

Denne fil er downloadet fra
Danmarks Tekniske Kulturarv
www.tekniskkulturarv.dk

Danmarks Tekniske Kulturarv drives af DTU Bibliotek og indeholder scannede bøger og fotografier fra bibliotekets historiske samling.

Rettigheder

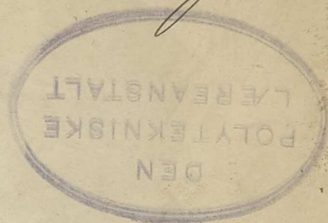
Du kan læse mere om, hvordan du må bruge filen, på
www.tekniskkulturarv.dk/about

Er du i tvivl om brug af værker, bøger, fotografier og tekster fra siden, er du velkommen til at sende en mail til *tekniskkulturarv@dtu.dk*

Trykt som Manuskript.

Dr. J. A. Sørensen
forbeholdt
h
Sørensen

Betænkning



angaaende

Motorvogne med komprimeret Luft.



621.54 Bet -
98.

Lazarus' Eftlg., Nyvej 19, Kjøbenhavn V.

~~621.422~~

Efterat „The Danish Air Power Company“ har gennemført Forsøget med Vogne med comprimeret Luft, idet den i New York benyttede Forsøgsvogn er ført hertil og i nogen Tid har gjort Forsøgskjørsler paa nogle af Falkoneralléens Sporvejs Linier, har Anlægsraadet for Frederiksberg Sporvejs- og Electricitetsactieselskab anmodet mig om at foretage en Undersøgelse af Sporvejsdrift med comprimeret Luft, og Resultaterne af denne Undersøgelse forelægges herved.

Det gjaldt da først om at fastslaa Systemets theoretiske Nyttevirkning i Forhold til det elektriske System med Luftledninger, i hvilken Anledning cand. polyt. H. Bache har foretaget en Beregning af Processen i Luftvognen.

Ifølge denne Beregning, der vedlægges (Bilag I.), vil Nyttevirkningen af Processen i Vognen under Forudsætning af en Compression i Beholderen af 2000 Pd. pr. $\square$ “ og et Arbejdstryk af 150 Pd. i Motorerne samt en Opvarmning af Luften til 120° C. stille sig saaledes:

P. = det indicerede Arbejde i Vognens Motorer,

O. = det indicerede Arbejde i Compressorerne

$$\frac{P.}{Q.} = 0,505.$$

Forudsættes nu en mekanisk Virkningsgrad i Compressorerne af 80 % og i Vognmotorerne af 70 %, faas en Nyttevirkning af den til Motoraxlen overførte Hestekraft i Forhold til den paa Maskinaxlen udviklede af:

$$I. \quad 0,505 \times 0,80 \times 0,70 = 28,28 \%$$

Til Sammenligning er Beregningen gennemført for Mekarskis Luftvogne med et Tryk i Luftbeholderen af 60 Atm. = 850 lbs. Paa Grund af det ringere Tryk i Beholderen med deraf følgende ringere Tab, stiller Nyttevirkningen sig saaledes:

$$\frac{P.}{Q.} = 0,58.$$

Den mekaniske Virkningsgrad bliver da under samme Forudsætninger som ovenfor:

$$0,58 \times 0,80 \times 0,70 = 32,5 \text{ } \%.$$

Dette Tal stemmer overmaade godt med det i min tidligere Betænkning fremsatte Tal 31 %, som Mr. Barbet har fundet ved Beregning, og ligeledes med det Tal 33 %, som han har fundet ved praktiske Forsøg.

Véd disse Beregninger er det forudsat, at Kjørslen fortsættes lige til Trykket i Luftbeholderen er sunket til 150 Pd. I Virkeligheden vil man ikke lade Trykket komme væsenslig under 1000 Pd., da man altid maa have en betydelig Reservekraft, og under disse Forhold synker Virkningsgraden betydelig lavere endnu. Ligeledes er der set bort fra, at Vandet i Varmekjedlen afkøles under Kjørslen.

Ville vi nu regne Nyttevirkningen til 30 % ved Luftsporvogne efter Hardies System, saa kan denne sammenlignes med Nyttevirkningen ved elektrisk Drift.

Af 100 % paa Dynamoens Axel omsættes 92 % i elektrisk Energi. Heraf tabes ca. 15 % i Ledningerne. I Vognmotorerne kan regnes 80 % af den elektriske Energi at omsætte i mekanisk Arbejde paa Motorernes Axel og ca. 94 % heraf at overføres til Vognaxlen. Nyttevirkningen bliver da:

$$\text{II. } 100 \times 0,92 \times 0,85 \times 0,80 \times 0,94 = 58 \text{ } \%.$$

Udgift til Drivkraft

Hvis man nu paaregner en Nyttetvirkning af 30 % ved det Hardieske System og en Nyttetvirkning af 50 % ved elektrisk Drift med Luftledninger, har man sikkert ikke disfavoriseret det første System. Ifølge de amerikanske Opgivelser veje Beholderne i Vognen ladede med Luft ca. 2,5 Tons. — Regnes en halv besat elektrisk Vogn at veje 10 Tons, vil en tilsvarende Luftvogn veje 12,5 Tons.

Kraften paa Stationen vil i de to Tilfælde forholde sig saaledes:

$$\frac{\text{K.L.}}{\text{K.E.}} = \frac{12,5 : 30}{10 : 50} = \frac{4,17}{2} \text{ eller med et rundt Tal som } 2 : 1.$$

Da der paa vore Linier aarlig skulle kjøres 1,500,000 Vognkilometer, kan heraf det aarlige Forbrug beregnes:

$$\frac{1,500,000 \text{ Vognkilometer} \times 450 \text{ Watttimer}}{640}$$

$$= 1,060,000 \text{ Hestekrafttimer.}$$

Regnes 2 Kg. Kul pr. eff. Hestekraft pr. Time, faas en aarlig Kuludgift af 2000 Tons à 15 Kr. = 30,000 Kr.

Ifølge den foregaaende Udvikling vil Drift med comprimeret Luft kræve den dobbelte Kraft, altsaa det dobbelte Kulforbrug. Denne Drift vil altsaa medføre en direkte Merudgift af 30,000 Kr. om Aaret for vort Anlæg. Men hertil kommer det større Forbrug af Olie og Pudsemidler ved det større Anlæg. Nødvendigheden af et større Maskinpersonale ved det større og uensartede Anlæg af Lys- og Kraftstation, og endelig Kuludgifter til Opvarmning af Vandet i Vognenes Varmedunke, som ikke er medregnet i de ovenfor angivne Kuludgifter, og som næppe er helt ringe.

Man vil altsaa med temmelig stor Sikkerhed kunne sætte Forskellen i Driftsomkostninger ved Systemet med comprimeret Luft ligeoverfor den elektriske Drift med Luftledninger til en aarlig Merudgift af ikke under 40.000 Kr., hvilket omtrent svarer til at

forrente en Million Kroner mere end ved det elektriske Luftledningssystem.

Fra det amerikanske Tryklufstelskab er fremkommet et Tilbud paa et Anlæg med comprimeret Luft for vore Linier. Ifølge dette vil der ialt paa Stationen blive at installere 464 indicerede Hestekræfter for at holde 29 Vogne i Drift. Ved denne Beregning er man gaaet ud fra et meget lavt Luftforbrug, nemlig kun 375 cub. foot fri Luft pr. Car-mile, medens der tidligere er garanteret 500 cub. foot. Compressorerne ere beregnede nøjagtig efter dette Forbrug, saaledes at det projecterede Anlæg lige netop vil kunne forsyne de 29 Vogne.

Ved vort elektriske Anlæg er der for Sporvejsdriften tænkt installeret Maskiner fra 250—325 ind. H. K. ligesom ovenfor uden Reserve, hvilket med Anvendelse af et Puffertbatteri antages at være rigeligt.

Ogsaa dette synes at tyde paa, at den ovenstaaende Beregning er rigtig.

Andre Driftsudgifter.

Hvad de øvrige Udgifter angaar, da frembyder Trykluftsystemet næppe nogen økonomisk Fordel, idet Mandskabet vil blive det samme, Reparationsudgifter ved Motorer, Ventiler o. s. v. sikkert mindst lige saa store ved Luftvognene som ved de elektriske Vogne.

Vedligeholdelsesudgifterne ville for de elektriske Luftledninger rimeligvis blive noget højere end for Rørledningerne for den comprimerede Luft. Dog maa det erindres, at disse sidste ved det herværende Anlæg blive temmelig lange, nemlig ca. 4,5 Kilometer, da det vil være nødvendigt at have Ladestationer ved alle Liniernes 4 Endepunkter.

At Reparationsudgifterne ved det betydelig større Maskinanlæg for comprimeret Luft ville blive større end de tilsvarende for Dynamoer og Maskiner til den elektriske Drift, er rimeligt.

Anlægsomkostninger.

A. Ifølge det amerikanske Tilbud skal der til Comprimering af Luft installeres 2 Maskiner à 232 I. H. K. 464 I. H. K.

Hertil kommer en Reservemaskine . . . 232 I. H. K.

696 I. H. K. = 560 eff. H. K.

Hertil for Lysanlægget 2 Masiner à 235 eff. H. K. . 470 - - -

Ialt 1030 eff. H. K.

For det elektriske Anlæg er ialt paaregnet 3 Ma-

skiner à 235 eff. H. K. 705 H. K.

Da Compressorerne kun kunne gaa med 70 Omdrejninger pr. Minut, medens de elektriske Maskiner er beregnede til 150 Omdrejninger, maa Maskinanlægget for den comprimerede Luft nødvendigvis blive betydelig dyrere.

Den nedenfor beskrevne Capacitetsprøve har vist, at Vognen næppe med Sikkerhed vil kunne paaregnes at kjøre mere end 8 Kilometer uden at lade. Heraf følger Nødvendigheden af en Lestation ved hvert Endepunkt. Om end de hertil fornødne Rørledninger vel ville blive en Del billigere end Luftledningerne til de elektriske Sporvogne, ville de dog blive temmelig kostbare, naar man ser hen til, at de ca. 4,5 Kilometer lange Rørledninger skulle føre comprimeret Luft af et Tryk af indtil 2500 Pd. pr. $\square$ “, og at Dampledningerne naturligvis maa være meget omhyggeligt isolerede, for at Dampen ikke skal tabe for megen Varme paa de betydelige Afstande.

Paa den anden Side vil man kunne spare de med Telefonbeskyttelsen, Jernbaneoverkørslerne o. s. v. forbundne Omkostninger, af hvilke de sidste dog ikke i og for sig ere saa store, og

de første forhaabentlig ville blive reducerede betydeligt fra det oprindelige Overslag.

Selve Vognene blive ved comprimeret Luft noget tungere og derfor dyrere end ved elektrisk Drift.

Der er ingen Grund til at antage, at man ved komprimeret Luft vil kunne nøjes med et ringere Antal Reservevogne end ved elektrisk Drift. Udgiften til det rullende Materiel vil saaledes sikkert blive dyrest ved Luftvognene.

Til en nøjagtig Sammenligning af Anlægsudgifterne ved de to Systemer, foreligger ikke tilstrækkelige Data for Trykluftens Vedkommende, men af det foregaaende vil det ses, at Sandsynligheden er for, at Trykluftsystemet vil udkræve et væsentlig dyrere Anlæg end den elektriske Drift.

Vognens Capacitet.

For at faa konstateret hvor stor en Vejlængde Trykluftssporvognen kan kjøre under Forhold, der komme de virkelige saa nær som mulig, foretoges d. 21. Marts en Capacitetsprøve, under hvilken Vognen var belastet med 6000 π Raajern plus ca. 10 Personer (svarende til en Belastning med ca. 54 Personer). Kjørslen foretoges paa Mariendalsvej paa udmaalte Strækninger paa henholdsvis 200 og 150 Meters Længde, hvad der omtrent svarer til de paa-tænkte Afstande mellem Stoppestederne. Omtrent midt mellem Vendepunkterne fandtes en, rigtignok kun meget kort, lille Kurve med ca. 50 Fods Radius. Ved Kjørs lens Begyndelse var Trykket i Luftbeholderen 2100 π (Maximum), hvorimod Temperaturen af Vandet i Varmekjedlen efter Opgivelse ikke havde den fulde Højde 120 °. Der kjørtes skiftevis paa de to Strækninger med 20 Ture ad Gangen paa hver. Da Trykket i Beholderen var sunket til 190 π , maatte Forsøgene afbrydes. Vandets Temperatur var da

65 °. Ved Prøven, hvor den amerikanske Montør kjørte Vognen, viste det sig, at Vognen kunde kjøre ialt 14500 Meter, idet der under Kjørslen blev stoppet 83 Gange. Da den Luftmængde, der brugtes under Kjørslen varierede temmelig stærkt ved de forskjellige Forsøgsrækker (se Bilag II), er det umuligt at udregne nøjagtigt, hvor stort et Tab der lides ved en Standsning. Som en Middelværdi er Tabet i Kjørelængde sat til 70 M. (Bilag III), saa at den Strækning, Vognen uden Standsninger kan tilbagelægge, herefter kan anslaaes til ca. 20500 Meter. Ved at multiplicere dette Tal med Forholdet mellem den belastede og den ubelastede

Vogns Vægt $\frac{11780}{8000}$ faas 30000 Meter, hvoraf det synes at fremgaa, at det amerikanske Selskabs Opgivelse, at Vognen kunde kjøre 30 Kilometer, gjælder for en tom Vogn, der kører uden Standsninger.

Da det nu altid er nødvendigt at have en ret betydelig Reservekraft i Vognen (Mekarskis Vogn kører paa de parisiske Linier kun det Halve af Maximallængden), bør man ikke normalt udnytte Vognens Capacitet udover 7500 Meter, hvilket altsaa lige kan gaa for vore Linier, hvor der forekommer Strækninger paa over 8 Kilometer imellem Steder, hvor Ladning er mulig.

Noget mere vil man maaske kunne opnaa ved en stærkere Opvarmning af Vandet, men da en Opvarmning til 120 ° efter Beregning kun forøger Luftens Energi med 30 %, vil det næppe være store Sager, som kan tjenes derved.

Resultatet af denne Undersøgelse er, at Trykluftsystemet vil blive saa betydeligt dyrere end det elektriske Luftledningssystem, at dets Indførelse paa de Frederiksbergske Linier maa betragtes som udelukket.

Kjøbenhavn, den 1. Maj 1898.

C. Winsløw.

Bilag I.

Til at fylde en Beholder hvis Volumen er 1 Kubikmeter med Luft af 142 Atm. absolut Tryk kræves ved isothermisk Sammentrykninger et Arbejde $A_1 = 10000 p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$ eller i det $v_1 = 142$ Kub. M., $p_1 = 1$; $p_2 = 142$ Atm. $A_1 = 10000 \times 142 \times 2,303 \log. 142 = 7025000$ Kilogrammeter. Da der imidlertid efter endt Kjørsel endnu er Luft af 11,5 Atm. absolut Tryk i Beholderen, maa man, for at faa det Arbejde der hver Gang medgaar til at fylde den til 142 Atm. Tryk fradrage Arbejdet $A_2 = 10000 \times 11,5 \times 2,303 \log. 11,5 = 281000$ Kg. M hvorved $Q = A_1 - A_2 = 6744000$ Kiogrammeter.

Ved Trykreduktionen (til 11,5 Atm. Tryk) udvider Luften sig isothermisk til et Rumfang $= 142 : 11,5 = 12,35$ Kub. M. Trækkes herfra det Rumfang, der efter endt Kjørsel er tilbage i Beholderen (1 Kub. M.) haves den Luftmængde (11,35 Kub. M.) hvis Arbejde overføres til Motoren.

I det denne Luftmængde udvider sig diabatisk til Atmosphærens Tryk udvikles Arbejdet:

$$A_3 = 10000 p_2 v_2 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} + 10000 \frac{p_2 v_2}{k-1} \left(\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) - 10000 p_2 v_2$$

$$= 10000 \frac{k}{k-1} p_2 v_2 \left(\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \text{ som med } k = 1,3; p_1 = 11,5;$$

$p_2 = 1; v_1 = 11,35; v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 11,35 \times 11,5^{0,77} = 11,35 \times$
 $6,557 = 74,5 \text{ Kub. M. giver } A_3 = 10000 \times 4,34 \times 74,5 \times 0,754 =$
 $2435000 \text{ Kilogrammeter. Paa Grund af Opvarmningen maa } A_3$
 imidlertid multipliceres med $\frac{1 + a T}{1 + a t} = 1,39$ i det $a = 0,00367$ og
 $T = 120^\circ; t = 10^\circ$ herved faa $P = 1,39 A_3 = 3390000$ og Forholdet:

$$\frac{P}{Q} = 0,505$$

1 Kg. pr. cm.² = 14,222 $\bar{x}$ pr. $\square$ " engelsk.

Gjennemføres den samme Regning i det Beholderen kun fyldes til 60 Atm. absolut Tryk faas:

$$A_1 = 10000 \times 60 \times 2,303 \log 60 = 10000 \times 60 \times 2,303 \times 1,778 = 2455000.$$

$$A_2 = 281000; Q = 2174000.$$

$$p_1 = 11,5; p_2 = 1; v_1 = 60 : 11,5 - 1 = 4,22; v_2 = 4,22 \times 6,557 = 27,7;$$

$$A_3 = 10000 \times 4,34 \times 27,7 \times 0,754 = 905000; P = 1,39 A_3 = 1256000.$$

$$\frac{P}{Q} = 0,58.$$

Bilag II.

Tur	Afstand Meter	Tryk ℔	Difference ℔	Middel Tryktab ℔	Længde Meter	
0		2100			0	
1	150	2050	50		150	
2	150	2010	40		300	
3	150	2000	10		450	1 Kilometer
4	150	1990	10		600	
5	150	1980	10		750	
6	150	1970	10		900	
7	150	1960	10		1050	
8	150	1940	20		1200	
9	150	1920	20		1350	
10	150	1900	20		1500	
11	150	1890	10		1650	
12	150	1870	20	16.4	1800	2 Km.
13	150	1850	20		1950	
14	150	1825	25		2100	
15	150	1810	15		2250	
16	150	1790	20		2400	
17	150	1780	10		2550	
18	150	1750	30		2700	
19	150	1730	20		2850	
20	150	1715	15		3000	
21	200	1700	15		3200	4 Km.
22	200	1680	20		3400	
23	200	1660	20		3600	
24	200	1635	25		3800	
25	200	1610	25		4000	
26	200	1590	20		4200	
27	200	1560	30		4400	
28	200	1530	30		4600	
29	200	1500	30		4800	
30	200	1475	25	24.75	5000	5 Km.
31	200	1450	25		5200	
32	200	1420	30		5400	
33	200	1400	20		5600	
34	200	1370	30		5800	
35	200	1350	20		6000	
36	200	1320	30		6200	
37	200	1295	25		6400	
38	200	1270	25		6600	
39	200	1250	20		6800	
40	200	1220	30		7000	

a

Tur	Afstand Meter	Tryk H	Difference H	Middel Tryktab H	Længde Meter	
41	150	1210	10	21.00	7150	8 Km. } b
42	150	1180	30		7300	
43	150	1160	20		7450	
44	150	1140	20		7600	
45	150	1120	20		7750	
46	150	1100	20		7900	
47	150	1080	20		8050	
48	150	1050	30		8200	
49	150	1030	20		8350	9 Km. } c
50	150	1005	25		8500	
51	150	990	15		8650	
52	150	970	20		8800	
53	150	950	20		8950	
54	150	930	20		9100	
55	150	910	20		9250	
56	150	890	20		9400	
57	150	865	25	27.5	9550	10 Km. }
58	150	840	25		9700	
59	150	820	20		9850	
60	150	800	20		10000	
61	200	780	20		10200	11 Km. } d
62	200	750	30		10400	
63	200	720	30		10600	
64	200	700	20		10800	
65	200	670	30		11000	
66	200	640	30		11200	
67	200	620	20		11400	
68	200	590	30		11600	12 Km. }
69	200	570	20		11800	
70	200	540	30		12000	
71	200	505	35		12200	
72	200	480	25		12400	
73	200	450	30		12600	
74	200	420	30		12800	
75	200	390	30	20	13000	13 Km.
76	200	360	30		13200	
77	200	330	30		13400	
78	200	310	20		13600	
79	200	280	30		13800	
80	200	250	30		14000	
81	150	220	30	20	14150	14.450 Km.
82	150	200	20		14300	
83	150	190	10		14450	

Kørslen begyndte et Par Minuter over Kl. 12 og op-
hørte Kl. 1.45. Temperaturen i Varmedunken var Kl. 2.10 65 °.

Bilag III.

Det her angivne Tal 70 M. er Middeltallet af Værdier som kunne udledes af Capacitetsprøven.

Er Δp Trykfaldet efter en Tour, er den forbrugte Luftmængde ved Atmosfærens Tryk $\Delta v = 51 \frac{\Delta p}{p - \Delta p} \cdot \frac{p - \Delta p}{14,22}$ cub. foot i det Beholderens Valumen er 51 cub. foot.

Tages Rækkerne a og b faas $\Delta v_a = 91,5$ cub.'; $\Delta v_b = \Delta v_c = 75$ cub.' $\Delta v_d = 93$ cub.' hvorved faas:

$$200x + y = 91,5; 150x + y = 75 \text{ som give } y = 79x$$

$$200x + y = 93; 150x + y = 75 \text{ som give } y = 58,5x$$

hvorefter Middeltallet er sat til 70.

En theoretisk Beregning giver:

Vognens Vægt er 8000 Kg. + 54 Passagerer à 70 Kg. = 11780 Kg. Den i Vognen indeholdte levende Kraft er herefter i det Vognens Hastighed er $v = 3,33$ Meter (12000 M. i Timen)

$$K = \frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} \frac{11780}{9,81} 3,33^2 = 6670 \text{ Kg. M.}$$

Det Arbejde som udfordres for at bevæge Vognen en Meter uden at accelerere den er $K_1 = 0,008 + 11780 = 94 \text{ Kg. M. naar}$

Modstanden paa flad Bane sættes til 8^0_{00} af Vognens Vægt eller $K_2 = 118 \text{ Kg. M.}$ naar Modstanden sættes til 10^0_{00} . Herved faas

$$\frac{K}{K_1} = 71; \frac{K}{K_2} = 56,5.$$

Den Middelluftmængde som Vognen bruger pr. Kilometer er naar Standsningerne ikke medregnes 345 cub' . Medregnes Standsningerne er Forbruget for 150 og 200 Meters Strækninger henholdsvis 500 og 460 cub. foot.

Pr. engelsk Mil bruges henholdsvis 550; 800 og 750 cub. foot.