

# Die sensorbasierte Vermessung des Radverkehrs

## Analyse des Radverkehrs mit einem SensorBike mit ubiquitären Sensoren

Jochen Eckart,<sup>1</sup> Jule Merk<sup>2</sup>

**Abstract:** Vorgestellt wird ein Ansatz zur Erhebung des Radverkehrs mit Hilfe von ubiquitären Sensoren in Form eines SensorBikes. Ziel ist die Erfassung des Radverkehrs aus der Perspektive der Radfahrenden, um neue Ansätze zur Förderung des Radverkehrs zu gewinnen. Basierend auf ersten Erfahrungen aus Erhebungen mit dem SensorBike werden deren Anwendungsfälle sowie die Herausforderungen für die Datenerhebung und Auswertung dargestellt. Thematisiert werden die Möglichkeiten, aber auch Grenzen und Herausforderungen der Erhebung mit einem SensorBike.

**Keywords:** Fahrrad; Sensoren; SensorBike; Anwendungsbereiche; Abstand; Erschütterungen; Leistungsmessung

## 1 Der Bedarf nach einem Perspektivwechsel

Radverkehr ist ein wichtiger Verkehrsträger der Zukunft. Radfahren vereint persönliche (aktive Mobilität, körperliche Fitness) und gesellschaftliche (emissionsfrei, leistungsfähig, flächensparsam, stadtverträglich) Vorteile für eine zukunftsfähige und nachhaltige Mobilität in Stadt und auf dem Land. Die Förderung des Radverkehrs basiert bisher häufig auf der Prämisse „was denken Planer, was die Radfahrenden brauchen“. Um den Radverkehr fortzuentwickeln erscheint ein Verständnis davon „was Radfahrende wirklich brauchen“ erforderlich. Um den zunehmenden Handlungsbedarf für den Radverkehr in den Bereichen Verkehrssicherheit, Leistungsfähigkeit und Komfort zu bewältigen, ist verstärkt die radfahrerzentrierte Perspektive zu berücksichtigen. Die bestehenden Erhebungsinstrumente zum Radverkehr in Form von Nutzerbefragungen, Unfallanalysen oder die Analyse lokaler Verkehrssituationen sind dafür nicht ausreichend. Um eine radfahrerzentrierte Perspektive zu schaffen, sind digitale Tools zur Erfassung der Daten der Radfahrenden einzusetzen und die gewonnenen Informationen für Planungsprozesse nutzbar zu machen. Dabei werden die Daten der Radfahrenden während der Fahrradfahrt selbst mit Hilfe von ubiquitären Sensoren erfasst und für die Förderung des Radverkehrs nutzbar gemacht. Die sensorgestützten Studien ermöglichen die Untersuchung einer radfahrerspezifischen Perspektive, die sowohl

---

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, Studiengang Verkehrssystemmanagement, Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe, jochen.eckart@hs-karlsruhe.de

<sup>2</sup> Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, Studiengang Verkehrssystemmanagement, Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe, jule.merk@hs-karlsruhe.de

den Radfahrer als Nutzer, sowie die genutzte Fahrradinfrastruktur in das Zentrum der Untersuchung rückt. Ziel ist neue Potenziale rund um schnelleres, sicheres, komfortableres und kraftsparendes Radfahren zu schaffen.

## 2 Entwicklung der sensorgestützten Forschung im Radverkehr

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Verkehrsteilnehmer „Radfahrer“ erfolgt bereits seit mehreren Jahrzehnten (vgl. [MM90] und [Kn95]). Dabei kamen zunächst insbesondere beobachtende Studien wie Nutzerbefragungen, Unfallanalysen oder Analysen lokaler Verkehrssituationen zum Einsatz. Die Entwicklung von sensorgestützten Erhebungen des Radverkehrs erfolgt erst in den letzten Jahren im größeren Umfang. Ansätze zur Erhebung des Radverkehrs mit Hilfe von Sensoren wurden u.a. in Kampagnen und Vorhaben in Berlin [Ta18], Köln [Be19] oder Dresden [BS19] eingesetzt.

Diese Entwicklung ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass Sensoren zunehmend günstiger und ubiquitär verfügbar werden. Zudem hat sich die Qualität der Sensoren deutlich gesteigert, was die Daten zuverlässiger für den Einsatz in Forschung und Planungspraxis macht. Zusätzlich ist die Handhabung der Sensoren deutlich einfacher geworden, so dass auch Akteure außerhalb der Informatik und Messtechnik diese nutzen können.

Dabei kann auf verschiedene, bereits im Massenmarkt vertretene Sensoren und Anwendungen zurückgegriffen werden. So sind z. B. die aus dem Freizeit- und Sportbereich stammenden Sensoren, wie Fahrradcomputer und Fitness-Apps preisgünstig und ausgereift und können auch für weitere Einsatzzwecke zur Messung des Radverkehrs umgenutzt werden [EH19]. Viele Erhebungsprojekte konzentrieren sich auf Sensorik die in handelsüblichen Smartphones eingebaut sind (insbesondere GPS sowie Erschütterungs- und Beschleunigungssensoren) [Vi20]. Für zahlreiche relevante Fragen wie z. B. die Überholabstände und –geschwindigkeiten werden jedoch weitere Sensoren benötigt. Weiterhin werden aber auch basierend auf günstigen Elektronikbausätzen wie z. B. Arduino eigene Sensorsysteme entwickelt.

Die im Radverkehr angewandten Messmethoden lassen sich in zwei Typologien unterteilen. Zum einen klassische Labor- und Feldversuche mit Radfahrenden, in kleinen Stichprobengrößen. Zum anderen werden im Rahmen von partizipativer Forschung und mit Hilfe von Crowd-Sensing Ansätzen auch Untersuchungen mit deutlich größeren Teilnehmerzahlen durchgeführt. Dies basiert häufig auf Kampagnen zur Messung des Radverkehrs durch Initiativen in den Kommunen oder durch kommerzielle Consulting Firmen (z. B. bikecizen [Bi20]).

Die Beobachtung dieser Messprojekte zeigt, dass die Ergebnisse der Messungen vielfach eher zurückhaltend in der Planungspraxis der Radverkehrsförderungen aufgegriffen werden. Die Daten und Informationen aus den bisherigen Messprojekten sind aufgrund ihrer Art und Struktur vielfach nicht leicht genug nutzbar. Der Mehrwert der erhobenen Daten ist für

die Akteure aus der Planungspraxis im Vergleich zum Erhebungsaufwand nicht ausreichend. Es stellt sich daher die Frage, wie die erhobenen Daten anschlussfähig an die Prozesse der Radverkehrsförderung gemacht werden können. Zudem ist zu verdeutlichen, welche neuen Möglichkeiten zur Förderung des Radverkehrs durch die Vermessung der Radfahrenden geschaffen werden.

Darüber hinaus bestehen teilweise noch praktische Herausforderungen bei der Sammlung, Aggregation und Auswertung der Messdaten. Es stellt sich die Frage, wie eine leicht verständliche und schnelle Handhabung der erhobenen Daten durch die Akteure aus der Praxis gewährleistet werden kann. Zudem stellen sich Herausforderungen bei der Skalierung dieser sensorbasierten Messungen des Radverkehrs, um eine umfassende Anwendung in der Praxis zu ermöglichen.

### 3 Das SensorBike der Hochschule Karlsruhe

Um den Einsatzbereich der Messung des Radverkehrs mit Sensoren zu erweitern, wurde an der Hochschule Karlsruhe ein SensorBike entwickelt. Das SensorBike ist ein Messfahrrad, welches als Untersuchungsinstrumentarium für die angewandte Forschung im Radverkehr entwickelt wurde. Es basiert auf einem handelsüblichen Trekkingrad, welches durch den Trapezrahmen und die geringe Rahmenhöhe für beide Geschlechter nutzbar ist. Durch den Anbau von diversen Sensoren (Tab. 1) kann eine Vielzahl an Daten zeitgleich erhoben und in der Analyse miteinander verknüpft werden. Die Sensoren und Anwendungsbereiche des SensorBikes umfassen die Einflussgrößen für den Kraftaufwand, die Verkehrssicherheit sowie den Fahrkomfort der Radfahrenden. Die Einflussgrößen, die sich auf den Kraftbedarf beim Radfahren auswirken, wie Längsneigung, Windgeschwindigkeit, Fahrbahnoberfläche, Reifendruck, Gewicht etc. werden erfasst und dem Energieverbrauch der Radfahrenden sowie weiteren Vitalparametern wie Puls gegenübergestellt. Einflussgrößen, die sich auf den Fahrkomfort der Radfahrer auswirken, wie Witterung/Klima, Erschütterungen, Luftqualität, Lärmbelastung, Belichtung etc., bilden wichtige Einflussgrößen für die Verkehrsmittelwahl und Routenwahl der Radfahrenden. Die Erhebung der Einflussgrößen zur Verkehrssicherheit, wie Seitenabstände und Geschwindigkeit des umliegenden Verkehrs, Bremsbeschleunigungen, Verkehrskonflikte etc., ermöglichen neue Ansätze zur Bewertung der Verkehrssicherheit des Radverkehrs.

Tab. 1: Die verbauten Sensoren des SensorBikes.

Themenfeld	Sensor/Technologie	Anwendungsbereich
Sicherheit	Markierungstaste / Feedbacktaste und Zeitlogger	Markierung von positiven / negativen Stellen durch Radfahrenden
	Beschleunigungssensor	Kritische Brems- und Beschleunigungsvorgänge

Tab. 1: Die verbauten Sensoren des SensorBikes.

<b>Themenfeld</b>	<b>Sensor/Technologie</b>	<b>Anwendungsbereich</b>
	Erschütterungssensor	Fahrbahnbelag, Komfortgefühl der Radfahrenden
<b>Sicherheit</b>	Kamera vorne und hinten	Verkehrssituationen, Verkehrskonfliktanalyse, Sichtverhältnisse, Wetter, Beleuchtung, Umfeldanalyse, Fahrbahnoberflächen
	Entfernungsmesser	Seitenabstände zum überholenden Fahrzeug und zum Seitenraum
	Bremssensoren	Detektion für Berührung und Zug an Bremsen; Identifikation kritischer Bremsvorgänge
<b>Kraftaufwand</b>	Leistungsmesskurbel im Tretlager	Messung Energiebedarf zum Radfahren
	Körperfunktionssensoren	Messung von Herzfrequenz, Blutdruck, Hautleitfähigkeit, Hauttemperatur, Sauerstoffsättigung
	Fahrradcomputer	Geschwindigkeit, Trittfrequenz
	GPS	Routennachverfolgung inkl. Höhenprofil
<b>Komfort</b>	Thermometer, Hygrometer, Lichtsensor	Körperliches Wohlbefinden mit Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Beleuchtungsstärke, Windgeschwindigkeit
	Feinstaubmessgerät	Schadstoffbelastung Luft
	Schallpegelmesser	Umgebungsärm, Stress
	Beschleunigungssensor	Fahrbahnzustand (Beschaffenheit Oberfläche, Feuchtigkeit)
	Gyroskop	Schwankungen im Fahrrad, Kurvenfahrt
	Drucksensor	Luftdruck Fahrradreifen

Das SensorBike wurde unter Nutzung verschiedener Sensoren bereits in über 16 Projekten und Abschlussarbeiten an der Hochschule Karlsruhe eingesetzt. Im Folgenden werden die Erfahrungen aus diesen Projekten zu folgenden Fragen geteilt:

- Welche Users Cases bzw. Anwendungsbereiche für die sensorbasierten Messungen des Radverkehrs bestehen in der Praxis der Radverkehrsförderung?
- Welche praktischen Herausforderungen bestehen beim Skalieren, Sammeln, Aggregieren und Auswerten der Daten für die Vermessung des Radverkehrs?

## 4 Anwendungsbereiche für das SensorBike

Um die praktische Anwendung der sensorbasierten Messung des Radverkehrs zu unterstützen sind zunächst die Themenfelder zu identifizieren, in welchen die Messungen auch in der Praxis genutzt werden können. Um die Ergebnisse der Messungen möglichst praxisrelevant zu gestalten, bietet sich eine Orientierung an den Aufgaben der kommunalen Radverkehrsförderung und –planung an.

### 4.1 Gesamtkonzepte Fahrradförderung

In der Praxis hat sich die Strategie der „Radverkehrsförderung mit System“ bewährt, die am Gesamtsystem Fahrrad mit den Elementen technische Infrastruktur, digitale Infrastruktur, Serviceleistungen für den Radverkehr sowie die Fahrradkultur ansetzt, wie am Beispiel der Stadt Karlsruhe [St13] ersichtlich. Diese ganzheitlichen Konzepte haben in zahlreichen Kommunen zur umfassenden Steigerung des Radfahranteils geführt.

Die Daten aus einer sensorbasierten Erhebung des Radverkehrs können zur Entwicklung oder Fortschreibung von Gesamtkonzepten zur Fahrradförderung z. B. im Rahmen von Verkehrsentwicklungsplänen eingesetzt werden. Die Ergebnisse zur sensorbasierten Erhebung des Radverkehrs können als Ergänzung zu etablierten Instrumenten wie dem ADFC Fahrradklimatest [Ad20] oder dem ByPad-Verfahren [By20] dienen. So können durch die Sensoren Potenziale erschlossen werden, um das Radfahren schneller, komfortabler und sicherer zu machen und damit das Fahrrad in Konkurrenz mit anderen Verkehrsmitteln zu stärken. Die sensorbasierten Daten können die Radverkehrsförderung dabei unterstützen, weg von der verinselten Betrachtung einzelner Situationen, hin zu einer ganzheitlichen Betrachtung gesamter Routen oder Gebiete zu kommen. Die Daten aus einer sensorbasierten Erhebung des Radverkehrs stehen flächendeckend zur Verfügung und erzeugen damit ein zuvor nicht vorhandenes Gesamtbild einer Kommune. Dies zeigte sich in einem Projekt in Wiesbaden (vgl. [Sc14] und [Ju14]), bei welchem die abgefahrenen Routen aller Radfahrenden übereinandergelegt wurden. Das Ergebnis ist eine vollständige Straßenkarte von Wiesbaden. Auch die in Kampagnen von bikecitizen [Bi20] erhobenen GPS-Daten des Radverkehrs (Route, Geschwindigkeit, Verzögerungen etc.) erlauben eine Gesamtbetrachtung ganzer Städte. Die sensorbasierten Messungen des Radverkehrs ermöglichen eine langfristige Erfassung. So kann eine Erhebung zur Langzeitwirkung von innovativen Maßnahmen zur Förderung des Radverkehrs durch einen Vorher-Nachher-Vergleich erfolgen. Die bisher meist nur qualitativ vorliegenden Größen zum Komfort, Kraftbedarf und Geschwindigkeit

der Radfahrenden können durch Sensoren umfassender erhoben und quantifiziert werden. Durch die Quantifizierung werden die Informationen besser handhabbar für Entscheidungs- und Planungsprozesse gemacht. Im Ergebnis können die Daten eine Priorisierung von Maßnahmen im kommunalen Planungsprozess unterstützen. Dies hilft in der Breite die Qualität der Planung zu steigern.

Für den Einsatz sensorbasierter Messungen zur Entwicklung von Gesamtkonzepten für den Radverkehr ist der passende Zeitpunkt entscheidend. Gesamtkonzepte zur Radverkehrsförderung werden in den Kommunen nur selten (alle 10-15 Jahre) aufgestellt. Damit sind die Zeitfenster begrenzt, in denen die Kommunen die beschriebenen, umfassenden sensorbasierten Daten für die Aufstellung von Gesamtkonzepten benötigen. Entsprechend sind realisierte Anwendungsfälle des Einsatzes von Sensordaten bei Gesamtkonzepten der Radverkehrsförderung bisher eher selten.

## 4.2 Partizipation der Nutzer

Konzepte zur Förderung des Radverkehrs werden meist durch eine umfassende Beteiligung der Radfahrenden sowie der Öffentlichkeit begleitet. Dies ermöglicht die Belange der Radfahrenden in die Planungsprozesse einzubringen und insgesamt die Qualität der Radverkehrskonzepte zu steigern. In vielen Partizipationsprozessen ist jedoch zu beobachten, dass die Beteiligung nicht repräsentativ ist und einzelne organisierte Interessengruppen ein hohes Gewicht in den Diskussionsprozessen besitzen. Eine sensorbasierte Erhebung des Radverkehrs mittels Crowd-Sensing kann helfen zu gewährleisten, dass Partizipation nicht von wenigen Aktiven bestimmt wird, sondern dass alle Radfahrenden repräsentativ eingebunden werden können.

Die sensorbasierte Partizipation der Radfahrenden kann eine wichtige Rolle für das Fahrradklima spielen. Damit wird den Radfahrenden ermöglicht, eine direkte Rückmeldung an die professionellen Planer zu geben. Die täglichen Erfahrungen der Radfahrenden werden aufgezeichnet, dokumentiert und für die Partizipationsprozesse nutzbar gemacht. Die Messung aus Sicht der Radfahrer kann helfen, die häufig sehr emotionale Diskussion zum Radverkehr zu objektivieren bzw. bisher nur qualitativ beschriebene Eigenschaften zu quantifizieren. Die durch die Sensoren empirisch erhobenen Präferenzen der teilnehmenden Radfahrenden erhalten im Vergleich zu den individuellen Einschätzungen einzelner Akteure mehr Gewicht in den Partizipationsprozessen. Neben Sensoren ermöglichen Feedbackinstrumente (Feedbacktasten, Apps für Rückmeldungen etc.), dass die Radfahrenden eigenständig vor Ort mit geringem Aufwand positive oder negative Rückmeldungen geben können, ähnlich wie im Projekt GO Karlsruhe [Hä19] für die Zielgruppe Fußgänger.

Zahlreiche bisherige Projekte zur sensorbasierten Partizipation der Radfahrenden wie Kampagnen in Berlin [Ta18] oder Köln [Be19] sind von einzelnen engagierten Akteure die ein hohes Organisationsvermögen sowie technische Kompetenz haben abhängig. Daher sind sensorbasierte Erhebungsinstrumente erforderlich, die ein einfaches Participatory

Sensing ermöglichen. Für den Einsatz bei lokalen Messkampagnen muss das System auf Gruppen mit größeren Teilnehmerzahlen ausgelegt sein. Von Vorteil beim Participatory Sensing ist, dass die Radfahrenden sich durch den „Mitmach-Charakter“ eingebunden und mitgenommen fühlt. Eine weitere Anforderung ist, dass die gewonnenen Daten mit vergleichsweise geringem Aufwand grafisch gut aufbereitet und präsentiert werden können, damit diese für die breite Bevölkerung verständlich sind. In diesem Fall ein bestehender Bedarf aus Sicht der Praxis der Radverkehrsförderung für den Einsatz von Sensoren am Fahrrad.

### 4.3 Fahrradrouten und Radroutennetze

Die Entwicklung der baulichen Radverkehrsinfrastruktur (Radwege, Radfahrstreifen, Schutzstreifen, Fahrradstraßen, fahrradgerechte Knotenpunkte etc.) hat sich als ein Kernelement der Radverkehrsförderung bewährt. Dabei ist wichtig, das Augenmerk auf ein durchgängiges Gesamtnetz zu richten, nicht nur auf einzelne Streckenabschnitte. Nur wenn das vorhandene Radverkehrsnetz attraktiv gestaltet ist, kann die Radverkehrsförderung die volle Wirkung entfalten. Im Vordergrund steht die Frage, wie für Radfahrende attraktive und komfortable Routen identifiziert und definiert werden können. Der Einsatz von Sensoren kann sowohl bei der Neuplanung der Radverkehrsinfrastruktur, als auch der Aufwertung bestehender Radrouten erfolgen.

Sensorbasierte Erhebungen können die Entwicklung und Verbesserung von Radroutennetzen (hierarchisches Routennetz für verschiedene Nutzergruppen, Fahrradwegweisung etc.) oder einzelnen Radrouten (Schnellradwege, Stadtteilverbindungsrouen etc.) unterstützen und verbessern. Zum einem kann dafür aufgezeichnet werden, welche Routen die Radfahrenden gegenwärtig nutzen und welche Eigenschaften die bisher von den Radfahrenden präferierten Routen besitzen. Zum anderen bietet sich ein Vergleich verschiedener Routenalternativen an. Mit Hilfe einer integrierten Leistungsmessung am Fahrrad lässt sich ermitteln, welche Routen am leichtesten zu befahren sind. Zudem ist zu analysieren, wie hoch das Geschwindigkeitsniveau der Radfahrenden ist und wo es zu Zeitverlusten durch häufige und lange Wartezeiten bzw. vermeidbare Haltevorgänge kommt. Mit Hilfe des Erschütterungssensors können Unebenheiten im Belag verortet werden. Darüber hinaus sind Sensoren zur Klimamessung (Temperatur, Luftfeuchte, Beleuchtungsstärke) eine wichtige Ergänzung, um die Messungen in den richtigen Kontext einzuordnen. Schall- und Feinstaubsensoren zeigen die Belastung des Radfahrers durch Umwelteinflüsse. Auch eine Messung des subjektiven Stresses des einzelnen Radfahrenden ist denkbar, um kritische Stellen in der Infrastruktur zu finden und von Radfahrenden präferierte Routen zu identifizieren.

Erste Projekte von Röder [Rö20] und Hauenstein [Ha20] zur Entwicklung und Verbesserung von Fahrradrouen zeigen ein großes Potenzial für sensorbasierte Erhebungen. Im Rahmen dieser Projekte wurden für die geplante Verbindung zwischen zwei Orten jeweils verschiedene Routenalternativen mit SensorBikes erfasst. Im Vordergrund standen dabei Faktoren wie Geschwindigkeit, Reisezeit, Leistungsbedarf, Erschütterungen oder Bremsvorgänge.

Es wurden Daten zum objektiven Vergleich der Routenalternativen aus Perspektive der Radfahrenden erhoben. Dabei konnten auch Verbesserungsvorschläge zur Optimierung der Routen abgeleitet und quantifiziert werden. Mit vergleichbar geringem Erhebungsaufwand konnten durch die sensorbasierte Erhebung zusätzliche Informationen zur Planung von Radrouten gewonnen werden. In diesem Anwendungsfeld besteht auch zukünftig eine Nachfrage in der Praxis der Radverkehrsförderung.

#### **4.4 Verkehrssicherheitsarbeit**

Die Verkehrssicherheit ist ein wichtiger Schlüssel für die Förderung des Radverkehrs. Insbesondere Gelegenheitsradfahrer sowie potentielle neue Radfahrer nennen die Verkehrssicherheit als ein wesentliches Kriterium zur Nutzung bzw. Nichtnutzung des Fahrrades. Nur wenn sich diese auf dem Fahrrad sicher fühlen, werden Sie dies auch als Verkehrsmittel nutzen. Die Verkehrssicherheitsarbeit ist damit wesentlicher Bestandteil zahlreicher Konzepte zur Radverkehrsförderung sowie Kriterium bei der Planung der Radverkehrsinfrastruktur.

Sensorbasierte Erhebungen auf dem Fahrrad können die Verkehrssicherheitsarbeit durch zusätzliche Informationen unterstützen. Die Erhebungen eignen sich besonders für die vorsorgende Verkehrssicherheitsanalyse, bei der Bereiche mit negativen Einflüssen identifiziert werden, bevor es zu Unfällen kommt. Für die Analyse der Verkehrssicherheit bieten sich verschiedene Sensoren an. So können Sensoren die Bremsbeschleunigung sowie die Betätigung der Bremsen erfassen. Situationen mit vielen plötzlichen und starken Bremsvorgängen oder Ausweichmanövern von Radfahrenden deuten auf sicherheitsrelevante Konflikte hin. Zudem bietet sich die Messung des Abstandes zu überholenden oder parkenden Fahrzeugen an, um Konflikte zu erkennen. Darüber hinaus können Radfahrende durch eine Feedbacktaste melden, wann und wo sie sich gefährdet fühlen, wodurch sich diese in Ihrer Einschätzung ernst genommen fühlen. Weiterhin bieten sich Videoaufzeichnungen vorne und hinten an, um mögliche Verkehrskonflikte (Beinahe-Unfälle) zu erfassen. Durch die Erhebung von Konflikten im Radverkehr wird die Verkehrssicherheitsarbeit um Informationen erweitert, die über die Betrachtung der eher schlecht dokumentierten Unfälle mit Radfahrerbeteiligung hinausgehen. Die Messungen des Stresses von Radfahrenden (über Hautleitfähigkeit und Hauttemperatur) ermöglicht zudem das subjektive Sicherheitsgefühl zu erfassen. Die Ergebnisse der sensorbasierten Messung können helfen, Handlungsschwerpunkte für die Verbesserung der Verkehrssicherheit zu definieren bzw. bei einzelnen Standorten die Ursachen der Verkehrskonflikte aus Sicht der Radfahrenden zu verstehen.

Die SensorBikes wurden bereits in verschiedenen Projekten erfolgreich für einzelne Fragen der Verkehrssicherheitsarbeit eingesetzt. Die Untersuchungen ermöglichten aktuell diskutierte Fragen, wie objektive und subjektive Verkehrssicherheit von Schutzstreifen, oder die Mindestüberholabstände von Radfahrenden mit objektiv erhobenen Daten zu analysieren. Eine Studie zur subjektiven und objektiven Verkehrssicherheit konnte zeigen, dass auf einer Infrastruktur auf der Fahrbahn häufiger Stressmomente auftreten, als dies im Seitenraum der Fall ist, die subjektive Sicherheit jedoch auch vom Radfahrertyp abhängt [Me19]. Eine Studie

zum Bremsverhalten konnte helfen, kritische Standorte mit zahlreichen plötzlichen und kräftigen Bremsvorgängen, verursacht durch andere Verkehrsteilnehmer, zu identifizieren [Rö20]. Eine Studie zu Überholabständen auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen zeigte, dass der Abstand zwar bei 50 % der Überholvorgänge unter 1,5 m, jedoch nur bei 10 % unter 1 m liegen [We20] und damit die Diskussion versachlichen. Die Ergebnisse der Projekte zu aktuellen Fragestellungen weisen eindrücklich nach, dass der Einsatz von Sensoren in diesem Themengebiet gewinnbringend ist und auch für weitere Projekte der Bedarf besteht.

#### **4.5 Messung Umweltqualität**

Die Umweltqualität beim Radfahren, wie die Luftqualität und die Lärmbelastung, tragen mit zum Komfort der Radfahrenden bei und sind damit ein weiteres Kriterium bei der Verkehrsmittelwahl. Zudem wird der Beitrag des Radverkehrs zur Förderung einer umweltfreundlichen Mobilität berücksichtigt.

Sensorbasierte Messungen werden genutzt, um zu analysieren, welchen Belastungen Radfahrende ausgesetzt sind. Zudem können Fahrräder als mobile Messstationen für die Erfassung der Umweltqualität dienen. Die Fahrräder können helfen, lineare oder auch flächenhafte Umweltbelastungen zu messen. Insbesondere bei Messungen, welche nicht durch den Einfluss eines Kfz beeinträchtigt werden sollen, bieten sich Fahrräder als „Sensorträger“ an. Denkbare Anwendungen für das Sensorbike sind die Erfassung des Stadtklimas, Erhebungen für den Naturschutz oder die Messung der Luftschadstoffbelastung.

Eine Fragestellung aus der Praxis der Radverkehrsförderung ist die Belastung von Babys durch Luftschadstoffe bei der Mitnahme auf dem Fahrrad bzw. im Fahrradanhänger. In der Studie wurde die Luftschadstoffbelastung von Babys bei der Mitnahme im Auto sowie dem Fahrrad verglichen und Maßnahmen zur Reduzierung der Belastungen aufgezeigt [SPK20]. Damit können Unsicherheiten junger Eltern reduziert werden. Die Messung der Umweltqualität durch Radfahrende ist als Fachthema durchaus gefragt und bietet vielfältige Anwendungsfelder für sensorbasierte Messungen. Allerdings ist die Einbindung in die kommunale Praxis der Radverkehrsförderung nur eingeschränkt möglich.

#### **4.6 Zustandserfassung und Bewertung von Radverkehrsanlagen**

Für den Komfort und den benötigten Kraftaufwand der Radfahrenden ist der Zustand der Fahrbahnoberfläche wichtig. Ungenügend unterhaltene Fahrbahnoberflächen zählen zu den häufigsten Meldungen von Radfahrenden an die Kommunen. Zudem haben die Straßenbaulastträger Interesse die Radverkehrsinfrastruktur systematisch zu erheben und zu erhalten.

Sensorbasierte Erhebungen durch das Fahrrad können die Zustandserfassung und Bewertung von Radverkehrsanlagen unterstützen. So findet die Zustandserfassung und Bewertung der

Radverkehrsanlagen bisher meist durch die Befahrung mit Kraftfahrzeugen statt, welche mit Kameras sowie Ebenheitsmessern ausgestattet sind. Jedoch sind nicht alle Wege mit den Testfahrzeugen befahrbar. Zudem besteht die Befürchtung von Radfahrenden, dass Ihre Perspektive durch die Messung mittels eines Kfz nicht angemessen berücksichtigt wird. Durch die sensorbasierten Erhebungen beim Radfahren kann der Zustand der Fahrbahnoberfläche mittels eines Erschütterungssensors und Kameraaufnahmen der Fahrbahn erfasst werden. Die Ergebnisse können damit auch als Ergänzung zum offiziellen Verfahren dienen.

Projekte mit dem SensorBike zur Messung der Erschütterungen durch die Fahrbahn haben gezeigt, dass eine zuverlässige Erkennung verschiedener Belagsarten sowie Fahrbahnzustände möglich ist [Fu19]. In diesem Rahmen konnten auch die Befürchtungen junger Eltern zu den Erschütterungen von Babys bei der Mitnahme mit dem Fahrrad eingeordnet werden [AHV20]. Erste Modellprojekte für eine sensorbasierte Zustandserfassung und Bewertung mit dem Fahrrad wurden in Brandenburg bereits durchgeführt [La16]. Jedoch gibt es noch offene Fragen und Bedenken bei der Zustandserfassung durch Fahrräder. Beispielsweise stellen sich die Fragen, welche Erschütterungswerte für die Zustandsbewertung relevant sind oder wie sich das Fahrverhalten und die Fahrtlinie der Radfahrenden auf die Ergebnisse auswirken. Für den Einsatz von sensorbasierten Messungen zur Erfassung des Fahrbahnzustandes müssen daher Standards entwickelt werden, um die hohen Qualitätsanforderungen der Straßenbaulastträger zu erfüllen und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Ein Bedarf aus der Praxis der Radverkehrsförderung für den Einsatz der sensorbasierten Zustandserfassung und Bewertung mit Hilfe von Fahrrädern besteht.

## **5 Herausforderungen für die sensorbasierte Messung des Radverkehrs und dessen Skalierung**

Eine ausreichende Teilnehmeranzahl ist für belastbare Ergebnisse von Studien von äußerster Wichtigkeit. Einige der vorgestellten Studien wurden als Vertiefungsstudien durchgeführt, um den gewählten Ansatz in der Messmethodik und dessen Umsetzbarkeit zu prüfen. In einem nächsten Schritt wird nun die Skalierung hin zu einem Crowd-Sensing Ansatz und die damit verbundenen Herausforderungen beim Sammeln, Aggregieren und Auswerten der Daten diskutiert.

Eine Herausforderung für die Umsetzung von Crowd-Sensing-Ansätzen ist die Gewinnung ausreichender Teilnehmerzahlen. Solche Messkampagnen sind nur in seltenen Fällen Selbstläufer mit hohen Teilnehmerzahlen. Die Möglichkeit zu einer guten Datengrundlage beizutragen ist selten eine ausreichende Motivation für die Teilnahme zahlreicher Nutzerinnen und Nutzer. In den meisten Fällen ist vielmehr erforderlich, die Crowd-Sensing-Ansätze in umfangreiche Kampagnen der Öffentlichkeitsarbeit einzubinden, um ausreichende Nutzerzahlen zu gewinnen. Zudem bietet sich der Einsatz von Multiplikatoren an. Der Aufwand für das Akquirieren der Teilnehmerinnen und Teilnehmer ist bei der Planung solcher Messungen zu berücksichtigen.

Das primäre Ziel der Skalierung ist die Einbindung möglichst vieler Teilnehmer und die zeitgleiche Einbeziehung mehrerer Standorte in eine Studie. Dabei sind auch eine hohe Datenqualität und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Durch die Erhöhung der Teilnehmerzahlen zeigt sich bei Crowd-Sensing-Studien zudem die Herausforderung des Umgangs mit großen Datenmengen. So liegen eine Vielzahl von Datenpunkten vor, die mit Hilfe von vorliegenden Orts- und Zeitangaben zu Aussagen für bestimmte Streckenabschnitte bzw. Zeiträume aggregiert werden müssen. Die Daten der verschiedenen Nutzer sind zusammenzuführen und zu verschneiden. Die aktuell noch sehr anspruchsvolle und zeitaufwendige Datenaufbereitung sollte in Zukunft mit interdisziplinärer Hilfe aus dem Bereich Informatik vereinfacht werden. Für das Datenmanagement erscheint daher die Entwicklung passgenauer Software sehr erstrebenswert. Diese sollte Funktionen zur automatischen Verschneidung der Daten sowie zur Fehlersuche aber auch zur Ausgabe von kumulierten Ergebnissen beinhalten. Dabei müssen die Instrumente für die Auswertung großer Datenmengen auch für technisch weniger versierte Nutzer verwendbar sein. Aus diesem Grund sollten die eingesetzten Modelle einfach, verständlich und transparent sein. So kann auch die Akzeptanz der Praxisakteure gegenüber den Ergebnissen deutlich erhöht werden und zu einer verbesserten Radverkehrsförderung beitragen.

Bei der Planung ist sehr genau abzuwägen, welche Daten und welcher Umfang von Daten für die Studie erforderlich sind. Dabei sollten die Daten bereits eine grundlegende Filterung erfahren, um die Datenqualität zu erhöhen. Zudem ist die Datenrate auf das, für den Messzweck erforderliche Minimum zu reduzieren, um die zu verarbeitende Datenmenge zu begrenzen.

Als eine Alternative zu Massendatenerhebungen mit hohen Teilnehmerzahlen bietet sich bei einigen Fragestellungen die Durchführung von Messkampagnen mit kleinen Teilnehmerzahlen und einem durchdachten Messdesign an. So konnte ein Teil der bisherigen Projekte aufgrund der aufwendigen Ausstattung und des hohen Betreuungsaufwandes nur in Vertiefungsstudien mit einer geringeren Anzahl von Probanden durchgeführt werden. Bei einigen Fragestellungen kann durch die Entwicklung von einfachen und duplizierbaren Sensorsystemen die Anzahl der Probanden erhöht werden. Andere Fragestellungen werden jedoch aufgrund der aufwendigen Ausstattung oder der Notwendigkeit der Kontrollierbarkeit der Rahmenbedingungen auch in Zukunft nur mit geringen Teilnehmerzahlen durchführen lassen.

Gerade auch Datenschutz und Datensicherheit spielen für das Crowd-Sensing beim Radverkehr eine wichtige Rolle. Vorgehensweisen und Erkenntnisse aus dem Datenschutz sind für die spezifischen Rahmenbedingungen weiterzuentwickeln. So sind technische Schutzmechanismen von Verschlüsselung bis Anonymisierung bzw. Pseudonymisierung vorzusehen.

## 6 Fazit

Die Aufzählung der möglichen Einsatzbereiche von sensorbasierten Messungen des Radverkehrs verdeutlicht, dass viele Ansätze bereits in Einzelstudien erprobt wurden. Die bisher erfolgversprechendsten Ansätze für die Unterstützung der Praxis der Radverkehrsförderung wurden dabei in klar umrissenen Anwendungsfeldern, wie der Zustandserfassung und Bewertung von Radverkehrsanlagen, der Verkehrssicherheitsarbeit oder der Planung von Radrouten erzielt. In diesen Fällen können die sensorbasierten Messungen helfen, bestehende Fragen der Radverkehrsförderung zu adressieren. Der Einsatz sensorbasierter Systeme bei generellen Fragestellungen wie der Entwicklung übergeordneter Radverkehrskonzepte steht bisher noch vor größeren Herausforderungen. Der Dialog zwischen den Akteuren der Radverkehrsförderungen sowie den Akteuren der Messkampagnen muss gestärkt werden. Die sensorbasierten Messungen des Radverkehrs sollten sich verstärkt an dem Informationsbedarf der Akteure der Radverkehrsförderung orientieren.

Wenn die genannten Herausforderungen gemeinsam mit den Akteuren aus dem Bereich der Informatik / Messtechnik sowie der Radverkehrsförderung gemeistert werden, bietet die sensorbasierte Messung des Radverkehrs große, bisher ungenutzte Potentiale zur Förderung des Radverkehrs.

## Literaturverzeichnis

- [Ad20] ADFC Fahrradklima-Test, <https://fahrradklima-test.adfc.de/>, Stand: 14.08.2020.
- [AHV20] Andriof, Benjamin; Haffelder, Silvio und Vonnieda, Leon: SensorBike: Radfahren mit Baby – Die Belastung von Babys durch Erschütterungen und Luftschadstoffen – Erschütterungen am Fahrrad und Auto. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Projekt von Studierenden 2020.
- [Be19] Beutelspacher, Klaus: Abstand Messen Köln. [www.abstand-messen-koeln.jimdofree.com/](http://www.abstand-messen-koeln.jimdofree.com/), Stand: 14.08.2020.
- [Bi20] bikecitizens, [www.bikecitizens.net/de/neues-datenanalysetool-fuer-die-radverkehrsplanung/](http://www.bikecitizens.net/de/neues-datenanalysetool-fuer-die-radverkehrsplanung/), Stand: 14.08.2020.
- [BS19] Becker, Udo; Schlag, Bernhard et al.: RadVerS - Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Verkehr - Differenzierung des Nutzerverhaltens unterschiedlicher RadfahrerInnengruppen. TU Dresden, 2019.
- [By20] BYPAD – Bicycle Policy Audit, [www.bypad.org/](http://www.bypad.org/), Stand: 14.08.2020.
- [EH19] Eichner, Rick und Hauenstein, Jan: Sensorbike – Erhebungsmethodik. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Projekt von Studierenden 2019.
- [Fu19] Furtado, Alexandre Thomaz: SensorBike: Evaluation of Bicycle Ride Comfort – According to ISO 2631-1. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Projekt von Studierenden 2019.

- [Ha20] Hauenstein, Jan: SensorBike: Radroutenplanung aus Sicht der Radfahrer – Am Beispiel Karlsruhe/Ettingen. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Bachelorthesis 2020.
- [Hä19] Häußler, Elke et al.: Den Fußverkehr in Städten fördern: Partizipative Forschung im Reallabor GO Karlsruhe. GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society, Band 28, Nummer 4, S. 396-397, 2019.
- [Ju14] Jung, Hendrik: Rad ohne Wege – Weiter Weg zur Fahrradstadt Wiesbaden. Sensor Wiesbaden, 01.05.2014, [www.sensor-wiesbaden.de/rad-ohne-wege-weiter-weg-zur-fahrradstadt-wiesbaden/](http://www.sensor-wiesbaden.de/rad-ohne-wege-weiter-weg-zur-fahrradstadt-wiesbaden/), Stand:15.08.2020.
- [Kn95] Knoflacher, Hermann: Fußgeher- und Fahrradverkehr: Planungsprinzipien. Böhlau Verlag, Wien, 1995.
- [La16] Land Brandenburg, Verkehrsministerium: Auftakt der Zustandserfassung von Radwegen. Pressemitteilung vom 29.08.2016, [www.mil.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.456982.de](http://www.mil.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.456982.de), Stand: 15.08.2020.
- [Me19] Merk, Jule: Vergleich der objektiven Verkehrssicherheit und des subjektiven Verkehrstresses bei Schutzstreifen und Radfahrstreifen im Vergleich zu eigenständigen Radwegen. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Masterthesis 2019.
- [MM90] Monheim, Heiner; Monheim-Dandorfer, Rita: Straßen für alle-Analysen und Konzepte zum Stadtverkehr der Zukunft. Hamburg, 1990.
- [Rö20] Röder, Annika: Optimierung und Vergleich regionaler Radrouten unter Einsatz des SensorBikes – am Streckenbeispiel Karlsruhe – Weingarten (Baden). Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Bachelorthesis 2020.
- [Sc14] Scholz&Volkmer GmbH: Radwende – Der Radweg ist das Ziel. Projekt 2014, [www.s-v.de/de/produkte/radwende/](http://www.s-v.de/de/produkte/radwende/), Stand:15.08.2020.
- [SPK20] Sommer, Anabelle; Prinzing, Benedikt und König, Björn: Abschlussbericht - Messung der Feinstaubbelastungen von Babys beim Radfahren und Autofahren. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Projekt von Studierenden 2020.
- [St13] Stadt Karlsruhe, Stadtplanungsamt: Radverkehr – 20-Punkte-Programm. Zwischenstand und Fortschreibung des 20-Punkte-Programms zur Förderung des Radverkehrs in Karlsruhe. 2013.
- [Ta18] Tagesspiegel Online: Radmesser: Die genaue Methode – Wie wurden die Überholabstände gemessen? [www.tagesspiegel.de/gesellschaft/medien/radmesser-die-genaue-methode-wie-wurden-die-ueberholabstaende-gemessen/23710682.html](http://www.tagesspiegel.de/gesellschaft/medien/radmesser-die-genaue-methode-wie-wurden-die-ueberholabstaende-gemessen/23710682.html), Stand: 14.08.2020.
- [Vi20] Vialytics GmbH, [www.vialytics.de/](http://www.vialytics.de/), Stand: 14.08.2020.
- [We20] Welz, Christoph: Erhebung und Analyse des Überholabstands vom motorisierten Individualverkehr zu Radverkehr auf Stadtstraßen – am Beispiel der Stadt Karlsruhe. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Bachelorthesis 2020.