

- twee typen lusdetectoren om snelheden nauwkeurig te meten
- praktijkonderzoek naar de nauwkeurigheid van lusdetectoren

Lusdetectoren voor snelheidsmeting

A. Versluis
 Rijkswaterstaat, Dienst Verkeerskunde
E. Nieuwkoop
 Technisch Fysische Dienst TNO-TH

1. Inleiding

Zoals reeds eerder in Verkeerskunde (nr. 4/79 blz. 156 e.v.) werd beschreven, kan met behulp van twee achter elkaar liggende lussen in het wegdek de snelheid van passerende voertuigen worden bepaald. Hiertoe worden beide lussen aangesloten op een detector, die vaststelt wanneer een voertuig de lus passeert. De snelheid v wordt vervolgens berekend met behulp van de formule $v = s/t$, waarbij s de afstand is tussen de twee lussen en t de tijd die verstrijkt tussen het passeren van de eerste en de tweede lus.

Fouten in de snelheid v worden in drie groepen onderverdeeld, te weten:

- I fouten door afwijkingen in de lusgeometrie: $\leq 1\%$.
- II fouten als gevolg van ongelijke voertuigpassage: naar schatting 0,5-1% (zie Verkeerskunde 9/79 blz. 424);
- III fouten ten gevolge van onvolkomenheden in de detector.

Om snelheidsmetingen zo nauwkeurig mogelijk te verrichten dienen in éérste instantie de fouten van categorie III gereduceerd te worden tot minder dan circa 1%. In dit artikel zal

worden ingegaan op de werking van twee typen (nauwkeurige) detectoren die werden ontwikkeld voor de Dienst Verkeerskunde van de Rijkswaterstaat, namelijk:

- een door de Technisch Fysische Dienst ontwikkelde analoge detector voor het ijkken van lussen
- een door de Dienst Verkeerskunde zelf ontwikkelde digitale detector voor verkeerskundige metingen.

Om een indruk te krijgen wat voor nauwkeurigheid met een dergelijk snelheidsmeetsysteem in de praktijk haalbaar is, werden met de analoge detector in combinatie met een lasersnelheidsmeter langs de weg, enkele ijkmetingen verricht. Dergelijke metingen werden nog niet uitgevoerd met de digitale analyse-detector, omdat de ontwikkeling hiervan pas kortgeleden werd afgerond. Een viertal prototypen is inmiddels wel in het laboratorium van de DVK-Stafafdeling Elektronische Systemen beproefd. Hiermee zullen op korte termijn eveneens ijkmetingen worden verricht, om de prestaties in de praktijk te toetsen.

2. Meetprincipe

Een lus in het wegdek vormt een spoel waarvan de zelfinductie afneemt (2-6%) als een voertuig de lus passeert.

De twee in dit artikel behandelde detectoren werken volgens een principe waarbij deze verandering van de luszelfinductie niet direct wordt gemeten maar via een daarmee verbonden lusfrequentie verandering. De lus wordt hierbij te zamen met een afstemcondensator opgenomen in een oscillator, zodanig dat geldt:

$$f_{lus} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

met f_{lus} : lusfrequentie
 L : luszelfinductie
 C : capaciteit afstemcondensator

Bevindt zich geen voertuig boven de detectielus, dan zal de lusfrequentie f_{0} kHz bedragen; dit is de rustfrequentie van het oscillatorcircuit.

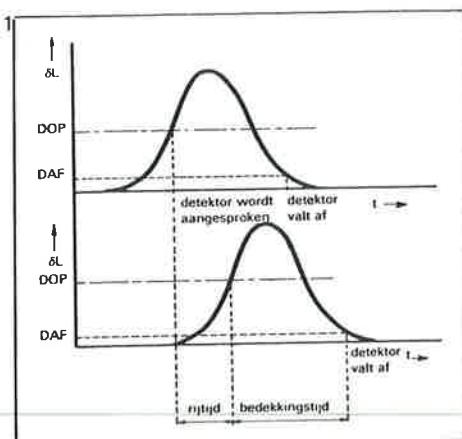
Als een voertuig de lus inrijdt neemt de zelfinductie met een bepaald percentage δL af, wat resulteert in een toename van de lusfrequentie met een percentage δf .

De relatie tussen de lusfrequentie-variantie en de luszelfinductie-variantie kan binnen een bepaald frequentiegebied als volgt worden voorgesteld:

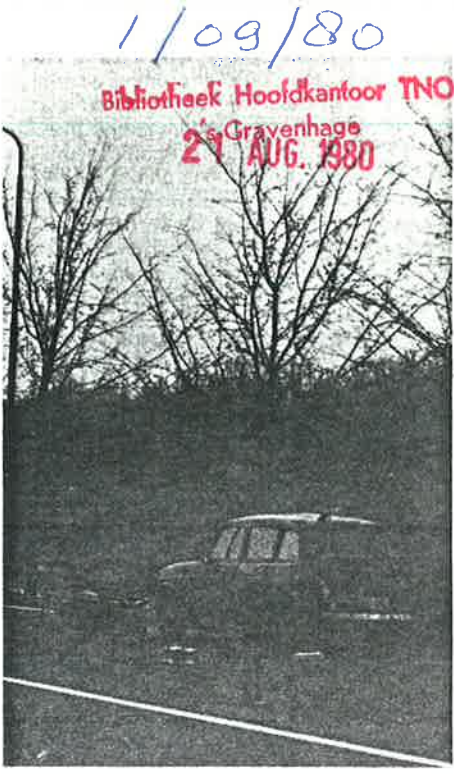
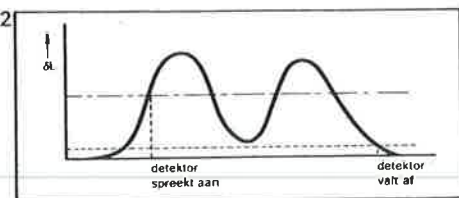
$$\delta f = -\frac{1}{2} \delta L$$

Deze δf wordt vervolgens omgezet in een spanningsvariantie (analoge detector) of in de verandering van een digitaal getal, dat ontstaat uit een periode tijdmeting (digitale detector). De manier waarop dit gebeurt wordt verder behandeld in de hoofdstukken over de betreffende detectoren.

Vervolgens dienen de detectoren uit de aldus verkregen afgeleide meetgrootheden de tijd te bepalen, die ligt tussen het passeren van de primaire (eerste) en secundaire (tweede) lus. De verandering van de zelfinductie van de twee lussen is aangegeven in figuur 1. Zodra de verandering van L een zekere drempelwaarde DOP bereikt wordt de detector „aangesproken“. Uit de tijd die ligt tussen het aanspreken van de primaire en secundaire detector, de zogenaamde „rijtijd“, wordt vervolgens de snelheid berekend. Nadat δL een tweede drempelwaarde DAF passeert, valt de detector weer af. De tijd tussen het aanspreken en afvallen van een detector wordt de „bedekkingstijd“ genoemd. Deze tijd is na vermenigvuldiging met de snelheid een maat voor de lengte van het passerende voertuig. Dat twee drempels worden gebruikt heeft de volgende reden: De verstomming van een vrachtwagen met aanhanger vertoont een verloop, zoals is aangegeven in figuur 2. Het dal in de curve treedt op, als de dissel (het verbindingstuk tussen de vrachtwagen en de aanhanger) zich boven de lus bevindt. Om nu



1. De verstomming δL van twee achter elkaar liggende lussen bij het passeren van een voertuig.
2. De verstomming δL van een vrachtwagen met aanhanger.



een vrachtwagen met aanhanger als één voertuig te detecteren, dient de drempel waarbij de detector afvalt, lager te liggen dan het laagste punt in het dal van de verstemmingscurve. Als een dergelijk lage drempel echter tevens als opdrempel zou worden gebruikt, is de helling van δL in de buurt van deze opdrempel slechts gering. Hierdoor neemt de spreiding in het aanspreekmoment toe en daarmee de nauwkeurigheid van de gemeten snelheid af. Om deze reden is een aparte opdrempel gekozen, waarbij de helling van δL een (veel) steiler verloop vertoont.

3. Analoge lusdetector

3.1. Algemeen

Lusparen die gebruikt worden voor snelheidsmetingen dienen aan hoge eisen te voldoen ten aanzien van hun onderlinge ligging en gevoeligheid. Om nu te kunnen controleren of een luspaar aan die eisen voldoet, zou men de lussen willen ijken. Met dit doel werd door de TPD een analoge detector — de zogenaamde „ijkdetector“ — ontwikkeld, waarmee zeer nauwkeurig de snelheid van passerende voertuigen kan worden gemeten. De manier waarop deze detector werkt en de principes, die zijn toegepast om die hoge nauwkeurigheid te kunnen bereiken, zullen hieronder worden uiteengezet aan de hand van het blokschema in figuur 3.

3.2. Vorming van de meetwaarde

Zoals reeds werd beschreven wordt allereerst de luszelfinductieverandering δL omgezet in een frequentieverandering δf . Deze verandering van f wordt vervolgens omgezet in de variatie van een spanning U_m , met behulp van een zogenaamde „phase locked loop“ (PLL) schakeling. Deze PLL-schakeling vertoont bij die omzetting de nodige filterwerking voor stoorspanningen en frequenties die afwijken van de lusfrequentie.

Als er zich geen voertuig op de lus bevindt, is de frequentie f gelijk aan de rustfrequentie f_0 . Deze frequentie resulteert in een „rustwaarde“ voor U_m . Door verandering van temperatuur of vochtigheid (regen) van de lus kan de luszelfinductie langzame variaties vertonen, waardoor U_m eveneens varieert. Dit laatste bemoeilijkt het nauwkeurig detecteren van drempeloverschrijdingen bij het passeren van een voertuig. Om deze reden wordt van U_m een referentiespanning U_{ref} afgetrokken die een dusdanige waarde heeft, dat de verschilspanning U_m gelijk is aan 0 Volt als zich geen voertuig boven de lus bevindt. De referentiespanning dient wel de langzame (klimatologische) veranderingen van U_m te volgen, maar niet de relatief snelle variaties die het gevolg zijn van passerende voertuigen. In wezen vormt de referentieschakeling samen met de aftrekschakeling een hoog doorlaatfilter.

U_{ref} wordt gevormd door U_m een laagdoorlaatfilter te laten passeren. Bij druk verkeer kan de gemiddelde waarde van U_m duidelijk gaan verschillen van de rustwaarde van U_m . Om nu te voorkomen dat U_{ref} hierdoor significant zou gaan afwijken van deze rustwaarde, wordt bij het passeren van een voertuig over de periode dat de afdrempel is overschreden, het laagdoorlaatfilter losgekoppeld van U_m . Hierdoor zal U_{ref} tijdens het passeren van een voertuig niet worden beïnvloed door U_m . Als de lus vrij is, dient U_{ref} gelijk te zijn aan U_m , terwijl een voertuig de spanning U_m in positieve richting doet veranderen. Blijkt nu op een zeker moment U_m kleiner te zijn dan U_{ref} , dan is dat een situatie die normaal niet voorkomt, maar mogelijk het gevolg is van inschakelen van de detector of van een (aangebrachte) wijziging van de rustfrequentie f_0 . Zodra zich dit voordoet, wordt U_{ref} op snelle wijze zodanig bijgesteld, dat weer geldt $U_{ref} = U_m$. Het kan gebeuren dat U_m groter wordt dan U_{ref} zonder dat een auto de lus passeert. Bijvoorbeeld na het inschakelen van de detector, ten gevolge van een onbekende storing, of als gevolg van een (gedeeltelijk) op de lus geparkeerde auto. De detector is dan aangesproken en zal in principe niet meer afvallen, ook niet op langere termijn, omdat de referentie is losgekoppeld van U_m als de detector in de aangesproken toestand verkeert. Om dit probleem te voorkomen is een zogenaamde time-uitschakeling aangebracht. Als de aanspreektijd langer wordt dan een (instelbare) tijdslimiet, maakt deze schakeling U_{ref} gelijk aan U_m , waardoor de detector afvalt en weer voor meting gereed is.

3.3 Beslissingscircuit en uitvoer

De meetspanning U_m wordt toegevoerd aan twee comparatoren, die U_m vergelijken met twee ingestelde drempelspanningen. Wordt U_m groter dan een zekere drempelwaarde DOP, dan worden de uitgangen van comparator 1 en van een geheugenschakeling hoog, ten teken dat de detector is „aangesproken“. Zodra U_m lager wordt dan een tweede drempelwaarde DAF, wordt de uitgang van de tweede comparator hoog, waardoor de geheugenschakeling naar zijn rusttoestand terugkeert en de detector weer „afvalt“. Het uitgangssignaal van deze geheugenschakeling vormt het digitale uitgangssignaal van de detector, dat wordt gebruikt om de rijtijd te meten.

Voor snelheidsmeting zijn steeds twee achter elkaar liggende lussen nodig. De frequenties waarop deze lussen werken moet echter verschillend zijn, daar anders de lussen elkaar beïnvloeden als gevolg van overspraak. Bij gebruik van verschillende frequenties is echter de gevoeligheid ook anders en wel om de volgende reden. Een relatieve zelfinductieverandering $\Delta L/L (= \delta L)$ heeft een relatieve frequentie $\Delta f/f (= \delta f)$ tot gevolg. Omdat de PLL-schakeling echter Δf omzet in een spanning ΔU_m , zal bij gelijkblijvende $\Delta L/L$ en bijvoor-

beeld een toegenomen f , Δf en dus ook ΔU_m toenemen. Om de fout die hierdoor zou ontstaan te elimineren is een schakeling aangebracht, die de op- en afdrempels van de comparatoren bijregelt, afhankelijk van de rustfrequentie en dus van U_{ref} . In de kast van de analoge lusdetector kunnen in totaal 12 detectoren geplaatst worden. Dit betekent dat op zes rijstroken de snelheid tegelijkertijd kan worden gemeten. Per detector zijn twee uitgangen beschikbaar, namelijk de digitale uitgang die aangeeft of een detector al of niet is aangesproken en een analoge uitgang, waarop het signaal U_m beschikbaar is. Hierdoor kan het verloop van U_m en dus δL heel eenvoudig zichtbaar worden gemaakt op een geheugenscoop of worden opgenomen met behulp van een instrumentatierecorder om naderhand te worden geanalyseerd.

4. De digitale analyse-detector

4.1. Algemeen

Door de Stafafdeling Elektronische Systemen van de Dienst Verkeerskunde werd een detector ontwikkeld met als hart een micro-computer. Op de lusoscillator en het trackingfilter na, werkt deze detector geheel digitaal. Hierdoor wordt de signaalverwerking in hoge mate ongevoelig voor bijvoorbeeld temperatuurvariaties en toleranties in componenten, omdat alle meetwaarden op digitale wijze, dus „hard“ vastliggen.

Met behulp van de microcomputer, die voor de juiste afwikkeling van het gehele detectieproces zorgdraagt, kunnen drempelwaarden, reeksen van opvolgende bewerkingen e.d. op eenvoudige wijze worden veranderd, door slechts de software (de programmatuur) te wijzigen. De microcomputer en het trackingfilter zorgen tevens voor een automatische en optimale instelling van de detector, zodat deze geen enkele afregeling meer behoeft.

4.2. Vorming meetwaarde

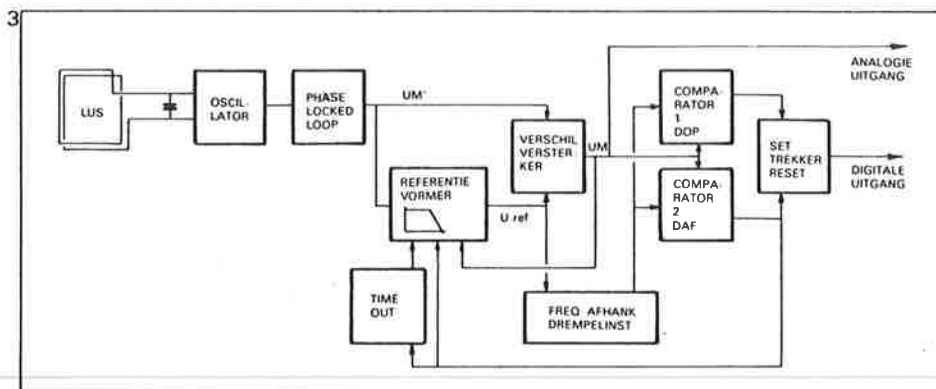
Evenals bij de analoge lusdetector wordt ook hier een verandering δL van de luszelfinductie omgezet in een lusfrequentieverandering, δf , door de lus op te nemen in een oscillatorring. Door onder andere de koppeling tussen lussen onderling, waarbij de frequentie van de ene lus, het signaal op de andere lus beïnvloedt, ontstaat een zekere hoeveelheid „jitter“ (fase-onzekerheid) in het lussignaal, wat nadelig werkt op de nauwkeurigheid van de meting. Om deze jitter zoveel mogelijk te beperken is een tracking-filter aangebracht. Dit filter bestaat ondermeer uit een PLL-schakeling die frequenties in een smalle band om de eigen lusfrequentie doorlaat, maar andere frequenties (zoals van buurlussen) sterk onderdrukt. Omdat echter voor elke detector de lusfrequentie moet kunnen variëren in een relatief breed frequentiegebied (40-100 kHz) regelt het tracking-filter zichzelf in op de gebruikte lusfrequentie. Zou na dit inregelen de lusfrequentie als gevolg van klimatologische invloeden gaan verlopen, dan regelt het filter zichzelf bij.

Vervolgens wordt de lusfrequentie omgezet in een digitaal getal. Hiertoe wordt gedurende n perioden van de lusfrequentie (n instelbaar) een hoogfrequent meetsignaal f_m (25 MHz) aangeboden aan een teller. Voor de meetwaarde, die hierdoor ontstaat geldt dan:

$$\text{meetwaarde} = f_m \cdot n \cdot t_{lus}$$

$$t_{lus} = 1/f_{lus}$$

Omdat de verandering van de luszelfinductie bij het passeren van een voertuig relatief klein is (2-6%), dient voor een nauwkeurige meting het oplossend vermogen en dus de meetwaarde voldoende groot te zijn. Een grote meet-



waarde kan verkregen worden door f_m te vergroten, hetgeen niet aantrekkelijk is in verband met de dan benodigde nog snellere electronica. Het vergroten van $n \cdot t_{lus}$ is beperkt, doordat deze in feite de meettijd vormt en er gedurende de meettijd slechts één meetwaarde ter beschikking komt. Het moment van een drempeloverschrijding wordt dan gedetecteerd met een onzekerheid gelijk aan de meettijd. Een dergelijk probleem ontbreekt bij de analoge detector, omdat hierbij de meetspanning U_m permanent aanwezig is. Een oplossing is gevonden door gebruik te maken van twee elkaar in meettijd overlappende meettellers. Voor elke meettelser is dan tweemaal zoveel tijd beschikbaar om een meetwaarde op te bouwen, omdat door het om de beurt uitlezen van de twee tellers, elke halve meettijd een meetwaarde beschikbaar komt (zie figuren 4 en 5). Een bijkomend voordeel is, dat door de langere meettijd de reeds eerder genoemde jitter nog eens extra wordt onderdrukt, doordat deze beter wordt uitgemiddeld. De tijd tussen het uitlezen van twee meetwaarden door de microcomputer wordt de scantijd genoemd en bedraagt 1 ms.

4.3. De microcomputer

Na elke milliseconde wordt beurtelings de meetwaarde van een van de twee meettellers door de microcomputer uitgelezen en vergeleken met een aantal drempelwaarden. Deze drempelwaarden worden afgeleid uit een digitale referentiewaarde, hetgeen vergelijkbaar is met wat er bij de analoge detector gebeurde. In tegenstelling echter tot de analoge detector

wordt bij de digitale detector de meetwaarde vergeleken met drie in plaats van twee drempelniveaus en wel om de volgende reden. Omdat de afdrempel DAF erg laag moest worden gekozen om een vrachtwagen met aanhanger als één voertuig te detecteren, zal de detector afvallen in een gebied waar de helling van de verstemmingskromme tamelijk flauw verloopt, hetgeen een grote onzekerheid in het afvaltijdstip inhoudt (zie figuur 1 en 2). Om de lengte van voertuigen zo nauwkeurig mogelijk te kunnen meten is dit punt dus minder geschikt. Om deze reden is een extra drempel (DAF 1) aangebracht in een steil gedeelte van de verstemmingscurve (zie figuur 6).

Zodra deze drempel wordt gepasseerd (C), legt de microcomputer het bijbehorende tijdstip vast, als een voorlopig afvaltijdstip, terwijl dit tijdstip pas geldig wordt verklaard, zodra de drempel DAF 2 wordt gepasseerd (D). Zou nu, zoals bij een vrachtwagen met aanhanger het geval is (zie figuur 7), de drempel DAF 1 reeds meerdere malen zijn overschreden (C1 en C2) voordat de drempel DAF 2 is gepasseerd, dan wordt het tijdstip waarop de drempel DAF 1 voor de laatste maal werd overschreden als juiste afvaltijdstip aangemerkt en verder als zodanig verwerkt.

Behalve het ophalen van de meetwaarden van de meettellers, stelt de microcomputer op grond van deze meetwaarden, de deelfactor n in en wel zodanig dat de meettijd n.t. t_{lus} voor alle voorkomende lusfrequenties circa 1,9 ms bedraagt. Hierdoor wordt de meettijd van 2 ms, die per meetteller beschikbaar is om een meetwaarde op te bouwen, vrijwel volledig

benut, onafhankelijk van de gebruikte lusfrequentie. Dit resulteert in een maximaal oplosend vermogen van de meetwaarde, wat gewenst is voor een nauwkeurige meting. Als ten gevolge van bijvoorbeeld klimatologische invloeden de lusfrequentie zou gaan verlopen, dan wordt zonder onderbreking van de normale detectorwerking de deelfactor n automatisch en optimaal bijgesteld. Ook bij het opstarten van de detector vindt inregeling van de factor n geheel automatisch plaats.

Hoewel iedere milliseconde een nieuwe meetwaarde beschikbaar komt, wordt het passeren van de drempel DOP bepaald met een nauwkeurigheid van 0,5 ms. Dit gebeurt door middel van lineaire interpolatie van de twee verkregen meetwaarden rond de opdrempel DOP. Door de nauwkeurigheid van 0,5 ms, waarmee het overschrijden van de drempel DOP berekend wordt, kan een maximale meetfout ontstaan van circa 0,5% in de gemeten snelheid van een auto die met 90 km/h de lussen passeert.

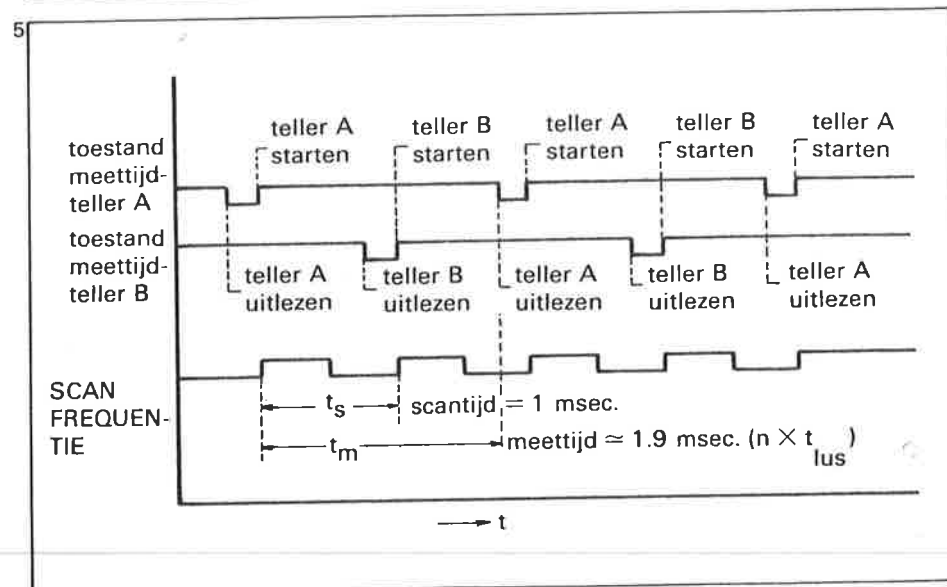
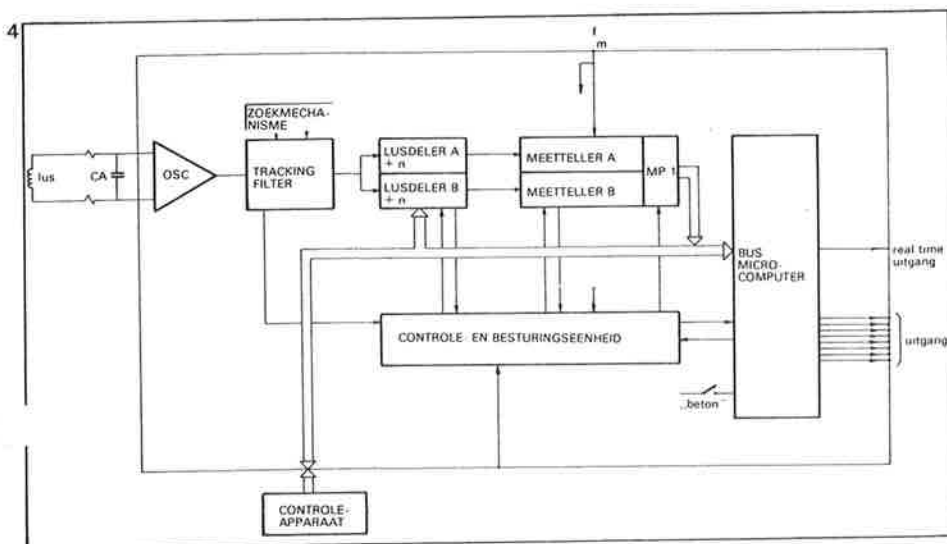
De detector heeft een aantal uitgangen, waarop diverse verwerkingsapparaten kunnen worden aangesloten. Zo is er in vergelijking met de digitale uitgang bij de analoge detector, een real-time-uitgang, die een signaal afgeeft als de detector is aangesproken. Verder is er een statusuitgang welke meer uitgebreide gegevens over het functioneren van de detector geeft, bijvoorbeeld of deze al of niet is ingeregeld. Hierdoor kunnen bij het (achteraf) beschouwen van de meetresultaten bepaalde storingen onderkend worden, zoals bijvoorbeeld het kortgesloten of onderbroken zijn van een lus (kabel).

Tot slot bestaat bij elke detector de mogelijkheid om een controle-apparaat aan te sluiten, waarmee een aantal gegevens ter plaatse op een display zichtbaar kan worden gemaakt zoals onder andere: lusfrequentie, referentiewaarde, status en time-out (instelbaar tussen 0 en 4,5 uur). De functie van de time-out is dezelfde als bij de analoge detector.

5. IJkmeting

5.1 Meetopstelling

Met de beschreven analoge lusdetector zijn inmiddels metingen verricht om de nauwkeurigheid van dit systeem onder praktijkomstan-



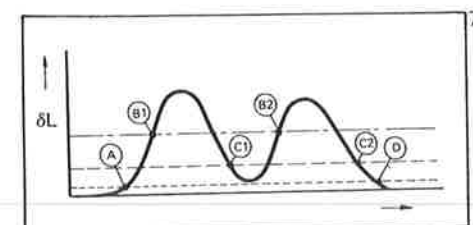
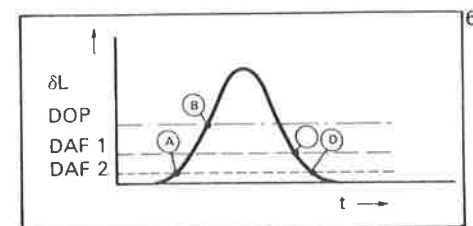
3. Blokschema analoge lusdetector.

4. Blokschema digitale lusdetector.

5. Tijddiagram periodetijdmeting.

6. De verstemming van een personenauto, waarbij drie drempelniveaus zijn aangegeven.

7. De verstemming van een vrachtwagen met aanhanger, waarbij drie drempelniveaus zijn aangegeven.





digheden te testen. Op de noordelijke afrit Delft van Rijksweg 13 werd hiertoe gedurende ongeveer een uur de snelheid van de passerende voertuigen op twee manieren tegelijkertijd gemeten te weten:

- met behulp van een lasersnelheidsmeter van de Dienst van het IJkwezen.
- met behulp van de analoge lusdetector.

De wegsituatie werd daarbij op een videoband vastgelegd samen met de meetwaarden van de lasersnelheidsmeter en de lusdetector. Deze videoband werd later uitgewerkt waarbij dan tevens aandacht kon worden besteed of een bepaalde afwijking eventueel het gevolg was van een bijzonder rijgedrag zoals scheefrijden, sterk remmen of vlak achter elkaar rijden.

De lasersnelheidsmeter bestaat uit een drietal op 0,5m afstand naast elkaar geplaatste lasers, waarbij de drie laserbundels door een passerend voertuig, korte tijd na elkaar worden onderbroken. Uit de tijd die ligt tussen het onderbreken van de eerste en de tweede laserbundel kan de snelheid berekend worden. Hetzelfde geldt voor de tweede en de derde bundel, zodat de lasersnelheidsmeter in totaal 2 snelheden aangeeft. Voor een betrouwbare meting moeten deze snelheden vrijwel aan elkaar gelijk zijn. Als dit niet zo is, dan duidt dit mogelijkwijs op een vertraging of versnelling van het passerende voertuig, of het op ongelijke wijze onderbreken van de drie laserbundels.

In al deze gevallen is een vergelijking met de door de (analoge) lusdetector bepaalde snelheid onbetrouwbaar en dienen dergelijke meetwaarden verworpen te worden. De video-opnamen werden gemaakt met de videowagen van de Dienst Verkeerskunde van

de Rijkswaterstaat. Dit is een bestelauto die speciaal is ingericht voor het maken van zwart/wit of kleuren video-opnamen van verkeerssituaties. Op de auto kan een telescoopmast worden geplaatst, waarop een camera is gemonteerd.

In de auto bevond zich een tweede camera, die gericht was op de uitlezing van de lasersnelheidsmeter en de lusdetector. Met behulp van een eveneens in de videowagen aanwezige regietafel was het mogelijk om de cijfers van deze uitlezing in het beeld van de wegsituatie zichtbaar te maken. Dit beeld werd vervolgens vastgelegd op een videocassette-recorder.

5.2. Verkregen resultaten bij één bepaalde meetcyclus

Om het aantal betrouwbare meetwaarden zoveel mogelijk te beperken werden uitsluitend die meetwaarden in beschouwing genomen, waarvoor de twee door de lasersnelheidsmeter weergegeven snelheden een onderlinge afwijking vertoonden van maximaal circa 0,3%. Tijdens de meetcyclus die een uur duurde, werden de volgende resultaten verkregen:

- er werden 52 geldige meetwaarden geregistreerd;
- de relatieve afwijking tussen de gemeten snelheid van beide meetsystemen bedroeg gemiddeld: $\Delta v = -0,06\%$ waarbij Δv gedefinieerd is als $\Delta v = \frac{1}{m} \sum \frac{v_{laser} - v_{detector}}{v_{laser}}$

m gelijk is aan het totaal aantal geldige meetwaarden en $\sum \frac{v_{laser} - v_{detector}}{v_{laser}}$

de som voorstelt over alle verkregen relatieve afwijkingen in de gemeten snelheid;

- de standaardafwijking van Δv bedroeg $\sigma = 0,53\%$
- de maximale afwijking bedroeg $\Delta v_{max} = -1,77\%$
- voor 90% van de meetwaarden was de afwijking kleiner dan $\pm 0,9\%$.

De gemeten afwijkingen zouden de volgende oorzaak kunnen hebben:

- inveren van het voertuig;
- onvolkomenheden in de lusdetector;
- onvolkomenheden in de lasersnelheidsmeter;
- plaats lasersnelheidsmeter kwam niet precies overeen met het midden tussen de twee plaatsen waar de primaire en secundaire detector aanspreken.

Afwijkingen als gevolg van een fout in de lusgeometrie of door „scheefrijden“ werden verwaarloosbaar geacht, nadat de lussen nauwkeurig waren nagemeten en geen „scheefrijden“ geconstateerd kon worden op grond van de video-opname. Een (geringe) verbetering van de meetresultaten kan zelfs nog verwacht worden, doordat de plaats van de lasersnelheidsmeter nog niet optimaal was, en de detectoren op een paar kleine punten nog verbeterd konden worden.

6. Slot

De huidige lusdetectoren voor snelheidsmeting werken meestal volgens een principe, waarbij het tijdverschil wordt gemeten waarop de verandering van L een bepaalde drempelwaarde passeert. Ruis en stoorspanningen op de lus en ongelijke variaties van L als gevolg van bijvoorbeeld scheefrijden, inveren of veroudering van de lussen geven altijd een fout in het aanspreekmoment.

Andere principes zoals bijvoorbeeld het laten aanspreken van de detector op het moment dat de hellingshoek van de verstemming maximaal is, of met behulp van kruiscorrelaties van de verstemmingskromme van de primaire en secundaire lus, zou een aantal van deze fouten sterk kunnen reduceren. Dit leidt echter tot detectoren die bij de huidige stand van de techniek nog steeds zeer complex zijn, maar mogelijkwijs in de toekomst nog eens van praktische betekenis kunnen worden.

8. Meetopstelling.

