

Daten- und modellbasierte Schätzung nicht messbarer Größen in der Fahrzeugtechnik an drei Beispielen

S. Ehlers*, H. Schäfke*, D. Bank*, B. Volkmann*, T. Seel*

* Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 1,
30823 Garbsen, Tel.: +49 1523 762-0565, E-Mail: simon.ehlers@imes.uni-hannover.de

Viele für Regelung und Betriebsstrategie von elektrifizierten und automatisierten Fahrzeugen nötige Größen lassen sich mit Seriensensorik nicht genau genug messen, und bessere Sensorik scheitert an den Kostenvorgaben. Aus der Messaufgabe wird eine Modellierungs- und Schätzaufgabe. In diesem Beitrag werden drei Arbeiten auf unterschiedlichen Zeitskalen vorgestellt: die Schätzung der Radgeschwindigkeit im Millisekundenbereich, das prädiktive Energiemanagement eines Kühlauflegers über Stunden und die Schätzung von Fahrbahnzuständen, die sich über lange Zeiträume fortschreiben und zwischen Fahrzeugen teilen lassen. In allen drei Fällen wird die gesuchte Größe aus Seriensignalen erschlossen, einmal rein datengetrieben, einmal hybrid, einmal physikalisch strukturiert.

Raddrehzahlsensoren in Serienfahrzeugen liefern teils nur 43 Inkremente je Umdrehung, also 4 bis 5 cm je Inkrement. Unterhalb von 3 km/h bestimmen Quantisierung und Latenz den Fehler, sodass etwa die Ruckdämpfung auf einem unzuverlässigen Signal aufsetzt. In Elektrofahrzeugen liegt die Motordrehzahl hoch aufgelöst vor, wird aber durch Torsion und Spiel im Triebstrang verfälscht. Beide Fehleranteile sind last- und geschwindigkeitsabhängig, was eine echtzeitfähige analytische Beschreibung der Dynamik erschwert. In [1] wird daher ein rein datengetriebener virtueller Radsensor auf Basis eines GRU-Netzes vorgestellt, der Rad- und Motordrehzahl mit Antriebs- und Bremsmoment fusioniert (Abbildung 1). Auf Messdaten eines Volkswagen ID.7 wird so eine deutliche Verbesserung der Schätzgüte erreicht bei gleichzeitiger Einhaltung der Anforderungen an die Recheneffizienz auf einem Serien-Steuergerät.

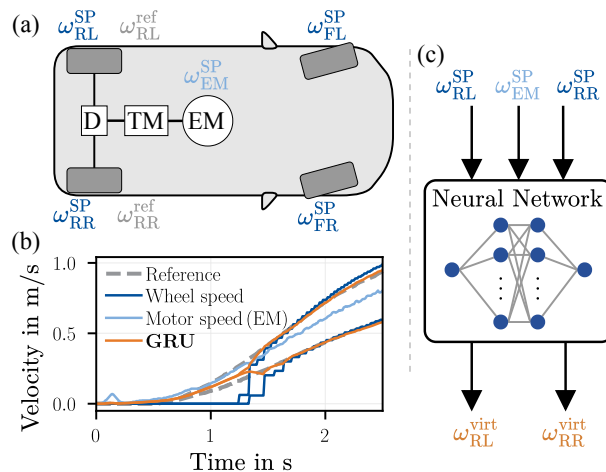


Abbildung 1: Virtueller Radsensor nach [1]: (a) verfügbare Drehzahlsignale, (b) Quantisierung und Torsionseinfluss bei kleinen Geschwindigkeiten, (c) GRU-Netzarchitektur.

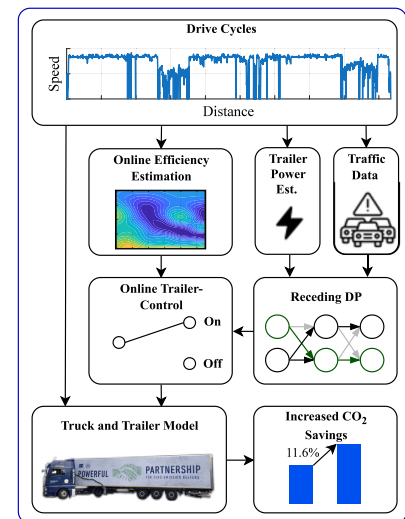


Abbildung 2: Prädiktives Energiemanagement nach [2]: Planer und Achsregler auf zwei Taktebenen.

Auf der Zeitskala von Stunden ersetzt eine batterieelektrische Kälteanlage mit Generatorachse den Hilfsdieselmotor des Kühlauflegers und erzeugt einen Zielkonflikt. Das zur Stromerzeugung nötige Schleppmoment kostet das Zugfahrzeug Kraftstoff, gleichzeitig muss die Batterie zur Sicherung der Kühltaste jederzeit ausreichend geladen sein. Da Streckenvorschau, Verkehrsfluss und Kühlbedarf nur ungenau bekannt sind, steht die Optimierung unter Prognoseunsicherheit. In [2] wird der Zielkonflikt zweistufig gelöst (Abbildung 2). Eine dynamische Programmierung mit gleitendem Horizont plant statt einer Ladezustandstrajektorie eine Schwelle für die Schleppeffizienz, also für das Verhältnis von erzeugter elektrischer Energie zu Mehrverbrauch. Diese Effizienz ist am Trailer nicht messbar. Ein physikalisches Fahrzeug- und Batteriemodell liefert die Datenbasis, ein Sparse Gaussian Process (SGP) schätzt sie online. Kalman-Filter prognostizieren Rekuperationspotenzial und Kühlbedarf, wobei letzterer die dynamische Untergrenze des Ladezustands festlegt. In 57 Betriebsstunden realer Transportfahrten sinken die CO₂-Emissionen gegenüber einer Zweipunktregelung im Mittel um 11,6 %, in NREL-Zyklen um 8,2 %.

Der witterungsbedingte Fahrbahnzustand entscheidet über den Bremsweg, zeigt sich im Fahrverhalten aber erst bei Schlupf. In [3] werden Fahrzeug- und Umgebungszustand deshalb in einem physikalisch strukturierten Bayes-Modell gemeinsam geschätzt. Die Umgebung ist eine Karte diskreter Fahrbahnabschnitte mit je einer Verteilung des maximalen Reibwerts. Ein Rao-Blackwell-Partikelfilter aktualisiert die Hyperparameter online, sodass die Information beim erneuten Befahren derselben Stelle wieder bereitsteht. In Notbremsungen auf drei Fahrbahntypen sinkt die Reibwertunsicherheit von Versuch zu Versuch. Der RMSE der Bremswegvorhersage fällt im Mittel um 4,95 %. Weil die Reibwertkarte ortsbezogen ist, lässt sie sich zwischen Fahrzeugen teilen. Im Ausblick geht es um Flotten, die ein Gebiet schneller erschließen und Reibwerte auch für nie befahrene Abschnitte prognostizieren. Für Nutzfahrzeuge liegt das nahe, da sie feste Routen wiederholt befahren. Dafür wären die aus Bordsensorik gewonnenen Schätzwerte [4] über Fahrzeugklassen hinweg zu normieren, eine Frage aus dem Projekt InFusion zur cloudbasierten Fahrbahnzustandsfusion.

Literatur

- [1] Schäfke, H. et al.: Neural Network-Based Virtual Wheel-Speed Sensor for Enhanced Low-Velocity State Estimation, IFAC-PapersOnLine, IFAC World Congress, 2026 (angenommen).
- [2] Bank, D. et al.: Decarbonizing Cold Chain Transport: Predictive Energy Management for Refrigerated Generator-Axle Trailers, Energy Conversion and Management: X, Vol. 31, 2026.
- [3] Volkmann, B. et al.: Joint Estimation of Vehicle States and Spatio-Temporal Tyre-Road Friction Using Sequential Monte Carlo, Vehicle System Dynamics, 2026.
- [4] Schäfke, H. et al.: Transformer Neural Networks for Maximum Friction Coefficient Estimation of Tire-Road Contact Using On-Board Vehicle Sensors, IEEE Conference on Decision and Control, 2023.