

Akustisches Tunnelmonitoring

Dipl.-Ing. Michael Steiner, ASFINAG

Dipl.-Ing. Dr. Franz Graf, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH

1 Einleitung

Das primäre Ziel zur Erhöhung der Sicherheit in Tunneln ist die Vermeidung kritischer Ereignisse, die eine Gefahr für Menschenleben, Umwelt und Tunnelbetriebsanlagen darstellen. Sekundär sollen auch die Auswirkungen bereits eingetretener kritischer Ereignisse so gering als möglich gehalten werden. Dies erreicht man dadurch, dass sich Unfallbeteiligte und andere gefährdete Tunnelbenutzer rasch in Sicherheit bringen können.

Ein wesentlicher Punkt ist in diesem Zusammenhang die rasche und effiziente Alarmierung der Ereignisdienste, wie Feuerwehr, Rettungskräfte und Polizei. Die Reaktionszeit der Ereignisdienste soll so kurz als möglich sein, um im Ereignisfall den Personenschaden, den materiellen Schaden sowie Schäden für die Umwelt zu begrenzen.

Die Zeit vom Auftreten eines Störfalls bis zur Alarmierung des Tunnelmanagers ist bei einem kritischen Ereignis essentiell und soll durch das innovative Sicherheitssystem des „Akustischen Tunnelmonitorings“ minimiert werden. Kritische Ereignisse werden in einem Tunnel oft von Unfallbeteiligten oder anderen Verkehrsteilnehmern verschieden schnell gemeldet, so dass für Sofortmaßnahmen mitunter kostbare Zeit verloren geht. Gerade diese Zeitspanne ist einerseits für die Vermeidung kritischer Ereignisse als auch für die Reduzierung möglicher Folgen essentiell.

Je schneller ein Störfall in einem Tunnel erkannt wird, desto geringer sind die Folgen für Menschen und Tunnelinfrastruktur.

In einem derzeit laufenden Projekt „*Akustisches Tunnelmonitoring (AKUT)*“ wird ein System zum Akustischen Tunnelmonitoring entwickelt. Das Projekt ist in drei Phasen aufgeteilt, deren zeitlichen Abfolge in Abbildung 1 dargestellt sind.

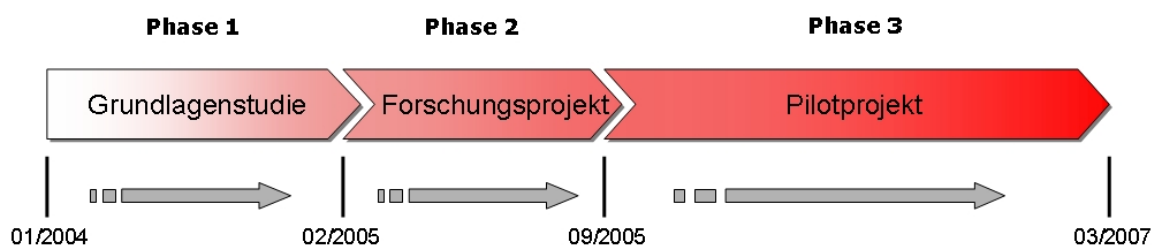


Abbildung 1 Phasenmodell des Projekts „Akustisches Tunnelmonitoring (AKUT)“

Die derzeit laufenden und zukünftig geplanten Arbeiten der einzelnen Projektphasen werden in den Abschnitten 2 und 3 detailliert erläutert.

1.1 Funktionsweise des Systems zum Akustischen Tunnelmonitoring

Die im Betrieb von Tunneln typischen Geräusche werden zum Großteil durch die im Tunnel fahrenden Kraftfahrzeuge geprägt. Diese Geräusche setzen sich aus Motor-, Roll- und Strömungsgeräuschen zusammen, wobei die Art des Kraftfahrzeugs (Karosserieform, Motorisierung, ...) mit der Zusammensetzung der Geräusche korrespondiert. In Abbildung 2 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt.



Abbildung 2 „Normale“ Betriebsgeräusche in einem Tunnel werden durch die Geräusche der fahrenden Kraftfahrzeuge geprägt

Auftretende Anomalien im Geräusch, wie z.B. der Aufprall eines Fahrzeuges an die Tunnelwand, der gegenseitige Aufprall zweier Fahrzeuge, Reifenquietschen usw. sowie Anomalien im Geräusch von Einzelfahrzeugen werden detektiert. Diese Detektion erfolgt mit im Tunnel angebrachten Mikrofonen. Die Signale der Mikrofone werden über Datenleitungen in die Betriebszentrale übertragen und dort von einem eigenen Rechner durch spezielle Erkennungsalgorithmen (diese werden in Abschnitt 2.6 näher erläutert) analysiert und ausgewertet. Damit ist es möglich, diese Geräusche automatisch zu identifizieren und bestimmten Alarmklassen zuzuordnen. Das Ergebnis der Auswertung wird an den Leitreechner weiter gegeben. Dieser kann bei Auftreten eines kritischen Ereignisses im Tunnel sofort Maßnahmen z. B. zur Verkehrsleitung vornehmen.

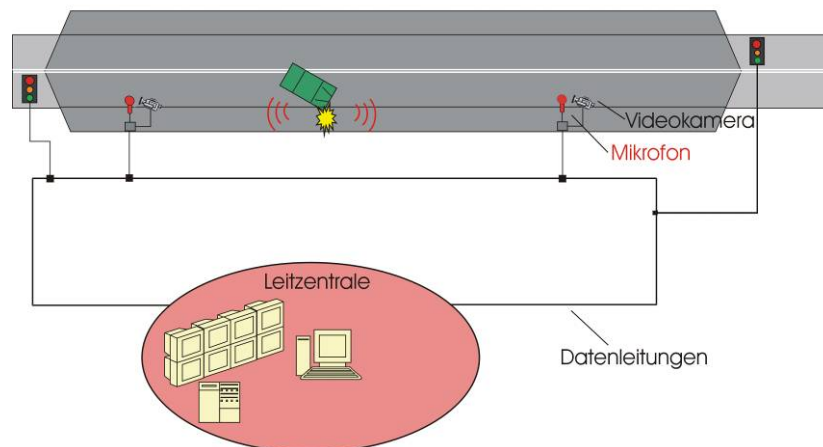


Abbildung 3 Schematischer Aufbau eines Systems zum Akustischen Tunnelmonitoring

Ein großer Vorteil akustischer Methoden zur Unfallerkennung besteht darin, dass Unfälle bzw. kritische Ereignisse in Tunneln praktisch immer von einem speziellen, deutlich identifizierbaren Unfallgeräusch begleitet sind. Diese Geräusche treten bereits zum Zeitpunkt des Geschehens – und nicht erst nach einiger Zeit – auf und können mit großer Sicherheit detektiert werden. Aber auch die plötzliche Abwesenheit der normalen Betriebsgeräusche lässt auf eine Anomalie im Verkehrsfluss (z. B. Stau) schließen.

Bei Detektierung eines Störfalls in einem bestimmten Streckenabschnitt können so verschiedene Maßnahmen sofort automatisch aktiviert werden. Zum Beispiel kann in der Tunnelzentrale je nach Alarm- bzw. Unfallklasse ein akustischer Signalton erklingen und das Kamerabild der Video-Überwachung des betroffenen Streckenabschnitts auf einen zentralen Monitor geschaltet werden. So kann der Tunnelmanager die Situation sofort erfassen und die entsprechenden Maßnahmen einleiten. Dadurch wird kostbare Zeit gewonnen und sowohl den Unfallbeteiligten als auch den nachkommenden Fahrzeugen ein Maximum an Soforthilfe und Unfallprävention zur Verfügung gestellt.

2 Phase 1 & 2: Bisherige Erfahrungen in der Grundlagenstudie & im Forschungsprojekt

Der Ansatz, auftretende akustische Ereignisse in einem Tunnel für eine automatische Störungsmeldung bzw. als automatisches Alarmsystem heranzuziehen, ist neu, weshalb man auf keinerlei Erfahrungen auf diesem Gebiet zurückgreifen konnte. Deshalb wurden in der ersten Phase des Projekts die Grundlagen eines derartigen Systems erarbeitet.

Ziel der beiden ersten Projektphasen war es, Basiswissen über das akustische Verhalten eines Tunnels und die darin auftretenden Geräusche zu erhalten.

In den folgenden Abschnitten werden die bisherigen Entwicklungen und erzielten Ergebnisse dargestellt, wobei die für das Verständnis wichtigen physikalischen Grundlagen der verwendeten Technologien in diese Abschnitte eingearbeitet sind.

2.1 Entwicklung des Sensor- und Aufnahmesystems

Die zentrale Einheit bei der Aufzeichnung von Geräuschen in einem Tunnel bildet das Mikrofon. Dies ist ein Sensor, der sich im Schallfeld befindet und dessen Membran die akustischen Schwingungen als Schalldruck aufnimmt und in elektrische Spannungssignale umwandelt. Abbildung 4 zeigt das Blockschaltbild eines Systems zur Schallaufzeichnung, wobei das Mikrofon als Sensor fungiert.

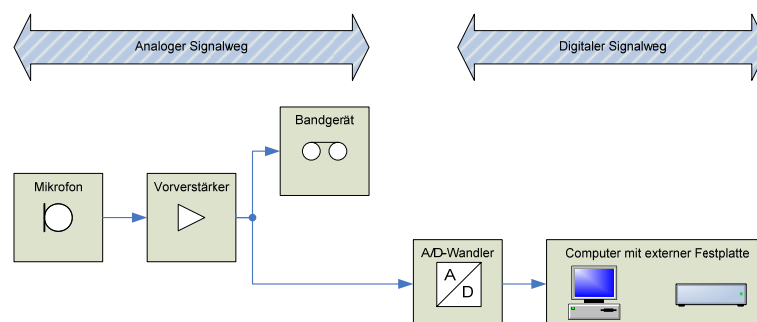


Abbildung 4 Blockschaltbild der Schallaufzeichnung; Es wird der Signalweg sowohl für die analoge als auch die digitale Signalaufzeichnung dargestellt.

Die elektrischen Spannungssignale, die das Mikrofon liefert, wären für eine Übertragung über längere Distanzen nicht geeignet, da die Verluste auf den Leitungen zu hoch und

dadurch das Nutzsignal beim Empfänger zu schwach wäre. Mit Hilfe des Vorverstärkers werden die vom Mikrofon gelieferten Spannungssignale verstärkt und so an die nachfolgenden Komponenten der Schallaufzeichnung angepasst. Die am Ausgang des Vorverstärkers anliegenden Spannungswerte sind nun für die eigentliche Schallaufzeichnung vorbereitet und können z. B. einem analogen Bandgerät zugeführt werden.

Aufgrund der Fortschritte, die in den vergangenen 10 Jahren im Bereich der digitalen Audiotechnik erzielt wurden, werden heutzutage Geräusche fast ausschließlich auf digitalen Medien wie z.B. Festplatten oder DATs (Digital Audio Tape) gespeichert. Damit dies ausgeführt werden kann, müssen die analogen Spannungswerte zuerst in ein digitales Format umgesetzt werden.

Die Mikrofone müssen bestimmten funktionalen Kriterien genügen, um unter den Betriebsbedingungen im Tunnel hochwertige Aufzeichnungen zu liefern. Diese Kriterien sind:

- Temperaturbeständigkeit
- Resistenz gegen Verschmutzung und Korrosion
- Dauerfestigkeit und Stabilität der Komponenten
- Wartungsfreundlichkeit, einfache Reinigung
- Einfache und robuste Befestigungsmöglichkeit
- Spritzwasserfestigkeit gemäß Schutzklassen

Entsprechend der oben angeführten Kriterien wurde für das Projekt ein Kondensator-Mikrofon mit Kugelcharakteristik und einem Membrandurchmesser von 1" (2,54cm) ausgewählt.

Im Februar 2004 wurden in der Oströhre des Plabutschunnels die ersten Aufzeichnungen mit diesem Mikrofon durchgeführt. Bei diesen Aufzeichnungen zeigte sich, dass der ausgewählte Mikrofontyp sich für den Einsatzzweck hervorragend eignet.

Da die Feinstaubbelastung während des Betriebs des Tunnels sehr hoch ist, verschmutzen auch die Mikrofone. Um der Verschmutzung entgegen zu wirken bzw. um die negativen Auswirkungen auf die Mikrofonmembran zu minimieren, soll in der laufenden Entwicklung ein Feinstaubschutz für die Mikrofone entwickelt und getestet werden. Abbildung 5 zeigt das verwendete Mikrofon.

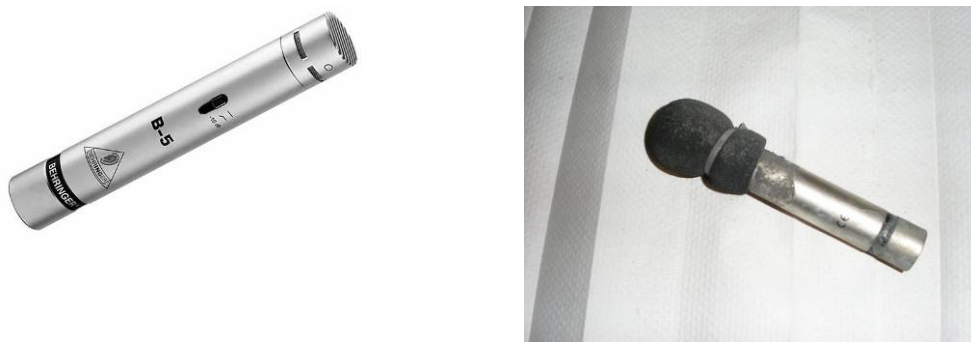


Abbildung 5 Verwendetes Mikrofon zur Aufzeichnung im Tunnel; Links: Zustand neu; Rechts: verschmutztes Mikrofon nach mehrwöchiger Verwendung im Tunnel

2.2 Konfiguration der Aufnahmesoftware

Die Aufzeichnung der Betriebsgeräusche im Tunnel erfolgte mit mehreren Mikrofonen an unterschiedlichen Positionen gleichzeitig. Damit war es notwendig, ein mehrkanaliges Aufzeichnungssystem zu verwenden. Diese Aufzeichnungen sind für die Generierung der so genannten Geräuschdatenbank notwendig, die in Abschnitt 2.4 näher erläutert wird. Für die konkrete Anwendung im vorliegenden Projekt muss die Aufnahmesoftware folgenden funktionalen Anforderungen genügen:

- Synchroner Aufzeichnung von mindestens 8 Kanälen
- Stabilität
- Einbindung von Videodaten für Kontrollzwecke
- Export der aufgezeichneten Signale in standardisierte Speicher-Formate
- Separate Auswahl der einzelnen Kanäle

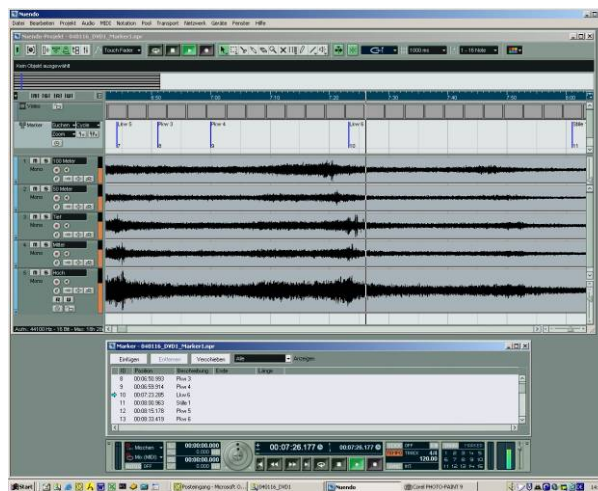


Abbildung 6 Bildschirmauszug der Aufzeichnungs-Software

Im Zuge der Messungen für die Grundlagenstudie wurden mehr als 50 Stunden an Betriebsgeräuschen im Tunnel aufgezeichnet. Das konzipierte Aufzeichnungssystem funktionierte bei allen Messungen einwandfrei.

2.3 Aufbau eines Messsystems im Plabutschtunnel

Für die Entwicklung der Erkennungsalgorithmen ist es notwendig, eine so genannte Geräuschdatenbank aufzubauen. Diese Geräuschdatenbank besteht aus einer Vielzahl von Geräuschbeispielen, sowohl von normalen Betriebs- und Vorbeifahrtsgeräuschen als auch aus Geräuschen, die bei kritischen Ereignissen auftreten. Um solche Geräusche zu erhalten, wurde von Jänner bis März 2004 im Plabutschtunnels ein Messsystem installiert.

2.3.1 BESTIMMUNG DER OPTIMALEN POSITIONEN DER MIKROFONE

Ein wesentliches Ziel der Grundlagenstudie war es, die optimalen Positionen der Mikrofone zu bestimmen und damit den Einfluss des Montage-Ortes auf das aufgezeichnete Signal zu bestimmen.

Dabei spielen die Grundgesetze der Schallentstehung und Schallausbreitung eine große

Rolle. Schall ist eine periodische oder nicht periodische Druckschwankung, die sich in einem elastischen Medium (z.B. Luft, Wasser, Festkörper, etc.) ausbreiten kann. Das Auftreten von Schall ist unmittelbar an die Existenz eines Mediums gebunden und pflanzt sich in Gasen oder Flüssigkeiten immer nur in Form von Längs- oder Longitudinalschwingungen (örtliche Verdichtungen und Verdünnungen) aus.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Schallwelle beträgt in Luft etwa 343 m/s (1235 km/h). Dadurch entstehenden Laufzeitunterschiede zwischen dem Auftreten eines akustischen Ereignisses im Tunnel und dem Eintreffen der Schallwelle an der Mikrofonmembran. Durch die Bestimmung der Laufzeitdifferenz zwischen dem Eintreffen der Schallwelle bei zwei an verschiedenen Orten montierten Mikrofonen kann so exakt die Stelle des Auftretens des Ereignisses berechnet werden.

Für die Bestimmung der optimalen Position wurden insgesamt fünf Mikrofone an der Außenulme des Plabutschtunnels installiert. Abbildung 7 zeigt schematisch die Anordnung der installierten Mikrofone in einem Abschnitt des Plabutschtunnels.

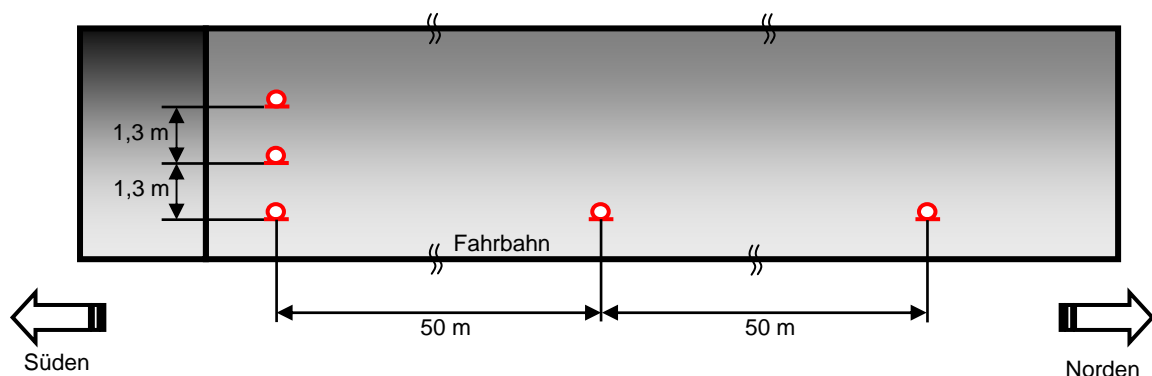


Abbildung 7 Schematische Darstellung der Anordnung der für erste Testmessungen positionierten Mikrofone

Die vertikal angeordneten Mikrofone dienen dazu, den Einfluss der Montagehöhe zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass aufgrund der langen Nachhallzeit von Tunneln allgemein die Höhe der montierten Mikrofone eine untergeordnete Rolle spielt. Aufgrund der geringeren Gefahr einer etwaigen Beschädigung im oberen Bereich der Außenulme sollen im weiteren Projektverlauf die Mikrofone im oberen Drittel der Außenulme angebracht werden.

Die langen Nachhallzeiten in Tunneln haben zur Folge, dass die im Tunnel entstehende akustische Energie sehr langsam abgebaut wird. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die Schallwellen einerseits an den glatten Betonwänden keine nennenswerte Absorption erfahren und andererseits die Dämpfung in Luft zu gering ist, um die akustische Energie schnell abzubauen. Für die automatische Detektion von Geräuschen ist die lange Nachhallzeit im Tunnel als nachteilig zu sehen, da einzelne akustische Ereignisse in sich „verschwimmen“ und die Trennung der Einzelereignisse mit zunehmender Nachhallzeit schwieriger wird.

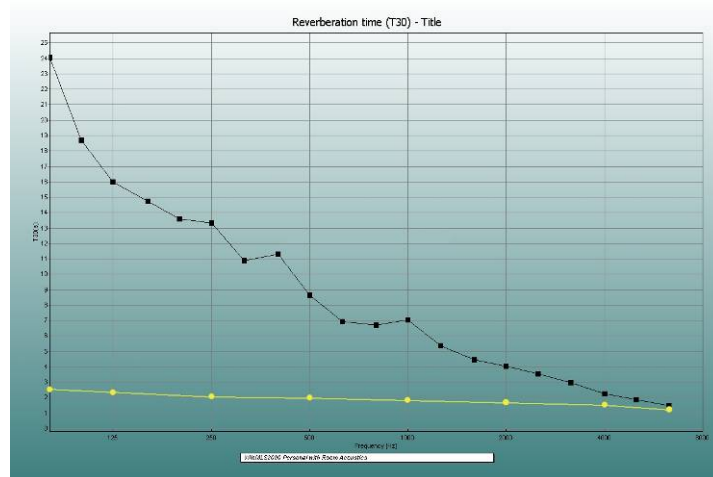


Abbildung 8 Gemessene Nachhallzeit in Sekunden im Plabutschunnel (schwarz) und zum Vergleich die gemessene Nachhallzeit im Goldenen Saal des Wiener Musikvereins (gelb)

Die horizontal angebrachten Mikrofone wurden in einem Abstand von jeweils 50 m montiert und dienten dazu, den erforderlichen Abstand zwischen zwei Mikrofonen zu untersuchen. Im Rahmen der Testmessungen stellte sich heraus, dass der Abstand von 50 m zu gering gewählt wurde. Aufgrund der bisher vorliegenden Ergebnisse wird ein Abstand von größer 100 m völlig ausreichend sein, da – wie oben erwähnt – die Tunneloberfläche die Schallwellen sehr stark reflektiert und dadurch die Nachhallzeit sehr hoch ist. Im vorliegenden Forschungsprojekt und im folgenden Pilotprojekt sollen weitere Messungen diesbezüglich durchgeführt werden, mit dem Ziel, einen noch größeren Mikrofonabstand zu erreichen.



Abbildung 9 & Abbildung 10 Mehrere Mikrofone wurden zur Bestimmung der optimalen Position sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung montiert

2.3.2 INSTALLATION DES MESSSYSTEMS

Das Messsystem wurde einerseits in der Oströhre als auch in der Weströhre des Plabutschunnels installiert, um so einen Überblick über die im Tunnel vorkommenden Geräusche zu erhalten und mit diesen Daten eine Geräuschdatenbank aufzubauen. In Abbildung 11 ist das Blockschaltbild des Messsystems, wie es in den ersten Messungen verwendet wurde, dargestellt.

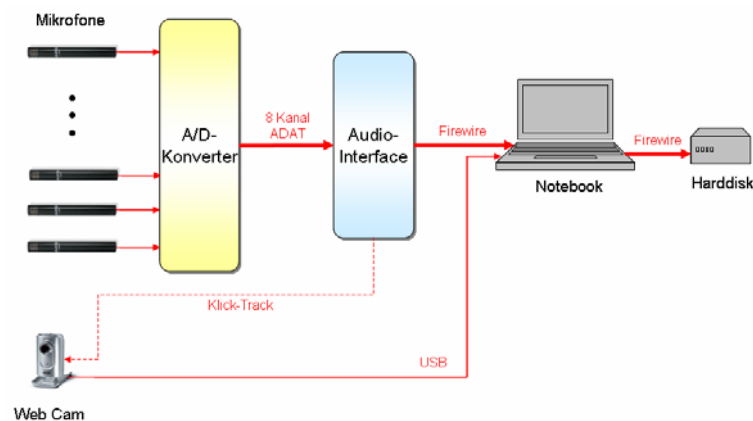


Abbildung 11 Blockschaltbild des Messsystems in der ersten Entwicklungsstufe

Die Tunnelgeräusche werden von den angebrachten Sensoren (Mikrofone) aufgenommen und in analoge elektrische Signale umgewandelt. Diese Signale (8 Kanäle) werden mit dem Audiointerface zusammengefasst und dieses setzt die 8 Kanäle in ein digitales Datenübertragungsformat um, so dass alle 8 Kanäle mit einer Datenleitung an das Notebook übertragen werden können. Auf dem Notebook läuft die Aufzeichnungs-Software, die die einzelnen Kanäle nun wieder trennt und so die digitalisierten Geräusche auf einer externen Harddisk speichert.

Zusätzlich zu den Mikrofonen wurde eine Videokamera installiert. Diese diente in der Entwicklungsphase des Projekts zur visuellen Kontrolle der momentanen Situation im Tunnel und zur Identifizierung und Klassifizierung noch nicht bekannter Geräusche im Tunnel.



Abbildung 12 Für die Entwicklungsphase zusätzlich installierte Videokamera (Web-Cam) zur visuellen Kontrolle der aktuellen Situation im Tunnel

Durch ein spezielles Signal wurden die Video- und Audiosignale synchronisiert. Beim späteren Einsatz des Systems zum Akustischen Tunnelmonitoring ist die Installation einer zusätzlichen Videokamera nicht mehr notwendig.

2.4 Aufbau der Geräusch-Datenbank

Ein wesentlicher Punkt bei der Entwicklung eines Detektionssystems ist die Erstellung einer Geräusch-Datenbank, da gewisse Vorabinformationen über die jeweiligen Geräuschklassen (z.B. Vorbeifahrtsgeräusch, Hupe, Reifenquietschen usw.) vorhanden sein müssen. Diese Vorabinformationen sind für jedes System mit so genannter „Künstlicher Intelligenz“ notwendig. Auch das System zur automatischen Detektion von Geräuschen im Tunnel arbeitet nach den Prinzipien der Künstlichen Intelligenz. In der Entwicklungsphase muss

jedes System vorerst eine so genannte „Trainingsphase“ durchlaufen, in der der Computer lernt, wie die einzelnen Geräusche unterschieden werden können. Dazu präsentiert ihm der Trainer (Mensch) möglichst viele Geräuschbeispiele einer Klasse und gibt ihm bestimmte Lernregeln vor, nach denen der Computer lernen soll. Nach der Trainingsphase folgt die so genannte „Erkennungsphase“, in der der Computer beweisen muss, dass er seine Lernaufgabe erfolgreich absolviert hat und in der Lage ist, die verschiedenen definierten Geräusch-Klassen selbständig und automatisch zu unterscheiden.

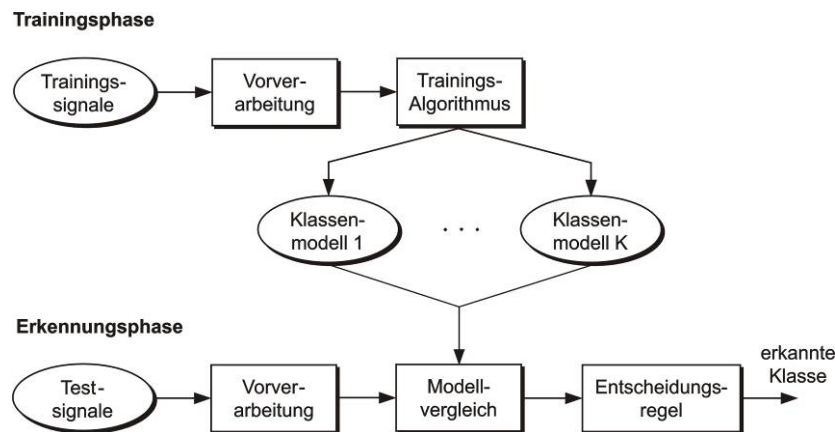


Abbildung 13 Blocksaltbild eines Detektionssystems mit den Schritten „Trainingsphase“ und „Erkennungsphase“, die nacheinander ausgeführt werden [2]

Für die Erstellung der nötigen Geräusch-Datenbank wurden im Plabutschunnel Aufzeichnungen durchgeführt. Einerseits, um die „normalen“ Betriebsgeräusche in einem Tunnel aufzuzeichnen und andererseits, um bestimmte „alarmierende“ Geräusche aufzunehmen. Die normalen Betriebsgeräusche eines Tunnels werden hauptsächlich durch Motor-, Reifenabroll- und Strömungsgeräusche der vorbeifahrenden Fahrzeuge geprägt. Jedoch sind auch Geräusche durch flatternde Planen oder Verzurrgurte von LKWs, u.a. aufgetreten. Alarmierende Geräusche wie z. B. Reifenquietschen und Hupgeräusche wurden während einer Sperre des Tunnels aufgezeichnet. Einige alarmierende Geräusche (Rufe, Aufprallgeräusche, ...) wurden synthetisch erzeugt bzw. einer speziellen Geräusch-Sammlung entnommen, mit mehreren Lautsprechern in den Tunnel eingespielt und gleichzeitig aufgezeichnet. Durch das Einspielen der Geräusche in den Tunnel werden die Geräusche auf diese Weise mit dem Nachhall des Tunnels überlagert um so deren Veränderung im Tunnel, zum Zweck einer späteren einwandfreien Identifikation, zu analysieren. Im derzeit laufenden Forschungsprojekt wird die Geräusch-Datenbank durch Montage des Messsystems in verschiedenen Tunneln erweitert.

2.5 Digitale Verarbeitung der aufgezeichneten akustischen Signale und Bildung des Frequenzspektrums

Im Vergleich zur analogen Schallaufzeichnung bietet die digitale Signalverarbeitung den großen Vorteil, die aufgezeichneten Daten mit entsprechenden Programmen am Computer analysieren und bearbeiten zu können. So können praktisch alle in der Mathematik bekannten Rechenoperationen auf das aufgezeichnete Signal angewendet werden.

Damit die aufgezeichneten Geräusche am Computer bearbeitet werden können, müssen diese zuerst digitalisiert werden. Dies geschieht im Analog-/Digital-Konverter. Das zeit- und wertkontinuierliche Analogsignal wird dabei in zwei Schritten in ein zeit- und wertdiskretes Digitalsignal umgesetzt.

Dabei erfolgt eine Abtastung des Analogsignals mit der so genannten Abtastrate. Sie gibt an, wie oft das zeitkontinuierliche Analogsignal innerhalb einer Sekunde abgetastet wird. Nach der Abtastung liegt das Eingangssignal als Folge von zeit- und amplitudendiskreten Abtastwerten vor.

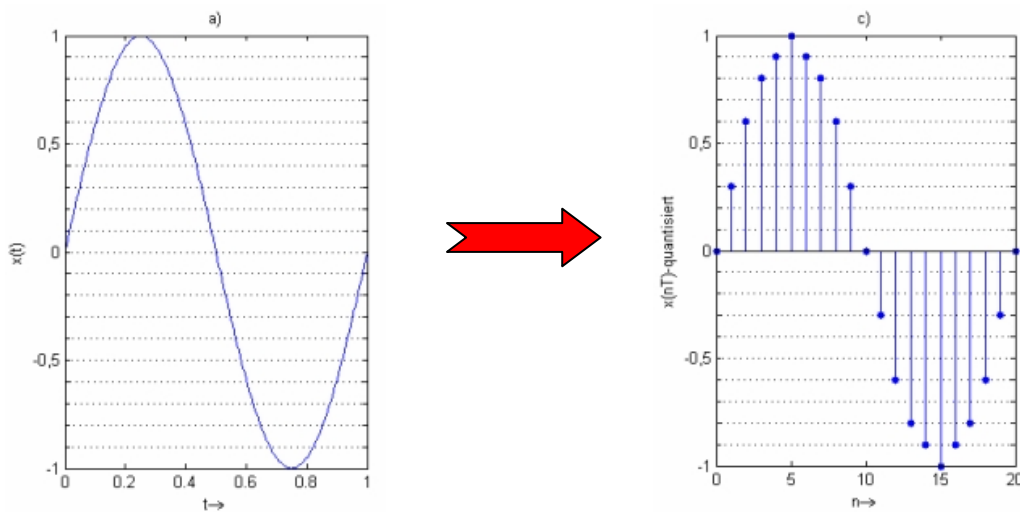


Abbildung 14 Das zeitkontinuierliche Analogsignal a) wird durch Abtastung in ein Digitalsignal c) gewandelt

Das Abtasttheorem von Shannon besagt, dass die Abtastrate mindestens doppelt so hoch sein muss, wie die höchste im aufgezeichneten Signal auftretende Frequenz. Die im Tunnel auftretenden Geräusche enthalten Frequenzanteile bis etwa 10 kHz. Deshalb wird die dem Audio-Standard entsprechende Abtastrate von 22,05 kHz verwendet.

Die Darstellung der aufgezeichneten Signale im Frequenzbereich bildet die Grundlage für die Detektion von Geräuschen im Tunnel. Der nötige Rechenvorgang für die Darstellung des Frequenzgehalts eines Signals wird allgemein als Fourier-Analyse bezeichnet. Nach dieser Vorschrift kann jede periodische nicht sinusförmige Schwingung als Überlagerung einer entsprechenden Anzahl rein sinusförmiger Teilschwingungen angesehen werden.

Zur Veranschaulichung sei hier ein Beispiel angeführt, bei dem das Frequenzspektrum eines Signalgemischs dargestellt wird. Das resultierende Zeitsignal setzt sich aus zwei Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz zusammen. Die erste Sinuskomponente (x_1) hat eine Frequenz von 50 Hz und eine Amplitude von 1. Die zweite Sinuskomponente (x_2) hat eine Frequenz von 150 Hz und eine Amplitude von 0,5. Der Zeitverlauf dieser Einzelschwingungen und der resultierenden Schwingung ist in Abbildung 15 oben dargestellt. Wenn man nur das resultierende Gesamtsignal kennt, so kann man für dieses recht einfache Beispiel die Frequenzzusammensetzung aus dem Zeitverlauf des Signals grafisch bestimmen. Für in der Praxis auftretende Geräusche ist eine grafische Bestimmung des Frequenzgehaltes aus dem Zeitsignal nicht mehr möglich. Wendet man jedoch eine Fourier-Analyse auf das Zeitsignal an, so erhält man die gewünschte Information über den Frequenzgehalt des Signals. Für das Beispiel mit dem Signalgemisch aus zwei Sinuskomponenten ist das Frequenzspektrum in Abbildung 15 unten dargestellt. Man kann daraus die genaue Zusammensetzung des Gesamtsignals erkennen.

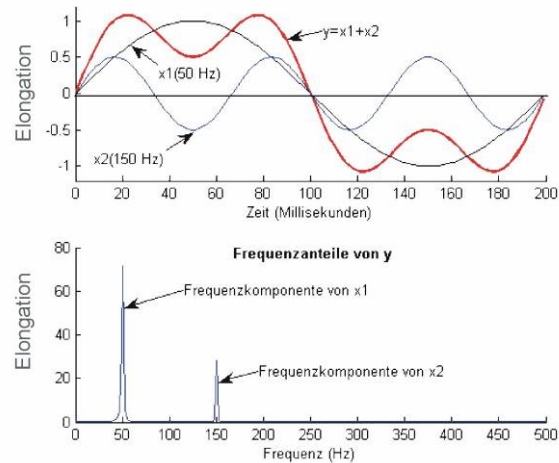


Abbildung 15 Signalgemisch aus zwei unterschiedlichen Sinussignalen (oben); Frequenzspektrum des Signalgemischs (unten)

Durch die Bildung des Spektrums ist es nun möglich, Geräusche, die spektral unterschiedlich zusammen gesetzt sind, zu unterscheiden. Als Beispiel ist in Abbildung 16 (oben) das typische Spektrum eines Vorbeifahrtsgeräusches eines LKWs dargestellt. In Abbildung 16 (unten) ist zum Vergleich das typische Spektrum einer Autohupe eines vorbeifahrenden PKWs dargestellt. Allein durch einen grafischen Vergleich kann erkannt werden, dass die harmonische Struktur des Spektrums der Autohupe deutlich vom Spektrum des LKWs abweicht. Damit wird es möglich, die Geräusche aufgrund des Spektrums zu unterscheiden.

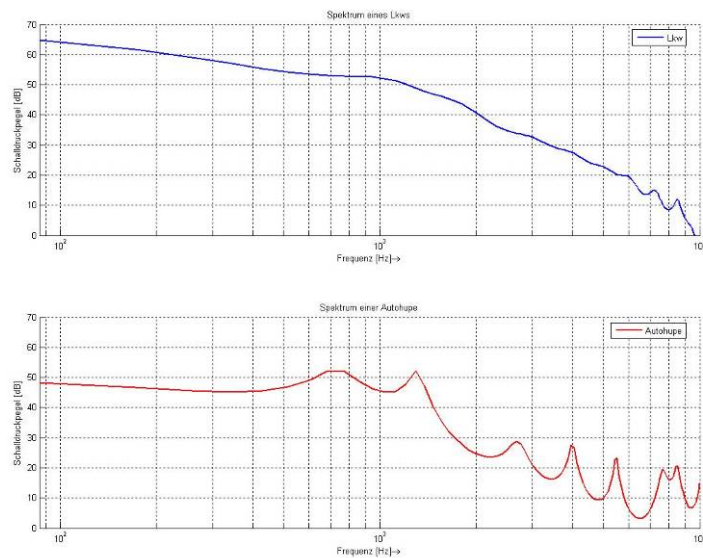


Abbildung 16 Spektrum eines Vorbeifahrtsgeräusches eines LKWs (oben) und einer Autohupe (unten)

Als weiteres Beispiel sind in Abbildung 17 die Spektren des Vorbeifahrtsgeräusches eines PKWs und von Reifenquietschen dargestellt.

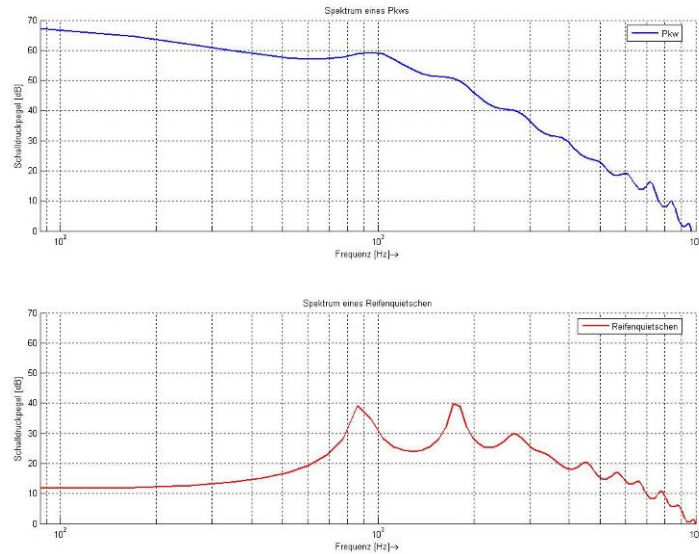


Abbildung 17 Spektrum eines Vorbeifahrtsgeräusches eines PKWs (oben) und von Reifenquietschen (unten)

Auch in Abbildung 17 zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen dem Spektrum des PKW-Vorbeifahrtsgeräusches und dem des Reifenquietschen. Auf diese Weise können die unterschiedlichen im Tunnel auftretenden Geräusche unterschieden werden.

2.6 Automatische Erkennung (Detektion) von akustischen Signalen

Es werden die Betriebsgeräusche im Tunnel von Mikrofonen aufgezeichnet und anschließend im Computer charakteristische Merkmale berechnet. Diese Merkmale bilden quasi einen „akustischen Fingerabdruck“, mit dessen Hilfe der Computer entscheiden kann, welcher Klasse das momentane Geräusch zugeordnet wird.

Damit der Computer diese automatische Erkennung ausführen kann, muss die Detektions-Software folgende Schritte ausführen:

- **Segmentierung** der zusammenhängenden Vorbeifahrtsgeräusche
- **Extraktion von Merkmalen** aus dem Schallsignal, die eine eindeutige Klassifizierung der Tunnelgeräusche ermöglichen
- **Klassifizierung** der Tunnelgeräusche mit statistischen bzw. stochastischen Modellen

Diese Schritte sind in Abbildung 18 grafisch dargestellt und werden anschließend näher erläutert:

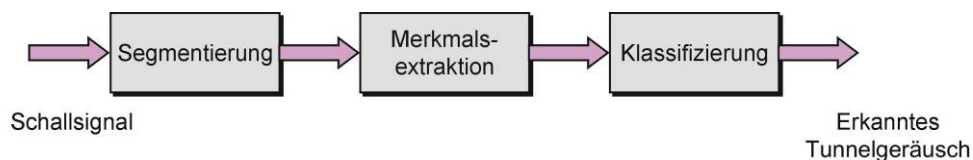


Abbildung 18 Blockschaltbild der einzelnen Schritte, die für die automatische Erkennung von Tunnelgeräuschen notwendig sind

2.6.1 SEGMENTIERUNG:

Die automatische Segmentierung der Geräusche in einem Tunnel ist deshalb notwendig, da die Verarbeitung und die Erkennung der Schallsignale für jedes vorbeifahrende Fahrzeug

bzw. jedes auftretende Ereignis getrennt durchgeführt werden muss. Die dadurch entstehenden zeitlichen Segmente bilden die Ausgangsbasis für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte.

Die in Abschnitt 2.3.1 beschriebene lange Nachhallzeit in Tunnels wirkt sich bei der Segmentierung der verschiedenen akustischen Ereignisse direkt aus. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die einzelnen Ereignisse sehr stark in sich akustisch „verschwimmen“, so dass allein durch die Analyse des Schalldruckpegels die Segmentierung nicht automatisiert werden kann. Es hat sich vielmehr gezeigt, dass durch Kombination des Schalldruckpegels und der Frequenzbereiche mit tiefen Frequenzen die Segmentierung durchgeführt werden kann.

In

Abbildung 19 ist an Hand eines konkreten Beispiels die Funktion des Segmentierungsalgorithmus dargestellt. In der oberen Abbildung ist das vom Mikrophon aufgezeichnete Geräusch als Funktion der Zeit dargestellt. Aus diesem Zeitverlauf ist auf dem ersten Blick nicht zu erkennen, welche Geräusche im Tunnel in dieser Zeitspanne aufgetreten sind. Durch die Analyse der Frequenz-Inhalte ist es durch gewichtete Kombination des Schalldrucks und der Frequenzbereiche möglich, eine neue Funktion (Feature 1) zu berechnen. Die Maxima dieser Funktion entsprechen dem „Mittelpunkt“ der Segmente. Die Länge der Segmente ist unterschiedlich und hängt von der Geschwindigkeit der vorbei fahrenden Fahrzeuge– oder allgemein formuliert, von der Länger des akustischen Ereignisses ab. Typischerweise haben die Segmente eine Länge von 1-2 Sekunden. In

Abbildung 19 sind die einzelnen Segmente mit roten Ziffern gekennzeichnet.

Nach der Segmentierung der Geräusche sind zwar die Grenzen der Segmente und damit die Segmentlänge bekannt – über den Inhalt (z.B. LKW-Vorbeifahrt, Hupe, etc.) kann man keinerlei Aussagen treffen.

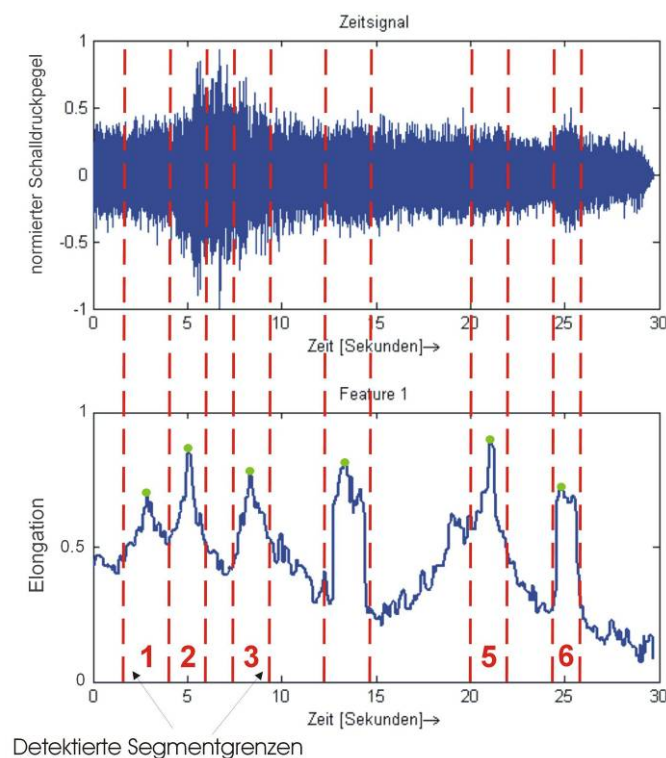


Abbildung 19 Automatische Segmentierung an Hand eines im Tunnel aufgezeichneten Geräusches. Die roten Ziffern in der unteren Abbildung markieren die einzelnen Segmente

2.6.2 EXTRAKTION VON MERKMALEN

Die Stufe der Extraktion von Merkmalen aus den Tunnelgeräuschen hat die Aufgabe, die akustischen Signale durch Transformationen in eine für die weitere Verarbeitung geeignete parametrische Form zu bringen. Die Extraktion von Merkmalen aus dem akustischen Signal hat folgende Ziele:

- Reduktion der Datenmenge
- Hervorhebung jener Variabilitäten, die zur Identifikation des Geräusches hilfreich bzw. notwendig sind
- Ausblendung von Störeinflüssen

In Abbildung 20 sind beispielhaft zwei verschiedene Merkmalsfunktionen dargestellt, die aus dem Zeitsignal (Abbildung 20, oben) berechnet wurden. Diese beiden Merkmalsfunktionen (Feature 2 und Feature 3) dienen der Unterscheidung von Hupgeräuschen und Reifenquietschen. Mit Feature 2 können z.B. aus dem Signal sowohl Hupgeräusche als auch Reifenquietschgeräusche detektiert werden. Dies äußert sich durch die Bereiche in Abbildung 20 (mitte), die rot eingekreist sind. Soll nur Reifenquietschen detektiert werden, verwendet man z.B. Feature 3. In Abbildung 20 (unten) erkennt man deutlich, die Auslenkung des Signals (rot eingekreist), wenn Reifenquietschen auftritt.

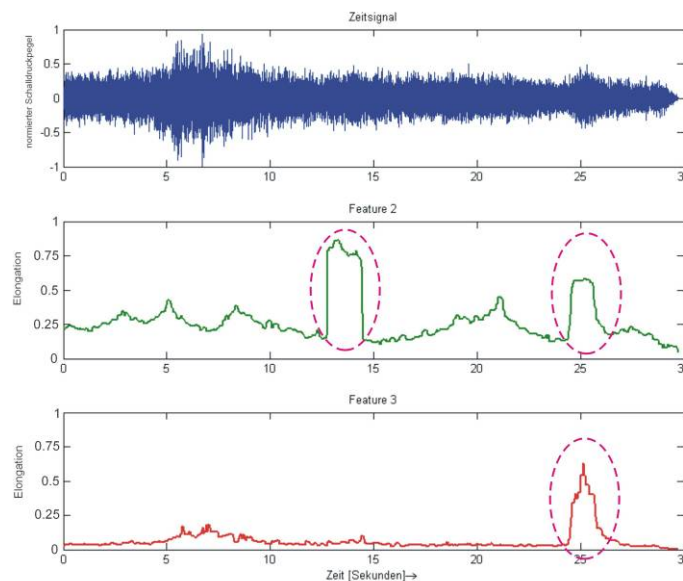


Abbildung 20 Extraktion von Merkmalen zur automatischen Detektion von Hupgeräuschen und Reifenquietschen. Eingekreist sind jene Bereiche dargestellt, an Hand derer man Hupen und Reifenquietschen unterscheiden kann.

Die Entwicklung der Merkmale (Features) ist ein intuitiver Prozess. Im Laufe der Entwicklungsarbeiten und mit größer werdender Geräusch-Datenbank werden die Berechnungsmethoden ständig optimiert bzw. erweitert.

2.6.3 KLASSIFIZIERUNG

Der dritte und letzte Schritt ist die Klassifikation. Als Klassifizierung oder Klassifikation

bezeichnet man den Vorgang, die verschiedenen Geräusche in zuvor definierte Klassen (LKW, PKW, Reifenquietschen, ...) einzuordnen. Bei der automatischen Klassifikation erledigt diese Aufgabe der Computer selbständig an Hand bereits erlernter Entscheidungsregeln.

In Abbildung 21 ist für das vorliegende Projekt ein Beispiel eines Klassifikators dargestellt. Der Klassifikator kann durch die zuvor erlernten Unterschiede zwischen den Klassen „LKW, PKW, Hupe, Bremsenquietschen“ die Grenzlinien ziehen und anschließend unbekannte Geräusche in diese Klassen einordnen. Die Klassifikation erfolgt hier aufgrund der Parameter „Schalldruckpegel“ und „Frequenz“, durch die sich die vier Klassen unterscheiden.

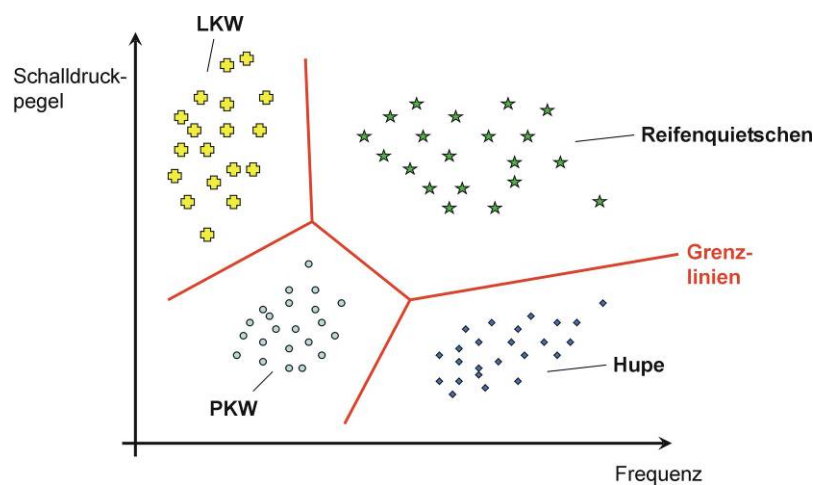


Abbildung 21 Die verschiedenen Klassen (LKW, PKW, Hupe, Bremsenquietschen) können durch den Klassifikator durch z.B. die Parameter „Schalldruckpegel“ und „Frequenz“ automatisch eingeordnet (klassifiziert) werden.

2.7 Optimierung des Aufzeichnungssystems

In Abschnitt 2.3.2 wurde das Blockschaltbild des derzeitigen Messsystems erläutert. Bei diesem Messsystem werden die Mikrofonsignale analog über Kupferleitungen übertragen. Dies bringt bei größeren Entfernungen einige Nachteile mit sich. Deshalb wurde im Zuge des Projektes eigens ein neues Messsystem entwickelt, das in der Lage ist, die Mikrofonsignale mittels Lichtwellenleiter zu übertragen. Damit können die Mikrofonsignale digital über lange Distanzen bis zur Tunnelwarte (Leitrechner) übertragen werden. In Abbildung 22 ist das Blockschaltbild des neuen Messsystems dargestellt.

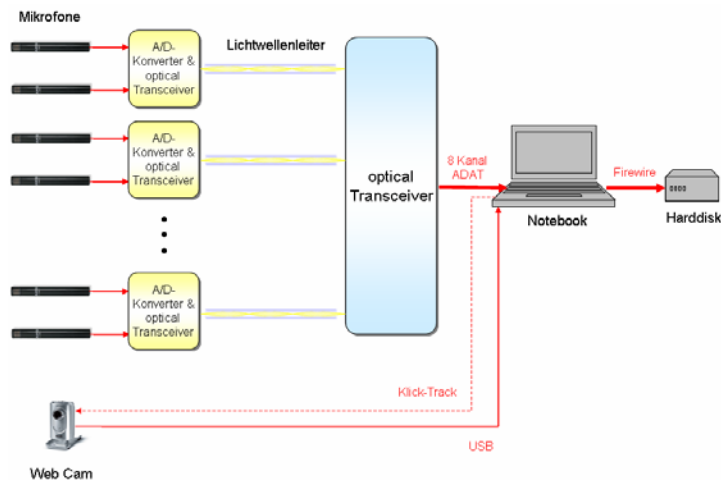


Abbildung 22 Blockschaltbild der Struktur des neuen Messsystems; die Mikrofonsignale werden digital über große Distanzen mit Lichtwellenleitern übertragen

3 Ausblick Phase 3 - Pilotprojekt

Wie in Abschnitt 1 erläutert, wird das Projekt „Akustisches Tunnelmonitoring“ in mehreren Phasen realisiert. Das derzeit In Arbeit befindliche Forschungsprojekt (Phase 2) wird im Herbst 2005 abgeschlossen. Im Anschluss daran folgt das Pilotprojekt (Phase 3), in dem eine Pilotanlage in einem österreichischen Tunnel aufgebaut werden soll.

Die zukünftigen Arbeiten im Pilotprojekt werden sein:

- Auswahl von verschiedenen Orten in einem Tunnel und verschiedene Tunnels zur stetigen Erweiterung der Geräuschdatenbank

Das Messsystem wird in Tunneln mit unterschiedlicher Geometrie und Betriebsmodus (Gegenverkehr, Richtungsverkehr) installiert, um ein möglichst breites Klangspektrum der Tunneln abzudecken.

- Weiterentwicklung der Auswertalgorithmen

Die Algorithmen werden laufend an Hand neuem Geräuschmaterial optimiert, um so einerseits die Erkennungsleistung zu maximieren und gleichzeitig die Fehlalarmrate zu minimieren.

- Untersuchung von möglichen Störgrößen, Zuverlässigkeit, Stabilität

Unter Störgrößen versteht man jene Geräusche, die die Klassifikationsleistung des Detektionssystems herabsetzen. Zuerst werden die möglichen Störgrößen recherchiert und durch manuelles Durchhören der Aufzeichnungen erfasst werden. Im nachfolgenden Pilotprojekt sollen die erfassten Störgrößen dazu dienen, den Klassifikationsalgorithmus resistent gegenüber diesen Störgrößen zu machen.

- Erstellung der Software-Architektur

Speziell bei der Implementierung von „echtzeitfähiger“ Software müssen eine ganze Reihe von Punkten beachtet werden, die bei der Programmierung einer herkömmlichen Software, die im „Offline-Betrieb“ arbeitet, nicht auftreten.

- Programmierung der Detektionsalgorithmen für Echtzeit-Betrieb

Die zuvor prototypisch implementierten Algorithmen werden auf einem echtzeitfähiges System implementiert und optimiert, damit sie möglichst schnell und mit wenig Rechenleistung abgearbeitet werden können.

- Aufbau und Installation des Pilotsystems in einem ausgewählten Tunnelabschnitt

Der erste Teilschritt ist der Aufbau und die Installation des Messsystems im ausgewählten Tunnel. Nach erfolgreicher Installation des Demonstrationssystems sollen in den folgenden 6 Monaten Langzeittests durchgeführt werden.

Durch die Installation des Pilotsystems soll die Funktionsweise in Hinblick auf die Vorteile des Systems zum Akustischen Tunnelmonitoring in einem Langzeittest demonstriert werden. Weiter soll durch eine stetige Optimierung und Feinjustierung des Systems die Performance weiter erhöht werden. Dabei werden die Klassifikations-Ergebnisse rund um die Uhr gespeichert, um alle vom System getätigten Klassifikationen nachvollziehen und überprüfen zu können. Der Langzeittest bildet die Grundlage für die Validierung des Systems, wobei zugleich die Leistungsfähigkeit eines Systems zum akustischen Tunnelmonitoring gezeigt wird.

Damit wird es erstmals möglich sein, die Vorgänge in einem Tunnel sowohl visuell als auch akustisch zu verfolgen. Dadurch wird die Sicherheit in Tunnels zukünftig durch die automatische visuelle und akustische Überwachung mit Hilfe der entwickelten innovativen Detektionssysteme noch weiter erhöht.

4 Zusammenfassung

Das System zum akustischen Monitoring verfolgt einen neuen Ansatz zur Erhöhung der Sicherheit in Tunnels. Bisher wurden lediglich Video-Informationen für die Überwachung und automatische Detektion von kritischen Ereignissen in Tunnels heran gezogen. In der vorliegenden Publikation werden die ersten Erfahrungen in der Entwicklung eines Systems erläutert, das die akustischen Ereignisse in einem Tunnel analysiert, automatisch klassifiziert und für die Tunnelüberwachung verwendet.

Der große Vorteil akustischer Methoden zur Unfallerkennung besteht darin, dass damit verbundene spezifische Geräusche immer zum Zeitpunkt des Geschehens auftreten – und nicht erst nach einiger Zeit – und diese auf Grund ihrer Eigenart mit großer Sicherheit detektiert werden können. Unfälle bzw. kritische Ereignisse in Tunnels sind praktisch immer von einem speziellen, deutlich unterscheidbaren Unfallgeräusch begleitet, weshalb eine automatische Detektion möglich ist. Aber auch die plötzliche Abwesenheit der normalen Betriebsgeräusche lässt auf eine Anomalie im Verkehrsfluss (z. B. Stau) schließen.

Aufgrund des Umstandes, dass vor Beginn der Arbeiten auf keinerlei Erfahrungen auf diesem Gebiet zurück gegriffen werden konnte, wurde das gesamte Projekt in drei Phasen aufgeteilt, die als Grundlagenstudie, Forschungsprojekt und Pilotprojekt bezeichnet werden.

In der Grundlagenstudie und im Forschungsprojekt wird das Basiswissen über die akustischen Zusammenhänge und die Erfassung der akustischen Ereignisse im Tunnel erarbeitet.

Bisher wurde das Verhalten von Tunnels raumakustisch untersucht, um so die optimale Positionierung der Sensoren zu erhalten und damit qualitativ hochwertige Aufzeichnungen zu erhalten. Des Weiteren wurde im Frühjahr 2004 im Plabutschunnel mit einem mehrkanaligen Aufzeichnungssystem über mehrere Stunden Betriebsgeräusche als auch alarmierende Geräusche aufgezeichnet. Diese wurden in die so genannte Geräuschdatenbank eingepflegt, die ständig mit neuen Einträgen erweitert wird. Diese Datenbank bildet die Grundlage für die Entwicklung der Detektionsalgorithmen, die mit Methoden der Künstlichen Intelligenz arbeiten und die verschiedenen Geräuschklassen

automatisch unterscheiden können.

Im Pilotprojekt werden die erarbeiteten Grundlagen in eine echtzeitfähige Detektions-Software übergeführt. Es wird ein akustisches Monitoring-System in einem österreichischen Tunnel installiert und in Folge in einem Langzeittest evaluiert .

Durch ein System zum akustischen Tunnelmonitoring wird es erstmals möglich, die Ereignisse in einem Tunnel auch akustisch rund um die Uhr zu überwachen. Dadurch wird die Detektionsrate von kritischen Ereignissen in einem Tunnel sprunghaft erhöht werden, da durch die akustischen Methoden eine neue Informationsquelle erschlossen wird. Jedoch soll das akustische System nicht als autarkes System gesehen werden. Vielmehr soll es in Kombination mit den bestehenden Video-Überwachungssystemen helfen, die Sicherheit in Tunneln noch weiter zu erhöhen und die Folgen eines kritischen Ereignisses für Menschen und die Tunnelinfrastruktur zu verringern. Gleichzeitig wird auch die Fehlalarmrate der bestehenden Detektionssysteme minimiert welches wiederum der Konzentration des Tunnelmanagers auf wesentliche Ereignisse dient.

Ein weiterer bestechender Vorteil des Akustischen Monitorings ist darin zu sehen, dass die Reaktionszeit der Ereignisdienste wesentlich verkürzt werden kann. Aufgrund der Tatsache, dass Schallereignisse immer zum Zeitpunkt des Geschehens detektiert werden können, ergibt sich hier keine nennenswerte Latenz des Detektionssystems. Daraus folgt, dass die Zeit bis zum Eintreffen der Hilfskräfte weiter minimiert wird.

Literatur

(1) BRANDSTÄTTER, W.; FOLDYNA, L.; GRAF, F.; KRIVEC, V.; MARIUS, W.; RAINER, H.; VITA, P.:(2004): Erhöhung der Tunnelsicherheit durch innovative akustische bzw. optisch-visuelle Methoden und Computersimulation - ETIMEC; interner Projektbericht
(2) GRAF, FRANZ (2002): Entwurf und Implementierung eines Systems zur automatischen Identifikation von akustischen Signalen; Dissertation; Technische Universität Graz
(3) EUROPÄISCHES PARLAMENT (2004): RICHTLINIE 2004/54/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßen; Amtsblatt der europäischen Union
(4) FAHY, F. (2001): Engineering Acoustics, Academic Press
(5) MEYER E.; NEUMANN E.-G. (1979): Physikalische und Technische Akustik, Verlag Vieweg
(6) JUNKER, G. (1994): Einführung in die Raumakustik und Beschallungstechnik; Vorlesungsunterlagen; Universität Wien
(7) MECHEL, F.P. (2002): Formulas of Acoustics, Springer Verlag
(8) CREMER, L.; MÜLLER, H. A. (2002): Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band I-II, S. Hirzel Verlag, Stuttgart