

# Technologie- und Marktorientierte Entwicklung von Messsystemen

Maximilian Ertsey<sup>1</sup>, Manuel Männel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Müller-BBM GmbH, 82152 Planegg, E-Mail: maximilian.ertsey@mbbm.com

<sup>2</sup>Müller-BBM GmbH, 82152 Planegg, E-Mail: manuel.maennel@mbbm.com

## Zusammenfassung

Für die Beurteilung von Verkehrsgeräuschen und den Eigenschaften von Fahrbahndeckschichten gibt es eine Reihe von normativen Verfahren, die bereits seit Jahren angewandt werden. Die in diesem Zusammenhang eingesetzten Messsysteme entwickeln sich kontinuierlich weiter. Ausgangspunkte für die Verbesserung von Messsystemen sind neue technische Möglichkeiten sowie eine sich ändernde Marktnachfrage. Die Messsysteme werden objektiver, präziser und effizienter – veraltete Verfahren werden ersetzt.

Als Beispiel dient die Bestimmung von Texturtiefen, die sich von dem einfachen und ungenauen Sandfleckverfahren über Lasertextur-Systeme (stationäre sowie mobile Systeme auf Fahrzeugen) bis zu einem hoch automatisierten System mit Eigenantrieb entwickelt hat, das die Messung und Analyse der Fahrbahndeckschicht in Echtzeit ermöglicht.

Dieser Artikel gibt anhand der Textur- und statistischen Vorbeifahrtmesssysteme einen Überblick in deren Entwicklung in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft.

## Einleitung

Zur Bestimmung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche und Verkehrsgeräusche im Allgemeinen existiert eine Reihe von Messverfahren, von denen einige in Normen detailliert beschrieben sind. Zudem gibt es Messsysteme für die Ermittlung bestimmter akustisch relevanter Parameter von Fahrbahndeckschichten wie beispielsweise die Oberflächentextur.

Diese Systeme befinden sich alle in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess, um ihre Anwendbarkeit zu optimieren und um Ergebnisse so objektiv und nachvollziehbar wie möglich zu machen. Verbesserungen der Messsysteme werden im Innovationsprozess typischerweise von sogenannten Beschleunigern getrieben. Externe Beschleuniger sind z. B.:

- Technische Möglichkeiten: z. B. die Verfügbarkeit von neuen Sensoren, Analysatoren oder anderen Soft- und Hardware-Komponenten sowie neuen Algorithmen.
- Normative Anforderungen: z. B. neue Versionen von bereits bestehenden Normen inkl. Änderungen der Messverfahren
- Kundenbedarf: z. B. wachsende Nachfrage nach Messungen, wachsende Nachfrage nach Qualität, wachsender Wettbewerb auf dem Markt oder neue Sicherheitsvorschriften.

Solche Beschleuniger erlauben bzw. fordern Verbesserungen der Messsysteme. Die hier beschriebene kontinuierliche

Entwicklung hat sich als relevantes methodisches Konzept im modernen Management bewährt. Das ursprüngliche Konzept wurde in Japan unter dem Namen Kaizen [1] entwickelt. In Deutschland ist es als „Kontinuierlicher Verbesserungsprozess“ (KVP) bekannt [2]. Abbildung 1 zeigt einen Überblick eines solchen Innovationssystems.

Verbesserungen von Messsystemen können mitunter die Effizienz, die Qualität der Daten oder die Sicherheit verbessern:

- Effizienz: Neben einer möglichst kurzen Aufbauzeit und einer schnellen Durchführung der Messung, soll das System eine minimale Beurteilungszeit zur Verarbeitung der Rohdaten aufweisen.
- Qualität: Die Messung sollte möglichst objektiv, reproduzierbar und repräsentativ durchführbar sein. Zudem sollte die Ungenauigkeit durch verschiedene Einflüsse (beispielsweise der Sensoren) möglichst minimiert werden und ein einheitliches Kalibrierverfahren gefunden werden, um die Gesamtpräzision zu verbessern.
- Sicherheit: Neben der Systemsicherheit (einer möglichst geringen Ausfallwahrscheinlichkeit des Messsystems) muss darauf geachtet werden, dass sowohl Personal wie auch Unbeteiligte im Straßenverkehr nicht durch die Messung gefährdet werden.

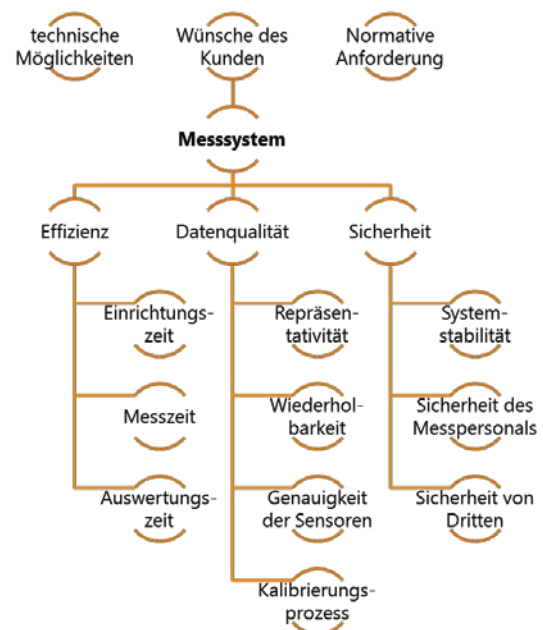


Abbildung 1: Innovationssystem für die Entwicklung von Messsystemen.

Solche Verbesserungen reichen von kleinen Veränderungen der Hardware, die die Durchführbarkeit erhöhen bis hin zu einer kompletten Neugestaltung der Soft- und Hardware.

## Beispiel 1 – SPB-Messungen

### Allgemeine Information

Statistische Vorbeifahrtmessungen (SPB) gemäß ISO 11819-1 [3] werden normalerweise mit CPX-Messungen kombiniert. Im Gegensatz zu CPX-Messungen ermöglichen SPB-Messungen die Messung des Absolutwerts von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen, inklusive der Dämpfungscharakteristika auf dem frühen Ausbreitungsweg über die Fahrbahndeckschicht.

SPB-Messungen sind die Hauptmethode, um das Geräuscheminderungspotential für verschiedene Arten von Deckschichten abzuleiten. Daher sind SPB-Messungen wichtige Hilfsmittel bei der Ermittlung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen und bei der Entwicklung von geräuscharmen Fahrbahndeckschichten im Allgemeinen.

### Kontinuierlicher Verbesserungsvorgang

Vor über 15 Jahren wurden frühe Messungen mit einem Schallpegelmessgerät mit Max-Hold-Funktion, einer Radarpistole und einer einfachen Wetterstation durchgeführt. Diese drei Systeme wurden parallel betrieben und die Datensätze wurden später kombiniert. Im Grunde funktioniert diese Methode gemäß der Norm, ist jedoch sehr zeitaufwändig und fehleranfällig. Der Anwender erhält kein Feedback, ob sich zu messende Fahrzeuge ausreichend vom Fremdgeräusch abhebt und er weiß nicht, wann er genügend gültige Datensätze angesammelt hat. Das bedeutet, dass einiges an Erfahrung nötig ist, um so ein „System“ zu betreiben, das nicht mehr als eine Kombination aus verschiedenen Sensoren und Analytoren ist.

Ein erster großer Verbesserungsschritt vor mehr als 10 Jahren war es, die Datenerfassung aller Sensoren in einem Analytoren, der von einem Messprogramm gesteuert wurde, zu kombinieren. Dieses Programm war auch in der Lage, z. B. die maßgebliche Erhöhung von mindestens 6 dB resultierend aus einer Vorbeifahrt, festzustellen, ungültige Datensätze (z. B. zu hohe Windgeschwindigkeiten) zu löschen und die komplette Datenanalyse gemäß ISO 11819-1 durchzuführen. Dadurch war es dem Anwender möglich, Echtzeit-Informationen über den Messvorgang zu erhalten und zu gewährleisten, dass der Datensatz bereits vor Ort ausreichend groß ist (entsprechend den Anforderungen der ISO 11819-1). Es war nicht notwendig, die einzelnen Rohdatensätze in der Auswertung zu kombinieren – eine geschlossene Prozesskette wurde von der Messung zur endgültigen Beurteilung erstellt, was die Qualität der Daten steigerte. Es ist klar, dass dieser Entwicklungsschritt fast alle der o. g. Verbesserungen (vgl. Abbildung 1) abdeckt.

In den letzten Jahren wurde jedoch festgestellt, dass es fast unmöglich ist, SPB-Messungen in dicht besiedelten Metropolregionen mit hohem und sogar noch weiter wachsendem Verkehrsvolumen durchzuführen. Die Pegelüberhöhung einer einzelnen Vorbeifahrt um 6 dB kann nicht erreicht werden, wenn der Verkehr zu dicht ist. Sogar wenn einzelne Vorbeifahrten gemessen werden können, sind diese statistisch nicht repräsentativ: Die einzelnen Vorbeifahrten, die eine Erhöhung um 6 dB in dichtem Verkehr zeigen, sind meistens Fahrzeuge mit einem

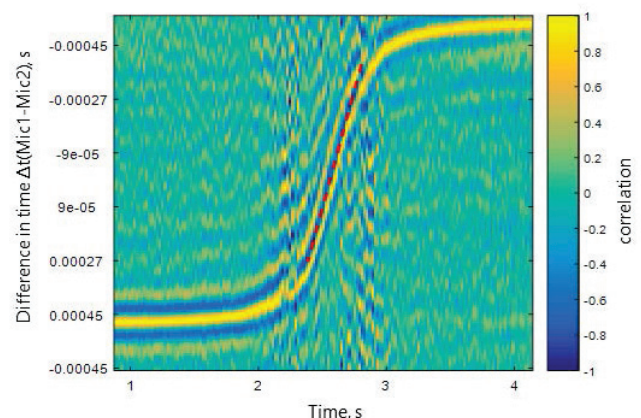
vergleichsweise hohen Vorbeifahrtpegel (sodass sie aus den Verkehrsgläuschen hervorstechen). Daher ist die grundlegende Voraussetzung einer Statistischen Vorbeifahrtmessung (eine statistische einheitliche Verteilung) nicht erfüllt [4].

Komplexe Messprinzipien wie Beamforming, wie in [5] beschrieben, verkomplizieren den Messablauf (siehe auch [6]), anstatt sich dem Ausgangsproblem (dichter Verkehr) zu widmen. Es ist schwer, die Komplexität eines solchen Systems zu beherrschen, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass die Nachfrage nach statistischen Vorbeifahrtmessungen auf dem Markt sehr hoch ist.

Die einzige Alternative ist dann, die Messungen in einem Zeitfenster mit geringerem Verkehrsvolumen durchzuführen [4], z. B. in der Nacht. Dies steht jedoch den Sicherheitsanforderungen für Messpersonal und den regulären Verkehr entgegen, da die Ausrüstung und das Personal nachts nur schwer erkennbar sind.

Dies führte zu einer weiteren großen Änderung des Messsystems. Der gesamte Vorgang der statistischen Vorbeifahrtmessungen wurde untersucht. Anschließend wurde ein Konzept für autonome statistische Vorbeifahrtmesssysteme entwickelt.

Dieses System, das in [7] detailliert beschrieben ist, bedient sich eines 3-Mikrofonen-Arrays, um die Längs- und Querpositionen von vorbeifahrenden Fahrzeugen zu bestimmen (Mikrofone 1 und 2 sind horizontal angebracht, Mikrofone 1 und 3 vertikal). Die Fahrzeugposition in Fahrtrichtung wird genutzt, um die Position eines vorbeifahrenden Fahrzeugs entlang der Straße und einzelne vorbeifahrende Fahrzeuge zu ermitteln. Dies wird mit der Beurteilung der Kreuzkorrelation der horizontalen Mikrofonpositionen erreicht (vgl. Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Typische Kreuzkorrelation der horizontal ausgerichteten Mikrofone für eine einzelne Fahrzeugvorbeifahrt im autonomen SPB-Messsystem.

So ein System kann abends aufgestellt werden, sammelt Daten über Nacht und kann am nächsten Morgen wieder demontiert werden. Über eine ganze Nacht werden normalerweise 300 bis 700 Fahrzeugvorbeifahrten aufgezeichnet. Das bedeutet, dass der Bestand von Datensätzen viel größer ist im Vergleich zu einer konventionellen beobachteten SPB-Messung.

## Fazit für SPB-Messsysteme und Ausblick

In einer Zeitspanne von 10 Jahren wurde ein System, das nicht mehr war als eine Kombination aus Sensoren und Analysatoren, weiterentwickelt zu einem integrierten System, das alle relevanten Datenflüsse in der Messung kombiniert und die Daten automatisch analysiert. Dieses System wurde über die Jahre verbessert; es wurde leichter, die Installation verlief schneller und es wurde einfacher zu bedienen. Letztendlich stellte sich heraus, dass der konventionelle SPB-Vorgang als begleitete Messung bei wachsendem Verkehrsvolumen an Effizienz zunehmend verliert. Deshalb wurde das gesamte System neugestaltet und vollständig automatisiert. Am Ende wurde ein autonomes SPB-Messsystem entwickelt. Dieses System befindet sich heute in seiner endgültigen Validierungsphase und wird das konventionelle System spätestens Ende 2018 ersetzen. Mit dem neuen autonomen System können größere Datensätze gemessen werden, die Entscheidungen, die normalerweise vom Anwender getroffen werden, werden nun autonom und objektiver getroffen.

## Beispiel 2 – Texturmessungen

### Allgemeines

Texturmessungen z. B. gemäß [8] sind wichtige Hilfsmittel, um die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndeckschichten zu ermitteln. Es gibt eine Reihe von Parametern, die genutzt werden können, wie beispielsweise die Mittlere Profiltiefe, den Gestaltfaktor, die mittlere Spitzengeometrie und das Spektrum.

### Kontinuierlicher Verbesserungsvorgang

Seit über 20 Jahren gibt es eine Reihe von optischen und taktilen Systemen, die das früher verwendete Sandfleckverfahren nach und nach ersetzen. Die gebräuchlichsten Systeme sind die Laser-Triangulationssysteme. Diese wurden in der Vergangenheit oft auf stationären, beweglichen Scanrahmen installiert, die den Lasersensor entlang der Fahrtrichtung einige Meter bewegen (normalerweise ca. 2 m). Es gibt auch einige exotischere Systeme, die die Textur auf einem runden oder spiralförmigen Weg messen, doch aufgrund der Bewegungsrichtung eines rollenden Reifens (entlang eines geraden Weges entlang einer Straße) ist klar, dass solche exotischen Systeme nicht vollständig das relevante Profil der Oberfläche bewerten können.

Texturmesssysteme erlangten zunehmend an Bedeutung in den letzten fünf bis sieben Jahren. Heute können zwei Hauptbeschleuniger identifiziert werden:

- Offenporige, schallabsorbierende Fahrbahndeckschichten werden zunehmend durch dichte, geräuschmindernde Deckschichten ersetzt. Die akustische Leistung von dichten Deckschichten ist hauptsächlich abhängig von der Oberflächentextur.
- in ISO 10844:2011 wird der *MPD*-Wert [8] als Spezifikation beschrieben und ersetzt den „Sandfleck“.

Diese beiden Beschleuniger erhöhten die Marktnachfrage nach Texturmessungen drastisch und beschleunigten besonders die Entwicklung von Systemen, die an Fahrzeugen befestigt sind.

Auf Fahrzeugen angebrachte Systeme sind relativ klein und können leicht von einem Standort zum anderen verschickt werden. Abhängig vom Anwendungsfall können die gemessenen Daten um vertikale Fahrzeugbewegung korrigiert werden, bevor die Daten gemäß den jeweiligen Normen analysiert werden. Sie erlauben ebenfalls, Hochgeschwindigkeitsmessungen durchzuführen, so lange der verwendete Lasersensor eine ausreichend hohe Abtastrate aufweist.

Dennoch weisen sie einige Nachteile auf. Sie brauchen z. B. ein Basisfahrzeug, das sie entlang der Oberfläche bewegt, was bedeutet, dass ein Auto bei der Messstelle bereitgestellt sein muss, das System auf einem Auto installiert werden muss oder das gesamte Auto inkl. System zu der Messstelle fahren muss. Zudem ist es notwendig, die Messoberfläche mit einem Auto zu befahren – dies kann ein Problem sein, wenn die Messungen direkt nach (oder sogar während) dem Einbau der Fahrbahndeckschicht durchgeführt werden sollen.



**Abbildung 3:** Entwicklung von Messsystemen für Texturmessungen. Von links nach rechts: Sandfleck, stationärer beweglicher Laserscanner, auf einem Fahrzeug angebrachter Laserscanner, selbst betriebenes Multisensorsystem Surface Drone.

Die Nachteile von auf Fahrzeugen angebrachten Systemen und die kontinuierliche Globalisierung des Marktes für Fahrbahndeckschichtmessungen führen zu einem weiteren grundlegenden Entwicklungsschritt.

Das Ziel war es, ein System aufgrund der folgenden Leistungsspezifikation zu entwickeln:

- Voll integriert: Alle Sensoren, Verkabelungen, Datenerfassung, Datenbeurteilung, User-Frontend (inkl. Bildschirmen) und die Mechanik, um das System zu bewegen, sollen in einem Gehäuse integriert sein.
- Leicht zu benutzen: aufwändige Benutzerinteraktion ist nicht notwendig. In der optimalen Lösung sollte keine Tastatur o. ä. notwendig sein, um das System zu steuern.
- Mobil: Das System sollte klein genug sein, um als Handgepäck im Flugzeug transportiert werden zu können.

Die angegebene Leistungsspezifikation unterschied sich sehr zu bestehenden Systemen, sodass eine vollständige Neugestaltung notwendig war. Es war notwendig, alle Komponenten, Soft- und Hardware neu zu entwickeln.

Schlussendlich wurde ein Konzept für einen selbst betriebenen Roboter gewählt, der mit einer Fernbedienung

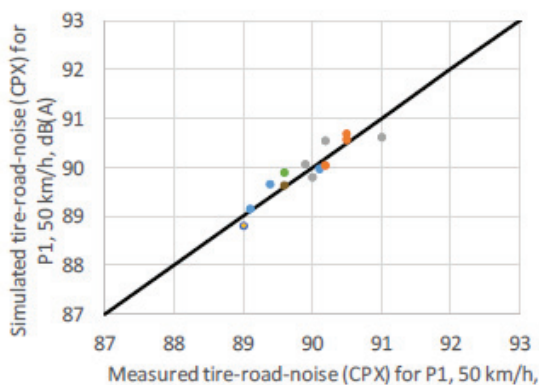
gesteuert werden kann. Das Fahrwerk ist als Riemenantrieb gestaltet. Das Fahrwerk des Roboters wurde individuell an die Leistungsspezifikation und die besonderen Anforderungen für eine umfangreiche Benutzung auf Fahrbahnoberflächen angepasst.

### Fazit für Texturmesssysteme und Ausblick

Texturmesssysteme haben sich in den letzten Jahren rasch entwickelt. Während sich die Hauptprinzipien der Messung (z. B. Laser-Triangulation) kaum verändert haben, gab es in der praktischen Anwendung große Änderungen. Der Messroboter Surface Drone ist ein Ergebnis dieses intensiven Innovationszyklus.

In Zukunft wird die Nachfrage nach Texturmessungen noch weiter zunehmen. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass andere wichtige Eigenschaften von Fahrbahndeckschichten wie der Rollwiderstand eine Funktion der Oberflächentextur darstellen [10]. Das bedeutet, dass die Beurteilung der Oberflächentextur in Zukunft genug Informationen liefern könnte, um den Rollwiderstand zu bewerten.

Ein weiteres Beispiel ist die Beurteilung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche: [11] zeigt, dass es – innerhalb eines Typs von Deckschicht – möglich ist, statistische Modelle zu generieren, um die Pegel der Reifen-Fahrbahn-Geräusche direkt aus der Oberflächentextur zu errechnen. Vergleichbare Ergebnisse wurden ebenfalls für andere Deckschichten abgeleitet. Abbildung 4 zeigt die errechneten Geräuschpegel mithilfe eines statistischen Modells verglichen mit den gemessenen CPX-Indizes mit dem Reifen P1 auf einem AC 5 D LOA.



**Abbildung 4:** Errechnete Geräuschpegel mithilfe eines statistischen Modells verglichen mit gemessenen CPX-Indizes mit dem Reifen P1 auf einem AC 5 D LOA.

### Abschließendes Fazit

Die technischen Möglichkeiten haben in den letzten 20 Jahren stark zugenommen, sodass man Messsysteme in Bezug auf Effizienz, Qualität und Sicherheit verbessern konnte. Insbesondere der Anstieg der Rechenleistung erlaubte es, aufwendigere und integriertere Messsysteme und Echtzeit-Beurteilungen von gemessenen Daten zu ermöglichen.

Während der Entwicklung der Messsysteme erfolgten sowohl kontinuierliche Verbesserung als auch grundlegende Neugestaltungen. In einigen Fällen hat sich auch das

Messprinzip geändert, z. B. von Punktmessungen zu kontinuierlichen Messungen oder von beobachteten Messungen zu autonomen Messungen.

Oft kann die Änderung eines Messprinzips im Sinne einer Norm stattfinden. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass Normen immer nur die technische Historie der letzten Jahre abbilden kann und man bei Weiterentwicklungen deshalb immer auch über den beschriebenen Umfang von Normen blicken sollte.

Moderne Beurteilungsmethoden wie Mustererkennung werden bereits in einigen Auswerteschritten genutzt. Das ermöglicht eine Steigerung der Objektivität der Messsysteme (z. B. für Fahrzeugcharakterisierung in SPB-Messungen). In Zukunft werden zur Beurteilung von Daten weitere moderne Algorithmen und technische Konzepte genutzt wie beispielsweise machine learning und künstliche Intelligenz.

### Literatur

- [1] D. Hanebuth: Rethinking Kaizen. An empirical approach to the employee perspective. In: J. Felfe (Hrsg.): Organizational Development and Leadership. Peter Lang, Frankfurt am Main 2002, S. 59–85 (Wirtschaftspsychologie 11), ISBN 3-631-38624-9.
- [2] Claudia Kostka, Sebastian Kostka: *Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess. Methoden des KVP (= Pocket Power. Band 22)*. 3., völlig neubearbeitete Auflage. Hanser, München 2006, ISBN 3-446-40736-7.
- [3] ISO 11819-1: Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1: Statistical pass-by method (ISO 11819-1:1997)
- [4] M. Männel, W. Bartolomaeus, A. Attenberger: Zusätzliche Anforderungen an Statistische Vorbeifahrermessungen. Fortschritte der Akustik –DAGA 2015 (Nürnberg 2015) Bad Honnef: DPG-GmbH, 2015
- [5] A. Fuchs, M. Conter, R. Wehr, M. Hagmüller, H. Pessentheiner: Anwendung von Beamforming für Vorbeifahrermessungen. Fortschritte der Akustik –DAGA 2015 (Nürnberg 2015) Bad Honnef: DPG-GmbH, 2015
- [6] F. Celanz, A. O. di Tommaso, G. Vassallo: Maxwell's Equations and Occam's Razor. Journal of Condensed Matter Nuclear Science 25 (2017), 1-29.
- [7] M. Ertsey, M. Männel, H. Fastl: Zur autonomen Messung von Vorbeifahrergeräuschen Fortschritte der Akustik –DAGA 2016 (Aachen 2016) Bad Honnef: DPG-GmbH, 2016
- [8] Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 1: Determination of mean profile depth (ISO/DIS 13473-1:2017)
- [9] Acoustics - Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres (ISO 10844: 2016)
- [10] C. Hoever: A model for investigating the influence of road surface texture and tyre tread pattern on rolling resistance. Journal of Sound and Vibration 351:161-176, June 2016
- [11] R. Wehr, M. Haider, M. Kriegisch: Forschungsprojekt OSILAWA - Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahngeräusch bei Betondecken. Fortschritte der Akustik –DAGA 2015 (Nürnberg 2015) Bad Honnef: DPG-GmbH, 2015