

MASTER

Onderzoek aan de gelijkstroommotor ten behoeve van de elektrische auto

Zbinden, C.N.M.J.

Award date:
1977

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

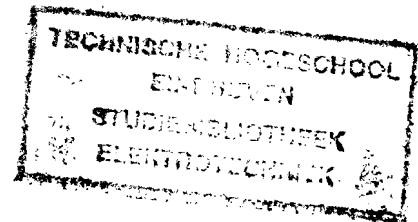
Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



2201 bse

AFSTUDEERVERSLAG



Onderzoek aan de gelijkstroommotor
ten behoeve van de elektrische auto.

EM 77-11.

Kees Zbinden.

Hoogleraar: Prof.dr.ir.H.C.J.de Jong

Begeleider: Ir.J.van de Kreek

Eindhoven, 16 juni 1977.



De ergste leugen is de halve waarheid

Multatuli

Hierbij wil ik ieder, die bijgedragen heeft tot de totstandkoming van dit verslag, hartelijk danken, in het bijzonder Noortje.



Inhoudsopgave

	Samenvatting	4
	Summary	5
	Nabeschouwing	6
	Lijst van gebruikte symbolen	7
1	inleiding	
1.1	De gelijkstroommotor	1-1
1.2	De meetopstelling	1-1
1.3	De ventilatievoorziening	1-4
1.4	De temperatuurbewaking	1-6
1.5	De toerentalmeting	1-7
1.6	De koppelmeting	1-10
2	Temperatuurmetingen	
2.1	Inleiding	2-1
2.2	De meetmethode	2-2
2.3	De metingen	2-4
2.4	Conclusie	2-15
3	De kommutatie	
3.1	Theoretische inleiding	3-1
3.2	De zwarte band	3-6
3.3	Metingen	3-10
3.4	Conclusie	3-25
4	Rendementsbepalingen	
4.1	Inleiding	4-1
4.2	De koppelmeetmethode	4-3
4.3	De metingen	4-4
4.4	Conclusie	4-17
5	De chopper	
5.1	Inleiding	5-1
5.2	Het basisschema	5-1
5.3	De stuurschakeling	5-4
	Appendix A	A-1
	Appendix B	B-1
	Literatuurlijst	L-1
	Bijlagen	F-1



Samenvatting

De motor, die onderzocht moest worden ten behoeve van de elektrische auto was de speciaal daarvoor ontworpen gelijkstroommotor 1GV1 van Siemens.

Deze motor is onderzocht op zijn belastbaarheid en de daarbij optredende temperaturen. Ten tweede is de motor getest op de kwaliteit van zijn kommutatie. Als laatste onderdeel zijn de rendementsgegevens gecontroleerd en aangevuld.

De machine voldeed bij alle toegestane belastingen ruim aan de temperatuureis, ook gaf de temperatuurdetektor, die ingebouwd was, bij al de proeven geen signaal.

De kommutatie van deze motor voldeed niet geheel. Bij hoge toerentallen boven de 1500 omw/min ging de kommutatorovergang bij ± 150 A vonken. De oorzaak hiervan ligt in de foute dimensionisering van de hulppolen, die een te zwakke invloed hebben.

De rendementen van de motor zijn laag bij de lage toerentallen namelijk ± 50 %. Het hoogste rendement, ± 87 %, wordt bereikt bij 3200 omw/min en een koppel van 40 Nm.



Summary

The engine that had to be researched in aid of the electrical automobile was the direct current engine type 1GV1 of Siemens. This engine had to be examined on his dutiability and the temperatures, that appears with that. Secondly the engine had to be tested on the quality of his commutation. In the last place the output datums of Siemens had to be controlled and filled.

The engine conformed to the maximum temperature in all his loads that are allowed, also the temperature detector was not given any signal on this tests.

The commutation of this engine was not satisfied. On high revolutions, above 1500 revolutions a minute the commutation began to sparkle on currents of 150 A. The causes of this are the false dimensions of the sub coils, these have a too weak influence on the commutation.

The outputs of the engine are minimal 50 percent on low revolutions a minute. The highest output is ± 87 percent and is reached on 3200 revolutions a minute and a torque of 40 Nm.



Nabeschuwing

In deze nabeschuwing wil ik wijzen op drie specifieke punten waar nog werk aan verricht zou kunnen worden.

- Zoals in hoofdstuk 3 geconcludeerd wordt, hebben de hulp-polen een te zwak veld om een juiste kommutatie te verkrijgen. Het hulppoolveld zou dus versterkt moeten worden, voordat de machine in de praktijk gebruikt gaat worden.
- Alle metingen, zowel de temperatuurmetingen, de zwarte-band-metingen als de rendementmetingen zijn verricht met voeding uit een gelijkstroombron. Interessant, vanwege zijn latere toepassing, zijn deze metingen uitgevoerd met gecopperde voeding. Dit is niet alleen praktisch gezien interessant, maar ook theoretisch kunnen daarbij interessante problemen naar voren komen.
- In hoofdstuk 4 hebben we vastgesteld dat de koppelmeettafel van Lebow enige meetfouten herbergt. Deze koppelmeetmethode, in het bijzonder deze tafel kan een punt **van** nader onderzoek zijn.



Lijst met gebruikte symbolen

D	dwarskracht	N
f	faktor	
I	stroom	A
i	stroom	A
J	stroomdichtheid	A/cm^2
L	zelfinductie	H
l	lengte	m
M	buigend moment	Nm
n	toerental	omw/min
P	vermogen	W
p	druk	N/cm^2
R	weerstand	Ω
r	rendement	
T	koppel	Nm
t	temperatuur	$^{\circ}C$
	tijd	sec.
u	spanning	V
V	spanning	V
w	hoeksnelheid	1/sec.



Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 De gelijkstroommotor

De gelijkstroommotor 1GV1 van Siemens is speciaal ontwikkeld voor het aandrijven van railgebonden en niet-railgebonden voertuigen. De machine heeft geen inwendige ventilator, bezit een thermische beveiligingsinrichting en een ingebouwde draaistroomgenerator voor toerenmeting. De machine kan aangedreven worden met stromen die een rimpel bezitten en de machine kan in beide draairichtingen gebruikt worden. De kengegevens van de machine zijn: Het pooltal bedraagt 4

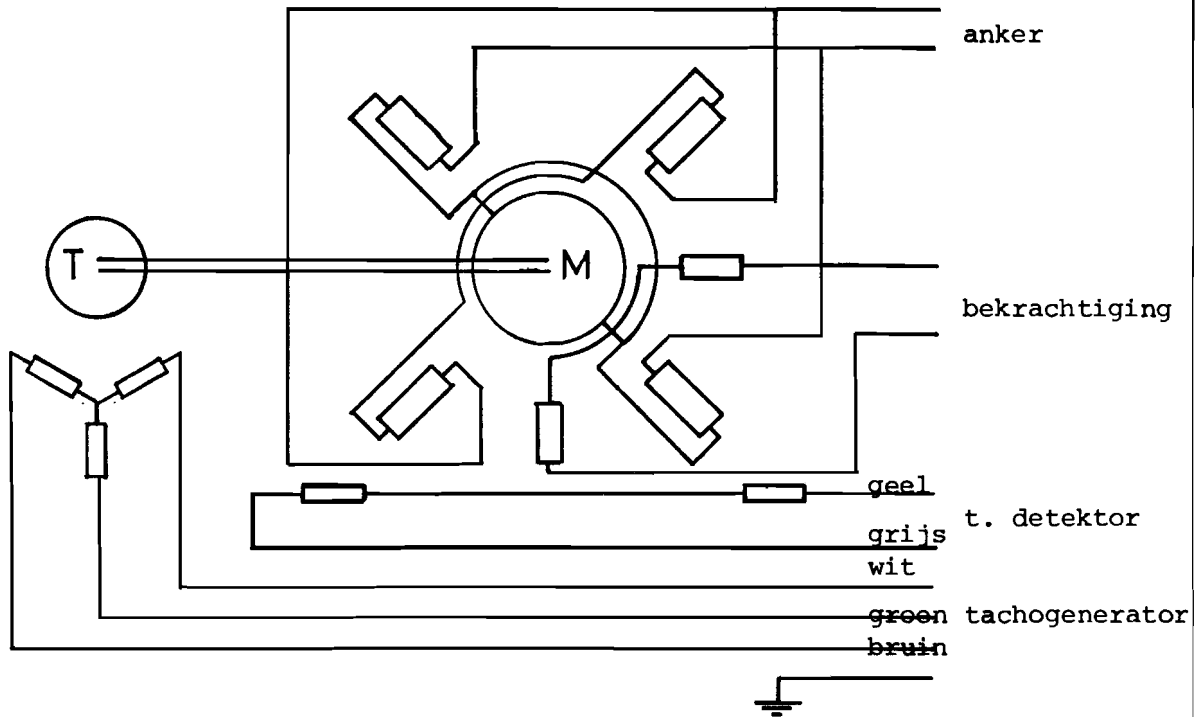
Nominaal	ankerspanning	130 V
	toerental	2200 min ⁻¹
	vermogen	17 kW
	ankerstroom	150 A
	bekrachtigingsstroom	7 A
	bekrachtigingsspanning	100 V
Maximaal	ankerspanning	180 V
	koppel	160 Nm
	vermogen	33.5 kW
	toerental	6700 min ⁻¹

In onderstaande figuur 1.1 is het elektrische motorschema gegeven.

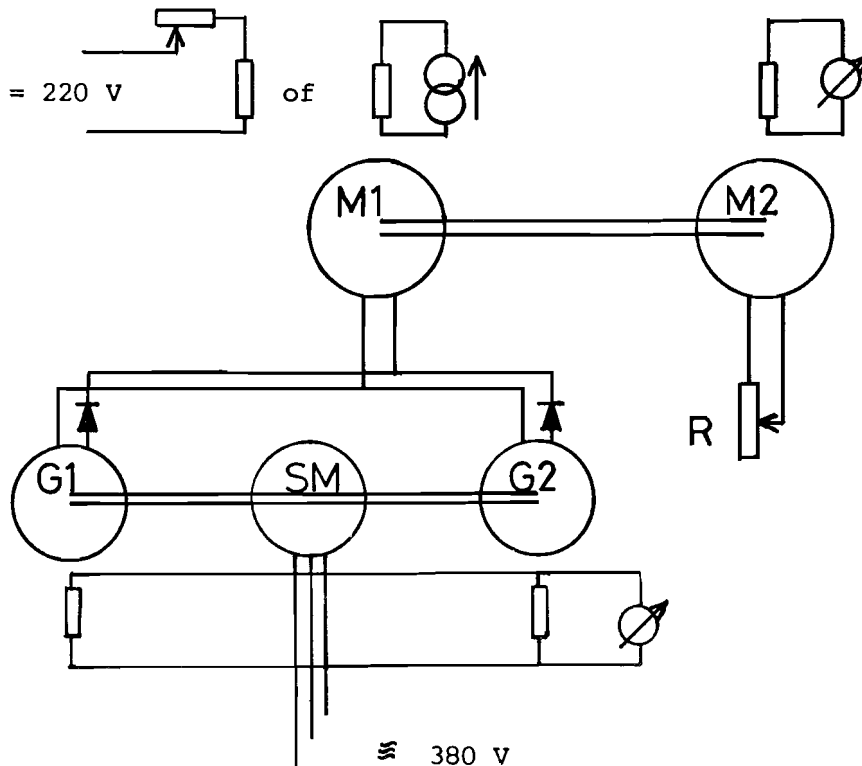
1.2 De meetopstelling

Bij het testen van de machine zijn wij geïnteresseerd in de volgende grootheden: ankerstroom, ankerspanning, bekrachtigingsstroom, bekrachtigingsspanning en de mechanische grootheden koppel en toerental.

De elektrische opstelling is opgebouwd volgens figuur 1.2.



figuur 1.1 Het motorschema



figuur 1.2 De meetopstelling



M2a Smit-Slikkerveer type SG21/13

220 V 76 A 14.7 kW

1450 omw./min

maximaal 440 V 3000 omw./min

bekrachtiging 220 V 2 A

M2b Heemaf type G24/12 no. 48442

220 V 54.5 A 12 kW

1500 omw./min

bekrachtiging 220 V 1.2 A

SM Heemaf type DG82-4

Δ 380 V 98 A 65 kVA $\cos \varphi = 1$

1500 omw./min

rotor 220 V 3.6 A

G1 en G2

Heemaf type GM32

220 V 114 A 25 kW

1500 omw./min

bekrachtiging 220 V 1.7 A

R1 Heemaf (2x parallel)

220 V 54.5 A 5.6Ω



De te testen motor M1 wordt belast met de als generator werkende machine M2, waarvan de bekrachtiging gestuurd kan worden met een regelbare gelijkspanningsvoeding. Op het ankercircuit van machine M2 zijn twee weerstanden R parallel aangesloten, die de energie die vrijkomt dissiperen. Het gebruik van deze weerstanden houdt in dat alleen het motorgebied van M1 te verwezenlijken is. Voor de bekrachtiging van M1 zijn twee mogelijkheden gebruikt.

- Het gebruik van een regelbare stroombron, bestaande uit drie in serie geschakelde stroombegrensdde gelijkspanningsvoedingen.
- De bekrachtigingswikkeling in serie met regelbare weerstanden aan te sluiten op 220V. gelijkspanning.

De eerste methode heeft als voordeel dat de bekrachtiging niet bijgeregeld hoeft te worden, omdat de temperatuur en dus de weerstandswaarden oplopen.

Voor de voeding van het ankercircuit van machine M1 hebben we een speciale voorziening moeten treffen, aangezien we geen enkele regelbare spanningsbron tot onze beschikking hebben, die 320A. kan leveren. Daarom hebben we twee identieke Ward-Leonard-schakelingen parallel geschakeld, zodat een maximale stroom van 300A. kortstondig te verwezenlijken is. Om te voorkomen dat een van de generatoren energie aan de andere generator zal gaan leveren, is bij beiden een diode in de aansluiting opgenomen. De bekrachtiging van de generatoren G1 en G2 zijn parallel geschakeld en worden gevoed met een regelbare gelijkspanningsvoeding.

1.3 De ventilatievoorziening

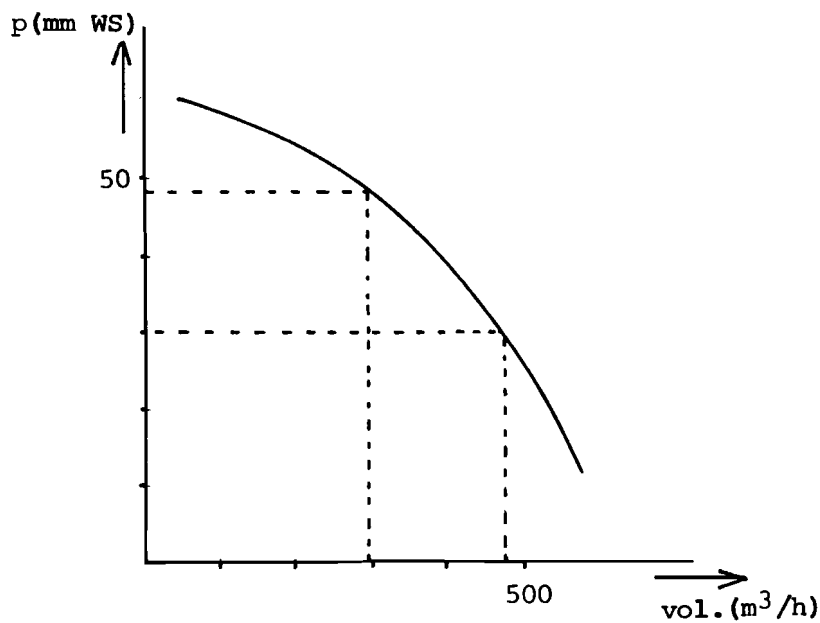
De automotor van Siemens bezit geen ingebouwde ventilator, zodat er voorzieningen getroffen moesten worden voor voldoende koeling. In de dokumentatie van de motor staat dat er een minimum hoeveelheid van 90 liter per seconde koellucht nodig is ($324 \text{ m}^3/\text{h}$). Het drukverlies binnen de machine zou dan $\pm 30 \text{ mm. WS}$ waterdruk bedragen.

Na enkele pogingen om deze koeling met perslucht te verwezenlijken werd besloten om een ventilator aan te schaffen. De specificaties hiervan zijn: Elektrobau Mülfingen type RGE 160-2

220 V 1.03 A 228 W

2240 omw./min 50 Hz

Het druk-volume diagram van deze ventilator is gegeven in figuur 1.3

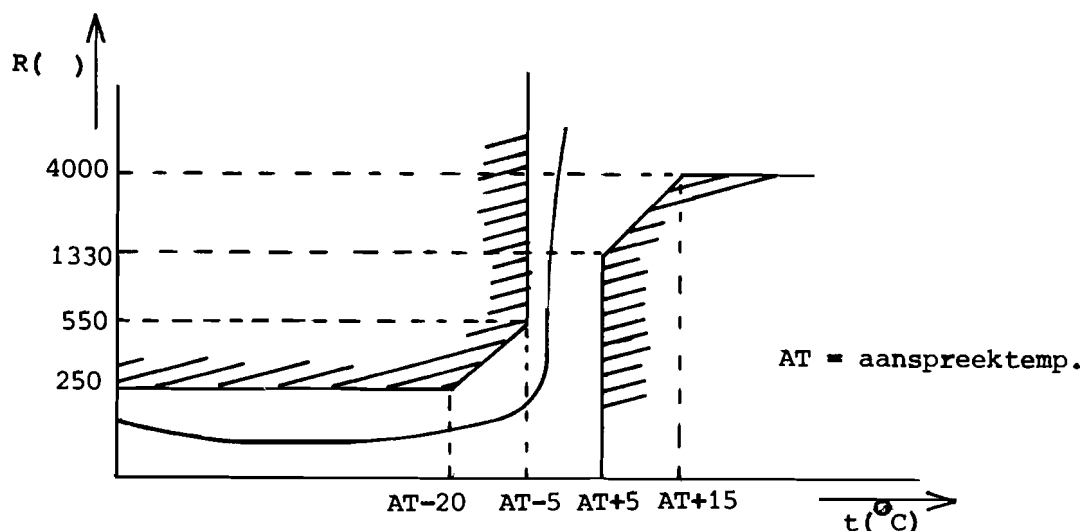


figuur 1.3 Het druk-volume diagram van de ventilator

Bij het drukverlies van 30 mm WS is de door de ventilator geleverde hoeveelheid lucht $480 \text{ m}^3/\text{h}$, wat voldoende zou zijn. Bij het testen bleek dat de hoeveelheid lucht ongeveer $290 \text{ m}^3/\text{h}$ bedroeg bij een drukverlies van 48 mm WS, hetgeen overeenkomt met het gegeven druk-volume diagram. Het luchtvolume voldoet niet aan de gestelde eisen. De conclusie is dat indien men over de voorgeschreven koellucht wil beschikken, men een druk zal moeten overwinnen van 50 à 60 mm WS. Voor de beproeving van de motor is verder genoeg genomen met dit tekort aan koellucht van 10%.

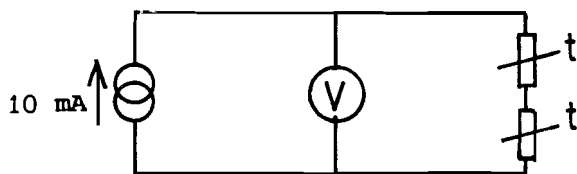
1.4 De temperatuurbewaking

In de machine zijn twee "kaltleiter-temperaturfühlern" aangebracht, ieder onder een van de hulppolen. "Kaltleiter-temperaturfühlern" zijn thermischgevoelige elementen, die onder de aanspreektemperatuur een lage weerstand en boven die temperatuur een hoge weerstand bezitten. Het type dat ingebouwd is, P395-D201, bezit bij 25°C een weerstandswaarde van $\pm 70\Omega$, terwijl de weerstand bij de aanspreektemperatuur, 125°C , $1.7\text{ k}\Omega$ bedraagt. Het weerstand-temperatuur verloop is met zijn toleranties in figuur 1.4 getekend.



figuur 1.4 Het weerstandsverloop van de temperatuurvoelers.

De twee temperatuurvoelers worden, in serie geschakeld, gevoed uit een stroombron, zodat de spanning over de temperatuurvoelers evenredig is met de som van de weerstandswaarden van de beide voelers. De stroombron wordt ingesteld op 10 mA, waarbij de voedingsspanning in koude toestand 1.2 V bedraagt. De stroombron kan een maximale spanning van 30 V leveren.



figuur 1.5 Het temperatuurbewakingscircuit.



1.5 De toerentalmeting

Een van de mechanische grootheden, die gemeten moet worden is het toerental. Er zijn drie mogelijkheden aanwezig om het toerental te meten.

-In de eerste plaats kunnen we een handtacho gebruiken (merk Hasler M). Deze methode heeft een meetbereik tot 4000 omw./min, terwijl de afleesnauwkeurigheid $\pm 1\%$ is.

-De tweede mogelijkheid is het gebruik maken van een op machine M2 gemonteerde elektronische toerenteller. Deze toerenteller bestaat uit een schijf met 60 gaatjes met daarachter een lampje. Een fototransistor telt 1 seconde lang het aantal gaatjes dat passeert; dit geeft direkt het aantal toeren per minuut aan. In verband met de traagheid van de gebruikte elektronische elementen was het meetbereik slechts ± 1500 omw./min.

-De laatste mogelijkheid is het gebruik maken van de ingebouwde tachogenerator. Dit is een 8-polig draaistroomgenerator met een permanente magneet in de rotor. Verdere gegevens zijn:
spanning $7.4 \text{ V} - \sqrt{66.67 \text{ Hz}}$ bij 1000 omw./min
tolerantie $\pm 3\%$
temperatuurafhankelijkheid 0.2% per 10°K
lineairiteitsfout $\leq 1 \%$

We sluiten op twee aansluitingen van deze generator een hoogohmige voltmeter aan, waarna we deze uitgangsspanning ijken met behulp van de eerste twee methoden.



Tabel 1-1

IJking van de ingebouwde tachogenerator.

$V_{\text{tachogenerator}}$ (volt)	$n_{\text{handtacho}}$ (omw./min)	$n_{\text{elektronisch}}$ (omw./min)
1	155	156
2	285	277
3	400	396
4	525	522
5	650	645
6	775	770
7	900	895
8	1020	1016
9	1145	1142
10	1265	1260
11	1390	1382
12	1505	1505
13	1635	1627
14	1750	
15	1865	
16	1990	
17	2115	
18	2235	
19	2350	
20	2480	
21	2585	
22	2715	
23	2820	
24	2950	
25	3125	

V_t (V.) ↑

20

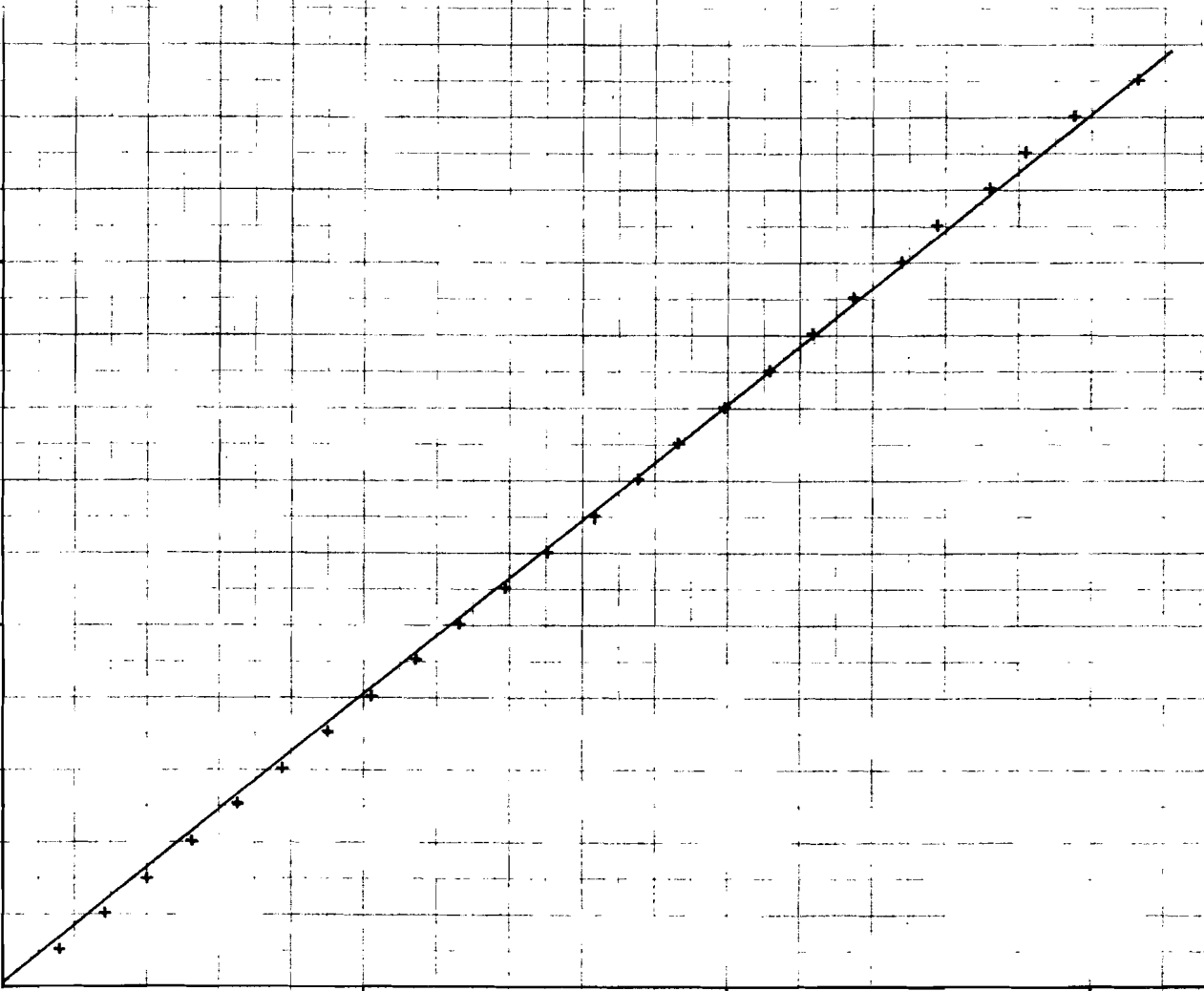
10

1000

2000

3000

n (omw./min) ↓



Grafiëk 1-1
LJking van de ingebouwde tachogenerator.



1.6 De koppelmeting

Het koppel dat door machine 1 wordt uitgeoefend is op twee manieren gemeten:

- Met een koppeltafel van Lebow, model 2540-1K met daarop machine M2a gemonteerd. Bij deze koppelmeetmethode traden meetfouten op (voor uitgebreide informatie hierover zie hoofdstuk 4), zodat in tweede instantie gebruik is gemaakt van:
 - een remdynamo met koppelmeting in de vorm van machine M2b.
- De koppeltafel is op twee manieren geijkt, ten eerste is er een koppel uitgeoefend op de machine en ten tweede is er een koppel uitgeoefend rechtstreeks op de tafel.

Tabel 1-2

IJking van de koppeltafel direkt op de tafel met een arm = 24 inches

gewicht (kg)	koppel (Nm)	uitslag (ψ strain)	extra uitslag (ψ strain)
0	0	15830	0
2	11.96	16160	330
4	23.92	16480	650
6	35.88	16815	985
8	47.84	17145	1315
10	59.8	17475	1645
12	71.76	17805	1975
14	83.72	18140	2310



Tabel 1-3

IJking van de koppeltafel op de machine met een arm = 30 cm.

gewicht (kg)	koppel (Nm)	uitslag (μ strain)	extra uitslag (μ strain)
0	0	15481	0
2	5.88	15321	160
4	11.76	15161	320
6	17.64	15001	480
8	23.52	14839	642
10	29.4	14680	801
12	35.28	14519	962
14	41.16	14358	1123

Tabel 1-4

IJking van de koppeltafel op de machine met een arm = 40 cm.

gewicht (kg)	koppel (Nm)	uitslag (μ strain)	extra uitslag (μ strain)
0	0	15466	0
2	7.84	15252	214
4	15.68	15037	429
6	23.52	14820	646
8	31.36	14606	860
10	39.2	14391	1075
12	47.04	14177	1288
14	54.88	13961	1505



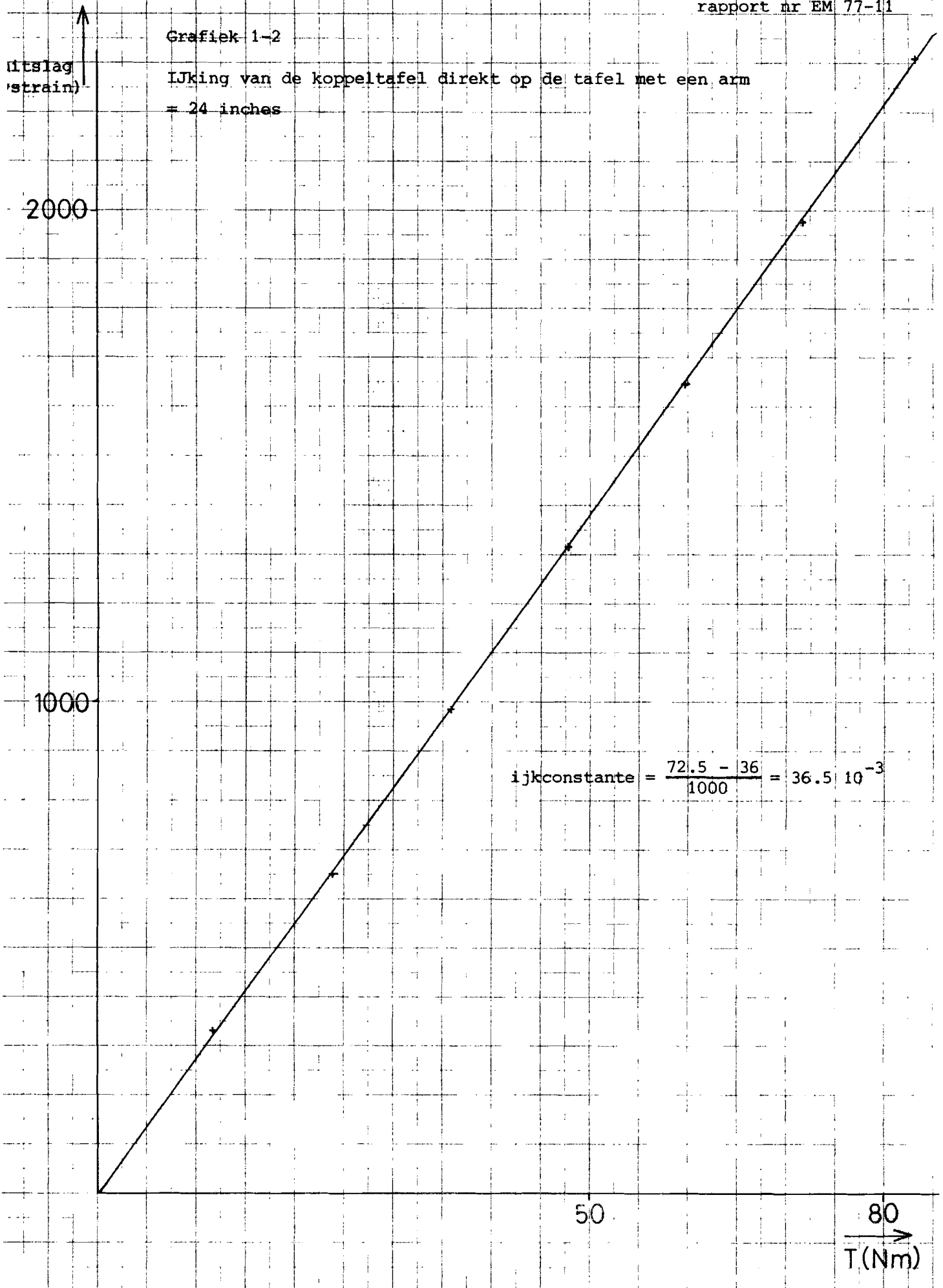
Tabel 1-5

IJking van de koppeltafel op de machine met een arm = 50 cm.

gewicht (kg)	koppel (Nm)	uitslag (μ strain)	extra uitslag (μ strain)
0	0	15452	0
2	9.8	15184	268
4	19.6	14915	537
6	29.4	14646	806
8	39.2	14378	1074
10	49	14107	1345
12	58.8	13837	1615
14	68.6	13569	1883

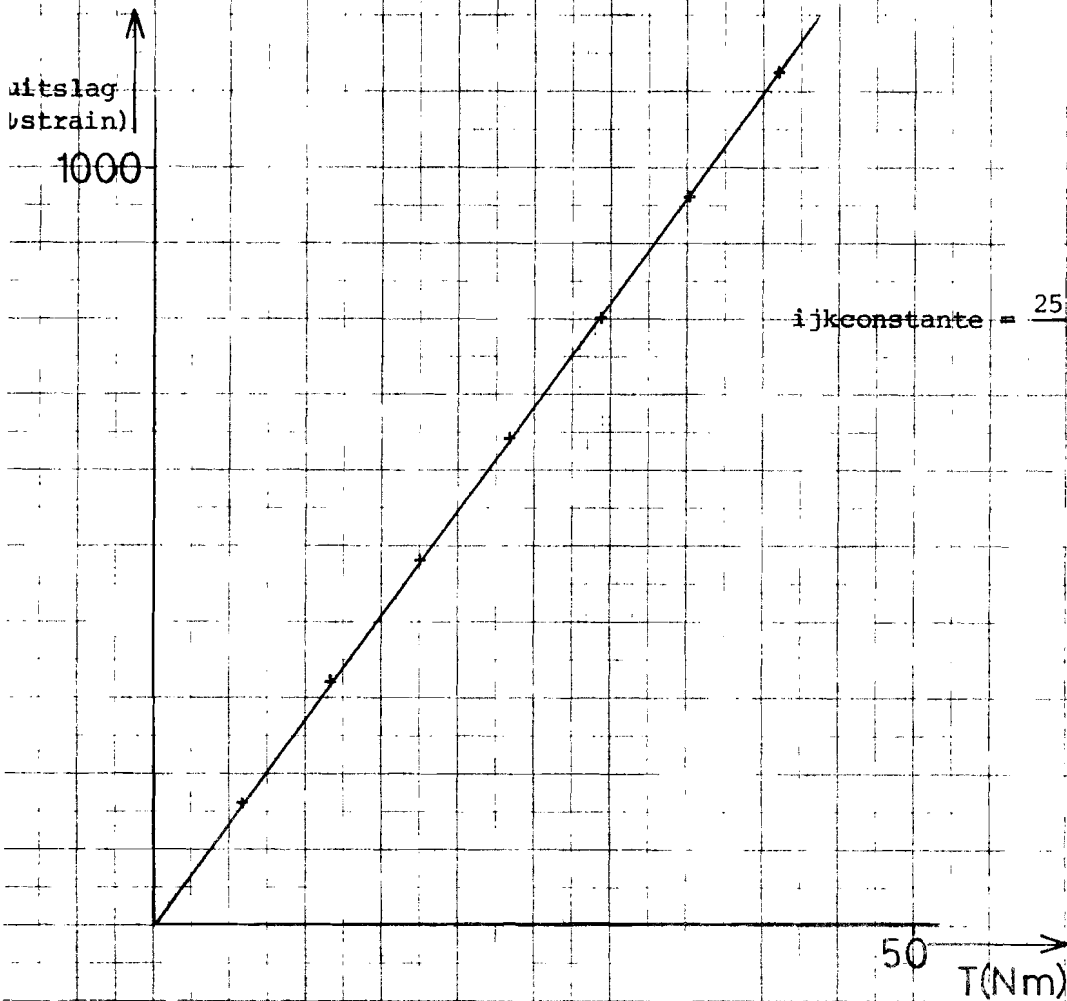
Grafiek 1-2

IJking van de koppeltafel direkt op de tafel met een arm
= 24 inches



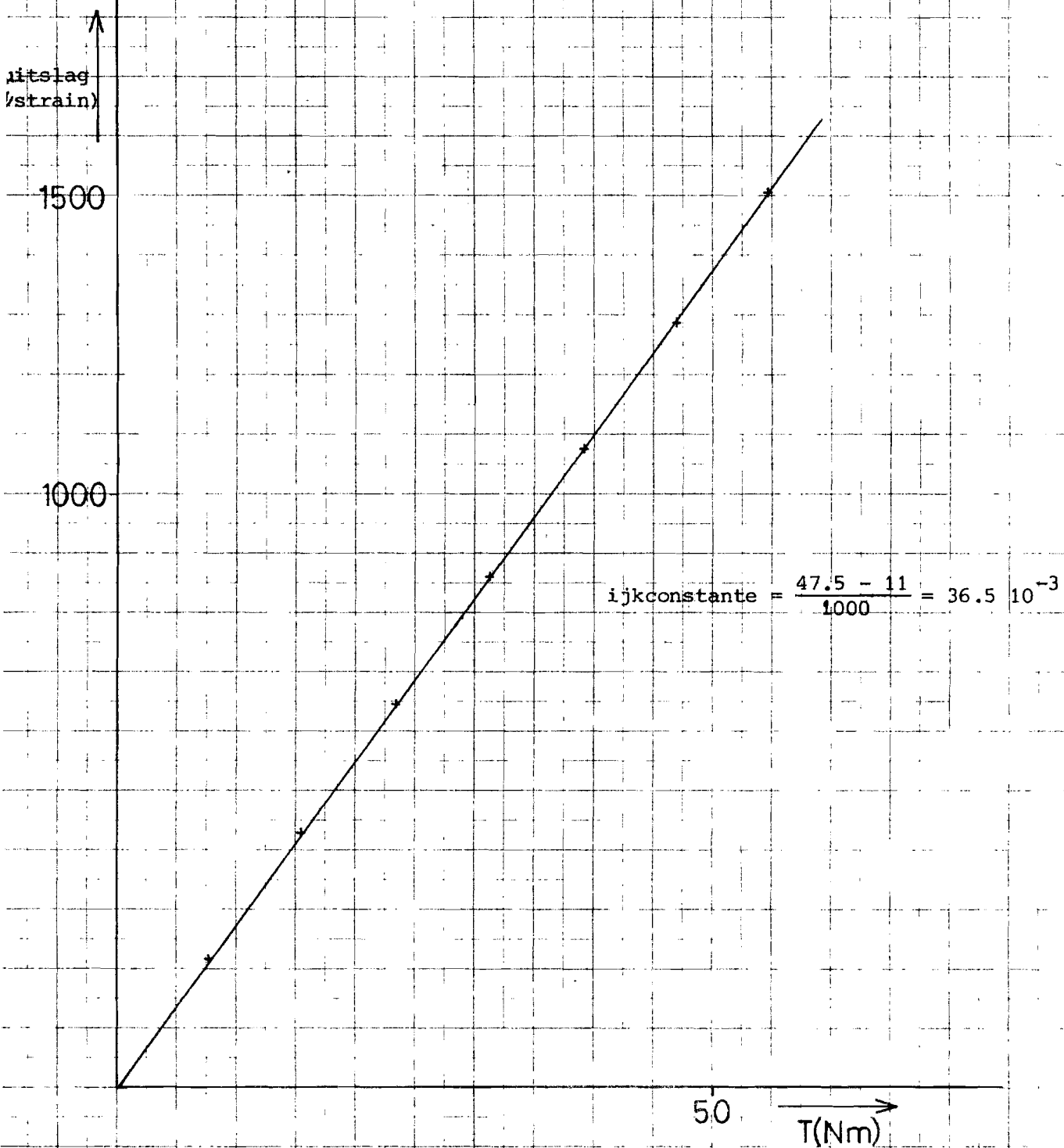
Grafiek 1-3

IJking van de koppeltafel op de machine met een arm = 30 cm.



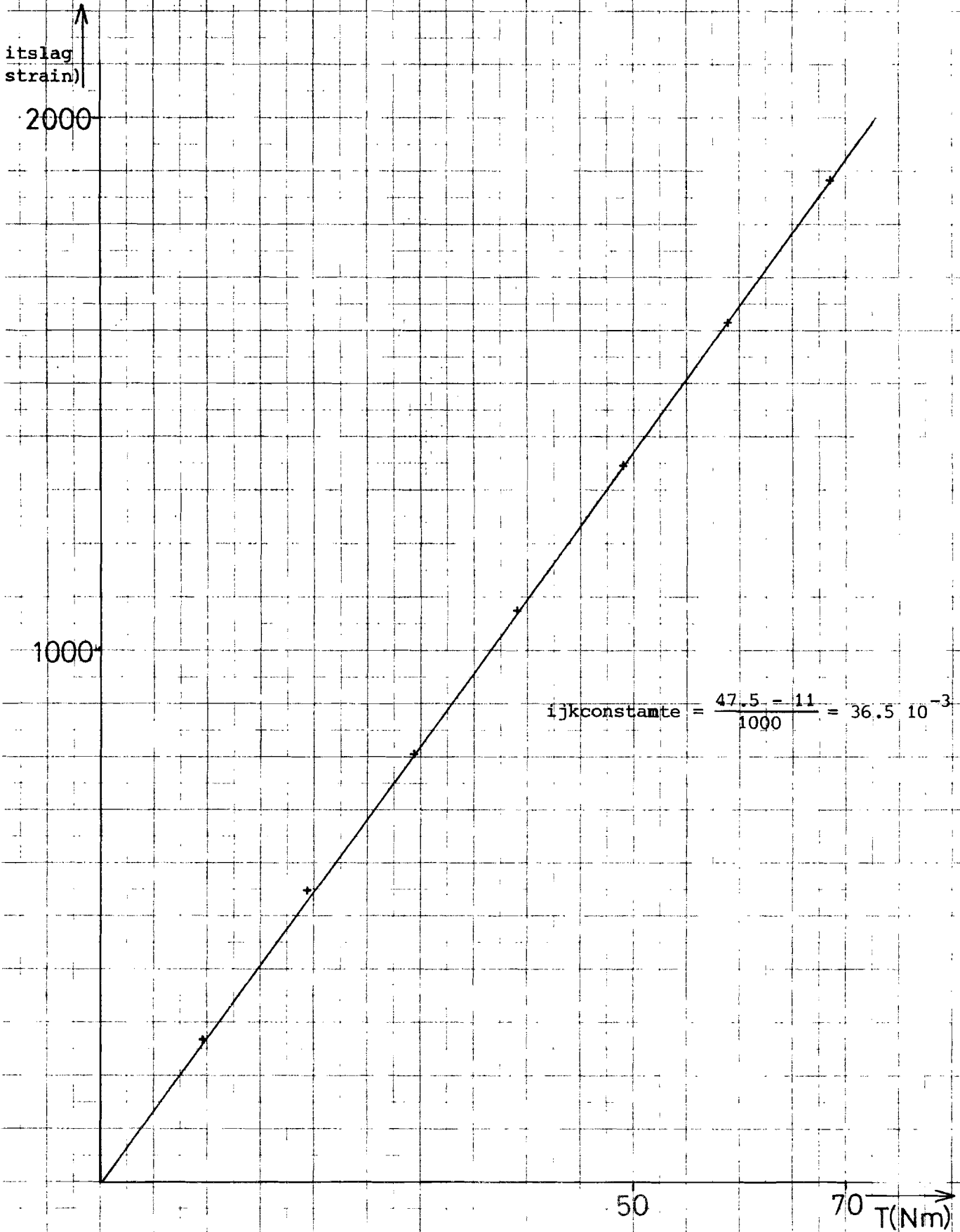
Grafiek 1-4

IJking van de koppeltafel op de machine met een arm = 40 cm



Grafiek 1-5

IJking van de koppeltafel op de machine met een arm = 50 cm





Hoofdstuk 2

Temperatuurmetingen

2.1 Inleiding

Omdat de levensduur van de isolatie en daarmee de levensduur van alle elektrische machines afhankelijk is van o.a. de temperatuur, is belangrijk dat de temperatuurstijging binnen bepaalde grenzen blijft. Bij te hoge temperaturen zullen er in de isolatie door verdamping en of door chemische processen, de veranderingen in samenstelling sneller plaatsvinden, die leiden tot snellere kwaliteitsvermindering van de isolatie. De maximale toegestane temperatuurverhoging is afhankelijk van de toegepaste isolatiematerialen.

De in de automotor toegepaste isolatiematerialen zijn van de klasse F, d.w.z. dat de maximale toegestane temperatuursverhoging van de veldwikkelingen 155°C . bedraagt en van de ankerwikkelingen 140°C . bedraagt (VDE- en IEC-voorschriften; L1 en L2).

Er zijn drie mogelijkheden om de temperatuur te meten: thermometermethode, detektormethode en weerstandsmethode. De thermometermethode is in dit geval niet te gebruiken, omdat er binnen de machine geen ruimte is om een temperatuurgevoelig element te plaatsen. Bovendien mag deze methode volgens o.a. de NEN-richtlijnen niet gebruikt worden bij machines met isolatieklasse F. In de machine is één temperatuurdetektor aangebracht (zie voor gegevens 1.4).

Deze detektor reageert bij temperaturen boven de 125°C ., d.w.z. een verhoging van $\pm 100^{\circ}\text{C}$. De detektor is aangebracht op de hulppoolspoelen.

De weerstandsmethode is voor deze motor het best toepasbaar. We kunnen hiermee de temperatuur meten van zowel bekrachtigingsspoel, ankerwikkeling als hulppoolspoel.

Volgens de voorschriften mag men de volgende lineairisering van de weerstandswaarde gebruiken:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{t_2 + 235}{t_1 + 235}$$

2-1

waaruit volgt

$$t_2 - t_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + t_1) - (t_a - t_1) \quad 2-2$$

waarbij

R_2 = de weerstandswaarde na de verwarmingsproef

R_1 = de weerstandswaarde van de koude wikkeling

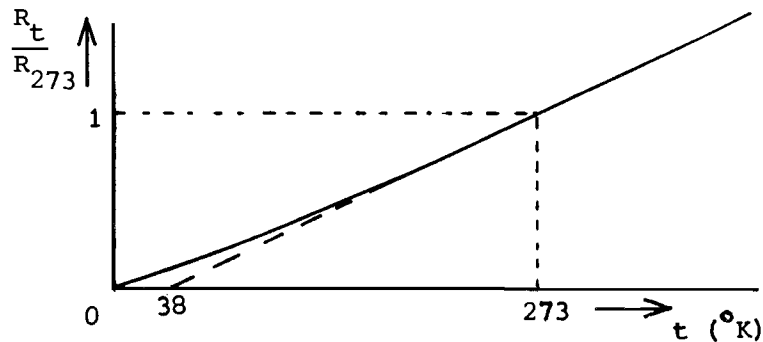
t_2 = de temperatuur in $^{\circ}\text{C}$ van de wikkeling na de temperatuurproef

t_1 = de temperatuur in $^{\circ}\text{C}$ van de koude wikkeling, waarbij

$$t_1 - t_a \leq 3 \text{ } ^{\circ}\text{C} \text{ moet zijn}$$

t_a = de temperatuur in $^{\circ}\text{C}$ van de koellucht

Dat deze linearisering goed overeenstemt met de werkelijkheid zien we in figuur 2.1, die afkomstig is uit de literatuur (L7).



figuur 2.1 Het weerstandverloop van koper met de temperatuur

2.2 De meetmethode

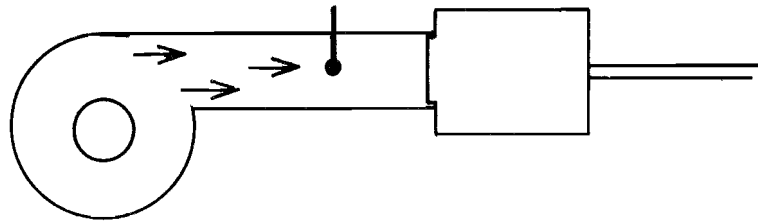
We zijn steeds de temperatuurproef begonnen nadat de machine langdurig afgekoeld was. We hebben gesteld dat $t_a = t_1$. De verder in formule vereiste gegevens worden op onderstaande manier gemeten.

De temperatuur van de koellucht hebben we gemeten met een thermometer in het aanvoer kanaal van de ventilator naar de motor, die dan de koelluchttemperatuur aangaf (figuur 2.2).

De weerstandswaarden worden verkregen door de spanning te meten bij bekende stroomwaarde, tijdens bedrijf of direkt na bedrijf, met kleine stromen om de verwarming gering te houden.

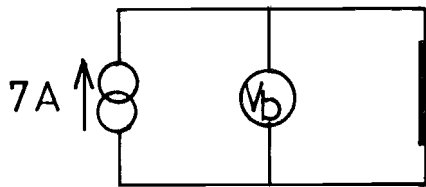
De weerstand van de bekrachtigingswikkeling kan rechtstreeks

berekend worden uit de bekrachtigingsspanning, als we de bekrachtiging voeden met een op 7 A ingestelde stroombron.



figuur 2.2 De koelluchttemperatuurmeting

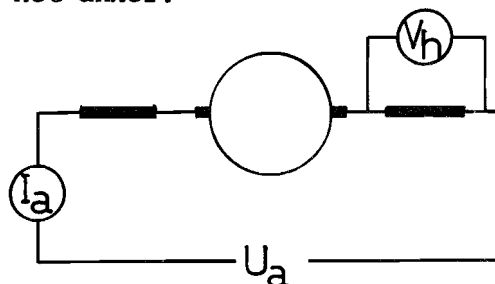
Ook de weerstandswaarde van de hulppoolspoel kan direkt berekend worden uit de spanning over de wikkeling en de stroom door het ankercircuit.



$$R_b = \frac{V_b}{7}$$

figuur 2.3 De meting van de bekrachtigingsweerstand

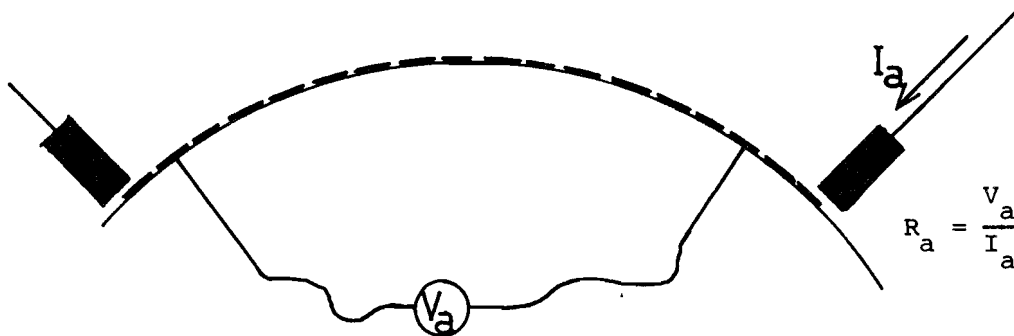
De weerstand van de ankerwikkelingen kunnen we niet direkt meten of berekenen, omdat we steeds een onbekende, konstante spanning meemeten die over de borstel-lamel overgang staat. Als we tijdens bedrijf meten, meten we tevens een rotatiespanning over het anker.



$$R_h = \frac{V_h}{I_a}$$

figuur 2.4 De meting van de hulppoolweerstand

Om deze problemen uit de weg te gaan, meten we de ankerweerstand in stilstand; via de borstels laten we een relatief kleine stroom I_a lopen, terwijl we de spanning tussen twee bepaalde lamellen meten. Om deze meting steeds op dezelfde lamellen in dezelfde positie ten opzichte van de borstels te verrichten, hebben we deze lamellen gemerkt. Van belang is natuurlijk dat deze meting zo snel mogelijk na de verwarming verricht wordt (bijv. binnen 45 seconden), omdat anders de temperatuur reeds is gedaald. Om deze afkoeling te beperken schakelen we ook de ventilator snel na de proef uit.



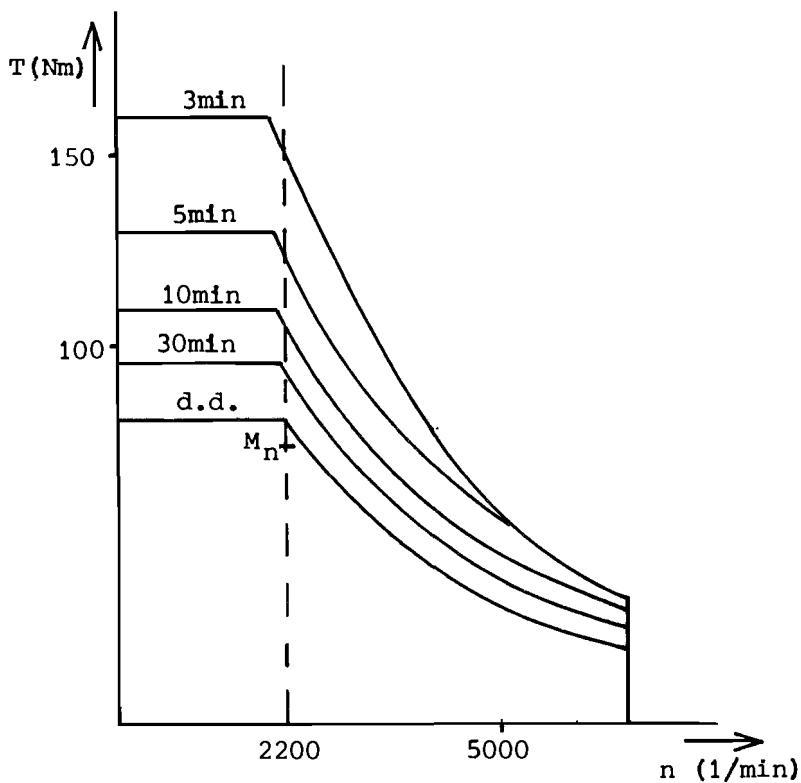
figuur 2.5 De meting van de ankerweerstand

2.3 De metingen

De belastingsomstandigheden waarbij we de temperatuurproeven hebben verricht, zijn gekozen uit de gegevens van Siemens, die in figuur 2.6 zijn getekend.

Bij 2200 omw./min hebben we de nominale belasting, de 30 minuten toegestane belasting en de 5 minuten toegestane belasting volledig gemeten, d.w.z. niet alleen de eindtemperatuur, maar ook het temperatuurverloop. Behalve deze 3 belastingen hebben we bij 2200 omw./min de maximale duurbelasting en de 10 minuten

toegestane belasting uitgevoerd, waarbij we alleen gecontroleerd hebben of de aanslagtemperatuur van de detektor bereikt werd.



figuur 2.6 De maximaal toelaatbare koppels

Door meetfouten van de koppeltafel hebben we helaas niet de door Siemens aangegeven koppels gerealiseerd, maar enigzins lagere, hieronder vermelde koppels.

Duurbelasting: 76 Nm in plaats van 80 Nm

30 min.belasting: 90 Nm in plaats van 94 Nm

10 min.belasting: 105 Nm in plaats van 107 Nm

5 min.belasting: 124 Nm in plaats van 125 Nm

Verder dienen we in het oog te houden dat we niet de voorgeschreven hoeveelheid koellucht tot onze beschikking hebben.

Tabel 2.1 Temperatuurmetingen

Temperatuurmeting bij nominale belasting

tijd (min)	t_a (°C)	V_a (V.)	R_a (mΩ)	t_A (°C)	V_b (V.)	R_b (Ω)	t_B (°C)	I_a (A.)	V_h (V.)	R_h (mΩ)	t_H (°C)
0	21	.41	20.5	21	67.5	9.643	21	20	.187	9.35	21
5	23	.485	24.23	64.6	77.4	11.057	55.5	152	1.5	9.87	32.2
10	25	.505	25.28	80.6	81.3	11.614	68.8	154	1.625	10.55	49.4
15	26	.524	26.2	87.2	85.5	12.214	84.3	149	1.625	10.91	58.7
20	26	.543	27.13	98.8	87.3	12.471	91.1	149	1.65	11.07	63.1
30	28	.565	28.25	110.8	90	12.857	99.3	148	1.65	11.15	63.3
45	29	.573	28.65	115.3	91.5	13.071	104.5	150	1.7	11.33	67.2
60	29	.583	29.16	121.1	92.3	13.186	107.1	147	1.65	11.22	64.7
90	29	.594	29.7	126.9	93	13.286	109.7	150	1.7	11.33	67.2
120	30	.595	29.75	127.5	93.7	13.386	111.4	149	1.675	11.24	63.8
180	31	.595	29.75	126.5	93.6	13.371	110.5	150	1.7	11.33	65.7

Temperatuurmeting bij 30 minuten toegestane belasting

tijd (min)	t_a (°C)	V_a (V.)	R_a (mΩ)	t_A (°C)	V_b (V.)	R_b (Ω)	t_B (°C)	I_a (A.)	V_h (V.)	R_h (mΩ)	t_H (°C)
0	21	.41	20.5	21	67.5	9.643	21	20	.187	9.35	21
5	24	.48	24	61.7	77	11	57	194	2.15	11.08	65.4
10	26	.54	27	97.2	82.2	11.743	71.8	194	2.35	12.11	91.6
20	29	.574	28.7	115.9	88	12.571	91.2	191	2.45	12.83	108.8
30	28	.64	32	156.1	91.2	13.029	102.4	185	2.4	12.97	113.6

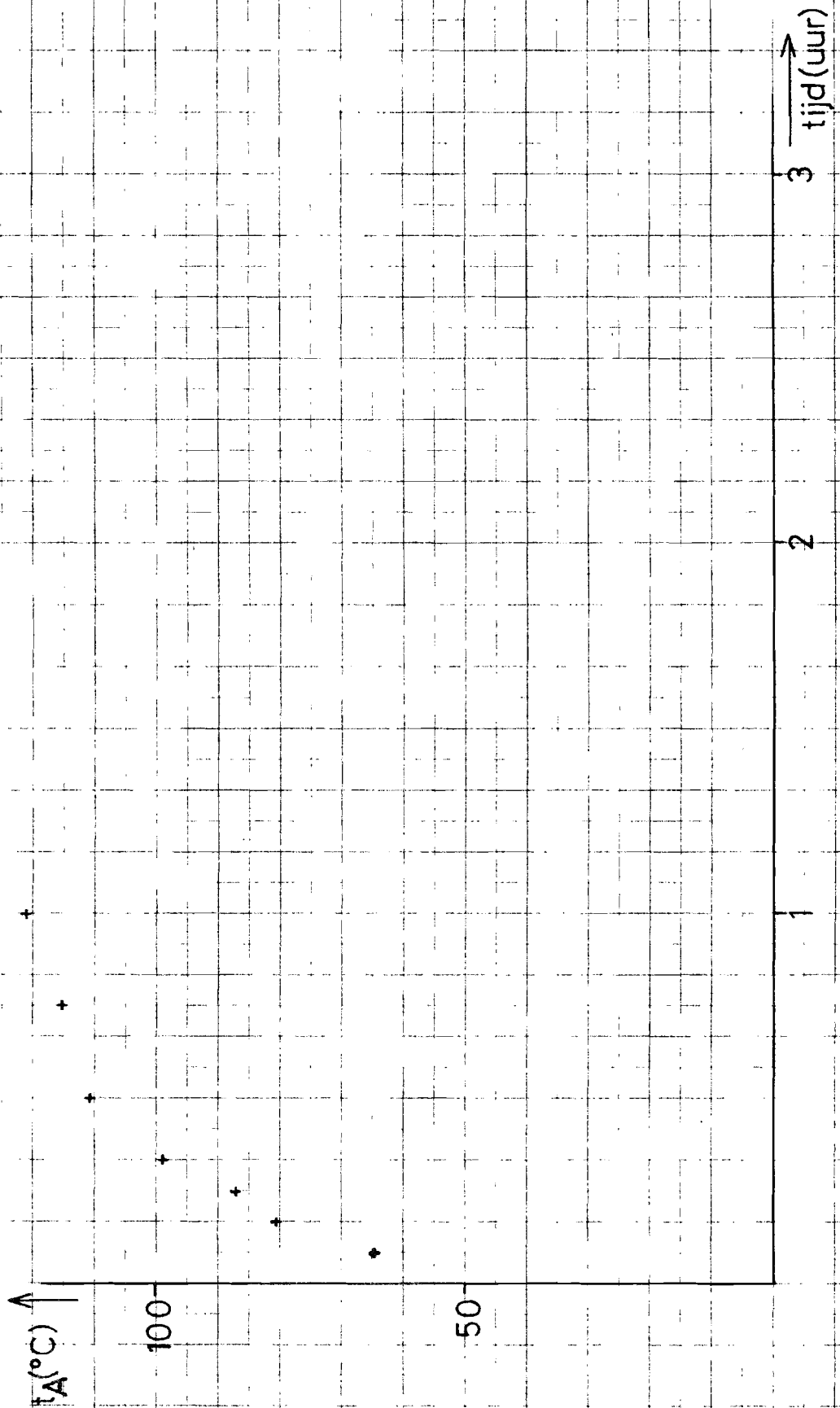


Temperatuurmeting bij 5 minuten toegestane belasting

tijd (min)	t_a ($^{\circ}\text{C}$)	V_a (V.)	R_a (m Ω)	t_A ($^{\circ}\text{C}$)	V_b (V.)	R_b (Ω)	t_{B} ($^{\circ}\text{C}$)	I_a (A.)	V_h (V.)	R_h (m Ω)	t_H ($^{\circ}\text{C}$)
0	21	.41	20.5	21	67.5	9.643	21	20	.187	9.35	21
3	25	.531	26.55	92.6	76	10.857	49.2	260	3.15	12.12	92.8
5	27	.564	28.2	111.2	79	11.286	58.6	260	3.55	13.65	132.7

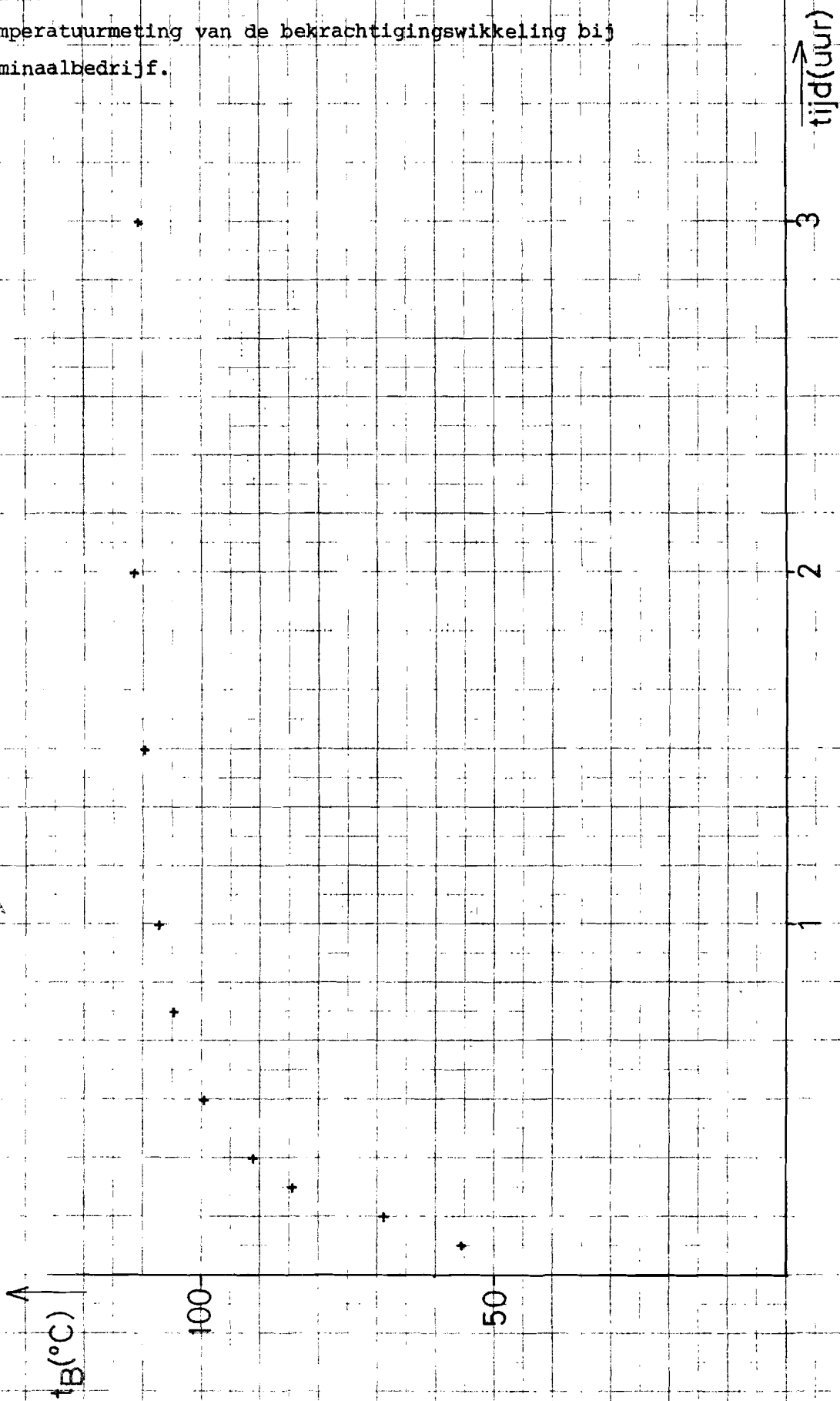
Grafiek 1-1

Temperatuurmeting van de ankerwikkeling bij nominaal bedrijf



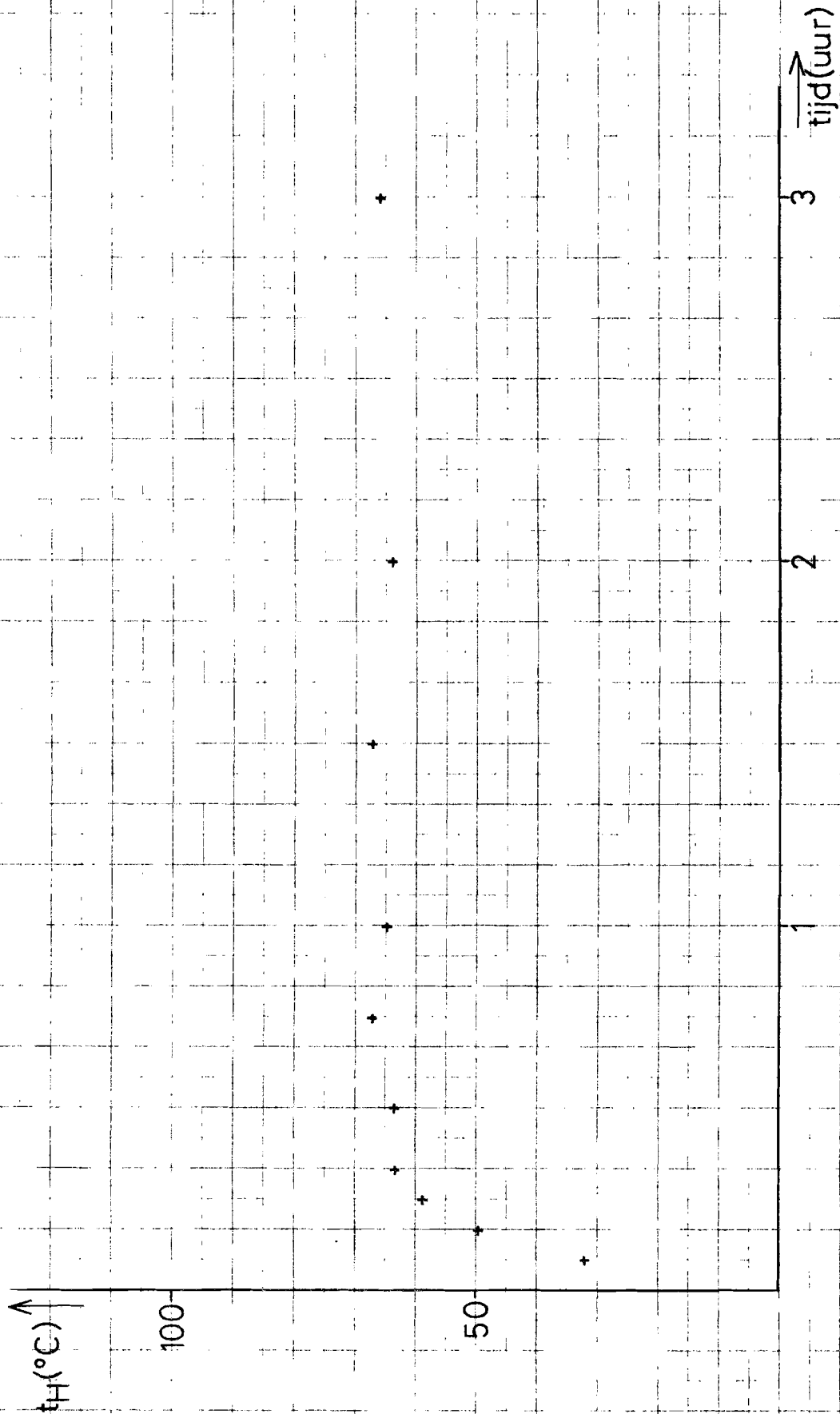
Grafiek 1-2

Temperatuurmeting van de bekrachtigingswikkeling bij
nominaalbedrijf.



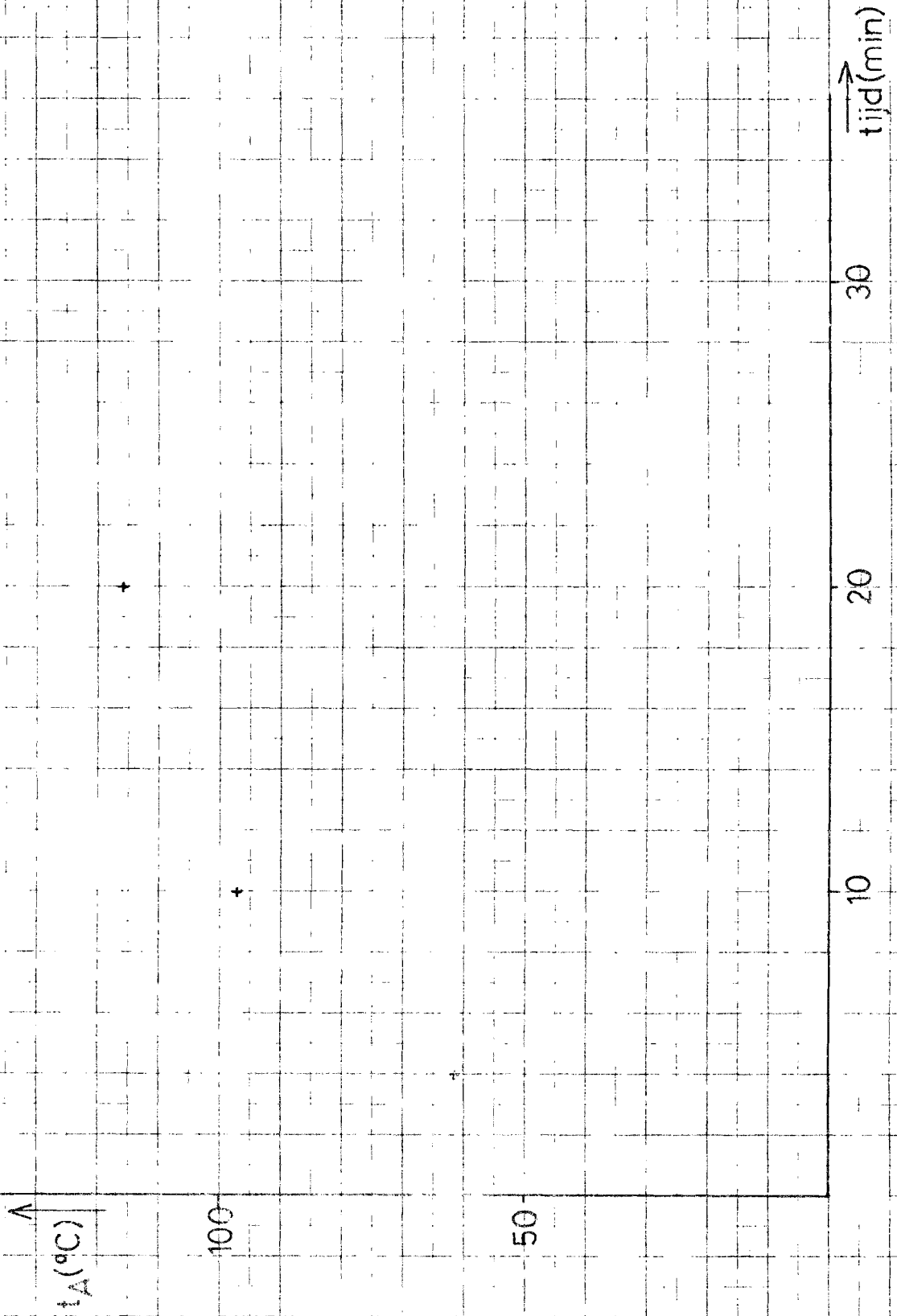
Grafiek 1-3

Temperatuurmeting van de hulppoolwikkeling bij nominaal bedrijf



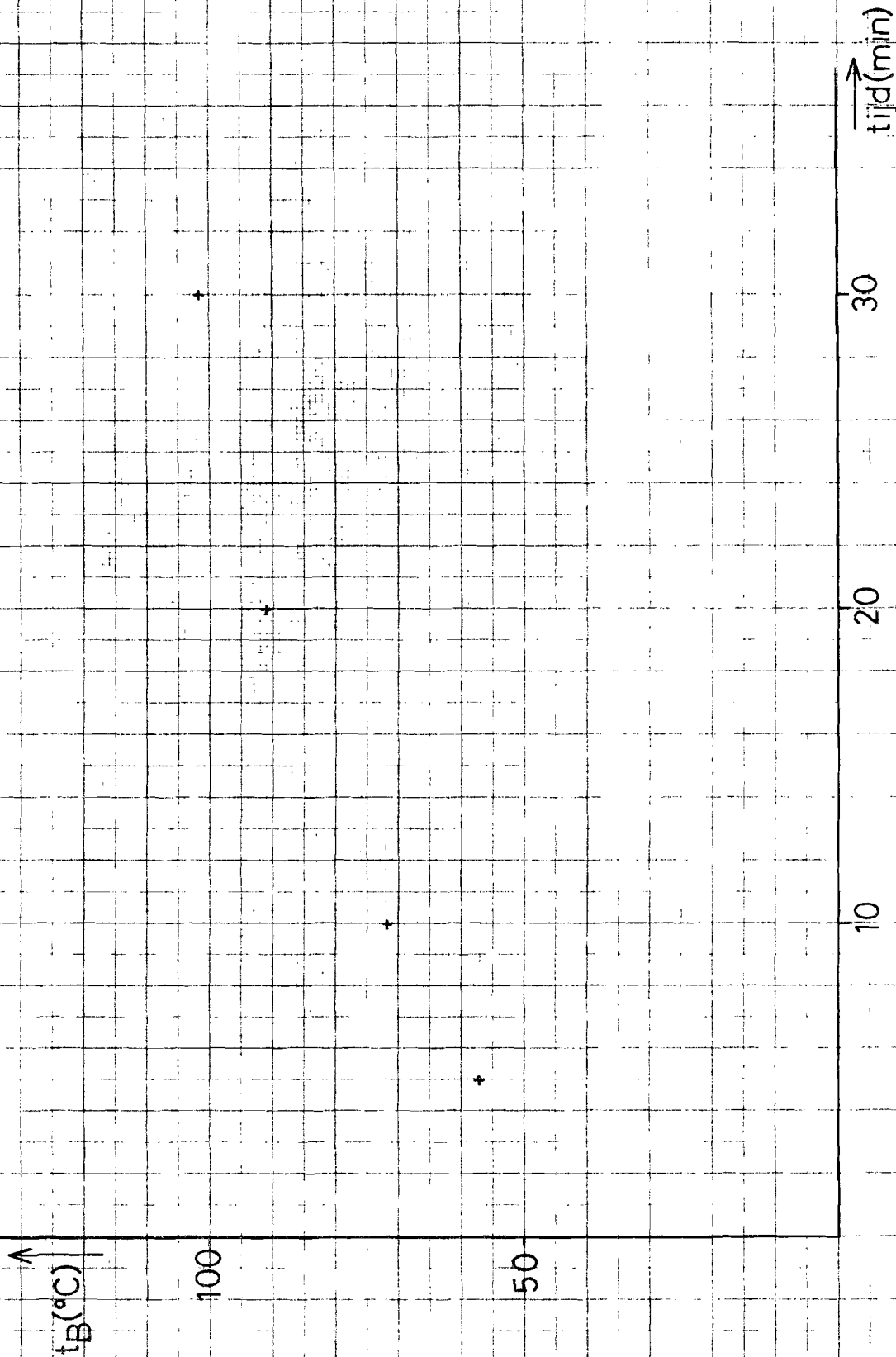
Grafiek 1-4

Temperatuurmeting van de ankerwikkeling bij de 30 minuten
toegestane belasting.



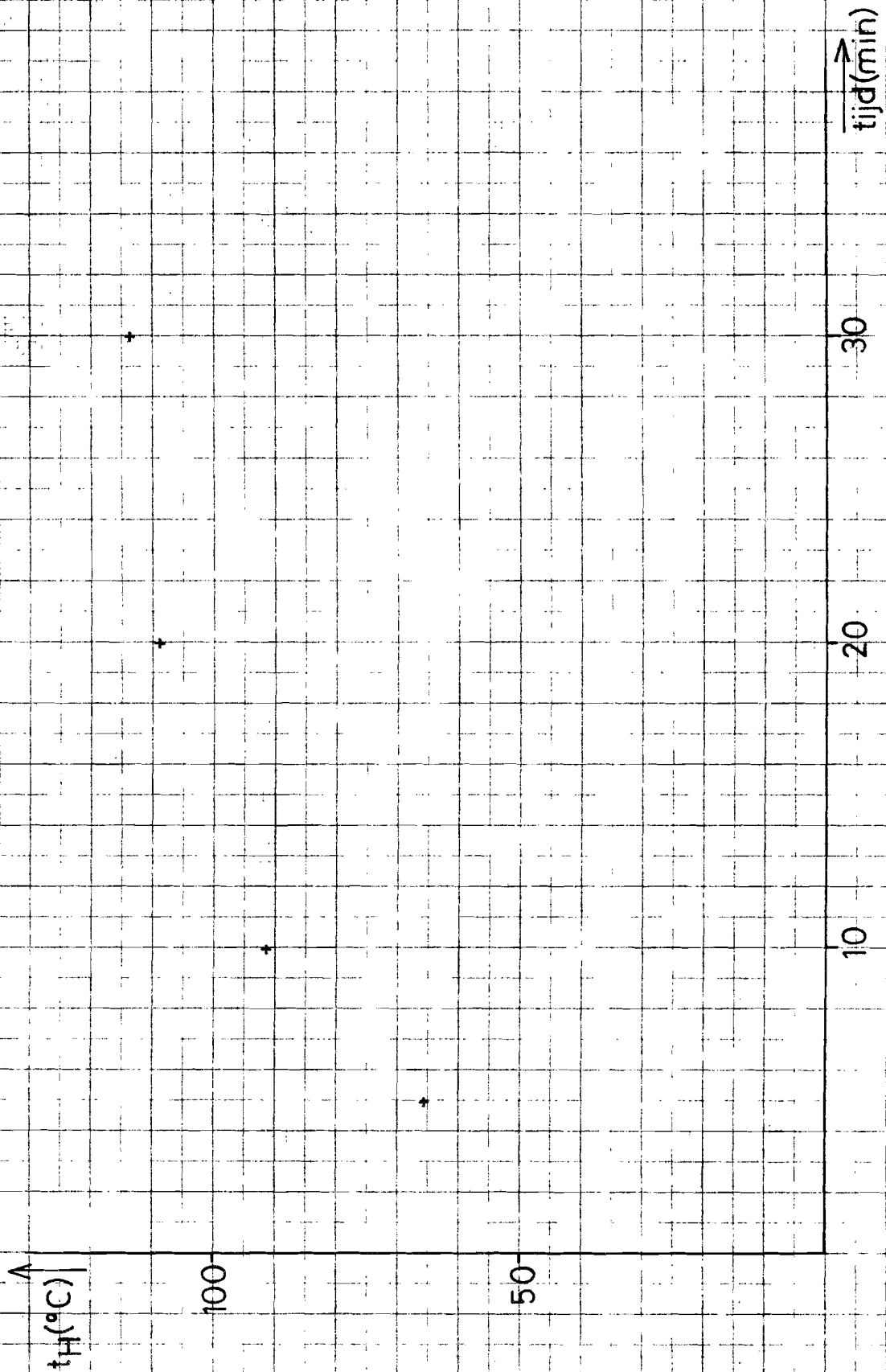
Grafiek 1-5

Temperatuurneting van de bekrachtigingswikkeling bij de 30
minuten toegestane belasting.



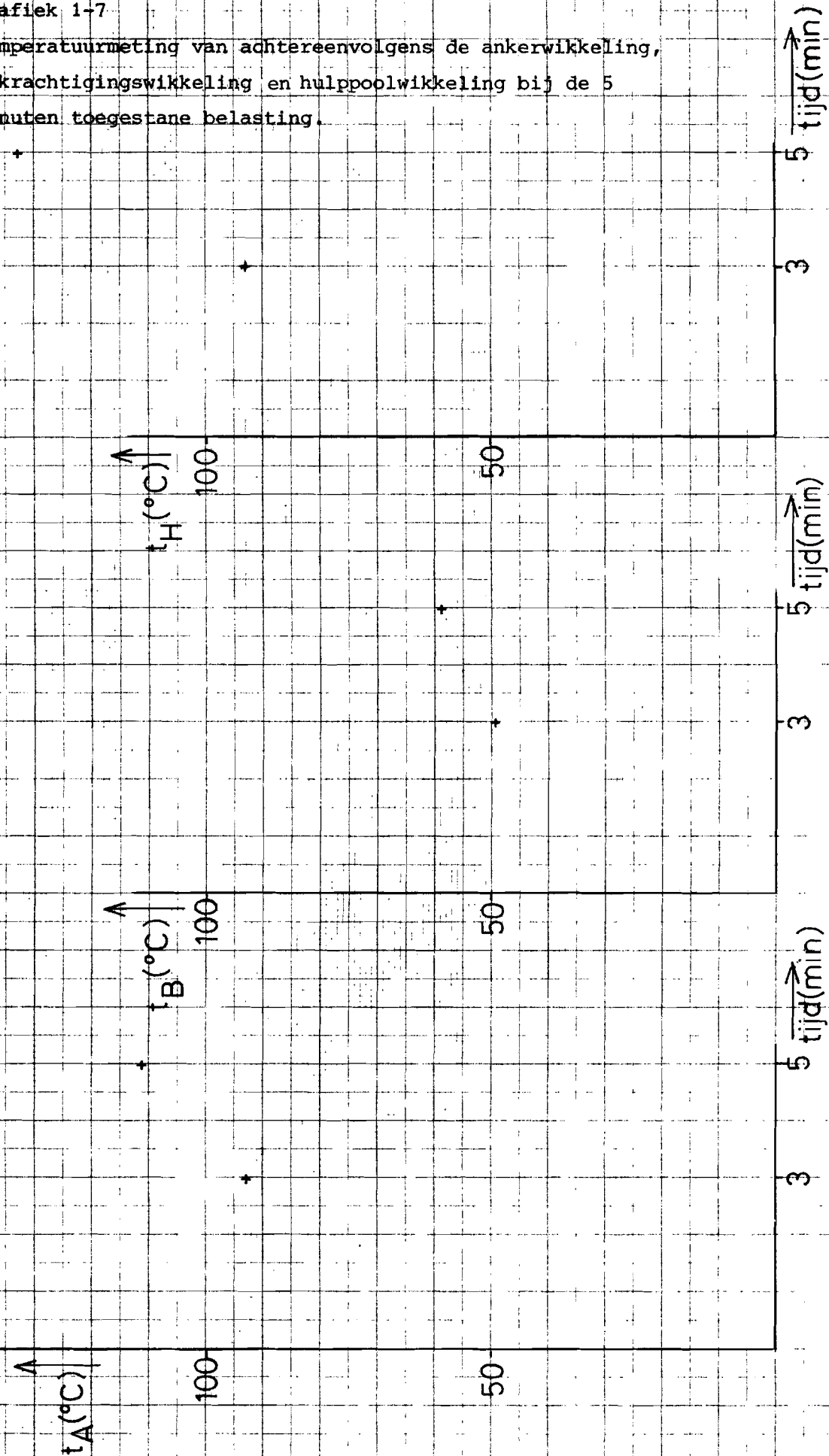
Grafiek 1-6

Temperatuurmeting van de hulppoolwikkeling bij de 30 minuten
toegestane belasting.



Grafiek 1-7

Temperatuurmeting van achtereenvolgens de ankerwikkeling,
bekrachtigingswikkeling en hulppoolwikkeling bij de 5
minuten toegestane belasting.





2.4 Conclusie

Ondanks het feit dat we bij lagere belastingen hebben gemeten, kunnen we toch zeggen dat de machine, wat betreft zijn maximale vermogens en de daarbij optredende temperaturen, aan zijn specificaties voldoet.



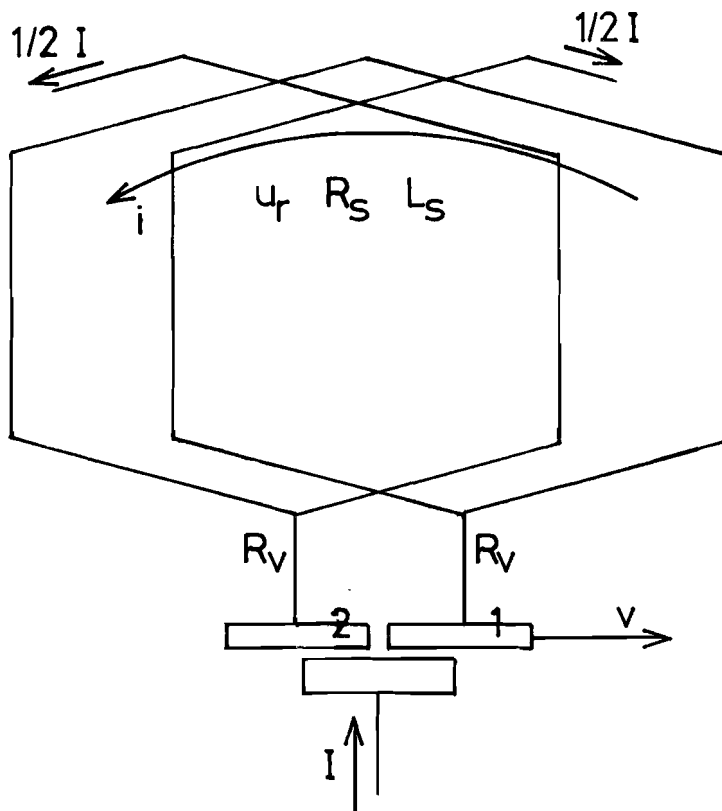
Hoofdstuk 3

De kommutatie

3.1 Theoretische inleiding

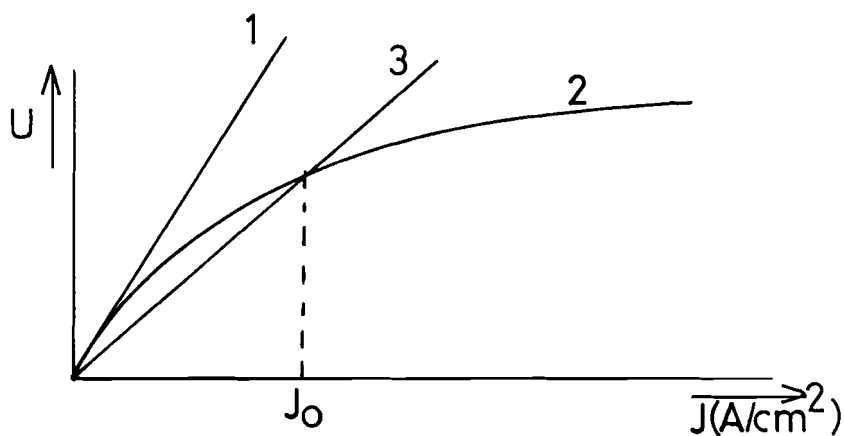
Een van de belangrijke punten van een gelijkstroommotor is het kommuteren van de stroom. Bij het kommutatieproces mag de kommutator en de borstel niet beschadigd worden; als dat wel gebeurt wordt de kommutatie nog slechter wat dan extra verliezen geeft. Dit houdt in dat er geen vonken mogen ontstaan als de borstel een lamel verlaat. Indien er wel vonken ontstaan, kunnen deze vonken variëren van witte oplichtingen tot een volledige lichtboog tussen de borstel en de lamel. De beschadiging varieert hierbij van een lichte beschadiging (zwarte strepen op de kommutator) tot inbranding van het koperoppervlak. De oorzaak van het vonken is een tekort of een teveel aan magnetische energie in de spoel waarvan de verbinding zojuist verbroken is.

Om enig inzicht te verkrijgen in het kommutatieproces zullen we een eenvoudig model opstellen. We gaan uit van identieke spoelen die allen een gelijke magnetische koppeling t.o.v. elkaar bezitten. Iedere wikkeling begint en eindigt slechts op één lamel, terwijl iedere lamel is aangesloten op twee afzonderlijke wikkelingen, die allen de vorm van enkelvoudige luswikkelingen hebben. De borstelbreedte is gelijk aan de breedte van één lamel. De borstelstroom I wordt gelijkmatig over beide ankertakken verdeeld. Een wikkeling bezit een weerstand R_s en een zelfinductie L_s . In de verbinding tussen borstel en spoel nemen we een weerstand R_v aan. De spoel bezit ter plaatse van de borstel ten gevolge van het daar aanwezige magnetische veld een rotatiespanning u_r . Tijdens de kommutatie gaat er een stroom i door de spoel stromen. De lamellen verplaatsen zich met een snelheid v ten opzichte van de borstels.



figuur 3.1 Een eenvoudig model van de kommutatie.

We zullen nu eerst de borstel-lamel overgang nader bekijken. Als we in de literatuur het stroomdichtheid-spanningsverloop van de overgang opzoeken, krijgen we spanningskurven als in figuur 3.2.



figuur 3.2 De spanning tussen borstel en kommutator als functie van de stroomdichtheid.



In deze figuur stelt 1 het spanningsverloop voor bij stilstaande rotor. Kurve 2 is het verloop van de spanning bij draaiende rotor en een konstante stroom, zodat er gelegenheid is om een evenwicht te bereiken wat betreft de patinavorming. De kurve 3 is het verloop van de spanning bij draaiende rotor en snelle stroomdichtheidsveranderingen met een konstante gemiddelde stroomdichtheid I_0 . Tijdens het kommutatieproces zullen we met een kurve als kurve 3 werken, d.w.z. dat de borstel-lamelovergang voor te stellen is als een weerstand die evenredig is met het kontaktoppervlak. De overgangsweerstand zijn:

$$r_1 = \frac{r T}{T - t} \quad 3-1$$

$$r_2 = \frac{r T}{t} \quad 3-2$$

Hierbij is T het tijdstip waarop de kommutatie voltooid is, als deze op $t=0$ begonnen is.

In de eerste instantie zullen we alle weerstanden verwaarlozen en alleen de inductieve effecten berekenen. Voor de spanningen in de spoel geldt dan:

$$L \frac{di}{dt} = u_r \quad 3-2$$

$$\text{dan is } i = \frac{u_r}{L} t + C \quad 3-3a$$

met de eis dat $i = \frac{I}{2}$ voor $t = 0$ is dan

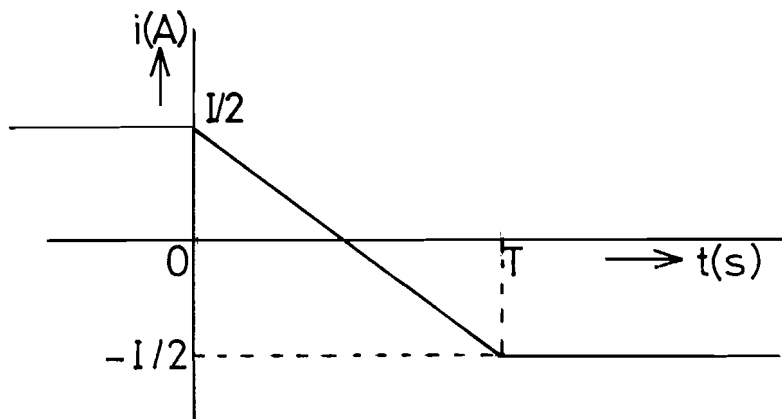
$$i = \frac{u_r}{L} t + \frac{I}{2} \quad 3-3b$$

Wil de magnetische energie van de spoel op het tijdstip T de juiste waarde hebben dan moet $i = -\frac{I}{2}$ voor $t = T$, dus

$$\frac{u_r}{L} T + \frac{I}{2} = -\frac{I}{2} \quad 3-4a$$

$$u_r = -\frac{I L}{T} \quad 3-4b$$

De stroom i verloopt dan zoals in figuur 3-3 is aangegeven.



figuur 3.3 Het stroomverloop bij lineaire kommutatie .

Als we van dit lineair verloop van de stroom uitgaan, kunnen we de borstel-lamel overgang dus als volgt beschrijven:

$$i_1 = \frac{1}{2} I + i = I - \frac{I}{T} t \quad 3-5a$$

$$i_2 = \frac{1}{2} I - i = \frac{I}{T} t \quad 3-5b$$

$$u_1 = i_1 r_1 = \frac{r T}{T - t} I \frac{T - t}{T} = r I \quad 3-6a$$

$$u_2 = i_2 r_2 = \frac{r T}{t} I \frac{t}{T} = r I \quad 3-6b$$

$$u_1 = u_2 = u_b \quad 3-7$$

De overgang kunnen we volgens 3-7 verder voorstellen als een konstante spanning.

Als we in tweede instantie de weerstanden van de spoel en de verbindingen wel in rekening brengen krijgen we voor de spanningen in de spoel:

$$u_b + R_v i_1 + R_s i - R_v i_2 - u_b = -L \frac{di}{dt} + u_r \quad 3-8$$

$$R_t i = -L \frac{di}{dt} + u_r \quad 3-9$$

$$\text{met } R_t = 2 R_v + R_s \quad 3-10$$

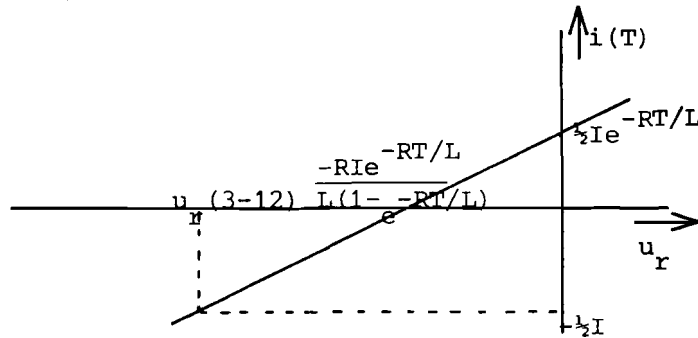
De differentiaalvergelijking 3-9 kunnen we oplossen; we krijgen met als randvoorwaarde dat $i = \frac{I}{2}$ voor $t = 0$, dan

$$i = \frac{I}{2} e^{-\frac{R}{L} t} + \frac{u_r}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t} \right) \quad 3-11$$

Weer willen we dat voor $t=T$ de magnetische energie in de spoel de waarde $\frac{1}{8} LI^2$ heeft dat wil zeggen $i = -\frac{I}{2}$. Voor u_r geeft dat als eis:

$$u_r = - \frac{R I}{2} \frac{1 + e^{-R T / L}}{1 - e^{-R T / L}} \quad 3-12$$

In figuur 3.4 is de stroom uitgetzet als functie van de rotatiespanning u_r .



figuur 3.4 Het verloop van $I(T)$.

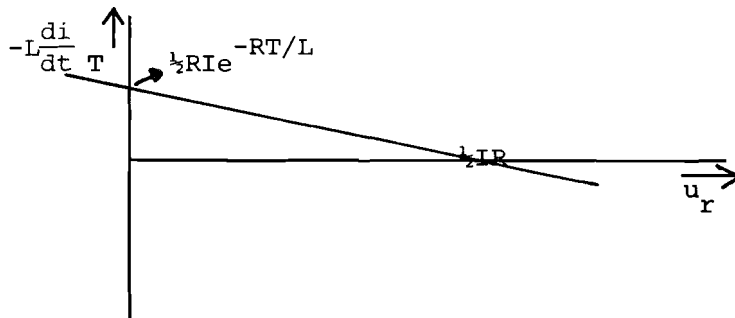
Voor het wel of niet vonken is niet alleen de stroom ten tijde T belangrijk, maar ook de spanning over de borstel-lamelovergang. Deze spanning is gelijk aan $-L \frac{di}{dt}$; we willen dat deze spanning nul wordt.

$$\frac{di}{dt} = - \frac{R I}{2 L} e^{-\frac{R}{L} t} + \frac{u_r R}{R L} e^{-\frac{R}{L} t} \quad 3-13$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=T} = - \frac{R I}{2 L} e^{-R T / L} + \frac{u_r R}{L} e^{-R T / L} \stackrel{!}{=} 0 \quad 3-14a$$

$$u_r = \frac{R I}{2} \quad 3-14b$$

Ook $\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=T}$ kunnen we uitzetten als functie van de rotatiespanning u_r en we krijgen dan:



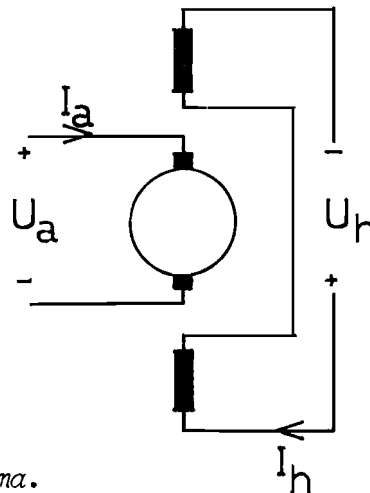
figuur 3.5 De borstel-lamel spanning $\left(-L \frac{di}{dt}\right)_{t=T}$.

Uit figuur 3.4 en 3.5 blijkt dat het onmogelijk is om onder de veronderstelde condities zowel aan de voorwaarde $i(T) = \frac{I}{2}$ als aan de voorwaarde $(\frac{di}{dt})_{t=T} = 0$ te voldoen. We zullen daarom in de eerste plaats de voorwaarde $i(T) = 0$ verzorgen.

De hiervoor benodigde rotatiespanning kunnen we verkrijgen door op de positie van de te kommuteren spoel een veld van de juiste sterkte op te wekken. Omdat de vereiste rotatiespanning evenredig is met I , ligt het voor de hand dit veld op te wekken met een spoel bekrachtigd met de ankerstroom, de zgn. hulppool.

3.2 De zwarte band

Om te onderzoeken of de hulppool de juiste sterkte heeft, gaan we de samenhang tussen ankerstroom, hulppoolstroom en de kwaliteit van de kommutatie beschrijven. Hiervoor sturen we door het anker en de hulppool verschillende stromen (figuur 3.6).

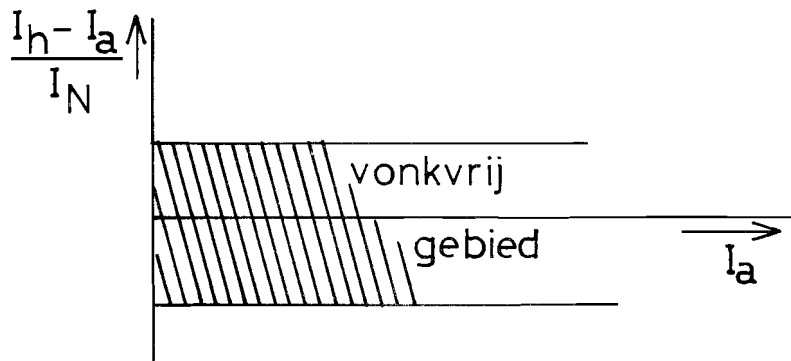


figuur 3.6 Het meetschema.

We bekijken nu voor welke combinatie van waarden voor I_a en I_h de borstel-lamel overgang gaat vonken. Wanneer we dit in een diagram uitzetten, krijgen we de zogenaamde zwarte band (fig. 3-7).

In het gearceerde gebied vonkt de kommutator niet. Meestal zetten we horizontaal niet $I_h - I_a$, maar het genormeerde stroom-

verschil dat wil zeggen : $\frac{I_h - I_a}{I_N}$.

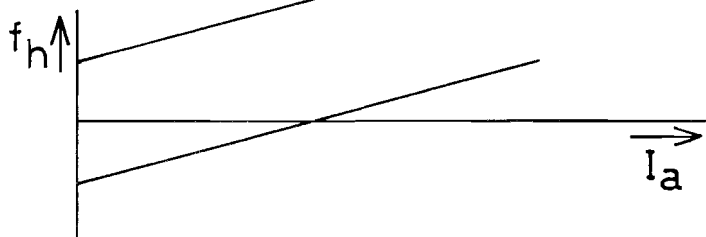


figuur 3.7 De zwarte band.

Als de hulppool nu een te sterk veld opwekt zal een kleinere hulppoolstroom nodig zijn om een vonkvrije kommutatie te verkrijgen. De zwarte band zal dan volgens figuur 3-8a verlopen.



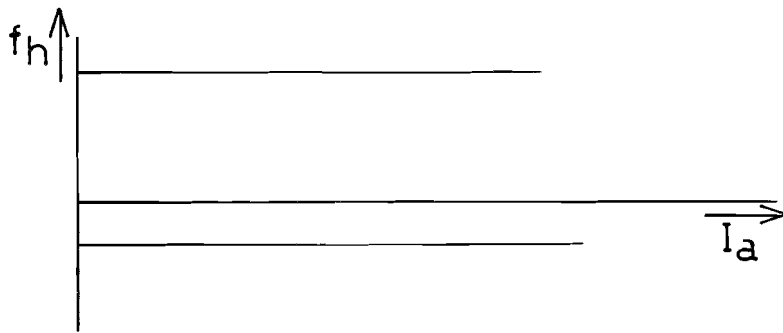
figuur 3.8a De zwarte band bij een te sterk hulppoolveld.



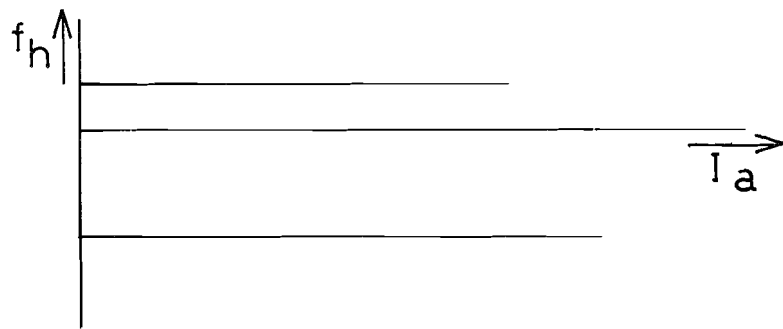
figuur 3.8b De zwarte band bij een te zwak hulppoolveld.

Indien het hulppoolveld te zwak is gedimensioneerd krijgen we het tegengestelde verloop (figuur 3.8b).

Ook kunnen de hulppool en de borstel een onjuiste stand ten opzichte van elkaar innemen. In dat geval is het hulppoolveld korter of langer aanwezig (afhankelijk van de draairichting), zodat het veld respectievelijk sterker of zwakker moet zijn om een tijdige kommutatie te verkrijgen. Bij figuur 3.9a is de hulppool in de draairichting verplaatst, terwijl in figuur 3.9b de tegengestelde situatie is uitgebeeld.

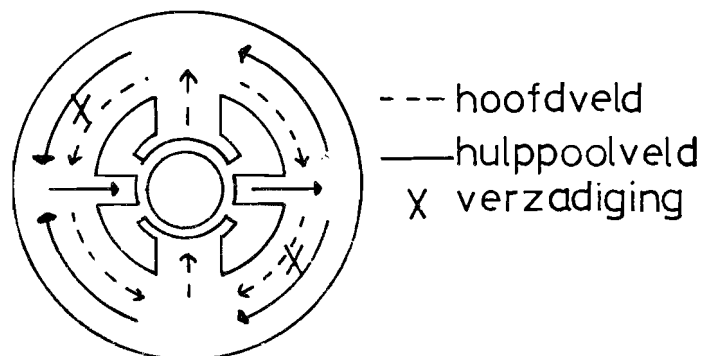


figuur 3.9a De zwarte band terwijl de borstels tegen de draairichting zijn verplaatst.



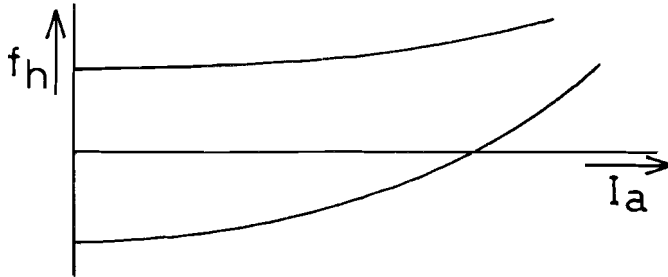
figuur 3.9b De zwarte band terwijl de borstels in de draairichting zijn verplaatst.

In het bovenstaande verhaal is er steeds van uitgegaan dat er een lineair verband bestaat tussen de magnetische velden en de stromen door de hulppoolspoelen. Op sommige plaatsen in het ijzer zal echter het hoofdveld en het hulppoolveld dezelfde richting hebben (figuur 3.10), zodat ter plaatse verzadiging op zal treden.



figuur 3.10 De hulppoolvelden en het ankerveld, die elkaar plaatselijk verzwakken en versterken.

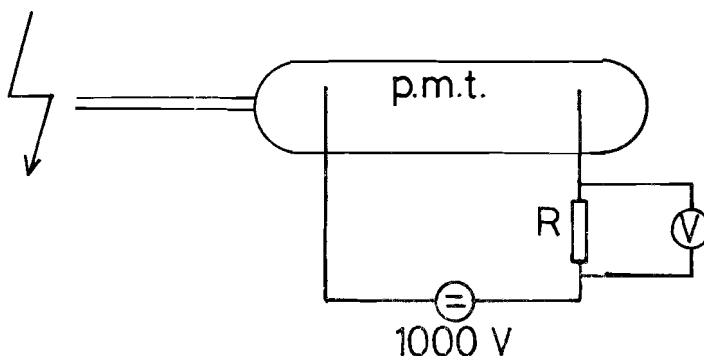
Hierdoor zal de zwarte band een stijgend verloop krijgen bij hoge stroomwaarden en tevens zal dan de zwarte band smaller worden (figuur 3.11).



figuur 3.11 De zwarte band als in het ijzer verzadiging optreedt.

Om vast te stellen of de kommutatie vonkvrij geschiedt, moeten we de aflopende kant van de borstel bekijken en de vonken met het oog vaststellen. Deze methode is zoals ieder zal begrijpen zeer subjectief; hij zal sterk afhangen van de observeerder. Men heeft voor de vonkdetektie dan ook enkele objectieve methoden ontwikkeld, waaronder de door ons gebruikte p.m.t.-methode. Het mogelijk aanwezige licht wordt via een glasvezelkabel getransporteerd naar een lichtgevoelige elektrische buis: de " photomultiplier tube ". Deze buis voert indien er geen licht aanwezig is een zeer kleine stroom, terwijl er reeds bij een zeer geringe lichtintensiteit een veel grotere stroom zal gaan vloeien. De stroom die de buis voert is dus een maat voor de vonkvorming als de kommutatieruimte verder lichtdicht is afgesloten. ~

We gebruiken de volgende vonkdetektieschakeling:

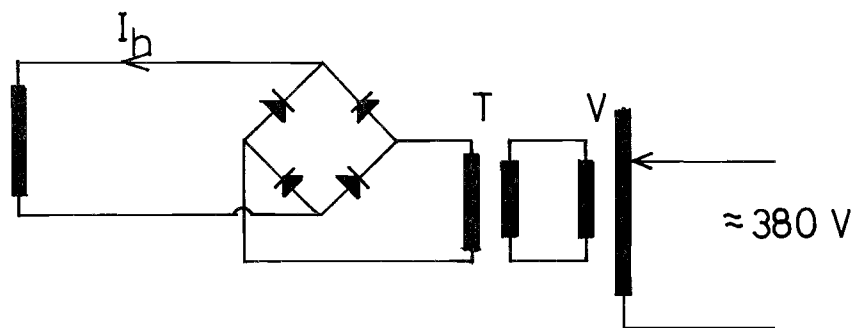


figuur 3.12 De vonkdetektieschakeling.

De lichtgevoelige buis (Philips, P 1002) werd via een weerstand van 100 k Ω gevoed door een gelijkspanning van 1500 Volt. Bij deze voeding was de donkerstroom 0.1 μ A wat een spanning van 10 mV over de weerstand R gaf.

3.3. Metingen

Om de hulppoolstroom te regelen hebben we de volgende voeding opgesteld:



figuur 3.13 De hulppoolstroomvoeding.

Via een regelbare transformator en een vaste transformator wordt een regelbare wisselspanning verkregen die we via een volledige diodebrug gelijkrichten en aan de hulppoolspoel toevoeren. Deze gelijkrichting zal een rimpel op de hulppoolstroom geven, die bepaald wordt door de weerstand en zelfinductie van de spoel. Deze rimpel bedraagt 15 %. Bij metingen zonder deze rimpel (tijdelijke voeding uit een akku) bleek dat deze rimpel geen invloed heeft op de kommutatie ; de zwarte band bleef hetzelfde. Het ankercircuit is gevoed door de Ward-Leonardschakeling (zie hoofdstuk 1).



Tabel 3-3

De zwarte band meting bij 2000 omw./min en een bekrachtigings-
stroom van 7 A. in de linkerdraairichting.

I_h (A)	I_a max (A)	f_h min	I_a min (A)	f_h max
0	30	-.2		
30	48	-.12		
60	71	-.073	15	.3
90	92	-.013	45	.3
120	115	.033	69	.34
150	139	.073	86	.426
180	159	.14	113	.446
210	184	.173	126	.56
240	212	.186	152	.586
270	227	.386	173	.646

Tabel 3-4

De zwarte band meting bij 2000 omw./min en een bekrachtigings-
stroom van 7 A. in de rechterdraairichting.

I_h (A)	I_a max (A)	f_h min	I_a min (A)	f_h max
0	34	-.226		
30	56	-.173		
60	73	-.086	16	.293
90	94	-.026	45	.3
120	112	.053	65	.366
150	132	.12	85	.433
180	158	.146	115	.433
210	184	.173	134	.506
240	211	.193	160	.533
270	238	.213	177	.62



Tabel 3-5

De zwarte band meting bij 1000 omw./min en een bekrachtigingsstroom van 3.5 A in de linkerdraairichting.

I_h (A)	I_a max (A)	f_h min	I_a min (A)	f_h max
0	98	-.653		
30	119	-.693		
60	140	-.533		
90	162	-.48		
120	187	-.446		
150	206	-.373	38	.746
180	226	-.306	58	.813
210	254	-.293	84	.833
240			105	.9
270			124	.973

Tabel 3-6

De zwarte band meting bij 1000 omw./min en een bekrachtigingsstroom van 3.5 A in de rechterdraairichting.

I_h (A)	I_a max (A)	f_h min	I_a min (A)	f_h max
0	70	-.466		
30	95	-.433		
60	117	-.38		
90	135	-.3		
120	155	-.233	25	.633
150	184	-.226	52	.653
180	216	-.24	70	.733
210	238	-.286	89	.806
240			112	.853
270			129	.94



Tabel 3-7

De zwarte band meting bij 2000 omw./min en een bekrachtigings-
stroom van 3.5 A in de linkerdraairichting.

I_h (A)	I_a max (A)	f_h min	I_a min (A)	f_h max
0	39	-.26		
30	66	-.24		
60	88	-.186	23	.246
90	116	-.173	45	.3
120	140	-.133	72	.32
150	164	-.093	101	.326
180	190	-.066	129	.34
210	212	-.013	153	.38
240	239	.006	188	.346
270			201	.46

Tabel 3-8

De zwarte band meting bij 2000 omw./min en een bekrachtigings-
stroom van 3.5 A in de rechterdraairichting.

I_h (A)	I_a max (A)	f_h min	I_a min (A)	f_h max
0	37	-.246		
30	56	-.173		
60	75	-.1	18	.28
90	99	-.06	43	.313
120	119	.006	69	.34
150	141	.06	95	.366
180	164	.106	119	.406
210	189	.14	144	.44
240	215	.166	171	.46
270	239	.206	188	.546

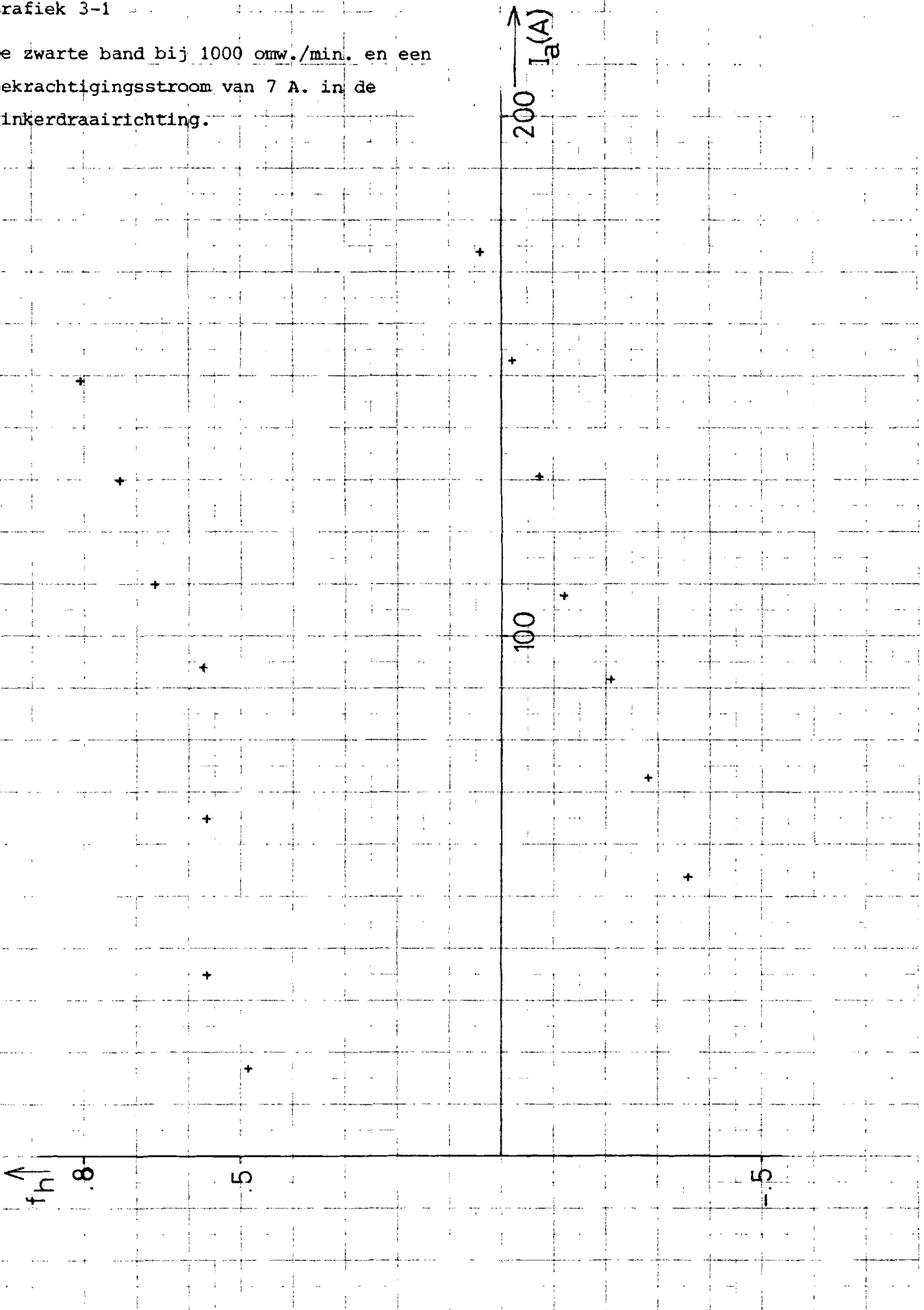
Tabel 3-9

De zwarte band meting bij 2000 omw./min en een bekrachtigingsstroom van 3.5 A in de linkerdraairichting, terwijl we de vonken visueel waarnemen.

I_h (A)	$I_{a \max}$ (A)	$f_{h \min}$	$I_{a \min}$ (A)	$f_{h \max}$
0	46	-.306		
30	90	-.4		
60	104	-.293		
90	126	-.24	42	.32
120	152	-.213	66	.36
150	174	-.16	92	.386
180	200	-.133	112	.453
210	222	-.08	140	.466
240	242	-.013	150	.6
270			166	.693

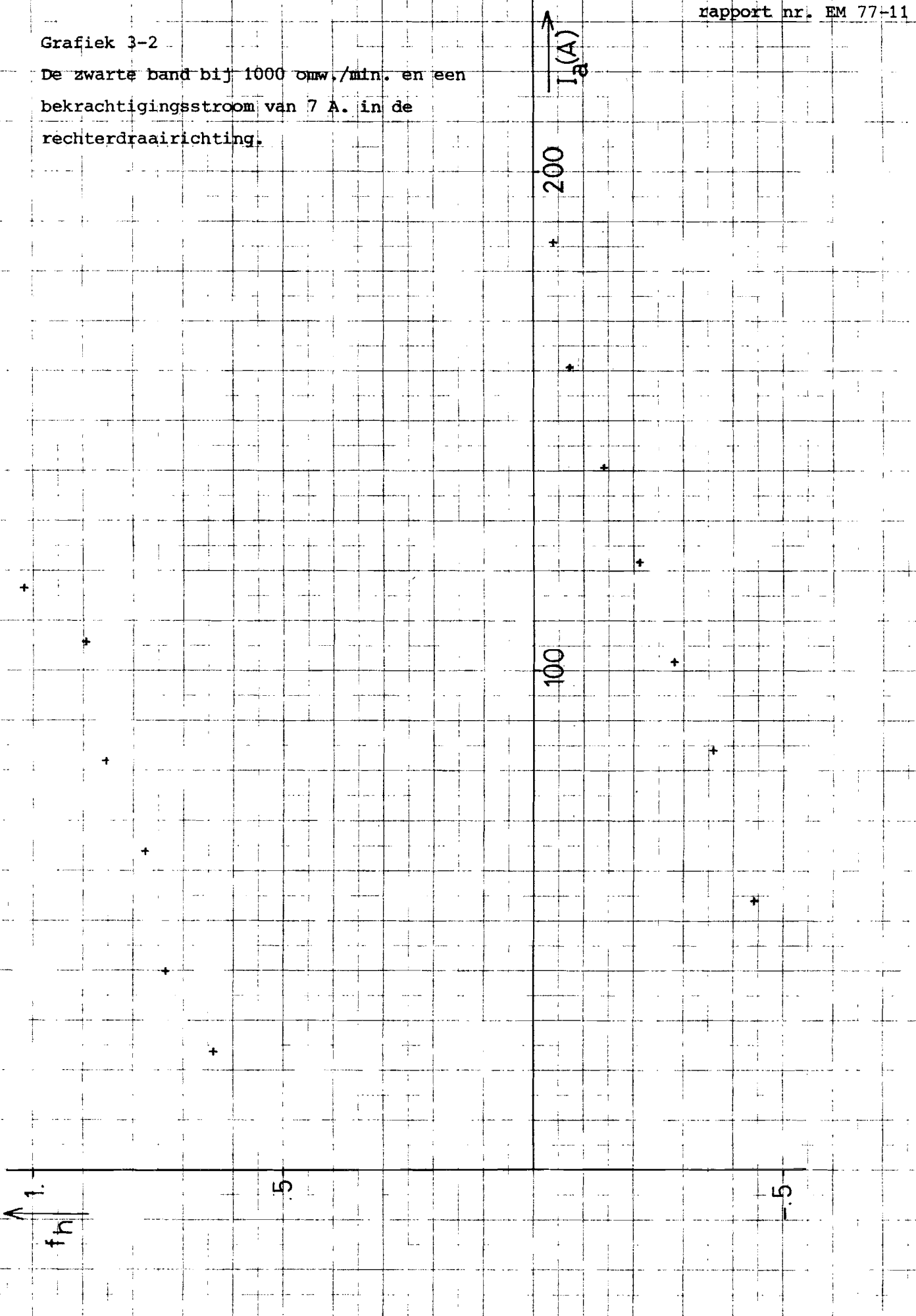
Grafiek 3-1

De zwarte band bij 1000 omw./min. en een
bekrachtigingsstroom van 7 A. in de
linkerdraairichting.



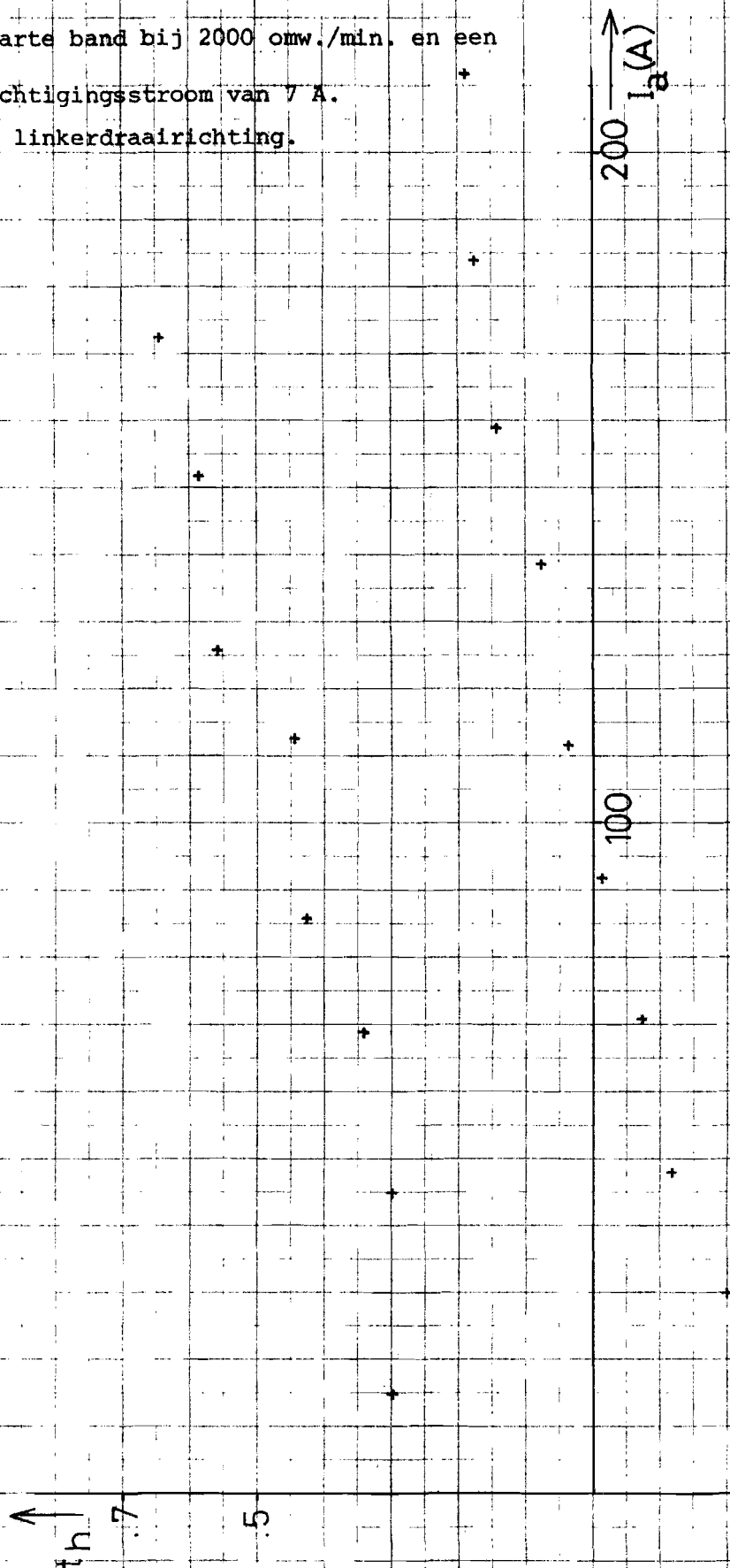
Grafiek 3-2

De zwarte band bij 1000 omw./min. en een bekrachtigingsstroom van 7 A. in de rechterdraairichting.



Grafiek 3-3

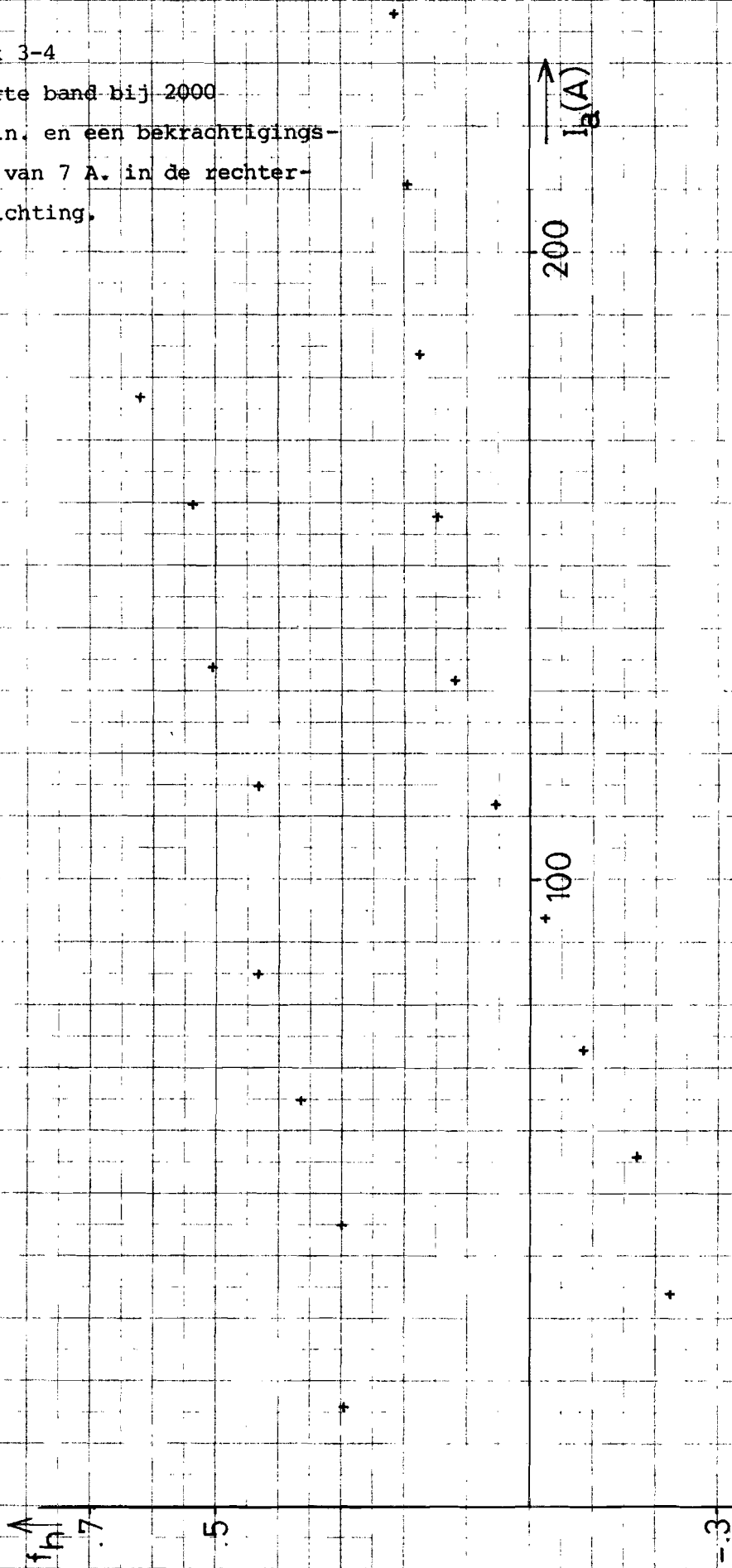
De zwarte band bij 2000 omw./min. en een
bekrachtigingsstroom van 7 A.
in de linkerdraairichting.



Grafiek 3-4

De zwarte band bij 2000
omw./min. en een bekrachtigings-
stroom van 7 A. in de rechter-
draairichting.

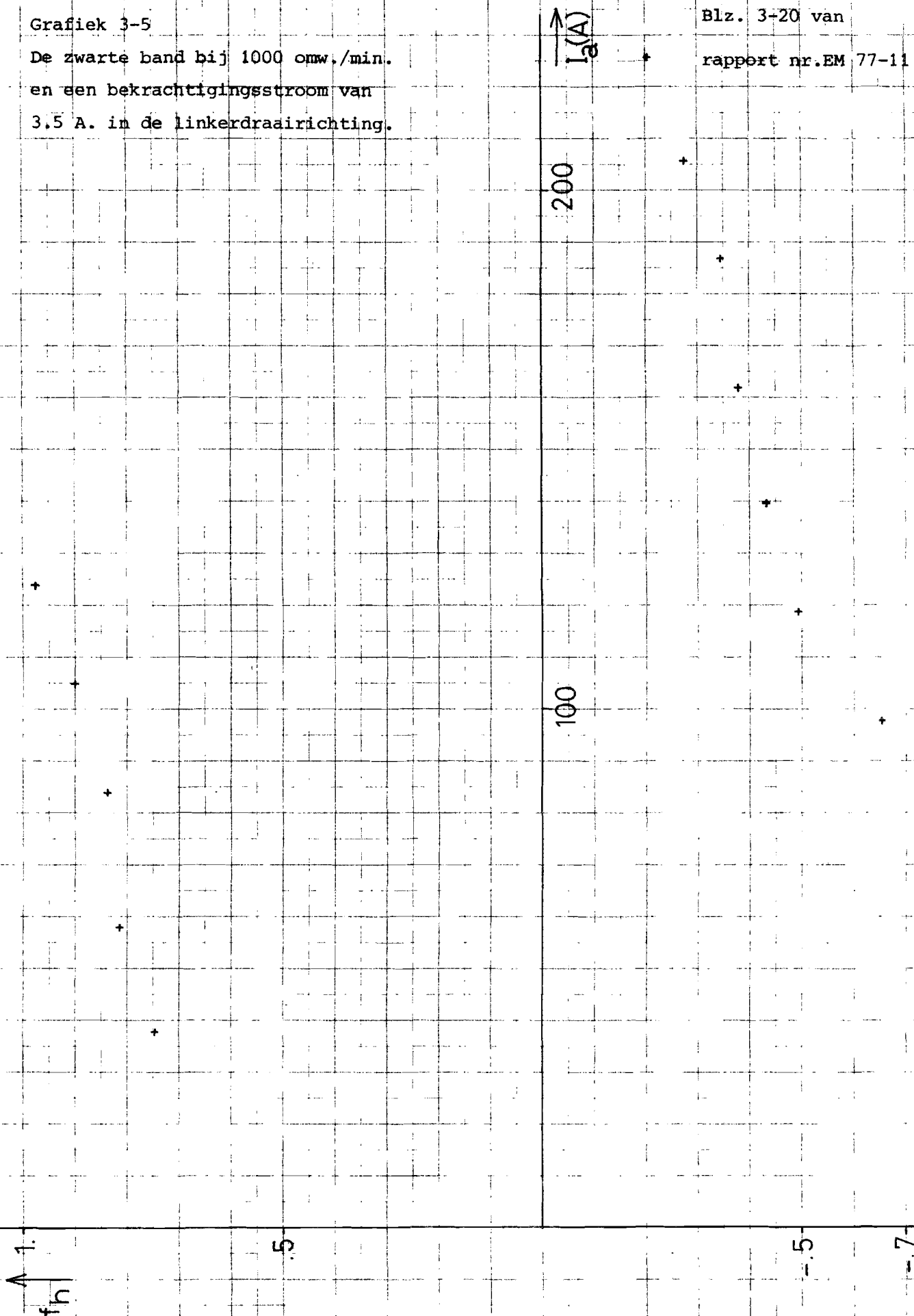
Blz. 3-19 van
rapport EM 77-11



Grafiek 3-5

De zwarte band bij 1000 omw./min.
en een bekrachtigingsstroom van
3.5 A. in de linkerdraairichting.

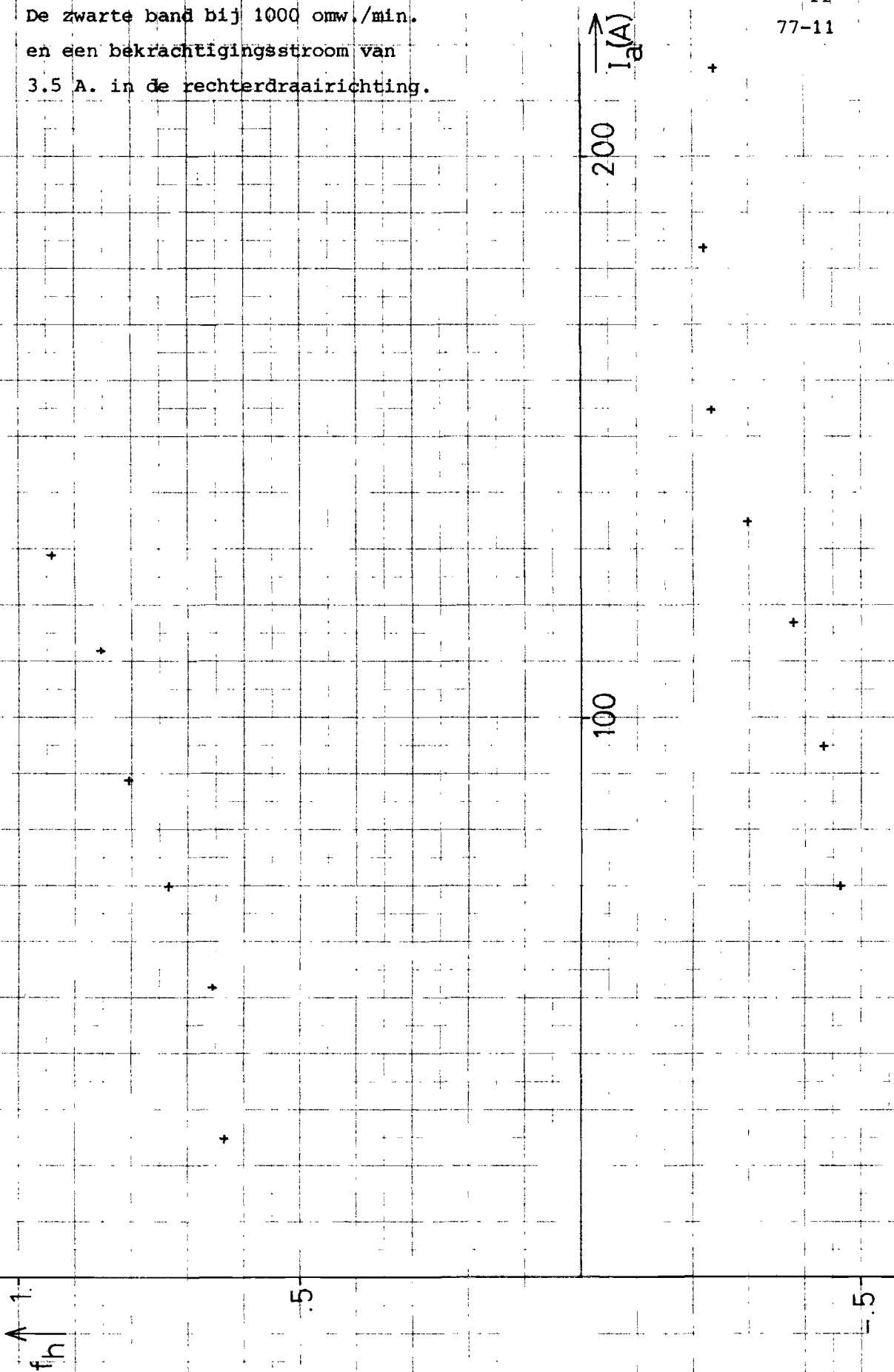
Blz. 3-20 van
rapport nr. EM 77-11



Grafiek 3-6

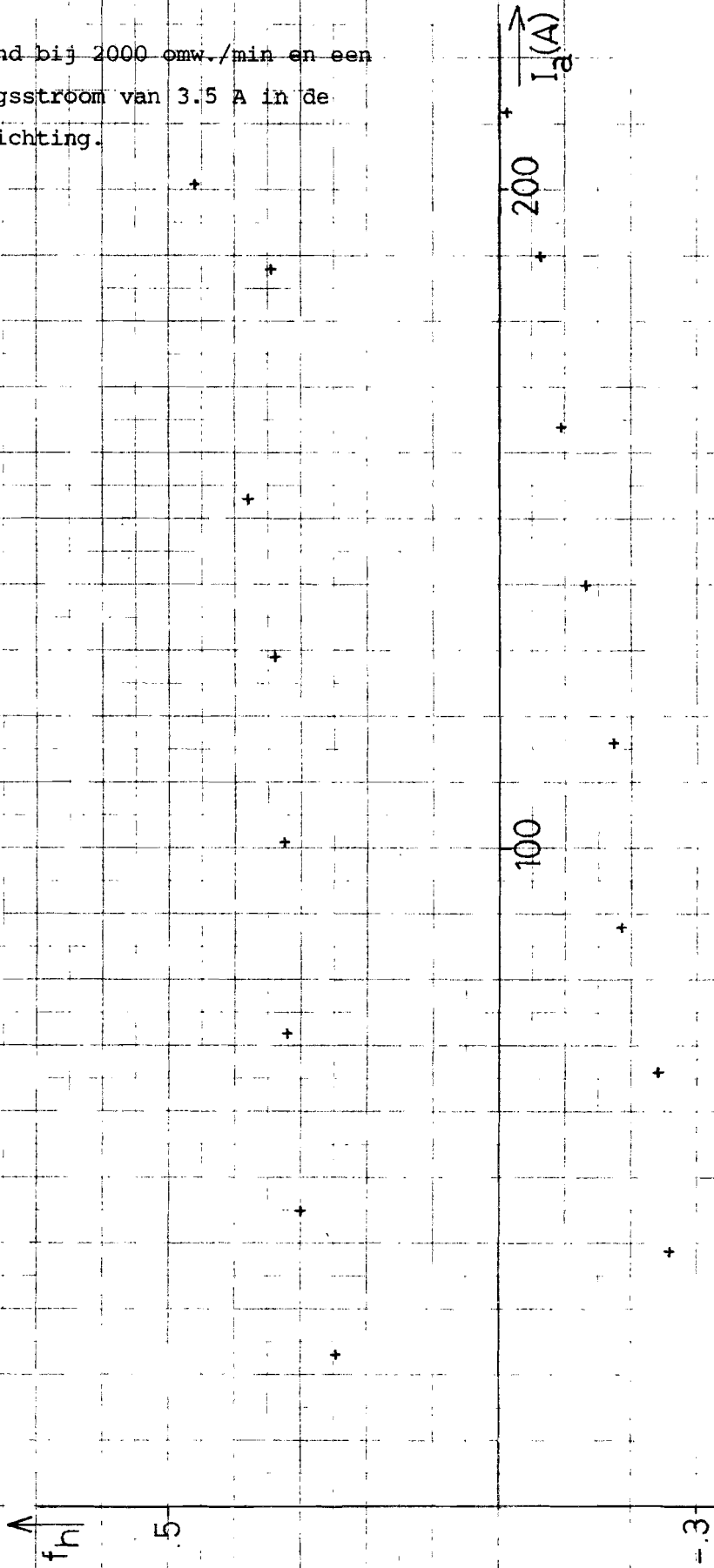
De zwarte band bij 1000 omw./min.
en een bekrachtigingsstroom van
3.5 A. in de rechterdraairichting.

Blz. 3-21 van
rapport nr. EM
77-11



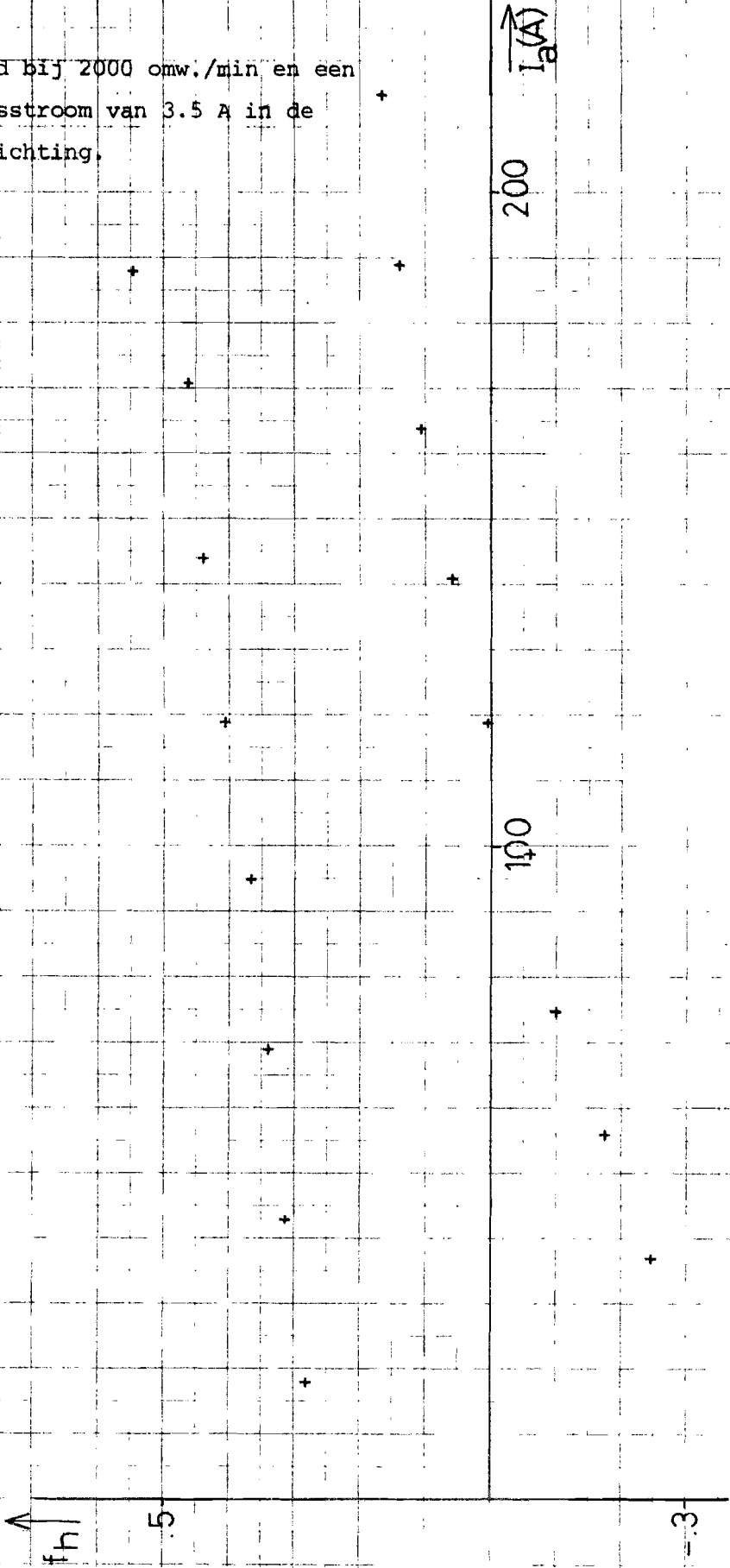
Grafiek 3-7

De zwarte band bij 2000 omw./min en een
bekrachtigingsstroom van 3.5 A in de
linkerdraairichting.



Grafiek 3-8

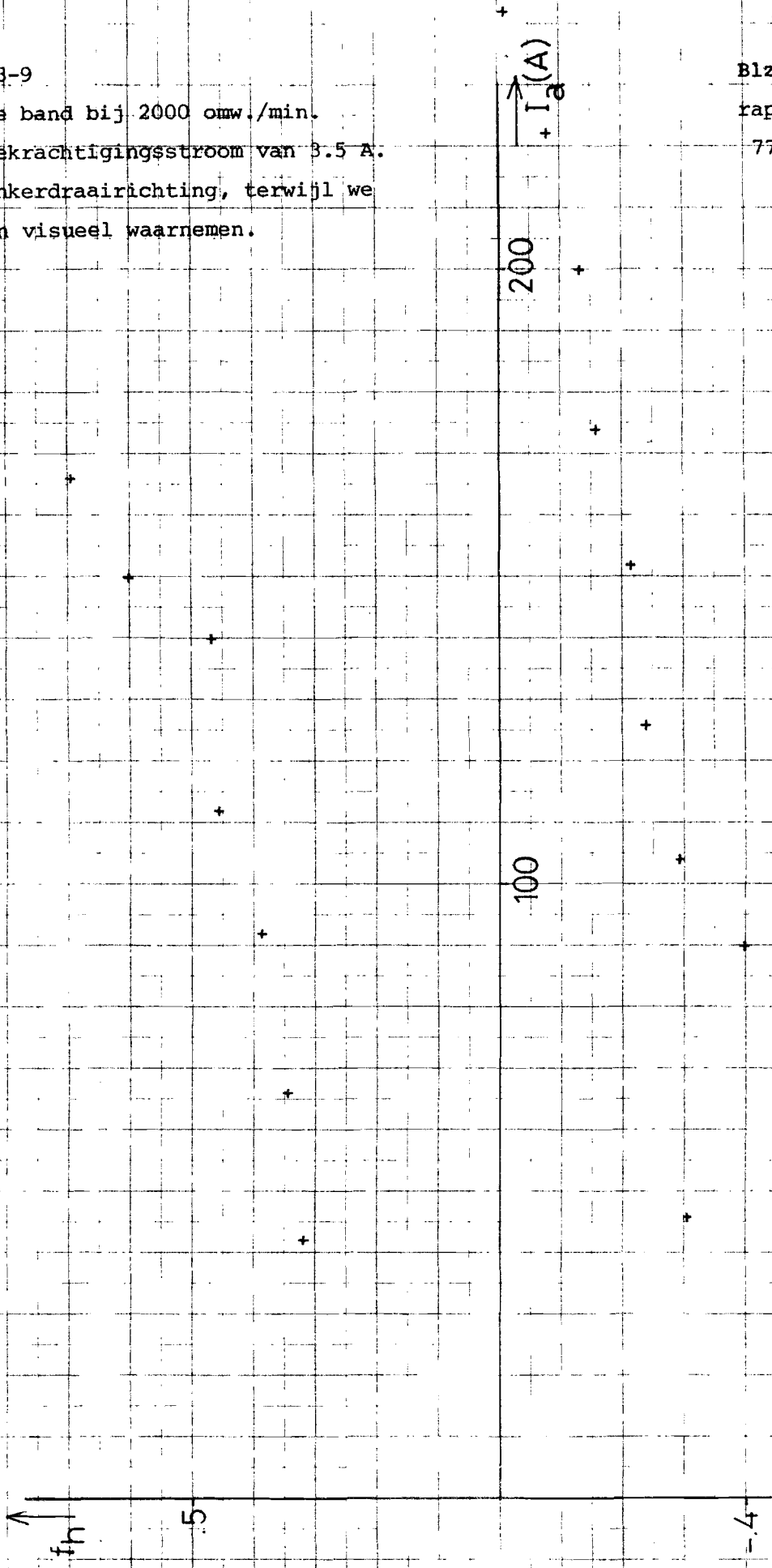
De zwarte band bij 2000 omw./min en een bekrachtigingsstroom van 3.5 A in de rechterdraairichting.



Grafiek 3-9

De zwarte band bij 2000 omw./min.
en een bekrachtigingsstroom van 3.5 A.
in de linkerdraairichting, terwijl we
de vonken visueel waarnemen.

Blz. 3-24 van
rapport nr. EM
77-11





3.4 Conclusie

Als we voorgaande metingen bekijken kunnen we vier opmerkingen plaatsen:

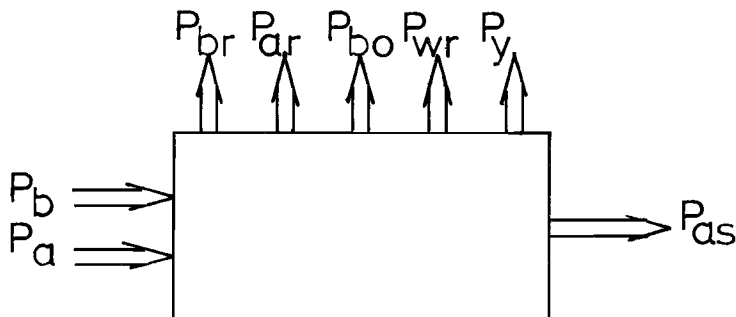
- De visuele meting die verricht is komt goed overeen met de meting met de p.m.t.-methode. De zwarte band is aan weerszijden 10 A breder.
- Het verschil tussen 3.5 A of 7 A bekrachtigingsstroom is dat de band in het eerste geval breder is. Bij 7 A bekrachtiging loopt de band tevens meer stijgend. Beide verschijnselen komen door de al eerder genoemde verzadiging in het ijzer.
- Het verschil tussen linker- en rechter draairichting is gering, terwijl de a-symetrie ten opzichte van de horizontale as gering is. Beide waarnemingen duiden op een juiste stand van de borstels ten opzichte van de hulppolen.
- In alle grafieken is duidelijk het opwaartse verloop zoals aangeduid in figuur 3.8b waar te nemen; de hulppolen zijn dus te zwak gedimensioneerd. Om het hulppoolveld te versterken kunnen we het aantal windingen vergroten en de luchtspleet verkleinen. De eerste mogelijke oplossing is in dit geval wegens ruimtegebrek niet te realiseren, zodat de oplossing bij de tweede mogelijkheid gezocht moet worden, bijvoorbeeld door opvulplaatjes onder de hulppolen en het huis te plaatsen.

Hoofdstuk 4

Rendementsbepalingen

4.1 Inleiding

Aangezien de hoeveelheid energie, die je in een akku kunt opslaan nog zeer beperkt is, is het belangrijk dat deze energie zo goed mogelijk wordt besteed. Het rendement van de motor is dus van groot belang, niet alleen het rendement bij nominaal bedrijf, maar het rendementsverloop in het gehele koppel-toeren gebied. We kunnen de motor energetisch bezien als een "zwarte doos", waar we elektrisch vermogen instoppen en waar we mechanisch vermogen uit willen krijgen. Behalve dit laatst genoemde vermogen komen er nog verschillende soorten van verliesvermogens vrij (figuur 4.1).



figuur 4.1 De energetische beschouwing van de motor.

Het elektrische vermogen voeren we toe via het bekrachtigingscircuit en het anker-circuit (respektievelijk P_a en P_b). Het mechanisch vermogen dat vrijkomt noemen we P_{as} . De vermogensverliezen bestaan uit de weerstandsverliezen in de bekrachtiging en in het anker (P_{br} en P_{ar}), de borstelverliezen P_{bo} , de mechanische wrijvingsverliezen P_{wr} en de verliezen van magnetische oorsprong in het ijzer (P_y).

Het rendement kunnen we bepalen door de verhouding van het uitgangsvermogen en het ingangsvermogen te bepalen; we noemen dit de directe methode.



$$r_d = \frac{P_{as}}{P_a + P_b} 100 \% \quad 4-1$$

Ook is het mogelijk alle verliezen te berekenen en dan het rendement indirect te bepalen volgens:

$$r_i = \frac{P_{as}}{P_{as} + P_{br} + P_{ar} + P_{bo} + P_{wr} + P_y} 100 \% \quad 4-2a$$

$$r_i = \frac{P_a + P_b - P_{ar} - P_{br} - P_{bo} - P_{wr} - P_y}{P_a + P_b} 100 \% \quad 4-2b$$

Het vaststellen van het ingaande elektrische vermogen is gemakkelijk met gelijkspanning werken en dus geldt:

$$P_a = I_a U_a \quad 4-3$$

$$P_b = I_b U_b \quad 4-4$$

Ook het asvermogen is eenvoudig vast te stellen, want daarvoor geldt:

$$P_{as} = T \omega \quad 4-5$$

Het vermogen dat verloren gaat in de weerstanden van zowel anker als bekrachtiging is gelijk aan:

$$P_{ar} = R_a I_a^2 \quad 4-6$$

$$P_{br} = R_b I_b^2 \quad 4-7$$

Voor de weerstandswaarden R_a en R_b nemen we de waarde bij een temperatuur van 115°C (volgens de NEN en IEC voorschriften).

Deze waarden hebben we reeds vroeger in hoofdstuk 2 vastgesteld op:

$$R_a = 60 \text{ m}\Omega \text{ en } R_b = 13.2 \Omega.$$

Omdat we met gelijkstroom zonder rimpel werken ondervindt de bekrachtiging geen inductieve effecten, zodat $P_{br} = P_b$.

De verliezen over de borstel-lamel overgang zijn moeilijk te bepalen, omdat de overgang noch door een weerstand, noch door een konstante spanningsdaling is voor te stellen. Volgens de richtlijnen mag je deze verliezen benaderen door een konstante spanning, zodat

$$P_{bo} = U_{bo} I_a \quad 4-8$$

waarbij $U_{bo} = 0.3$ Volt voor de koolsoort van de door ons gebruikte borstels.



De wrijvingsverliezen zijn vast te stellen, door het meten van het koppel, dat nodig is om de as met een bepaalde hoeksnelheid aan te drijven.

$$P_{wr} = T_{wr} \omega \quad 4-9$$

Het berekenen van de ijzerverliezen is een onmogelijke zaak. We zullen de verliezen eerst benaderen door ze uit te splitsen in een konstant deel en een gedeelte dat zal afhangen van de belasting.

$$P_y = P_{yc} + P_{yb} \quad 4-10$$

Het konstant deel bepalen we door het nullastvermogen met de reeds beschreven verliezen te verminderen, zodat we alleen P_{yc} overhouden ($P_{yb} = 0$), want voor P_n geldt:

$$P_n = P_{ar} + P_{br} + P_{bo} + P_{wr} + P_{yc} \quad 4-11$$

Het gedeelte P_{yb} zullen we volgens de voorschriften benaderen door een kwadratisch verloop met de stroom aan te nemen van deze verliezen, terwijl het verlies maximaal 1% van het ankervermogen bij maximale stroom en maximale spanning bedraagt bij het betreffende toerental

$$P_{yb} = \frac{U_{\max} I_{\max}}{I_{\max}^2} I_a^2 = \frac{U_{\max} I_a^2}{I_{\max}} \quad 4-12$$

I_{\max} is hierbij steeds 320 A, terwijl we U_{\max} kunnen bepalen uit het lineaire verloop van U_a als functie van I_a .

4.2 De koppelmeetmethode

Bij metingen, waarbij we voor de koppelmetering de koppelmeet-tafel gebruikten, kregen we waarden van de vermogens waarbij gold: $P_{as} + P_{ar} + P_{br} \gg P_a + P_b$. Aangezien dit onmogelijk is, moest een van de metingen fout zijn.

Enige voorbeelde van dit verschijnsel staan hieronder vermeld.

- $n = 400$ omw./min

$$T = 110 \text{ Nm} \quad P_{as} = 4607 \text{ W}$$

$$U_b = 93 \text{ V} \quad P_a = 651 \text{ W}$$

$$I_b = 7 \text{ A} \quad P_{ar} = 651 \text{ W}$$

$$U_a = 36 \text{ V} \quad P_a = 7524 \text{ W}$$

$$I_a = 228 \text{ A} \quad P_{ar} = 3119 \text{ W}$$

$$651 + 3119 + 4607 = 8377 > 651 + 7524 = 8175$$



- $n = 1800$ omw./min

$$T = 80 \text{ Nm} \quad P_{as} = 15083 \text{ W}$$

$$U_b = 93 \text{ V} \quad P_b = 651 \text{ W}$$

$$I_b = 7 \text{ A} \quad P_{br} = 651 \text{ W}$$

$$U_a = 108 \text{ V} \quad P_a = 16092 \text{ W}$$

$$I_a = 149 \text{ A} \quad P_{ar} = 1332 \text{ W}$$

$$651 + 1332 + 15083 = 17066 > 651 + 16092 = 16743$$

- $n = 1600$ omw./min

$$T = 30 \text{ Nm} \quad P_{as} = 5026 \text{ W}$$

$$U_b = 93 \text{ V} \quad P_b = 651 \text{ W}$$

$$I_b = 7 \text{ A} \quad P_{br} = 651 \text{ W}$$

$$U_a = 91 \text{ V} \quad P_a = 5187 \text{ W}$$

$$I_a = 57 \text{ A} \quad P_{ar} = 195 \text{ W}$$

$$651 + 195 + 5026 = 5872 > 651 + 5187 = 5838$$

Bij controle van alle gemeten grootheden, bleek dat de koppelmeting fout moest zijn. Een nadere bestudering van de mogelijke fouten, die bij deze koppelmeting gemaakt zijn, staat uitgewerkt in appendices A en B. Om de rendementsbepalingen toch uit te kunnen voeren zijn we verhuist naar een andere koppelmeetmethode, de zogenaamde remdynamo (voor gegevens zie hoofdstuk 1). Deze koppelmeetmethode is reeds op zijn juistheid onderzocht en bleek binnen 1% nauwkeurig te zijn (L12).

4.3 De metingen

Het gebied waarin we de metingen verricht hebben is wat betreft het toerental naar boven begrensd, doordat de komplementaire machine niet meer dan 3000 omw./min mag draaien. Onze aandacht ging echter vooral uit naar het gebied waarin Siemens geen rendementswaarden geeft (grafiek 4.3), namelijk het gebied met lage toerentallen. Dit laatste is de situatie, die zich voordoet bij het optrekken van het voertuig, wat bij een stadsauto veelvuldig voorkomt.



We zijn begonnen om het wrijvingskoppel als functie van het toerental te bepalen, hetgeen in onderstaande tabel is opgenomen.

n(omw./min)	T _{wr}
100	1.6
200	1.7
300	1.7
400	1.8
500	1.9
600	1.9
800	1.95
1000	1.95
1200	1.95
1400	1.95
1600	1.95
1800	2
2000	2
2200	2
2400	2
2600	2
2800	2
3000	2

Tabel 4.1

Het wrijvingskoppel.

Het wrijvingskoppel is in grafiek 4.1 uit gezet.

De volgende meting, de nullastmeting en de tijdens nullast optredende verliezen en de op die wijze berekende konstante ijzerverliezen zijn in de tabel 4.2 opgenomen.

Deze berekeningen zijn in grafiek 4.2 grafisch verwerkt.

Het verloop van deze kromme bestaat uit een stijgend deel tot ± 2350 omw./min en daarna een dalend deel. De stijging komt omdat de hystereseverliezen toenemen met de hoeksnelheid bij konstante bekrachtiging. De daling wordt veroorzaakt doordat de wervelstroomverliezen afnemen bij afname van het veld. Ook de hystereseverliezen zullen dan afnemen, hoewel veel minder dan de wervelstroomverliezen.



Tabel 4.2

De berekening van de konstante ijzerverliezen.

$n \left(\frac{\text{omw.}}{\text{min}} \right)$	V_a (V)	I_a (A)	P_N (W)	P_{ar} (W)	P_{bo} (W)	P_{wr} (W)	P_{yc} (W)
200	13.3	3.9	51.9	.67	2.34	35.6	13.29
400	24.2	4.05	98	.72	2.43	75.4	19.45
600	35	4.25	148.8	.79	2.55	119.38	26.08
800	45.5	4.5	204.8	.89	2.7	163.36	37.85
1000	56.5	4.75	268.4	.99	2.85	204.2	60.35
1200	67.5	4.95	334.1	1.08	2.97	245.04	85.01
1400	78	5.1	397.8	1.14	3.06	285.88	107.72
1600	88.5	5.2	460.2	1.19	3.12	326.73	129.16
1800	99.5	5.4	537.3	1.28	3.24	376.99	155.79
2000	110	5.55	610.5	1.36	3.33	418.88	186.99
2200	121	5.75	685.8	1.45	3.45	460.77	220.19
2400	130	5.5	715	1.33	3.3	502.65	207.72
2600	130	5.4	702	1.28	3.24	544.54	152.94
2800	130	5.4	702	1.28	2.24	586.43	111.05
3000	130	5.55	721.5	1.36	3.33	628.32	88.49

In de hiernavolgende tabellen staan de rendementsbepalingen, die door ons zijn verricht.

T_{wr} (Nm)



2

1

1000

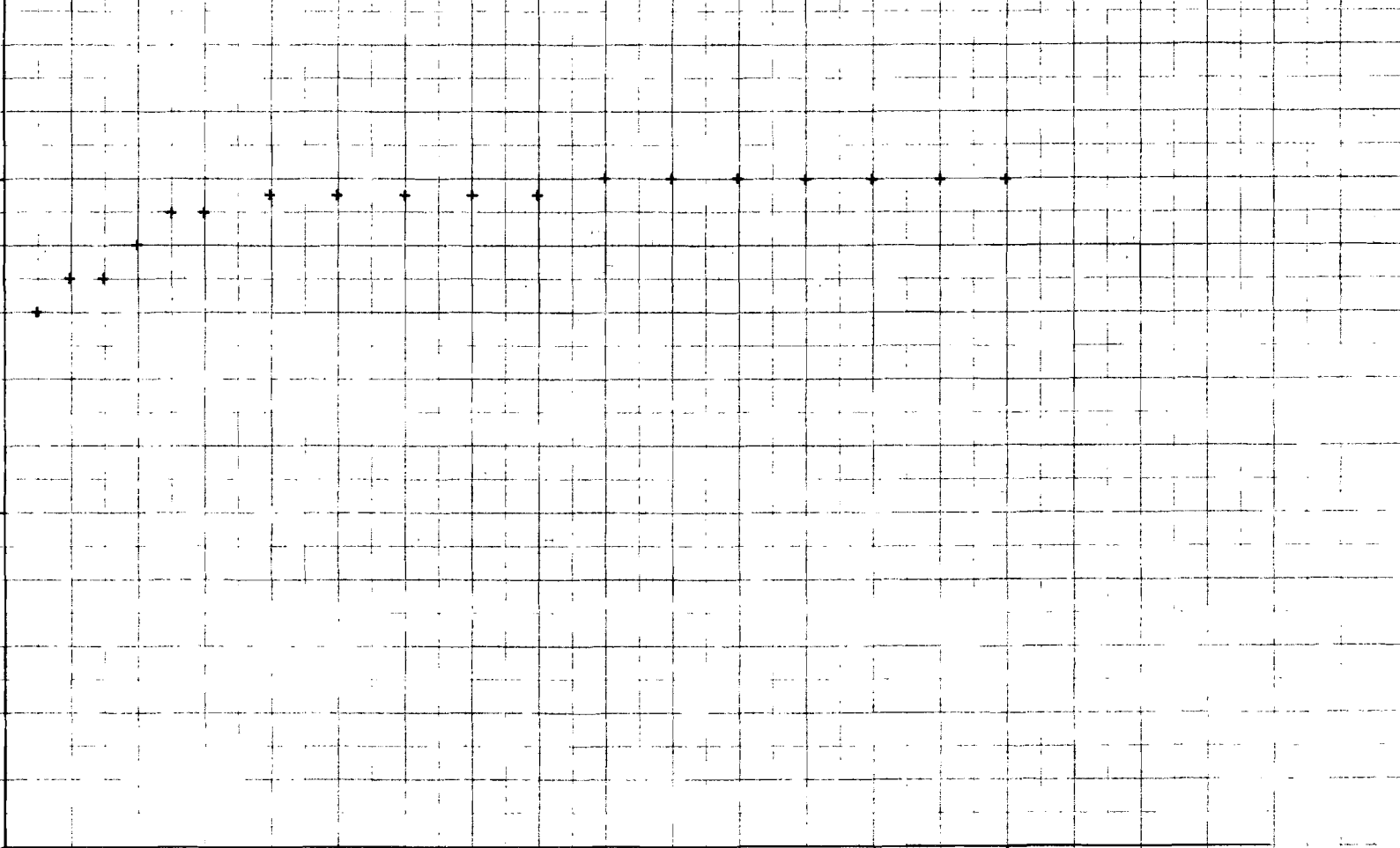
2000

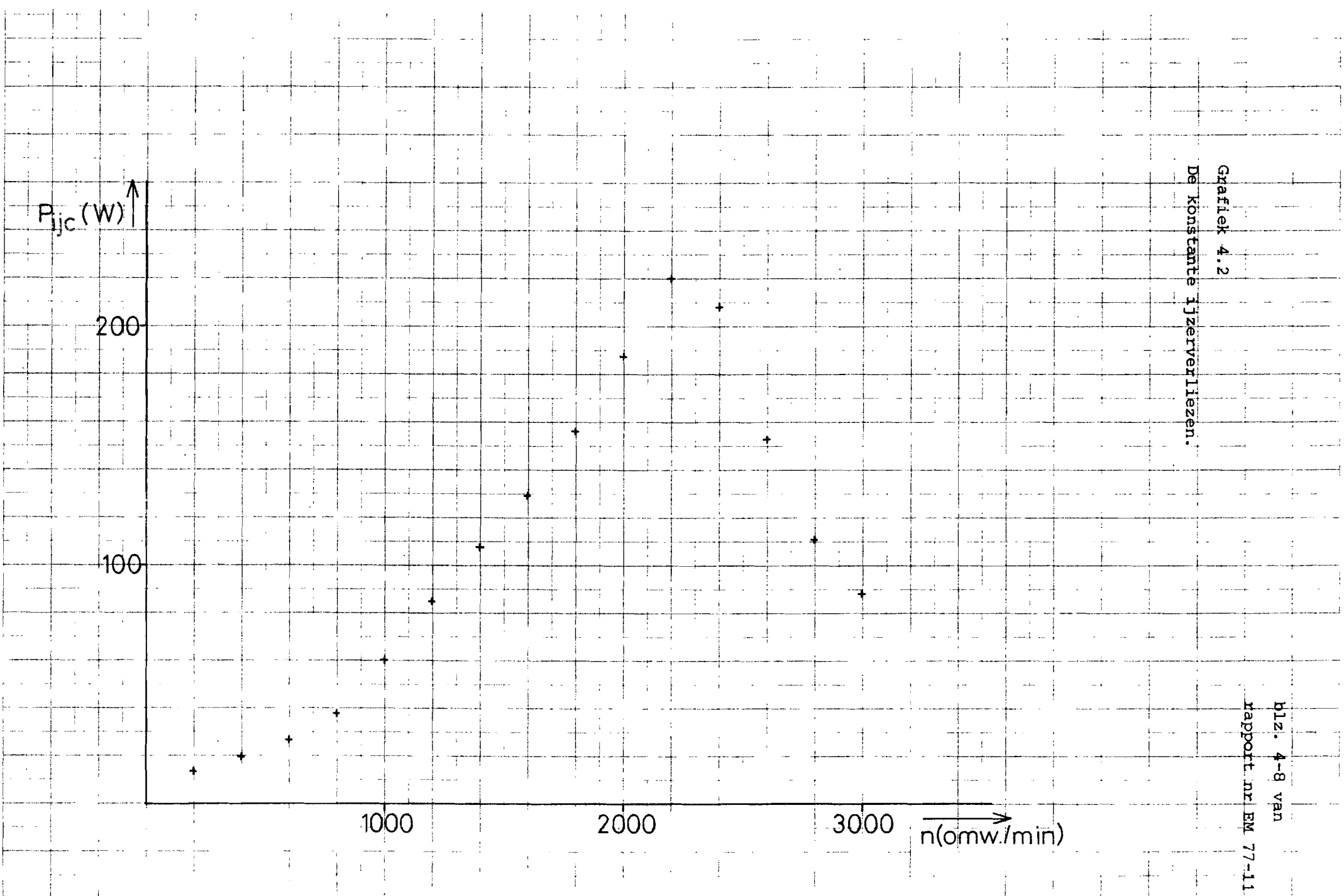
3000

n (omw./min)

Grafiek 4.1
Het wrijvingskoppel.

blz. 4-7 van
rapport nr EM 77-11





Grafiek 4.2
De konstante ijzerverliezen.

Tabel 4.3

Rendementsmetingen.

$n \left(\frac{\text{OPW}}{\text{min}} \right)$	T(Nm)	V_a (V)	I_a (A)	U_b (V)	I_b (A)	P_{as} (W)	P_a (W)	P_b (W)	P_{ar} (W)	P_{br} (W)	P_{bo} (W)	P_{wr} (W)	P_{yc} (W)	P_{yb} (W)	r_d	r_i
400	30	26	62	93	7	1256	1612	651	231	651	37	75	13	3	.555	.554
400	50	28.5	102	93	7	2094	2907	651	624	651	61	75	13	7	.589	.594
400	70	31	146	93	7	2932	4526	651	1279	651	88	75	13	15	.566	.58
400	90	33	188	93	7	3770	6204	651	2121	651	113	75	13	24	.550	.557
400	110	35	236	93	7	4608	8260	651	3342	651	142	75	13	38	.517	.520
600	40	38	82	93	7	2513	3116	651	403	651	49	119	19	7	.667	.668
600	60	40	124	93	7	3770	4960	651	923	651	74	119	19	16	.672	.677
600	80	42	166	93	7	5027	6972	651	1663	651	100	119	19	28	.659	.661
600	100	44.5	211	93	7	6283	9390	651	2671	651	127	119	19	46	.625	.634
600	120	47	259	93	7	7540	12173	651	4025	651	155	119	19	70	.588	.599
800	30	47.5	64	93	7	2513	3040	651	246	651	38	163	26	6	.681	.690
800	50	49.5	102.5	93	7	4189	5074	651	630	651	62	163	26	15	.731	.730
800	70	52	144	93	7	5864	7488	651	1244	651	86	163	26	29	.720	.727
800	90	53.5	186	93	7	7540	9951	651	2076	651	112	163	26	48	.711	.710
800	110	56	231	93	7	9215	12936	651	3202	651	139	163	26	74	.678	.684
800	130	59	280	93	7	16520	16520	651	4704	651	168	163	26	108	.634	.652
1000	40	59.5	82.5	93	7	4189	4909	651	408	651	50	204	38	12	.753	.755
1000	60	62	123	93	7	6283	7626	651	908	651	74	204	38	26	.759	.768
1000	80	63.5	164	93	7	8378	10414	651	1614	651	98	204	38	46	.757	.760
1000	100	66	206	93	7	10472	13596	651	2546	651	124	204	38	73	.735	.742
1000	120	68	252	93	7	12566	17136	651	3810	651	151	204	38	109	.706	.717



$n \left(\frac{\text{OMW}}{\text{min}} \right)$	T(Nm)	V_a (V)	I_a (A)	U_b (V)	I_b (A)	P_{as} (W)	P_a (W)	P_b (W)	P_{ar} (W)	P_{br} (W)	P_{bo} (W)	P_{wr} (W)	P_{yc} (W)	P_{yb} (W)	r_d	r_i
1200	30	70	64	93	7	3770	4480	651	246	651	38	245	60	8	.735	.751
1200	50	72	102	93	7	6283	7344	651	624	651	61	245	60	22	.786	.791
1200	70	73.5	143	93	7	8796	10511	651	1227	651	86	245	60	42	.788	.791
1200	90	75.5	183	93	7	11310	13817	651	2009	651	110	245	60	69	.782	.782
1200	110	77.5	225	93	7	13823	17438	651	3038	651	135	245	60	105	.764	.766
1200	130	80	270	93	7	16336	21600	651	4374	651	162	245	60	151	.734	.743
1400	40	81.5	82	93	7	5864	6683	651	403	651	49	286	108	16	.8	.795
1400	60	84	122	93	7	8796	10248	651	893	651	73	286	108	36	.807	.811
1400	80	85.5	162	93	7	11729	13851	651	1575	651	97	286	108	63	.809	.808
1400	100	88	203	93	7	14661	17864	651	2473	651	122	286	108	100	.792	.797
1400	120	91	246	93	7	17593	22385	651	3631	651	148	286	108	146	.764	.78
1600	30	92	63	93	7	5027	5796	651	238	651	38	327	129	11	.78	.784
1600	50	94.5	101	93	7	8378	9545	651	612	651	61	327	129	28	.821	.823
1600	70	97	142	93	7	11729	13774	651	1210	651	85	327	129	56	.813	.827
1600	90	98.5	181	93	7	15080	17829	651	1966	651	109	327	129	91	.816	.822
1600	110	101	223	93	7	18431	22523	651	2984	651	134	327	129	137	.795	.809
1600	130	104	266	93	7	21782	27664	651	4245	651	160	327	129	195	.769	.792
1800	40	102	83	93	7	7540	8466	651	413	651	50	377	156	21	.827	.819
1800	60	105.5	122	93	7	11310	12871	651	893	651	73	377	156	46	.836	.837
1800	80	108	163	93	7	15080	17604	651	1594	651	98	377	156	83	.826	.836
1800	100	110	203	93	7	18850	22330	651	2473	651	122	377	156	128	.82	.828
1800	120	112.5	243	93	7	22619	27338	651	3543	651	146	377	156	184	.808	.817





n ($\frac{\text{omw}}{\text{min}}$)	T (Nm)	V_a (V)	I_a (A)	V_b (V)	I_b (A)	P_{as} (W)	P_a (W)	P_b (W)	P_{ar} (W)	P_{br} (W)	P_{bo} (W)	P_{wr} (W)	P_{yc} (W)	P_{yb} (W)	r_d	r_i
2000	30	114	62	93	7	6283	7068	651	231	651	38	419	187	13	.814	.803
2000	50	117	101	93	7	10472	11817	651	612	651	61	419	187	35	.84	.842
2000	70	119.5	141	93	7	14661	16850	651	1193	651	85	419	187	69	.838	.849
2000	90	121	180	93	7	18850	21789	651	1944	651	108	419	187	112	.84	.846
2000	110	124	220	93	7	23038	27280	651	2904	651	132	419	187	167	.825	.838
2000	130	127	264	93	7	27227	33528	651	4182	651	158	419	187	241	.797	.823
2200	40	126.5	82	93	7	9215	10373	651	403	651	49	461	220	26	.836	.836
2200	60	129	122	93	7	13823	15738	651	893	651	73	461	220	57	.843	.854
2200	80	130	163	93	7	18431	21190	651	1594	651	98	461	220	101	.844	.855
2200	100	130	208	83.5	6.35	23038	27040	530	2596	530	125	461	220	165	.836	.849
2200	120	130	262	77.5	5.95	27646	34060	461	4119	461	157	461	220	262	.801	.83
2400	30	130	64	79	6.15	7540	8320	486	246	486	38	503	208	17	.856	.834
2400	50	130	108	74.5	5.83	12566	14040	434	700	434	65	5 3	208	47	.868	.865
2400	70	130	153	72.7	5.7	17593	19890	414	1405	414	92	503	208	95	.866	.866
2400	90	130	203	67.7	5.35	22619	26390	362	2473	362	122	503	208	167	.846	.855
2400	110	130	261	63.3	5.05	27646	33930	320	4087	320	157	503	208	277	.807	.833
2600	40	130	93	61	4.88	10891	12090	298	519	298	56		153	35	.879	.871
2600	60	130	143	58	4.7	16336	18590	273	1227	273	86	545	153	83	.866	.873
2600	80	130	196	55.5	4.52	21782	25480	251	2305	251	118	545	153	156	.847	.861
2600	100	130	258	53	4.35	27227	33540	231	3994	231	155	545	153	270	.806	.836

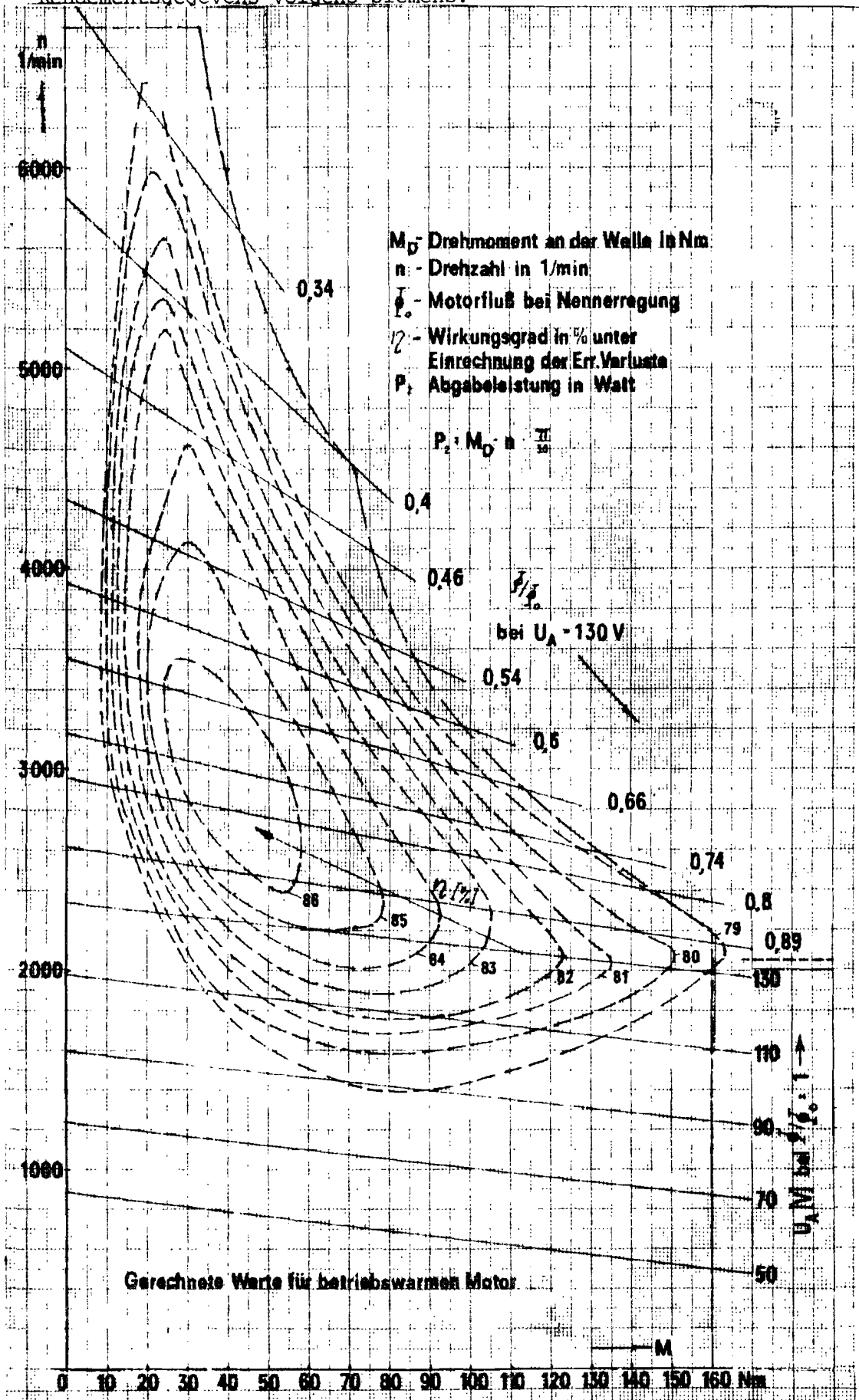


$n \left(\frac{\text{OMW}}{\text{min}} \right)$	T (Nm)	V_a (V)	I_a (A)	V_b (V)	I_b (A)	P_{as} (W)	P_a (W)	P_b (W)	P_{ar} (W)	P_{br} (W)	P_{bo} (W)	P_{wr} (W)	P_{yc} (W)	P_{yb} (W)	r_d	r_i
2800	30	130	75	52	4.28	8796	9750	223	338	223	45	586	111	23	.882	.869
2800	50	130	127	50	4.18	14661	16510	209	968	209	76	586	111	66	.877	.879
2800	70	130	181	48.5	4.08	20525	23530	198	1966	198	109	586	111	133	.865	.869
2800	90	130	245	44.7	3.95	26389	31850	177	3602	177	147	586	111	244	.824	.844
3000	40	130	110	42.5	3.75	12566	14300	159	726	159	66	628	88	49	.869	.88
3000	60	130	167	41.5	3.65	18850	21710	151	1673	151	100	628	88	113	.862	.873
3000	80	130	230	39.3	3.45	25133	29900	136	3174	136	138	628	88	215	.837	.852



Grafiek 4.4

Rendementsgegevens volgens Siemens.



n
(omw/min)

3000

2000

1000

w

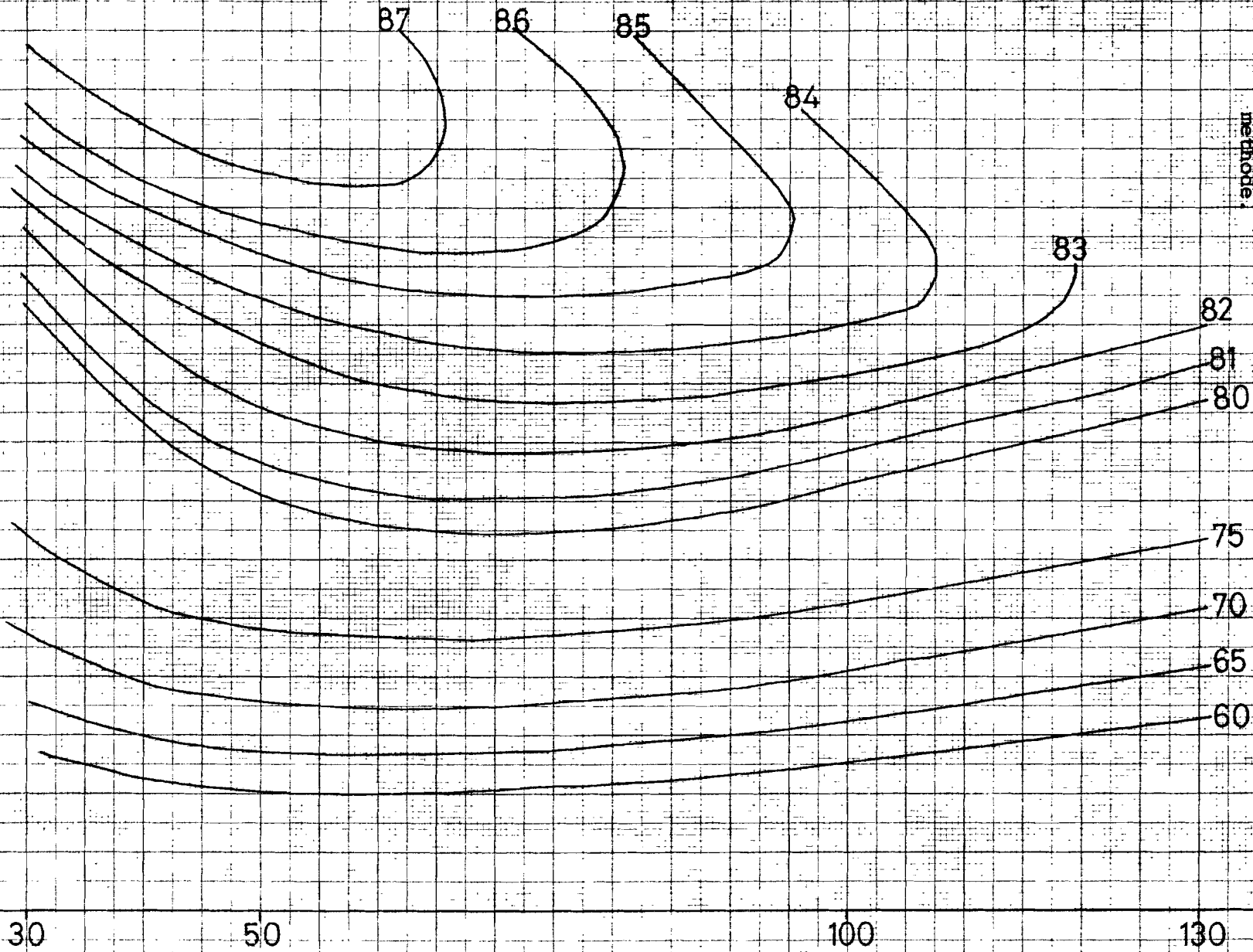
30

50

100

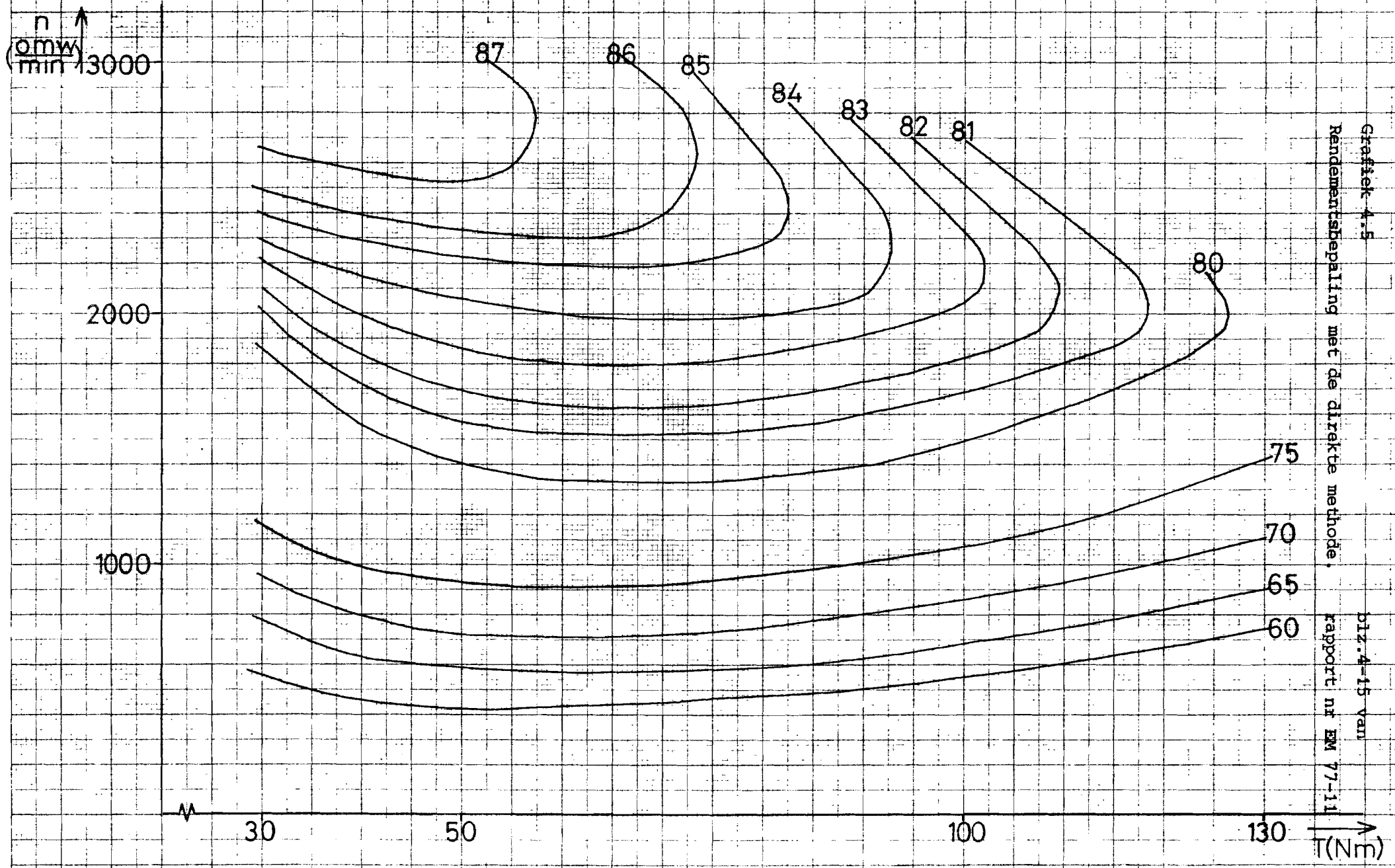
130

T(Nm)

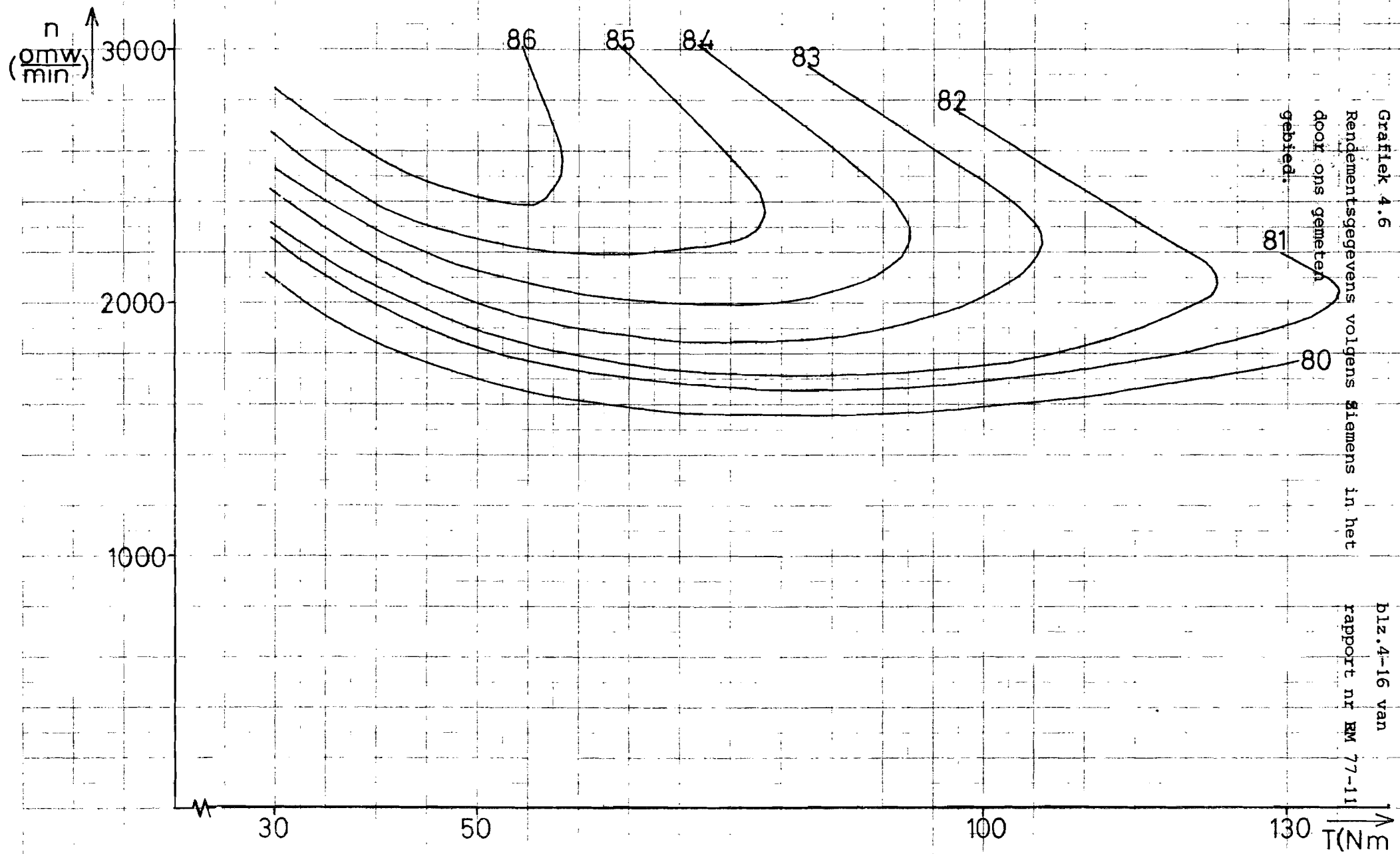


Gratifik 4.4
Rendmentsbeperking met de indirekte
methode

biz. 4-14 van
rapport nr EM 77-11



Grafiek 4.5
 Rendementsbepaling met de directe methode.
 D12.4-15 van
 rapport nr EM 77-11



Grafiek 4.6
Rendementsgegevens volgens Siemens in het
door ons gemeten
gebied.

blz. 4-16 van
rapport nr EM 77-11



4.4 Conclusie

In de voorafgaande grafieken is eerst de volledige Siemens-rendementsgrafiek overgenomen, waarna deze grafiek is vergroot in grafiek 4.6 op het door ons onderzochte gebied. In de dan volgende grafieken staan de door ons uit de metingen berekende grafieken.

Als we de kurven van de indirecte methode vergelijken met de kurven van de directe methode, zien we verschillen bij hoge en bij lage koppelwaarden. Het eerste verschil wordt veroorzaakt door een te lage benadering van de weerstandsverliezen en de ijzerverliezen. De vergroting van de weerstandsverliezen komt doordat de temperatuur in de weerstand hoger dan 115°C bedraagt vanwege de hoge stroomwaarden. De ijzerverliezen zullen niet kwadratisch toenemen met de stroom maar nog steiler, omdat het ijzer zich in de verzadiging zal bevinden.

Het verschil bij lage stromen wordt veroorzaakt doordat de weerstandsverliezen te hoog zijn benaderd, evenals de borstelverliezen. De te hoge benadering van de weerstandsverliezen komt omdat de temperatuur beneden de 115°C zal zijn bij lage stroomwaarden. De borstelverliezen zijn lager dan benaderd, omdat de stroomdichtheid afneemt en daarmee de potentiaal tussen de borstel en de lamel.

De verschillen tussen de metingen en de Siemens-gegevens kunnen worden verklaard doordat de rendementen per machine kunnen variëren, terwijl de gegevens van Siemens betrekking hebben op één bepaalde motor. Verder hebben onze metingen een onnauwkeurigheid in de orde van 2.5 %.



Hoofdstuk 5

De chopper

5.1. Inleiding.

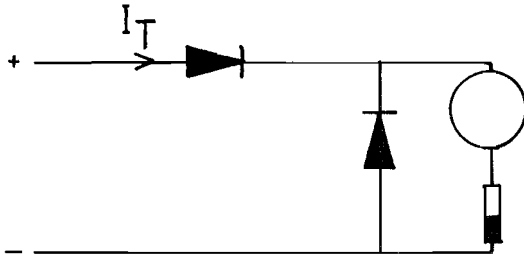
Er zijn verschillende methoden om de gelijkstroom voor een gelijkstroommotor te regelen. Een van deze methoden is het opwekken van een spanning door het regelen van het bekrachtigingsveld van een constant draaiende gelijkstroombmachine en daardoor diens ankerspanning te regelen, de zo genaamde Ward-Leonardschakeling. Deze methode is door ons gebruikt (zie hoofdstuk 1). Een andere methode is het gebruik maken van voorschakelweerstand in het ankercircuit dat gevoed wordt uit een constante voedingsspanning. Een derde mogelijkheid is om elektronische schakelelementen te gebruiken, de zo genaamde chopper.

De eerste manier kunnen we in traktievoertuigen niet toepassen vanwege de omvang en het gewicht van deze installatie. De dissipatieve methode heeft als nadeel dat ze veel warmteverliezen geeft en verder zijn er vaak terugkerende problemen met de mechanische schakelaars. De laatstgenoemde methode heeft een handzame omvang, geeft geen extra verliezen en is continu regelbaar, zodat de motor regelmatig aanloopt.

Een chopper kan men beschouwen als een gelijkstroom transformator, die de spanning periodiek aan- en uitschakelt. Dit basisprincipe is in 1923 door Alexanderson en Prince voor het eerst gerealiseerd met thyratrons en een vrijloopdiode voor een inductieve belasting. In 1961 ontwierpen Mc.Murray en Shattluck de eerste chopper met thyristoren, zoals wij ook gebouwd hebben.

5.2 Het basisschema

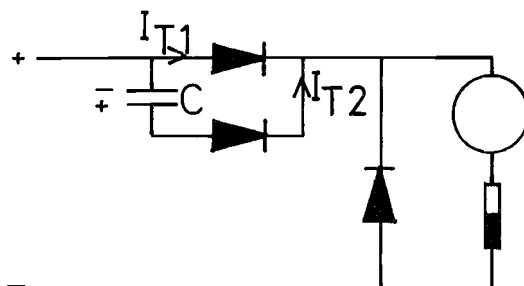
De chopper bestaat uit een schakelelement in serie met de motor en een vrijloopdiode parallel aan de belasting, zodat de inductieve motorstromen kunnen blijven vloeien (figuur 5.1).



figuur 5.1 De basisschakeling.

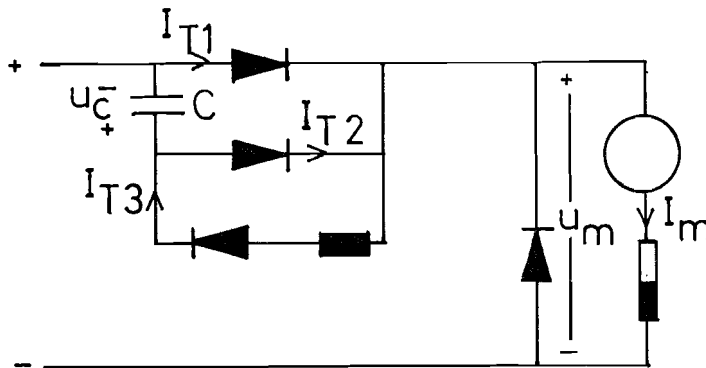
De thyristor wordt vaak gebruikt als schakelelement, maar heeft als nadeel dat hij eerst ophoudt met geleiden als de stroom nul geworden is. Bij het bovenstaande schema is het dus onmogelijk om de stroom I_T uit te schakelen. Dit uitschakelen zal moeten gebeuren met behulp van een schakeling, die tijdelijk een negatieve spanning over de thyristor aanbrengt, zodat $I_T = 0$.

Een thyristor met een spanningsbron zou als deze schakeling kunnen dienen. Als we voor spanningsbron een opgeladen condensator gebruiken wordt de stroom I_{T2} op zijn beurt automatisch nul (figuur 5.2).



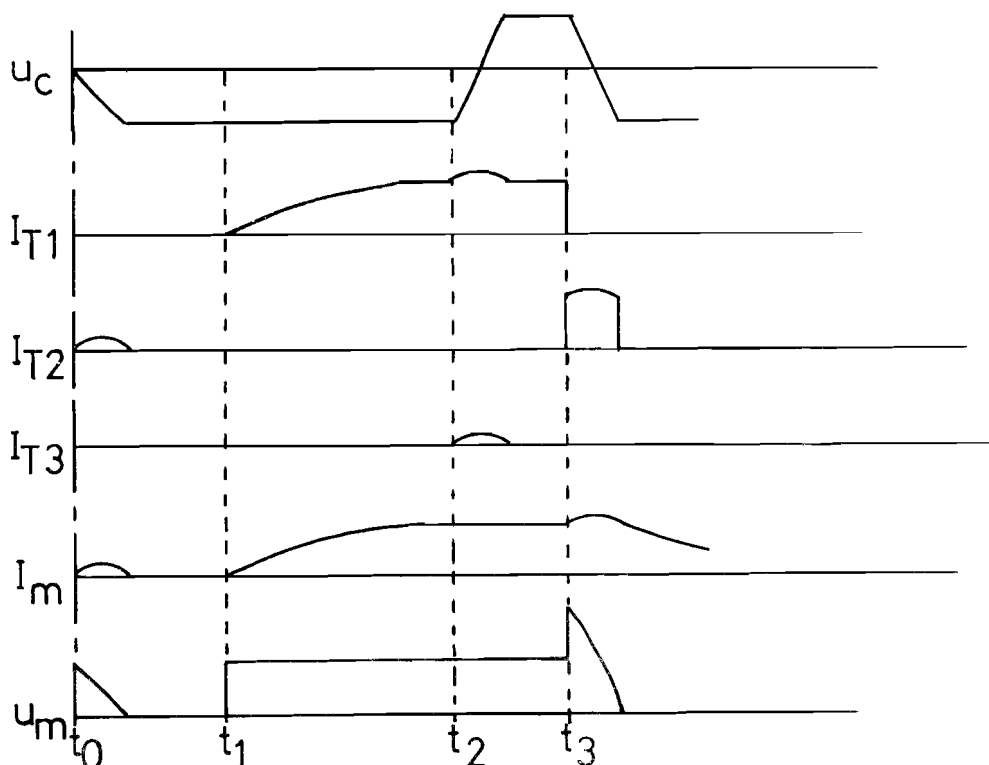
figuur 5.2 De basisschakeling met het doofcircuit.

Omdat deze capaciteit op deze manier slechts eenmaal te gebruiken is (de condensatorspanning wordt namelijk tegengesteld), moeten we een schakeling ontwerpen waarmee we de condensator weer op kunnen laden. Deze omkeerschakeling bestaat uit een thyristor en een spoel in serie zoals aangegeven is in figuur 5.3.



figuur 5.3 De basisschakeling met het doof- en omkeercircuit.

Als we er nu van uitgaan dat de schakeling in rust is, dat wil zeggen alle stromen en spanningen nul zijn. We ontsteken nu T_2 op t_0 , dan zal er via de C , T_2 en de belasting een stroom gaan vloeien, totdat de capaciteit een spanning heeft, die qua grootte gelijk is aan de voedingsspanning. We kunnen nu de hoofdthyristor ontsteken, zodat er een stroom door de belasting zal gaan lopen. Voor we deze thyristor kunnen doven, moeten we de capaciteit ompolen door T_3 te ontsteken op $t = t_2$. Via T_1 , L , T_2 en de capaciteit krijgen we een slingerkring, zodat de capaciteit een positieve spanning krijgt.



figuur 5.4 Het stroom- en spanningsverloop in de chopper



Als we op t_3 nu de doofthyristor T_2 ontsteken, zal deze de stroom van T_1 overnemen; over T_1 komt namelijk een negatieve spanning te staan (U_c). Op het moment dat de condensator een spanning $-U$ verkrijgt, zal T_2 ook doven en dan zal de motorstroom I_m door de vrijlooptdiode gaan lopen.

5.3 De stuurschakeling.

Uit voorgaande beschrijving volgt de volgorde waarin de thyristoren ontstoken dienen te worden. Voor deze ontsteking hebben we een stuurschakeling nodig, die in ons geval gebouwd is met High-level-logic elementen. Als eisen voor de sturing gelden:

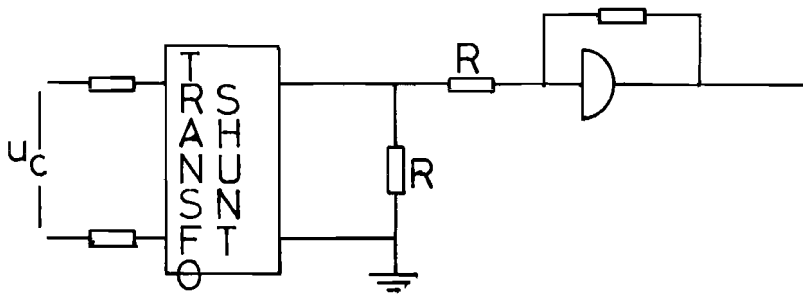
- zowel "in" als de "uit" tijd van de choppers moet regelbaar zijn.
- er moet een automatische inrichting zijn voor het starten van de chopper.

De eerste eis realiseren we door gebruik te maken van een regelbare oscillator, die reeds aanwezig is. Als logische eisen krijgen we voor de ontsteking van de thyristoren de volgende eisen.

De hoofdthyristor zal ontstoken mogen worden als de chopper aan staat en de oscillatiespanning positief en $U_c = -200$ V. De laatste eis moet gesteld worden, omdat anders de condensator niet omgeslingerd kan worden, dus de hoofdthyristor niet meer gedoofd kan worden.

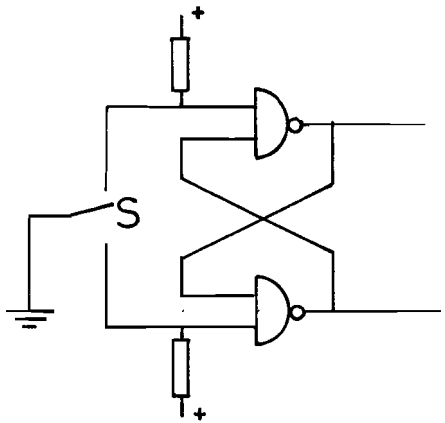
De ontsteking van de doofthyristor en de omslingerthyristor zullen dezelfde eisen hebben met dien verstande dat de ontsteking van de doofthyristor vertraagd zal worden, zodat de condensator via de omkeerthyristor omgepoold kan worden. Deze eisen zijn de oscillatiespanning negatief of $U_c = -200$ V. De ontsteking van de omslingerthyristor zal hierbij pulsformig moeten zijn.

De spanning U_c zal gemeten worden met een transfohunt, waarvan we de uitgangsspanning omzetten in een logisch signaal m.b.v. een teruggekoppelde "and" poort. Met behulp van de weerstanden kunnen we het nivo van de spanning, waarop het signaal "1" wordt, instellen.



figuur 5.4 De meetschakeling van U_c .

Voor het "aan-uit" signaal van de chopper gebruiken we een flip-flop, omdat anders tijdens het schakelen momenten optreden, waarop de uitgangsspanning niet gedefinieerd is.

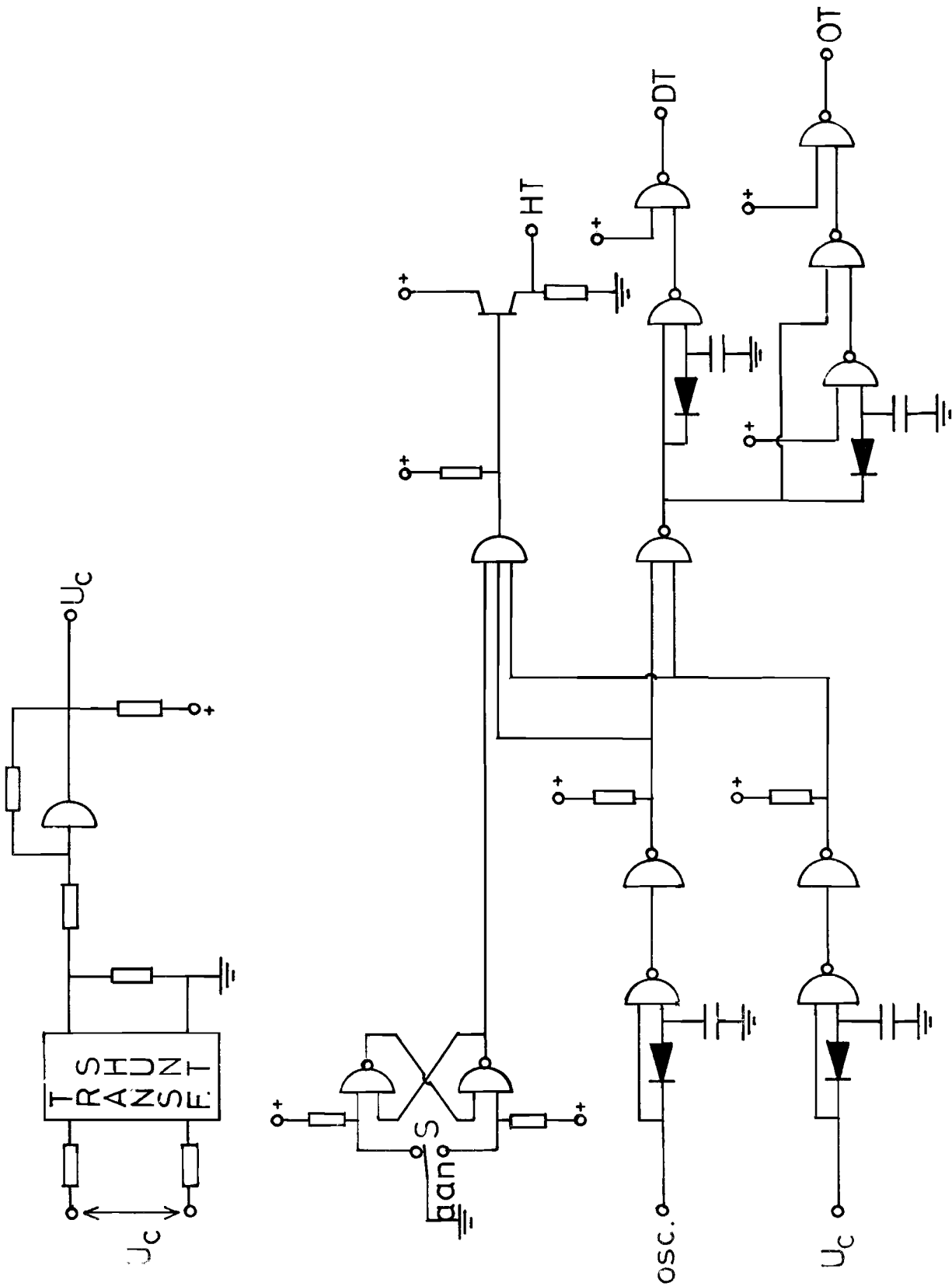


figuur 5.6 De aan-uitschakeling

De logika-stuurschakeling komt er nu als volgt uit te zien:



De logische stuurschakeling van de chopper.





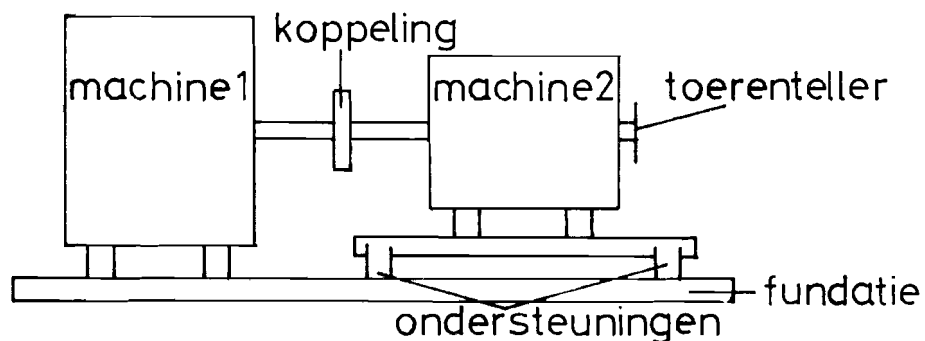
In dit schema zijn bij het condensatorsignaal en het oscillatiesignaal vertragingen opgenomen van $0.1 \mu\text{s}$ om stoorsignalen te elimineren. De uitgangssignalen zijn nog eens versterkt met transistoren, zodat de logische elementen niet te hoog belast worden.

APPENDIX A

Koppelmeettafel

In hoofdstuk 4 is gebleken, dat het gebruik van de koppelmeettafel van Lebow foute koppelmetingen gaf. Daarom zullen we in deze appendix deze meetmethode aan een kritische beschouwing onderwerpen.

In figuur A.1 hebben we de meetopstelling geschetst, zoals die gebruikt wordt.



figuur A.1 De meetopstelling.

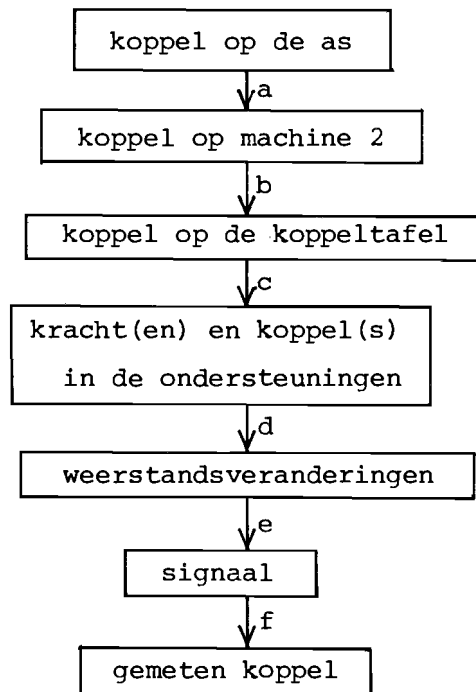
We willen het koppel dat machine 1 op zijn as uitoefent meten; dit koppel zou gelijk moeten zijn aan het koppel dat machine 2 op zijn as, die gekoppeld is met de as van machine 1 uitoefent. Het reactiekoppel dat daaraan gelijk is, wordt via de ondersteuning overgebracht op de fundatieplaat. In deze ondersteuning zijn rekstrookjes aangebracht, die krachten of koppels in deze ondersteuning meten.

We krijgen nu het meetmodel volgens figuur A.2.

Bij dit diagram kunnen tijdens alle transformaties fouten gemaakt worden. We zullen daarom al deze overbrengingen naar de maat van het koppel bekijken.

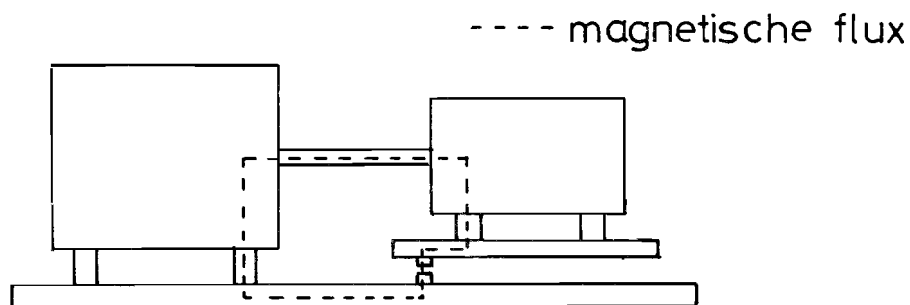
a De as kan behalve op de machine ook een koppel uitoefenen op de rondom aanwezige lucht, b.v. via luchtwervelingen rond de koppeling en rond de toerenteller die op het uiteinde van de as is gemonteerd. De in de machine aanwezige ventilator zal de lucht ook in een tangentiële richting

verplaatsen; wat ook een verlieskoppel zal opleveren.

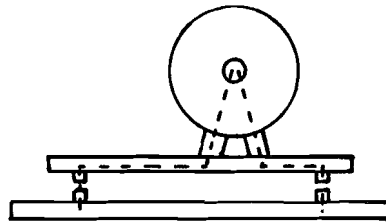


figuur A.2 Het koppelmeetdiagram.

- b De verbinding tussen machine en koppeltafel is volkomen star, dus kan daar geen koppel verloren gaan. Naast deze verbinding is er echter ook via de aansluitdraden een verbinding tussen machine en fundatie; de verwachting is echter dat deze krachten verwaarloosd mogen worden.
- c Behalve via de ondersteuning(en) van de koppeltafel kunnen er ook krachten van elektro-magnetische oorsprong werkzaam zijn tussen de tafel en de fundatie. Deze krachten zullen door de niet altijd symmetrische aanslagen een koppel kunnen leveren. (Zie figuur A.3).



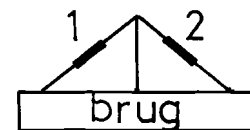
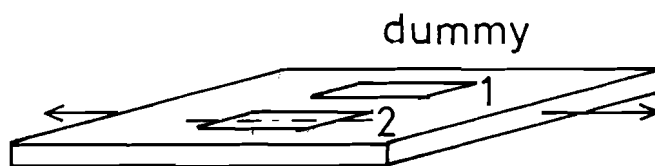
figuur A.3a De lengtedoorsnede van de koppeltafel en de lekfluks.



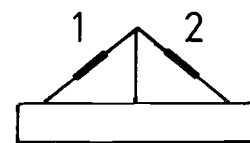
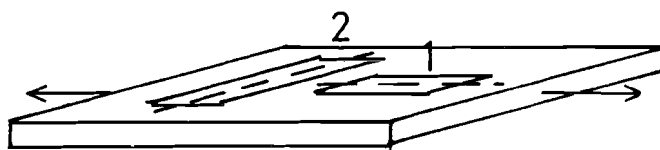
figuur A.3b De dwarsdoorsnede van de koppeltafel met de krachten door de aanslagen.

Hoe en in welke vorm een koppel dat op de tafel wordt uitgeoefend verdeeld wordt over de ondersteuning, staat in appendix B beschreven.

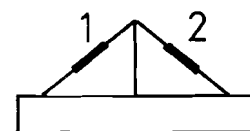
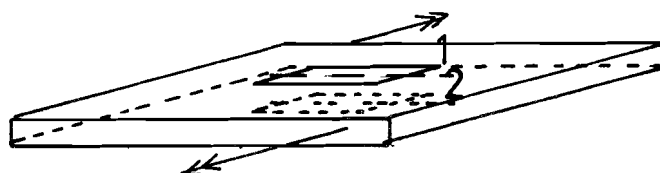
- d Of de op de ondersteuning geplaatste rekstrookjes een koppel of een kracht meten, hangt af van de plaatsing van de strookjes en hun functie. Onder de functie verstaan we hier of de weerstand actief is of slechts een dummy (d.w.z. niet gevoelig voor rek) t.b.v. de temperatuurkompensatie. Hieronder staan drie mogelijkheden op welke manier de rekstrookjes geplaatst zouden kunnen zijn.



figuur A.3a



figuur A.3b



figuur A.3c



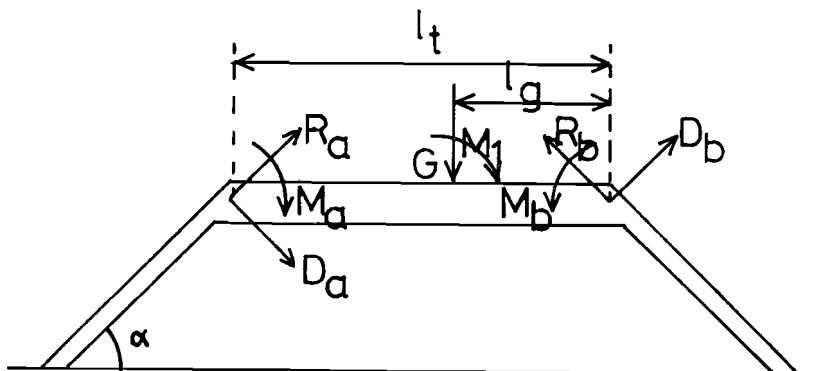
- De schakelingen van figuur A.3a en figuur A.3b zijn beide temperatuur gekompenseerd en meten beide normaal krachten zoals in de figuren zijn getekend. De schakeling van figuur A.3c is juist niet gevoelig voor normaal krachten maar alleen voor een buigend moment zoals in de figuren is getekend. Deze laatste schakeling is ook gekompenseerd voor temperatuurveranderingen.
- e De verandering van weerstand geeft een signaal op de rekstrookmeetbrug. De grootte van het signaal is afhankelijk van de plaatsing van de rekstrookjes (zie d), en de wijze waarop de in totaal acht rekstrookjes geschakeld zijn. Ook kan het signaal door inductieve effecten beïnvloed worden, waardoor het signaal niet overeenkomt met de weerstandsverandering en dus met het koppel.
- f Het omzetten van het gemeten signaal naar een koppelwaarde gebeurt m.b.v. een ijkgrafiek. Deze ijking is beschreven in hoofdstuk 1 en mag als juist aangenomen worden, daar hij op vier manieren verricht is en dezelfde ijkconstante oplevert.

APPENDIX B

Mechanische beschouwing van de koppelmeettafel

Om het verband te leren kennen tussen de krachten en de momenten, die in de ondersteuning optreden en het koppel en de kracht, die op de tafel uit geoefend worden, zullen we een tweedimensionaal model opzetten.

De ondersteuning maken een hoek α met de fundatie (in werkelijkheid is deze hoek 45°). Op de tafel oefenen we een gewichtskracht G uit tezamen met een koppel M . In de ondersteuning kunnen een normaalkracht R , een dwarskracht D en een buigend moment M optreden.



figuur B.1 Het model van de koppeltafel.

Aangezien het geheel in evenwicht is kunnen we stellen

voor de horizontale krachten:

$$D_a \cos \alpha + R_a \sin \alpha - R_b \sin \alpha + D_b \cos \alpha = 0 \quad \text{A-1}$$

voor de verticale krachten:

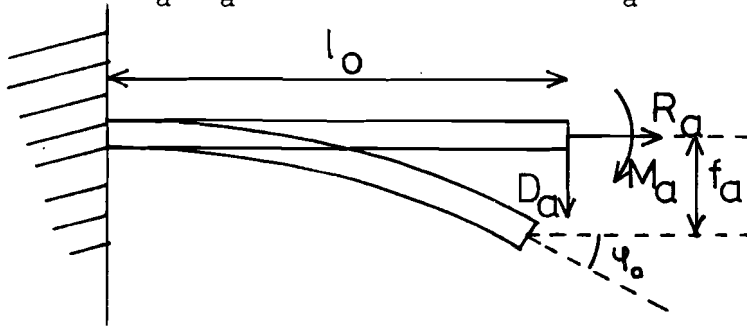
$$D_a \sin \alpha - R_a \cos \alpha + G - R_b \cos \alpha - D_b \sin \alpha = 0 \quad \text{A-2}$$

voor de momenten ten opzichte van de rechtse ondersteuning:

$$M_b + M_a + R_a l_t \cos \alpha - D_a l_t \sin \alpha - G l_g = 0 \quad \text{A-3}$$

De situatie is niet alleen met bovenstaande drie statische vergelijkingen te beschrijven. We moeten voor een volledige beschrijving ook de buiging van de ondersteuning berekenen.

Wanneer we een ondersteuning los van de tafel beschouwen, dan is hij aan de onderzijde volledig ingeklemd, terwijl op het uiteinde de krachten D_a , R_a en het buigend moment M_a werken.



figuur B.2 Een ondersteuning los beschouwd.

De verplaatsing van het uiteinde van de ondersteuning zal dan gelijk zijn aan:

$$f_a = \frac{M_a l_0^2}{2E I} + \frac{D_a l_0^3}{3E I} \quad \text{A-4a}$$

Als we de hoek beschouwen tussen de onbelaste ondersteuning en het uiteinde van de belaste ondersteuning dan geldt daarvoor:

$$\psi_a = \frac{M_a l_0}{E I} + \frac{D_a l_0^2}{2E I} \quad \text{A-5a}$$

Voor de andere ondersteuning geldt dan tevens:

$$f_b = \frac{M_b l_0^2}{2E I} + \frac{D_b l_0^3}{3E I} \quad \text{A-4b}$$

$$\psi_b = \frac{M_b l_0}{E I} + \frac{D_b l_0^2}{2E I} \quad \text{A-5b}$$

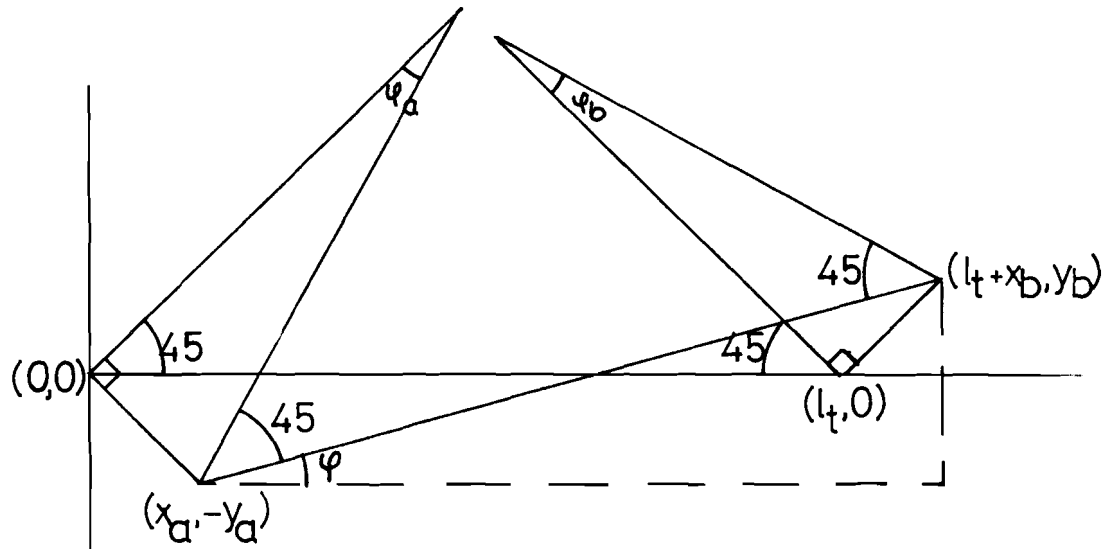
We weten verder dat de afstand tussen de twee ondersteuning konstant is en wel gelijk aan de breedte van de koppeltafel l_t . De hoek tussen de ondersteuning en de koppeltafel is konstant gelijk aan 45° . Ter illustratie dient figuur B.3.

Na verbuiging wordt de afstand tussen de ondersteuning:

$$l = \sqrt{(l_t + x_b - x_a)^2 + (y_a + y_b)^2} \doteq l_t \quad \text{A-6}$$

waarbij $x_b = y_b = \frac{1}{2} 2 f_b$ A-7b

$x_a = y_a = \frac{1}{2} 2 f_a$ A-7a



figuur B.3 De verplaatsingen van de uiteinden van de ondersteuning.

Tezamen geeft dat:

$$f_a^2 + f_b^2 - \sqrt{2} l_t f_a + \sqrt{2} l_t f_b = 0 \quad \text{A-8}$$

Omdat de hoek tussen de ondersteuning en de koppeltafel konstant is geldt:

$$-\varphi = \varphi_a = \varphi_b = -\cotg \frac{y_a + y_b}{l_t + x_b - x_a} \quad \text{A-9}$$

met A-7a en A-7b geeft dat:

$$\varphi_a = \varphi_b = -\cotg \frac{f_a + f_b}{\sqrt{2} l_t + f_b - f_a} \quad \text{A-10}$$

Het totaal van onbekenden en het aantal vergelijkingen is nu gelijk zodat het mogelijk is om de verdeling van krachten en koppels over de twee ondersteuning te berekenen.

In werkelijkheid is het probleem niet zo eenvoudig, omdat je in werkelijkheid totaal 4 ondersteuning hebt in drie dimensies, zodat de berekening veel complexer wordt.



Literatuurlijst

- L.1 VDE 0535/1.69 ; Bestimmungen für elektrische Maschinen, Transformatoren, Drosseln und Stromrichter auf Bahn- und andere Fahrzeugen.
VDE Verlag, Berlin, 1969
- L.2 IEC publication 101 ; Rules for auxiliary machines on motor vehicles
IEC recommendation, Geneve, 1958
- L.3 NEN 3173 ; Richtlijnen voor elektrisch machines.
NEC, 's Gravenhage, 1960
- L.4 Kamping, M.; Commutatiewerschijselen van een gelijkstroombmachine,
waarvan de ankerstroom een rimpel heeft.
T.H.Eindhoven, EM 76-20, 1976
- L.5 Herzig, B. en Paulig, E.; Objektive Methode zur Beurteilung des
Bürstenfeuers von Kommutatormaschinen.
Elektrie 25, 1971, H 10
- L.6 Richter, R.; Elektrische Maschinen, Band 1
Birkhäuser Verlag, Basel, 1951
- L.7 Ardenne, M.van ; Tabellen zur angewandten Physik, Band 1
VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1973
- L.8 Holm, R. ; Electric contacts
Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1967
- L.9 Dreyfus, L.A. ; Ein neuer Weg zum Ausbau der Kommutierungstheorie
Archiv für Elektrotechnik 13, 1924, p. 356-358
- L.10 Bödefeld, Th. en Sequenz, H. ; Elektrische Maschinen.
Springer, Wien, 1962
- L.11 Holm, R. ; Theory of the sparking during commutation on dynamos.
Trans. AIEE part 3, 1962, p. 588
- L.12 Brackè, P.A.M. ; De pendeldynamo.
T.H.Eindhoven, 1977



L.13 Heumann, K. en Stümpe, C. ; Thyristoren.

B.G. Teubner, Stuttgart, 1970

L.14 Richter, W. ; Leistungselektronik in der Antriebstechnik.

Verlag H. Stam GmbH, Köln

L.15 Janssen, J.D. ; Technische mechanika voor elektrotechnici.

T.H.Eindhoven, Diktaatnummer 4443, 1966



Een overzichtsfoto met in het midden de meetopstelling, links de bedieningstafel
rechts de dissipatie weerstanden en op de voorgrond de vonkdetektieschakeling.



De motoren, van links naar rechts de ventilator, de Siemens-motor
en de komplementaire machine op de koppelmeettafel

De bedieningstafel.



De vonkdetektieschakeling met van links naar rechts de voltmeter,
de voeding en de lichtgevoelige buis.

De hulppoolstroomvoeding met van links naar rechts de variac,
de transformator en de diodebrug met amperemeter.