

# LAUFZEITMESSUNG VON GESTÖRTEN AKUSTISCHEN SIGNALEN MIT VERFAHREN DER MUSTERERKENNUNG

*Ulrich Kordon, Matthias Wolff und Steffen Kürbis*

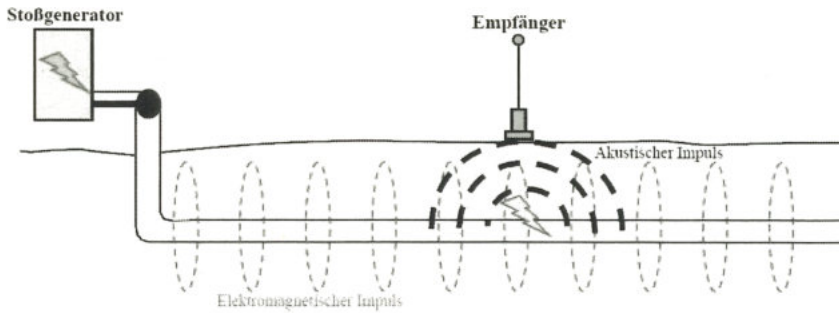
*Technische Universität Dresden, Institut für Akustik und Sprachkommunikation  
ulrich.kordon@ias.et.tu-dresden.de*

**Kurzfassung:** In verschiedenen Anwendungen ist die Bestimmung der Laufzeit akustischer Signale von einem Sende- zu einem Empfangsort von Bedeutung. Dazu werden üblicherweise Korrelationsverfahren verwendet. Die zur Detektion des Maximums in der Korrelationsfunktion verwendeten Schwellwertverfahren liefern jedoch bei Signalen mit geringem Signal-Störabstand Ergebnisse, deren Zuverlässigkeit bzw. Genauigkeit für viele Anwendungen nicht ausreichend ist. Bei dem hier vorgestellten Ansatz soll durch die Verwendung von Verfahren der Mustererkennung, wie sie z. B. in der automatischen Spracherkennung Verwendung finden, eine zuverlässigere bzw. genauere Laufzeitmessung ermöglicht werden. Das Verfahren wurde in verschiedenen Einsatzszenarien getestet und erreichte eine mittlere Detektionsrate der Laufzeit (Abweichung innerhalb vorgegebener Grenzen vom Sollwert) von ca. 70 %, wobei insbesondere bei schwachen Signalen am Empfangsort mit entsprechend geringem Signal-Rauschabstand eine Verbesserung gegenüber einer ausschließlich Schwellwert-basierten Bestimmung der Laufzeit erreicht werden konnte.

## 1 Aufgabenstellung - Lösungsansatz

In verschiedenen Anwendungen ist die Bestimmung der Laufzeit akustischer Signale von einem Sende- zu einem Empfangsort von Bedeutung. Ein wichtiger Bereich ist die Lokalisierung von eventuellen Unterbrechungen in erdverlegten elektrischen Energieversorgungsleitungen.<sup>1</sup> Die Ortung dieser Fehlerstellen kann durch Detektion des Geräuschs erfolgen, das ein Überschlag an der Fehlerstelle durch Anlegen einer Hochspannung an das fehlerhafte Kabel erzeugt und sich über den Boden ausbreitet. Dabei wird über die zeitliche Differenz zwischen Überschlag (elektromagnetischer Impuls) und Beginn des mit einem speziellen Aufnehmer an verschiedenen Messstellen am Boden gemessenen Geräuschs (akustisches Signal) auf den Abstand bzw. die Richtung der Fehlerstelle geschlossen (Abbildung 1). Das erfolgt durch den jeweiligen Nutzer vor allem durch auditive Auswertung des vom Aufnehmer erfassten akustischen Signals. Die Detektion des Geräuschs wird aber praktisch durch überlagerte akustische Störsignale (z. B. Umgebungsgeräusche), einen geringen Signal-Rausch-Abstand des akustischen Signals (insbesondere bei größeren Entfernungen zwischen Fehler- und Messstelle) und durch den Einfluss unterschiedlicher Ausbreitungsverhältnisse im Boden erschwert. In diesem Beitrag werden Verfahren der Mustererkennung zur Verbesserung der Geräuschdetektion vorgeschlagen. Grundsätzlich soll dabei die Bestimmung des zeitlichen Abstands zwischen elektromagnetischen Impuls und akustischen Impuls durch Mustererkennungsverfahren, wie sie z. B. im Bereich der automatischen Spracherkennung verwendet werden, erfolgen. Ziel ist eine Verbesserung der Geräuschdetektion insbesondere in kritischen Anwendungssituationen (stärkere

<sup>1</sup>Der vorliegende Beitrag entstand im Ergebnis einer Industriekooperation mit der Hagenuk KMT Kabelmesstechnik GmbH Radeburg / Bearbeiter: Torsten Berth, Marco Stephan



**Abbildung 1** - Kabelfehlerortung durch Detektion des Überschlagsgeräuschs (Bild: Hagenuk KMT)

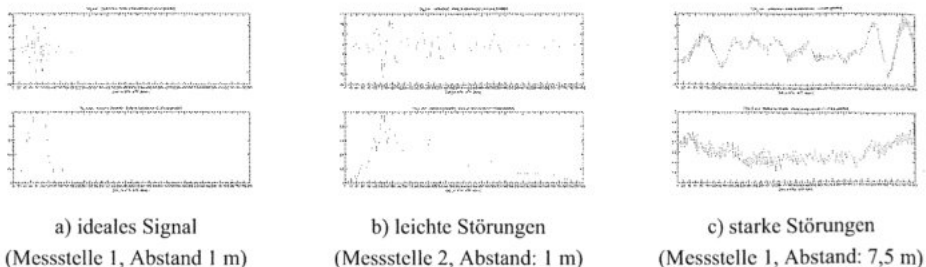
äußere akustische Störungen, größerer Abstand Schallaufnehmer - Störstelle). Dabei wurde auf einen Mustererkennungsansatz orientiert, da damit bereits gute Ergebnisse bei der Verarbeitung anderer nichtsprachlicher akustischer Signale erreicht wurden (z. B. [1]).

## 2 Aufnahme und Aufbereitung des Datenmaterials



**Abbildung 2** - Kombiniertes Aufnehmer zur Erfassung der Messsignale (Bild: Hagenuk KMT)

Für die Aufnahme der erforderlichen Datenbasis stand eine Versuchsanordnung von vier erdverlegten Testkabeln und drei realen Kabeln mit bekannter Fehlerposition zur Verfügung. Insgesamt wurden 361 Messsignale erfasst. Ein Messsignal besteht dabei aus einer Folge von ca. 20 magnetischen und akustischen Impulsen, die durch Spannungsüberschläge an der Fehlerstelle nach wiederholter Einspeisung von Hochspannungspulsen in das Kabel entstehen. Die entsprechenden Messstellen unterscheiden sich in der Entfernung vom Kabelfehler, der Art der Bodenankopplung des Aufnehmers und der Lage zum Kabelfehler (Winkel). Die Aufnahme der Messsignale erfolgte mit Hilfe eines kombinierten Aufnehmers (Abbildung 2), der über eine Spulenordnung die magnetischen Impulse und über einen speziell gelagerten Beschleunigungsaufnehmer die akustischen Impulse gleichzeitig aufnehmen kann. Der in gleicher Form auch in der Praxis verwendete Aufnehmer wird handgeführt lose auf den Erdboden an der Messstelle aufgesetzt, wobei der akustische Aufnehmer damit über eine entsprechende mechanische Ankopplung vor allem vertikale Oberflächenschwingungen erfasst. Diese Vorgehensweise ist durch die Forderung nach effektiver Handhabung im praktischen Einsatz bedingt.



**Abbildung 3** - Verlauf von Zeitfunktion (oben) und Hüllkurve (unten) typischer Messsignalabschnitte

### 3 Auswahl geeigneter Merkmale

#### 3.1 Vorverarbeitung

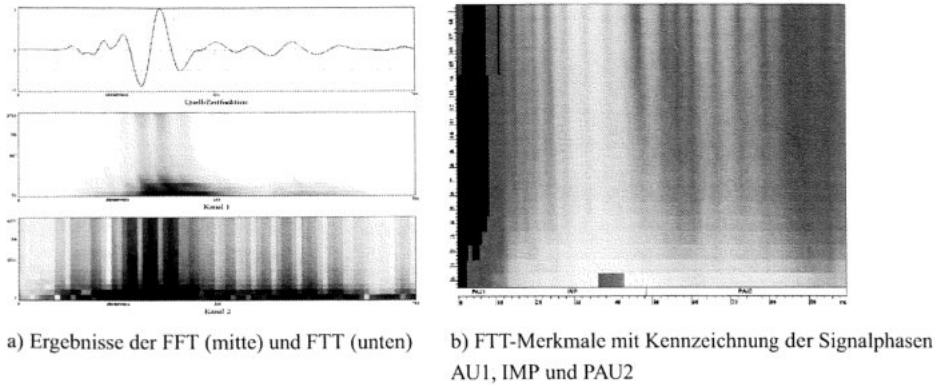
Erste Sichtungen der selektierten Daten ergaben, dass der Abstand zwischen Magnetimpuls und akustischen Impuls im Bereich 1 ms (0 m Abstand) bis ca. 37 ms (10 Meter Abstand) liegt. Die Impulslänge beträgt dabei ca. 37 bis 100 ms. Auf Grund der schwierigen Impulsendetektion wurden nur konstant lange Abschnitte von 37 ms ab Impulsanfang verwendet. Die Amplituden der Signale schwanken stark, so dass eine Amplitudennormierung erforderlich ist. Signifikante Signalanteile der Impulsphasen scheinen sich im Frequenzbereich unterhalb von 1000 Hz zu konzentrieren. In der weiteren Aufbereitung werden die Messsignale auf einen Frequenzbereich bis 4 kHz bandbegrenzt (Abtastfrequenz 8 kHz) und amplitudennormiert, sowie in jeweils 100 ms lange Abschnitte ab dem magnetischen Impuls unterteilt, in dem der akustische Impuls erwartet werden kann. Maßnahmen zur Störunterdrückung wurden nicht mit einbezogen. Die Datenbasis besteht damit insgesamt aus einem Inventar von 5164 verwendbaren vorverarbeiteten Einzelimpulsen mit entsprechendem Pausensegmenten vor und ggf. nach dem akustischen Impuls, deren jeweilige Grenzen für das Training des Mustererkennungsystems in den Abschnitten manuell markiert werden müssen. Die Kennzeichnung von Anfang und Ende der Impulse ist dabei nicht unproblematisch, insbesondere das Ende der Impulse ist durch das langsame Ausschwingen der Zeitfunktionen nicht immer sicher erkennbar. In Abbildung 3 a), b) und c) sind beispielhaft Verläufe von Zeitfunktionen und Hüllkurven ausgewählter Messungen (jeweils gemittelt über alle Impulse an der Messstelle) dargestellt.

#### 3.2 Analyse und Merkmalselektion

Die Detektion und möglichst genaue Lokalisation der Impulse im fortlaufenden akustischen Signal erfordert die Bestimmung von solchen Signalparametern, die die Impulse möglichst gut von Abschnitten zwischen Impulsen unterscheiden. Besonders problematisch hierbei ist, dass im akustischen Kanal auftretende Störungen oft den von elektrischen Überschlüssen ausgehenden Impulsen ähnlich sind. Nach Voruntersuchungen an den akustischen Signalen wurden folgende bei vergleichbaren Problemstellungen erfolgreich eingesetzte Analyseverfahren untersucht.

##### **Hilbert-Transformation:**

Die Hilbert-Transformation (z. B. [2]) wurde zur Bestimmung der zeitlichen Hüllkurve der Signale verwendet. Der Verlauf der Hüllkurve ist exemplarisch für drei verschiedene akustische Impulse in Abbildung 3a), b) und c) mit dargestellt.



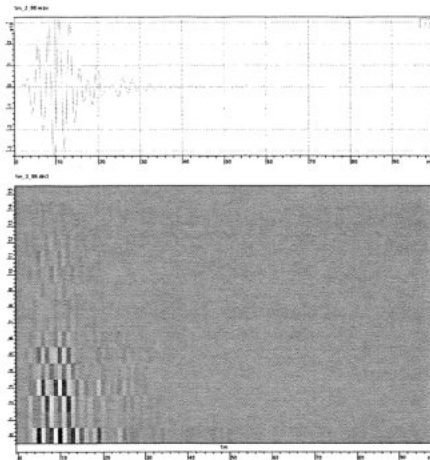
**Abbildung 5** - Vergleich der Analyseergebnisse von FFT und FTT, (Messstelle 1, Abstand: 1 m)

**Spektral-Transformation:**

Als klassisches Verfahren bei der Analyse von Ereignissen, die auditiv wahrnehmbar sind, wurde die Spektralanalyse mittels Kurzzeit-FFT (z. B. [3]) mit einbezogen. In Abbildung 5a) (mitte) ist das Ergebnis der FFT-Transformation dargestellt. Die der FFT eigene konstante Auflösung in Zeit- und Frequenzrichtung ist bei den vorliegenden Frequenzen und der geforderten zeitlichen Auflösung jedoch problematisch.

**Wavelet-Transformation:**

Die konstante Auflösung von Zeit- und Frequenz der Kurzzeit-FFT wird bei der Wavelet-Analyse (z. B. [2]) aufgehoben. Diese Analyse scheint durch die Verwendung zeitlich lokalisierter Aufbaufunktionen für die vorliegenden Messsignale besonders geeignet. Als Beispiel zeigt Abbildung 4 das Ergebnis einer schnellen Wavelet-Transformation (D4-Wavelet) für einen Impuls im Vergleich zum Ergebnis einer FFT-Analyse.



**Abbildung 4** - Signal mit schneller Wavelet-Transformation (D4-Wavelet), (Messstelle 1, Abstand: 1 m)

**Fourier-t-Transformation:**

Eine weitere Transformation, bei der die Auflösung von Zeit und Frequenz werden kann, stellt die Fourier-t-Transformation ([4]) dar. Die Nachbildung von Eigenschaften des humanen Gehörs bei der Fourier-t-Transformation scheint der bisher verwendeten subjektiven auditiven Impulsdetektion gut zu entsprechen. Ein Ergebnis der Analyse mittels FTT im Vergleich zur FFT ist in Abbildung 5a) (unten) angegeben. Abbildung 5b) zeigt den Verlauf der FTT-Merkmale in den einzelnen Phasen eines Impulses.

Die Merkmale der Primäranalyse wurden durch entsprechende Delta- bzw. Delta-Delta-Merkmale

Tabelle 1 - Verwendete Merkmalsätze

Merkmalsatz	Verfahren	Zeitfenster/ Fortsetzrate (in Abtastwerten)	Parameter
HILB	Hilbertransformation		
LMAGn	Logarithmisches Kurzzeitbetragsspektrum mit n-Linien	32/8	Vektorstandardisierung: Normierung auf Mittelwert und Standardabweichung des gesamten Datensatzes
FWTn	Kurzzeit- D4-Wavelettransformation mit n Linien	16/8	D4-Wavelet
FTTn	Kurzzeit-Fourier-t- Transformation mit n Linien	-/4	Startfrequenz: 100 Hz Filterbreite: 0,8 Bark Frequenzabstand: 0,8 Bark Glättungsfaktor: 0,7
DELTA	Delta-/ Delta-Delta-Merkmale		
PCAn	Hauptkomponentenanalyse mit Reduktion auf n Merkmale		

ergänzt und einer PCA (Primary-Component-Analysis, z. B. [5]) unterzogen. In Tabelle 1 sind die verwendeten Merkmalsätze zusammengefasst.

## 4 Klassifikation

### 4.1 Klassifikationsaufgaben und Versuchsaufbau

Ziel der Klassifikation ist die Bestimmung der Entfernung des Sensors vom Kabelfehler. Als Merkmal dafür dienen die Laufzeitdifferenz zwischen Magnet- und akustischem Impuls ( $\Delta t$ ) sowie möglicherweise spektrale Eigenschaften der akustischen Signale. Es wurden verschiedene Ansätze zur Lösung des Problems untersucht:

**Aufgabe A:** Ordne das Testsignal einer Klasse (Gruppe) ähnlicher Signale zu, deren Entfernung vom Kabelfehler gleich und bekannt ist und ermittle so indirekt diese Entfernung für das Testsignal.

**Aufgabe B:** Ordne das Testsignal einer Klasse (Gruppe) ähnlicher Signale zu, deren Laufzeitdifferenz gleich und bekannt ist und ermittle so indirekt die Laufzeitdifferenz für das Testsignal.

**Aufgabe C:** Erlerne den Unterschied zwischen den spektralen Eigenschaften von Impulsen und Pause (Rauschen) der akustischen Signale und bestimme die Laufzeitdifferenz für das Testsignal durch Suchen des Impulses.

Die Klassifikation erfolgte mit Hilfe eines auch in der Spracherkennung üblichen Folgeklassifikators auf HMM-Basis, der Bestandteil eines umfangreichen Experimentiersystems zur akustischen Mustererkennung ist ([6], [7]). Abbildung 6 zeigt ein Signalflussdiagramm des Klassifikators. Die Klassifikationsleistung wurde mit Hilfe einer Kreuzvalidierung beurteilt. Dieses

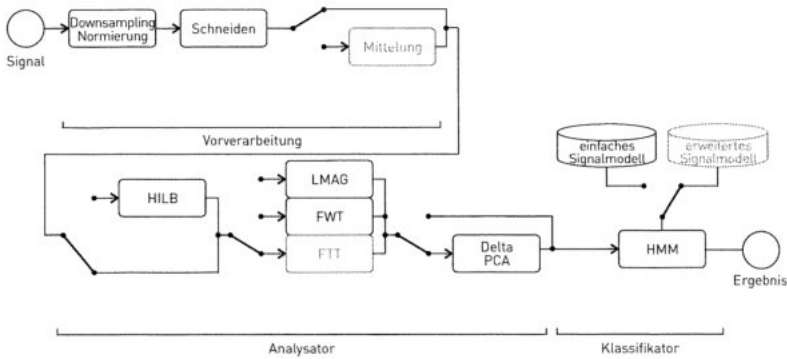


Abbildung 6 - Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Verfahren liefert die bestmögliche Aussage für eine gegebene Signaldatenbasis, da Testergebnisse für *jedes einzelne* Signal einfließen. Da Trainings- und Teststichproben jeweils disjunkt sein müssen, verwendet die Kreuzvalidierung ein Rotationsprinzip.

#### 4.2 Klassifikation nach Laufzeit bzw. Entfernung

Für die Klassifikationsaufgaben A und B wurden entsprechend der als Referenz dienenden manuell bestimmten Impulsabstände folgende Signalklassen definiert (Tabelle 2) und dafür jeweils ein HMM trainiert. Die Ergebnisse für die Klassifikationsaufgaben A und B zeigt Tabelle 3. Als Gütekriterium für den Klassifikator dient der Prozentsatz der korrekt ihrer Klasse zugeordneten Signale (Spalte „Erkennungsrate |  $\pm 0$  Klassen“). Die Zufallsgrenze für diesen Wert liegt bei etwa 10 bzw. 13% für die Aufgaben A und B. Zusätzlich wird der Prozentsatz der Signale angegeben, die korrekt oder einer der beiden benachbarten Klassen zugeordnet wurden (Spalte „Erkennungsrate |  $\pm 1$  Klasse“).

Klasse	Aufgabe A [Abstand in m]	Aufgabe B [Zeit in ms]
1	0	0 – 2,5
2	0,5	2,5 – 4,5
3	1	4,5 – 6,375
4	1,5	6,375 – 8,875
5	2	8,875 – 11,275
6	3	11,275 – 19,0
7	4	19,0 – 25,25
8	5	> 25,25
9	7,5	
10	10	

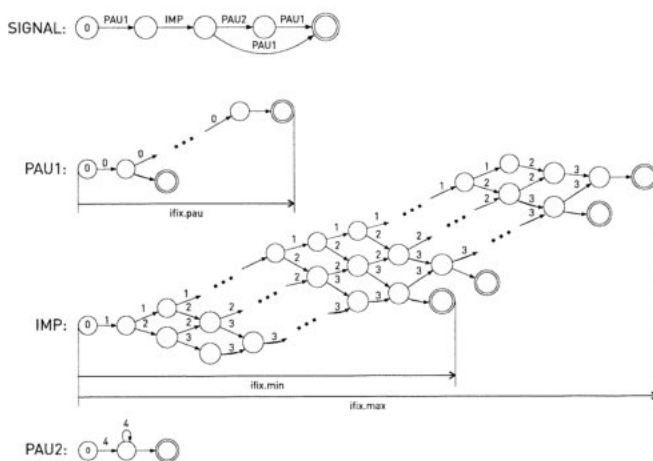
Tabelle 2 - Signalklassen für Aufgabe A und B

#### 4.3 Suche des Impulses in den Geräuschsignalen

Bei der Aufgabe C wird der Anfangszeitpunkt des akustischen Impulses im Signal automatisch detektiert. Dazu wird unterstellt, dass jedes Signal in drei Abschnitte – führende Pause (PAU1), Impuls (IMP) und abschließende Pause (PAU2) – unterteilt werden kann. In den Messsignalabschnitten der Trainingsstichproben wurden diese Abschnitte manuell annotiert. Als Anfangszeitpunkt des akustischen Impulses (und somit als Laufzeitdifferenz zwischen Magnet- und akustischem Impuls) wird der Zeitpunkt des Übergangs vom Abschnitt PAU1 zur Marke IMP definiert. Entsprechend dieser Annahmen zur Signalsyntax wurde das in (Abbildung 7) dargestellte Signalmodell trainiert. Die Bewertung des Klassifikators erfolgt im Vergleich mit der manuellen Annotation durch Angabe der Abweichung zwischen Hand- und automatischer Annotation (Tabelle 4).

**Tabelle 3** - Klassifikationsergebnisse für die Aufgaben A und B

Aufgabe	Vorverarbeitung		Merkmalsatz		Erkennungsrate
A: Abstand B: Laufzeit	Mitte- lung	HILB	Primär- analyse	DELTA/ PCA	±0/±1 Klasse(n)
A	–	–	FWT16	–	09,4/20,0 %?
A	–	–	LMAG16	–	61,3/82,2 %
A	–	–	FWT16	X	50,3/76,0 %
A	–	–	LMAG16	X	39,7/66,4 %
A	–	X	FWT16	–	09,4/20,0 %?
A	–	X	LMAG16	–	<b>62,3/83,1 %</b>
A	–	X	FWT16	X	47,2/72,1 %
A	–	X	LMAG16	X	50,8/74,5 %
B	–	X	LMAG16	–	<b>69,8/91,4 %</b>



**Abbildung 7** - Signalmodell mit Begrenzung der Impulsanfangszeit (ifix.pau) sowie minimaler und maximaler Impulsdauer (ifix.min und ifix.max).

**Tabelle 4** - Klassifikationsergebnisse für die Aufgabe C

Vorverarbeitung		Merkmalsatz		Modell	Ergebnis				
Mitte- lung	HILB	Primär- analyse	PCA	IFIX	Fehler kleiner als				
					1 ms	2 ms	3 ms	4 ms	5 ms
–	X	LMAG16	–	30/50/40	45,9 %	59,7 %	66,3 %	70,6 %	75,3 %
X	X	LMAG16	–	30/50/40	51,8 %	64,6 %	<b>71,7 %</b>	<b>77,2 %</b>	<b>80,7 %</b>
–	–	FTT20	PCA4	30/50/40	49,0 %	55,5 %	59,2 %	61,6 %	64,4 %
–	–	FTT20	PCA8	30/50/40	56,5 %	63,8 %	68,5 %	71,5 %	74,3 %
–	–	FTT20	PCA16	30/50/40	<b>60,8 %</b>	<b>66,6 %</b>	69,9 %	72,8 %	75,1 %

## 5 Zusammenfassung

Verfahren zur Folgenerkennung sind geeignet, die Laufzeitdifferenz zwischen Magnet- und akustischem Impuls zu messen. Mit HMMs sind indirekte (Aufgaben A, B) und direkte (Auf-

gabe C) Messungen möglich. Das direkte Verfahren ist genauer als die indirekten. Bei der Analyse wurden mit der Fourier-t-Transformation (FTT) in Kombination mit einer Reduktion der Vektordimension durch eine PCA die besten Messergebnisse erhalten, wobei bei allen untersuchten Analyseverfahren *außer* der Fourier-t-Transformation die Messergebnisse durch eine vorgeschaltete Hilbert-Transformation verbessert werden. Durch den Einsatz von Mustererkennungsverfahren konnten in einigen Versuchen selbst dann konsistente und plausible Ergebnisse erhalten werden, wenn eine manuelle Detektion des akustischen Impulses auf Grund großer Störungen nicht mehr möglich war. Zur endgültigen Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Messverfahrens unter Feldbedingungen sind weitere Tests notwendig.

## Literatur

- [1] Hoffmann, R., Eichner, M., Kordon, U., Tschöpe, C., Wolff, M.: Anwendung von Spracherkennungsalgorithmen auf nichtsprachliche Signale.  
In: Hentschel, C. (Hrsg.): Sprachsignalverarbeitung - Analyse und Anwendungen.  
Studientexte zur Sprachkommunikation, Band 44. Dresden: TUDpress, 2007.
- [2] Hoffmann, R.: Signalanalyse und -erkennung.  
Berlin, Heidelberg, New York, ...: Springer, 1998.
- [3] Hoffmann, R.: Grundlagen der Frequenzanalyse.  
Renningen: Expert-Verlag; 2. Auflage, 2005.
- [4] Heinbach, W.: Gehörgerechte Repräsentation von Audiosignalen durch Teiltonzeitmuster.  
Dissertation, TU München, 1982.
- [5] Wendemuth, A.: Grundlagen der stochastischen Sprachverarbeitung.  
München, Wien: Oldenbourg, 2004.
- [6] Eichner, M.: Spracherkennung und Sprachsynthese mit gemeinsamen Datenbasen - Akustische Analyse und Modellierung.  
Dissertation, TU Dresden, 2006.
- [7] Hoffmann, R., Eichner, M., Wolff, M.: Analysis of verbal and nonverbal acoustic signals with the Dresden UASR system.  
In: Esposito, A. et al. (Eds.): Verbal and Nonverbal Communication Behaviours.  
Berlin etc.: Springer 2007 (LNAI vol. 4775), 200 - 218.