

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT
Afdeling der Elektrotechniek

Aard : Afstudeerverslag
Omvang : 201 pagina's; 1 bijlage
Datum : 24 juni 1971

Lab/Afd. : Laboratorium voor Automatische Verkeers-
systemen

Auteurs : P.C. v.d. Berg, A.N.H. van Iersel,
Th. Sprecher

Titel : Een automatisch longitudinaal en lateraal
geleidingssysteem voor autosnelwegen.

Korte
inhoud : Dit verslag behandelt beknopt een automatisch
verkeersgeleidingssysteem. Hoofdstuk 1 leidt de
lezer in de materie. In hoofdstuk 2 staan de
eisen opgesteld, waaraan een geleidingssys-
teem moet voldoen. Hoofdstuk 3 geeft mogelijke
oplossingen voor de longitudinale sturing. Een
beschrijving van een systeem geeft hoofdstuk 4.
Hierin worden tevens enige onderwerpen (kommu-
nikatie, verwerking van de informatie, regel-
systeem) nader bekeken. Tenslotte kan men in
hoofdstuk 5 een kostenoverzicht vinden.

Summary.

By means of vehicle automation considerable improvement in highway capacity and highway safety can be achieved. In this report an automated highway system is described to some detail. Chapter one gives some motives.

Chapter two deals with requirements and premises.

In chapter three two possible longitudinal control systems - a road oriented one and a car oriented one - are compared.

Chapter four gives a description of a representative system. This system is a road oriented one. To some extent is dealt with information transmission, rabbit keeping (in american literature called slot keeping) and car control systems. An economic evaluation of the representative system has been made. A simulation of an automated vehicle is performed on an analog computer. The results of the simulation are given in the appendix.

Lijst van in de tekst gebruikte tekens en symbolen.

Bij hoofdstuk 3, paragraaf 3.5.

x_k	positie van de k^e auto t.o.v. de oorsprong
v_k	snelheid van de k^e auto
a_k	versnelling van de k^e auto
h_k	afstand van de k^e auto tot de $k-1^e$ auto
v_{r_k}	relatieve snelheid van de k^e auto t.o.v. de $k-1^e$ auto
a_{r_k}	relatieve versnelling van de k^e auto t.o.v. de $k-1^e$ auto

Bij hoofdstuk 3, paragraaf 3.6.

x_a	positie van de auto t.o.v. de oorsprong
x_s	positie van de rabbit. t.o.v. de oorsprong
v_a	snelheid van de auto
v_s	snelheid van de rabbit
a_a	versnelling van de auto
a_s	versnelling van de rabbit
h	relatieve positie van de auto t.o.v. de rabbit
v	relatieve snelheid van de auto t.o.v. de rabbit
a	relatieve versnelling van de auto t.o.v. de rabbit.

Bij hoofdstuk 4, paragraaf 4.2.

f	frekwentie
x	[as die in de richting van de weg loopt, willekeurige variabele
y	as die dwars op de weg staat

z	as die loodrecht in verticale richting op de weg staat
\underline{i}	eenheidsvektor langs x-as
\underline{j}	eenheidsvektor langs y-as
\underline{k}	eenheidsvektor langs z-as
\underline{H}	magnetische veldsterkte
\underline{E}	Elektrische veldsterkte
I	stroomsterkte
U	elektrische potentiaal
l	kabellengte
r	afstand van kabeldeel tot meetpunt
V	verhouding van twee velden
R	kabelparameter, weerstand
L	kabelparameter, koëfficiënt van zelfinductie
G	kabelparameter, conductie
C	kabelparameter, capaciteit
ω	radiaalfrekwentie
j	$\sqrt{-1}$
p	d/dt
γ	voortplantingskoëfficiënt
α	dempingskoëfficiënt
β	fasedraaiingskoëfficiënt
Z_k	karakteristieke impedantie
Γ	reflektiekoëfficiënt

Hoofdstuk 4, paragraaf 4.3

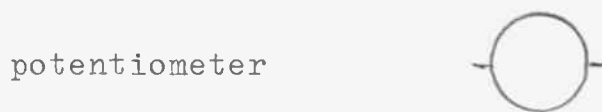
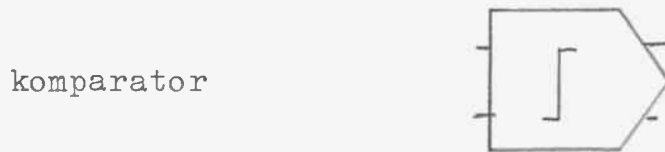
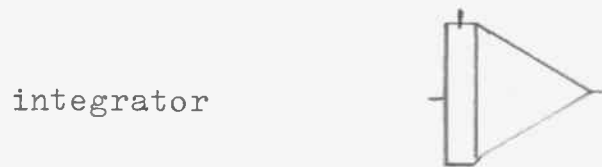
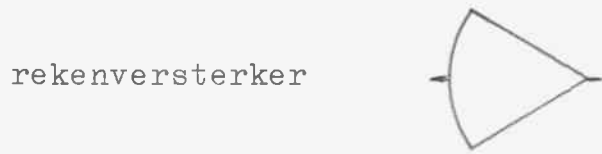
x	willekeurige variabele
$k_1, k_2 \dots$	konstanten
T	tijdsduur

T_w, T_s	tijdstip
t	tijdvariabele
P_s	systeempuls
P_w	wegpuls
U_w	afgegeven signaal door P_w
U_s	afgegeven signaal door P_s
L	knoopafstand
ρ	verschil in procentuele fout tussen V_s en V_a
δ	totale procentuele fout - $\rho/100$
v_c	fout in v_r

Bij hoofdstuk 4, paragraaf 4.4.

H, H''	overdrachtsfunctie
τ, τ_1	tijdkonstanten
u	ingangssignaal
δ	terugkoppelfactor
s	stoorsignaal
K, K'', K_1	versterkingsfactoren
a, b, c	konstanten
w	ruis
e	foutsignaal
J	kost - functie
q_1, q_2, q_3	konstanten
α	stand van de gasklep

Appendix en § 4.3 (zie ook § 4.3.5)



Inhoud.

1	De toekomst van het autoverkeer.		
1.1		blz.	1
2	Een geleidesysteem voor geautomatiseerde auto's		
2.1	Inleiding	"	
2.2	Doel	"	3
2.3	Detaillering	"	4
2.4	Indeling	"	5
2.5	Eisen te stellen aan objecten die niet direkt van invloed zijn op het systeem.		
2.5.1	Eisen aan de auto te stellen	"	6
2.5.2	Eisen aan de weg te stellen	"	10
2.5.3	Eisen aan de entourage te stellen.	"	13
2.6	Eisen te stellen aan objecten die direkt van invloed zijn op het systeem		
2.6.1	Eisen aan de auto te stellen	"	14
2.6.2	Eisen aan de weg te stellen	"	16
2.6.3	Eisen aan de entourage te stellen	"	18
3	Mogelijkheden in systemen		
3.1	Inleiding	"	20
3.2	Splitsing	"	21

3.3	Het laterale regelsysteem	blz.	22
3.4	Longitudinale regelsystemen	"	25
3.5	Systemen met relatieve plaatsbe- paling		
3.5.1	Inleiding	"	26
3.5.2	Nadere uitwerking	"	29
3.5.3	Voor- en nadelen	"	33
3.6	Systemen met absolute plaatsbe- paling		
3.6.1	Inleiding	"	35
3.6.2	Voor- en nadelen	"	36
3.7	Kombinaties van relatieve en abso- lute systemen	"	37
3.8	Konklusie	"	38
4	Beschrijving van een systeem		
4.1	Inleiding	"	41
4.2	Kommunikatie tussen weg en auto		
4.2.1	Inleiding	"	43
4.2.2	Laterale besturing	"	45
4.2.3	Longitudinale besturing	"	57
4.3	Beschouwing over de informatie wel- ke nodig is voor het rabbit-volg- systeem		
4.3.1	Inleiding	"	69
4.3.2	De fasevlakmethode	"	70
4.3.3	Toepassing van de fasevlakme- thode	"	72
4.3.4	Bespreking van mogelijke infor- matiebronnen	"	80

4.3.5	Beknopte beschrijving van de gebruikte bouwstenen van een analoge rekenmachine	blz.	94
4.3.6	Analoge rekenmachine als hulpmiddel bij de fasevlakmethode	"	96
4.3.7	Simulatie van een konvergerende correctie	"	101
4.3.8	Slot	"	113
4.4	Het longitudinale regelsysteem		
4.4.1	Enkele gegevens	"	119
4.4.2	Doel van het regelsysteem	"	123
4.4.3	Optredende beperkingen	"	124
4.4.4	Mogelijkheden tot verbetering van de overdracht		127
4.4.5	De optimale regelaar	"	141
4.4.6	Invloed van digitaliseren	"	146
4.4.7	Konklusie	"	148
4.5	De auto	"	149
4.6	De weg	"	151
4.7	Centrale voorzieningen	"	153
4.8	Nabeschouwing	"	154
5	Wat gaat een automatisch verkeersgeleidingsysteem kosten?		
5.1	Inleiding	"	156
5.2	Te verwachten ontwikkelingen	"	157
5.3	Enkele cijfers	"	159

Appendix A. Simulaties.

1 Inleiding		
1.1 Doel	blz.	162
1.2 Het compensatienetwerk	"	162
1.3 Informatie nodig voor de regeling	"	168
2 Simulatie		
2.1 Simulatie 1	"	169
2.2 Simulatie 2	"	174

Appendix B. Kapaciteitsberekening.	"	187
------------------------------------	---	-----

Appendix C. Verantwoording	"	192
----------------------------	---	-----

Literatuurlijst	"	194
-----------------	---	-----

zich op de autoweg bevinden automatisch bestuurd kunnen worden. Hoe deze toestand bereikt zal worden - dat wil zeggen door speciale autowegen aan te leggen alleen voor automaten-auto's, of door een geleidelijke invoering, waarbij automaten-auto's en handbestuurde auto's tezamen van de weg gebruik maken - is nog niet te voorzien.

Er wordt hier tenslotte opgemerkt, dat dit rapport vrijwel alleen technische beschouwingen bevat; alle andere aspecten van autoverkeer, hoe belangrijk ook, vallen buiten de competentie van de schrijvers. Toch is geprobeerd om het probleem zo realistisch mogelijk te benaderen, - en waar mogelijk- op te lossen.

2 Een geleidesysteem voor geautomatiseerde auto's. Inleiding.

2.1 Onder een geleidesysteem voor geautomatiseerde auto's wordt hier verstaan al die mechanische, elektrische en elektronische apparatuur, (de hardware) alsmede de kennis van bedrijf en konstruktie van die apparatuur, (de software) die nodig zijn om een ongeautomatiseerde auto te automatiseren en vervolgens veilig op zijn bestemming te brengen zonder ingrijpen van een der inzittenden van de auto.

Onder de bestemming wordt bij een wegennet, dat slechts gedeeltelijk geschikt is voor gebruik door geautomatiseerde auto's, verstaan die plaats waar een der inzittenden van de auto het voertuig weer met de hand moet besturen. Bij een wegennet dat volledig geschikt gemaakt is voor gebruik door geautomatiseerde auto's wordt onder de bestemming verstaan die plaats die de "bestuurder" van de auto zich als einddoel heeft gesteld.

2.2 De bedoeling van deze inleiding is na te gaan aan welke eisen een geleidesysteem voor geautomatiseerde auto's zou moeten voldoen ten aanzien van veiligheid, gebruikerskomfort en systeemeigenschappen. De oorzaak van de meeste ongevallen op autowegen is het menselijk falen bij de besturing van de auto. Wenst men de veiligheid van autowegen te vergroten, dan ligt het voor de hand te proberen om menselijke fouten uit te schakelen. Met andere woorden; automatiseer het verkeer op die autowegen door middel van de

invoering van een geleidesysteem. Het gevolg zal niet alleen een grotere veiligheid zijn maar tevens, omdat de reacties van het systeem op bepaalde instructies voorspelbaar en sneller dan die van de mens zijn, een grotere wegcapaciteit. De invoering van het systeem heeft ook tot gevolg, dat de mentale belasting die door het autorijden aan de bestuurder wordt opgelegd, vermindert wordt.

2.3 Is het geleidesysteem eenmaal ontworpen, dan moet het in staat zijn een auto, die zich op de geautomatiseerde weg bevindt, zowel in laterale als in longitudinale zin te besturen. Bij de laterale (zijwaartse) besturing van de auto speelt "sturen" een grote rol. Sturen is hier die handeling die de auto de loop van de weg doet volgen. Bij de longitudinale besturing zijn de volgende punten van belang: versnellen resp. vertragen van de auto; snelheid van het voertuig; afstand tot de voor de auto resp. tot de achter de auto rijdende voertuigen. Bij de longitudinale besturing dient ervoor gezorgd te worden dat de afstand tussen de voertuigen niet te klein wordt en dat de achter elkaar rijdende auto's geen grote snelheidsverschillen vertonen.

Het ontworpen systeem moet tevens fail-safe zijn. Hieronder wordt verstaan dat, wanneer uitvallen van een of meer onderdelen of functies van het systeem leidt tot een gevaarlijke situatie voor de voertuigen op de weg, het systeem zelf automatisch deze gevaarlijke situatie opheft.

meer nog vragen. De standaardvoertuig slaat dan alleen op kompassen en het systeem, zij het licht, be-
houden.

De andere manier, misschien meer voor de hand liggend, is die bestaat een uitgaande van de auto in zijn huidige vorm passeert om met zo min mogelijk ingrijpende veranderingen de auto te een mogelijk systeem te laten passen. Dit kan worden hier tegen el-
kaar afgezet.

De voordelen van een standaardvoertuig zijn onder meer de mogelijkheid om het elimineren van de nadelen die de voertuigen nu te bezit. Men kan dan een systeem ontwikkelen dat van de beschikbare mogelijkheden opti-
maal gebruik maakt. Zo'n voertuig dat standaardvoertuigen nu zijn in grote serie geproduceerd, voor een lage prijs worden verkocht. De standaardapparatuur die in het voertuig is aangebracht, vereist een eenvoudige, danwel geen afstelling. Service en onderhoud kunnen niet duur te zijn. Er zijn ook nadelen verbonden aan een standaardvoertuig. Er zal veel moeite zijn moeilijk internationaal overleg nodig zijn om het standaardvoertuig in productie te brengen. Het kan zijn dat de kosten zover komen, dat zullen de aankoopkosten zeer groot zijn. Als laatste blijft dan nog de vraag of het voertuig verhandelbaar zal blijken te zijn, niet iedereen isers wil in dezelfde auto rijden als zijn buurman.

De voordelen van het standaardvoertuig van de huidige vorm zijn onder meer de veel geringere veranderingen die het zal ondergaan bij het invoeren van het systeem.

afstand van de auto's onderling bepalen rechtstreeks de capaciteit per rijstrook. Slijkt nu deze capaciteit te klein te zijn in verband met het te verwachten verkeersaanbod, dan staan twee wegen open om de capaciteit van de weg te vergroten:

Men legt de éénstrooksautowegen (een rijstrook in iedere richting) zover uit elkaar, dat een zodanige verkeerspreiding ontstaat dat een rijstrook per richting voor iedere weg voldoende is. Voordelen hiervan zijn een eenvoudig geleidesysteem en weinig of geen verkeersstoppen in de spitsuren bij op- en afritten. Nadelen zijn het grote grondverbruik, de vele onteigeningsprocedures, de vele kunstwerken die nodig zijn om secundaire wegen kruisingvrij te snijden. Tenslotte wordt nog opgemerkt, dat een obstakel dat zich op die ene rijstrook bevindt niet omzeild kan worden.

De andere manier is, dat men gewoon meerstrooksautowegen aanlegt, zoals die nu in gebruik zijn. Voordelen zijn dat men nu per rijstrook gemeenschappelijk van kunstwerken en op- en afritten gebruik kan maken, minder grondverbruik, minder onteigeningsprocedures, obstakels leggen nu niet het gehele verkeer lam, maar kunnen in principe vermeden worden. Als nadelen denke men aan de verkeersopstoppingen die bij bepaalde op- en afritten kunnen ontstaan (spitsuurverkeer van slaapstad naar werkstad en omgekeerd). Het systeem wordt ingewikkelder, met name in- en uitvoegen stuit op grotere problemen.

Veiligheidsvoorzieningen: Zoals ook bij de huidige autowegen het geval is, moet de autoweg op ieder punt bereikbaar zijn voor politie, brandweer, zie-

even? Van een aantal van deze en nog andere vragen zal de oplossing zich vanzelf aandienen, terwijl andere oplossingen arbitrair zijn of misschien enig speurwerk eisen.

2.6 Eisen te stellen aan objecten die direkt van invloed zijn op het systeem.

2.6.1 Eisen aan de auto te stellen.

Zoals reeds eerder is uiteengezet, is het de bedoeling dat, zodra de auto zich op de geautomatiseerde weg bevindt, de bestuurder geen invloed meer op het rij-proces uitoefent.

Een auto die zich op de weg bevindt, zal op een gegeven ogenblik deze weg weer moeten verlaten. Het systeem moet bij de geautomatiseerde weg bepalen waar de auto aan het afslaan moet beginnen. De bestemming moet dus voor de betreffende afslag bekend zijn. Omdat verwacht kan worden dat de "bestuurder" van de auto gedurende de rit niet oplet is het dus vereist, dat de bestemming reeds vóórdat de auto op de weg komt bekend is. Om de bestemming aan te geven is gedacht aan een toetsenbord waar iedere bestemming op kan worden aangegeven door middel van een kodekombinatie (vergelijk dit met kiesschijf-telefoonnummer). De bestemming zal niet meer worden veranderd zolang de auto op de weg rijdt, tenzij een van navolgende handelingen wordt verricht. Tijdens de rit over de geautomatiseerde weg kunnen de inzittenden van de auto op twee manieren invloed op de beweging van de auto uitoefenen. Men kan de noodrem uittrekken of de "eerste-afslagtoets" indrukken.

Wanneer de passagiers in de auto een storing opmerken die het systeem niet konstateert of niet kan konstateren. (klappeband, ziekte van een der inzittenden) dan kan door middel van de noodrem de auto tot stilstand worden gebracht. Bij gebruik van de noodrem wordt de auto van de rijstrook gevoerd er op de serviceweg tot stilstand gebracht. De servicedienst wordt automatisch gewaarschuwd en verleent, bij de geparkeerde auto aankomen, hulp. Na hulpverlening kan het voertuig, via serviceweg en eerstvolgende afrit, opnieuw aan het verkeer deelnemen door de aan het begin geschetste procedure uit te voeren.

De "eerste-afslagtoets" wordt gebruikt wanneer geen hulp van de servicedienst gewenst is. (Men denke aan bijvoorbeeld de sanitaire stop, verkeerde bestemming aangegeven, sigaretten vergeten enz.) Na indrukken van de "eerste-afslagtoets" wordt de auto bij de eerstvolgende mogelijk afslag van de weg gevoerd. Daarna kan men via de bijbehorende oprit en na opnieuw bestemming te hebben aangegeven, weer op de geautomatiseerde weg komen.

Bij het verlaten van de weg - Bij een niet volledig geautomatiseerd wegennet is dit de bestemming - wordt de bestuurder van de auto door middel van een signaal gewaarschuwd dat hij zich gereed moet maken om de besturing over te nemen. Om er zeker van te zijn dat de bestuurder in staat is om de wagen te besturen, moet hij het systeem antwoorden. Wanneer de bestuurder gereed is, antwoordt hij het systeem door bijvoorbeeld het aanslaan van de datum op het genoemde

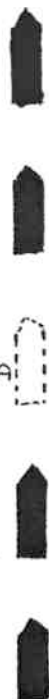
zijn? en: wat zijn de konsekventies van meerdere verkeerssoorten op de geautomatiseerde weg? zijn nog niet opgelost.

2.8.3 Zien aan de entourage te stellen.

De entourage van de weg die van direkte invloed kan zijn op het systeem, is die van brandstofstations, wegrestaurants, postpalen enz. Voor het bereiken van een van deze objecten moet de auto uit de verkeersstroom worden genomen. In- en uitvoeren speelt hierbij een belangrijke rol. Het lijkt daarom gewenst om bij op- en afritten van geautomatiseerde wegen een concentratie te maken van servicestation, wegrestaurant, E.H.B.O.-post enz. Deze dienststations kunnen tevens dienen als uitvalsbasis voor politie, servicepatrouille en wat dies meer zij.

HOOFPWEG

VERKEERSROOM



INBERGSTRACK

AFVOER VAN
GEWEEGERDE
VOERTUIGEN

GEWEEGERD
VOERTUIG

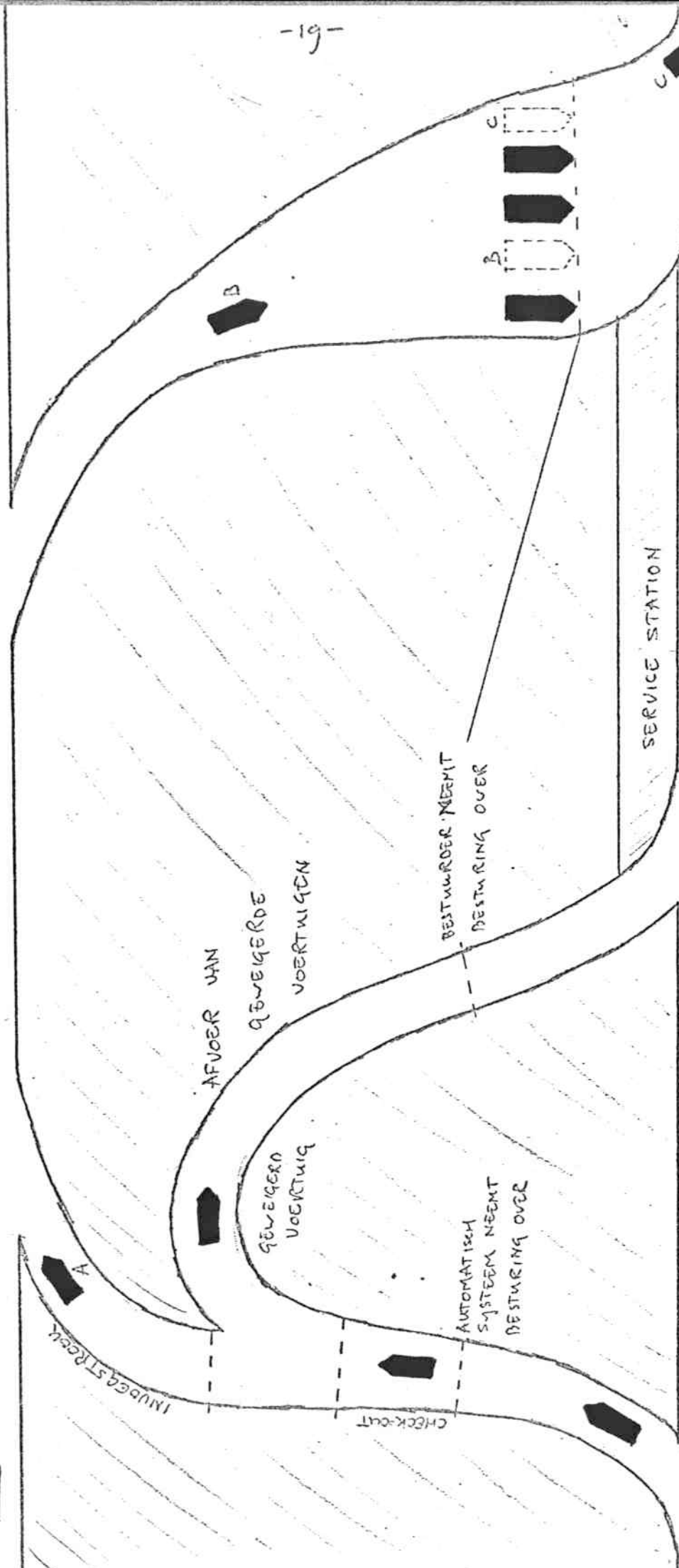
BESTUURDER NEEMT
BESTURING OVER

AUTOMATISCH
SYSTEEM NEEMT
BESTURING OVER

CHECK-OUT

SERVICE STATION

SECUNDAIRE WEG



3 Mogelijkheden in systemen.

3.1 Uit hoofdstuk 1 en 2 moge het beoogde doel - een geautomatiseerd autoverkeerssysteem - en de daaraan te stellen eisen duidelijk zijn geworden. Nu zal worden aangegeven welke oplossingen ons ten dienste staan en welke problemen met deze oplossingen samenhangen. Men zal natuurlijk trachten een optimale oplossing te vinden. Optimaal in die zin, dat zo goed mogelijk wordt voldaan aan de eisen die door sociologie, psychologie, economie, techniek en veiligheid aan het systeem worden gesteld. (zie fig.3.1)

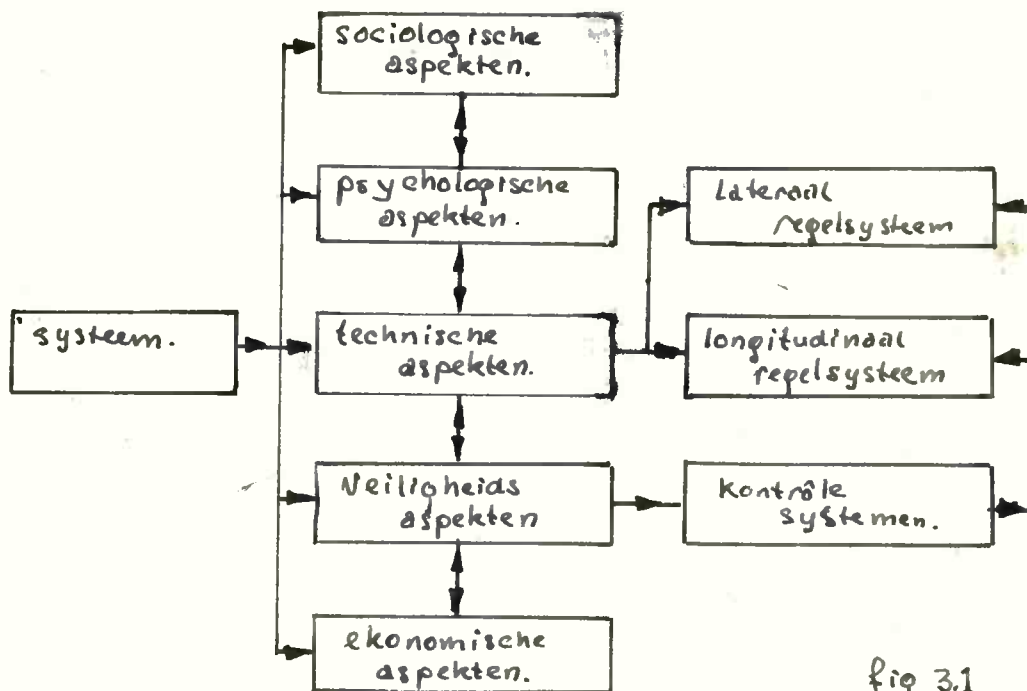


fig 3.1

Waarschijnlijk zal dit, zoals iedereen zal vermoeden, neerkomen op een kompromis tussen de eisen die door de

verschillende disciplines aan het systeem worden gesteld. Zeer belangrijk zal ook de prijs zijn die voor het systeem moet worden betaald. Om de prijs te verminderen, lijkt het zinvol om als leidraad aan te nemen dat de apparatuur in de auto, met behoud van alle eisen, zoveel mogelijk beperkt moet worden. Zo mogelijk wordt de apparatuur dus in de weg aangebracht. De reden hiervan is duidelijk; er zijn veel auto's en relatief weinig geautomatiseerde wegen. Een kleine besparing in de apparatuur van de auto kan derhalve - in geld uitgedrukt - een grote besparing in de kosten opleveren, ook al is de vervangende apparatuur in de weg aanzienlijk duurder dan de besparing per auto.

3.2 Met het systeem willen we de bewegingen van de auto zo beïnvloeden, dat op de autoweg geen aanrijdingen kunnen plaatsvinden en dat toch een vlotte verkeersafwikkeling plaats vindt. De rijdende auto heeft met betrekking tot het hier te ontwerpen systeem twee vrijheidsgraden. Met andere woorden, het voertuig kan twee onafhankelijke bewegingen maken; 1 een voorwaartse beweging
2 een zijwaartse beweging.

Om de voorwaartse beweging te beheersen is een regelsysteem nodig dat de snelheid van de auto alsmede de afstand tot de voorgaande auto bepaalt. Dit systeem is het longitudinale regelsysteem.

Ter beheersing van de zijwaartse beweging is een regelsysteem nodig, dat in staat is de sturbewegingen van de chauffeur over te nemen. Dit wordt het latera-

le regelsysteem genoemd.

Het laterale en longitudinale regelsysteem werken in principe onafhankelijk van elkaar. Het laterale regelsysteem bevat in hoofdzaak regeltechnische problemen (servosystemen, elektromechanische constructies enz), die min of meer buiten het kader van dit verslag vallen. Voor zover elektronische en/of informatietechnologische problemen in het laterale systeem optreden, zal ook daar aandacht aan worden besteed. De aandacht zal voornamelijk worden gevestigd op het longitudinale regelsysteem, daar dit de meeste elektronische en informatietechnologische problemen met zich meebrengt. Buiten het regelen van het normale rijden op de autoweg, moet het longitudinale regelsysteem ook in staat zijn om auto's in- en uit te laten voegen. Het vinden van deeloplossingen die ofwel goed invoegen, danwel goed uitvoegen of het rijden op de weg goed regelen, geeft geen grote moeilijkheden. De problemen worden aanzienlijk groter, wanneer men tracht een universeel systeem te vinden dat zowel het goed in- en uitvoegen als het rijden op de weg regelt.

3.3 Het laterale regelsysteem.

De referentie die dit systeem vereist moet evenwijdig lopen aan het door de auto te volgen tracé. Als referentie kunnen in principe verschillende middelen dienen, men denke bijvoorbeeld aan een rail langs de weg, een ~~g~~leuf in de weg (karrespoor) enz.

Omdat in dit geval een referentie waarbij mechanisch contact optreedt moet worden vermeden (slijtage), is naar een andere oplossing gezocht. De gekozen oplossing is een elektrisch geleidende kabel die in het wegdek wordt gelegd. De auto rijdt hier in lengterichting overheen. Een elektrisch signaal dat door de kabel wordt gestuurd veroorzaakt een e.m. veld daaromheen. Dit e.m. veld wordt door antennes aan de auto opgevangen en als referentie gebruikt. De antennes - het zijn er twee - zijn links en rechts onder de auto aangebracht (zie fig. 3.2).

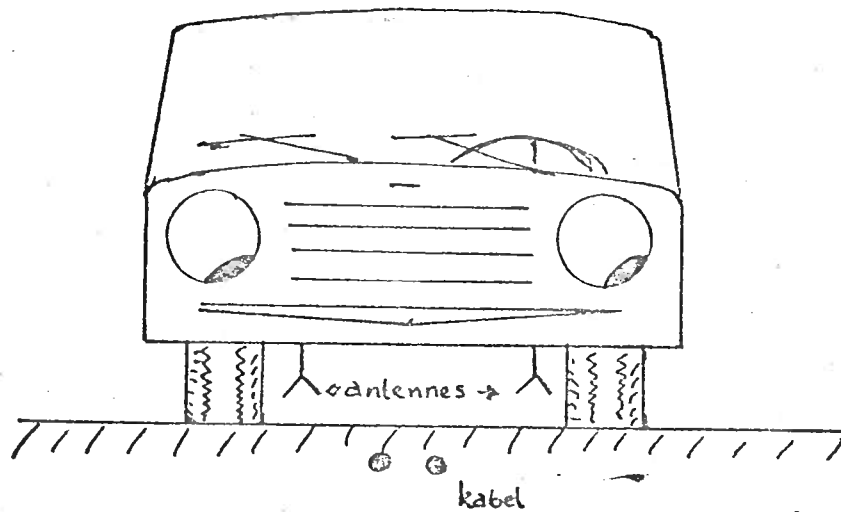


fig 3.2

Wanneer deze antennes zich op even grote afstand van de kabel in de weg bevinden, zijn de opgevangen signalen even sterk. Vergelijken van de signalen levert geen verschil op. Wanneer tijdens het rijden de ene antenne

dichter bij de kabel komt dan de andere, ontstaat bij vergelijken van de opgevangen en eventueel versterkte signalen een verschilsignaal. (zie fig. 3.3)

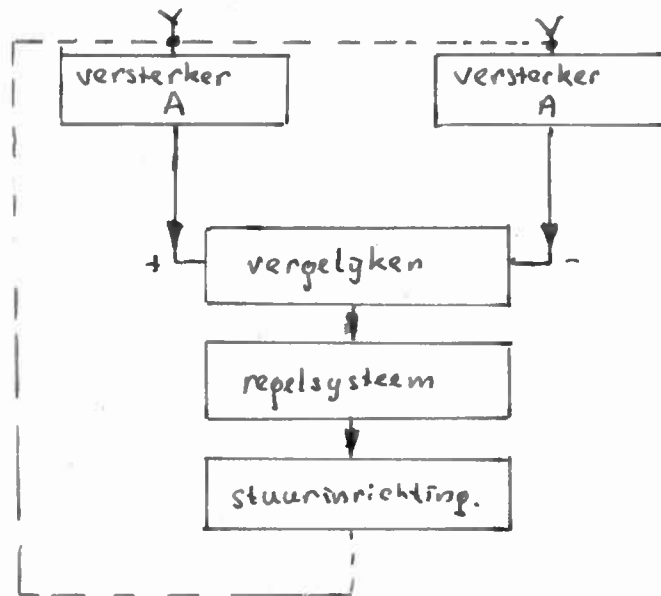


Fig 3.3

Dit verschilsignaal , toegevoerd aan het regelsysteem, stuurt de auto zodanig dat het verschil weer nul wordt. De gewenste koers wordt nu weer gevolgd. Hoewel voor de kabel in de weg ook met een enkeldraads-kabel kan worden volstaan is, onder andere uit technische en milieuhygiënische overwegingen, gebruik gemaakt van een tweedraadskabel. Het technische voordeel van twee kabels ligt in het veldverloop. Dit veldverloop tussen de kabels is beter geschikt om het regelsysteem te voeden dan het veldverloop rondom een enkele kabel. Uit milieuhygiënische overwegingen heeft een tweedraads-

kabel het voordeel dat de veldsterkte van de opgewekte e.m. golven sneller met de afstand afnemen dan bij een enkeldraadskabel. De kabel wordt gevoed door generatoren die een sinusvormig signaal produceren. De frekwentie van dit signaal zal waarschijnlijk omstreeks 50 kHz komen te liggen. De weg is verdeeld in sekties die ieder een eigen voedingsgenerator hebben. Wanneer de weg meer dan één rijstrook heeft, moet worden onderzocht of de rijstroken elkaar onderling beïnvloeden wat betreft hun e.m.-veld. Is dit het geval, dan moet iedere rijstrook een kabel met een andere frekwentie krijgen in plaats van dezelfde frekwentie. Iedere auto dient dan zodanig te zijn uitgerust, dat hij in staat is om alle frekwenties, die worden gebruikt in de kabels, te detekteren.

3.4 Longitudinale regelsystemen.

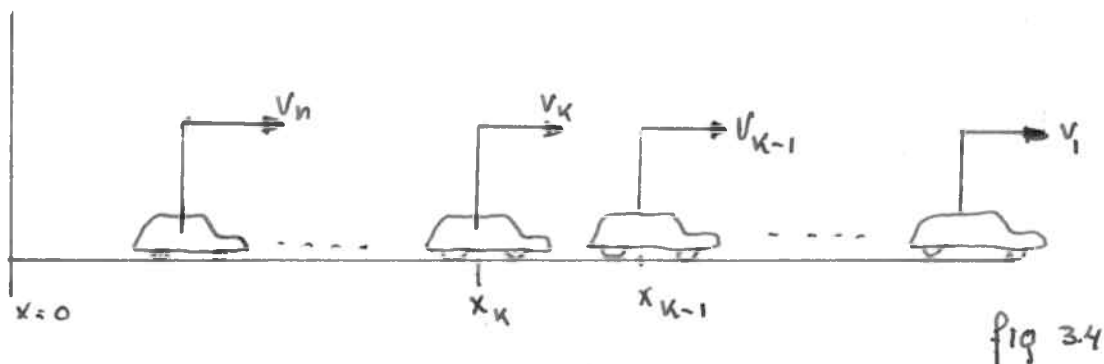
Het longitudinale regelsysteem kan volgens een aantal manieren worden gebouwd. Te onderscheiden zijn: Een systeem met relatieve plaatsbepaling (zie 3.5), een systeem met absolute plaatsbepaling (zie 3.6), een combinatie van de systemen (3.5) en (3.6), (zie 3.7). Ieder systeem bezit zekere voor- en nadelen. Het ligt in de bedoeling de systemen zo goed mogelijk tegen elkaar af te wegen, vervolgens een systeem uit te zoeken, dit verder te ontwikkelen en zo mogelijk te bouwen. In de konklusie aan het eind van dit hoofdstuk staan de overwegingen, die tot de keus van een bepaald systeem leidden, vermeld.

3.5 Systemen met relatieve plaatsbepaling.

3.5.1 Men stelle zich n auto's voor die met een zekere snelheid en zekere tussenruimte achter elkaar over de autoweg rijden. Noem de eerste auto 1, de tweede auto 2 enz. Bij systemen met relatieve plaatsbepaling probeert het regelsysteem in de k^e auto 'n zekere, door het systeem vastgelegde, afstand tot de $k-1^e$ auto te handhaven. Men spreekt ook wel van volgsystemen. De eerste auto heeft, binnen relatief grote afstand, geen voorganger. Deze auto kan men nu óf in staat stellen zelf zijn snelheid te kiezen, óf men laat deze auto vooraf gaan door een imaginaire auto (rabbit), die het regelsysteem van de eerste auto de vereiste informatie verstrekt die het behoeft om de afstand tot de rabbit te handhaven.

Algemener gesteld kan men zich afvragen; welke informatie aan de k^e auto moeten worden verstrekt, opdat zijn regelsysteem in staat is om de gewenste afstand h_k , (*) tussen de k^e en de $k-1^e$ auto te bewaren. Uit onderstaande afleiding moge een en ander blijken. (zie fig. 3.4)

(*) In de literatuur wordt voor h_k geschreven: h_{k-1} ; naar onze mening een verwarrende schrijfwijze.



De voertuigen bewegen zich over de autoweg voort met absolute snelheden v_k , gerekend ten opzichte van het wegdek. Iedere auto bevindt zich op een gegeven ogenblik op een zekere afstand x_k van de oorsprong. De versnellingen die op de auto worden toegepast zijn a_k . Er geldt $1 \leq k \leq n$. De afstand h_k tussen de k^e en de $(k-1)^e$ auto bedraagt

$$h_k = x_{k-1} - x_k$$

Het snelheidsverschil of relatieve snelheid v_{r_k} bedraagt

$$v_{r_k} = v_{k-1} - v_k = \frac{d(h_k)}{dt}$$

Het versnellingsverschil of de relatieve versnelling a_{r_k} bedraagt

$$a_{r_k} = a_{k-1} - a_k = \frac{d(v_{r_k})}{dt}$$

Het verband tussen h_k , v_{r_k} en a_{r_k} ligt vast in een differentiaalvergelijking van de vorm

$$b \frac{d^2 h_k}{dt^2} + c \frac{d(h_k)}{dt} + d \cdot h_k = 0$$

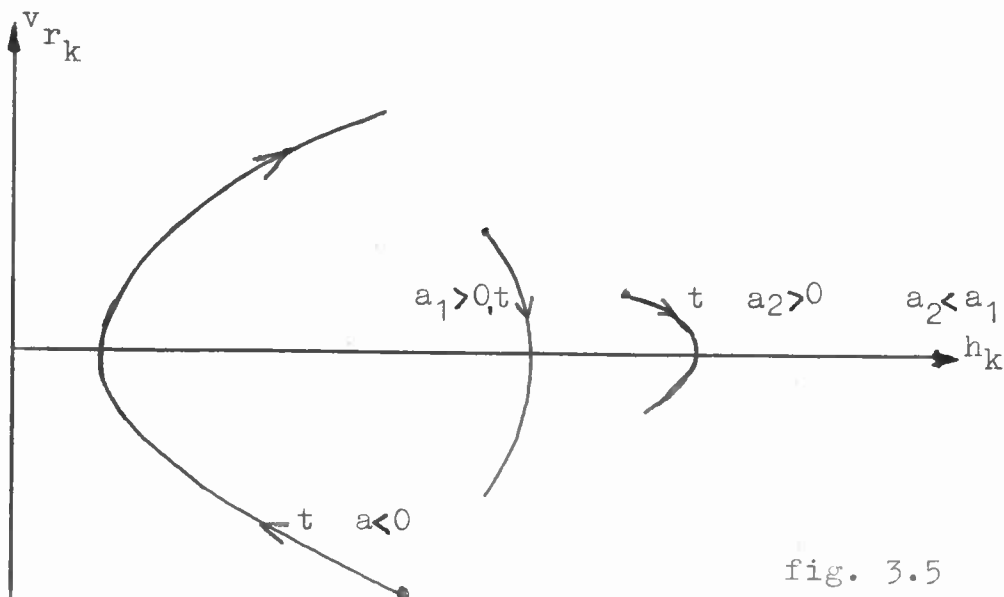
Hieruit volgt dat van h_k , v_{r_k} en a_{r_k} er twee onafhankelijk veranderlijk zijn en een afhankelijk veranderlijk.

Wanneer het systeem zoals hier, lineair en tijdsafhankelijk is zijn b, c en d konstant.

Het verband tussen h_k en v_{r_k} is grafisch weer te geven in een fasevlak. (In een fasevlak wordt dx/dt als functie van x weergegeven). Kiezen we voor $x = h_k$, dan geldt voor $dx/dt = v_{r_k}$.

Een simpele berekening toont aan dat, wanneer op een voertuig een konstante versnelling a_{r_k} wordt uitgeoefend, het punt t dat de tijd aangeeft, een parabool in het fasevlak beschrijft. (zie fig 3.5)

Zo is dus uit de trajektorie die het punt t beschrijft op ieder ogenblik de verhouding van relatieve snelheid en afstand tot auto $k-1$ van auto k bekend.



Om een goede regeling van de k^e auto te verkrijgen, moet zijn regelsysteem op ieder ogenblik kunnen beschikken over twee van de drie variabelen h_k , v_{r_k} of a_{r_k} .

Hoewel er verschillende praktische oplossingen bestaan om bijvoorbeeld v_r en h te bepalen, berusten ze allemaal op voertuig $(k-1)$ - weg - voertuig (k) communicatie. Methoden die v_r en h rechtstreeks bepalen, zoals radarsystemen, zijn niet te gebruiken. Wanneer deze systemen zouden worden toegepast, zou door onderlinge beïnvloeding en ongewenste reflecties een chaos ontstaan. Andere manieren om h en v_r rechtstreeks te bepalen zijn ons nog niet bekend.

Wanneer, hoe dan ook, h en v_r bekend zijn, resteren nog twee problemen die moeten worden opgelost.

Men dient er in de eerste plaats voor te zorgen dat het regelsysteem in de k^e auto niet instabiel kan worden door een afwijking die optreedt in de $k-1^e$ auto. Deze eis wordt de lokale stabiliteitseis genoemd. Voorts moet een verstoring in de snelheid, die ergens in de rij auto's optreedt, verzwakt naar achteren worden doorgegeven. Hier spreekt men van de asymptotische stabiliteitseis.

3.5.2 Het zal de oplettende lezer duidelijk zijn, dat in het ideale geval de auto's op onderlinge afstanden h_0 rijden met onderlinge relatieve snelheden $v_r = 0$. Rijdt door een storing een voertuig niet op de gewenste afstand tot zijn voorganger, dan moet het regelsysteem door middel van versnellingen en vertraagingen de auto op de gewenste plaats in de rij voertuigen brengen. Reeds is aangetoond dat het punt t , dat afstand h en relatieve snelheid v_r van een voertuig

aangeeft, bij konstante a_r een parabool in het fasevlak beschrijft. Vanuit ieder punt P in het fasevlak kan men, door het konstrueren van diverse parabolen die symmetrisch liggen ten opzichte van de h -as, het punt h_0 bereiken. Iedere parabool komt overeen met een konstante versnelling die op het voertuig wordt toegepast. Fig. 3.7 geeft een voorbeeld van een stelsel parabolen waarmee het gewenste punt h_0 kan worden bereikt.

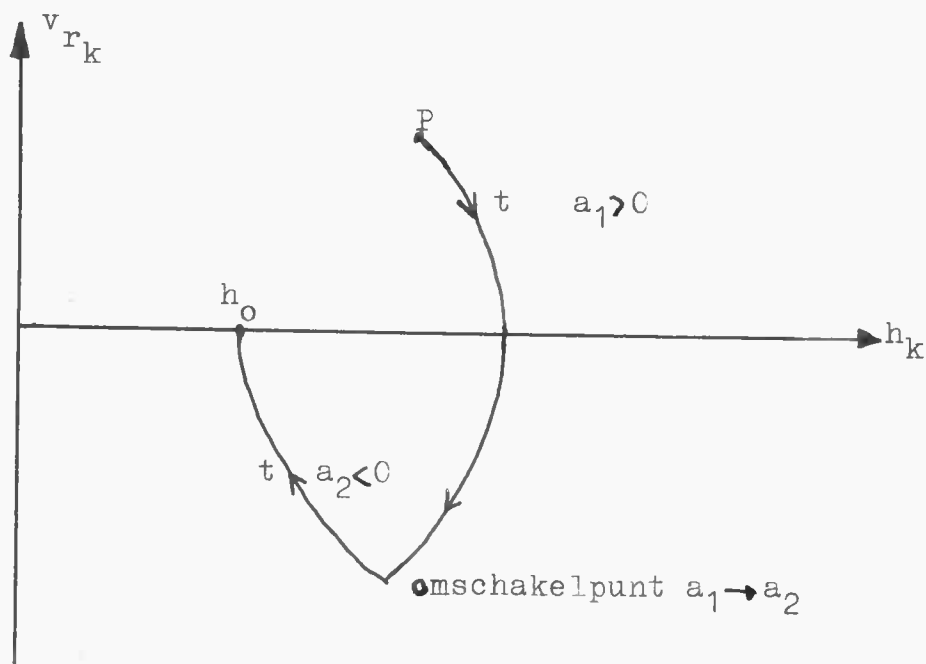


fig. 3.7

Men moet bij het konstrueren van de parabolen er rekening mee houden dat niet iedere parabool kan worden gekonstrueerd, daar men ook rekening moet houden met de fysische mogelijkheden van de auto. Het motorvermogen beperkt de acceleraties tot $0,2 \text{ à } 0,3 \text{ g}$. Het remvermogen is beperkt tot $0,5 \text{ g}$, met dien verstande dat bij een glad wegdek deze deceleraties aanleiding tot slippen kunnen geven.

Verder moet het regelsysteem zo worden uitgevoerd, dat de juiste versnellingen op het goede ogenblik hun werking beginnen. Deze voorgaande problemen zijn opgelost door aan ieder punt uit het v_r - h -vlak een bepaalde versnelling te koppelen. Dit geeft aanleiding tot een verdeling in gebieden van het fasevlak, waarbinnen een bepaalde versnelling heerst. Een van de vele mogelijkheden van verdeling van het fasevlak geeft figuur 3.8

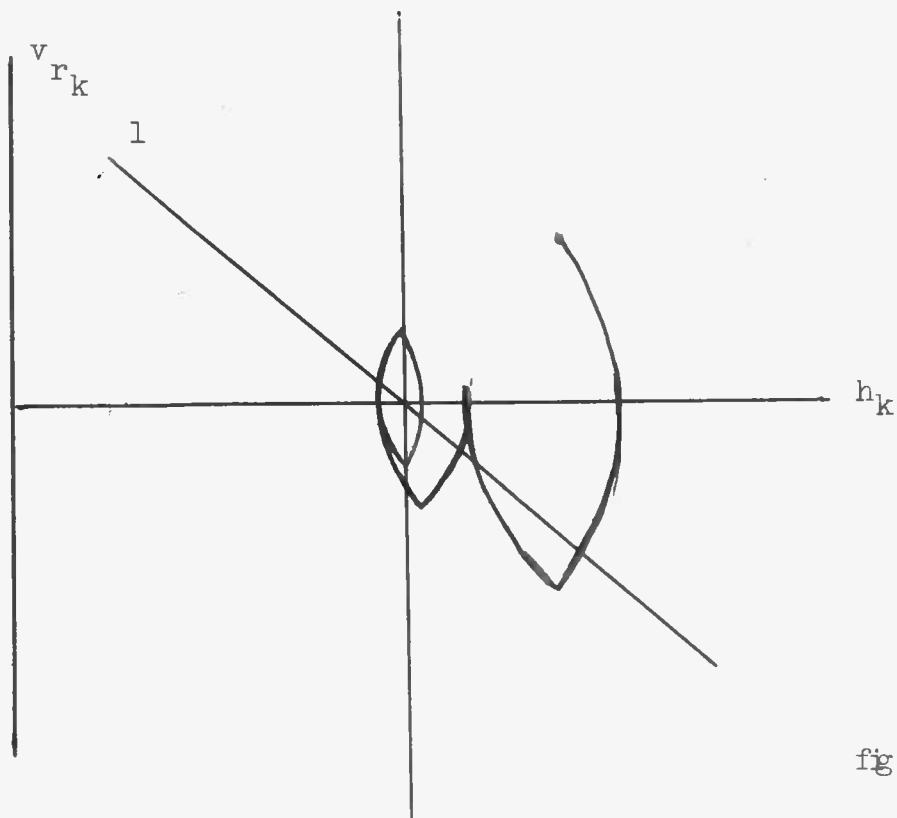
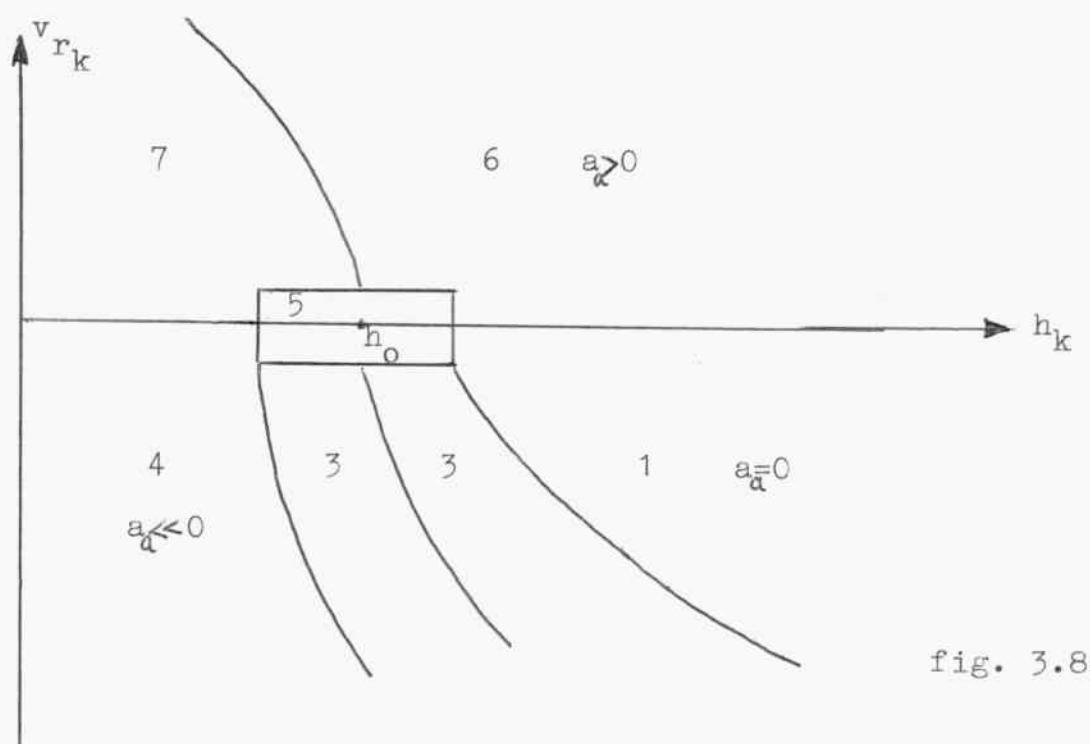


fig. 3.8

Het v_r - h -vlak wordt hier door de lijn 1 in twee delen verdeeld. Boven de lijn 1 is de versnelling die op de auto wordt uitgeoefend groter dan nul, daaronder kleiner dan nul, de versnellingen zijn konstant. Waar ook het beginpunt van de kromme in het vlak ligt, altijd zal de kromme door beurtelings versnellen en vertragen van de auto in de oorsprong terecht komen. Deze oplossing bevat voor de inzittenden van de auto een aantal onaangename elementen.

Het is niet prettig om met tussenpozen van enkele seconden versneld of vertraagd te worden. In het gebied van h_0 gekomen treden limitcycles op: de auto kan h_0 niet precies bereiken door de traagheid van het systeem, maar tracht daar toch te komen. Tenslotte ontstaat een stabiele schommeling om de gewenste waarde h_0 heen (de limit-cycle). Een andere oplossing die veel in Amerikaanse literatuur is beschreven is die volgens figuur 3.9 (lit. 3;8)



Deze methode van verdeling van het fasevlak geeft een vermindering van het aantal malen dat van versnelling moet worden veranderd. De lijnen geven de grenzen van de gebieden aan. In gebied 1 is de versnelling a_d bijvoorbeeld nul, de auto rijdt dan met konstante snelheid. In gebied 4 is de auto zeer dicht tot zijn voorganger genaderd, hier moet de wagen dus sterk worden afgeremd. In gebied 6

rijdt het voertuig langzamer dan zijn voorganger, hetgeen tot een versnelling aanleiding zal moeten geven. In gebied 5 is de versnelling evenredig met de relatieve snelheid. De plaats van de auto ten opzichte van het voorgaande voertuig wordt hier niet in aanmerking genomen. Daardoor zal na verloop van tijd door meetfouten en dergelijke, gebied 5 weer verlaten worden. De versnellingen in de andere gebieden zorgen er dan voor dat gebied 5 weer wordt bereikt. Ook hier treden dus limitcycles op, zij het minder dan in het vorige geval.

3.5.3 Voor- en nadelen.

Een voordeel van het systeem met relatieve plaatsbepaling (voertuiggebonden) is, dat in principe de mogelijkheid bestaat om tot geleidelijke invoering van het systeem te komen. De eis van geleidelijke invoering vindt men in de literatuur voortdurend terug (lit. 3;4;6;8). (Hoewel hier niet helemaal ter zake doende, wordt het volgende opgemerkt. Een geleidelijke invoering van het systeem is minder ideaal dan men zou vermoeden. Zodra men geautomatiseerde en ongeautomatiseerde voertuigen op dezelfde rijstrook toelaat; vervallen de voordelen van hogere snelheid, hogere wegcapaciteit en veiliger verkeer. De gebruiker die al deze voordelen mist, zal nu niet snel geneigd zijn om zijn auto ook te laten automatiseren, louter en alleen omdat hij geen verschil bemerkt met de ongeautomatiseerde toestand. Bij geleidelijke invoering bestaat derhalve de mogelijkheid, dat het systeem zichzelf onmogelijk maakt, doordat een relatief groot aantal van de autobezitters niet overgaat tot het

laten automatiseren van zijn auto.)

Een ander voordeel is dat men de onderlinge afstand van de voertuigen vrij eenvoudig afhankelijk kan maken van de systeemsnelheid. Moet deze snelheid door een of andere oorzaak worden verlaagd, dan kan men door het verkleinen van de onderlinge afstand een relatieve verbetering van de wegcapaciteit verkrijgen. Ook kan iedere auto zijn voorganger "zien", dat wil zeggen dat de auto de plaats en snelheid van zijn voorganger kan bepalen. Het voordeel van het kunnen "zien" van zijn voorganger, bevat tevens een nadeel. Dit nadeel wordt veroorzaakt door de manier waarop de aanwezigheid van de voorgaande auto wordt vastgesteld. Om zijn voorganger te kunnen zien, is óf voertuig-voertuig communicatie vereist, danwel voertuig-weg-voertuig communicatie. Voertuig-voertuig communicatie is niet erg betrouwbaar wat betreft de gevoeligheid voor storingen: hellingen, schommelingen van de auto, obstakels langs de weg, signalen van tegemoetkomende auto's enz. vormen allemaal storingsbronnen. Past men voertuig-weg-voertuig communicatie toe, dan kunnen veel van deze problemen uitschakelen. Echter de weg die het signaal van auto tot auto moet afleggen, gaat door vele schakels en iedere schakel verhoogt de gevoeligheid voor storingen. Mocht bij voertuiggebonden systemen onverhoopt het voertuig "blind" worden, dan kunnen ongelukken worden voorkomen door het aanbrengen van extra veiligheidsvoorzieningen in de weg. Alhoewel de blinde auto nog door zijn opvolger kan worden gezien, kan het zelf geen voertuigen of voorwerpen meer detekteren. Het zou dus niet uitgesloten zijn, dat

het blinde vehikel andere voertuigen aanrijdt.

Een ander nadeel is het volgende: Rijdend over de autoweg kan zich binnen zekere afstand h_0 voor de auto wél of géén voertuig bevinden. Bevindt zich binnen h_0 meter van de auto een voorganger, dan zal de voorganger de snelheid van zijn achtervolger bepalen. Bevindt zich binnen h_0 geen voertuig, dan moet de auto zelf zijn snelheid vaststellen. Voor deze twee gevallen kan niet met dezelfde apparatuur worden volstaan. In het fasevlak blijkt dit als volgt (zie figuur 3.9): In gebied 1 is de versnelling nul, hier wordt dus niet op de voorganger geregeld en de afstand tussen twee opeenvolgende voertuigen is groter dan h_0 . Wanneer twee voertuigen elkaar inhalen, wordt een groot gebied van het fasevlak beschreven. De apparatuur om te bepalen waar men zich bevindt in het fasevlak moet daartoe geschikt zijn.

Tenslotte wordt opgemerkt dat bij systemen met relatieve plaatsbepaling zowel lokale als asymptotische stabiliteit van belang zijn.

3.6 Systemen met absolute plaatsbepaling.

3.6.1 Men stelle zich n imaginaire auto's voor (rabbits) die zich met de gewenste snelheid (de systeemsnelheid) op konstante onderlinge afstanden voortbewegen. Snelheid en plaats van de rabbit zijn door het systeem bepaald. Bij snelheidsveranderingen worden alle rabbits tegelijk vertraagd of versneld, voor zover de rabbits zich op de autoweg bevinden.

Bij systemen met absolute plaatsbepaling (weggebonden) probeert het regelsysteem van de k^e auto de relatieve snelheid en afstand tot de k^e rabbit nul te maken. Iedere auto heeft zijn eigen rabbit en behoudt deze gedurende de rit over de automatische weg. Het ook hier van toepassing zijnde v-h -fasevlak ($v_r = v$) heeft hier dus betrekking op de relatie auto (k)-rabbit (k). Bij systemen met absolute plaatsbepaling is $h_0 = 0$. Systemen met absolute plaatsbepaling geven ons de mogelijkheid om auto (k) gelijk met rabbit (k) te laten vertrekken. Het gevolg hiervan is, dat begin en eind van de kromme die v en h in het fasevlak beschrijven in de oorsprong liggen. Relatieve snelheid en afstand worden gerekend ten opzichte van de rabbit, daarom schrijven we v in plaats van v_{r_k} en h in plaats van h_k .

3.6.2 Voor- en nadelen.

Tegenover het voordeel van de geleidelijke invoering die mogelijk is bij de relatieve systemen, staat hier het voordeel van de mogelijkheid tot reserveren. Wanneer men met zijn auto eenmaal op de weg is toegelaten, is men er zeker van dat men tot aan de bestemming van een ongestoorde rit kan genieten. Voor dit boekingssysteem draagt een centraal regelorgaan zorg. Vertragingen door wegen die "vol" zijn kunnen niet voorkomen.

Voor de plaatsbepaling van de auto is slechts voertuig-weg of weg-voertuig communicatie nodig.

De auto kan alleen zijn eigen rabbit "zien". Dit scheidt een veiligheidsprobleem: Wordt de auto "blind", dan moet

er een veiligheidsvoorziening beschikbaar zijn die maatregelen neemt.

Het voertuig en de rabbit kunnen tegelijkertijd op de oprit starten. Laat men dus de rabbit een gewenst snelheidsprofiel volgen, dan doet de auto dit ook. Zo kan worden bewerkstelligd dat het gebied in het fasevlak dat door de v-h-kromme bestreken wordt, relatief klein is. Dit kan tot vereenvoudiging in de apparatuur leiden. Tenslotte wordt nog opgemerkt dat bij systemen met absolute plaatsbepaling alleen lokale stabiliteit van belang is.

3.7 Combinaties van relatieve en absolute systemen.

Systemen die deels de eigenschappen van de relatieve, deels die van de absolute systemen bevatten zijn er vele te ontwerpen. Een van dit soort systemen is door Vervoort ontwikkeld. (lit. 18) Tussen de raaien vindt hier absolute plaatsbepaling plaats met behulp van kilometerteller en snelheidsmeter. Deze instrumenten geven helaas niet voldoende nauwkeurig de afgelegde weg en de snelheid aan. Op de raaien wordt de afstand tot de voorgaande auto vastgesteld. Hier worden dan zo nodig volgens het relatieve plaatsbepalingsysteem correcties uitgevoerd. Door bepaalde onvolkomenheden in het systeem (de relatieve snelheid wordt niet bepaald, niet alle versnellingen zijn mogelijk) ontstaat asymptotische instabiliteit. Bij zorgvuldige vaststelling van de systeem eigenschappen kan bij deze systemen in principe worden bereikt, dat zekere

voordelen van relatieve en absolute systemen worden gekombineerd. Voor ieder ander ontworpen systeem kunnen dus de eigenschappen en daarmee de voor- en nadelen verschillen.

3.8 Konklusie.

Op grond van voorgaande gegevens moet een keuze worden gemaakt tussen de beschreven systemen. Welk systeem ook zal worden gekozen, de keuze zal onder meer sterk afhangen van de ingenomen standpunten. In veel Amerikaanse literatuur (lit. 3;4;5;6) wordt vaak geëist dat het systeem geleidelijk moet worden kunnen ingevoerd. Geleidelijk in die zin, dat tegelijkertijd automatische en handbestuurde auto's van dezelfde rijstrook gebruik kunnen maken. In § 3.5.3 is reeds op de nadelen hiervan gewezen.

Stelt men geleidelijke invoering niet als eis, dan worden ook de systemen met absolute plaatsbepaling aantrekkelijk. De wederzijdse voor- en nadelen kunnen dan tegen elkaar worden afgewogen.

Het grote voordeel van de absolute systemen, de mogelijkheid tot het vooraf reserveren van plaatsen, geeft aanleiding tot een ongestoorde rit van begin naar eindpunt.

Bij het invoegen wordt geen oponthoud veroorzaakt door wachttijden. Tevens maken de reserveringen het mogelijk op ieder ogenblik een overzicht te krijgen van de drukte op de wegen. De voordelen van de ongestoorde rit, kunnen bij relatieve systemen moeilijk worden gerealiseerd.

Een ontegenzeggelijk voordeel van relatieve systemen is, dat de onderlinge afstand van de voertuigen kan worden ingesteld op iedere gewenste waarde, voor zover toelaat-

baar. Dit kan bij snelheidsveranderingen een prettige eigenschap zijn, bijvoorbeeld om de capaciteit van de weg te handhaven. Wordt de snelheid kleiner, dan maakt men de afstand kleiner, waardoor de wegcapaciteit minder dan evenredig met de snelheid afneemt. Bij absolute systemen kan de afstand ook worden geregeld, doch in eerste instantie slechts stapsgewijs. Wat betreft de overdracht van informatie, is het relatieve systeem in het nadeel. Past men bij relatieve systemen voertuig-voertuig communicatie toe, dan zal men de reeds beschreven nadelen moeten proberen op te heffen. Past men voertuig-weg-voertuig communicatie toe, dan moet de informatie meer schakels doorlopen, dan bij weg-voertuig communicatie bij absolute systemen. Iedere extra schakel maakt de keten gevoeliger voor storingen. Valt het plaatsbepalend systeem uit, dan kan bij absolute systemen door middel van een kleine toevoeging aan de apparatuur een adequate veiligheidsvoorziening worden getroffen. Deze veiligheidsvoorzieningen eisen bij de relatieve systemen meer apparatuur. Bij absolute systemen hoeft de auto zich alleen op de eigen rabbit te concentreren, bij relatieve systemen moet onderscheid worden gemaakt tussen twee toestanden: namelijk wel of geen auto binnen zekere afstand. Ook hier is het relatieve systeem in het nadeel.

Aangaande het fasevlak het volgende: Relatieve systemen maken in principe gebruik van het gehele rechterdeel van het fasevlak; absolute systemen slechts van het gebied rond de oorsprong. Dit maakt het mogelijk om bij absolute systemen met eenvoudiger apparatuur te volstaan dan

bij relatieve systemen.

Tenslotte de stabiliteit: Bij absolute systemen is slechts de lokale stabiliteitseis van belang; bij relatieve systemen moet men ook rekening houden met de asymptotische stabiliteitseis. Daardoor wordt aan de ontwerper van relatieve systemen een extra beperking opgelegd.

Met bovenstaande argumenten als leidraad, lijkt het momenteel zinvol om te proberen een absoluut plaatsbepalingssysteem te ontwerpen. Rond het principe van de absolute (weggebonden) plaatsbepaling moet dan het complete systeem worden gebouwd. In hoofdstuk 4 is een zeer beknopte beschrijving van een dergelijk systeem te vinden.

4 De beschrijving van een systeem.

4.1 Inleiding.

In dit hoofdstuk zal worden getracht een - zij het zeer beknopte - beschrijving te geven van een systeem dat in staat is om autoverkeer snel en zonder stagnatie af te wikkelen. Deze verkeersafwikkeling zal dan geschieden zonder ingrijpen van de inzittenden van de auto's, zolang deze zich op het wegennet bevinden waarop automatische verkeersgeleiding volgens het weggebonden principe wordt toegepast. Een systeem zoals hier wordt bedoeld, zal vele subsystemen bevatten. Om de beschrijving te vergemakkelijken en overzichtelijk te maken, worden drie belangrijke subsystemen van het systeem behandeld. Namelijk auto, weg en centrale voorzieningen. Deze drie elementen van het systeem zijn voor een principiële funktionering van het systeem essentieel. Andere, wellicht niet minder belangrijke aspecten zijn - door de auteurs - nog niet voldoende onderzocht, om daar nu reeds een zinvolle verhandeling over te schrijven. Men denke hierbij aan veiligheidsvoorzieningen, communicatieproblemen tussen passagiers en centrale hulpdiensten enz.

Een beschrijving van de auto met toebehoren zal zeker een algemene beschrijving van het voertuig moeten bevatten. Een behandeling van de regelsystemen, lateraal en longitudinaal, mag niet ontbreken. Ook aan de middelen, die systeem-systeem communicatie en mens-systeem communicatie mogelijk maken zal aandacht worden geschonken. In § 4.5 kan de lezer het gezochte vinden.

Een beschrijving van de weg kan weer worden onderverdeeld in drie moten: de oprit, de afrit en de weg, maar dan zonder op- en afritten. Bij opritten en afritten moet dan nog onderscheid worden gemaakt tussen verbindingen van geautomatiseerde wegen onderling en verbindingen tussen geautomatiseerde wegen enerzijds en ongeautomatiseerde anderzijds. Bij op- en afritten van het laatste type moeten natuurlijk extra voorzieningen worden getroffen. De belangstellende lezer zal in §4.6 nadere informatie vinden betreffende de weg.

Tenslotte behandelt § 4.7 de centrale voorzieningen. Van primair belang is hier het reserveringsstelsel. Alle andere zaken die een centrale regeling vereisen, zoals snelheidsregelingen, controlewerkzaamheden, directie van hulpdiensten enz. worden in principe in deze paragraaf behandeld. Van dit onderwerp is nog weinig bekend, zodat deze paragraaf kort zal zijn.

Tot slot een aantal opmerkingen over § 4.2, §4.3 en § 4.4. Deze paragrafen vormen samen een min of meer afgerond geheel. In § 4.2 wordt beschreven op welke manier de communicatie tussen weg en auto plaatsvindt. In § 4.3 wordt de lezer duidelijk gemaakt hoe de uit de weg verkregen informatie wordt verwerkt. Tevens blijkt uit deze paragraaf welke problemen hierbij een rol spelen. Tenslotte verklaart § 4.4 hoe het regelsysteem in de auto is opgebouwd en hoe de werking ervan is. Met betrekking tot de gekozen verdeling auto-weg-centrale voorzieningen vormen deze paragrafen ieder voor zich slechts onderdelen van de gekozen splitsing. Om in de paragrafen 4.5 t/m 4.7 niet teveel in herhalingen te vervallen, wordt zonodig naar § 4.2;4.3 of 4.4 verwezen.

4.2 Kommunikatie tussen weg en auto.

4.2.1 In deze paragraaf wordt beschreven hoe de communicatie tussen weg en auto kan, en waarschijnlijk zal plaatsvinden. Kommunikatie tussen weg en auto is noodzakelijk; het stelt de auto in staat zijn juiste positie in te nemen met behulp van de informatie die het voertuig uit de weg verkrijgt, informatie die de auto aan de weg verschaft schept de mogelijkheid om bijvoorbeeld snelheid en plaats van de auto te controleren.

Een voor de hand liggende methode om informatie aan de auto over te dragen is hier overdracht door middel van elektro-magnetische velden. Ook voor informatie-overdracht naar de weg wordt hier gebruik van gemaakt, bijvoorbeeld bij toepassing van lusdetektoren.

De elektro-magnetische velden (e.m.-velden) die naar het voertuig worden uitgezonden en door antennes aan de auto worden opgevangen, moeten voldoende informatie bevatten om de auto te kunnen positioneren. Welke is die vereiste informatie? Welnu, een automatisch bestuurd, rijdende auto heeft afgezien van de autovering slechts twee vrijheidsgraden, namelijk zijwaarts of voorwaarts resp. achterwaarts. De zijwaartse of laterale beweging wordt veroorzaakt door het sturen van de auto. De voorwaartse of longitudinale beweging komt hier neer op "afstand bewaren". Het voertuig moet dus over twee informatiebronnen beschikken, een die informatie verschaft voor de laterale **sturing**, de andere die gegevens verstrekt voor de longitudinale regeling van het voer-

tuig.

De longitudinale plaatsbepaling kan nu op twee verschillende manieren geschieden: (zie ook hoofdstuk 3) op een absolute manier (ten opzichte van de weg, weggebonden) of op een relatieve manier (ten opzichte van het voorgaande voertuig, voertuiggebonden).

De laterale besturing eist een referentie. Deze referentie geeft het tracé aan dat de auto in het ideale geval zou moeten volgen. Wijkt de auto van het ideale tracé af, dan moet door middel van een referentie signaal aan het vehikel kenbaar gemaakt worden dat het van de koers afwijkt en zo mogelijk hoe groot de afwijking ten opzichte van de ideale toestand is.

Bij absolute longitudinale plaatsbepaling moet informatie verschaft worden over de plaats, gemeten langs het ideale tracé, die de auto op ieder ogenblik inneemt. Ook hier moet zo mogelijk bekend zijn hoe groot de afwijking van de ideale plaats is.

Bij de voertuiggebonden plaatsbepaling moet de afstand en eventueel snelheid van de voorgaande auto bekend zijn. In tegenstelling tot de weggebonden plaatsbepaling, is bij relatieve plaatsbepaling auto-auto communicatie vereist. Hiervoor is tot nu toe nog geen bevredigende oplossing gevonden. (lit. 5) Een betere oplossing is misschien het gebruik van voertuig-weg-voertuig communicatie, mede omdat hierbij selektieve aansturing mogelijk is. Bij selektieve aansturing kan men aan iedere auto afzonderlijk berichten overbrengen.

4.2.2 De laterale besturing

Het laterale referentiesysteem dat aan de in 4.2.1 gestelde eisen voldoet, kan verkregen worden met behulp van de volgende configuratie: Symmetrisch ten opzichte van het te volgen tracé liggen twee elektrisch geleidende kabels in de weg. De kabels zijn aan een zijde verbonden met een generator, die de kabels met een elektrisch signaal bekrachtigt. Ten gevolge van deze bekrachtiging ontstaat rond de geleiders een elektrisch veld E en een magnetisch veld H . Deze velden kunnen worden gemeten.

Voor de plaatsbepaling maakt de auto slechts gebruik van het magnetische veld. Zou men bij de hier gebruikte frequenties van het elektrische signaal (in de orde van 50 tot 100 kHz) van het elektrische veld gebruik willen maken, dan zou dit aanleiding geven tot onpraktisch grote antennes. De antennes die benodigd zijn om het magnetische veld te meten zijn klein en kunnen een relatief groot signaal afgeven (spoel rond ferrietstaaf).

Nu de vorm van het referentiesysteem bekend is, wordt het tijd om na te gaan wat de invloed van deze configuratie op het magnetische veld is. Om de berekening van het veld mogelijk te maken, wordt eerst een assenstelsel gedefinieerd.

Men stelde zich een assenstelsel voor bestaande uit 3 loodrecht op elkaar staande assen. De x-as loopt in de richting van het te volgen tracé, eenheidsvektor \underline{i} . De y-as geeft de richting van de zijdelingse bewegingen van de auto aan, eenheidsvektor \underline{j} . De richting van de z-as,

met eenheidsvektor \underline{k} , ligt nu vast; om de zin van de eenheidsvektor te bepalen, definiëren we het volgende uitwendige produkt:

$$\underline{i} * \underline{j} = \underline{k} \qquad \underline{j} * \underline{i} = -\underline{k}$$

Deze definitie geeft aanleiding tot een assenstelsel als geschetst in fig. 1:

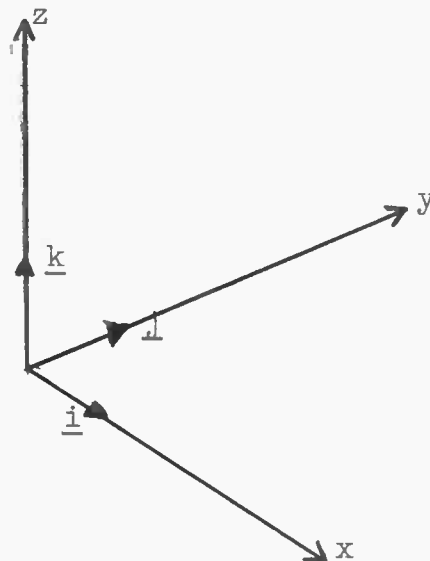


fig. 1

De sterkte van het veld H in een punt P van de ruimte is afhankelijk van de grootte van het signaal waarmee de kabels worden bekrachtigd, de afstand van de geleiders tot het punt P waar gemeten wordt en de lengte van de geleiders.

De formule van Biot-Savart geeft een en ander in de gewenste vorm:

$$d\underline{H} = \frac{\underline{i} * \underline{r}}{4\pi r^3} dl$$

$$\underline{r} = \underline{i}x + \underline{j}y + \underline{k}z$$

$$\underline{I} = \underline{i}I$$

In deze formule stelt $d\underline{H}$ de bijdrage aan de veldsterkte door een stukje dl van de geleider voor, \underline{I} is de stroom door de geleider, $\underline{I} \times \underline{r}$ is het uitwendig produkt van de vektoren \underline{I} en \underline{r} , waarin \underline{r} de vektor is die van het stukje stroomvoerende geleider naar het punt P wijst. Figuur 2 geeft een beeld van de configuratie:

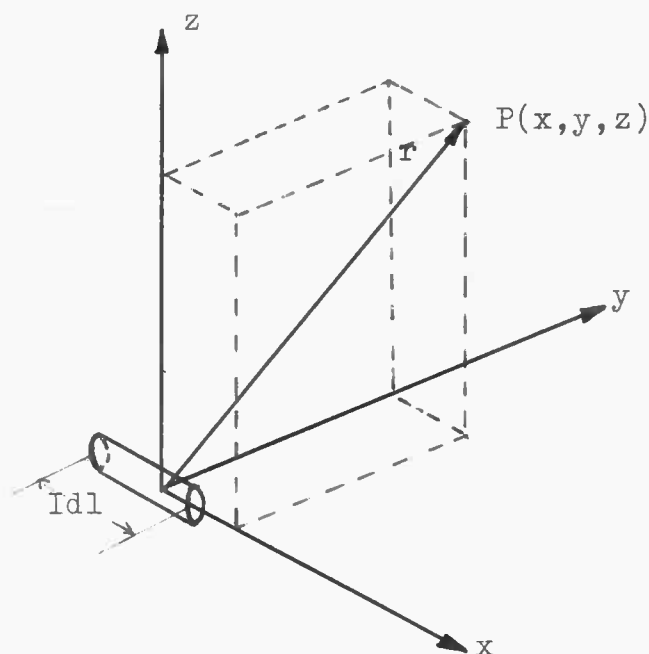


fig. 2

Met behulp van de formule van Biot-Savart wordt nu het magnetische veld voor het in figuur 3 beschreven referentiesysteem berekend.

Hier wordt verondersteld dat de kabeldiameters verwaarloosbaar klein zijn ten opzichte van de afstand b .

In figuur 3 stelt z_0 de hoogte van de antennes voor ten opzichte van de kabels, y_0 de plaats ervan ten opzichte van het vlak $y = 0$ en x_0 stelt de afgelegde weg langs de ideale lijn voor, een lijn evenwijdig aan de x -as.

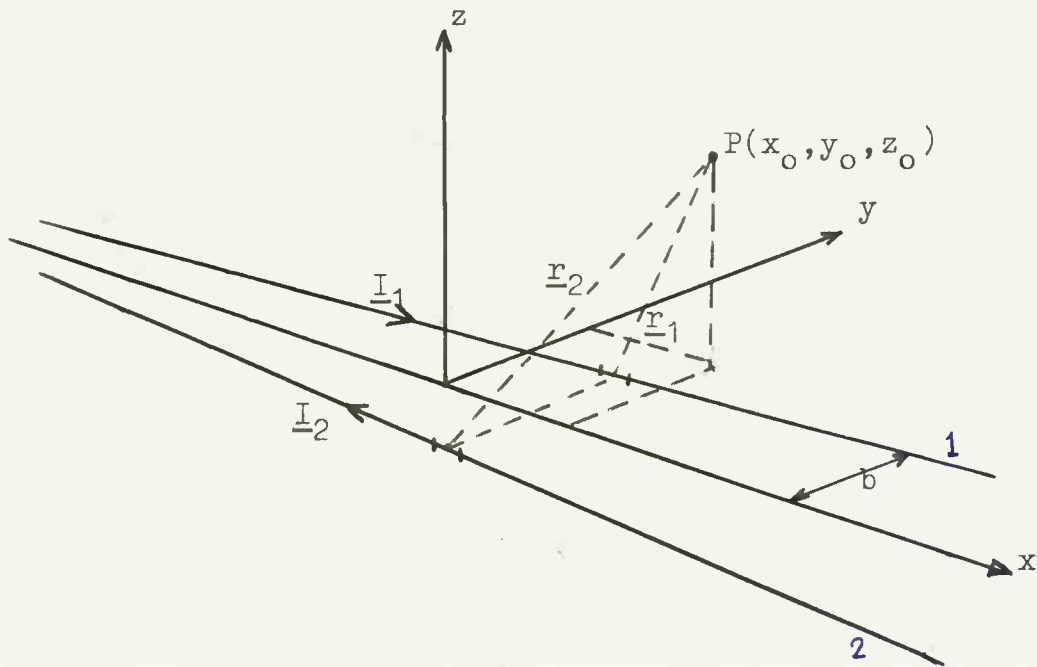


fig. 3

Voor figuur 3 geldt:

$$dH_1 = \frac{I_1 * r_1}{4\pi r_1^3} dl \quad -\infty < l < \infty$$

$$r_1 = i(x_0 - x) + j(y_0 - b) + kz_0$$

$$dH_2 = \frac{I_2 * r_2}{4\pi r_2^3} dl \quad -\infty < l < \infty$$

$$r_2 = i(x_0 - x) + j(y_0 + b) + kz_0$$

H_1 is het veld ten gevolge van geleider 1, H_2 ten gevolge van geleider 2. Ter plaatse van een doorsnede met konstante x geldt: $I_1 = -I_2 = I$. Het totale veld $dH = dH_1 + dH_2$ is te splitsen in een vertikaal veld H_z en een horizontaal veld H_y , de reden van deze splitsing zal later in deze paragraaf duidelijk worden.

Na integratie vindt men voor H_y en H_z :

$$H_y = \frac{-2I z_0 b y_0}{\pi [(y_0 - b)^2 + z_0^2] [(y_0 + b)^2 + z_0^2]} \quad (1)$$

$$H_z = \frac{2I b (y_0^2 - b^2 - z_0^2)}{\pi [(y_0 - b)^2 + z_0^2] [(y_0 + b)^2 + z_0^2]} \quad (2)$$

Uit deze formule blijkt dat zowel H_y als H_z onafhankelijk zijn van x . Dat wil zeggen dat op iedere doorsnede met konstante x hetzelfde veldverloop verwacht kan worden. In de praktijk zal men het veld op een konstante hoogte z_0 meten (afgezien van de vering van de auto die een afwijking in de meethoogte veroorzaakt). In (1) en (2) is y dan de enige variabele. Voor een zekere z zal het verloop van H_y en H_z als functie van y het volgende beeld vertonen; zie figuur 4a en 4b.

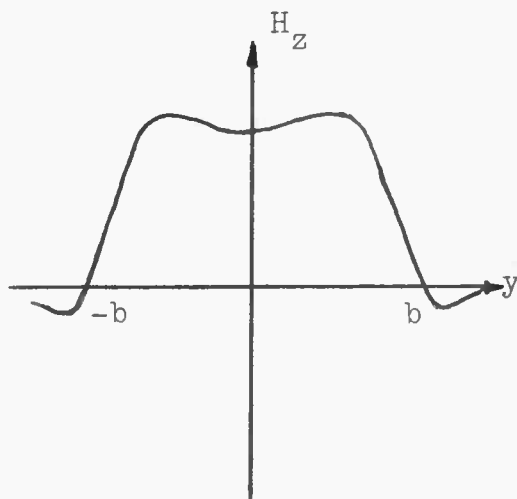


fig. 4a

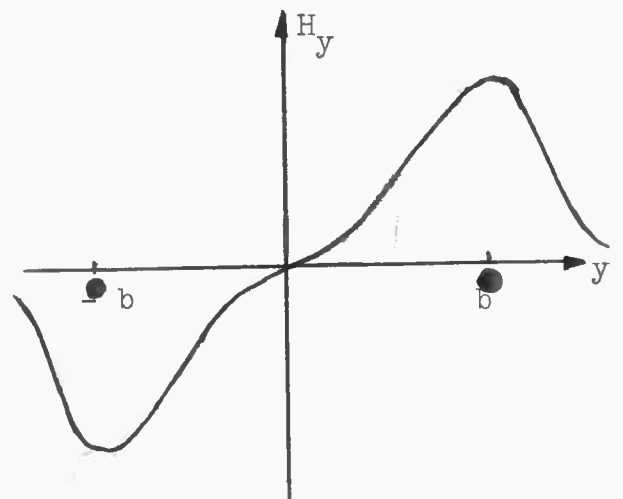
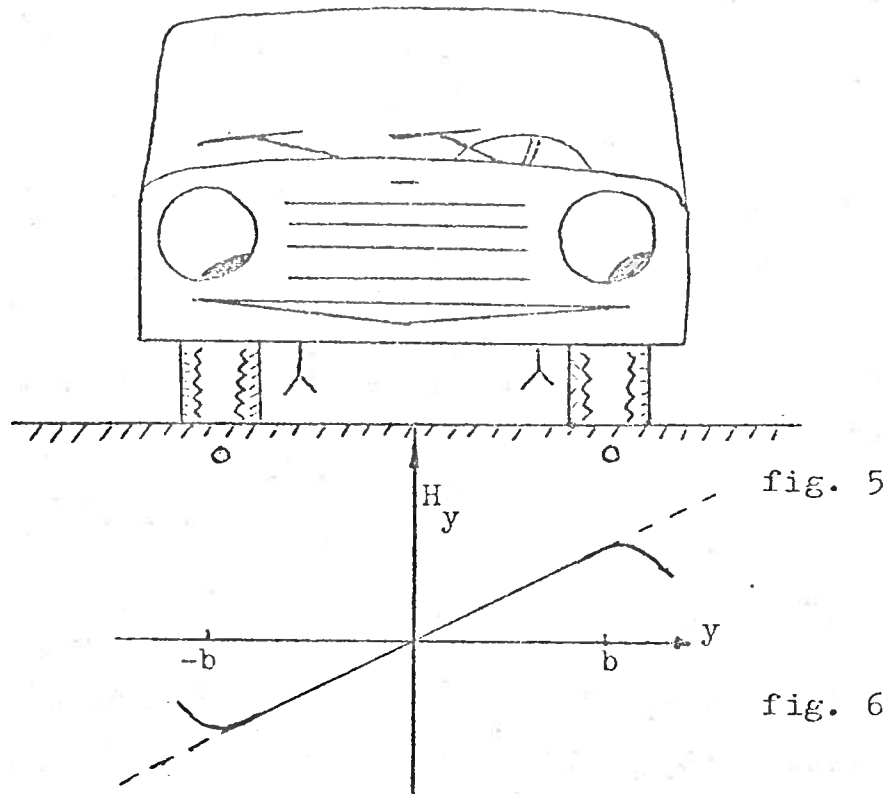


fig. 4b



Figuur 5 laat zien hoe de auto op het wegdek staat; tevens zijn onder de auto de antennes aangegeven die het veld meten. De twee voelsprietten meten het veld H_y . Bevinden beide antennes zich even ver van de oorsprong (de ideale toestand), dan zijn de gemeten magnetische velden in absolute waarde gelijk. De som van de signalen die door identieke antennes wordt afgegeven, is dan nul.

Zou men erin slagen een veld te scheppen volgens figuur 6, dan zou men daar goed gebruik van kunnen maken bij de besturing van de auto. Een afwijking van de ideale toestand geeft dan aanleiding tot een evenredig met y toenemend veld. Dit geldt natuurlijk alleen tussen $-b$ en b , voor $y \rightarrow \infty$ geldt immers dat H_y tot nul na-

dert.

Tevens wordt nu duidelijk waarom het veld H gesplitst is in de velden H_y en H_z : H alleen kan geen lineair veldverloop geven en is daarom minder geschikt voor de laterale sturing van de auto.

Hier wordt opgemerkt, dat er eigenlijk niets aan het veldverloop veranderd kan worden. Het enige wat mogelijk is, is de verhouding z/b wijzigen. Er moet dus gezocht worden naar een gunstige waarde van z/b .

Voor het ideale geval, geschetst in figuur 6, geldt:

$$H_{wens} = k_1 \cdot y \quad -b \leq y \leq b$$

H_{wens} stelt het gewenste veld voor, k_1 een konstante die de hellingshoek van de grafiek aangeeft.

Neem nu als eenheid van lengte $b=1$ (dit doet niets aan de algemeenheid van de berekening af), en druk alle andere lengten in deze eenheid uit.

Definieer nu een verhouding V als volgt:

$$V = \frac{H_{wens}}{H_y} = k_2 \frac{(y^2 + z^2 + 1)^2 - 4y^2}{z} \quad (3)$$

waarin $k_2 = k_1 \pi / (-2I \cdot b \cdot z_0)$

Deze verhouding moet in het ideale geval 1 zijn voor alle waarden van y tussen $-b$ en b .

V bereikt een extreme waarde voor $dV/dy=0$. hieruit volgt:

$$k_2 [4y(y^2 + z^2 + 1) - 8y] = 0 \quad (4)$$

De oplossing van (4) is:

$$y_1 = 0$$
$$y_{2,3} = \pm\sqrt{1-z^2}$$

Uit d^2V/dy^2 volgt dat dit extreem een minimum is.

In de extreme punten zal de fout van het werkelijke veld ten opzichte van het gewenste veld een maximale waarde aannemen.

De grootte van de fout kan worden berekend als de waarde van k_2 uit (3) bekend is. Bij nauwkeurige beschouwing van de grafiek van H_y blijkt dat voor $y=\pm 0,8$ (niet ongeveer 0,8, maar +0,8 en -0,8) het verschil tussen het gewenste veld en het werkelijke veld te groot wordt. Daartussen stemmen de velden redelijk overeen. Neem nu als grenzen van het lineaire verloop van het veld $y=\pm 0,8$ en kijk hoe groot voor deze waarde van y de maximale fout wordt.

Voor $y=0,8$ volgt voor de waarde van z na uitschrijven van (3):

$$y^4 + 2y^2(z^2 - 1) = 0 \text{ ofwel } z^2 = 0,68$$
$$z_{1,2} = \pm\sqrt{0,68}$$

Voor $y=\pm 0,8$ en $y=0$ heeft V dus precies de juiste waarde 1. Voor $y=0$ kan tevens de waarde van k_2 worden berekend, gevonden wordt:

$$k_2 = \frac{1}{(1+z^2)^2}$$

Tenslotte kan men dan het verschil tussen wensveld H_{wens} en werkelijk veld H_y in het extreme punt berekenen. Substitueer daartoe $y^2=1-z^2$ in (3), met voor z^2 de waarde 0,68. Voor V wordt vervolgens een waarde van $V=0,965$ gevonden, dat wil zeggen een verschil van 3,5% met de gewenste waarde.

Hiervoor is aangetoond, dat van veld H_y met vrucht gebruik kan worden gemaakt bij de besturing van de auto. Ook H_z zal waarschijnlijk moeten worden gebruikt.

Waarom? : Op grote afstand van de generator zal de stroom, die het veld veroorzaakt, merkbaar kleiner zijn dan vlak bij de generator. Meet men in de auto nu alleen H_y , dan wordt een fout geïntroduceerd die het voertuig niet kan vaststellen. De foutenbron, de veranderde stroom, zou geëlimineerd moeten worden. Dit is mogelijk door de verhouding H_y/H_z te meten. Zo zijn ook veranderingen in de magnetische permeabiliteit, veroorzaakt door bijvoorbeeld sneeuw, regen of ijzel, te elimineren. Als immers H_y en H_z met dezelfde faktor worden veranderd, blijft de verhouding hetzelfde.

Wordt H_z als referentieveld gebruikt, dan zal dit voor bijvoorbeeld voor $-0,8 \leq y \leq 0,8$ een konstante waarde moeten bezitten, omdat zijwaartse bewegingen van het voertuig geen veldveranderingen in H_z mogen veroorzaken. Hiervan uitgaande toont figuur 7 het gewenste verloop van H_z .

Wordt H_z in een Taylorreeks ontwikkeld, dan volgt:

$$H_z = H(0) + y/1! H'(0) + y^2/2! H''(0) + \dots \quad (5)$$

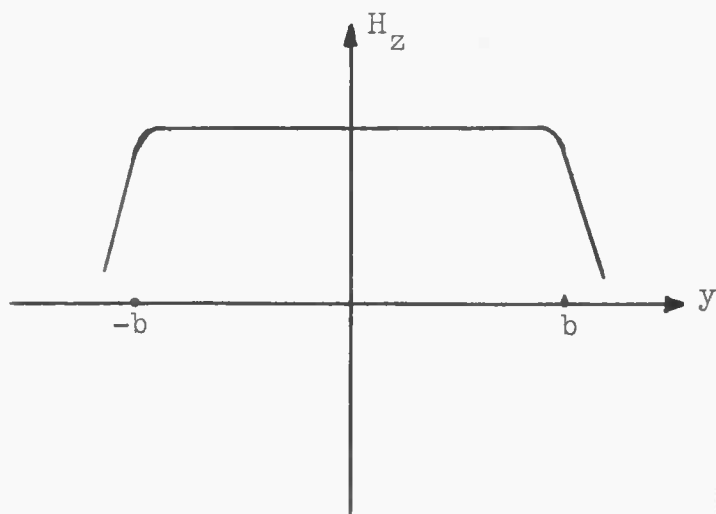


fig. 7

Uit symmetrieoverwegingen blijkt dat alle oneven afgeleiden nul zijn. Formule (5) gaat dan over in:

$$H_z(y) = H(0) + \frac{y^2}{2!} H''(0) + \dots$$

Praktisch kan men nu niet alle hogere afgeleiden elimineren. Als benadering maakt men nu de tweede afgeleide nul. De voorwaarde die wordt gevonden is dan $z\sqrt{3} = 1$. Deze eis komt niet helemaal overeen met de eisen die aan H_y zijn gesteld voor een lineair verlopend veld. Mogelijke oplossingen zijn: een kompromis tussen de eisen voor H_y en H_z , óf de antennes die H_y en H_z meten op verschillende hoogten aanbrengen. De praktijk zal uitkomst moeten brengen.

Tot slot zal, wat betreft de laterale besturing, nu worden nagegaan of de auto vanuit iedere positie y naar de ideale as wordt teruggestuurd. Bekijk daartoe de figuren 8a en 8b. Figuur 8a geeft schematisch aan waar het voertuig zich in het ideale geval bevindt (zie ook figuur 5). y_1 en y_2 geven de plaatsen aan waar de antennes die het veld H_y meten zich bevinden. Figuur 8b toont de positie

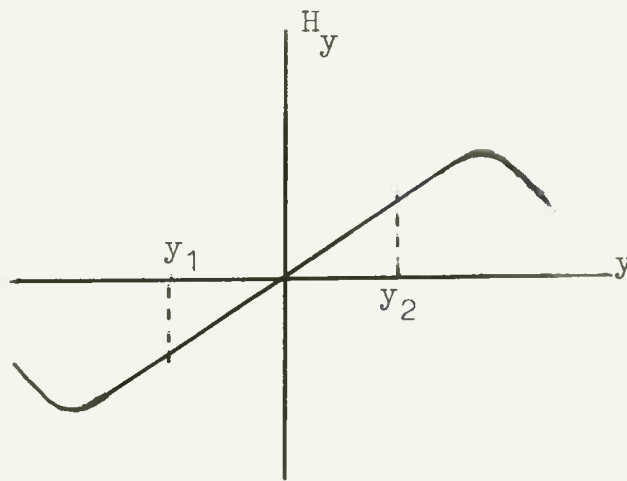


fig. 8a

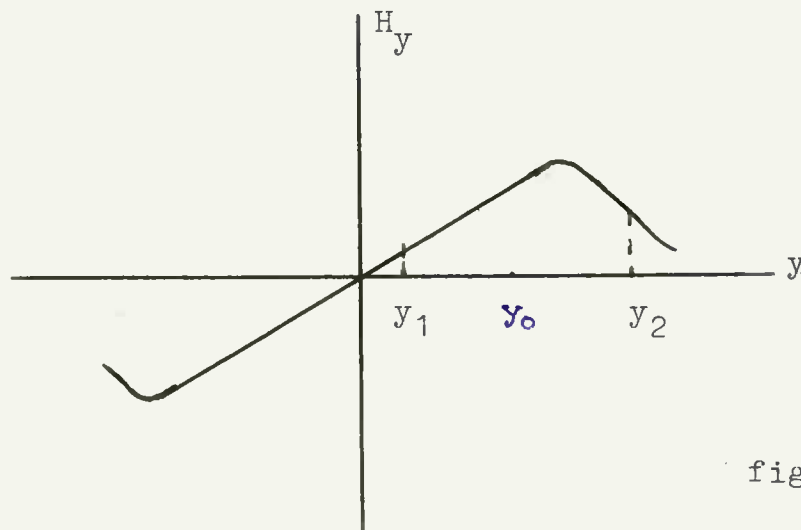


fig. 8b

van het vehikel dat nu een uitwijking y_0 ten opzichte van de ideale as heeft. Het regelmechanisme in de auto probeert nu de som van de signalen die door de antennes worden afgegeven nul te maken. Dit wordt bereikt door de voorwielen van de auto te verdraaien, waardoor de ideale as wordt bereikt en de som van de antennesignalen ten slotte nul wordt. Stel nu dat het signaal dat de antenne ter plaatse y_1 afgeeft wordt voorgesteld door $H(y_1)$, evenzo wordt $H(y_2)$ gedefinieerd. Het laterale regelmechanisme in de tracht nu $H(y_1)+H(y_2)$ nul te maken. Neem aan dat deze som K bedraagt. Een vergroting van de uitwijking y

tot $y+\Delta y$ moet aanleiding geven tot een vergroting van de kracht die de auto naar de ideale as terugdrijft, mits Δy groter dan nul is.

Dan volgt:

$$\frac{H(y_1+\Delta y)-H(y_1)+H(y_2+\Delta y)-H(y_2)}{\Delta y} > \frac{K(y_0+\Delta y)-K(y_0)}{\Delta y}$$

voor $y \rightarrow 0$ wordt gevonden:

$$\frac{dH(y_1)}{dy} + \frac{dH(y_2)}{dy} > 0 \text{ ofwel } \frac{dH(y_1)}{dy} > -\frac{dH(y_2)}{dy}$$

Wanneer aan bovenstaande eis niet meer is voldaan, dan wordt het voertuig niet meer naar de as teruggevoerd. Zodra een van de antennes het punt $-b$ of b heeft gepasseerd, wordt de afgeleide van het veld dat de betreffende antenne opvangt kleiner dan nul. Hier is dus kans op instabiel worden van het systeem. Van deze instabiliteit kan met voordeel gebruik worden gemaakt bij het verwisselen van rijstrook resp. in- en uitvoegen.

Tevens geeft deze stabiliteitseis aan waar de antennes ongeveer moeten komen. Hoe verder de antennes zich van de as bevinden, hoe groter de kans op instabiliteit wordt. Dicht bij de as geplaatste antennes hebben het nadeel van een klein af te geven signaal.

In de voorgaande paragraaf is berekend voor welke waarde van z het veld redelijk lineair is tussen twee bepaalde waarden. De waarde van z ligt in de orde van 40 tot 60 cm, hiermee ligt de waarde van b vast; b ligt dan in

tussen 50 en 80 cm. Uit Amerikaanse literatuur blijkt uit proeven die zijn genomen, dat de maximale uitwijking y de waarde van + en - 15 cm ten opzichte van de ideale as niet overschrijdt. (lit. 19) Ook bij de maximale uitwijking mag de waarde van 0,8b niet worden overschreden. Antennes moeten dus op een afstand van de as worden geplaatst die kleiner dan 25 tot 35 cm is. Verder kan worden vastgesteld welke de optimale afstand is langs experimentele weg.

4.2.3 Longitudinale besturing.

Bij de longitudinale besturing moet de auto kunnen beschikken over informatie, gemeten in x-richting, betreffende de plaats van het voertuig.

Bij systemen met relatieve plaatsbepaling blijkt uit de literatuur (lit. 5) dat voor dit probleem nog geen goede oplossing is gevonden, zoals men toegeeft voldoet voertuig-voertuig communicatie niet (radar, laser enz). Een mogelijke oplossing zou de volgende kunnen zijn: Langs de kabel die reeds gebruikt wordt voor de laterale besturing, wordt een elektrische puls gezonden (zie figuur 9). Beschrijf nu de parameters van de kabel met R, L, G en C . (R is de weerstand van de kabel, L is de zelfinductie, G de konduktantie en C de capaciteit. Alle waarden uitgedrukt per meter lengte.) Wanneer de kabel met de karakteristieke impedantie $Z_1 = Z_k$ is afgesloten, ($Z_k = (R + j\omega L)^{\frac{1}{2}} / (G + j\omega C)^{\frac{1}{2}}$, ω is de radiaal-frekwentie van het signaal en $j = \sqrt{-1}$) wordt geen energie aan het eind van de kabel gereflekteerd. Er ontstaat een lopende puls met loopsnelheid v . Bevindt een auto zich boven de kabel, dan

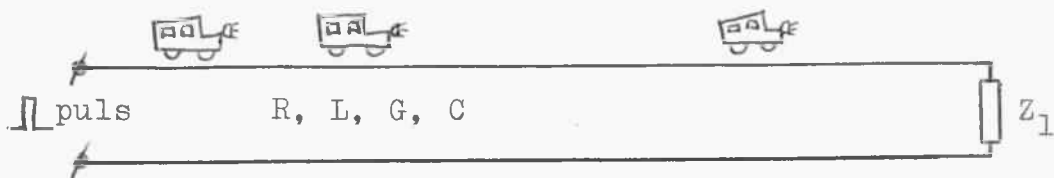


fig. 9

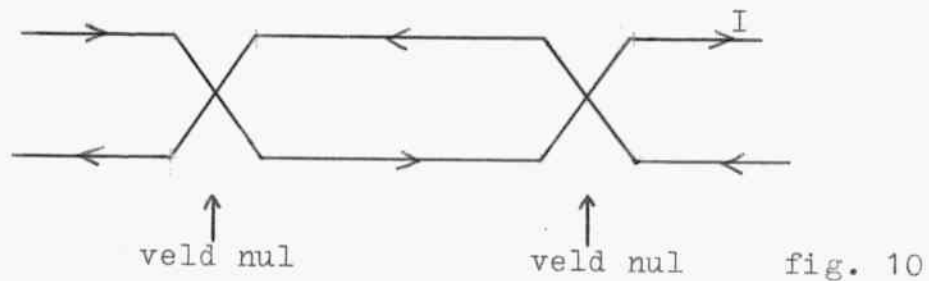
zullen door de massa van de auto (ijzer) de parameters R, L, G en C een verandering ondergaan. Met andere woorden: ter plaatse van de auto is de kabel niet meer karakteristiek afgesloten. De aanwezigheid van de auto veroorzaakt dus een energiereflectie. De opvolgende auto kan zodoende de afstand en de snelheid van het voorgaande voertuig bepalen door de tijd te meten tussen de heengaande en de gereflekteerde puls. Hoewel deze manier van afstand bepalen niet geschikt is voor het in dit verslag gepropageerde systeem, - waar immers geen voertuig-voertuig communicatie vereist is - zou het eventueel als veiligheidsvoorziening dienst kunnen doen.

Bij de systemen met absolute plaatsbepaling moet de auto informatie worden verstrekt over de plaats gemeten in x-richting van de rabbit en het voertuig.

Dit is op verschillende manieren mogelijk.

- a. Kontinu. Aan iedere plaats in de weg is een voor die plaats kenmerkend signaal toegevoegd. Bijvoorbeeld signaal $S(x) = k \cdot x$, waarin k een konstante voorstelt. Zo'n signaal is in het algemeen voor $x \rightarrow \infty$ niet realiseerbaar.
- b. Digitaal. De weg wordt verdeeld in sectoren van gelijke lengte. Telkens wanneer het voertuig een sektorlengte heeft

afgelegd ontvangt het een (zelfde) signaal. Dit systeem zal verder worden aangeduid in dit verslag als het knopenstelsel. Het signaal is hier de veldverandering in H_y en H_z die optreedt. Dit systeem heeft als nadeel, dat ter plaatse van de knoop het veld nul wordt. (zie figuur 10)



Hierdoor gaat, indien geen maatregelen daartegen worden genomen, informatie verloren. Tevens is op de knoop de auto in principe onbestuurbaar. Tussen de knopen in wordt aan de auto geen informatie verschaft over de afgelegde weg. Wanneer de afstand tussen de knopen groot wordt, is een - wellicht onnauwkeurige - schatting van de afstand die is afgelegd noodzakelijk. De nauwkeurigheid van die schatting kan de capaciteit van de weg beïnvloeden. Is de apparatuur namelijk niet in staat om de afstand voldoende nauwkeurig te schatten, dan moet tussen de voertuigen, uit veiligheidsoverwegingen, een extra grote afstand worden gehandhaafd.

c. Een combinatie van a en b. De weg wordt in sectoren verdeeld. Tussen begin en eind van iedere sektor wordt continue informatie verstrekt over de afgelegde weg.

Zo mogelijk moet men van de reeds aanwezige faciliteiten voor laterale sturing gebruik maken bij de oplossing van dit probleem.

Een eerste mogelijke oplossing is die met behulp van een staande golf (zie figuur 11).

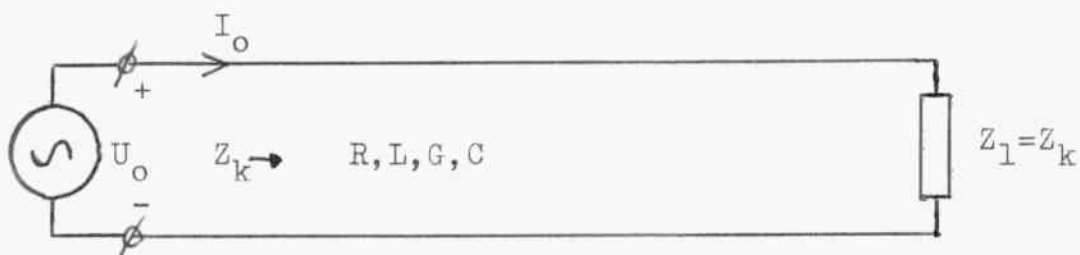


fig. 11

Wanneer men deze tweedraadskabel, met dezelfde parameters als reeds eerder in deze paragraaf is aangegeven, met een sinusvormig signaal bekrachtigt, ontstaat een lopende golf indien de afsluitweerstand Z_1 gelijk is aan de karakteristieke impedantie Z_k .

Deze golf kan beschreven worden door:

$$U(x) = U(0)\exp(-\gamma x), \quad \gamma = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}$$

$$I(x) = U(0)/Z_k \exp(-\gamma x), \quad Z_k = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$$

$U(0)$ is hier de spanning die aan het begin van de kabel wordt aangesloten, $U(x)$ is de spanning ter plaatse x , $I(x)$

de stroom door de kabels ter plaatse x en γ de voortplantingskoëfficiënt.

Sluit men nu het einde van de kabel kort, dan wordt de energie van de lopende golf gereflekteerd. Het signaal op de lijn kan dan als volgt worden beschreven:

$$U(x) = U(0) [1 + \Gamma(1) \exp(-2\gamma l(1-z))]$$

$$\Gamma(1) = \frac{Z(1) - Z_k}{Z(1) + Z_k}$$

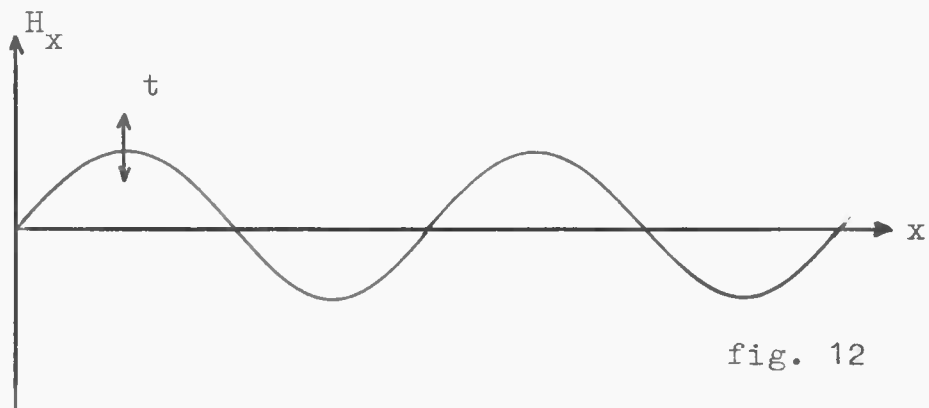
$$U(x, t) = 2\hat{u} \sin\beta(x-l) \sin(\omega t - \beta l)$$

$$U = \hat{u} \exp j\omega t$$

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

$\Gamma(1)$ wordt de reflektiecoëfficiënt genoemd, β de fase-draaiingscoëfficiënt. ϵ_0 en μ_0 zijn resp. de diëlektrische konstante van vacuüm en de magnetische permeabiliteit van vacuüm.

Uit deze formules blijkt dat nu een staande golf het signaal op de kabel is. (zie figuur 12)



Deze staande golf kan uitstekend dienst doen als informatiebron voor de afgelegde weg. De nuldoorgangen kunnen als knopen worden gedacht. Daartussen is informatie beschikbaar waarvan grootte en verandering per tijdseenheid in de x-richting een indicatie zijn voor plaats en snelheid van de auto.

Voordeel van dit systeem is, dat de knoopafstand kan worden veranderd door wijziging van de frekwentie van de signaalbron. Hier is dus een mogelijkheid om de afstand van de voertuigen centraal te regelen, bijvoorbeeld afhankelijk van de weersgesteldheid. Kleine knoopafstanden vereisen hoge frekwenties. Nagegaan zal moeten worden wat de invloed van de massa van het voertuig op de staande golf is.

Een tweede manier om informatie over de plaats op de weg te verschaffen lijkt veel op het knopensysteem. Evenals bij de laterale besturing een tamelijk lineair veld in de y-richting is verkregen, zo kan ook in de x-richting zo'n veld worden geschapen. Een ideaal veld zou er als volgt uitzien, zie figuur 13, getrokken lijn.

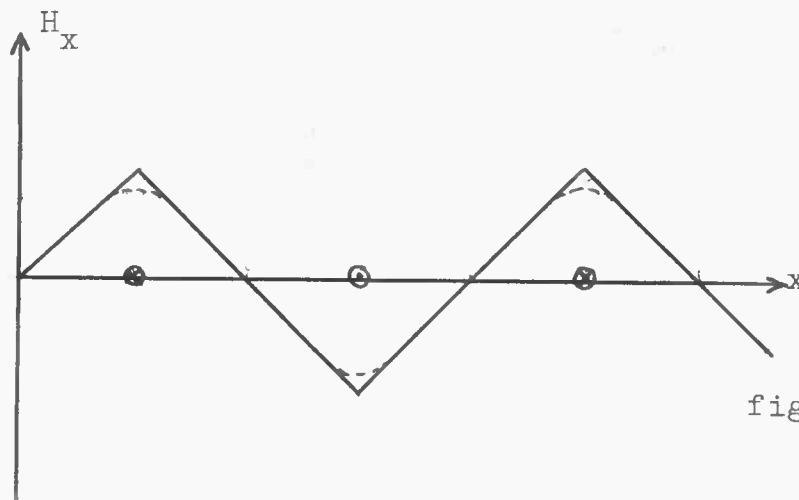
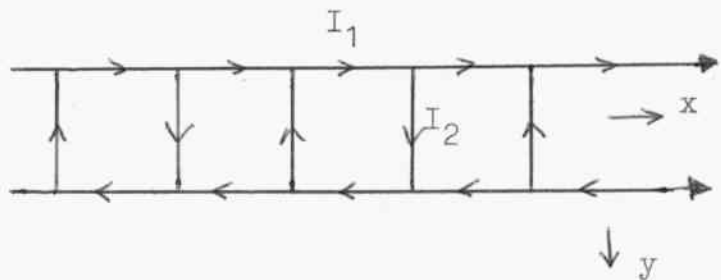
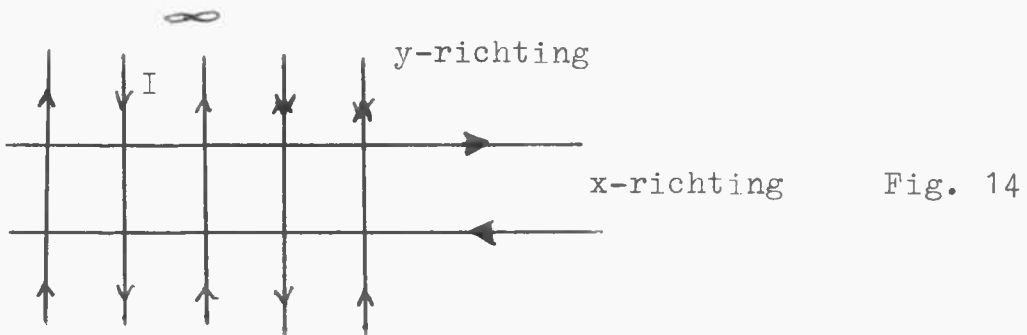


fig. 13

De draden in de weg, aangegeven door \odot en \otimes , lopen hier in y-richting. De ideale configuratie is niet haalbaar, ter hoogte van de geleiders zal het veld verlopen volgens de stippellijn uit figuur 13.

Figuur 14 toont een bovenaanzicht van een - onpraktische - opstelling. In figuur 15 is een "praktischer" opstelling getekend, die echter niet te realiseren is.



Wel mogelijk zijn de configuraties volgens de figuren 16a en 16b.

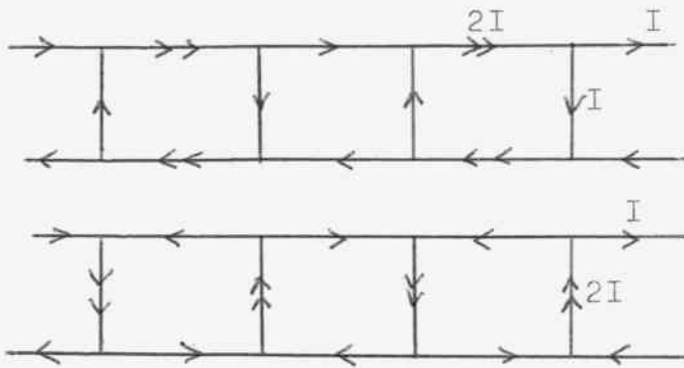


fig. 16a

fig. 16b

De konstruktie van figuur 16a heeft het nadeel dat voor de laterale sturing het veld H_y niet op iedere doorsnede met konstante x even groot is. Voordeel is, dat het veld in y -richting nergens ter plaatse $y \neq 0$ nul wordt.

De opstelling volgens figuur 16b heeft het nadeel dat op de knopen (daar waar de draden in y -richting lopen) het veld H_y nul wordt. Voordeel is, dat hier de velden halverwege de knopen, absoluut genomen, even groot zijn. Voor het geval beschreven in figuur 16a zal nu worden berekend hoe de verhoudingen van lengte, breedte enz. moeten zijn om een optimaal veld te verkrijgen.

Opmerking: In tegenstelling tot het oorspronkelijke knopensysteem, genoemd onder b, wordt hier geen gebruik gemaakt van het veld H_y , maar van een verandering in veld H_x . De velden H_x en H_y zijn onafhankelijk. Ook hier is het voordelig om H_x/H_z te meten om allerlei ongewenste invloeden uit te schakelen.

In figuur 17 is de praktische konstruktie van een deel van de geleiders getekend. Hiervoor wordt nu, alweer met behulp van de formule Biot-Savart het magnetische veld berekend.

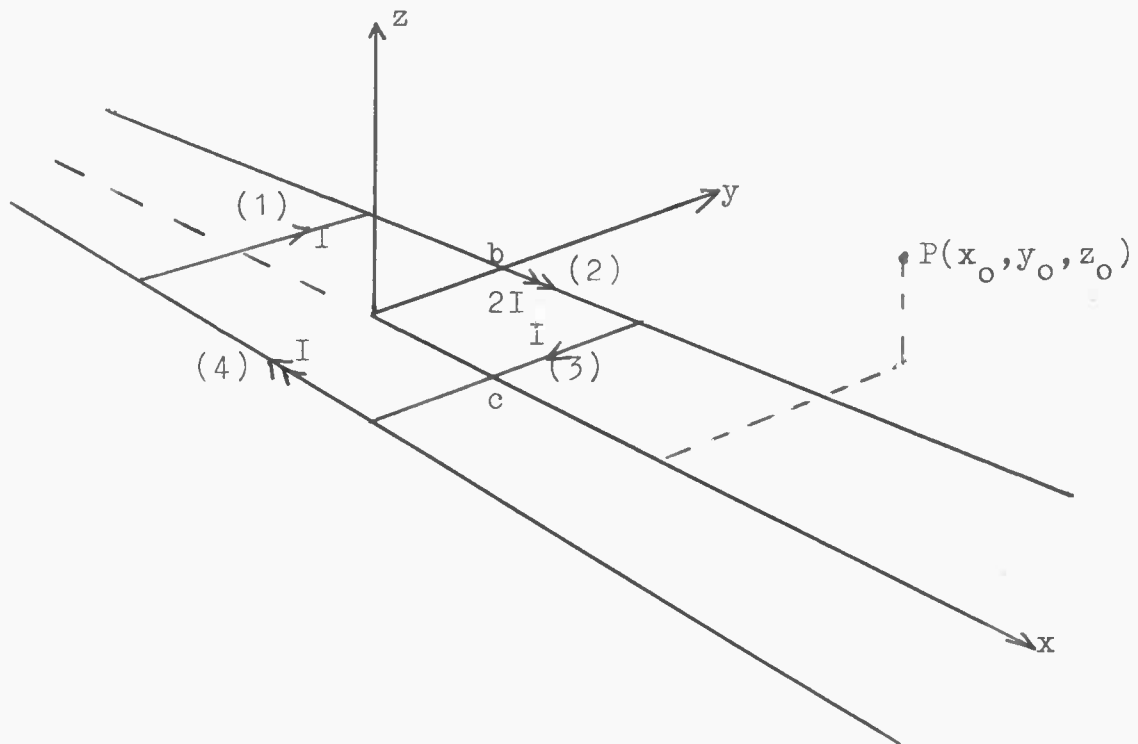


fig. 17

De vergelijkingen zijn:

$\underline{I}(1) = \underline{j}I$	$\underline{r}_1 = \underline{i}(x_0 + c) + \underline{j}(y_0 - y) + \underline{k}z_0$	$y=1 \quad -b \leq l \leq b$
$\underline{I}(2) = 2\underline{i}I$	$\underline{r}_2 = \underline{i}(x_0 - x) + \underline{j}(y_0 - b) + \underline{k}z_0$	$x=1 \quad -c \leq l \leq c$
$\underline{I}(3) = -\underline{j}I$	$\underline{r}_3 = \underline{i}(x_0 - c) + \underline{j}(y_0 - y) + \underline{k}z_0$	$y=1 \quad -b \leq l \leq b$
$\underline{I}(4) = -2\underline{i}I$	$\underline{r}_4 = \underline{i}(x_0 - x) + \underline{j}(y_0 + b) + \underline{k}z_0$	$x=1 \quad -c \leq l \leq c$

$\underline{I}(1)$ stelt hierin de stroom door geleider 1 voor enz., \underline{r}_1 is de afstand van het beschouwde deel van geleider 1 tot aan het meetpunt enz.

Het veld H_x in x-richting is alleen afhankelijk van de stromen $I(1)$ en $I(3)$. Slechts voor deze draden behoeft het veld te worden uitgerekend. Noem $H_x(1)$ het veld dat veroorzaakt wordt door geleider 1, $H_x(3)$ het veld dat door draad 3 wordt gevormd, dan geldt: $H_x = H_x(1) + H_x(3)$

Na integratie volgt voor $H_x(1)$ en $H_x(3)$:

$$H_x(1) = \frac{-Iz_0}{4\pi} \frac{1}{[(x_0+c)^2+z_0^2]} \left[\frac{y_0-b}{[(x_0+c)^2+(y_0-b)^2+z_0^2]^{\frac{1}{2}}} + \right. \\ \left. - \frac{y_0+b}{[(x_0+c)^2+(y_0+b)^2+z_0^2]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (8)$$

$$H_x(3) = \frac{Iz_0}{4\pi} \frac{1}{[(x_0-c)^2+z_0^2]} \left[\frac{y_0-b}{[(x_0-c)^2+(y_0-b)^2+z_0^2]^{\frac{1}{2}}} + \right. \\ \left. - \frac{y_0+b}{[(x_0-c)^2+(y_0+b)^2+z_0^2]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (9)$$

Ter plaatse van de x-as ($y=0$), is nu het volgende veldverloop gewenst, zie figuur 18

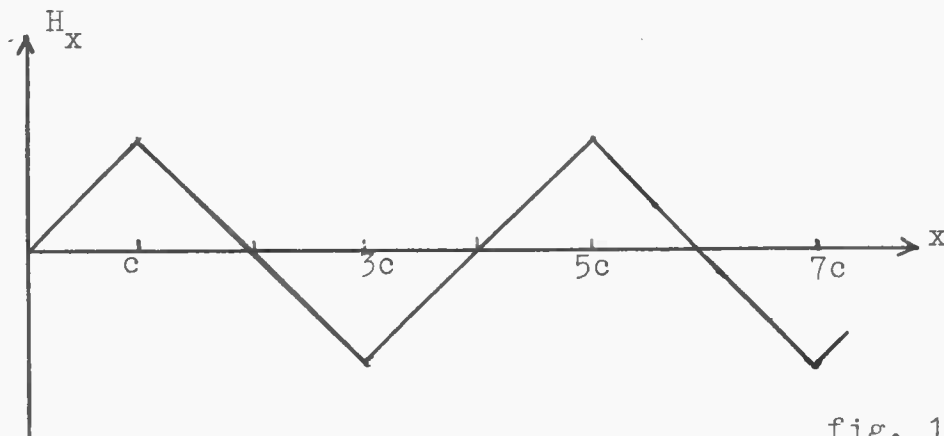


fig. 18

Tussen twee knopen moet het veld dus lineair toe- of afnemen. In de bovenstaande formules voor $H_x(1)$ en $H_x(3)$ is slechts een blok in aanmerking genomen. Bepaal nu eerst wat de invloed is van de andere niet beschouwde blokken. Ter plaatse $x=2kc$ $k=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ is het werkelijke veld gelijk aan het onder (8) en (9) berekende veld.

Dit is onmiddellijk duidelijk als wordt bedacht, dat de invloeden van de twee naastliggende geleiders elkaar wat betreft H_x opheffen. Hetzelfde geldt voor de daarnaast liggende draden enz. Ter plaatse $x=(2k+1)c$ $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ zal de fout in het onder (8) en (9) berekende veld maximaal zijn. Ter plaatse $x=c$ is het berekende veld ten gevolge van de draden op c en $-c$ bekend. Deze invloed kan rechtstreeks uit de formules (8) en (9) worden bepaald. Het effect van de geleider op $3c$ op een meetpunt ter hoogte c , is even groot als de invloed van de geleider ter plekke $-c$, ook deze is dus te berekenen. Dit effect blijkt in de orde van 5 tot 10 % te liggen, afhankelijk van de waarde van z en c die wordt ingevuld (b is weer als eenheid genomen, z en c liggen dan in de orde van $0,9 \dots 0,7$). Het berekende veld in c is dus 5 tot 10 % te groot ten gevolge van de verwaarlozing van de geleider op $3c$. Ten gevolge van de verder weg liggende draden moet het veld nog met 2 tot 3 % verhoogd worden, zodat de totale fout 3 tot 7 % is. Dat wil dus zeggen, dat het veld dat met de formules (8) en (9) berekend kan worden 3 tot 7 % te hoog is, afhankelijk van de ingevulde waarden voor z en c .

In principe is op dezelfde manier als bij ∞ -lange geleiders een waarde voor c/b en z/b te berekenen die aanleiding geeft tot een optimaal veldverloop. De waarde van c/b wordt ongeveer gelijk aan 1, terwijl de waarde van z/b iets groter uitvalt dan in het geval van de ∞ -lange geleiders.

4.2.4 Enkele opmerkingen.

In de voorgaande paragraaf is een principiële methode gegeven om informatie aan de auto over te dragen. Praktisch kan bijvoorbeeld voor de laterale besturing een draaggolf gebruikt worden met een frekwentie van 50 tot 100 kHz. Op deze draaggolf zou dan weer de informatie voor de longitudinale besturing van de auto gemoduleerd kunnen worden. Men denke aan een pulsreeks. Uitgebreider informatie wordt in de volgende paragraaf verstrekt.

Een opmerking over de gebruikte dradenkonstruktie:

Vanuit het oogpunt van millieuhygiëne, met name de ethervervuiling, is de dradenkonfiguratie volgens figuur 16b beter dan die volgens figuur 16a. Ter verklaring moge het volgende dienen. Het zal de lezer bekend zijn dat het magnetische veld van een oneindig lange rechte geleider omgekeerd evenredig afneemt met de afstand r tot de geleider. In formule vorm:

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

Het totale veld van twee evenwijdige oneindig lange rechte geleiders, die tegengestelde stromen voeren, neemt af met $1/r^3$. Figuur 16a toont in principe deze configuratie. De konstruktie volgens figuur 16b doet het veld met $1/r^5$ afnemen. Hier is namelijk sprake van blokken, die telkens tegengestelde velden opwekken. Wanneer nu een heel wegennet met automatische verkeersgeleiding wordt aangelegd, kan het van belang zijn dat de velden zo snel mogelijk met de afstand afnemen. De opzet van figuur 16b heeft dan natuurlijk de voorkeur.

4.3 Beschouwing over de informatie welke nodig is voor het absolute plaatsbepalingsysteem (longitudinaal).

4.3.1 Inleiding.

Bij de bestudering van de benodigde informatie voor de longitudinale besturing van de auto, is ervan uitgegaan dat de overdrachtsfunctie van hetingangssignaal van het regelsysteem in de auto naar de snelheid van de auto ongeveer de volgende vorm heeft:

$$v_a = \frac{K_d \cdot U_i}{p} \quad \text{ofwel} \quad a_a = K_d \cdot U_i$$

waarin K_d = versterkingsfaktor,

U_i = ingangssignaal,

$p = d/dt$, dus $p \cdot v_a = a_a$

Voor een voorbeeld van een regelsysteem dat deze overdracht kan verwezenlijken, wordt verwezen naar de appendix "Simulatie van een regelsysteem in de auto". (Appendix A).

Er zal getracht moeten worden zoveel informatie aan het regelsysteem in de auto door te geven, dat deze met zo groot mogelijke nauwkeurigheid het imaginaire punt ofwel de zogenaamde rabbit volgt. Hiervoor is het minstens nodig dat het regelsysteem de plaats van de rabbit en die van de auto weet, óf de plaats van de rabbit ten opzichte van de plaats van de auto. Bovendien zou het mogelijk kunnen zijn dat ook over de afgeleide van deze grootheden beschikt moet worden. Met behulp van een lineaire of niet lineaire combinatie van bovengenoemde informaties kan een

korrektieversnelling voor de auto worden bepaald. Een algemeen regeltechnische aanpak van deze materie kan gebeuren door gebruik te maken van de zogenaamde faseruimtemethode.

Van de vele methoden die beschikbaar zullen zijn om informatie te verkrijgen, zijn enkele nader bekeken. De theoretisch meest optimale manier is vervolgens gesimuleerd op een analoge computer om de juistheid van deze methode te testen en om een voorbeeld te geven van een mogelijke realisatie.

4.3.2 De fasevlakmethode.

Een systeem kan in het algemeen beschreven worden met behulp van een n^e orde differentiaalvergelijking

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = 0.$$

Heeft men te maken met een niet lineair systeem dan zijn de koëfficiënten functies van x en haar afgeleiden. Bij een gegeven begintoestand (deze wordt voorgesteld door de waarde van x en haar afgeleiden op het tijdstip $t=0$) kan de oplossing van de differentiaalvergelijking weergegeven worden in de n -dimensionale ruimte, waarbij langs de assen van deze ruimte x en haar afgeleiden zijn geplaatst (op de n^e afgeleide na). De coördinaten van een punt in deze n -dimensionale ruimte worden gevormd door de toestandsvariabelen, dit zijn x en haar afgeleiden op een zeker tijdstip. De kromme die in de ruimte met de tijd ontstaat bij een gegeven begintoestand noemt men trajek-

torie.

Daar het regelsysteem in de auto geregeld wordt met een acceleratie a welke bepaald zal kunnen worden uit de plaats en/of de snelheid ten opzichte van die van de rabbit, hebben we hier te maken met een tweede orde systeem. Bij tweede orde systemen gaat de faseruimte over in een fasevlak. Uit het verloop van de trajektoriën in dit vlak is dan direkt een inzicht te verkrijgen in het gedrag van het systeem.

Een tweede orde systeem kan in het algemeen worden beschreven door een tweede orde differentiaalvergelijking van de vorm

$$a \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = 0$$

In het fasevlak wordt dx/dt als functie van x afgebeeld. De trajektoriën die het verloop van x en dx/dt met de tijd aangeven, zijn afhankelijk van de begintoestand $(x(0), dx(0)/dt)$ van het systeem. Dus in het fasevlak kan men waarnemen hoe de toestand van het systeem met de tijd verandert. De tweede orde differentiaalvergelijking gaat door substitutie van $dx/dt=y$ over in een stelsel van twee eerste orde differentiaalvergelijkingen.

$$dx/dt = y$$

$$dy/dt = -by/a - cx/a$$

Dit stelsel kan als bijzonder geval beschouwd worden van:

$$dx/dt = P(x,y)$$

$$dy/dt = Q(x,y)$$

De richting van de trajectorie in een bepaald punt (x_1, y_1) volgt uit de verhouding:

$$\left[\frac{dy}{dx} \right] (x_1, y_1) = \left[\frac{dy/dt}{dx/dt} \right] (x_1, y_1) = \frac{Q(x_1, y_1)}{P(x_1, y_1)}$$

Wanneer een trajectorie eindigt in een gesloten kromme, betekent dit dat het systeem zal gaan oscilleren. Zo'n gesloten baan wordt limitcycle genoemd.

Om het konstrueren van een trajectorie te vergemakkelijken, wordt gebruik gemaakt van een stelsel isoclinen. Isoclinen zijn lijnen waarop de trajectoriën een gelijke helling bezitten.

4.3.3 Toepassingen van de fasevlakmethode op het systeem met absolute plaatsbepaling. (dit is het rabbit-volgsysteem).

Voor de algemene beschrijving van dit systeem wordt verwezen naar hoofdstuk 3.

De snelheden en de plaatsen van de rabbit, worden door het systeem bepaald. Bij snelheidsveranderingen worden alle rabbits tegelijk versneld met behoud van hun onderlinge afstand. Het regelsysteem van de auto zal moeten trachten de auto en de daarbij behorende rabbit zo dicht

mogelijk bij elkaar te brengen. De notatie van de verschillende grootheden is:

a_s = versnelling van de rabbit

a_a = versnelling van de auto

v_s = systeemsnelheid = snelheid van de rabbit

v_a = snelheid van de auto

$v_s - v_a = v$ = relatieve snelheid

$dv/dt = a$

$\int_0^t v dt = h(t)$ = relatieve plaats van de auto.

Bij de beschouwing van het rabbit volgsysteem (dat kan worden beschreven met een tweede orde differentiaalvergelijking) in het fasevlak zal de snelheid v langs de verticale as en de relatieve plaats h langs de horizontale as worden uitgezet.

In de literatuur (lit. 3;4;6) zijn systemen beschreven met relatieve plaatsbepaling (zie hoofdstuk 3), waarbij men ook is uitgegaan van een fasevlak. Het imaginaire punt van een auto bevindt zich in deze systemen op een bepaalde afstand achter de voorgaande auto of anders gezegd: een geautomatiseerde auto zal trachten zijn voorganger zo goed mogelijk te volgen.

Het hier gebruikte fasevlak is verdeeld in een aantal gebieden. In ieder gebied wordt de auto een bepaalde, bij dat gebied behorende, versnelling opgedrukt, zodanig dat de auto altijd in een gebied van het fasevlak terecht komt waar lineair geregeld wordt. Dit is gedaan om limit-cycles te vermijden.

Het is nu van belang om na te gaan of deze lineaire regeling misschien geschikt is om te worden gebruikt bij het

rabbit-volgsysteem. Bij deze lineaire regeling is men uitgegaan van de volgende differentiaalvergelijking:

$$-d^2x/dt^2 = K(dx/dt)$$

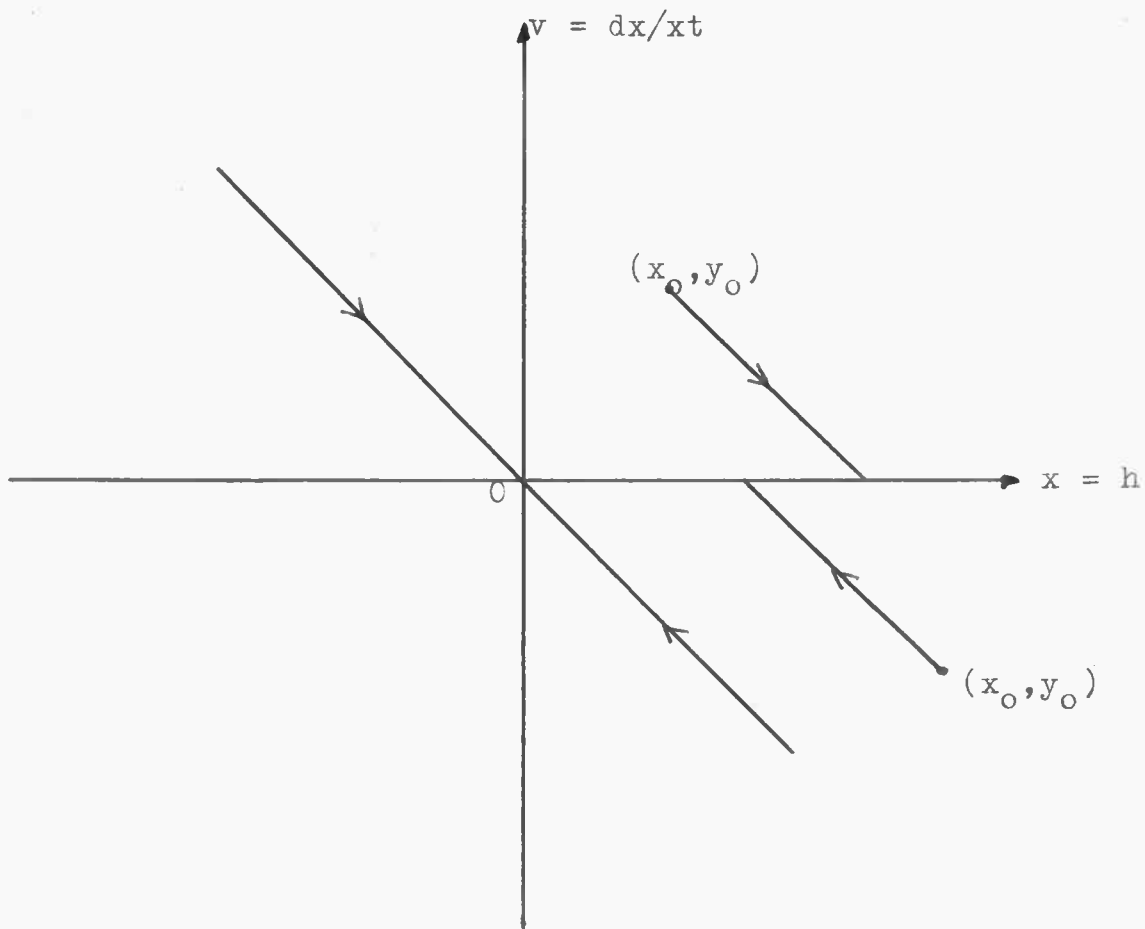
waarbij x = relatieve afstand h ,
dus geldt dat $dx/dt = v$ en $d^2x/dt^2 = a$.

Stel $K = 1$ en $dx/dt = y$, dan is $dy/dt = -y$.

Hieruit volgt dat:

$$dy/dx = \frac{dy/dt}{dx/dt} = -1$$

Dus is in ieder punt van het fasevlak de helling van de raaklijn aan een trajectorie bepaald door $dy/dx = -1$.



Wanneer de begintoestand gelijk is aan (x_0, y_0) , dan is de vergelijking van de trajektorie gelijk aan:

$$y - y_0 = -1(x - x_0)$$

Dus voor $y = 0$ geldt $x = y_0 + x_0$.

Dit is dan tevens het eindpunt van de trajektorie omdat hier $d^2x/dt^2 = 0$ is.

Bij het rabbit-volgsysteem zal de begintoestand altijd de oorsprong van het fasevlak zijn (daar bij de start de auto en de rabbit zich op één en dezelfde plaats zullen bevinden), zodat deze regeling de auto de rabbit in principe kontinu doet volgen.

Er wordt echter van uit gegaan dat de relatieve snelheid exakt bekend is, hetgeen in de praktijk onmogelijk is. Vandaar dat zal moeten worden bekeken hoe deze regeling reageert op een fout, veroorzaakt door de relatieve snelheidsmeting. Stel dat deze fout een bepaalde waarde r heeft. De differentiaalvergelijking (1) gaat nu over in:

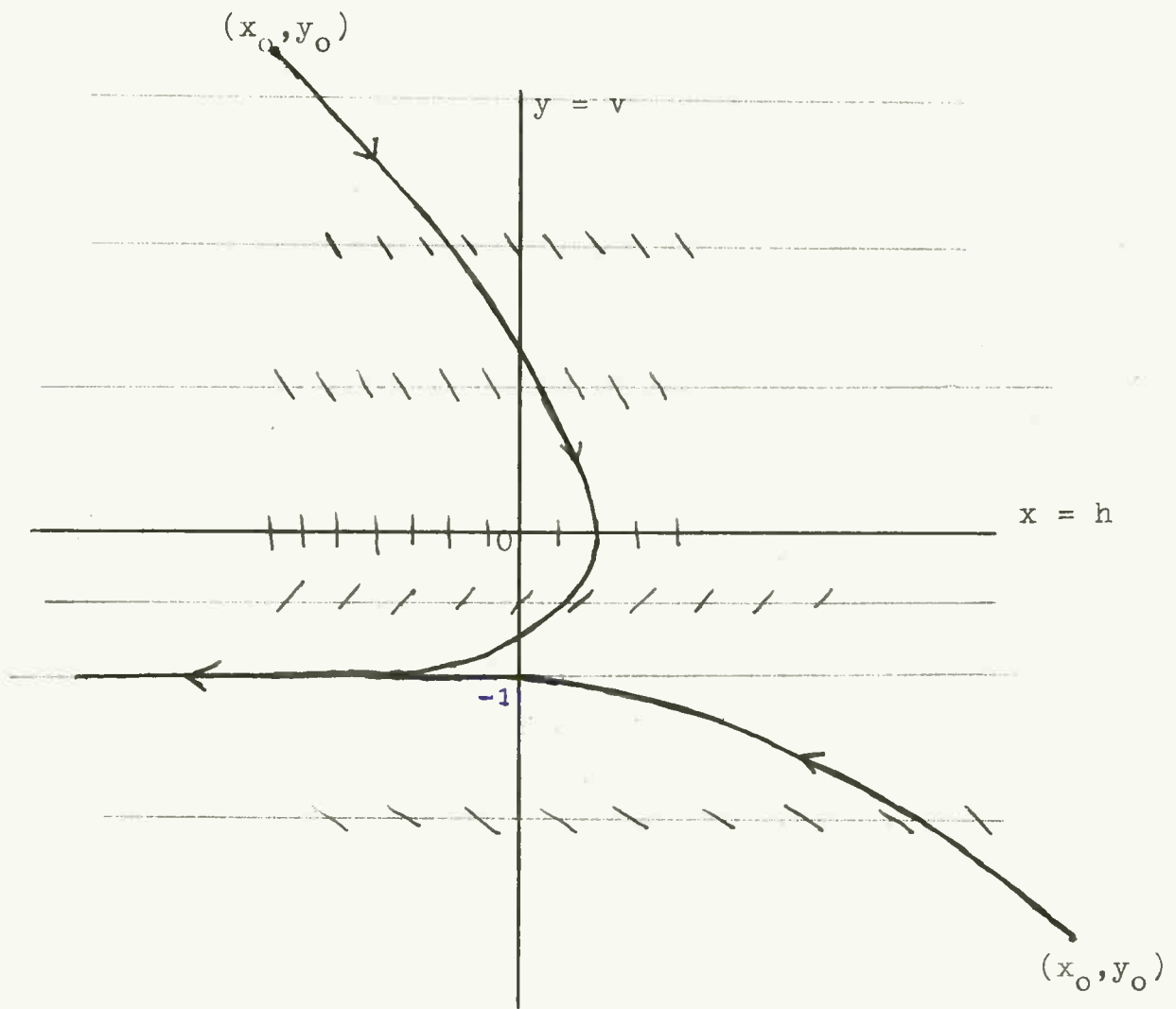
$$-d^2x/dt^2 = K(dx/dt + r)$$

Stel nu weer dat $K = 1$ en $r = 1$ m/sek. en $dx/dt = y$, dan is $dy/dt = -(y + 1)$ en $dy/dx = -(1 + 1/y)$.

Een stelsel isoclinen kan nu worden bepaald op de volgende wijze: $dy/dx = k \rightarrow y(1 + k) = -1$

$$\begin{array}{l} \underline{k} \quad \underline{y = -1/(1 + k)} \\ 0 \quad y = -1 \end{array}$$

- 1 $y = -\frac{1}{2}$
- 2 $y = -1/3$
- $-\frac{1}{2}$ $y = -2$
- $-3/4$ $y = -4$
- 1 $y = \infty$
- $-1\frac{1}{2}$ $y = 2$
- 2 $y = 1$
- 3 $y = \frac{1}{2}$



Uit het fasevlak is nu direkt te zien dat de rabbit steeds verder zal achter blijven bij de auto onafhankelijk van de begintoestand. De relatieve snelheid wordt gelijk aan $-r$ zodat een dergelijke regeling volkomen onbruikbaar is voor het rabbit volgsysteem.

Over het systeem met relatieve plaatsbepaling kan nu gezegd worden, dat wanneer de auto zich in het lineaire gebied bevindt, deze dit gebied op den duur weer zal verlaten ten gevolge van een onvermijdelijke fout in de relatieve snelheidsmeting. Heeft de auto dit gebied verlaten dan zal hij terecht komen in een gebied waar de auto een bepaalde relatieve versnelling zal worden opgedrongen. Via een aantal andere gebieden zal de auto tenslotte weer worden teruggebracht naar het lineaire gebied. Dit betekent dat het lineaire gebied niet in staat is om de limitcycles volledig te onderdrukken, hoewel de frequentie van de limitcycle aanzienlijk is teruggebracht. Het ligt nu voor de hand om ook de volgende differentiaalvergelijking te bekijken:

$$-d^2x/dt^2 = K(x + r)$$

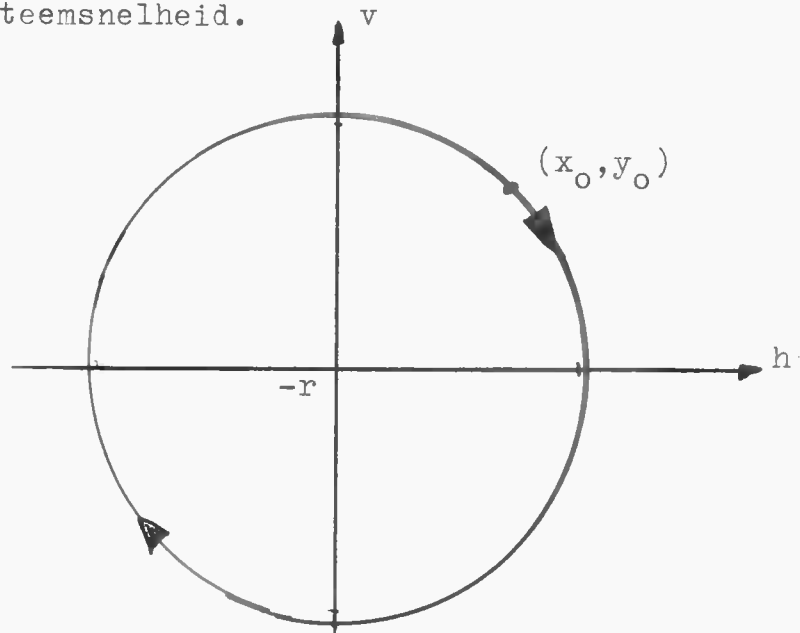
Stel $dx/dt = y$, dan is $dy/dt = -K(x+r)$ en $dy/dx = -K(x+r)/y$. Ook geldt nu dat $ydy = -K(x+r)dx$, ofwel $\frac{1}{2}y^2 = -K(\frac{1}{2}x^2 + rx) + C_0$ waarin C_0 de integratiekonstante voorstelt.

$$\underline{y^2/K + (x + r)^2 = C_1}$$

Hier hebben we dus te maken met een limitcycle in de vorm

van een ellips, waarvan de grootte afhankelijk is van de begintoestand.

Gekonkludeerd kan worden dat een dergelijke regeling onaangename schommelingen zal vertonen ten opzichte van de systeemsnelheid.



Een regeling die wel tot een redelijk resultaat zal leiden, wordt beschreven in de differentiaalvergelijking

$$-d^2x/dt^2 = K(dx/dt + x) \quad (3)$$

Er zal ook nu weer rekening moeten worden gehouden met het feit dat dx/dt en x (v en h) niet exakt te meten zijn, zodat het verstandig is ook hier weer uit te gaan van een fout r . Deze fout kan opgevat worden als een fout in de meting van dx/dt en/of van x . Echter wanneer de relatieve afstand h bepaald wordt door de relatieve snelheid v , dan zal de absolute waarde van de fout r met de tijd aangroeien ten gevolge van de integratie van de fout in

de relatieve snelheid. De differentiaalvergelijking (3) gaat nu over in:

$$-d^2x/dt^2 = K(dx/dt + x + r) \quad (4)$$

Stel dat $K=1$ en $dx/dt=y$, dan is $dy/dt = -(x+y+r)$ en $dy/dx = (dy/dt)/(dx/dt) = -(1+(x+r)/y)$.

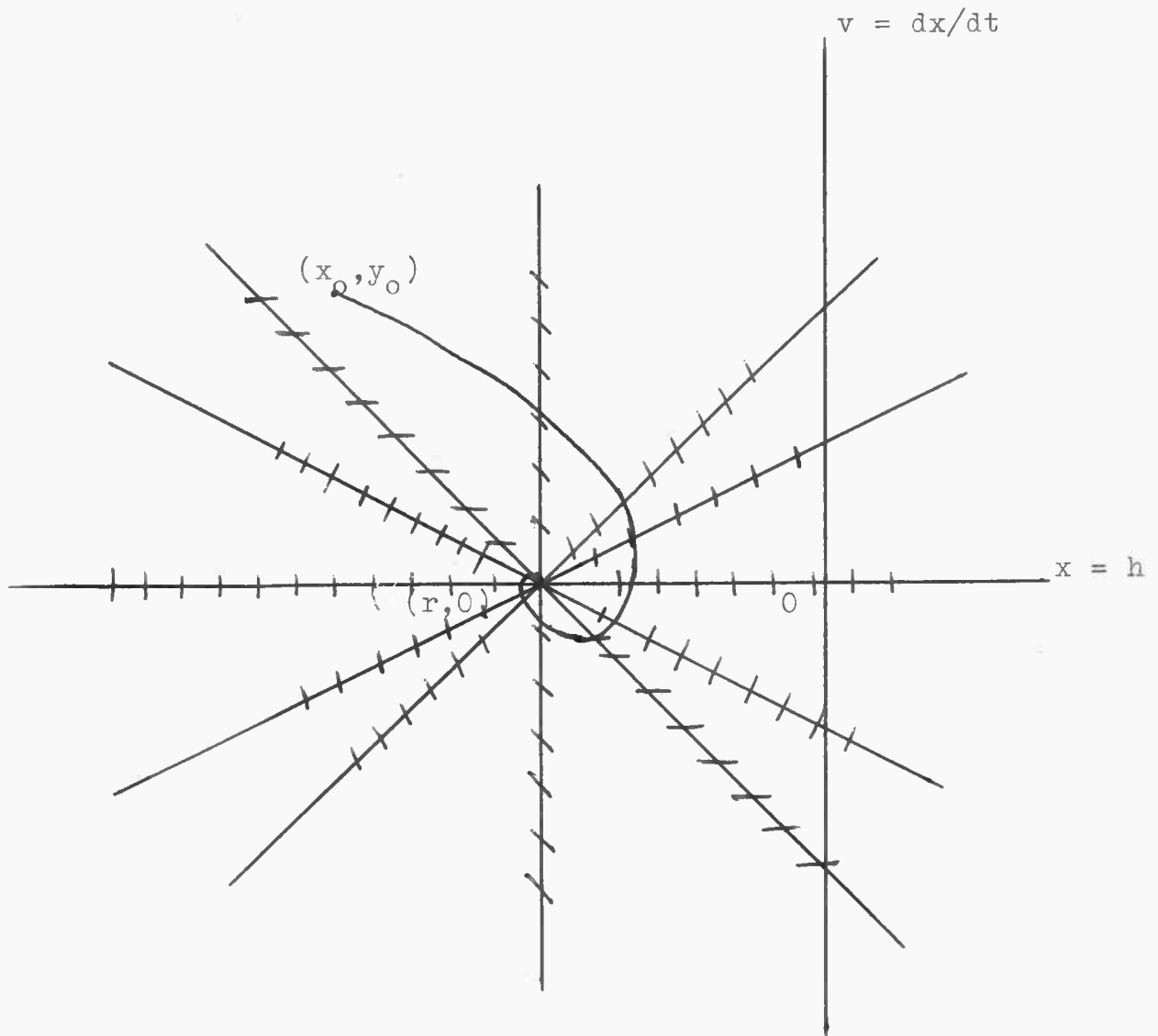
Op de bekende manier kunnen de vergelijkingen van een stel isoclinen bepaald worden.

$$y = -(x + r)/(k + 1)$$

Dit zijn rechten die alle door één punt gaan en een richtingscoëfficiënt hebben van $-1/(1+k)$

<u>k</u>	<u>$-1/(1+k)$</u>
0	-1
1	$-\frac{1}{2}$
-1	∞
-2	1
-3	$\frac{1}{2}$
∞	0

Onafhankelijk van de begintoestand zal de trajektorie eindigen in het punt met $h = -r$ en $v=0$. Het feit dat de auto nu een bepaalde afstand van de rabbit verwijderd is, wil niet zeggen dat deze regeling ook niet te gebruiken is. Er moet echter wel voor gezorgd worden dat deze afstand r niet te groot wordt en zeker niet aangroeit. Gekonkludeerd kan worden dat een systematische fout in de relatieve snelheid v en/of de relatieve afstand h tot uiting komt



in een afstandverschil tussen de auto en de rabbit.

Op deze manier zouden nog veel lineaire en niet lineaire tweede orde differentiaalvergelijkingen kunnen worden onderzocht. Echter is het hier niet de bedoeling om de meest optimale differentiaalvergelijking te vinden, maar om na te gaan wat de gevolgen zijn van een onjuiste meting.

4.3.4 Bespreking van mogelijke informatiebronnen

Zoals uit de vorige paragraaf is gebleken, is het niet direkt noodzakelijk (en hoogst waarschijnlijk onmogelijk)

om over de exakte relatieve plaats en - snelheid te beschikken. Hoewel de fout in de informatie zeker niet continu mag toenemen. Als uitgegaan wordt van de relatieve snelheid kan de relatieve plaats niet zonder meer bepaald worden door de integratie van de relatieve snelheid v , daar de fout dan steeds zal toenemen.

De fout in de relatieve afstand wordt dan:

$$\int_0^t r dt \quad (\text{met } r = \text{fout in } v)$$

En als r konstant is, dan wordt deze fout rt .

Om enigszins een inzicht te verkrijgen in de aard van de fouten, zal het nodig zijn de methoden te onderzoeken welke mogelijk zijn om de v en h te bepalen.

De waarde van de relatieve snelheid kan bepaald worden door het differentiëren naar de tijd van de relatieve plaats of door het verschil te nemen van de snelheid van het systeem v_s en die van de auto v_a .

Gesteld dat de relatieve plaats bekend is, dan zal een analoge differentiator nog altijd moeilijkheden opleveren; daar al een klein stoorsignaal (bijvoorbeeld ruis) een groot uitgangssignaal kan opwekken.

Wordt ervan uitgegaan, dat met digitale componenten wordt gewerkt, dan is het in principe goed mogelijk om een differentiator te bouwen. Echter moet men wel bedenken dat voor het vaststellen van een v een bepaalde tijd T nodig is. In de meeste gevallen zal een dergelijke differentiator niet de momentele snelheid aangeven, doch de gemiddelde snelheid gedurende de tijd T (zie taakverslag over de digita-

le snelheidsmeter). Om de fout die hierdoor optreedt klein te maken kan men T zeer klein kiezen, hoewel de aangeboden hoeveelheid digitale informatie dan veel groter zal moeten zijn (meer bits per tijdseenheid).

Voor het bepalen van de relatieve snelheid door het verschil te nemen van v_s en v_a zal het nodig zijn over deze beide grootheden te beschikken. De grootte van de systeem-snelheid v_s kan continu bekend zijn door een hiermee evenredig signaal te moduleren op een draaggolffrekwentie, welke op de longitudinale geleiders staat (zie hoofdstuk 3 en 4.2). Voor het bepalen van de snelheid van de auto zou gedacht kunnen worden aan een tachogenerator of een digitale snelheidsmeter. Het principe van de digitale snelheidsmeter kan berusten op het tellen van het aantal omwentelingen van de aandrijfas van de auto of door het tellen van markeringen welke op de weg zouden kunnen zijn aangebracht en deze afstandsmaat te delen door de meettijd. Om een redelijke nauwkeurigheid (5%) en een kleine meettijd te bereiken, zal het nodig zijn om bij het tweede principe het aantal markeringen op de weg bijzonder groot te maken, zodat dit principe een markeringsprobleem met zich meebrengt. ($v_a = 10$ m/sek \rightarrow markeringsafstand < 25 cm bij een meettijd van 1 sek).

Bij het eerste principe kan de fout die wordt geïntroduceerd door de digitale snelheidsmeter zelf bijzonder klein gemaakt worden, zodat de resterende fout nagenoeg alleen afhangt van de bandenspanning en de slip die optreedt tussen het wegdek en de band (deze fout is bij benadering 3%). Daar in § 4.3.2 is gebleken dat een systematische fout in

de relatieve snelheidsmeting slechts tot uiting komt in een afstandverschil tussen de rabbit en de auto, is het niet direkt noodzakelijk deze fout te elimineren, zolang ervoor gezorgd zal worden dat het afstandsverschil niet al te groot kan worden. Uit het latere betoog zal blijken, dat de afgeleide van de gemeten relatieve snelheid in de meeste gevallen slecht overeen komt met de relatieve snelheid, zodat dit principe voor het bepalen van de relatieve snelheid veel moeilijkheden zal opleveren. Voor het regelsysteem in de auto zal het plezierig zijn over de snelheid van de auto te beschikken om hiermee een terugkoppeling te kunnen aanbrengen (zie o.a. de appendix "simulatie van een regelsysteem in de auto"). Het ligt daarom voor de hand dat de relatieve snelheid v bepaald wordt door het verschil van v_s en v_a . Bovendien zal het wenselijk zijn ook over de systeemsnelheid te beschikken bij het bepalen van de relatieve plaats.

Om een indruk te krijgen van de grootte van het afstandsverschil tussen de auto en de rabbit (dit is dus de werkelijke h) tengevolge van een fout in de bepaling van v volgt hier een numerieke beschouwing.

Stel dat $v_s = 30 \text{ m/sek} = 108 \text{ km/uur}$

fout in de meting van $v_s = 3\%$

fout in de meting van $v_a = 3\%$

Dan is de maximale fout in de relatieve snelheid bij benadering gelijk aan 6% van de systeemsnelheid, zodat de waarde van deze fout gelijk is aan $\pm 1,8 \text{ m/sek.}$

Wordt nu geregeld met een differentiaalvergelijking van de volgende vorm

$$-d^2x/dt^2 = K(dx/dt + kx + r)$$

met $x = h$ en $r = \text{fout in } v$, dan volgt uit de fasevlaktheorie dat $h = -r/k$. In het geval dat $k = 5$ geldt dat $h_{\text{max}} = 180/5 = 36 \text{ cm}$.

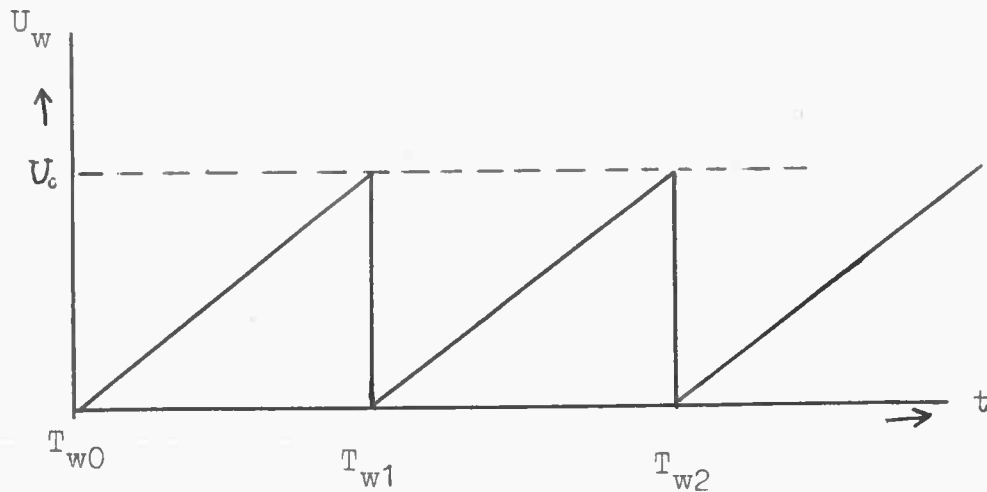
Bij het bepalen van de relatieve afstand h zal het systeem zoveel mogelijk informatie moeten verschaffen over de exakte plaats van de rabbit en de auto. Om dit mogelijk te maken is gedacht aan een weg met markeringen op onderling gelijke afstanden, de zogenaamde knopen. Terwijl op de frekwentie van de stroom door de longitudinale geleiders een systeempulsfrekwentie gemoduleerd wordt.

Iedere puls afkomstig van de pulsfrekwentie P_s betekent dat de rabbit één knoop opgeschoven is. De plaats van de auto kan exakt bepaald worden op het moment dat de auto een knoop passert. De op deze manier verkregen informatie is verre van continu en zeker ongeschikt voor een directe bepaling van de relatieve afstand wanneer gedacht wordt aan een knoopafstand van 5 à 15 meter.

Getracht zal moeten worden om met behulp van een extrapolatieproces informatie te verkrijgen over de plaats van de auto en de rabbit tussen de tijdstippen waarop de informatie exakt gegeven wordt, om zodoende een redelijk betrouwbare h te verkrijgen. De plaats van de auto zou ook kunnen worden bepaald indien de sterkte of de vorm van het e.m.-veld, dat zich om de longitudinale geleiders bevindt, met de plaats tussen de knopen verandert. In het ideale geval kan verwacht worden dat de amplitude van het signaal

U_w , dat uit de opnemer van het e.m.-veld komt evenredig is met de plaats tussen de knopen. (zie § 4.2)

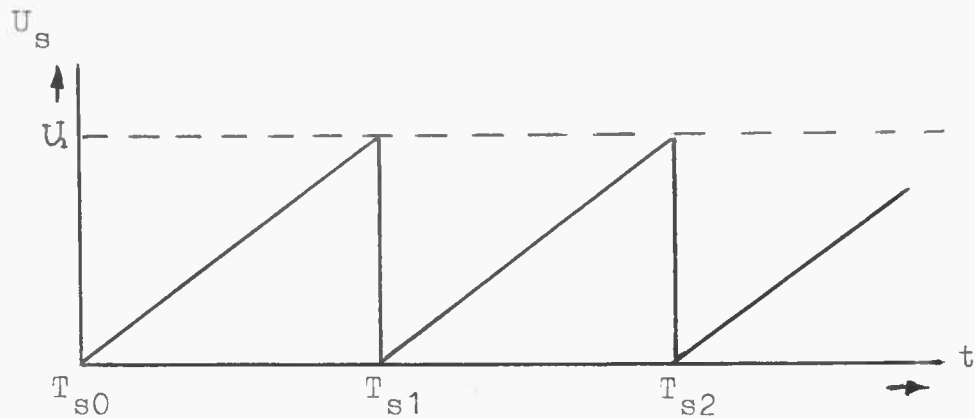
Bij een konstante snelheid van een auto zal dan een signaal ontstaan dat er als volgt uitziet:



In dit ideale geval behoort U_c dus overeen te komen met de knoopafstand. T_{w0} , T_{w1} , T_{w2} ,..... zijn de tijdstippen waarop een knoop gepasseerd wordt.

Voor het bepalen van de plaats van de rabbit tussen de tijdstippen van de exakte informatie kan weer gebruik worden gemaakt van de systeemsnelheid v_s , welke ook reeds gebruikt is bij de bepaling van de relatieve snelheid v .

Door de systeemsnelheid te integreren met behulp van een integrator (analoog of digitaal) gedurende de tijd tussen twee systeempulsen en op het moment dat de systeempuls binnenkomt de integrator te resetten op nul, zal het verloop van het signaal U_s aan de uitgang van de integrator er als volgt uitzien:



Indien in de overbrenging van de waarde van de systeem-
snelheid v_s geen fout zou zitten, dan behoort U_1 ook over-
een te komen met de knoopafstand. T_{s0} , T_{s1} , T_{s2} , ... zijn
de tijdstippen waarop de systeempulsen binnenkomen en waar-
op de rabbit zich op een knoop bevindt.

Uitgaande van de toestand dat $T_{w0} = T_{s0}$ kan de relatieve
afstand bepaald worden door $h = k(U_s - U_w)$, als gesteld
wordt dat $U_1 = U_0$. Echter zodra er een systeem- of wegpuls
(de laatste is afkomstig van een knoop in de weg) binnen-
komt, zal er een korrektie plaats moeten vinden en wel
afhankelijk van de eerst binnengekomen puls.

a) Systeempuls treedt het eerst op.

Dit wil zeggen dat de rabbit een knoopafstand heeft afge-
legd op het moment dat deze puls binnen komt en dat sig-
naal U_s nul geworden is. Daarom wordt het verschilsignaal
 $U_s - U_w$ nu met een signaal C vergroot, waarvan de waarde
overeen komt met een knoopafstand. Er geldt nu dat
 $h = U_s - U_w + C$. Als vervolgens de wegpuls binnen komt
betekent dit, dat de auto ook een knoopafstand heeft afge-
legd, terwijl U_w nul wordt. Het signaal $U_s - U_w + C$ moet
daarom weer verminderd worden met een signaal C , zodat

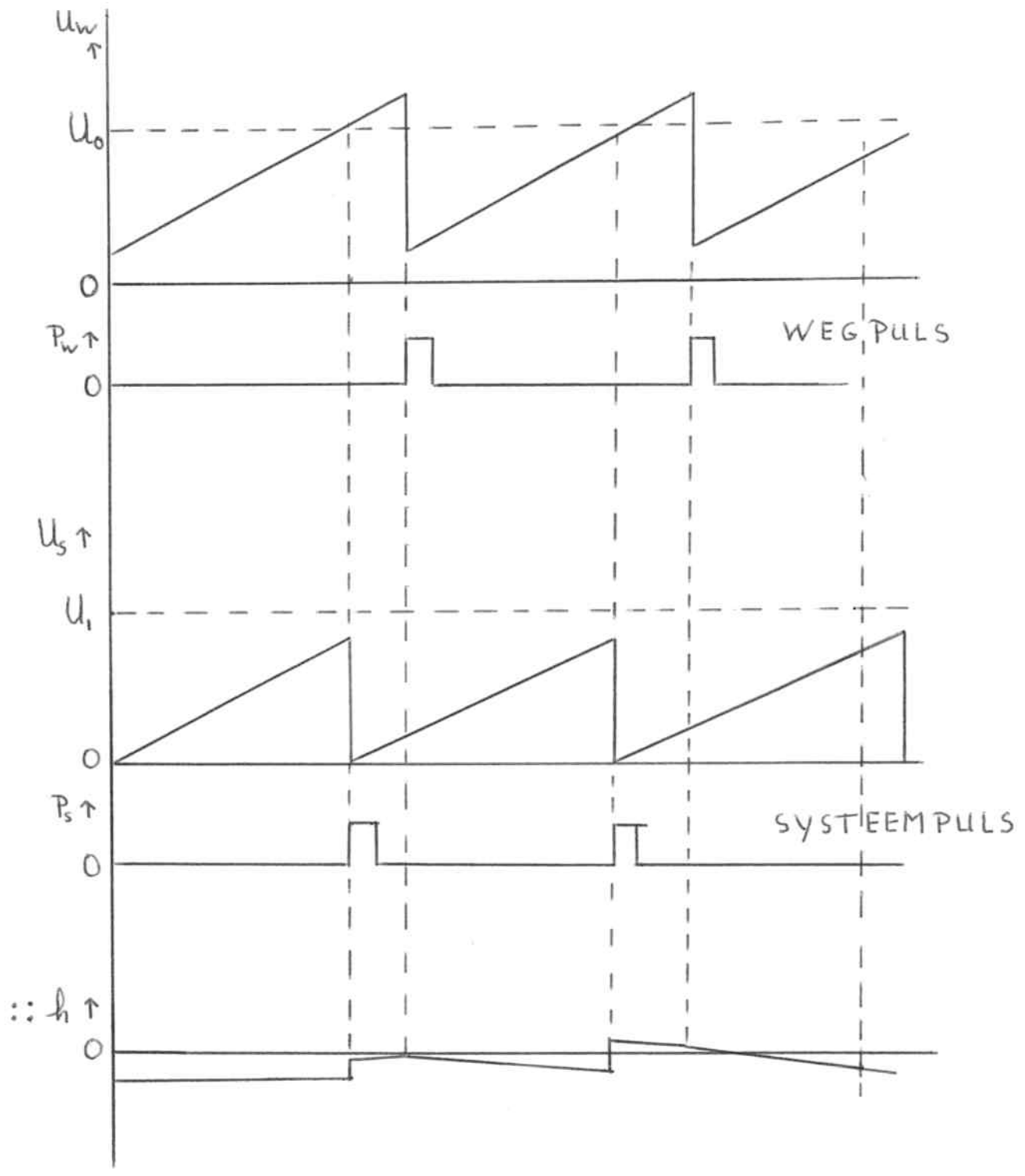
dan weer geldt: $h = U_s - U_w$.

b) Wegpuls treedt het eerst op.

Met eenzelfde redenering als de voorgaande kan hier aangetoond worden, dat nu gecorrigeerd moet worden met het tegengestelde van het signaal C.

Om een indruk te krijgen van het verloop van het signaal $U_s - U_w$ + de correctie, wanneer ervan uitgegaan wordt dat U_s een procentuele fout en U_w een systematische fout bezit, zijn de volgende schetsen gegeven. De grootte van de optredende sprongen in het verloop van $U_s - U_w$ + correctie zijn afhankelijk van een variërende fout die in U_s en U_w optreedt en van de knoopafstand. Stel dat de procentuele fout gelijk is aan $\pm 5\%$ en de knoopafstand L meter, dan is de spronggrootte bij benadering $L \cdot 0,05$ meter.

Zolang de spronggrootte klein gehouden kan worden (bijvoorbeeld bij een knoopafstand van 1 à 2 meter) is het misschien mogelijk de diskontinuiteiten in het signaal $U_s - U_w$ + correctie weg te werken met een of ander vereffeningsfilter. Echter zal de auto wel een continue schommeling gaan vertonen, daar dit filter de werkelijke positieveranderingen goed moet kunnen doorgeven.



Vervolgens is gezocht naar een methode om de grootte van de korrekties te laten convergeren met de bedoeling om schommelingen ten opzichte van de snelheid van de auto zover te laten afnemen dat dit geen hinderlijke invloed meer zal uitoefenen op eventuele passagiers. Hiervoor zal het nodig zijn korrekties aan te brengen die de oorzaak van de opgelopen fout in het verleden zo goed mogelijk trachten te onderdrukken.

Bij deze korrektiemethode is ervan uitgegaan dat de relatieve afstand h' bepaald wordt door een integratie van de gemeten relatieve snelheid. De fout in de op deze manier bepaalde h' wordt veroorzaakt door een fout in de relatieve snelheidsmeting. Er zal dus getracht moeten worden deze laatste fout op een of andere manier te bepalen en de waarde hiervan extra toe te voeren naar de integrator die de h' produceert.

Een ander voordeel van deze methode is, dat de plaats van de auto x_a en die van de rabbit x_s nu niet meer kontinu bekend hoeven te zijn.

Uit het tijdsverschil tussen de systeempuls en de wegpuls is de afstand tussen de rabbit en de auto te bepalen als ook de systeemsnelheid en/of de snelheid van de auto bekend is. Bovendien is h afhankelijk van de eerst aangeboden puls.

a) Systeempuls treedt het eerst op.

Stel dat op het moment t_0 de systeempuls optreedt, dan bevindt de rabbit zich op dat moment op een knoop K_1 .

Na een zekere tijd T_0 zal de wegpuls optreden, zodat nu de auto zich op de knoop K_1 zal bevinden. Gedurende de tijd T_0

heeft de rabbit zich van de knoop K_1 verwijderd met de systeemsnelheid, zodat de afstand tussen de knoop (of de auto) en de rabbit gelijk is aan:

$$h = + \int_{t_0}^{t_0+T_0} v_s(t) dt$$

b) Wegpuls treedt het eerst op.

Eenzelfde soort redenering als hierboven zal leiden tot:

$$h = - \int_{t_1}^{t_1+T_1} v_a(t) dt$$

waarin t_1 = tijdstip waarop de wegpuls optreedt en t_1+T_1 = tijdstip waarop de systeempuls optreedt.

Als er nu vanuitgegaan wordt dat men hier te maken heeft met procentuele fouten in de meting van v_a en v_s , dan kan gesteld worden dat de fout in de relatieve snelheid ongeveer gelijk is aan:

$$v_c \approx \frac{-\rho}{100} v_a = \delta v_a$$

als $v_a \approx v_s$, ρ = het verschil van de procentuele fouten in v_s en v_a . Bijvoorbeeld $v_a(\text{gemeten}) = v_a + 5\%$, $v_s(\text{gemeten}) = v_s - 3\%$, $\rho = -3-5 = -8\%$, $\delta = 8/100$.

Wanneer de auto achter is bij de rabbit zal op ieder moment waarop de auto een knoop passeert informatie binnenkomen over de relatieve afstand h . Er moet dan gelden dat:

$$\int_{t_0}^{t_1} v_{c1}(t) dt = \delta \int_{t_0}^{t_1} v_a(t) dt = h_1 - h_0.$$

Waarin $v_{c1}(t)$ = de fout in de relatieve snelheid tijdens de integratietijd van t_0 tot t_1 ; t_0 en t_1 zijn de tijdstippen waarop de informatie over de h binnenkomt.

h_0 = de relatieve afstand op tijdstip t_0 ,

h_1 = de relatieve afstand op tijdstip t_1 .

Bovendien moet gelden dat:

$$\int_{t_0}^{t_1} v_a(t) dt = L$$

met L = knoopafstand, zodat $\delta = (h_1 - h_0)/L$, dus:

$$\underline{v_{c1}(t) = (h_1 - h_0)v_a(t)/L}$$

Deze formule is dus afgeleid voor het geval dat de systeemimpuls het eerste optreedt. Treedt echter de wegpuls het eerste op dan zal met een iets gewijzigde afleiding toch dezelfde formule gevonden worden.

Nadat n maal informatie is binnen gekomen over de relatieve afstand h zal dus moeten worden gecorrigeerd met een extra correctie op de relatieve snelheid van:

$$v_c(t) = \sum_{k=1}^n v_{ck}(t) = (h_1 - h_0)v_a(t)/L + (h_2 - h_1)v_a(t)/L + \dots + (h_k - h_{k-1})v_a(t)/L + \dots + (h_n - h_{n-1})v_a(t)/L$$

$$v_c(t) = -h_0 v_a(t)/L + h_n v_a(t)/L$$

Daar bij de startplaats de auto en de rabbit zich op één en dezelfde plaats bevinden is $h_0=0$, zodat in het algemeen

geldt dat:

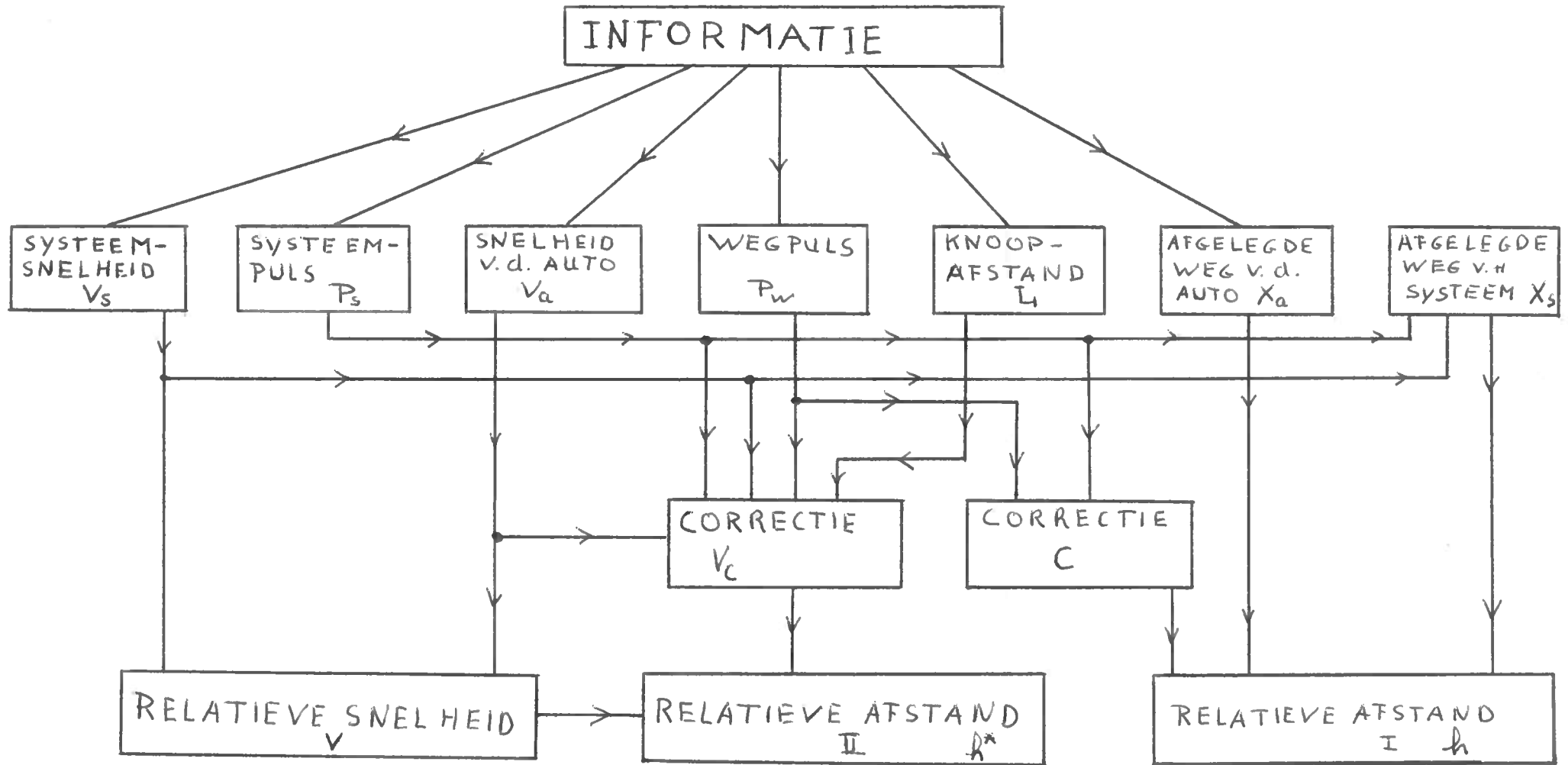
$$\underline{\underline{v_c(t) = hv_a(t)/L}}$$

Deze formule is afgeleid voor het geval dat v_a en v_s procentuele fouten bezitten, wat in veel gevallen een juiste benadering zal zijn. Wanneer dit echter niet zo is, dan zal de formule niet helemaal meer kloppen, maar de relatieve afstand zal er altijd naar streven zo groot te worden dat bij konstante snelheid weer precies voldaan wordt aan:

$$\underline{\underline{v_c = hv_a/L}}$$

De sprongen in de korrektiesnelheid v_c (bij snelheidsverandering) zullen groter zijn naarmate de fouten in v_a en v_s meer zullen afwijken van de verwachte procentuele fouten. Wanneer het signaal v_c sprongen vertoont, behoeven deze niet te worden weggewerkt, daar de auto geregeld wordt met de direkt gemeten relatieve snelheid en de relatieve afstand, welke laatste bepaald wordt door de integratie van de gemeten snelheid en de korrektiesnelheid.

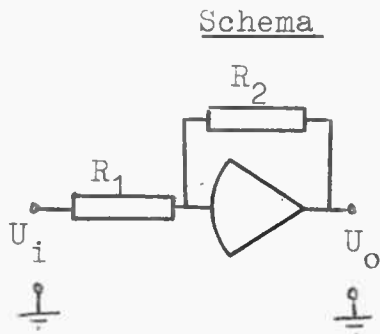
OVERZICHT VAN DE BESPROKEN INFORMATIE
EN HUN BESTEMMINGSMOGELIJKHEDEN



4.3.5 Beknopte beschrijving van de gebruikte bouwstenen van een analoge rekenmachine.

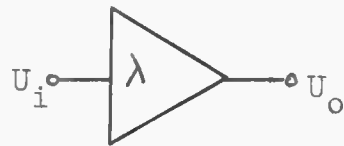
a) Tekenomkeerder.

Een tekenomkeerder bestaat uit een rekenversterker en twee weerstanden.



$$U_o = -R_2 U_i / R_1$$

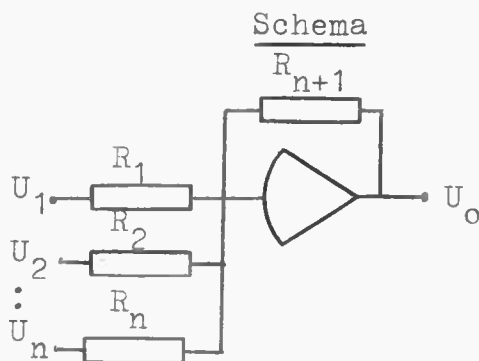
symbool



$$\lambda = R_2 / R_1$$

Deze vergelijking is slechts dan exakt geldig, wanneer de versterkingsfaktor ($-\mu$) van de rekenversterker oneindig groot is. Er is daarom gestreefd naar een zo groot mogelijke versterkingsfaktor van de rekenversterker. Ook is dit het geval bij de opteller en de integrator.

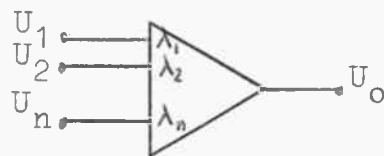
b) Opteller.



Er geldt dat:

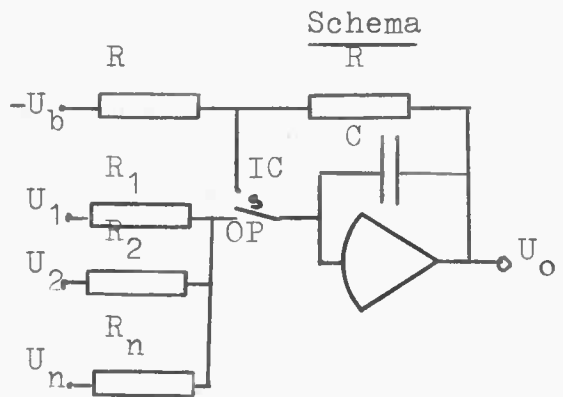
$$U_o = - \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot U_j$$

Symbol

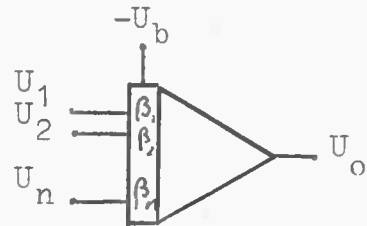


$$\lambda_j = R_{n+1} / R_j$$

c) Integrator.



Symbool



$$\beta_k = 1/R_k C$$

Er geldt dat:

$$U_o(t) = U_b \int_{t_0}^t \sum \beta_j U_j dt$$

waarin: t_0 = de tijd waarop de integrator start,

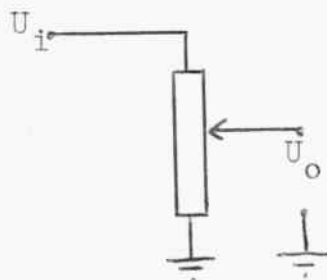
U_b = beginvoorwaarde van de integrator,

IC = de stand van relais S waarin wordt ingelezen

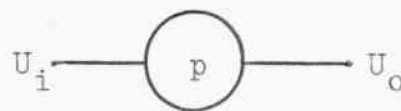
OP = de stand van relais S waarin wordt gerekend.

d) Potentiometer.

Schema



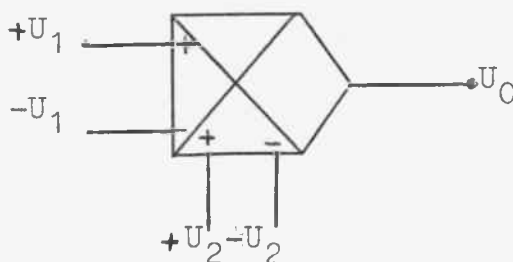
Symbool



$$U_o = p \cdot U_i, \text{ met } 0 \leq p \leq 1$$

e) Vermenigvuldiger.

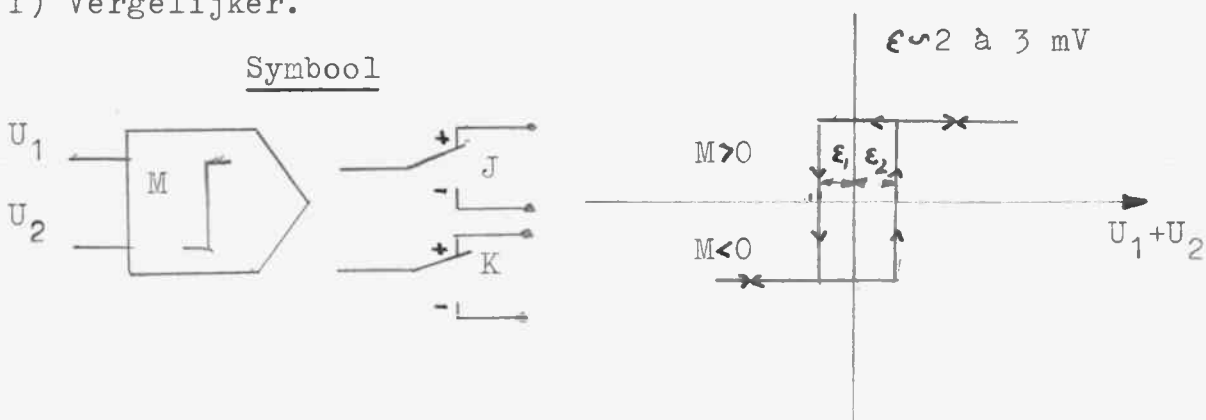
Symbol



$E = \text{machine-schaaleenheid, } U_0 = -U_1 U_2 / E$

f) Vergelijkjer.

Symbol



- $U_1 + U_2 > 0$ Volt de kontakten van relais M staan op de positieve kant
- $U_1 + U_2 < 0$ Volt de kontakten van relais M staan aan de negatieve kant.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de vergelijker een hysteresis bezit, zoals in de figuur is verduidelijkt.

4.3.6 Een analoge rekenmachine als hulpmiddel bij de fasevlakmethode.

In bepaalde gevallen zal het konstrueren van de trajektoriën in het fasevlak moeilijkheden opleveren. Dit is onder andere het geval wanneer de isoklinen krommen zijn die moeilijk te konstrueren zijn. In dergelijke situaties is het verstandiger om een analoge re-

kenmachine te gebruiken.

Wanneer men de trajektoriën wel eenvoudig kan konstrueren, dan zal het toch vaak aan te bevelen zijn de analoge rekenmachine te gebruiken, daar de gevolgen van parameter-varianties dan snel zichtbaar gemaakt kunnen worden.

Als voorbeeld worden vervolgens differentiaalvergelijkingen (welke reeds in de voorgaande paragrafen zijn besproken) op de analoge rekenmachine onderzocht. Uitgegaan is van een schema waarmee tweede orde differentiaalvergelijkingen van de vorm $d^2x/dt^2 = -K(k_1x + k_2dx/dt)$ kunnen worden bekeken. (zie schema 1). Voor het rabbit-volgsysteem wil dit zeggen dat geregeld wordt met $a = -K(k_1h + k_2v)$.

De resultaten van de volgende differentiaalvergelijkingen zijn met behulp van een x-y-schrijver in een grafiek weergegeven.

$$\text{I} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{dx}{dt} + r$$

$$\text{V} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -\left(x + \frac{dx}{dt}\right) + r$$

$$\text{II} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -10\frac{dx}{dt} + r$$

$$\text{VI} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -10\left(x + \frac{dx}{dt}\right) + r$$

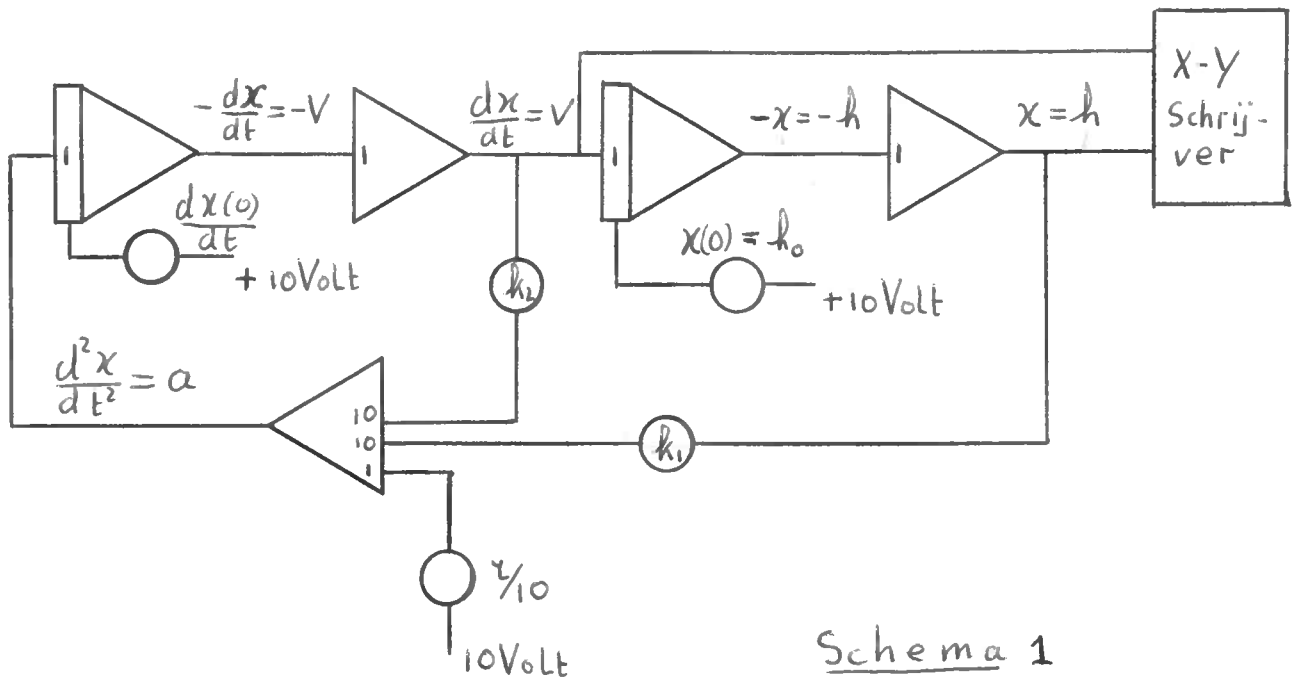
$$\text{III} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -x + r$$

$$\text{VII} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -(10x + \frac{dx}{dt}) + r$$

$$\text{IV} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -10x + r$$

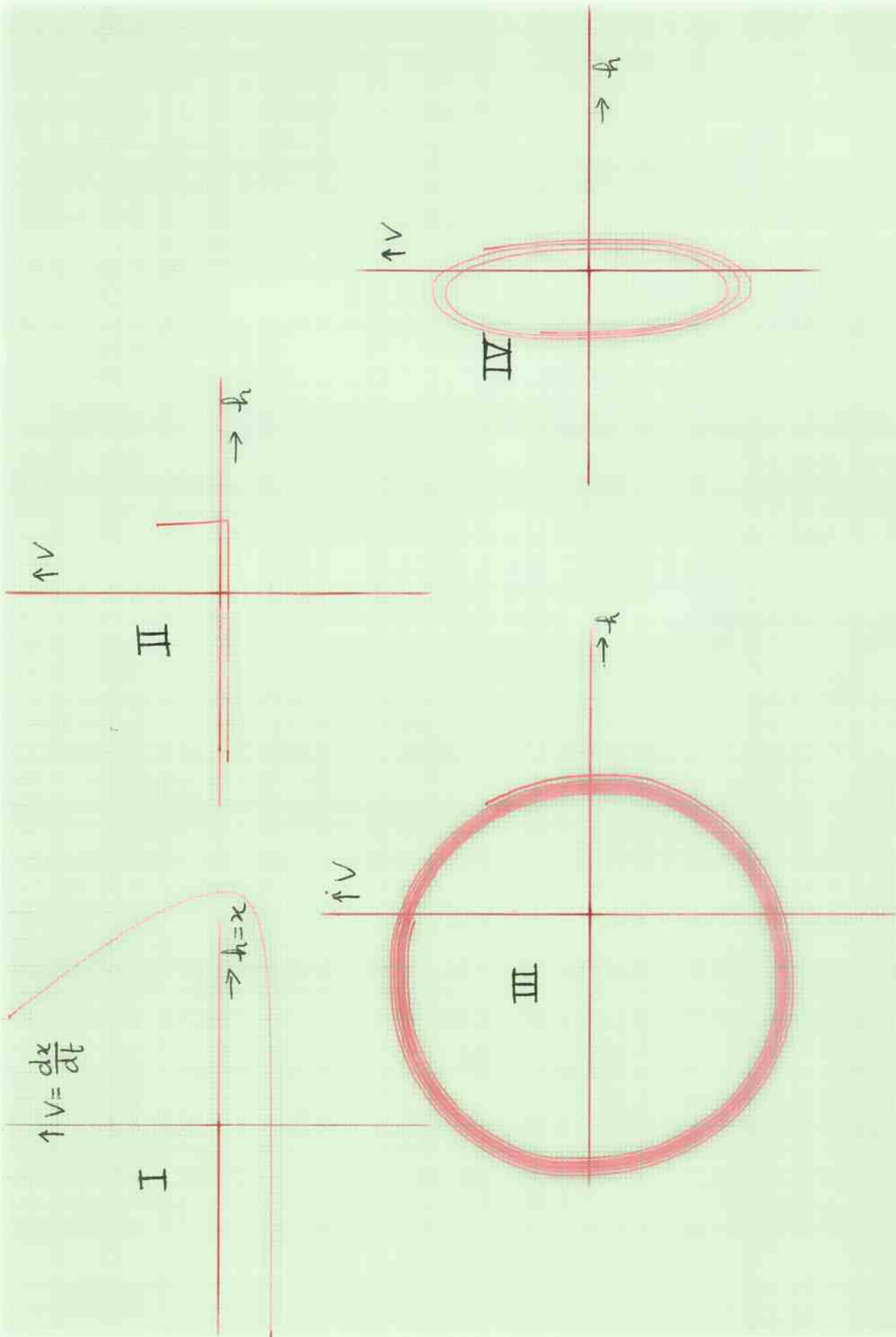
$$\text{VIII} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -(x + 10\frac{dx}{dt}) + r$$

$r = 1$ Volt.

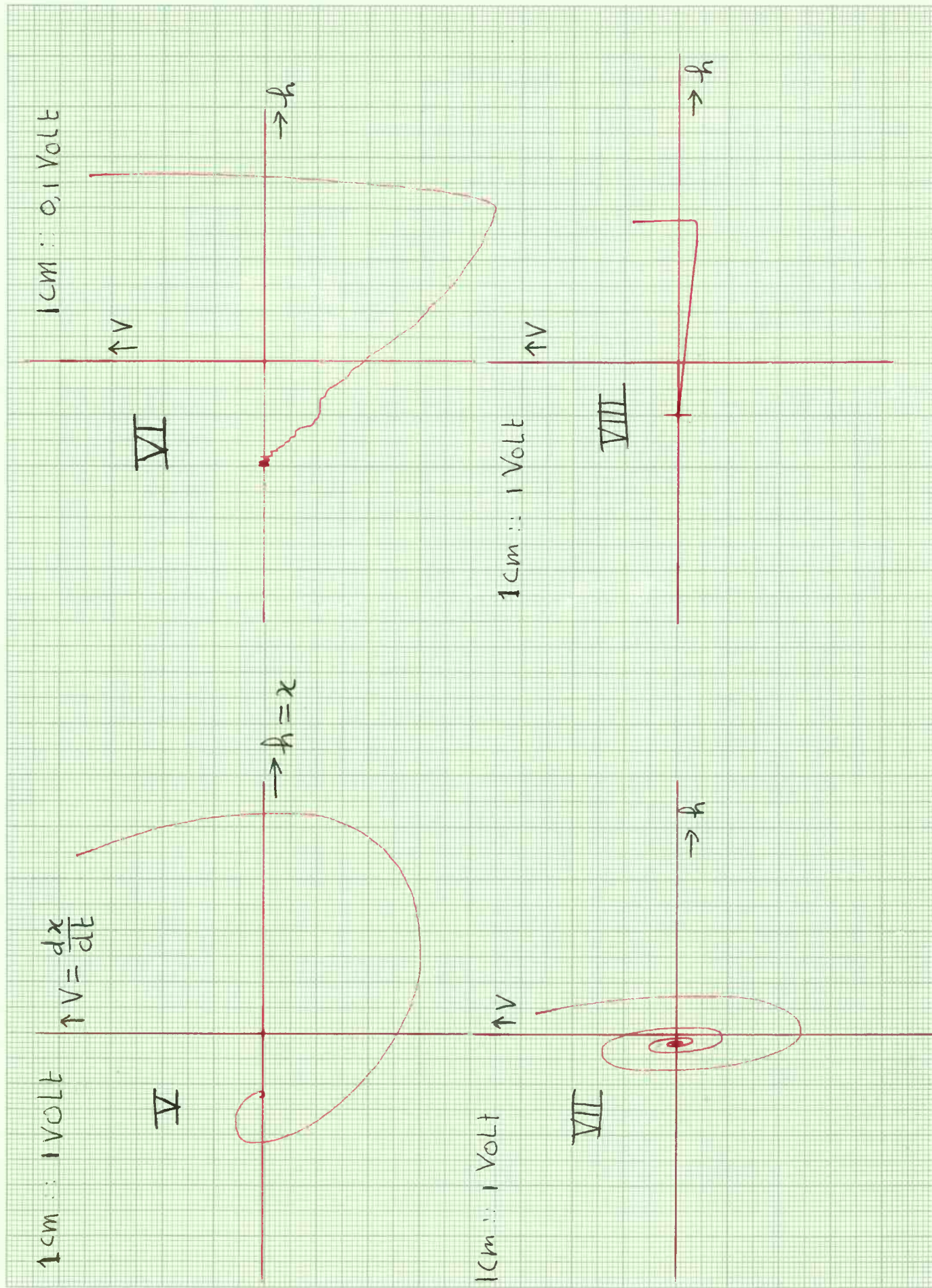


Schema 1

r moet opgevat worden als een fout in de meting van V en/of h .



1cm = 1Volt



4.3.7 Een simulatie van een konvergerende correctie van de informatie voor het rabbit-volgsysteem.

Er is getracht met behulp van een analoge rekenmachine een simulatie te maken van de konvergerende correctiemethode welke besproken is in paragraaf 4.3.4.

De daar afgeleide formule voor $v_c = hv_a/L$ is getoetst bij verschillende knoopafstanden en de resultaten zijn weergegeven in grafieken.

Als geheugensteun wordt gegeven dat:

v_c = de fout in de meting van de relatieve snelheid v

v_a = snelheid van de auto

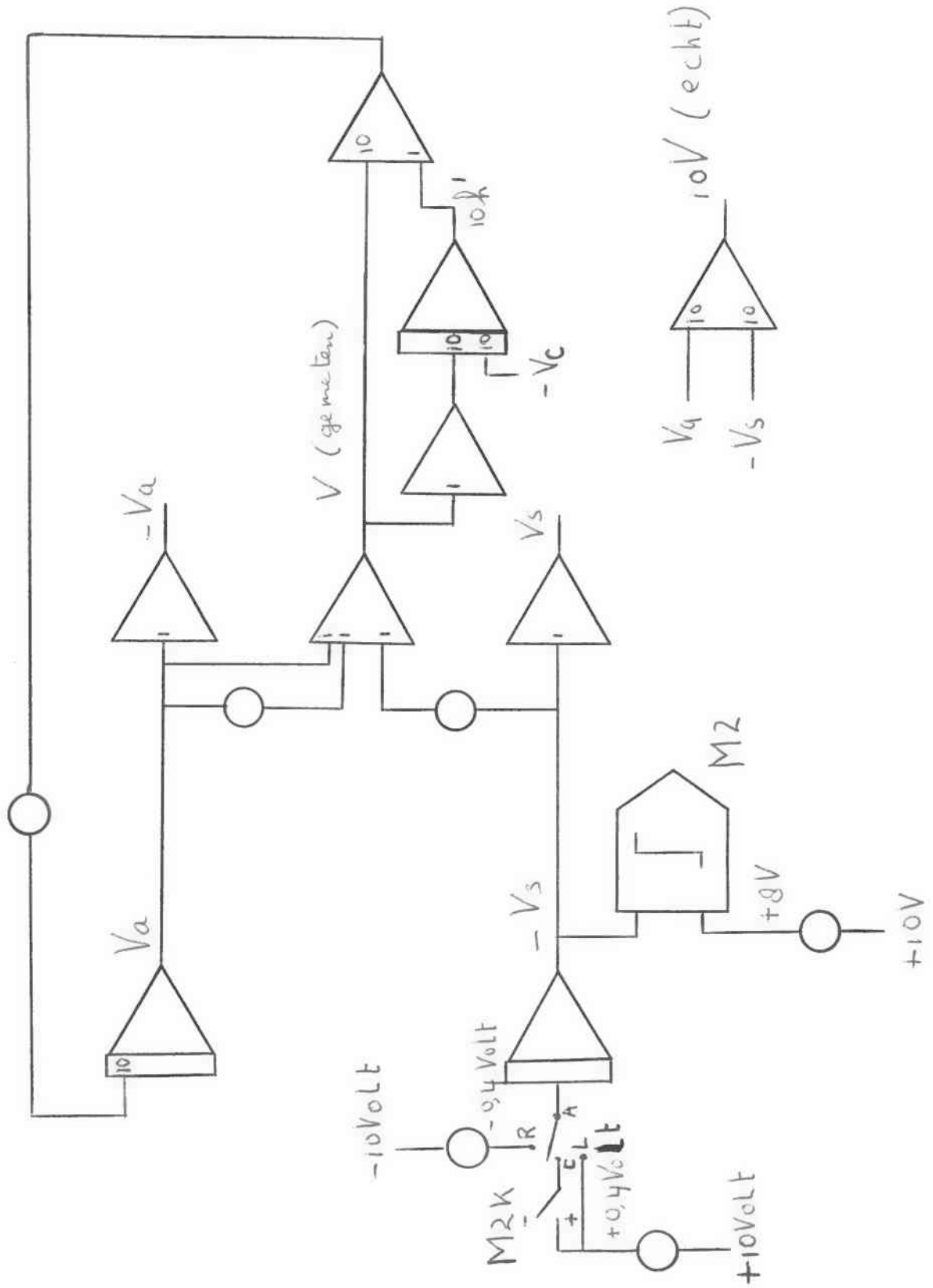
L = de knoopafstand

h = de relatieve afstand.

Bespreking van schema 2 :

De systeemsnelheid wordt gesimuleerd, door een bepaalde spanning, welke overeen komt met de optrekversnelling, ($0,5 \text{ Volt} \cong 1 \text{ m/sek}^2$) op de ingang van een integrator te zetten. Zodoende zal de waarde van de uitgangsspanning overeenkomen met $-v_s$. Zodra v_s groter wordt dan een bepaalde waarde, zal met behulp van een vergelijker de ingang van de integrator nul volt gemaakt worden, zodat vervolgens v_s konstant blijft. Bovendien kan met behulp van een handschakelaar (RCLA) de snelheid van v_s gewijzigd worden. Zoals reeds in de inleiding van 4.3 is vermeld, is het geoorloofd om het regelsysteem in de auto te simuleren door een integrator. Dit regelsysteem zorgt er namelijk voor dat de overdracht van het ingangssignaal naar de snelheid van de auto bij benadering gelijk is aan:

$$v_a = U_i/p \Rightarrow U_i = a_a$$



Schemaz

waarin a_a de versnelling van de auto is en $pv_a = a_a$. De fouten in de meting van v_a en v_s worden gesimuleerd met behulp van potentiometers. De relatieve snelheid v wordt bepaald door:

$$v = (v_s \pm a\%) - (v_a \pm b\%)$$

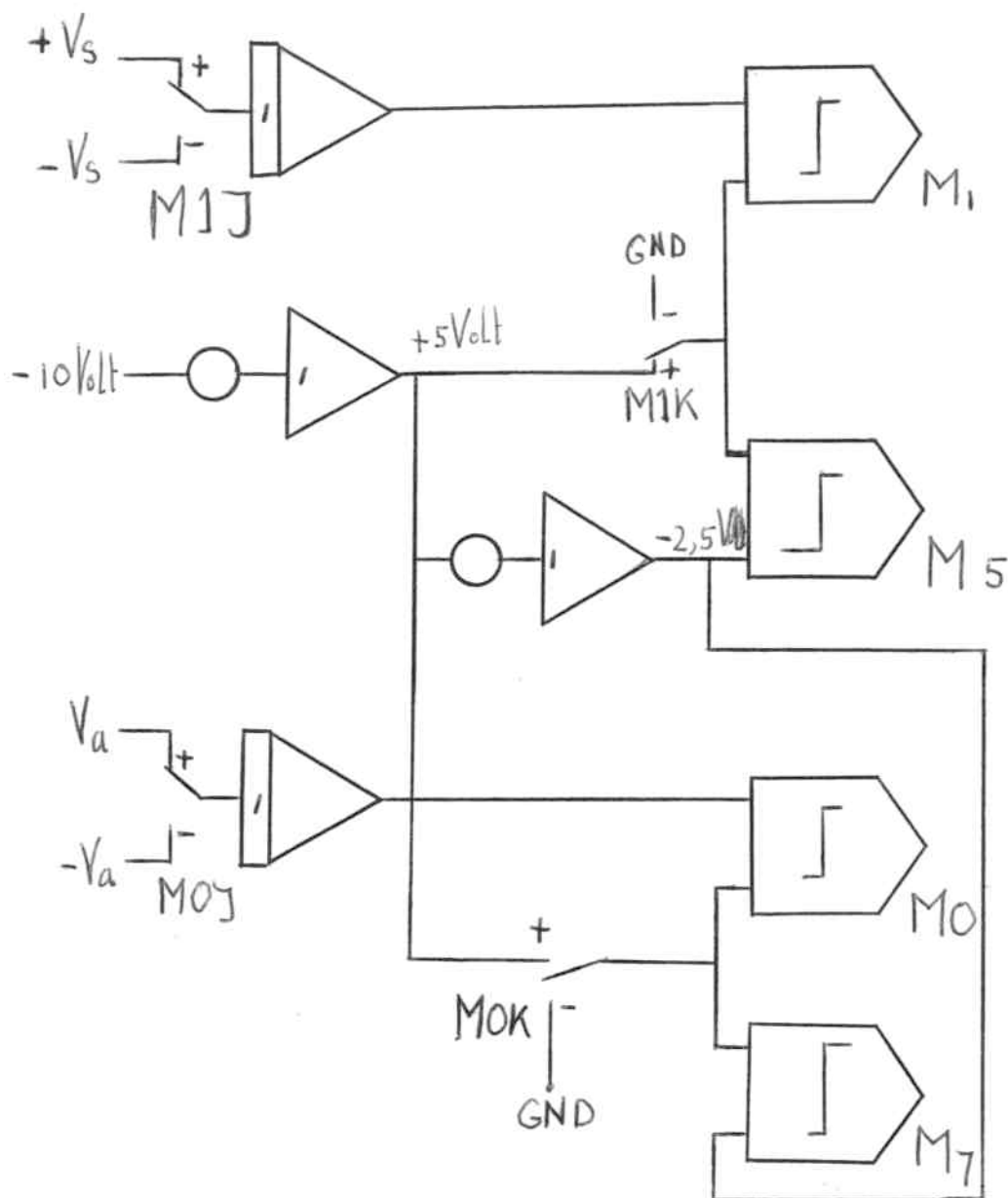
Na integratie van deze v verkrijgt men de relatieve afstand h' . Voor het bepalen van de versnelling a_a is uitgegaan van de volgende differentiaalvergelijking:

$$a_a = 30(v + h')$$

Het zal nu duidelijk zijn dat de werkelijke relatieve plaats h steeds meer zal verschillen van h' , zolang er niet gecorrigeerd wordt. Er wordt naar gestreefd het ingangssignaal van de integrator (welke de h' bepaalt) zodanig te corrigeren dat de juiste relatieve snelheid wordt aangeboden, daar zich hier de oorzaak van de fout in de relatieve afstand bevindt (zie § 4.3.4).

Bespreking van schema 3.

De methode voor het bepalen van de werkelijke relatieve afstand h bij de knopen wordt beschreven in § 4.3.4. Hiervoor is het nodig systeem- en wegpuls te simuleren (zie grafiek 1). De systeempuls wordt gesimuleerd door $-v_s$ aan de ingang van de integrator te zetten. Zodra met behulp van een vergelijker blijkt dat de uitgang van de integrator een spanning heeft, die overeenkomt met de knoopafstand L , wordt $-v_s$ verwisseld door $+v_s$, mits de uitgang van de integrator groter dan nul is. De knikpunten van de op



Schema 3

deze wijze ontstane zaagspanning (zie grafiek 1) geven de tijdstippen aan van de systeempuls. Deze systeempuls wordt dus vertolkt door het omklappen van het relais van de vergelijkers M_1 en M_5 . De wegpuls kan op precies dezelfde manier gesimuleerd worden.

Bespreking van schema 4.

Gedurende de tijd tussen het optreden van de systeempuls en de wegpuls wordt de ingang van een integrator gelijk aan $-v_s$ (als er van uitgegaan wordt dat de rabbit vóór is op de auto), zodat de uitgang na de laatste puls (hier dus de wegpuls) gelijk is aan de werkelijke relatieve afstand (zie § 4.3.4). Deze waarde van h wordt vervolgens onthouden in een andere integrator. Met behulp van een vermenigvuldiger en een potentiometer is nu de formule $v_c = v_a h/L$ toe te passen.

De grafieken 2 t/m 4 geven de resultaten van de simulatie weer bij verschillende snelheidsprofielen en knoopafstanden. De pieken welke in de meting van h verschijnen worden veroorzaakt door het steeds opnieuw uitrekenen van de werkelijke h en hebben verder geen enkele betekenis.

Uit de grafieken is duidelijk te zien dat de spronggrootte in de meting van h steeds kleiner wordt, waardoor de benodigde korrekties ook zullen afnemen. De kleine schommeling (3% van de knoopafstand) die overblijft, wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de hysteresis van de gebruikte vergelijkers. Hiermee is dan toevalligerwijs nog een onjuistheid in de knoopafstand gesimuleerd. Theoretisch zouden de sprongen in de relatieve afstandsmeting alleen afhangen van de veranderingen in de versnelling, zodra de totale

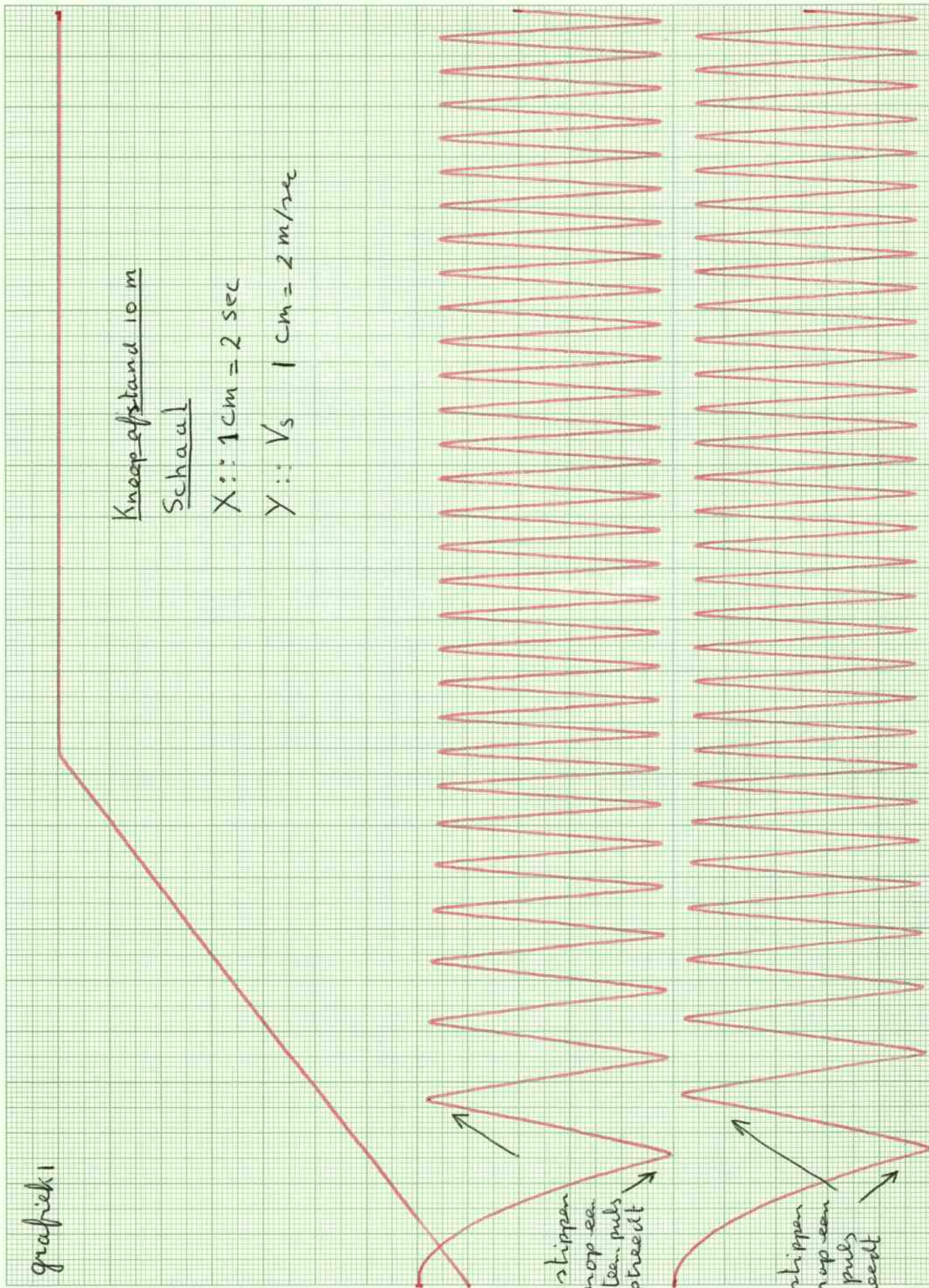
grafiek 1

Knoop afstand 10 m

Schaal

X :: 1 cm = 2 sec

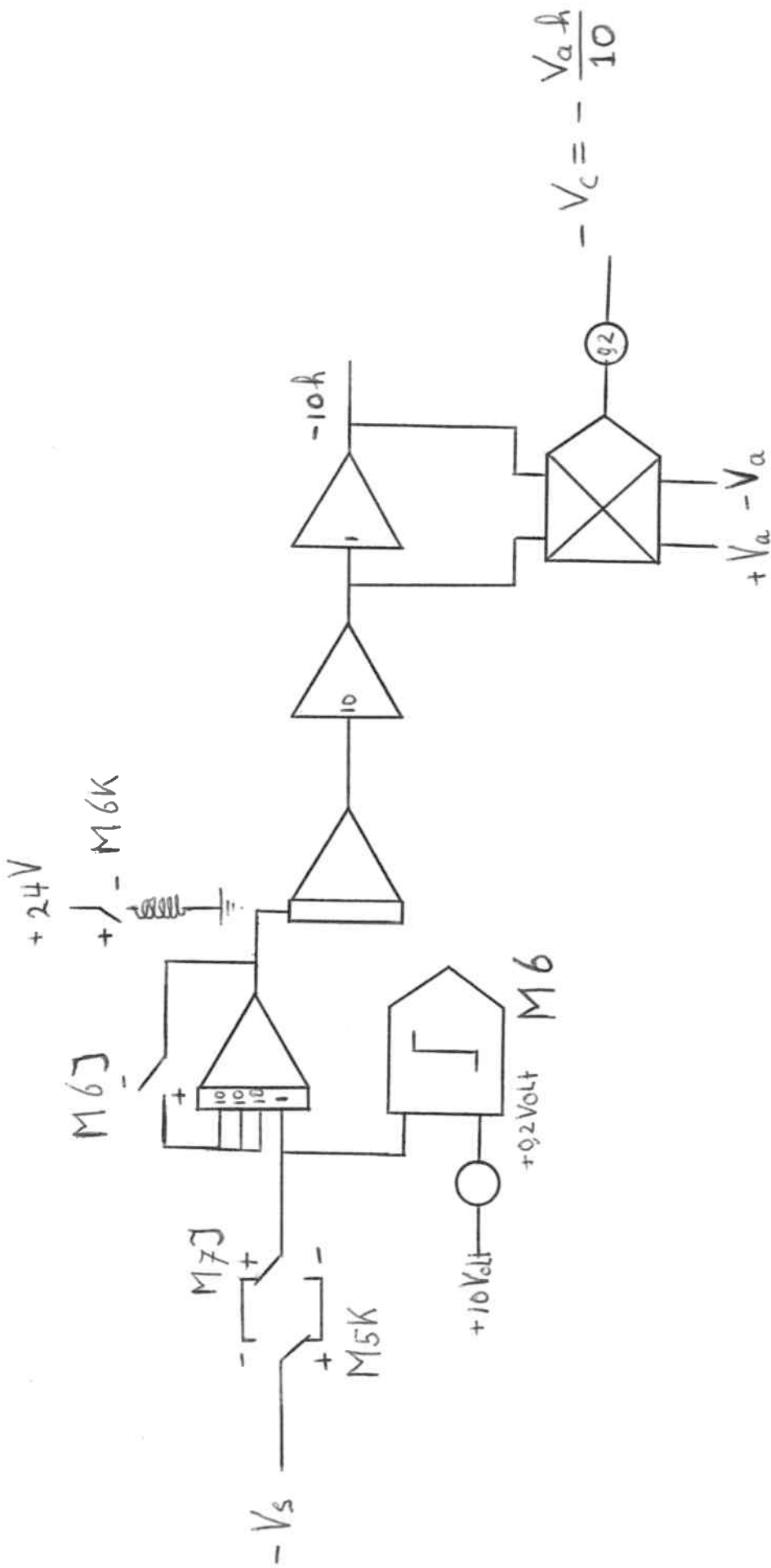
Y :: V_s | 1 cm = 2 m/sec



V_s

tijdstippen
wanneer een
1/2 sec. puls
optreedt

tijdstippen
wanneer een
wey puls
optreedt



$$-V_c = -\frac{V_a \cdot h}{10}$$

Schema 4

korrektie eenmaal konstant is geweest. Bij een kritische bechouwing van de grafieken zal echter blijken dat de sprongen (welke kleiner zijn dan 20 cm) groter zijn dan men had mogen verwachten bij lage snelheden en veranderingen in de versnelling. Dit wordt veroorzaakt door de fout in de vermenigvuldiger (bij $v_a = 0$ m/sek heeft de uitgang van de vermenigvuldiger reeds een kleine waarde).

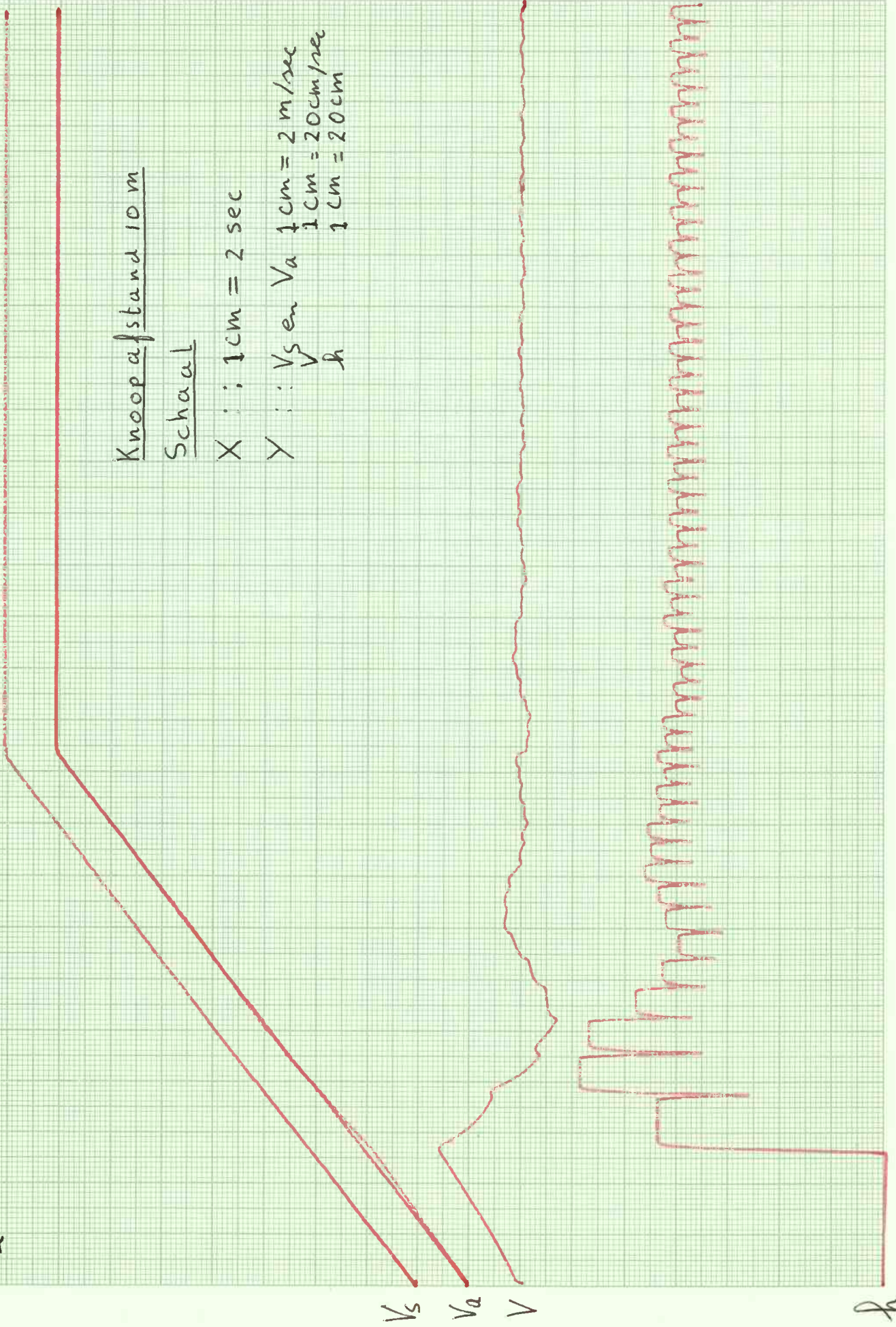
2

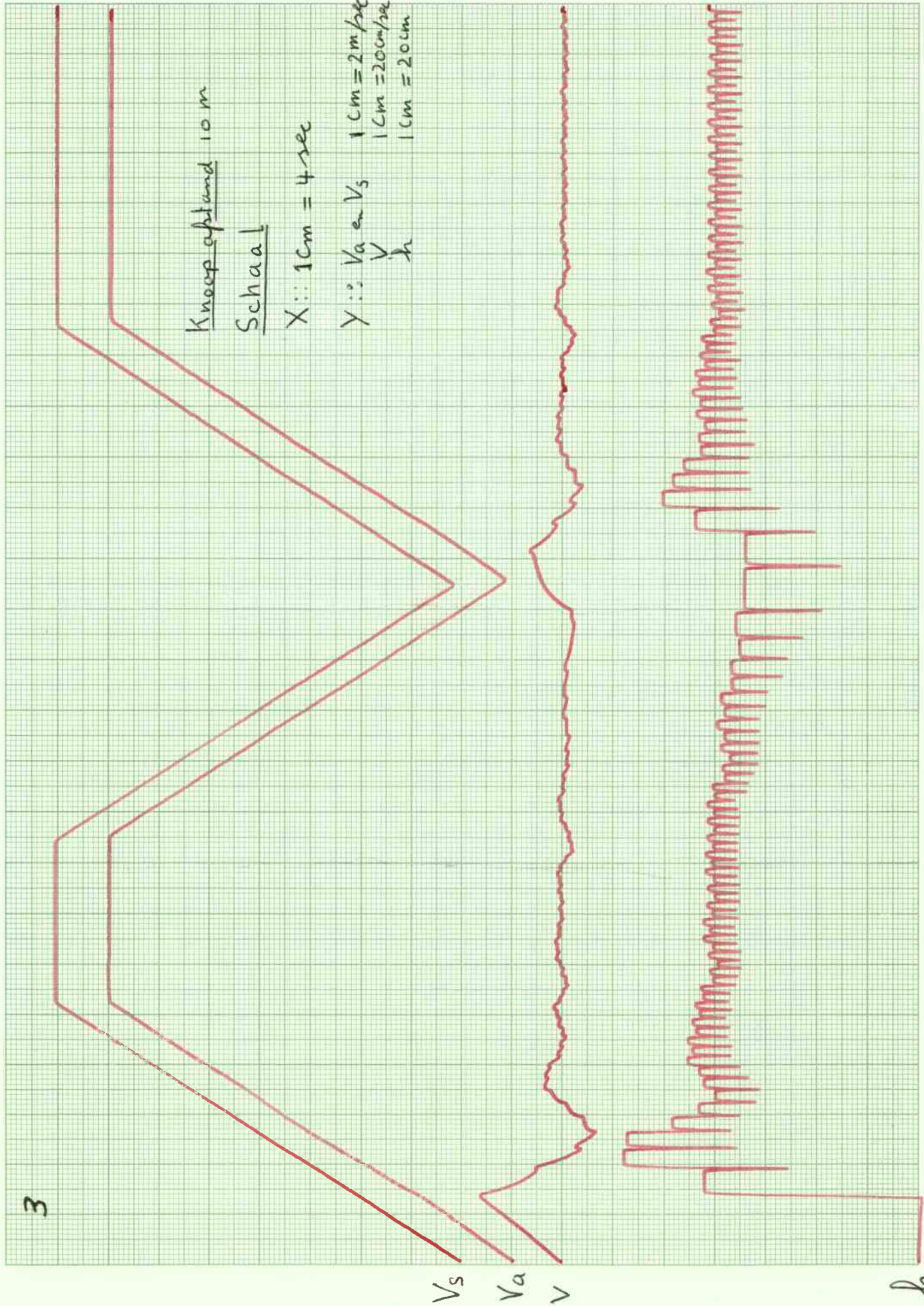
Knoopafstand 10 m

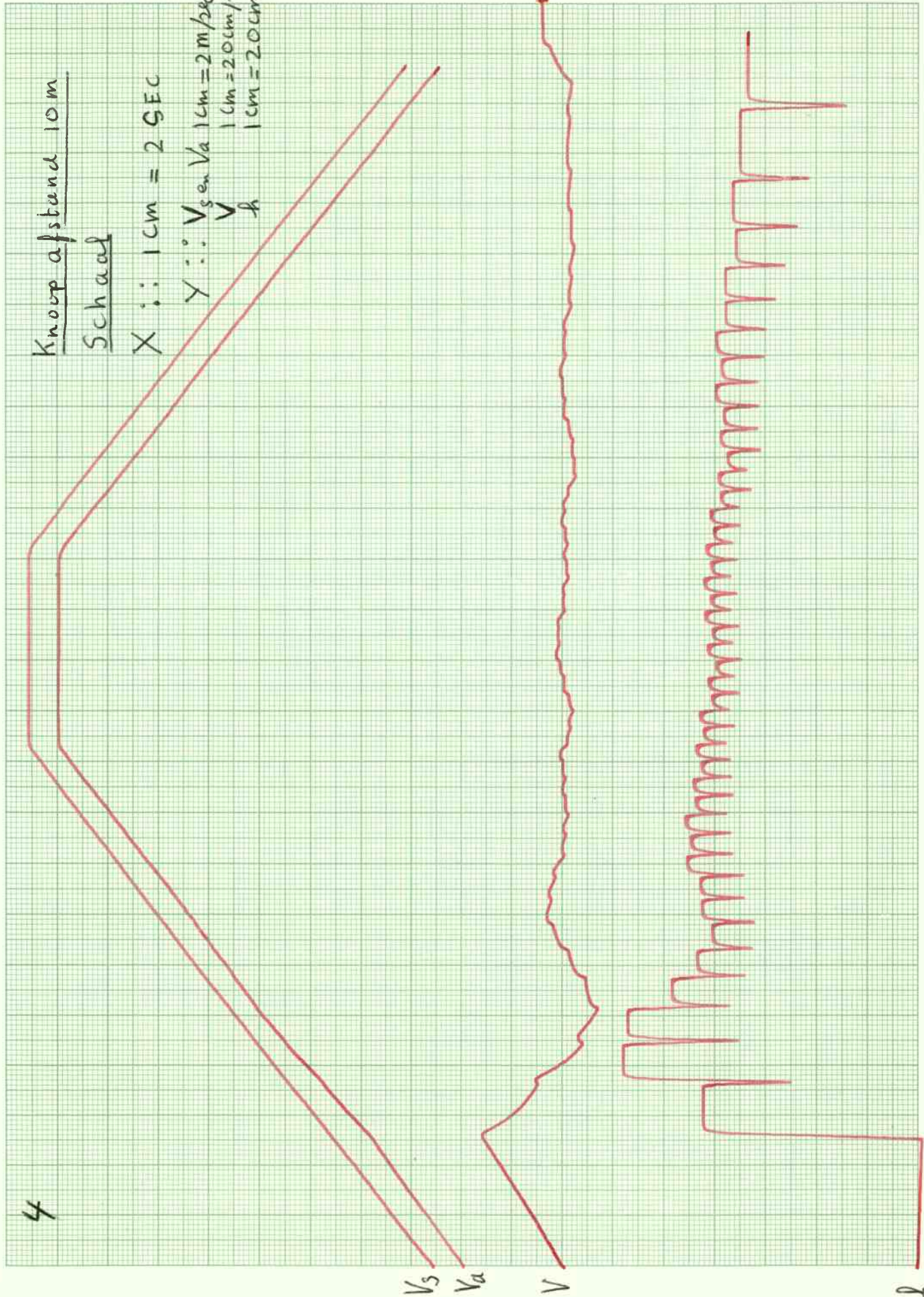
Schaal

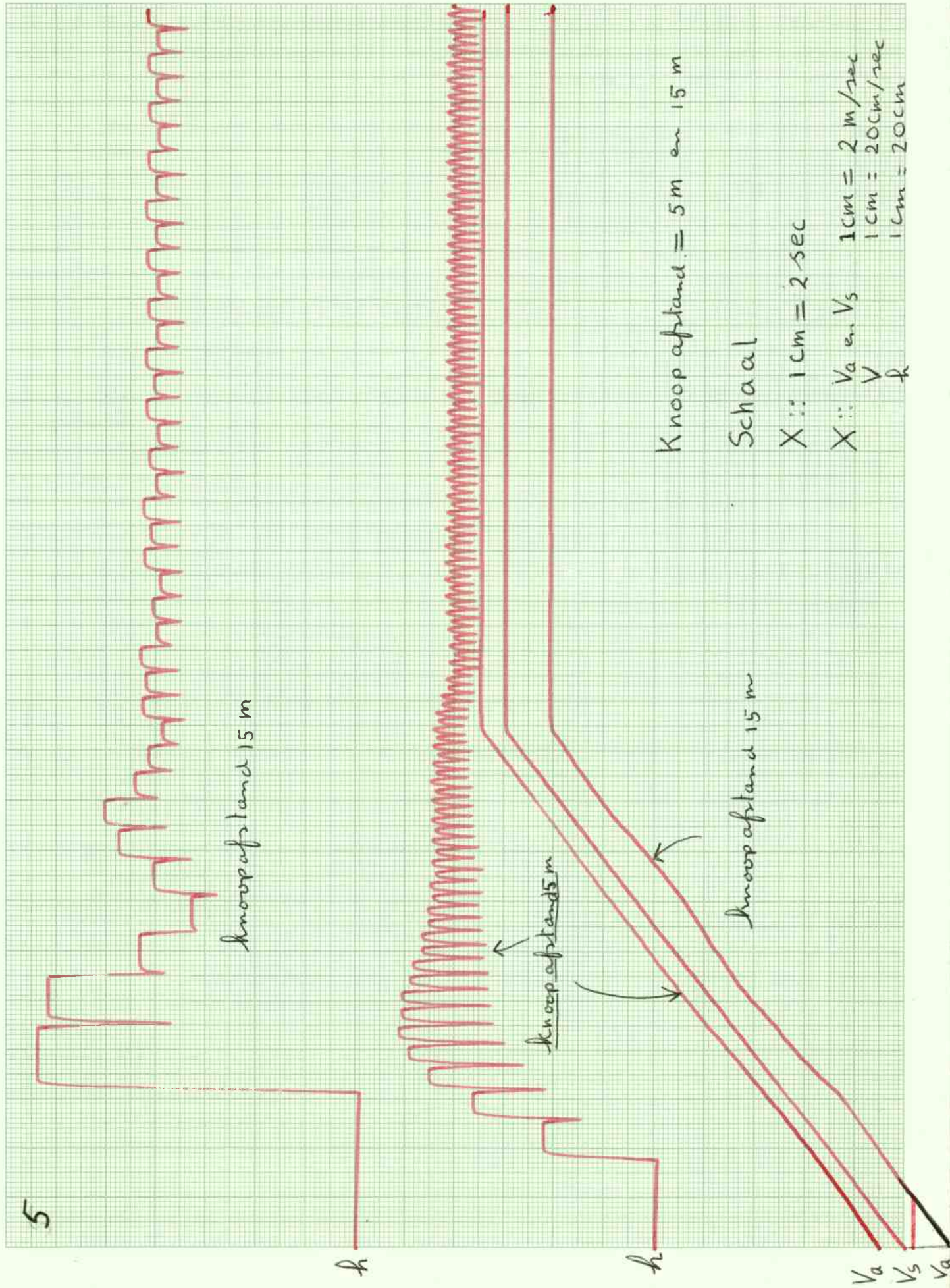
X : : 1 cm = 2 sec

Y : : V_s en V_a 1 cm = 2 m/sec
 1 cm = 20 cm/sec
 h 1 cm = 20 cm



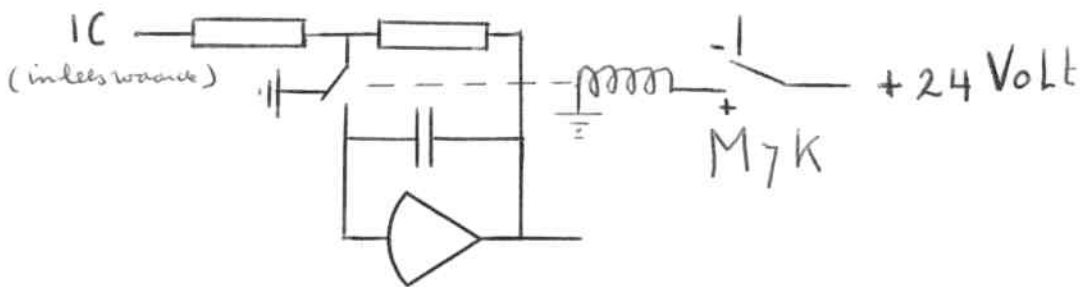
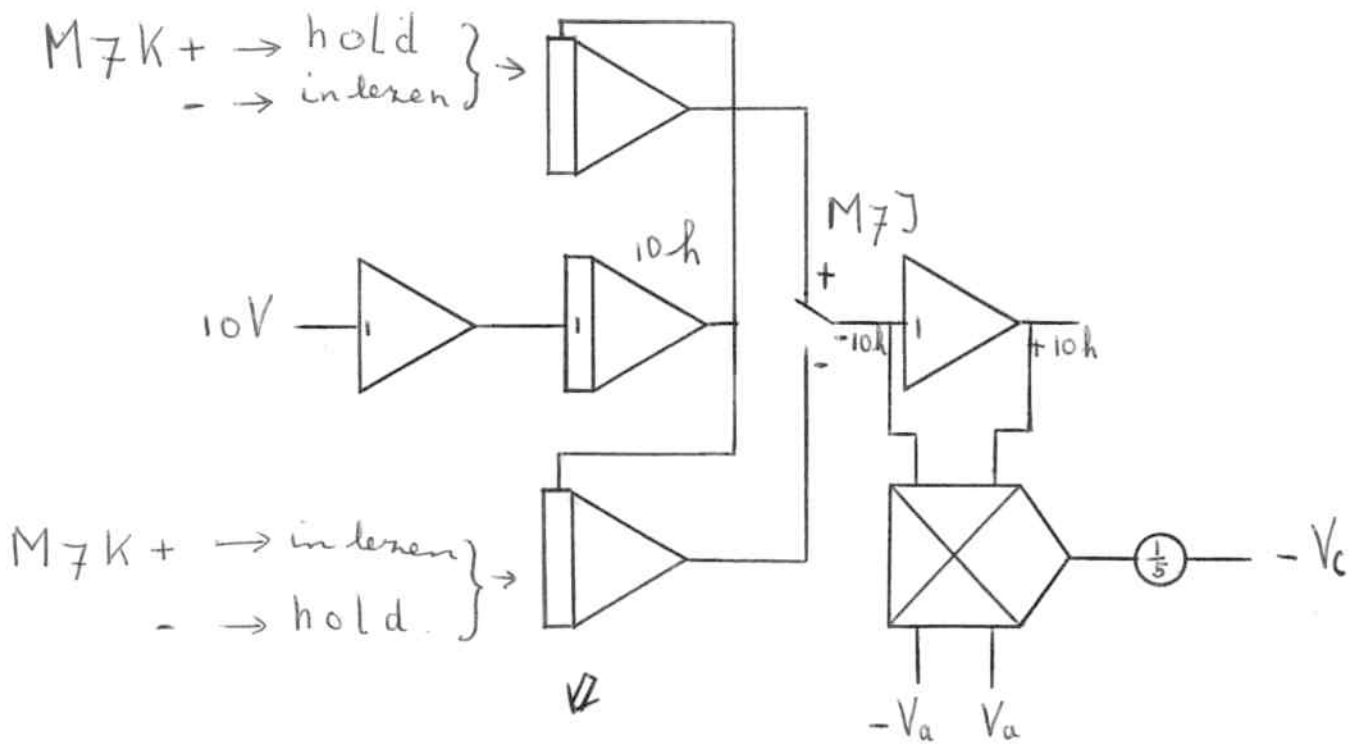
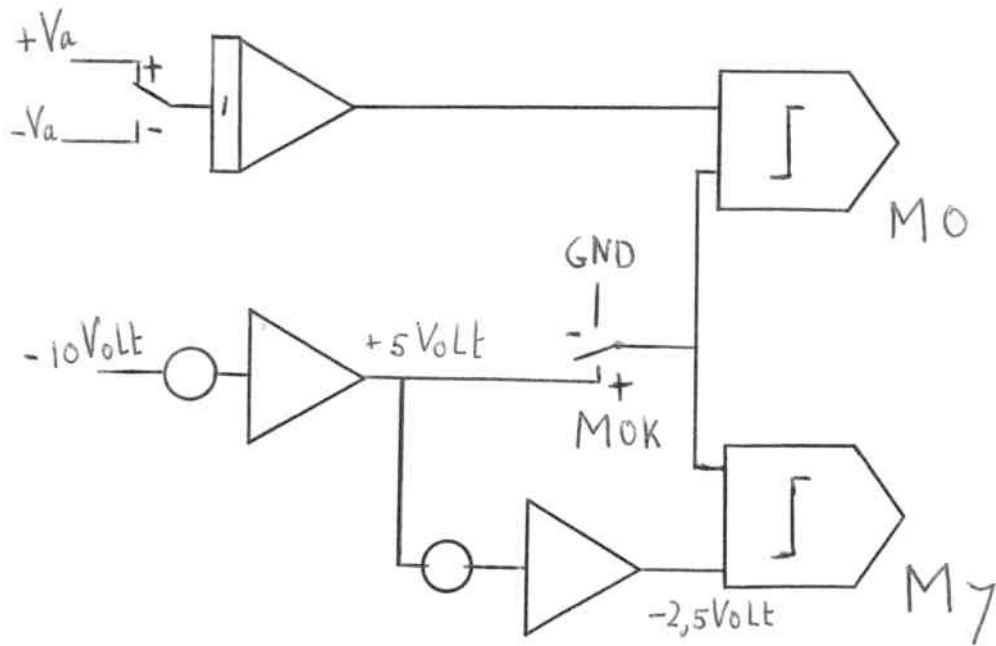




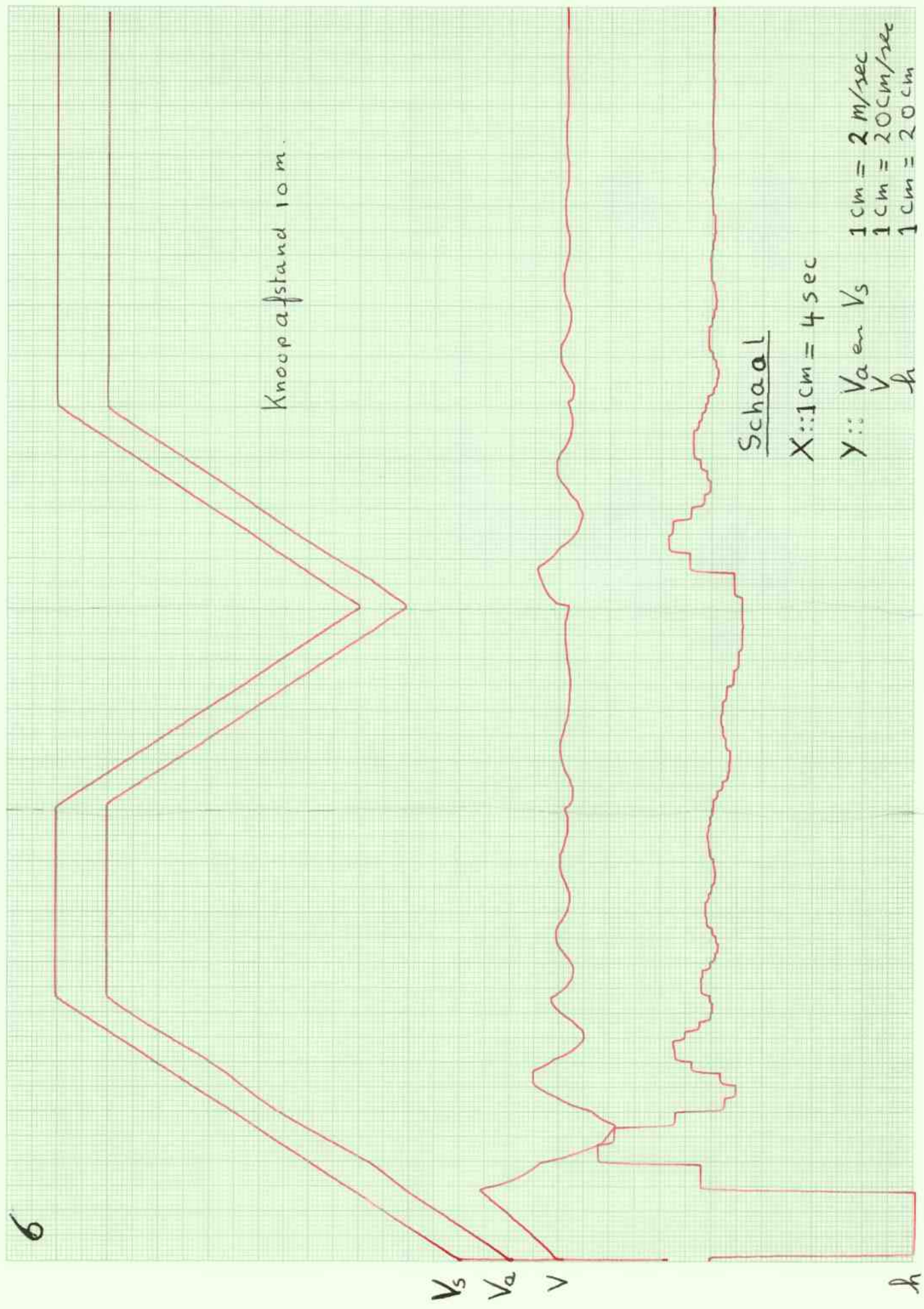


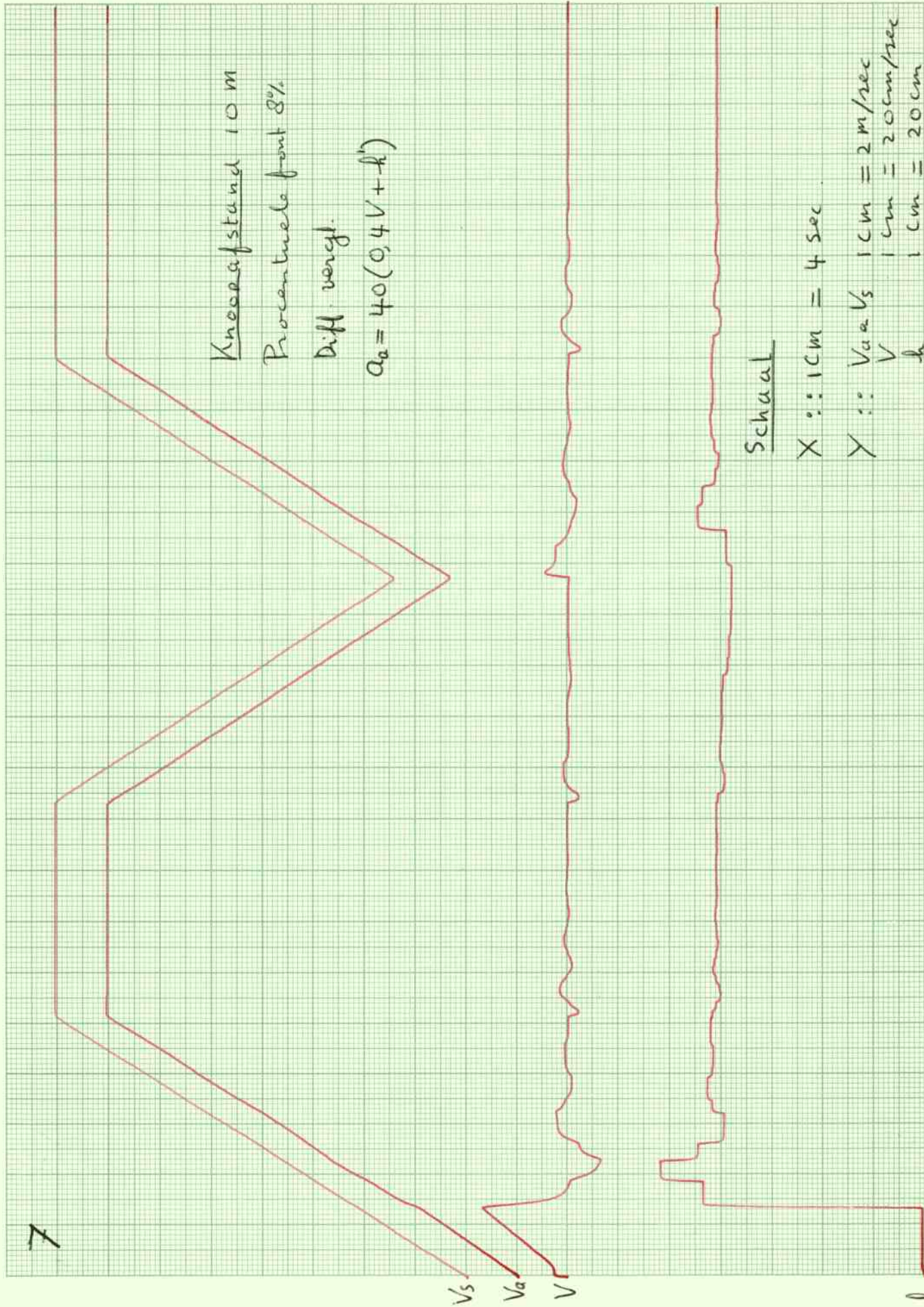
4.3.8 In de voorgaande besproken simulatie is getracht voor de bepaling van v_c (zie schema 3 & 4) een zoveel mogelijk in werkelijkheid te realiseren schema op te bouwen. Hierdoor ontstond nogal een gekompliceerd schema. Bij de volgende simulatie is getracht om met een iets eenvoudiger (in werkelijkheid niet te gebruiken) schema hetzelfde resultaat te bereiken (zie schema 5).

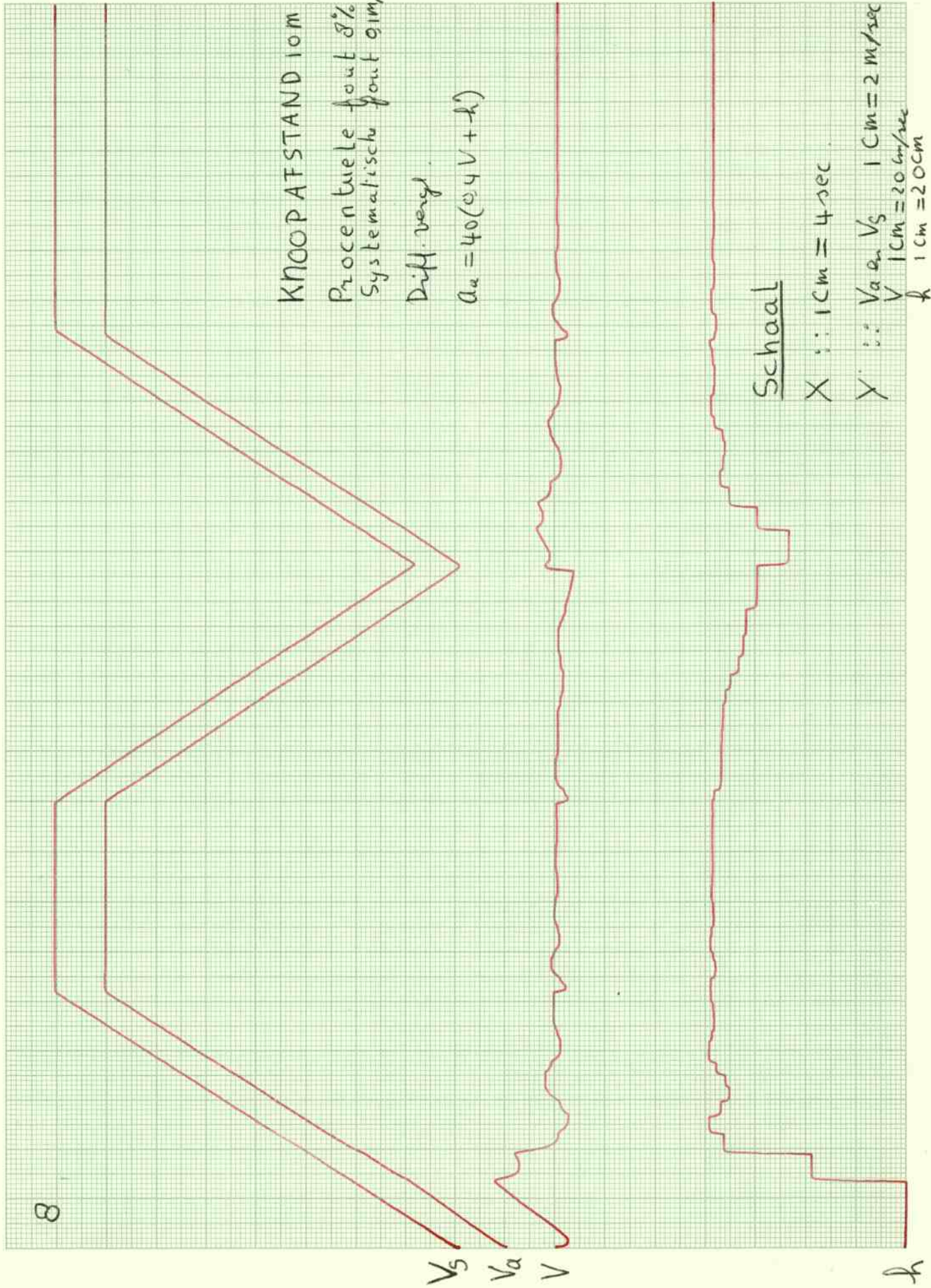
Hierbij wordt op het moment dat de auto een knoop passeert direkt de werkelijke relatieve afstand op dat ogenblik doorgegeven aan de vermeningvuldiger en onthouden. De resultaten zijn opgenomen in de grafieken 6 t/m 9. Voor zover niet anders is aangegeven bij de grafieken is weer uitgegaan van de differentiaalvergelijking $a_a = 30(h' + v)$. In grafiek 8 is naast de procentuele fout nog een systematische fout in de snelheidsmetingen opgenomen. De situatie zoals te zien is in grafiek 9, waar uitgegaan is van de differentiaalvergelijking $100(0,05v + h) = a_a$ is in de praktijk niet te verwezenlijken daar er versnellingen aan de auto worden opgedrongen, die maximaal haalbare versnellingen ver overschrijden.



Schema5







KNOOP AFSTAND 10m

Procentuele fout 8%
Systematische fout 0.1m/sec

Diff. vergl.

$$a_a = 40(e_4 V + h)$$

Schaal

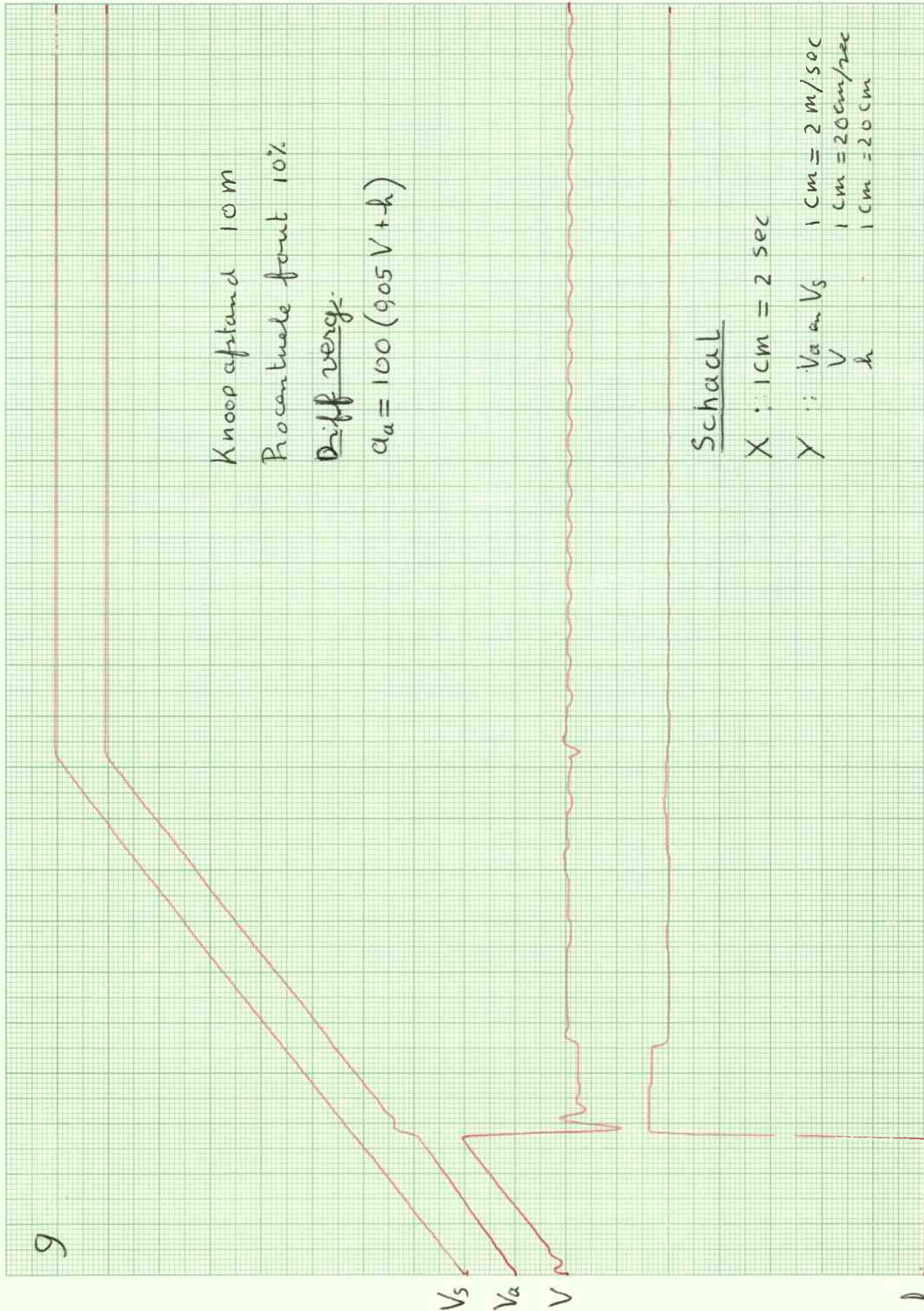
X :: 1cm = 4 sec

Y :: V_a, V_s | 1cm = 2 m/sec
V | 1cm = 20 cm/sec
h | 1cm = 20 cm

8

V_s
V_a
V

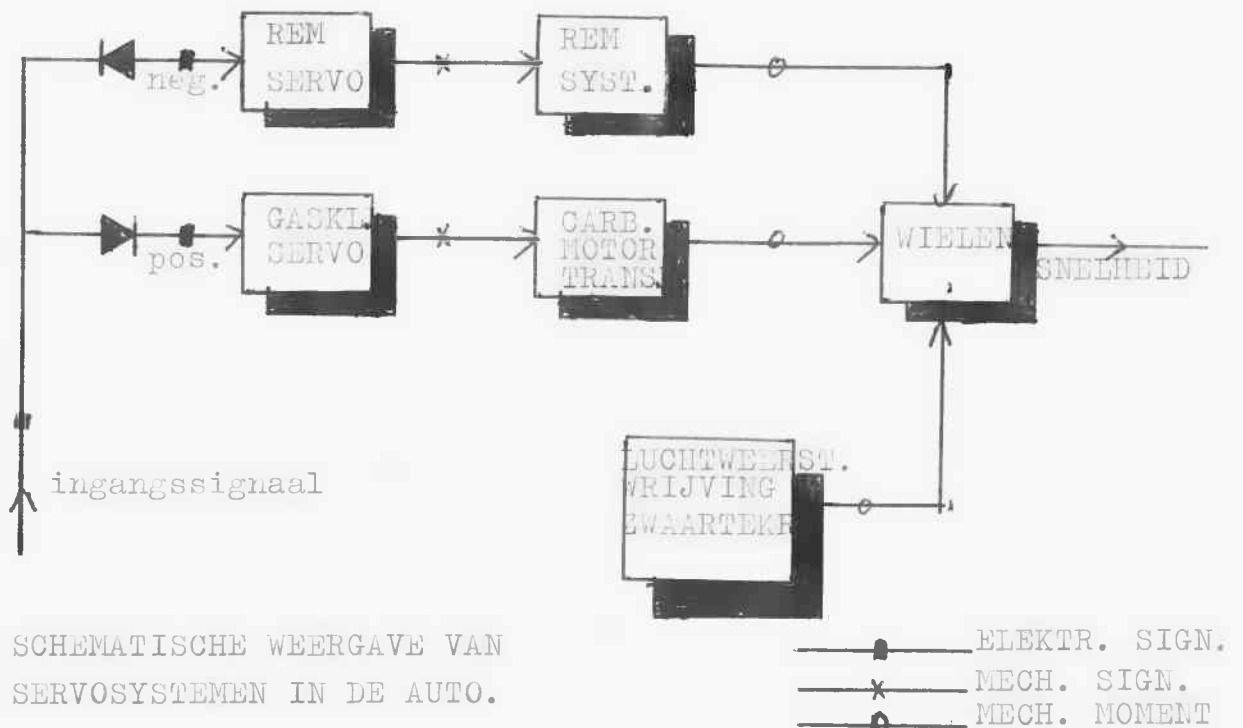
h



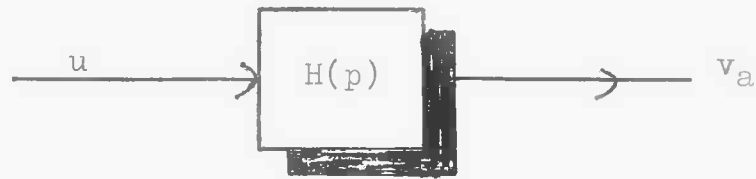
4.4 Het longitudinale regelsysteem.

4.4.1 Enkele gegevens.

Bij het ontwerpen van een regelsysteem dient men allereerst enige informatie over het te regelen proces te bezitten. Het proces, in dit geval een automobiel, wordt geacht voorzien te zijn van twee servosystemen. Deze servo's worden gebruikt om door middel van een elektrisch signaal het gaspedaal resp. het rempedaal te kunnen bedienen. Uiteindelijk zal het de bedoeling zijn, met een enkel elektrisch signaal (bijvoorbeeld tussen -15 V. en +15 V.) de versnelling / vertraging en daarmee de snelheid van de auto te kunnen regelen.



Het tot dusver beschreven systeem wordt het te regelen proces genoemd en schematisch als volgt aangegeven:

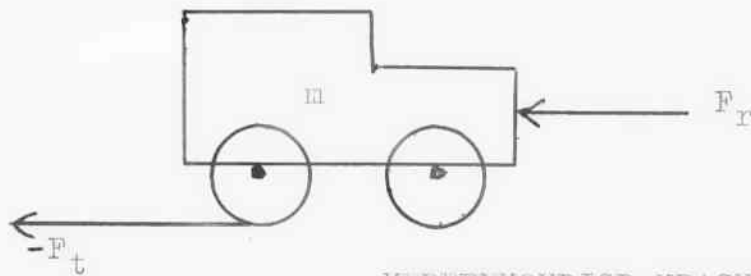


u = ingangssignaal

v_a = snelheid van de auto

HET TE REGELEN PROCES.

Via een simpele afleiding kan men een benadering voor $H(p)$ vinden:



VEREENVOUDIGD KRACHTENSPEL.

Als we stellen dat:

m = het totale gewicht van het voertuig plus lading plus equivalente roterende massa (ten gevolge van motor, transmissie en wielen),

F_t = de versnellingskracht (afkomstig van motor plus transmissie), ($-F_t$ is reactiekracht van weg op voertuig)

F_r = de reactiekracht ten gevolge van lucht- en rolweerstand,

F_a = de resulterende kracht op het voertuig,

u = ingangssignaal , evenredig met de gasklepopening,

c_1, c_2, c_3 : evenredigheidskonstanten,

p = operator d/dt ,

dan geldt bij benadering:

$$F_a = F_t - F_r ,$$

$$F_t = c_1 u - c_2 v_a , \quad (\text{lit. 30})$$

$$F_r = c_3 v_a .$$

Tevens: $F_a = m dv_a / dt = mp v_a .$

Hieruit volgt:

$$\frac{v_a}{u} = \frac{c_1 / (c_2 + c_3)}{mp / (c_2 + c_3) + 1} .$$

Als we nu kiezen:

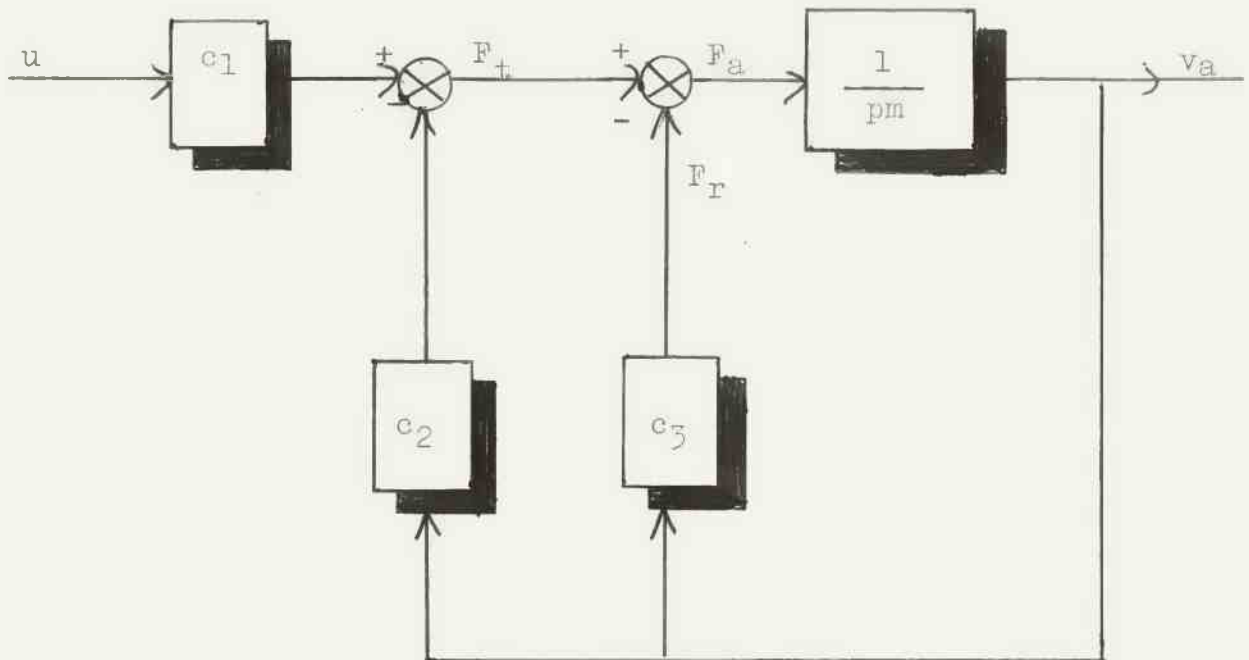
$$K = c_1 / (c_2 + c_3) \quad \text{en} \quad \tau = m / (c_2 + c_3)$$

Dan geldt voor het te regelen proces de volgende benaderde overdracht:

$$\frac{v_a}{u} = K / (p\tau + 1) .$$

Door middel van stapresponsies heeft men kunnen vaststellen, dat de effectieve tijdconstante τ gemiddeld 20 sek. bedraagt. (lit. 30).

Ten opzichte van deze tijdconstante verwaarlozen we die van de onbelaste motor ($\pm \frac{1}{2}$ sek.) en van de gasklepservo ($\pm 0,1$ sek.).



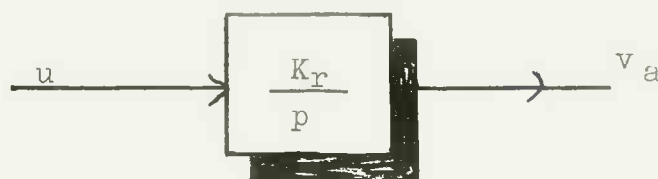
BLOKSCHEMA KRACHTENSPEL.

Men kan uit de geschetste figuur eenvoudig opmaken, dat de overdracht voor een ideale auto zal zijn:

$$H(p) = \frac{1}{pm}$$

Dit stelt dan een auto voor, welke zich voortbeweegt, ongehinderd door reactie- of wrijvingskrachten.

De overdracht van het remsysteem blijkt te zijn: (lit. 30)



K_r = versterkingsfaktor

u = ingangssignaal, evenredig met pedaalkracht

HET REMSYSTEEM.

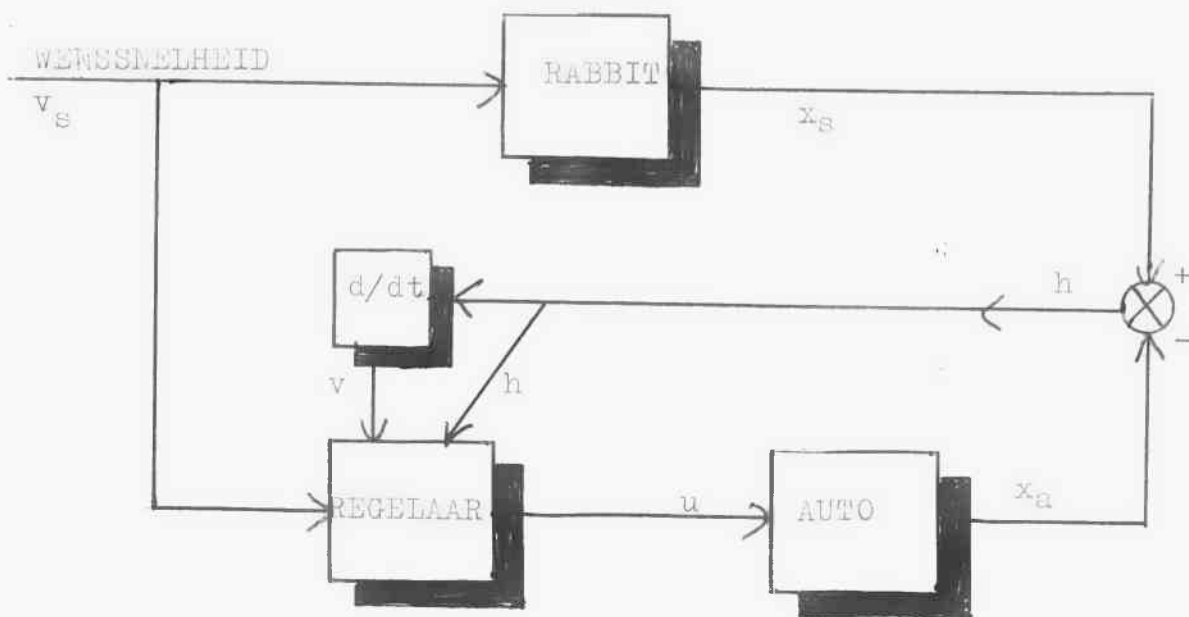
(In de volgende paragrafen 4.4.2 t/m 4.4.4 wordt met het te regelen proces bedoeld de auto exclusief remsysteem).

4.4.2 Doel van het regelsysteem.

Aan de hand van beschikbare informatie wil men een zodanigingangssignaal $u(t)$ produceren, dat ongeacht externe of interne invloeden de auto zich elk moment nauwkeurig op een door het automatisch geleidingssysteem voorgeschreven plaats bevindt. Deze voorgeschreven plaats, de rabbit, beweegt zich normaliter met een konstante snelheid voort, maar kan zich onder bepaalde omstandigheden (invoegen, uitvoegen) ook met een konstante versnelling / vertraging verplaatsen. Voor het rabbit-volgsysteem is het gewenst over de volgende informatie te kunnen beschikken:

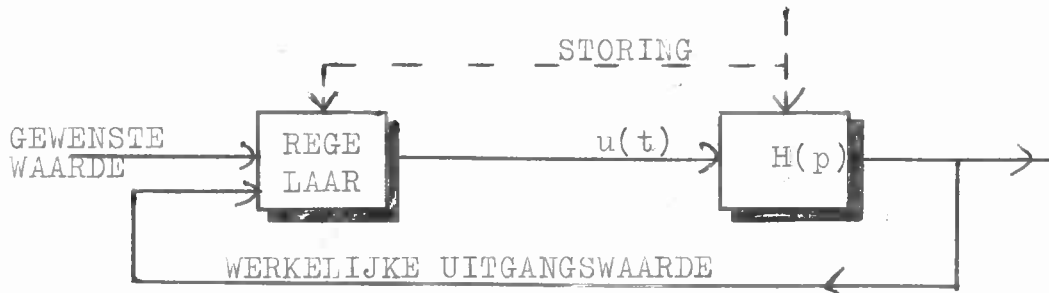
- a) de relatieve snelheid (van de auto tot de rabbit) v ,
- b) de afstand (van de auto tot de rabbit) h .

HET RABBIT-VOLGSYSTEEM.



4.4.3 Optredende beperkingen.

Theoretisch is het gestelde doel uitermate eenvoudig te bereiken door toepassing van resultaten uit de klassieke of optimale regeltheorie. Men heeft een bekend systeem $H(p)$ en op grond van a) de gewenste uitgangsgrootheden, b) de werkelijke uitgangsgrootheden produceert men hetingangssignaal $u(t)$ door middel van een van te voren berekende regelaar. Op deze manier kan men zelfs externe storingen weg regelen, mits zij gemeten en aan de regelaar doorgegeven kunnen worden. Men kan de regelaar zo dimensioneren, dat een of ander criterium geminimaliseerd wordt (b.v. minimum tijdresponsie, minimum energieprobleem). (lit. 26)



EENVOUDIG REGELSYSTEEM.

In werkelijkheid zullen afwijkingen van de mathematisch afgeleide overdracht optreden. Deze kunnen tot gevolg hebben, dat bedoelde theorieën niet zonder meer met succes kunnen worden toegepast. Genoemd kunnen worden :

(4.4.3.1 t/m 4.4.3.8)

4.4.3.1 Geschatte overdracht

De overdrachtsfunctie $H = K / (p\tau + 1)$ is slechts een mathematische benadering van een fysisch proces. Het werkelijke systeem zal dan ook niet geheel overeenkomen met deze benadering, maar in zekere mate mede beïnvloed worden door een aantal tijdconstanten, welke verwaarloosd

worden (zie §4.4.1). Het is dus een hogere orde systeem met als konsekwenties:

- a) kans op instabiliteit bij terugkoppeling,
- b) parametervariatiës in het benaderde mathematisch model.

4.4.3.2 Parametervariatiës

De in de benaderde overdrachtsfunctie aangenomen versterkingsfaktor K en tijdkonstante τ blijken niet konstant te zijn, maar onder andere af te hangen van de snelheid van de auto.

4.4.3.3 Externe stoorinvloeden.

Er treden storingen op, die in praktijk niet direkt gemeten kunnen worden (wind, helling).

4.4.3.4 Meetruis.

De afgelegde weg kan men meten door het waarnemen van referentiepunten op de rijbaan. Deze vorm van meten geeft slechts op bepaalde momenten informatie (bemonsterde informatie), terwijl voor tussengelegen momenten een schatting gemaakt zal moeten worden. Dit introduceert een zekere fout, welke wordt opgevat als een vorm van storing, de meetruis. De momentane snelheid kan direkt gemeten worden door middel van de snelheidsmeter in de auto. Deze meting introduceert ook een fout ten gevolge van optredende slip tussen wiel en wegdek, en ten gevolge van het niet konstant zijn van de wieldiameter. De centrifugale kracht vergroot namelijk de wieldiameter bij hoge snelheden. Ook hierbij dus meetruis.

4.4.3.5 Stabiliteit.

De minimum afstand waarmee in het automatisch geleide-systeem de auto's achter elkaar zullen kunnen rijden, is in sterke mate afhankelijk van de lokale stabiliteit. Hieronder wordt verstaan (zie § 3.5.1) de stabiliteit van de positie van elk voertuig ten opzichte van de positie van de rabbit, zowel bij konstante snelheid/versnelling als bij verandering in de wenssnelheid. Behalve voor de minimum afstand tussen de auto's, is de nauwkeurigheid waarmee elke auto zijn rabbit kan volgen ook belangrijk voor de systeemveiligheid. Bij te grote afwijkingen van de gestelde norm, zal het systeem de auto defect achten en deze zal vervolgens uit het automatisch geleidesysteem verwijderd moeten worden.

4.4.3.6 Niet lineairiteit.

De rem- en gasklepservo's zullen slechts ingangssignalen van beperkte grootte kunnen aanvaarden. Daarboven treedt verzadiging op. Ook motor en transmissie van de auto leggen beperkingen op aan de maximaal bereikbare versnelling/vertraging en snelheid. Aangezien in verband met het comfort de maximum versnelling/vertraging toch nooit geëist worden kan, legt dit punt onder normale rijcondities geen zware beperkingen op aan het regelsysteem.

4.4.3.7 Ingewikkeldheid van het ontwerp.

Een meer economische dan technische beperking. Als men grote nauwkeurigheid of flexibiliteit van het ontwerp vraagt kan deze beperking een rol gaan spelen. Ook de betrouwbaarheid eist een eenvoudig, gemakkelijk te onderhouden regelsysteem. Uiteindelijk zal een kom-

promis moeten worden gezocht of een keuze bepaald tussen een duur maar universeel regelsysteem, of een relatief goedkoop maar beperkt en specifiek regelsysteem.

4.4.3.8 Komfort.

Dit legt beperkingen op aan de maximaal toe te laten versnelling/vertraging, die onder normale (uitgezonderd nood-) situaties toegepast mag worden. Hierbij blijkt niet zozeer de absolute grootte van de versnelling alswel de veranderlijkheid of de herhalingsfrequentie een grote rol te spelen. Konstante versnellingen met grote absolute waarde kunnen comfortabel geacht worden, terwijl plotseling optredende of herhaaldelijk van teken wisselende versnellingen reeds bij veel kleinere absolute waarde als onaanvaardbaar geklassificeerd kunnen worden. (lit. 1) De maximale absolute waarden voor versnelling/vertraging zullen in normale situaties liefst kleiner dan 0,05 g moeten blijven.

Al deze afwijkingen van de voor een ontwerp ideale situatie, zullen elk met een zekere gewichtsfactor meegenomen moeten worden in het uiteindelijke ontwerp.

4.4.4 Mogelijkheden tot verbetering van de overdracht.

Als voornaamste afwijkingen van de ideale overdrachtsfunctie mogen de in §4.4.3 genoemde

geschatte overdracht,

parametervariaties,

externe storingen

beschouwd worden. Het is bijzonder moeilijk om een regelmatig te ontwerpen voor een proces, dat in sterke mate behept is

met deze drie onaangename eigenschappen. Daarom zal worden getracht allereerst deze invloeden zoveel mogelijk te ontkrachten, daarbij de stabiliteit niet uit het oog verliezend. Verder in § 4.4.3 opgesomde beperkingen zullen dáárna bij de regelaar ingekalkuleerd moeten worden.

Ter vereenvoudiging van de overdrachtsfunctie van de auto staan ons nu drie mogelijkheden open:

4.4.4.1 tegenkoppeling,

4.4.4.2 kompensatie,

4.4.4.3 adaptatie.

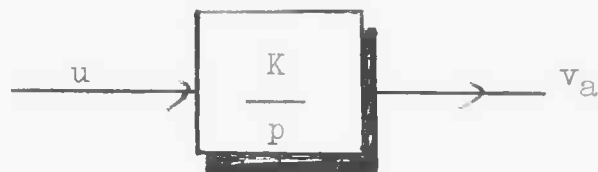
Voordat deze methoden toegepast kunnen worden moeten we een antwoord vinden op de vraag, naar welke "ideale" overdracht toe te werken. Normaal gesproken zou de ideale overdracht van het te regelen proces identiek 1 moeten zijn:



Bij deze overdracht zou men echter een versnelling moeten realiseren door u als een lineair toenemende functie aan te bieden. In dat geval is het eenvoudiger, een ideale overdracht van de vorm $1/p$ na te streven. Hierbij heeft men slechts een konstant signaal u aan te bieden om een versnelling te realiseren:



Deze vorm van overdracht blijkt overeen te komen met die van een massa in een wrijvingsloze omgeving (zie § 4.4.1). Verder is het prettig, dat in dit geval de overdracht van het remsysteem naar de snelheid v_a dezelfde vorm heeft, als de overdracht van de gasklep naar de snelheid v_a . We zullen dus streven naar een totale overdracht van het te regelen proces in de vorm:



K = versterkingsfaktor

HET IDEALE PROCES.

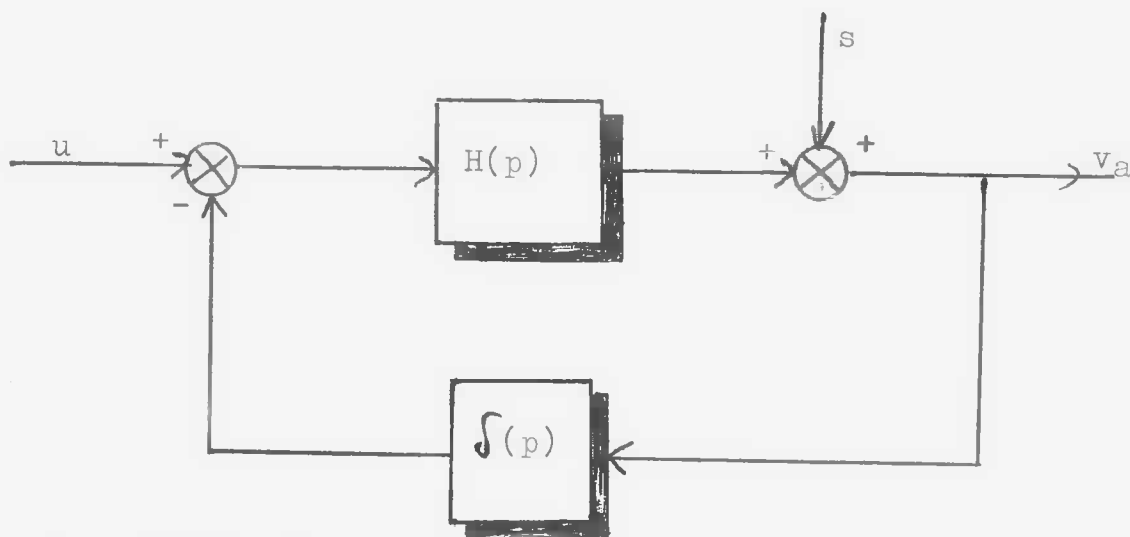
Deze zelfde overdracht, maar dan naar de afgelegde weg in plaats van naar de snelheid heeft de vorm:



4.4.4.1 Tegankoppeling.

Dit is een van de eenvoudigste methoden om onaan-

gename eigenschappen in een overdracht kwijt te raken. Men voert door een filter met de overdrachtsfunctie $\mathcal{S}(p)$ een deel van het uitgangssignaal met een negatief teken terug naar de ingang van het proces:



s = extern stoorsignaal

TEGENKOPPELING.

Er geldt nu

$$v_a = \frac{uH + s}{1 + \mathcal{S}H}$$

De responsie op storingen blijkt nu te zijn

$$\frac{v_a}{s} = \frac{1}{1 + \mathcal{S}H}$$

Als de absolute waarde van deze overdracht groter dan 1 is, zullen we de storingen onverzwakt, of zelfs versterkt in het uitgangssignaal terugvinden. Dit is natuurlijk zeer ongewenst. Daarom zou het ideaal zijn als $v_a/s \ll 1$ hetgeen benaderd kan worden door $\mathcal{S}H \gg 1$ te kiezen.

De responsie op het ingangssignaal:

$$\frac{v_a}{u} = \frac{H}{1 + \delta H}$$

De ideale overdracht $v_a/u = K/p$ kan, als we alleen tegenkoppeling toepassen, niet direkt verkregen worden. De beste nog haalbare benadering zal zijn $v_a/u \approx 1/\delta$ en wel in het geval $\delta H \gg 1$.

Het bereikte voordeel is, dat de overdracht v_a/u zo goed als niet meer afhankelijk is van de oorspronkelijke overdracht H .

De gevoeligheid ten aanzien van parameter variaties.

Stel

$$H = \frac{K}{p\tau + 1}$$

dan wordt na tegenkoppeling de responsie op een ingangssignaal:

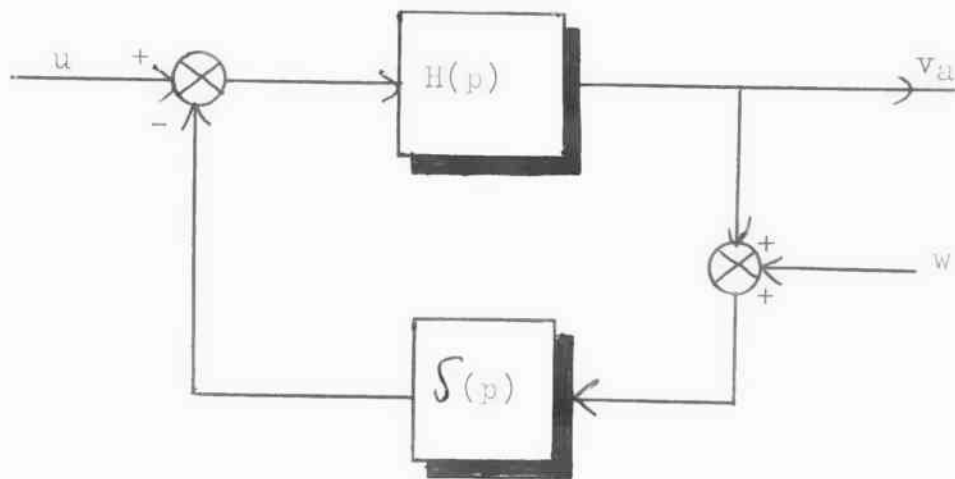
$$\frac{v_a}{u} = \frac{K''}{p\tau'' + 1} \quad \text{waarin}$$

$$K'' = \frac{K}{\delta K + 1} \quad \text{en} \quad \tau'' = \frac{\tau}{\delta K + 1}$$

Door $\delta K \gg 1$ te maken kan men dus de invloed van de oorspronkelijke K en τ op het uitgangssignaal zeer sterk verkleinen en daarmee de invloed van parameter variaties. Hieruit blijkt,

dat dezelfde remedie geldt voor het afzwakken van storingen zowel als parametervariatiës.

De responsie op meetruis, die men introduceert tijdens het tegenkoppelen, kan op de volgende wijze in rekening gebracht worden.



MEETRUIS.

De overdracht van de meetruis naar het uitgangssignaal is:

$$\frac{v_a}{w} = \frac{S H}{S H + 1}$$

Als we nu $S H \gg 1$ maken, zoals gunstig bleek ter onderdrukking van storingen en parametervariatiës, dan blijkt deze overdracht $v_a/w \approx 1$ te worden, dus zeer ongunstig voor het onderdrukken van meetruis. Deze zou dan onverzwakt in het uitgangssignaal terug te vinden zijn. Er zal dus een compromis gezocht moeten worden tussen het onderdrukken van storingen en parametervariatiës enerzijds en het onderdrukken

van meetruis anderzijds. Zonder meer vergroten van de rondgaande versterking $\mathcal{S}H$ ter vermindering van parameter-variantie en storingsinvloeden brengt nog een gevaar met zich mee. Zoals reeds eerder opgemerkt (§ 4.4.3.1) zal de werkelijke overdrachtsfunctie van de auto aanzienlijk meer tijdconstanten bevatten, dan in de mathematische benadering

$$H = \frac{K}{p\tau + 1}$$

wordt aangenomen. De konsekwenties hiervan kunnen we inzien bij beschouwing van een hypothetisch proces met drie tijdconstanten:

$$H = \frac{K}{(p\tau_1 + 1)(p\tau_2 + 1)(p\tau_3 + 1)}$$

waar een tegenkoppeling $\mathcal{S}(p) = \mathcal{S} = \text{konstant op}$ wordt aangebracht. De totale overdracht van het tegengekoppelde systeem zal nu worden

$$\frac{v_a}{u} = \frac{H}{\mathcal{S}H + 1}$$

uitgewerkt

$$\frac{v_a}{u} = \frac{K'}{(p\tau_1 + 1)(p\tau_2 + 1)(p\tau_3 + 1) + \mathcal{S}K},$$

hetgeen te herleiden is tot de vorm

$$\frac{v_a}{u} = \frac{K'}{(p\tau'+1)(ap^2+bp+c)}$$

Hierin zijn a, b en c konstanten, wier grootte afhankelijk is van de grootte van \mathcal{S} .

Dan geldt:

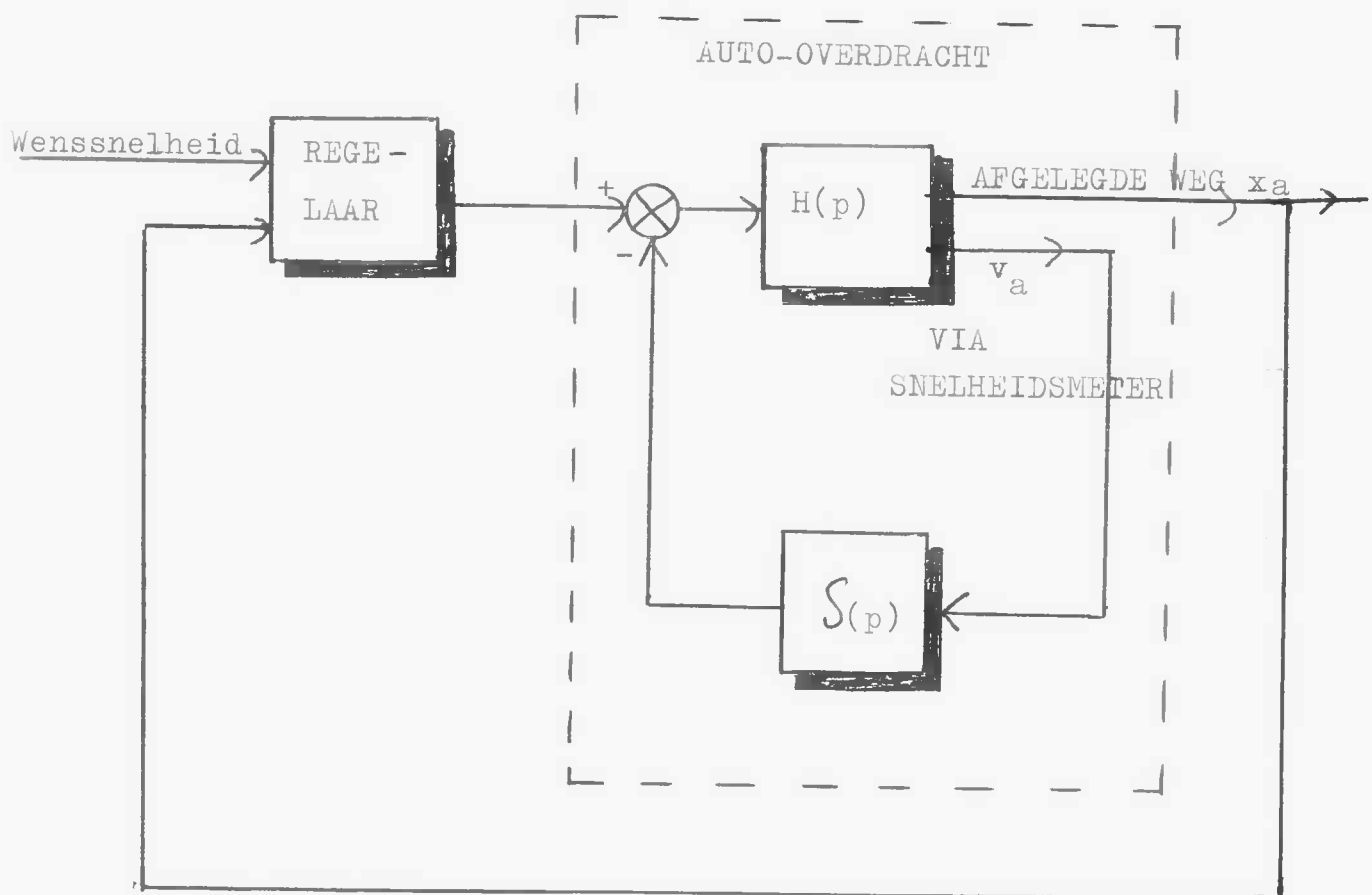
$$\frac{v_a}{u} = \frac{K'}{(p\tau'+1)\left(p + \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right)\left(p + \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right)}$$

Zodra $b^2 - 4ac$ kleiner dan nul is, worden twee van de drie polen van het gesloten systeem complex. Dit uit zich in overshoot. Zodra $b/2a$ kleiner dan nul is, treden de twee complexe polen het rechterhalfvlak van het p-vlak binnen, dat wil zeggen de twee complexe polen krijgen positieve reële delen. Volgens de klassieke regeltechnische definitie van stabiliteit is het systeem op dat moment instabiel geworden. (lit. 26). Men kan \mathcal{S} dus niet ongelimiteerd opvoeren. In de praktijk blijkt het wél haalbaar een redelijk eenvoudige en konstante overdracht te verkrijgen door middel van tegenkoppeling:

$$H = \frac{K''}{p\tau''+1}$$

Volgens Fenton (lit. 11) ligt de minimum haalbare waarde voor de tijdkonstante τ " in de orde van 3 sek. De enige moeilijkheid, die hierbij nog opgelost dient te worden, is vanaf welk punt men terugkoppelt. De twee mogelijkheden zijn: via de snelheidsmeter of via de weg. Daar deze terugkoppeling alleen als tegenkoppeling ter verbetering van de auto-overdracht gebruikt wordt, lijkt het verstandig om via de snelheidsmeter terug te koppelen. Terugkoppelen via de weg maakt namelijk een extra differentiatie noodzakelijk, waarbij nog komt, dat informatie over de afgelegde weg slechts bemonsterd ter beschikking staat.

TEGENKOPPELEN VIA SNELHEIDSMETER.



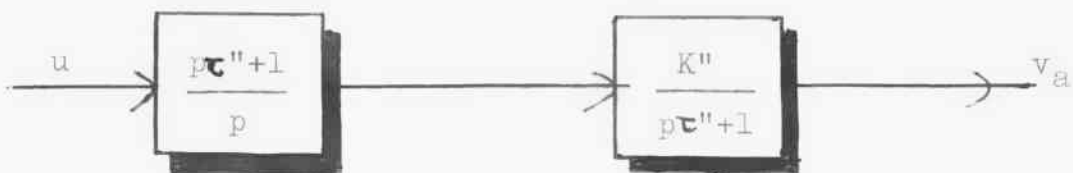
4.4.4.2 Kompensatie.

Als het te regelen proces een ongewenste, maar niet aan parameter variaties onderhevige vorm van overdrachtsfunctie bezit, kunnen we met polen- en nulpuntenkompensatie naar een ideale overdracht van het proces toewerken. Deze methode berust op het neutraliseren van polen in de procesoverdracht, door nulpunten uit het kompensatienetwerk. Evenzo nulpunten door polen. Een eis hierbij is, dat de te neutraliseren polen c.q. nulpunten niet veel variëren. Daarom is deze methode in ons geval slechts succesvol toe te passen, nadat door middel van tegenkoppeling aan deze eis voldaan werd.

We willen van

$$\frac{v_a}{u} = \frac{K''}{p\tau''+1} \quad \text{naar de vorm} \quad \frac{v_a}{u} = \frac{K''}{p} .$$

Dit is te bereiken door middel van een kompensatienetwerk met de overdracht $(p\tau''+1)/p$:



KOMPENSATIE.

De combinatie van tegenkoppeling met compensatie levert dus theoretisch de ideale overdrachtsfunctie. Uit simulaties (zie appendix A) en proefnemingen (lit. 11; 30) blijkt deze combinatie, aangevuld met een regelaar, een regelsysteem met uitstekende resultaten op te leveren.

Als voordeel van deze gekombineerde methode mag de eenvoud genoemd worden. Als nadeel kan gelden, dat deze methode erg autotype-gebonden is. Voor elke auto zal het hele systeem opnieuw uitgerekend moeten worden, aan de hand van experimenteel te bepalen waarden van K'' en τ'' .

4.4.4.3 Adaptatie

Een andere methode om een proces te regelen, waarvan de overdrachtsfunctie niet precies bekend is en waarin parametervariëaties optreden, is adaptatie. Interessant is het volgende citaat van Truxal (lit. 27): "Adaptive control has been viewed as the instrumentation realization of a prime characteristic of the human being in a control task. Just as the classic example of feedback control is the human being extending his hands to pick up a pencil from the table, the universal principle of adaptive control is the human being steering an automobile. The driver continually injects small variational signals in the steering wheel in order to maintain the "feel of the road and car"; i.e. the driver is continually measuring the dynamics of the process to be controlled, in order that he may be prepared to effect optimum control when input-signals arise (through the eye)".

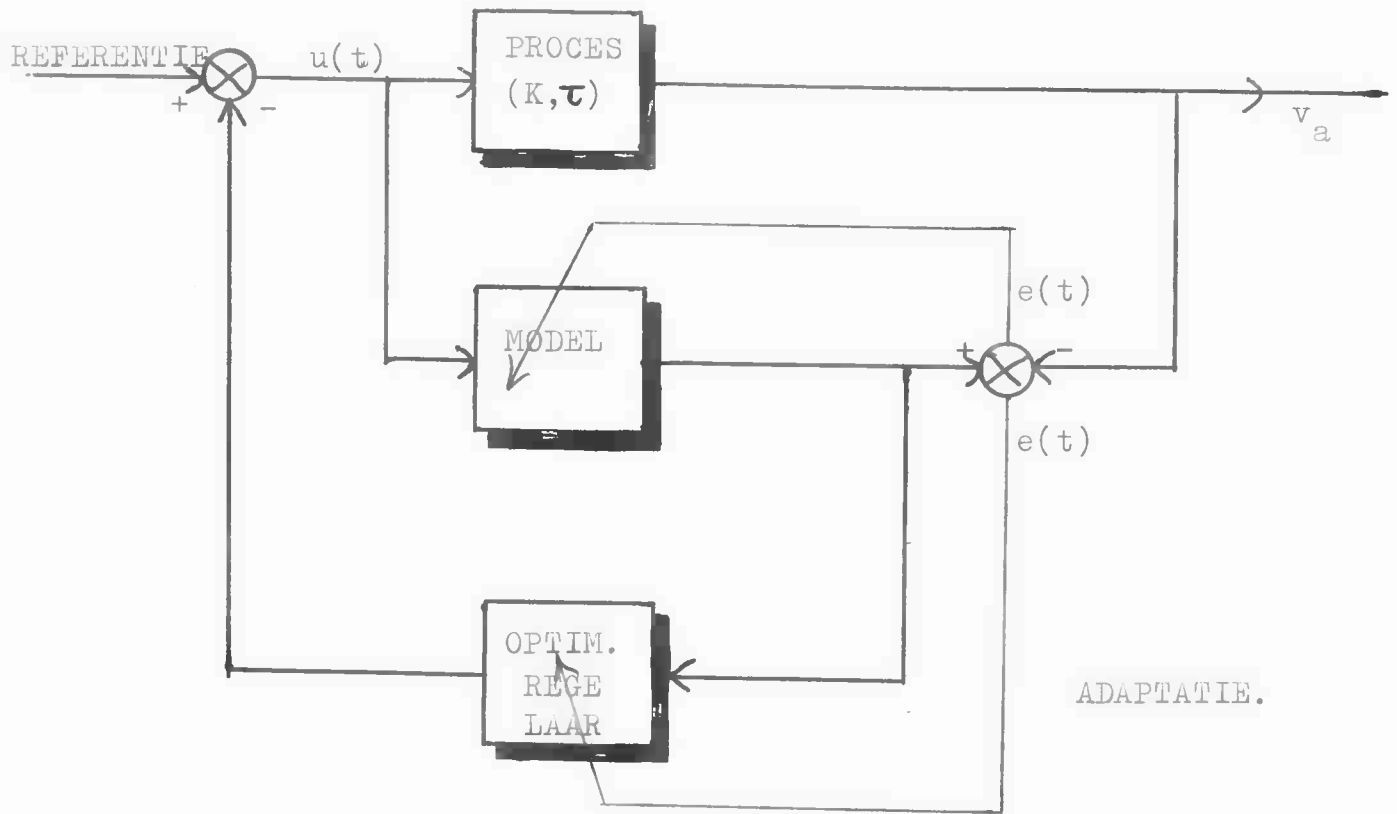
Adaptatie wil zeggen een vorm van regelsysteem, waarin de dynamische eigenschappen van de regelaar veranderen, afhan-

kelijk van veranderingen in het uitgangssignaal ten gevolge van parametervariatië of externe storingen. Het adaptende regelsysteem bestaat in het algemeen uit een model en een optimale regelaar. Het model is een schatting van het te regelen proces. De optimale regelaar kan het model terugbrengen van een begintoestand (opgetreden na bijvoorbeeld een externe storing) naar de gewenste toestand, en daarbij een of ander criterium minimaliseren. Het signaal $u(t)$, dat geproduceerd wordt door de optimale regelaar, wordt zowel aan het model als aan het werkelijke proces (de auto) toegevoerd. Uit het verschil van de reacties van het model en het proces wordt een foutsignaal $e(t)$ gedestilleerd, dat informatie bevat over parametervariatië of storingen. Met behulp van dit signaal kan een model bijgeregeld worden, zodat het beter aansluit bij de momentane overdracht van het proces (identifikatie). Ook is het mogelijk met behulp van dit signaal onmiddellijk het proces bij te regelen, door het toe te voeren aan de optimale regelaar. De bedoeling is een zodanige korrigerende van model c.q. regelaar te bewerkstelligen, dat het foutsignaal $e(t)$ zo klein mogelijk wordt.

Aangezien de auto bij benadering de overdracht

$$\frac{K}{p\tau + 1}$$

bezit, zal de overdracht van het model ook van deze vorm moeten zijn. De onbekenden zijn K en τ .



Een ruwe schatting van deze parameters is niet moeilijk. De vraag is nu hoe we informatie kunnen verkrijgen over de aktuele waarden van deze parameters. Een mogelijke oplossing van deze vraag kan gevonden worden door toepassing van gevoeligheidsmodellen. Hiermee gewapend kunnen we direkt uit het uitgangssignaal van het proces het foutsignaal $e(t)$ verkrijgen, in de vorm van een relatieve gevoeligheidscoëfficiënt. Als we geïnteresseerd zijn in parameter τ , terwijl het uitgangssignaal v_a is, dan is de relatieve gevoeligheidscoëfficiënt

$$e_{\tau}(t) = \tau \frac{\partial v_a}{\partial \tau} \quad \text{evenzo} \quad e_K(t) = K \frac{\partial v_a}{\partial K} \quad (\text{lit. 32})$$



GEVOELIGHEIDSKOEFFICIENTEN.

Een voordeel van deze methode is, dat er een vorm van identificatie optreedt, welke het mogelijk maakt op verschillende typen auto's dezelfde regelaar te plaatsen. De regelaar past zich dan aan bij de auto. Dit kan een belangrijk argument tegen de kompensatie- en terugkoppelingsmethode zijn, vooral als het gaat om massaproductie van standaardregelaars, omdat we voorlopig nog niet af zijn van de grote verscheidenheid in merken, maar ook in typen automobielen (vrachtwagens, personenwagens).

Een ander voordeel van deze methode is het feit, dat de terugkoppeling van de uitgangsgrootte van het proces (de auto) slechts wordt benut als korrigerende faktor. Het ingangssignaal $u(t)$ wordt afgeleid uit de toestand van het model, hetgeen neerkomt op een schatting van de toestand van het proces. Dit zou terugkoppeling via de snelheidsmeter overbodig maken, men kan dan volstaan met het (bemonsterde) signaal teruggekoppeld via de weg. De vrij grote ingewikkeldheid van adaptatie kan als een nadeel aangetekend worden.

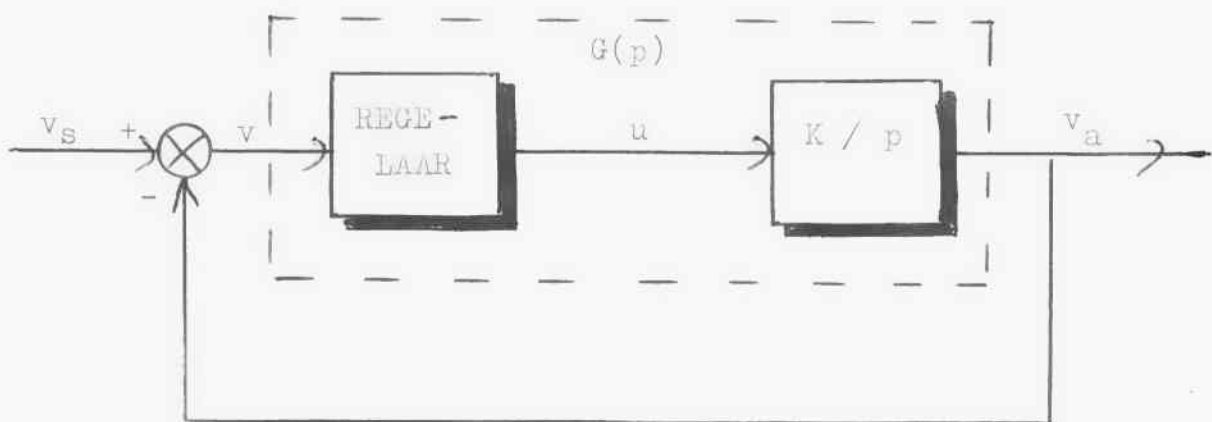
4.4.5 De optimale regelaar.

De functie van de regelaar in het regelsysteem zou men zich kunnen voorstellen door te denken, dat men een schijnwerper gericht moet houden op een met konstante snelheid voortbewegend, of konstant versnellend objekt. Bij het ontwerpen van een regelsysteem gaan we uit van

óf een proces dat na terugkoppeling en kompensatie een bekende eenvoudige en konstante overdrachtsfunctie heeft,

óf zoals bij adaptatie, van een model van het proces, waarbij informatie over parametervariatiën in het proces bekend is.

De mogelijke referentiesignalen (snelheid, versnelling van de rabbit) stellen eisen aan het ontwerp van de regelaar. Om de invloed van de verschillende ingangssignalen te bestuderen, staan ons de statische fout-koëfficiënten ter beschikking.



Het referentiesignaal v_s kan de volgende vorm aannemen:

- a) Stapfunctie, dat wil zeggen de auto wordt geacht met konstante snelheid te gaan rijden,

- b) lineair toenemende funktie, dat wil zeggen de auto wordt geacht een konstante versnelling te realiseren.

Wil men de positie van de auto zoveel mogelijk gelijk laten zijn aan de positie van de rabbit, dan zal het foutsignaal $v(t)$, het snelheidsverschil tussen de auto en de rabbit, zeker gemiddeld nul moeten zijn. Dit stelt eisen aan de totale overdracht $G(p)$ van de regelaar plus auto (K/p). Er geldt:

$$v = v_s - Gv$$

$$v = \frac{v_s}{1 + G}$$

Is v_s een (eenheids)stapfunctie, dan geldt:

$$v = \frac{1}{1 + G} \cdot \frac{1}{p}$$

Volgens het eindwaardetheorema (lit. 27) kan men de fout in de blijvende toestand verkrijgen door

$$e_{ss} = \lim_{p \rightarrow 0} pv = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{1}{1 + G} \cdot \frac{1}{p} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G} .$$

Als G geen enkele zuivere integratie bevat (dat wil zeggen geen pool voor $p = 0$) dan wordt

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K} .$$

De auto zal nu nooit de gewenste snelheid bereiken.
Bezit G een minstens één zuivere integratie, dan wordt

$$e_{ss} = 0 ,$$

dat wil zeggen uiteindelijk wordt precies de gewenste snelheid bereikt.

Voor een lineair toenemende (eenheids)funktie v_s , (kan slechts gedurende beperkte tijd achtereen optreden), wordt dit:

$$v_s = 1/p^2$$

$$v = \frac{1}{1 + G} \frac{1}{p^2}$$

$$e_{ss} = \lim_{p \rightarrow 0} pv = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1 + G}$$

Bezit G geen enkele zuivere integratie, dan zal $e_{ss} \rightarrow \infty$.
Dat wil zeggen het snelheidsverschil tussen auto en rabbit wordt steeds groter.

Bezit G één zuivere integratie, dan zal $e_{ss} = 1/K$, dat wil zeggen de auto houdt uiteindelijk een konstant snelheidsverschil met de versnellende rabbit, dit houdt in, dat de afstand tot de rabbit steeds groter wordt.

Bezit G twee of meer zuivere integraties dan zal $e_{ss} = 0$.
In ons geval stellen we de overdracht van de auto K/p , dat wil zeggen $G(p)$ bezit reeds één zuivere integratie. Voor het goed kunnen volgen van een versnellende rabbit zal de regelaar dus minstens één zuivere integratie moeten bevatten,

terwijl voor het volgen van een met konstante snelheid voortbewegende rabbit geen extra eisen aan de regelaar worden gesteld.

Behalve de overdracht van de auto en informatie over de momentane positië en snelheid van de auto ten opzichte van de rabbit dient men nog een criterium of kost-functie te hebben ter beoordeling van de "performance" van het systeem. De eerste indruk is, dat we optredende storingen in het uitgangssignaal zo snel mogelijk willen wegwerken. Dit geeft aanleiding tot een criterium van de vorm

$$J(u) = \int_0^t dt \quad ,$$

dat de lengte van de overgangstijd van de begintoestand naar de gewenste toestand voorstelt. Uit de theorie blijkt, dat minimaliseren van dit criterium gepaard gaat met eeningangssignaal dat bestaat uit een serie extrema (bang-bang principe), bijvoorbeeld enige tijd maximale versnelling, daarna enige tijd maximale vertraging. Dit is in ons geval niet wenselijk, aangezien we graag de toe te passen versnellingen binnen comfortabele grenzen houden. Beter toepasbaar is het minimum-energie criterium. Hierbij wordt een kwadratische kost-functie bekeken:

$$J(u) = \int_0^{\infty} u^2(t) dt \quad .$$

Een voordeel van de kwadratische kost-functie is, dat zeer kleine waarden $u(t)$ min of meer getolereerd worden, terwijl grote waarden van $u(t)$ bijzonder sterk onderdrukt

worden. Het criterium hoeft echter niet beperkt te blijven tot deze vorm. We mogen verwachten, dat zelfs onder gunstige omstandigheden afwijkingen zullen optreden van het gewenste gedrag, zodat in het criterium verschillende termen aanwezig moeten zijn:

- a) De afstand tot de rabbit moet liefst gelijk nul blijven, dat wil zeggen $h(t)$ zo klein mogelijk,
- b) het snelheidsverschil met de rabbit moet liefst gelijk nul blijven, dus $v(t)$ zo klein mogelijk,
- c) grote versnellingen of vertragingen dienen vermeden te worden, dus $u(t)$ zo klein mogelijk.

De kostfunctie kan dan als volgt geformuleerd worden:

$$J(u) = \int_0^{\infty} [q_1 h^2(t) + q_2 v^2(t) + q_3 u^2(t)] dt$$

waarin q_1 , q_2 , en q_3 gewichtsfactoren zijn.

Als we dan de optimale regeltheorie toepassen op de auto-overdracht van het ingangssignaal naar de afgelegde weg:

$$\frac{x_a}{u} = \frac{K}{p^2} ,$$

dan blijkt de oplossing een lineaire regelaar te zijn van de vorm

$$u(t) = \sqrt{q_1/q_3} \cdot h(t) + \sqrt{q_2/q_3} \cdot v(t)$$

(lit. 26, "double-integralplant")

4.4.6 Invloed van digitaliseren.

Bemonsteren van informatie, zoals dit plaatsvindt bij het bepalen van de positie van het voertuig en zoals dit ook plaats kan vinden bij het bepalen van de snelheid van de auto via de snelheidsmeter (m.b.v. Hall-generator of kodeschijf), is te beschouwen als een amplitude- en tijdskwantisering van het analoge signaal.

Amplitudekwantisering is mathematisch op te vatten als een in het systeem ingevoerde storing (meetruis), maar heeft bij voldoende groot aantal kwantiseringsniveau's geringe invloed.

Tijdskwantisering van het analoge signaal heeft tot gevolg, dat de informatie alleen op de bemonstertijdstippen bekend is. Voor tussengelegen momenten moet een schatting gemaakt worden. Dit kan met een houdschakeling of op andere manier (zie § 4.3), maar heeft extra tijdskonstanten tot gevolg. (De overdracht van een nulde-orde houdschakeling is bijvoorbeeld $(1 - \exp(-pT))/p$.) De invloed hiervan op het regelsysteem is in sterke mate afhankelijk van de bemonsterfrequentie $1/T$.

Volgens het bemonsteringstheorema van Shannon geldt, dat $1/T$ minimaal twee maal zo groot moet zijn als de hoogste, in het analoge signaal voorkomende frequentie. Alleen dan is het mogelijk het oorspronkelijke signaal weer volledig terug te winnen. Wordt de bemonsterperiode T groter, dan zal de invloed van een digitaal-analoogomzetting steeds sterker meespelen. Dit kan gedeeltelijk opgevangen worden door de regelaar, maar kan uiteindelijk aanleiding geven tot grote onnauwkeurigheid of zelfs instabiliteit.

De bemonsterfrequentie wordt bepaald door

- a) de snelheid van de auto
- b) de onderlinge afstanden van de markeringen op de weg.

De invloed van bemonsterde informatie blijkt geen onoverkomelijk beletsel te vormen (zie § 4.3; lit. 1, appendix B).

De besproken regelsystemen kunnen in principe zowel digitaal als analoog gerealiseerd worden. Bij het maken van een keuze kunnen de volgende factoren een rol spelen:

- a) de terugkoppeling via de weg levert een bemonsterd signaal,
- b) de terugkoppeling via de snelheidsmeter is inherent analoog, maar kan bemonsterd worden uitgevoerd,
- c) de centrale voorzieningen (zie §4.7) zullen digitaal uitgevoerd moeten worden,
- d) het voortbewegen van de auto over de weg is een analoog proces, dat continu onder controle gehouden moet worden,
- e) het realiseren van lineaire functies (voor compensatie en regelaar) is het eenvoudigst met analoge bouwstenen (rekenversterkers).

Op dit moment lijkt een beslissing in het voordeel van een grotendeels analoog longitudinaal regelsysteem uit te vallen, omdat dit betrekkelijk eenvoudig te realiseren is.

Twee factoren, namelijk de sterk voortschrijdende integratie van functies in digitale bouwstenen, en de verwachte complexiteit van het uiteindelijke automatische geleidingsstelsel met evenredige vraag naar in te bouwen mogelijkheden, kunnen deze beslissing in een later stadium mogelijk

doen omslaan.

4.4.7 Konklusie.

Op dit moment lijkt een systeem met

- a) analoge tegenkoppeling via snelheidsmeter,
- b) analoge kompensatie van auto-overdracht tot K/p ,
- c) een analoge lineaire regelaar, ontworpen volgens het minimum-energie principe,

het makkelijkst en snelst realiseerbaar. Dit in het bijzonder, zolang niet met verschillende autotypen gewerkt wordt, zodat de voordelen van andere genoemde mogelijkheden niet tot hun recht zullen komen.

4.5 De auto (lit. 1).

Zoals vroeger rijtuigen werden omgebouwd tot rijtuigen-zonder-paarden-maar-met-motor, zo ongeveer stelle men zich ook de eerste geautomatiseerde auto's voor. Voertuigen die slechts voorzien zijn van de nodige apparatuur, hoofdzakelijk bestaande uit servosystemen die voor de bediening van stuurinrichting, gasklep en remmen bestemd zijn. Een automatische versnellingsbak (ook wel gangwissel genoemd), is daarbij een geschikt hulpmiddel. De kruissnelheid van een dergelijk voertuig zal rond de 100 km/uur liggen. Na verloop van een aantal jaren, zal door vernieuwing van het wagenpark een nieuw type auto zijn intrede doen. Dit voertuig is geheel ontworpen voor gebruik in het systeem. De kruissnelheid van dit voertuig kan wellicht waarden bereiken in de orde van 200 tot 250 km/uur. Het zal duidelijk zijn dat de reistijden in vergelijking met het huidige autovervoer kort kunnen zijn en de rit comfortabel.

Het voertuig bevat in hoofdzaak twee regelsystemen: het laterale en het longitudinale. Het laterale systeem bedient de stuurinrichting van de auto zodanig, dat het voertuig een door de laterale referentie aangegeven koers volgt. In § 3.3 en § 4.2 kan een uitgebreidere beschrijving van dit systeem worden gevonden.

Het longitudinale regelsysteem probeert de afstand tussen de rabbit en de auto zo klein mogelijk te maken. De rabbit loopt met de wensnelheid over de weg. Iedere auto heeft zijn eigen rabbit. Alle rabbits lopen op onderling gelijke afstanden. Een goed longitudinaal regelsysteem positioneert

alle auto's dus op onderling gelijke afstanden. Wanneer snelheidsveranderingen noodzakelijk zijn, worden alle rabbits tegelijk versneld of vertraagd, met behoud van hun onderlinge afstand. Hoe ontstaat nu een rabbit? Langs het ideale tracé is de weg op regelmatige afstanden gemarkeerd. Telkens wanneer de auto zo'n markering passeert, detecteert de auto een puls. Een andere informatiebron voegt aan de auto systeempulsen toe, waarvan de herhalingsfrequentie een maat is voor de gewenste snelheid. Het longitudinale regelsysteem probeert nu elke systeempuls met een markeringspuls samen te laten vallen. De markeringspuls is dus de rabbit die de auto tracht te volgen. Een hogere herhalingsfrequentie van de systeem-puls geeft dus aanleiding tot een hogere snelheid van het voertuig. In § 4.2 wordt behandeld hoe de wegmarkeringen ontstaan, § 4.3 en §4.4 beschrijven de apparatuur die wegpuls en systeempuls tracht te doen samenvallen.

Tenslotte resteert de vraag hoe de auto aan de informatie komt. Antennes onder aan de auto meten magnetische velden die informatie bevatten voor de laterale en longitudinale regelsystemen. De informatie, welke de antennesignalen bevatten, wordt via versterkers en filters gedetecteerd en gebruikt voor de sturing van het voertuig.

Ten behoeve van mens-systeem-kommunikatie is in de auto een toetsenbord aangebracht. Op dit paneel kan de bestemming worden aangegeven. Tevens wordt hierop, wanneer het voertuig wordt toegelaten op de geautomatiseerde weg, reistijd en route aangegeven. Mobilfoon in de auto is wellicht noodzakelijk, terwijl noodrem en eerste afslagknop

niet zullen ontbreken. Het doel van de noodrem zal duidelijk zijn: Mocht er een zodanige situatie ontstaan, dat gevaar voor de inzittenden van de auto aanwezig is, zonder dat het systeem deze opmerkt; dan kunnen de passagiers door middel van de noodrem nog ingrijpen. Wenst men, eenmaal rijdend op de autoweg, om welke - niet dwingende - redenen dan ook de rit te onderbreken; dan is de eerste afslagknop hiervoor het aangewezen middel.

4.6 De weg. (lit.1).

Het wegdek van een geautomatiseerde weg kan men zich voorstellen als het wegdek van een hedendaagse autoweg. De rijstrookbreedte kan, bij gebruik van een goed lateraal regelsysteem in de auto, wellicht verminderd worden. Een servicestrook langs iedere rijstrook is noodzakelijk. Op deze servicestrook kunnen defekte auto's worden geparkeerd. Hulpdiensten kunnen dan zorgdragen voor reparatie of transport van het betreffende voertuig. Wenst men meerstrooksautowegen bij gebruik van een automatisch verkeersgeleidingsysteem toe te passen, dan ontstaan problemen met in- en uitvoegen. Voertuigen die op de linker rijstrook rijden, moeten alle andere rijstroken passeren, met alle konsekwenties vandien. Enkelstrooksautowegen zijn daarom te prefereren. De elektrische apparatuur in de weg bestaat in eerste instantie uit evenwijdige geleiders, voorzien van markeringen die in langsricting in de weg liggen. §4.2 behandelt doel en werking van deze bekabeling. De kabels worden gevoed door gesynchroniseerde generatoren. De synchronisatie wordt geregeld en gecontroleerd door een centraal mechanisme.

§ 4.7 vertelt hier meer over.

Op een autoweg rijden alle auto's met dezelfde snelheid, hoewel het niet is uitgesloten dat op verschillende wegen van het netwerk andere snelheden worden gehandhaafd. De auto's rijden waarschijnlijk in clusters (ook wel platoons genoemd). Een cluster is een groep auto's, die bij bijvoorbeeld snelheidsveranderingen als een geheel wordt versneld of vertraagd. De clusters worden door relatief grote afstanden gescheiden. Clustervorming maakt snelheidsveranderingen op een wegtraject zonder veel moeite mogelijk. Stagnaties die ergens in de verkeersstroom optreden, veroorzaken slechts een vertraagde schokgolf naar achteren; er blijft enige tijd tot ingrijpen voor de centrale regelaar over. De opritten kunnen worden gescheiden in twee soorten: De eerste soort vormt samen met een afrit een verbinding tussen twee geautomatiseerde wegen. Op- en afrit zijn samen te beschouwen als een klein stukje geautomatiseerde weg. Deze schakel tussen geautomatiseerde wegen moet in staat zijn om snelheidsveranderingen tot stand te brengen. Voertuigen zijn zo in staat met aangepaste snelheid wegen te verlaten of op te rijden. Het verschil met de gewone geautomatiseerde weg is hoofdzakelijk de extra detektie- en schakelapparatuur.

Het tweede type oprit verbindt gewone en geautomatiseerde wegen. Voertuigen die van de ongeautomatiseerde weg afkomen en die van de geautomatiseerde weg gebruik willen maken, rijden naar een meldingspunt, sluis genoemd. Bij de sluis aangekomen geeft de bestuurder de gewenste bestemming aan op het paneel in de auto. Vervolgens neemt het systeem de besturing van het vehikel over. De auto

wordt dan getest. Gekontroleerd wordt of alle apparatuur in de auto foutloos werkt (en aanwezig is). Remmen en stuurinrichting worden op hun werking beproefd, nagegaan wordt of de brandstofvoorraad tot aan de bestemming toereikend is. Worden geen fouten gekonstateerd, dan kan het voertuig op de weg worden toegelaten. Voor echter de auto op de weg komt, wordt op het toetsenbord in de auto de reistijd en de te rijden route aangegeven. Wenst men nu de rit niet te vervolgen, dan kan men dit door middel van de eerste afslagtoets kenbaar maken. De reservering wordt nu ongedaan gemaakt. Via een vluchtweg verlaat men dan, precies als een auto waarbij gebreken zijn gekonstateerd, de sluis.

Bij een afrit die verbinding geeft tussen geautomatiseerde en ongeautomatiseerde wegen spelen soortgelijke problemen een rol. Wanneer een auto een dergelijke afrit oprijdt, wordt aan de bestuurder door middel van een signaal kenbaar gemaakt dat hij de besturing moet gaan overnemen. Wordt dit signaal niet beantwoord, dan zal het voertuig op een parkeerterrein tot stilstand worden gebracht. In het andere geval kan de besturing volgens een bepaalde procedure worden overgenomen. Hoe deze procedure moet verlopen, is nog niet precies te voorzien.

4.7 Centrale voorzieningen. (lit. 1).

Auto's die bij de sluis hun bestemming hebben opgegeven, treden in contact met een computer. Dit rekenttuig kan bepalen, of er van sluis tot bestemming voor de aanvragende auto een plaats in het systeem is. Is dit het geval, dan wordt aan het voertuig bekend gemaakt hoelang

de reistijd is, alsmede de te volgen route. Van begin tot eindpunt van de rit zorgt de computer ervoor, dat de auto altijd een vrije rabbit vindt. Wachttijden onderweg ten gevolge van congestie komen niet voor. Alle voertuigen die zich op de weg bevinden staan in het geheugen van de computer geregistreerd. Desgewenst kan bijvoorbeeld op ieder ogenblik de bezetting van de weg worden vastgesteld.

In de centrale regelkamer wordt tevens vastgesteld hoe de werking van het verkeersgeleidingsysteem is. Daar worden storingen gemeld, de toestand van de wegen (sneeuw, ijzel enz.) zijn er bekend. Gestrande automobilisten melden hun positie automatisch aan de regelkamer. Van hieruit worden hulpdiensten naar de gewenste plaats gedirigeerd. Hoewel de centrale voorzieningen slechts zeer beknopt zijn beschreven, moge toch een indruk van het belang ervan zijn overgekomen.

4.8 Nabeschouwing.

De lezer van dit verslag kan zich afvragen na de voorgaande hoofdstukken te hebben gelezen, wat nu het doel van dit verslag is. Poogt het een compleet beeld te geven van een compleet automatisch verkeersgeleidingsysteem? Nee, verre van dat! De bedoeling is meer een kader te schetsen van een automatisch verkeersgeleidingsysteem. In hoofdstuk 2 zijn eisen opgesteld waaraan een automatisch verkeersgeleidingsysteem moet voldoen. Hoofdstuk 3 weegt twee plaatsbepaling systemen tegen elkaar af. Nadat voor een systeem is gekozen, geeft hoofdstuk 4 een beschrij-

ving van een mogelijk systeem. Het verslag tracht een lijn aan te geven, een lijn die anderen al dan niet kunnen volgen. Er worden in deze scriptie meer problemen aangesneden dan opgelost. Veel van de problemen zijn nauwelijks ter sprake gekomen (bijvoorbeeld veiligheid). Andere problemen zijn slechts ten dele opgelost. Een van de problemen die op een oplossing liggen te wachten is een praktische realisering van het regelsysteem in de auto. Dit regelsysteem moet ook op op- en afrit goed voldoen, zodat dit probleem samen met andere moet worden opgelost. Veiligheid mag niet uit het oog worden verloren. Kortom: een team van specialisten zal aan de ontwikkeling van een dergelijk systeem de handen vol hebben.

Een punt waar nog geen aandacht aan is geschonken is de prijs van het systeem. Is die prijs te hoog, dan zou dit uiteindelijk wel eens het struikelblok van het hele systeem kunnen zijn. In hoofdstuk 5 wordt het konventionele auto-transport systeem vergeleken met een automatisch systeem met betrekking tot de kosten.

5 Wat gaat een automatisch verkeersgeleidingsysteem kosten?

5.1 Hoe vaak zijn toekomstvoorspellingen uitgekomen?

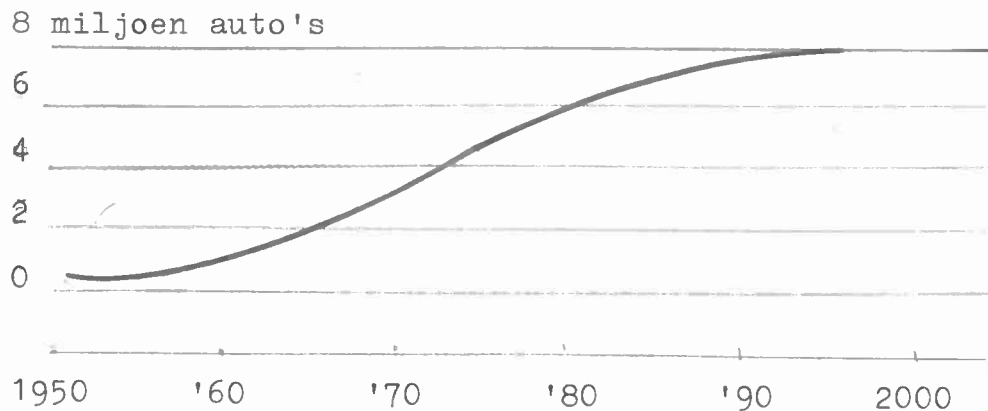
Soms krijgt men de indruk dat alle prognoses verkeerd zijn. In dit licht gezien lijkt het onverstandig om TP 2000 als leidraad te gebruiken. Toch wordt dit hier gedaan, eenvoudig omdat andere gegevens - indien beschikbaar - wellicht even (on)betrouwbaar zijn. Het ontleenen van gegevens aan TP 2000 - en veel van de onderstaande gegevens zijn eraan ontleend - heeft dan nog het voordeel, dat de samenstellers van deze toekomstprojectie ten nauwste bij de problemen (het vervoer) betrokken zijn. In dit hoofdstuk moeten het konventionele en het geautomatiseerde personenvervoer per auto worden vergeleken, een vergelijking die betrekking zal hebben op de kosten van de systemen.

Afgezien van de vraag: konventioneel of geautomatiseerd personenvervoer, is er nog een andere vraag, namelijk de keuze tussen openbaar en particulier vervoer. Strikt genomen valt dit onderwerp buiten het kader van dit verslag. Desondanks wordt toch een aantal opmerkingen over dit probleem gemaakt.

Bij velen heeft de mening postgevat, dat een keuze moet worden gemaakt tussen (verbeterd) openbaar vervoer en privé vervoer. Een popularisering van het openbaar vervoer wordt als oplossing gezien voor problemen als: ruimtegebrek, luchtverontreiniging, geluidshinder enz. die veroorzaakt worden door het autoverkeer. Toch lijkt dit geen goede

oplossing. De technische problemen die men zo tracht te ontwijken, kunnen overwonnen worden. Denk aan parkeergarages tegen het ruimtegebrek, elektromotoren tegen de geluidshinder en de luchtverontreiniging, betrouwbare apparatuur tegen onveiligheid, enz. Het zou verkeerd zijn als de mens zich aan de problemen zou gaan aanpassen, de problemen moeten worden opgelost. Dit standpunt heeft als konsekwentie, dat de auto (handig bij het boodschappen doen, handig om bagage in te bergen, prettig bij recreatievervoer, altijd beschikbaar), zoals nu reeds het geval is, in de toekomst nog meer het vervoermiddel bij uitstek zal zijn. Moet dit ten koste gaan van het openbaar vervoer? Dat hoeft niet. Het openbaar vervoer moet geïntegreerd worden in het particuliere wegvervoer. Bij een konventioneel systeem is dit praktisch niet mogelijk. Immers, waar wordt de chauffeur vandaan gehaald en wie betaalt hem? Bij automatische verkeersgeleiding is deze integratie een reële mogelijkheid. Men kan zich voorstellen dat interlokaal openbaar vervoer van dezelfde infrastructuur gebruik maakt als het particulier vervoer, terwijl in stedelijke agglomeraties speciale voorzieningen zijn getroffen om voor- en natransport mogelijk te maken.

5.2 Welke zijn nu de te verwachten ontwikkelingen? Volgens een prognose, opgesteld door het NEL, zal de groei van het autobezit volgens de navolgende grafiek verlopen. Van $2\frac{1}{2}$ miljoen auto's nu, zal het wagenpark tot $7\frac{1}{2}$ miljoen voertuigen in het jaar 2000 toenemen.



Wenst men de verkeersafwikkeling op hetzelfde niveau te handhaven, dan is een grote uitbreiding van het wegennet noodzakelijk. Een verbetering van de verkeersdoorstroming zou natuurlijk nog meer wegen vereisen. Het zal duidelijk zijn dat deze wegeaanleg, behalve geld, ook veel grond zal opeisen. De ontsiering van het landschap zal met de wegeaanleg groter worden.

Deze problemen - en nog vele andere - kunnen worden bestreden met behulp van automatische verkeersgeleiding. Automatische verkeersgeleiding is in staat om bij een snelheid van ongeveer 100 km/uur de capaciteit van de weg met een faktor 4 tot 7 te vergroten*. Past men hogere snelheden toe - in de literatuur wordt gesproken van 200 tot 250 km/uur (lit. 1) - dan is de capaciteitswinst nagenoeg evenredig met de snelheidsvergroting. Deze capaciteitswinst kan een kleinere lengte van het wegennet tot gevolg hebben. (* : zie Appendix B).

Andere voordelen van de verkeersgeleiding zijn:

- a) De veiligheid van het systeem is veel groter dan die van het huidige transportsysteem,
- b) Het comfort kan hoog worden opgevoerd,
- c) Reistijden zullen aanzienlijk kleiner worden,
- d) De auto kan elektrische energie uit de weg betrekken, hierdoor kan de luchtverontreiniging worden beperkt,
- e) Openbaar vervoer kan door de integratie in het systeem een daling ondergaan. Veel automobilisten die nu per openbaar vervoer gaan, zullen dan hun eigen voertuig gebruiken.

Voordelen als veiligheid, comfort, reistijd enz. zijn moeilijk in geld te waarderen. Toch zal bij een sociaal-economische berekening met deze gegevens rekening moeten worden gehouden.

Laat nu alle subjectief te waarderen voordelen even buiten beschouwing. Stel dan een kostenoverzicht op voor het geautomatiseerde en konventionele transportsysteem. Kosten die betrekking hebben op wegeaanleg, investering in apparatuur enz.. Blijkt een automatisch verkeersgeleidingssysteem dan wat duurder uit te vallen dan het konventionele systeem, dan kunnen alsnog de voordelen van het geleidesysteem in geld worden uitgedrukt, om te zien hoeveel dan de prijs dan wel hoger ligt.

5.3 Enkele cijfers.

Een rijstrook wordt momenteel begroot op een capaciteit van 1200 personenauto's per uur, terwijl de capaci-

teit van het geleidesysteem gelijk is aan 8000 voertuigen per uur bij een snelheid van 30 m/sek (108 km/uur). Een vermindering van de breedte van de rijstrook behoort, bij toepassing van een goed lateraal regelsysteem, niet tot de onmogelijkheden.

Volgens TP 2000 moet er van 1970 tot 1985 2700 km auto-weg worden aangelegd. Van 1985 tot 2000 stijgt het voersaanbod met 70%, er moet dus nog 1900 km weg worden aangelegd. In het structuurplan hoofdwegen zijn er dan nog 1700 km die niet in het rijkswegenplan zijn opgenomen. Dit maakt dat tot 2000 nog 6300 km weg moet worden aangelegd. Wegaanleg kost momenteel in de orde van 5 tot 7 miljoen gulden per kilometer. Tot 2000 is er dus met wegeaanleg een bedrag gemoeid van 31 tot 44 miljard gulden, voorwaar een vorstelijk bedrag (volgens TP 2000 wordt er in wegen en oeververbindingen tot 2000 51 miljard geïnvesteerd). Nu is bekend wat het konventionele systeem gaat kosten.

Wat kost nu een automatisch verkeersgeleidingsysteem?

Per auto zal ongeveer 2000 tot 2500 gulden moeten worden geïnvesteerd in apparatuur. Bij toepassing op grote schaal kan dit bedrag dalen. Een kilometer weg voorzien van de nodige elektrische apparaten komt op een bedrag van 150.000 tot 500.000 gulden. Invoering van het geleidingsysteem verbetert de wegcapaciteit met een faktor 4 tot 7. Laten we een faktor 5 nemen. Dit houdt in dat in plaats van 6300 km autoweg, slechts 1260 km hoeft te worden aangelegd. Neem voor het gemak 1500 km. Een automatisch systeem gaat dan minimaal voor $7\frac{1}{2}$ miljoen auto's

28 miljard gulden kosten. Namelijk $7\frac{1}{2} \times 2\frac{1}{2} \times 10^9$ gulden voor de apparatuur in de auto's plus $1500 \times (5 + 0,5) \times 10^6$ gulden voor de investeringen in wegen en apparatuur. Maximaal gaat het systeem 31 miljard gulden kosten. Uit deze berekeningen blijkt, dat zelfs zonder de sociaal-ekonomische kosten in de berekeningen te betrekken, een automatisch verkeersgeleidingssysteem goedkoper is dan het konventionele systeem.

Appendix A.

Simulatie van een regelsysteem in een auto.

1 Inleiding

1.1 De opzet van deze simulatie was om na te gaan in hoeverre het mogelijk is om een auto een imaginair punt te laten volgen, de zogenaamde rabbit.

Voor de simulatie is gebruik gemaakt van een analoge computer, omdat op een dergelijke machine eenvoudig de overdracht van de auto en de benodigde compensatienetwerken te simuleren zijn.

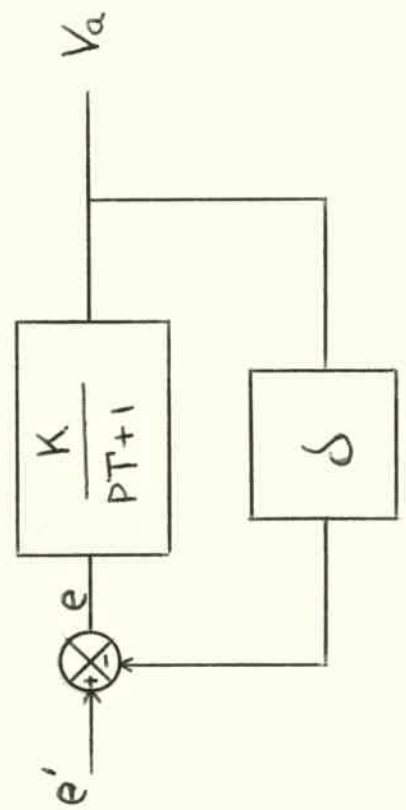
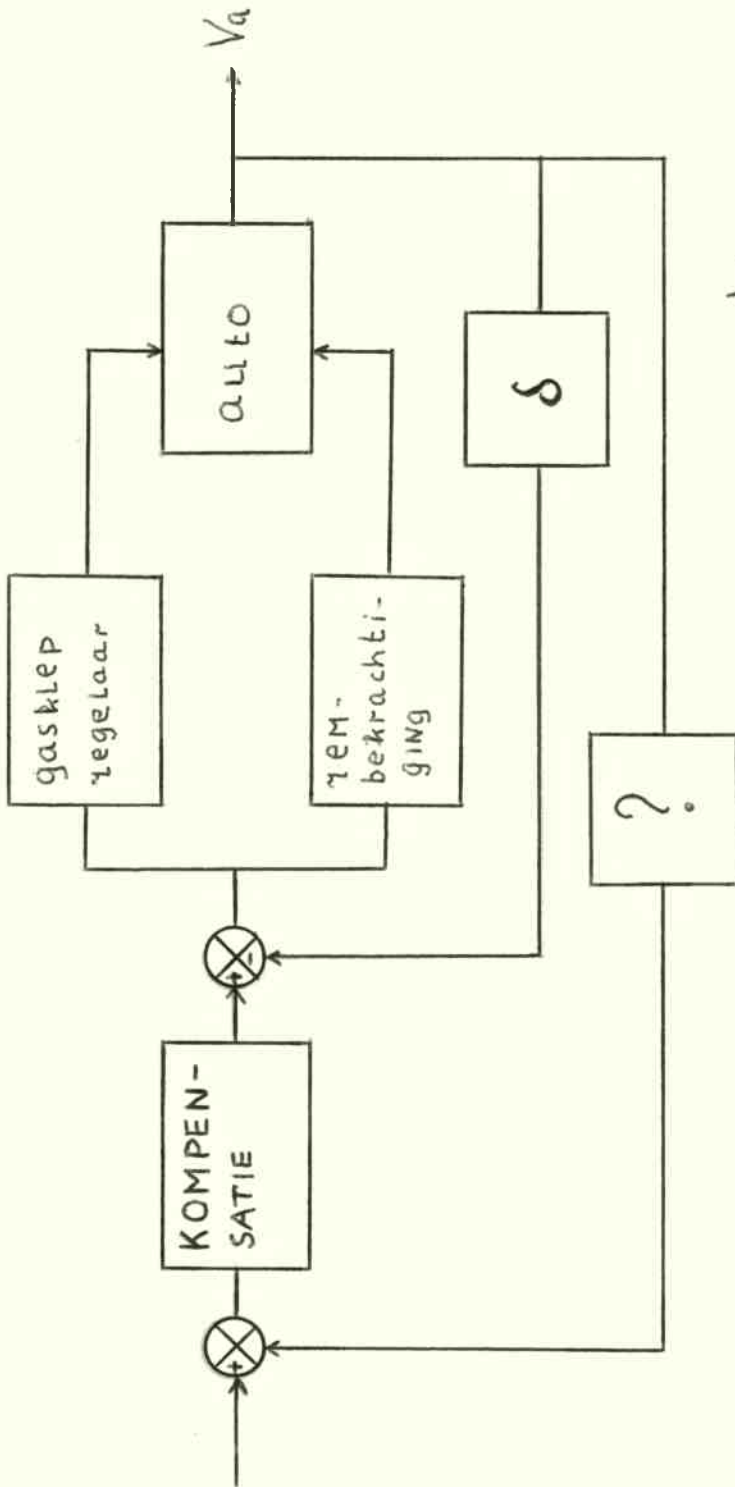
Bij het ontwerp van het regelsysteem is uitgegaan van de overdrachtsfunctie van de stand van het gaspedaal naar de snelheid van de auto en eveneens van de overdrachtsfunctie van hetingangssignaal van de rembekrachtiging naar de snelheid van de auto.

Getracht is om met behulp van compensatienetwerken een overdracht te verkrijgen die geschikt is voor het regelen van de gewenste versnelling a_w (zie figuur 1).

Opgemerkt dient te worden, dat de overdrachtsfuncties van de gasklepregelaar en de rembekrachtiger niet apart in de simulatie zijn opgenomen, daar van de veronderstelling is uitgegaan, dat hun tijdconstanten verwaarloosbaar klein zijn ten opzichte van de overige tijdconstanten.

1.2 Het compensatienetwerk.

De overdrachtsfunctie van de gasklep naar de snel-



heid van de auto kan men zich als volgt voorstellen:

$$v_a = \frac{K}{pT + 1} e$$

waarin K = versterkingsfaktor,

T = tijdkonstante,

e = signaal dat de stand van de gasklep regelt,

v_a = snelheid van de auto.

Voor de theoretische afleiding wordt verwezen naar de geraadpleegde literatuur. (lit. 1;11;), (§ 4.4.1).

Van deze overdracht is echter zowel de versterkingsfaktor als de tijdkonstante afhankelijk van de volgende factoren:

- a) snelheid van de auto
- b) de longitudinale helling van de weg
- c) de wind
- d) de temperatuur
- f) de gebruikte brandstof enz.

Om nu te zorgen, dat de afwijkingen van K en T ten opzichte van hun nominale waarden zo klein mogelijk zijn, is er een terugkoppeling aangebracht (zie figuur 2).

De nu ontstane overdracht is:

$$v_a = \frac{K/(1+\delta K)}{pT/(1+\delta K) + 1} e'$$

ofwel:

$$v_a = \frac{K_o}{pT_o + 1} e'$$

waarin e' als het nieuwe ingangssignaal fungeert.

Voor $\delta K \gg 1$ geldt nu dat $K_0 = 1/\delta$ en $T_0 \ll T$.

Met deze terugkoppeling is nu bereikt, dat K_0 nagenoeg als konstant mag worden beschouwd.

De ideale overdracht, die de auto een gewenste versnelling kan opleggen, ziet er als volgt uit:

$$v_a = \frac{K_d}{p} \cdot \frac{a_w}{K_d} \quad \text{waarin } K_d \text{ de versterkingsfaktor}$$

hierbij wordt a_w/K_d als ingangssignaal beschouwd en a_w als de gewenste versnelling.

Om een dergelijke overdracht tot stand te brengen, zal het nodig zijn een kompensatienetwerk aan te brengen. De overdracht van dit kompensatienetwerk zal dus de volgende vorm hebben:

$$\frac{K_d(pT_0 + 1)}{K_0 p}$$

Deze kompensatie is te verwezenlijken met behulp van een PI-regelaar (zie figuur 3)

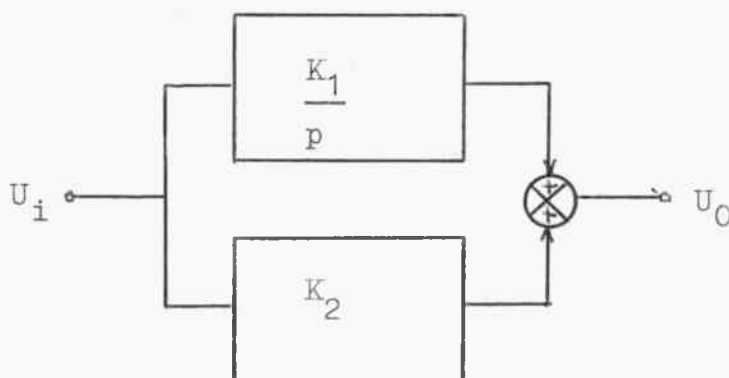


fig. 3

$$U_o = \left(\frac{K_1}{p} + K_2 \right) U_i$$

$$U_o = \frac{K_1}{p} \left(1 + p \frac{K_2}{K_1} \right) U_i$$

Hieruit volgt dat:

$$K_2/K_1 = T_o \quad \text{en} \quad K_1 = K_d/K_o$$

Figuur 4 geeft een overzicht van de totale overdracht :

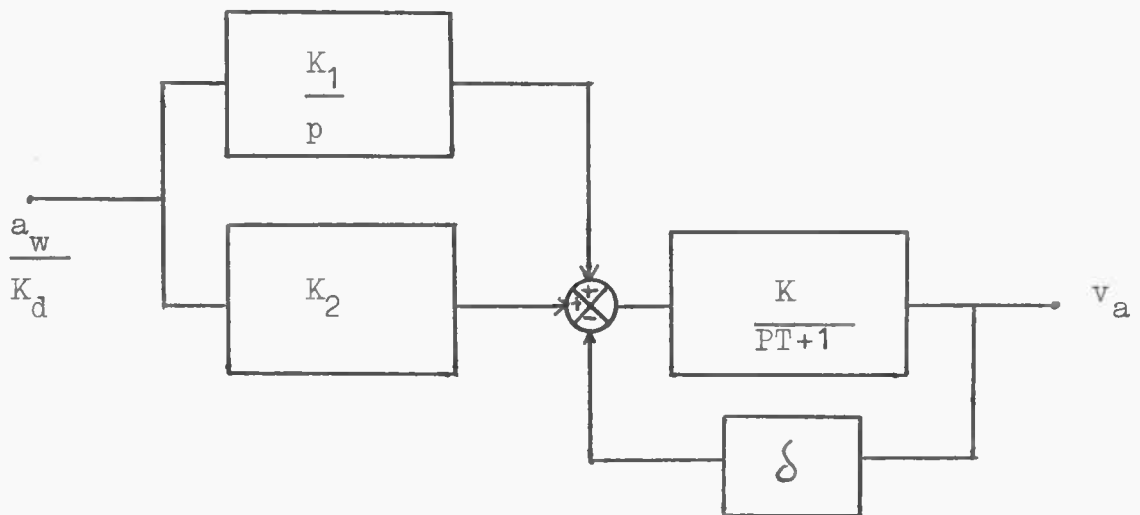


fig. 4

De eliminatie van de noemer van de overdracht van de auto, $pT+1$, slaagt echter alleen als T_o konstant zou zijn. Daar dit niet het geval is, zullen de gevolgen van de extra pool en het nulpunt uit de simulatie naar voren

moeten komen. De overdrachtsfunctie is dan:

$$\frac{v_a}{a_w/K_d} = \frac{K_1(1 + pK_2/K_1) K_o}{p(pT_o + 1)}$$

Naast het korrigeren van de versnelling van de auto tijdens het optrekken en bij het rijden met konstante snelheid, moet de korrigerende werking ook plaats vinden tijdens het afremmen. Hiervoor is het gewenst, de overdrachtsfunctie van het remsysteem naar de snelheid van de auto te bekijken.

Deze overdracht blijkt bij benadering gelijk te zijn aan:

$$v_a = \frac{K_b}{p} e$$

waarin e eeningangssignaal en K_b een versterkingsfactor voorstelt.

Voor de afleiding van deze overdracht wordt weer verwezen naar de geraadpleegde literatuur (lit. 1;11).

Het is nu mogelijk met behulp van een terugkoppeling dezelfde overdracht te krijgen als de motor bezit.

Figuur 5 geeft deze terugkoppeling weer:

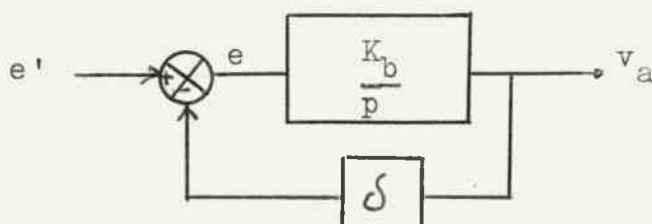


fig. 5

De hierdoor ontstane overdracht is:

$$v_a = \frac{1/\delta}{p/\delta K_b + 1} e'$$

Er moet dus nu voldaan worden aan:

$$1/\delta K_b = K_2/K_1$$

en met $\delta K \gg 1$ geldt dat $K_0 \approx 1/\delta$.

1.3 Informatie nodig voor de regeling

Voor een regelsysteem, dat moet zorgen dat de auto de rabbit precies volgt, is het noodzakelijk over de volgende informatie te beschikken:

- a) de relatieve snelheid v
- b) relatieve afstand h

Om de toestand aan te geven, waarin de auto zich op een bepaald moment bevindt, is weer gebruik gemaakt van een fasevlak (zie hoofdstuk 3). De trajektorie, die wordt doorlopen, is afhankelijk van de relatieve versnelling $a = a_s - a_a$, waarin a_s de versnelling van de rabbit aanduidt en a_a de versnelling van de auto.

2 Simulatie

2.1 Simulatie 1

Hierbij is ervan uitgegaan, dat de binnenkomende informatie slechts kan variëren met eenheidsstappen. Daarom zal de juiste informatie minder dan een eenheidsstap van de aangeboden informatie afliggen. Voor de regeling is nu het fasevlak in twee gedeelten gesplitst. In gebied B wordt een extra versnelling Δa aan het regelsysteem toegevoerd, in het gebied A een extra vertraging Δa . De waarde van Δa moet groter zijn dan de maximale fout in de versnelling van de auto. Hiermee wordt bereikt dat:

in gebied B $a < 0$

en in gebied A $a > 0$ (zie figuur 6)

Nu zal ten gevolge van het parabolisch verloop van de trajectoriën in de gebieden A en B de auto steeds meer naar de oorsprong van het fasevlak convergeren. Echter ten gevolge van de stapsgewijze informatie treedt tenslotte een limitcycle op, waarvan de grootte afhankelijk is van de stapgrootte van de informatie. Om de niet-kontinue informatie op de analoge computer enigszins te simuleren, is een vergelijkerschakeling, een zogenaamde komparator, gebruikt. Deze komparator bezit een hysteresis, die evenredig is met de stapgrootte van de informatie.

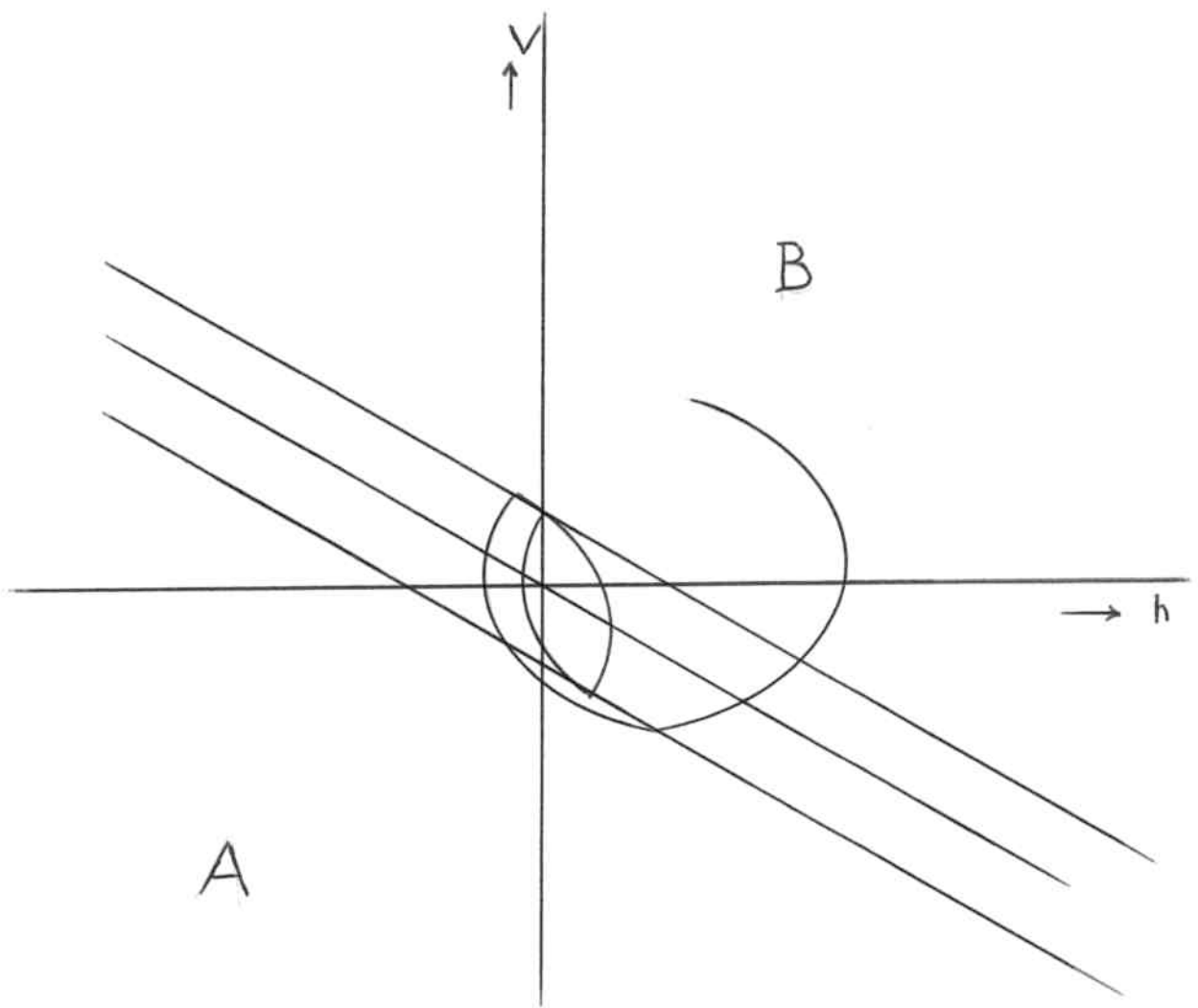


fig 6

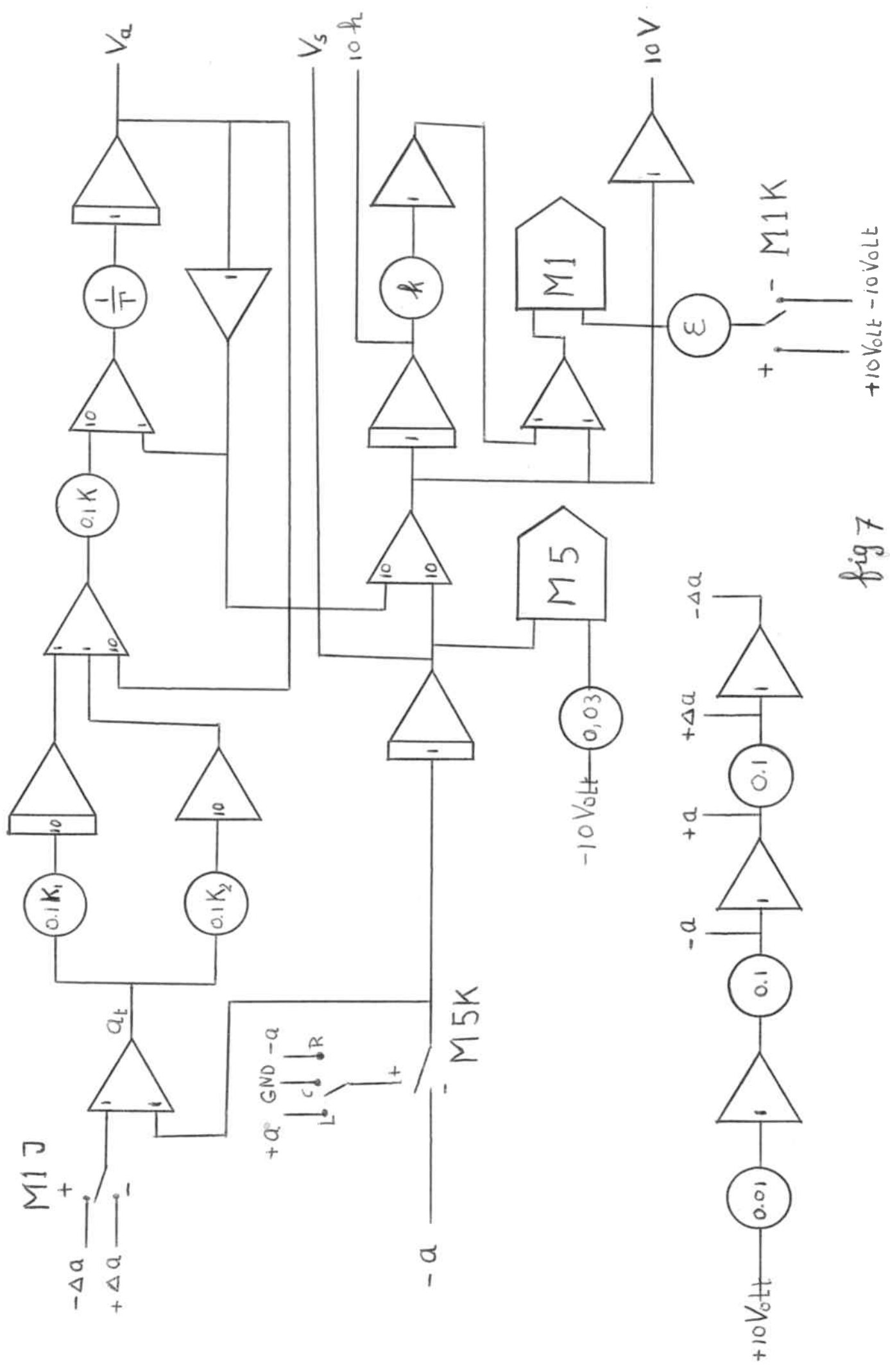
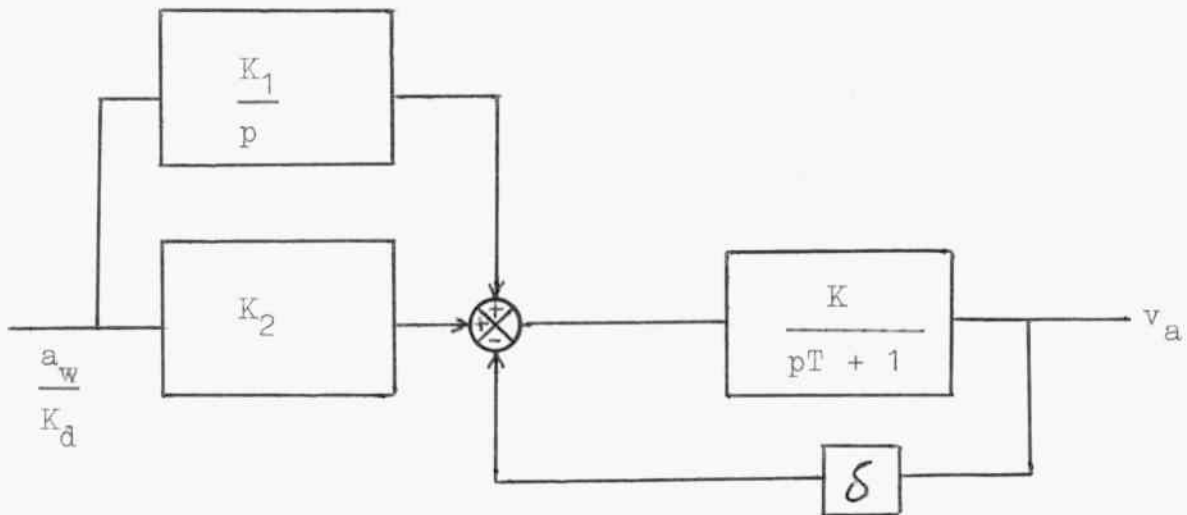


fig 7

In figuur 7 is de schakeling van de simulatie op de analoge komputer weergegeven. In § 4.3.5 kan een beschrijving van de gebruikte componenten worden gevonden. Ter vergelijking is ook nog het blokschema opgenomen:



De gekozen waarden zijn:

$$K_{\text{nominaal}} = 10$$

$$T_{\text{nominaal}} = 20 \text{ sek.}$$

$$\delta = 10$$

$$K_d = 1$$

Dus $K_0 = 0,1$, $K_1 = 10$, $T_0 \text{ nominaal} = 0,198 \text{ sek.}$ en $K_2 = 1,98$.

De versnelling van de rabbit, ($a_s = 1 \text{ m/sek}^2$ tijdens het optrekken, $a_s = 0 \text{ m/sek}^2$ wanneer de systeemsnelheid v_s is bereikt, $v_s = 30 \text{ m/sek}$), wordt aan het regelsysteem in de auto aangeboden en aan een integrator, welke de systeemsnelheid v_s levert. Men kan de relatieve snelheid v vinden door van de systeemsnelheid v_s de snelheid van de auto v_a af te trekken.

Na integratie van de relatieve snelheid v verkrijgt men de relatieve afstand h .

Met behulp van deze twee grootheden wordt bepaald in welk gedeelte van het fasevlak de auto zich bevindt. Afhanke-lijk van het gebied waarin de auto zich bevindt, wordt aan het regelsysteem een extra versnelling of vertraging Δa toegevoegd.

De grootte van Δa is zo gekozen dat deze een stuk kleiner is dan de vertraging, die ontstaat wanneer de auto op de motor afremt. (die vertraging is ongeveer $0,25 \text{ m/sek}^2$). Deze versnelling is groter dan de maximale fout in de versnelling ten gevolge van het regelsysteem in de auto ($\Delta a = 0,1 \text{ m/sek}^2$ gekozen).

Uitgaande van voorgaande veronderstellingen zijn gra-
fiek opgenomen bij verschillende instellingen van de
versterkingsfaktor K en de tijdconstante T van de auto

grafiek	K	T (sek)
1	10	20
2	10	5
3	10	100
4	5	5
5	5	20

grafiek	K	T (sek)
6	5	100
7	1	5
8	1	20
9	1	100

In grafiek 9 ontstonden zulke grote afwijkingen van h en v, dat de komputer overbelast werd en er derhalve geen grafieken meer konden worden opgenomen.

2.2 Simulatie 2

Bij deze simulatie is verondersteld dat de informatie continu ter beschikking staat, zodat een eventuele korrektieversnelling ook continu bepaald kan worden. Deze korrektieversnelling wordt bepaald uit een lineaire combinatie van v en h, namelijk:

$$a = K_v(v + k.h)$$

Experimenteel is vastgesteld dat K_v minimaal 20 moet bedragen, anders treedt instabiliteit op.

Bij het opnemen van grafieken, waarbij K en T hetzelfde verloop hadden als in voorgaande tabel, bleek dat h en v geen van nul waarneembare verschillen vertoonden. (zie grafiek 10).

Ook hierbij is gebleken dat het regelsysteem in staat is, om ook zonder de door de rabbit opgedrukte versnelling de auto met de juiste snelheid op de juiste plaats te laten rijden.

Zelfs wanneer een grote verstoring werd aangebracht,

(een extra kracht op de auto die een versnelling van ongeveer 5 m/sek^2 veroorzaakte) bij de ongunstigste instelling van K en T (K = 1 en T = 100 sek), veroorzaakte dit slechts een kleine afwijking in v en h. (zie grafiek 11).

Figuur 8 geeft een overzicht van het gebruikte schema bij de simulatie.

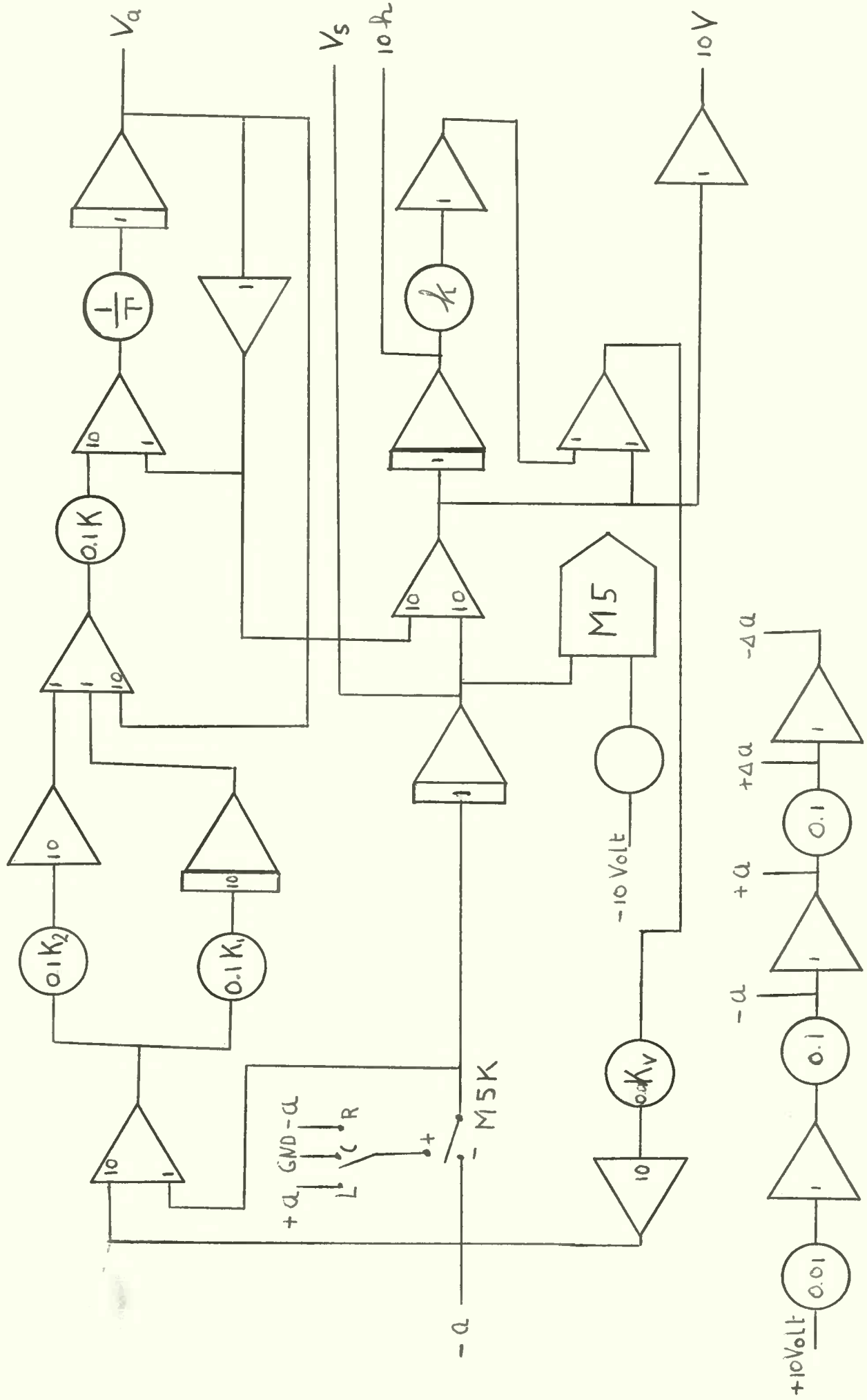
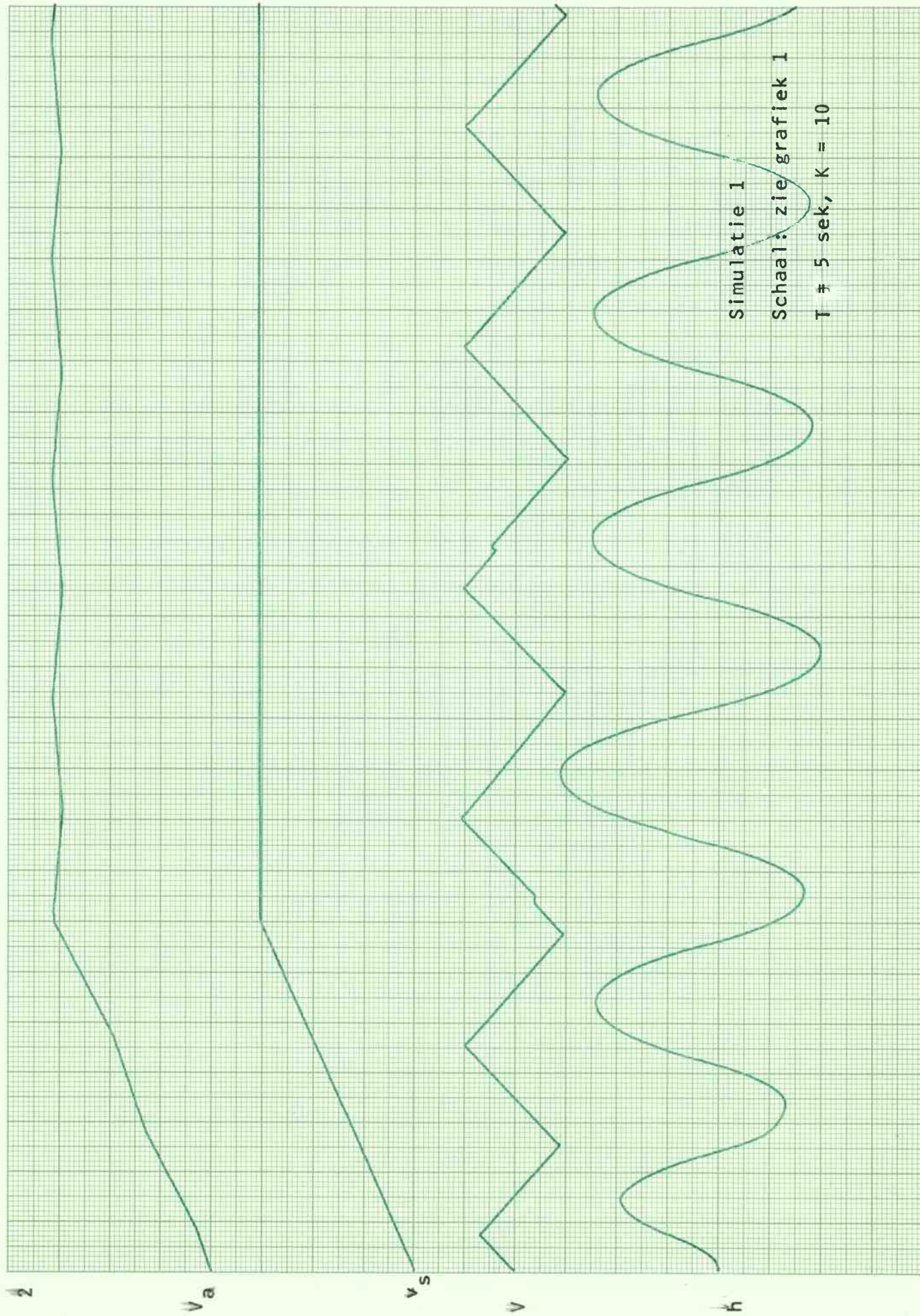
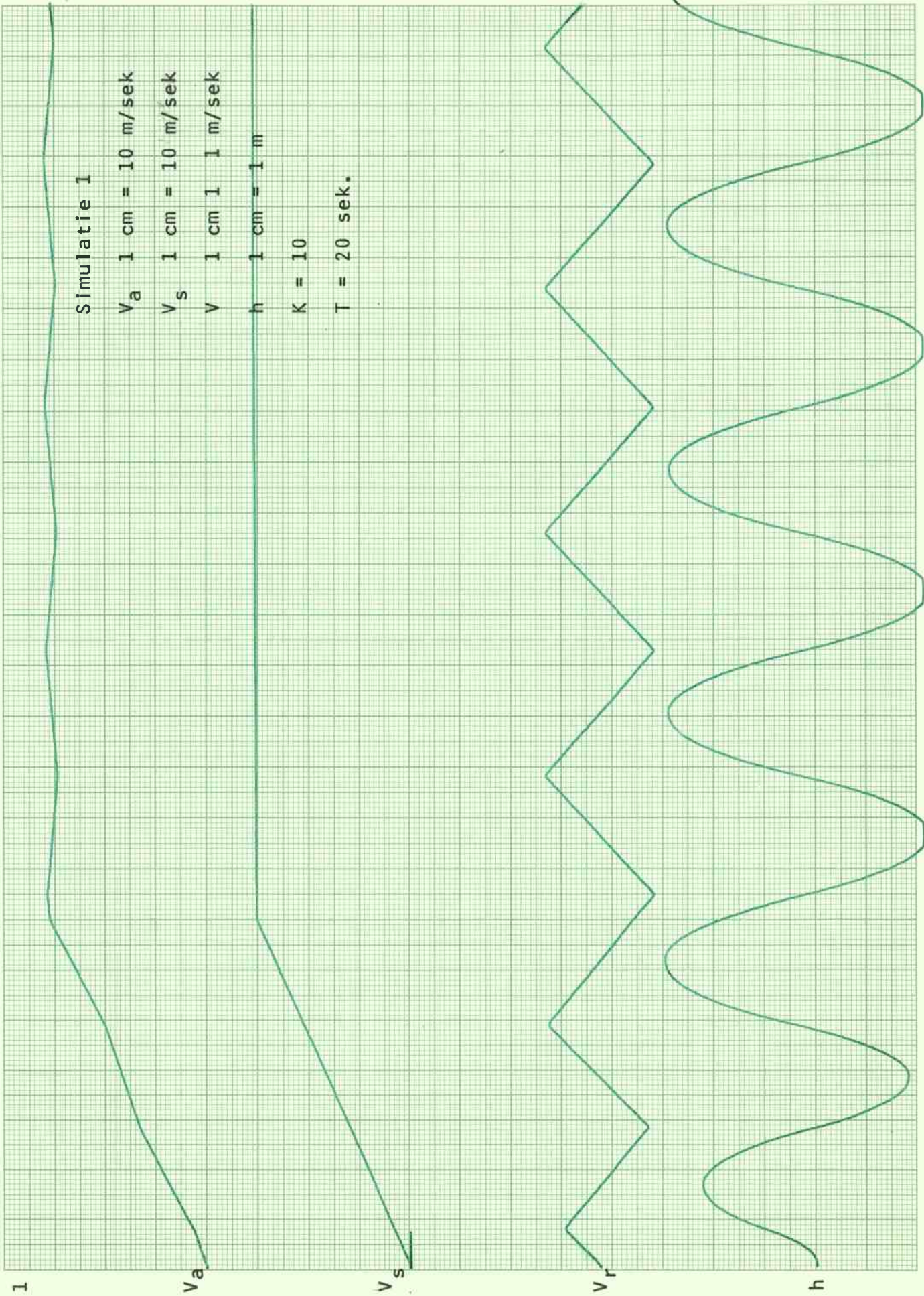
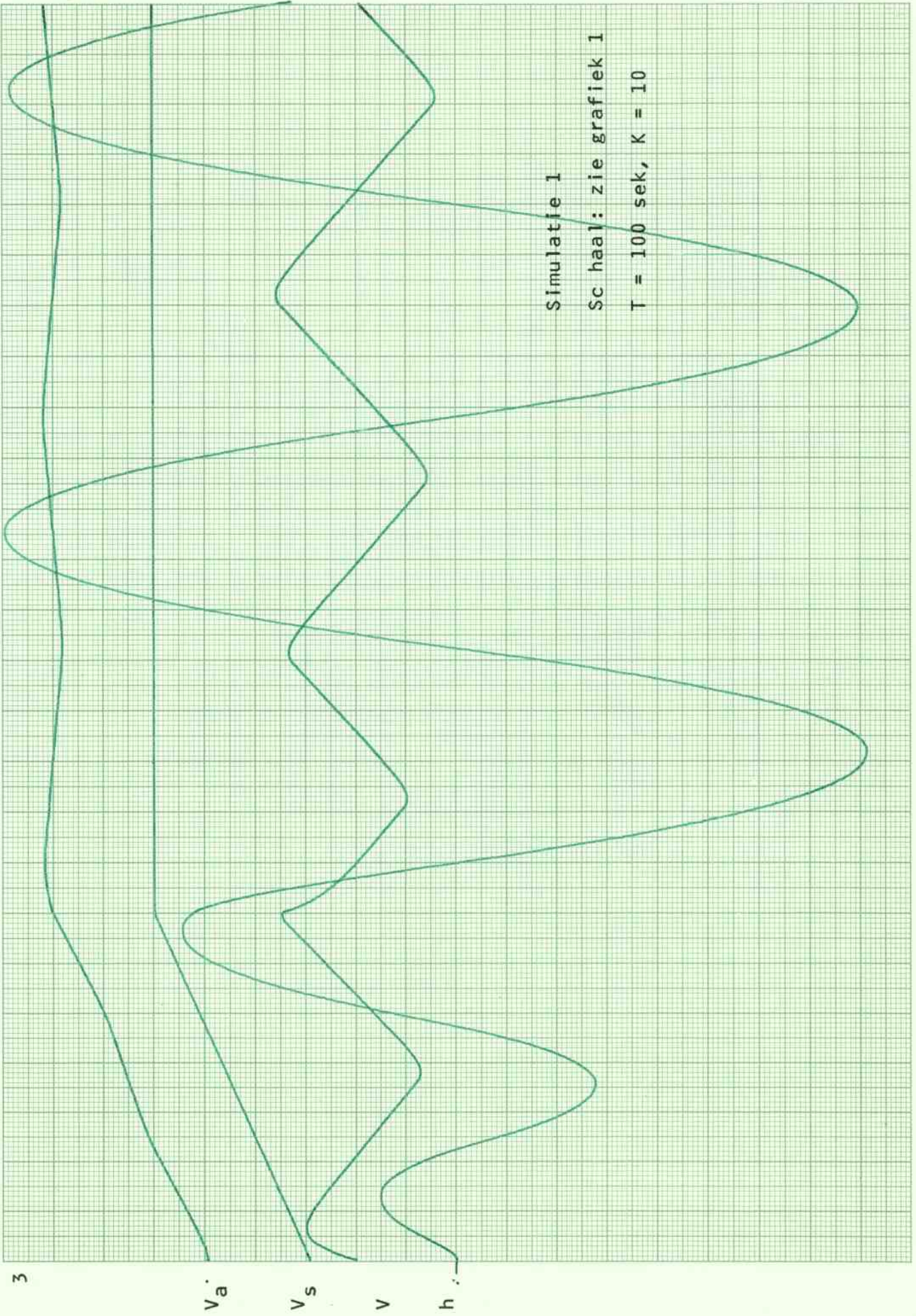


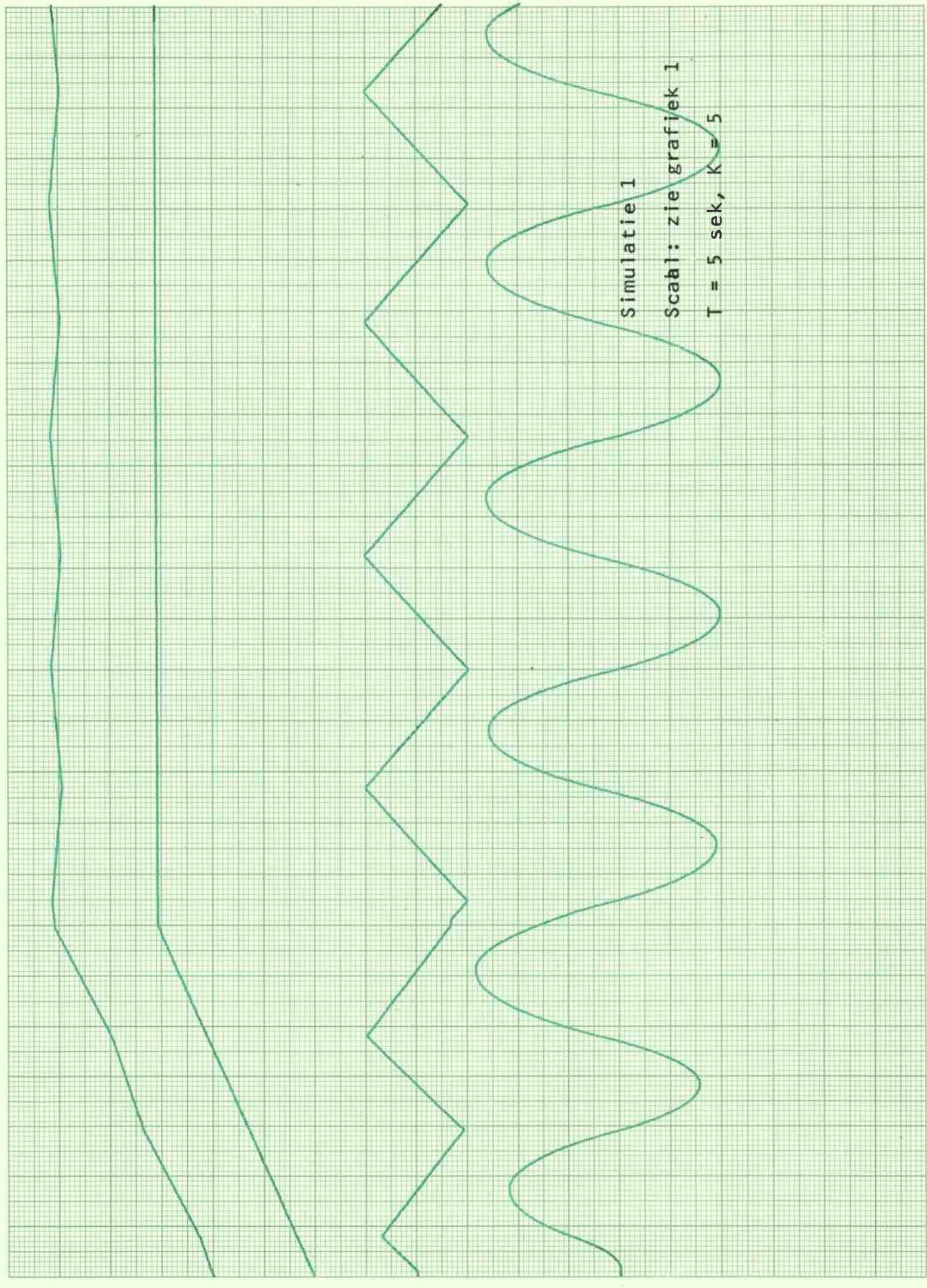
fig 8

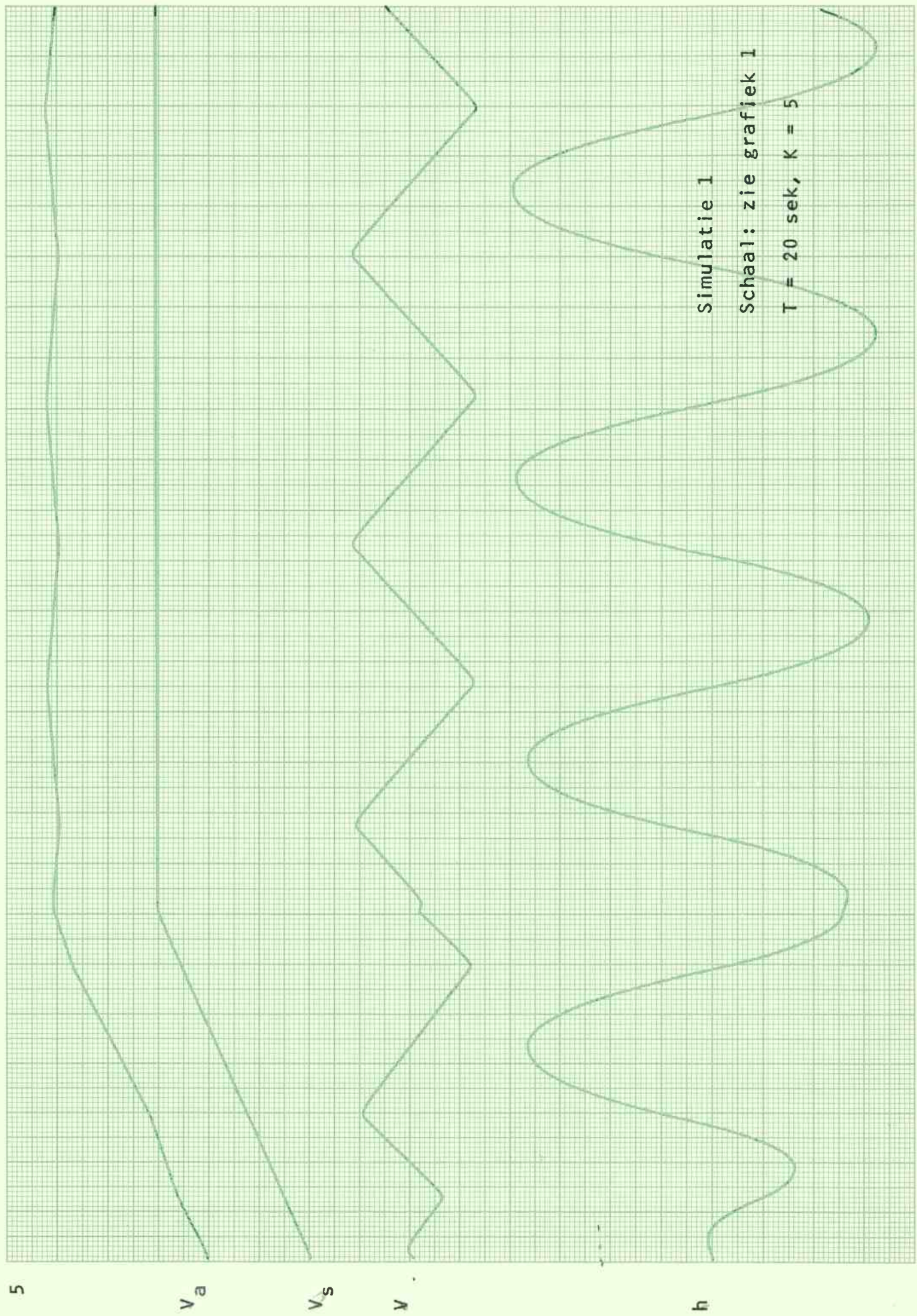


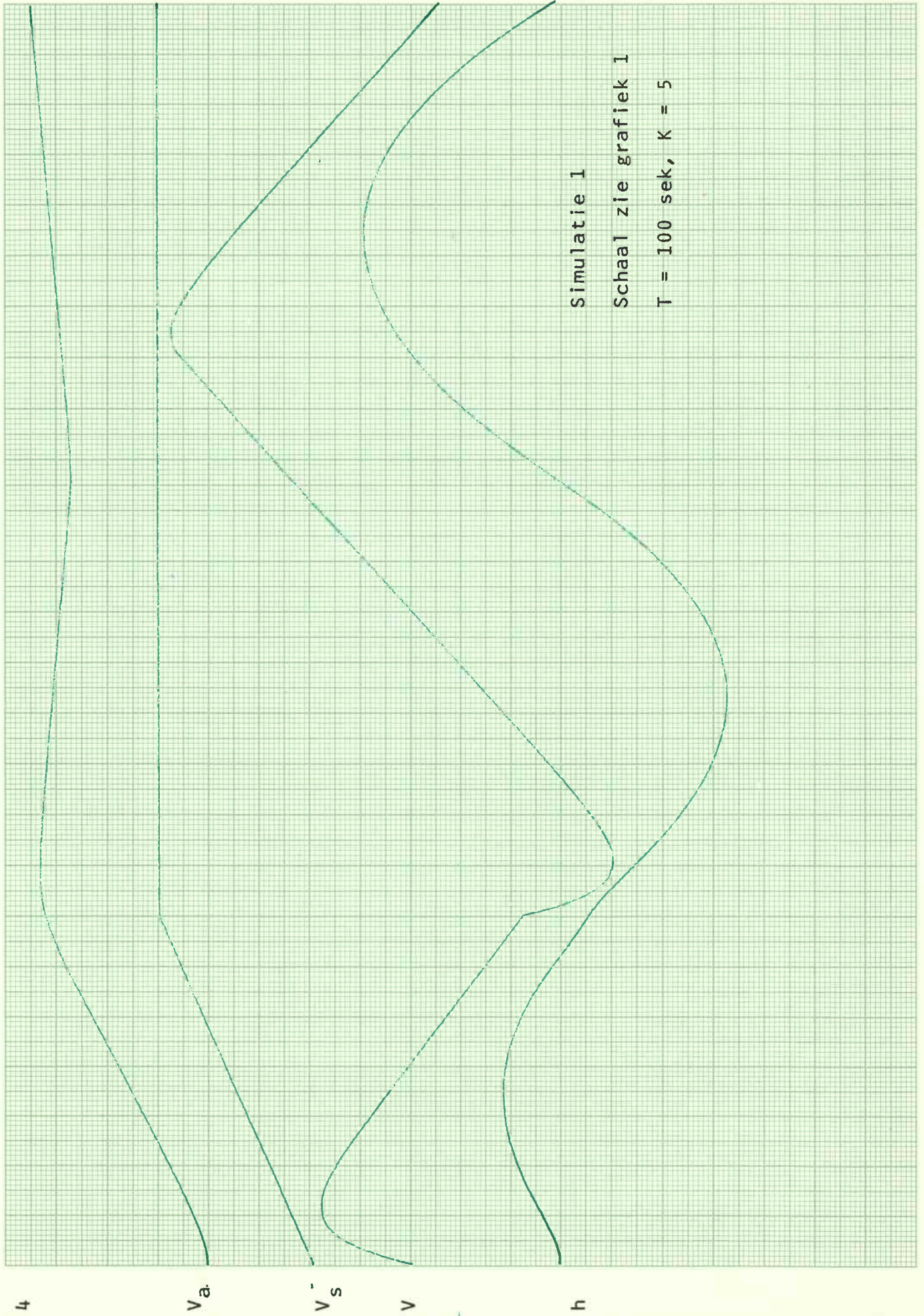




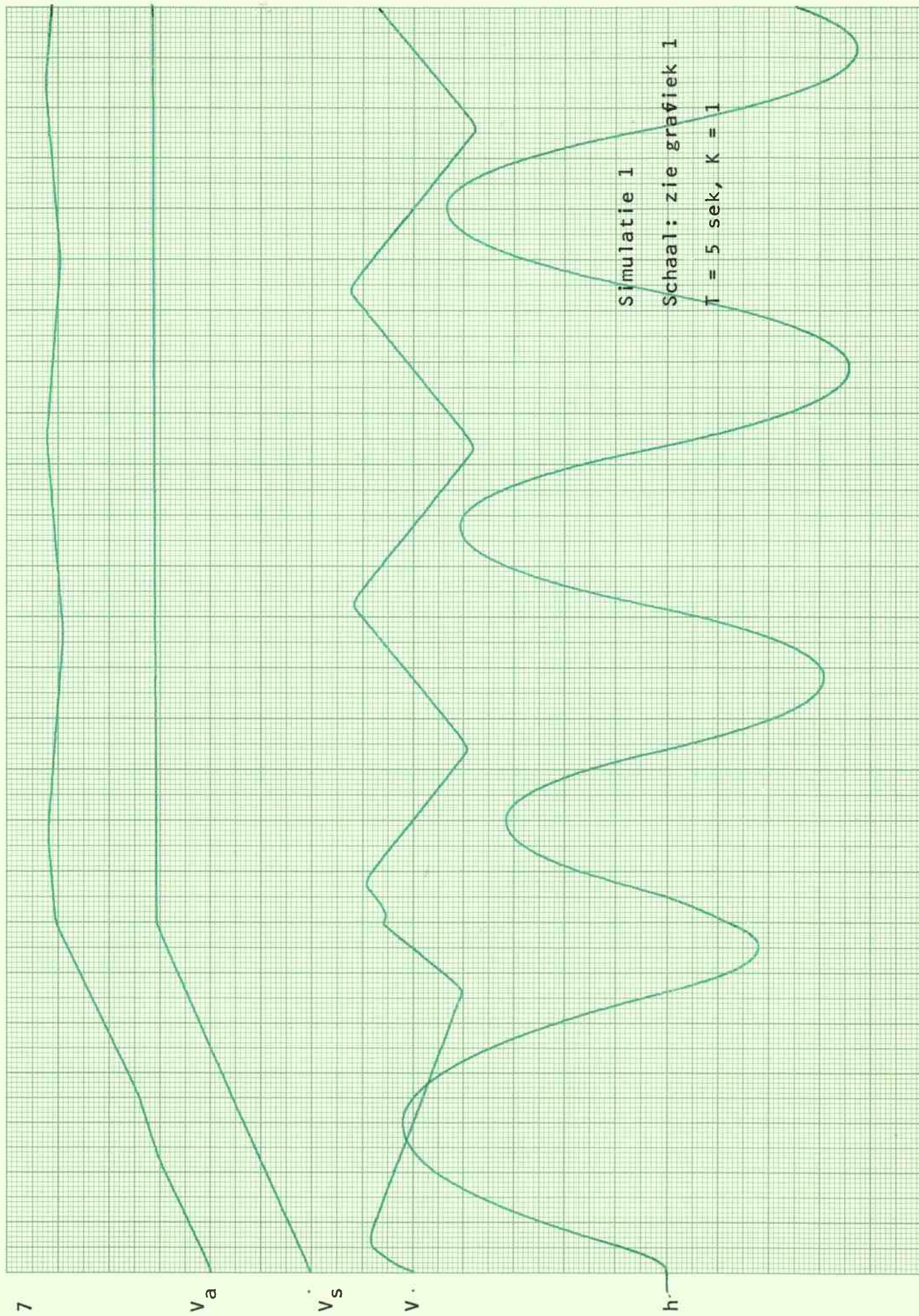
4

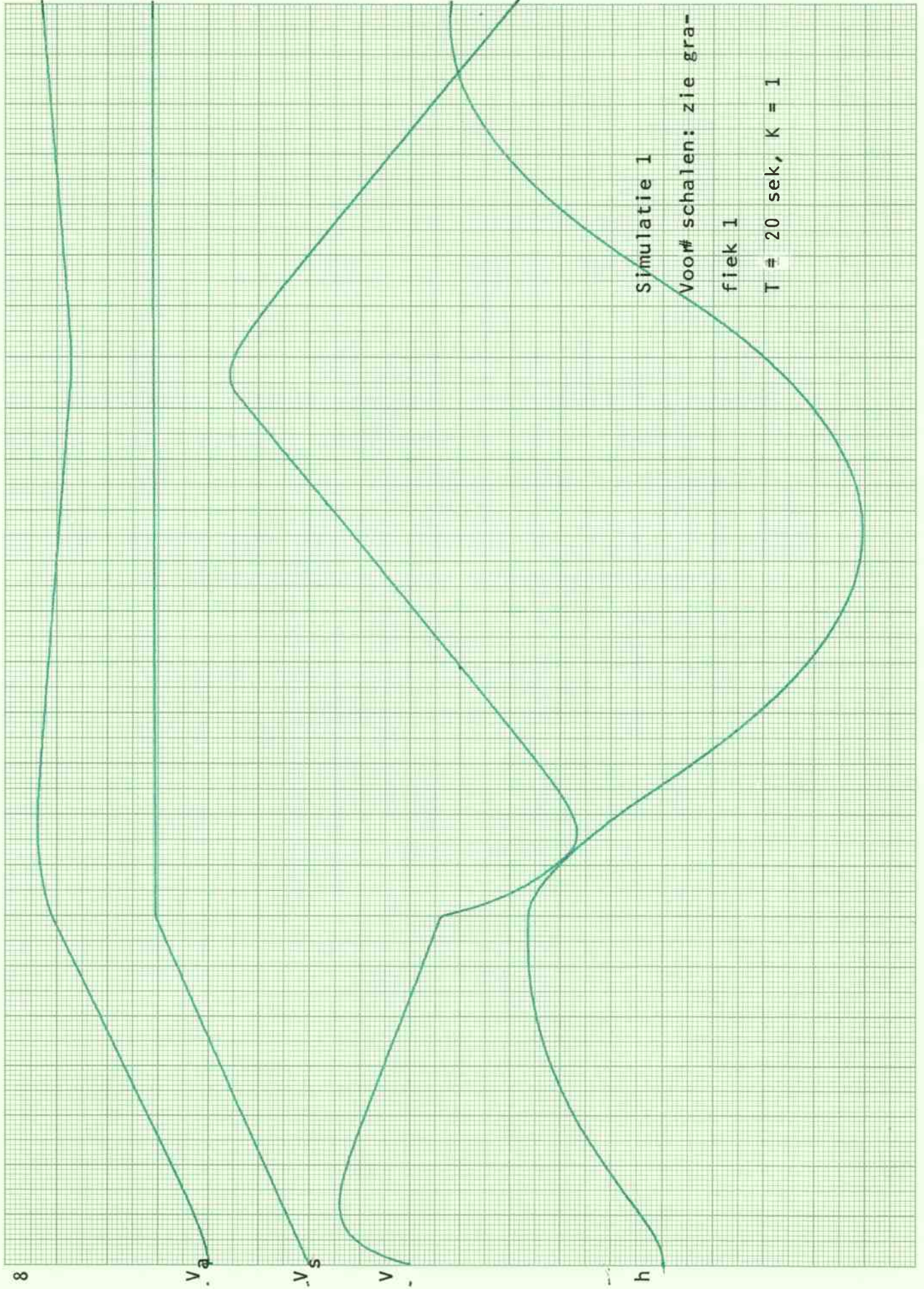






6





Simulatie 1

Voo# schalen: zie gra-

fiek 1

T = 20 sek, K = 1

8

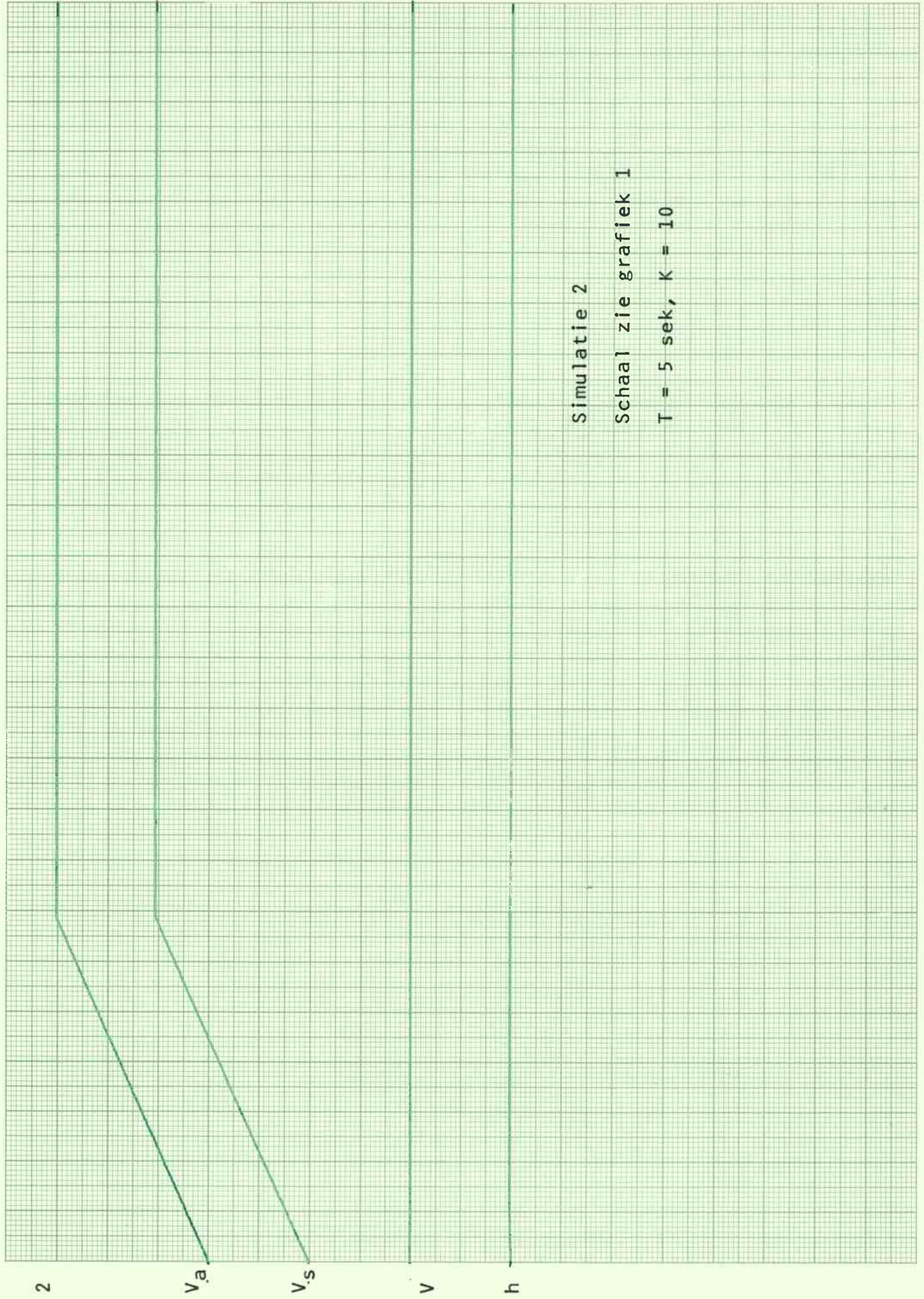
v a

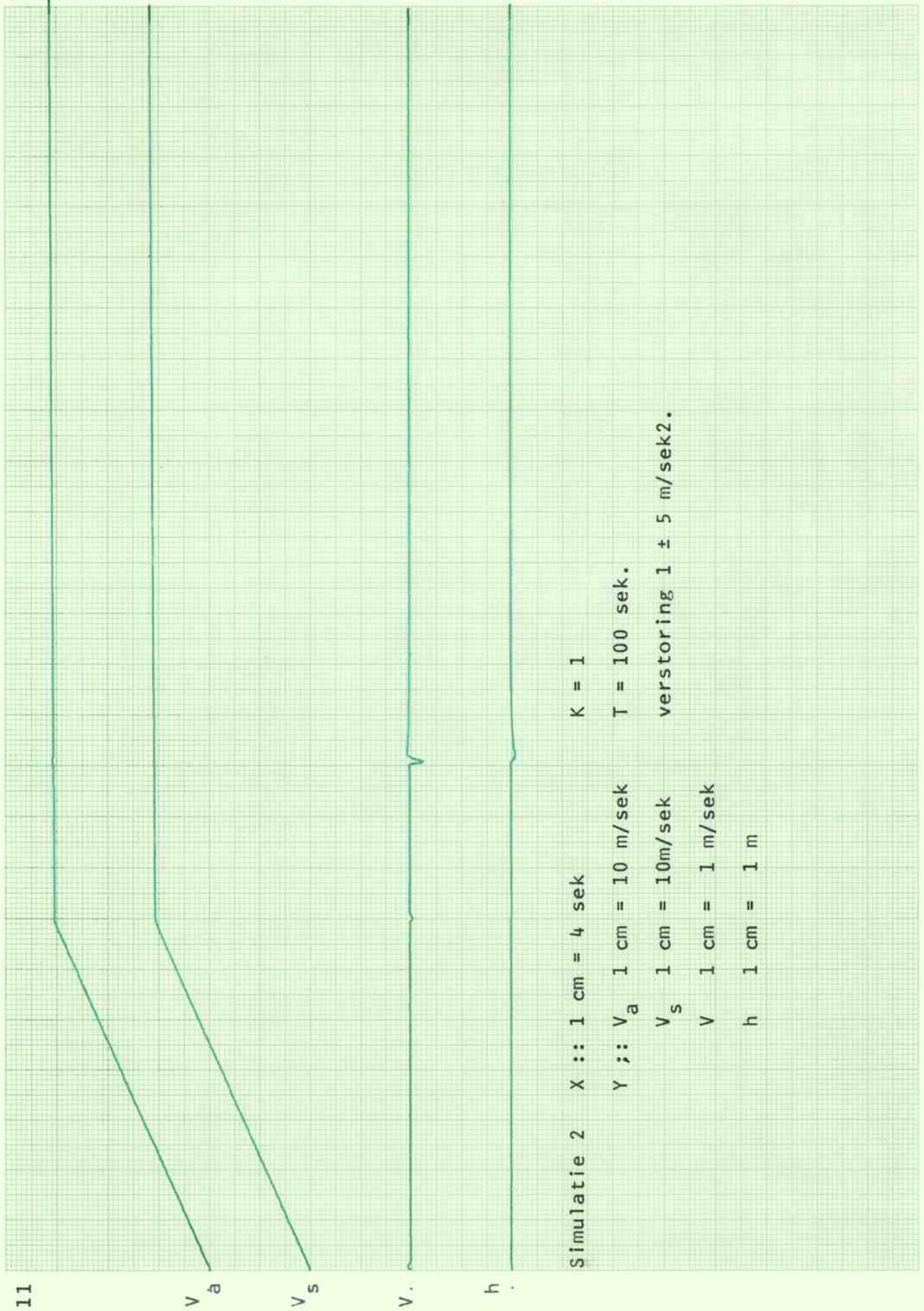
v s

v

h

10





Appendix B.

Berekening van de capaciteit van een geautomatiseerde weg.

Van de vele voordelen die automatische verkeersgeleiding met zich meebrengt, zal de vergroting van de capaciteit van de weg zeker een van de belangrijkste voordelen zijn. Hier wordt door middel van een berekening een indruk gegeven van de capaciteit van een geautomatiseerde weg.

In hoofdstuk 5 is reeds de capaciteit van de gewone autoweg aangegeven; namelijk 1200 auto's/uur/rijstrook. Deze capaciteit is vrij klein. Dit wordt veroorzaakt door het feit, dat de afstand die tussen de auto's moet worden gehandhaafd vrij groot moet zijn. De oorzaak is de hoge reaktietijd van de bestuurder van het voertuig, die ongeveer in de orde van een seconde ligt. Wanneer tevens de mogelijkheid tot inhalen ontbreekt, kan één langzaam rijdende auto de capaciteit nog verder doen dalen. Bij automatische verkeersgeleiding spelen genoemde problemen geen rol; hier is dus een flinke capaciteitsverhoging te verwachten. Hier is de capaciteit afhankelijk van de ruimte die iedere auto nodig heeft, alsmede van de snelheid waarmee de voertuigen rijden.

Europese auto's variëren in lengte van van 4 tot 5 meter. Amerikaanse auto's kunnen langer zijn, daarom wordt hier voor iedere auto een ruimte van 5,5 meter gereserveerd. Uit § 4.3 blijkt dat de maximale afstand tussen auto en rabbit in de orde van 1,2 meter ligt. Om aan de ruime kant te blijven met de capaciteitsberekening ronden we deze afstand af tot 1,5 meter. De totale ruimte die een auto tijdens de rit mogelijk kan in-

nemen bedraagt dus: $5,5 + 2 \times 1,5 = 8,5$ meter. Neem voor iedere auto nu een ruimte van 9 meter om verder mee te werken.

Wanneer men ervan uitgaat, dat de auto's in een lange file achter elkaar rijden, dan zal de weg een capaciteit C bezitten, welke gelijk is aan:

$$C = \frac{v_s}{l} 3600 \quad (\text{ auto's/uur/rijstrook })$$

waarin v_s = systeemsnelheid,

en l = lengte nodig voor één auto.

Indien v_s 30 m/sek bedraagt, vindt men voor $C = 12.000$ auto's/
/uur/rijstrook.

Om meerdere redenen zal het nodig zijn om de voertuigen in clusters te laten rijden. (zie ook § 4.6). Een van die redenen is de veiligheid. Zodra zich een ongeluk voordoet, ergens in een aaneengesloten file, een ongeluk waarbij een auto plotseling stil komt te staan, zal hoogstwaarschijnlijk een flinke kettingbotsing ontstaan. Wanneer nu de auto's in clusters rijden, kan de kettingbotsing beperkt worden tot auto's uit die cluster, waarin de auto met het mankement zich bevond. Om te kunnen garanderen dat de eerste auto van de volgende cluster kan stoppen voor de laatste auto van de voorgaande cluster, moet de afstand tussen twee clusters zo groot zijn, dat een noodstop mogelijk is. De benodigde afstand is gelijk aan:

$$\frac{v_s^2}{2a}$$

waarin a de maximale vertraging is die het systeem de auto

mag opleggen.

De lengte van een cluster zal afhankelijk zijn van het maximale aantal auto's n per cluster, waarbij iedere auto de hiervóór berekende weglengte in beslag neemt. De clusterlengte bedraagt dus $n \cdot l$. De som van clusterlengte en clusterafstand bedraagt:

$$\frac{v_s^2}{2a} + n \cdot l$$

Per uur komen dus

$$\frac{7200 \cdot a \cdot v_s}{v_s^2 + 2 \cdot n \cdot l \cdot a} \quad \text{clusters langs een punt van de weg.}$$

De capaciteit van de weg bedraagt dan:

$$C = \frac{7200 \cdot n \cdot a \cdot v_s}{v_s^2 + 2 \cdot n \cdot l \cdot a} \quad (\text{voertuigen/uur/rijstrook})$$

Wenst men de maximale capaciteit van de weg te kennen, dan bepaalt men die waarde van v_s waarvoor geldt $dC/dv_s = 0$. Hieruit volgt

$$v_s = \sqrt{2 \cdot n \cdot a \cdot l}$$

zodat C_{\max} bedraagt:

$$C_{\max} = 3600 \sqrt{\frac{n \cdot a}{2 \cdot l}} = 1200 \sqrt{\frac{n \cdot a}{2}}$$

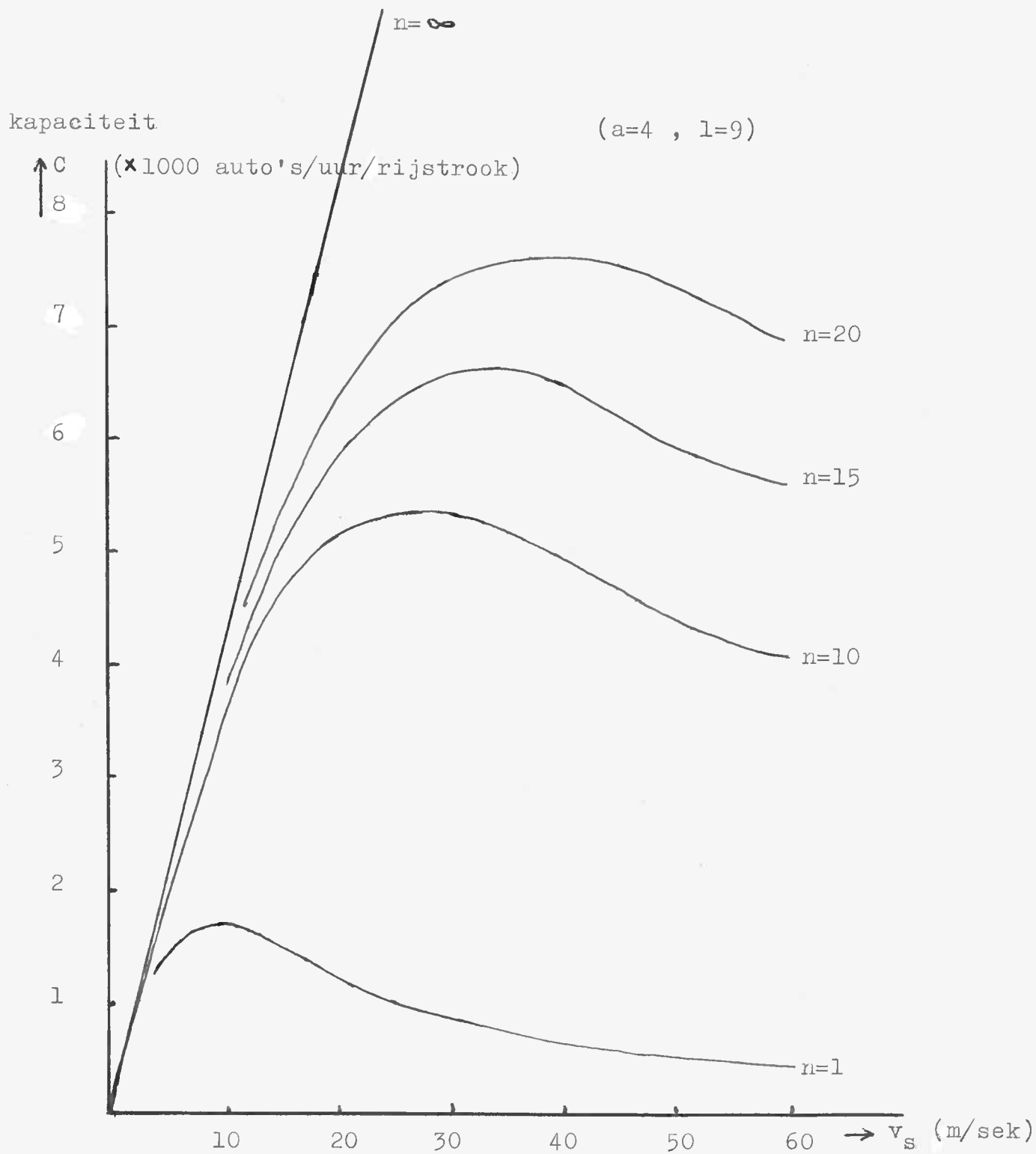
Hieruit kan gekonkludeerd worden, dat het aantal auto's

per cluster, samen met de maximaal haalbare vertraging, de maximumcapaciteit van een weg bepalen. Het maximale aantal auto's per cluster zal mede bepaald worden door de lengte van de afritten, daar de auto's indien nodig per cluster moeten kunnen worden afgevoerd. Men denke aan 10 tot 20 auto's per cluster. De maximaal toe te passen vertraging ligt in de orde van 3 tot 5 m/sek² (de wettelijke eis). In de literatuur wordt gesproken van een maximum vertraging van 8 m/sek².

Wanneer men het ongunstigste geval bekijkt, met $n = 10$ en $a = 3$ m/sek², dan vindt men voor $C_{\max} = 4650$ auto's/uur/rijstrook. De systeemsnelheid bedraagt dan 23,2 m/sek. Voor het gunstigste geval ($n = 20$ en $a = 5$) worden deze waarden: $C_{\max} = 8480$ auto's/uur/rijstrook en $v_s = 42,5$ m/sek.

Om een gemiddelde waarde voor C_{\max} te vinden nemen we $n = 15$ en $a = 4$. Dan wordt $C_{\max} = 6580$ auto's/uur/rijstrook en $v_s = 32,85$ m/sek. In de figuur op de volgende bladzijde staat een en ander grafisch weergegeven.

Tenslotte een opmerking: Hoewel de hier berekende capaciteiten al een faktor 4 tot 7 groter zijn dan de capaciteit voor een rijstrook van een gewone autoweg, zijn de mogelijkheden van het automatische geleidesysteem nog niet uitgeput. De clusterafstand is bepaald op grond van het argument, dat een auto pardoos stil kan staan op de weg. Dit is natuurlijk niet juist. Het defekte voertuig zal altijd een zekere weg nodig hebben om tot stilstand te komen. Deze weglengte kan van de clusterafstand worden afgetrokken. Wanneer het defekte voertuig een vertraging van 8 m/sek² ondergaat, dan is de capaciteit C gelijk aan:
 $C = 8500$ auto's/uur/rijstrook, bij $v_s = 30$ m/sek, $n = 15$ en $a = 4$ m/sek².



Appendix C. Verantwoording.

In deze appendix zal worden uiteengezet door wie welk deel van dit verslag is geschreven. Tevens zal een poging worden gedaan om aan te geven waar van eigen werk sprake is en waar de invloed van de literatuur merkbaar is. Het vervolg zal duidelijk maken hoe dit rapport tot stand is gekomen.

In het begin van de afstudeerperiode was onze enige houvast het afstudeerverslag van Vervoort. Asymptotische instabiliteit in het systeem van Vervoort was er de oorzaak van dat besloten werd een eigen systeem te ontwikkelen. Ieder van ons stelde vervolgens de eisen op, waaraan zijns inziens, het geleidesysteem zou moeten voldoen. Een iteratieproces (these, antithese, synthese) heeft geleid tot de eisen zoals die nu in Hoofdstuk 1 en 2 staan opgesteld. Nadat hoofdstuk 1 en 2 gereed waren werd een zo uitgebreid mogelijke literatuurstudie aangepakt. Toen bleek, dat met name in de V.S., al veel onderzoek op het gebied van automatische verkeersgeleiding was gepleegd. Op dat moment stond ons reeds een geleidesysteem voor de geest, dat in essentie van het Amerikaanse systeem verschilde. Dit essentiële verschil hebben we in hoofdstuk 3 tot uitdrukking gebracht door de verdeling in relatieve systemen (Amerikaanse systeem) en absolute systemen (ons systeem). Mede omdat voor het systeem met relatieve plaatsbepaling nog geen goede oplossing bestaat, werd besloten om een systeem met absolute plaatsbepaling verder te ontwikkelen. Ontwikkelen van een geheel afgerond systeem bleek een zware taak. Na een kleine impasse werd overgegaan tot bestudering van een essentieel deel van het geleidesysteem, namelijk het regelsysteem in de auto. Door middel van een simulatie op een analoge computer, werd het regelsysteem in de auto getest. De basiskennis, nodig om werken met de analoge computer mogelijk te maken, is ontleend aan het kollege analoog en hybride rekenen. De gunstige resultaten

van de simulatie (appendix A) noopten tot een uitgebreidere studie over dit onderdeel; omdat het rapport een persoonlijk verslag van ieder van ons moest bevatten, werd besloten om een gedeelte van het systeem - dat qua werking één geheel vormt - nader te bekijken. Zo behandelt § 4.2, geschreven door Phons van Iersel, de communicatie tussen weg en auto. In § 4.3 beschrijft Peter van den Berg hoe die informatie wordt verwerkt. Tenslotte wordt in § 4.4 door Theo Sprecher een beeld geschetst van het regelsysteem in de auto. Uitgaande van de formule van Biot-Savart en het uit de literatuur afkomstige idee van de splitsing van het veld H in twee onderling loodrechte velden, werd § 4.2 een produkt van eigen kunnen. § 4.3 is geheel eigen werk op de inleiding over de faseruimte methode na; een kollegediktaat verschafte over de laatste methode informatie. De opzet van § 4.4 is, na nauwkeurig omlijnen, mogelijke oplossingen van het gestelde probleem na te gaan, aan de hand van bekende algemene regeltechnische theorieën uit de literatuur. Toen de persoonlijke verslagen gereed waren, kwamen we tot de ontdekking dat inmiddels in de V.S. een rapport was verschenen waarin het door ons gepropageerde systeem uitgebreid werd beschreven. Met voldoening konstaterden we, dat een aantal ideeën, die wij de onze dachten te noemen, ook in dit rapport - samengesteld door een grote groep mensen - min of meer letterlijk werden genoemd. Hoofdstuk 4 wordt besloten met § 4.5 t/m 4.8, waarin systeemeigenschappen worden uitgewerkt aan de hand van de eisen uit hoofdstuk 2. In hoofdstuk 5 wordt de prijs van het systeem bekeken, veel feiten zijn ontleend aan TP 2000. De in de economische beschouwingen genoemde voordelen blijken vanzelf na enig denkwerk. Bij het tot stand komen van dit afstudeerverslag is van een - vaak niet gemakkelijke - intensieve samenwerking sprake geweest. Behalve in § 4.2, 4.3 en 4.4 is daarom de invloed van de schrijvers afzonderlijk niet meer te onderkennen.

Literatuurlijst.

1. High speed ground Automated highways.
transportation sys- Deze studie is verricht in op-
tems engineering dracht van het amerikaanse ministe-
study. rie van vervoer.

Dit rapport geeft de resultaten van
een studie weer, die verricht werd
door een groep systems engineers.
Een representatief systeem wordt
beschreven.
2. Flory, L.E.; Electronic techniques in a system of
Gray, G.W.; highway vehicle control.
Morey, R.E.; R.C.A. Review, september 1962, pp.
Pike, W.S.; 293-310.
Caulton, C.O. Het verslag behandelt een oplossing
van het probleem: "Hoe detekteer ik
een auto vóór mij en hoe breng ik
de gewenste informatie over".
3. Fenton, R.E. One approach to highway automation.
 Proceedings of the IEEE, vol 56, no 4,
 april 1968, pp. 556-566.
 Behandelt een representatief systeem
met behulp van relatieve plaatsbepa-
ling.
4. Fenton, R.E. The electronic highway.
 IEEE spectrum, vol. 6, no. 7, july
 1969, pp. 60-66.

- Beschrijft een systeem met relatieve plaatsbepaling.
- 5 Fenton, R.E. Automatic vehicle guidance and control - A state of the art survey. IEEE transactions on vehicular technology, vol. VT-19, no. 1, february 1970, pp. 153-161.
Geeft een overzicht van het tot dan toe gepresterde in automatische verkeerssystemen.
6. Cosgriff, R.;
Roeca, W.
Thomas, A;
Todosiev, E. Studies of the two vehicle situation. IEEE int. convention record, part 8, vol. 12, pp. 197-203, 1964.
Beschrijft mogelijke lineaire en longitudinale regelsystemen.
7. Pipes, L.A. An operational analysis of traffic dynamics.
Journal of applied physics, vol. 24, no. 3, march 1953, pp. 274-281.
Geeft een wiskundige beschouwing van de gedragingen van elkaar volgende auto's.
8. Cosgriff, R.;
English, J.J.;
Roeca, W.B. An automatic system for longitudinal control of individual vehicles.
Highway research record, 1966, no. 122, pp. 7-18.
Behandelt een systeem voor de longitudinale regeling van auto's.

9. ----- Trucks braked by radar device.
Fleetowner, april 1970, vol. 65, no. 4,
p. 48.
10. Bender, J.G.; On the flow capacity of automated
Fenton, R.E. highways.
Transportation science, vol 4, no. 1
february 1970, pp 52-63.
Geeft methoden ter berekening van de
capaciteit van geautomatiseerde wegen.
11. Bender, J.G.; A study of automatic car following.
Fenton, R.E. IEEE transactions on vehicular tech-
nology, vol. VT-18, no. 3, november
1969, pp. 134-140.
Beschrijft het regelsysteem in de
auto dat vereist is om andere auto's
te kunnen volgen, geeft experimentele
resultaten.
12. Fenton, R.E.; An intervehicular spacing display for
Montano. W.B. improved car-following performance.
IEEE transactions on man-machine sys-
tems, vol. MMS-9, no. 2, june 1968,
pp. 29-35.
Behandelt de zogenaamde joy-stick ter
verbetering van het rijgedrag bij het
volgen van auto's, geeft experimente-
le resultaten.

13. Kometani, E. A safety index for traffic with linear spacing.
Operations research, 1959, no. 7, pp. 704-720.
Geeft een verbetering van het artikel van Pipes (7).
14. Herman, R. Traffic dynamics: Analysis of stability in car following.
Journal of the operations research society of America, february 1959, pp. 68-106.
Behandelt stabiliteitsproblemen die optreden bij elkaar volgende auto's.
15. Levine, W.S. On the optimal error regulation of a string of moving vehicles.
IEEE transactions on automatic control, vol. AC-11, no. 3, july 1966, pp. 355-361.
Geeft een methode om een optimaal regelsysteem te ontwerpen, om plaats en snelheid van elk voertuig in een rij met hoge snelheid voortbewegende voertuigen te regelen.
16. Izzard, C.F. Innovations in highway traffic systems.
Public works, august 1969, vol. 100, no. 8, pp. 105-110.
Geeft een aantal vernieuwingen die het autorijden moeten vergemakkelijken.

17. Bierman, G.R.; The automatic highway.
Hain, J.L. Mechanical engineering, july 1968,
pp. 18-22.
18. Vervoort, E.H. Een simulatieprogramma opgesteld ten-
einde diverse modifikaties van een
verkeersgeleidingsysteem te kunnen
beproeven.
Afstudeerverslag, T.H. Delft, dK/1970/
/02, Lab. voor automatische verkeers-
systemen.
19. Olson, K.W. A system for automatic vehicle lateral
guidance.
Communications and control systems
laboratory, Department of electrical
engineering, The Ohio State University,
Columbus, Ohio 43210, unpublished.
20. Ministerie van TP 2000,
verkeer en water- Ministerie van verkeer en waterstaat,
staat. Staatsuitgeverij 's-Gravenhage, 1971.
Behandelt de te verwachten ontwikkeling
op verkeer- en vervoergebied.
21. Carp, R.W.; Adaptive speed control for automobiles.
Elliot, J.G.; Bendix technical journal, vol.2, 1969,
Weidman, J.S. Ondanks de misleidende titel geen adap-
tief maar een lineair auto- volgsysteem
met behulp van radar en optische de-
tektie.

22. Kwakernaak, H. Kollegediktaat moderne systeem- en regeltheorie b.o. najaar 1968.
Hoofdstuk betreffende lineaire terugkoppeltheorie voor multivariabele systemen. Gevoeligheidseigenschappen van de optimale lineaire reguleur.
23. Gardels, K. Automatic car controls for electronic highways.
General motors corporation research laboratory, report GMR-270, june 1960.
24. Kasselmann, J.T.; Adaptive steering.
Keränen, T.W. Bendix technical journal, vol. 2, 1969.
Beschrijving van een laterale regelaar.
25. Flügge-Lotz, I. Discontinuous and optimal control.
McGraw Hill 1968, Hoofdstuk 2, 3.
Diskontinu regelen met behulp van fasevlakmethoden.
26. Athans, M.; Optimal control.
Falb, P.L. McGraw Hill 1966.
Uiteenzetting van moderne systeem- en regeltheorie. Hoofdstuk 6-17 t/m 6-20 over het minimum energieprobleem, hoofdstuk 9 over het ontwerpen van optimale lineaire systemen met kwadratische criteria.
27. Mishkin, E.; Adaptive control systems.
Braun, L. McGraw Hill 1961.
Hoofdstuk 5 over bemonsterde systemen en stabiliteitsonderzoek.

28. Levis, H.; Athans, M. On the optimal sampled-data control of strings of vehicles. Transportation science, vol. 2, november 1968, no. 4, pp. 362-382. Over het optimaal regelen van positie en snelheid van een met hoge snelheid rijdende rij voertuigen onder toepassing van bemonsterde terugkoppelingen.
29. Kooistra, J. Simulatie van de rijomstandigheden en konstante snelheidsregeling voor de Daf 750 bestelwagen. Afstudeerverslag, Lab. voor regeltechniek, afd. der elektrotechn., T.H. Delft, jan 1969, no. 99. Bevat afleiding overdrachtsfunctie van Daf-bestelauto, ontwerp gasklepservo.
30. Blackwell, L.M. A study af the adaptibility of the automobile to automatic control. Ohio state university, report EE -276A-3, february 1967. Beschrijft een autovolgsysteem, maakt gebruik van kompensatiemethoden ter verbetering van de autooverdrachtsfunctie.
31. Bender, J.G. Experimental studies in vehicle automatic longitudinal control. Ohio state university, Report EES-276A-5, august 1968. Beschrijft eenzelfde systeem als 30.

32. Honderd, G.

Regeltechniek IV

Kollegediktaat T.H. Delft, 1968.

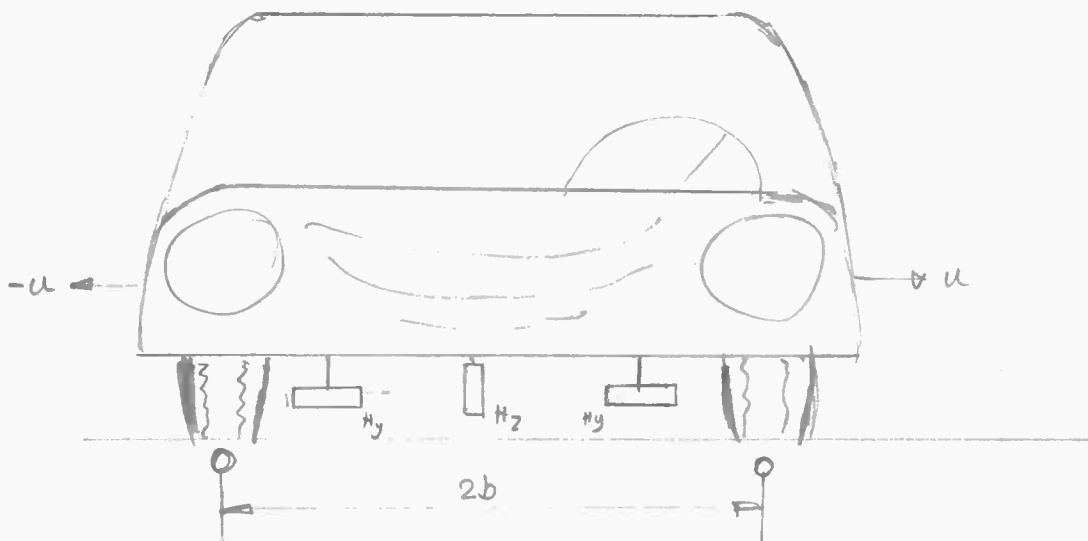
Hoofdstuk 2: gevoeligheidsmodel en adaptatie, hoofdstuk 3: fasevlakmethode.

Appendix bij § 4.2

In deze appendix zal een aantal mogelijke configuraties van antennes aan de auto en kabels in de weg worden bekeken. De antennes bestaan uit een ferrietstaaf, omhuld door een spoel. In deze appendix wordt een antenne aangegeven door een rechthoekje.

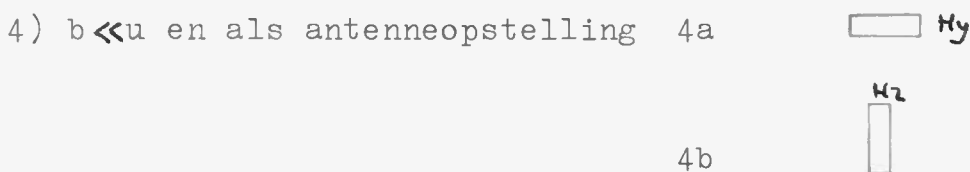


Het veld H , dat een emk in de spoel opwekt, loopt in lengterichting door de antenne. Onderstaande figuur toont de opstelling van de antennes onder de auto, zoals die behandeld is in § 4.2 (de longitudinale besturing blijft even buiten beschouwing).



Stelt men de uitwijking die de auto ten opzichte van de oorsprong maximaal kan aannemen op $+u$ of $-u$, dan kan met behulp van de kabels in de weg een tweetal configuraties worden gereaa-

liseerd: $b \ll u$ of $b \gg u$ (bij \ll en \gg denke men aan een faktor 2 tot 5). Samen met de antenneopstelling worden dan 4 grensgevallen onderscheiden:



Opgemerkt wordt, dat het in de opstelling 1, 2 en 4 niet veel zin heeft om de antennes een andere stand te geven; verandering van de stand van de antennes geeft geen aanleiding tot een verbetering in de regeleigenschappen. Hieronder worden de 4 genoemde configuraties behandeld.

1) Dit is de in § 4.2 behandelde opstelling.

Voordelen: 1.1 Meten van het veld H_y geeft een gunstig veldverloop tussen $+0,8 b$ en $-0,8b$ bij deze dradenconfiguratie

1.2 H_z vormt een goed referentieveld tussen $+0,8b$ en $-0,8b$ (H_z is in dit interval ongeveer konstant)

1.3 Deze opstelling van de antennes kan een goede sig-

naal/ruisverhouding geven, mits men de antennes niet te dicht bij elkaar aanbrengt.

1.4 Storingen kunnen goeddeels worden geëlimineerd. Immers de antennesignalen van het veld H_y zijn tegengesteld, terwijl stoorsignalen (bijvoorbeeld 50 Hz-brom) gelijkgerichte signalen opleveren. Zodoende kunnen stoorsignalen worden weggewerkt.

1.5 Valt een van de antennes uit, dan wordt het voertuig niet onbestuurbaar, de andere antenne die H_y meet kan zijn functie overnemen.

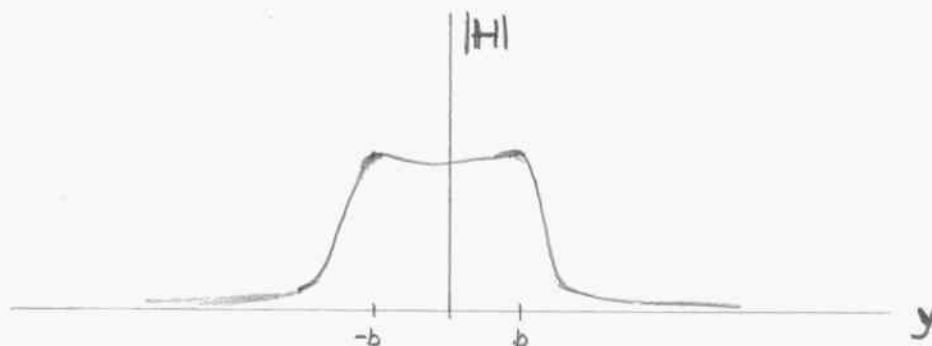
1.6 Bij deze dradenconfiguratie kunnen de kabels wellicht in de berm van de weg worden gelegd in plaats van in een ingeslepen groef in het asfalt. Onderhoud en aanleg kunnen daardoor goedkoper worden.

Nadelen

1.1 Twee antennes voor H_y vereist.

1.2 Wanneer de kabels in de berm liggen, moet over de breedte van de weg een gleuf worden gezaagd om kruisdraden te kunnen leggen.

Opmerking: Het veldverloop van $|H| = (H_y^2 + H_z^2)^{\frac{1}{2}}$ is geschetst in onderstaande figuur



In het gebied boven de draden is $|H|$ ongeveer konstant. Voor het sturen van de auto is deze karakteristiek minder geschikt. Wordt H_y gebruikt in plaats van H , dan wordt een veel gunstiger

ger karakteristiek gevonden, zoals ook uit § 4.2 blijkt.

2) De voordelen van deze configuratie zijn:

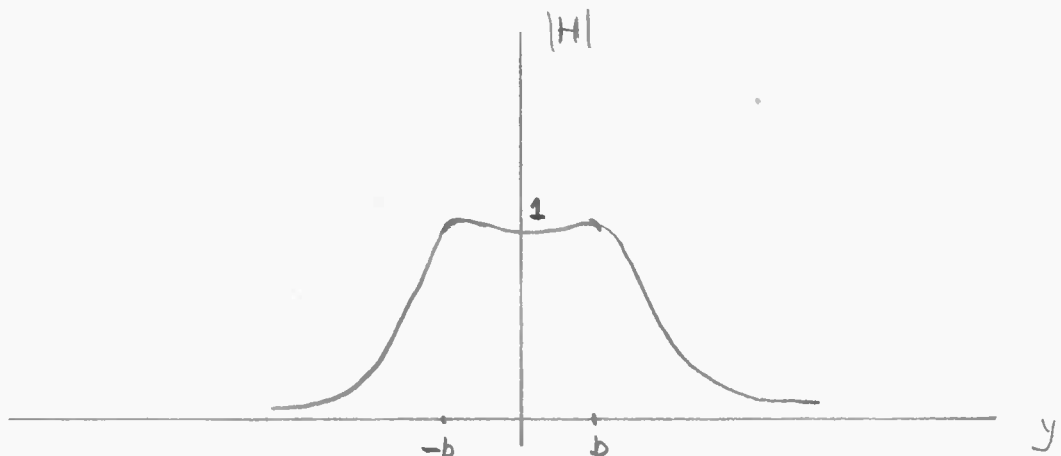
- 2.1 Gunstig veldverloop tussen $0,8b$ en $-0,8b$.
- 2.2 H_z vormt een goed referentieveld tussen $+0,8b$ en $-0,8b$.
- 2.3 Draden kunnen in de berm van de weg worden gelegd.
- 2.4 Slechts één antenne voor het meten van H_y vereist.

Nadelen:

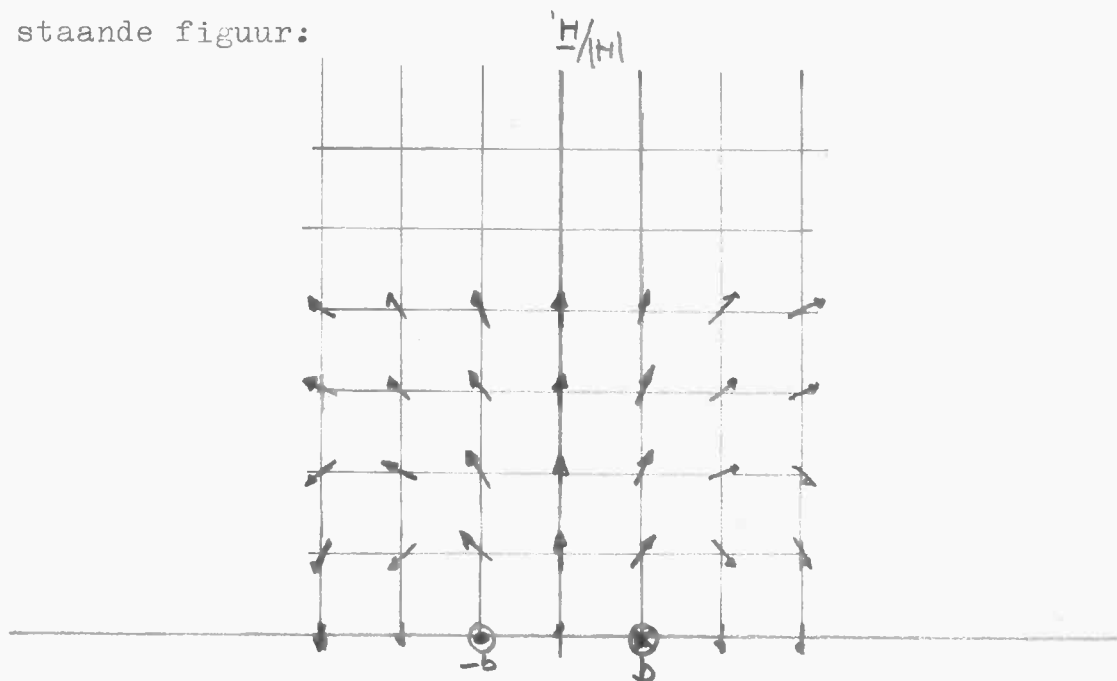
- 2.1 Liggen de kabels in de berm, dan moet voor kruiskabels over de gehele breedte van de weg een sleuf worden gegraven
- 2.2 Slechte signaal/ruisverhouding, in de oorsprong immers is de veldsterkte nul.
- 2.3 Storingen kunnen moeilijker geëlimineerd worden dan bij opstelling 1
- 2.4 Uitval van de antenne voor H_y maakt de auto onbestuurbaar.

Vóór de behandeling van de methoden 3 en 4, volgt hier eerst een kleine beschouwing over het veld H .

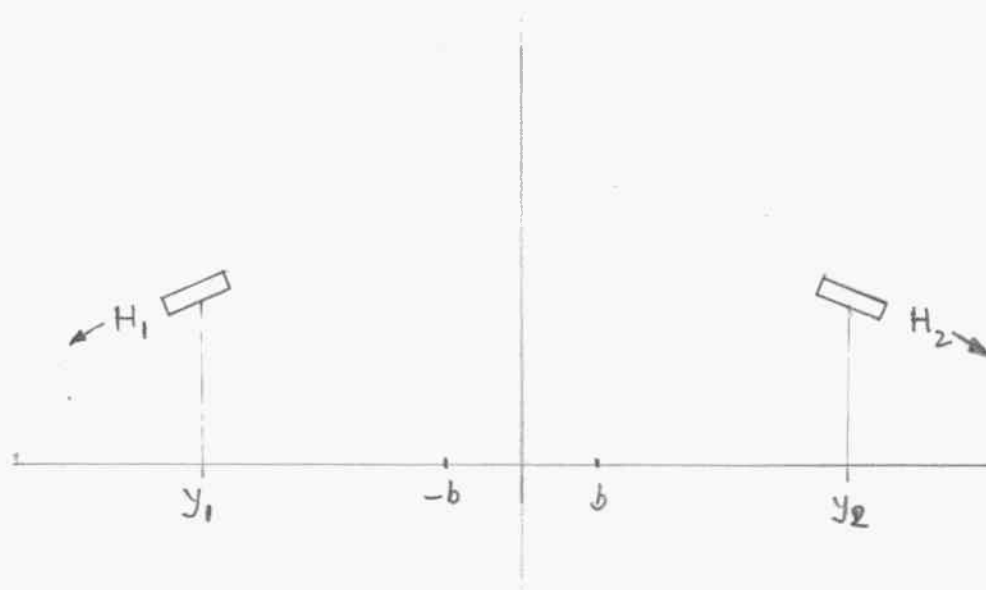
Het veldverloop van $|H|$ ziet er als volgt uit:



De richting van de veldsterkte H wordt aangegeven in de onderstaande figuur:



In de opstellingen 3 en 4 kan niet meer met voordeel van het veldverloop van H_y gebruik gemaakt worden. De antennes kunnen nu in zo'n stand worden geplaatst, dat in ideale toestand het maximale veld kan worden gemeten. Bekijk nu de volgende configuratie



Het antennesignaal, dat in ideale toestand wordt gemeten, is evenredig met $H = H_1 + H_2$. Wijkt het voertuig van de ideale koers af, dan wordt het antennesignaal evenredig met:

$$H = H_1 \cos \varphi_1 + H_2 \cos \varphi_2$$

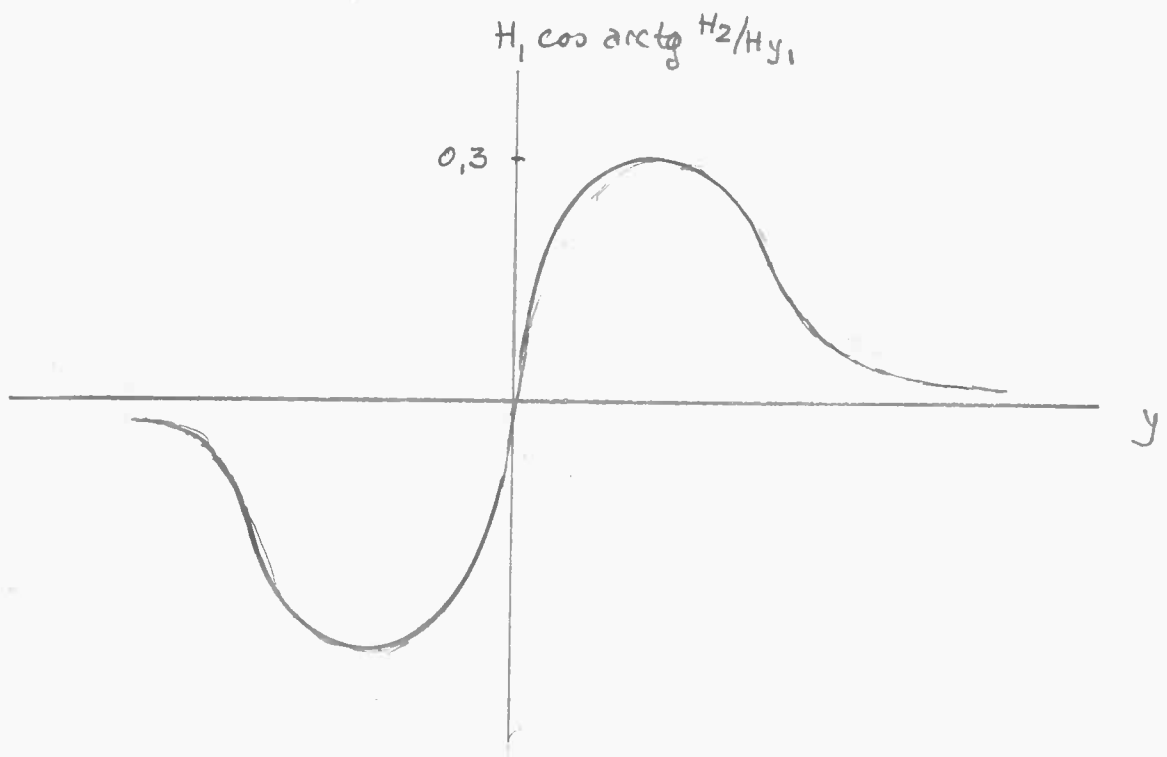
waarin φ_1 en φ_2 de hoeken zijn tussen veldrichting en antenne-richting ter plaatse y_1 en y_2 .

Er geldt dat $\varphi_1 = \arctg(H_z/H_{y_1})$ en $\varphi_2 = \arctg(H_z/H_{y_2})$

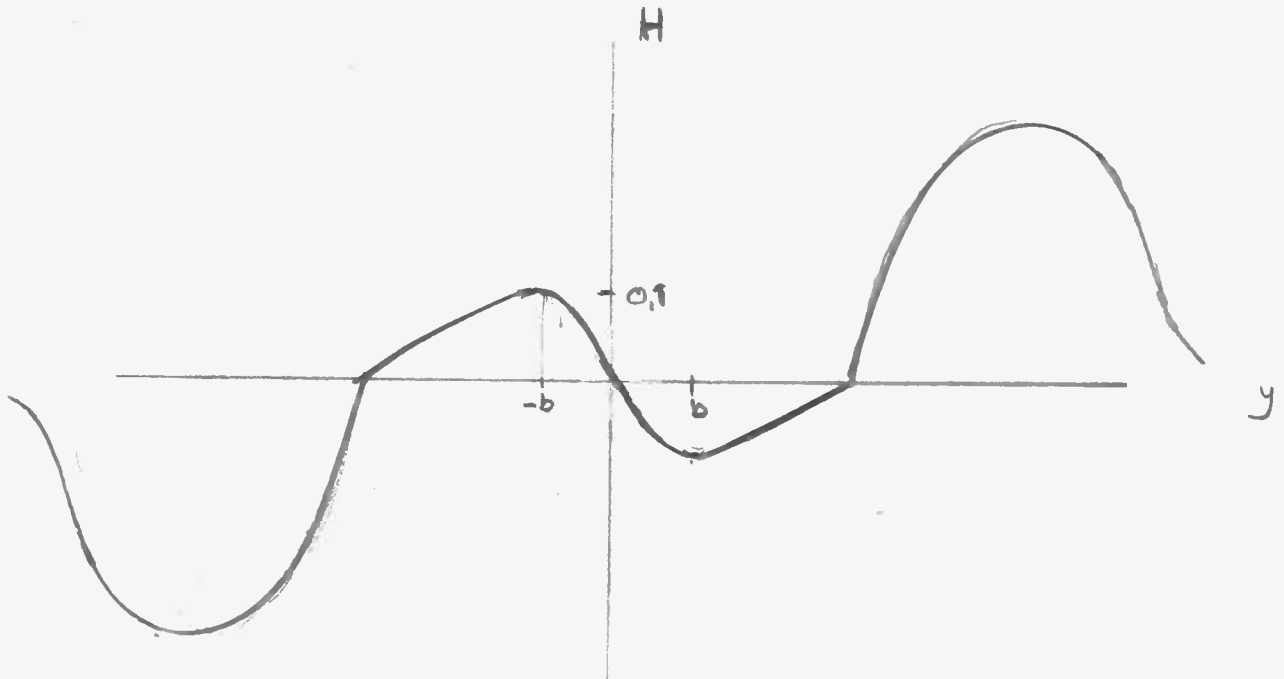
Neem nu voor het gemak, dat de antennes evenwijdig aan de y-as lopen, dan volgt voor alle waarden van y_1 en y_2

$$H = H_1 \cos(\arctg(H_z/H_{y_1})) + H_2 \cos(\arctg(H_z/H_{y_2}))$$

Voor $-\infty < y < \infty$ heeft $H_1 \cos(\arctg(H_z/H_{y_1}))$ het volgende verloop:



Eenzelfde verloop wordt gevonden voor H_2 . Sommeren van H_1 en H_2 levert H , geschetst in onderstaande figuur:



Ligt b in de orde van 5 cm, terwijl u ongeveer 15 cm bedraagt, dan blijkt duidelijk de ongunstige regelkarakteristiek. In het regelgebied liggen drie nulpunten, die ieder voor zich aanleiding kunnen geven tot het volgen van "een ideale koers". Wanneer de antennes niet evenwijdig aan de y -as worden gelegd, vindt men ook ongunstige waarden voor het veldverloop. Nu kunnen voor- en nadelen van configuratie 3 en 4 worden opgesteld.

3) Voordelen:

- 3.1 Goede signaal/ruisverhouding in ideale toestand.
- 3.2 Storingen kunnen gedeeltelijk, doch minder goed als bij opstelling 1, worden geëlimineerd.

3.3 Valt een van de antennes uit, dan wordt de auto niet onbestuurbaar.

3.4 Kruisdraden vereisen slechts kleine sleuven in de weg.

Nadelen:

3.1 Twee antennes voor H vereist

3.2 Geen gunstige regelkarakteristiek

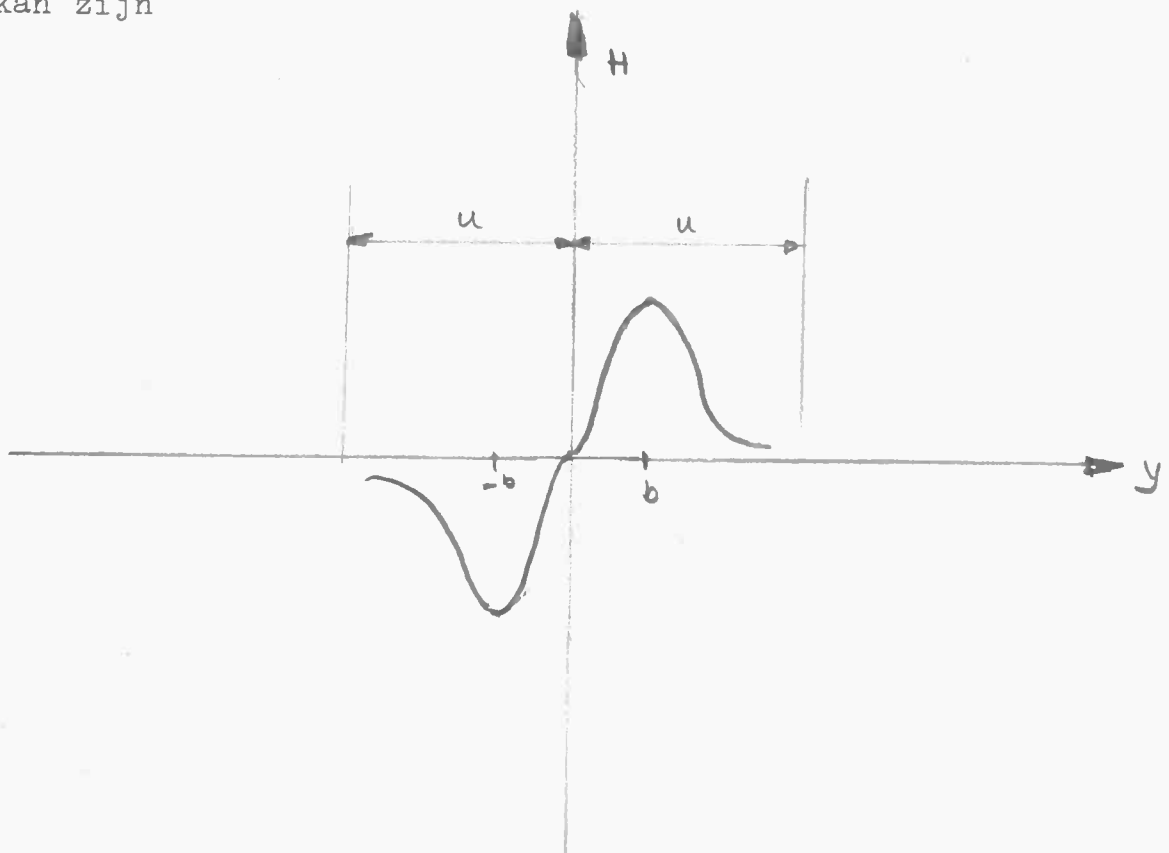
3.3 Om een veld van redelijke grootte in het meet punt op te wekken is meer energie vereist dan bij 1

3.4 In de langsrichting van de weg moeten sleuven worden geslepen teneinde kabellegging mogelijk te maken.

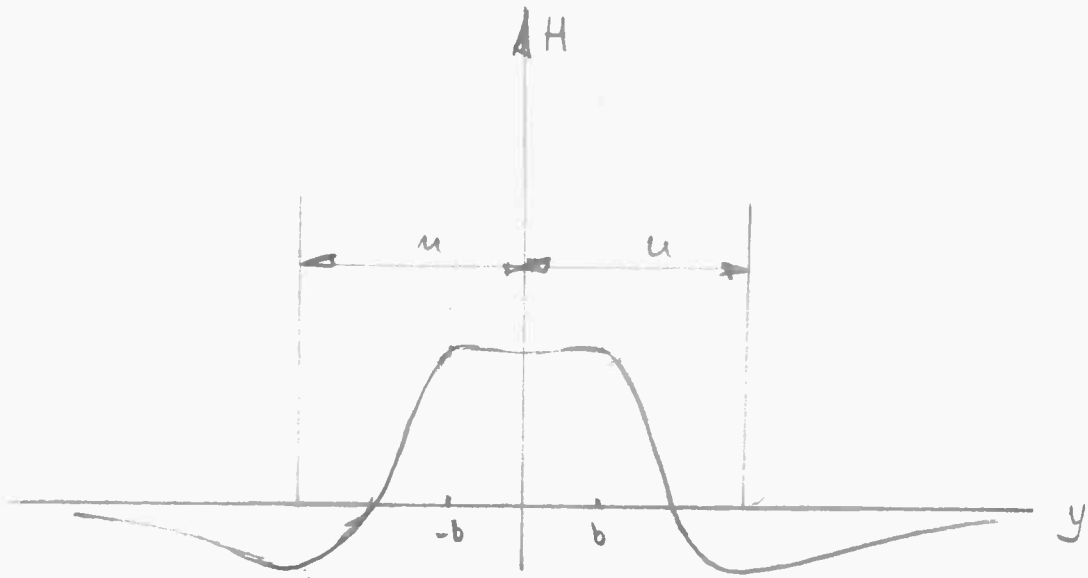
3.5 Er staat geen referentieveld meer ter beschikking.

3.6 Meerder "ideale tracé's" zijn mogelijk.

4a) Het veldverloop dat in deze opstelling wordt gemeten staat in onderstaande figuur afgebeeld. De waarde van u en b tonen duidelijk aan, dat hier van een goede regeling geen sprake kan zijn



4b) Het signaal dat door de antenne in de opstelling van 4b wordt gegeven, staat afgebeeld in de onderstaande figuur. Ook hier is geen bruikbare regeling van te maken.



Opmerking: De configuraties 4a en 4b geven eigenlijk Het veldverloop van H_y en H_z . Het gebied waarover y kan variëren is hier echter veel groter dan het interval $+b$ en $-b$, daardoor wordt de ongunstige regelkarakteristiek veroorzaakt.

Van de vier mogelijke opstellingen, die hier zijn beschreven, lijken alleen 1 en 2 redelijke resultaten te geven. De methoden 3 en 4 zijn, door de ongunstige karakteristieken, vrijwel niet te gebruiken voor het sturen van een auto.