledningerne eller væsentlige driftmæssige begrænsninger i forhold til den nuværende praksis i Danmark for transport af naturgas.

Ved større brinttilsætninger eller ved drift med ren brint anbefales følgende:

Rørmaterialernes og svejsesømmenes brudmekaniske egenskaber bør bestemmes under brintpåvirkning. På basis heraf er det muligt at beregne en kritisk fejlstørrelse for en given rørstrækning, idet man tager hensyn til de aktuelle forhold.

Størrelsen af eksisterende fejl bør måles med stor nøjagtighed vha. intelligent pigs, og de målte fejlstørrelser sammenholdes med den beregnede kritiske fejlstørrelse for at se, om der er risiko for at fejlene vokser. De eksisterende pigs er endnu ikke tilstrækkelig følsomme, men udviklingen går hurtigt i disse år.

Mulighederne og begrænsningerne ved inhibitortilsætning skal fastlægges, dels ved laboratorieforsøg, dels ved fuldskala forsøg. Sådanne undersøgelser forventes at komme til at foregå i udlandet.

Sikkerhedsfaktorer for drift af rørledninger med brint skal fastlægges. Dette forventes at ske i (samarbejde med) udlandet.

Praktiske erfaringer med konvertering til og drift af rene brint- og metan-brintledninger bør indhentes på en delstrækning inden hele det danske naturgasnet involveres.

Der må forventes at skulle tages forskellige driftmæssige forholdsregler som sænkning af trykket i transmissionsledningerne, begrænsninger i trykudsving mm, ligesom sikkerhedsprocedurer og omfang af kontrol for utætheder og skader vil skulle fastlægges.

Udviklingen i udlandet bør følges nøje på alle relevante områder.

B.2.2 Opbygningen af det danske naturgassystem

Kun naturgassystemet nedstrøms relativt til behandlingsanlægget i Nybro vil blive beskrevet her. Al gas fra Nordsøen modtages på Nybro gasbehandlingsanlæg, og trykket reduceres fra ca. 130 bar gauge til 80 bar gauge og om nødvendigt fjernes vand og tungere kulbrinter. I Nybro findes udstyr til reduktion af H_2S indholdet, men indtil videre sker reduktionen på platform.

Det danske naturgassystem er anlagt efter 1980 og består af transmissions-, fordelings- og distributionsnettene samt to gaslagre. Det skal bemærkes, at der internationalt er uoverensstemmelse i terminologien vedrørende betegnelserne for fordelings- og distributionsnet; således slår den amerikanske GPTC Guide [10] de to net sammen under betegnelsen distributionsnet. Det danske distributionssystem er så godt som udelukkende opbygget af plast, og vil derfor blive beskrevet i en anden rapportdel.

Som buffer mellem produktion og forbrug af naturgas anvender DONG i dag dels to undergrundslagre, dels line pack, dvs. at trykket i ledningerne er højt i perioder, hvor forbruget er lavt og visa versa. Det ene lager er et kavernelager, som er udskyllet i en saltformation, medens det andet er et akviferlager.

Generelt ligger trykket i transmissionsnettet mellem 50 og 80 barg, i fordelingsnettet mellem 19 og 50 barg og i distributionsnettet mellem 0,002 og 4 barg. Trykreduktion mellem de forskellige net sker på måler og regulator (M/R) stationer. Inden trykreduktion opvarmes naturgassen vha. kedelanlæg for at kompensere for temperaturfaldet, der opstår pga. Joule-Thomson effekten.

Naturgas består af metan og mindre mængder af højere kulbrinter. Desuden indeholder den forskellige urenheder, hvoraf kuldioxid og svovlbrinte og andre svovlholdige komponenter har væsentlig betydning for korrosion, hvis gassen er fugtig eller våd. Kontrakterne begrænser indholdet af kuldioxid i gas, leveret til nettet, til 4 vol %, men indholdet har endnu ikke været højere end 2,5 %. Ifølge reglerne (DVGW-Arbejdsblatt G 260 [11]) må gas af salgskvalitet, dvs. efter behandling, maksimalt indeholde 5 mg/m³ H_2S , medens der ikke er krav til CO_2 indholdet. En rørledning eller beholder af stål, som indeholder fugtig naturgas med en given sammensætning, vil have en højere korrosionshastighed jo højere trykket er, fordi hastigheden er afhængig af deltrykkene (partialtrykkene) for kuldioxid og svovlbrinte. For at undgå korrosion i transmissions- og fordelingsnettet tørres gassen på Nybro anlægget.

Naturgassystemet kan inddeles efter det miljø, som hersker indvendigt i rør og anlæg. En del af systemet er designet til gas, der kan indeholde svovlbrinte (H_2S) og andre svovlholdige komponenter i en koncentration over en vis grænse, såkaldt "sour" gas. Rørstål til "sour service" skal være af særlig god kvalitet for at kunne modstå revnedannelse, som opstår, fordi H_2S fremmer brintindtrængning i stålstrukturen. Jo højere koncentrationen samtidig er af CO_2 , jo større bliver brintindtrængningen. Rørledninger opstrøms gasbehandlingsanlægget i Nybro og procesanlægget i forbindelse med akviferlageret i Stenlille er designet for "sour service".

Resten af naturgassystemet er designet til såkaldt "sweet service", dvs. til gas med et lavt indhold af svovlbrinte og andre svovlholdige komponenter. "Sweet gas" kan være aggressiv, hvis den indeholder CO_2 og fugt/vand, men i modsætning til H_2S -korrosion sker korrosionen som en reduktion af godstykkelsen og ikke som revnedannelse. Procesanlægget i forbindelse med kavernelageret i Ll. Torup er beregnet for "sweet service". Der samme gælder hele transmissions- og fordelingsnettet nedstrøms Nybroanlægget.

Som nævnt tørres naturgassen på Nybro anlægget, og der er derfor ikke risiko for indvendig korrosion af transmissions- eller fordelingsnetterne. På anlæggene i forbindelse med gaslagrene må man derimod regne med periodevis

tilstedeværelse af vand, fordi gassen fugtes under lagringen. I kavernelageret drejer det sig om restvand fra udskylningen, og fugtindholdet bliver derfor mindre med tiden, efterhånden som kavernen udtørres. I akviferlageret vil gassen altid være i kontakt med vand, og afhængig af driftforholdene vil vand i perioder blive medproduceret. Der tilsættes derfor en korrosionsinhibitor, som nedsætter eller hindrer korrosion i procesanlægget. Inden gassen sendes ud i transmissionsnettet tørres den.

Godstykkelsen for transmissionsrørene er bl.a. fastlagt på basis af en klassifikation af de enkelte rørledningsstrækninger ud fra bebyggelsesgraden i overensstemmelse med GPTC Guiden. Der er fire kategorier med designfaktorer fra 0,4 for de tættest bebyggede områder til 0,72 for de tyndest bebyggede områder. En lav designfaktor giver større godstykkelse og dermed øget sikkerhed mod brud i tættere bebyggede områder. Derudover ligger der en lille ekstra sikkerhed i, at man vælger den nærmeste højere standardstørrelse rør. Rør, der kan være udsat for korrosion, får desuden et korrosionstillæg, som varierer efter forholdene.

Der tages ikke højde for bebyggelsesgraden ved anlæg af fordelingsnettet. Ved beregning af godstykkelsen anvendes i stedet en lav designfaktor på 0,2, hvorved godstykkelsen bliver relativt større end for transmissionsledninger.

Normale trykvariationer pga. line pack har i Danmark været forholdsvis små ($< \pm 10\%$) med en typisk frekvens på et udsving pr døgn. Dertil kommer lejlighedsvis store trykudsving i f.m. planlagte eller ikke planlagte shutdowns. Den lavfrekvente belastning af naturgasledninger i forbindelse med line pack har en størrelse, som erfaringsmæssigt ikke giver anledning til udmattelsesbrud i naturgasledningernes levetid.

Temperaturudsvingene er forholdsvis små for nedgravede rørledninger (3-8°C). De højeste temperaturer opstår i f.m. gaslagring, dels i lagrene (ca. 40°C), dels efter kompressorerne pga. trykstigning (Joule-Thomson effekten) (ca. 50°C).

Naturgas tilsættes et lugtstof (odorant) på M/R stationerne ved overgangen mellem transmissions- og fordelingsnettet. Odoranten THT (tetrahydrothiophen), som hidtil er blevet anvendt, indeholder stærkt lugtende svovlforbindelser. Der er for nylig gjort forsøg med at erstatte THT med et nyt stof, som reducerer udledningen af SO₂ fra forbrænding af naturgas til en tredjedel.

Internationale statistikker viser, at den største risiko for en væsentlig gaslækage skyldes pågravning (tredjeparts skade). Den sikreste metode til at påvise skader, som kan udvikle sig til en lækage i en rørledning er at sende "intelligent pigs" igennem ledningerne. Disse kan detektere områder på et rør, hvor der optræder formindsket godstykkelse f.eks. som følge af en mekanisk skade eller korrosion, eller hvor der er revner. Der er to typer intelligent pigs på markedet, en magnetic flux leakage pig og en ultralyd pig. De har hver deres styrke og begrænsning, men for begge gælder, at de endnu ikke i tilstrækkelig grad er udviklet til at påvise langsgående revner i gasrør under drift. Der arbejdes intenst med udviklingen af sådanne pigs, da mange olie- og gasselskaber har problemer med langsgående revner udvendigt på rørene. En anvendelig pig ventes på markedet om få år.

DONG har undersøgt alle transmissionsledninger med intelligent pigs og har dermed grundlag for at vurdere eventuelle ændringer i godstykkelsen, der måtte opstå senere pga. korrosion eller mekaniske skader. Alle indikationer, der kunne tyde på uregelmæssigheder, har været undersøgt ved opgravning og er om nødvendigt repareret. Der er intet, der tyder på, at DONG kan have problemer med udvendige, langsgående revner.

Intelligent pig undersøgelser er kun mulige for en lille del af fordelingsnettet, fordi mange rør har for lille diameter eller for skarpe bøjninger. Kun en lille del af fordelingsnettet er undersøgt med intelligent pigs.

Der foretages rutinemæssige patruljeringer langs naturgasledningerne pr. fod, bil og helikopter for at afsløre ikke-anmeldte, igangværende anlægsarbejde og andre potentielle årsager til gasudslip og antændelse. Standardfrekvensen for de forskellige typer af patruljeringer er fastlagt i den amerikanske GPTC Guide.

Der er gennemført en risikovurdering af hele transmissionsnettet. Vurderingen er baseret på statistiske data, dels for risikoen for at et ledningsbrud kan ske, dels for konsekvenserne for de mennesker, der befinder sig i nærheden af bruddet. Der er ikke fundet områder med uacceptabel risiko, men dog områder med forhøjet risiko.

I risikoområder kan transmissionsledninger sikres mod tredieparts skader på forskellig måde: ved at de graves længere ned end den normalt krævede 1 meter, ved at de dækkes af beton eller stålplader, ved at der vælges en større godstykkelse end trykket kræver eller ved at trykket nedsættes.

Gasselskaberne har en mangeårig erfaring med udførelse af risikobetonede aktiviteter med naturgas. Der findes således almindeligt anerkendte sikkerhedsprocedurer for f.eks. udskylning af systemer, fyldning med gas, shutdown og hot-tapping (svejsning på gasfyldte rør).

B.2.2.1 Typer af rør

I transmissions- og fordelingsnettet anvendes stål rør med flydespændinger mellem 240 MPa (API 5L grade B) og 480 MPa (API 5L grade X70). Til de store transmissionsrør er anvendt 30" rør i X70 stål. Tendensen for transmissionsledninger går mod anvendelsen af stål med højere styrke, samt drift ved højere tryk og højere udnyttelse af

stålets flydespænding. Det må indenfor en relativ kort årrække også forventes at blive tilfældet i Danmark ved nyanlæg af store naturgasledninger.

Stålrørene i både transmissions- og fordelingsnettet er fremstillet af kulstof-mangan stål, og de tilhører den nye generation af rør, hvor man har lagt vægt på styrke, sejhed, svejsbarhed og kvalitet. Specielt er der sket en stor udvikling for højstyrkestålene, men for alle europæiske rørstål gælder, at stålet er renere og mere ensartet end tidligere. Stålene er enten normaliserede eller thermomekanisk valsedede (thermomechanically controlled rolled, TMCR). Ved thermomekanisk behandling opnås høj flydespænding og høj sejhed. Rørene fremstilles af plade ved at svejse langs en frembringer vha. pulversvejsning eller modstandssvejsning, eller svejse i spiral vha. pulversvejsning. Desuden kan rør fremstilles sømløse. Sømløse rør anvendes som procesrør på gasbehandlingsanlæg.

Selv om moderne rør generelt er af god kvalitet, kan der være en vis spredning mellem de forskellige typer og fra værk til værk for samme type. Kvaliteten er mest ensartet for pulversvejste rør med langsøm. Hovedparten af de store transmissionsrør er af denne type.

Den højeste stålstyrke, som er anvendt til "sour service" i Danmark er 445 MPa (X65), men i de seneste år er der lagt 480 MPa (X70) rørledninger i udlandet.

Hvis en ledning til naturgas har for lav sejhed, kan en skade eller en fejl udløse et brud, der i uheldige tilfælde lukker ledningen op over flere kilometer. Det katastrofale forløb for sådanne ustabile, seje brud skyldes, at aflastning af naturgastrykket ved revnen sker så langsomt, at spændingen ved revnespidsen er tilstrækkelig til at opretholde revnevækst ved høj hastighed. Sejheden for de moderne rørstål, som er anvendt i Danmark, er tilstrækkelig til at sikre mod sådanne lange løbende revner i naturgasledninger.

Foruden rørene indgår diverse fittings, flanger, ventiler mm. Fittings er normalt svejst op af rør, mens flanger og ventiler er fremstillet af stålstøbegods. Ved indkøb af sådanne komponenter specificeres om de skal bruges til "sweet" eller "sour" service.

Indersiden af transmissionsledningerne, med undtagelse af svejsesamlingerne, er sandblæst og behandlet med tyndt lag epoxy. Formålet med epoxylaget er at mindske rustdannelse i anlægsperioden for dermed at opnå glattere røroverflade med lavere friktion under gas-transporten. Laget er ikke tykt nok og ikke tæt nok til at hindre korrosion under drift.

I anlægsperioden kan dannes rust på røriundersiden, hvor der ikke er epoxy. Rusten kan senere omdannes til jensulfid pga. gassens indhold af H₂S.

Rørledninger af stål, som ligger i jord eller vand er udvendigt beskyttet vha. en coating og katodisk beskyttelse. Ved katodisk beskyttelse udvikles brint på ståloverfladen, og ydersiden af rørene udsættes derfor for en vis brintbelastning; jo mere negativt potentialet er, jo mere brint udvikles. For ikke at skade rørene holdes potentialet indenfor et passende interval.

B.2.2.2 Svejsning af rør

Nedgravede ledninger er samlet ved svejsning. Flangesamlinger anvendes kun over jord på M/R stationer og gasbehandlingsanlæg, hvor de kan efterses.

Nedgravede rørledninger er indtil for nylig samlet ved manuel elektrodesvejsning med celluloseelektroder og kritiske svejsninger med basiske elektroder. Som noget nyt i Danmark er en enkelt transmissionsledning (opstrøms Nybro gasbehandlingsanlæg) svejst med automatiseret udstyr. Fordelen er, at når udstyret er korrekt indstillet, bliver kvaliteten ensartet og god. Det må forventes, at større ledninger i fremtiden vil blive svejst ved anvendelse af svejseautomater.

Svejsning af gasrørledninger sker efter procedurer, som er afprøvede, så man sikrer, at kravene til forskellige mekaniske egenskaber er opfyldt, og at der ikke er tilbøjelighed til dannelse af farlige fejl under svejsningen. Der er udarbejdet procedurer for de forskellige svejsemetoder og for forskellige stålstyrker og rørdimensioner.

Svejsprocedurerne egnet afprøves ved forskellige destruktive og ikke-destruktive undersøgelser. Oprindeligt blev der ikke stillet krav til sejheden for rundsømmene, idet påvirkningen i aksial retning i en rørledning, som må betragtes som fastspændt, når den ligger i jord, normalt er lav. Siden er svejsninger reproduceret efter alle de svejsprocedurer, der er anvendt på transmissionsnettet, og det er konstateret, at sejheden (målt som slagsejhed) er tilfredsstillende.

Der stilles større krav til svejsninger i en "sour" gasledning end i en "sweet" gasledning. Hårdheden må således lokalt i svejsesømmen ikke overstige 250 Vickers hårdheder (HV 10), mens den for "sweet" gas ledninger må være op til 350 HV10. Det skal dog nævnes, at der i de senere år har været en tendens til at slække på kravene til hårdhed i "sour service". Den seneste udgave af British Standard, BS 4515 [12] tillader således hårdheder op til 300 HV10, afhængig af godstykkelsen.

Lokalt høje hårdheder kan opstå på røret under fabrikation. Ved senere svejsning af rundsømme kan de opstå som følge af strukturændringer pga. varmepåvirkningen under svejsningen, eller fordi svejseren tænder lysbuen på rørvæggen

(tændsår). Også påsvejsning af kabler til katodisk beskyttelse kan give høje hårdheder, hvis der anvendes termitsvejsning.

Enhver svejsning indeholder fejl som slagger, hulrum, små revner, bindingsfejl, rodfejl, mangelfuld indtrængning, kærve mm. Ved overholdelse af relevante standarders krav til mængde og udbredelse af fejl, som kan konstateres vha. røntgen, har man erfaring for, at rørledninger er egnede til transport af naturgas, selv om svejsesømmen indeholder fejl. Dette kaldes workmanship kriteriet. Hele transmissions- og fordelingssystemet er anlagt efter workmanship kriteriet.

Ved workmanship kriteriet kontrolleres svejsningerne typisk ved 100% røntgenkontrol plus 10% manual ultralydkontrol. Ultralydundersøgelse bruges kun som stikprøvekontrol, selv om metoden er bedre egnet end røntgenundersøgelse til at finde kritiske fejl som revner og revnelignende fejl. Når ultralydundersøgelse ikke har været den primære metode skyldes det, at metoden tidligere har været for langsom, for operatørafhængig og ikke har kunnet dokumenteres.

Det er ved anlæg af transmissionsledninger i de sidste år blevet almindeligt at anvende et brudmekanisk kriterium (fitness-for-purpose princippet). Ved dette fastlægges de kritiske fejlstørrelser i rørledningen på baggrund af beregninger for det aktuelle stål under hensyntagen til alle de forhold, som rørledningen kommer ud for såvel under anlæg som drift. De tilladelige fejlstørrelser udtrykkes som længde og højde og kan kun fastlægges nøjagtigt vha. ultralydmålinger. DONGs nyeste rørledning (Syd Arne-Nybro ledningen) er undersøgt vha. automatiseret ultralydudstyr under anvendelse af brudmekaniske kriterier. Fordelen ved metoden er, at der er væsentlig større sikkerhed for at kritiske fejl opdages, samtidig med at man ofte kan tillade større fejl end ved workmanship kriteriet. Derved kan man undgå at foretage unødvendige reparationer, som i øvrigt materialemæssigt ofte skader mere end de gavner.

Udover svejsekontrol bliver rørledninger trykprøvet, hvor hovedformålet er at få ledningen til at sætte sig og at fjerne restspændinger. Især for lavstyrkestål sker en lokal deformation, som kan være en fordel, fordi skarpe kærve afrundes og dermed bliver mindre farlige. Efter trykprøvningen foretages en tæthedsprøvning. De to test tilsammen giver en vis sikkerhed for, at der ikke er alvorlige svejsefejl, som er overset.

B.2.3 Virkningen af brint på rørledningsstål

Brint på atomar form (H) kan absorberes i stål. Hvis enten brintkoncentrationen i stålet eller hastigheden for brintindtrængning i stålet overskrider en for stålet kritisk grænse, vil stålet revne. Risikoen for revnedannelse er størst, hvis brinten dannes på ståloverfladen. Det skyldes, at brint dannes som atomer, som kan eksistere en vis tid afhængig af forholdene. Hvis der er H_2S tilstede, bliver levetiden for atomerne længere og muligheden for absorption dermed større.

Ren brint som luftart består næsten udelukkende af brintmolekyler (H_2), dvs. af to atomer, der er bundet sammen, og absorption sker derfor kun i meget lille grad og uden skadelig virkning ved normale driftforhold for ledninger.

Brintgas kan dog skade rørledningsstål:

- hvis gassen indeholder en kritisk mængde H_2S
- hvis stålet deformeres plastisk.
- hvis gassen er varm (f.eks. procesgas) eller stålet er varmt (f.eks. pga. svejsning).
- hvis der dannes en katalytisk virksom film på ståloverfladen [13]
- og muligvis også ved ekstremt højt brintrtryk.

De 2 (3) første punkter er de vigtigste.

Virkningen af brintatomer, der er trængt ind i stål er den samme, uanset hvad årsagen til indtrængningen er. Virkningen kan konstateres ved rutinemåling af de mekaniske egenskaber (f.eks. styrke, sejhed, etc.) under brintbelastning, men bør undersøges vha. brudmekaniske målinger herunder udmattelsesmålinger.

Til sammenligning kan nævnes at naturgasledningledninger, som ikke tilsættes brint, kan revne pga. dannelse og indtrængning af brint under følgende forhold:

Indvendig korrosion under dannelse af H-atomer (relativ lavt pH, f.eks. pga. CO_2) og samtidig et vist indhold af H_2S , dvs. "sour service". Det kan, afhængigt af betingelserne, resultere i to hovedtyper af brintrevner: Hydrogen Induced Cracking (HIC) eller Sulfide Stress Cracking (SSC). Disse klassiske brintskader er årsagen til, at der ved et kritisk indhold af H_2S vælges særlig rent og resistent stål (stål til sour service). En del litteratur fremfører, at følsomheden overfor SSC stiger væsentligt med stigende styrke for stålet. Det er imidlertid en generalisering, der ikke gælder for rørledningsstål. [14] angiver således, at stål med flydespændinger op til max. 600 MPa ikke udviser speciel høj følsomhed. (X80 ~ 550 MPa).

Overdreven katodisk beskyttelse af rørets udvendige side, hvorved der dannes H-atomer. Brinten fra katodisk beskyttelse er farlig, hvis røret samtidig deformeres plastisk, f.eks. ved en trykstigning [15]. Der findes ikke noget stål, der er resistent overfor denne ikke-klassiske type brintskade.

Hvis naturgassen i en rørledning har et kritisk indhold af H₂S, og der tilsættes brint, er indvendig korrosion ikke nødvendig for, at der kan opstå klassiske brintskader fra indersiden. Der bør ved kritiske værdier af H₂S, pH og brintpartialtryk vælges resistent stål. Der er også risiko for ikke-klassiske brintrevner ved overdreven katodisk beskyttelse hvis ledningen deformeres plastisk.

Hvis rørledningen derimod indeholder ren H-gas, er der ikke risiko for at de to klassiske typer brintskader kan opstå, og der er dermed ingen speciel fordel ved at anvende "sour service" stål. De ståltypen, som er anvendt til det danske transmissionssystem er derfor i princippet egnede. Det må dog undersøges, om det porøse lag af jernsulfid, som er dannet af rust fra anlægstiden (jfr. s. 8) kan virke som promotor.

Der kan i ren brint være en risiko for at den ikke-klassiske brintskadetype kan opstå indvendigt i en rørledning ved plastisk deformation.

B.2.3.1 Revnedannelse ved tilstedeværelse af H₂S

Brintatomer, som er trængt ind i stålet, kan diffundere i og igennem stålveggen via fejlsteder i atomgitteret. Når brintindtrængningen starter, vil en del af brintatomerne blive fanget i gitteret, idet de placerer sig ved gitterfejl og i områder, som er under trækspænding. Desuden kan brintatomerne placere sig i hulrum omkring forskellige partikler (f.eks. mangansulfid inclusioner). Efterhånden som stålet bliver mættet, kan man måle stigende brinttransport gennem stålet.

SSC revner kan optræde, når brintkoncentrationen i stålet og den lokale trækspænding når op på en kritisk værdi, der er afhængig af stålets struktur. HIC revner skyldes brintatomer, der diffunderer til hulrummene omkring urenheder i stålet f.eks. mangansulfidpartikler, hvor de kombinerer til brintmolekyler under dannelse af høje tryk. Hvis stålet indeholder mange flade mangansulfidpartikler, kan små revner mellem partiklerne og stålet vokse sammen og danne større revner (trinrevner).

B.2.3.2 Revnedannelse ved plastisk deformation, uden tilstedeværelse af promotorer

Brintatomer kan trænge ind i en ståloverflade og give ikke-klassiske revner, uden at der er H₂S tilstede, hvis stålet udsættes for en langsom plastisk deformation af en kritisk hastighed. Rørledninger drives ved så lavt tryk, at de ikke deformeres, men f.eks. ved tryksvingninger sker der en deformation i lille skala i bunden af eksisterende kærve og ujævnheder i overfladen. Ved deformationen dannes ny, nøgen, aktiv ståloverflade, som kan absorbere eksisterende brintatomer, ligesom brintmolekyler kan spaltes til atomer (dissociere) og derefter absorberes [13, 16, 17] og give revner. Revnerne vokser kun under trykstigning, og altså ikke når trykket falder i forbindelse med tryksvingninger. En vis udnyttelse af line pack og shut-downs udgør ikke nogen risiko for naturgasledninger forudsat, at ledningen ikke udsættes for overdreven katodisk beskyttelse, men kan være katastrofal for brintledninger ved små fejl i stålet (kærve, revner) [18]. Risikoen er størst, hvis ståloverfladen er ren [16]. Det er derfor en fordel med et lag glødeskal eller rust på ståloverfladen.

B.2.3.3 Metoder til at hindre brintskader i brintholdige ledninger

Ovenfor er kun nævnt H₂S som promotor, men også andre komponenter i gassen har tilsvarende virkning, om end i mindre grad. [14, 16, 19] angiver således, at CO₂ virker fremmede på brintindtrængning og revnevækst i stål og [18] antager, at odorant, som indeholder svovlforbindelser kan have tilsvarende virkning. En nedsættelse af CO₂ indholdet og en ændring af odoranttypen kan dermed mindske risikoen for skader.

Hvis et anlæg er designet til "sour service", vil det have forbedret resistens overfor de klassiske brintskader.

Laboratorieundersøgelser har vist, at brintindtrængning i stål kan inhiberes ved tilsætning af små mængder ilt og i mindre grad ved tilsætning af CO og SO₂ [13, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22]. Virkningen af inhibitorerne skulle ifølge [15, 18] kunne forklares ved, at de adsorberer til ståloverfladen og derved blokerer for adsorption af brintatomer. Ilt er den inhibitor, der synes mest realistisk til praktisk brug. Ilt i våd/fugtig naturgas giver korrosion, men ikke når gassen er tør, som den er i transmissions- og fordelingsledningerne. Der vil dog kunne ske en vis korrosion, når iltholdig naturgas pumpes ned i Stenlille lageret, fordi gassen her kommer i kontakt

[21] angiver, at iblanding af 10⁻³-10⁻² vol % ilt i ren brint virker inhiberende, medens [14] angiver, at et iltindhold på 0,1 vol % i ren brint giver en 90% inhibering overfor brint-indtrængning. Da et indhold af CO₂ i naturgas også virker fremmede på brintindtrængning skal der sandsynligvis tilsættes mere ilt til en naturgas-brintblanding end svarende til partialtrykket af brint. Andre forsøg [20] har vist, at tilsætning af 1 vol % atmosfærisk luft virker inhiberende på en

naturgas-brintblanding med 10 vol % brint ved 70 bar. I ren brint ved 70 bar var en tilsætning på 1 vol % luft derimod ikke tilstrækkelig.

Man forventer, at inhibering også vil kunne hindre revnevækst pga. line pack [18], men referencen anbefaler alligevel, at der med jævne mellemrum foretages undersøgelse for revner.

Epoylaget på indersiden af transmissionsrørene har ingen beskyttende virkning overfor brintskader, da det ligesom alle plast og andre organiske malingstyper er permeabelt for gasarter, og derfor ikke har nogen barrierevirkning.

B.2.4 Erfaringer med, og anbefalinger vedrørende konvertering af naturgasanlæg til brint

Indtil nu er kun korte naturgasledninger med lille diameter og til relativt lavt tryk blevet konverteret til brint. Erfaringerne med konvertering er derfor små, men til gengæld er der mange overvejelser om mulighederne for konvertering [22, 23]. Følgende kan uddrages af litteraturen:

- Et korttidsforsøg på 6 måneder har vist, at stålør ved tryk mindre end 4 bar ikke blev skadet ved drift med ren brint [24]. Da brintens partialtryk er afgørende for om revner dannes, vil man sandsynligvis kunne konkludere, at den del af nettet (fordelingsnettet), som har et tryk på max. 40 barg, vil kunne tåle en tilsætning på 10 % brint til naturgassen, hvis indholdet af H₂S er lavt.
- Reference [22] anbefaler at det maksimale tilladelige tryk i ledningen reduceres til 70% eller mindre af naturgastrykket ved overgang til brint, fordi de mekaniske egenskaber er dårligere ved brintpåvirkning. Samtidig erkendes, at tallet er noget arbitrært.
- Da brint har en lav molekylvægt og en evne til hurtigt at blande sig med luft, skal en tændkilde være placeret meget tæt på et brintudslip, for at der sker antændelse. Da antændelsesområdet for brint imidlertid er meget stort (4-75 vol % i luft), og antændelsesenergien er meget lav (0,02 mJ ved 25 C), vil en gnist kunne give antændelse, hvis den opstår i nærheden. Dette har betydning for de aktiviteter, som af sikkerhedsmæssige årsager kan tillades i nærheden af ledningen. Ved iblanding af brint i naturgas skal patruljeringsfrekvensen mindst opfylde kravene i GPTC Guiden og sandsynligvis skærpes [22], ligesom ekstra sikring mod tredieparts skader må overvejes for de tætbebyggede områder, som DONG ved risikovurdering har identificeret som havende forhøjet risiko. Det kunne f.eks. være et alarmsystem svarende til det, der er anvendt på visse strækninger af en brintledning i Houston området. Her har man lagt en alarmtråd ca. en halv meter over ledningen. Hvis alarmtråden rives over lyder en alarm i kontrol centeret.
- Som nævnt tidligere (s. 8), kan der for naturgasledninger være risiko for lange løbende seje brud, hvis stålets sejhed er relativ lav. Det er der derimod ikke risiko for i brint, hvis blot stålet har en sejhed, som kan hindre sprøde brud. Det skyldes, at aflastningen af brinttrykket ved revnespidsen sker med væsentlig større hastighed end ved naturgas.
- Revner, revnelignende fejl og korrosionsangreb vil kunne nedsætte levetiden væsentligt for rørledninger, der indeholder brint, hvis de er udsat for langsom svingende belastning pga. line pack. Især langsgående revner kan være farlige, men disse er stadig vanskelige at påvise vha. intelligent pigs. Mulighederne forbedres dog år for år. For at begrænse risikoen for skader anbefaler [22, 23], at trykudsvingene holdes så lave som muligt og at antallet af cykler/år reduceres mest muligt.
- Flere amerikanske referencer angiver, at hard spots og tændsår (ydersiden af røret) på samme måde kan udgøre en risiko ved trykudsvingninger. Risikoen er imidlertid ikke større end for naturgasledninger, fordi brinten i begge tilfælde stammer fra den katodiske beskyttelse.
- Hverken fabriksvejsninger til fremstilling af rør eller feltsvejsninger til samling af rør har været genstand for systematiske undersøgelser under brintpåvirkning og man kan derfor ikke være sikker på, at workmanship kriteriet for fejl i svejsninger i rørledninger til naturgas er tilstrækkeligt for ledninger til brint. Man bør derfor vurdere de enkelte strækninger [5, 22] Der bør anvendes brudmekaniske undersøgelser og de kritiske fejlstørrelser bør fastlægges.
- Set i lyset af at det en gang kan blive nødvendigt at transportere brint i naturgasledningerne, kan det være uheldigt, at tendensen går mod bedømmelse af svejsekvaliteten ud fra et brudmekanisk kriterium, hvis man undlader at reparere relativt store fejl, fordi man ved en fitness-for-purpose vurdering kan vise at de ikke vokser, når ledningen anvendes til naturgas.
- Det vil være nødvendigt at udarbejde specielle sikkerhedsprocedurer for udførelse af risikobetonet arbejde (udskylning og fyldning af rør, shutdown) for at sikre såvel personale som offentlighed og materiel. Svejsning direkte på rør med brint eller brintholdig naturgas (hot-tapping) kan sandsynligvis ikke accepteres.

B.2.5 Nyanlæg af rørledninger til ren brint

Følgende erfaringer med materialevalg og konstruktion af rørledninger til ren brint findes i litteraturen:

- Eksisterende ledninger til ren brint er konstrueret af lavstyrkestål (flydespænding 240 MPa). Der er anvendt høje sikkerhedskoefficienter, typisk højere end 4 [21]. Til sammenligning kan nævnes, at transmissionsledninger til naturgas i Danmark er konstrueret af højstyrkestål (flydespænding 480 MPa) og dimensioneret med sikkerhedsfaktorer på 1,4-2,5 afhængigt af bebyggelsesgraden (~ designfaktorer på hhv. 0,72 og 0,40, jfr. s. 5).

Beregninger fra et tysk diplomarbejde, som er refereret i [21], viser, at ved en større udbredelse af brint som fremtidig energikilde, vil det af økonomiske grunde være nødvendigt at transmissionsledningerne har diametre > 1 m og tryk > 100 barg.

Det kan give et problem ved valg af stål. Thermomekanisk behandlede stål har høj styrke, sejhed og svejsbarhed, som umiddelbart gør dem anvendelige til formålet, men hvis der skal anvendes tilsvarende høje sikkerhedskoefficienter som ved de eksisterende brintledninger, vil rørenes godstykkelser blive så store, at thermomekanisk behandling sandsynligvis ikke er mulig. Man må da enten eftervise, at en lavere sikkerhedskoefficient garanterer sikkerheden, eller tilsætte inhibitorer, ændre praksis ved drift af ledningerne eller andet.

- Det canadiske gasselskab NOVA anlagde en lille brintledning ($D = 254$ mm) i midten af firserne. Det er så vidt vides den sidste brintledning, der er anlagt i Vesten. Man valgte et lavstyrkestål med en minimum flydespænding på 290 MPa (X42), og da stålværkerne ofte leverer stål med væsentligt højere styrke end specificeret, blev der i specifikationerne krævet, at den aktuelle flydespænding ikke måtte overstige 414 MPa og den aktuelle trækstyrke ikke 700 MPa (max 414 MPa ~ X56). Sejheden skulle være mindst 30 % højere end for en tilsvarende naturgasledning, og designfaktoren kun 60 %. Kravene til de mekaniske egenskaber afspejler, at styrke og sejhed har betydning for revnedannelse og vækst. Som beskrevet tidligere (s. 11) er det ikke nødvendigt at anvende lavstyrkestål, med mindre formålet er at opnå en stor godstykkelse for at ledningen skal blive mere modstandsdygtig overfor tredjeparts skader.

- Da Nova anlagde sin ledning til ren brint krævede myndighederne, at ledningen blev designet til "sour service" [4]. Det svarer til Risøs anbefaling i 1978 [8] og er en fordyrelse i forhold til en normal transmissions- eller distributionsledning. Som beskrevet tidligere (s. 12) er der ikke nogen fordel ved at bruge "sour service" stål til ren brint.

- Nova anslår, at transportomkostningerne for ren brint i nye ledninger er 50-70% højere end for naturgas [4], medens [5] nævner 50% højere omkostninger. Referencen [23] skønner at omkostningerne forøges med 25-50% under optimale forhold i nye ledninger og 60-70%, hvis rørledningens diameter er fastlagt. De forhøjede omkostninger skyldes hovedsagelig brintens lavere energiindhold end naturgas, og at der derfor kræves et tre gange så stort volumen brint som volumen naturgas for at opfylde et givet energibehov. Da brintens massefylde imidlertid er lavere end metans kan brint transporteres ved en tre gange højere flowhastighed end naturgas og dermed bliver det muligt at transportere ca. samme mængde energi gennem en given ledning. Forudsætningen herfor er dog, at der installeres flere kompressorer. Uden brug af kompressorer vil enten større rørdiametre eller flere rørledninger være nødvendige, hvilket øger anlægsomkostningerne.

- Sikkerhedsfaktorer og tilladelige trykudsving skal fastlægges [19].

- Med stigende iblanding af brint bliver opvarmning af gassen på M/R stationerne (for at modvirke afkølingen pga. Joule-Thomson effekten) overflødig, og i ren brint kan en afkøling muligvis blive nødvendig ved visse driftforhold.

- Som en konsekvens af brints større udslip ved utætheder anbefales normalt at rør og anlæg til dette formål fuldsvejses.

B.2.6 Brintlagring

Som beskrevet tidligere, kan en tilsætning af brint til naturgas nødvendiggøre en reduceret anvendelse af line pack. Det vil stille øgede krav om adgang til lagerfaciliteter.

Saltkaverner har været anvendt til lagring af brintholdig bygas i Frankrig og til ren brint af f.eks. kemikonzernen ICI i Teeside/England [5]. Drifttrykket i Teeside er 50 bar, hvilket er væsentlig lavere end trykkene i kaverne i Ll. Torup (150-190 bar).

Gasarten helium, som har endnu større tilbøjelighed til at slippe ud gennem utætheder, har været lagret i et udtjent naturgasfelt [5], så der skulle ikke være væsentlige problemer med tab af brint i akviferlagre, men på den anden side har man heller ikke eftervist, at det er realiserbart [21]. Behandlingsanlægget i Ll. Torup ikke er designet til "sour service". Våd/fugtig brint eller metan-brintblandinger kan derfor ikke behandles uden særlige forholdsregler.

Ved udtrækning af naturgas fra lagrene reduceres trykket, hvorved gassens temperatur falder. Hvis gassen er våd/fugtig giver temperaturfaldet risiko for dannelse af hydrater (methan-vand blanding på fast form som sne), og dermed risiko for tilstopning af ledningen. Ved udtrækning af brint eller blandinger af brint og naturgas vil temperaturen stige eller falde

mindre og risikoen for tilstopning elimineres dermed. Til gengæld sker der et fald i temperaturen, når brint komprimeres, dvs. når den pumpes ned i lageret, og det kan betyde, at opvarmning kan være nødvendig opstrøms lageret.

Udgifterne til lagring af brint vil være væsentlig højere end for naturgas for samme energiindhold. [25] anslår således, at udgifterne vil være dobbelt så høje, da der skal lagres et tre gange så stort volumen. Andre angiver dog lageromkostningerne for lagring af brint til at være af samme størrelsesorden som for naturgas [4], men der er formentlig tale om udgiften pr. volumenenhed og ikke pr. energienhed.

[5] anfører dels at centrifugalkompressorer ikke kan anvendes til brint, dels at energiforbruget ved at pumpe brint ind og ud af lagre er væsentligt. Ældre litteratur angiver, at det vil være nødvendigt at ombygge eller udskifte kompressorer [refereret i 8].

B.2.7 anbefalinger

Selv om der eksisterer praktiske erfaringer med konvertering af naturgasledninger til brintledninger, er erfaringerne kun i begrænset omfang anvendelige i forbindelse med det danske naturgasnet. Man vil dog fra litteraturen og denne rapport kunne uddrage nedenstående anbefalinger med relevans for det danske stålnet. Listen svarer til konklusionen i indledningen af kapitlet.

A. Nødvendige undersøgelser:

De brudmekaniske egenskaber måles for rør og svejsesømmene i brint,

Kritiske fejlstørrelser bestemmes for rørmateriale og svejsninger i brint,

Rørledninger og svejsesømme undersøges for korrosionsskader, kærve, revner og revnelignende fejl vha. intelligent pigs,

Nye risikovurderingsprogrammer udvikles for brintledninger,

Rørledninger i tætbeholdede risikoområder sikres yderligere eller omlægges,

Nødvendig inhibitor-koncentration fastlægges,

Sikkerhedsfaktorer fastlægges,

Nødvendigheden af yderligere sikring af ledninger i risikoområder undersøges

B. Driftmæssige forholdsregler:

Trykket nedsættes for om nødvendigt at opnå højere sikkerhedsfaktorer,

Daglige trykudsving pga. line pack begrænses,

Shutdowns undgås i videst mulig omfang,

Intelligent pigging udføres jævnligt for at følge udviklingen i mekaniske skader, korrosionsskader og eventuel revnevækst,

Patuljeringsfrekvensen intensiveres,

Inhibitor tilsættes, f.eks. ilt.

B.2.8 Litteraturliste

[1] M. Mohitpour, C.L. Pierce, Peter Graham: Design basis developed for H₂ pipeline. Oil & Gas Journal, May 28, 1990, 83-94.

[2] Hamish C. Angus: Storage, Distribution and compression of hydrogen. Chemistry and Industry, 16 January 1984, 68-72

[3] HyWeb: Knowledge – Hydrogen in the Energy Section. <http://www.hyweb.de/Knowledge/w-i-energie-w-eng1.html>

[4] M. Mohitpour, C.L. Pierce, R. Hooper: The Design and Engineering of Cross-Country Hydrogen Pipelines. Presented at ETCE, New Orleans, Louisiana, January 10-13, 1988, of The American Society of Mechanical Engineers./Journal of Energy Resources Technology, Dec. 1988, vol. 100, 203-207.

[5] Daniel Morgan, Fred Sissine: Hydrogen: Technology and Policy. Congressional Research Service Report. April 28, 1995. Report no. 95-540 SPR.

- [6] ANSI/ASME 31.8 Gas Transmission and Distribution Piping Systems.
- [7] CSA Z184, Gas Pipeline Systems.
- [8] K. Rørbo: Anvendelse af brint i et kommende dansk naturgasnet. Materialespørgsmål. 19 juni 1978. Risø rapport nr. S 7806.
- [9] David Knott: Hydrogen: Fuel of the future? Oil & Gas Journal, May 16, p. 26, 1994.
- [10] GPTC Guide for Transmission and Distribution Piping Systems. ANSI Z 380.1.
- [11] DVGW- Arbeitsblatt G 260, Technische Regeln für die Gasbeschaffenheit.
- [12] BS 4515, Specification for welding of steel pipelines on land and offshore.
- [13] W. Haumann, W. Heller, H.-A. Jungblut, H. Pircher, R. Pöpperling: Der Einfluss von Wasserstoff auf die Gebrauchseigenschaften von unlegierten und niedriglegierten Stählen. Stahl u. Eisen 107 (1987) Nr 12, 585-594.
- [14] R. Pöpperling, W. Schwenk, J. Venkateswarlu: Abschätzung der Korrosionsgefährdung von Behältern und Rohrleitungen aus Stahl für Speicherung und Transport von Wasserstoff und wasserstoffhaltigen Gasen unter hohen Drücken. VDI Zeitschriften, Reihe 5, Nr. 62, 1982.
- [15] Celia Juhl: Forsinket revnedannelse på rørledninger efter mekaniske skader. Teknisk Notat, April 1997.
- [16] H. Gräfen: Wechselwirkung zwischen Gas und Metal unter besonderer Berücksichtigung der mechanischen Belastungsart. Z. Werkstofftech. 9, 1978, 391-400.
- [17] T. Günther, H. Gräfen: Wasserstoffversprödung von Feinkornbaustählen in Abhängigkeit von der Legierungszusammensetzung, der Gefügeausbildung und der mechanischen Belastung. Z. Werkstofftech. 10, (1979), 373-390.
- [18] H.J. Cialone, P.M. Scott, J.H. Holbrook: Hydrogen Effects on Conventional Pipeline Steels. 5. World Hydrogen Energy Conference, Toronto, Canada, 1984. Hydrogen Energy Progress, vol 4, 1855- 1868.
- [19] H. Gräfen, R. Pöpperling, H. Schlecker, H. Schlerkmann und W. Schwenk: Zur Frage der Schädigung von Hochdruckleitungen durch Wasserstoff oder wasserstoffhaltige Gasmische. Gas-Erdgas 130 (1989) 1, 16 –21.
- [20] H. Gräfen, R. Pöpperling, H. Schlecker, H. Schlerkmann, W. Schwenk: CERT-Untersuchungen an Leitungsrohrstälen über eine Korrosionsgefährdung durch wasserstoffhaltige Gase bei hohen Drücken. Werkstoffe und Korrosion 39, 517-525, 1988.
- [21] K. Kussmaul, P. Deimel: Materialverhalten in H₂-Hochdrucksystemen. VDI Berichte Nr 1201,1995, 87-101.
- [22] W.W. Youngblood: Safety Criteria for the Operation of Gaseous Hydrogen Pipelines, 1984. DOT Report No. WR-84-24; DOT/RSPA/DMT 10-85/1
- [23] E. Anderson, J. Davies, M.Kornmann, G. Capitaine: Analysis of the potential transmission of hydrogen by pipeline in Switzerland. 3R International, 18 (1979), 2, 93-101.
- [24] W.J. Jasionowski, D.G. Johnson, and J.B. Pangborn: Suitability of Gas Distribution Equipment in Hydrogen Service. DOE financed project. Proceedings of the 14th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Boston, Massachusetts, August 1979, vol. 1.
- [25] Hans-Georg Fasold: Wasserstoffgas – ein potentieller Energieträger des 21. Jahrhunderts? Möglichkeiten von Transport, Verteilung und Speicherung. Gwf Gas Erdgas 129 (1988), 7, 281-291.
- [26] Blending of Hydrogen in Natural Gas Distribution systems, Volume 3. Gas Blends Leakage Tests of selected Distribution System Components. Final Report, June 1 1976 – April 30 1978.
- [27] Study of the Behavior of Gas Distribution Equipment in Hydrogen Service – Phase II. Project 65 022 Final Report. for the period April 26 1979 through June 26 1980. Walter J. Jasionowski, H. Ding Huang, Date Published July 1980.
- [28] W. W. Youngblood: Safety Criteria for the operation of gaseous Hydrogen Pipelines, 1984. DOT Report No. WR – 84 – 24, DOT/RSPA/DMT 10 – 85/
- [29] Udtalelse fra Nordisk Wavin 17/3-1999. Udtalelse fra IGA 17/3-1999