

**BEPALING VAN DE POSITIE EN  
DE GEOMETRIE VAN HET LASBAD  
M.B.V. ULTRA-GELUIDSGOLVEN**

**- K.M. Broek -**



BEPALING VAN DE POSITIE EN  
DE GEOMETRIE VAN HET LASBAD  
M. B. V. ULTRA-GELUIDSGOLVEN

Afstudeerverslag van  
K.M. Broek

In opdracht van  
Prof. G. den Ouden

Begeleider  
Drs. W.J.P. Vink

Delft, juni 1987

## INHOUDSOPGAVE

Summary

Samenvatting

Symbolenlijst

1	INLEIDING	1
2	THEORIE	2
2.1	<u>Lasbadonderzoek</u>	2
2.1.1	U.S-onderzoek bij kamertemperatuur	2
2.1.2	Ultrasoon lasbadonderzoek	6
2.2	<u>Geluidsnelheidsonderzoek</u>	9
3	EXPERIMENT	13
3.1	<u>Lasbadonderzoek</u>	13
3.1.1	Inleidende experimenten	13
3.1.2	Opstelling en meetmethode	15
3.1.3	Waarnemingen	19
3.1.4	Verwerking van waarnemingen	22
3.1.5	Toepassing van het transittime-delay-model	25
3.1.6	Toepassing bij transversale golven	27
3.1.7	Bevindingen bij het lasbadonderzoek	30
3.2	<u>Geluidsnelheidsonderzoek</u>	33
3.2.1	Inleidende experimenten	33
3.2.2	Opstelling en meetmethode	35
3.2.3	Waarnemingen bij verschillende temperaturen	39
3.2.4	Resultaten bij verschillende temperaturen	40
3.2.5	Experimenten bij kamertemperatuur	42
3.2.6	Foutbespreking	46
4	DISCUSSIE EN CONCLUSIE	52
4.1	<u>Discussie</u>	52
4.1.1	Lasbadonderzoek	52
4.1.2	Geluidsnelheidsonderzoek	53
4.2	<u>Conclusie</u>	55

## Literatuur

## FIGUREN

## APPENDICES

- A Materiaalsamenstelling
- B Geluidsdrukafname door bundelspreiding
- C De temperatuurafhankelijkheid van  $c_L$ ,  $c_T$  en  $\nu$
- D Correctiefactoren t.b.v. elastomatproeven
- E Invloed van T op de staafafmetingen
- F Details van de opstelling voor lasbadonderzoek
- G Staafafmetingen en staafmassa's
- H Waarnemingen EW1
- I Methode van piekwaardeberekening
- J  $\alpha$ -waarden voor EW1, LW5 en LW6
- K Berekende  $c_L$ -waarden van LW1, LW4, LW5 en EW1
- L Waarnemingen en resultaten van LW6

## Summary

The increase in using welding robots during the last years, created a great demand for reliable sensors in the field of positioning and process control. Literature shows the possibility of using ultrasonics as sensor principle; this method became our goal for investigation. We have researched the geometry of stationary welding beads in thick construction steel. This resulted in detection of the solid/liquid-interface by means of transversal sound waves; the experiments with longitudinal waves were not successful due to excessive reflections.

The longitudinal and transversal speed of sound played an important role in research of bead dimensions. Therefore we have studied the two sonic speeds in the testing material. This was done by scanning the resonance frequencies of a bar at different temperatures; in addition the speed of sound was determined by the value of the frequency.

## Samenvatting

Door de toenemende robotisering van het lasproces is er de laatste jaren een grote behoefte aan betrouwbare sensoren ten behoeve van de lasboogpositionering en de procescontrole ontstaan. Uit een literatuurstudie bleek dat één van de sensorprincipes gebaseerd is op het gebruik van ultra-geluidsgolven. Deze methode werd in het kader van een afstudeeropdracht nader bestudeerd. Gekozen werd voor onderzoek aan de geometrie van een stationair lasbad, tijdens het lassen met een voortloopsnelheid gelijk aan nul in een dikke plaat constructiestaal. Er kwam onder meer naar voren dat het mogelijk is om met transversale geluidsgolven de overgang vast/vloeibaar-metaal te detecteren; het werken met longitudinale golven leverde een overmaat aan storende signalen op.

Bij het ultrasoon lasbadonderzoek speelt de grootte van de longitudinale en transversale geluidsnelheid als functie van de temperatuur een essentiële rol. Dit was één van de redenen om parallel aan het lasbadonderzoek de temperatuurafhankelijkheid van de twee geluidsnelheden in het proefmateriaal nader te bestuderen. Het principe van de hieruit voortvloeiende experimenten is dat een staafje bij verschillende temperaturen in eigentrilling wordt gebracht; de frequentie van de eigentrilling is dan een maat voor de geluidsnelheid.

## Symbolenlijst

a	- breedte van staafje	m
b	- dikte van staafje	m
c	- geluidsnelheid	m/s
c <sub>L</sub>	- longitudinale geluidsnelheid	m/s
c <sub>T</sub>	- transversale geluidsnelheid	m/s
C <sub>v</sub>	- van $\nu$ afhankelijke omrekeningsfactor	
d	- dikte	m
D	- transmissiefactor	
D <sub>L/E</sub>	- dikteverhouding tussen LW en EW	
E	- elasticiteitsmodulus	Pa
G	- glijdingsmodulus	Pa
I	- stroomsterkte	A
k	- factor voor bundelspreiding	
K <sub>p</sub>	- correctiefactor voor golf-orde p	
K <sub>TORS</sub>	- correctiefactor bij torsie-golven	
K <sub>v</sub>	- van $\nu$ afhankelijke omrekeningsfactor	
l	- lengte	m
l <sub>N</sub>	- lengte van Fresnelzone	m
m <sub>p</sub>	- constante voor golf-orde p	
p	- [lasbadonderzoek:] geluidsdruk	Pa
p	- [geluidsnelheidsonderzoek:] golf-orde	
R	- reflectiefactor	
s	- standaard afwijking	
T	- temperatuur	°C
t <sub>d</sub>	- tijdverlengingsfactor	
T <sub>M</sub>	- smelttemperatuur	°C
U	- elek. potentiaalverschil	V
v <sub>d</sub>	- deeltjessnelheid	m/s
x	- afstand	m
Z <sub>a</sub>	- acoustische impedantie	N·s/kg
$\alpha$	- hoek	°
f	- frequentie	Hz
$\lambda$	- golflengte	m
$\nu$	- constante van Poisson	
$\rho$	- soortelijke massa (s.m.)	kg/m <sup>3</sup>
1long	- eerste longitudinale trilling (grondtrilling)	
2tors	- tweede torsie-trilling	
3tranA	- derde transversale trilling <sup>1</sup> (staafhoogte = a)	
3tranB	- derde transversale trilling <sup>1</sup> (staafhoogte = b)	
EW	- evenwijdig aan walsrichting	
LW	- loodrecht op walsrichting	

<sup>1</sup>betreft feitelijk buigingsgolven (zie 2.2)



## 1 INLEIDING

Door de toenemende robotisering van het lasproces is er de laatste jaren een grote behoefte aan betrouwbare sensoren ten behoeve van de lasboogpositionering en de procescontrole ontstaan. Uit een literatuurstudie van Broek e.a. [1] bleek dat één van de sensorprincipes gebaseerd is op het gebruik van ultrageluidsgolven. Deze methode werd in het kader van een afstudeeropdracht nader bestudeerd. Gekozen werd voor onderzoek aan de geometrie van een stationair lasbad, tijdens het lassen met een voortloopsnelheid gelijk aan nul in een dikke plaat constructiestaal.

Bij het ultrasoon lasbadonderzoek speelt de grootte van de geluidsnelheden als functie van de temperatuur een belangrijke rol. Dit was één van de redenen om parallel aan het lasbadonderzoek de temperatuurafhankelijkheid van de longitudinale en transversale geluidsnelheid nader te bestuderen. Het principe van de hieruit voortvloeiende experimenten is dat een staafje bij verschillende temperaturen in eigentrilling wordt gebracht; de frequentie van de eigentrilling is dan een maat voor de geluidsnelheid.

Zowel het lasbadonderzoek als het geluidsnelheidsonderzoek werd uitgevoerd aan Fe510 Nb, waarvan de samenstelling in appendix A gegeven wordt. Het was beschikbaar in twee dikten (25 en 50 mm) die beiden uit dezelfde ovencharge afkomstig waren. Voor inleidende proeven werd van andere ongelegeerde staalsoorten gebruik gemaakt.

## 2 THEORIE

### 2.1 Lasbadonderzoek

#### 2.1.1 U.S.-onderzoek bij kamertemperatuur

In deze paragraaf wordt het relevante deel van de theorie over niet-destructief ultrasoon-onderzoek gepresenteerd (Vink en Versluis [2]). De twee golfvormen die hierbij meestal worden toegepast zijn die met longitudinale en transversale voortplanting. Er komen echter ook andere types voor, zoals oppervlaktegolven en plaatgolven.

Voor de bepaling van de afstand tot een fout kan de pulseecho-methode gebruikt worden. Hierbij wordt een meetsonde ("taster") op het te onderzoeken object geplaatst. Vanuit de taster wordt een korte longitudinale of transversale geluidspuls het materiaal ingestuurd. Bij een fout kan reflectie optreden zodat dan een gedeelte van de puls even later bij de taster terugkeert. Door registratie van het tijdsverschil tussen opwekking en terugkeer van de geluidspuls ("transittime") is bij bekende materiaalgeluidsnelheid de afstand tot de fout te berekenen.

De waarde van de geluidsnelheid hangt niet alleen af van het materiaal maar ook van het golftype. Voor Fe510 kan men als richtlijn voor de longitudinale snelheid bij kamertemperatuur  $c_L = 5920$  m/s nemen en voor de transversale golf  $c_T = 3255$  m/s. Het is mogelijk om de snelheden te berekenen uit de elastische parameters:

$$c_L = \sqrt{(E/\rho)} \cdot \sqrt{\left(\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}\right)} \quad \dots (1)$$

$$c_T = \sqrt{(G/\rho)} \quad \dots (2)$$

waarbij E de elasticiteitsmodulus is, G de glijdingsmodulus,  $\rho$  de soortelijke massa en  $\nu$  de constante van Poisson.

In een willekeurige doorsnede, loodrecht op de voortplantingsrichting, veroorzaken de trillende deeltjes bij longitudinale golven normaalkrachten en bij transversale golven schuifkrachten. Uit het laatstgenoemde is af te leiden dat voortplanting van transversale golven in niet-visceuze vloeistoffen onmogelijk is. Een belangrijke grootte bij longitudinale golven is de geluidsdruk. De geluidsdruk  $p$  is gelijk aan het product van de dichtheid  $\rho$ , de geluidssnelheid  $c_L$  en de deeltjessnelheid  $v_d$ .

$$p = \rho \cdot c_L \cdot v_d = Z_B \cdot v_d \quad \dots (3)$$

De grootte  $\rho \cdot c_L$  noemt men de geluidsweerstand of de specifieke acoustische impedantie  $Z_B$ . De amplitude  $A$  van de golf is evenredig met  $p$  en de intensiteit  $I$  is evenredig met  $p^2$ . Tijdens de verplaatsing van het golffront zal de geluidsdruk hierin meestal afnemen. Deze verzwakking van het signaal laat zich uitdrukken in decibels als de verhouding van de geluidsdruk  $p$  t.o.v. de ingangsdruk  $p_{in}$  bekend is. Er geldt:

$$\text{Aantal dB} = 20 \cdot \log(p/p_{in}) \quad \dots (4)$$

Veronderstel dat we twee stoffen met een verschillende geluidssnelheid tegen elkaar plaatsen. Wat zal er gebeuren als een geluidsbundel met een vlak golffront loodrecht op het scheidingsvlak stuit? In het algemeen kan gesteld worden dat er gedeeltelijk reflectie en gedeeltelijk transmissie zal optreden. De som van de intensiteiten van de gereflekteerde en doorgaande golf is natuurlijk gelijk aan die van de invallende golf. Daarentegen geldt dat de geluidsdruk van de invallende golf plus de gereflekteerde golf gelijk moet zijn aan de geluidsdruk van de doorgaande golf:

$$p_{in} + p_{refl.} = p_{doorg.} \quad \dots (5)$$

De reflectiefactor  $R$  en de doorlaatfactor  $D$  worden gedefiniëerd als:

$$R = \frac{P_{\text{refl.}}}{P_{\text{in}}} \quad \dots (6)$$

$$D = \frac{P_{\text{doorg.}}}{P_{\text{in}}} \quad \dots (7)$$

Omdat de deeltjessnelheid hetzelfde is aan beide zijden van het scheidingsvlak kan voor R en D afgeleid worden:

$$R = \frac{Z_{s,2} - Z_{s,1}}{Z_{s,1} + Z_{s,2}} \quad \dots (8)$$

$$D = \frac{2 \cdot Z_{s,2}}{Z_{s,1} + Z_{s,2}} \quad \dots (9)$$

Bij reflectie tegen een stof met een kleinere geluidsweerstand wordt R negatief. Voor longitudinale golven heeft dat als consequentie dat er een fasesprong van 1/2 ontstaat in de geluidsdruk. Dit kan betekenen dat er uitdovingsverschijnselen optreden tussen invallende en gereflekteerde golf. De overgang van staal naar lucht is een voorbeeld van een situatie met een negatieve R-waarde, evenals de overgang van vast staal naar het vloeibare lasbad. De geluidsweerstand voor transversale golven in vloeistoffen en gassen is overigens nul door het ontbreken van schuifkrachten. De reflectie zal dan altijd volledig zijn. Tenslotte dient opgemerkt te worden dat bij de overgang naar een stof met een grotere geluidsweerstand de doorgaande geluidsdruk groter is dan die van de invallende bundel.

Als het golffront onder een hoek op het scheidingsvlak valt, zal er naast reflectie en transmissie ook breking optreden. De reflectie- en transmissiehoeken kunnen op dezelfde wijze als in de optica bepaald worden. Een complicatie is echter dat er veelal golftransformaties kunnen optreden. Een voorbeeld is geschetst in figuur 1, waarin uit een invallende longitudinale golf zowel twee

longitudinale golven ontstaan (reflectie en transmissie) als twee transversale. De grootte van de hoeken is te bepalen met de wet van Snellius. Deze zegt dat het quotiënt van de sinus van de hoek met de normaal en de geluidsnelheid van de golf constant is:

$$\frac{\sin \alpha}{c} = \text{constant} \quad \dots (10)$$

In tegenstelling tot de loodrechte inval, zijn voor onder een hoek invallende golven geen eenvoudige formules voor R en D af te leiden.

Met de ultrasontaster worden geluidsgolven gegenereerd en ontvangen. Een summiere omschrijving van dit meetinstrument lijkt hier op zijn plaats te zijn. Bij ons onderzoek werd zowel van rechte tasters als van hoektasters gebruik gemaakt. De opbouw van de rechte taster is geschetst in figuur 2. De feitelijke transducent is een kristal met piëzo-elektrische eigenschappen, dat door een korte elektrische spanningspuls in mechanische eigen trilling wordt gebracht. Het kristal bevindt zich samen met een dempingsmassa en een kunststof beschermingszool in het tasterhuis. Uit deze taster komt een longitudinale geluidsgolf. Bij de schuine taster (fig. 3) is het kristal onder een hoek geplaatst. Deze hoek heeft een zodanige grootte dat de opgewekte longitudinale golf niet doorloopt in het te onderzoeken materiaal, maar volledig gereflecteerd wordt. De door golftransformatie ontstane transversale trilling zal daarentegen wel doorlopen in het onderzoeksobject. Onder de inzendhoek verstaat men de hoek die de transversale geluidsbundel in het onderzoeksmateriaal maakt met de normaal van het intreevlak.

De bundelkarakteristiek zal alleen van de rechte taster besproken worden. Parameters hierbij zijn de diameter  $d$  van het cirkelvormig veronderstelde kristal en de golflengte  $\lambda$ ; de laatste hangt af van de tasterfrequentie en de geluidsnelheid in het materiaal. De vorm van de bundel staat schematisch weergegeven in figuur 4. Vlak na de taster blijft de geluidsbundel cilindrisch:

dit is de Fresnelzone of het nabije veld. De geluidsdrukverdeling vertoont hier maxima en minima. De lengte van de Fresnelzone  $l_N$  wordt gegeven door:

$$l_N = 280 \frac{d^2}{\lambda} \quad \dots (11)$$

Na de Fresnelzone komt de Fraunhoferzone of het verre veld; hierin treedt kegelvormige bundelspreiding op. Voor de geluidsdruk  $p_x$  langs de x-as kan in benadering worden geschreven

$$p_x = p_0 \cdot \pi \cdot \frac{l_N}{x} \quad \dots (12)$$

Hierin is  $p_0$  de geluidsdruk op  $x=0$ : het begin van de Fraunhoferzone. In figuur 4 is de geluidsdrukverdeling over een doorsnede loodrecht op de x-as aangegeven. De spreidingshoek  $\alpha$  is te berekenen volgens:

$$\sin \alpha = k \cdot \frac{\lambda}{d} \quad \dots (13)$$

Voor de lijn waar de druk 10% van de maximumdruk is (afname 20 dB) geldt  $k=1,09$ . De k-waarden voor andere drukken zijn getabelleerd in appendix B. De Fresnelzone in figuur 4 bevat een gedeelte dat als "dode zone" bekend staat. Na het aanslaan van de taster, trilt het taster-element nog korte tijd door. Gedurende deze tijd geeft de taster dan een elektrisch signaal af, waardoor het detecteren van reflecties in deze periode onmogelijk is. De lengte van de hierdoor ontstane dode zone hangt af van de tasteropbouw en van de apparatuur-instelling; hij kan zich overigens tot in de Fraunhoferzone uitstrekken.

### 2.1.2 Ultrasoon lasbadonderzoek

Het ultrasoon lasbadonderzoek bevat een aantal interessante maar lastige aspecten. Doordat de geluidsnelheid temperatuur-

afhankelijk is, klopt bijvoorbeeld de bij kamertemperatuur ver-richte transit-time-ijking van de apparatuur niet meer. Dit be-zwaar is gedeeltelijk te ondervangen door, middels literatuur-studie of experimenteel onderzoek, uit te zoeken hoe de longitu-dinale en transversale geluidsnelheden afhangen van de tempera-tuur. Een extra probleem vormt de onbekende temperatuurverdeling in het proefstuk. Een beschikbaar computerprogramma gebaseerd op het model van Eagar en Tsai [3] bood geen oplossing voor de ge-bruikte meetopstelling, zodat een eenvoudig eigen model ontwik-keld moest worden (3.1.4).

In 2.1.1 bleek dat voor het berekenen van reflectie- en doorgangscoefficienten de specifieke impedantie wordt gebruikt. Deze is het product van soortelijke massa en geluidsnelheid, grootheden die beide van de temperatuur afhankelijk zijn. In tabel 1 zijn als indicatie de waarden van  $Z_s$  voor een ongele-geerde staalsoort vermeld bij kamertemperatuur en rond het smelt-punt  $T_M$ . Tabel 2 geeft de R- en D-coëfficiënten bij loodrechte aanstraling van de lasbadwand. Meer gegevens over het verband tussen de geluidsnelheden van staal en de temperatuur zijn te vinden in appendix C.

Tabel 1: Enkele benaderingen voor ongelegeerd staal

	20 °C	Net onder $T_M$	Net boven $T_M$
$c_L$ (m/s)	5920	4700	4000
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7860	7270	7010
$Z_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	46,5.10 <sup>6</sup>	34,2.10 <sup>6</sup>	28,0.10 <sup>6</sup>

Tabel 2: Reflectie en doorgangscoefficienten voor de staalsoort uit tabel 1

	R	D
Overgang vast/vloeibaar	-0,10	0,90
Overgang vloeibaar/vast	0,10	1,10

Bij de overgang van vast naar vloeibaar staal bedraagt de reflectiecoëfficiënt dus ongeveer 10%. De geluidsdruk van de terugkerende bundel wordt ook beïnvloed door de vorm van de reflectiewand. Bij loodrechte aanstraling van een vlak kan de reflectie 100% bedragen, bij een bolvorm is dat slechts 10%. Indien het reflecterend oppervlak kleiner is dan de doorsnede van de geluidsbundel ter plaatse, dan zal de intensiteit van de gereflecteerde golf ook minder zijn. Daarnaast heeft de tegen een klein vlakje gereflecteerde golf een dermate grote spreidingshoek (conform formule 13), dat deze bijna als bol beschouwd mag worden. De lasbad-ontrek laat vaak zowel bol- als holgebogen gedeeltes zien.

Een laatste aspect dat U.S.-onderzoek bemoeilijkt betreft de demping bij hogere temperaturen. Dan wordt ferriet omgezet in austeniet en deze structuur heeft ongunstige dempingseigenschappen. Daarnaast kan ook korrelgroei tot de demping bijdragen. Dit gebeurt als de korreldiameter in dezelfde orde van grootte komt te liggen als de golflengte van de geluidspuls. Overigens is bij lasbadonderzoek de grootte van de zone waar beide verschijnselen zich voordoen gering. Tenslotte kan vermeld worden dat bij gebruik van een ander golfstype, de plaat- of Lambgolf, er demping geconstateerd werd ten gevolge van de fase-overgang van ferriet en austeniet (Rokhlin e.a. [4]).



## 2.2 Geluidsnelheidsonderzoek

Door een staaf in eigentrilling te brengen en de resonantie-frequenties te noteren kan men de geluidsnelheden van een materiaal bepalen. Elke staaf zal meerdere resonantie-frequenties te zien geven. Dat zullen niet alleen de boventonen zijn van een grondfrequentie; er zijn namelijk meerdere golftypen met eigen grondfrequenties en boventonen te onderscheiden. In de staaf kunnen longitudinale, torsie en transversale trillingen voorkomen. De definities van deze golven zijn gedeeltelijk gerelateerd aan de lengte-as van de proefstaaf. Longitudinale golven zijn hier dezelfde drukgolven als genoemd in 2.1.1. Bij de transversale golven trilt de staaf in een richting loodrecht op de staafas. In fysische zin is hier sprake van buigingsgolven waarbij de krachten op atomair niveau op dezelfde wijze worden overgedragen als bij longitudinale golven. Dit betekent dat uit de transversale staaftrilling de longitudinale geluidsnelheid bepaald kan worden. De aanduiding transversaal voor dit golftype werd gebruikt door het Instituut Dr. Förster [5] dat de voor dit onderzoek benodigde meetapparatuur geleverd heeft; deze benaming werd gemakshalve in dit verslag overgenomen. De torsietrilling tenslotte is een beweging om de staafas, waarbij op atomair niveau schuifkrachten een rol spelen. Uit de bijbehorende eigenfrequentie zal derhalve de transversale geluidsnelheid afgeleid kunnen worden. Bij staven met een rechthoekige doorsnede komt het transversale type twee maal voor, afhankelijk van de stand van de staaf. Van de staafafmetingen is  $a$  de breedte en  $b$  de dikte ( $a > b$ ); als de hoogte van de liggende staaf gelijk is aan  $a$  zal de trilling van het transversaal-A-type (tranA) zijn en anders van het transversaal-B-type (tranB). De trillingsvormen van tranA en tranB zijn identiek, maar de frequenties verschillen (zie [5]).

Het is eenvoudig om het verband af te leiden tussen de longitudinale eigenfrequentie  $f$  van een draad en de longitudinale geluidsnelheid  $c_L$ . De geluidsnelheid is het produkt van de golf-lengte en de frequentie van de trilling; de lengte van de draad  $l$

kan bij de grondtrilling gelijkgesteld worden aan de halve golflengte. Het resultaat is dan:

$$c_L = 2 \cdot l \cdot f_1 \quad \dots (14)$$

Desgewenst kan middels de relatie

$$c_L = \sqrt{(E/\rho)} \quad \dots (15)$$

het verband tussen elasticiteitsmodulus en eigenfrequentie weergegeven worden door:

$$E = 4 \cdot l^2 \cdot \rho \cdot f_1^2 \quad \dots (16)$$

In ons experiment werden echter geen draden gebruikt maar staven met een rechthoekige doorsnede. Dit betekent dat de uitkomsten van bovenstaande formules hiervoor gecorrigeerd moeten worden.

De berekening van de elasticiteitsmodulus uit de longitudinale grondtrilling is voor elke prismatische staaf mogelijk met de formule

$$E = 4 \cdot K_1 \cdot l^2 \cdot \rho \cdot f_1^2 \quad \dots (17)$$

De orde van de trilling wordt in dit verslag weergegeven door de index  $p$ ; voor de grondtrilling heeft  $p$  de waarde één. Formule (17) kan ook voor hogere-orde-trillingen gebruikt worden, mits dan  $K_1$  door  $K_p$  vervangen wordt en uit de gemeten  $f_p$  de grondfrequentie berekend wordt. Dat laatste is snel uitvoerbaar door de eenvoud van de betrekking:

$$f_p = p \cdot f_1 \quad \dots (18)$$

De correctiefactor  $K_p$  brengt de afwijking van de draadvorm in rekening. De grootte van  $K_p$  is afhankelijk van de golf-orde  $p$ :

$$K_p = 1 + \frac{p^2 \cdot \pi^2}{12} \cdot \nu^2 \cdot \frac{a^2 + b^2}{l^2} \quad \dots (19)$$

Het is ook mogelijk om de elasticiteitsmodulus uit de transversale resonantie-frequenties te halen. De hiernavolgende formule geldt echter alleen voor staven met een rechthoekige doorsnede:

$$E = \frac{48 \cdot \pi^2}{m_p^4} \cdot K_p \cdot \frac{l^4 \cdot \rho \cdot f^2}{a^{2-p}} \quad \dots (20)$$

Merk op dat hierin eventueel direct een gevonden harmonische ingevuld kan worden en dat de formule twee van  $p$  afhankelijke constanten bevat. Bij de grondtrilling geldt  $m_1 = 4,7300$  en eveneens voor  $p=1$  geldt:

$$K_1 = 1 + \frac{a^2}{l^2} \cdot (4,12 + 2,46 \cdot (1+\nu) - 8,4 \cdot (1+\nu) \frac{a^2}{l^2}) \quad \dots (21)$$

In appendix D staan ook de waarden en formules van  $m$  en  $K$  bij  $p > 1$ ; de verhoudingen tussen  $f_1$  en  $f_p$  zijn eveneens te vinden in de genoemde bijlage. Bij rechthoekige staven zullen veelal twee grondfrequenties gevonden worden: in bovenstaande formules zijn  $a$  en  $b$  verwisselbaar.

De glijdingsmodulus  $G$  kan tenslotte uit de torsie-resonantie-frequentie bepaald worden door substitutie van de (eventueel herleide) grondfrequentie in de volgende vergelijking:

$$G = \frac{4}{K_{tors}^2} \cdot l^2 \cdot \rho \cdot f_1^2 \quad \dots (22)$$

De factor  $K_{tors}$  in deze formule is alleen afhankelijk van het quotiënt van a en b. Voor staven met een vierkante of een cirkelvormige doorsnede geldt  $K_{tors}=1$ , voor rechthoekige doorsneden staan de waarden in appendix D. Torsie-harmonischen zijn net als longitudinale-boventonen een veelvoud van de grondfrequentie.

Als van de drie parameters E, G en  $\nu$  er twee bekend zijn, ligt ook de derde vast. Hun relatie wordt weergegeven door

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad \dots (23)$$

Het bepalen van twee elastische parameters is voldoende om de longitudinale en transversale geluidsnelheden te kunnen berekenen uit de formules 1 en 2. Uit deze en voorgaande formules volgen een aantal relaties tussen geluidsnelheden en eigenfrequenties van de staaf:

$$\text{Voor } f_{p, \text{long}} : c_l = \sqrt{K_p} \cdot 2 \cdot l \cdot \sqrt{\left(\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}\right)} \cdot f_p \quad \dots (24)$$

$$\text{Voor } f_{p, \text{tran a}} : c_l = \frac{\sqrt{K_p}}{m_p} \cdot 4\pi\sqrt{3} \cdot \frac{l^2}{a} \cdot \sqrt{\left(\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}\right)} \cdot f_p \quad \dots (25)$$

Voor  $f_{p, \text{tran b}}$ : substitueer a=b in (25)

$$\text{Voor } f_{p, \text{tors}} : c_t = \frac{1}{K_{tors}} \cdot 2 \cdot l \cdot f_p \quad \dots (26)$$

Voor de berekening van  $c_L$  uit de eigenfrequenties is dus slechts één elastische parameter nodig (t.w. de constante van Poisson), en voor  $c_T$  géén. Bij de toepassing van de formules 24 t.e.m. 26 op metingen bij verschillende temperaturen dient bedacht te worden dat zowel  $\nu$  als de staafafmetingen niet constant zijn. Over de temperatuurafhankelijkheid van  $\nu$  staat informatie in appendix C en de verandering van de staafafmetingen als functie van de temperatuur wordt besproken in appendix E.

### 3 EXPERIMENT

#### 3.1 Lasbadonderzoek

##### 3.1.1 Inleidende experimenten

Er werd gestart met het creëren van een stationair lasbad met behulp van TIG-lasapparatuur in een 22 mm dikke plaat Fe360. Vervolgens werd het lasbad vanuit een op de plaat staande hoektaster ultrasoon aangestraald; dit gebeurde via een bodemreflectie in de plaat. Bij toepassing van een U.S.-taster als sensor voor een lasrobot is dit de meest voor de hand liggende opstelling. De belangrijkste overweging was echter de bescherming van de taster tegen een te hoge temperatuur. Alle beschikbare rechte tasters en hoektasters zouden boven een kritische temperatuur, die tussen 50 en 80 graden celcius ligt, defect kunnen raken. De gebruikte 45°- en 60°-hoektasters werden met de hand heen en weer geschoven. Het bij de taster terugkerende signaal werd op het scoopscherm van een USIP 11 weergegeven. De USIP 11 van de firma Krautkrämer is een pulsgever en -receiver die speciaal voor U.S.-onderzoek toegerust is. Het bleek moeilijk te zijn om in de korte lasperiode (1 à 3 minuten) conclusies te trekken uit het sterk wisselende scoopbeeld. Wel werd duidelijk dat de tasters af en toe te warm werden: de amplitude van de getoonde signalen, waaronder die van de inzendpuls begonnen na zekere tijd flink te dalen. Een blijvende beschadiging van de tasters kon steeds voorkomen worden. De behoefte om de signalen vast te leggen, teneinde ze op een later tijdstip te kunnen analyseren, leidde tot de aankoop van een geavanceerde 100 MHz-transiëntrecorder. Doordat de fabrikant in eerste instantie de gestelde levertijd ruimschoots overschreed en het hem later niet lukte om een kwalitatief goed apparaat af te leveren, moest er naar een alternatieve opnamemethode gezocht worden. Deze werd gevonden in de vorm van een kleinbeeldcamera met tijdmechanisme; hiermee kon het

scoopscherm periodiek gefotografeerd worden (minimumperiodetijd: 1 sec).

De standtijd van de tasters kon iets vergroot worden door over te stappen op een dikkere plaat Fe360. Deze was om ongewenste reflecties tegen te gaan tweezijdig vlakgeslepen tot 30 mm dikte. Daarnaast werd voor dit onderzoek een tweetal hogetemperatuurtasters aangeschaft. Als hoektaster werd een Panametrics microtaster gekozen (2,25 MHz; 1/4" kristal). Deze bevatte een 45°- en een 60°-zool; de contacttemperatuur mocht 480°C bedragen. Van hetzelfde merk werd een S.E.-taster aangeschaft (rechte taster met gescheiden zend- en ontvangkristal; 5 MHz); deze kon een contacttemperatuur van 400°C weerstaan. Let wel, de genoemde maximumtemperaturen gelden voor de kunststof zolen; de kristallen mochten niet warmer worden dan 50°C.

Er werd een tiental lasproeven uitgevoerd met de 45°-microtaster, gevolgd door een paar experimenten met de conventionele 45°- en 60°-hoektasters. Deze werden nu door een eenvoudige klem-inrichting op het werkstuk gefixeerd. De stroomsterkte variëerde van 100 tot 225 A. In de plaat werden een aantal putjes in het oppervlak geboord met boortjes van  $\varnothing 3$  of  $\varnothing 2,5$  mm. De taster werd dan zodanig gepositioneerd dat deze putjes een optimale reflectie te zien gaven. Er werd daarmee zekerheid verkregen over een goede koppeling tussen taster en plaat. Daarnaast zou een dergelijke piek (vóór het lassen) een goed referentiepunt op het scoopbeeld vormen. De te onderzoeken reflectie van de vast/vloeibaar-overgang werd dan een stukje voor de inmiddels verdwenen boorputpiek verwacht. Omdat de verkregen beelden niet conform de verwachting waren, werd gezocht naar een andere meetmethode. In 3.1.6 zullen toch enkele resultaten besproken worden.

Het vermoeden dat de reflectie van de gezochte fase-overgang te zwak was leidde tot het voornemen de S.E.-taster in te zetten. Deze heeft een hogere frequentie en hij stuurt longitudinale golven het materiaal in: twee factoren die elk voor een iets kleinere demping zorgen. De grootste signaalwinst werd gezocht in een verkleining van de afstand tussen taster en lasbadwand. Dit

kon gerealiseerd worden door de taster aan de onderkant van een iets dikkere plaat te koppelen, namelijk 50 mm dik Fe510 Nb. Er zouden metingen in 0°-positie (recht onder het lasbad) en in 45°-positie verricht worden; voor de laatstgenoemde zou in de plaat een uitholling met een schuine wand gemaakt moeten worden. Een eerste vereiste bij deze proef was een goede koeling van de taster. Om te zien of persluchtkoeling van taster en plaatbodem tot de mogelijkheden behoorde, vond een simulatie van de meetomstandigheden plaats. In een tegen de plaatbodem aangedrukt blokje R.V.S. (tastersubstituut) registreerde een thermokoppel de temperatuur tijdens het lassen. Hieromheen waren twee concentrische buizen geconstrueerd waardoor de lucht kon stromen. Het effectieve plaatoppervlak dat door de luchtstroom werd gekoeld bedroeg ongeveer 1500 mm<sup>2</sup>. Dit met veel gesis gepaard gaande afkoelproces had een niet-significante temperatuurverlaging van tien procent tot gevolg. De temperatuur van de plaatbodem recht onder het lasbad, was na vijf minuten lassen met 200 A nog altijd veel te hoog: 150°C. Een volgende stap werd gezet in de richting van waterkoeling. Helaas bleek de SE-taster ongeschikt te zijn voor het lasbadonderzoek. Bij de gebruikte versterkingen van 70 à 80 dB gaf de taster na plaatsing op de plaat te veel stoerpulsen af.

Nadat de S.E.-taster afviel als bron van longitudinale geluidsgolven, werd besloten door een kleine ingreep de eerder gebruikte microhoektaster hiervoor geschikt te maken (3.1.2).

### 3.1.2 Opstelling en meetmethode

De bovenzijde van een blok staal werd m.b.v. lasapparatuur plaatselijk zodanig verhit dat er een kleine vloeibare zone ontstond: het lasbad. De lasapparatuur bestond uit een Miller las-trafo met daaraan een TIG-lastoorts (figuren 5 en 6). Bij het TIG-lasproces wordt gebruik gemaakt van een wolfraamelektrode die ten opzichte van het stalen werkstuk een negatieve potentiaal krijgt opgelegd. Tussen elektrode en werkstuk wordt m.b.v. een

hoogfrequent ontstekingsmechanisme een elektrische boog getrokken. Om het ontstane lasbad te beschermen stroomt er argon door de toorts; dit heeft tevens een koelende functie voor de niet afsmeltende elektrode. Zie voor details over toorts en lasapparatuur appendix F. Bij een stroomsterkte van 200 A en een bijhorende boogspanning van circa 11 V had het smeltbad een oppervlakte doorsnee variërend van 10 tot 14 mm, en een diepte die tussen 5 en 6 mm lag.

De gebruikte blokken hadden een afmeting van 205 \* 120 \* 50 mm. Ze waren uit een plaat Fe510 Nb gezaagd; de walshuid aan onder- en bovenkant was niet verwijderd. Aan de onderzijde bevond zich een uitholling met twee wanden die een hoek van 45° met het plaatoppervlak maakten (fig.7). De rechte ultrasoontaster werd tegen één van deze wanden gezet, zodat het mogelijk werd om onder een hoek longitudinale golven het materiaal in te sturen. De uitholling was gerealiseerd middels een eenstaps vonkverspaningsproces; de oppervlakteruwheid was toereikend voor U.S.-onderzoek. Er werd geen gebruik gemaakt van de mogelijkheid om de taster recht onder de las te plaatsen (0° positie). Gevreesd werd dat de tastertemperatuur ondanks de waterkoeling te hoog zou oplopen.

Als taster werd een ontmantelde Panametrics microhoektaster gebruikt; zonder warmtebestendige zool kon deze namelijk als rechte taster fungeren. In figuur 8 is te zien hoe de taster d.m.v. een messing juk tegen de plaat werd gedrukt. Tussen taster en plaat werd altijd een koppelmiddel toegepast; in dit geval Ultragel II. Over de taster werd een waterhuis geplaatst dat met een rubber pakking tegen de plaat werd aangeschroefd (figuur 9). Binnenin zat als verlengstuk van de waterinlaat een buisje dat dicht bij de taster uitmondde. Dit was gedaan om rond de taster een zekere stroming te veroorzaken. Om te voorkomen dat de taster in een luchtbel zou komen te zitten, werd het op de plaat gemonteerde bakje in omgekeerde positie met water gevuld. Door het aangebrachte ontluchtingsnippeltje kon tijdens het vullen de lucht ontsnappen. Rechtsachter deze nippel is de doorgangplaats voor het tastersignaal kabeltje zichtbaar.



Als pulsgever en -receiver werd een USIP 11 van Krautkrämer gebruikt. Met dit apparaat kan een keuze worden gemaakt uit een drietal signaalvormen om naar de in rust verkerende taster te sturen. Er werd uitsluitend van de meest steile piek gebruik gemaakt. Het van de taster terugkerende signaal bestond uit een rond de nulwaarde schommelend potentiaalverschil. Dit signaal werd door de USIP 11 eerst gelijkgericht; vervolgens werd op het oscilloscoopscherm de omhullende van het gelijkgerichte signaal als functie van de tijd geprojecteerd. De ijking van de apparatuur gebeurde m.b.v. een Fe510 ijkblok met bekende afmetingen. De tijdschaal van het scoopscherm werd niet gekijkt op transittime, maar op de door de geluidspuls afgelegde weg (het getoonde bereik liep van 0 tot 100 mm).

Het beeldscherm van de USIP 11 kon gefotografeerd worden met een Nikon F2 kleinbeeldcamera. Het gebruik van een 400 ASA film en een volle lensopening van f2.8 leidde tot het gebruik van een sluitertijd van 1/8 seconde. Aangezien de herhalingsfrequentie van de tasteraanslag 500 Hz bedroeg, werden er per foto ca. 62 verschillende beelden geregistreerd. Met de camera kon een serie van 36 opnamen per film gemaakt worden; voor het filmtransport zorgde een aangekoppelde motordrive. Met een elektrische timer kon het fotograferen geautomatiseerd worden. Dit apparaat bevatte twee tijd klokken die onafhankelijk van elkaar traploos instelbaar waren. Met de eerste klok kon een wachttijd ingesteld worden en met de tweede de periodetijd van de pulsafgifte. Hoewel periodetijden van 0,1 seconde formeel mogelijk waren, leverde de combinatie van pulsgever en camera-instelling (sluitertijd 0,125 sec) een minimumtijd van 1 seconde op. De werking van het systeem was niet geheel feilloos. Veelvuldig traden er hinderlijke storingen op zoals het niet nemen van een foto na pulsafgifte en het niet stoppen bij het bereiken van de ingestelde hoeveelheid opnamen.

TABEL 3: Lasproeven met de rechte taster

Proef	Film	I (A)	Hoek	Bijzonderheden
1.1	21	100	ca. 45°	Plaat 1; met boorputje
1.2	22	150	Als 1.1	
1.3	22	200	Als 1.1	
1.4	23	200	Als 1.1	Verplaatsing van lasbad naar achteren tijdens het lassen
1.5	24	200	--	Diverse verplaatsingen van het lasbad
2.1	25	200	55°	Plaat 2
2.2	25	200	44°	Geen tasterreset na 2.1
	26	---	44°	Afkoelingsverloop
2.3	27	200	44°	
	28	---	44°	Afkoelingsverloop
2.4	29	200	29°	
2.5	30	200	(38°)	Afwijkende ligging
2.6	31	200	(50°)	Afwijkende ligging
2.7	32	var.	44°	I loopt van 150 tot 250 A
2.8	33	200	50°	
	34	---	50°	Afkoelingsverloop
2.9	35	200	38°	
	36	---	38°	Afkoelingsverloop

Er werden op twee blokken lasproeven uitgevoerd. Een overzicht van de lasproeven staat in tabel 3. De proeven staan in chronologische volgorde weergegeven; het eerste cijfer van het proefnummer geeft het plaatnummer aan. Onder "hoek" staat telkens de hoek vermeld tussen de verbindingslijn van de taster naar het lasbadmidden enerzijds, en de normaal op het plaatoppervlak anderzijds. Plaat 1 werd gebruikt om enkele meetmethoden op uit te proberen. Op de plaats waar het centrum van de geluidsbundel het plaatoppervlak sneed, werd een boorputje aangebracht als indicatiepunt (alleen bij de eerste proef). Hier kwam de boog recht boven te staan. Er werden op deze plaats drie lasproeven uitgevoerd met achtereenvolgens stroomsterkten van 100, 150 en 200 A. De taster bleek in deze gevallen goed te functioneren en er werd besloten om de stroomsterkte van 200 A als standaard te nemen. Hierna werd tijdens een tweetal lasproeven de boog enkele malen verplaatst. Het tweede blok werd benut om vanuit de vaste

tasterpositie van  $45^\circ$ , het lasbad waar te nemen onder hoeken tussen  $29^\circ$  en  $55^\circ$  (t.o.v. de normaal op het plaatoppervlak). In figuur 10 zijn de verschillende lasposities onder vermelding van de hoek weergegeven. Bij  $44^\circ$  werd als enige meerdere malen gelast; de derde en laatste keer werd de stroomsterkte tijdens de lasproef gevariëerd tot een maximum van 250 A. Later werd een doorsnee van het blok gemaakt om een macroscopisch beeld van de afmetingen van het lasbad en die van de warmte-beïnvloede-zone te krijgen.

Bij elke proef werden gedurende 2 à 2,5 minuut opnamen gemaakt van de scoopbeelden. Soms gebeurde dat met constante tussenpozen (5 à 10 sec), andere keren werd telkens een serie foto's snel achter elkaar genomen (1 sec), gevolgd door een pauze van enige tientallen seconden. Na sommige lasproeven werd ook het afkoelingsverloop geregistreerd; dit gebeurde telkens op een nieuwe film. Tijdens het verwisselen van de films werd de boog intact gelaten, zodat de totale lasduur dan opliep tot 5 à 5,5 minuut. Tussen de proeven door vond in het algemeen een taster-reset plaats, d.w.z. dat de taster van de plaat werd gehaald en er een nieuw laagje koppelmiddel werd aangebracht. Dit was nodig omdat de gebruikte Ultragel II enigzins oploste in water.

### 3.1.3 Waarnemingen

De eerste waarnemingen konden verricht worden voordat er gelast werd. Naast een dode zone van 30 à 40 mm, waren er al duidelijke reflectiepieken aanwezig. De oorzaak hiervan lag in onregelmatigheden van het plaatoppervlak (walshuid). Voor proef 1.1 was er in het plaatoppervlak een klein indicatieputje geboord; hiervan werd één scherpe piek verwacht. In plaats daarvan was er een piekzone van 59 mm tot ca. 78 mm zichtbaar op het scoopscherm (fig. 11); dit komt overeen met een gebied van ongeveer 25 mm langs het oppervlak gemeten. Dit gebied was nog groter voor aanvang van proef 2.8. Hier was een piekzone van 56 mm tot

88 mm zichtbaar (fig. 12); gemeten langs het oppervlak betrof dat een gebied met een lengte van 42 mm. De inzendhoek van de taster was  $45^\circ$ ; de reflecties van de walshuid kwamen uit een gebied tussen  $36^\circ$  en  $59^\circ$  (t.o.v. de normaal op de plaatbodem). In de bovenstaande gevallen was hoofdzakelijk sprake van reflecties tegen de walshuid. Na afkoeling van de plaat werd er een vergelijkbaar piekpatroon zichtbaar (fig. 13).

Direct na het ontsteken van de lasboog werd bij de gebruikte versterking veelal een zone met veel fluctuaties zichtbaar op het scherm van de USIP 11. Na een halve tot een hele minuut lassen was dit gebied veelal uiteengevallen in enkele, al dan niet sterk variërende pieken. Een voorbeeld van een dergelijke zone is te zien in de figuren 14 en 15, terwijl de figuren 16 en 17 de situatie na respectievelijk één en vijf minuten weergeven. De breedte van het gebied en het fluctuerende karakter ervan deden vermoeden dat hier sprake was van een reflectie tegen het lasbadoppervlak, eventueel samen met een reflectie tegen de overgang vast/vloeibaar van het smeltbad. In figuur 15 liep de zone van 70 mm tot ca. 85 mm op de voor kamertemperatuur geijkte afstandschaal. Bij kamertemperatuur zou dat wijzen op een zone van 53 mm tot 71 mm langs het bovenoppervlak; de werkelijke lasbadoppervlak-afmetingen liepen van 47 mm tot 61 mm. Het verschil kan eenvoudig verklaard worden uit het optredend temperatureffect (hogere temperatuur geeft grotere transitie).

Om te zien of de gesignaleerde fluctuerende zone inderdaad met het lasbad van doen had, werd bij proef 1.4 de boog tijdens het lassen ongeveer een centimeter over het oppervlak naar achteren geschoven (t.o.v. de taster). De beginpositie was dezelfde als in proef 1.1; het scoopbeeld vlak voor de proef is te zien in figuur 18. De figuren 19 en 20 zijn na ongeveer anderhalve minuut lassen genomen en figuur 21 werd na ruim twee minuten gemaakt. Op deze foto's is telkens een vaste (d.w.z. niet fluctuerend tijdens de opname) piek te zien op 61 mm. Een zone met fluctuerende pieken begint op ca. 64 mm of 67 mm en eindigt op ongeveer 79 mm à 81 mm. Na  $3\frac{1}{2}$  minuut vond de verplaatsing van het lasbad plaats.

In figuur 22 is een niet-fluctuerende zone te zien van 59 mm tot circa 71 mm (piekeinde 74 mm). Op 88 mm is een nieuwe piek zichtbaar, deze ligt in een gebied waar voorheen geen pieken voorkwamen. Figuur 23 geeft ca. 25 sec na de verplaatsing een viertal pieken met een fluctuerend karakter te zien, waarvan de eerste op 75 mm ligt en de laatste op 88 mm omhoog komt. Als aangenomen wordt dat de pieken afkomstig zijn van reflectie tegen het lasbadoppervlak en er geen rekening gehouden wordt met een temperatuureffect op de geluidsnelheid, dan kan berekend worden over welke afstand de reflectiepunten zich langs het oppervlak verplaatst hebben. Voor de beginpiek werd een afstand van 13 mm à 17 mm waargenomen en voor de laatste van de zone een verplaatsing van 10 mm. Doordat er natuurlijk wel sprake was van een temperatuurinvloed, beperkt de waarde van deze bepaling zich tot de constatering dat een verplaatsing van het lasbad leidt tot een verschuiving van de fluctuerende zone in een te verwachten richting.

In proef 1.5 werd het experiment in gewijzigde vorm herhaald. Nu was de startpositie ongeveer 2 cm achter die van proef 1.1. Tijdens het lassen werd de boog tweemaal ca. 1 cm terugbewogen en toen weer 2 cm naar achteren. Tussen de diverse vaste pieken door, waren weer verschuivingen van de beginpiek van de fluctuerende zone in de juiste richting te constateren.

De zogenaamde niet-fluctuerende pieken konden eveneens in amplitude variëren, zij het met lagere frequentie. Het karakter van de pieken kon ook veranderen van "vast" naar "fluctuerend" en vice versa. Voorbeelden hiervan zijn te vinden in de figuren 24 t.e.m. 28, die met een tussentijd van 5 seconde genomen zijn.

Tot slot volgen nog een drietal aanvullingen op de waarnemingen:

1. Een aantal malen werd het afkoelingsverloop geregistreerd. Zodra de boog werd uitgeschakeld begon het scoopbeeld sterk te veranderen. In de eerste minuut stegen en daalden oude en nieuwe pieken op onvoorspelbare wijze.

2. De variatie van de stroomsterkte in proef 2.7 (44°) leidde niet tot resultaten door de slechte kwaliteit van de opnamen.
3. In figuur 29 is een macro-opname van de aangeëtste plaatdoorsnede te zien. Hierin zijn achtereenvolgens de lassen zichtbaar van de proeven 2.1, 2.7, 2.4, 2.9 en 2.8 (de hoeken 55°, 44°, 29°, 50° en 38°).

#### 3.1.4 Verwerking van waarnemingen

Uit de globale beschrijving van de waarnemingen in 3.1.3 komt naar voren dat er vaak vele pieken tegelijkertijd op het beeldscherm waren te zien. Het is daarom goed om een overzicht te geven van mogelijke reflectiebronnen.

1. \* Interne reflecties in taster en koppellaag
  - \* Scheurtjes en insluitels
  - \* Oppervlakte-onregelmatigheden (walshuid)
2. Lasbadoppervlak: overgang vloeibaar staal / lucht
3. Lasbadwand: overgang vast/vloeibaar staal
4. Lasbadachterwand: overgang vloeibaar/vast staal via reflecties tegen het lasbadoppervlak.

Eventuele scheurtjes en verontreinigingen geven veel meer stoor-effecten dan bij het veel toegepaste niet-destructief U.S.-onderzoek, doordat nu een relatief hoge versterking werd toegepast (80 dB). Reflectie tegen het lasbadoppervlak werd bij de gebruikte longitudinale golven wel verwacht, echter geen terugkaatsing in de richting van de taster. Bestudering van de waarnemingen leidde tot het vermoeden dat er van het laatste wel degelijk sprake was. Een oorzaak zou kunnen liggen in de kromming van het oppervlak en in het ontstaan van oppervlakterimpels. Het verschil tussen de tasterafstanden tot het dichtsbijzijde en het verstgelegen oppervlaktereflectiepunt bedroeg bij de proeven op plaat 2 maximaal 12 mm. Op het scoopscherm konden in dit geval reflecties verwacht worden in een zone die breder was dan 12 mm (door het temperatuureffect). Datgene waar in eerste instantie naar gezocht werd,

de reflectie tegen de overgang vast/vloeibaar, zou gevonden moeten worden aan het begin van, of vóór de eerste pieken van de genoemde zone. Het minst waarschijnlijk is het optreden van pieken afkomstig van geluidsgolven die eerst tegen het lasbadoppervlak reflecteren, vervolgens tegen de overgang vloeibaar/vast, en uiteindelijk via een tweede oppervlakteweerkaatsing hun weg richting taster vervolgen. Om te weten of deze mogelijkheid zich waarneembaar heeft voorgedaan, zal eerst bekend moeten worden waar de lasbadoppervlaktezone op het scoopscherm precies ophoudt.

De genoemde reflectiebronnen zullen niet allemaal zichtbaar worden. Een wat zwakkere bron wordt niet zichtbaar als een sterkere zich op iets kortere afstand van de taster bevindt. Het is mogelijk dat er door interferentie van de heengaande en terugkomende golf uitdoving optreedt. Verder ligt een belangrijke oorzaak van het niet waarnemen van reflectiepieken in de zwakte van het gereflecteerde signaal. Een bolvormige reflectiewand heeft een reflectiecoëfficiënt van 0,1 en de fase-overgang vast/vloeibaar staal heeft een R-waarde van dezelfde grootte: in totaal een verlies van 40 dB.

Het interpreteren van het piekprofiel levert ook wat problemen op. Zowel het begin als het eind van een getoonde piek zijn afhankelijk van de combinatie signaalsterkte en versterking. In figuur 30 is geschetst hoe de begin en eindpunten van de versterking afhangen. In het algemeen is bij het U.S.-onderzoek het piekbegin van belang. Bij het U.S.-lasbadonderzoek is er speciale belangstelling voor het begin van de laatste piek van het lasbad, terwijl veelal alleen het eindpunt hiervan zichtbaar is.

Doordat de geluidsnelheid bij hogere temperatuur afneemt, klopt de kamertemperatuur-ijking van de USIP 11 niet voor de lasproeven. Daarom werd er een transittime-delay-model opgesteld om te corrigeren voor het temperatuureffect. De weg van de geluidspuls van taster tot lasbadoppervlak wordt daartoe in vier stukken verdeeld. Voor elk van deze trajecten werd een verlengingsfactor voor de transittime bepaald. Door de relevante afstanden op te meten in de gemaakte macro en deze met de verlen-

gingsfactor te vermenigvuldigen, kan achteraf bepaald worden op welke plaats een bepaalde reflectiepiek op het scoopscherm te zien zou moeten zijn. De afstanden op de afstandschaal van de USIP 11 worden uiteraard op dezelfde wijze beïnvloed als

Tabel 4: Gegevens van het transittime-delay-model

Zone	Begrenzungen (°C)	$t_d$
A	20 - 400	1,02
B	400 - 750	1,08
C	750 - 1500	1,2
D	1500 - ?	1,5

de transittime. In de bovenstaande tabel staan de vier gebieden met hun respectievelijke verlengingsfactoren ( $t_d$ ) vermeld. Bij de berekening van de verlengingsfactor is gebruik gemaakt van het verband tussen geluidsnelheid en temperatuur van St34 (appendix C). Voor het model wordt een temperatuurverdeling aangenomen als geschetst is in figuur 31. In de gebieden A, B en C wordt eenvoudigheidshalve een lineair verloop van de temperatuur verondersteld. De werkelijke temperatuur in zone D, het lasbad, was naar verwachting enkele honderden graden hoger dan 1500 °C. De invloed van deze hogere temperatuur op de geluidsnelheid is niet precies bekend. Naar verwachting zal de verlengingsfactor bij een gemiddelde temperatuur van 1800 °C liggen tussen 1,48 en 1,57. De 750°C-grens is het begin van de zichtbare aanetsing van de plaatdoorsnede. Er is verondersteld dat de aangeëtste gebieden tijdens het lassen austenitisch zijn geweest; de werkelijke temperatuur van de zichtbare grens zal tussen 700°C en 900°C liggen. De loop van de 400°C grens is onbekend; in het model wordt aangenomen dat de lengte van zone B 1/3 deel van de som van A en B is. Het transittime-delay-model krijgt door deze opzet een zekere mate van flexibiliteit: door het verschuiven van de 400°C-grens is het model eenvoudig aan te passen aan de waarnemingen.



## 3.1.5 Toepassing van het transittime-delay-model

Uit de aangeëtste doorsnede van de lassen (fig. 29) werden de afstanden tussen de taster en een paar punten van het lasbad bepaald. De hoek waaronder een lasbad bekeken werd, was de hoek die de lijn tussen het midden van het lasbadoppervlak en de taster maakte met de normaal op het plaatoppervlak. De lasbadkarakterisering vond plaats als geschetst in figuur 32. Het dichtst bij de taster gelegen punt op de lasbadwand werd punt 1 genoemd. De punten 2 en 4 vormden de begrenzingen van het lasbadoppervlak, terwijl punt 3 in het midden ervan lag. De resultaten van deze opmetingen zijn te vinden onder het kopje "werkelijke afstand" in tabel 5. Van elke afstand

Tabel 5: Afstand van taster tot lasbad

		Proef	2.1	2.8	2.7	2.9	2.4
		Hoek	55°	50°	44°	38°	29°
Punt	Ligging	Werkelijke afstand (mm)					
1	Wand	74,5	63,0	57,0	52,5	47,0	
2	Oppervlak	74,0	65,0	58,0	53,5	50,0	
3	Oppervlak	79,5	70,5	63,5	58,0	52,5	
4	Oppervlak	85,5	71,0	69,0	62,5	55,0	
		Virtuele afstand (mm)					
1	Wand	78	66	60	55	49	
2	Oppervlak	77	68	61	56	53	
3	Oppervlak	85	76	69	63	57	
4	Oppervlak	94	76	77	69	61	

werd bepaald welk deel in het lasbad lag (zone D) en hoe groot de afstand door het aangeëtste gebied (zone C) was. Door nu de lengte van elke zone met de in tabel 4 vermelde transittime-delay-factor te vermenigvuldigen, werd bekend op welke plaats op het scoopscherm een reflectie van de punten 1 t.e.m. 4 zichtbaar had moeten worden; zie voor resultaten tabel 5, onder "virtuele afstand".

Uit vergelijking van de virtuele afstanden tot de punten 1 en 2 blijkt dat deze dicht bij elkaar liggen. Als het lasbadoppervlak al vanaf punt 2 reflecties richting taster stuurt, zal het moeilijk zijn om reflecties afkomstig van de lasbadwand als zodanig te herkennen. Alleen in het geval van proef 2.4 ( $29^\circ$ ) lijkt daar een mogelijkheid te liggen. In het hiernavolgende zal voor elk van de lassen uit tabel 3 beschreven worden in hoeverre de waarnemingen informatie geven over reflectie door de lasbadwand, het lasbadoppervlak en de lasbadachterwand.

#### Proef 2.1 ( $55^\circ$ )

Reflecties afkomstig van het lasbad zouden moeten liggen tussen 77 mm en 94 mm. Er werd bij deze proef geen fluctuerende zone zichtbaar. Kort na het begin van het lasproces ontstond een licht fluctuerende piek op ca. 88 mm; deze werd langzaam kleiner en was na een minuut verdwenen.

#### Proef 2.8 ( $50^\circ$ )

Bij  $50^\circ$  werden lasbadoppervlaktereflecties verwacht tussen 58 mm en 76 mm. Op de meeste foto's was van 56 tot 70 mm een zone met vaste pieken zichtbaar. Op verschillende foto's was een fluctuerende zone zichtbaar van 70 mm tot 78 à 85 mm. Tevens kwam op enkele foto's een piek op 92 à 93 mm omhoog. Het optreden van een reflectie tegen de lasbadachterwand wordt ondermeer door deze foto's enigszins aannemelijk gemaakt. De gezochte reflectie tegen de lasbadwand op 66 mm zou alleen bij een sterk signaal opgemerkt zijn, ten gevolge van de aanwezigheid van andere pieken op het scherm.

#### Proef 2.7 ( $44^\circ$ )

Het lasbad lag hier op een virtuele afstand van 61 mm tot 77 mm. Het aflezen van de te lichte film was lastig, maar niet zonder resultaat. Van 58 tot 65 mm was weer een zone met vaste pieken aanwezig. Daarnaast werden er fluctuerende pieken op 67 mm en op 75 à 76 mm waargenomen. Enkele kleine fluctuerende piekjes op 83 mm zouden weer kunnen wijzen op meervoudige reflecties in het lasbad.

### Proef 2.9 (38°)

De verwachte lasbadzone van 56 mm tot 69 mm lijkt aardig weergegeven te worden door een aantal piekjes waarvan de eerste begint op 57 mm en de laatste op 73 à 75 mm. Op een paar foto's was nog een fluctuerende piek zichtbaar op 85 mm.

### Proef 2.4 (29°)

Lasbadreflectie werden verwacht tussen 53 en 61 mm en een lasbadwandreflectie op 49 mm. Geen van deze verwachtingen kwam uit. De lasbadwandreflectie was in het geheel niet zichtbaar en de fluctuerende zone loopt van 59 à 61 mm tot ca. 67 mm. Een piek op 70 mm lijkt een vaste piek te zijn.

### 3.1.6 Toepassing bij transversale golven

Het onder een hoek van 29° tot 55° aanstralen van het lasbad met longitudinale golven had geen duidelijke waarneming van de gezochte vast/vloeibaar-overgang tot gevolg. Bij de dichtsbijzijnde en verstgelegen las werd er geen lasbadwandreflectie waargenomen. Daarom leek het interessant om nog eens te kijken naar de opnamen van enkele inleidende proeven, waarbij van transversale golven gebruik werd gemaakt. Transversale geluidsgolven planten zich niet voort in vloeistoffen, zodat eventuele pieken met grotere zekerheid aan lasbadwandreflecties toegeschreven kunnen worden. Bovendien is de reflectiecoëfficiënt tegen de overgang vast/vloeibaar een factor tien hoger, al kwam dit volgens Lott [6] bij twee experimenten niet tot uiting in een verhoogde amplitude. In dit verslag werden een aantal foto's opgenomen die gemaakt zijn bij een inleidende proef met de 45°-microhoektaster (fig. 33 t.e.m. 41); hierbij werd gedurende één minuut gelast met 200 A. De tijd/afstandschaal van de beginproeven was overigens anders geïjkt: het scoopscherm bestrijkt een gebied van 50 tot 100 mm. Het proefmateriaal bestond uit een tweezijdig vlakgeslepen plaat Fe360 met een dikte van 30 mm. De taster be-

vond zich aan de bovenzijde van de plaat, zodat de geluidsbundel tegen de plaatbodem moest reflecteren.

Zoals beschreven in 3.1.1 werd voor elke proef een indicatieputje geboord, hetgeen door de 45°-taster zo goed mogelijk moest worden aangestruild. Van de gekozen proef is geen opname van vlak voor het lasproces beschikbaar; daarom wordt een vergelijkbare opname uit een andere serie getoond. De toegepaste versterking was 80 dB en de knop voor de elektronische ruisonderdrukking stond op 1 (0=uit; 5=max). Ter vergelijking: de versterking is identiek aan die bij de proeven met de rechte microtaster, daar was de ruisonderdrukking echter maximaal. Dat er ondanks het lage niveau van ruisonderdrukking toch een rustig scoopbeeld verkregen werd, zal ongetwijfeld aan de verwijdering van de walshuid door vlakslijpen toegeschreven mogen worden.

De afstand die de geluidspuls moest afleggen tot het punt op het oppervlak waarboven de lasboog gecentreerd werd, bedroeg 85 mm. De reflectie van het indicatie-boorputje werd op 83 à 84 mm verwacht. Hoewel het niet bekend is waar de piek werkelijk op het scoopscherm stond, kan op grond van opnamen bij andere series gesteld worden dat hij zich waarschijnlijk tussen 80,5 en 81,5 mm bevond.

Om de reflecties tijdens het lasproces te kunnen verklaren, werd gekeken naar de mogelijkheid om het transittime-delay-model op de nieuwe situatie toe te passen. De twee grootste veranderingen die erin verwerkt moesten worden betreffen de gewijzigde temperatuurverdeling en de overschakeling van longitudinale op transversale geluidgolven. Een probleem bij het laatstgenoemde was het ontbreken van betrouwbare gegevens over het verband tussen de transversale geluidsnelheid en de temperatuur. Wel waren er relaties tussen de poissonconstante en de temperatuur voorhanden. Met behulp van de formules 1 en 2 is het mogelijk om de transversale geluidsnelheid te bepalen uit  $c_L$  en  $\nu$ .

$$c_t = K_\nu \cdot c_1 \quad \dots (27)$$

$$\text{met } K_\nu = \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}}$$

Door de  $K_\nu$ -waarden met die voor kamertemperatuur te vergelijken, was het direct mogelijk de toename van de transittime-delay-factor ( $\Delta t_d$ ) t.o.v. de longitudinale waarden te bepalen. Een handicap van deze rekenwijze was dat de gebruikte gegevens over geluidsneldheid en poissonconstante als functie van de temperatuur, niet op dezelfde staalsoort betrekking hebben. De in tabel 6 vermelde resultaten zijn dan ook niet meer dan richtwaarden. Toepassing van de resultaten op het transittime-delay-model uit 3.1.4 zullen naar schatting leiden tot een verhoging van de te meten virtuele afstanden tot de lasbadwand met ongeveer 4%.

Tabel 6: toename van  $t_d$  bij transversale golven

T (°C)	$\nu$	$K_\nu$	$\Delta t_d$
20	0,29	0,544	0%
400	0,30	0,535	2%
750	0,32	0,525	4%
>1000	0,37	0,454	20%

Zoals eerder opgemerkt diende ook de temperatuurverdeling te worden aangepast. Er werd besloten om het model uit 3.1.5 op één verandering na ongewijzigd te laten. Het betreft de lengte verhouding tussen de zones A en B; het aandeel van B hierin werd van 33% op 15% gebracht.

Van de las van de beproven serie was geen aangeëtste plaatdoorsnede beschikbaar, zodat de lengte van de geluidsweg door de zones C en D geschat moest worden. Het leek reëel om de lengte van C tussen 3 en 4 mm te schatten en die van D (lasbad) tussen 5 en 7 mm. Voor zone A werd  $t_d=1,03$  genomen, voor B  $t_d=1,11$  en voor C  $t_d=1,35$ . De virtuele afstand van taster tot lasbadwand zou dan 82,5 à 84,5 mm moeten bedragen; in dit gebied zou eveneens de piek van het boorputje moeten zitten. Zoals bekend werd deze

reflectiepiek op iets kortere afstand waargenomen; de lasbadwandpiek zou waarschijnlijk dezelfde verschuiving te zien geven. Op de opnamen bleek meestal een piek in het verwachte gebied aanwezig te zijn op ca. 81 mm. Deze werd veelal door andere pieken gevolgd op ca. 83 en 86 mm; mogelijkwijs was een grilig gevormd lasbad hier debet aan. Er werd geen moeite gedaan om de aanwezigheid van de soms opduikende verderweg gelegen pieken te verklaren.

### 3.1.7 Bevindingen bij het lasbadonderzoek

In 3.1.4 werden vier categoriën reflectiebronnen opgesomd. Hun invloed op de proef zal eerst beschreven worden; daarna volgt een korte bespreking van de resultaten.

Er waren vele storende reflecties zichtbaar bij de proeven met de rechte taster. De meeste hiervan waren zonder twijfel afkomstig van de onregelmatig gevormde walshuid. Dit wordt duidelijk na vergelijking van de scoopbeelden met die van de proeven met de hoektaster. Hier was het oppervlak tweezijdig vlakgeslepen en waren er slechts enkele pieken zichtbaar.

De reflectie van de overgang vast/vloeibaar staal werd niet gevonden met longitudinale golven en wel met transversale golven. De proefomstandigheden bleken bij de eerstgenoemde experimenten ongunstig te zijn, door de onverwacht sterke terugkaatsing van het lasbadoppervlak. Discriminatie tussen lasbadwand- en lasbadoppervlakte-pieken was niet mogelijk bij aanstraalhoeken groter dan ca.  $30^\circ$  t.o.v. de normaal op het oppervlak. Bij de twee uiterste lasposities ( $29^\circ$  en  $55^\circ$ ) werd met zekerheid geen lasbadwandreflectie vastgelegd.

Een ander interessant punt, het begin van het lasbadoppervlak, werd tweemaal gedetecteerd met longitudinale golven. Dit gebeurde bij een hoek van  $50^\circ$ , op een virtuele afstand van 70 mm i.p.v. 68 mm, en bij  $38^\circ$  op 57 mm i.p.v. 56 mm. Overigens zouden dit eventueel reflecties van de lasbadwand kunnen zijn (bij  $50^\circ$

70 mm i.p.v. 66 mm; bij  $38^\circ$  55 mm i.p.v. 56 mm). Bij de lassen op  $55^\circ$  en  $44^\circ$  werden wel pieken in de verwachte lasbadzone waargenomen, maar niet aan het begin ervan.

Tenslotte werden tijdens het lassen bij de hoeken van 29, 38, 44 en 50 graden, pieken zichtbaar na het verwachte gebied van de lasbadzone. Dit maakte de weerkaatsing van reflecties tegen de overgang vloeibaar/vast via het lasbadoppervlak aannemelijk.

Bij alle genoemde waarnemingen moet bedacht worden dat deze soms maar op een paar foto's van een serie zichtbaar waren. Het wekt misschien bevreemding dat zelfs pieken, die naar verondersteld werd van reflecties tegen insluitels afkomstig waren, soms van het scoopscherm verdwenen. Mogelijk was hier dan sprake van uitdoving tussen heengaande en gereflecteerde puls. Doordat met hogere temperatuur de geluidsnelheid daalt, kan tijdens het opwarmen van het materiaal de conditie voor uitdoving veranderen: pieken kunnen hierdoor verdwijnen of juist zichtbaar worden. Dit mechanisme is ook een deelverklaring voor de wisselende amplituden van reflecties tegen fasengrenzen, al zal daar de beweeglijkheid van deze scheidingsvlakken ook een grote rol in spelen.

De vraag waarom bij het aanstralen van de las onder  $29^\circ$  met longitudinale golven geen lasbadwandreflectie werd waargenomen, kan niet beantwoord worden. De hoeveelheid relevante gegevens die dit oriënterende onderzoek opleverde is daarvoor te gering. Wel lijkt het nuttig om de verschillen van dit experiment met de meer succesvolle proef met transversale golven op een rij te zetten. Ten eerste is er een verschil in de aanstraalhoek en ten tweede zullen de lasbadvormen niet identiek zijn. Ook het proefmateriaal was niet gelijk: Fe360 bij de transversale proeven. Het effect van deze factoren op de signaalsterkte is onbekend. Een verschijnsel dat de transversale golven tegenwerkt is de kleinere hoeveelheid energie die in de geluidpuls wordt gestopt. Een positieve verklaring voor het succes van deze proef is dat bij gelijke versterking een veel geringere ruisonderdrukking werd toegepast (er waren minder stoorpieken door de verwijdering van de walshuid). Een tweede verklaring is dat de reflectiecoëfficiënt

tegen het lasbad 100% is: tien maal zo groot dus. Tenslotte spreekt nog mee dat het lasbad in het centrum van de geluidsbundel lag. De las bij  $29^\circ$  had een hoekafwijking van  $16^\circ$  t.o.v. de as van de geluidsbundel. Uit formule 13 volgt hier een bescheiden signaalverlies van 6 dB uit (appendix B; fig. B1).

Er zijn te weinig lasproeven met de rechte taster uitgevoerd om te kunnen zeggen of het transittime-delay-model uit 3.1.4 aangepast moet worden. Zo werd bij de eerste lasbadpieken bij  $38^\circ$  en  $50^\circ$  verondersteld dat deze van het begin van het lasbadoppervlak afkomstig zouden zijn, terwijl het best mogelijk is dat het reflectiepunt meer naar het midden lag, of dat de reflectie zelfs van de dichterbij gelegen lasbadwand afkwam. De zwakke punten in het model waren de aannamen omtrent de temperatuurverdeling in de plaat en de geluidsnelheid in het lasbad.

Tenslotte behoeft nog één verschijnsel een nadere toelichting. Dit betreft het vreemde feit dat bij longitudinale golven reflecties tegen de overgang vast/vloeibaar niet zichtbaar worden en die tegen de verderweg gelegen vloeibaar/vast-overgang waarschijnlijk wel. Door gebruikmaking van de R- en D-waarden uit tabel 2 en de incorrecte aanname dat het lasbadoppervlak volkomen vlak is, blijkt er geen significant verschil in de signaalsterkte van de reflecties te bestaan. Een verklaring voor het genoemde effect zal gezocht moeten worden in een toevallig focuserende werking van de niet vlakke vorm van het lasbadoppervlak en van de lasbadachterwand.



### 3.2 Geluidsnelheidsonderzoek

#### 3.2.1 Inleidende experimenten

De kamertemperatuuropstelling van de Elastomat (fig. 42) werd gebruikt om een drietal staafjes Fe360 met vlakgeslepen oppervlak te onderzoeken. De draden tussen golfopwekker en -ontvanger drukten licht gebogen tegen de zijkanten van de staafjes; de doorsnee van deze "koppeldraden" bedroeg 0,1 mm. Om het wegspringen van de koppeldraden te voorkomen waren er op de contactplaatsen minuscule putjes in de staaf geslagen. Ook de amplitude van de opgewekte trilling werd om deze reden beperkt gehouden. Op elk staafje werden (minimaal) twee metingen verricht, waarvan één na een 90°-rotatie van het staafje om zijn lengte-as. Dit werd gedaan om de invloed op de twee trillingsvormen van  $f_{1TRAN}$  te bestuderen; de verwachting was dat er slechts één per proef zichtbaar zou zijn. Vaak bleek de niet-verwachte eigentrilling toch in een zwakkere vorm opgewekt te kunnen worden. De resulterende waarden voor de geluidsnelheid werden per proef en per frequentie gemiddeld:

Tabel 7: Resultaten bij kamertemperatuur voor Fe360

StAAF	Afmetingen (mm*mm*mm)	$c_L$ uit llong	$c_L$ uit ltranA	$c_L$ uit ltranB	$c_T$ uit ltors
		(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
A	5*7*160	6022	6015	6016	3241
B	5*5*160	6020	6005	6052	3235
C	3*7*160	6021	6012	6010	3255
Gemiddeld		6019			3237

Bij de berekening van  $c_L$  is gebruik gemaakt van de aanname  $\nu=0,30$ . De spreiding in de resultaten is niet groot: de maximum-afwijking van het gemiddelde was voor beide geluidsnelheden minder dan één procent. De afwijking t.o.v. de literatuurwaarden voor Fe510 bedroeg +2% voor  $c_L$  en -0,5% voor  $c_T$ . Omdat er geen

literatuurwaarden voor Fe360 bekend waren, moest de vergelijking met die voor Fe510 plaatvinden; de waarden hiervan zullen naar verwachting in dezelfde orde van grootte liggen.

De plaatsing van de koppeldraadjes tegen de zijvlakken werd bij staafje A gevariëerd. Plaatsing in het zwaartepunt van de vlakjes gaf bij matige versterking geen waarneembare torsietrilling. Als de draadjes nabij de uiteinden van een lichaamsdiagonaal aangebracht werden, was de signaalsterkte van torsietrillingen optimaal. Daarom werd besloten om deze plaatsingswijze bij alle proeven toe te passen.

Staafe A werd vervolgens in de ovenopstelling beproefd. Bij een drietal metingen werden temperaturen van achtereenvolgens 400, 700 en 1000°C bereikt. De temperatuurverhoging bleek tot een aanmerkelijke verzwakking van signalen te leiden. Bij hogere temperaturen bleek het vrijwel onmogelijk te zijn om de gemeten eigenfrequentie te benoemen, door het ontbreken van een betrouwbare voorspelling van de frequentieverschuiving. De tweede proef leverde geen meetwaarden op door het losspringen van een koppeldraadje. Na afkoeling van de staaf en verwijdering van de loszittende oxydehuid bleken de grondfrequenties slechts weinig gewijzigd te zijn. De derde proef leverde een zwaar geoxydeerd staafje op; de staafmassa bleek met 11% gereduceerd te zijn t.o.v. de niet verhitte toestand.

Om oxydatie en daardoor vormverandering tegen te gaan, werd besloten stikstof door de oven te leiden. Het bleek technisch niet realiseerbaar te zijn om toetreding van omgevingslucht tegen te gaan, tenzij de hele oven in een couveuse geplaatst zou worden. Bij een staafje met dezelfde afmetingen als A leidde deze werkwijze tot een massa-afname van slechts 0,2% bij verwarming tot 700°C. De kosten van deze methode bleken onaanvaardbaar hoog te zijn: een halve fles stikstof en één golfopwekker. De laatste raakte defect doordat de uit de oven komende warme gasstroom het kristal van piëzo-elektrisch materiaal thermisch te veel belastte.

Er werd op grond van bovenstaande ervaringen besloten om van het eigenlijke proefmateriaal een serie staafjes voor eenmalig gebruik te laten vervaardigen. Om het losspringen van de koppeldraadjes te voorkomen en om zo mogelijk de signaaloverdracht te verbeteren, werd naar een manier gezocht om de draden aan de staven te hechten. Een oplossing werd gevonden in het vonkclassen van het draadeinde met behulp van de snelle ontlading van een condensator. Hiervoor was het nodig over te stappen op dikker koppeldraad; er werd voor verenstaal met een doorsnee van 0,2 mm gekozen.

### 3.2.2 Opstelling en meetmethode

Het meetprincipe van deze proef was gebaseerd op het in eigentrilling brengen van een proefstaaf. Aan weerszijden van de proefstaaf bevonden zich twee identieke golfopwekkers c.q. -ontvangers (fig. 43). In één van de twee, de zender, werd een mechanische trilling met de gewenste frequentie opgewekt. Via een op het zendkristal aanwezig buisje en een daaraan bevestigd dun koppeldraadje, werd de trilling op de proefstaaf overgedragen. Deze ging zelf resoneren indien de opgelegde frequentie gelijk was aan een eigenfrequentie of harmonische. Hoewel het kristal longitudinale trillingen opwekte, werden door de scheve aanhechting van het koppeldraadje ook transversale en torsiecomponenten overgebracht. Als het staafje in resonantie was, voltrok zich het omgekeerde proces aan de kant van de golfontvanger. Het in trilling gebrachte kristal met piëzo-elektrische eigenschappen gaf vervolgens een wisselspanning af met de frequentie van de staaftrilling.

Het belangrijkste instrument van de opstelling was de Elastomat. Hiermee kon t.b.v de golfopwekker een elektrische trilling met een frequentie van 580 Hz tot 26,5 kHz opgewekt worden. In de Elastomat was een oscilloscoopscherm ingebouwd: langs de x-as werd de amplitude van de opgewekte trilling geschreven en langs

de y-as die van het (versterkte) terugkerende signaal. Op deze manier ontstond er een lissajousfiguur indien het uitgaande en inkomende signaal correleerden. Het verkrijgen van de gewenste zendfrequentie gebeurde door handmatige of motorische verdraaiing van een afstemknop op de Elastomat. De frequentiewaarde kon nauwkeurig afgelezen worden van een aangekoppelde Hewlett Packard 5300 A frequentieteller. In de Elastomat gaf een draaispoelmeter de sterkte van het terugkerende signaal aan; de waarde hiervan was afhankelijk van de versterking van het terugkerende signaal. Voor proeven bij kamertemperatuur was er een meetbankje met twee strak gespannen snaren waarop het proefstaafje kon worden gelegd. Daarnaast was er een ovenopstelling beschikbaar voor proeven bij hogere temperaturen (maximaal 1000°C); het staafje werd hier in twee metalen lussen gehangen. In de stalen ovenwand bevond zich een thermokoppel zodat het temperatuurverloop op een x,t-schrijver zichtbaar gemaakt kon worden.

De proefstaafjes waren uit een plaat Fe510 Nb van 25 mm dik gemaakt. De staafas stond bij de LW-serie loodrecht op de walsrichting, bij de EW-serie was hij er evenwijdig aan. Om de series te onderscheiden hadden ze verschillende lengten gekregen; de globale afmetingen van een LW-staaf waren 5\*7\*166 mm<sup>3</sup> en van een EW-staaf 5\*7\*155 mm<sup>3</sup>; de werkelijke afmetingen staan in appendix G. Het ophangen van de staafjes in de lussen gebeurde op 1/4 en 3/4 deel van de staaf lengten. Na ophanging werden er twee stukken verenstaal (Ø 0,2 mm) op lengte geknipt om als koppeldraad tussen golfomzetter en proefstaaf dienst te doen. Ze werden met een soldeerbout en schellak aan het buisje op het kristal "gesoldeerd". Vervolgens vond het vastlassen aan de staafuiteinden plaats met behulp van het vonklas-apparaat; dit lukte vaak pas na twee of meer pogingen. Een nieuwe hechting werd veelal op een andere plek gemaakt en van de koppeldraad moest een stukje afgeknipt worden om een schoon uiteinde te krijgen. De koppeldraadjes bevonden zich voor een groot deel in de smalle toegangsbuis tot de oven; contact tussen draad en buiswand leidde tot groot signaalverlies. Het was meestal mogelijk de draadjes weer vrij van

de buiswand te krijgen door voorzichtige verplaatsing van de golfomzetters. Deze manipulatie was zowel nodig vóór iedere proef als tijdens de proef ten gevolge van temperatuur-uitzettingseffecten.

Het optekenen van alle eigentrillingen van de proefstaaf was een tijdrovende bezigheid. Er moest voortdurend naar het oscilloscoopscherm gekeken worden terwijl de frequentie motorisch werd veranderd. Een staafresonantie uitte zich door het plotseling veranderen van het beeld door de snelle op- en afbouw van bijvoorbeeld een ellips. De motor werd dan uitgeschakeld zodat met de hand de juiste frequentie kon worden teruggezocht. Op het waarnemingenblad werden naast de gevonden frequentie de standen van de versterkingsknoppen genoteerd, alsmede de uitlezing van de signaalamplitudemeter. Van de niet-ellipsen werden alleen de trillingen opgemeten met een verhouding van 2 of 3 tussen uitgezonden en ontvangen frequentie. Nadat het gewenste golflengtegebied gescand was, kon de temperatuur verhoogd worden. Vaak werd de oven een twintigtal graden boven de gewenste temperatuur gebracht, waarna langzaam werd afgekoeld. De staafdoorwarming werd geacht voldoende te zijn na een verblijftijd van tien minuten op de meettemperatuur.

Het onderzoek zou zich in de eerste plaats richten op het verloop van de longitudinale- en de torsiegrondtrilling met de temperatuur. Deze meetwaarden zijn in principe voldoende om  $c_L$  en  $c_T$  te berekenen. Er werd een ruim frequentiegebied rond de verwachte frequentiewaarden gescand, onder meer om het verloop van eventuele harmonischen te kunnen volgen. De temperaturen waarbij geëxperimenteerd werd staan in tabel 8. Het bleek tijdens de proevenserie nodig te zijn om het meetplan te wijzigen. In eerste instantie was het de bedoeling om aparte staafjes voor metingen in het longitudinale en in het torsiegebied te nemen. Reden hiervoor was de wens om de verblijftijd van de staafjes in de hete oven te minimaliseren; de tijdwinst lag in de orde van 25%. Met de proeven LW2 en LW3 lukte het door problemen met de koppeldraden niet om LW1 te reproduceren bij de hoogste temperaturen.

Daarom werd besloten om de twee belangrijke golftypen voortaan in één proef te meten: het nadeel van de langere verblijftijd woog niet op tegen het voordeel van een efficiëntere werkwijze. Helaas begaven de koppeldraden het ook bij LW4 voortijdig, maar bij LW5 konden wel genoeg metingen verricht worden. Van het materiaal met een andere walsrichting werd slechts één proef uitgevoerd (EW1). Als laatste werden bij LW6 nog kamertemperatuurmetingen verricht met de daarvoor bestemde opstelling. Deze proeven hadden tot doel de invloed van de lengte van de koppeldraden te onderzoeken.

Tabel 8: Gebruikte meettemperaturen

Proef	Meettemperatuur longitudinaal (°C)
LW1	18, 400, 700, 800, 900
LW2	20, 400, 700
LW3	15, 700, 790
LW4	15, 400, 710
LW5	15, 220, 600, 710, 800, 900, 960
EW1	15, 100, 200, 300, 420, 520, 600, 670, 800, 900
LW6	15
Proef	Meettemperatuur torsie (°C)
LW1	18
LW2	20
LW3	
LW4	15, 400, 710
LW5	15, 220, 610, 710, 800, 900, 960
EW1	15, 100, 200, 290, 420, 530, 600, 670, 790, 900
LW6	15
Proef	Meettemperatuur transversaal (°C)
LW1	18
LW2	20
LW3	
LW4	
LW5	960
EW1	15
LW6	15

### 3.2.3 Waarnemingen bij verschillende temperaturen

Er werden veel meer staaft trillingen waargenomen dan theoretisch verwacht. Proef EW1 leverde bij kamertemperatuur meer dan vijftig meetpunten op, terwijl er hoogstens veertien eigentrillingen in het te meten frequentiegebied lagen. Omdat de numerieke weergave van alle waarnemingen niet zinvol werd geacht, laat appendix H alleen die van de meest complete serie EW1 zien. Een drietal figuren geven de gemeten frequenties als functie van de temperatuur grafisch weer; overigens zijn hierin de x- en y-assen verwisseld omwille van de duidelijkheid. Figuur 44 is een bundeling van de proeven LW1 t.e.m. LW5; resultaten van EW1 moesten apart gepresenteerd worden, voornamelijk vanwege de afwijkende staaftafmetingen. De verzameling meetpunten in figuur 44 geeft ruwweg de gescande gebieden weer rond de torsie en longitudinale grondtrilling. Gebieden met slechts enkele meetpunten erin werden veelal slechts in een enkele serie gescand of zelfs in het geheel niet; in het laatste geval betreft het een uit een hogere orde lissajousfiguur bepaalde frequentie. Op sommige plaatsen is een verhoogde concentratie meetpunten zichtbaar. Een verschuiving van deze groepen bij verhoging van de temperatuur valt niet waar te nemen. Van elke serie werden grafieken vervaardigd met een vergrote frequentie-as, teneinde de meeste meetpunten afzonderlijk waar te kunnen nemen. Voorbeelden hiervan zijn de figuren 45 en 46 van serie EW1. Ook al zijn hier bij veel temperaturen metingen verricht, het lukte niet om een bepaald temperatuurafhankelijk verschuivingspatroon te ontdekken. Om te zien of de signaalsterkten van de resonanties nadere informatie konden verstrekken, werden in elke grafiek de piekwaarden boven de meetpunten geplaatst. De piekwaarde was een grootte die met een getal van nul tot negen niet meer dan een ruwe maat voor de signaalsterkte was. De methode volgens welke de piekwaarde uit de gemeten signaalamplitude en de versterkerstanden van zender en ontvanger berekend werd, staat beschreven in bijlage I. Ook de vermelding van de signaalsterkte in de grafieken leidde niet tot het gewen-

ste resultaat: de ontdekking van een piekwaarde-patroon dat zich bij temperatuurverhoging naar lagere frequenties verplaatste. Wel werd een verlaging van de signaalsterkte bij hogere temperatuur zichtbaar.

### 3.2.4 Resultaten bij verschillende temperaturen

Toen bij eerste beschouwing van de waarnemingen geen verband tussen temperatuur en frequentie (en dus geluidsnelheid) naar voren kwam, werd besloten de beschikbare gegevens uit de literatuur te gebruiken als leidraad. Bijlage C geeft voor een aantal staalsoorten de relaties tussen de geluidsnelheden en de temperatuur. Hiervan zal naar verwachting de ongelegeerde staalsoort St34,II het meest lijken op het gebruikte proefmateriaal. Doordat alleen  $c_L$  als functie van  $T$  bekend was, moest het verloop van de transversale geluidsnelheid hieruit afgeleid worden. Daarvoor was het nodig het verloop van de poissonconstante met de temperatuur te kennen; noodgedwongen moest hiervoor van gegevens voor de staalsoort SAE 4340 gebruik worden gemaakt.

De meetpunten werden eerst en masse behandeld als zijnde longitudinale grondtrillingen en vervolgens als torsie grondtrillingen. Van elke meetserie konden zo twee grafieken gemaakt worden waarin de geluidsnelheid (resp.  $c_L$  en  $c_T$ ) als functie van de temperatuur was uitgezet. Door hierin de curven voor St34,II te projecteren werd gehoopt dat er een verband in de meetpunten zichtbaar zou worden. Deze aanpak bleek echter geen duidelijke resultaten op te leveren.

Doordat telkens een breed gebied rondom de twee verwachte grondtrillingen gescand was, leek het mogelijk te zijn om aanvullende informatie te verkrijgen uit de (toevallig) gemeten harmonischen. Vanwege het vele rekenwerk werd in eerste instantie alleen serie EW1 op deze wijze geanalyseerd. Uit de formules 24 t.e.m. 26 blijkt dat de geluidsnelheid recht evenredig is met de gemeten eigenfrequentie. Voor alle veertien eventueel optredende



eigentrillingen werd bij elke meettemperatuur de verhouding  $\alpha$  tussen  $c$  en  $f$  berekend (appendix J). Door nu de al eerder gebruikte geluidsnelheden van St34,II met de genoemde  $\alpha$ -quotiënten te vermenigvuldigen, ontstond een totaaloverzicht van de mogelijk optredende frequenties als functie van de temperatuur. De curven van deze trillingen werden samen met de meetresultaten in twee  $T(f)$ -grafieken geplaatst (fig. 47 en 48); de meetpunten worden hier met de piekwaarden van nul tot negen weergegeven. Uit deze figuren blijkt dat alle curven vaak door of vlak langs meetpunten lopen. Vanwege de grote hoeveelheid punten in deze gebieden kan hieruit natuurlijk niet de conclusie getrokken worden dat het geluidsnelheidsverloop van EW1 ongeveer gelijk is aan dat van St34,II. Uit het feit dat de samenstelling van de laatstgenoemde niet zeer veel afwijkt van het gebruikte Fe510 Nb, en na vergelijking van de eigenschappen van de verschillende staalsoorten in appendix C, kan met redelijke zekerheid gesteld worden dat de geluidsnelheidsafwijkingen van het proefmateriaal niet meer dan vier procent zullen bedragen.

Voor de berekening van  $c_L$  werden de volgende trillingstypen gebruikt: de eerste longitudinaal (grondtrilling), de derde transversaal A en de vierde en vijfde transversaal B. Bij de berekening van  $c_T$  werd de eerste en tweede torsietrilling gebruikt. Alle meetpunten tot 800 °C die minder dan vijf procent afweken van de verwachte frequenties van St34,II werden vervolgens geselecteerd. Met behulp van de reeds bepaalde verhoudingen tussen  $c$  en  $f$  werd voor alle genoemde punten de longitudinale of transversale geluidsnelheid berekend. De resultaten zijn te vinden in de figuren 49 en 50. Meetpunten die van de gezochte eigentrillingen afkomstig zijn, zullen naar verwachting meerdere malen ongeveer dezelfde geluidsnelheidswaarde opleveren; meetpunten van onbekende oorsprong zullen minder kans maken om op deze waarde terecht te komen. Concentraties meetpunten in de  $c(T)$ -figuren zullen dus mogelijk afkomstig kunnen zijn van de gezochte eigentrillingen en dienen als zodanig behandeld te worden. De op slechts twee golftypen gebaseerde  $c_T(T)$ -grafiek biedt te weinig

mogelijkheden voor clustering van de punten. Betere resultaten kunnen verwacht worden van de grafiek met de longitudinale geluidsnelheid. Toch werd het ook hiervoor wenselijk geacht om over meer meetpunten te beschikken. Uit een ander experiment was inmiddels duidelijk geworden dat er bij kamertemperatuur geen groot verschil tussen de  $c_L$  van de EW- en LW-serie bestond. Voorlopig werd aangenomen dat ze bij elke temperatuur overeenkomstige geluidsnelheids-eigenschappen bezaten. Deze aanname maakte het mogelijk om de resultaten van de EW-serie te combineren met die van de LW-series. Op de waarnemingen van LW1, LW4 en LW5 werden vervolgens de hiervoor beschreven bewerkingen uitgevoerd. In de figuren 51 t.e.m. 55 zijn de meetpunten van deze series weergegeven, samen met de verwachte eigenfrequenties voor St34,II. Uit deze figuren wordt duidelijk dat er hier helaas geen discriminatie tussen de twee torsietrillingen en andere resonanties mogelijk is. Wel kunnen er een zeventigtal punten aan de  $c_L(T)$ -grafiek toegevoegd worden (fig. 56); alle gevonden waarden zijn getabelleerd in appendix K. Uit de figuur komen een aantal concentraties van punten naar voren. Het is evenwel niet mogelijk om hier betrouwbare conclusies uit te trekken (zie ook 3.2.6).

### 3.2.5 Experimenten bij kamertemperatuur

Het onderzoek naar de mogelijke invloed van de koppeldraadlengte moest op de kamertemperaturopstelling van de Elastomat uitgevoerd worden. De temperatuur in de meetruimte varieerde overigens van 12°C tot 18°C. Naast de variatie van de lengte werd ook getracht om de invloed van de draadspanning te onderzoeken; dit bleek echter een moeilijk instelbare grootheid te zijn. Bij een 100 mm draadje kon tussen lichtgespannen en matiggespannen gekozen worden; een hogere belasting zou tot breuk van de las met de proefstaaf aanleiding geven. De kleinere draadjes konden door hun geringe flexibiliteit niet gelast worden; ze werden los tegen het proefstaafje aangedrukt. De proefomstandigheden staan in

onderstaande tabel beschreven. De lengte van de draadjes kon vijf procent afwijken van de vermelde waarden.

Tabel 10: Proefomstandigheden LW5

nr.	l (mm)	bevestiging	spanning	opmerkingen
1	100	gelast	licht	beperkt $f$ -gebied door losspringende las
2	100	gelast	licht	
3	100	gelast	matig	
4	50	los	niet	
5	20	los	niet	
6	250	gelast	niet	
7	250	gelast	matig	

In de meeste gevallen werd een frequentiegebied van ca. 0,6 kHz tot ca. 20 kHz doorlopen. De waarnemingen zijn in appendix L geplaatst. Hierin staan ook de waargenomen frequenties met een verhouding van twee en drie tussen de gemeten en werkelijke  $f$ -waarde. Deze meetpunten werden echter niet in de figuren 57, 58 en 59 geplaatst, omdat ze weinig waardevol bleken te zijn. In de genoemde figuren worden de waarnemingen in een drietal interessante frequentiegebieden getoond. Denk eraan dat voor de duidelijkheid de  $f$ -as van figuur 58 sterk is uitgerekt. Zoals gebruikelijk werden boven de punten weer de piekwaarden geplaatst. De verticale lijnen geven de verwachte eigenfrequenties weer op grond van de gemiddelde waarde voor de geluidsnelheid, berekend uit de longitudinale- en torsiegrondtrillingen ( $l_{long}$  en  $l_{tors}$ ). Bij deze proeven valt het geringe aantal meetpunten per serie op: gemiddeld twintig tegen ruim vijftig bij EW1. Dit hangt samen met de eveneens zeer afwijkende gemiddelde piekwaarde, die erg laag is. De kleine wijziging van de opstelling heeft blijkbaar een grote invloed. De onderzochte invloed van koppeldraadlengte dan wel draadspanning op de proef bleek vrijwel nihil te zijn. Bij de lange draad zonder spanning (nr. 6) werden wat meer trillingen genoteerd en bij de kleinste (nr. 5) wat minder dan gemiddeld.

Het lag voor de hand om uit de waarnemingen ook de geluid-snelheden te bepalen. Uit de eerste berekeningen bleek dat de d.m.v. longitudinale grondtrillingen bepaalde geluid-snelheid, sterk overeenkwam met de waarden uit de transversale trillingen. Daarom was het hier verantwoord om direct clusters te vormen uit punten die niet meer dan 0,5 procent van de genoemde gemiddelde  $c_L$  afweken. Met de keuze van de punten van de eerste torsietrilling lag het moeilijker, doordat deze met die van de vierde transversale-B-trilling samen leken te vallen. Na rijp beraad werd besloten om bij 8610 herz een scheiding te leggen tussen de punten van "1tors" en "4trans". In tabel 11 werden per golf-type en per golf-orde het aantal clusterpunten  $n$ , het cluster-gemiddelde  $\bar{c}$  en de standaarddeviatie  $s$  vermeld. Achter de overall-gemiddelden is de absolute afwijking hierin gegeven met een betrouwbaarheid van 95 procent. Er is sprake van twee uitschieters in de waarnemingen, te weten de tweede transversale-A-trilling en de tweede torsietrilling. De laatste doet een wat grotere waarde voor de afwijking in  $c_T$  vermoeden.

Tabel 11: Resultaten van clustermiddeling

golftype	n	$\bar{c}$ (m/s)	s (m/s)	
1long	8	5966,2	4,455	
1tranA	4	5965,6	0,000	
2tranA	5	5982,9	1,207	
3tranA	1	5965,7	0,000	
4tranA	4	5961,5	1,318	
5tranA	2	5964,0	0,177	
1tranB	5	5961,8	2,048	
2tranB	5	5959,8	1,319	
3tranB	5	5960,8	1,960	
5tranB	2	5969,0	1,646	
1tors	8	3249,7	0,500	
2tors	3	3241,9	0,469	
c-type	n	$\bar{c}$	s	$\Delta\bar{c}$
LONG	41	5965,8	2,487	0,8
TORS	11	3247,6	2,228	0,3

Een vergelijkend onderzoek met een ultrasoon wanddiktemeter moest uitwijzen wat het verschil in longitudinale geluidsnelheid tussen de LW- en EW-serie bij kamertemperatuur was. Het meetinstrument, een Panametrics 5223, was een gevoelige ultrasoon pulsgever, -ontvanger en -analysator. Door de instelling van het apparaat op de geluidsnelheid van het testmateriaal, kon na plaatsing van een bijbehorende U.S.-taster de wanddikte van het proefstuk digitaal afgelezen worden. Van de 25 mm plaat Fe510 Nb werden twee doorsneden gezaagd die vervolgens tweezijdig werden vlakgeslepen. Bij het plaatje EW1 kon zo de geluidsnelheid evenwijdig aan de walsrichting bepaald worden; ook bij het LW-proefstuk werd onderzoek verricht in de lengterichting van de gelijknamige elastomat-proefstaven. Met een zeer zuivere schroefmicrometer kon de werkelijke dikte, na middeling over 17 of 18 metingen, nauwkeurig bepaald worden. Vervolgens werd de U.S.-wanddiktemeter op een willekeurige geluidsnelheid ingesteld: voorwaarde was dat deze bij beide materialen gelijk was. De praktisch te behalen nauwkeurigheid lag een factor tien lager dan de fabrikant van het apparaat claimde. Dit werd veroorzaakt door variaties in de stand van de taster en de aandrukkracht ervan. De waarnemingen staan in de tabellen 12 en 13; de dikteverhouding tussen LW en EW wordt weergegeven door  $D_{L/E}$ . De dikteverhouding die uit de bepaling met de schroefmicrometer volgt is een gemiddelde waarde die met een 95%-betrouwbaarheidsinterval gepresenteerd wordt. De  $D_{L/E}$ -waarden uit de U.S.-metingen zijn uit de gemeten minima en maxima bepaald. De afwijking van de ultrasone  $D_{L/E}$ -meting met die van de micrometer geeft de afwijking van de geluidsnelheid van LW ten opzicht van EW weer. Deze blijkt tussen de grenzen -0,3 procent en +0,07 procent te liggen.

Tabel 12: Werkelijke diktemetingen met micrometer

Mate- riaal	n	$\bar{d}$ (mm)	s (mm)	$\Delta\bar{d}$ (mm)	$D_{L/E}$
LW	18	6,2788	0,00232	0,0012	1,0006
EW	17	6,2825	0,00175	0,0009	$\pm 0,0003$

Tabel 13: Relatieve diktemetingen met U.S.-meter

Mate- riaal	d min.	d max.	$D_{L/E}$ min.	$D_{L/E}$ max.
LW	6,275	6,286	0,998	1,001
EW	6,279	6,289		

### 3.2.6 Foutbespreking

Voor de bestudering van onnauwkeurigheden bij de berekening van  $c_L$  uit een longitudinale meting wordt uitgegaan van een gefingeerd meetpunt dat afkomstig is van de grondtrilling bij 15°C. In tabel 14 staan de afwijkingen in meetwaarden en benaderde gegevens vermeld; de hierin voorkomende  $C_\nu$  is als volgt gedefinieerd:

$$C_\nu = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \dots (28)$$

Tabel 14: Staaf EW1, trilling llong, 15°C

	waarde van grootheid	absolute afwijking	relatieve afwijking
f	16760 Hz	1 Hz	0,00006
l	155,45 mm	0,2 mm	0,0013
a	7,073 mm	0,01 mm	0,0014
b	5,081 mm	0,01 mm	0,0020
$\nu$	0,290	0,001	0,0035
$C_\nu$	1,145		0,0013
$K_1$	1,000216		0,0000

Uit formule (24) volgt voor de relatieve onnauwkeurigheid in  $c_L$ :

$$\left| \frac{\Delta c}{c} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{\Delta K_1}{K_1} \right| + \left| \frac{\Delta l}{l} \right| + \left| \frac{\Delta C_\nu}{C_\nu} \right| + \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \quad \dots (29)$$

$$= 0,0000 + 0,0013 + 0,0013 + 0,0001 = 0,0027$$

De lengte van de staaf werd met een oude schuifmaat van groot model gemeten. Het wordt niet uitgesloten geacht dat de werkelijke meetfout hoger ligt. De waarde voor  $\nu$  die uit de geluidsnheidsmetingen van proef LW6 volgt ( $c_L=5966$  m/s en  $c_T=3248$  m/s), bedraagt 0,289; door deze kennis kon de foutgrootte goed geschat worden. Het belang van een goede schatting van  $\nu$  blijkt uit het aandeel van de onnauwkeurigheid in  $C_\nu$  in de totale relatieve fout (bijna 50%).

Voor een beschouwing van een transversale golf werd een gefingeerd meetpunt uit de vierde transversale-B-serie gebruikt, nu bij verhoogde temperatuur (670°C). In tabel 15 staan weer de verschillende foutschattingen.

Tabel 15: Staaf EW1, trilling 4tranB, 670°C

	waarde van grootheid	absolute afwijking	relatieve afwijking
$f$	8255 Hz	1 Hz	0,0001
$l$	155,45 mm	0,2 mm	0,0013
$b$	5,081 mm	0,01 mm	0,0020
$\nu$	0,317	0,01	0,032
$C_\nu$	1,190		0,017
$K_{46}$	1,0727		0,0008

Uit (25) kan afgeleid worden:

$$\left| \frac{\Delta c}{c} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{\Delta K}{K_{46}} \right| + 2 \cdot \left| \frac{\Delta l}{l} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right| + \left| \frac{\Delta C_\nu}{C_\nu} \right| + \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \quad \dots (30)$$

$$= 0,0004 + 0,0026 + 0,0020 + 0,0170 + 0,0001 = 0,022$$

De onnauwkeurigheid is hier een factor acht groter dan bij de longitudinale grondtrilling bij 15°C. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de veel grotere onnauwkeurigheid in  $C_\nu$ . Na ver-

gelijking van de poissonwaarden van SAE 4340 en 52100 (appendix C; fig. C7) lijkt een schatting van de absolute afwijking van 0,01 in  $\nu$  voor Fe510 Nb toch wel op zijn plaats.

Tenslotte werd gekeken naar de onnauwkeurigheid in de torsie-grondtrilling bij kamertemperatuur.

Tabel 16: Staaf LW6, trilling 1tors, 15°C

	waarde van grootheid	absolute afwijking	relatieve afwijking
$f$	8600 Hz	1 Hz	0,0001
$l$	165,8 mm	0,2 mm	0,0012
$K_{\text{tors}}$	0,878	0,003	0,0034

Uit (26) volgt voor  $c_T$ :

$$\left| \frac{\Delta c}{c} \right| = \left| \frac{\Delta K}{K} \right| + \left| \frac{\Delta l}{l} \right| + \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \quad \dots (31)$$

$$= 0,0034 + 0,0012 + 0,0001 = 0,0047$$

De  $K_{\text{tors}}$ -waarde werd berekend uit een vierde-graads-polynoom-benadering. De afwijking hiervan met de werkelijke waarden was een goede maat voor de foutschatting.

In alle bovenstaande foutberekeningen is niet de invloed van de afwijking in de temperatuurmeting verwerkt. De temperatuur van de metingen boven kamertemperatuur werd per serie gemiddeld en op tien graden celcius afgerond. De werkelijke oventemperatuur schommelde meestal niet meer dan 10°C rond de gemiddelde waarde. Het thermokoppel in de opstelling mat de temperatuur in de dikke metalen wand rond het proefstaafje; de werkelijke staaftemperatuur zou systematisch lager kunnen liggen. Een temperatuurafwijking zal zich in de formules 24 t.e.m. 26 manifesteren in de grootheden  $\nu$  en  $f$ . Een afwijking van 10°C bij 670°C leidt tot een relatieve fout van 0,0030 in  $\nu$ ; de relatieve afwijking in  $C_p$  blijft beperkt tot 0,0016. Uit bestudering van de  $T, c_p$ -grafiek van St34, II (appendix C; fig. C5) volgt voor dezelfde omstandigheden een relatieve fout ter grootte van 0,0023; dit moet gelijk



zijn aan de afwijking in  $f$ . Aan de formules 29 en 30 kunnen dus twee termen toegevoegd worden:

$$\left| \frac{\Delta c}{c} \right| = \dots + \left| \frac{\Delta C_y(T)}{C_y(T)} \right| + \left| \frac{\Delta f(T)}{f(T)} \right| \quad \dots (32)$$

Bij 670°C geldt:  $\dots + 0,0016 + 0,0023$

Een meetfout in de temperatuur zal bij de torsietrilling alleen invloed op de frequentiebepaling hebben, zodat aan formule 31 slechts één term toegevoegd moet worden. Voor de numerieke waarde van de onnauwkeurigheid werd gekeken naar de  $T, c_T$ -curve van St34, II (appendix C; fig. C6).

$$\left| \frac{\Delta c}{c} \right| = \dots + \left| \frac{\Delta f(T)}{f(T)} \right| \quad \dots (33)$$

Bij 670°C geldt:  $\dots + 0,008$

De fout in de afmetingen is voor metingen aan één proefstaaf systematisch en de fout in  $K_F$ ,  $\nu$  en  $C_y$  is per temperatuurserie als systematisch te karakteriseren (dit geldt niet voor  $\Delta K_{TORS}$  die uitsluitend van de afmetingen afhankelijk is). De toevallige fout per temperatuurserie hangt dus alleen af van de onnauwkeurigheden in  $f$ ,  $f(T)$  en  $C_y(T)$ .

Tabel 17: Totale relatieve fout in staaf  
EW1 bij 15°C en bij 670°C

trilling	T (°C)	$\frac{\Delta c}{c}$	T (°C)	$\frac{\Delta c}{c}$
1long	15	0,0027	670	0,022
4tranB	15	0,0064	670	0,026
1tors	15	0,0047	670	0,012

Het blijkt dat boven kamertemperatuur de onnauwkeurigheid in de geluidsnelheid drie tot acht maal zo hoog wordt. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de onzekerheid in de poissonconstante; de toevallige afwijking van de staafteperatuur met 10°C was bij de torsietrilling de enige grond voor de toename van de fout-

grootte. In tabel 17 is geen rekening gehouden met een mogelijk systematisch te laag gemeten temperatuur. Het verdient bij vervollexperimenten zeker aanbeveling om aandacht te schenken aan de wijze van temperatuurmeting.

Een storende factor bij de elastomatproeven was het veelvuldig optreden van "spooktrillingen". Een verklaring hiervoor moet mogelijk gezocht worden in resonanties van de koppeldraden of van de ophanglussen bij de ovenopstelling. De koppeldraden variëerden in lengte van 12 tot 15 cm en in de ophanglussen kwamen vier lengten van elk ongeveer 4 cm voor. Welke trillingen verantwoordelijk zouden moeten zijn is niet duidelijk; in elk geval niet die van het longitudinale type, want de hieruit resulterende frequenties zijn te hoog voor het meetgebied.

Bij de samenvoeging van de geluidsnelheidspunten in figuur 56 was de verwachting dat de spookresonanties min of meer willekeurig verdeeld waren en dat de gezochte meetpunten in een cluster van beperkte omvang zouden zitten. Toen dit niet duidelijk zichtbaar werd in de figuur kwam de vraag naar voren hoe groot een dergelijk cluster zou kunnen zijn. Een antwoord hierop kan gevonden worden door te onderzoeken welk deel van de relatieve fout in tabel 17 als toevallig bestempeld kan worden. Dat blijken alle in het voorgaande opgesomde fouten te zijn, met uitzondering van die in de constante van Poisson; de afwijking hierin is per temperatuurserie als systematisch te karakteriseren. De toevallige relatieve fout bij 670°C bedraagt 0,5% voor 1long en 0,9% voor 4tranB. De afwijking van de punten zal dus bijna één procent schommelen rond de juiste waarde. De grootte van deze zone verklaart waarom er geen duidelijke puntenoepening plaatsvond in figuur 56. In de toevallige relatieve fout van de longitudinale geluidsnelheid is een grote bijdrage afkomstig van de onzekerheid in de temperatuurmeting, te weten 0,4 procent. Het bovenstaande geldt niet voor de transversale geluidsnelheid die uit de torsietrilling berekend moet worden. In de hierbij behorende toevallige relatieve fout van 1,2% zit een

bijdrage van 0,8% ten gevolge van de meetonnauwkeurigheid in de staaftemperatuur.

## 4 DISCUSSIE EN CONCLUSIE

### 4.1 Discussie

#### 4.1.1 Lasbadonderzoek

Door de verrichte inleidende experimenten met transversale golven werd aannemelijk gemaakt dat detectie van de lasbadwand mogelijk was onder een aanstralhoek van  $45^\circ$ . Met longitudinale golven werd de lasbadwand niet gevonden bij het aanstralen tussen  $29^\circ$  en  $55^\circ$ . Dit werd gedeeltelijk veroorzaakt door de onverwacht ongunstige experimentele condities die bleken te heersen bij hoeken rond de  $45^\circ$ . Bij het gebruik van kleinere aanstralhoeken zou de discriminatie tussen verschillende reflectiebronnen beter zijn geweest, terwijl bij grotere hoeken de weerkaatsing van het lasbadoppervlak misschien een kleinere omvang zou hebben gehad. Opmerkelijk was de ontdekking van mogelijke reflecties tegen de overgang vloeibaar/vast staal in het lasbad. Hierbij zou dan een focuserende werking van de lasbadgeometrie een rol moeten spelen.

Al werden sommige fasenovergangen dan gedetecteerd, nauwkeurig gelocaliseerd werden ze niet. Vertaling van de gemeten virtuele afstanden naar reële behoeft een nauwkeuriger transit-time-delay-model en meer zekerheid omtrent de aard van de reflectiebron.

Door de hoge versterking werd bij proeven met de rechte taster veel hinder ondervonden van reflecties tegen de walshuid. Daardoor moest van een maximale ruisonderdrukking gebruik worden gemaakt, waardoor mogelijk lasbadwandreflecties werden weggedrukt.

Met de gebruikte fotografische opnametechniek van het scoopbeeld werd het experiment steekproefgewijs vastgelegd. Omdat sommige waarnemingen zich gedurende korte tijd voordeden, was het jammer dat er niet meer opnamen van elke lasproef voorhanden

waren. De lasbadpieken konden langs fotografische weg niet scherp worden vastgelegd door hun sterk variërende amplitude.

Vertaling van de resultaten van dit oriënterende onderzoek naar dat voor de ontwikkeling van een sensor voor een lasrobot is in dit stadium niet mogelijk. De proefomstandigheden verschillen teveel voor een zorgvuldige vergelijking. Zo zal voor gebruik op een dunne plaat misschien met een ander golfstype (bijvoorbeeld oppervlaktegolven) gewerkt moeten worden. In elk geval zullen er andere soorten transducers toegepast moeten worden, die beter bestand zijn tegen hogere temperaturen. Voor sensortoepassing moet het gereflecteerde signaal in elk geval een duidelijk te onderscheiden piek te zien geven en een zekere continuïteit vertonen. Met het laatste wordt bedoeld dat minimaal twee maal per seconde een betrouwbare waarde van de lasbadgeometrie verkregen moet worden, teneinde toegepast te kunnen worden bij snel werkende lasrobots.

#### 4.1.2 Geluidsnelheidsonderzoek

Het geluidsnelheidsonderzoek vereiste een grote tijdinvestering, zowel op het gebied van experimenteel onderzoek als in het vlak van de verwerking van meetgegevens. Ondanks deze inspanning kon het verloop van de longitudinale en transversale geluidsnelheden in Fe510 Nb niet bepaald worden. De oorzaak hiervan moet in eerste instantie gezocht worden in het optreden van een groot aantal "spookresonanties". Er werd getracht om door samenvoeging van verschillende meetresultaten te zorgen voor een duidelijke opeenhoping van meetpunten. De zone waarin de gezochte geluidsnelheidswaarden zich konden bevinden was echter te groot: bijna twee procent van de meetwaarde. Bij exacte meting van de staaftemperatuur zou de grootte van deze zone tot ongeveer één procent teruggebracht kunnen worden. Naast het verbeteren van de temperatuurbepaling verdient het aanbeveling om d.m.v. andere proefnemingen of literatuuronderzoek een betere verband voor de

temperatuurafhankelijkheid van de constante van Poisson te vinden.

Uit elastomatproeven bij kamertemperatuur aan een LW-staafje werd voor de longitudinale geluidsnelheid 5966 m/s en voor de transversale geluidsnelheid 3248 m/s gevonden. Deze waarden wijken respectievelijk 0,8 procent en -0,2 procent af van de literatuurwaarden voor Fe510. Deze serie metingen bij kamertemperatuur geeft ook aan dat de invloed van de koppeldraden op de frequentiemeting nihil was. Wel vormden zij samen met de ophangdraadjes van de proefstaaf een mogelijke bron van "spookresonanties".

Verschilmetingen met een ultrasoon-wanddiktemeter gaven aan dat de longitudinale geluidsnelheid in het proefmateriaal weinig richtingafhankelijk was. De afwijking van de longitudinale geluidsnelheid van LW ten opzichte van EW ligt tussen de grenzen -0,3 procent en +0,1 procent.

#### 4.2 Conclusie

Uit een onderzoek met een oriënterend karakter kwam naar voren dat de lasbadwand onder  $45^\circ$  met transversale geluidspulsen detecteerbaar was. Het werken met longitudinale golven in dezelfde omstandigheden leidde tot een overmaat aan reflectiepieken afkomstig van het lasbadoppervlak en mogelijk van de overgangen vast/vloeibaar en vloeibaar/vast staal. Een goede positiebepaling van de reflectiebronnen was nog niet mogelijk, een eerste aanzet hiertoe werd gegeven door de ontwikkeling van een eenvoudig transit-time-delay-model. De kloof tussen de huidige proefnemingen en de productie van een betrouwbare U.S.-sensor voor een lasrobot lijkt nog erg groot.

Het geluidsnelheidsonderzoek leverde geen verband op tussen de longitudinale en transversale geluidsnelheden van Fe510 Nb als functie van de temperatuur. De oorzaak moet gezocht worden in het optreden van "spookresonanties"; deze konden ook door middel van rekentechnieken niet uitgezeefd worden doordat de meetonnauwkeurigheid hiervoor te hoog was.

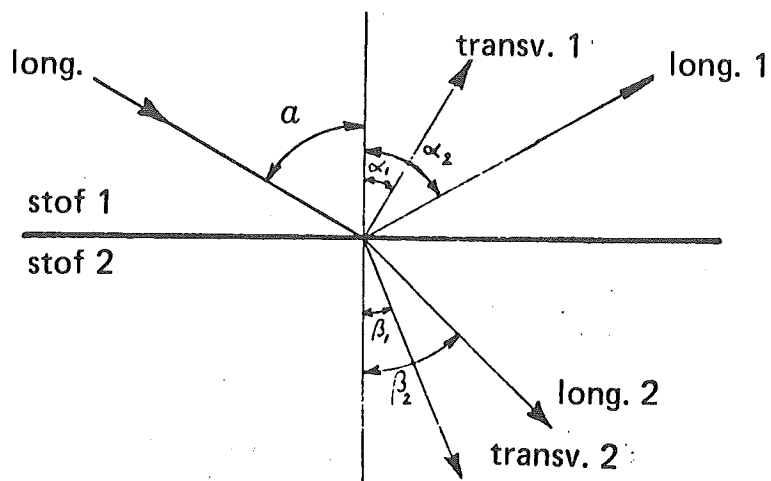
## Literatuur

- [1] K.M. Broek, W.J.P. Vink en G. den Ouden  
Sensoren voor lasrobots  
Lastechniek 52 (1986), 12-15
- [2] W.J.P. Vink en N.H.R. Versluis  
Niet-destructief onderzoek  
2<sup>e</sup>-druk, D.U.M. Delft, 1985
- [3] T.W. Eagar en N.-S. Tsai  
Temperature Fields Produced by  
Traveling Distributed Heat Sources  
Welding Research Supplement (1983), 346s-355s
- [4] S.I. Rokhlin, R.J. Mayhan en L. Adler  
On-line Ultrasonic Lamb Wave Monitoring of Spot Welds  
Materials Evaluation 43 (1985), 879-883
- [5] Quantitative Zusammenhänge zur Auswertung  
der Messergebnisse des Elastomaten  
Institut Dr. Förster, Reutlingen, West-Duitsland
- [6] L.A. Lott  
Ultrasonic Detection of Molten/Solid Interfaces  
of Weld Pools  
Materials Evaluation 42 (1984), 337-341
- [7] J. Krautkrämer en H. Krautkrämer  
Werkstoffprüfung mit Ultraschall  
3<sup>e</sup>-druk, Springer-Verlag Berlijn Heidelberg New York, 1975
- [8] W. Kurz en B. Lux  
Lokalisierung der Erstarrungsfront beim  
Stranggießen von Stahl  
Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 114 (     ), 123-130
- [9] E.P. Papadakis, L.C. Lynnworth, K.A. Fowler en  
E.H. Carnevale  
Ultrasonic Attenuation and Velocity in Hot Specimens by the  
Momentary Contact Method with Pressure Coupling, and Some  
Results on Steel to 1200°C  
J. Acoust. Soc. Am. 52 (1972), 850-857

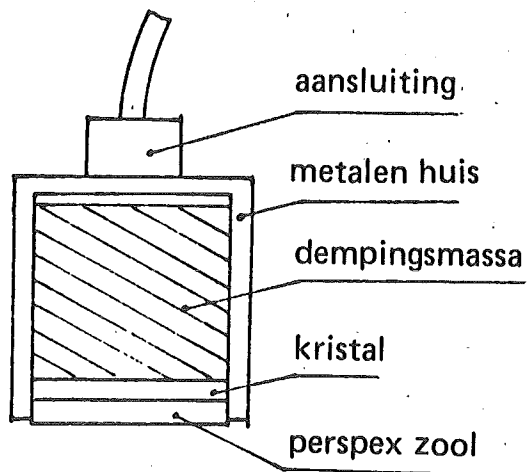


- [10] L.C. Lynnworth en E.H. Carnevale  
Ultrasonics at Elevated Temperatures  
5<sup>e</sup>n Int. Conf. on NDT, Canada 1967
- [11] E.H. Carnevale, L.C. Lynnworth en G.S. Larson  
Ultrasonic Measurement of Elastic Moduli at Elevated  
Temperatures, using Momentary Contact  
J. Acoust. Soc. Am. 36 (1964), 1678-1684
- [12] C.J. Smithells  
Metals Reference Book  
5<sup>e</sup>-druk, Butterworths, London & Boston

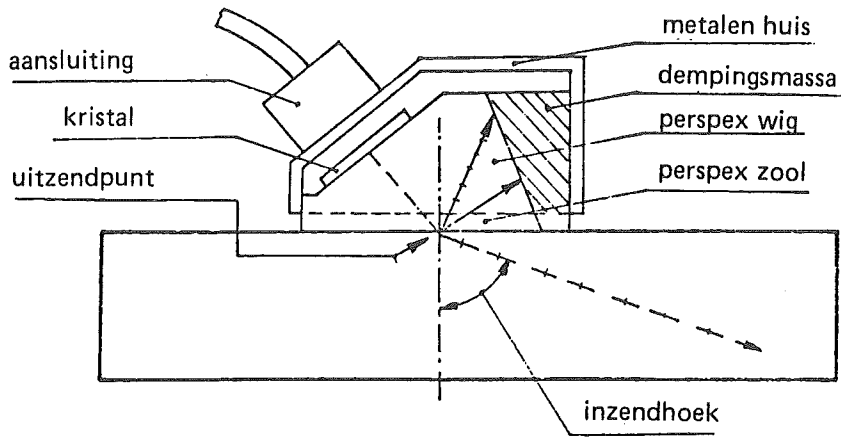
FIGUREN



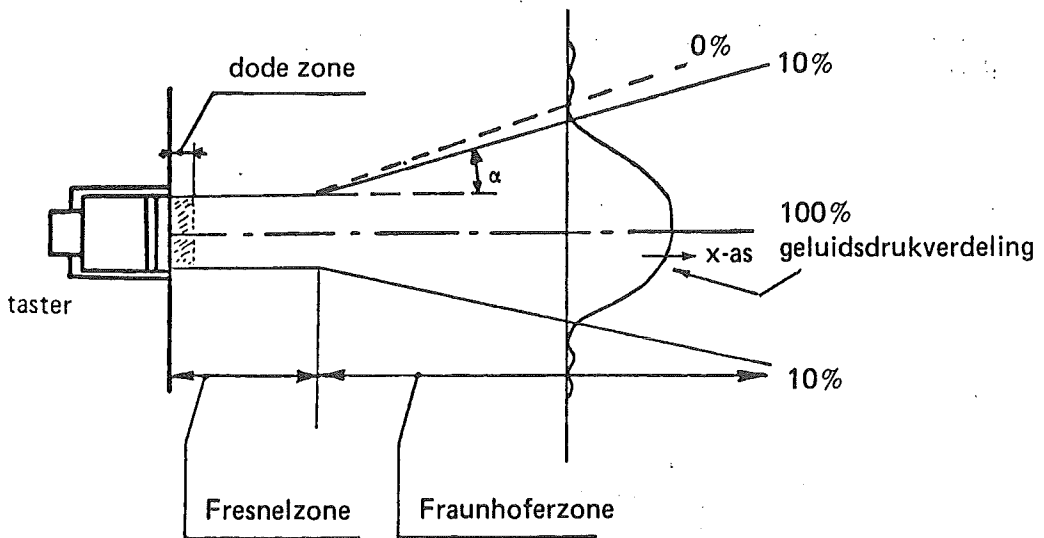
Figuur 1: Inval van een longitudinale golf onder een hoek  $\alpha$  (Vink en Versluis [2]).



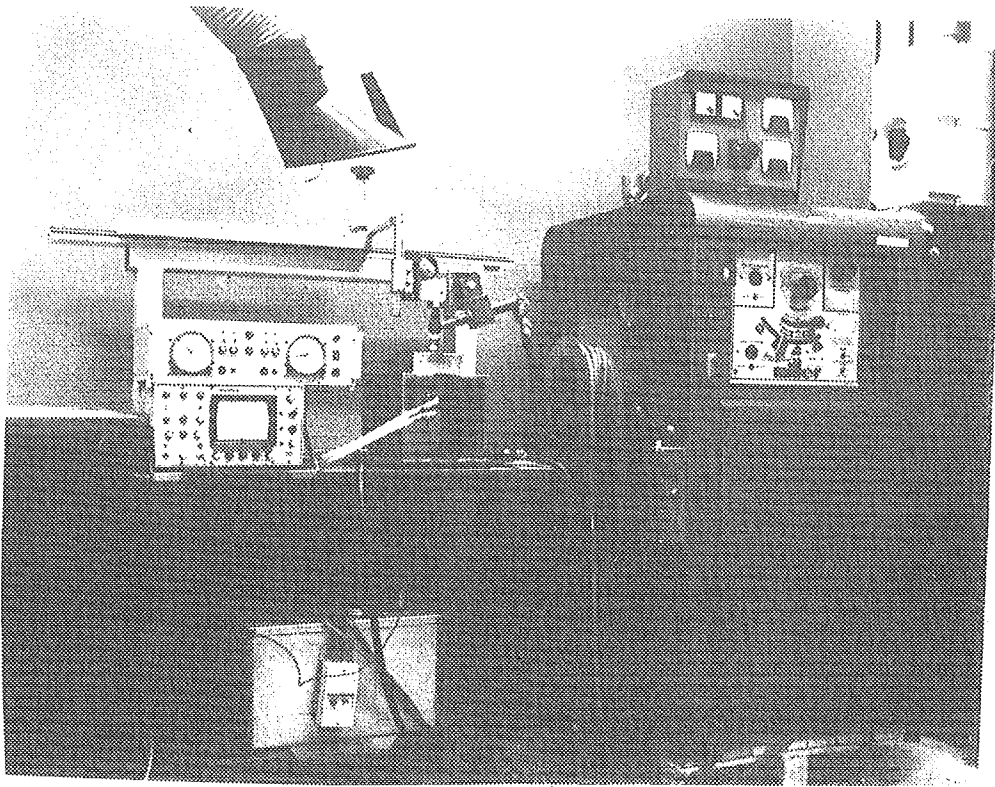
Figuur 2: Voorbeeld van een rechte U.S.-taster (Vink en Versluis [2]).



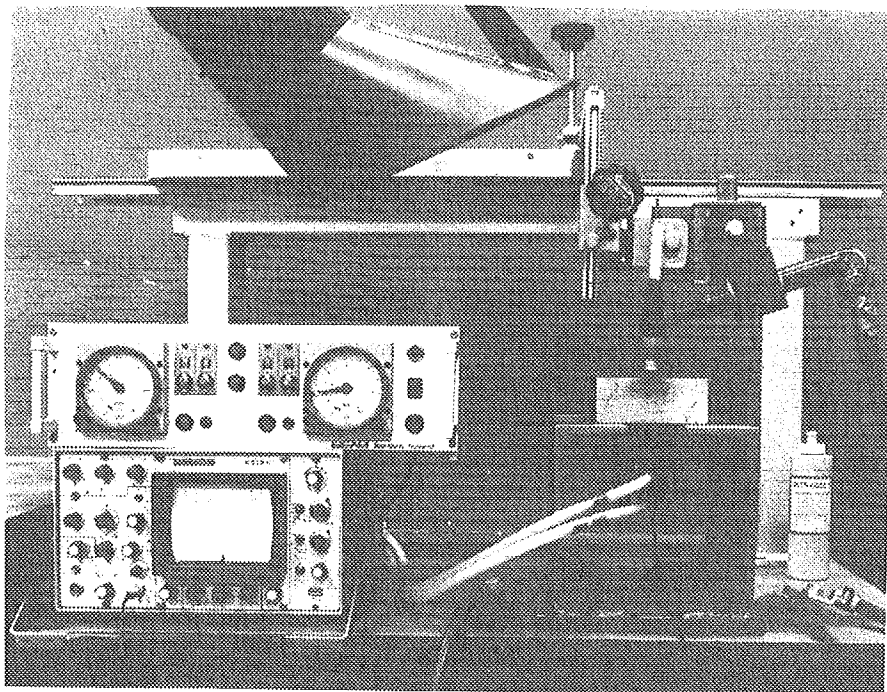
Figuur 3: Voorbeeld van een hoektaster (Vink en Versluis [21]).



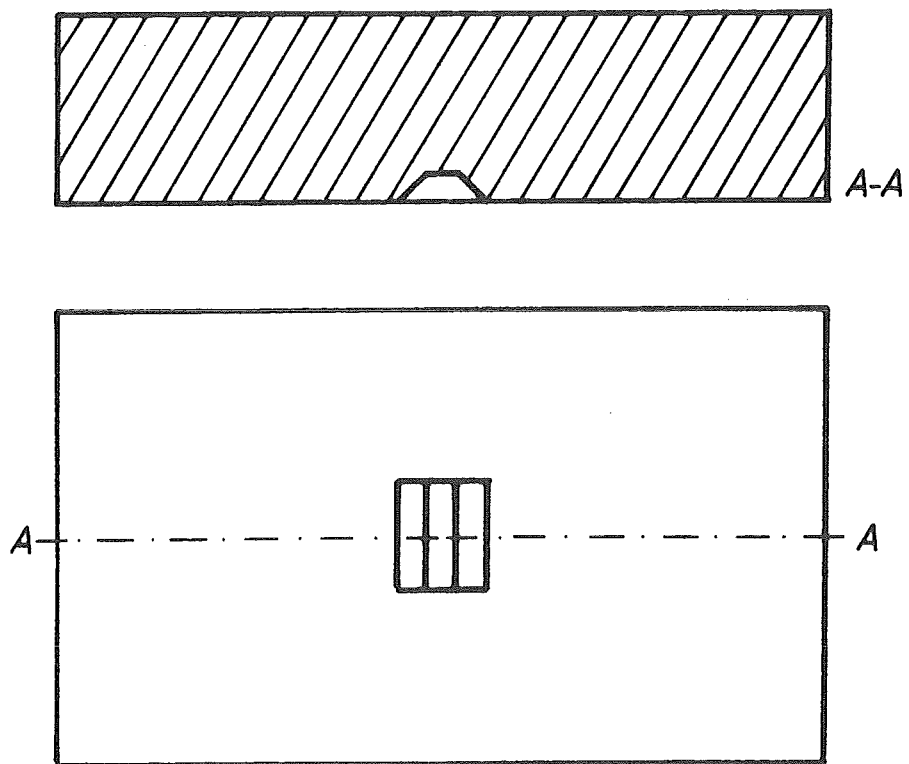
Figuur 4: Bundelkarakteristiek van rechte taster (Vink en Versluis [21]).



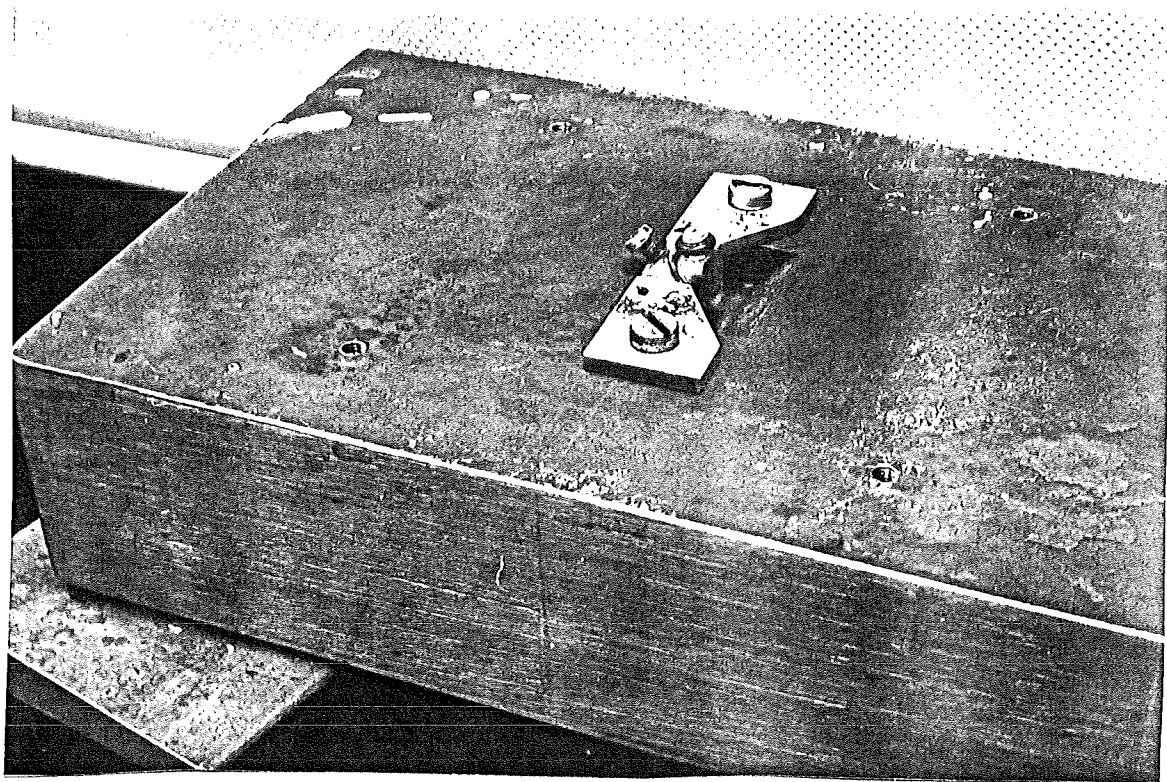
Figuur 5: Meetopstelling van het lasbadonderzoek. Links staat de werktafel met het proefstuk en het U.S.-apparaat, rechts is de lastrafo zichtbaar.



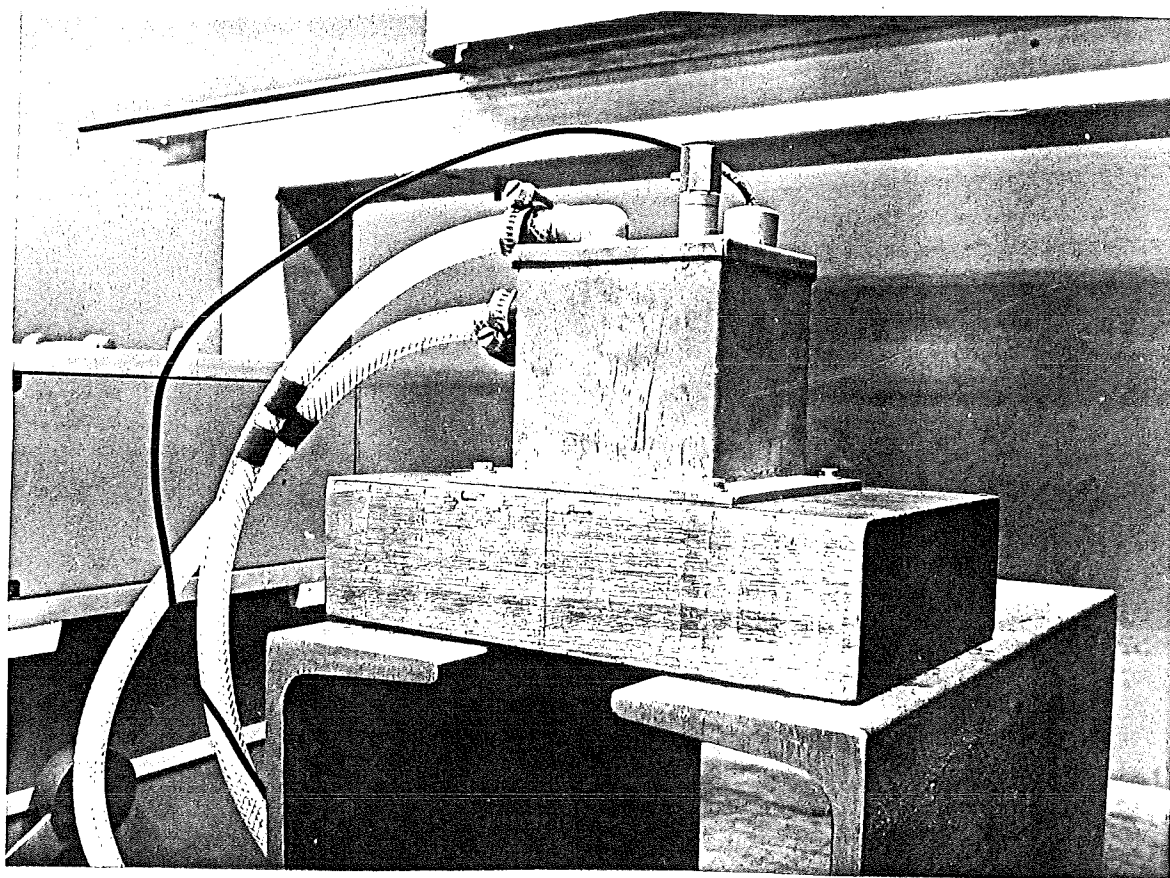
Figuur 6: Detail van de meetopstelling. Het U.S.-apparaat staat links en de timer voor het fototoestel bevindt zich erop. Rechts hangt de lastoorts en daaronder ligt het proefstuk met aangekoppeld waterhuis.



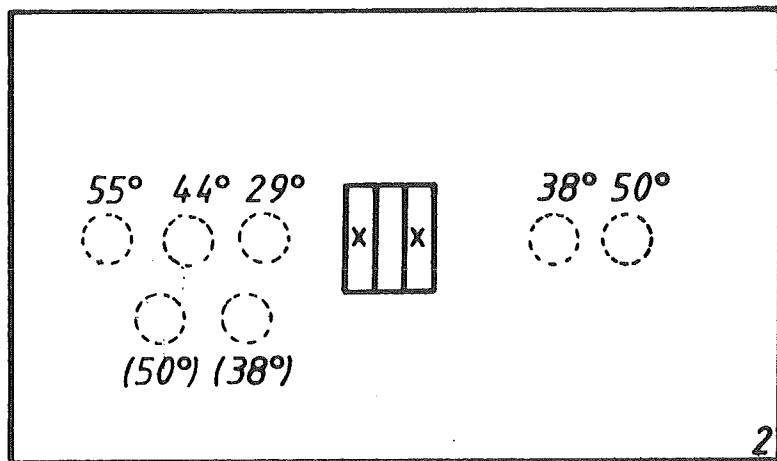
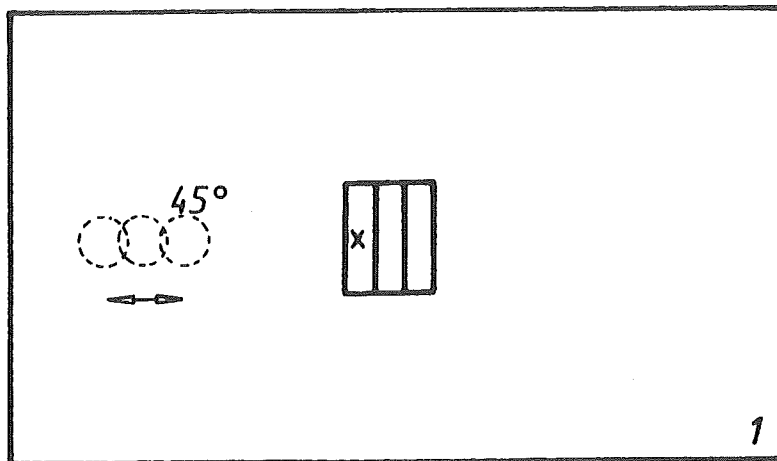
Figuur 7: Doorsnede en onderzijde van de proefblokken Fe510 Nb.



Figuur 8: De bevestiging van de rechte microtaster aan de plaat-  
onderkant. De taster bevindt zich in het midden van het  
messing juk.

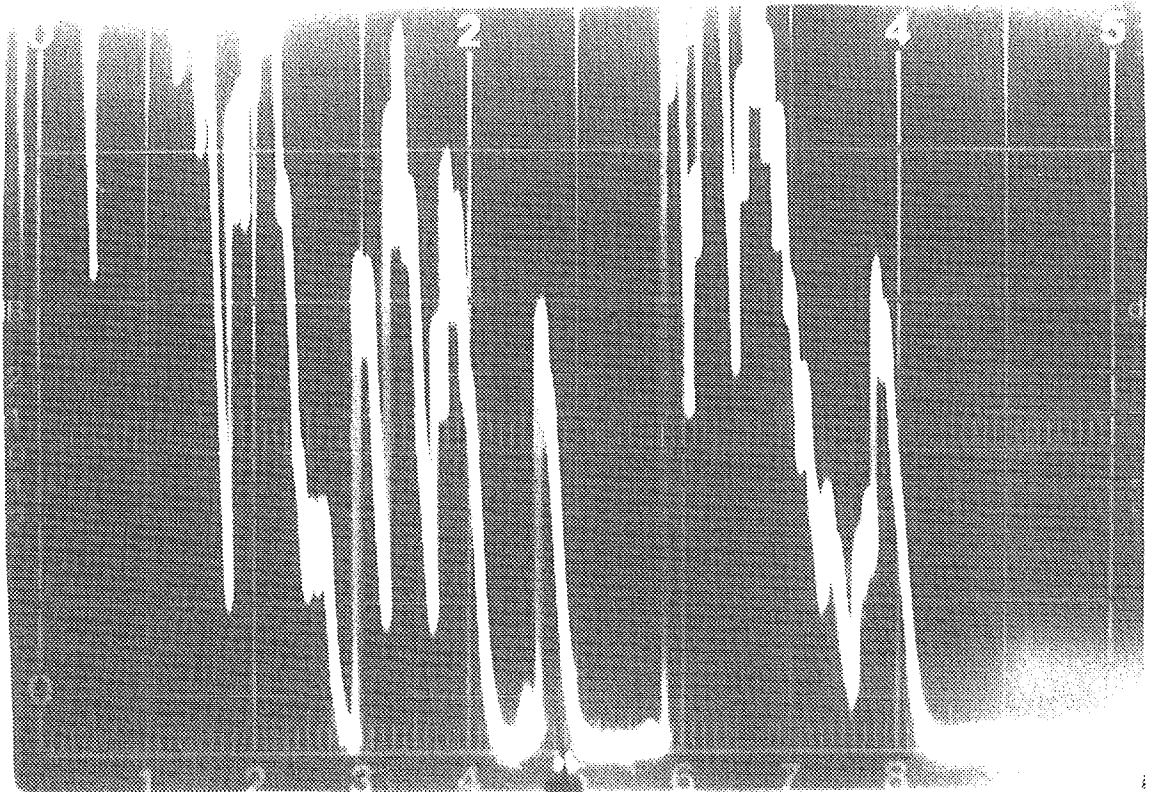


Figuur 9: Het waterhuis werd over de taster gemonteerd. Vullen  
met water gebeurde in de getoonde positie.



Figuur 10: Onderzijde van de proefblokken Fe510 Nb. In de figuur zijn de smeltbadposities aan de bovenzijde geschetst, ondervermelding van de aanstraalhoek. De tasterposities zijn met een x gemerkt.

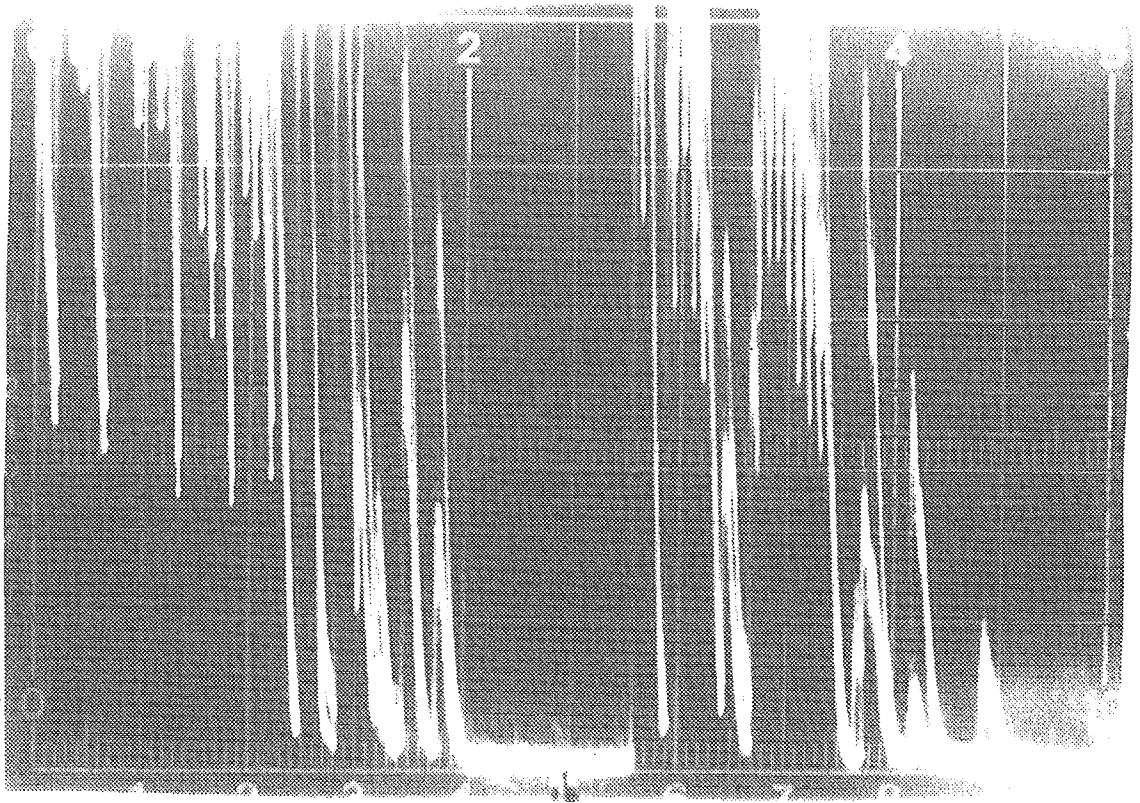




Figuur 11:

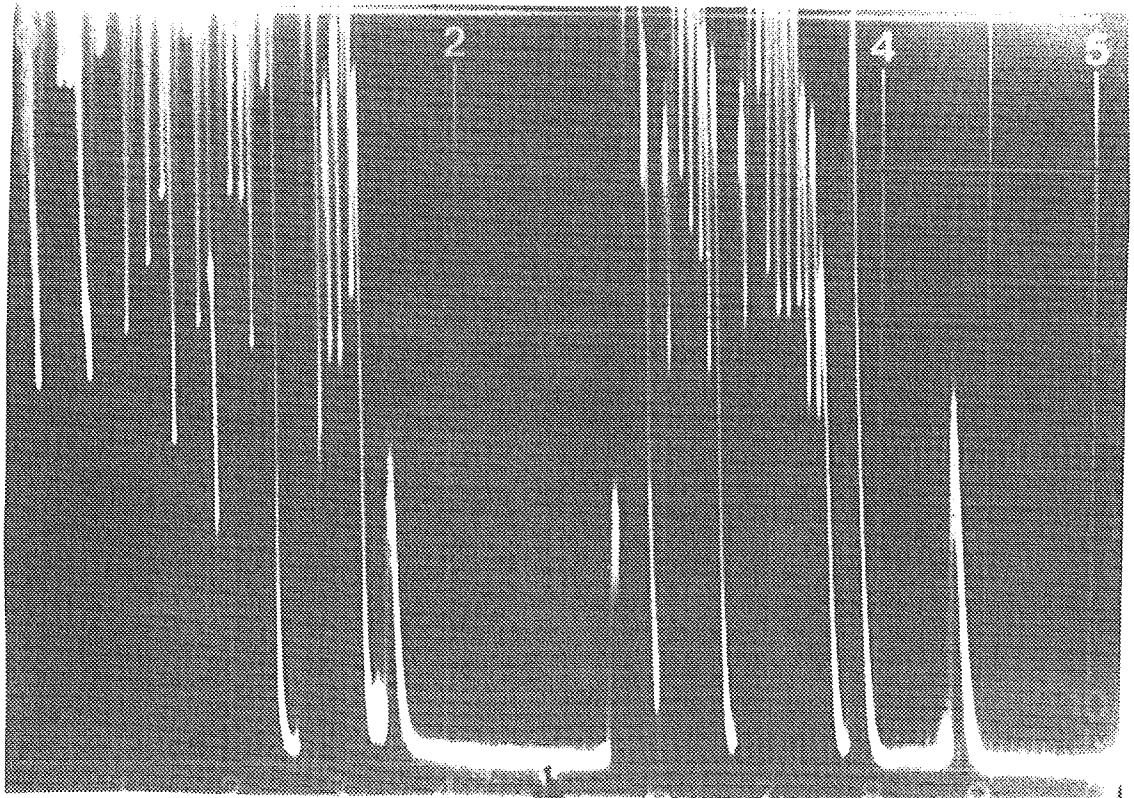
Tot en met fig. 28 worden foto's van het beeldscherm getoond; de schaal van de x-as loopt van 0 tot 100 mm (bij kamertemperatuur).

De opname in deze figuur laat het piekpatroon vóór het lassen zien bij proef 1.1 ( $45^\circ$ ); bij deze proef was een indicatieputje in de plaat aangebracht. De reflectie-piek hiervan werd op ongeveer 63 mm verwacht; zichtbaar is een piekzone van 59 mm tot 78 mm. De dode zone van de taster bedraagt ca. 40 mm.



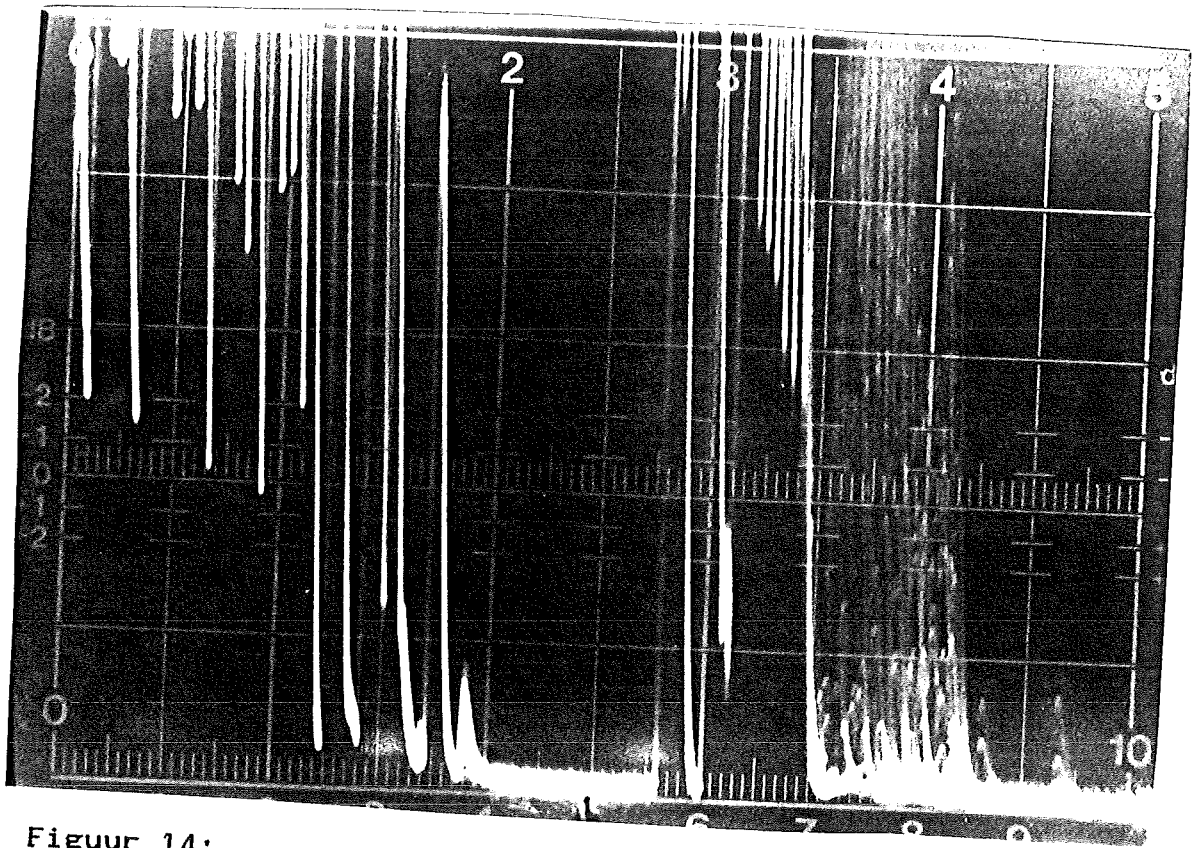
Figuur 12:

Opname vóór de start van het lasproces bij proef 2.8 (50°). De waarschijnlijk van de walshuid afkomstige reflectiezone loopt van 56 mm tot ca. 88 mm.



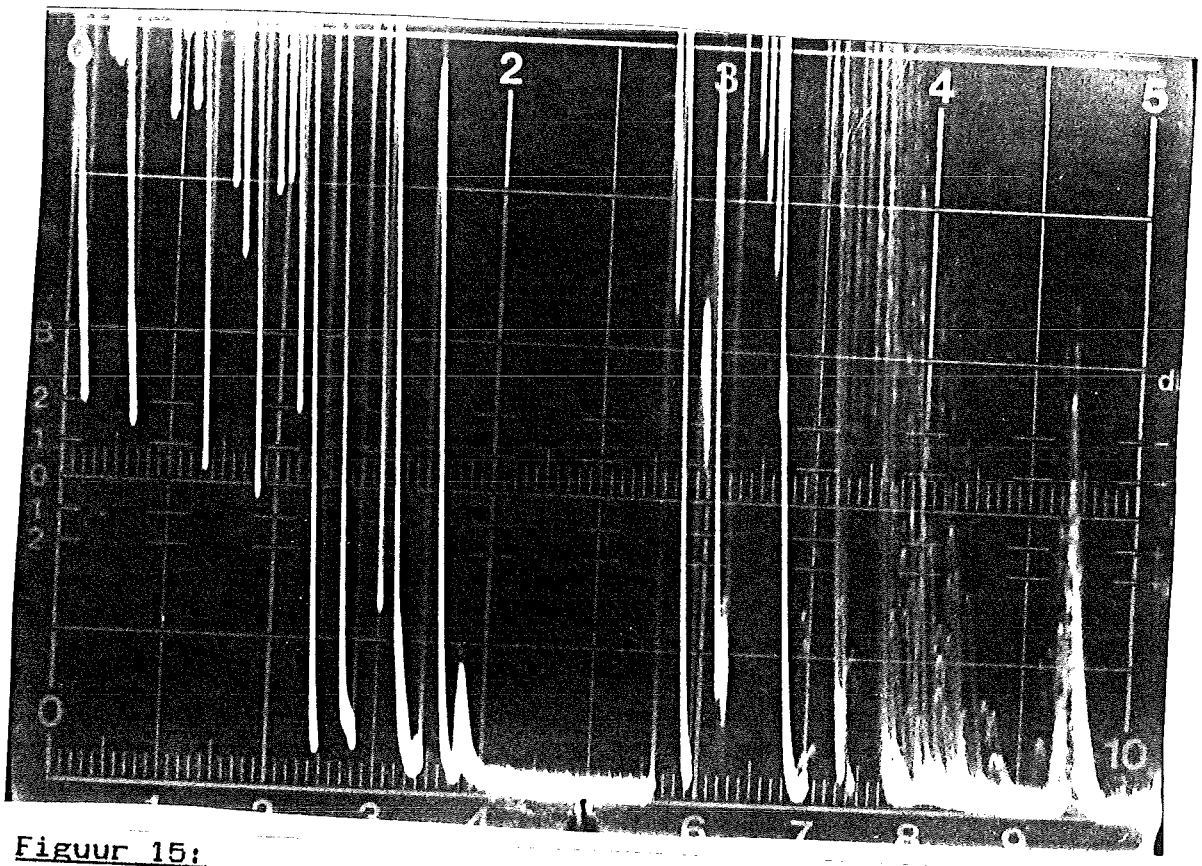
Figuur 13:

Na afloop van proef 2.8 en na afkoeling van de plaat ontstond het bovenstaande piekpatroon, dat veel overeenkomst vertoont met dat van figuur 12.



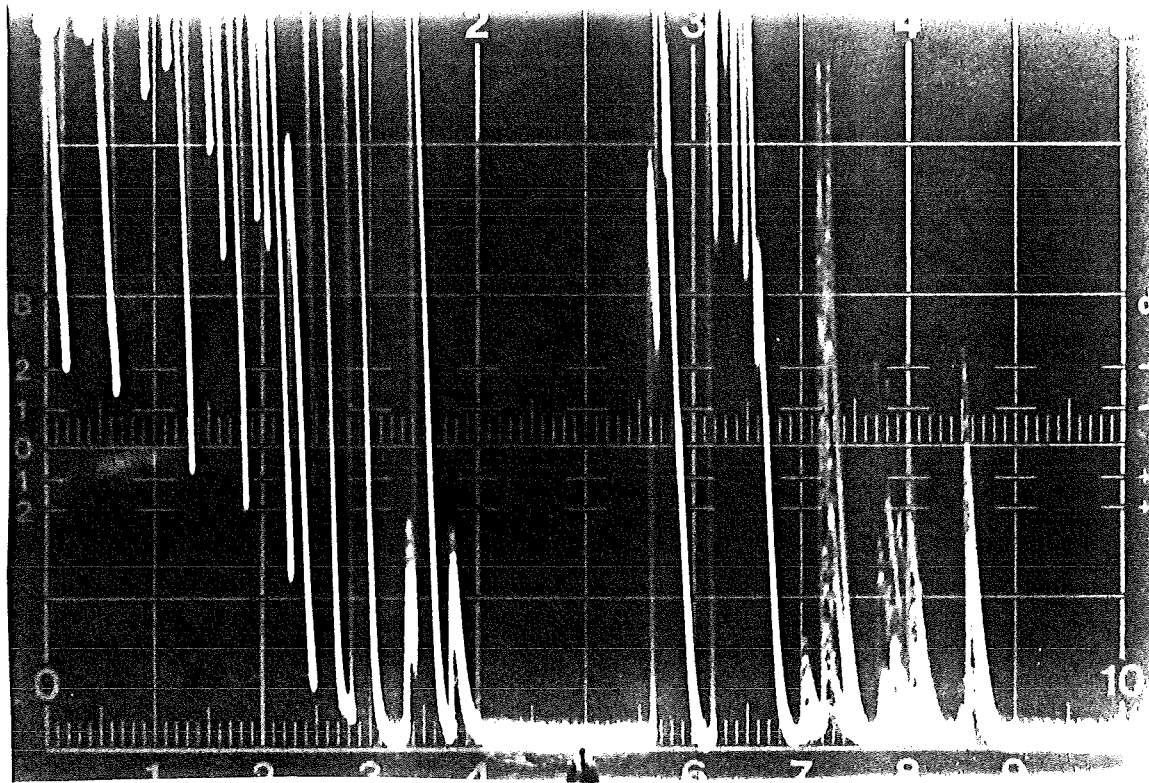
Figuur 14:

Proef 2.8 ( $50^\circ$ ) na een lastijd van 15 sec. De sterk fluctuerende zone begint op ca. 70 mm.



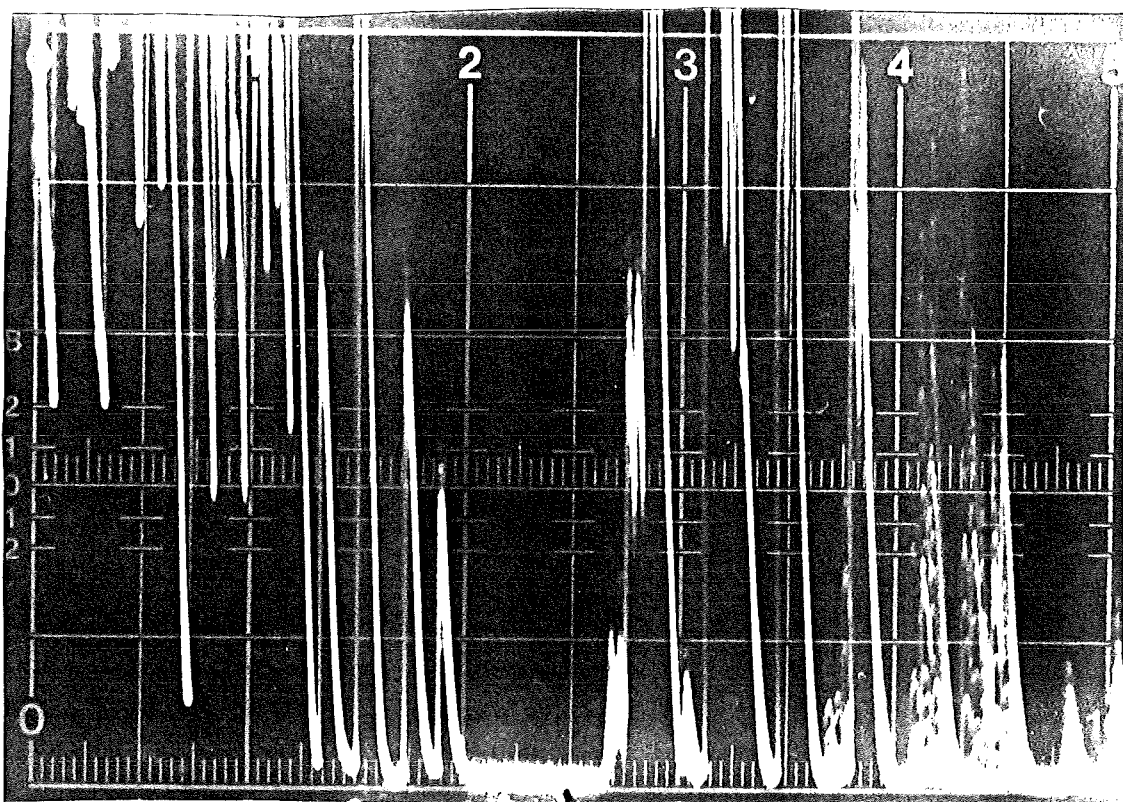
Figuur 15:

Proef 2.8 ( $50^\circ$ ) na een lastijd van 25 sec.



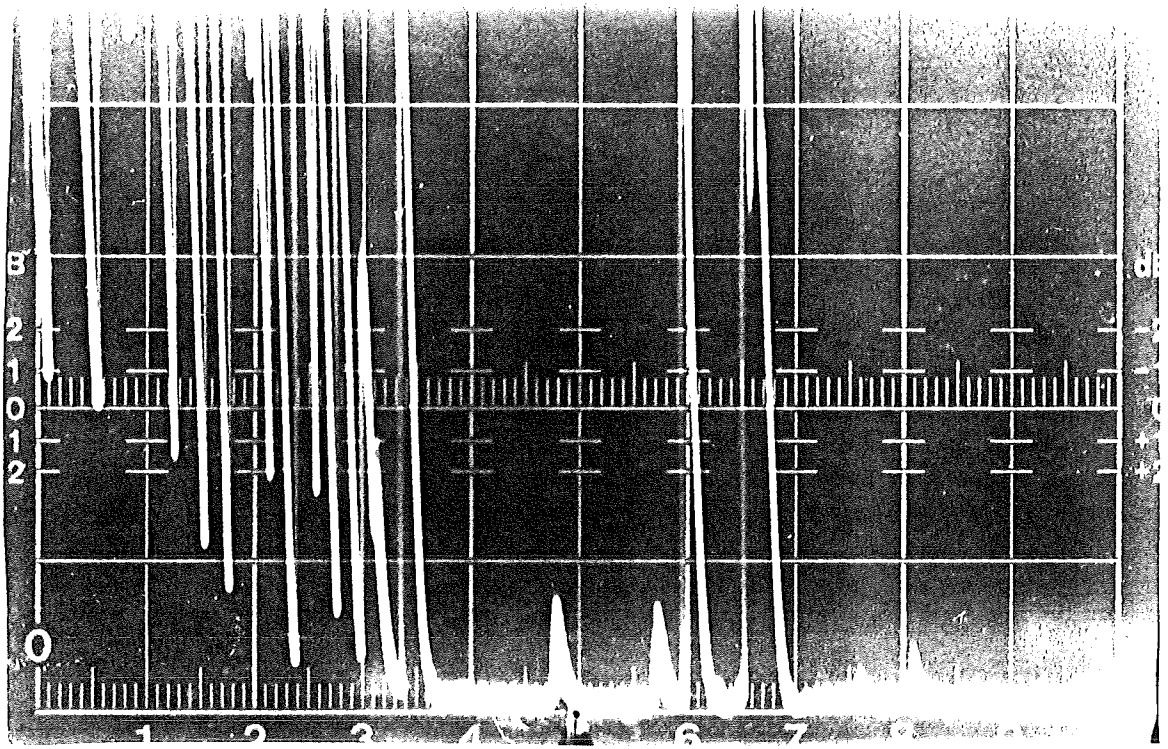
Figuur 16:

Proef 2.8 (50°) na een lastijd van 65 sec; de fluctuerende zone is in een drietal gedeelten opgesplitst.



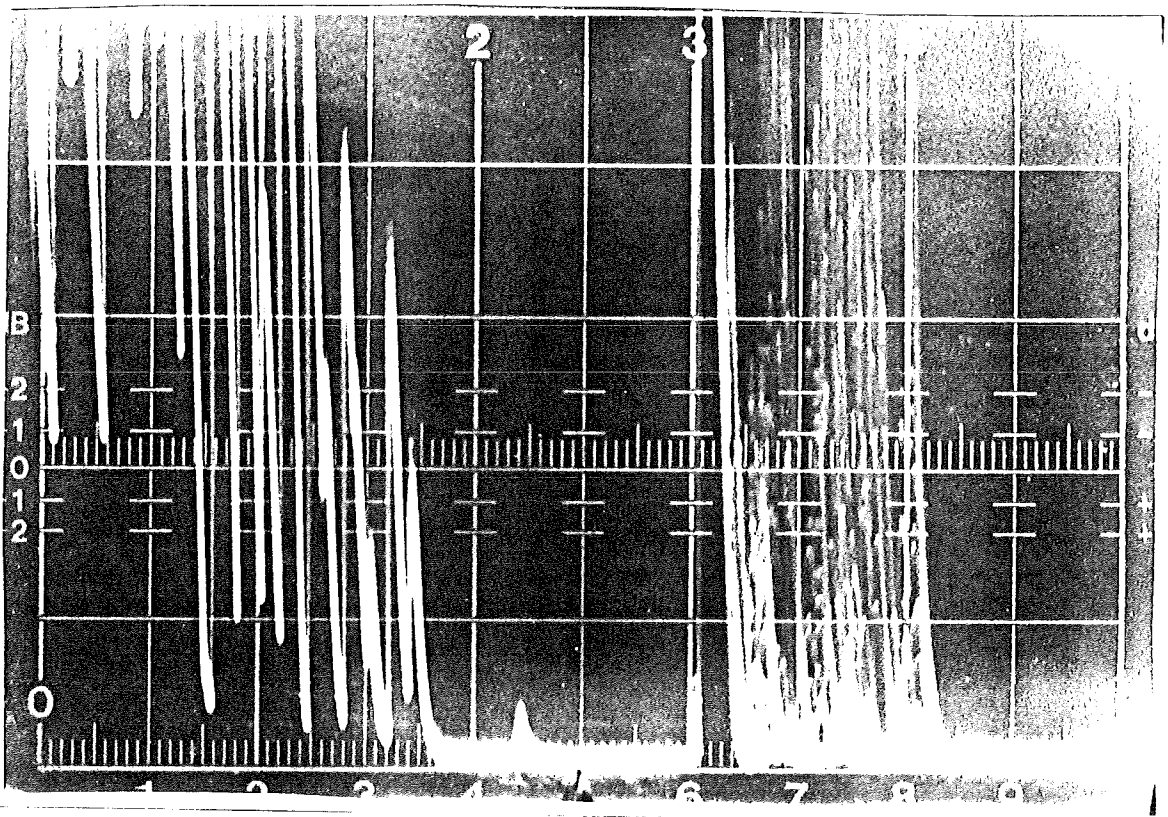
Figuur 17:

Proef 2.8 (50°) na een lastijd van vijf minuten.



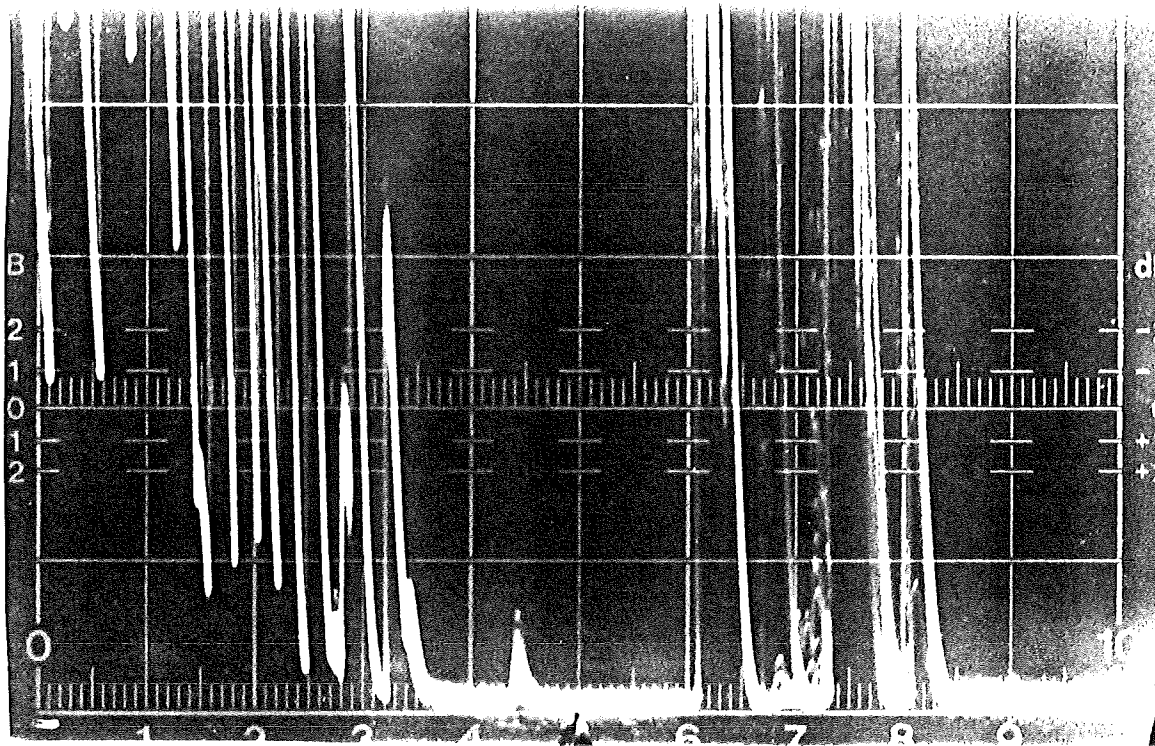
**Figuur 18:**

Proef 1.4 vóór het lassen



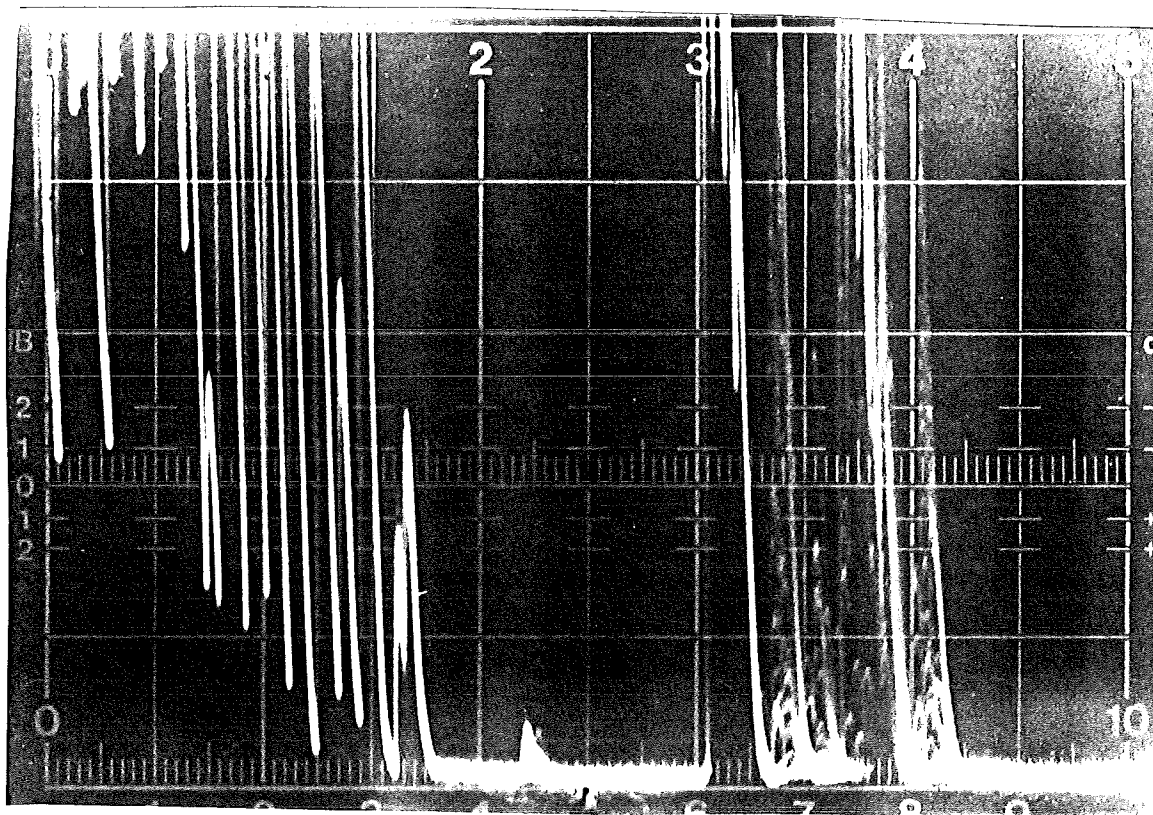
**Figuur 19:**

Proef 1.4 na een lastijd van 80 sec. Het begin van een fluctuerende zone ligt op ongeveer 65 mm. De aanstralhoek van het lasbadmidden bedraagt ongeveer 45°.



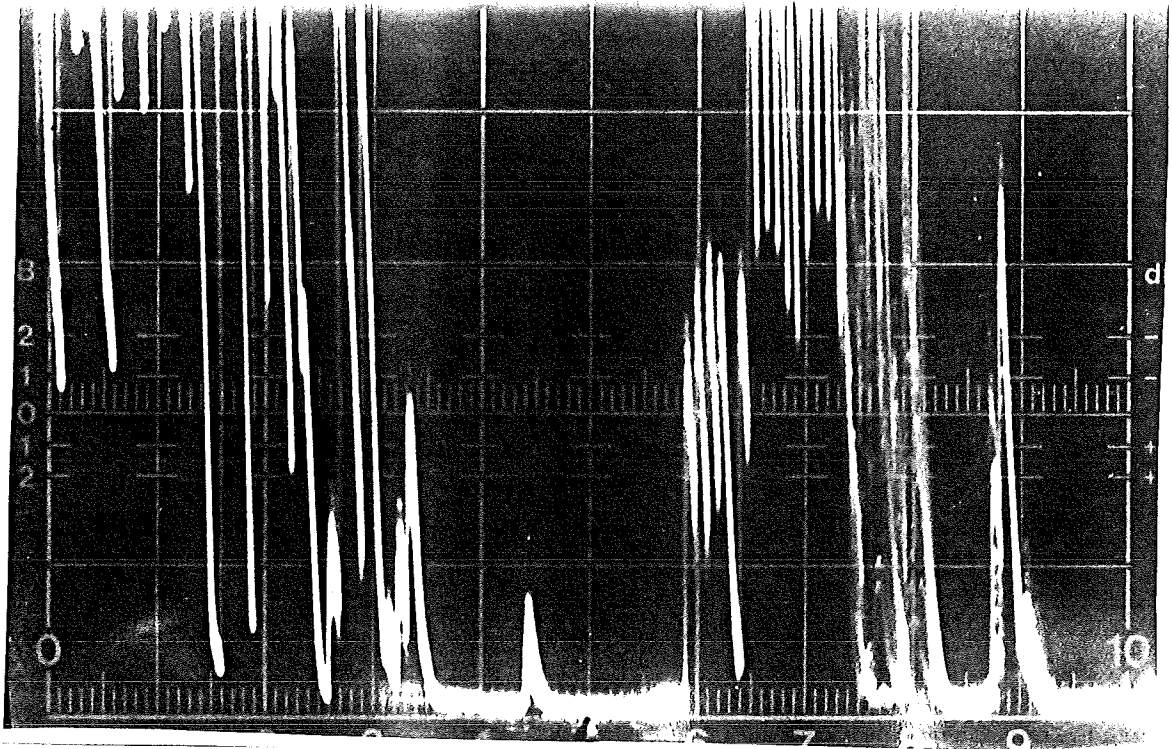
Figuur 20:

Proef 1.4 na een lastijd van 90 sec.



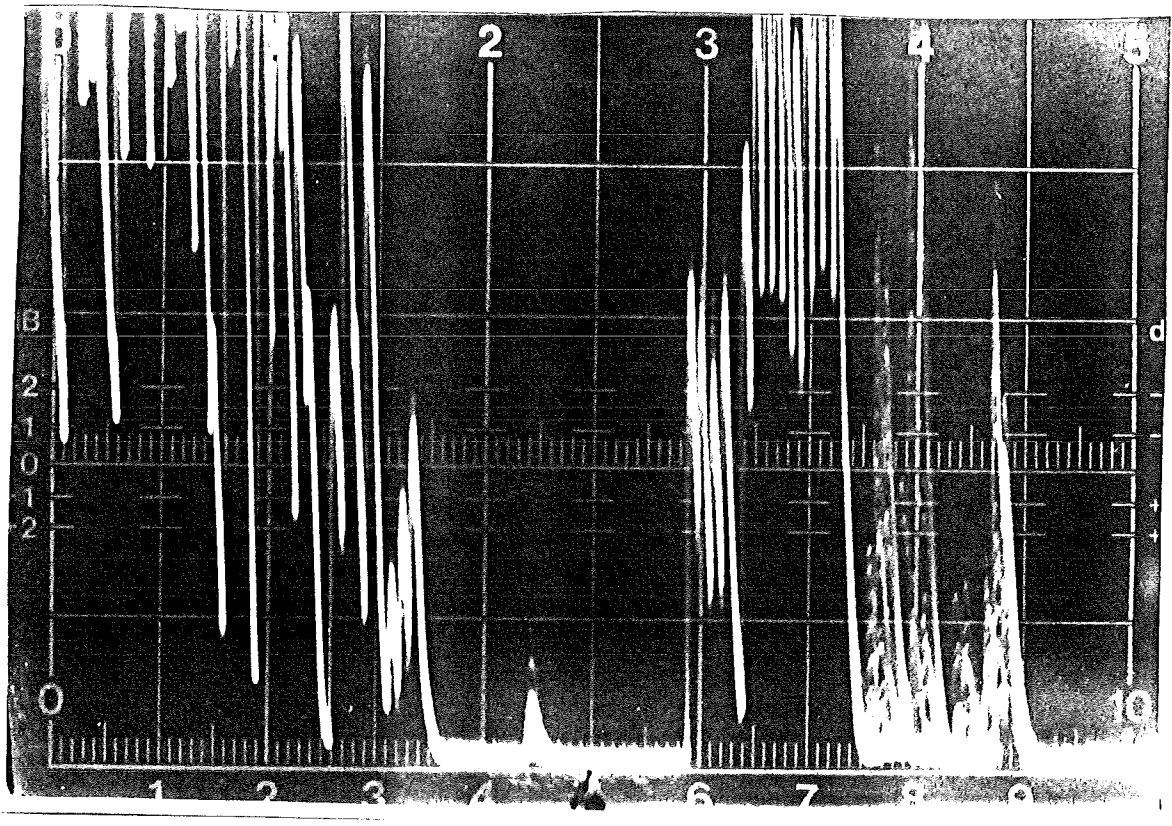
Figuur 21:

Proef 1.4 na een lastijd van 190 sec.



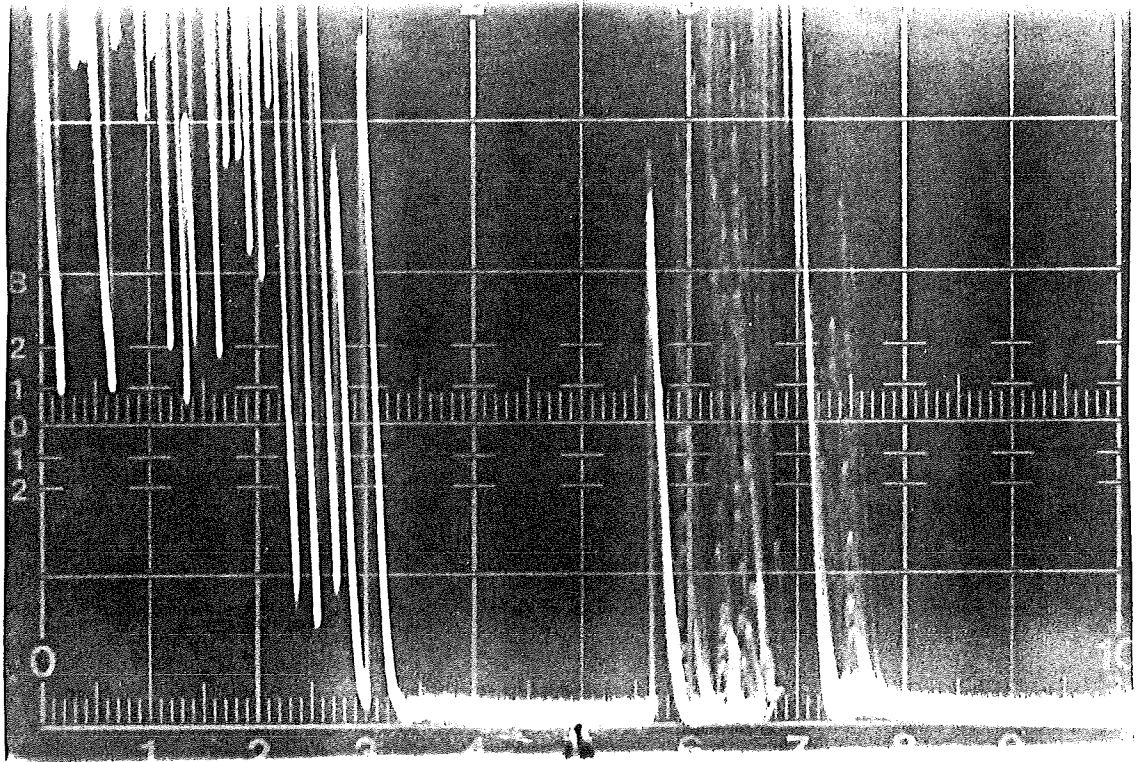
Figuur 22:

Proef 1.4 vlak na de verplaatsing van de lasboog over één centimeter naar achteren. De aanstralhoek werd hierdoor ca.  $50^\circ$  en de totale lastijd bedroeg 210 sec.

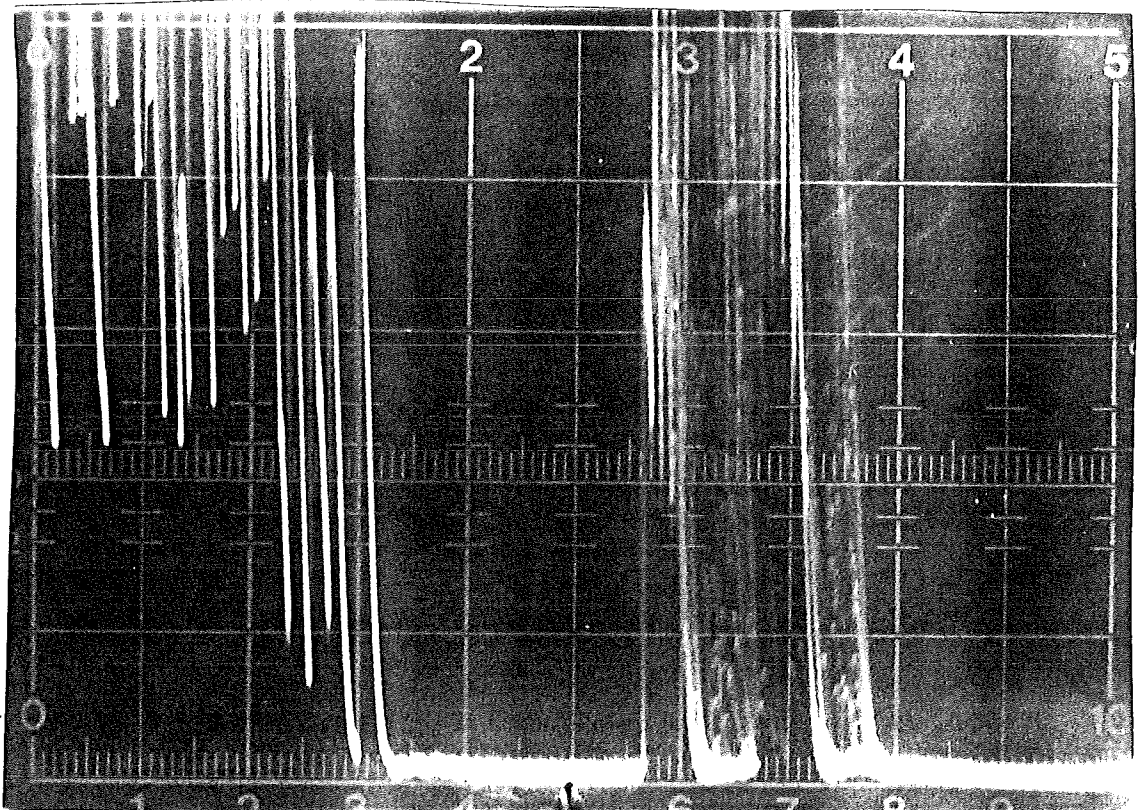


Figuur 23:

Proef 1.4 twintig seconden na de verplaatsing (totale lastijd 230 sec).

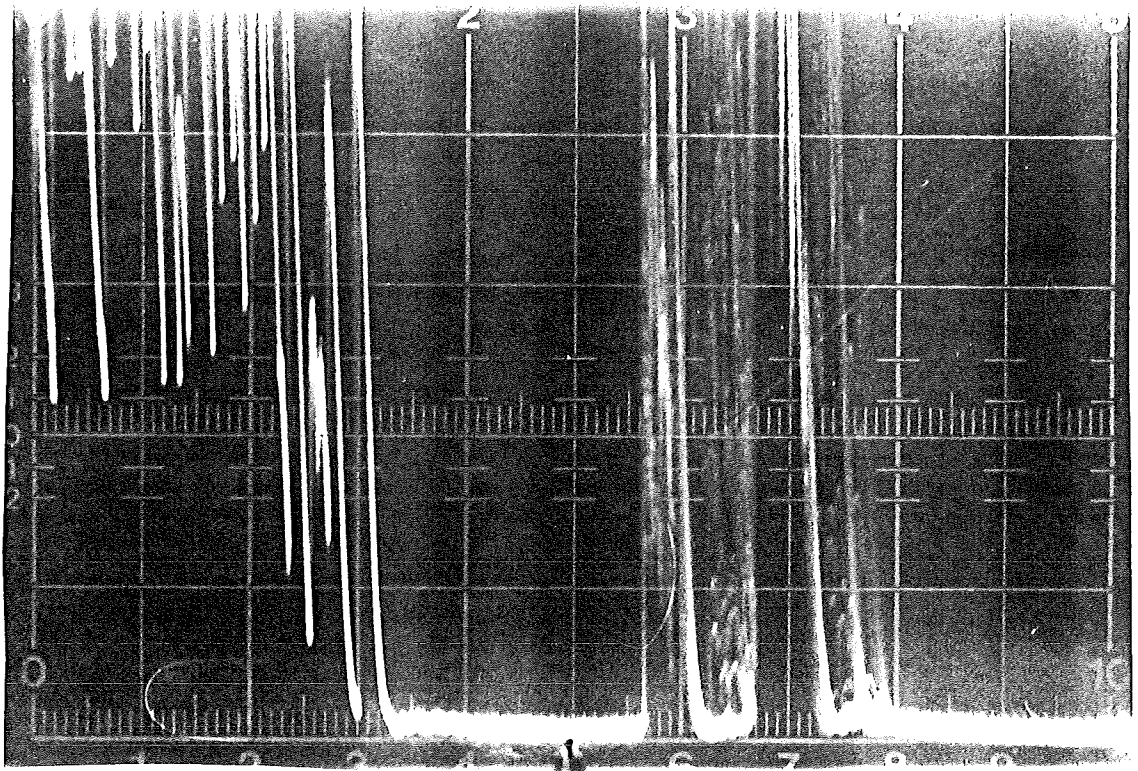


Figuur 24: Lastijd 125 sec; figuur 24 t.e.m. 28 zijn uit de 38°-serie van plaat 2. De gekozen foto's zijn met een periodetijd van vijf seconden gemaakt.

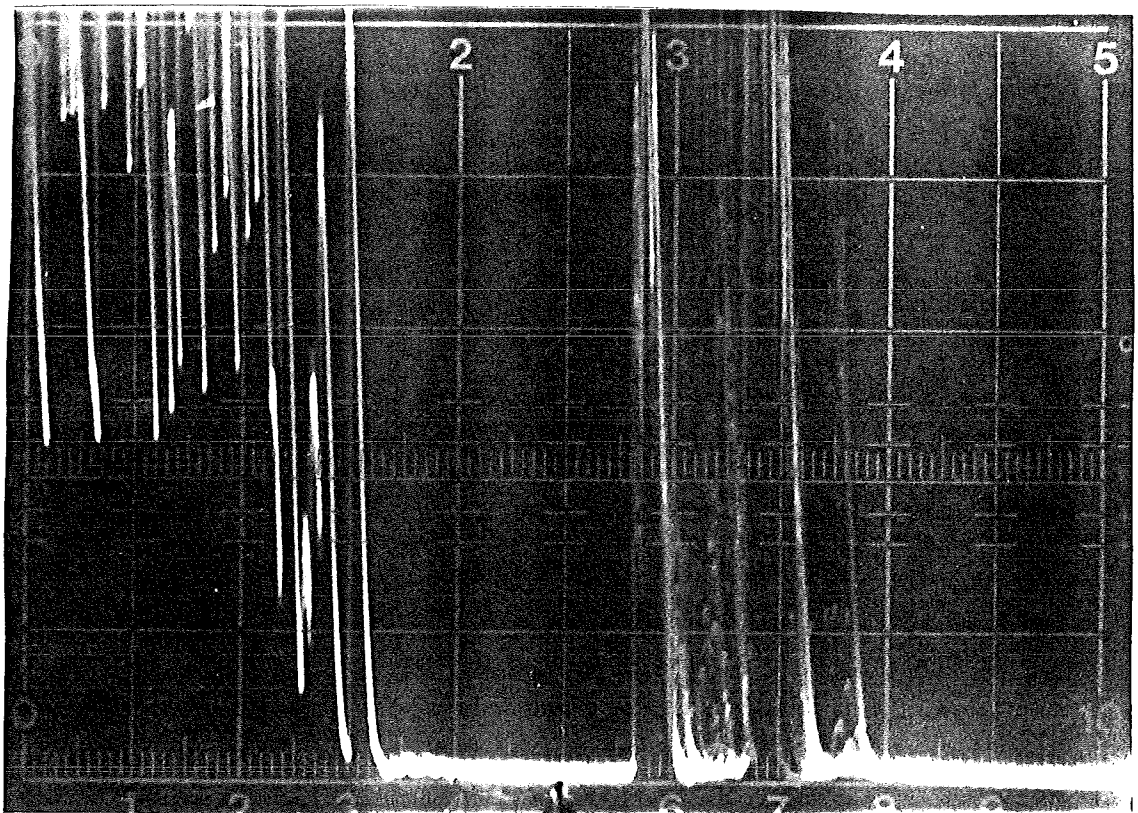


Figuur 25: Lastijd 130 sec  
(zie fig. 24 voor beschrijving).

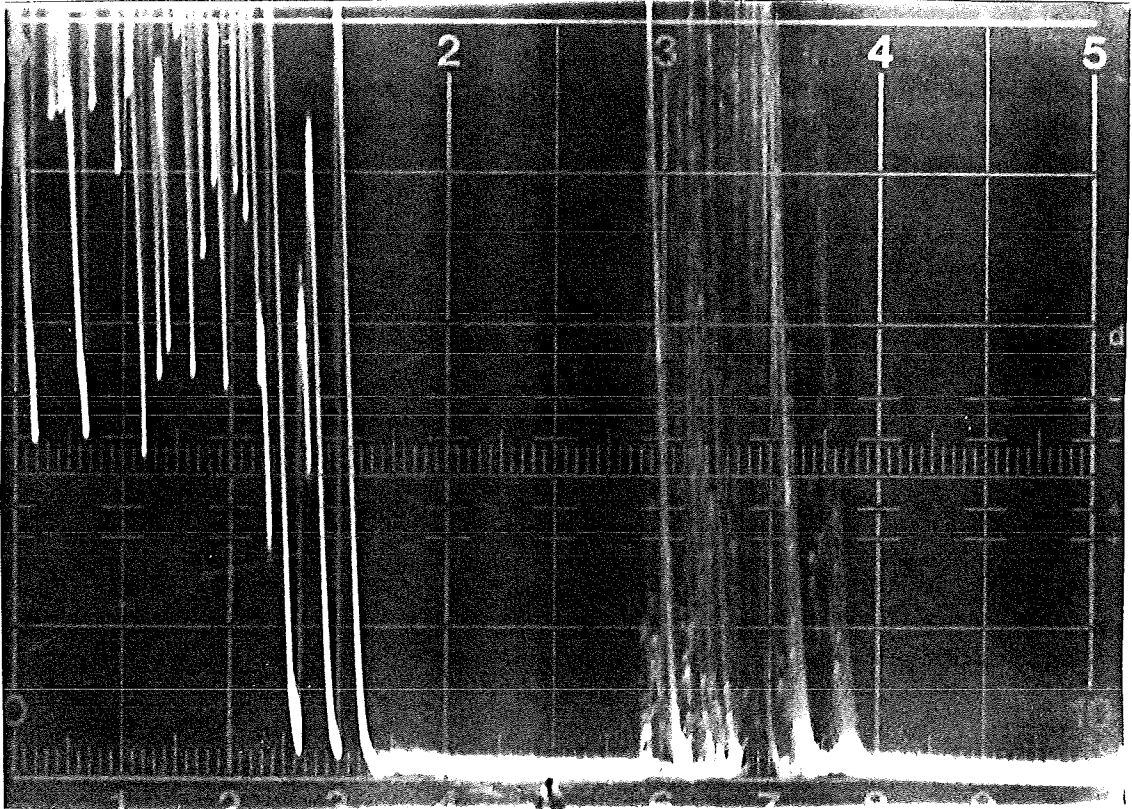




Figuur 26: Lastijd 135 sec  
(zie fig. 24 voor beschrijving).



Figuur 27: Lastijd 140 sec  
(zie fig. 24 voor beschrijving).



Figuur 28: Lastijd 145 sec  
(zie fig. 24 voor beschrijving).

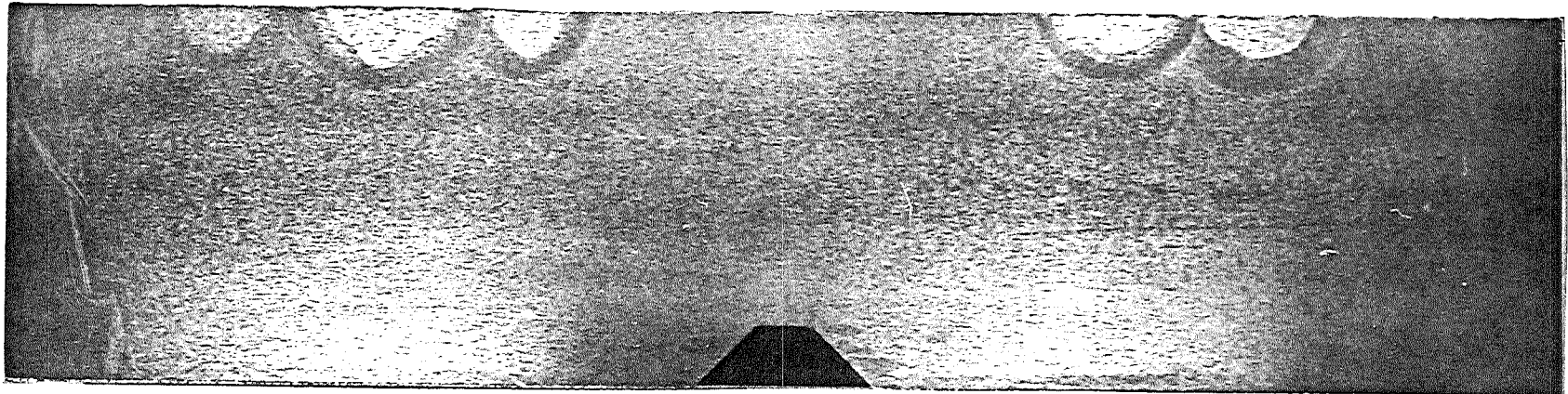
55°

44°

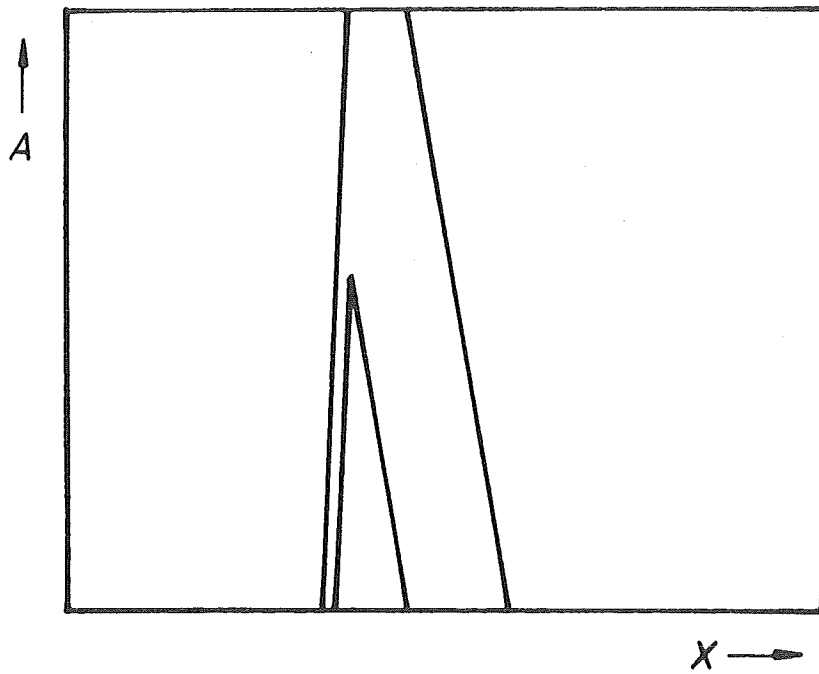
29°

38°

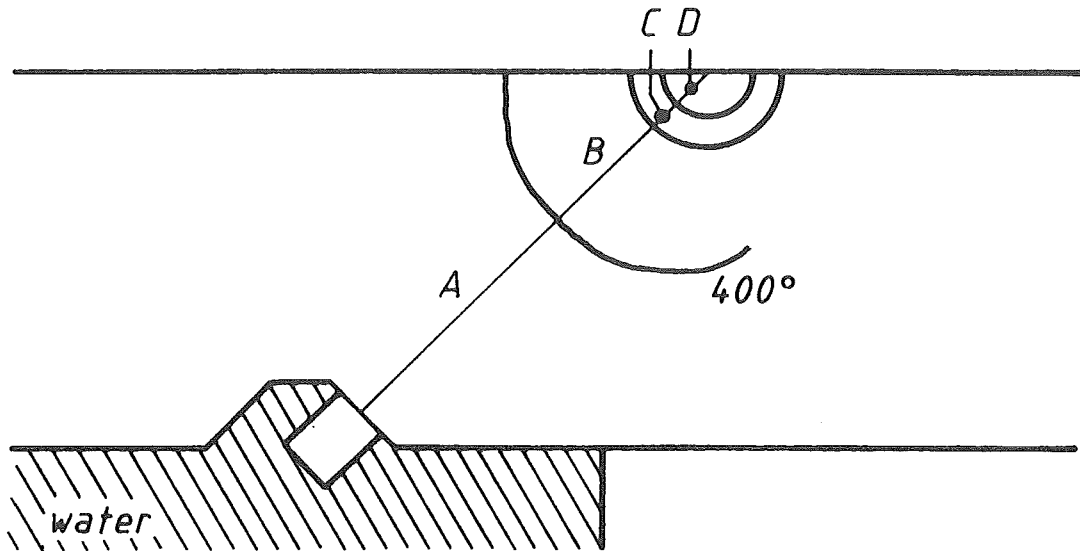
50°



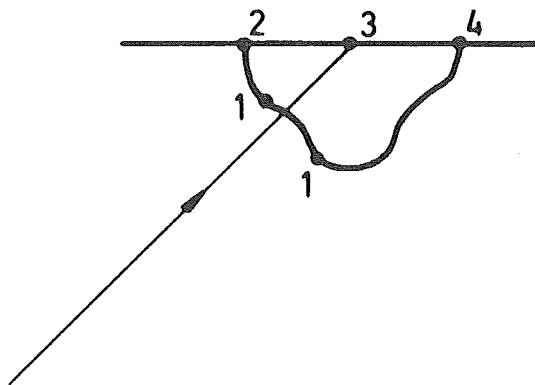
Figuur 29: Aangeëtste doorsnede van plaat 2. Midden-onder is de vonkverspaande uitholling voor de taster zichtbaar.



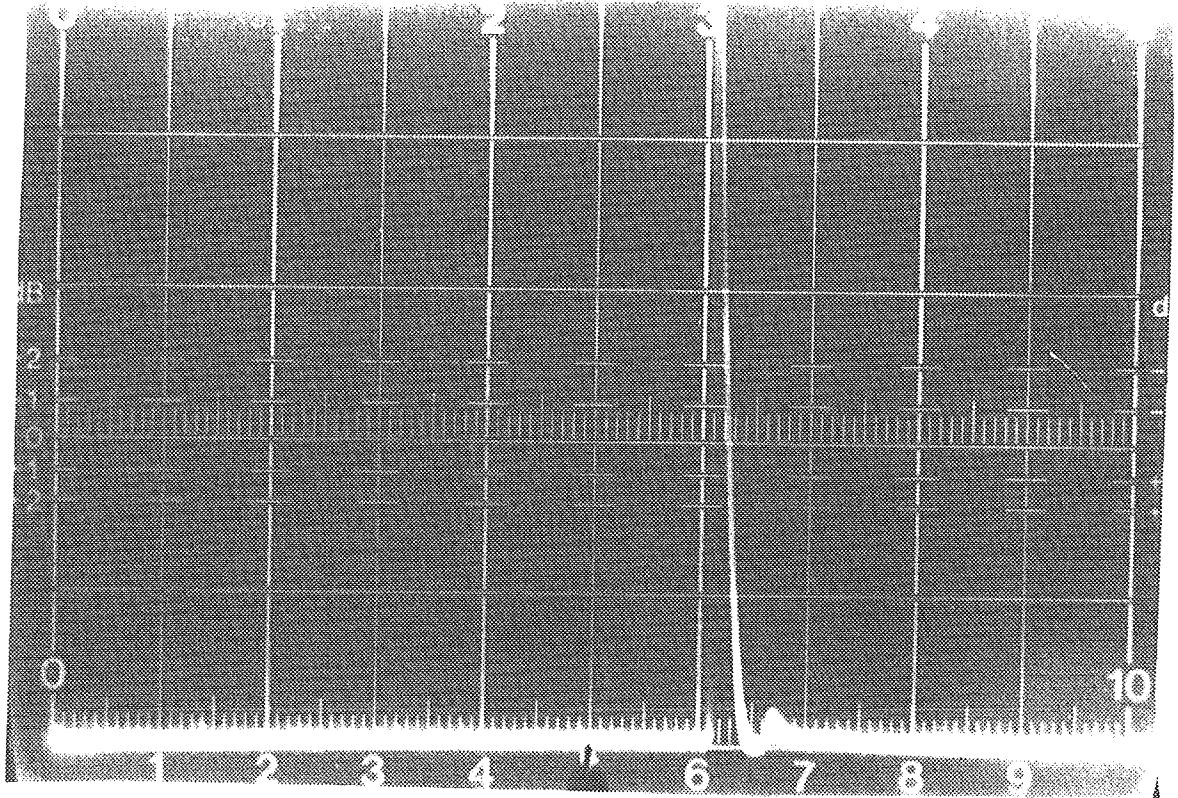
Figuur 30: De gestileerde weergave van het beeldscherm met één reflectiepiek bij twee versterkingen. Het piekeinde zal het meest van de toegepaste versterking afhankelijk zijn.  
(A=amplitude; x=afstand)



Figuur 31: Aangenomen temperatuurverdeling in de plaat volgens het transittime-delay-model. Linksonder bevindt zich de taster, omgeven door koelwater.

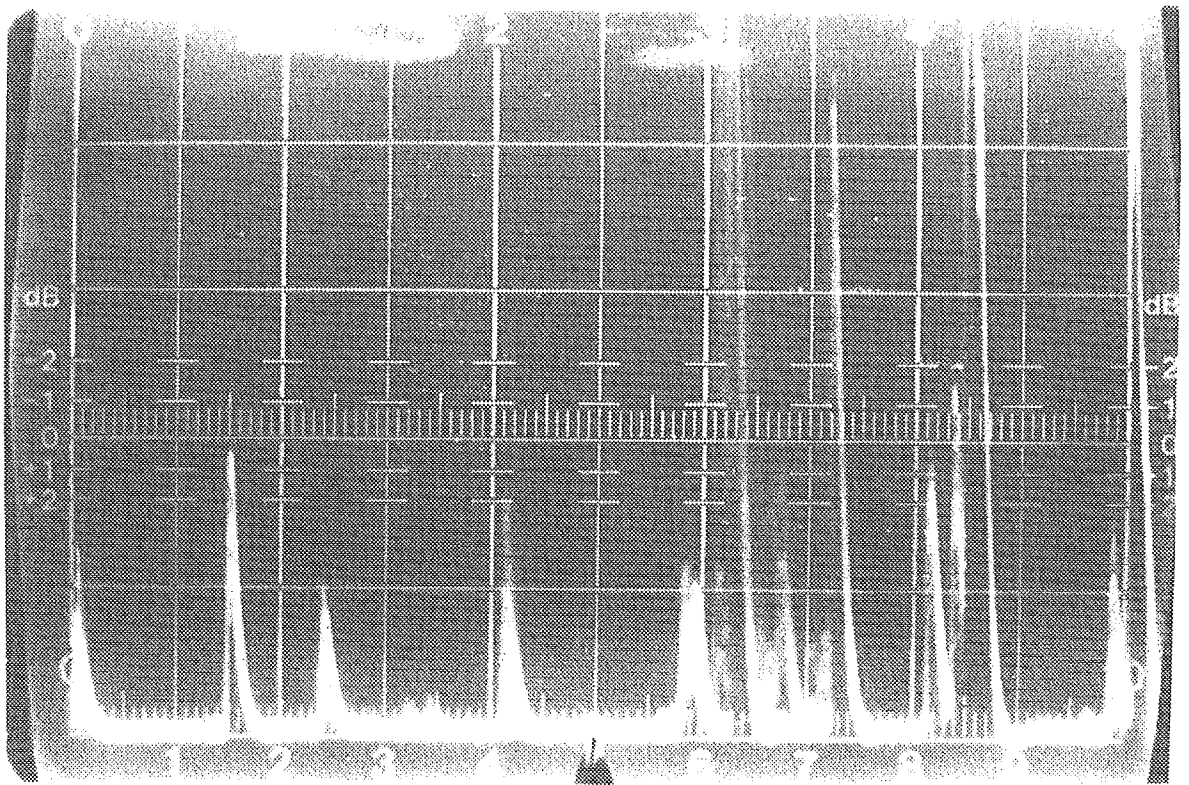


Figuur 32: De karakterisering van de lasbadgeometrie. Voor de keuze van het dichtst bij de taster gelegen punt (1) zijn hier twee mogelijkheden.

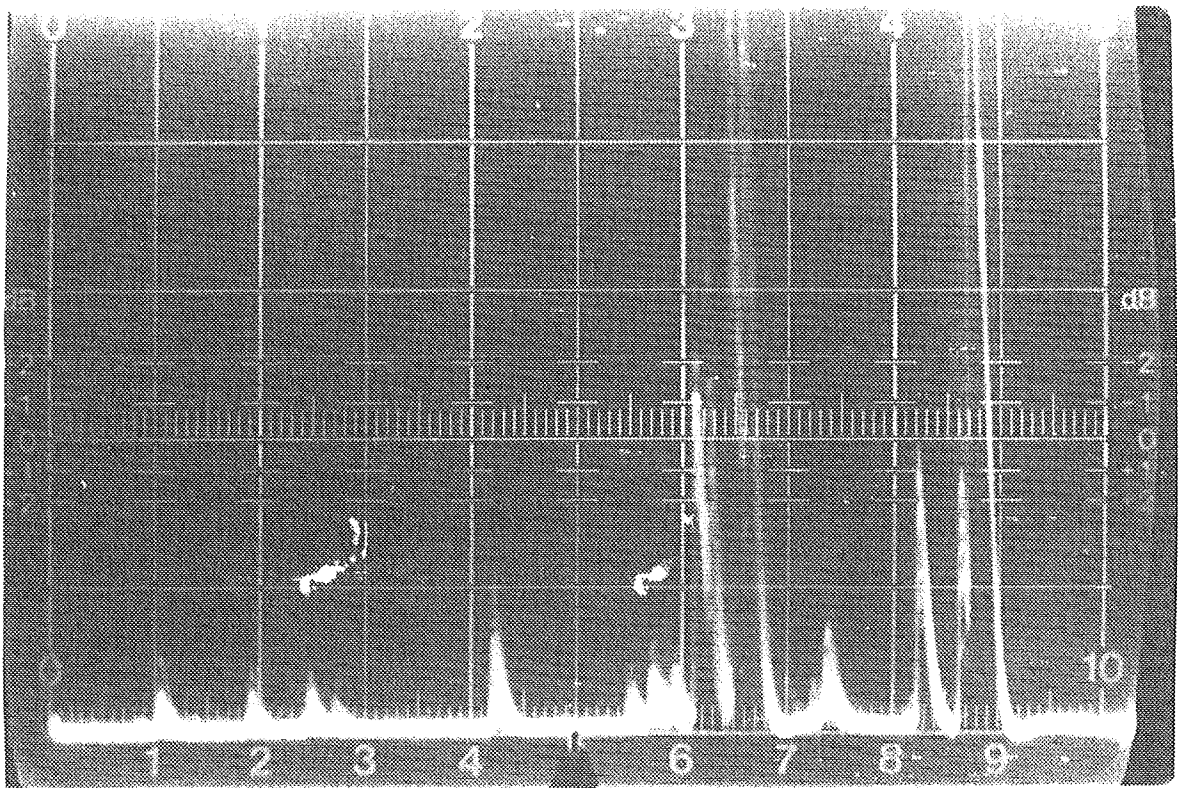


Figuur 33;

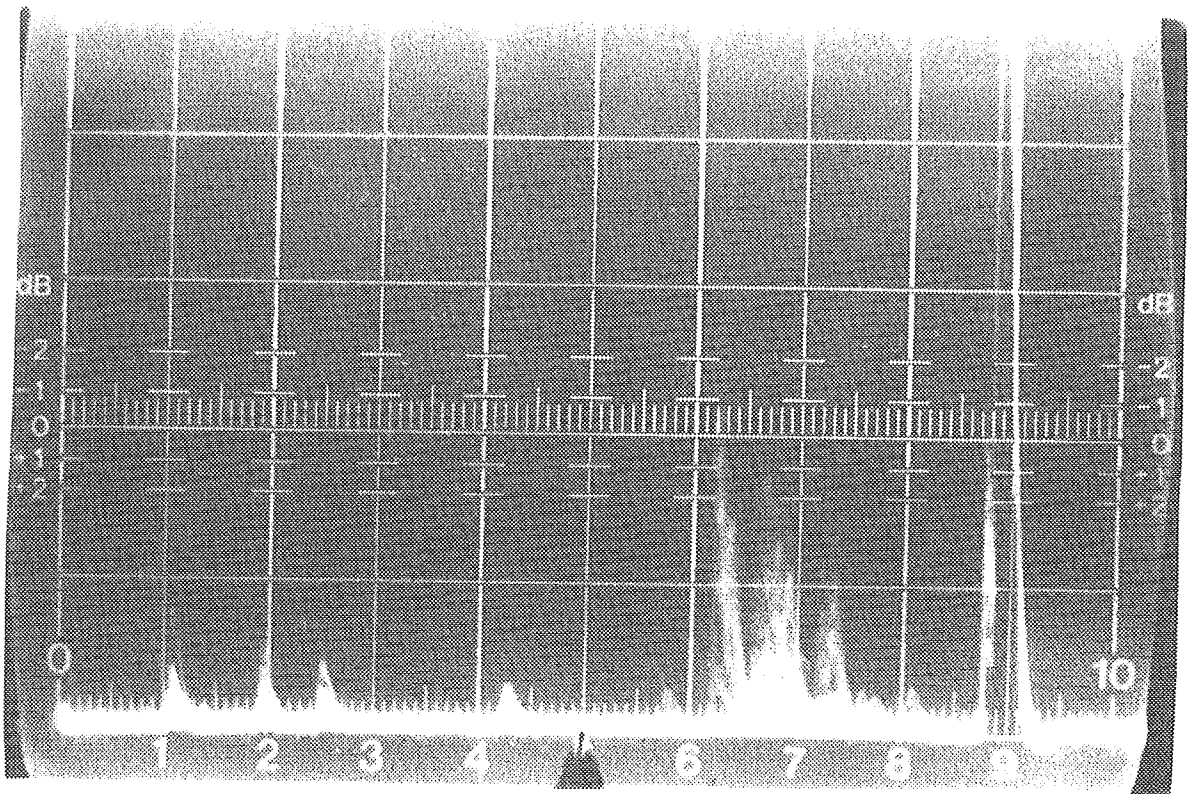
In de hiernavolgende figuren worden een aantal opnamen getoond bij proeven met de micro-hoektaster op 30 mm Fe360. De schaal van de x-as loopt van 50 mm tot 100 mm. Bovenstaande opname is representatief voor het beeld vlak voor het lassen (de foto is uit een andere serie afkomstig). De tijd na het begin van het lassen zal telkens vermeld worden.



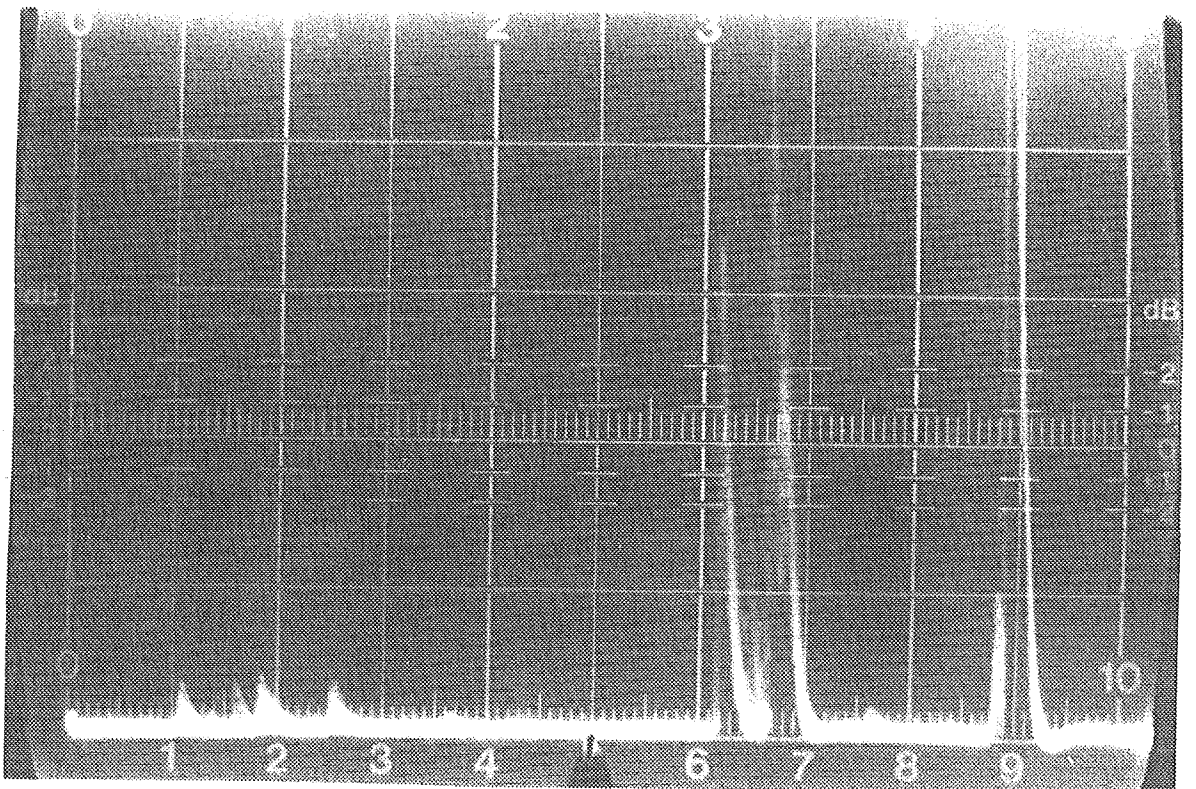
Figuur 34: Lastijd 20 sec  
(zie fig. 33 voor beschrijving).



Figuur 35: Lastijd 30 sec  
(zie fig. 33 voor beschrijving).

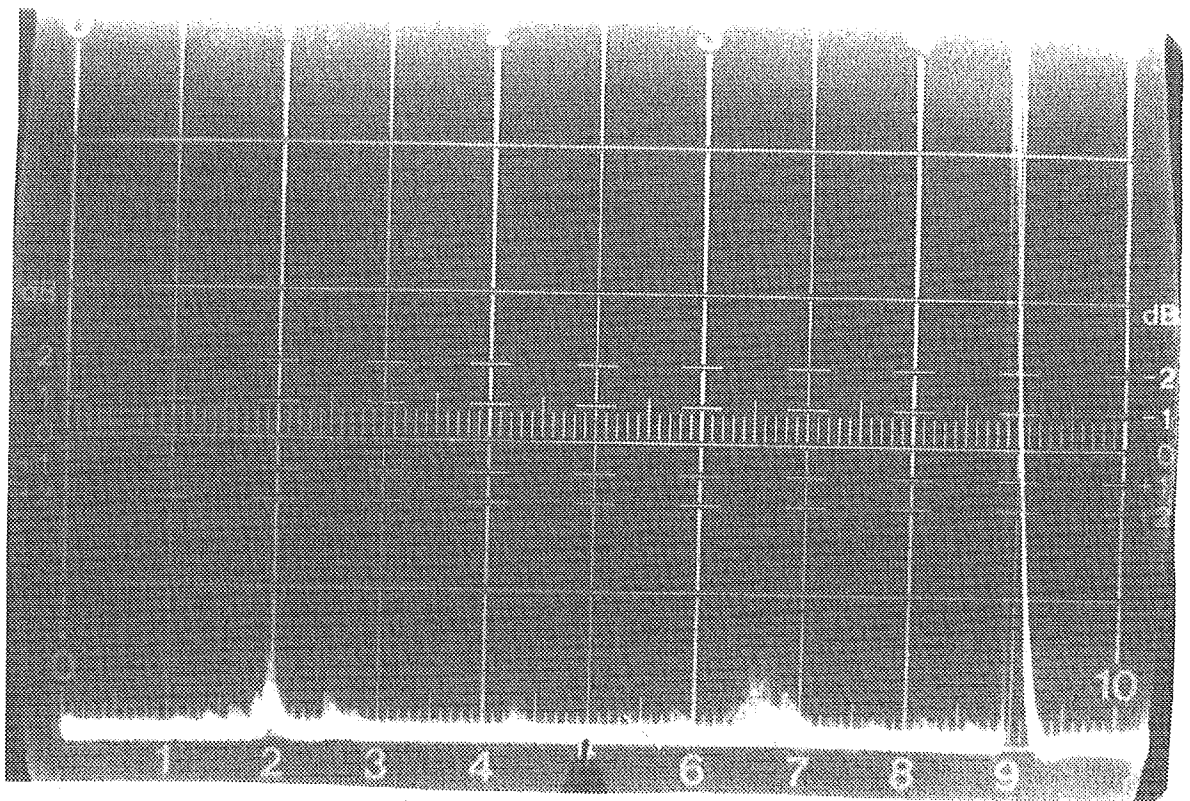


Figuur 36: Lastijd 40 sec  
(zie fig. 33 voor beschrijving).

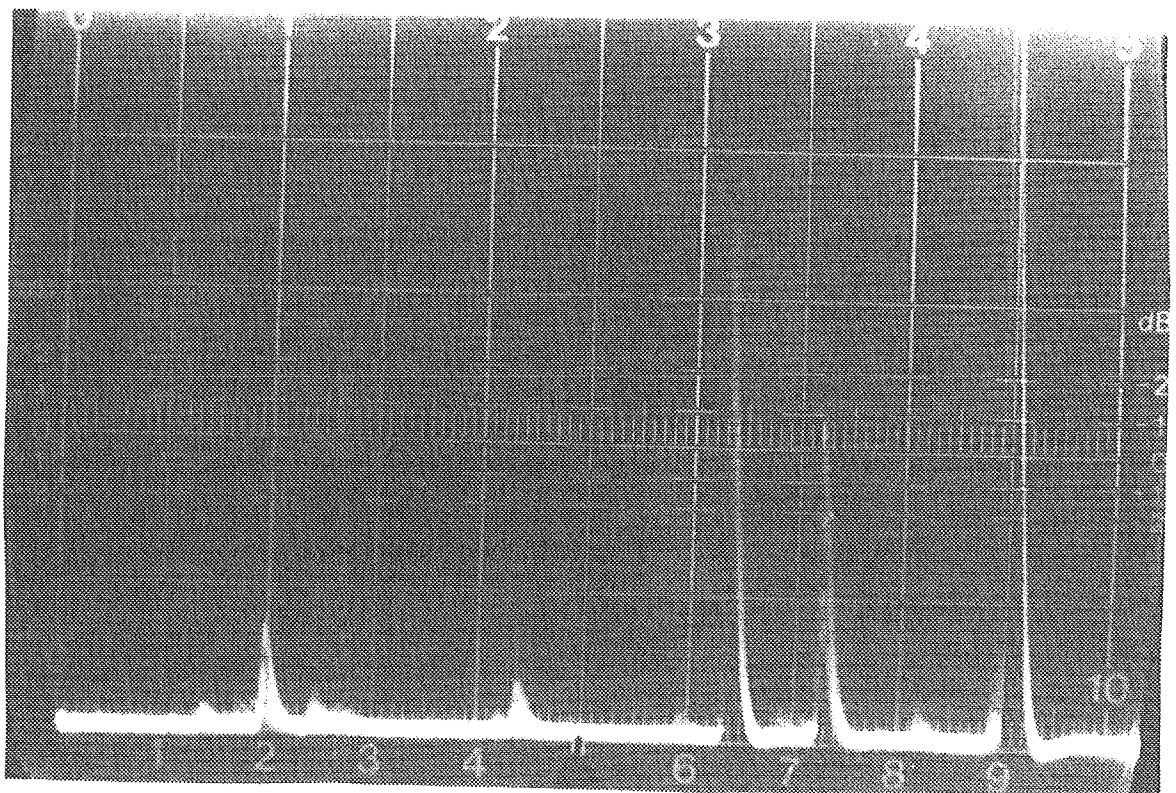


Figuur 37: Lastijd 42 sec  
(zie fig. 33 voor beschrijving).

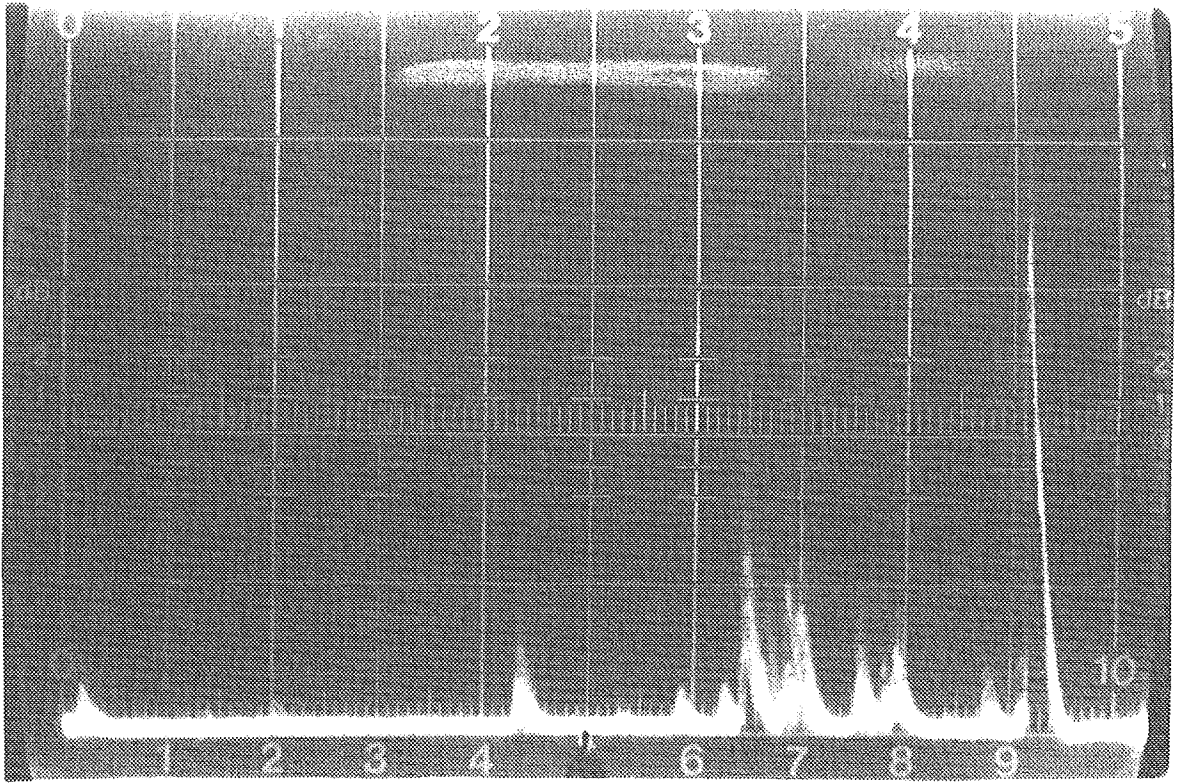




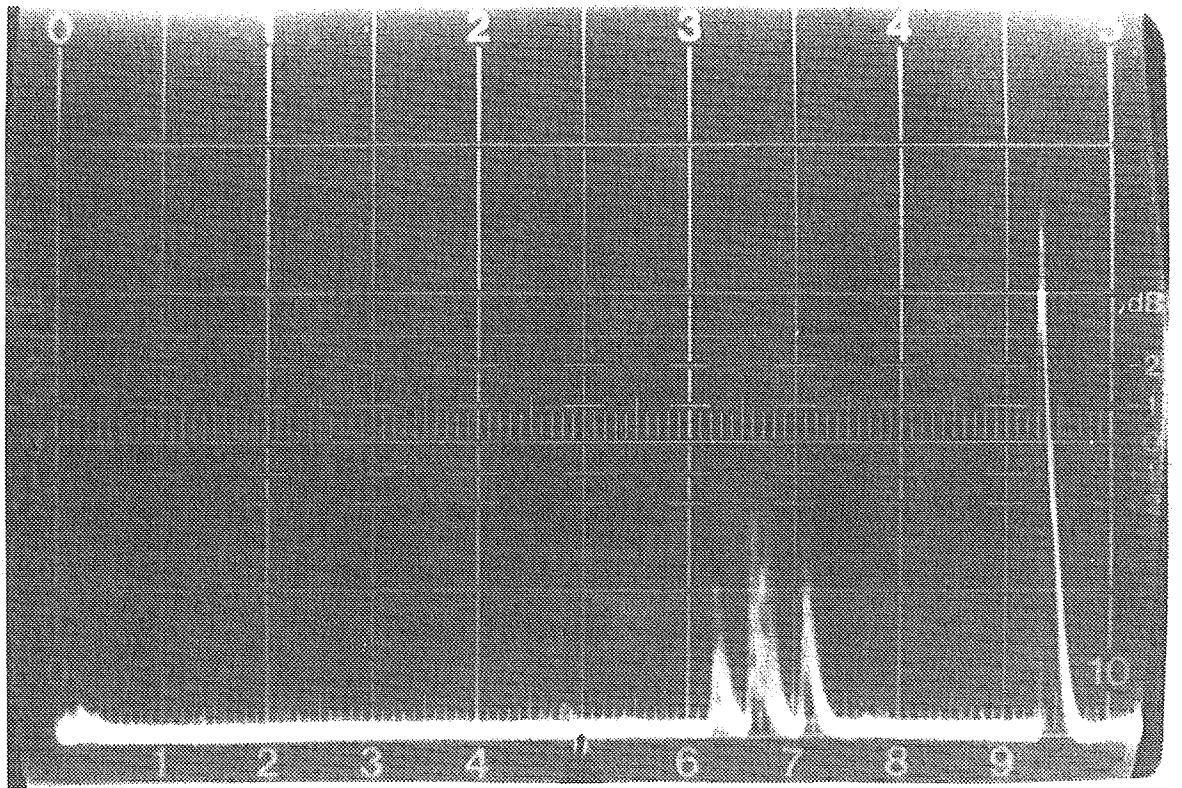
Figuur 38: Lastijd 44 sec  
(zie fig. 33 voor beschrijving).



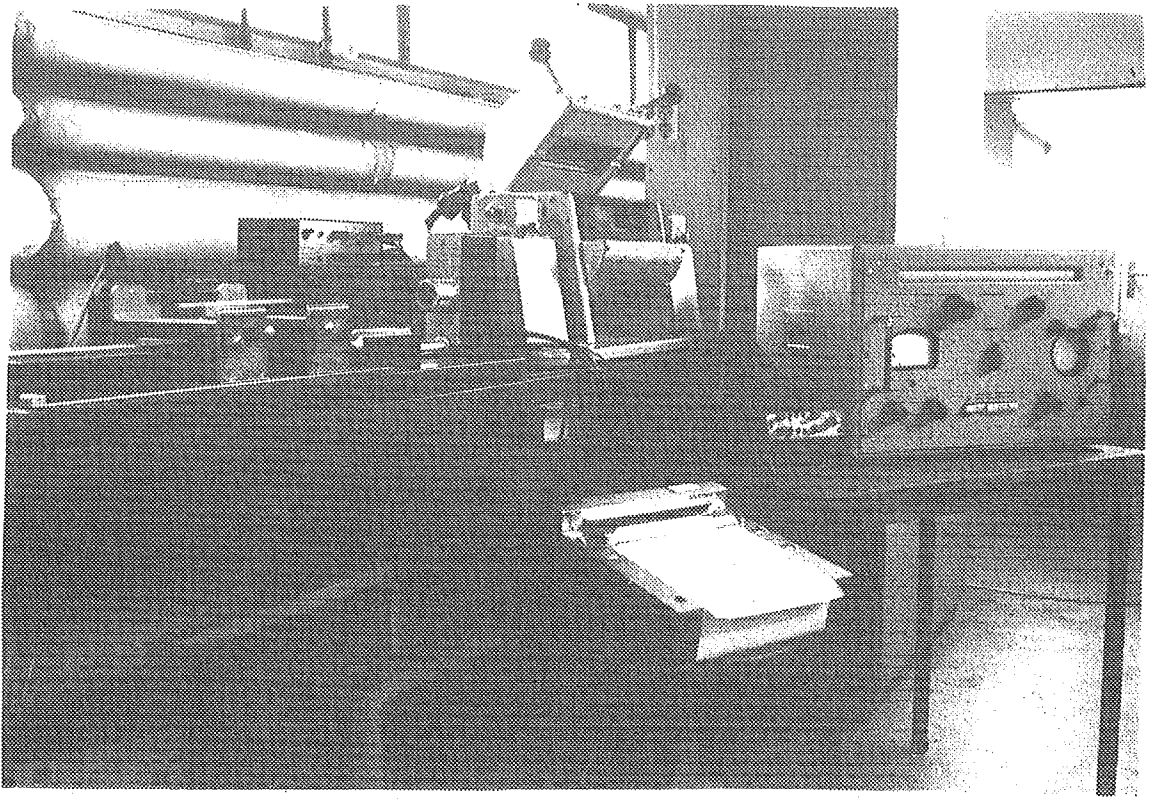
Figuur 39: Lastijd 46 sec  
(zie fig. 33 voor beschrijving).



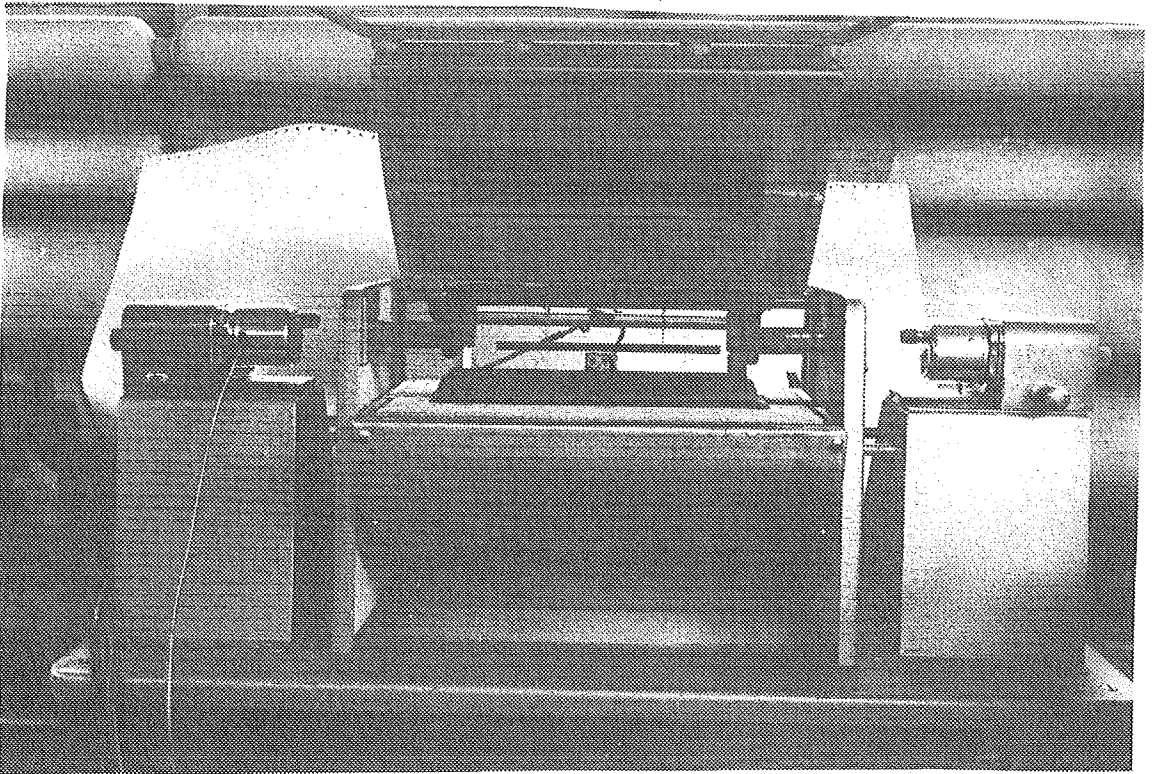
Figuur 40: Lastijd 60 sec  
(zie fig. 33 voor beschrijving).



Figuur 41: Lastijd 70 sec  
(zie fig. 33 voor beschrijving).



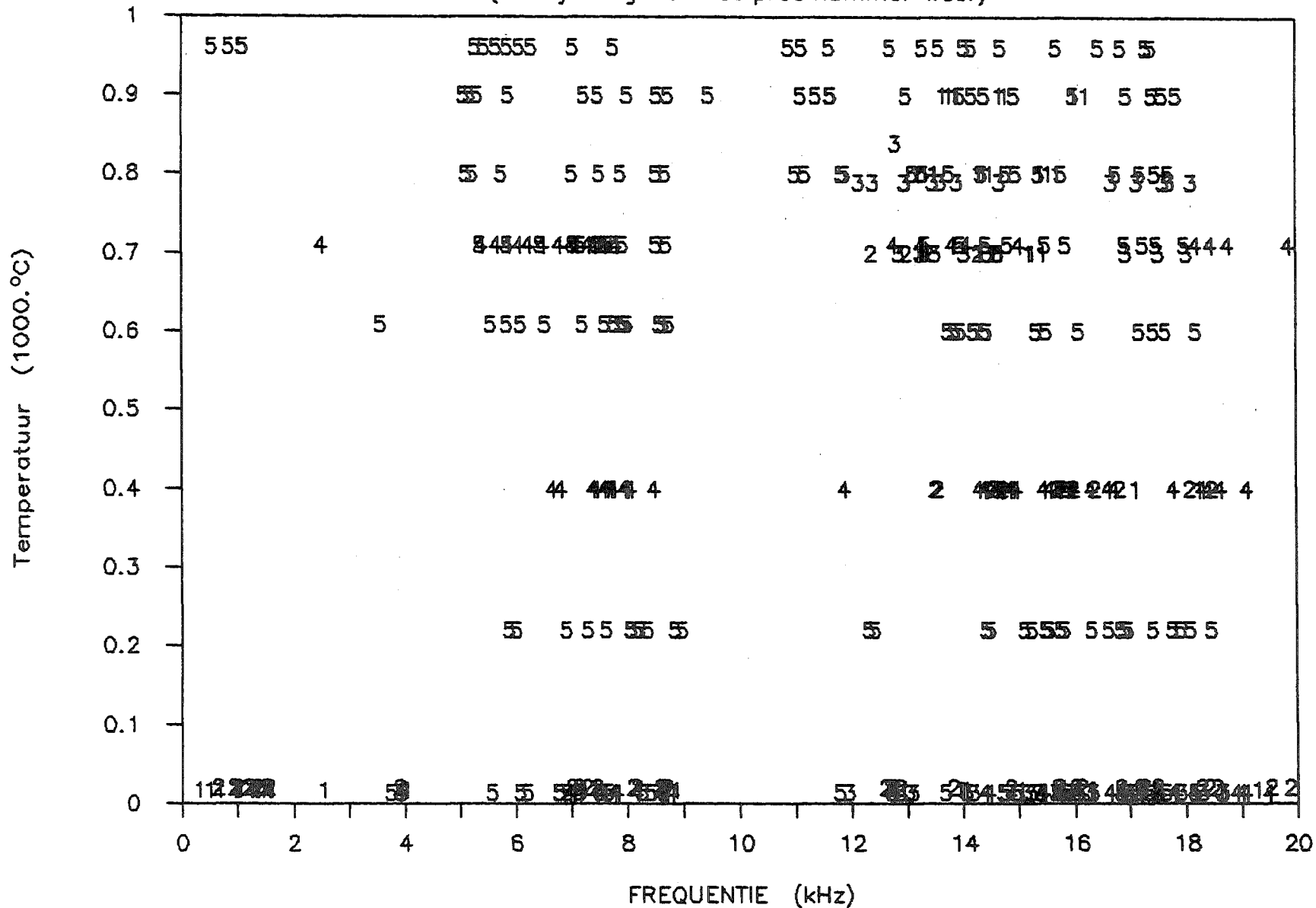
Figuur 42: Opstelling voor geluidsnelheidsonderzoek. De Elastomat staat met de frequentiemeter op de tafel rechts. De kamertemperatuurbenk bevindt zich links op de foto.



Figuur 43: De oven van de Elastomat-opstelling. Links en rechts van de oven zijn de golfomzetters bevestigd.

Figuur 44: Verzamelde meetpunten van LW1 – LW5

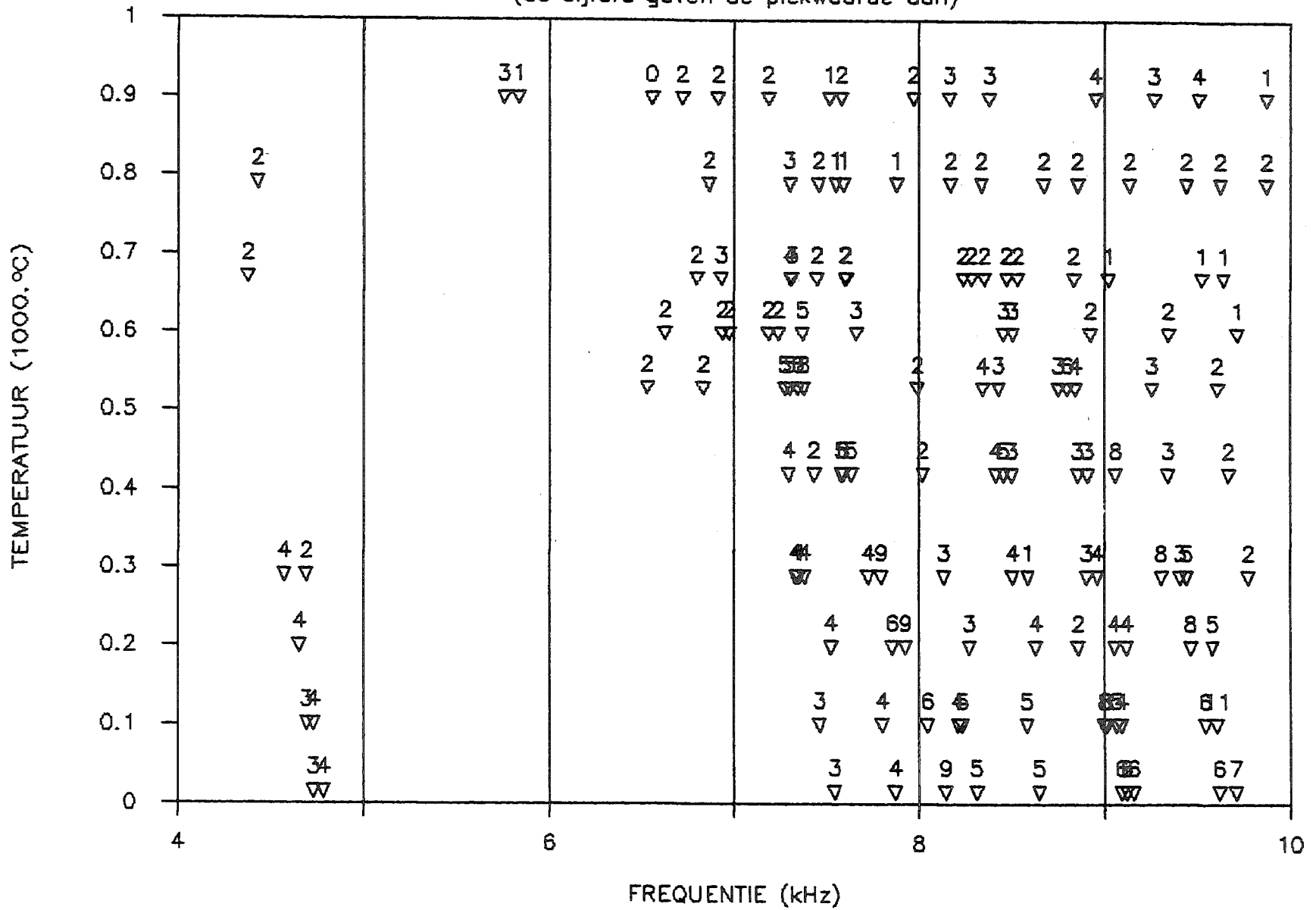
(de cijfers geven het proefnummer weer)



Figuur 45:

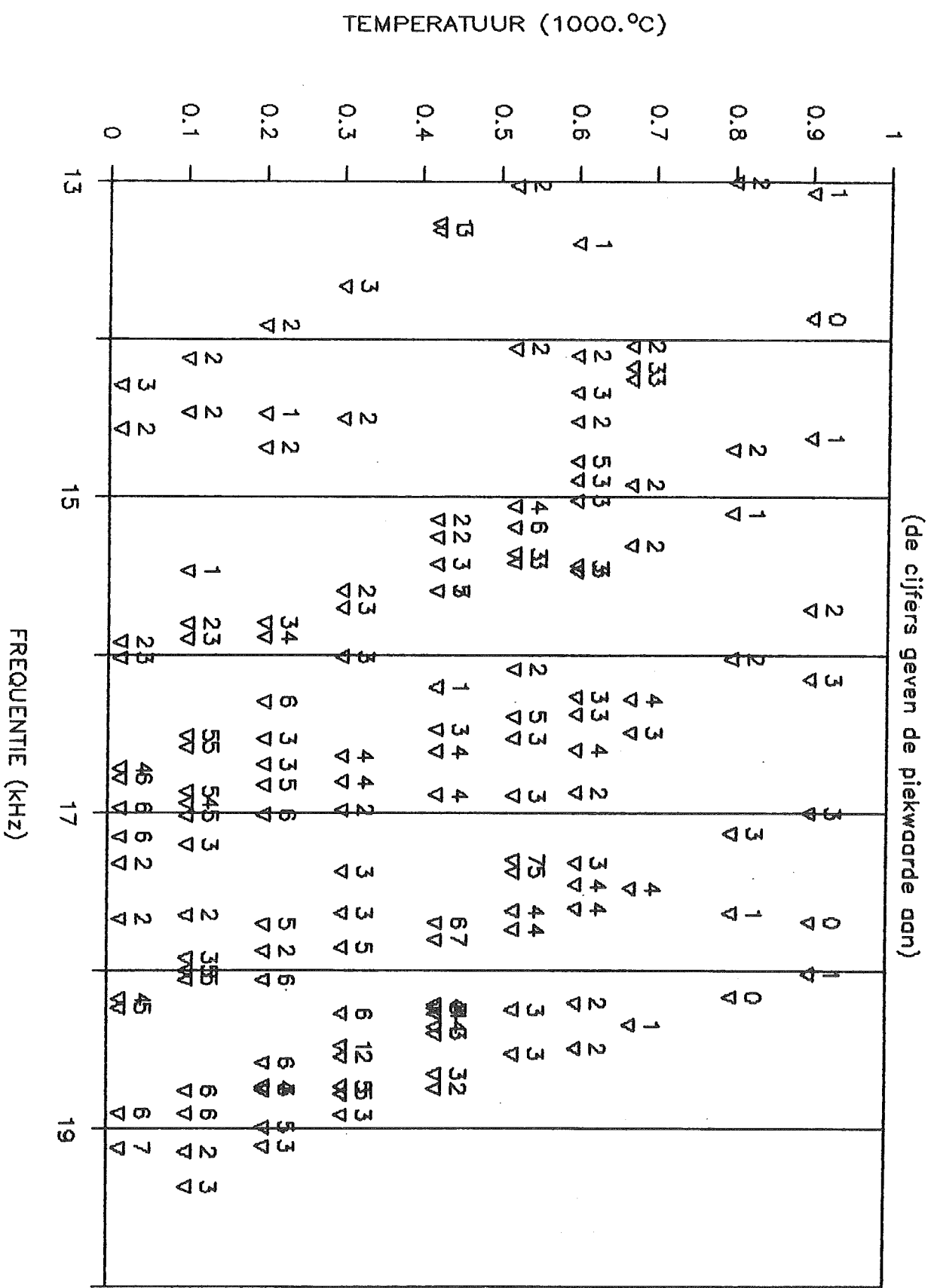
EW1 - RESONANTIES

(de cijfers geven de piekwaarde aan)



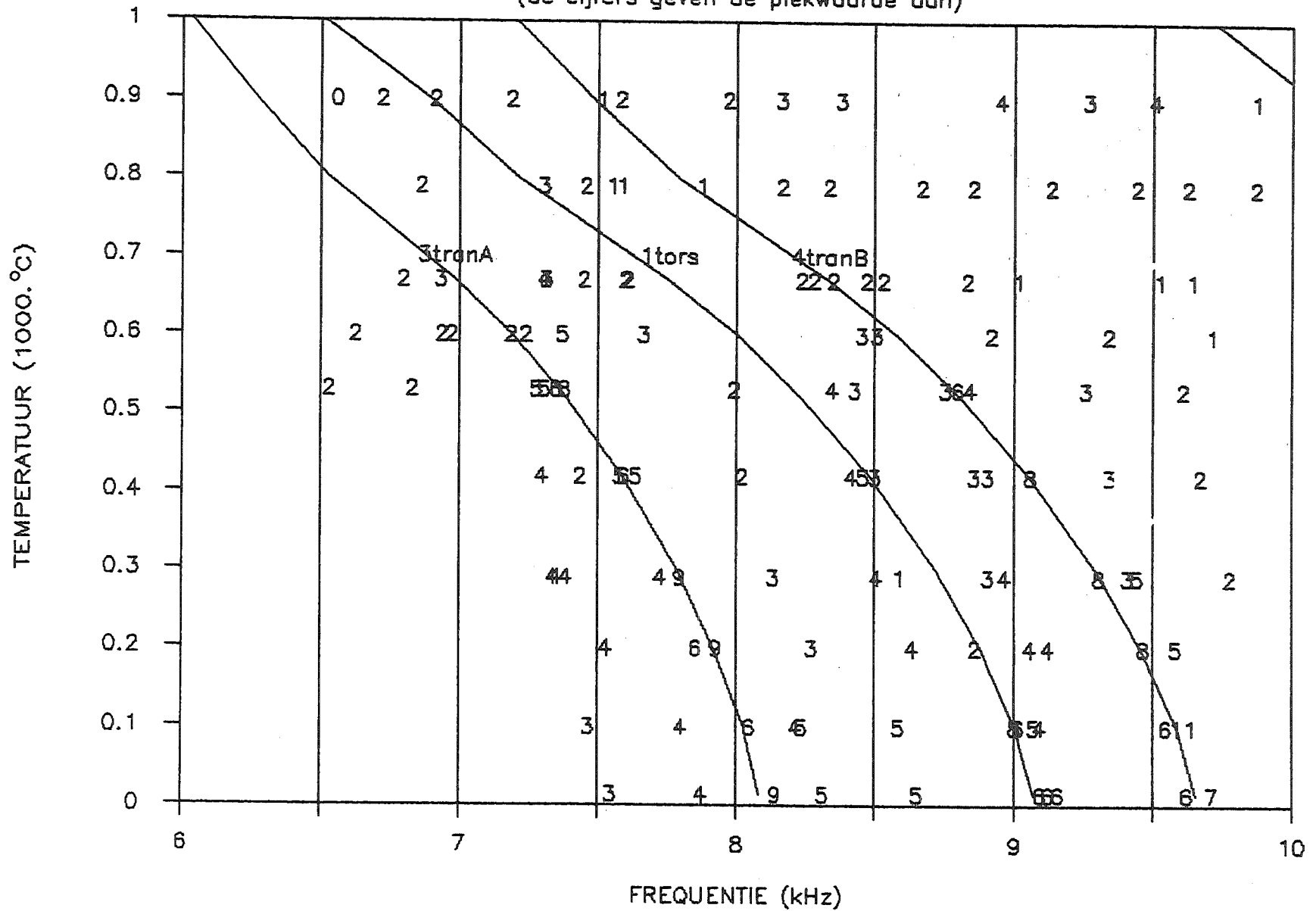
FIGUUR 46:

EW1 - RESONANTIES



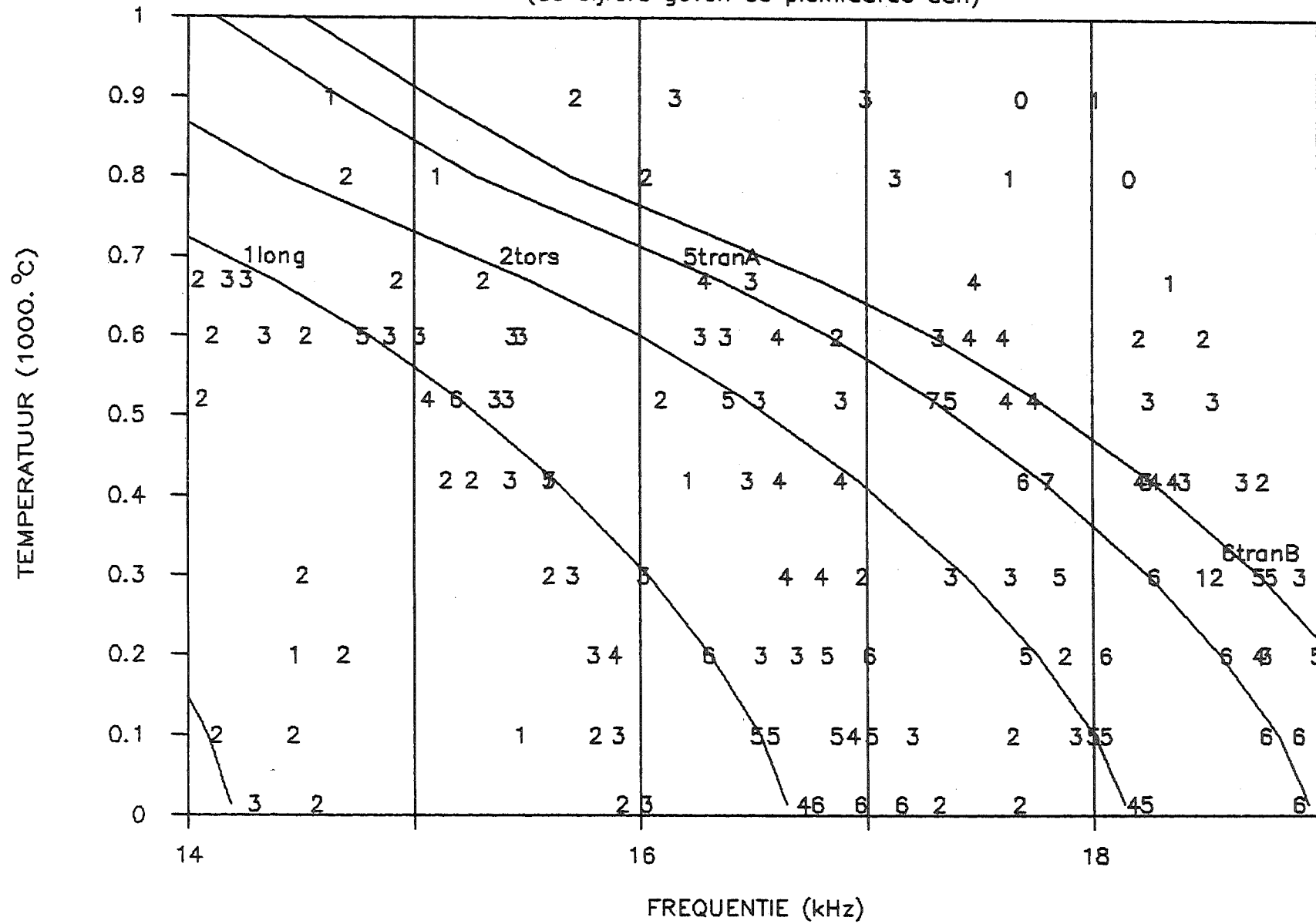
Figuur 47: Resonanties EW1 met St34,II-verwachting

(de cijfers geven de piekwaarde aan)



Figuur 48: Resonanties EW1 met St34,II-verwachting

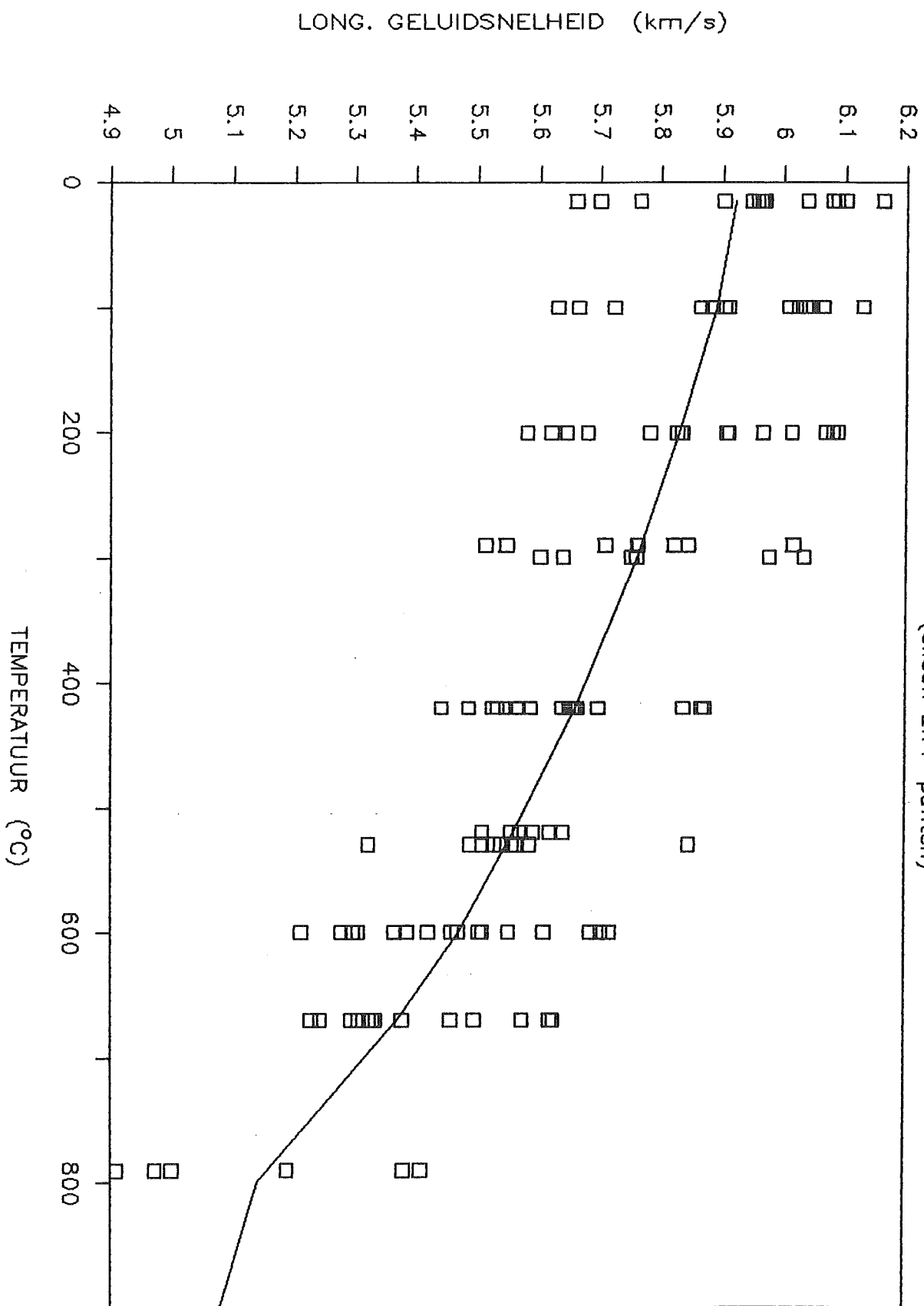
(de cijfers geven de piekwaarde aan)





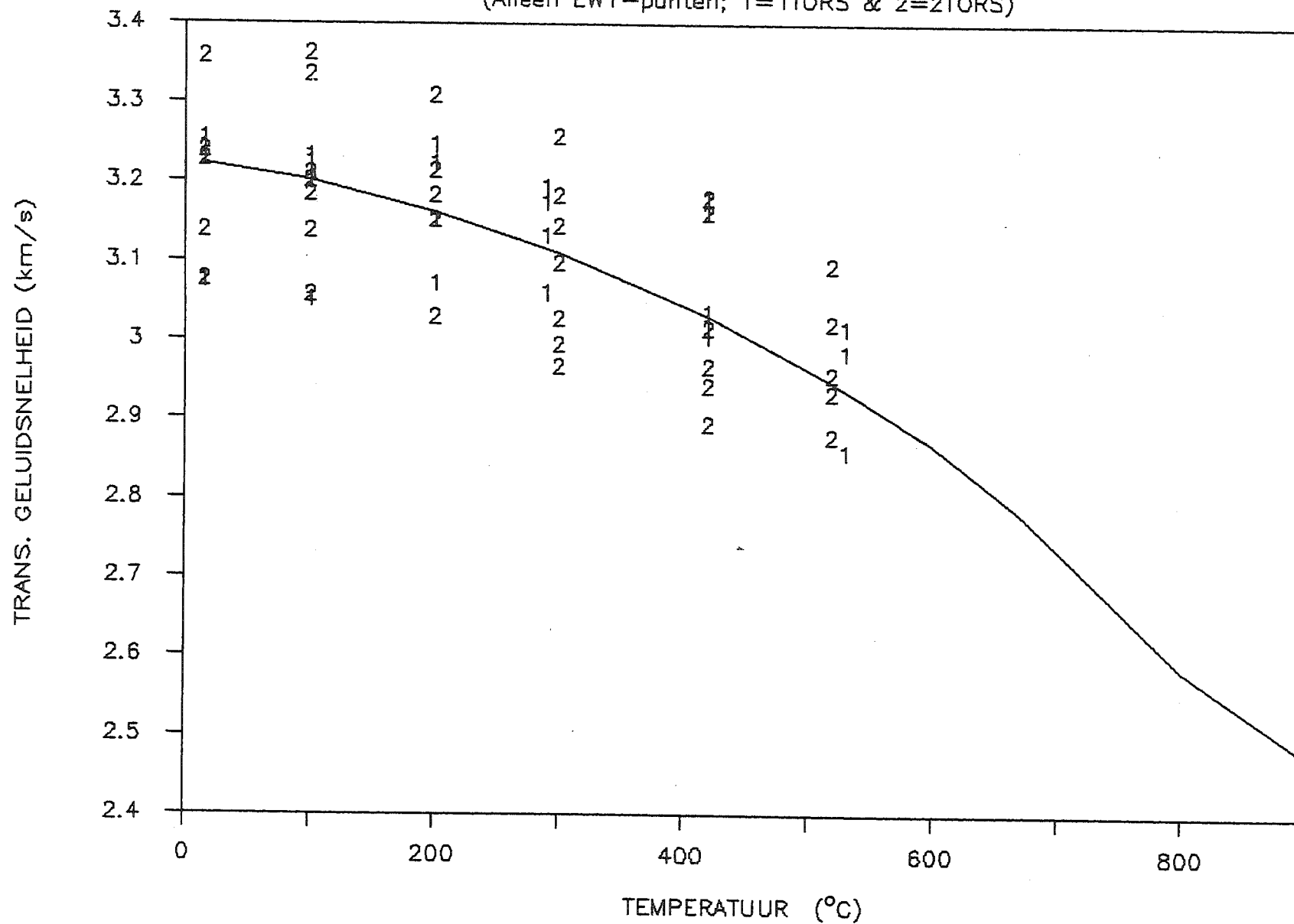
Figuur 49: Punten in 5%-interval rond St34-curve

(alleen EW1-punten)



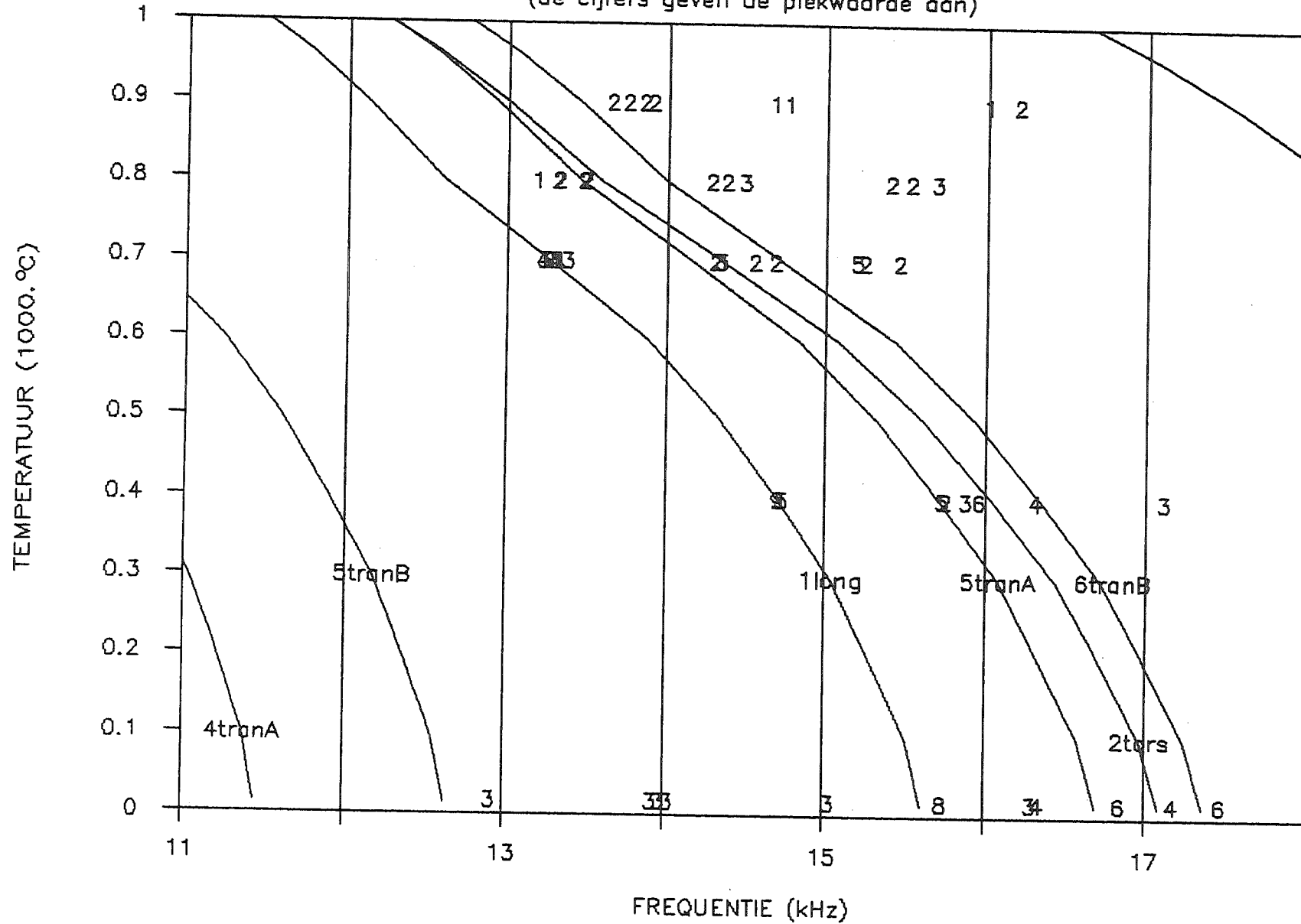
Figuur 50: Punten in 5%-interval rond St34-curve

(Alleen EW1-punten; 1=1TORS & 2=2TORS)



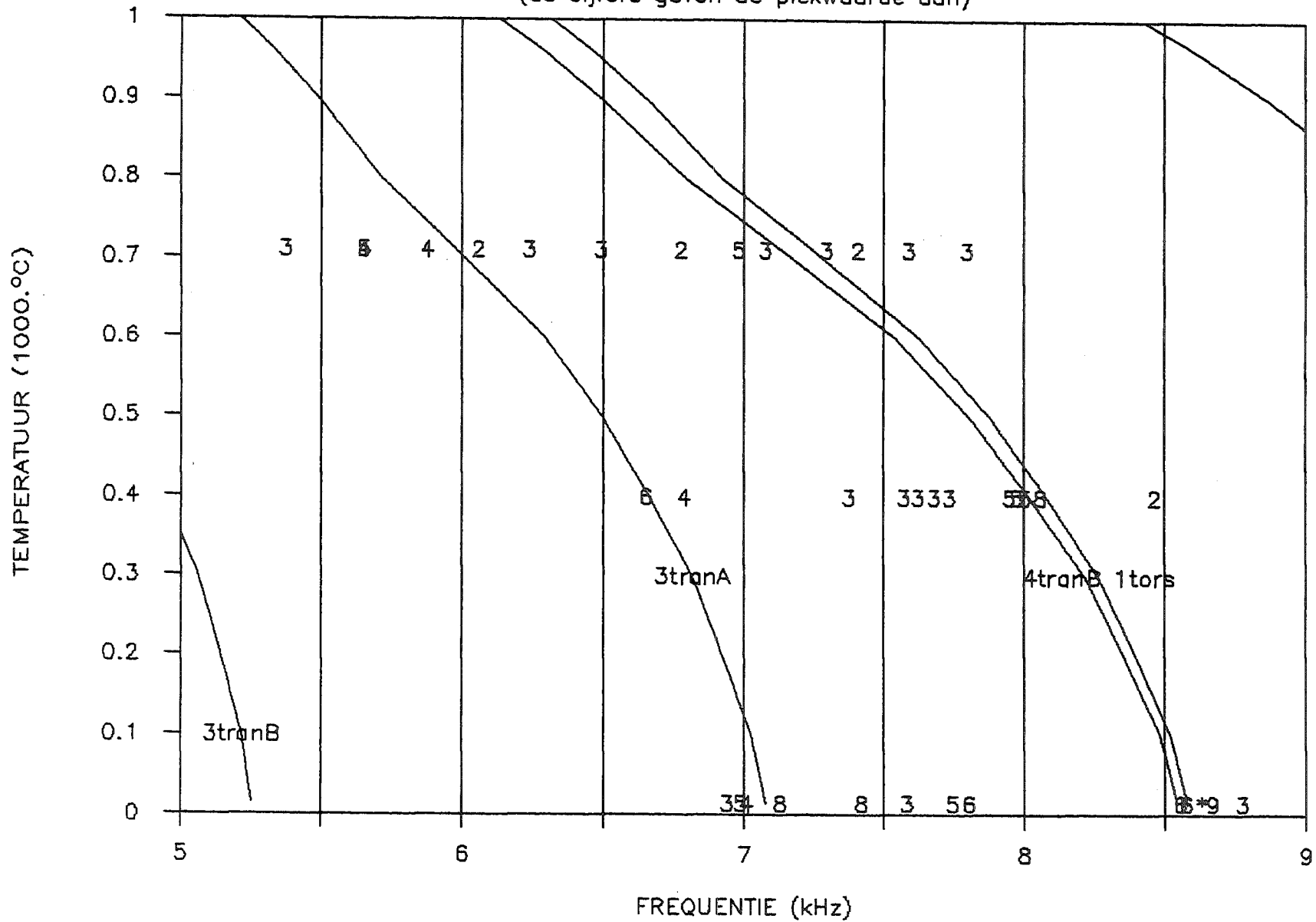
Figuur 51: Resonanties LW1 met St34,II-verwachting

(de cijfers geven de piekwaarde aan)



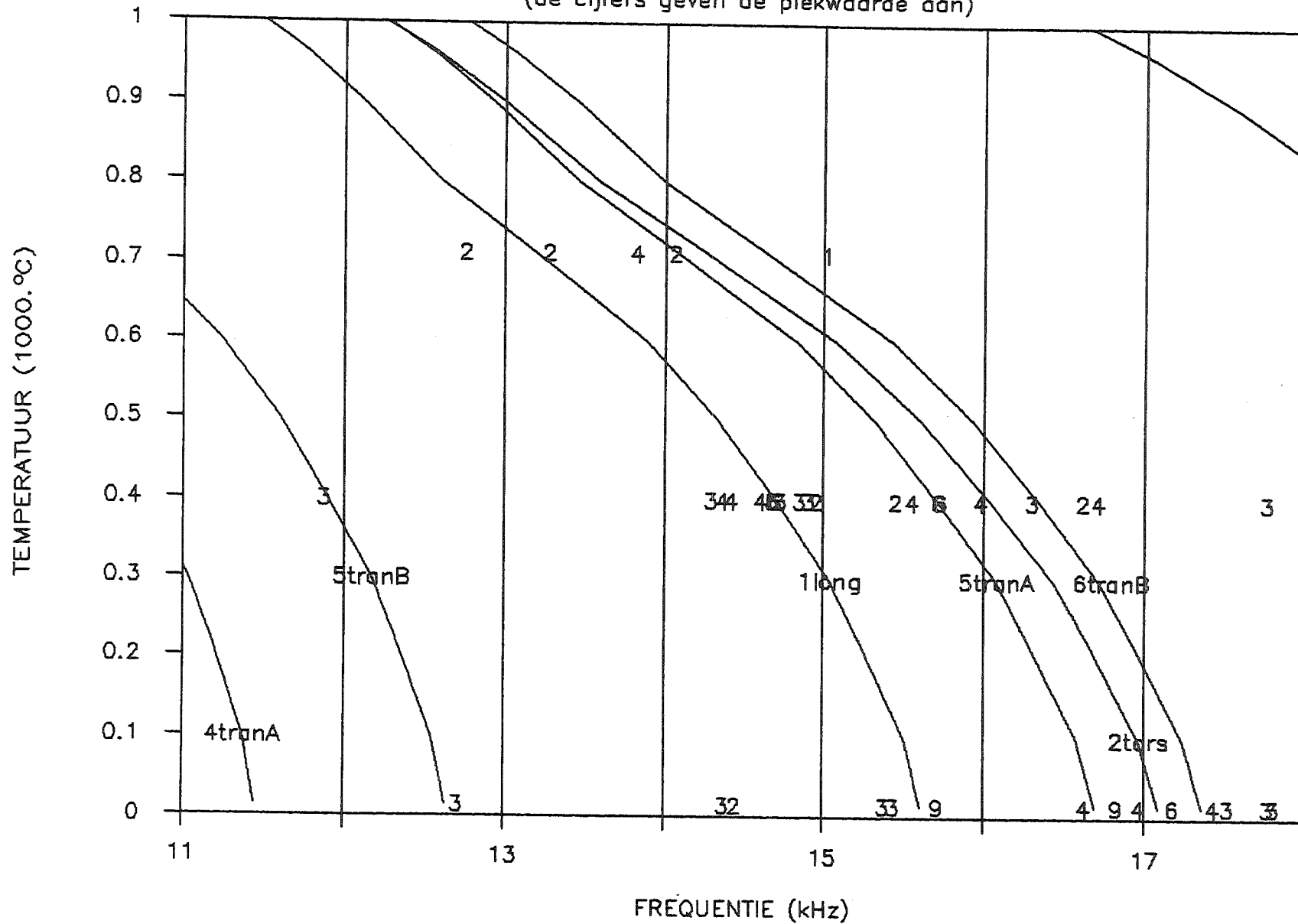
Figuur 52: Resonanties LW4 met St34,II-verwachting

(de cijfers geven de piekwaarde aan)



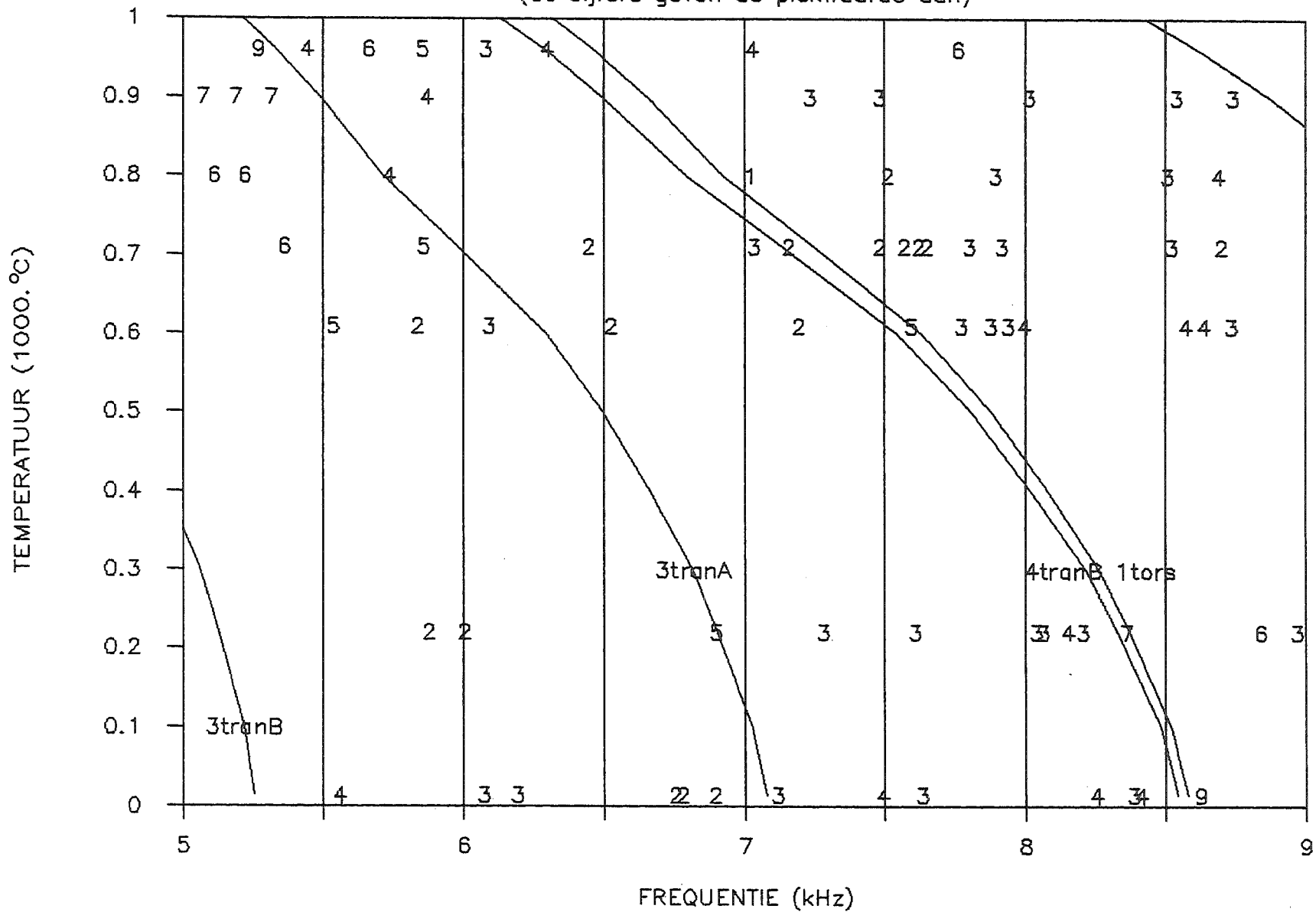
Figuur 53: Resonanties LW4 met St34,II-verwachting

(de cijfers geven de piekwaarde aan)



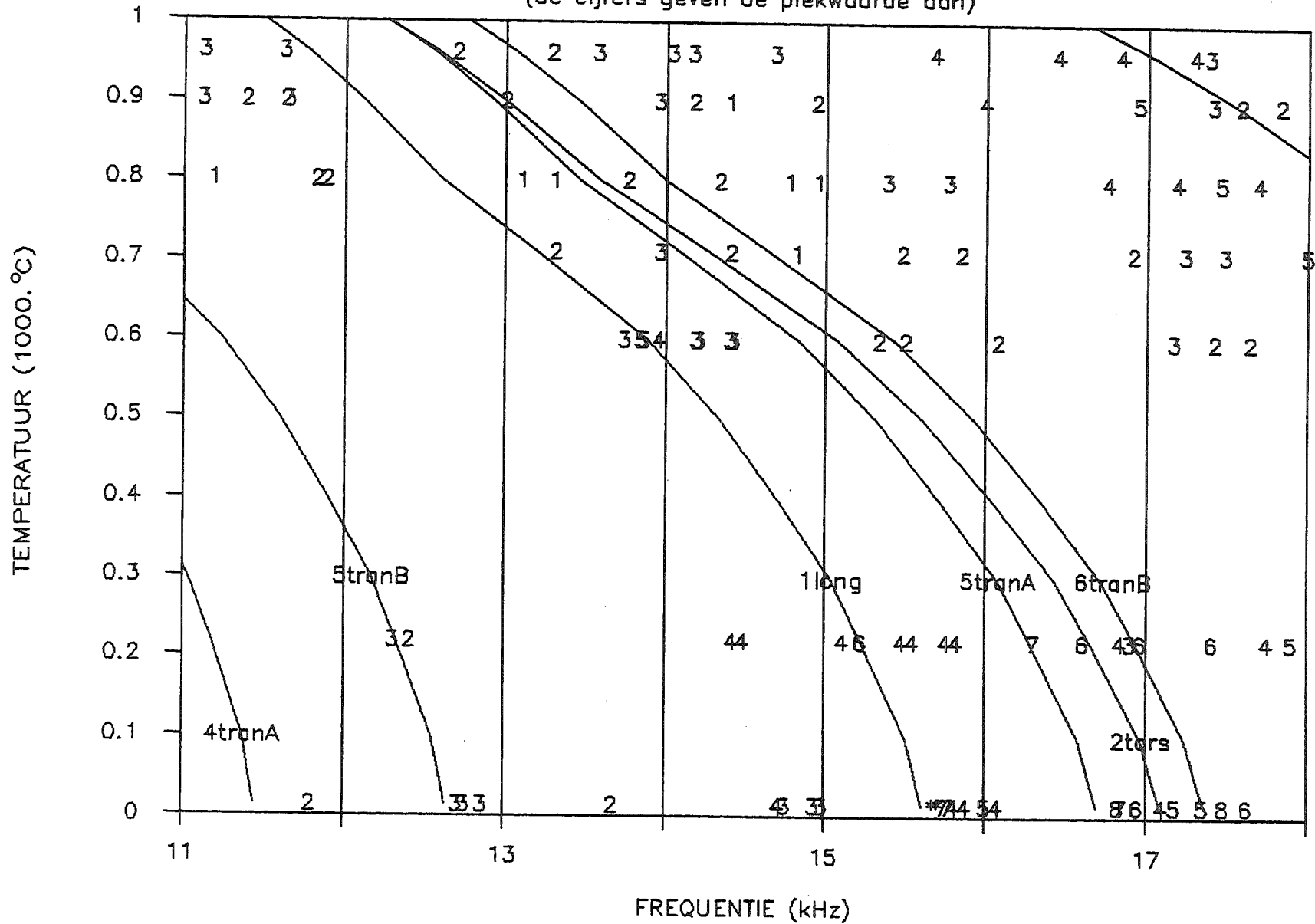
Figuur 54: Resonanties LW5 met St34,II-verwachting

(de cijfers geven de piekwaarde aan)



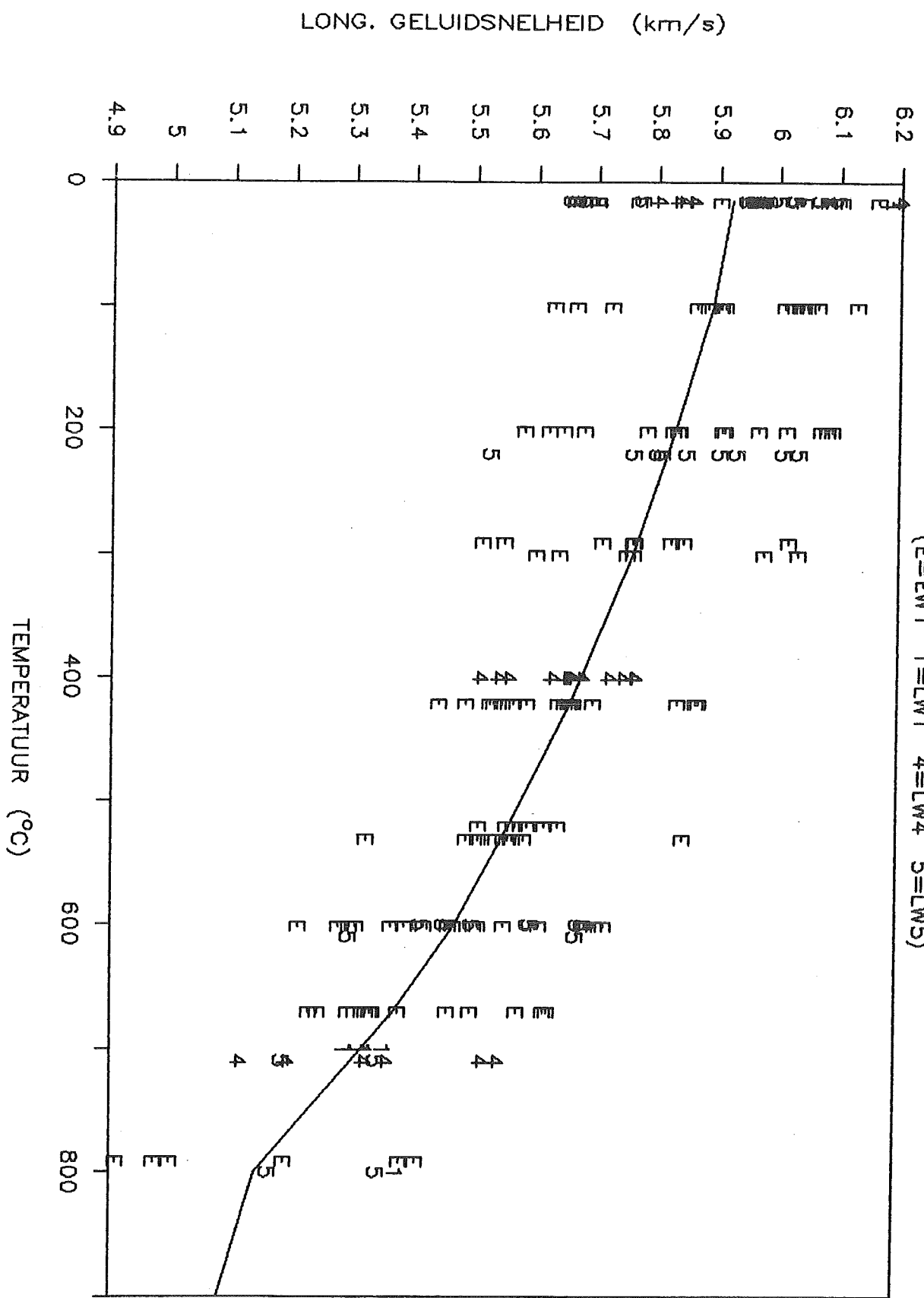
Figuur 55: Resonanties LW5 met St34,II-verwachting

(de cijfers geven de piekwaarde aan)



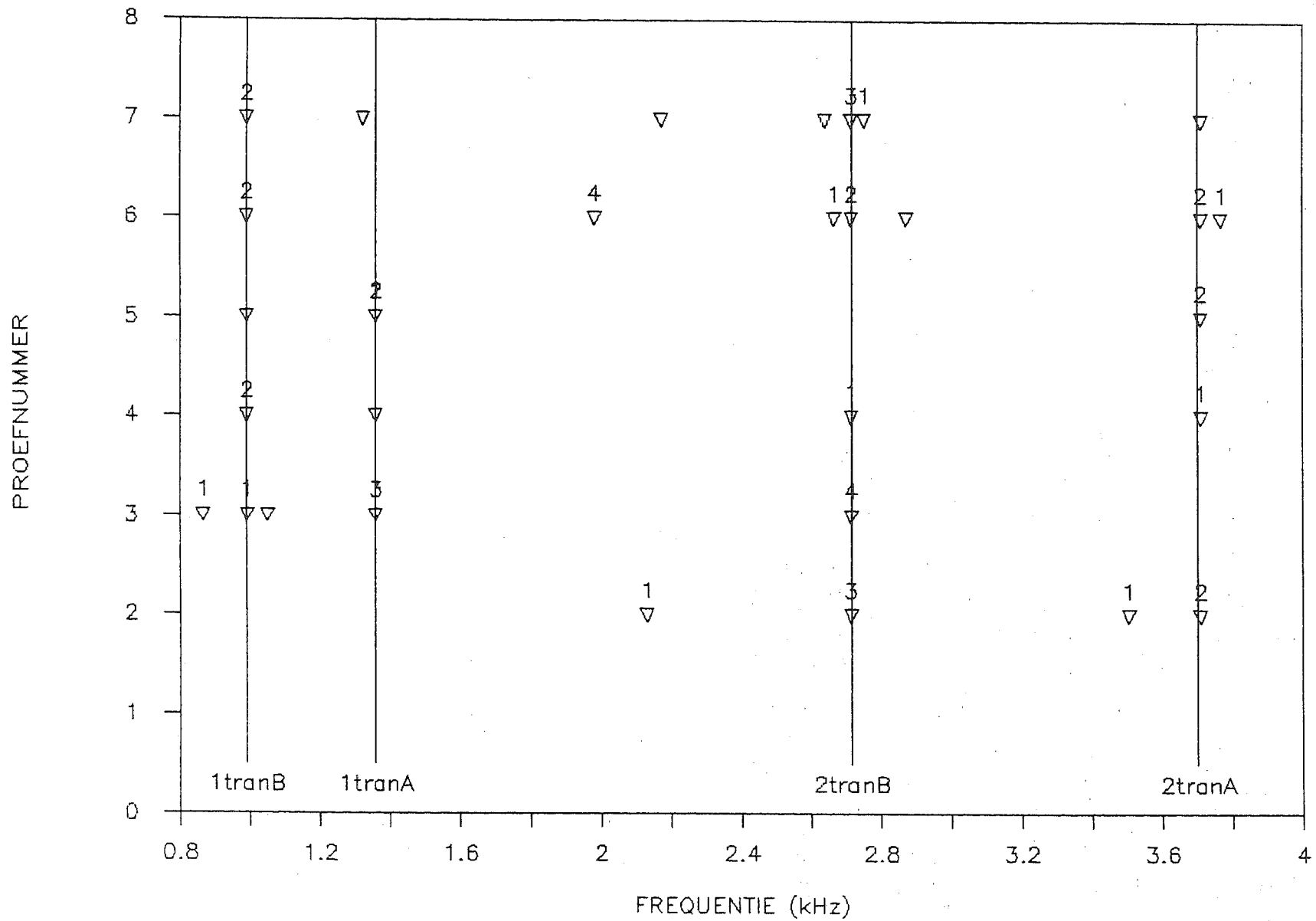
Figuur 56: Punten in 5%-interval rond St34—curve

(E=EW1 1=LW1 4=LW4 5=LW5)

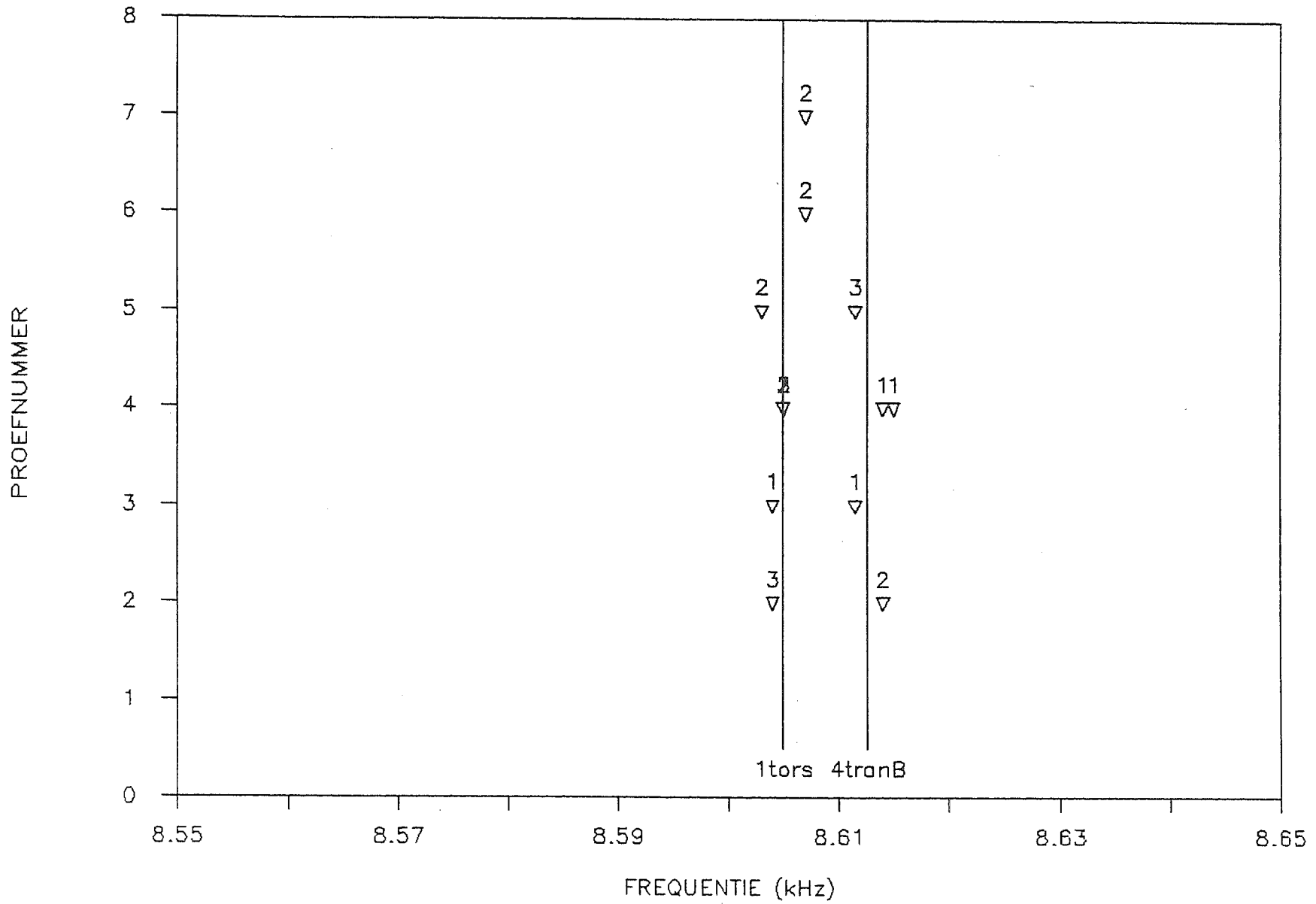




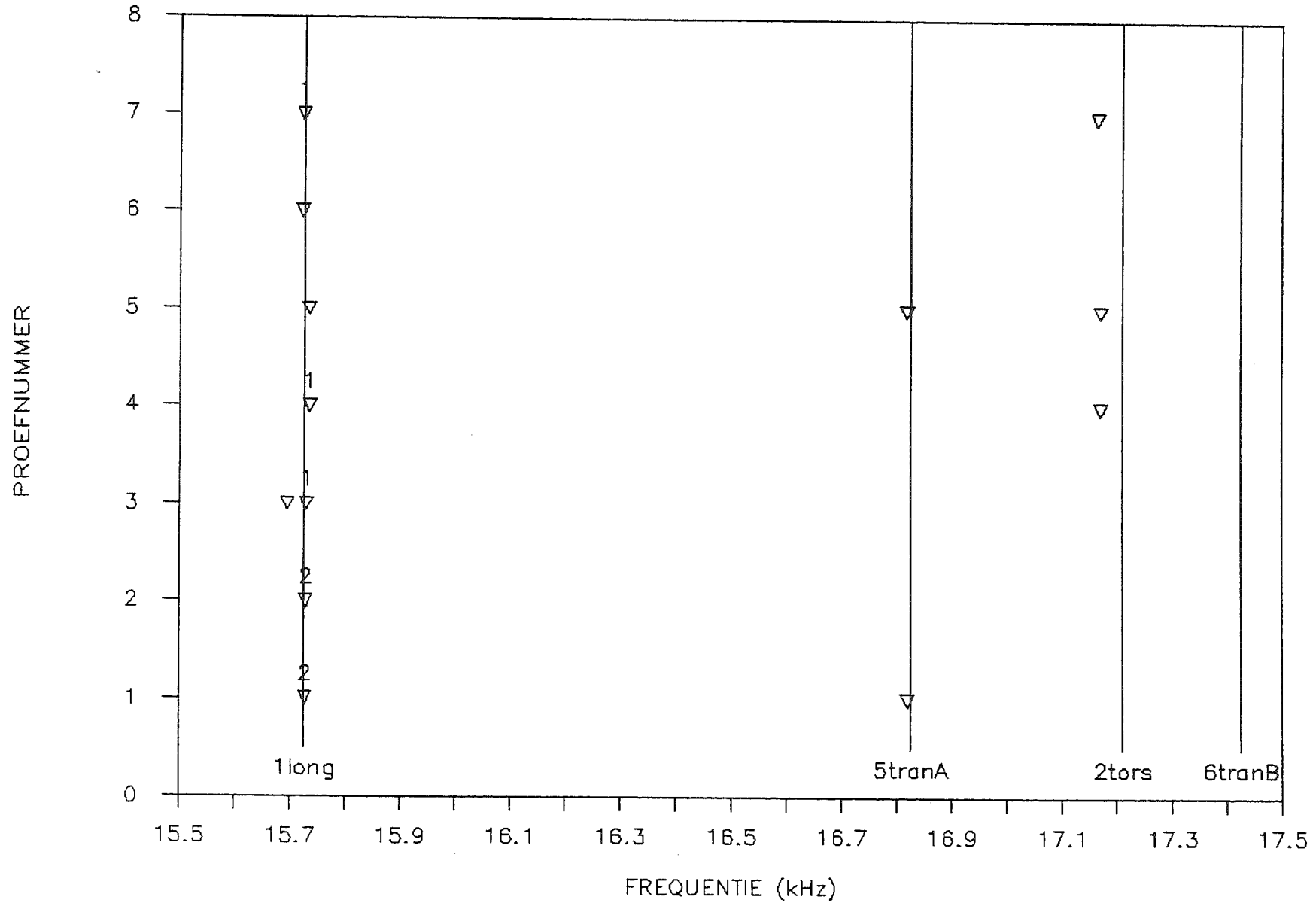
Figuur 57: Resonanties bij kamertemperatuur (LW6)



Figuur 58: Resonanties bij kamertemperatuur (LW6)



Figuur 59: Resonanties bij kamertemperatuur (LW6)



## APPENDICES

- A Materiaalsamenstelling
- B Geluidsdrukafname door bundelspreiding
- C De temperatuurafhankelijkheid van  $c_L$ ,  $c_T$  en
- D Correctiefactoren t.b.v. elastomatproeven
- E Invloed van T op de staafafmetingen
- F Details van de opstelling voor lasbadonderzoek
- G Staafafmetingen en staafmassa's
- H Waarnemingen EW1
- I Methode van piekwaardeberekening
- J  $\alpha$ -waarden voor EW1, LW5 en LW6
- K Berekende  $c_L$ -waarden van LW1, LW4, LW5 en EW1
- L Waarnemingen en resultaten van LW6

Appendix A: Materiaalsamenstelling

Het proefmateriaal bestond uit continu-gegoten en normaal-gegloeid Fe510 Nb. Het materiaal, dat afkomstig was uit één ovencharge, was in twee dikten door Hoogovens B.V. ter beschikking gesteld (25 en 50 mm). In onderstaande tabel wordt de samenstelling gegeven van de ovenlading, alsmede het gehalte van een vijftal elementen in de twee platen. Er zijn kleine verschillen tussen lading- en plaat-analyse.

Tabel A1: Analyse van Fe510 Nb

	oven- lading	25 mm plaat	50 mm plaat
% C	0,177	0,16	0,17
% Mn	1,513	1,55	1,54
% Si	0,465	0,47	0,49
% P	0,016	0,014	0,015
% S	0,010	0,006	0,005
% Al	0,042		
% Nb	0,033		
% N	0,007		
% Cu	0,010		
% Si	0,004		
% Cr	0,028		
% Ni	0,031		
% Mo	0,001		

Appendix B: Geluidsdrukafname door bundelspreiding

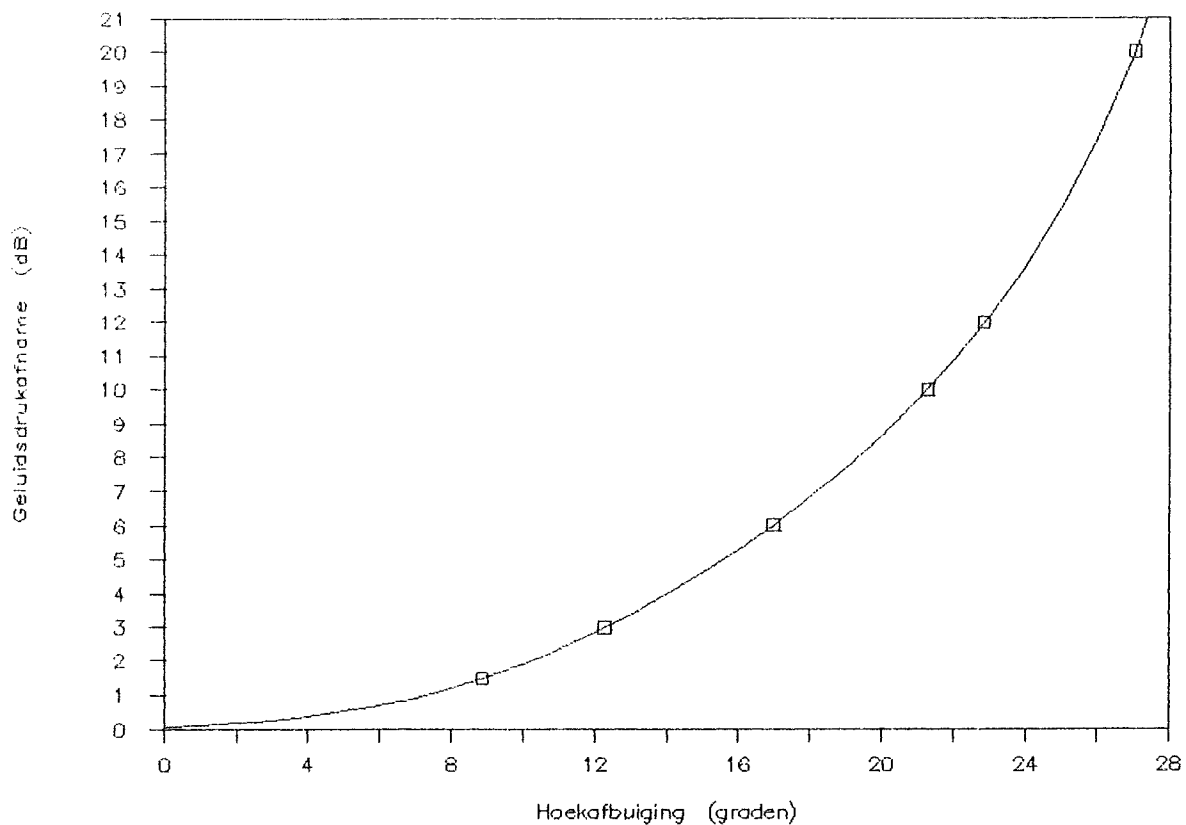
In de Fraunhoferzone treedt bundelspreiding op. In 2.1.1 werden de formules 11, 12 en 13 gegeven, waarmee zowel de afname van de geluidsdruk bij toenemende afstand tot de taster (afbuiging nul), als onder een bepaalde afbuighoek berekend kunnen worden. Voor de bepaling van het effect van de afbuighoek met formule 13 zijn de k-waarden uit tabel B1 nodig.

Tabel B1: k-waarden uit  
Krautkrämer [7]

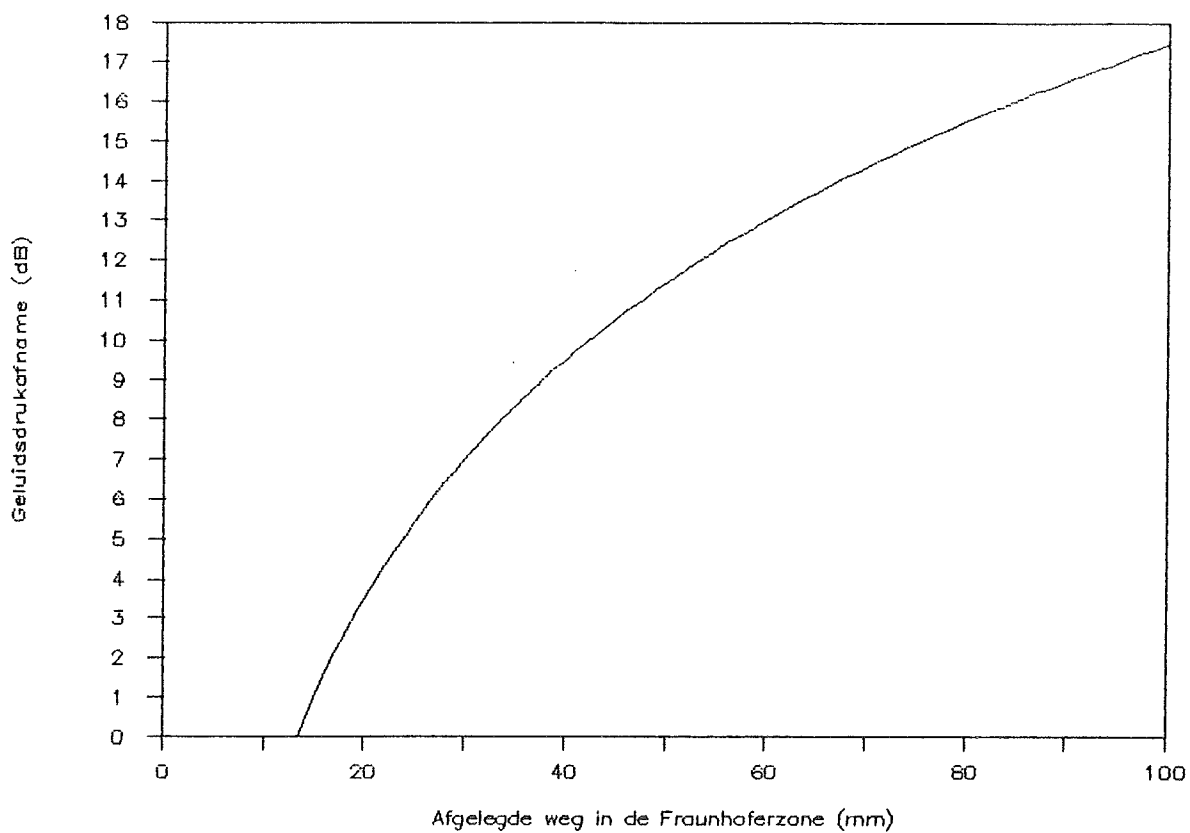
Geluidsdruk		k
(%)	( $\Delta$ dB)	
84	-1,5	0,37
71	-3,0	0,51
50	-6,0	0,70
32	-10,0	0,87
25	-12,0	0,93
10	-20,0	1,09
0	- $\infty$	1,22

De afname van de geluidsdruk t.g.v. de twee genoemde effecten werd berekend voor de proeven met de rechte taster en het materiaal Fe510 Nb. De resultaten zijn grafisch weergegeven in de figuren B1 en B2. De punten in de grafiek voor de hoekafbuiging (fig. B1) zijn afkomstig van de getabelleerde k-waarden. In figuur B2 staat langs de x-as de afgelegde weg in de Fraunhoferzone uit; de afstand tot de taster wordt verkregen door er de lengte van de Fresnelzone (4,26 mm) bij op te tellen. Bij de berekeningen werd gebruik gemaakt van de volgende gegevens:

Kristaldiameter  $d$ : 6,35 mm  
 Tasterfrequentie  $f$ : 2,25 MHz  
 Geluidsnelheid  $c_L$ : 5960 m/s



Figuur B1: Geluidsdrukafname in staal door bundelspreiding, bij gebruik van de rechte microtaster bij kamertemperatuur, als functie van de hoekafbuiging.



Figuur B2: Geluidsdrukafname in staal door bundelspreiding, bij gebruik van de rechte microtaster bij kamertemperatuur, als functie van de afgelegde weg in de Fraunhoferzone.

Appendix C: De temperatuurafhankelijkheid van  $c_L$ ,  $c_T$  en  $\nu$ .

De pogingen om achter het verband tussen de longitudinale en transversale geluidssnelheid van Fe510 Nb en de temperatuur te komen, beperkte zich in eerste instantie tot speurwerk in de literatuur. Kurz en Lux [8] gaven een gedetailleerde grafiek voor  $c_L$  van vier staalsoorten (fig. C1). Met uitzondering van het austenitisch chroom-nikkelstaal is de fasenovergang van  $\alpha$  naar  $\tau$  telkens duidelijk aanwezig; ook de overgang naar de vloeibare fase komt goed naar voren door de sterke daling van de longitudinale geluidssnelheid in het betreffende temperatuurgebied. In Papadakis e.a. [9] werden  $c_L$  en  $c_T$  van SAE 52100 gegeven als functie van  $T$  (fig. C2 en C3). De metingen waren niet alleen bij opwarming maar ook tijdens afkoeling verricht, hetgeen een soort hystereselus opleverde tussen de  $A_1$ - en  $A_{CM}$ -temperatuur van de staalsoort. Tenslotte staan in figuur C4  $c_L(T)$ - en  $c_T(T)$ -krommen voor SAE 4340 uit Lynnworth en Carnevale [10]. Hierin staan geen meetpunten en de curven maken een sterk gestileerde indruk.

Ter vergelijking werden de gevonden curven in twee grafieken samengevoegd: één voor de longitudinale geluidssnelheid (fig. C5) en één voor de transversale (fig. C6). In figuur C6 is ook een zelf berekende curve voor St34,II geschetst; hierop wordt nog nader ingegaan.

De poissonconstante  $\nu$  van een materiaal blijkt uitsluitend bij één temperatuur te gelden. Vanwege zijn rol in de berekening van de longitudinale geluidssnelheid uit de staafresonanties (form. 24 en 25), was het gewenst om het verband tussen  $\nu$  en  $T$  te kennen. Alleen Carnevale e.a. [11] gaven hierover informatie (voor de legering SAE 4340).

Als basis voor de puntenclustering in 3.2.4 waren er oriëntatiekrommen nodig die zoveel mogelijk op die van Fe510 Nb moesten lijken. Op grond van de materiaalsamenstelling werd gekozen voor de curve(n) van St34,II. Een curve van de transversale geluidssnelheid als functie van de temperatuur was niet gegeven voor dit materiaal. Daarom werd besloten om de longitudinale kromme met behulp van de poissonconstante van SAE 4340 om te rekenen



naar een transversale. Hierbij werd aangenomen dat het verloop van de poissonconstante met de temperatuur niet sterk van de samenstelling afhankelijk was. Voor de berekening werd gebruik gemaakt van de formules 1 en 2. Hieruit volgde:

$$c_t^2 = \frac{(1-2\nu)}{2 \cdot (1-\nu)} \cdot c_l^2$$

De door Carnevale e.a. [11] gevonden meetpunten van de temperatuurafhankelijke poissonconstante werden gebruikt voor een polynoombenadering, zodat  $\nu$  bij elke temperatuur snel berekend kon worden. Gevonden werd:

$$\nu = 0,2895 + 0,00278 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,0327 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 0,0347 \cdot 10^{-9} \cdot T^3$$

De meetpunten werden samen met de curve van de polynoombenadering in figuur C7 geplaatst. Als controle op de aanname dat het  $\nu$ -verloop niet erg samenstellingsafhankelijk is, werden enkele waarden van SAE 52100 in de grafiek geplaatst. Omdat deze niet gegeven waren, werden ze berekend uit de meetpunten in de figuren C2 en C3. Uit de formules 1 en 2 valt ook de volgende relatie af te leiden:

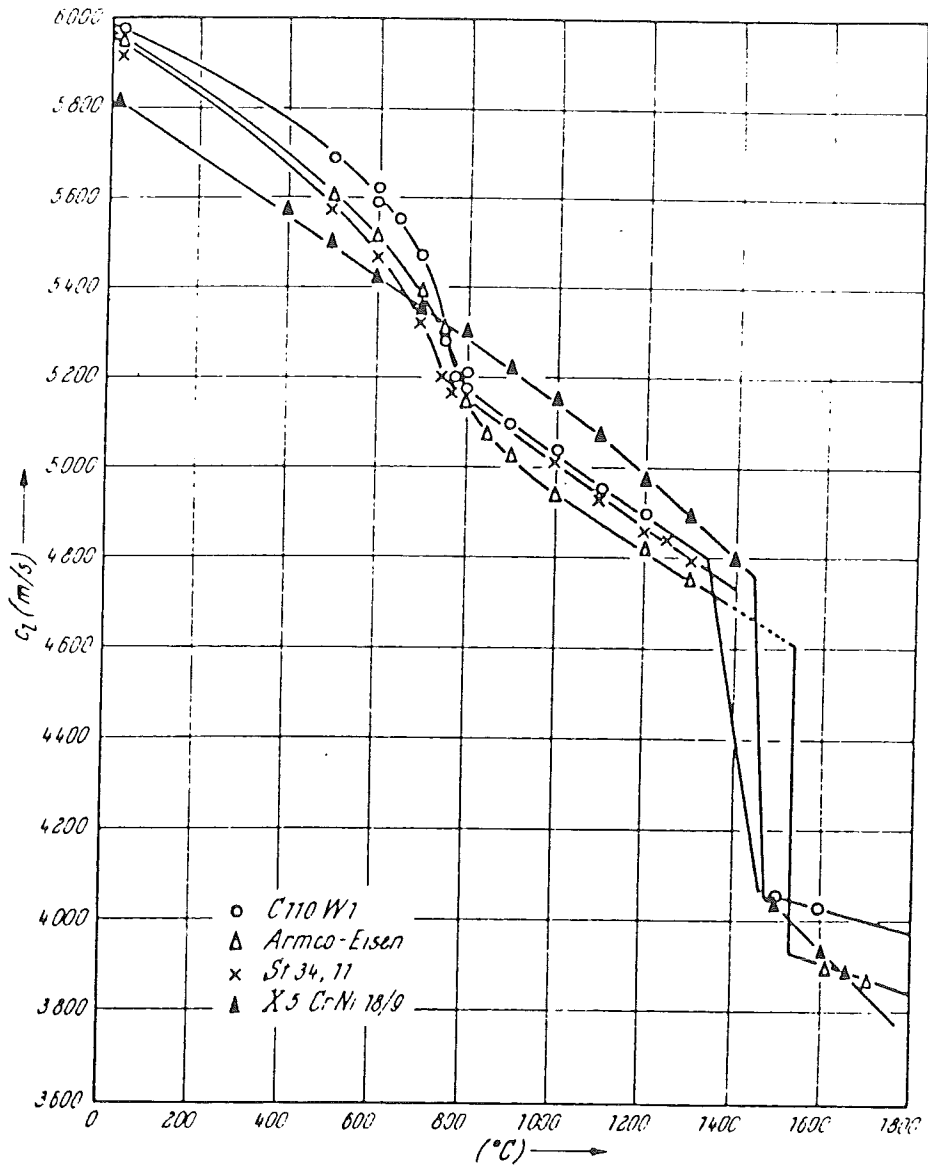
$$\nu = \frac{(1-\beta)}{(1-2\beta)} \quad \text{met} \quad \beta = \frac{1}{2} \cdot (c_L/c_T)^2$$

Opvallend is de schommeling van de  $\nu$ -waarden van 52100 om de curve van 4340. De aanname dat voor het verloop van de poissonconstante van St34,II zonder bezwaar die van 4340 genomen kan worden, komt hierdoor op losse schroeven te staan. Een afwijking van 0,01 in  $\nu$  ( $\approx 3$  procent) geeft een afwijking in  $c_T$  van dezelfde orde grootte.

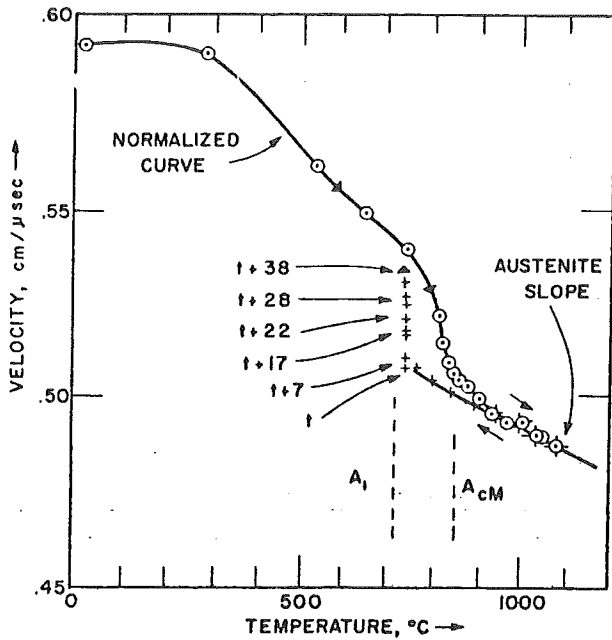
Tenslotte worden in de volgende tabel de samenstellingen van de in deze appendix genoemde staalsoorten gegeven.

Tabel C1: Samenstellingsgrenzen van enkele legeringen (in %)

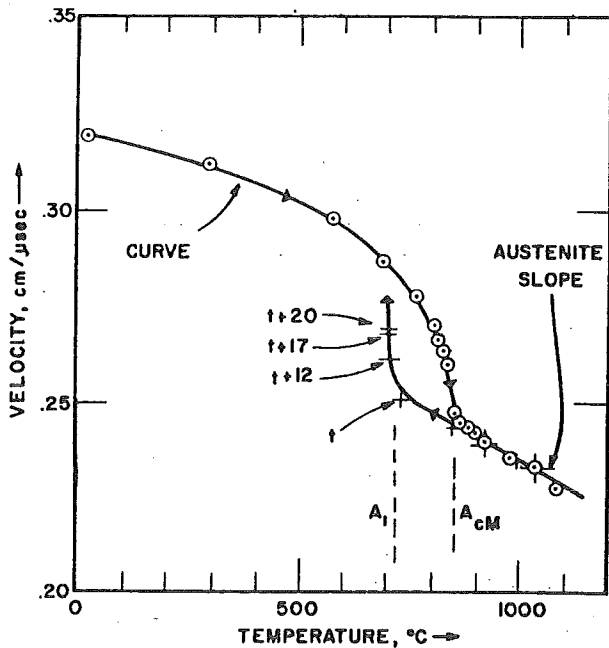
	SAE 4340	SAE 52100	St34,II	C110 W1	X5CrNi18.10
C	0,36-0,44	0,98-1,1	0,09-0,15	0,95-1,04	<0,06
Mn	0,55-0,80	0,25-0,45	0,25-0,50	0,15-0,25	<2,0
Si	0,15-0,30	0,15-0,30	0,17-0,37	0,15-0,30	<0,8
P			<0,045	<0,020	<0,045
S			<0,050	<0,020	<0,030
Cr	0,60-0,90	1,3 -1,6		<0,20	17-19
Ni	1,65-2,00			<0,20	9-11,5
Mo	0,2 -0,3				



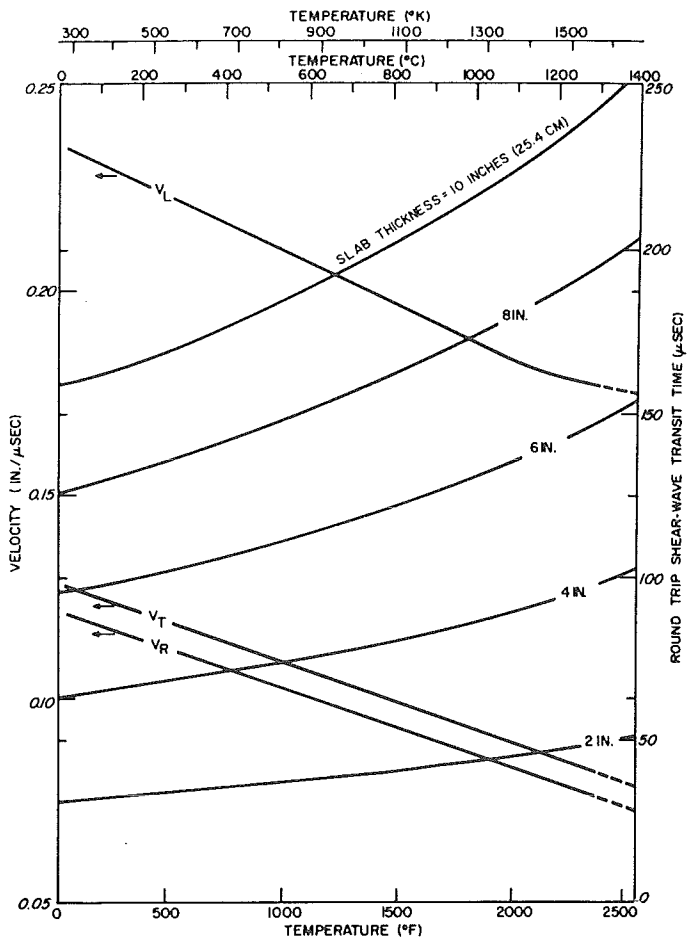
Figuur C1: De longitudinale geluidsnelheid van een viertal staalsoorten als functie van de temperatuur; onder de vier bevindt zich de curve van St34, II (Kurz en Lux [8]).



Figuur C2: De longitudinale geluidsnelheid van SAE 52100; de plustekens geven de waarnemingen bij afkoeling weer (Papadakis e.a. [9]).

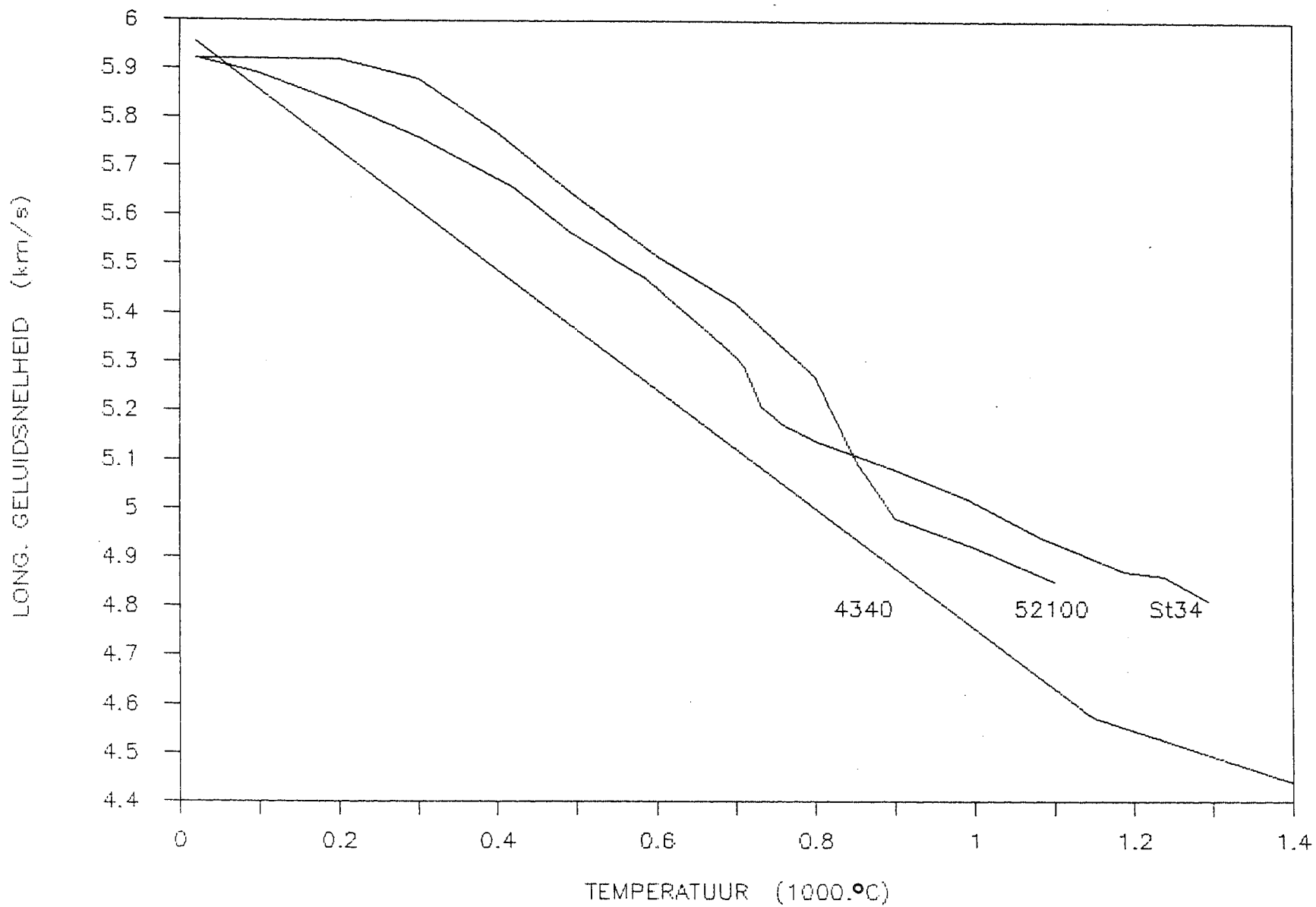


Figuur C3: De transversale geluidsnelheid van SAE 52100; de plustekens geven de waarnemingen bij afkoeling weer (Papadakis e.a. [9]).

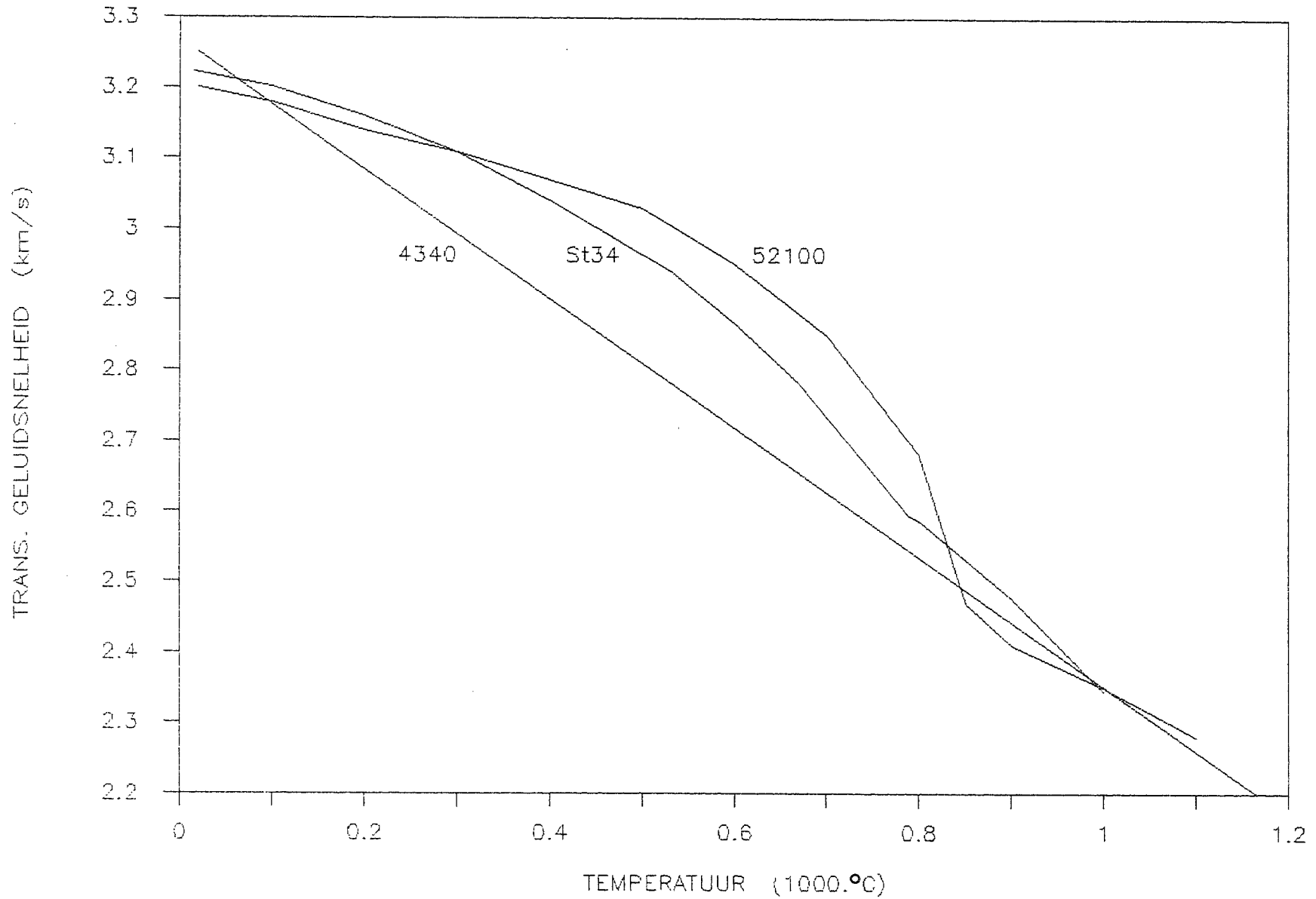


Figuur C4: In deze figuur staan onder meer de longitudinale ( $v_L$ ) en transversale ( $v_T$ ) geluidsnelheden uit tegen de temperatuur voor SAE 4340 (Lynnworth en Carnevale [10]).

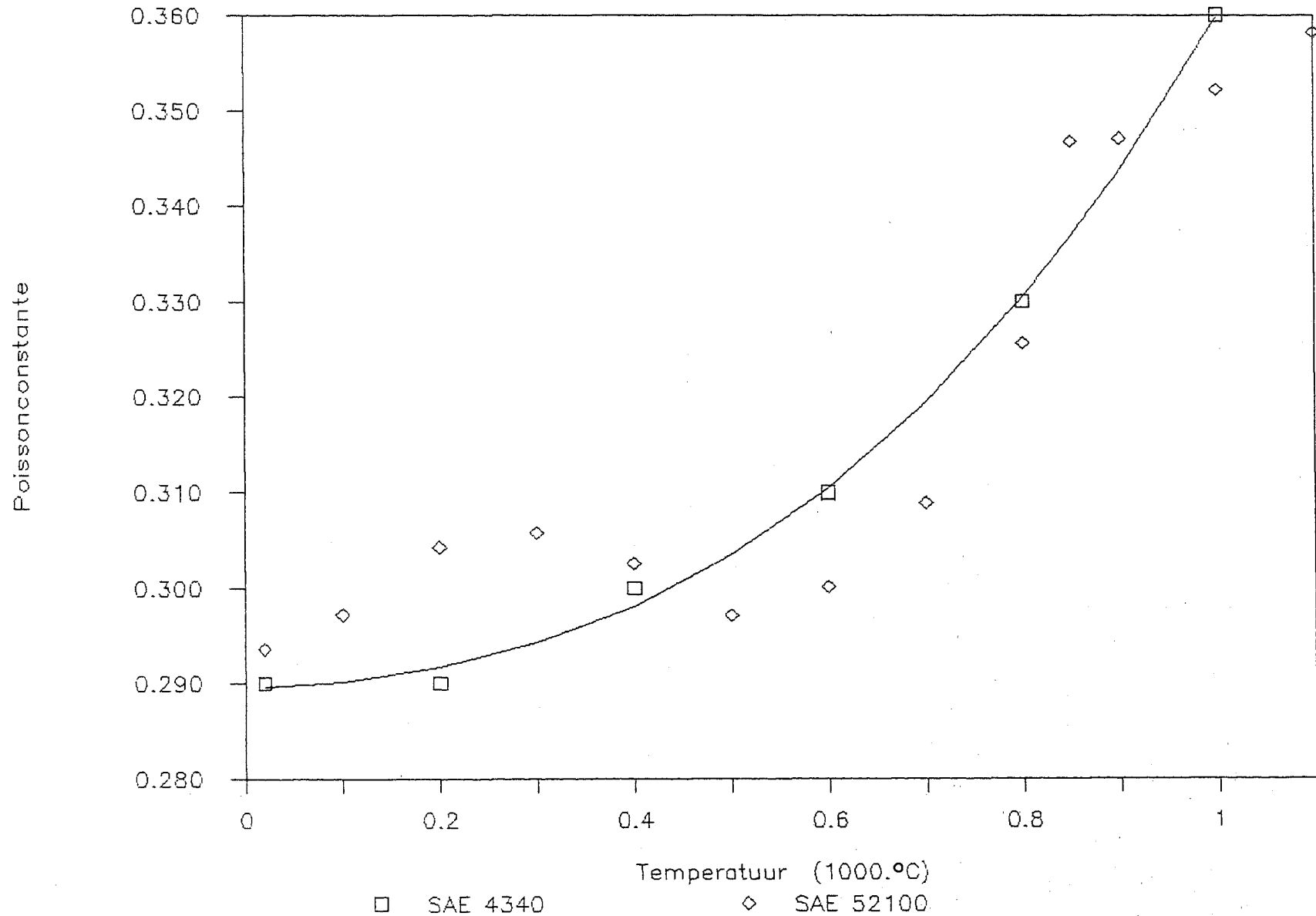
Figuur C5: De longitudinale geluidsnelheden van SAE 4340, SAE 52100 en St34,II als functie van de temperatuur.



Figuur C6: De transversale geluidsnelheden van SAE 4340, SAE 52100 en (een benadering van) St34,II als functie van de temperatuur.



Figuur C7: De constante van Poisson bij verschillende temperaturen voor SAE 4340 volgens de meetpunten van Carnevale e.a. [11], alsmede een aantal uit figuur C4 berekende punten voor SAE 52100





Appendix D: Correctiefactoren t.b.v. elastomatproeven

Formule 25 voor transversale staaftrillingen in 2.2 bevat een tweetal van het golfgetal  $p$  afhankelijke constanten:  $m_p$  en  $K_p$ . De waarden van  $m$  voor  $p=1$  (grondtrilling) tot  $p=6$  worden gegeven door tabel D1.

Tabel D1:  $m_p$ -waarden

$p$	$m_p$
1	4,7300
2	7,8532
3	10,9960
4	14,1372
5	17,2788
6	20,4203

De correctietermen voor de eindigheid van de staaf lengte gelden alleen voor staven met rechthoekige doorsnede; hierin is  $a$  de hoogte van de liggende staaf. De algemene formule is:

$$K_p = 1 + \frac{a^2}{l^2} \cdot (c_1 + c_2 \cdot (1+\nu)) + c_3 \cdot (1+\nu) \cdot \frac{a^2}{l^2}$$

Tabel D2: Constanten voor K-formule

$p$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
1	4,12	2,46	-8,4
2	9,08	9,20	-64
3	15,6	19,78	-244
4	23,7	34,4	-666
5	33,5	52,8	-1486
6	45,0	75,2	-2898

Bij de berekening van  $c_T$  uit de torsietrilling (26) wordt een correctieterm gebruikt i.v.m. de niet-circelvormige doorsnede van de proefstaaf. Voor een aantal dikte/breedte-verhoudingen werden

de  $K_{tors}$ -waarden gegeven; deze zijn onder "lit.-waarde" geplaatst in tabel D3. Het verband tussen  $K_{tors}$  en het quotiënt  $a/b$  (met  $a > b$ ) bleek redelijk weergegeven te kunnen worden door een vierdegraads-polynoombenadering:

$$K_{tors} = 0,385 + 1,36 \cdot (a/b) - 1,14 \cdot (a/b)^2 + 0,353 \cdot (a/b)^3 - 0,039 \cdot (a/b)^4$$

Tabel D3:  $K_{tors}$ -waarden

a/b	lit. waarde	benadering	verschil
1,00	0,918	0,919	0,001
1,20	0,905	0,905	-0,001
1,40	0,871	0,873	0,003
1,60	0,829	0,833	0,005
1,80	0,784	0,789	0,006
2,00	0,741	0,745	0,005
2,50	0,642	0,652	0,016
3,00	0,562	0,577	0,026

### Appendix E: Invloed van T op de staafafmetingen

Bij een temperatuurverhoging zullen de staafafmetingen groter worden. Bij de elastomatproeven speelde dit onder meer een rol bij de geluidsnelheidsberekeningen in de formules 24, 25 en 26. Om hiervoor te kunnen corrigeren werd gezocht naar gegevens over de lineaire uitzettingscoëfficiënt  $\alpha$  bij verschillende temperaturen. Er werden in Smithells [12] een zestal waarden gevonden voor EN 14 (BS 150M19); deze staan in figuur E1. Voor het gebied van kamertemperatuur tot 720°C werd door kwadratische interpolatie een derde machtspolynoom ontwikkeld. Van 720°C tot 800°C en van 800°C tot 1000°C moest met een lineaire vergelijking volstaan worden. De formules volgen hieronder en voor de grafische presentatie wordt nogmaals naar figuur E1 verwezen.

$$15^{\circ}\text{C} - 720^{\circ}\text{C}: \alpha = 11,044 \cdot 10^{-6} + 9,056 \cdot 10^{-9} \cdot T - 4,895 \cdot 10^{-12} \cdot T^2$$

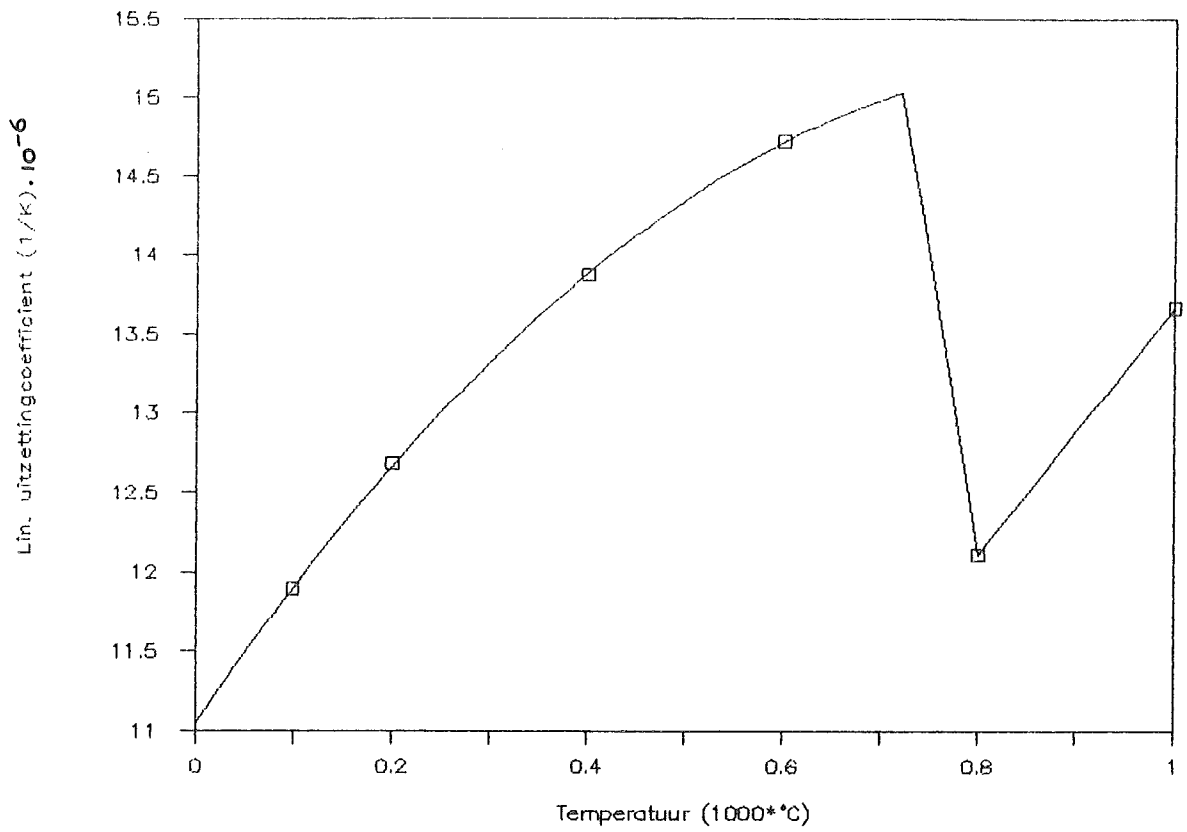
$$720^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}: \alpha = 41,31 \cdot 10^{-6} + 36,5 \cdot 10^{-9} \cdot T$$

$$800^{\circ}\text{C} - 1000^{\circ}\text{C}: \alpha = 5,87 \cdot 10^{-6} + 7,8 \cdot 10^{-9} \cdot T$$

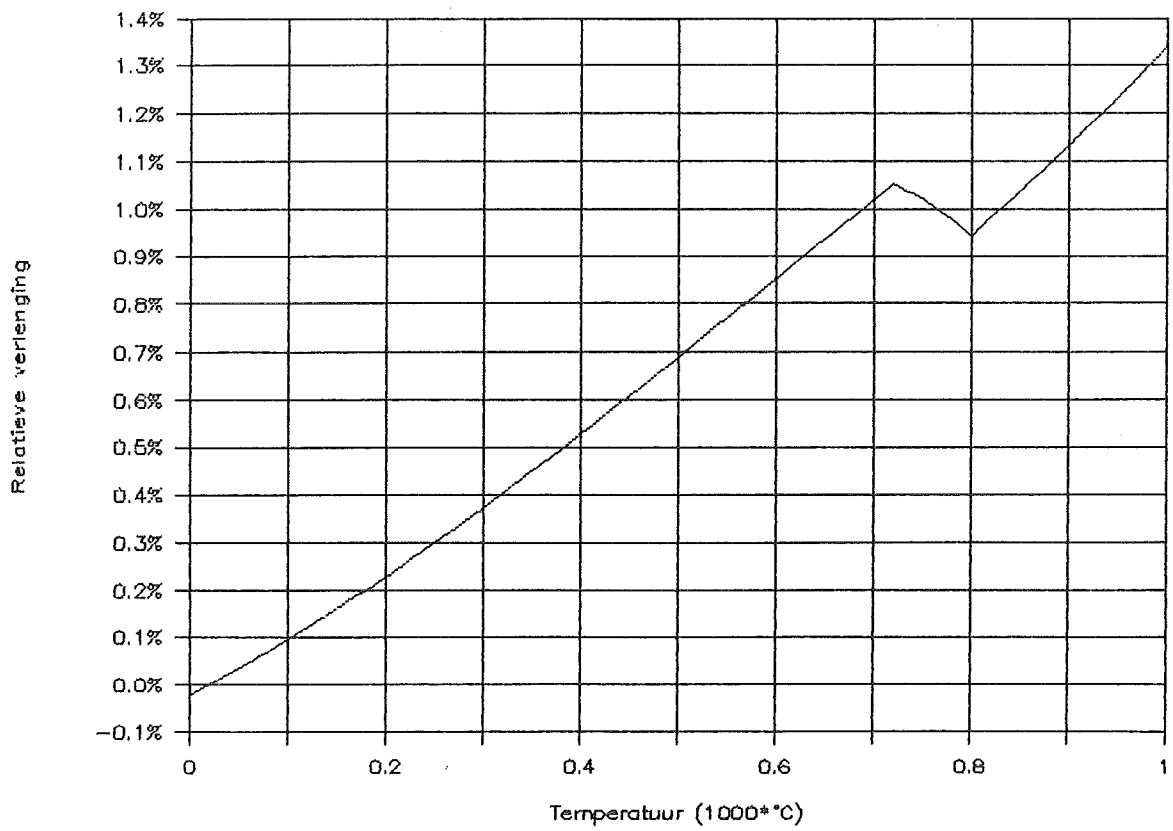
De relatieve verlenging van een staafafmeting werd verkregen door  $\alpha$  te vermenigvuldigen met de staaftemperatuur; de resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur E2.

Tabel E1: Samenstelling van EN 14

	normgrenzen
% C	0,15 - 0,23
% Mn	1,30 - 1,70
% Si	0,10 - 0,40
% P	<0,050
% S	<0,050



Figuur E1: Lineaire uitzettingscoëfficiënt van EN 14 als functie van de temperatuur.



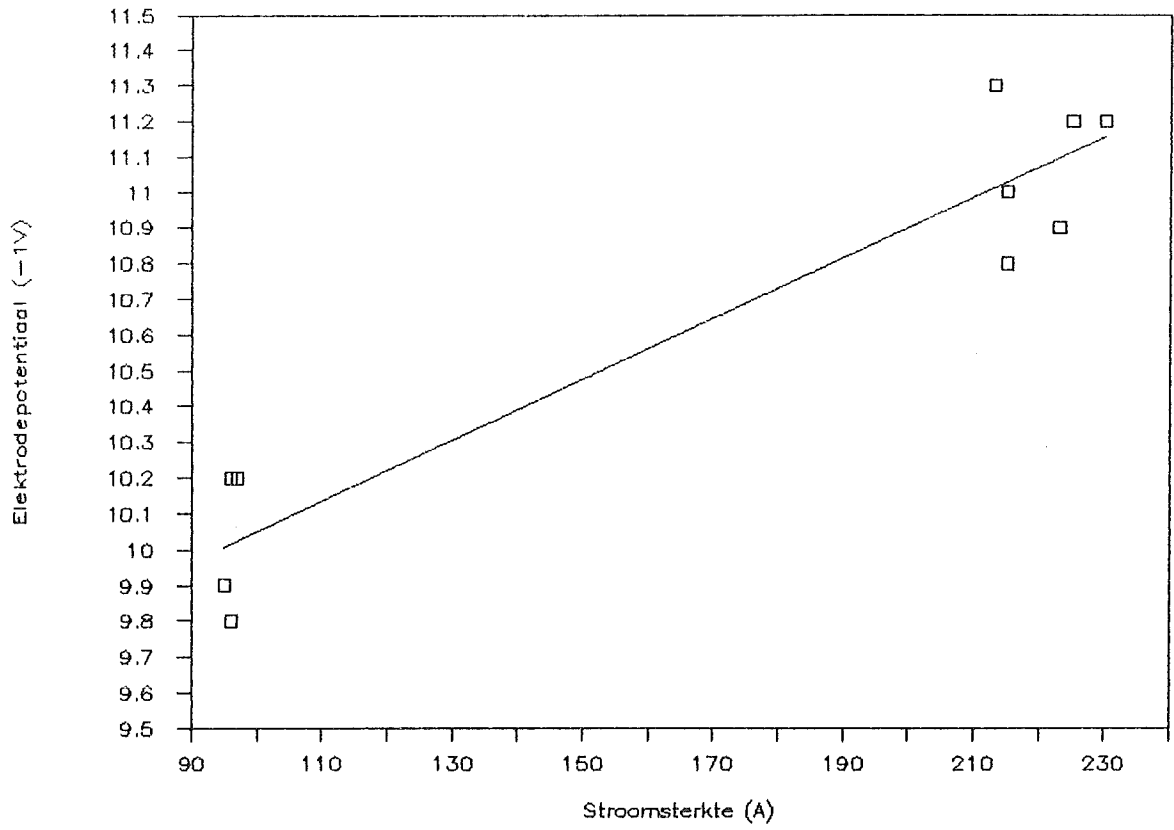
Figuur E2: Relatieve verlenging van een proefstaaf van EN 14 als functie van de temperatuur

Appendix F: Details van de opstelling voor lasbadonderzoek

Er werd gebruik gemaakt van een Miller lastransformator die ondermeer voor het TIG-lasproces toegerust was. Hij stond ingesteld op een maximum stroomsterkte van 250 A; de stroomsterkte I was traploos regelbaar van tien tot honderd procent van de maximumwaarde. Bij een regeling van veertig tot honderd procent van  $I_{\text{max}}$ , bleek het verband tussen I en de elektrodepotentiaal U vrijwel lineair te zijn. Deze conclusie werd getrokken uit een viertal metingen, die waren uitgevoerd m.b.v. de op de Miller aanwezige U- en I-meter. Omdat getwijfeld werd aan de nauwkeurigheid van deze apparaten, werd tijdens een aantal proeven het stroom- en potentiaalverloop nauwkeurig vastgelegd. De gemiddelde resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur F1 voor vier metingen op 40% ( $\cong$  100 A) en zeven op 80% ( $\cong$  200 A). Zowel in de gemiddelde I als in de gemiddelde U trad een flinke spreiding op. Bij een instelling op 80% van  $I_{\text{max}}$  was de gemiddelde stroomsterkte ongeveer 220 A bij een elektrodepotentiaal van -11,1 V. Als in het verslag een waarde van 200 A genoemd wordt, dan is dat dus feitelijk onjuist. Vanwege de geringe invloed van een dergelijke afwijking op de resultaten van het oriënterende lasbadonderzoek, werd er verder geen aandacht aan geschonken. Tenslotte volgen hier de overige lasparameters:

Argonflow:	5 liter/min
Elektrodemateriaal:	wolfraam
Elektrodetophoek:	30° (flinke afwijking mogelijk)
Elektrodediameter:	3,2 mm
Cupdiameter:	9 mm
Uitsteeklengte:	ca. 3 mm
Booglengte:	3 mm (bij de meeste proeven)

De ultrasoonpulsgever en -ontvanger was een USIP 11 van de firma Krautkrämer. Voor de proeven met de rechte taster (3.2.2) was het meetbereik ingesteld op 100 mm, en de schakelaar voor de impulsherhaling op x1; de bij deze combinatie behorende herhalingsfrequentie was 500 Hz. Bij de ijking moesten twee potmeters ingesteld worden: die voor de calibratie van de x-as werd ingesteld op 5,14 en de potmeter die voor de verplaatsing van het nulpunt diende, kwam op 4,54 te staan. Met de USIP konden drie soorten pulsen naar de tasters gestuurd worden. Zonder uitzondering werd voor stand drie gekozen, die de snelste stijgtijd had. Het was ook mogelijk om de amplitude van de puls te regelen; er werd hier meestal van de in de gebruiksaanwijzing aanbevolen stand twee gebruik gemaakt. De versterking van het ontvangen signaal varieerde tussen 70 en 80 dB. De ruisonderdrukker stond meestal maximaal (stand vijf). Voor experimenten met de hoektaster (3.2.6) was de schaalwaarde-potmeter op 3,55 en de nulpunt-potmeter op 4,89 ingesteld. Het meetbereik was 50 mm en het scoopscherm gaf het gebied van 50 tot 100 mm weer. De impulsherhaling stond nu op  $x\frac{1}{2}$  zodat de herhalingsfrequentie 250 Hz was.



**Figuur F1:** De uit enkele metingen bepaalde elektrode-karakteristiek.

Appendix G: Staafafmetingen en staafmassa's

In de hiernavolgende tabellen zijn de afmetingen en massa's van alle staven vermeld, dit om tot een goede bepaling van de soortelijke massa (s.m.) van Fe510 Nb te kunnen komen. De berekening van de s.m. moet gezien worden als een vorm van dienstverlening aan de geïnteresseerde lezer die E en G uit de gevonden eigentrillingen wil bepalen.

Tabel G1: Dimensies van alle meetstaven

proef	dimensies			afzonderlijke metingen (mm)				
				1	2	3	4	5
LW1	l	(mm)	165,70					
	a	(mm)	7,005	7,005	7,015	7,010	7,005	6,990
	b	(mm)	5,103	5,100	5,100	5,105	5,110	5,100
LW2	l	(mm)	165,63					
	a	(mm)	7,006	7,010	7,000	7,005	7,005	7,010
	b	(mm)	5,114	5,115	5,115	5,110	5,115	5,115
LW3	l	(mm)	165,70					
	a	(mm)	7,003	7,005	6,995	7,000	7,005	7,010
	b	(mm)	5,107	5,100	5,100	5,110	5,110	5,115
LW4	l	(mm)	165,70					
	a	(mm)	7,008	7,015	7,015	7,010	7,000	7,000
	b	(mm)	5,110	5,110	5,110	5,105	5,105	5,120
LW5	l	(mm)	165,75					
	a	(mm)	7,003	7,005	7,005	7,005	7,000	7,000
	b	(mm)	5,117	5,110	5,120	5,125	5,120	5,110
LW6	l	(mm)	165,80					
	a	(mm)	7,010	7,000	7,010	7,015	7,015	7,010
	b	(mm)	5,099	5,095	5,095	5,100	5,105	5,100
EW1	l	(mm)	155,45					
	a	(mm)	7,073	7,080	7,075	7,080	7,065	7,065
	b	(mm)	5,081	5,080	5,075	5,080	5,085	5,085



De lengte werd soms uit één en soms uit twee metingen bepaald (met verschillende schuifmaten). In het laatste geval werd in tabel G1 de gemiddelde waarde weergegeven; door de relatief grote meetfout leek een nadere specificatie niet nodig. De breedte (a) en dikte (b) van de staafjes werden telkens op vijf plaatsen gemeten; de nummers 1 t.e.m. 5 in de tabel geven de meetlocaties in volgorde weer. De gemiddelde waarden van a en b werden onder het kopje 'dimensies' geplaatst.

Tabel G2: Massa en s.m.  
van elk staafje

proef	massa (gram)	s.m. (kg/m <sup>3</sup> )
LW1	46,226	7804
LW2	46,277	7798
LW3	46,214	7798
LW4	46,297	7802
LW5	46,302	7796
LW6	46,218	7799
EW1	43,578	7800

De massabepalingen werden uitgevoerd op een elektronische balans van Mettler; deze was op 0,0001 gram afleesbaar. Achteraf bleek dat bij een asymmetrische plaatsing van de staafjes op de weegtafel, een afwijking van 0,001 gram niet ongewoon was. De gemiddelde soortelijke massa bedraagt 7799,7 kg/m<sup>3</sup> en de standaardafwijking is 2,63. Als aangenomen wordt dat de meetfouten normaal verdeeld zijn, kan de afwijking in het gemiddelde met 95%-betrouwbaarheid op 2,4 kg/m<sup>3</sup> gesteld worden.

Conclusie: de s.m. van Fe510 Nb bedraagt (7800 ± 3) kg/m<sup>3</sup>.

Appendix H: Waarnemingen EW1

Na de vermelding van het serie- en proefnummer volgt een kolom met de gemiddelde temperatuur van de meetserie, afgerond op 10°C (m.u.v. de kamertemperatuur). Daarna volgt de piekwaarde die berekend werd volgens de methode in appendix I. In de kolom met  $f_{re\ddot{e}l}$  staat de waargenomen piekfrequentie vermeld indien er op het scoopscherm een ellips zichtbaar was. Als het quotiënt van de waargenomen en werkelijke frequentie ongelijk was aan één (zie laatste kolom), werd de werkelijke frequentie vermeld.

serie- nummer	proef- nummer	T <sub>gem.</sub>	piek- waarde	f <sub>reëel</sub>	f- ver- houding
3	3	15	4	1038	1
3	4	15	7	1120	1
3	5	15	9	1150	1
3	6	15	4	1206	1
3	7	15	4	1213	1
3	11	15	4	1457	1
3	12	15	6	1472	1
3	13	15	4	1486	1
3	16	15	4	1535	1
3	17	15	6	1549	1
3	18	15	7	1557	1
3	19	15	5	1790	1
3	20	15	5	1818	1
3	21	15	4	1827	1
3	22	15	6	1874	1
3	24	15	8	2069	1
3	26	15	7	2162	1
2	1	15	3	7544	1
2	2	15	4	7870	1
2	3	15	9	8141	1
2	4	15	5	8309	1
2	5	15	5	8645	1
2	6	15	6	9091	1
2	7	15	6	9120	1
2	8	15	6	9154	1
2	11	15	6	9619	1
2	12	15	7	9711	1
1	1	15	3	14294	1
1	2	15	2	14569	1
1	3	15	2	15915	1
1	4	15	3	16020	1
1	5	15	4	16717	1
1	6	15	6	16779	1

serie- nummer	proef- nummer	T <sub>gem.</sub>	piek- waarde	f <sub>reëel</sub>	f- ver- houding
1	7	15	6	16967	1
1	8	15	6	17148	1
1	9	15	2	17318	1
1	10	15	2	17671	1
1	11	15	4	18176	1
1	12	15	5	18234	1
1	13	15	6	18904	1
1	14	15	7	19125	1
1	15	15	2	20711	1
5	1	100	3	7464	1
5	2	100	4	7800	1
5	3	100	6	8045	1
5	4	100	4	8211	1
5	5	100	5	8231	1
5	6	100	5	8580	1
5	7	100	8	8998	1
5	8	100	6	9011	1
5	9	100	5	9067	1
5	10	100	4	9090	1
5	13	100	6	9543	1
5	14	100	11	9606	1
4	1	100	2	14125	1
4	2	100	2	14465	1
4	3	100	1	15467	1
4	4	100	2	15798	1
4	5	100	3	15898	1
4	6	100	5	16510	1
4	7	100	5	16584	1
4	8	100	5	16863	1
4	9	100	4	16936	1
4	10	100	5	17017	1
4	11	100	3	17198	1
4	12	100	2	17645	1
4	13	100	3	17918	1
4	14	100	5	17998	1
4	15	100	5	18057	1
4	16	100	6	18761	1
4	17	100	6	18906	1
4	18	100	2	19145	1
4	19	100	3	19370	1
7	1	200	4	7526	1
7	2	200	6	7854	1
7	3	200	9	7925	1
7	4	200	3	8269	1
7	5	200	4	8627	1
7	6	200	2	8855	1
7	7	200	4	9052	1
7	8	200	4	9117	1
7	10	200	8	9462	1

serie- nummer	proef- nummer	T gem.	piek- waarde	f reëel	f- ver- houding
7	11	200	5	9580	1
7	12	200	2	10852	1
6	1	200	2	13913	1
6	2	200	1	14472	1
6	3	200	2	14690	1
6	4	200	3	15791	1
6	5	200	4	15887	1
6	6	200	6	16295	1
6	7	200	3	16529	1
6	8	200	3	16689	1
6	9	200	5	16822	1
6	10	200	6	17009	1
6	11	200	5	17703	1
6	12	200	2	17877	1
6	13	200	6	18057	1
6	14	200	6	18585	1
6	15	200	4	18734	1
6	16	200	3	18758	1
6	17	200	5	18991	1
6	18	200	3	19114	1
6	19	200	2	20539	1
6	20	200	2	20615	1
9	1	290	4	7333	1
9	2	290	4	7348	1
9	3	290	4	7380	1
9	4	290	4	7722	1
9	5	290	9	7794	1
9	6	290	3	8132	1
9	7	290	4	8502	1
9	8	290	1	8584	1
9	9	290	3	8903	1
9	10	290	4	8960	1
9	12	290	8	9304	1
9	14	290	3	9404	1
9	15	290	5	9439	1
9	16	290	2	9776	1
8	1	300	3	13667	1
8	2	300	2	14506	1
8	3	300	2	15593	1
8	4	300	3	15699	1
8	5	300	3	16011	1
8	6	300	4	16637	1
8	7	300	4	16796	1
8	8	300	2	16979	1
8	9	300	3	17371	1
8	10	300	3	17633	1
8	11	300	5	17852	1
8	12	300	6	18269	1
8	13	300	1	18479	1

serie- nummer	proef- nummer	T <sub>gem.</sub>	piek- waarde	f <sub>reëel</sub>	f- ver- houding
8	14	300	2	18545	1
8	15	300	5	18734	1
8	16	300	5	18785	1
8	17	300	3	18914	1
11	1	420	4	7294	1
11	2	420	2	7434	1
11	3	420	5	7579	1
11	4	420	6	7591	1
11	5	420	5	7635	1
11	6	420	2	8019	1
11	7	420	4	8410	1
11	8	420	5	8454	1
11	9	420	3	8497	1
11	10	420	3	8854	1
11	11	420	3	8904	1
11	12	420	8	9057	1
11	13	420	3	9340	1
11	14	420	2	9668	1
10	1	420	1	13266	1
10	2	420	3	13309	1
10	3	420	2	15142	1
10	4	420	2	15254	1
10	5	420	3	15423	1
10	7	420	7	15594	1
10	6	420	5	15594	1
10	8	420	1	16204	1
10	9	420	3	16471	1
10	10	420	4	16609	1
10	11	420	4	16880	1
10	12	420	6	17695	1
10	13	420	7	17802	1
10	14	420	4	18213	1
10	15	420	3	18239	1
10	16	420	4	18273	1
10	17	420	4	18358	1
10	18	420	3	18404	1
10	19	420	3	18658	1
10	20	420	2	18749	1
12	1	520	3	12976	1
12	2	520	2	13024	1
12	3	520	2	14059	1
12	4	520	4	15059	1
12	5	520	6	15188	1
12	6	520	3	15356	1
12	7	520	3	15416	1
12	8	520	2	16088	1
12	9	520	5	16390	1
12	10	520	3	16524	1
12	11	520	3	16886	1

serie- nummer	proef- nummer	T gem.	piek- waarde	f reëel	f- ver- houding
12	12	520	7	17296	1
12	13	520	5	17372	1
12	14	520	4	17615	1
12	15	520	4	17737	1
12	16	520	3	18246	1
12	17	520	3	18530	1
13	1	530	2	6530	1
13	2	530	2	6830	1
13	3	530	5	7276	1
13	4	530	5	7303	1
13	5	530	6	7343	1
13	6	530	8	7376	1
13	8	530	2	7989	1
13	9	530	4	8341	1
13	10	530	3	8427	1
13	11	530	3	8750	1
13	12	530	6	8796	1
13	13	530	4	8839	1
13	14	530	3	9255	1
13	15	530	2	9608	1
15	1	600	2	6624	1
15	2	600	2	6935	1
15	3	600	2	6972	1
15	4	600	2	7186	1
15	5	600	2	7238	1
15	6	600	5	7370	1
15	7	600	3	7663	1
15	8	600	3	8452	1
15	9	600	3	8503	1
15	10	600	2	8920	1
15	11	600	2	9341	1
15	12	600	1	9715	1
14	1	600	1	13388	1
14	2	600	2	14106	1
14	3	600	3	14337	1
14	4	600	2	14521	1
14	5	600	5	14776	1
14	6	600	3	14894	1
14	7	600	3	15024	1
14	8	600	3	15432	1
14	9	600	3	15471	1
14	10	600	3	16262	1
14	11	600	3	16374	1
14	12	600	4	16601	1
14	13	600	2	16868	1
14	14	600	3	17316	1
14	15	600	4	17451	1
14	16	600	4	17603	1
14	17	600	2	18205	1
14	18	600	2	18491	1

serie- nummer	proef- nummer	T gem.	piek- waarde	f reëel	f- ver- houding
17	1	670	2	6797	1
17	2	670	3	6929	1
17	18	670	4	7303	1
17	3	670	3	7311	1
17	17	670	2	7448	1
17	16	670	2	7599	1
17	4	670	2	7608	1
17	15	670	2	8238	1
17	5	670	2	8281	1
17	14	670	2	8348	1
17	6	670	2	8470	1
17	13	670	2	8529	1
17	11	670	2	8832	1
17	10	670	1	9017	1
17	9	670	1	9523	1
17	8	670	1	9641	1
17	7	670	2	11024	1
16	1	670	2	14043	1
16	2	670	3	14176	1
16	3	670	3	14256	1
16	4	670	2	14924	1
16	5	670	2	15305	1
16	6	670	4	16279	1
16	7	670	3	16488	1
16	8	670	4	17477	1
16	9	670	1	18342	1
19	1	790	2	6863	1
19	2	790	3	7303	1
19	3	790	2	7457	1
19	4	790	1	7551	1
19	5	790	1	7592	1
19	6	790	1	7880	1
19	7	790	2	8169	1
19	8	790	2	8335	1
19	9	790	2	8670	1
19	10	790	2	8854	1
19	12	790	2	9134	1
19	13	790	2	9440	1
19	14	790	2	9625	1
19	15	790	2	9872	1
19	16	790	1	10972	1
18	1	800	2	13002	1
18	2	800	2	14701	1
18	3	800	1	15102	1
18	4	800	2	16025	1
18	5	800	3	17127	1
18	6	800	1	17633	1
18	7	800	0	18165	1

serie- nummer	proef- nummer	T <sub>gem.</sub>	piek- waarde	f <sub>reëel</sub>	f- ver- houding
21	1	900	3	5759	1
21	2	900	1	5835	1
21	3	900	0	6558	1
21	4	900	2	6720	1
21	5	900	2	6911	1
21	6	900	2	7187	1
21	7	900	1	7518	1
21	8	900	2	7583	1
21	9	900	2	7971	1
21	10	900	3	8165	1
21	11	900	3	8377	1
21	12	900	4	8951	1
21	13	900	3	9266	1
21	14	900	4	9507	1
21	15	900	1	9874	1
21	16	900	1	11030	1
20	1	900	1	12210	1
20	2	900	1	13071	1
20	9	900	0	13866	1
20	3	900	1	14628	1
20	8	900	2	15710	1
20	4	900	3	16151	1
20	5	900	3	16997	1
20	6	900	0	17688	1
20	7	900	1	18015	1
3	1	15	4	460	2
3	2	15	3	466	2
3	8	15	4	607	2
3	9	15	4	619	2
3	14	15	4	743	2
3	15	15	4	768	2
3	23	15	5	959	2
3	25	15	6	1058	2
3	27	15	4	1109	2
2	9	15	3	4724	2
2	10	15	4	4781	2
5	11	100	3	4691	2
5	12	100	4	4728	2
7	9	200	4	4649	2
9	11	290	4	4571	2
9	13	290	2	4688	2
13	7	530	5	3791	2
17	12	670	2	4373	2
19	11	790	2	4427	2
3	10	15	4	470	3



Appendix I: Methode van piekwaardeberekening

Symbolenlijst:

- E Versterkerstand van ontvanger (0-10)  
 S Versterkerstand van zender (0-10)  
 A Waarde van amplitudemeter (0-100)  
 C(E) Amplitudecorrectiefactor voor E  
 C(S) Amplitudecorrectiefactor voor S

De uitslag van de signaalamplitudemeter van de Elastomat was afhankelijk van de sterkte van het uitgezonden signaal en de versterking van het terugkerende signaal. Om vergelijking van de piek-amplitudes mogelijk te maken, werd geprobeerd om voor de invloed van de versterkerstanden E en S te corrigeren. Dit gebeurde door de proefstaaf in resonantie te brengen, en vervolgens de E of S te variëren. Door hierbij telkens de amplitude A te noteren, werd het mogelijk om correctiefactoren te bepalen die A konden omrekenen naar de situatie met E=10 en S=10. Deze correctiefactoren zijn geplaatst in tabel I1. Doordat de C(E) mede afhankelijk bleek te zijn van de waarde van S, en de meting van C(S) hierdoor ook moeilijkheden opleverde, zal de nauwkeurigheid van de resultaten in de tabel beperkt zijn. Dit geldt zeker voor de lagere E- en S-waarden die zijn samengesteld uit meerdere metingen; dit werd veroorzaakt doordat het niet mogelijk was om met één resonantiepiek het hele gebied te onderzoeken.

Tabel I1: Correctiefactoren voor  
piekwaardeberekening

E, S	C(E)	C(S)
1.0	1610	73.5
1.5	56.7	24.0
2.0	13.9	12.8
3.0	4.84	6.25
4.0	3.06	3.89
5.0	2.28	2.79
6.0	1.801	2.07
7.0	1.381	1.532
8.0	1.114	1.188
9.0	1.010	1.011
10.0	1	1

De gevonden amplitudes bij de proef werden vermenigvuldigd met de correctiefactoren  $C(E)$  en  $C(S)$ . Omdat er zo minder goed hanteerbare getallen onstonden, werd uit het product de logaritme getrokken. Voor de plaatsing als meetpunt in grafieken was het gewenst dat de meeste piekwaarden met een getal van nul tot negen gekarakteriseerd konden worden. Zo ontstond uiteindelijk de volgende praktische formule:

$$\text{piekwaarde} = 2 \cdot 10^{\log[C(E) \cdot C(S) \cdot A]} - 2$$

Appendix J:  $\alpha$ -waarden voor EW1, LW5 en LW6

Uit de formules 24 t.e.m. 26 blijkt dat er per staaf, per golfstype en per proeftemperatuur een lineair verband bestaat tussen resonantie-frequentie en geluidsnelheid:

$$f = \alpha \cdot c$$

Voor de berekening van  $\alpha$  werd ondermeer gebruik gemaakt van de benadering van de poissonconstante van SAE 4340 (appendix C), en van de lin. uitzettingscoëfficiënt van EN 14 (appendix E). De  $\alpha$ 's uit de volgende tabellen werden gebruikt om uit de geluidsnelheid van St34,II (appendix C) de bijbehorende eigenfrequentie te berekenen. De hiermee berekende waarden vormden de basis voor de methode van puntenclustering. Een tweede toepassing van de  $\alpha$ -waarden was het op eenvoudige wijze kunnen berekenen van de geluidsnelheid uit de gemeten frequenties. In deze bijlage zijn de tabellen voor LW1 en LW4 niet opgenomen; de afwijkingen in hun  $\alpha$ 's bedroegen maximaal 0,13 procent t.o.v. LW5.

Tabel J1:  $\alpha$ -waarden voor LW6 bij 15°C

type	$\alpha$	type	$\alpha$	type	$\alpha$
1long	2.63572	1tranA	0.22764	1tranB	0.16609
1tors	2.64792	2tranA	0.62015	2tranB	0.45493
2tors	5.29583	3tranA	1.19566	3tranB	0.88378
3tors	7.94375	4tranA	1.93491	4tranB	1.44356
		5tranA	2.82002	5tranB	2.12591
		6tranA	3.83197	6tranB	2.92082

Tabel J2:  $\alpha$ -waarden voor verschillende golftypen van EW1

T(°C)	1long	1tors	2tors	1tranA	2tranA
15	2.8111	2.8145	5.6290	0.26102	0.70981
100	2.8062	2.8117	5.6234	0.26056	0.70855
200	2.7970	2.8080	5.6159	0.25970	0.70622
290	2.7850	2.8043	5.6086	0.25859	0.70319
300	2.7834	2.8039	5.6078	0.25844	0.70279
420	2.7602	2.7987	5.5974	0.25628	0.69689
520	2.7336	2.7942	5.5884	0.25381	0.69014
530	2.7305	2.7937	5.5875	0.25353	0.68936
600	2.7065	2.7905	5.5811	0.25130	0.68329
670	2.6778	2.7873	5.5747	0.24863	0.67601
790	2.6204	2.7876	5.5752	0.24329	0.66143
800	2.6151	2.7880	5.5760	0.24280	0.66008
900	2.5431	2.7828	5.5656	0.23611	0.64185
1000	2.4492	2.7772	5.5543	0.22739	0.61808
T(°C)	3tranA	4tranA	5tranA	6tranA	1tranB
15	1.3652	2.2029	3.2007	4.3358	0.18818
100	1.3628	2.1990	3.1950	4.3280	0.18785
200	1.3583	2.1917	3.1843	4.3135	0.18723
290	1.3524	2.1822	3.1704	4.2945	0.18643
300	1.3516	2.1809	3.1686	4.2920	0.18633
420	1.3402	2.1624	3.1415	4.2550	0.18477
520	1.3272	2.1412	3.1105	4.2127	0.18299
530	1.3257	2.1387	3.1069	4.2078	0.18278
600	1.3139	2.1197	3.0790	4.1697	0.18118
670	1.2999	2.0968	3.0455	4.1241	0.17926
790	1.2717	2.0511	2.9786	4.0328	0.17541
800	1.2691	2.0468	2.9724	4.0243	0.17505
900	1.2339	1.9897	2.8890	3.9107	0.17024
1000	1.1880	1.9154	2.7805	3.7631	0.16395
T(°C)	2tranB	3tranB	4tranB	5tranB	6tranB
15	0.51504	0.9994	1.6301	2.3967	3.2870
100	0.51413	0.9976	1.6272	2.3924	3.2811
200	0.51244	0.9944	1.6219	2.3845	3.2702
290	0.51025	0.9901	1.6149	2.3742	3.2560
300	0.50996	0.9895	1.6139	2.3728	3.2541
420	0.50569	0.9812	1.6003	2.3527	3.2264
520	0.50081	0.9717	1.5848	2.3298	3.1947
530	0.50024	0.9706	1.5830	2.3271	3.1911
600	0.49584	0.9620	1.5689	2.3064	3.1625
670	0.49057	0.9518	1.5522	2.2816	3.1284
790	0.48002	0.9313	1.5185	2.2320	3.0600
800	0.47904	0.9294	1.5154	2.2274	3.0537
900	0.46584	0.9037	1.4734	2.1654	2.9683
1000	0.44862	0.8702	1.4187	2.0847	2.8573

Tabel J3:  $\alpha$ -waarden voor verschillende golftypen van LW5

T(°C)	1long	1tors	2tors	1tranA	2tranA
15	2.6365	2.6517	5.3035	0.22756	0.61993
100	2.6319	2.6491	5.2981	0.22715	0.61883
220	2.6211	2.6448	5.2896	0.22622	0.61629
300	2.6106	2.6417	5.2835	0.22531	0.61381
400	2.5929	2.6377	5.2753	0.22379	0.60965
500	2.5693	2.6334	5.2669	0.22175	0.60408
600	2.5384	2.6291	5.2583	0.21908	0.59678
710	2.4938	2.6244	5.2488	0.21523	0.58626
800	2.4526	2.6268	5.2535	0.21167	0.57653
900	2.3852	2.6218	5.2437	0.20585	0.56062
960	2.3352	2.6187	5.2374	0.20153	0.54884
1000	2.2971	2.6165	5.2331	0.19824	0.53986
T(°C)	3tranA	4tranA	5tranA	6tranA	1tranB
15	1.1953	1.9343	2.8192	3.8310	0.16677
100	1.1931	1.9309	2.8142	3.8241	0.16647
220	1.1882	1.9228	2.8024	3.8081	0.16579
300	1.1834	1.9150	2.7910	3.7924	0.16513
400	1.1753	1.9019	2.7718	3.7661	0.16401
500	1.1646	1.8844	2.7460	3.7308	0.16252
600	1.1504	1.8613	2.7122	3.6847	0.16056
710	1.1300	1.8282	2.6636	3.6182	0.15774
800	1.1112	1.7975	2.6186	3.5566	0.15514
900	1.0804	1.7475	2.5453	3.4565	0.15087
960	1.0576	1.7105	2.4912	3.3826	0.14771
1000	1.0403	1.6823	2.4499	3.3263	0.14530
T(°C)	2tranB	3tranB	4tranB	5tranB	6tranB
15	0.45679	0.88736	1.4493	2.1343	2.9321
100	0.45599	0.88578	1.4467	2.1305	2.9268
220	0.45411	0.88213	1.4408	2.1216	2.9147
300	0.45229	0.87858	1.4350	2.1130	2.9028
400	0.44923	0.87263	1.4252	2.0986	2.8829
500	0.44513	0.86465	1.4121	2.0793	2.8562
600	0.43977	0.85420	1.3950	2.0539	2.8213
710	0.43203	0.83912	1.3703	2.0174	2.7709
800	0.42487	0.82519	1.3474	1.9837	2.7243
900	0.41317	0.80240	1.3101	1.9285	2.6483
960	0.40450	0.78554	1.2825	1.8878	2.5921
1000	0.39790	0.77269	1.2615	1.8567	2.5493

Appendix K: Berekende  $c_L$ -waarden van LW1, LW4, LW5 en EW1

In deze bijlage zijn alle punten opgenomen die minder dan vijf procent van de verwachte frequentie c.q. geluidsnelheid van St34,II afweken.

T (°C)	piek- waarde	$c_L$ (m/s)	staaf, golftype	afwijking St34,II
15	8	6198	LW4 3tranA	4.7%
18	4	6191	LW1 1long	4.6%
18	3	6175	LW1 1long	4.3%
15	2	6161	EW1 1long	4.1%
15	6	6100	EW1 1long	3.0%
15	4	6095	LW5 1long	3.0%
15	5	6086	EW1 3tranA	2.8%
15	2	6079	EW1 5tranB	2.7%
15	5	6065	LW5 1long	2.4%
18	3	6062	LW1 5tranB	2.4%
15	6	6038	EW1 1long	2.0%
15	3	6024	LW5 5tranB	1.8%
15	4	6019	LW5 1long	1.7%
15	4	5995	LW5 1long	1.3%
15	7	5979	LW5 1long	1.0%
15	3	5974	LW5 5tranB	0.9%
15	6	5969	EW1 1long	0.8%
15	7	5968	LW5 1long	0.8%
18	8	5964	LW1 1long	0.7%
15	3	5964	EW1 5tranB	0.7%
15	9	5963	EW1 3tranA	0.7%
15	3	5958	LW4 5tranB	0.6%
15	9	5958	LW4 1long	0.6%
15	7	5957	EW1 4tranB	0.6%
15	3	5956	LW5 3tranA	0.6%
15	8	5955	LW4 3tranA	0.6%
15	*	5955	LW5 1long	0.6%
15	3	5952	LW5 5tranB	0.5%
15	4	5947	EW1 1long	0.5%
15	*	5943	LW5 1long	0.4%
15	6	5901	EW1 4tranB	-0.3%
15	4	5857	LW4 3tranA	-1.1%
15	3	5854	LW4 1long	-1.1%
15	5	5838	LW4 3tranA	-1.4%
15	3	5829	LW4 1long	-1.5%
15	3	5800	LW4 3tranA	-2.0%
15	2	5770	LW5 3tranA	-2.5%
15	4	5765	EW1 3tranA	-2.6%
18	3	5700	LW1 1long	-3.7%
15	3	5699	EW1 1long	-3.7%
15	3	5683	LW5 1long	-4.0%

T (°C)	piek- waarde	c <sub>L</sub> (m/s)	staaf, golftype	afwijking St34, II
15	2	5672	LW5 3tranA	-4.2%
15	3	5663	LW5 1long	-4.3%
15	2	5661	EW1 1long	-4.4%
15	2	5653	LW5 3tranA	-4.5%
100	3	6129	EW1 1long	4.1%
100	5	6064	EW1 1long	3.0%
100	2	6046	EW1 5tranB	2.6%
100	5	6040	EW1 3tranA	2.5%
100	4	6035	EW1 1long	2.5%
100	4	6025	EW1 3tranA	2.3%
100	5	6009	EW1 1long	2.0%
100	5	5910	EW1 1long	0.3%
100	2	5904	EW1 5tranB	0.2%
100	11	5903	EW1 4tranB	0.2%
100	6	5903	EW1 3tranA	0.2%
100	5	5883	EW1 1long	-0.1%
100	6	5865	EW1 4tranB	-0.4%
100	4	5724	EW1 3tranA	-2.8%
100	3	5665	EW1 1long	-3.8%
100	2	5630	EW1 1long	-4.4%
200	3	6088	EW1 3tranA	4.4%
200	6	6081	EW1 1long	4.3%
200	1	6069	EW1 5tranB	4.1%
220	4	6033	LW5 1long	3.8%
220	4	6007	LW5 1long	3.4%
200	5	6014	EW1 1long	3.2%
200	3	5967	EW1 1long	2.3%
220	4	5931	LW5 1long	2.1%
220	4	5903	LW5 1long	1.6%
200	3	5910	EW1 1long	1.4%
200	5	5907	EW1 4tranB	1.3%
220	2	5848	LW5 5tranB	0.7%
200	2	5835	EW1 5tranB	0.1%
200	9	5834	EW1 3tranA	0.1%
200	8	5834	EW1 4tranB	0.1%
220	5	5808	LW5 3tranA	0.0%
220	6	5807	LW5 1long	-0.1%
200	6	5826	EW1 1long	-0.1%
220	3	5799	LW5 5tranB	-0.2%
200	6	5782	EW1 3tranA	-0.8%
220	4	5762	LW5 1long	-0.8%
200	4	5680	EW1 1long	-2.6%
200	3	5646	EW1 1long	-3.2%
200	4	5621	EW1 4tranB	-3.6%
200	4	5581	EW1 4tranB	-4.3%
220	4	5524	LW5 1long	-4.9%
300	4	6034	EW1 1long	4.8%

T (°C)	piek- waarde	c <sub>L</sub> (m/s)	staaf, golftype	afwijking St34, II
290	3	6017	EW1 3tranA	4.5%
300	4	5977	EW1 1long	3.8%
290	5	5845	EW1 4tranB	1.5%
290	3	5823	EW1 4tranB	1.1%
290	9	5763	EW1 3tranA	0.1%
290	8	5761	EW1 4tranB	0.0%
300	1	5760	EW1 5tranB	0.0%
300	3	5752	EW1 1long	-0.1%
290	4	5710	EW1 3tranA	-0.9%
300	3	5640	EW1 1long	-2.1%
300	2	5602	EW1 1long	-2.7%
290	4	5548	EW1 4tranB	-3.7%
290	3	5513	EW1 4tranB	-4.3%
420	1	5871	EW1 1long	3.7%
420	3	5867	EW1 1long	3.7%
420	3	5836	EW1 4tranB	3.1%
400	4	5766	LW4 3tranA	1.7%
400	2	5764	LW4 1long	1.7%
400	3	5744	LW4 1long	1.3%
400	3	5723	LW4 1long	0.9%
420	5	5697	EW1 3tranA	0.7%
400	3	5677	LW4 1long	0.1%
400	5	5675	LW1 1long	0.1%
420	6	5664	EW1 3tranA	0.1%
420	8	5660	EW1 4tranB	0.0%
420	3	5657	EW1 5tranB	-0.1%
400	9	5666	LW1 1long	-0.1%
420	5	5655	EW1 3tranA	-0.1%
400	3	5664	LW4 5tranB	-0.1%
400	6	5663	LW4 1long	-0.1%
420	7	5650	EW1 1long	-0.2%
400	5	5657	LW4 1long	-0.2%
400	6	5653	LW4 3tranA	-0.3%
420	1	5639	EW1 5tranB	-0.4%
400	4	5630	LW4 1long	-0.7%
420	3	5588	EW1 1long	-1.3%
420	3	5564	EW1 4tranB	-1.7%
400	4	5557	LW4 1long	-2.0%
420	2	5547	EW1 3tranA	-2.0%
420	3	5533	EW1 4tranB	-2.2%
400	4	5540	LW4 1long	-2.3%
420	2	5526	EW1 1long	-2.4%
400	3	5510	LW4 1long	-2.8%
420	2	5486	EW1 1long	-3.1%
420	4	5442	EW1 3tranA	-3.9%
530	3	5846	EW1 4tranB	5.1%
520	3	5639	EW1 1long	1.4%
520	3	5618	EW1 1long	1.0%



T (°C)	piek- waarde	c <sub>L</sub> (m/s)	staaf, golftype	afwijking St34, II
520	2	5590	EW1 5tranB	0.5%
530	4	5584	EW1 4tranB	0.4%
520	3	5570	EW1 5tranB	0.2%
530	8	5564	EW1 3tranA	0.1%
530	6	5557	EW1 4tranB	-0.1%
520	6	5556	EW1 1long	-0.1%
530	6	5539	EW1 3tranA	-0.4%
530	3	5527	EW1 4tranB	-0.6%
530	5	5509	EW1 3tranA	-0.9%
520	4	5509	EW1 1long	-0.9%
530	5	5488	EW1 3tranA	-1.3%
530	3	5323	EW1 4tranB	-4.3%
600	3	5716	EW1 1long	4.5%
600	3	5702	EW1 1long	4.2%
600	2	5686	EW1 4tranB	3.9%
600	3	5682	LW5 1long	3.9%
600	3	5674	LW5 1long	3.7%
610	2	5671	LW5 3tranA	3.7%
600	5	5609	EW1 3tranA	2.5%
600	3	5596	LW5 1long	2.3%
600	3	5591	LW5 1long	2.2%
600	3	5551	EW1 1long	1.5%
600	2	5509	EW1 3tranA	0.7%
600	3	5503	EW1 1long	0.6%
600	4	5498	LW5 1long	0.5%
600	2	5469	EW1 3tranA	0.0%
600	5	5460	LW5 1long	-0.2%
600	5	5459	EW1 1long	-0.2%
600	5	5453	LW5 1long	-0.3%
600	3	5420	EW1 4tranB	-0.9%
600	3	5414	LW5 1long	-1.0%
600	3	5387	EW1 4tranB	-1.5%
600	2	5365	EW1 1long	-1.9%
600	2	5306	EW1 3tranA	-3.0%
600	3	5297	EW1 1long	-3.2%
610	3	5294	LW5 3tranA	-3.2%
600	2	5278	EW1 3tranA	-3.5%
600	2	5212	EW1 1long	-4.7%
670	2	5624	EW1 3tranA	4.7%
670	4	5618	EW1 3tranA	4.6%
670	2	5573	EW1 1long	3.8%
670	2	5495	EW1 4tranB	2.3%
670	2	5457	EW1 4tranB	1.6%
670	2	5378	EW1 4tranB	0.1%
670	2	5335	EW1 4tranB	-0.7%
670	3	5330	EW1 3tranA	-0.7%
670	3	5324	EW1 1long	-0.9%
670	2	5307	EW1 4tranB	-1.2%

T (°C)	piek- waarde	c <sub>L</sub> (m/s)	staaf, golftype	afwijking St34,II
670	3	5294	EW1 1long	-1.4%
670	2	5244	EW1 1long	-2.3%
670	2	5229	EW1 3tranA	-2.6%
710	4	5540	LW4 1long	4.7%
710	3	5515	LW4 3tranA	4.3%
710	2	5356	LW4 3tranA	1.2%
710	2	5340	LW5 1long	0.9%
700	3	5353	LW1 1long	0.8%
710	2	5321	LW4 1long	0.6%
700	2	5323	LW1 1long	0.2%
700	3	5322	LW1 1long	0.2%
700	3	5320	LW1 1long	0.2%
700	3	5315	LW1 1long	0.1%
700	2	5311	LW1 1long	0.0%
700	3	5292	LW1 1long	-0.3%
700	4	5289	LW1 1long	-0.4%
710	4	5193	LW4 3tranA	-1.8%
710	5	5184	LW5 3tranA	-2.0%
710	2	5114	LW4 1long	-3.3%
790	2	5408	EW1 3tranA	5.2%
790	2	5380	EW1 4tranB	4.7%
800	1	5375	LW1 1long	4.6%
800	1	5343	LW5 1long	3.9%
790	1	5189	EW1 4tranB	1.0%
800	4	5162	LW5 3tranA	0.4%
790	1	5000	EW1 4tranB	-2.7%
790	1	4973	EW1 4tranB	-3.2%
790	2	4911	EW1 4tranB	-4.5%

Appendix L: Waarnemingen en resultaten van LW6

De experimenten aan staafje LW6 werden bij kamertemperatuur (ca. 15°C) verricht. Onder het kopje *f* staat de werkelijke frequentie vermeld, zoals die uit de waargenomen frequentie werd berekend. Onder *c* staan de longitudinale of transversale geluid-snelheden vermeld van de punten die binnen de gestelde cluster-grenzen vielen.

serie nummer	proef nummer	piek-waarde	<i>f</i> (Hz)	<i>f</i> -verhouding	golf-type	<i>c</i> (m/s)
7	21	0	764	1		
3	18	1	866	1		
6	27	2	990	1	1transB	5960.6
7	19	2	990	1	1transB	5960.6
5	15	0	990	1	1transB	5960.6
4	21	2	990	1	1transB	5960.6
3	16	1	991	1	1transB	5966.6
3	14	0	1050	1		
7	13	0	1322	1		
5	11	1	1358	1	1transA	5965.6
3	12	3	1358	1	1transA	5965.6
5	14	2	1358	1	1transA	5965.6
4	17	0	1358	1	1transA	5965.6
6	21	4	1981	1		
2	18	1	2131	1		
7	17	0	2170	1		
7	12	0	2636	1		
6	11	1	2663	1		
7	10	3	2711	1	2transB	5958.1
6	12	2	2711	1	2transB	5958.1
4	20	1	2711	1	2transB	5958.1
3	9	4	2712	1	2transB	5961.4
2	13	3	2712	1	2transB	5961.4
7	9	1	2749	1		
6	13	0	2870	1		
2	11	1	3505	1		
2	9	2	3709	1	2tranA	5980.8
5	9	2	3710	1	2tranA	5982.4
4	15	1	3711	1	2tranA	5983.2
6	14	2	3711	1	2tranA	5984.0
7	7	0	3711	1	2tranA	5984.0
6	15	1	3766	1		
6	16	0	4835	1		
2	8	2	5031	1		
2	7	2	5162	1		

serie nummer	proef nummer	piek- waarde	f (Hz)	f- ver- houding	golf- type	c (m/s)
6	17	3	5183	1		
6	18	3	5202	1		
5	7	2	5266	1	3tranB	5958.5
4	13	3	5266	1	3tranB	5958.5
6	8	4	5267	1	3tranB	5959.6
7	4	0	5269	1	3tranB	5961.9
2	6	5	5270	1	3tranB	5963.0
2	5	0	5431	1		
7	5	1	5551	1		
2	2	1	6132	1		
4	3	0	6183	1		
6	7	0	7014	1		
4	4	2	7132	1		
4	7	2	7134	1		
6	6	0	8495	1		
5	5	2	8603	1	1tors	3249.0
2	3	3	8604	1	1tors	3249.3
3	3	1	8604	1	1tors	3249.3
4	10	3	8605	1	1tors	3249.7
4	6	2	8605	1	1tors	3249.7
4	8	2	8605	1	1tors	3249.7
7	6	2	8607	1	1tors	3250.5
6	5	2	8607	1	1tors	3250.5
3	4	1	8612	1	4tranB	5965.8
5	6	3	8612	1	4tranB	5965.8
4	5	0	8614	1	4tranB	5967.2
2	4	2	8614	1	4tranB	5967.2
4	11	1	8614	1	4tranB	5967.2
4	9	1	8615	1	4tranB	5967.9
6	4	0	11003	1		
7	3	1	11532	1	4tranA	5960.0
6	1	2	11533	1	4tranA	5960.5
4	12	1	11537	1	4tranA	5962.6
3	5	1	11538	1	4tranA	5963.1
6	2	0	12686	1	5tranB	5967.3
5	4	0	12693	1	5tranB	5970.6
3	2	0	15696	1	1long	5955.1
6	3	0	15724	1	1long	5965.5
7	1	1	15725	1	1long	5966.1
1	2	2	15728	1	1long	5967.2
2	1	2	15729	1	1long	5967.6
3	1	1	15730	1	1long	5968.0
5	3	0	15735	1	1long	5969.9
4	2	1	15736	1	1long	5970.1
5	2	0	16818	1	5tranA	5963.8
1	1	0	16819	1	5tranA	5964.1
7	2	0	17165	1	2tors	3241.2
5	1	0	17170	1	2tors	3242.2
4	1	0	17171	1	2tors	3242.3
7	20	1	443	2		

serie nummer	proef nummer	piek- waarde	f (Hz)	f- ver- houding	golf- type	c (m/s)
6	26	2	495	2		
3	17	1	496	2		
3	15	1	517	2		
7	18	1	543	2		
7	14	0	678	2		
6	23	2	928	2		
7	16	0	928	2		
6	22	2	942	2		
6	20	4	991	2		
2	19	1	1155	2		
6	19	1	1205	2		
3	13	2	1211	2		
2	17	2	1259	2		
2	16	3	1292	2		
6	9	3	1297	2		
3	11	1	1311	2		
4	16	0	1317	2		
4	19	2	1317	2		
6	10	3	1317	2		
5	13	2	1317	2		
5	10	3	1317	2		
3	10	4	1317	2		
2	15	4	1318	2		
7	11	3	1355	2		
3	8	4	1356	2		
2	14	3	1356	2		
7	8	1	1386	2		
3	7	3	1783	2		
2	10	1	1783	2		
5	8	1	2153	2		
2	20	2	453	3		
6	25	2	576	3		
5	12	3	585	3		
6	24	3	585	3		
7	15	0	615	3		
4	18	1	792	3		
2	12	2	957	3		
4	14	1	1748	3		

