

ONTWERP EN CERTIFICATIE VAN HET FOKKER 100 PASSENGER ADDRESS SYSTEEM

Piet A.A. Verbaarschot en Elly H. Waterman
Fokker Aircraft B.V.
Postbus 7600, Schiphol

DESIGN AND CERTIFICATION OF THE FOKKER 100 PASSENGER ADDRESS SYSTEM

Summary: The intelligibility of the Passenger Address System in aircraft has to comply with the requirements of various Airworthiness Authorities. The existing requirements at the start of the design phase of the Fokker100 were based on the subjective judgement of these Authorities. As this was an undesirable situation, Fokker used an objective measurement method for assessing the intelligibility, the Speech Transmission Index STI, developed by the Dutch Institute for Perception, TNO-IZF. This method applies a special test-signal and analysis method to obtain an index (with a value between 0 and 1) which predicts the intelligibility. The STI method has been used to evaluate and optimize the Passenger Address System in various mock-up tests, while using simulated background noise. After negotiations with various Airworthiness Authorities a minimal acceptable STI value of 0.5 (which indicates a reasonable intelligibility) for the Passenger Address System was established as the certification basis. Finally the Fokker100 Passenger Address System was certified in the first production aircraft using the STI method in-flight.

1 INLEIDING

Eind 1983 werd besloten dat er een moderne opvolger voor het straalvliegtuig van Fokker, de F28 Fellowship, zou moeten komen. Het zou een "afgeleid" ontwerp moeten worden; een verlengd vliegtuig voor maximaal 100 passagiers, voorzien van nieuwe motoren en met een nieuwe vleugel. Het nieuwe vliegtuig, de Fokker100, zou evenals zijn voorganger dienst gaan doen op korte en middellange afstanden.

Wegens vergaande eisen vanuit de markt kon de filosofie van "minimum wijziging" niet meer gehandhaafd worden. Het uiteindelijke Fokker100 vliegtuig (figuur 1) vertoont dan ook alleen uiterlijk nog enige gelijkenis met zijn voorganger. Vele systemen werden drastisch gewijzigd teneinde het vliegtuig aan de modernste eisen te laten voldoen. Het Passenger Address (PA) systeem in de Fokker100 is een van de vele systemen die geheel opnieuw zijn ontworpen.

Het was bekend dat het F28 PA systeem op diverse plaatsen in het vliegtuig slechts marginaal verstaanbaar was. Het verkrijgen van een goede spraakverstaanbaarheid op alle plaatsen in het vliegtuig was dan ook de belangrijkste ontwerp doelstelling voor het PA-



Figuur 1 Het Fokker100 vliegtuig.

systeem in de Fokker100. Deze doelstelling is bereikt door een beter systeem ontwerp en door een lager geluidsniveau in de cabine.

Bij diverse metingen tijdens de ontwerpfase en bij de certificatie is gebruik gemaakt van de STI meetmethode (zie de Appendix) om het ontwerp te valideren. Deze methode maakt gebruik van een specifiek testsignaal en van een speciale analyse methode teneinde de spraakverstaanbaarheid uit te kunnen drukken in één getal, de STI, die een waarde tussen 0 (onverstaanbaar) en 1 (volledig verstaanbaar) kan aannemen.

2 ONTWERP DOELSTELLINGEN EN BEPERKINGEN

2.1 Luchtwaardigheidseisen en verstaanbaarheid

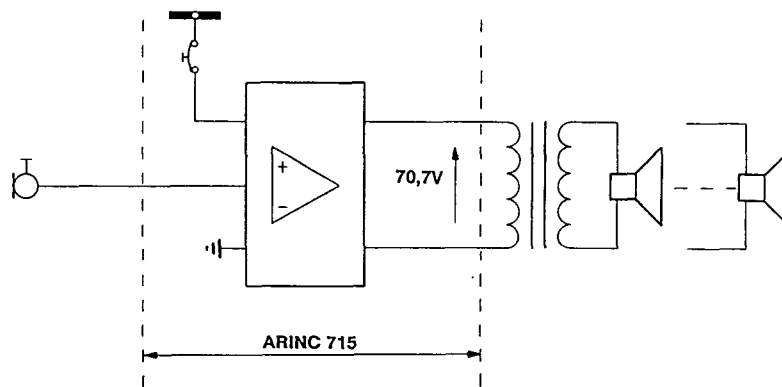
De momenteel geldende eisen die de luchtvaartautoriteiten stellen aan een PA systeem zijn (nog) heel summier geformuleerd. De letterlijke vertaling van de in de voorschriften gebruikte terminologie is dat op een aantal omschreven plaatsen in het vliegtuig het PA systeem HOORBAAR dient te zijn. Er worden geen verdere criteria gesteld zodat de vliegtuigfabrikant voor de goedkeuring van het ontwerp afhankelijk is van een SUBJECTIEVE beoordeling van de verstaanbaarheid door de autoriteiten. Deze ongewenste situatie is bij de certificatie van de Fokker100 ondervangen door de autoriteiten te overtuigen van een bruikbaar OBJECTIEF alternatief; de STI meetmethode.

Bij het ontwerp van het PA systeem heeft Fokker zichzelf de eis gesteld dat op alle zitplaatsen, in de toiletten en bij de boordkeukens een STI waarde bereikt zou moeten worden van tenminste 0.5, dat betekent een redelijke verstaanbaarheid. Bovendien diende het systeem met een redelijke kwaliteit muziek weer te kunnen geven, hetgeen van belang is tijdens het instappen van de passagiers.

2.2 ARINC eisen architectuur

Het PA systeem diende zodanig ontworpen te worden dat zoveel mogelijk voldaan zou worden aan internationale afspraken vastgelegd in de zogenaamde ARINC documenten [1]. ARINC is een niet winstgevende internationale organisatie die is opgericht door de luchtvaartmaatschappijen. ARINC heeft voor een aantal vliegtuigsystemen richtlijnen voor het systeem- en apparatuurontwerp opgesteld. De aldus bereikte standaardisatie van de ontwerpeisen heeft tot gevolg dat in één vliegtuig systeemapparatuur gebruikt kan worden van elke willekeurige fabrikant, mits het apparaat volgens dezelfde ARINC specificatie is ontworpen. Dit levert de luchtvaartmaatschappijen een grote flexibiliteit op, zodat in verschillende vliegtuigen, zoals een Boeing 747, een Airbus A310 of een Fokker100, dezelfde PA versterker gebruikt kan worden.

In figuur 2 is de architectuur van het PA systeem voor de Fokker100 schematisch weergegeven. De ARINC ontwerpeisen leidde ertoe dat een ARINC 715 PA versterker gebruikt diende te worden. Daarmee lagen een aantal specifieke eigenschappen van de versterker vast, zoals de luchtkoeling, de voeding (28 V DC), de afmetingen, de aansluitingen, het microfoonsignaal en het beschikbare vermogen. Eveneens lag het principe van het aan de luidsprekers te koppelen uitgangscircuit (hoogohmig, 70.7 V constante spanning) vast. Deze eigenschap heeft als voordeel dat het vermogen dat de versterker levert afhankelijk is van het aantal toegepaste luidsprekers en dat het vermogen in elke



Figuur 2 De architectuur van het Fokker100 Passenger Address Systeem.

luidspreker constant is. Een nadeel is dat laagohmige luidsprekers (8 ohm) alleen met behulp van aanpassingstrafo's (ten koste van gewicht!) aangesloten kunnen worden.

2.3 Gewichtseisen

Vanzelfsprekend speelt gewicht een zeer belangrijke rol bij het vliegtuigontwerp. Een hoger gewicht zal namelijk onmiddellijk resulteren in een hoger brandstofverbruik en in een kleinere hoeveelheid te vervoeren nuttige (= betalende) lading. Tijdens de selectie van de benodigde onderdelen is dus niet alleen naar de kwaliteit gekeken, maar ook naar het gewicht. Bovendien is getracht het aantal componenten zo klein mogelijk te houden. Gezien het grote aantal componenten dat per vliegtuig moet worden toegepast is ook de prijs van elke component bij de afweging betrokken.

2.4 Vliegtuig-interieur

Het interieur van het vliegtuig wordt hoofdzakelijk ontworpen met het oog op het comfort en de veiligheid van de passagiers. Bij elke stoel dient een zuurstofmasker beschikbaar te zijn, maar ook een leeslampje, een ventilatie-opening en bagageruimte. Er is door al deze eisen weinig ruimte beschikbaar voor een luidspreker ten behoeve van het PA systeem. De luidsprekers moeten bovendien op een zodanige manier worden ingebouwd dat het geheel esthetisch aanvaardbaar is.

Het PA systeem kon niet in een van de prototypes van de Fokker100 worden getest, omdat deze prototypes niet waren voorzien van een representatief interieur. Om de kans op latere wijzigingen zo klein mogelijk te maken zijn daarom in een vroeg stadium proefnemingen in een mock-up van het vliegtuig interieur uitgevoerd.

3 DETAILS VAN HET LUIDSPREKER ONTWERP

3.1 Eerste voorlopig ontwerp

De oorspronkelijke gedachte was om de luidsprekers op te nemen in de Passenger Service Units (PSU). Dit is een paneel, waarin de hierboven genoemde voor iedere passagier benodigde voorzieningen worden ingebouwd. Met het oog op een maximale flexibiliteit voor de positionering van deze PSU panelen ten opzichte van de stoelen, was het optimaal al deze voorzieningen in één paneel te concentreren.

Een probleem hierbij leverde de geringe ruimte die binnen het PSU paneel beschikbaar was. Voor de luidspreker bleef slechts een ruimte over van 5 cm diameter. Het is twijfelachtig of er binnen deze afmeting een luidspreker gevonden kan worden die aan de eisen van de geluidsdruk en frequentie overdracht voldoet.

In april 1986 zijn proeven uitgevoerd met een aantal van deze PSU panelen die gemonteerd werden in een mock-up van het vliegtuig interieur op werkelijke grootte. De mock-up was representatief ten aanzien van de toegepaste interieurdelen en was voorzien van stoelen.

De oorspronkelijk geselecteerde luidsprekers werden beoordeeld op de maximaal leverbare geluidsdruk, op de frequentie-overdracht en op de vervorming. Tijdens de hiervoor uitgevoerde metingen werd gebruik gemaakt van rose ruis en van zuivere tonen die via een ARINC PA versterker aan de luidsprekers werden toegevoerd.

De gemeten maximale geluidsdruk werd vergeleken met de verwachte benodigde geluidsdruk, die was bepaald uit voorspellingen van de cabine geluidsniveaus. Uit de meetresultaten bleek dat de toegepaste luidsprekers een te laag geluidsniveau leverden en bovendien een onacceptabele vervorming en een slechte spraak/muziekweergave hadden.

3.2 Tweede ontwerp

In mei 1986 ontstonden via de KLM, die door TNO-IZF metingen in vliegtuigen had laten uitvoeren, contacten met het Instituut voor Zintuig Fysiologie TNO-IZF in Soesterberg. Er werd kennis genomen van de door dit instituut ontwikkelde objectieve spraakverstaanbaarheid meetmethode (zie Appendix), hetgeen ertoe leidde dat van TNO assistentie werd gevraagd bij het uitvoeren van verdere proefnemingen.

Er werd een nieuw ontwerp gemaakt waarbij de luidspreker op een apart paneel werd gemonteerd. Dit maakte de toepassing van een grotere luidspreker met een diameter van 15 cm mogelijk.

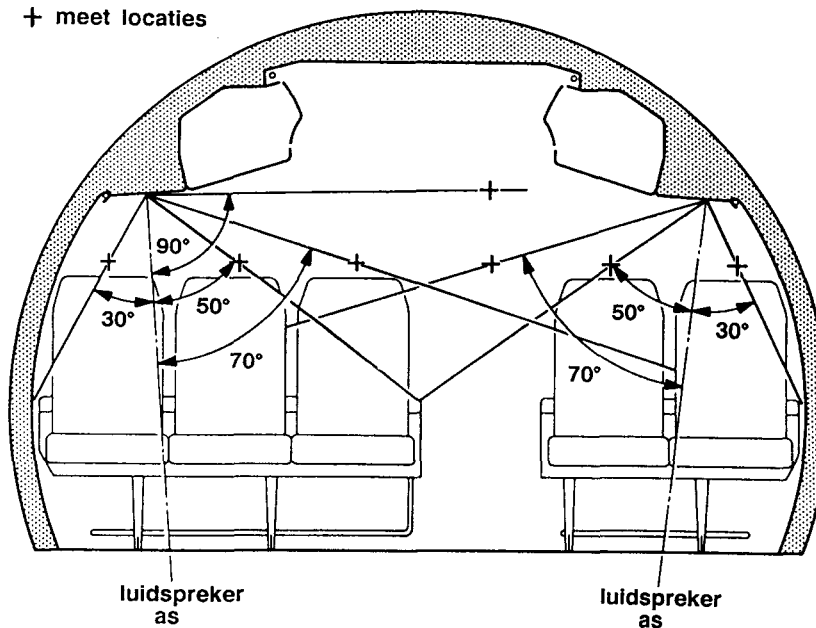
In juli 1986 werden de prestaties van dit ontwerp in de cabine mock-up bepaald. Hiertoe waren de nieuwe luidsprekers gemonteerd op houten proefpanelen. In de mock-up werd het achtergrondlawaai gesimuleerd door het weergeven van het in een F28 vliegtuig opgenomen geluid, omdat op dat moment nog geen geluidsband van de Fokker100 beschikbaar was (het eerste prototype vliegtuig zou pas in december 1986 zijn eerste vlucht maken).

Uit deze metingen bleek dat de STI waarden varieerden tussen 0.49 en 0.72, afhankelijk van de stoelpositie. Hoewel deze waarden reeds zeer dicht bij de ontwerpdoelstelling van 0.5 STI lagen, werd de marge te klein geacht om er zeker van te zijn dat in het echte Fokker100 vliegtuig de ontwerpdoelstelling daadwerkelijk gehaald zou

worden. Met name de stoel aan het gangpad werd marginaal bevonden. De belangrijkste beperking voor de verstaanbaarheid bleek de signaal-ruis verhouding te zijn. Dit kon worden verbeterd door de luidspreker een hogere geluidsdruk te laten leveren. Zoals echter blijkt uit figuur 3 was de luidspreker vrij dicht bij de passagier aan het raam geplaatst, waardoor de geluidsdruk niet verder kon toenemen zonder het comfort van deze passagier aan te tasten. De situatie was vooral ongunstig omdat de luidspreker-as juist in de richting van de passagier aan het raam wees, waardoor de afstraling naar de passagier aan het gangpad niet optimaal was.

Tijdens deze metingen werd door middel van het aan- en uitschakelen van luidsprekers bovendien vastgesteld dat bij elke stoelrij tenminste twee luidsprekers nodig zouden zijn, één aan elke zijde van het vliegtuig. Hierdoor werd het noodzakelijk het aanzienlijke gewicht van 16 kg te reserveren voor de luidsprekers en aanpassingstrafo's.

+ meet locaties



Figuur 3 De plaatsing van de PA luidspreker in de Fokker100 cabine.

3.3 Uiteindelijk ontwerp

Op basis van bovenstaande resultaten is een nieuw ontwerp gemaakt waarbij een kleinere en dus lichtere luidspreker werd toegepast, die bovendien 50° naar het middenpad werd gekanteld. In juli 1986 werd dit ontwerp beproefd in de mock-up met behulp van nieuwe houten proefpanelen. Ditmaal werd gebruik gemaakt van gesimuleerd achtergrondlawaai door middel van een ruisbron met een equalizer. Het spectrum van het gesimuleerde geluid werd door middel van een real-time analyzer zo goed mogelijk gelijk gemaakt aan het voorspelde Fokker100 geluidsspectrum. Het achtergrondniveau werd gelijk gemaakt aan het hoogste voorspelde niveau voor de Fokker100 teneinde zeker te zijn van een voldoende marge voor de verstaanbaarheid in het toekomstige vliegtuig. (Dit niveau treedt op bij de achterste stoelrijen, die zich het dichtst bij de motoren bevinden.)

Het resultaat van deze meting was dat op alle zitplaatsen een acceptabele STI waarde tussen 0.57 en 0.70 bereikt kon worden. Bovendien werd vastgesteld dat het mogelijk was om twee 4 ohm luidsprekers te koppelen aan één aanpassingstrafo, waardoor een acceptabel totaal gewicht van 9 kg bereikt werd in plaats van de 16 kg van het vorige ontwerp.

Deze resultaten waren zodanig dat het ontwerp van het PA systeem bevroren kon worden nog voordat het eerste Fokker100 prototype zijn eerste vlucht had gemaakt. Ongeveer een jaar later kwam er een eerste proef exemplaar van het uiteindelijke luidsprekerpaneel beschikbaar. Hiervan is onder andere de frequentie overdracht bepaald, teneinde vast te stellen of er ongewenste resonanties op zouden treden. Na enige kleine wijzigingen werd het ontwerp vervolgens geschikt geacht voor serie productie.

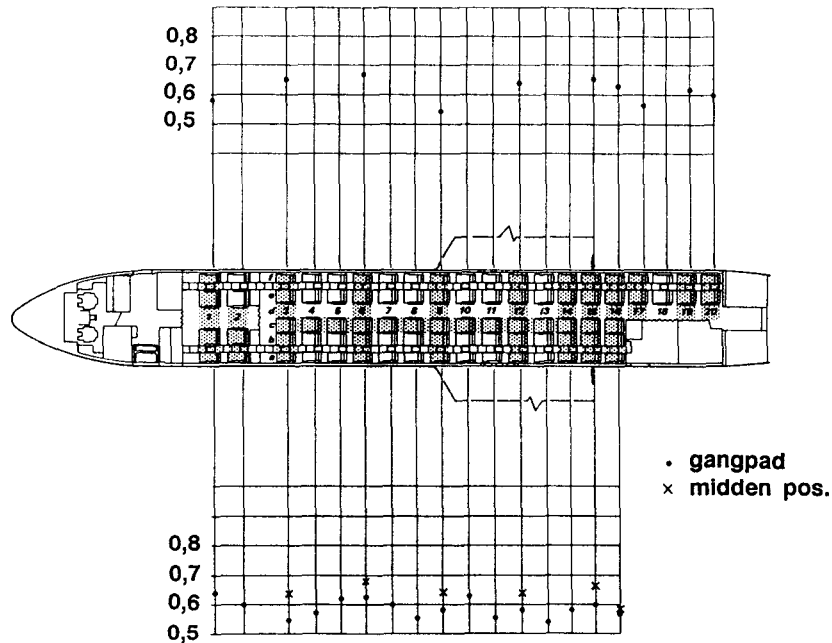
4 CERTIFICATIE

In januari 1988 werden in het eerste Fokker100 serie-vliegtuig STI metingen uitgevoerd ten behoeve van de certificatie van het PA systeem.

Met de Rijksluchtvaartdienst was overeen gekomen dat STI metingen uitgevoerd zouden worden bij de voor de Fokker100 representatieve kruisconditie op een hoogte van 30,000 ft (iets meer dan 9 km) en met een snelheid van Mach 0.72 (ongeveer 770 km/hr). Als afkeurcriterium zou een STI waarde van 0.5 gehanteerd worden.

In figuur 4 zijn de meetresultaten van deze vlucht gepresenteerd. Hieruit blijkt dat op alle stoelen STI niveaus hoger dan 0.5 zijn gevonden. De gemeten STI waarden komen goed overeen met de metingen in de mock-up. Het is opmerkelijk dat ter plaatse van stoelrij 9 en 17 lagere STI waarden gevonden worden, hetgeen verklaard kan worden door het ter plaatse ontbreken van luidsprekers (wegens interferentie met een ander vliegtuigstelsel).

Inmiddels is gebleken dat behalve de RLD ook andere luchtwaardigheidsautoriteiten akkoord gaan met de door Fokker gevolgde certificatie procedure. De Britse CAA is er zelfs toe overgegaan om voor de introductie van nieuwe verkeersvliegtuigen in het Britse Koninkrijk een verstaanbaarheidsmeting te eisen. Zij accepteren naast de Articulation Index de STI methode als bewijsvoering.



Figuur 4 Gemeten STI niveaus in het eerste Fokker100 serievliegtuig Swissair s/n 11244, kruisconditie: 30000 ft, Mach 0.72.

5 DANKWOORD

De schrijvers van dit artikel zijn de heren H.J.M. Steeneken en E. Agterhuis van het IZF zeer erkentelijk voor hun inbreng.

REFERENTIES

1. Airborne Passenger Address Amplifier, Arinc Characteristic 715, Aug. 1984. Aeronautical Radio, Incorporated, Annapolis, Maryland, USA.
2. Steeneken, H.J.M. and Houtgast, T., A physical method for measuring speech-transmission quality, *J. Acoust. Soc. Am.*, 67 (1), Jan. 1980, 318-326.
3. Steeneken, H.J.M. en Houtgast, T., RASTI: Een hulpmiddel bij het evalueren van auditoria, *NAG Publ.* 78 (1-2) 1985. Hierin treft men een volledige literatuurlijst aan.

APPENDIX STI MEETMETHODE

De STI methode (zie [2] en [3]), zoals ontwikkeld en gevalideerd door TNO-IZF is een methode voor het bepalen van de spraakverstaanbaarheid van een systeem. Door middel van metingen wordt één getal voor het voorspellen van de spraakverstaanbaarheid bepaald, de Spraak Transmissie Index (STI). De STI heeft een waarde tussen 0 en 1, waarbij een lage waarde overeenkomt met een slechte verstaanbaarheid en een hoge waarde met een goede verstaanbaarheid. De methode biedt voor een vliegtuigbouwer zoals Fokker een aantal belangrijke voordelen. Ten eerste is het een objectieve methode, zodat er geen luistertests door bijvoorbeeld diverse luchtvaartautoriteiten nodig zijn bij de certificatie van het vliegtuig. Ten tweede zijn er tijdens de ontwerpfase geen proefpersonen nodig, hetgeen veel organisatorische inspanningen voorkomt. Ten derde levert de methode diagnostische informatie op, waarmee het mogelijk wordt de oorzaak te vinden van een eventueel tekort schieten van het systeem.

De methode is gebaseerd op de aanname dat de in spraak aanwezige spectrale verschillen de verstaanbaarheid bepalen. Door na te gaan in hoeverre deze spectrale verschillen na transmissie via een systeem behouden blijven is een voorspelling van de verstaanbaarheid te geven. Daarom is een speciaal testsignaal ontworpen waarin referentiesignalen zijn opgenomen. Dit testsignaal wordt op de ingang van het te testen systeem gezet. Door aan de ontvangtzijde te bepalen in welke mate de referentieverschillen behouden zijn gebleven is een maat voor de verstaanbaarheid te geven. De methode houdt rekening met achtergrondlawaai, niet-lineaire vervormingen en verstoringen van het signaal in het tijd-domein (zoals nagalm en echo's). De analyse-methode houdt bovendien nog rekening met eigenschappen van het menselijk gehoor, zoals maskering. Op deze aspecten wordt hieronder nog iets dieper ingegaan.

Signaal-ruisverhouding

Het testsignaal is een ruis signaal met een bandbreedte van één octaaf waarvan de intensiteit sinusvormig wordt gemoduleerd met diverse modulatiefrequenties. Het signaal doorloopt achtereenvolgens de 7 octaafbanden van 125 Hz tot 8000 Hz. De output van het te testen systeem wordt geanalyseerd. Het resultaat van deze analyse is een Modulation Transfer Functie voor elk van de 7 octaafbanden.

Maskering menselijk gehoor

Ieder van de 7 Modulation Transfer Functies (MTF) wordt vervolgens gecorrigeerd voor eventuele maskering door het menselijk gehoor. De correctie is gebaseerd op het geluidsniveau in de octaafband met een juist lagere frequentie dan de band waarvan de MTF moet worden gecorrigeerd.

Niet-lineaire vervormingen

Niet-lineaire vervormingen van het systeem, welke tot uitdrukking komen in een bijdrage van het signaal in andere octaafbanden, worden meegemeten door niet alle 7 octaafbanden tegelijk te testen, maar deze duidelijk afzonderlijk te behandelen. Dit gebeurt door in de geteste octaafband sinusmodulatie toe te passen, maar in de andere banden een hiermee ongecorrigeerd signaal te gebruiken (pseudorandom aan/uitzetten van het signaal ter

simulatie van een spraaksignaal). De niet-lineaire bijdrage van deze banden komt dan automatisch tot uitdrukking in de signaal-ruisverhouding van de geteste octaafband.

Tijd-domein verstoringen

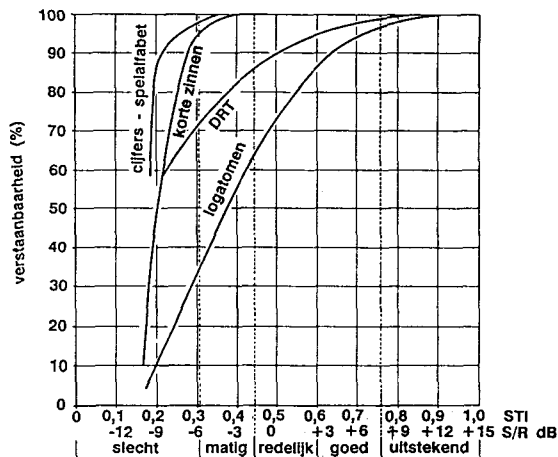
Of verstoringen in het tijd-domein werkelijk hinderlijk zijn hangt af van de tijdsduur van deze verstoringen ten opzichte van de karakteristieke tijden die in de menselijke spraak aanwezig zijn. Om deze bijdrage te kunnen bepalen is de modulatiefrequentie van het test-signaal aangepast aan de karakteristieken van menselijke spraak. Deze modulatiefrequentie doorloopt waarden van 0.63 Hz tot 12.5 Hz in 14 stappen van elk 1/3 octaaf. Voor elke van deze modulatiefrequenties wordt een Modulation Transfer Functie bepaald.

Berekening STI

Uit de 14 Modulation Transfer Functies die in elk van de 7 octaafbanden zijn bepaald wordt als volgt de STI berekend:

1. Correctie voor de maskering van het gehoor
2. Bepaling effectieve signaal-ruisverhouding
3. Normalisatie.
4. Bepaling octaafindices: gemiddeld over de 14 modulatiefrequenties
5. Bepaling STI: een gewogen gemiddelde van de 7 octaafindices.

Het verband tussen STI en diverse andere (subjectieve) spraakverstaanbaarheidsmeetmethoden is weergegeven in figuur 5. Hieruit blijkt dat bij een STI waarde van 0.5 een redelijke verstaanbaarheid wordt bereikt.



Figuur 5 Het verband tussen STI waarden en diverse andere methoden om de verstaanbaarheid te bepalen.

DRT = diagnostische rijm test.