

# Statt einer Festschrift

Ein Tribut an Werner A. Deutsch



HERAUSGEGEBEN VON KONRAD ANTONICEK,  
SYLVIA MOOSMÜLLER UND ANTON NOLL

WIEN 2012



---

© 2012 Institut für Schallforschung  
der Österreichischen Akademie der Wissenschaften  
Wohllebengasse 12-14, 1040 Wien

---

## INHALT

Zum Geleit ( <i>Giselher Guttmann</i> )	4
Geschichte der Schallforschung ( <i>Anton Noll</i> )	6
Erlebnis Schall – Schallforschung aus der Sicht eines Musikwissenschaftlers ( <i>Theophil Antonicek</i> )	10
Digitale Signalverarbeitung – Hard- und Softwareentwicklung ( <i>Anton Noll</i> )	15
Die Bedeutung Werner Deutschs für die Phonetik in Österreich ( <i>Sylvia Moosmüller</i> )	28
Zur Deutsch'schen Psychoakustik in Österreich ( <i>Bernhard Laback</i> )	41
Der Irrelevanz Algorithmus oder Was macht ein Mathematiker in der Psychoakustik? ( <i>Peter Balazs</i> )	45
Ein Beispiel eines Projektes: Eisenbahntunnel im anisotropen linear-elastischen horizontal geschichteten Boden ( <i>Holger Waubke, Wolfgang Kreuzer, Georg Rieckh, Christian Kaseß, Zhensheng Chen</i> )	59

---

# ZUM GELEIT

**Giselher Guttman**

Lieber Werner!

Der Schallforschung bin ich länger verbunden, als es sie – jedenfalls als eigenständige Einrichtung – überhaupt gibt. Denn unser gemeinsamer Lehrer Hubert Rohrer, der mich 1955 angestellt hatte, schickte mich – das Jahr ist in Vergessenheit geraten – ins „Phonogrammarchiv“, wo es interessante Methoden zur Aufzeichnung von Schallereignissen geben sollte, die auch ihn interessierten. Ich lernte dort die Pionierzeit der Sonographie kennen, das alte bis 1977 verwendete Gerät und seinen Nachfolger sowie die unglaubliche Fülle verschiedenster Fragestellungen aus der Welt des Schalls, von der Analyse von Mensch- und Tierstimmen bis zur Objektivierung der Klangeigenheit von Instrumenten. Ihnen hat einer meiner frühen Dissertanten, Werner Herkner seine Dissertation gewidmet, Sonogramme aller Instrumente des klassischen Orchesters erstellt und nach objektiven Korrelaten für die von der Instrumentationslehre angegebenen Ausdruckseigenheiten gesucht.

Zu einem meiner frühen Dissertanten zähltest aber auch Du mit Deiner Doktorarbeit „Die Lateralisation von akustischen Clicks in Abhängigkeit von der interauralen Zeitdifferenz und ihre neuropsychologischen Grundlagen“, die im Hinblick auf ihre Bedeutung für das Richtungshören 1974 auch im „Anzeiger der Philosophisch-Historischen Klasse“ erschienen ist. Als Du Mitarbeiter unserer 1972 als „Kommission für Schallforschung“ gegründeten und 2000 zum „Institut für Schallforschung“ elevierten Einrichtung wurdest, begann sie mit Dir – besser und korrekter gesagt: durch Dich – ihren Weg in die moderne Schallforschung.

Du beginnst unverzüglich mit der Eigenentwicklung von Software, die bald zu einem überaus potenten Werkzeug ausgebaut und 1986 als S\_Tools vorgestellt werden kann. Zu den frühen von Dir entwickelten Anwendungen zählen Signalverbesserungen für das Pho-

---

nogrammarchiv, mit denen alte Aufnahmen von Brahms und Kaiser Franz Joseph bearbeitet werden konnten. Aber mehr Gewicht hast Du schon früh auf die Möglichkeiten der Sprechererkennung gelegt, mit der Du Dich schon 1980 auseinanderzusetzen beginnst. Die Stimmanalysen eines Erpressungsversuchs an Hundertwasser führen in forensische Anwendungen, bei denen Du dann jahrzehntelang vor Gericht als bewundernswert souveräner Gutachter – das Institut blickt zur Zeit auf rund 470 Gutachten – aufgetreten bist.

Weit ist der Forschungshorizont des Instituts Dank Deiner Vielseitigkeit und Offenheit gespannt: Die Untersuchungen im Sittenbergtunnel der Westbahn waren der Anstoss zur Entwicklung neuer Modellierungen von Lärmschutzmassnahmen und der Bogen der Forschungen spannt sich von sonagraphischen Analysen der Klavierseiten von Thomastik bis zu den Möglichkeiten, für Träger von Cochleaimplantaten die Lokalisation von Schallquellen zu verbessern. Um ein Institut mit einem solchen Forschungsspektrum aufzubauen, bedarf es freilich nicht nur einer bewundernswerten Breite der Interessen seines Architekten. Dazu reicht auch nicht allein Neugier und Freude am Beobachten – Gaben mit denen Du in beneidenswertem Mass gesegnet bist. Es bedarf auch einer breit gestreuten Fachkompetenz für Gebiete, die auf der wissenschaftlichen Landkarte unglaublich weit voneinander entfernt liegen.

Du hast Dich jahrzehntelang in sie alle eingedacht und eingearbeitet und dadurch die für die Forschung so entscheidende Fähigkeit erarbeitet, entscheiden zu können, welche Projekte möglich sein sollten oder weniger aussichtsreich erscheinen. Diesen Kursvorgaben ist zu danken, dass wir nun mit Bewunderung auf ein international bekanntes und hochgeachtetes Institut blicken können, in welchem Forschungen betrieben werden, die keine andere universitäre oder ausseruniversitäre Einrichtung Österreichs durchzuführen vermag. Nimm unseren Dank dafür entgegen, dass Du im Geschichtsbuch der Schallforschung ein grosses und gewichtiges Kapitel geschrieben hast.

---

# GESCHICHTE DER SCHALLFORSCHUNG

## Anton Noll

Die Kommission für Schallforschung wurde am 28. Jänner 1972 gegründet. Ihr erster Obmann war Walter Graf und Werner Deutsch war der erste und einzige wissenschaftlicher Mitarbeiter. Die Kommission war als wissenschaftliche Ergänzung zum Phonogrammarchiv gedacht. Ihre Aufgaben waren mit „*Erforschung des Schalls als Informationsträger und Impulsgeber*“ [JB 1973, Graf] weitläufig definiert. Außerdem sollte sie sowohl eigene wissenschaftliche Projekte durchführen, wie auch andere Institute und Forschungseinrichtungen bei ihren Arbeiten unterstützen. Die Schallforschung war bei ihrer Gründung die einzige österreichische Institution, die speziell der Akustik und den damit verbundenen Bereichen gewidmet war und ist es auch bis heute geblieben.

Neben der Forschungstätigkeit waren die ersten Jahre hauptsächlich dem Aufbau einer umfassenden Fachliteratursammlung und des akustischen Labors gewidmet. Von Beginn an gab es vielfältige Kontakte zu Universitätsinstituten, wie zum Beispiel Psychologie, Musikwissenschaft, Sprachwissenschaft und Zoologie, was sich in einer großen Zahl von Kooperationen insbesondere mit Prof. Guttman, Prof. Födermayr, Prof. Dressler und Prof. Kratochvil niederschlug. Durch das Engagement von Herrn Deutsch in der österreichischen Sektion der Audio Engineering Society (AES), in der er seit 1975 mitwirkte, sowie seiner Teilnahme an den internationalen Tagungen der AES ergaben sich auch wesentliche Kontakte zu im Audiobereich tätigen Firmen und ausländischen Forschungseinrichtungen, woraus später zahlreiche Kooperationen und gemeinsame Projekte resultierten.

Durch die begrenzten finanziellen Mittel wie auch dem minimalen Personalstand erfolgte der Aufbau des Labors langsam aber stetig. Auch die räumlichen Möglichkeiten mussten erst geschaffen werden. Zu dem von Anfang an zur Verfügung stehenden Sonagraph wurden nach und nach weitere Labor- und Messgeräte angeschafft,

---

wobei auch schon die damals aufkommende Digitaltechnik berücksichtigt wurde. Herr Deutsch hat zum Erfahrungsaustausch auch ähnliche Einrichtungen im Ausland, zum Beispiel in Holland und Dänemark, besucht. Ab dem Jahr 1980 verfügte die Schallforschung über ein vollständiges akustisches Labor mit einer schallgedämmten Kammer, einer Prozessrechenanlage, einem Echtzeit Spektrumanalysator, dem Sonagraphen und verschiedenen anderen Laborgeräten. Für den Betrieb dieses Labors und nun auch für die Betreuung und Programmierung des Rechners war, mangels eines Technikers, weiterhin Herr Deutsch zuständig. Die neue Rechenanlage wurde zuerst hauptsächlich für das gerade aktuelle Langzeitprojekt der Sprecheridentifikation verwendet. Im Laufe der Zeit entstand aber eine allgemeine Programmbibliothek, die in vielen wissenschaftlichen Bereichen erfolgreich eingesetzt werden konnte.

Die Forschungstätigkeit der Schallforschung war, gemäß ihrer weit gefassten Definition, breit gestreut. Zu Beginn wurden hauptsächlich Projekte aus den Bereichen Psychologie, Sprachwissenschaft, Musikwissenschaft und Zoologie durchgeführt. Bald wurden aber auch Fragestellungen aus den Gebieten der Schallarchivierung, der Signalverbesserung, der Musikinstrumententechnik, der akustischen Forensik und der Lärmforschung bearbeitet. Ein wesentliches Anliegen von Herrn Deutsch war es, die gemeinsamen fachübergreifenden Modelle und Methoden herauszuarbeiten und zu verbreiten, insbesondere die Modelle der Psychoakustik und die Methoden der Signalanalyse und Visualisierung. Vor allem für die psychoakustischen Perzeptionsmodelle gab es viele Anwendungen, zum Beispiel in der Sprach- und der Musikwissenschaft, die naturgemäß in vielen Fragestellungen eng mit der Wahrnehmung verknüpft sind, und später auch in der, von rein technischen Maßen dominierten, Lärmforschung. Sein Engagement führte auch ab 1990 zur Mitarbeit im Österreichischen Arbeitsring für Lärmforschung (ÖAL) und in der Forensic Speech and Audio Analysis Working Group des European Network of Forensic Science Institutes (ENFSI), wo er auch im Steering Committee tätig ist. Ebenso war er 1996 Gründungsmitglied der Österreichischen Gesellschaft für Akustik (AAA) und leitet dort den Fachbereich für Hör- und Sprachakustik.

---

Der Personalstand der Schallforschung entwickelte sich nur langsam. In den ersten Jahren wurde die gesamte wissenschaftliche Arbeit von Obmann Walter Graf und dem einzigen ständigen Mitarbeiter Werner Deutsch, dem auch die technischen Aufgaben oblagen, bewältigt. Nur zeitweise, meist nur für die Dauer eines Projektes, konnten wissenschaftliche Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen oder eine Sekretariatskraft beschäftigt werden. Durch die ständigen Kooperationen waren natürlich auch immer Gastwissenschaftler aus dem In- und Ausland in der Schallforschung tätig.

1982 konnte ein Techniker angestellt werden, der für die Hard- und Softwareentwicklung und Teils zum Teil für die Betreuung des Labors zuständig war.

Seit 1986 wurde die akustische Arbeitsstation S\_TOOLS in der Schallforschung entwickelt. Bis 1993 waren bereits 27 Arbeitsstationen gebaut, davon wurden 20 bei Kooperations- und Projektpartnern im In- und Ausland betrieben.

Ab 1992 erfolgte der Aufbau der Arbeitsgruppe Phonetik unter der Leitung von Sylvia Moosmüller, wodurch die Ausdehnung der Forschung auf die Gebiete der Phonetik, Phonologie und Soziolinguistik ermöglicht wurde.

Mit dem 1. 1. 1994 wurde die Kommission in eine Forschungsstelle umgewandelt und Werner Deutsch zu deren Leiter bestellt. Die interne Organisation der Forschungsstelle erfolgte durch die Einteilung in die drei Fachabteilungen Psychoakustik, akustische Phonetik und Linguistik und vergleichend systematische Musikwissenschaft sowie die technische Abteilung für Signalverarbeitung und Softwareentwicklung.

1999 kamen Bernhard Laback, der sich intensiv mit Hörschäden und vor allem mit dem Hören mit Cochlea Implantaten beschäftigt, und Peter Balazs, der zuerst in der Softwareentwicklung mitarbeitete und später die Arbeitsgruppe für Mathematik und Signalverarbeitung leitete, an die Schallforschung.

Seit dem 1. 1. 2000 ist die Schallforschung ein Institut und Herr Deutsch ihr Direktor.

Seit 2001 gibt es am Institut auch eine Arbeitsgruppe für numerische Akustik unter der Leitung von Holger Waubke. Durch diese

---

wertvolle Ergänzung wurde es zum Beispiel möglich, Probleme der Lärmforschung aus dem Blickwinkel der Produktion, mittels numerischer Modelle, wie auch der Perzeption, mittels psychoakustischer Methoden, zu untersuchen.

Damit war die bis jetzt bestehende Organisation der Schallforschung komplett. Die Forschungsarbeit am Institut wurde in die Arbeitsgruppen Psychoakustik, Phonetik, numerische Akustik, experimentelle Audiologie, Mathematik und Softwareentwicklung aufgeteilt.

Begonnen hat die Kommission für Schallforschung vor 40 Jahren, mit einem wissenschaftlichen Mitarbeiter, in wenigen, vom Phonogrammarchiv abgezweigten Räumen. Heute sind es im Durchschnitt zwanzig Mitarbeiter, die am Institut für Schallforschung in den Bereichen Psychoakustik, experimentelle Audiologie, Phonetik, numerische Akustik, Mathematik und Softwareentwicklung arbeiten, spezifische und interdisziplinäre Projekte durchführen und dafür über ein hochwertiges akustisches Labor verfügen. Eine Entwicklung, die durchaus als Erfolgsgeschichte bezeichnet werden kann und die auf dem persönlichen Engagement von Herrn Deutsch beruht.



---

# ERLEBNIS SCHALL – DIE SCHALLFORSCHUNG AUS DER SICHT EINES MUSIKWISSENSCHAFTLERS

Theophil Antonicek

Wenn ich hier zu Werner Deutsch sprechen darf, so geschieht das sicherlich nicht, weil ich Experte in einer der vielen von ihm und „seiner“ Schallforschung vertretenen und betreuten Forschungsdisziplinen wäre. Meine Legitimation besteht nicht in fachlicher Qualifikation, sondern in dem Umstand, daß ich in jahrzehntelanger Freundschaft die Tätigkeit Werner Deutschs und die Entwicklung des heutigen Instituts für Schallforschung in engem Kontakt als bewundernder Dilettant miterleben konnte. Das brachte freilich auch mit sich, daß ich für mein persönliches Wissen sehr viel profitieren konnte, vor allem auch Dinge, die für meine eigenen, historischen Forschungen anregend und hilfreich waren. Das war auch deshalb möglich, weil Deutsch es bei mir nicht an der nötigen Geduld fehlen ließ und auch mehrmaliges, vermutlich meist dummes Fragen mit Erklärungen beantwortete, die auch mir einen Zugang, wenn auch natürlich nur von außen, zu der jeweiligen Materie ermöglichten, eine Art des Lernens, wie sie bei unserem von uns beiden wirklich verehrten Lehrer Walter Graf in dieser Weise nicht oder nur selten in persönlichen Gesprächen möglich war.

Lange Jahre haben wir an zwei in benachbarten Häusern tätigen wissenschaftlichen Institutionen gearbeitet, er an der Schallforschung (bzw. noch vorher am Phonogrammarchiv) unter Walter Graf und ich am Musikwissenschaftlichen Institut der Universität unter Erich Schenk. Wir haben uns in dieser Zeit so gut wie jeden Tag beim Mittagstisch gesehen, wobei es natürlich auch zu Gesprächen über unsere wissenschaftlichen Tätigkeiten und über die Erfahrungen mit unseren Chefs kam. Diese haben sich nach anfänglicher, immer etwas gezwungener Eintracht bald auseinander entwickelt, bis es schließlich zu einem lautstarken Krach kam, der das Verhältnis endgültig zerstörte. Für die Beziehung zwischen Deutsch und mir war das freilich kein Problem, wir haben das Treiben der beiden eigenwilligen

---

Kampfhähne gelegentlich auch belustigt betrachtet. Als dann beide in den Ruhestand traten und damit auf ihre Akademiepositionen – Schenk als Obmann der Kommission für Musikforschung, Graf als Leiter der Kommission für Schallforschung – reduziert waren oder nobler ausgedrückt sich konzentrieren konnten, blieb unser Erfahrungsaustausch weiter bestehen, nur daß er jetzt seinen Charakter insofern änderte, als wir unsere Zusammentreffen meist mit der Frage begannen, wie es denn dem „Ahn!“ des anderen ginge.

Eine Schlüsselstellung erhielt Werner Deutsch für mich nach der Einführung des Computers. So viel möchte ich mir zugutehalten, daß ich ziemlich bald erkannte, daß hier die Zukunft von unser aller Arbeit liege, und daher besuchte ich einen von der Akademie der Wissenschaften organisierten Computerkurs, von dem ich zwar direkt nichts profitierte, aber doch auf die Möglichkeiten der Arbeit mit dem elektronischen Medium aufmerksam wurde. Wir erhielten dann die Möglichkeit, auf einigen für alle bestimmten Geräten zu arbeiten. Dabei ging es zunächst vor allem um das Erlernen der nötigen Technik. Und da hat Werner Deutsch bei mir eingegriffen mit den Worten *„Du setzt Dich neben mich und arbeitest, und wenn ein Problem auftaucht, meldest Du Dich.“* Das funktionierte großartig, und bald konnte ich dann auch selbständig auf einem eigenen Computer arbeiten und mußte Werner nur bei auftauchenden, meine Fähigkeiten überfordernden Problemen konsultieren.

Was uns damals zu dieser Arbeitsgemeinschaft verband, war neben Persönlichem auch das von mir betriebene Projekt einer Datenbank zur österreichischen Musik. Da damit zunächst vor allem eine Bibliographie auch mit inhaltlicher Auswertung verbunden war, stellten sich natürlich computertechnische Probleme, die Deutsch löste und immer wieder auf neuen Stand brachte. Dabei haben wir oft bis tief in die Nacht gearbeitet, er vor dem Computer, ich daneben, stets seiner oft auch dick hereinprasselnden Fragen (*„So, jetzt brauch ich Dich, was willst Du da jetzt haben ...“*) gewärtig. Auf diesem Weg entstand eine von Deutsch entwickelte Datenbank, welche die problemlose Arbeit ermöglichte.

Schon vom Anfang haben wir aber auch über andere Probleme gesprochen, vor allem über Möglichkeiten des Einsatzes etwa der

---

Schallanalyse für musikalische Untersuchungen. Darauf aufmerksam gemacht hatte bereits immer wieder Walter Graf. Ich erinnere mich etwa an seine Ausführungen über einen Gesang über einen Vulkanausbruch, wobei sich zeigte, daß die Schallanalyse des Gesanges ein der Schallanalyse des Naturereignisses entsprechendes Bild ergab. Aufmerksamkeit erregte es, als Walter Graf und Franz Födermayr in den zum 200. Geburtstag Beethovens erschienenen *Beethoven-Studien* der Akademie der Wissenschaften Musik des Meisters mit schallanalytischen Methoden untersuchten, was übrigens auch den unfreiwillig komischen Effekt einer Zeitungsüberschrift *Der Sonagraph beweist Beethovens Genialität* zeitigte. Auf viel mehr Verständnis ist damals die Methode, die ja nicht behauptet, alle anderen Methoden restlos zu ersetzen, bei vielen auf ihre eigenen Analysemethoden eifersüchtigen Musikern und Musikhistorikern auch nicht gestoßen. Wir haben freilich damals nicht aufgehört, uns zumindest mit dem Problem zu beschäftigen und haben auch praktische Untersuchungen an Musik Anton Bruckners durchgeführt. Daß die Sache dann mehr oder weniger versickert ist, liegt hauptsächlich daran, daß wir beide von unseren jeweiligen eigenen Tätigkeiten immer mehr aufgefressen wurden.

Ähnlich ging es mit einem anderen Problem, über das wir schon früh und dann oft und oft gesprochen haben, nämlich ob und in welcher Weise die Taubheit bzw. das Taubwerden Beethovens sich in seinem Schaffen niedergeschlagen habe. Angeregt wurde das durch Thomas Manns *Doktor Faustus*, wo das extreme Auseinandergehen der melodischen Linien in äußerste Höhen und Tiefen in Beethovens letzter Klaviersonate op. 111 besprochen wird. Wir haben dann auch versucht, noch andere Kriterien zu finden. Das Ganze scheiterte dann an mir, weil ich als der Historiker Beethovens Werke auf „verdächtige“ Stellen zu untersuchen gehabt hätte, ein umfangreiches Vorhaben, das mir damals neben meinen Verpflichtungen durchzuführen nicht möglich war. Es ist allerdings zu der ganzen Sache zu sagen, daß sich unsere Unterhaltungen niemals in tödlichem „seriösem“ Ernst abspielten und immer auch die Möglichkeit offenstand, das Ganze als Spaß zu verstehen. So wissen wir vermutlich beide nicht, wie ernst es uns mit diesem Projekt war. Inzwischen höre ich, daß das

---

Problem gerade in letzter Zeit ohnehin untersucht wird. Wenn wir uns etwas für eine gemeinsame Pensionstätigkeit auswählen wollten, müssten wir neu mit der Suche beginnen.

Eingangs habe ich davon gesprochen, daß ich Zeuge der steilen Entwicklung werden durfte, die die Schallforschung seit der Gründung der Kommission vor allem durch und unter Werner Deutsch genommen hat. Ich muß in diesem Kreis nicht darüber sprechen, welche wenigstens für den Laien unglaublichen Entwicklungen die Forschungsmethoden und -möglichkeiten in der weiten Welt des Schalles genommen haben. Natürlich habe ich nicht alles in ununterbrochener Reihenfolge erlebt, aber wichtige Errungenschaften auf verschiedensten Gebieten konnte ich doch sowohl im Gespräch wie vor dem Bildschirm kennenlernen. Um nur wenig herauszugreifen, da war etwa die Stimmerkennung, die ja auch eine eminent praktische Bedeutung hat, kann doch heutzutage niemand mehr seine Stimme so verstellen, daß er nicht erkannt würde. Oder die Untersuchung des Hörerlebnisses, schon ein Steckenpferd Walter Grafs, der vermutlich völlig fassungslos vor den heutigen Ergebnissen und Möglichkeiten auf diesem Gebiet stehen würde. Auch hier ergeben sich wieder eminente praktische Auswirkungen, wenn ich an die Cochlea-Implantate bei Gehör-Geschädigten denke. Dazu gehören aber auch die exakten Messungen über die Hörfähigkeit, die ich dankbar auch an mir selbst erfahren durfte. Die Versuche, wie viel von einem Hörerlebnis weggeschnitten werden könne, damit das Gehörte noch immer erkennbar bleibt, können eine wertvolle Hilfe für Musiker sein, ebenso auch die Untersuchung der akustischen Eigenschaften von Musikinstrumenten, die zugleich auch für den Instrumentenbau wertvoll sind. Licht fällt auch auf die Gesetze der Raumakustik, jahrhundertlang ein nicht gelöstes Problem, wenn man an den Ruhm denkt, den einzelne Musik- und Theaterräume wegen ihrer Akustik genießen, während bei anderen das Gegenteil der Fall ist. Ich habe selbst erlebt, wie Werner Deutsch das mit dem unschönen Wort „Beschallung“ bezeichnete Problem bei akustisch ungünstigen Räumen wie etwa dem schönen Festsaal der Akademie der Wissenschaften mit der entsprechenden Aufstellung von Mikrofonen lösen konnte. Besonders imponiert haben mir die Untersuchungen zum Sittenberg-Tunnel der

---

Westbahn, in dem sich immer durch das Fahrgeräusch der Züge eine schwer erträgliche Belästigung der Fahrgäste ergeben hatte. Hier wurden mögliche Problemlösungen (verschiedene Beläge der Tunnelwände) mittels mitfahrender Mikrophone untersucht, ich konnte mich selbst von den wenigstens für mich frappierenden Unterschieden überzeugen.

Eine andere Seite von Werner Deutschs Aktivität ist seine Offenheit gegenüber den Forschungen anderer. Er hat seine Bereitschaft und Fähigkeit zur Zusammenarbeit in zahlreichen Fällen bewiesen, vielfach indem er auch „einfach“ nur sein Wissen und die von seinem Institut gebotenen Möglichkeiten zur Verfügung stellte. Es sind wohl unzählige Arbeiten, die auf diesem Weg wertvolle Förderungen erfahren haben. Hervorheben möchte ich die akademische Jugend, der in Deutschs Institut von ihr wahrscheinlich ungeahnte Forschungsräume geboten wurden. In Vorlesungen und in persönlichen Gesprächen hat er sein großes Wissen und Können weitergegeben und damit vielfach die Begeisterung junger Leute erweckt, die sogar manchmal unerwünschte Ausmaße erreichen konnte. Jedenfalls bin ich immer wieder auf Studenten gestoßen, die sich in glühenden Worten über Deutsch äußerten, wobei sie wohl wußten, daß sie damit bei mir an der richtigen Adresse waren.

Je mehr man an die gemeinsame Vergangenheit denkt, umso reicher und bunter wird die Palette des Erlebten. Ich will es aber bei den bisherigen Erinnerungsfragmenten bewenden lassen. Ich wünsche Dir, lieber Werner, alles Gute für Deinen Ruhestand, der Dir nur das Mindestmaß an Unruhe bringen möge, das Du zu Deiner schöpferischen Hektik brauchst. Denn daß Du es fertigbringen kannst, Dich aus dem in Deinem Lebenswerk manifesten wissenschaftlichen Gebäude ganz zurückzuziehen, kann ich eigentlich nicht glauben, so sehr ich Dir weite Ruhezone vor allem in der von Dir so geliebten Natur wünsche und vergönne. Zum letzten kann ich es nicht unterdrücken, noch auf etwas nicht streng Fachlich-Wissenschaftlich hinzuweisen: Werner Deutschs Begeisterungsfähigkeit, vor allem für die vielfachen Erscheinungen der Natur, aus der man nur demütig lernen kann. Lass mich, lieber Werner, noch lange und oft von Dir lernen!

---

# DIGITALE SIGNALVERARBEITUNG – HARD- UND SOFTWAREENTWICKLUNG

**Anton Noll**

Software wird in der Schallforschung bereits seit mehr als dreißig Jahren entwickelt. Bereits 1979 wurde die erste Rechananlage in Betrieb genommen. Noch im gleichen Jahr begann Herr Deutsch, der damals neben seiner Arbeit als Wissenschaftler auch für die Betreuung des Labors und der technischen Einrichtung verantwortlich war, mit der Entwicklung der ersten Programme. Da zu dieser Zeit die Signalverarbeitung noch in den Kinderschuhen steckte, waren nicht nur wissenschaftliche Programme gefragt, sondern es musste auch die gesamte Infrastruktursoftware mühsam erarbeitet und implementiert werden. Bis Mitte 1982 war Herr Deutsch alleine für die Programmierung zuständig. In diesen drei Jahren entstand bereits eine umfangreiche Programmsammlung, die neben den wesentlichen Basisfunktionen auch Algorithmen zur Sprachanalyse und für die Spektrografie umfasste. Als im August 1982 ein von der Schallforschung schon lange geforderter Hard- und Softwaretechniker angestellt werden konnte, war es Herrn Deutsch möglich, sich aus der aktiven Entwicklung zurückzuziehen. Er blieb aber der Softwareentwicklung bis heute in vielfältiger Weise erhalten, nicht zuletzt mit seinen nicht immer einfach zu realisierenden spontanen Ideen und als kritischer Tester. Auch viele der zu Beginn entwickelten Konzepte sind noch immer in der Software enthalten und werden bei der Weiterentwicklung berücksichtigt.

Die Rechananlagen der achtziger Jahre sind mit den heutigen nur entfernt verwandt. Wer gewöhnt ist, am PC oder Laptop zu sitzen und beliebig viele Programme parallel zu verwenden, kann sich die Arbeit an einem Terminal neben einem schrankgroßen, lauten Computer, dessen Leistung und Bedienungskomfort an den Laptop nicht annähernd heranreicht und der außerdem eine ebenso große und laute Klimaanlage benötigt, nur schwer vorstellen. Trotzdem bedeutete dieses Gerät einen enormen Fortschritt, da es vielfälti-

---

ge neue Möglichkeiten bot, wie zum Beispiel die Implementierung komplexer numerischer Methoden und die Automatisierung von Analysen und anderen Verarbeitungsschritten. Eine wichtige Neuerung, welche die Transkription von Sprache und Musik sehr erleichterte, ergab sich durch die graphischen Möglichkeiten. So konnten nun Analysegraphiken, zuerst nur im Druck, später auch am Bildschirm, erzeugt werden, die mehrere Parameter des Signals zeitlich synchron darstellten (z. B. Spektrogramm, Wellenform, Grundtonspur). Der Entwicklungsaufwand in den ersten Jahren war enorm, da neben den wissenschaftlichen Programmen auch die gesamten, für die Signalverarbeitung notwendigen Basisfunktionen implementiert und teils auch erfunden werden.

Ein Vorteil der noch einfachen Computertechnik war, dass sie durchschaubar, berechenbar und damit leicht erweiterbar war, was von heutigen PCs nicht unbedingt behauptet werden kann. Eine solche Erweiterung des Systems war auch bald gefragt, da es auch für interaktive Tests und andere Echtzeitaufgaben eingesetzt werden sollte. Daher wurde bereits 1983 mit einem der ersten verfügbaren Signalprozessoren eine externe Peripherie entwickelt, die diese Aufgaben übernehmen sollte. Da dieses Gerät zwischen den Host-rechner und die Signalwandler geschaltet war und vom Host aus programmiert werden konnte, war es für die Durchführung vielfältiger Echtzeitverarbeitungen geeignet und konnte vom Host auch als schneller numerischer Prozessor verwendet werden. Da es sich um eine der ersten Signalprozessorapplikationen in Österreich handelte, wurde diesem Gerät auch reges Interesse von anderen Instituten und auch Audioherstellern entgegen gebracht. Obwohl wir später noch mehrere andere Signalprozessorschaltungen entwickelten und auch kommerzielle DSP-Produkte einsetzten, war dieses erste System wohl das erfolgreichste. Es wurde mit wenigen Änderungen in die S\_TOOLS Workstation übernommen und blieb bis zum Jahr 2000 im Einsatz.

Neben den eigenen Forschungstätigkeiten war eine der Aufgaben der Schallforschung die Unterstützung anderer Institute und Forschungseinrichtungen. Dies führte zu einer großen Anzahl von Kooperationen mit den verschiedensten Fachrichtungen, was für die

---

Softwareentwicklung eine Menge Ideen und Anforderungen bedeutete, die in Anwendungen umgesetzt wurden. Zugleich wurden dadurch auch die in der Schallforschung entwickelten Methoden und Konzepte in andere Forschungsbereiche transferiert. Die Palette reichte von der Psychoakustik über die Musik- und Sprachwissenschaft bis hin zur Zoologie, was nicht nur für viele interessante Anwendungen sorgte, sondern auch für eine imposante Geräuschkulisse – von pfeifenden Amazonasfröschen zu indonesischen Gongs, über Klavier-sonaten und Kirchenglocken zu Volksmusik und knurrenden Fischen. Bei länger dauernden Projekten konnten die Klänge durchaus zu allergieähnlichen Reaktionen führen. Zum Glück sind Züge, Bremsen und Getriebe erst später dazugekommen.

Lange Zeit verfügte die Schallforschung über kein bleibendes Entwicklungsteam. Daher musste immer wieder auf freie Mitarbeiter oder die Hilfe von Studenten zurückgegriffen werden, ohne deren Beitrag die schnelle und umfassende Entwicklung nicht möglich gewesen wäre. In den achtziger Jahren gab es eine enge Zusammenarbeit mit der Musikwissenschaft, hauptsächlich mit Professor Fördermayr. Dadurch ergab sich auch, dass viele seiner Studenten ihre Arbeiten in der Schallforschung durchführten und einige davon auch bei der Programmentwicklung mitarbeiteten. Auf diese Weise fand sich auch das erste Entwicklungsteam für die PC Workstation, das aus den damaligen Studenten Heinrich Mislik, Gerhard Eckel und mir bestand. Beiden sind wesentliche Bestandteile des Paketes S\_TOOLS zuzuschreiben. Erst in der zweiten Hälfte der neunziger Jahre, am Beginn der Entwicklung von S\_TOOLS-STx, wurden längerfristige Anstellungen möglich. Seither besteht das Entwicklungsteam aus zwei bis drei ständigen Mitarbeitern.

## Konzepte

Die Richtung der Softwareentwicklung wurde natürlich hauptsächlich von den Anforderungen der durchgeführten Projekte bestimmt. In einigen Fällen kam es auch vor, dass die Möglichkeiten der Software Projekte anregten oder überhaupt denkbar machten. Obwohl die Entwicklung also meistens von den Anwendern und Projekten



---

angetrieben wurde, blieb sie auch immer bestimmten Grundsätzen treu.

Besonders Wert gelegt wurde auf die kumulative Sammlung von Algorithmen. Dadurch wurde erstens die spätere Wiederholbarkeit von Analysen und anderen Verarbeitungsschritten garantiert, zweitens konnten die vorhandenen Algorithmen in neue Methoden integriert werden, ohne neu implementiert werden zu müssen, und drittens entstand auf diese Weise eine „lebende“ Dokumentation der Arbeit des Instituts. Dieser Grundsatz wurde so genau verfolgt, dass auch in der aktuellen Version von S\_TOOLS-STx die meisten Algorithmen, die bereits am ersten Computer implementiert wurden, noch im Original oder als Weiterentwicklung verfügbar sind.

Der Grundsatz der kumulativen Entwicklung legt bereits eine Modulbauweise als beste Softwarestruktur fest. Alle Softwarepakete folgten daher einem modularen Aufbau, wobei die Schnittstellen der Module so festgelegt wurden, dass eine einfache Kopplung von Modulen zu komplexen Verarbeitungsgruppen möglich war. Am deutlichsten ist der modulare Aufbau in den „Signal Processing Units“ (SPU) von S\_TOOLS-STx realisiert.

Im Gegensatz zu vielen anderen Programmpaketen wurde auf die Signalsegmentierung von Beginn an großer Wert gelegt. Die Segmentierung sollte mit höchster Genauigkeit möglich sein, und es sollte keine Zerstückelung des Signals erfolgen, also der Kontext sollte erhalten bleiben. Die Software der Schallforschung verwendete daher, lange bevor Metadaten-Standards für akustische Signale definiert wurden, Segmenttabellen, die beliebig gelagerte, auch überlappende Teile eines Signals referenzierten. In Paket S\_TOOLS-STx wurde dieses Modell so erweitert, dass auch beliebige Metadaten, wie Transkriptionen, Annotationen, Parametersätze und Links zu externen Daten, zu einem Segment gespeichert werden können.

Da immer wieder größere bis sehr große Signalmengen verarbeitet werden mussten, wurde auch auf die Automatisierung von Abläufen Wert gelegt. Das führte auch zur Entwicklung der integrierten Scriptsprache, die anfangs eine einfache, z. B. an DOS und REXX angelehnte, Batchsprache war und sich im Laufe der Softwaregenerationen zu einer „echten“ objektorientierten Programmiersprache

---

wandelte. Die breite Streuung der Anwendungen erforderte es auch, dass die Länge eines zu verarbeitenden Signals keine Rolle spielt, also ganze Soundfiles mit beliebiger Länge oder Ausschnitte davon mit beliebiger Kürze verarbeitet werden können. Dies ist eines der Merkmale, die S\_TOOLS-STx von den sonstigen verfügbaren Softwarepaketen abheben.

Bei der Entwicklung der Benutzeroberfläche wurde vor allem auf zwei Punkte geachtet. Erstens sollte aus möglichst vielen Umgebungen, vor allem den graphischen Darstellungen, auf das zugrunde liegende Signal zugegriffen werden können, um eine akustische Kontrolle der Darstellung, die Transkription des Signals oder auch einen Vergleich von Signalen zu ermöglichen. Paradebeispiele dafür sind die Spektrogramm-Applikation von S\_TOOLS-STx, die verschiedenartige, zeitlich synchrone Darstellungen eines Signals liefert, und das in den letzten Jahren entwickelte Transkriptionsprogramm. Zweitens wurde natürlich eine logische Struktur der Oberfläche und eine intuitive Bedienbarkeit angestrebt. Leider muß ich gestehen, dass aufgrund des weiten Anwendungsfeldes, der Vielfalt der implementierten Funktionen und der divergierenden Vorstellungen der Anwender dieser Punkt nur teilweise erfüllt werden konnte.

Der Schwerpunkt der Software lag immer in den Bereichen Segmentierung, Transkription, Analyse, Visualisierung und Filterung. Die Funktionalitäten für Zeitbereichsverarbeitungen, wie Schneiden, Kopieren, Mischen, etc. und zur Signalsynthese waren auch immer implementiert. Sie wurden aber fast ausschließlich für die Signalaufbereitung, für die Erzeugung von Signalen, für psychoakustische Tests und zur Verifikation von Algorithmen und Modellen (Analyse durch Synthese) eingesetzt, jedoch nie in die Richtung „digitales Mischpult“ oder anderer, eher kommerzieller, Audioanwendungen optimiert.

## **HP 1000**

Das erste Softwarepaket für digitale Signalverarbeitung wurde auf einem Computer vom Typ HP 1000 implementiert, der 1980 installiert wurde und für etwa 10 Jahre ein zentraler Bestandteil des elektroaku-

---

stischen Labors der Schallforschung war. Die Anlage verfügte über einen Hauptspeicher von 128 kB, einem Massenspeicher von 20 MB und wurde mit einem Takt von wenigen MHz betrieben. Bei dem damals bei uns hauptsächlich verwendeten Signalformat (16 kHz, 16 Bit, mono), konnten daher ca. 300 Sekunden Signal gespeichert werden. Durch das für die Echtzeitverarbeitung ausgelegte Betriebssystem und der mittels Steckkarten erweiterbaren Hardware war das System für den Einsatz in der Signalverarbeitung bestens geeignet.

Da es noch keine standardisierte Audiosoftware gab, mussten auch die Basisfunktionen, wie zum Beispiel Aufnahme- und Wiedergabeprogramme, Datenformate und Tools für Speicherung und Verwaltung oder ein Signaleditor für digitalen Schnitt und Segmentierung neu entwickelt und implementiert werden. Nach der Entwicklung dieser Basissoftware konnte mit der Implementierung der Analyse- und Auswertungsprogramme begonnen werden, die ebenfalls von Grund auf erfolgte, da die existierenden Lösungen auf anderen Plattformen implementiert oder einfach nicht leistbar waren. Es wurden Libraries und Programme für die Spektralanalyse (FFT, Cepstrum), für die Sprachanalyse und Synthese (basierend auf LPC) und zur Extraktionen von Signalparametern (Grundfrequenz, Formanten, etc.) implementiert. Auf diese Weise entstand innerhalb weniger Jahre ein leistungsfähiges Programmpaket mit dem Schwerpunkt Segmentierung, Signalanalyse und Visualisierung, das aber auch Funktionen zum Editieren, Filtern und Generieren von Signalen enthielt.

Die Echtzeitkapazität des Prozessrechners reichte zwar für die kontinuierliche Aufnahme und Wiedergabe, jedoch nicht für die Signalverarbeitung. Für die Beschleunigung der Spektralanalyse wurde daher der vorhandene FFT Spectrum Analyser (SD 360) in das System eingebunden. Ein weiterer Schritt war die Entwicklung eines eigenen Signalprocessing Systems, das zwischen die AD/DA Konverter und den Rechner geschaltet wurde. Dadurch wurde es möglich, Filterungen und Synthesen, aber auch komplexe Ablaufsteuerungen für Experimente in Echtzeit durchzuführen. Eine der ersten Applikationen dieses Systems war ein LPC Sprachsynthesizer, der von einem am Host implementierten Text-to-Speech Programm gesteuert wurde. Auch ein zu dieser Zeit durchgeführter Test zur subjektiven Wahr-

---

nehmung der Tonhöhe von indonesischen Gamelan-Instrumenten wurde mit Hilfe dieses Systems durchgeführt.

Nachdem diese Hard- und Softwarebasis geschaffen war, konnten in Folge die für wissenschaftliche Projekte und Kooperationen notwendigen Algorithmen relativ einfach implementiert werden, da man sich nun auf das Wesentliche konzentrieren konnte. So wurden in den folgenden Jahren psychoakustische Modelle (z. B. Simultanverdeckung, Tonhöhe), Methoden zur Signalverbesserung, Verfahren zur Extraktion von Parametern aus Musik- und Sprachsignalen (harmonisches Gitter, Formanttracking) entwickelt und in das Paket integriert.

Neben der Arbeit für eigene Projekte wurde die Rechenanlage und Software der Schallforschung auch oft in Kooperationen von anderen Institutionen in Anspruch genommen. Zum Beispiel wurde es durch die Spektrogrammsoftware erstmals möglich, große Signalmengen mit erträglichem Aufwand zu spektrografieren. Dadurch konnten das Phonogrammarchiv (ÖAW) und das Institut für Musikwissenschaft (Univ. Wien) bei der Durchführung großer Transkriptionsprojekte unterstützt werden. Mit dem in der Schallforschung entwickelten Signalverbesserungsverfahren wurden einige der historischen Aufnahmen (z. B. Kaiser Franz Josef, Johannes Brahms, Hofopernsänger) für die Veröffentlichung bearbeitet. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Zoologie (Univ. Wien) wurden Methoden zur Analyse und Auswertung von bioakustischen Signalen entwickelt und teils animierte Grafiken für wissenschaftliche Filme erzeugt.

## S\_TOOLS

Mit dem Personal Computer (PC) ergaben sich neue Möglichkeiten für die Signalverarbeitung. Schon die ersten PCs erreichten die Spezifikation der bisher eingesetzten Rechenanlage, und es war abzu-sehen, dass die Hardwareentwicklung hier rasch vorangehen würde. Außerdem war der PC ein universell einsetzbarer Rechner und mit der Verfügbarkeit von Text-, Graphik-, Statistik- und Entwicklungssoftware war in Kürze zu rechnen. Da diese neue Plattform die Entwicklung einer günstigen und trotzdem leistungsfähigen Worksta-

tion ermöglichte, wurde beschlossen, das bestehende System auf den PC umzustellen. Der Standard IBM-PC mit dem Betriebssystem DOS wurde ausgewählt, da er die Möglichkeit der Hardwareerweiterung bot und das System einfach, hardwarenahe und echtzeitfähig war.

Für die neue Workstation wurde zuerst das eigene DSP-System so adaptiert, dass es als Steckkarte in den PC passte. Die AD/DA-Konverter verblieben in einem externen Gerät, das wieder über den DSP angekoppelt wurde, erhielten als Ergänzung aber einen Ein- und Ausgangsverstärker und eine Aussteuerungsanzeige. Da die normalen Grafikkarten weder die für die Visualisierungsfunktionen benötigte Auflösung noch die Geschwindigkeit erreichten, wurden ein spezieller Grafikkadapter, der eigentlich für CAD/CAM Systeme gedacht war, und ein zweiter Bildschirm als Grafiksubsystem eingesetzt.



Abb. 1: S\_TOOLS Workstation

Als Grundlage für das neue Programmpaket wurde natürlich die am Prozessrechner laufende Software verwendet. Allerdings mussten einige wesentliche Änderungen durchgeführt werden. Dazu gehörte auch das Erlernen einer neuen Programmiersprache, da ab jetzt die Entwicklung in der modernen Programmiersprache

C und nicht mehr in FORTRAN erfolgen sollte. Da Signalverarbeitung am PC noch keine Standardanwendung war, wurde ein eigenes Dateiformat für Signale entwickelt, das auch eine Segmentliste enthielt. Die bisher verwendeten Einzelprogramme wurden in eine einzige übergeordnete Applikation integriert. Zur Steuerung und Batchprogrammierung dieser Applikation wurde die erste, noch sehr

---

einfache Version der S\_TOOLS Scriptsprache entwickelt. Die Visualisierungsfunktionen konnten ebenfalls erheblich verbessert werden, da nun ein eigener Grafikbildschirm zur Verfügung stand, auf dem zusätzlich noch mehrere graphische Fenster möglich waren.

Die erste neue Arbeitsstation stand nach einer Entwicklungszeit von weniger als zwei Jahren ab Ende 1986 zur Verfügung und wurde S\_TOOLS getauft (S für Sound). Ein zu dieser Zeit mit der Firma Philips durchgeführtes Projekt, für das die Segmentierung und Spektrogramme benötigt wurden, ermöglichte einen umfangreichen Praxistest. Ein zweiter Testlauf, bei dem auch die Eignung der neuen Arbeitsstation für interaktive akustische Tests und für die Echtzeitverarbeitung geprüft wurde, konnte durch den Einsatz der Workstation bei der Dissertation von Gerhard Eckel durchgeführt werden. Dadurch wurde S\_TOOLS auch gleich um zwei bis heute wichtige Methoden erweitert, nämlich den allgemein zur Implementierung von Filtern verwendeten Phasenvocoder und den Algorithmus des Irrelevanz-Filters, der Gegenstand dieser Dissertation war.

Die Vorteile einer Workstation, die sowohl als „akustisches Labor“ als auch als normaler PC einsetzbar ist, waren natürlich nicht zu übersehen. Viele wesentliche Arbeitsschritte, von der Datensammlung über die Analyse und statistische Auswertung bis zur Publikation, konnten nun an einem Arbeitsplatz durchgeführt werden. Es war sogar möglich, wenn auch noch mühsam, mit diesem akustischen Labor zu verreisen, und es somit direkt bei der Feldforschung einzusetzen oder auf Tagungen mitzunehmen. Obwohl S\_TOOLS neben der Signalverarbeitung auch für einfache Auswertungen eingesetzt werden konnte, waren für komplexere Verfahren andere darauf spezialisierte Programme besser geeignet. Daher wurde es immer wesentlicher, auch Datenschnittstellen zur Verfügung zu stellen. Neben vielen speziellen Lösungen wird bis heute als Standardschnittstelle der Textfileexport verwendet, der, in verschiedenen Formaten, von fast allen Programmen unterstützt wird.

Ursprünglich erfolgte die Entwicklung von S\_TOOLS, um den Eigenbedarf der Schallforschung an Signalverarbeitungsmethoden zu befriedigen. Jedoch schon bald zeigten auch andere Forschungseinrichtungen und Firmen Interesse an der akustischen Workstation.

---

Im Lauf der Jahre wurden in Österreich, Deutschland, Italien und anderen Ländern in Universitätsinstituten, Forschungseinrichtungen, Archiven und Firmen im Verlauf von gemeinsamen Projekten und Kooperationen etliche S\_TOOLS Workstations aufgestellt. Auch bei S\_TOOLS war die Palette der Anwendungsgebiete über fast alle denkbaren akustischen Fachrichtungen gestreut.

S\_TOOLS war mehr als ein Jahrzehnt im Einsatz und wurde in diesem Zeitraum immer weiterentwickelt. Während die ersten Versionen noch hauptsächlich über die Befehlszeile bedient wurden, erhielten die späteren eine zu dieser Zeit übliche Menüführung mit Textfenstern. Auch die sich immer mehr verbreitende Maus und andere Eingabegeräte wurden sowohl in die Menüführung als auch in die Grafik integriert. Die rasante Hardwareentwicklung brachte nicht nur erheblich höhere Taktfrequenzen, sondern vor allem mehr Speicherplatz. Daher wurde es notwendig, der Signalverwaltung mehr Beachtung zu schenken. Die Software wurde daher so erweitert, dass S\_TOOLS auch als Soundfile- und Segmentdatenbank verwendet werden konnte. Bei einigen Archivierungsprojekten wurden Datenbankprototypen mit Hilfe von S\_TOOLS entwickelt. In den neunziger Jahren etablierten sich die ersten Standards für Signaldatenformate und Applikationen am PC. Um kompatibel zu diesen zu sein, wurde das Windows WAVE Format mit einer formatkonformen Erweiterung für Segmenttabellen in S\_TOOLS implementiert. Ab der dritten Version, also etwa 1992, wurden neben dem eigenen DSP-System auch kommerzielle Produkte verwendet. Da es sich hierbei um 32 Bit Floatingpoint Prozessoren handelte, wurde die numerische Genauigkeit erheblich verbessert, die Rechengeschwindigkeit jedoch nur marginal erhöht. Im Zuge dieser Umstellung wurde auch ein professionelles Wandlersystem eingebunden, wodurch nun alle Standardabtastraten im Bereich von 8 kHz bis 48 kHz zur Verfügung standen.

## **S\_TOOLS-STx**

In der Mitte der neunziger Jahre hatte sich das Hard- und Softwareumfeld sehr gewandelt. Die graphische Oberfläche setzte sich auch

---

am PC durch, und es standen neue Generationen von Multitasking Systemen zur Verfügung. Auch die Vernetzung in Form von LAN und Internet begann sich durchzusetzen. Da das erworbene Know-how und die nun schon beachtliche Sammlung von Algorithmen und Anwendungen erhalten und weiterentwickelt werden sollte, wurde beschlossen, S\_TOOLS auf eine neue Plattform zu portieren. Die Auswahl war diesmal nicht so einfach, da eigentlich keines der zur Verfügung stehenden Systeme alle Anforderungen erfüllte und sich vor allem die Echtzeitverarbeitung unter den neuen Architekturen schwierig gestaltete. Die Wahl fiel schließlich auf Windows NT, auch wegen der zur Verfügung stehenden Entwicklungstools und Libraries. Die neue Software erhielt den Namen S\_TOOLS-STx. Als Implementierungssprache wurde C++ gewählt, womit es möglich war, einen großen Teil des vorhandenen Quellcodes weiter zu verwenden.

Im ersten Anlauf war geplant, weiterhin eine eigene DSP-Hardware zu verwenden. Basierend auf einem 32 Bit Floatingpoint Chip wurde eine Multiprozessorkarte für einen PC Steckplatz entwickelt. Dieser Versuch scheiterte allerdings, nach anfänglichen Erfolgen, an der inzwischen doch sehr fortgeschritten und nicht mehr so gut dokumentierten Datenbus-Technologie des PC. Dieses Scheitern hatte aber auch positive Konsequenzen. Zuerst führte es dazu, dass wir vollkommen auf eigene Hardwarekomponenten verzichteten, also auch auf die AD/DA Konverter, und stattdessen Standardhardware einsetzten, womit S\_TOOLS-STx hardwareunabhängig wurde. Außerdem konnte das für die DSP Hardware entwickelte Modulmodell ohne Probleme so implementiert werden, dass es auch direkt am PC laufen konnte. Der am Anfang spürbare Verlust an Rechenleistung wurde durch die weitere Entwicklung der CPU-Chips rasch wettgemacht.

Für die Portierung waren umfangreiche Änderungen notwendig. Es musste eine neue Benutzeroberfläche entwickelt werden, die Grafik musste vollkommen neu gestaltet werden, und auch die Signalprozessingstruktur musste der neuen Systemarchitektur angepasst werden. Weiter ausgebaut wurde vor allem die Verwaltung von Soundfiles und Segmenten. Der inzwischen auf mehrere tausend Soundfiles angewachsene Datenbestand und die Notwendigkeit, auch Metadaten (Transkriptionen, Annotationen, extrahierte Parameter, ...)



---

und externe Verknüpfungen (Textdokumente, Grafiken, ...) in die Verwaltung mit aufzunehmen, erforderten eine Erweiterung der Datenbankfeatures und der internen Datenverwaltung. S\_TOOLS-STx speichert Segmentdefinition, Metadaten und Analyseergebnisse nicht mehr im Soundfile, sondern legt sie in einer eigenen, mit dem Soundfile (namentlich) verknüpften XML-Datei ab. Dieses Format wird auch für die interne Datendarstellung und auch, etwas vereinfacht, für die Anzeige in der graphischen Oberfläche verwendet. Das verwendete XML-Schema lehnt sich an den in MPEG-7 definierten Audiostandard an, ist aber nicht direkt damit kompatibel.

Die bisher einfach strukturierte Scriptsprache wurde ebenfalls wesentlich verbessert und erweitert sowie mit objektorientierten Features versehen. Sie spielt seither eine große Rolle in der Programmierung der S\_TOOLS-STx Applikationen, von Benutzeroberflächen und bei der Erstellung von speziellen Benutzerscripts. Das neue, von DOS her ungewohnte Multitasking musste erst in unsere Gehirne einsickern, wurde dann aber ein zentraler Bestandteil des Konzepts. In der heutigen Implementierung sind sowohl die Scriptinterpreter (Shells), wie auch die Grafikenfenster (Displays) und die Signalprozessingmodule (SP-Units) als eigenständige Subprozesse (Threads) implementiert, die parallel ablaufen und miteinander kommunizieren.

Zu Signalspeicherung wird in S\_TOOLS-STx hauptsächlich das Windows WAVE Format verwendet. Die früheren Formate werden, da sie einen erheblichen Teil des Datenbestandes ausmachen, weiterhin unterstützt. Eine besondere und vielfältige Signalquelle, die rudimentär bereits in S\_TOOLS existierte, ist die „Sequenz“. In dieser können synthetische Klänge und reale Signale (Segmente) in beliebiger, genau definierter zeitlicher Folge zusammengesetzt und mit Filtern, Mischfaktoren, Modulationen und Rampen versehen werden. Diese Signalquelle findet vor allem bei der Generierung von Testsignalen für Experimente Verwendung.

Die erste Version von S\_TOOLS-STx stand 1998 zur Verfügung und wird seither gepflegt, weiterentwickelt und in einer Vielzahl von Projekten der Schallforschung eingesetzt. Der Aufstieg zum Institut brachte für die Schallforschung neue Forschungsfelder und damit für die Signalverarbeitungssoftware neue Algorithmen und Anwendun-

---

gen. So wurde S\_TOOLS-STx für audiologische Experimente oder auch für die Aufnahme, automatische Segmentierung und die Auswertung von großen Signalmengen in Geräuschbewertungsprojekten (z.B. Zugsvorbeifahrten) eingesetzt.

Die neu entstandenen Arbeitsgruppen für Mathematik und Signalverarbeitung und für numerische Akustik brachten auch neue Impulse für die Softwareentwicklung. Die Projekte dieser Arbeitsgruppen führten zur Implementierung von neuen Methoden, wie z. B. einer Testumgebung für Frame Multiplier, der Wavelet Analyse, der Wigner-Ville Verteilung und des akustischen Beamforming, sowie allgemein zum Ausbau der numerischen und graphischen Funktionen. Durch die große Sammlung von Algorithmen, diese neuen Features und nicht zuletzt die Scriptsprache wurde S\_TOOLS-STx auch zu einer sehr effektiven Entwicklungs- und Testumgebung. Als solche wurde die Software in den letzten Jahren auch in einer Reihe von Forschungsaufträgen, vor allem mit Partnern aus der Industrie, eingesetzt.

Auch S\_TOOLS-STx wurde bei Projekt- und Kooperationspartnern installiert und auch in Vorlesungen an Studenten weitergegeben. Durch die Möglichkeit, die Software auch über das Internet zu beziehen, wurden auch private und industrielle Interessenten gefunden, was in einigen Fällen zur Vergabe einer Lizenz führte und auch Kooperationen anregte. Seit 2010 ist auch eine Freeware Version über den Webserver zu erhalten.

An der nun schon dreißig Jahre dauernden Softwareentwicklung waren eine Reihe von Mitarbeitern beteiligt. Die folgende Aufzählung in zeitlicher Reihenfolge erhebt nicht Anspruch auf Vollständigkeit: Werner A. Deutsch, Anton Noll, Heinrich Mislik, Gerhard Eckel, Stefan Wegscheider, Patrick Peck, Peter Balazs, Jonathan White, Holger Waubke, Timo Becker, Christian Gottschall, Ewald Enzinger.

Für die Bereitsstellung von Leihgeräten und die Unterstützung bei der Hardwareentwicklung sind wir den Firmen Siemens AG Österreich, AKG und Philips zu Dank verpflichtet.

---

# DIE BEDEUTUNG WERNER DEUTSCHS FÜR DIE PHONETIK IN ÖSTERREICH

Sylvia Moosmüller

## Kurzer geschichtlicher Abriss der Phonetik in Österreich

Die Geschichte der Phonetik in Österreich ist eng mit dem Phonogrammarchiv der Österreichischen Akademie der Wissenschaften verknüpft. Die Phonogramm-Archiv-Kommission wurde am 27. April 1899 durch die Kaiserliche Akademie der Wissenschaften gegründet, ihr erster Obmann war der Physiologe Siegmund Exner-Ewarten. Herausragende Forscherpersönlichkeiten wie der Physiker Leo Hajek, der Germanist Hans. W. Pollak, der Laryngo-Rhinologe Leopold Réthi und vor allem der Anglist Karl Luick arbeiteten dort. Karl Luick war von 1927 bis zu seinem Tod 1935 Obmann des Phonogrammarchivs.

1923 gründete Karl Luick das Institut für experimentelle Phonetik an der Universität Wien und bot Edward W. Scripture einen Lehrstuhl an. Erfreut berichtete die Romanistin Elise Richter in einem Brief vom 3. April 1923 Hugo Schuchardt von dieser Neueinrichtung, die es ermöglichen wird, „*allerhand Arbeiten, die früher hier nur aus zweiter Hand gegeben wurden*“ dann selbst zu machen<sup>1</sup>. E. W. Scripture wirkte bis 1933 in Wien, wo er aus eigenen Mitteln ein Phonetiklabor aufbaute. Er beschäftigte sich intensiv mit experimentellen Methoden in der Phonetik, sein Hauptinteresse galt den Sprachstörungen und der Psycholinguistik. Von 1924 bis 1930 war er Ehrenmitglied der „Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik“ und hielt dort Vorträge über „Neue Apparate für die Experimentalphonetik“ (1924), „Neue Untersuchungen zum Wesen des deutschen Verses“ (1925), „Grundbegriffe der Lautkurvenanalyse“ (1926), „Vortrag über die Natur der Vokale“ (1927). In

---

<sup>1</sup> Siehe Hugo Schuchardt Archiv: <http://schuchardt.uni-graz.at/korrespondenz/briefe/korrespondenzpartner/728/briefe/58-9568>.

---

letzterem versuchte er zu beweisen, dass die Empfindung eines Tones aus der Wiederholung eines Gehöreindrucks entsteht, die Empfindung der Qualität hingegen aus der Wellenform. Diese Ausführungen führten zu einer regen Diskussion unter den anwesenden Physikern über die physikalische Realität des Grundtones. Das schien sein letzter Vortrag in der Gesellschaft gewesen zu sein. Anlässlich der 20. Jahrestagung der Gründung der Österreichischen Gesellschaft für Experimentalphonetik (1934) wurde in den Vorträgen über den gegenwärtigen Stand der Experimentalphonetik von Desider Weiß (naturwissenschaftlicher Teil) und Elise Richter (sprachwissenschaftlicher Teil) seine Arbeit mit kritischer Skepsis betrachtet, insbesondere sein Versuch, mittels Tonhöhenkurven Stimmstörungen zu diagnostizieren. 1933 kehrte Scripture nach London zurück, ließ telegraphisch sein Institut sperren und jede Benutzung seiner Apparate verbieten<sup>2</sup>. Bemühungen, wieder ein phonetisches Institut an der Universität zu gründen, blieben fruchtlos. Arbeiten zur Phonetik wurden (wieder) am Phonogrammarchiv der Akademie der Wissenschaften ausgeführt.

Die Österreichische Gesellschaft für experimentelle Phonetik wurde am 19. Mai 1914 gegründet. Ehrenpräsident war Siegmund Exner-Ewarten, Präsident Leopold Réthi, nach dessen Tod 1924 gefolgt von Karl Luick. Die Gesellschaft war eine interdisziplinäre Vereinigung, die sich u. a. aus Medizинern, Philologen, Physikern und Technikern zusammensetzte. Entsprechend vielfältig waren auch die vorgetragenen Themenbereiche, die allesamt den Eindruck einer sich gegenseitig befruchtenden, wissenschaftlichen Auseinandersetzung auf hohem Niveau hinterlassen.

Wie bereits erwähnt, wurden nach dem Abgang Scriptures (experimental)phonetische Untersuchungen (wieder) am Phonogrammarchiv der Akademie der Wissenschaften durchgeführt. Während des zweiten Weltkriegs und danach wurde die Phonetikforschung mit den

---

<sup>2</sup> Siehe Elise Richter, Autobiographie: <http://www.romanistinnen.de/frauen/richter.html#veroeff>. Elise Richter äußert sich hier sehr enttäuscht über die äußerst schwierige Zusammenarbeit mit E. W. Scripture, der offenbar mit allen Fachkollegen „über Kreuz“ war, so auch mit Luick und Fröschels, dem damaligen Ehrenpräsidenten und dem damaligen Präsidenten der „Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik“.

---

Namen der beiden Anglisten Friedrich Wild und seinem Schüler Walter Ruth verbunden. Versuchen Eberhard Zwirners (Berlin), im Falle einer Zusammenlegung des Phonogrammarchivs mit dem Institut für Lautforschung die Leitung zu übernehmen, wurde erfolgreich entgegengewirkt.

1935 wurde Wild als Nachfolger des verstorbenen Karl Luick zum Inhaber des Ordinariats für Englische Sprache und Literatur bestellt. Er übernahm auch die Leitung des Dolmetsch Instituts. 1938 wurde er wirkliches Mitglied der Akademie der Wissenschaften und 1941 Obmann des Phonogrammarchivs. Sein Schüler Walter Ruth wurde 1938 zum Leiter. 1940 habilitierte er sich in Phonetik. Friedrich Wild unterstrich in seinem Gutachten die Bedeutung dieser Wissenschaft und auch speziell die Bedeutung eines Österreichers<sup>3</sup> für diese Wissenschaft:

*„Als gebürtiger Ostmärker ist Dr. Ruth aber auch mit der Sprechweise eines Grossteils der Studierenden der Wiener Universität vertraut und daher besonders geeignet, ost-märkische Studierende auf Schwierigkeiten aufmerksam zu machen, die ihnen bei der Aussprache des Englischen begegnen.“* (Hausmann 2003: 284)

Und weiter sein Bericht über Ruths Habilitationskolloquiums im Dezember 1941 im Phonogrammarchiv der Akademie der Wissenschaften:

*„In der programmatischen Einleitung der ersten Stunde wurden die allgemeinen Aufgaben und die Abgrenzung der Phonetik gegen die Nachbarwissenschaften erörtert. Die besonderen Forschungsaufgaben und Methoden der experimentellen Phonetik wurden dann nach drei Richtungen hin gekennzeichnet: genetisch, gennemisch und apperzeptiv. Unter den die Sprachlautbildung untersuchenden genetischen Methoden wurde die Verwendung*

---

<sup>3</sup> Möglicherweise, um die Bestrebungen Zwirners, die Leitung des Phonogrammarchivs zu übernehmen, abzuwenden.

---

*des künstlichen Gaumens gezeigt. In der Vorlesung des zweiten Tages wurden nach klar gefaßten Begriffsbestimmungen für einzelne Fachausdrücke die Verfahren der objektiven Festhaltung von Gehörseindrücken an den dazu dienenden Geräten vorgeführt, ihre Wirkungsweise in leicht verständlicher Weise veranschaulicht und an der Hand der Wiedergabe der dabei gemachten Sprechaufnahmen die Verwertbarkeit solcher Aufnahmen für sprachwissenschaftliche und musikwissenschaftliche Zwecke dargestellt. Der dritte Vortrag machte mit den Methoden der Herstellung von Daueraufnahmen bekannt und beschrieb die Wege, die der rechnerischen sprachwissenschaftlich-phonetischen Auswertung solcher Aufnahmen dienen, wobei besonders der Kathodenstrahloszillograph in seiner Wirkung gezeigt wurde.“ (Hausmann 2003: 285)*

Nach Ruths Tod folgte der Musikwissenschaftler Walter Graf 1953 als Leiter des Phonogrammarchivs, der die Notwendigkeit einer breit gefächerten Schallarchivierung betont:

*„Ein Vergleich der einzelnen Gebiete zeigt nun nicht nur die Übereinstimmung oder die Unterschiede auf, sondern er bietet auch manche Anregung von einem zum anderen Gebiet hin. [...] Für das Gebiet der sprach- und musikwissenschaftlichen Schallarchivierung können sich bereits Hinweise aus dem Vergleich der (experimental-) phonetischen und der akustischen, gehörophysiologischen wie der ton- bzw. musikpsychologischen Untersuchungen ergeben und Folgerungen für die technische Seite der Aufnahmen ableiten lassen.“ (Graf 1961: 52).*

Genau dieser interdisziplinäre Ansatz war die ideale wissenschaftliche Umgebung für Werner Deutsch.

---

## Die Bedeutung von Werner Deutsch für die Phonetik in Österreich

Wenn ich mich in meiner Darstellung auf die Bedeutung Werner Deutschs für die Phonetik beschränke, soll das keineswegs sein sehr breit gefächertes Wissen und seine Bedeutung für andere Fächer, wie die Musikwissenschaft, die Psychologie und insbesondere die Psychoakustik schmälern. Denn er verstand und versteht es wie kaum ein anderer, das Gemeinsame zu erkennen und herauszuarbeiten, den Graben zwischen Natur- und Geisteswissenschaften zu überbrücken. Genau aus diesem Wissenschaftsverständnis heraus erklärt sich, warum und in welcher Reihenfolge die fachspezifischen Bausteine zunächst in die Kommission, dann in die Forschungsstelle und zuletzt in das Institut für Schallforschung eingegliedert wurden und zu genau den Arbeitsgruppen führten, die heute das Institut ausmachen.

Werner Deutsch wurde 1969 in das Phonogrammarchiv als Vertragsbediensteter aufgenommen, just zu der Zeit, als der Nachlass von Felix Trojan zur Aufarbeitung anstand. Werner Deutsch setzte sich intensiv mit den Arbeiten Felix Trojans auseinander, dessen Arbeiten zur Biophonetik in der internationalen Fachwelt viel zu wenig bekannt sind. Insbesondere das von Trojan entwickelte Konzept der vokalen Enge/Weite bei emotionalen Stimmlagen schien Deutsch für weiterentwicklungswert.

Mit Maria Hornung und Eberhard Kranzmayer unternahm er Feldforschungsreisen und weiß so manche Anekdote aus den Befragungen von Gewährspersonen zu erzählen. Auch die bretonischen Aufnahmen Wolfgang U. Dresslers gingen durch seine Hände.

In den späten 1960iger Jahren entschied sich das Phonogrammarchiv, sich seiner ursprünglichen Aufgabe der Archivierung und Sammlung zu widmen und die wissenschaftliche Bearbeitung der Schallaufnahmen der 1972 gegründeten Kommission für Schallforschung zu überantworten. Obmann der Kommission für Schallforschung wurde Walter Graf, Leiter des Phonogrammarchivs wurde Dietrich Schüller.

Mit der Gründung der Schallforschung begann Werner Deutsch intensiv mit den Instituten für Psychologie, Sprachwissenschaft,

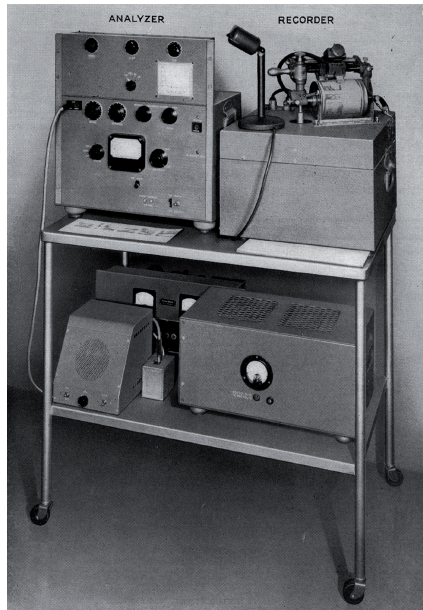


Abb. 1: Kay Sonagraph.

Musikwissenschaft und Zoologie zusammenzuarbeiten, wurde in die Lehre eingebunden und bearbeitete jeweils die akustischen Bereiche und hob somit das Verbindende dieser Wissenschaften hervor. In diese Zeit datiert auch eine Projektstudie zu Computern in der Akustik.

Sein sprachwissenschaftlich-phonetisches Interesse mündete in der Forschungstätigkeit im Bereich der forensischen Phonetik und Ton-technik. Er erstellte Transkriptionen, überprüfte Tonaufnahmen auf Manipulationen, analysierte Schüsse und Schussabfolgen und arbeitete zur Sprechererkennung. Erste Kontakte mit dem Bundesministerium für Inneres gehen auf das Jahr 1975 zurück, seine ersten Gutachten erstellte er 1977.

In der Sprechererkennung (Vergleich von Sprechproben) stützte sich seine Analyse auf einen auditiven und auditiv-phonologischen Vergleich sowie auf den Vergleich von Formantfrequenzen. Insbe-



sondere beim Vergleich von Formantfrequenzen war er methodisch seiner Zeit weit voraus, denn seine Messungen stützten sich nicht nur auf einen Meßwert in der Mitte eines Vokals, sondern bezogen den zeitlichen Verlauf von F1, F2 und (!) F3<sup>4</sup>. Diese Methode war kontextsensitiv und erforderte Textgleichheit der zu vergleichenden Proben/Äußerungen. Das Analyseverfahren war auch sehr zeitintensiv. Mithilfe des Kay Sonographen (siehe Abbildung 1) konnten Sonagramme über einen zeitlichen Bereich von ca. 2 s erzeugt werden. Anfang und Ende der vokalischen bzw. diphthongischen Elemente wurden mit einem Stift markiert (siehe Abbildung 2). Von der Äußerung der Vergleichstimme wurde in gleicher Weise ein Sonagramm erzeugt. Anschließend wurde der Verlauf der Formanten bestimmt und in verschiedenen Farben für Täter- und Vergleichsprobe auf eine Overheadfolie aufgetragen (siehe Abbildung 3) und übereinandergelegt. So konnte visuell Übereinstimmung und Nichtübereinstimmung von vokalischen und diphthongischen Sequenzen geschätzt werden.

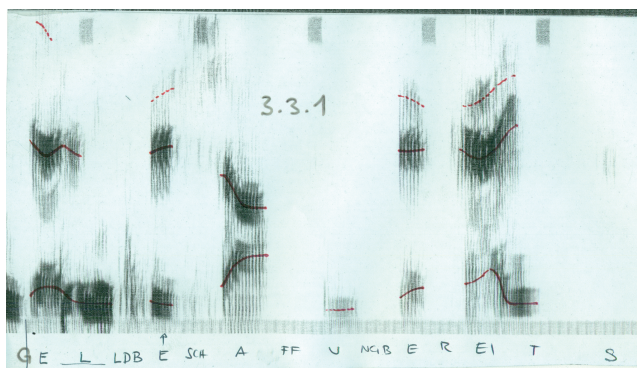


Abb. 2: Sonagramm einer Täterstimme mit handeingezeichneten Formantenspielen der Sequenz: „... Geldbeschaffung bereits...“.

<sup>4</sup> In der Forensik wurde erst 2005 mit der Dissertation von Kirsty McDougall auf die Notwendigkeit der Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs von Formanten hingewiesen.

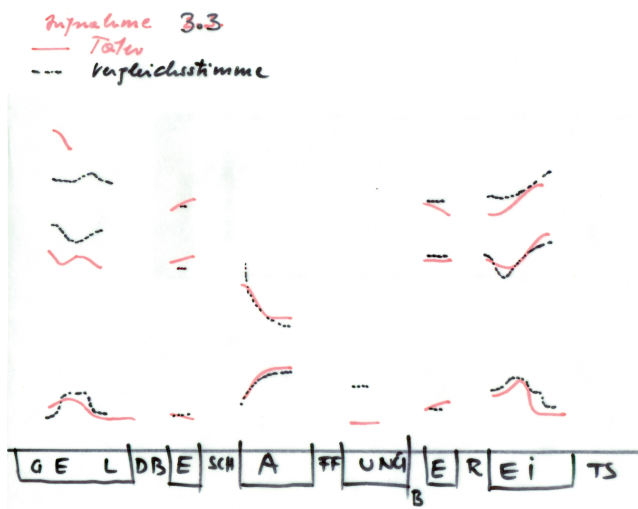


Abb. 3: Händisch übereinandergezeichnete Formantspuren von Täter- und Vergleichsstimme der Sequenz: „... Geldbeschaffung bereits...“.

1980 kaufte er einen Echtzeitspektralanalysator, der es ihm ermöglichte, gemittelte Spektren von Vokalen zu erzeugen, die er ebenso in der Sprechererkennung einsetzte (siehe Abbildung 4). Den Verlauf der Formanten über die Zeit zu vergleichen war dieser Methode jedoch überlegen, weil sie mehr Information enthielt und somit sicherere Hinweise bezüglich Übereinstimmung bzw. Nichtübereinstimmung lieferte. Daher wurde die Methode des Vergleichs von Formanten über die Zeit beibehalten. Werner Deutsch war sich völlig darüber im Klaren, dass es sich bei diesem Verfahren nur um eine Schätzung handelte, entsprechend vorsichtig war er auch bei der Evaluierung seiner Ergebnisse. Gleichzeitig wußte er aber auch, welche Schritte zu setzen waren, um in der Sprechererkennung methodisch vorwärtszukommen. Die wichtigsten Schritte waren daher:

- a) Die Entwicklung einer Software zur Bearbeitung großer Datenmengen und
- b) Die Erstellung einer Datenbank.

— Vergleichsstimme  
 Täterstimme  
 — neutrale  
 Vergleichsstimme

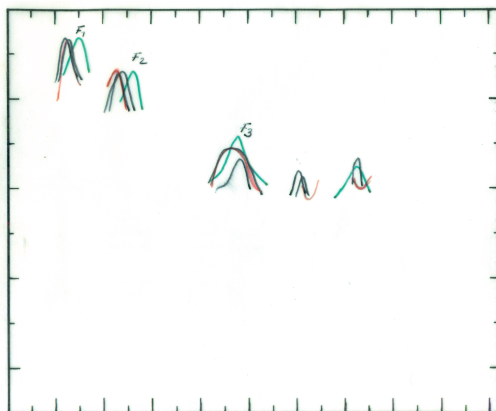


Abb. 4: Händisch übereinandergezeichnete spektrale Spitzen gemittelter Spektren des Vokals /a/ aus „Vater“ von Täter- und Vergleichsstimme sowie einer unbeteiligten Vergleichsstimme.

Beide Forschungsdesiderata wurden mithilfe von Projekten finanziert. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung wurde in den Jahren 1980 – 1985 das erste Softwarepaket auf einem Computer des Typs HP 1000 implementiert, das den Grundstein für die (weitere) Softwareentwicklung bildete<sup>5</sup>.

Zur Bearbeitung des zweiten Forschungszieles wurde ich 1992 im Rahmen des vom Bundesministerium für Inneres geförderten Projekts „Wissenschaftliche Sprachdatenbank“ als Mitarbeiterin angestellt. Während meines Mutterschutzes und meiner Karenzierung wurde ich von Ralf Vollmann vertreten.

Intensive Kontakte pflegte Werner Deutsch auch mit der Abteilung Sprecher-Erkennung und Tonträgeranalyse des Bundeskriminalamts Wiesbaden, insbesondere mit dem damaligen Leiter Hermann Künzel, seiner Mitarbeiterin Angelika Braun und seinem Mitarbeiter Stefan Gfroerer. Stefan Gfroerer übernahm nach Künzels Berufung nach Marburg die Leitung der Abteilung. Auch mit Jens Peter Köster (Universität Trier) arbeitete er intensiv an Fragen der Sprechererken-

<sup>5</sup> Siehe dazu den Beitrag von Anton Noll.

---

nung zusammen. Mit der Gründung der International Association for Forensic Phonetics (IAFP) und der Forensic Speech and Audio Analysis Working Group des European Network of Forensic Science Institutes (ENFSI) entstand eine internationale Vernetzung und eine rege und stete Diskussion zu methodischen Fragen der Sprechererkennung.

Der Einführung automatischer Sprechererkennungssysteme stand er – wie viele andere auch – mit großer Skepsis gegenüber. Als Psychoakustiker kritisierte und kritisiert er insbesondere die Verwendung perzeptiver Parameter (z.B. MFCCs) für die Bewertung artikulatorischer Zustände, die Durchbrechung der Kausalkette, sowie die Gleichsetzung von Reliabilität und Validität. Dennoch war ihm bewußt, daß die Entwicklung automatischer Systeme für den Vergleich von Sprachproben nicht ignoriert werden darf. So kam 2004 Timo Becker ans Institut. Als dieser 2007 am BKA Wiesbaden eine Stelle angeboten bekam, folgte EwaldENZINGER, um die Arbeiten zur automatischen Sprechererkennung weiterzuführen. Während seiner Zeit am Institut für Schallforschung implementierte Timo Becker ein automatisches Sprechererkennungssystem auf Basis Gaußscher Mischverteilungen in der institutseigenen Software STx. Er beschäftigte sich unter anderem mit der Schätzung von statistischen Sprechermodellen sowie der Miteinbeziehung von Stimmgrundfrequenzmerkmalen und der Modellierung von Langzeitformantverteilungen. EwaldENZINGER knüpfte an diese Arbeit mit einer Evaluierung von Parameterisierungen von Formantverläufen in Diphthongen an (ENZINGER 2009). Folglich nahm er sich des Themas der Auswirkungen des Mobilfunk-Telefonkanals auf Formantmessungen an. Aus einer Zusammenarbeit mit Peter BALAZS entstanden Ansätze zur Modellierung der Akustik von Nasalen für Sprechervergleiche.

Werner DEUTSCH war aber nicht nur in der Sprechererkennung aktiv, die Tür der Kommission stand allen offen, die sich für phonetische Fragen interessierten. Auch ich gehörte zu den Interessierten und erbat so manche Unterstützung bei meinen Arbeiten. So z. B. ermöglichte er mir die Durchführung eines frühen Versuchs zur Prosodie des Wiener Dialekts und der Wiener Standardaussprache, für den notwendig war, nur den Grundfrequenzverlauf eines von verschied-

---

denen Sprechern und Sprecherinnen gesprochenen Satzes („*Dutzende Menschen überquerten gestern mit Booten den berühmtesten Kärntner See*“) hörbar zu machen und diesen jeweils auch um eine Oktav höher (bei Männerstimmen) oder tiefer (bei Frauenstimmen) zu erzeugen. Anton Nolls verzweifelter „*Håbn s' ghead wås de wü*“ mündete in der Synthetisierung eines harmonischen Klangs, mit dem Vokal /e/ gefiltert und in die Lage des jeweils anderen Geschlechts transponiert. So wurde ermöglicht, dass ich meine Tests durchführen konnte (Moosmüller 1987).

Auch bei dem 1989 bis 1991 unter der Leitung von W. U. Dressler durchgeführten Projekt „Sprechvariation in Phonetik und Phonologie“ stand mir Werner Deutsch bei der Aufnahmetechnik und bei der akustisch phonetischen Analyse des Datenmaterials hilfreich zur Seite.

Als ich 1992 ans Institut kam, waren somit die Weichen gestellt für die Fortführung der Phonetik in Österreich, gemeinsam arbeiteten wir nun in der Forschung in der forensischen Phonetik. Sukzessive übertrug er mir die Lehre und die Erstellung einer Datenbank zum österreichischen Deutsch und ermöglichte mir die Erforschung von Sprachvarietäten. Durch die Bewilligung weiterer Projekte konnte auch die Arbeitsgruppe Phonetik vergrößert werden um Julia Brandstätter, Ewald Enzinger, Tina Hildenbrandt und Najda Kerschhofer-Puhalo.

Ab ca. 1995 widmete sich Werner Deutsch seinem Hauptinteressensgebiet, der Psychoakustik, mit dem sich der nächste Beitrag von Bernhard Laback beschäftigen wird. Es muß aber an dieser Stelle festgehalten werden, dass es ohne Werner Deutsch wohl keine (akustische) Phonetik in Österreich geben würde, da alle Bemühungen, insbesondere von W. U. Dressler, einen Lehrstuhl für Phonetik an der Universität einzurichten, nicht fruchteten. Somit ist seit Anbeginn die Akademie der Wissenschaften mit dem Phonogrammarchiv und der Kommission/Forschungsstelle/Institut für Schallforschung Garant für den genuin interdisziplinären Forschungszweig Phonetik.

---

## Literaturverzeichnis

Enzinger, Ewald. 2009. Formant trajectories in forensic speaker recognition. Diplomarbeit, Univ. Wien.

Graf, Walter. 1961. Zum Verhältnis sprach- und musikwissenschaftlicher Schallarchivierung. *Phonetika* 6: 52–55.

Hausmann, Frank-Rutger. 2003. Anglistik und Amerikanistik im „Dritten Reich“. Frankfurt/Main: Klostermann.

McDougall, Kirsty. 2005. The Role of Formant Dynamics in Determining Speaker Identity. Ph.D. thesis, Department of Linguistics, University of Cambridge.

Moosmüller, Sylvia. 1987. Soziale Perzeption der Grundfrequenz und des Tonhöhenverlaufs bei Frauen und Männern. *Klagenfurter Beiträge zur Sprachwissenschaft* 13, 411–432.

Richter, Elise. 1934. Der gegenwärtige Stand der experimentellen Phonetik (sprachwissenschaftlicher Teil). Jahresbericht der Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik. Sitzung vom 15. Mai 1934. Wien. Verlag der Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik, 13–16.

Richter, Elise. 1997. *Summe des Lebens*. Wien: WUV-Univ.-Verlag.

Scripture, Edward W. 1924. Neue Apparate für die Experimentalphonetik. Jahresbericht der Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik. Sitzung vom 3. Juni 1924. Wien. Verlag der Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik, 39–41.

Scripture, Edward W. 1925. Neue Untersuchungen zum Wesen des deutschen Verses. Jahresbericht der Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik. Sitzung vom 16. Juni 1925. Wien. Verlag der Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik, 1–2.

Scripture, Edward W. 1927. Vortrag über die Natur der Vokale. Jahresbericht der Österreichischen Gesellschaft für experimentelle

---

Phonetik. Sitzung vom 18. Jänner 1927. Wien. Verlag der Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik, 1–2.

Weiß, Desider. 1934. Der gegenwärtige Stand der Experimentalphonetik (naturwissenschaftlicher Teil). Jahresbericht der Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik. Sitzung vom 15. Mai 1934. Wien. Verlag der Österreichischen Gesellschaft für experimentelle Phonetik, 2–13.

---

# ZUR DEUTSCH'SCHEN PSYCHOAKUSTIK IN ÖSTERREICH

**Bernhard Laback**

Im ersten Teil dieses Beitrages beschreibe ich meine persönliche Erfahrung mit Werner A. Deutsch als meinem akademischen Lehrer, wissenschaftlichen Betreuer und Direktor des Instituts für Schallforschung. Im zweiten Teil beschreibe ich die Rolle von Werner Deutsch in der Psychoakustikforschung in Österreich, wie sie sich aus meiner Sicht darstellt.

## Teil I

Als Student der vergleichend-systematischen Musikwissenschaft der Universität Wien hatte ich schon von älteren Studienkollegen von der als außergewöhnlich interessant geltenden Vorlesungsserie Psychoakustik I–IV eines gewissen Werner Deutsch gehört. Die Psychoakustik ist ein Teilgebiet der Psychophysik und damit der Wahrnehmungspsychologie. Als besonders an den naturwissenschaftlichen Aspekten von Musik und den zugrundeliegenden Wahrnehmungsprozessen Interessiertem waren meine Erwartungen an diese Vorlesungen daher besonders hoch. Trotzdem war ich (ebenso wie meine Studienkollegen) von der ersten Vorlesungseinheit an restlos begeistert, meine Erwartungen wurden übertroffen. Die Mischung aus psychophysischer Theorie, phänomenologischen und physiologischen Hörtheorien und akustischen Demonstrationen von psychoakustischen Phänomenen – meist mit analogen Signalgeneratoren – fand ich extrem gelungen. Ich erinnere mich genau, wie ich jedes praktische und theoretische Detail der Vorlesungen von Werner Deutsch gebannt verfolgte. Der Vortrag war stets frei, d. h. es gab keine vorgefertigten Vortragsfolien, sondern lediglich das jeweilige Thema war festgelegt und wurde von Werner Deutsch auf spontane Weise ausgeführt. Diese Spontanität des Vortrages, gepaart mit den ebenso spontan



---

installierten und in „Echtzeit“ generierten Hörbeispielen, machte die Vorlesungen besonders anregend und kurzweilig.

Drei Hauptthemen, gewissermaßen thematische Steckenpferde von Werner Deutsch, sind mir schon während der Zeit des Besuches der Vorlesungen aufgefallen: Die Dichotomie Zeit- vs. Frequenztheorie des Hörens, die Simultan (bzw. Frequenz)-Maskierung und deren Auswirkung auf die Hörbarkeit von Spektralkomponenten von komplexen Signalen (was zur Entwicklung des Irrelevanzfilters führte) und das binaurale Gehör. Schon vor Absolvierung der vierteiligen Vorlesung war ich Feuer und Flamme für das Fach Psychoakustik und wollte mich unbedingt in diese Richtung weiterbewegen, nicht zuletzt aufgrund von Synergieeffekten mit meinem zusätzlichen Studium der Tontechnik/Aufnahmeleitung an der Wiener Universität für Musik und darstellende Kunst. Im Rahmen meiner Diplomarbeit lernte ich die Arbeitstechniken am Institut für Schallforschung kennen, vor allem die hauseigene Signalanalysesoftware S\_Tools/STx. Auch im Rahmen meiner Dissertation mit Auslandsaufenthalt zur Ergänzung meiner Psychoakustik-Expertise in Richtung Hörschäden fand ich volle Unterstützung von Werner Deutsch. Insbesondere die Thematik der Dissertation, die Untersuchung der Auswirkung von erhöhter Simultanmaskierung bei Innenohrschwerhörigkeit auf die Musikwahrnehmung und Möglichkeiten der Kompensation durch Signalverarbeitung, stieß bei Werner Deutsch auf Begeisterung. Diese Begeisterung für innovative, interdisziplinäre Ansätze abseits des Mainstreams mit Aussicht auf praktische Anwendungen ist charakteristisch für die Forschungsausrichtung von Werner Deutsch.

Der Enthusiasmus von Werner Deutsch für die Psychoakustik bei Schwerhörigen mündete schließlich im Jahr 1999 in einem Forschungsprogramm am Institut für Schallforschung mit Fokussierung auf der Psychoakustik bei elektrischer Stimulation mit Cochlea Implantaten im Vergleich zum normalen Gehör, mit dessen Leitung ich im Rahmen eine Postdoc-Stelle betraut wurde. Obwohl Österreich eine starke Tradition in der Entwicklung und klinischen Versorgung mit Cochlea Implantaten hat, wurden grundlegende Wahrnehmungsphänomene bei Cochlea Implantat Stimulation bis dahin in Österreich wenig untersucht. Werner Deutsch stellte die

---

notwendigen Kontakte mit wichtigen CI-Zentren her, vor allem dem AKH Wien (Prof. Baumgartner, Prof. Ehrenberger) und dem Universitätsklinikum Salzburg (Prof. Albegger, Mag. Mair, Prof. Hubmair). Die thematischen Schwerpunkte auf zunächst spektraler Sensitivität (Stichwort: Maskierungsphänomene) und später auf binauralem sowie allgemein räumlichem Hören fanden erwartungsgemäß volle Unterstützung von Werner Deutsch.

In den darauffolgenden Jahren (ab ca. 2000) fokussierte sich Werner Deutsch in seiner eigenen Arbeit auf die Wahrnehmung und statistische Klassifikation von Lärm und Geräuschen, beispielsweise von Güterzügen mit unterschiedlichen Eigenschaften der Räder oder von Autogetrieben. Diese Projekte, in enger Kooperation mit der Arbeitsgruppe für Numerische Akustik, verfolgten das Ziel, die effektive (perzeptiv relevante) Lärmemission besser zu prognostizieren und Methoden zur Reduktion von dessen Ausbreitung zu erarbeiten.

Beim Aufbau des Instituts für Schallforschung war Werner Deutsch immer auf der Suche nach komplexen Fragestellungen, die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit erforderten. Dies führte zur Entstehung von Arbeitsgruppen, die einen relativ breiten Bereich der Akustik abdecken. Die Synergieeffekte aus dieser Zusammensetzung, also die Früchte der jahrelangen Aufbauarbeit von Werner Deutsch, kamen in den vergangenen Jahren voll zum Tragen. Der heutige Erfolg des Instituts für Schallforschung ist also dem kontinuierlichen Einsatz von Werner Deutsch über die Jahre zu verdanken. Dabei war ihm das Wohlergehen des Instituts und seiner Mitarbeiter stets wichtiger als persönliche Erfolge oder Eitelkeiten, eine Philosophie, die bei weitem keine Selbstverständlichkeit oder gängige Praxis ist.

## Teil II

Die Lehre und Forschung in der Psychoakustik wurde an österreichischen Universitäten mit wenigen Ausnahmen weitgehend vernachlässigt, obwohl sie international ein sehr aktives und dynamisches Forschungsgebiet ist. Die wohl fundierteste und intensivste Ausbildung in Psychoakustik wurde von Werner Deutsch über viele Jahre am Institut für Musikwissenschaft sowie, in gekürzter Form, auch

---

am IEM (Institut für elektronische Musik und Akustik) in Graz angeboten. Durch diese Vorlesungen hat Werner Deutsch Aktivitäten in Österreich auf dem Gebiet der Psychoakustik entscheidend beeinflusst oder gar erst ermöglicht. Werner Deutsch konnte seine Zuhörer für das Fach Psychoakustik begeistern und von dessen praktischer Anwendbarkeit und kommerzieller Verwertbarkeit überzeugen. Diese Begeisterung für das Fach konnte er auch nicht-fachlichem Publikum vermitteln, etwa in zahlreichen Radio-Interviews oder populärwissenschaftlichen Vorträgen.

Ausgehend von seinem Engagement für die Psychoakustik hat sich Werner Deutsch auch für andere Bereiche der Akustik in Österreich eingesetzt. Unter anderem als Gründungsmitglied und Chairman der österreichischen Sektion der Audio Engineering Society (AES), als Vizepräsident der Österreichischen Akustischen Gesellschaft (AAA), als Vorsitzender des Fachausschusses für Akustik der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft (ÖPG) und als Mitglied des Österreichischen Arbeitsrings für Lärmbekämpfung (ÖAL). Durch seine Präsenz in all diesen Gremien konnte er das Bewusstsein für die Wichtigkeit der Psychoakustik auch in rein technisch/physikalische Bereiche der Akustik übertragen und leistete damit einen sehr wichtigen Beitrag für die gesamte Akustik in Österreich.

Ich wünsche, auch im Namen der Kollegen aus meiner Arbeitsgruppe, Werner Deutsch viel Freude in seiner neuen Freiheit, der wohlverdienten Pension, und hoffe, dass er seine Begeisterung für die Psychoakustik beibehält. Jetzt kann er sich endlich einem alten Steckenpferd, der Wahrnehmung der Spektral- versus Grundtonhöhe bei frequenzmodulierten Tonkomplexen mit dynamisch ein- und ausgeschalteten Harmonischen, mit Leib und Seele (sprich: mit Ohren und Cortex) widmen.

---

# DER IRRELEVANZ ALGORITHMUS ODER WAS MACHT EIN MATHEMATIKER IN DER PSYCHOAKU- STIK?

Peter Balazs

**Definition.** *Es seien*

$WAD := \text{Werner A. Deutsch.}$

$ARI := \text{Institut für Schallforschung.}$

Daraus folgt dann

**Theorem.**

$$WAD \implies ARI$$

**Proof:** Zum Beweise dieser Aussage sei nun angemerkt:

---

## Eine kurze Geschichte der Irrelevanz

*Diesen Algorithmus müsste man einmal formal beschreiben.*

*WAD, 1999*

**Juni 1989:** Gerhard Eckel gibt seine Dissertation [10] mit dem Titel „*Ein Modell der Mehrfachverdeckung für die Analyse musikalischer Schallsignale*“ ab. Darin wird ein Algorithmus zur Irrelevanzreduktion vorgestellt, der in Zusammenarbeit mit *WAD* am *ARI* entwickelt wurde.

---

*„Wesentliche Eigenschaft des vorliegenden Verfahrens ist es also, ein Signal zu erzeugen, das von allen Komponenten befreit ist, die vom gehörten Signal selbst verdeckt werden.“*

Dr. Eckel bricht dann im November ans IRCAM, Paris, auf.

**Juni 1999:** Ein (damals noch) junger Mathematiker in Geldnöten ist auf der Suche nach einem Teilzeitjob, um den Abschluss seines Studiums finanzieren zu können. Er findet am Institut für Mathematik einen Aushang, in dem *ARI* nach einem Programmierer sucht. Er bewirbt sich und muss sich übers Wochenende in  $ST_x$  einarbeiten, um einen Aufnahmetest zu bestehen. Durch die Begeisterung der gesamten *ARI*-Belegschaft um *WAD* für die Akustik entscheidet er sich dann auch, diesen Job anzunehmen und lässt einen viel lukrativeren Job bei einer Programmier-Firma sausen.

Kurze Zeit später kommt er mit dem Irrelevanz-Algorithmus in Kontakt und dem Ziel, diesen formal zu beschreiben.

**Jänner 2010:** Endlich erscheint der Zeitschriften-Artikel [6], in dem der Algorithmus auf die mathematische Basis der Gabor Multiplikatoren gestellt wird und auch die psychoakustischen Tests neu ausgewertet sowie analysiert werden.

Das ist das wohl eine der längsten Ausarbeitungen eines Papers und zeigt die langfristige Forschungs-Ausrichtung von *WAD* und *ARI*. Diese Arbeit war die Grundlage von vielen derzeitigen und zukünftigen Forschungsprojekten.

## Mathematischer Hintergrund

*Das ist ja eh nur der Phasen Vocoder!*

*WAD, 2005*

## Zeit-Frequenz Analyse

Die *Fourier Transformation* ist ein bekanntes mathematisches Werkzeug, um den Frequenzinhalt eines Signals zu analysieren. Der sehr

effiziente Algorithmus der schnellen Fourier Transformation (FFT), siehe z. B. [20], hat viele Entwicklungen erst möglich gemacht. Wenn wir jedoch einen Klang, eine Stimme oder Musik hören, nehmen wir nicht nur Frequenzen und deren Amplituden wahr, sondern auch deren dynamische Entwicklung. Also sucht man nach einer Zeit-Frequenzdarstellung des Signals, d. h. einer zweidimensionalen Darstellung der Ausgangsfunktion, die zu jeder Zeit den Frequenzinhalt des Signals anzeigen soll. Eine exakte Bestimmung der Frequenz und der Zeit gleichzeitig kann nie möglich sein, das wird durch die Unschärfe verhindern. Man muss also immer eine Entscheidung treffen, wie man die Genauigkeiten gegeneinander abwägt.

Eine Methode, um ein Signal einer Zeit-Frequenz Analyse zu unterziehen, ist die *Kurzeitfouriertransformation (STFT)* (siehe z. B. [14]). Eine Möglichkeit, nennen wir sie die *Fourier Sichtweise*, diese zu betrachten, ist es, von dem Signal  $f(t)$  auszugehen, es mit einer verschobenen Fensterfunktion  $g(t - \tau)$  zu multiplizieren, um eine beim Zeitpunkt  $\tau$  zeitlich konzentrierte Version des Signals zu bekommen, und dies dann einer Fourier-Transformation zu unterwerfen:

$$\mathcal{V}_g f(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t - \tau)e^{-i2\pi\omega t}dt.$$

Wir wollen uns hier auf den diskreten Fall, auf Signale der Länge  $N$  konzentrieren. Beim Zeitpunkt  $n$  und Frequenzpunkt  $k$  ist die STFT definiert durch:

$$\mathcal{V}_g[k, l] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m]g[m - k]e^{\frac{-2\pi jlm}{N}}$$

Ein andere Sichtweise, die der *Filterbanken*, betrachtet das STFT System als Filterbanksystem. Diese Filter  $h_k(\nu)$  erfüllen bestimmte Eigenschaften. Sie haben bis auf die Zentrumsfrequenz die selbe Charakteristik und sind über den linearen Frequenzbereich gleich verteilt, also  $h_k(\nu) = h_0(\nu - k/N)$ . Klarerweise stehen diese Filter in engem Zusammenhang mit den Fenstern aus der Fourier Sichtweise.

Es gibt noch eine dritte, die *Gabor Sichtweise*, dabei werden die Zeit und Frequenz Achsen symmetrisch betrachtet. Das Signal wird aus

Grundbausteinen, aus Atomen, zusammengesetzt, die eine bestimmte Zeit-Frequenz Verteilung haben. Diese Grundbausteine  $g_{k,l}$  entstehen durch die Zeit-Frequenz Verschiebung eines Gabor Atoms  $g$ ,  $g_{k,l}[n] = g[n - k] \cdot e^{\frac{-2\pi jlm}{N}}$ . Dieses  $g$  ist das Fenster der Fourier-Sichtweise. Die STFT ist dann einfach eine Projektion  $f \mapsto \langle f, g_{k,l} \rangle$ .

Alle diese drei Sichtweisen sind mathematisch (und damit als Algorithmus) äquivalent, aber liefern drei verschiedene Methoden, um Probleme zu analysieren. So kann man die Fourier Sichtweise gut gebrauchen, um etwa Aussagen über den zu verwendenden Algorithmus zu treffen, die Filterbank Sichtweise, um zum Beispiel die Eigenschaften im Frequenz-Bereich abzuschätzen und die Gabor Sichtweise für eine sehr kompakte mathematische Beschreibungsweise.

Besonders nützlich wird ein Analysesystem erst in Verbindung mit einem Synthesesystem. Hier gibt es ein solches, (je nach Sichtweise) die *Overlap Add*, die *Oszillator Bank* Methode oder die Projektion auf die *Synthese Atome*. Für die Synthese wird wiederum ein Fenster  $\gamma$  verwendet, wobei man praktisch oft entweder „kein“ Fenster ( $\gamma \equiv 1$ ) respektive das Analysefenster ( $\gamma = g$ ) wählen kann. Für die volle STFT kann „fast jedes“ Synthese-Fenster verwendet werden.

In der praktischen Anwendung möchte man natürlich die Anzahl der Berechnungen niedrig halten und so die Redundanz der Darstellung verringern. Um diese zu senken, berechnet man (in der Fourier Sichtweise) nicht zu jedem Zeitpunkt das Spektrum, sondern nur alle  $a$  Punkte, das ist die Sprungweite zwischen den einzelnen Spektren („Hop size“). Das entspricht in der Filter Sichtweise einer Unterabtastung der Filterantworten um  $a$ . Ein weiterer Parameter ist die Länge der Spektren  $M = \frac{N}{b}$ . (Es wird angenommen, dass  $a$  und  $b$  die Länge des Signals  $N$  teilen.) Wird nicht die volle STFT (kontinuierlich oder diskret) weiterverarbeitet, sondern eine gesampelte Version davon, so spricht man von *Gabor transformation*:

$$\mathcal{G}_g(f)[k, l] = \mathcal{V}_g(f)(a \cdot k, b \cdot l) = \sum_{m=0}^{M-1} f[m]g[m - ak]e^{\frac{-2\pi il}{M}}.$$

Die Redundanz einer solchen Transformation kann man als  $red = \frac{N}{a \cdot b} = \frac{M}{a}$  definieren. Für die STFT ist die Redundanz im endlich-

dimensionalen Fall genau  $N$ , was die Definition sehr anschaulich macht, da ein Signal  $f$  mit  $N$  Datenpunkten bei der STFT durch  $N^2$  Punkte dargestellt wird. Gabor [13] hat vorgeschlagen, dass im Fall von Gauß-Funktionen als Fenster die Redundanz bis  $red = 1$  verringert werden kann. (Dies führt jedoch zu Problemen bei der stabilen Rekonstruktion, siehe z. B. [1].) Es kann jedoch gezeigt werden, dass für Gaußfenster und  $red < 1$  immer ein *Frame* vorliegt, d. h. anschaulich, dass es zum Analyse- ein Synthesesystem gibt, sodass (ohne Modifikation) perfekte Rekonstruktion vorliegt.

Die formale Definition eines Frames [8] ist die folgende: Eine Folge von Elementen  $(\psi_k)$  in einem Hilbert-Raum heißt ein *Frame*, wenn es Konstanten  $A > 0, B < \infty$  gibt, sodass für alle Elemente  $f$  in dem Hilbert-Raum gilt:

$$A \cdot \|f\|^2 \leq \sum_k |\langle f, \psi_k \rangle|^2 \leq B \cdot \|f\|^2.$$

Die praktische Bedeutung eines Frames ist dadurch gegeben, dass man in diesem Fall immer eine Synthese-Transformation, siehe z. B. [8], angeben kann, die perfekte Rekonstruktion erlaubt.

Die Redundanz zu senken, hat nicht nur Vorteile, denn die Fehleranfälligkeit steigt in der gleichen Weise, wie die Redundanz sinkt. Denn je „bedeutender“ eine einzelne Komponente ist, desto „schlimmer“ ist ein Fehler.

## Phasen Vocoder

Der Phasen Vocoder [12] ist ein Algorithmus, der die STFT Analyse und Synthese kodiert. Der Analyse Teil des Phasen Vocoders liefert Amplitude  $|\mathcal{V}_g f[k, l]|$  und Instantan-Frequenz. Diese Frequenz wird aus der zeitlichen Phasendifferenz geschätzt (ein analoger Ansatz kann auch für die Differenz in Frequenz-Richtung angewandt werden, wodurch in Kombination etwa eine Schärfung des Spektogramms (Reassignment [7]) möglich ist).

Auch hier kann die Bedeutung der Redundanz gesehen werden. Bei Reduzierung der Redundanz wird die Frequenzschätzung immer schwieriger. Denn es ist nicht unterscheidbar, „wie oft die Phase den Kreis durchläuft“.



---

Eine mögliche Anwendung des Phasen Vocoder ist die zeitliche Streckung oder Stauchung von Signalen.

## Filterung

Eine wichtige Eigenschaft eines Analyse-Synthese Systems ist die Möglichkeit zwischen Analyse und Synthese eine Modifikation durchzuführen. Da die Analyse oft so gewählt wird, dass die Koeffizienten besser interpretierbar sind, ist hier die Bestimmung der konzeptuellen Eigenschaften so einer Modifikation leichter.

Eine oft verwendete Modifikation ist die der Filterung. Filter sind Faltungs-Operatoren, die einer Multiplikation auf Fourier-Seite entsprechen. Allgemeiner können diese als Fourier-Multiplikatoren bezeichnet werden.

## Gabor Multiplikatoren

Die Modifikation, die in der Zeit-Frequenz Ebene durch Multiplikation erreicht wird, kann formal durch einen Multiplikator beschrieben werden: Bei gegebenen Gabor Systemen  $(g_{k,l})$  und  $(h_{k,l})$  und einer Sequenz von ganzen Zahlen  $(m_{k,l})$ , genannt das *Symbol*, wird der Operator, der durch

$$\mathbf{G}_{m,g,h}(f) = \sum_{k,l} m_{k,l} \langle f, h_{k,l} \rangle g_{k,l}$$

definiert ist, als *Gabor Multiplikator* bezeichnet [11]. Solche Operatoren sind für alle Arten von Frame-Transformationen vorstellbar [3].

Ich habe in meiner Dissertation [2] ein Konzept vorgestellt, wie ein Irrelevanz-Algorithmus als Gabor Multiplikator dargestellt werden kann, d. h. ein Operator, der diejenigen Koeffizienten entfernt, die vom menschlichen Zuhörer nicht wahrgenommen werden können.

---

## Maskierung

*What you see is what you hear!*

WAD, 1999

Der Schall trifft über die Ohrmuschel, das Trommelfell, die Gehörknöchelchen auf das ovale Fenster der Schnecke und darin auf die Basilar-Membran, versetzt diese in Schwingung und reizt damit die Nervenzellen.

Allerdings regt eine bestimmte Frequenz nicht nur eine Zelle an, sondern hat eine bestimmte Erregungsverteilung auf der Basilar-Membran. Eine sinusoidale Anregung bringt eine bestimmte Anregung der Basilar-Membran mit sich, doch diese ist abhängig von Frequenz und Amplitude. Eine gute Näherung (siehe [17]) ist eine Dreiecksfunktion in der Bark-Skala.

Nimmt man nun an, dass ein zweiter Ton vorliegt, so muss die Anregung der Summe für das auditorische System unterscheidbar zum ersten Ton sein, um wahrgenommen zu werden. Ist sie das nicht, so spricht man von *Verdeckung* oder *Maskierung*. So kann es sein, dass eine Frequenzkomponente eine andere überdeckt, diese also unhörbar macht.

### Der Irrelevanz-Algorithmus nach Eckel

In der Dissertation von G. Eckel [10] wurde ein Algorithmus vorgeschlagen, der die Erkenntnisse über die Simultan-Maskierung verwendet, um Signale in einer Zeit-Frequenz Darstellung zu finden, die nicht wahrgenommen werden. Das Signal wird mit einem Phasen Vocoder analysiert, dann wird aus jedem Spektrum eine Schwelle berechnet: Das Spektrum wird zuerst in die Bark Skala transferiert. Es wird mit gleichmäßig verdeckendem Rauschen gewichtet, dann mit einer annähernd dreieckigen Funktion gefaltet, die im Punkt Null auf Null gesetzt ist. Das Ergebnis wird als Relevanzschwelle herangezogen. Nur die Komponenten, die über dieser Schwelle liegen, werden weiterverarbeitet und re-synthetisiert (siehe Bild 1).

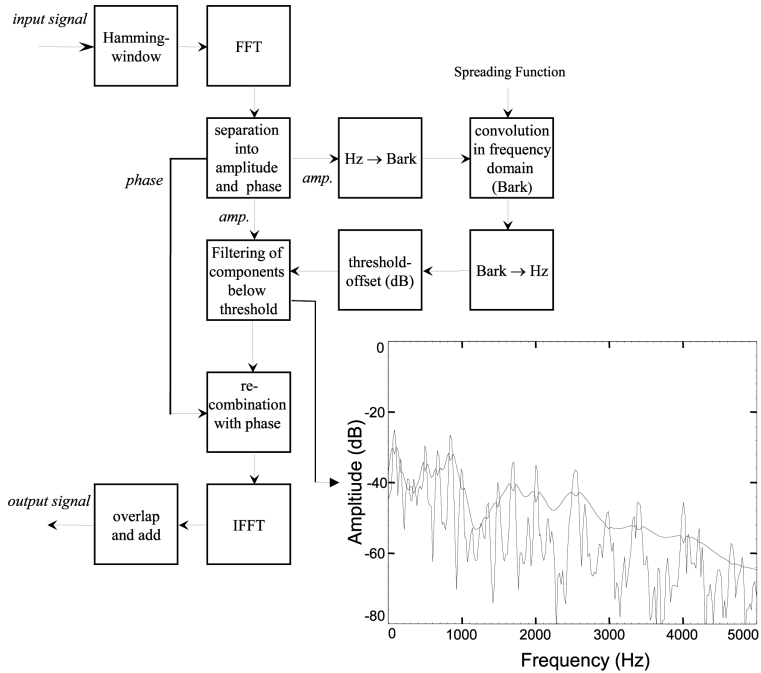


Abb. 1: Der Irrelevanz-Algorithmus nach Eckel.

Dieser Algorithmus wurde in [10] nur für bestimmte Parameter ausgetestet: für eine Abtastrate von 16 kHz, eine Fensterlänge von 256 und eine Sprungweite von 32 Samples, eine untere Flanke von 27 db/bark, eine obere Flanke von 24 db/bark und einen „damping factor“ von 0.3. Der letzte Faktor beschreibt die Form der Funktion, bei 0 liegt tatsächlich eine Dreiecksfunktion vor, bei höheren Werten wird die „Spitze“ abgerundet.

Es zeigt sich aber in der Erfahrung (insbesondere von *WAD*), dass dieser Algorithmus auch für andere Parameter verwendbar ist. Klarerweise führt jedoch eine absolute Verlängerung des Fensters zur Integration der zeitlichen Information im Spektrum, wodurch hier das Modell schlechter passt.

---

Diese Methode wurde in [6] auf die mathematische Basis der Gabor Multiplikatoren gestellt; auch die psychoakustischen Tests wurden neu ausgewertet.

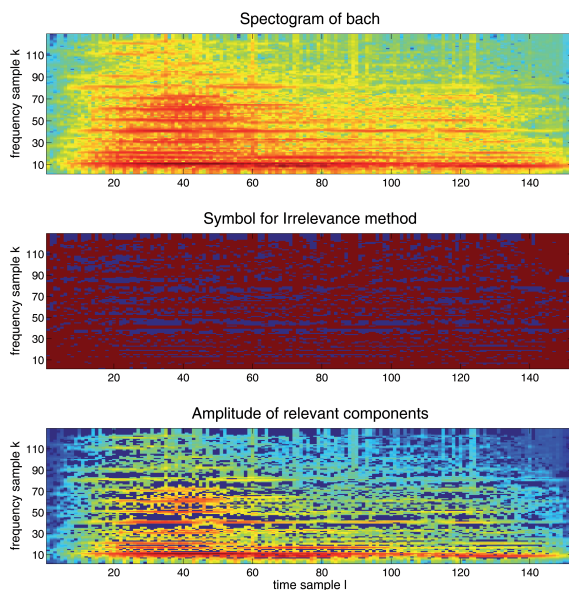


Abb. 2: (OBEN:) Das Spektrogramm eines Testsignals. (MITTE:) Das Symbol des Gabor Multiplikators, rot = 1 = „relevant“, blau = 0 = „irrelevant“. (UNTEN:) Die Multiplikation der beiden.

Das Verfahren wurde schon oft angewandt, zum Beispiel

- a) für die Verbesserung der Musik-Wahrnehmung für Hörgeschädigte [16],
- b) für die Vordergrund/Hintergrund Trennung durch „Übermaskierung“ [9], oder
- c) für die bessere Sichtbarkeit von perzeptiv relevanten Teiltönen in Autogeräuschen [18].

---

## Derzeitige und zukünftige Forschung

*Dass der atomistische Ansatz so funktioniert, muss noch gezeigt werden ...*

WAD, 2007

### Psychoakustische Erkenntnisse

Maskierung ist nicht nur in Frequenz-Richtung möglich. Es gibt auch einige Untersuchungen der Maskierung in Zeit-Richtung. Sowohl die reine Frequenz- wie auch die reine Zeit-Sichtweise ist aber, wie wir oben gesehen haben, nur bedingt sinnvoll. Also ist die Untersuchung der Zeit-Frequenz Maskierung anzustreben, die bis jetzt nur rudimentär erfolgt ist, und (in Kooperation mit dem CNRS Marseille) am *ARI* derzeit durchgeführt wird.

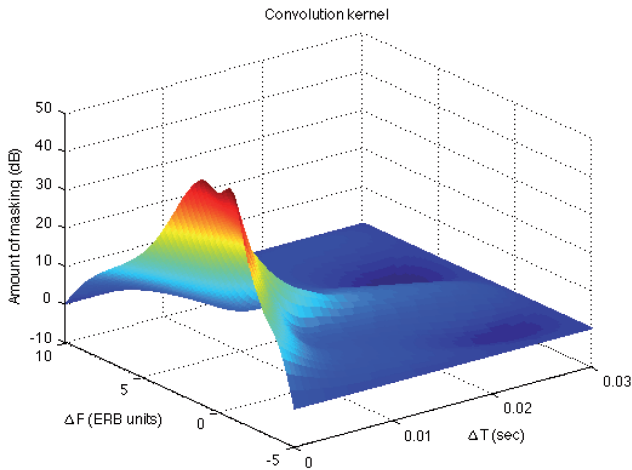


Abb. 3: Die Zeit-Frequenz Maskierungs-Wirkung eines Gauss-Atoms [19].

Die Additivität dieser Maskierung über die lineare Summation hinaus („excess masking“) wurde in den letzten Jahren auch untersucht [15]. Weitere psychoakustische Untersuchungen sind in Vorbereitung.

---

## Nicht-Stationäre Gabor Analyse

Darüber hinaus wurde am *ARI* (mit Partnern aus Frankreich und Österreich) die Möglichkeit entwickelt, das Fenster der Gabor-Analyse zeitabhängig zu machen [5]. Mit derselben Theorie kann man sehr leicht flexible Filterbänke implementieren, die trotzdem perfekte Rekonstruktion erlauben.

So wird am *ARI* gerade eine „*ERBlet*“-Transformation entwickelt. Dies soll eine lineare Zeit-Frequenz Transformation sein, die an das menschliche Hören angepasst und invertierbar ist.

In so eine Transformation werden wir die neuen psychoakustischen Daten einbauen, um einen neuen, verbesserten Irrelevanz-Algorithmus zu bekommen.

## Danksagung

*Hollywood!!!!*

*WAD, 1999–2012*

Ich kann mit Fug und Recht behaupten, dass mich *WAD* mein ganzes wissenschaftliches Leben geformt hat. Wie oben geschildert hat er den Anstoss gegeben, mich mit diesem interessanten Thema zu beschäftigen. Viele interessante Diskussionen haben dazu geführt, dass ich nun die anwendungsorientierte Mathematik für die Akustik als mein Gebiet betrachte. Und alle meine Erfolge, wie die Dissertation [2], die Gründung der Arbeitsgruppe „Mathematik und Signalverarbeitung in der Akustik“, die Habilitation [4] sowie der START-Preis 2011 sind auf diese Ausrichtung und daher die Interaktion mit *WAD* zurückzuführen.

*Vielen Dank.*

*WAD* hat *ARI* zu einem international anerkannten Zentrum für multi-disziplinäre, wissenschaftliche Forschung in der Akustik aufgebaut. Mitunter auch unter Vernachlässigung seiner persönlichen wissenschaftlichen Karriere. *ARI* verdankt ihm (fast) alles.

*Vielen Dank.*

---

Ich hoffe, dass ich auch nur annähernd so erfolgreich *ARI* vertreten und wachsen lassen kann.

---

Damit ist der Beweis abgeschlossen. □

## Literaturverzeichnis

- [1] J.-P. Antoine and P. Balazs, *Frames and semi-frames.*, Journal of Physcis A: Mathematical and Theoretical **44** (2011), in press, submitted.
- [2] P. Balazs, *Regular and irregular Gabor multipliers with application to psychoacoustic masking*, Phd thesis, University of Vienna, June 2005.
- [3] ———, *Basic definition and properties of Bessel multipliers*, Journal of Mathematical Analysis and Applications **325** (2007), no. 1, 571–585.
- [4] ———, *New concepts in frame theory motivated by acoustical applications*, University of Vienna, 2011.
- [5] P. Balazs, M. Dörfler, N. Holighaus, F. Jaillet, and G. Velasco, *Theory, implementation and applications of nonstationary Gabor frames*, Journal of Computational and Applied Mathematics **236** (2011), no. 6, 1481–1496.
- [6] P. Balazs, B. Laback, G. Eckel, and W. A. Deutsch, *Time-frequency sparsity by removing perceptually irrelevant components using a simple model of simultaneous masking*, IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing **18** (2010), no. 1, 34–49.
- [7] E. Chassande-Mottin, I. Daubechies, F. Auger, and P. Flandrin, *Differential reassignment*, IEEE Signal Processing Letters **4** (1997), no. 10, 293–294.

- 
- [8] O. Christensen, *An introduction to frames and Riesz bases*, Birkhäuser, 2003.
- [9] W. Deutsch, A. Noll and G. Eckel, *The perception of audio signals reduced by overmasking to the most prominent spectral amplitudes (peaks)*, Audio Engineering Society Convention 92, 3 1992.
- [10] G. Eckel, *Ein Modell der Mehrfachverdeckung für die Analyse musikalischer Schallsignale*, Ph.D. thesis, University of Vienna, 1989.
- [11] H. G. Feichtinger and K. Nowak, *A first survey of Gabor multipliers*, ch. 5, pp. 99–128, Birkhäuser Boston, 2003.
- [12] J.L. Flanagan and R. M. Golden, *Phase vocoder*, Bell Syst. Tech. **45** (1966), 1493 – 1509.
- [13] D. Gabor, *Theory of communications*, J. IEE **III** (1946), no. 93, 429–457.
- [14] K. Gröchenig, *Foundations of time-frequency analysis*, Birkhäuser Boston, 2001.
- [15] B. Laback, P. Balazs, T. Necciari, S. Savel, S. Ystad, S. Meunier, and R. Kronland-Martinet, *Additivity of auditory masking for short gaussian-shaped sinusoids*, The Journal of the Acoustical Society of America **129** (2011), 888–897.
- [16] B. Laback, N. Versfeld, and W. A. Deutsch, *Effects of changes of the spectral masking slope on sound quality and clarity of music sounds in the normal and impaired ear*, J. Acoust Soc. Am. **102**, No. 5, Pt. 2 (1997), 3187 (A).
- [17] B.J.C. Moore, *Perceptual consequences of cochlear damage*, Oxford: Oxford Medical Publications, 1995.
- [18] A. Mors, Werner A. Deutsch, and Holger Waubke, *Audibility of resolved tonal components of gear noise in passenger car*



---

*cabinsby trained listeners*, Fortschritte der Akustik, DAGA, Strassburg, 2004.

- [19] T. Necciari, *Auditory time-frequency masking: Psychoacoustical measures and application to the analysis-synthesis of sound signals*, Ph.D. thesis, Universite de Provence, 2010.
- [20] J. S. Walker, *Fast fourier transforms*, CRC Press, 1991.

---

# **EIN BEISPIEL EINES PROJEKTES: EISENBAHNTUNNEL IM ANISOTROPEN LINEAR- ELASTISCHEN HORIZONTAL GESCHICHTETEN BO- DEN**

**Holger Waubke, Wolfgang Kreuzer, Georg Rieckh, Christian Kasseß, Zhensheng Chen**

## **Einleitung**

Bahnstrecken auf dem Gelände belästigen die Umgebung mittels akustischer Emissionen und im Nahfeld zusätzlich durch spürbare Vibrationen aus dem Untergrund. Bei seicht liegenden Tunneln wird zwar die akustische Beeinträchtigung unterbunden, aber wahrnehmbare Erschütterungen und Sekundärluftschall in Gebäuden können die Lebensqualität beeinträchtigen. Aus diesem Grund sind Modelle, die die Ausbreitung von Vibrationen in Böden simulieren können, von großem Interesse [3, 4]. Im Folgenden wird ein Rechenmodell vorgestellt, das mit begrenztem Speicherplatz in der Lage ist, die Erschütterungsfortpflanzung in Böden zu berechnen [5, 6, 7, 8, 9]. Es wird dabei angenommen, dass sich der Boden bei den geringen Amplituden, die die Erschütterungen aufweisen, linear elastisch verhält. Allerdings wird ein anisotropes Verhalten des Bodens zugelassen. Um die Anzahl der Parameter zu beschränken, wird weiters, ohne Einschränkung der Allgemeinheit der Lösung, davon ausgegangen, dass orthotropes Verhalten vorliegt. Damit werden auch die Gleichungen etwas vereinfacht, die Methodik ist allerdings auf jede Art der Anisotropie anwendbar. Um eine Unterteilung des gesamten Bodens in Elemente zu vermeiden, soll die Randelementemethode verwendet werden. Mit dieser Methode muss nur mehr der Einschnitt oder der Tunnel diskretisiert werden, wenn die Green'sche Funktion des geschichteten linear-elastischen Halbraums mit anisotropem Material bekannt ist. Leider kann diese Funktion nur numerisch bestimmt werden, was den Aufwand erhöht. Die Lösung erfolgt in zwei Schritten.

Zunächst wird die Green'sche Funktion im Fourier transformierten Raum über die horizontalen Koordinaten  $x$  und  $y$  bestimmt. Dann wird die Randelementemethode im Fourier transformierten Raum über der Längskoordinate  $x$  abgeleitet. Mithin verbleiben die Rücktransformation der Green'schen Funktion über der Koordinate  $y$  und die Elementintegration über die Randelemente. Dreht man die Reihenfolge um, so lassen sich die Integrationen über die Randelemente bei Verwendung der Kollokations-Methode analytisch durchführen und es verbleibt nur noch die numerische Rücktransformation der Integrale [1]. Mit Hilfe dieses Ansatzes lassen sich insbesondere die singulären Integrale behandeln.

## Orthotropes Medium als Spezialfall anisotroper Medien

Die Ableitung der Gleichungen erfolgt im Frequenz transformierten Raum, dem Spektrum. Die Ableitungen erfolgen in den orthogonalen Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Dabei zeigt  $x$  in Richtung der Gleisachse,  $y$  quer zur Gleisachse und  $z$  in Tiefenrichtung. Zunächst werden die Verzerrungen  $\varepsilon$  aus den Verformungen  $\mathbf{u}$  für linear elastisches Verhalten und kleine Verformungen abgeleitet.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \end{pmatrix}. \quad (0.1)$$

Für die Dehnungen gibt es zusätzliche Bedingungen, die verhindern, dass es zu Klaffungen kommt (Kompatibilität).

$$\begin{pmatrix} \partial^2 \varepsilon_{xx} / \partial y^2 + \varepsilon_{yy} / \partial x^2 \\ \partial^2 \varepsilon_{yy} / \partial z^2 + \varepsilon_{zz} / \partial y^2 \\ \partial^2 \varepsilon_{zz} / \partial x^2 + \varepsilon_{xx} / \partial z^2 \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} \partial^2 \varepsilon_{xy} / (\partial x \partial y) \\ \partial^2 \varepsilon_{yz} / (\partial z \partial z) \\ \partial^2 \varepsilon_{zx} / (\partial z \partial x) \end{pmatrix}. \quad (0.2)$$

Als nächstes wird die Flexibilitätsmatrix  $\mathbf{F}$  eingeführt, wobei ohne Einschränkung der Allgemeinheit orthotropes Verhalten postuliert

wird. Im orthotropen Modell existieren Elastizitätsmodule  $E$ , Schubmodule  $G$  und Querdehnbeiwerte  $\nu$ , die von den Koordinaten abhängig sind. Als Spezialfall wird angenommen, dass in der horizontalen Ebene isotropes Verhalten vorliegt und nur in vertikaler Richtung andere Werte vorkommen. Damit ergibt sich:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{zx}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{zx}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_x} & -\frac{\nu_{zx}}{E_x} & \frac{1}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{zx}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{zy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{xy}} \end{pmatrix}. \quad (0.3)$$

Die Inverse der Flexibilitätsmatrix ist die Elastizitätsmatrix  $\mathbf{E}$ . Mit Hilfe dieser Matrix lassen sich die Spannungen  $\boldsymbol{\sigma}$  aus den Dehnungen  $\boldsymbol{\varepsilon}$  berechnen.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{F}\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{E} = \mathbf{F}^{-1} \quad (0.4)$$

Abschließend wird das Gleichgewicht der Spannungen benötigt. Als äußere Kräfte wirken dabei die d'Alembertschen Trägheitskräfte und Volumenkräfte  $\mathbf{b}$  ein.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{pmatrix} + \rho \Omega^2 \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (0.5)$$

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass Kräfte nur an den Schichtgrenzen existieren. Somit sind die Volumenkräfte  $\mathbf{b}$  Null.

Der wesentliche Schritt ist die Fourier Integral Transformation über die Ortskoordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$ .

$$\begin{aligned} \hat{f}(k_x, k_y, k_z, \Omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z, \Omega) e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} dx dy dz \\ f(x, y, z, \Omega) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(k_x, k_y, k_z, \Omega) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y dk_z \end{aligned} \quad (0.6)$$

Mit Hilfe der Transformation werden aus Differentialgleichungen (0.1), (0.2) und (0.5) gewöhnliche lineare Gleichungssysteme. Kombiniert man Gleichungen (0.1), (0.2), (0.3), (0.4) und (0.5), so erhält man das folgende Gleichungssystem für Verformungen im Fourier transformierten Raum (siehe Gl. (0.8) für die Einträge der Matrix):

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (0.7)$$

mit

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left( \frac{(E_z - \nu_{zx}^2 E_x) E_x k_x^2}{(\nu_{xy}^2 - 1) E_z + (1 + 2\nu_{xy}) \nu_{zx}^2 E_x} - G_{xy} k_y^2 + \rho \Omega^2 \right) - G_{zx} k_z^2 \\ a_{12} &= \frac{(\nu_{xy} E_z - \nu_{zx}^2 E_x) E_x k_x k_y}{(\nu_{xy}^2 - 1) E_z + (1 + 2\nu_{xy}) \nu_{zx}^2 E_x} - G_{xy} k_x k_y - G_{zx} k_x k_z \\ a_{13} &= \left( \frac{\nu_{zx} E_z E_x k_x}{(\nu_{xy} - 1) E_z + 2\nu_{zx}^2 E_x} - G_{zx} k_x \right) k_z \\ a_{21} &= a_{12} \\ a_{22} &= \frac{(E_z - \nu_{zx}^2 E_x) E_x k_y^2}{(\nu_{xy}^2 - 1) E_z + (1 + 2\nu_{xy}) \nu_{zx}^2 E_x} - G_{xy} k_x^2 + \rho \Omega^2 - G_{zx} k_z^2 \\ a_{23} &= \left( \frac{\nu_{zx} E_z E_x k_y}{(\nu_{xy} - 1) E_z + 2\nu_{zx}^2 E_x} - G_{zx} k_y \right) k_z \\ a_{31} &= a_{13} \\ a_{32} &= a_{23} \\ a_{33} &= -G_{zx} (k_x^2 + k_y^2) + \rho \Omega^2 + \frac{(\nu_{zx} - 1) e_z^2 k_z^2}{(\nu_{xy} - 1) E_z + 2\nu_{zx}^2 E_x} k_z^2 \end{aligned} \quad (0.8)$$

Das Gleichungssystem ist nun von den Wellenzahlen  $k_x$ ,  $k_y$  und  $k_z$  abhängig. Die Abhängigkeit von  $k_z$  ist bereits hervorgehoben. Nichttriviale Lösungen des Gleichungssystems existieren genau dann, wenn die Determinante des Gleichungssystems (0.7) Null ist. Die Determinante von (0.7) ist ein Polynom 6. Grades in  $k_z$ , die dazugehörigen Nullstellen  $k_{z,j}$  werden im Folgenden als Eigenwerte bezeichnet.

Mittels Fourier-Transformation ist es auf analoge Weise auch möglich ein Gleichungssystem für die Spannungen herzuleiten:

$$\mathbf{\Psi}_{\sigma,j}(k_x, k_y, \Omega) = \mathbf{E} \mathbf{D}_j(k_x, k_y, \Omega), \quad (0.9)$$

wobei die Differentialmatrix  $\mathbf{D}_j$  gegeben ist durch:

$$\mathbf{D}_j = \begin{pmatrix} ik_x & 0 & 0 \\ 0 & ik_y & 0 \\ 0 & 0 & ik_{z,j} \\ \frac{1}{2}ik_y & \frac{1}{2}ik_x & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}ik_{z,j} & \frac{1}{2}ik_y \\ \frac{1}{2}ik_{z,j} & 0 & \frac{1}{2}ik_x \end{pmatrix}. \quad (0.10)$$

Mit Hilfe der Eigenwerte  $k_{z,j}$ , den dazugehörigen Eigenvektoren  $\mathbf{\Psi}_j$  (d.h. den Lösungen von Gl. (0.8) zum Wert  $k_{z,j}$ ) und der Dirac-Delta-Funktion kann man die homogenen Lösungen für die Verformungen  $\mathbf{u}$  im transformierten Raum bestimmen.

$$\hat{\mathbf{u}}(k_x, k_y, k_z, \Omega) = \sum_{j=1}^6 A_j \mathbf{\Psi}_j(k_x, k_y, \Omega) \delta(k_z - k_{z,j}) \quad (0.11)$$

$$\hat{\sigma}(k_x, k_y, k_z, \Omega) = \sum_{i=j}^6 A_i \mathbf{E} \mathbf{D}_i \mathbf{\Psi}_j(k_x, k_y, \Omega) \delta(k_z - k_{z,j}) \quad (0.12)$$

Diese Funktion lässt sich mittels der verallgemeinerten Fourier Integral Transformation im Sinne einer beidseitigen Laplace-Transformation über der vertikalen Koordinate  $z$  zurück zu transformieren:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{u}}(k_x, k_y, z, \Omega) &= \sum_{j=1}^6 A_j \mathbf{\Psi}_j(k_x, k_y, \Omega) e^{ik_{z,j}z} \\ \tilde{\sigma}(k_x, k_y, z, \Omega) &= \sum_{j=1}^6 A_j \mathbf{E} \mathbf{D}_i \mathbf{\Psi}_j(k_x, k_y, \Omega) e^{ik_{z,j}z}, \end{aligned} \quad (0.13)$$

wobei die Unbekannten  $A_j$  durch die Randbedingungen am oberen bzw. unteren Rand der Schicht bestimmt werden können. Im nächsten Schritt wird die horizontale Schichtung des Halbraums berücksichtigt.

Dazu werden die Lösungen für Spannungen und Verformungen jeder Schicht an den Schichtgrenzen gekoppelt. An der Schichtgrenze in der Tiefe  $z_p$  wird zusätzlich eine Belastung hinzugefügt.

$$\begin{aligned} p(x, y, z, t) &= \delta(x)\delta(y)\delta(z - z_p)\delta(t) \\ \hat{p}(k_x, k_y, z, \omega) &= \delta(z - z_p) \end{aligned} \quad (0.14)$$

Sollte die Tiefe der Belastung nicht auf Höhe einer Schichtgrenze liegen, so wird eine zusätzliche Schichtgrenze auf Höhe der Belastung eingeführt. An der Schichtgrenze müssen die Verformungen  $\tilde{\mathbf{u}}$  gleich groß sein und die frei geschnittenen Spannungen  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$  unterscheiden sich um die Größe der Belastung, die an der Schichtgrenze  $m - n$  angreift:

$$\begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{u}}_m \\ \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{u}}_n \\ \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{p}_0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} \tilde{u}_x \\ \tilde{u}_y \\ \tilde{u}_z \end{pmatrix}, \quad \tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \begin{pmatrix} \tilde{\sigma}_{xz} \\ \tilde{\sigma}_{yz} \\ \tilde{\sigma}_{zz} \end{pmatrix} \quad (0.15)$$

Somit existieren sechs Übergangsbedingungen, was ausreicht, um die sechs Unbekannten  $A_j$  einer Schicht zu bestimmen. An der freien Oberfläche sind drei weitere Randbedingungen gegeben:  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}_1 = \mathbf{p}_0$ . Die fehlenden drei Randbedingungen ergeben sich aus der Sommerfeldschen Randbedingung, die das Abklingen der Lösung in der Tiefe beschreibt. Im gedämpften Medium werden für den Halbraum jene drei Komponenten zu Null gesetzt, die mit der Tiefe aufklingen bzw. eine positive reelle Komponente in der komplexen Exponentialfunktion besitzen.

## Randelemente Methode im transformierten Raum

Soweit ist die Greensche Funktion im transformierten Raum beschrieben. Der nächste Schritt ist die Herleitung der Randelementemethode.

Die Randelementemethode basiert auf dem Satz von Betti. Dabei werden gemischte Potentiale über die Umrandung des Gebiets gebildet und gleich gesetzt. Man unterteilt die Potentiale in das Single Layer (SL) und Dual Layer (DL) Potential [2]. Die Potentiale sind

in Gleichung (0.17)) für den transformierten Raum angegeben. Die mit \* gekennzeichneten Größen beziehen sich auf die Green'schen Funktionen der Verformungen  $\mathbf{u}^*$  und freigeschnittenen Spannungen  $\mathbf{t}^*$ . Benötigt werden diese Funktionen an der Umrandung des zu behandelnden Gebiets. Die übrigen Größen sind die unbekannten Werte  $\mathbf{u}$  und  $\mathbf{t}$  am Rand des zu bestimmenden Gebietes. Die Umrandung wird in Elemente eingeteilt und es wird angenommen, dass die Unbekannten über das Element konstant sind. Dies ist der Kollokationsansatz.

Um die Randintegrale vom ursprünglichen Raum in den transformierten Raum zu überführen, wird eine modifizierte Version des Plancherelschen Theorems verwendet.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)h(x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x)H(-k_x)dk_x \quad (0.16)$$

Diese Transformation wird verwendet, um ein dreidimensionales Problem in eine Sequenz unabhängiger zweidimensionaler Aufgabenstellungen zu überführen. Die Transformation ist möglich, wenn sich die Ränder entlang der zu transformierenden Koordinate  $x$  nicht verändern. Bei Eisenbahntunneln kann dies in guter Näherung angenommen werden. Das Single Layer (SL) und das Double Layer (DL) Potential lauten im transformierten Raum

$$\begin{aligned} SL : \Pi &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_S \check{\mathbf{u}}^*(-k_x, y(s), z(s), \Omega) \check{\mathbf{t}}(k_x, y(s), z(s), \Omega) ds dk_x \\ DL : \Pi &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_S \check{\mathbf{u}}(k_x, y(s), z(s), \Omega) \check{\mathbf{t}}^*(-k_x, y(s), z(s), \Omega) ds dk_x. \end{aligned} \quad (0.17)$$

Es sind also die fundamentalen Verformungen  $\mathbf{u}^*$  und freigeschnittenen Spannungen  $\mathbf{t}^*$  bei  $-kx$  auszuwerten, um die unbekannten Größen bei  $+kx$  bestimmen zu können. Abbildung 1 gibt die verwendeten Elementkoordinaten wieder. Die lokalen Koordinaten  $s$  und  $t$  greifen in der Mitte des Elementabschnitts an. Die Koordinaten  $y_0$



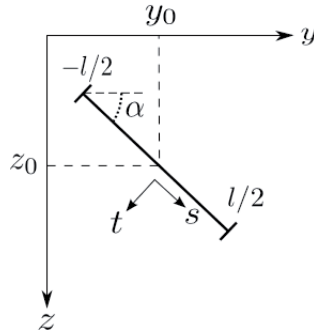


Abb. 1: Elementkoordinaten und globale Koordinaten

und  $z_0$  sind die Koordinaten des Mittelpunkts im globalen System. Die Länge des Abschnitts ist mit  $l$  gegeben. Das lokale Koordinatensystem ist mit dem Winkel  $\alpha$  gegenüber dem lokalen System geneigt.

## Vorgehen beim Single Layer Potential

Es wird der Kollokationsansatz verwendet und mithin angenommen, dass die Spannungen  $\mathbf{p}_0$  bzw. Verformungen  $\mathbf{u}_0$  auf dem Element konstant sind. Damit ergibt sich für das Single Layer Potential:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_0(k_x, \Omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{p}_0(x, t) e^{-i(k_x x + \Omega t)} d\Omega dk_x \\ I &= \int_{-l/2}^{l/2} \check{\mathbf{u}}^*(-k_x, y(s), z(s)) \check{\mathbf{p}}_0(k_x, \Omega) ds \\ I &= \int_{-l/2}^{l/2} \check{\mathbf{u}}^*(-k_x, \cos \alpha s + y_0, \sin \alpha s + z_0) \check{\mathbf{p}}_0(k_x, \Omega) ds \quad (0.18) \end{aligned}$$

Die Verformungen  $\mathbf{u}$  werden durch die Fourier-Rücktransformation  $\check{\mathbf{u}}$  ersetzt und das Element-Integral durch Einfügen einer Box-Funktion

auf unendlich erweitert:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\mathbf{u}}^*(-k_x, k_y, \sin \alpha s + z_0, \Omega) e^{ik_y(\cos \alpha s + y_0)} \check{\mathbf{p}}_0(k_x) \cdot (H(s + l/2) - H(s - l/2)) dk_y ds \quad (0.19)$$

Das Spektrum der Fundamentallösung wird auf Basis der sechs Wellenzahlen zerlegt:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^6 (A_j \Psi_j^T e^{ik_{z,j}(\sin \alpha s + z_0)}) e^{ik_y(\cos \alpha s + y_0)} \check{\mathbf{p}}_0(k_x) \cdot (H(s + l/2) - H(s - l/2)) dk_y ds. \quad (0.20)$$

Durch eine Substitution und Austausch der Integrale entsteht eine Fourier Rücktransformation über die Box-Funktion,

$$k_s = k_{z,i} \sin \alpha + k_y \cos \alpha$$

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^6 \left[ A_j \Psi_j^T \check{\mathbf{p}}_0 e^{i(k_{z,j} z_0 + k_y y_0)} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (H(s + l/2) - H(s - l/2)) e^{ik_s s} ds \right] dk_y, \quad (0.21)$$

die eine sinc-Funktion ergibt:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^6 \left[ A_j \Psi_j^T \check{\mathbf{p}}_0 e^{i(k_{z,j} z_0 + k_y y_0)} \cdot \frac{1}{2\pi} \text{sinc}(l/2(k_{z,j} \sin \alpha + k_y \cos \alpha)) \right] dk_y. \quad (0.22)$$

Die sinc-Funktion führt zu einem Abfall des Kerns gegenüber der Originalfunktion für zunehmendes  $k_y$ . Des Weiteren führen die Koordinaten des Elementursprungs zu einer Modulation im Spektrum. In

---

gleicher Weise lässt sich auch das Double Layer Potential anschreiben. Die beschriebene Methode lässt sich nicht nur auf die Elemente mit Singularitäten anwenden, sondern auch auf reguläre Elemente.

## Inverse Fourier Transformation

Der letzte Schritt ist die inverse Fourier Transformation der Auswertungspunkte der Randelemente Methode über der Koordinate  $x$ . Diese wird wiederum als diskrete Fourier Transformation ausgeführt. Es wird mithin ein sich periodisch fortgesetzter Abschnitt simuliert. Die Belastung erfolgt in der Abschnittsmittle an der Sohle des Tunnels mit einer verteilten Belastung. Das Integral über die Belastung entspricht einer Einheitskraft mit der Amplitude Eins. Abbildung 2 zeigt grafisch die Ergebnisse einer Berechnung eines Tunnelstückes im Originalraum.

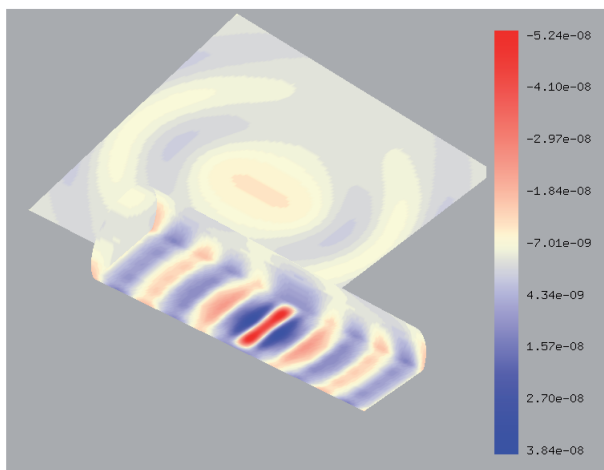


Abb. 2: Amplitude der Schwingung an der Tunnelwand und an der Halbraumoberfläche.

---

## Zusammenfassung

Es wurde eine Methode entwickelt, um die Integrale mit Singularitäten, die bei der direkten Randelemente Methode vorhanden sind, zu berechnen. Dabei entfällt die numerische Integration über das Element, weshalb die Methode auch für reguläre Elemente Anwendung findet. Es ist das Element in zwei Teile zu zerlegen, wenn das Element über eine Schichtgrenze hinausragt. Dies gilt insbesondere für die singulären Integrale, da auf Höhe der Testfunktion eine Schichtgrenze einzuführen ist.

## Literaturverzeichnis

- [1] F. Duddeck. Fourier-BEM: Or what to do if no fundamental solution is available?, *Meccanica* 36 (2001) 437–448.
- [2] L. Gaul, M. Kögl, M. Wagner. *Boundary Element Methods for Engineers and Scientists. An Introductory Course with Advanced Topics*, Springer, Berlin Heidelberg, 2003.
- [3] S. Gupta, M. Hussein, G. Degrande, H. Hunt, D. Clouteau. A comparison of two numerical models for the prediction of vibrations from underground railway traffic, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 27 (7) (2007) 608–624.
- [4] S. Gupta, H. V. den Berghe, G. Lombaert, G. Degrande. Numerical modelling of vibrations from a Thalys high speed train in the Groene Hart tunnel, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 30 (3) (2010) 82–97.
- [5] G. Rieckh, W. Kreuzer, H. Waubke, P. Balazs. A 2.5D-Fourier-BEM model for vibrations in a tunnel running through layered anisotropic soil, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, in print
- [6] G. Rieckh, H. Waubke, W. Kreuzer. Vibrations in layered anisotropic soil: 2.5D-Fourier-BEM and parallel computation, in: *Proceedings of the 8th International Conference on Structural*

- 
- Dynamics, EUROODYN 2011, Leuven, Belgium, 2011, pp. 570–573.
- [7] H. Waubke. Transform Methods for Horizontally Layered Isotropic and Anisotropic Media with Obstacles, DAGA 2004, CD-ROM
- [8] H. Waubke. Boundary Element Method for Isotropic Media with Random Shear Moduli, J. Comput. Acoust. 13 (1) (2005) 229–258.
- [9] H. Waubke, W. Kreuzer. Lastansätze innerhalb einer Schicht eines geschichteten anisotropen Mediums. DAGA 2008, CD-ROM



