

# Winkelabhängigkeit des Motorschalls eines Fahrzeugs mit zwei Auspüffen

MICHAEL HOFFMEYER, JÜRGEN ALTMANN

Bochumer Verifikationsprojekt, Institut für Experimentalphysik III, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum

## 1. Problem

Das Bochumer Verifikationsprojekt untersucht, ob automatische Sensorsysteme für die kooperative Verifikation von Abrüstungs- und Friedensabkommen geeignet sind. Zur Gewinnung akustischer, seismischer und magnetischer Signale von Vorbeifahrten schwerer militärischer Fahrzeuge führten wir im Oktober 1992 in Amersfoort, Niederlande, eine Messkampagne durch. Bei der Auswertung der akustischen Daten des Leopard-1-Kampfpanzers - in denen der Auspuffschall dominiert - zeigte sich, dass sich die Signalform während der Vorbeifahrt stark ändert. Entsprechend verändert sich der Obertongehalt der Spektren (Altmann, DAGA 97, 232 f.). Das zeigt sich besonders drastisch in der Anzahl großer Schalldruckberge und -täler in der Motorperiode bzw. in der Ordnung der stärksten Harmonischen: Während diese Zahl meist 5 beträgt, ist sie bei hohen Drehraten und in einem engen Winkelbereich seitlich rechts jedoch 7 (s. Abb. 2). Insgesamt sind die Signalform bzw. der Obertongehalt Funktionen der Drehrate und des Azimutwinkels vom Fahrzeug zum Sensor.

Der Leopard-1 hat einen 10-Zylinder-V-Motor mit zwei getrennten Auspüffen; sie liegen an den hinteren oberen Rumpfecken.

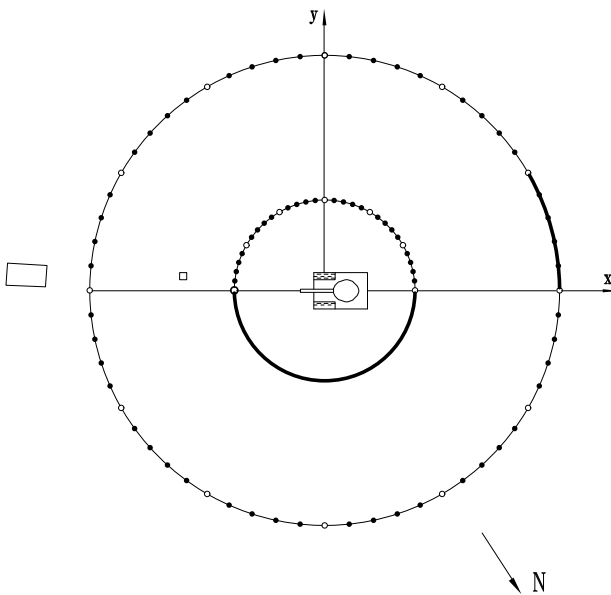


Abb. 1 Messanordnung und Koordinatensystem (Azimutwinkel im mathematischen Sinn). Die Auspüffe des Panzers befinden sich an den hinteren oberen Rumpfecken (die Kanone war nach hinten gedreht). 15 Mikrofone deckten jeweils einen Quadranten des 30-m-Kreises ab (ausgefüllte Kreise: Sennheiser, offene: Brüel&Kjaer). Ein Referenzmikrofon (dickerer Kreis) blieb ortsfest. (Der innere Kreis mit 11,8 m Durchmesser konnte nicht vollständig gemessen werden und wird hier nicht diskutiert.)

## 2. Experiment

Um die zusätzlichen Probleme auszuschalten, die sich bei Messungen von Vorbeifahrten ergeben (Entfernungs- und damit Amplitudenvariation, Dopplerverschiebung, Kettengeräusch u.a.), führten wir am 11. – 14. Oktober 1999 in der Wehrtechnischen Dienststelle 91 in Meppen eine

Standmessung durch. Ein Leopard 1 wurde auf einer freien Fläche aufgestellt. Die Mikrofonpositionen befanden sich auf einem Kreis von 30 m Radius um den Auspuff-Mittelpunkt mit einer Azimutauflösung von  $6^\circ$ . Um mit der verfügbaren Ausrüstung eine gute Signalauflösung zu erreichen, führten wir vier getrennte Messungen durch, zwischen denen die Mikrofone um jeweils einen Quadranten versetzt wurden. Zusätzlich war ein ortsfestes Referenzmikrofon (sowie einige Geofone) im Einsatz (Abb. 1). Die Summenabtastrate betrug 83 kHz.

Während einer Messung wurde die Motordrehrate jeweils etwa 30 s konstant gehalten und dann erhöht. Dabei wurde der Fahrer gebeten, Drehraten von 800, 1000, 1200, 1400, 1500, ..., 2300, 2400  $\text{min}^{-1}$  einzustellen; er sah die digitale Anzeige eines Drehratenmessers, der die Signale einer Lichtschranke mit Reflektor auf der Schwungscheibe verarbeitete. Bei einem Viertaktmotor ist die Kurbelwellendrehrate das Doppelte der Motorgrundfrequenz, somit variierte letztere von 6,7 bis 20 Hz. Eine Messung dauerte ca. 500 s.

Die Signale der Mikrofone im Quadranten (12 Sennheiser KE4-211-2, 2+1 Brüel&Kjaer 4188 bzw. 4166) wurden mit 1 kHz Grenzfrequenz Tiefpass-gefiltert, mit 3,1 kHz digitalisiert und durch einen Laptop-PC gleich auf eine externe Festplatte geschrieben.

## 3. Spektrale Auswertung – Obertonserien

Nach Sichtung der Spektrensequenzen wurden für jede der vier Quadrantenmessungen 4-Sekunden-Intervalle mit etwa konstanter Drehrate bestimmt. Für jedes Mikrofon wurde das gemittelte Leistungsspektrum (2048-Punkt-FFT, Hann-Fenster, Periodogramm-Normierung) dieser Intervalle berechnet. In den Spektren wurden automatisch die Linien bestimmt, und es wurde nach harmonischen Linienserien gesucht. Für letztere wurden die Grundfrequenzen optimiert und die relativen Anteile der Leistungen bei den ersten 15 Harmonischen an der Gesamtleistung der Serie bestimmt.

Die jeweiligen Grundfrequenzen der vier Einzelmessungen stimmten auf etwa  $\pm 0,4$  Hz überein; die Werte wurden entsprechend gruppiert. Abb. 2 zeigt den Verlauf der relativen Leistungen der vier stärksten Obertöne mit dem Winkel für 19,9 Hz Grundfrequenz. Hier ist deutlich zu sehen, dass der siebte Oberton von  $220$  bis  $290^\circ$  (in Fahrtrichtung rechts) über dem fünften liegt und damit der stärkste ist. Sonst dominiert fast immer das fünfte Vielfache, auch bei anderen Winkeln und Drehraten. Dieses Verhalten stimmt mit dem bei Vorbeifahrten beobachteten überein. Nur bei Leerlauf und knapp darüber ist in einigen Richtungen das zehnte Vielfache am stärksten.

Generell wird bei vielen Fahrzeugtypen beobachtet, dass die Ordnung der stärksten Harmonischen gleich der Zylinderzahl oder deren Hälfte ist. Eine Schätzung der Zylinderzahl aufgrund dieser Ordnung führt beim Leopard-1 meist zur richtigen Zahl (5 oder) 10, manchmal jedoch zu falschen Werten (7 oder) 14.

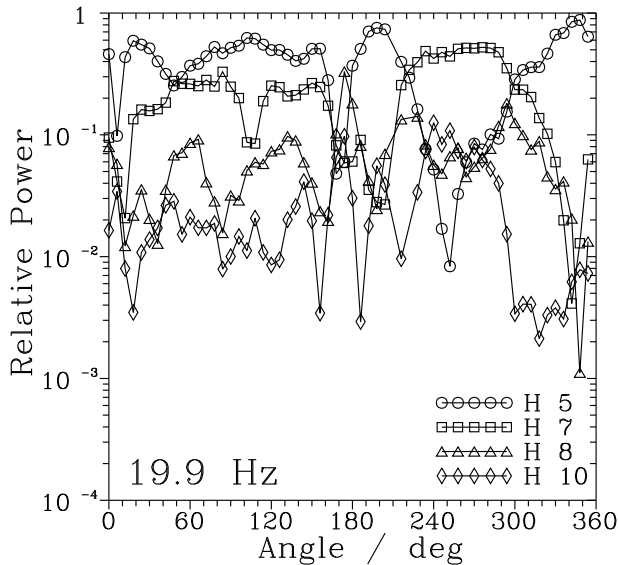


Abb. 2 Verlauf der relativen Leistungen bei den Vielfachen 5, 7, 8 und 10 mit dem Winkel bei Grundfrequenz 19,9 Hz. Von 220 bis 290 ° (in Fahrtrichtung rechts) liegt die 7. Harmonische über der 5. und ist hier die stärkste.

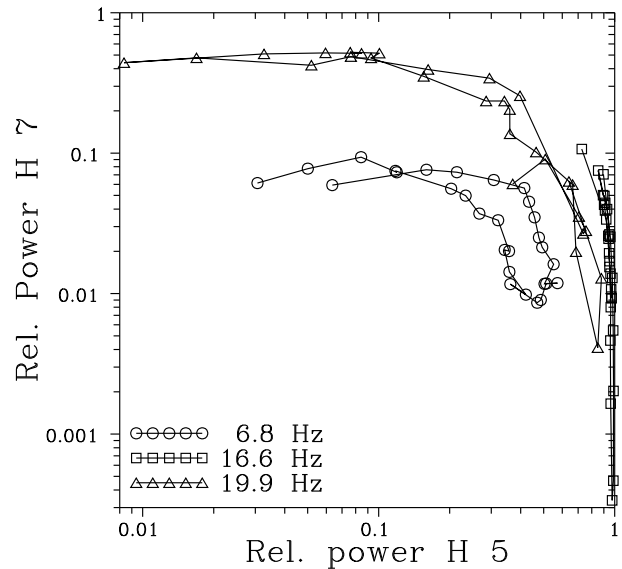


Abb. 4 Verteilung der Mustervektoren in zwei Dimensionen (relative Stärken der Vielfachen 5 und 7) bei drei Motorgrundfrequenzen und Winkeln von 180 bis 354 °. Die Projektion in die Ebene lässt sich nicht durch Geraden separieren.

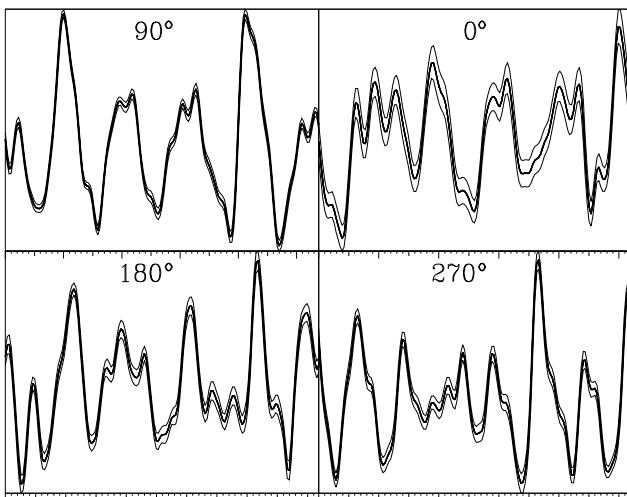


Abb. 3 Über 4 s gemittelte Periodensignale (+/- Standardabweichung) in den Richtungen 0, 90, 180 und 270 ° bei 19,1 Hz Grundfrequenz. In Richtung 270 ° (nach rechts) sind es 7 große Berge und Täler, sonst 5.

#### 4. Auswertung im Zeitbereich – Periode und gemittelt Signal

Während der 4-s-Intervalle wurde bei allen Mikrofonen mittels der Autokorrelationsfunktion AKF der Verlauf der aktuellen Signalperiode bestimmt (die Wahl des richtigen AKF-Maximums wurde durch Kenntnis der Grundfrequenz eingeschränkt). Diese Perioden wurden dann zeitrichtig aufgemittelt, um Fluktuationen auszugleichen. Abb. 3 zeigt für 19,1 Hz Grundfrequenz die gemittelten Periodensignale in 4 Richtungen. Die starke Änderung der Signalform ist offensichtlich – in Richtung 270 ° sind es 7 große Berge und Täler, sonst 5.

#### 5. Schlussfolgerungen für die Motortyperkennung und Ausblick

Die Beschreibung der Motorsignalförmung mittels relativer Leistungen bei der Grundfrequenz und den Obertönen ist invariant gegen Amplituden- und Frequenzskalierung (dazu Zeitverschiebung), und damit unabhängig von Ent-

fernung und Motordrehrate. Mit z.B. 15 Komponenten stellt ein solcher Mustervektor eine stark komprimierte Beschreibung dar. Wäre die Signalförmung unveränderlich, würde der Vergleich mit einem abgespeicherten Vektor pro Motor-/Fahrzeugtyp zur Erkennung genügen. Beim Leopard-1 ändert sich die Signalförmung allerdings mit der Drehrate und dem Abstrahlwinkel. Erstere kann dem Mustervektor als weitere Komponente hinzugefügt werden; bei der Verarbeitung eines unbekannten Signals fällt sie bei der Bestimmung der relativen Harmonischen-Leistungen sowieso mit an. Der Winkel vom Fahrzeug zum Sensor ist aber zunächst unbekannt; beim Vergleich mit einer abgespeicherten Musterbibliothek müssen also alle Winkel geprüft werden. Im Idealfall würde dann die Erkennung gleichzeitig eine Schätzung des Abstrahlwinkels liefern.

Für die Motor- bzw. Fahrzeugtyperkennung in der Verifikationsanwendung reicht es also nicht aus, ein Muster pro Typ zu speichern. Eine Musterbibliothek muss vielmehr für jeden Typ viele Muster enthalten, die sich nach Drehrate und für manche Fahrzeuge sogar zusätzlich nach Abstrahlwinkel unterscheiden. Dabei bilden die Verteilungen im Musterraum komplizierte Gebilde, die nicht einfach durch Hyperebenen separiert werden können. Abb. 4 zeigt die Verteilung in bezug auf die Obertöne 5 und 7 für drei Drehraten und die Richtungen von 180 bis 354 °.

Als physikalische Ursachen für die Variation mit der Drehrate lassen sich die (z.T. nicht-linearen) Vorgänge im Auspuffinnern vermuten, dazu Laufzeitdifferenzen zwischen den beiden Auspuffen und dem Sensor; letztere sind wohl für die Variation mit dem Abstrahlwinkel verantwortlich.

In der Zukunft werden wir die Fahrzeugtyperkennung nach dem angedeuteten Verfahren untersuchen. Weitere Arbeiten werden sich mit den physikalischen Ursachen für die Variation der Signalförmung befassen.

Dank

Wir danken dem Bundesministerium der Verteidigung für die Erlaubnis für diese Messungen und der Wehrtechnischen Dienststelle 91, insbesondere dem Akustik-Dezernat, für die Unterstützung bei der Durchführung.