

## Ergänzung zur Machbarkeitsstudie über die Prüfung von gesinterten Zahnrädern

### 1. Messverfahren

Das von uns angebotene Messverfahren bewertet den Klang eines Bauteils bei mehrmaliger definierter Anregung durch einen Ultraschall-Impuls (Chirp-Funktion). Ähnlich wie bei einer Glocke oder einem Weinglas gibt der Klang (Frequenzspektrum, Abklingverhalten) des Bauteils Aufschluss über bestimmte Fehler, wie beispielsweise Ausbrüche, Risse oder andere mechanische Beschädigungen. Die Bewertung erfolgt mit Hilfe eines statistischen Klassifikationsverfahrens, welches ein zuvor aus einer Lernstichprobe (von guten Teilen) gebildetes Klangmodell benutzt, um dem aufgezeichneten Klang eines Bauteils eine skalare Maßzahl („akustische Bewertung“) im Wertebereich von etwa 20 bis 150 zuzuordnen. Je kleiner diese Maßzahl ist, desto ähnlicher ist der Klang dem vom Modell beschriebenen. Die Entscheidung, ob ein Teil „ähnlich“ oder „unähnlich“ zum modellierten Klang ist, erfolgt durch Vergleich der akustischen Bewertung mit einem Schwellwert. Durch die Wahl dieses Schwellwertes kann für ein und dasselbe Modell die Erkennungsrate für Ausschussteile gegen die Anzahl irrtümlich aussortierter Gutteile abgewogen werden. Abbildung 1 zeigt die Fehlrückweisungs-Fehlakzeptanz-Kurve für ein konkretes Datenbeispiel aus den gelieferten Teilen (Fehlrückweisung bedeutet irrtümliches Aussortieren eines Gutteils, Fehlakzeptanz irrtümliches Passierenlassen eines Ausschussteils).

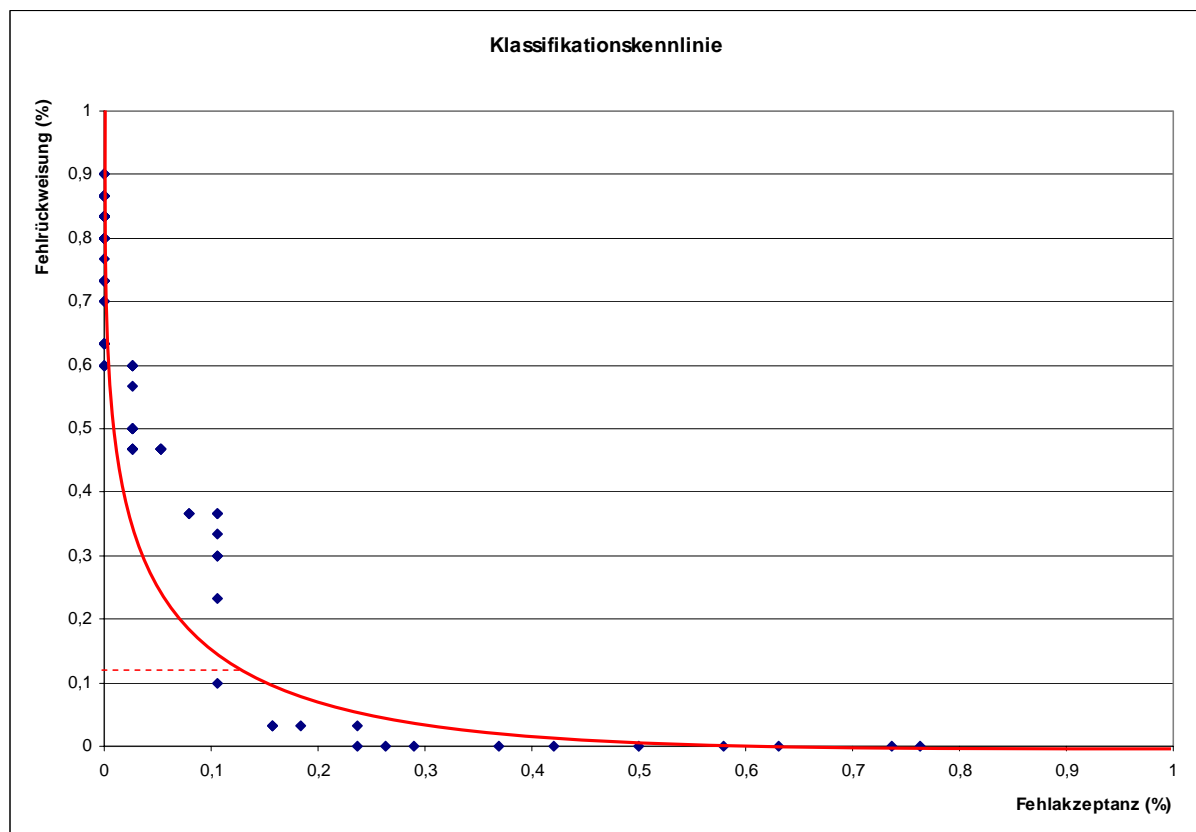


Abbildung 1: Fehlrückweisungs-Fehlakzeptanz-Kurve für ein Datenbeispiel.

**Um den Preis relativ vieler aussortierter Gutteile erlaubt das angebotene Klassifikationsverfahren eine praktisch 100-prozentige Erkennung von Ausschussteilen. Das Verhältnis ist vom Anwender einstellbar.**

## 2. Auswertung der Experimente

Das beschriebene akustische Messverfahren erlaubt eine äußerst sensible Detektion von Klangunterschieden. Abbildung 2 zeigt die akustische Bewertung von Testbauteilen aus den Chargen 7, 9, 11 und 12 (Gutteile, linker Abschnitt), der Charge 0 (Gutteile mittlerer Abschnitt) sowie von Ausschussteilen (rechter Abschnitt). Das Klangmodell der guten Teile wurde aus den Chargen 7, 11 und 12 gebildet. Es ist deutlich erkennbar, dass sowohl der Klang der Ausschussteile als auch der Klang der guten Teile aus Charge 0 signifikant vom modellierten Klang abweichen.

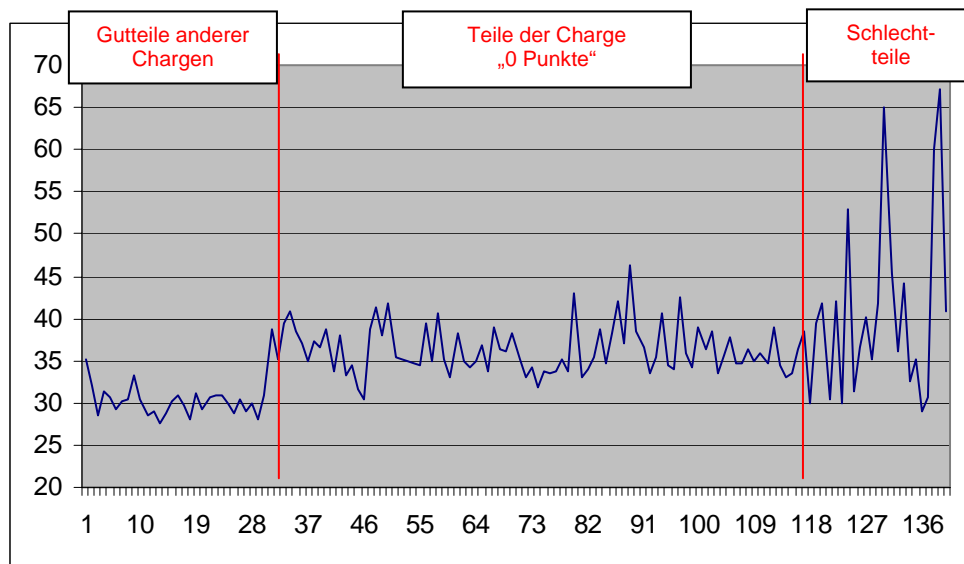


Abbildung 2: akustische Bewertung von Testbauteilen aus den Chargen 7, 9, 11 und 12 (Gutteile, linker Abschnitt), der Charge 0 (Gutteile mittlerer Abschnitt) sowie von Ausschussteilen (rechter Abschnitt).

Abbildung 3 zeigt zum Vergleich die Bewertung von Teilen aus den genannten Gruppen durch ein Modell, welches aus Gutteilen der Charge 0 gebildet wurde. Andere Teile der Charge 0 werden als „ähnlich“, Ausschussteile *und* Teile anderer Chargen werden als „unähnlich“ eingestuft.

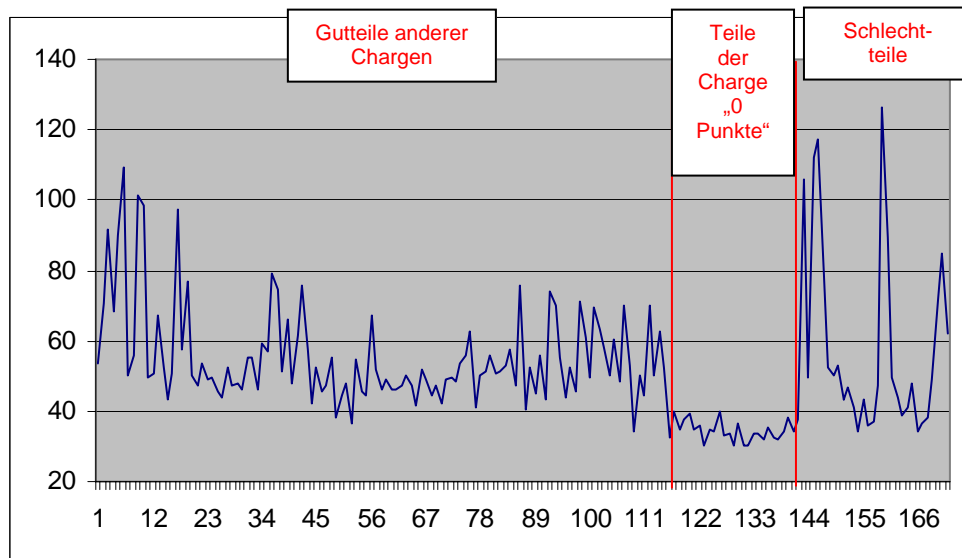


Abbildung 3: akustische Bewertung von Testbauteilen durch ein aus Gutteilen der Charge 0 gebildetes Modell.

Aus diesen Daten kann geschlussfolgert werden:

1. Das akustische Klassifikationsverfahren ist geeignet, den Klang der gelieferten Bauteile zu beschreiben und ähnliche Bauteile zu erkennen.
2. Die akustischen Eigenschaften der Bauteile variieren von Charge zu Charge. Es müssen daher individuelle Klangmodelle für Gutteile jeder Charge gebildet werden. Vergleichbare Chargen können dabei das gleiche Modell verwenden.
3. Die Erkennungsgenauigkeit ist umso besser, je größer die zur Modellbildung verwendete Anzahl vergleichbarer (d.h. gleiche Charge) Gutteile ist. Die Mindestanzahl liegt bei etwa 200 Teilen.

Da das Messverfahren auf einem statistischen Modell beruht, hängt die erreichbare Klassifikationsgenauigkeit davon ab, dass die Lernstichprobe der Gutteile repräsentativ für alle zu bewertenden Gutteile ist. Erfahrungsgemäß kann dies in der Praxis nur bis zu einem bestimmten Grad erreicht werden. Unter geeigneten Bedingungen sind mit dem Verfahren Klassifikationsgenauigkeiten > 99 % möglich.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie standen nicht ausreichend viele Gut- und Ausschussteile *pro Charge* zur Verfügung um eine sichere Aussage zur endgültigen Klassifikationsgenauigkeit treffen zu können. Unter den gegebenen Bedingungen wurden etwa 90 % der Testteile richtig klassifiziert. Bei individuellen Klangmodellen für jede Charge und bei größeren verfügbaren Mengen vergleichbarer Gutteile kann jeweils eine Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit erwartet werden.

### 3. Grenzen des Verfahrens

Da das Messverfahren ausschließlich auf der Bewertung des Klanges der Bauteile beruht, können prinzipiell keine Fehler erkannt werden, die keinen oder zu geringen Einfluss auf den Klang der Bauteile haben.

### 4. Möglichkeiten zur Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit

#### **Metaklassifikation (mehrkriterielle Klassifikation)**

Bei diesem Verfahren werden mehrere Klassifikatoren gleichzeitig eingesetzt. Jeder führt eine eigenständige Erkennung von Gut- und Ausschussteilen auf Grund bestimmter Messdaten aus. Anschließend wird eine Gesamtentscheidung Gut / Ausschuss basierend auf den Einzelentscheidungen getroffen. Abbildung 4 zeigt die mehrkriterielle Klassifikation am Beispiel der Teile aus den Chargen 7, 9, 11 und 12. Als Einzelkriterien für die Klassifikation wurden die akustischen Messdaten zweier gleichzeitig aufnehmender Sensoren benutzt. Das Diagramm zeigt auf der Abszisse die akustische Bewertung des Signals von Sensor 1, auf der Ordinate die akustische Bewertung des Signals von Sensor 2. Jeder Datenpunkt steht für ein Teil. Das Diagramm zeigt außerdem optimale Klassentrennfunktionen für die Erkennung *aller* Ausschussteile (jeweils um den Preis des Aussortierens einer bestimmten Anzahl guter Teile) für Sensor 1, Sensor 2 und für die Metaklassifikation (Sensor 1 und 2). Die Anzahl der irrtümlich aussortierten guten Teile (◆-Punkte rechts und oberhalb der Trennfunktionen) bei Erkennung aller Ausschussteile wird durch Verwendung der Metaklassifikation gesenkt. In anderen Worten: mit Hilfe der Metaklassifikation kann die Sicherheit der Unterscheidung zwischen guten und Ausschussteilen erhöht werden. Hierzu ist keine größere Trainingsprobe erforderlich.

**Die Verwendung mehrerer Aktor- / Sensorstrecken verbessert die Klassifikationsgenauigkeit. Neben akustischen können auch andere Messdaten mit in die Entscheidung einbezogen werden. Je mehr aussagefähige Messdaten zur Verfügung stehen, desto höher ist die zu erwartende Klassifikationsgenauigkeit.**

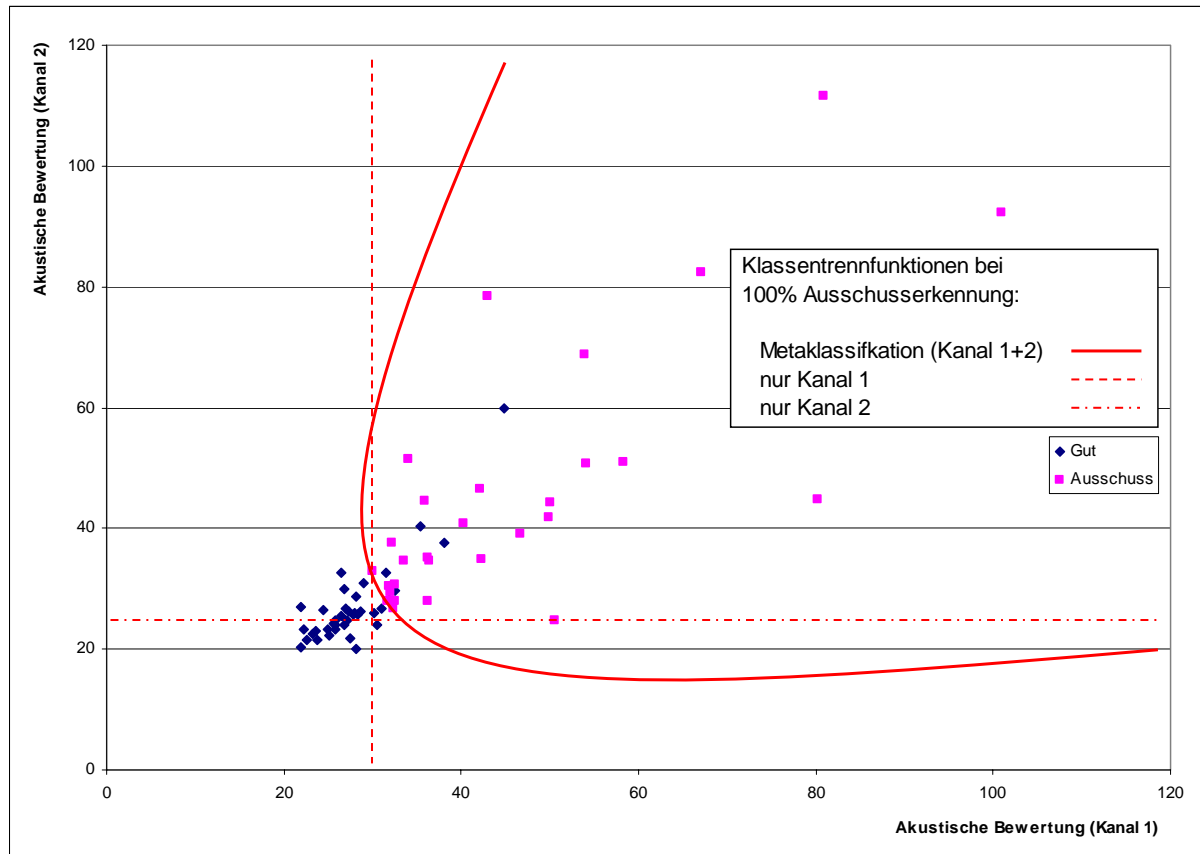


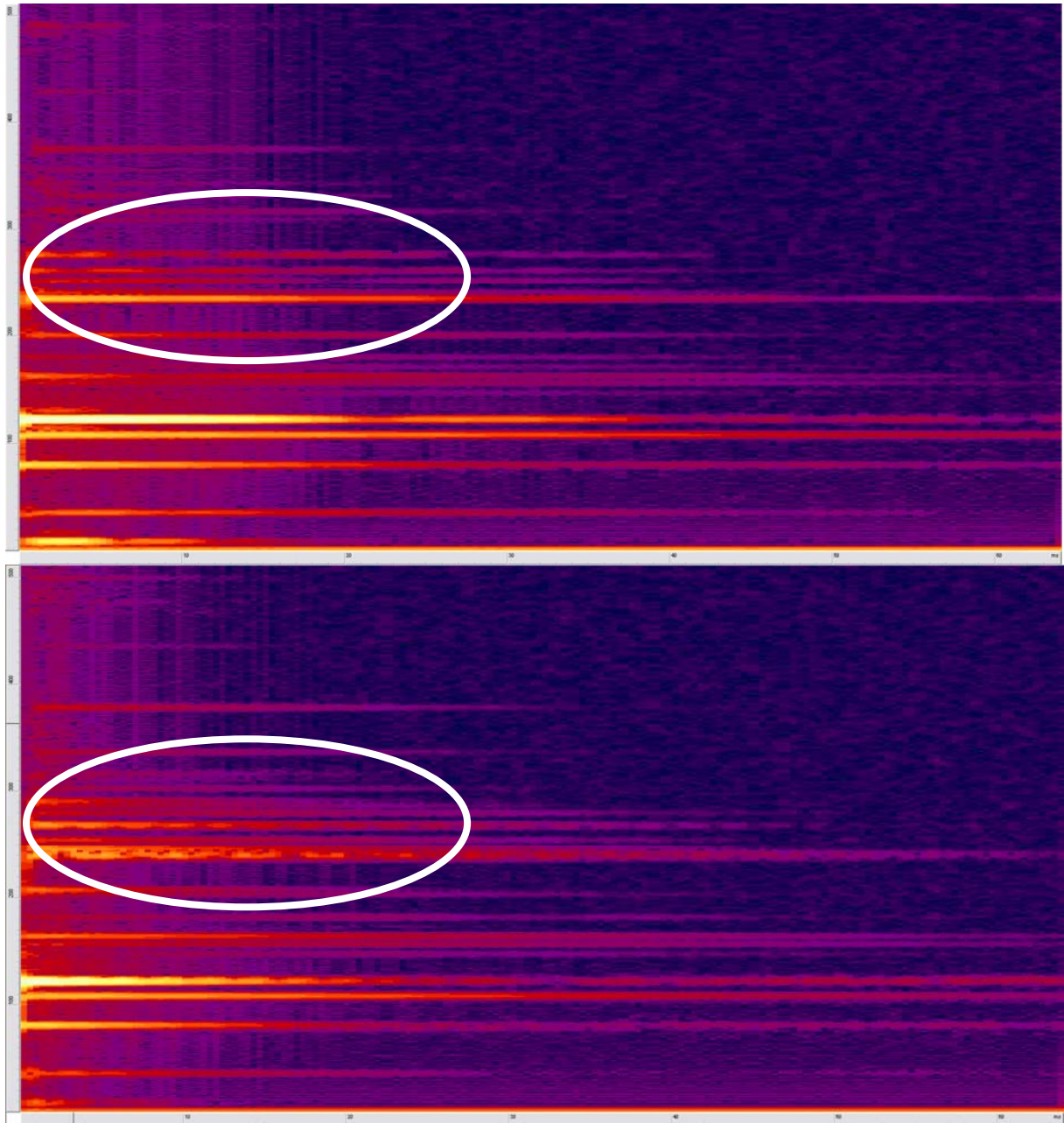
Abbildung 4: Funktionsweise der Metaklassifikation (mehrkriteriellen Klassifikation) an einem konkreten Datenbeispiel aus den gelieferten Teilen. Die (zu Recht oder irrtümlich) aussortierten Teile liegen rechts und oberhalb der eingezeichneten Klassentrennfunktionen.

## Klassifikation von Ausschussteilen

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Bildung eines oder mehrerer Klangmodelle auch für Ausschussteile. In diesem Fall wird die Entscheidung Gut / Ausschuss nicht ausschließlich durch die Ähnlichkeit des Klanges eines Bauteils zum Modell guter Teile getroffen. Zusätzlich wird die Ähnlichkeit des Klanges zu bekannten Fehlerbildern ermittelt. Die Verwendung zweier statt eines Entscheidungskriteriums wird die Erkennungsgenauigkeit voraussichtlich verbessern. Voraussetzung für die Anwendung dieser Strategie ist jedoch ebenfalls die Verfügbarkeit einer genügend großen Menge von Ausschussteilen (min. 200) zur Modellbildung.

## Angepasste akustische Analyse

In der Machbarkeitsstudie wurde ein Standard-Signalanalyseverfahren zur Bewertung des Klanges verwendet. Erfahrungen aus früheren Projekten zeigen, dass eine speziell auf eine Aufgabe angepasste Signalanalyse eine deutliche Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit zur Folge haben kann. Abbildung 5 zeigt exemplarisch einen für die gelieferten Bauteile denkbaren Ansatz auf diesem Gebiet:



*Abbildung 5: Frequenz-Zeit-Darstellung des Klanges eines typischen fehlerfreien Teils (oben) und eines typischen Aussussteils (unten). Die Markierungen zeigen Bereiche, in denen bei Aussussteilen (im Gegensatz zu guten Teilen) spektrale Modulationen auftreten, die von der bisher verwendeten allgemeinen Signalanalyse nur unzureichend erfasst werden.*

Die Frequenz-Zeit-Diagramme der Messsignale zeigen spektrale Modulationen (periodisches Auf- und Abklingen der Energie in bestimmten Frequenzbereichen), welche von Reflexionen des Anregungsimpulses im Bauteil herrühren. Im Falle eines beschädigten Teils (unteres Diagramm) sind diese Modulationen anders ausgeprägt. Das bisher verwendete Signalanalyseverfahren ist nicht speziell auf die Erfassung solcher Effekte ausgelegt. In diesem Beispiel könnten durch eine zusätzliche Bandpassfilterung und Demodulation des Messsignals weitere relevante akustische Merkmale bestimmt werden, die zu einer Verbesserung der Klassifikation beitragen dürften. Es sind weitere derartige Ansätze denkbar.