

Umsetzung einer prädiktiven Fahrstrategie durch radarbasierte Steigungserkennung in Traktoren

Stefan Traub, Markus Birk, Bastian Volpert, Manfred Auer

In diesem Beitrag wird eine Möglichkeit zur prädiktiven Anpassung der vorhandenen Fahrstrategie in einer Getriebesteuerung einer Landmaschine erläutert. Die Anpassung erfolgt über den Einsatz eines aktiven Sensors am Fahrzeug. Ein Radarsensor aus dem Automotive-Umfeld wird dazu am Fahrzeug angebracht und entsprechende Algorithmen zur Steigungserkennung über Radarrohdaten implementiert. Die Ergebnisse der Steigungsermittlung sendet die Recheneinheit an die Getriebesteuerung. So kann nun die Übersetzung des Getriebes vorausschauend an das zukünftige Gelände angepasst werden. Dadurch ist garantiert, dass für die jeweilige Steigung die optimale Übersetzung im Getriebe eingestellt ist, schon bevor das Fahrzeug in eine Steigung fährt.

Schlüsselwörter

Intelligente Fahrstrategie, Intelligente Übersetzungswahl, Steigungserkennung, Radarsensor

Bei Arbeitsmaschinen im Off-Highway-Bereich (hier am Beispiel Landmaschinen) wird die Fahrstrategie über regelbasierte Algorithmen vorgegeben. Diese erlauben es der Getriebesteuerung entsprechend der getriebeinternen Signale sowohl die korrekte Gang- oder Übersetzungswahl (Lastschalter oder stufenloses Getriebe) als auch die entsprechende Antriebsdrehzahl einzustellen. Durch die Anpassung der unterschiedlichen Parameter der Fahrstrategie wird die Performanz oder der Kraftstoffverbrauch entsprechend der Anforderung eingestellt. Dies lässt sich meist durch Bedieneingaben in einem gewissen Bereich beeinflussen. Somit hat der Fahrer die Möglichkeit den Fokus auf Performanz oder Senkung des Kraftstoffverbrauchs des Fahrzeugs selbst zu legen. Die Fahrstrategie über regelbasierte Algorithmen reagiert auf die aktuellen Umgebungsbedingungen über getriebeinterne und externe am Fahrzeug verfügbare Signale (Motordrehzahl, Motorlast, Abtriebsdrehzahl ...). Die Reaktion der Fahrstrategie auf sich schnell ändernde Umweltbedingungen, in diesem Fall Steigung, kommt verzögert.

Zur Vermeidung der Verzögerung des Fahrzeuges bei unvorhersehbaren Fahrereignissen (z.B. einer Steigung) bis in den Stillstand hinein, wird dem Fahrzeug über einen aktiven Umfeldsensor (z.B. Radar) eine Erfassung der Umwelt ermöglicht. Der Radar wird am höchsten Punkt des Fahrzeuges montiert, um die beste Erfassung des Umfelds zu garantieren. Seine Rohdaten werden von einem Hochleistungsrechner (HPC = High Performance Computer) ausgewertet (ZF FRIEDRICHSHAFEN AG o.J. c). Als Hochleistungsrechner wird hier eine Recheneinheit verstanden, die mehr Speicher und eine höhere Rechenleistung aufweist als ein übliches Getriebesteuergerät. Dieser HPC besitzt auch Schnittstellen (z.B. Automotive Ethernet) zum direkten Anschluss eines Sensors sowie eine CAN-Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Getriebesteuergerät. Auf dem HPC läuft ein Betriebs-

system, welches den Einsatz des Robot Operating Systems (ROS) erlaubt. Der HPC erhält zusätzlich vom Fahrzeug Informationen, die für eine Positionsschätzung notwendig sind. Die Algorithmen bestimmen den Abstand des Fahrzeuges zur Steigung und den Winkel. Wenn diese Daten ermittelt sind, werden sie über den Fahrzeugkommunikationsbus dem Getriebesteuergerät zur Verfügung gestellt. Mit diesen Informationen ist es nun möglich intelligent und bereits vor Einfahrt in die Steigung prädiktiv die Fahrstrategie entsprechend anzupassen. So wird immer die optimale Übersetzung für das zukünftige Gelände eingestellt. Bei Testfahrten wurde die Steigung korrekt erkannt und die entsprechende Reaktion der Getriebesteuerung auf die Steigungsfahrt im Fahrzeug umgesetzt. Die vorgestellte prädiktive Fahrstrategie ist universell einsetzbar und auch auf andere, abseits von öffentlichen Straßen fahrenden, mobilen Arbeitsmaschinen übertragbar.

Stand der Technik

Bei PKW und Nutzfahrzeugen kann das Fahrzeug über GPS und vorhandene Karten auf die vor ihm liegende Topografie reagieren. Entsprechende Algorithmen passen dann die jeweilige Fahrstrategie den aktuellen Umweltbedingungen an und helfen somit Kraftstoff zu sparen oder das Fahrzeug performanter zu betreiben (ZF Friedrichshafen AG o.J., b).

In Off-Highway-Umgebungen sind Karten selten verfügbar oder aber das Terrain ändert sich über die Zeit, z. B. auf einer Baustelle. Dadurch kann die Lösung über ein GPS-Signal mit Verknüpfung zu einer vorhandenen Karte nicht eingesetzt werden. Um diese Einschränkung zu umgehen, wird ein aktiver Sensor zur Umfelderkennung eingesetzt.

Beschreibung des Systemaufbaus

Zur intelligenten Anpassung der Fahrstrategie auf sich ändernde Umweltbedingungen sind unterschiedliche Hardware und Algorithmen untersucht worden. Zur Umsetzung des Systems wurde eine Landmaschine (Serienfahrzeug) mit prototypischer Hardware erweitert, um Steigungen mittels Radar vor dem Fahrzeug erkennen zu können. Der eingesetzte Radar wurde beim Einbau um 90° gedreht (Abbildung 1).



Abbildung 1: Radar montiert an Landmaschine (© ZF Friedrichshafen AG)

Vom Radar werden die Signale an einen Hochleistungsrechner übermittelt (Abbildung 2). Auf diesem HPC läuft ein eigens entwickelter Algorithmus zur Erkennung einer vor dem Fahrzeug liegenden Steigung. Zur Auswertung der Radarrohdaten wurde ein ROS-Framework eingesetzt.



Abbildung 2: Einbau des Systems in Landmaschine: HPC mit Display zur Darstellung der Steigungserkennung (© ZF Friedrichshafen AG)

Die Funktionsarchitektur erlaubt den Einsatz der entwickelten Algorithmen in bereits vorhandenen Fahrzeugsteuergeräten (Abbildung 3), wenn diese über die notwendigen Schnittstellen zu den Sensoren, zur Getriebesteuerung und genügend Ressourcen (Speicher, Laufzeit) zur Umsetzung der Algorithmen verfügen. Die beiden Blöcke mit den Algorithmen können auch in einem Steuergerät ausgeführt werden.

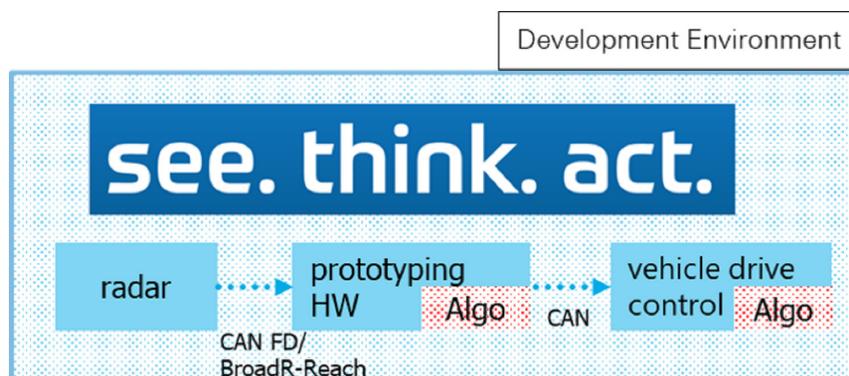


Abbildung 3: Einbettung der Algorithmen in die Entwicklungsumgebung (© ZF Friedrichshafen AG)

Radarbasierte Steigungserkennung – Funktionsbeschreibung

Bei der Umsetzung wurde ein Radarsensor zur Umfelderkennung gewählt. Damit der Umfeldsensor seine Aufgabe optimal erfüllen kann, muss zunächst eine Position für ihn ermittelt werden, die das Sichtfeld des Sensors möglichst wenig einschränkt. Da das Sichtfeld des Sensors durch Anbaugeräte beeinträchtigt werden kann, wurde dieser oberhalb der Frontscheibe der Kabine montiert (Abbildung 4).

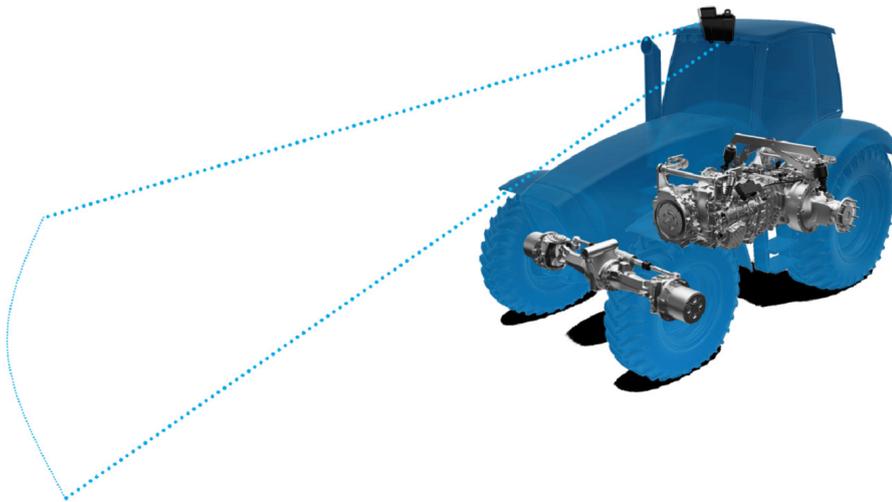


Abbildung 4: Montage von Radar an Landmaschine (© ZF Friedrichshafen AG)

Das Prinzip eines Radarsensors soll hier kurz erklärt werden: Der Radarsensor sendet elektromagnetische Wellen aus. Diese werden an Zielkörpern reflektiert und die reflektierte Welle wird wieder vom Radar empfangen. Radarwellen sind gerichtete Wellen und werden über Antennen ausgesendet und detektiert. Durch die Bestimmung der „Time of flight“ kann der Abstand des Zielkörpers zum Radar und über den Eintreffwinkel die Position ermittelt werden. Gleichzeitig kann über den Dopplereffekt auch eine Erfassung der Geschwindigkeit jedes Radarpunktes erfolgen (FRAUNHOFER IAF 2020, SPEKTRUM AKADEMISCHER VERLAG 1998).

Der Radarsensor hat in Azimut (horizontal) und Elevation (vertikal) eine unterschiedliche Auflösung (Abbildung 5). Darum ist die Einbaurichtung in diesem Fall entscheidend.

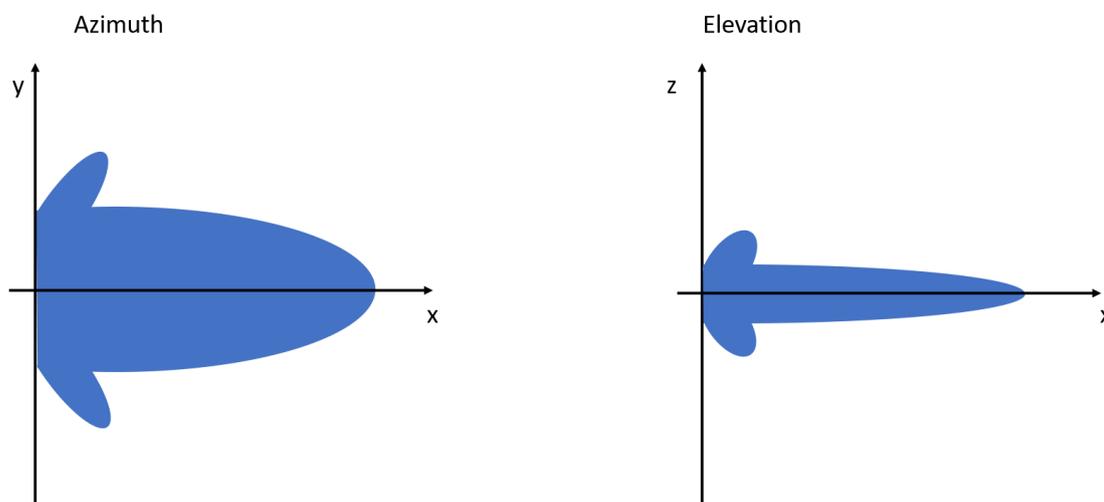


Abbildung 5: Radarkegel (schematische Darstellung) (© ZF Friedrichshafen AG)

Um eine bessere vertikale Auflösung zur Steigungserkennung zu bekommen, ist die Einheit wie bereits erwähnt um 90° gedreht gegenüber dem Einsatz im Automotive-Umfeld verbaut worden. Im Automobilbereich sollen üblicherweise horizontale Umfeldinformationen gewonnen werden, z. B. auf der Autobahn. Im Beispiel hier, abseits der Straße, sind allerdings die Umfeldinformationen in vertikaler Richtung von Interesse. Somit wird das größere Sichtfeld in Sensor-Azimut besser genutzt. Würde nur die Elevation-Auflösung ausgewertet, wäre das Sichtfeld sehr eingeschränkt und eine Steigungserkennung aufgrund von wenigen reflektierten Targets kaum möglich.

Für die prototypische Umsetzung der Steigungserkennung wurde ein HPC für die Berechnung der Algorithmen verwendet. Alle Algorithmen zur Steigungserkennung basieren auf den Rohdaten des Radarsensors. Diese Rohdaten werden an die Recheneinheit über BroadR-Reach übermittelt. Die Recheneinheit berechnet die vor der Landmaschine liegende Steigung und sendet die erkannten Werte (Abstand zur Steigung und Steigungswinkel) über den Fahrzeug-CAN an das Getriebesteuergerät. Vom Getriebesteuergerät erhält der Algorithmus im HPC die Fahrzeuggeschwindigkeit und den Lenkwinkel. Diese Informationen sind notwendig, um die Bewegung des Fahrzeuges zu schätzen.

Der Ablauf der Funktion ist wie folgt: Die Landmaschine fährt auf eine Steigung zu (Abbildung 6) (ZF FRIEDRICHSHAFEN AG o.J. b). Der Radarsensor scannt dabei kontinuierlich die vor dem Fahrzeug befindliche Strecke. Die berechneten Daten des HPC werden zyklisch über CAN an das Getriebesteuergerät gesendet. Dieses passt rechtzeitig vor einer Steigung die Fahrstrategie an. Diese Steigungserkennung führt dazu, dass, z.B. bei einem stufenlosen Getriebe, ab einem einstellbaren Abstand zur Steigung die Motordrehzahl des Antriebs erhöht und die Übersetzung im Getriebe angepasst wird, um die Leistungsreserve des Motors zu erhöhen. Bei Lastschaltern verhindert die Fahrstrategie eine ungünstige Hochschaltung vor der Steigung. Dadurch wird das Rückschalten in der Steigung vermieden und die Landmaschine kann die Steigung schneller überwinden. Je nach Fahrzustand kann auch rechtzeitig die Rückschaltung eingeleitet werden. Diese Vorausschau über die Umfeldsensorik ermöglicht es dem Antrieb intelligent und rechtzeitig auf die Änderungen im Umfeld zu reagieren.

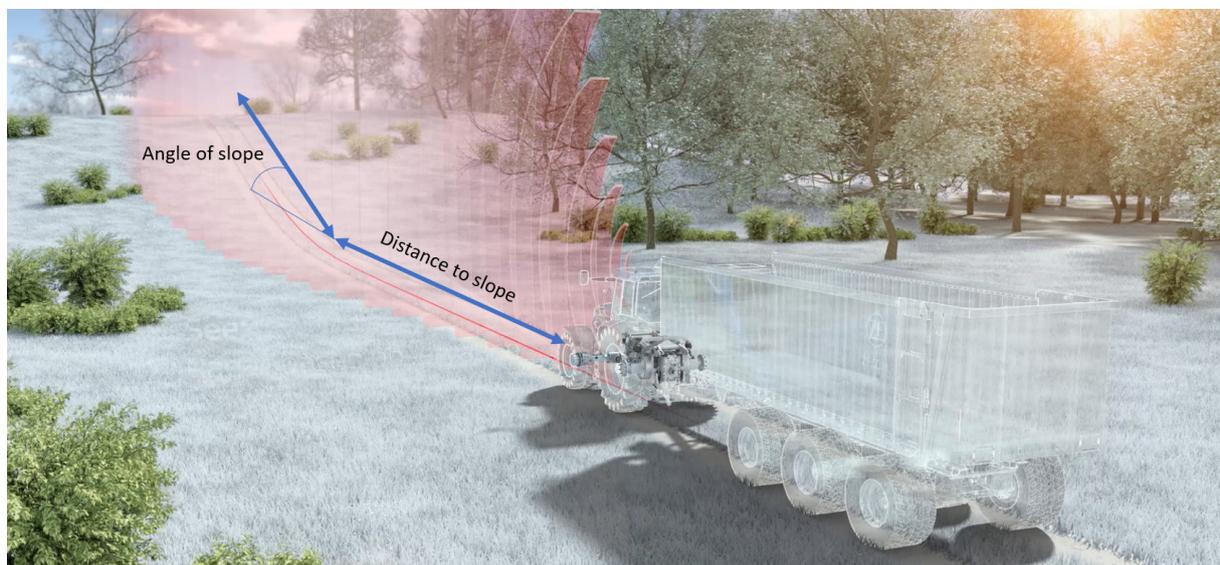


Abbildung 6: Landmaschine, Radarscan und Umgebung (© ZF Friedrichshafen AG)

SEE – THINK – ACT

Damit die Landmaschine eine Steigung erkennen kann (SEE), kommt der eingangs beschriebene Radarsensor zum Einsatz. Die ermittelten Daten des Radars werden im Rohformat übertragen. Um eine Steigung zu erkennen, müssen die empfangenen Daten zunächst in die richtige Reihenfolge gebracht werden. Dafür wird ein sogenanntes Belegtheitsgitter (Occupancy Grid) verwendet. Dieses zeigt die erfassten Daten im Abstand zum Radarsensor und in der entsprechenden vertikalen Höhe an.

Im THINK Teil der Kette werden die einzelnen Algorithmen angewandt, die für die Steigungserkennung notwendig sind. Abbildung 7 zeigt die funktionalen Bestandteile des THINK-Teils. Durch die extrinsische Kalibrierung werden die Position und die Orientierung des Radars zum Fahrzeug festgelegt. Das ist notwendig, um die Radardaten auch entsprechend auswerten und Abstände von Steigungen zum Radar (Fahrzeug) bestimmen zu können. Dies erfolgt in der Applikation.

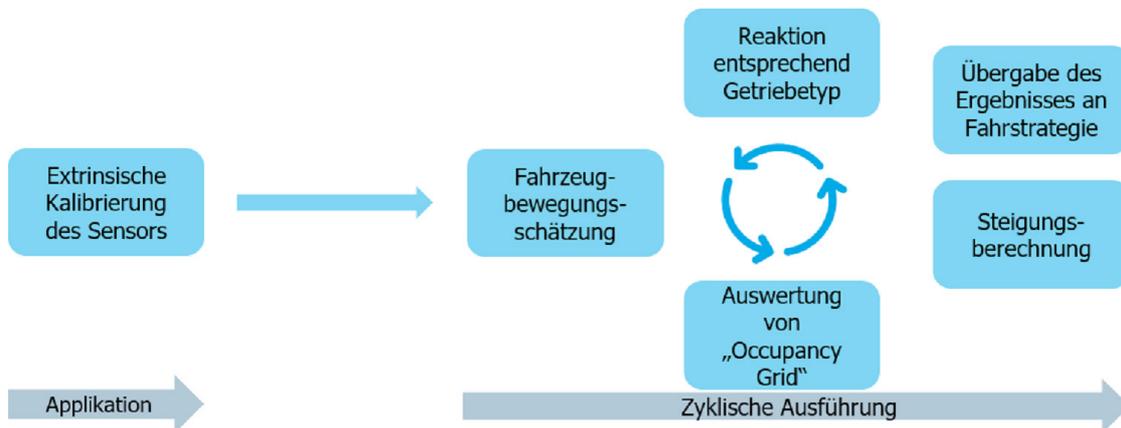


Abbildung 7: Darstellung der funktionalen Bestandteile des THINK-Teils (© ZF Friedrichshafen AG)

Abbildung 8 zeigt die erfassten Radardaten in einer ROS-Visualisierung. Hier wurde zur besseren Vergleichbarkeit der Messdaten zusätzlich das mit einer Kamera aufgezeichnete Video eingeblendet. Im zweiten Schritt ist die Schätzung der Fahrzeugbewegung notwendig. Diese wird über die Daten der Getriebesteuerung, Lenkwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet. So kann der zurückgelegte Weg seit der letzten Messung bestimmt werden. Die Ermittlung von Winkel und Abstand zur Steigung soll im Folgenden genauer beschrieben werden.

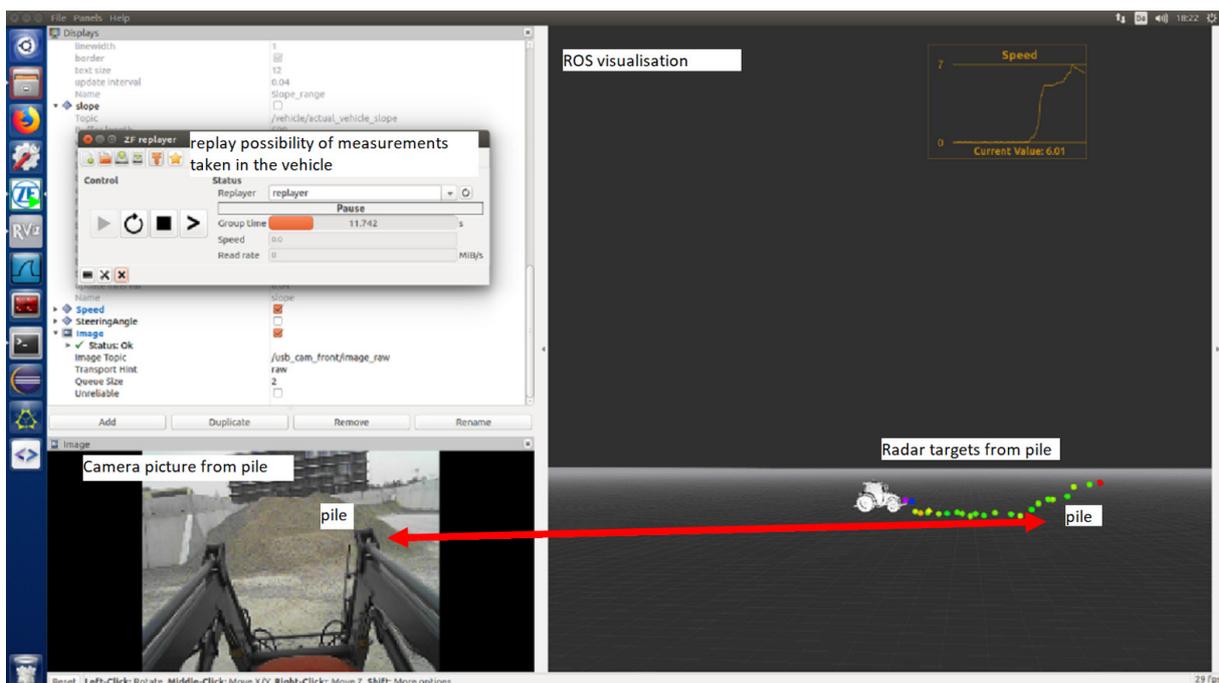


Abbildung 8: Visualisierung der Radardaten in der ROS-Entwicklungsumgebung (© ZF Friedrichshafen AG)

Im Folgenden wird ein möglicher Algorithmus zur Berechnung der Steigungsdaten erläutert. In Abbildung 11 ist das Belegtheitsgitter mit der schematischen Darstellung der ermittelten Steigung zu sehen.

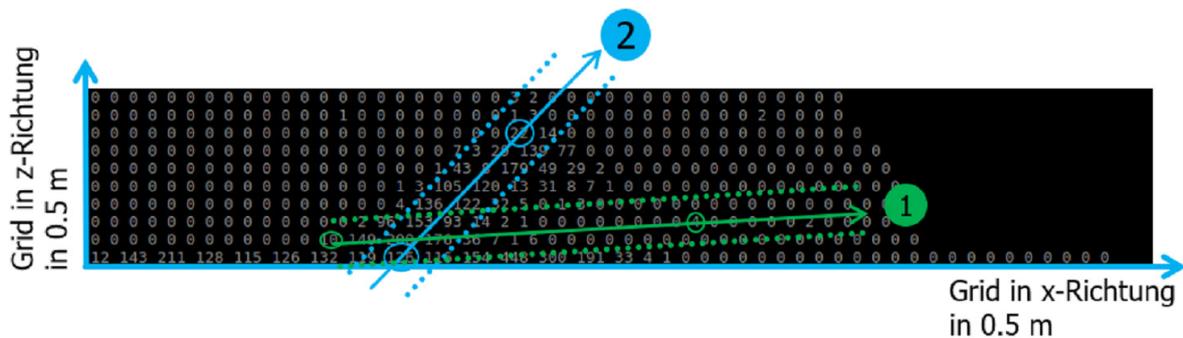


Abbildung 11: Ermittlung der Steigungsdaten mit einem Algorithmus (© ZF Friedrichshafen AG)

Es werden zufällig zwei belegte Zellen ausgewählt und durch diese wird eine Gerade gelegt. Anschließend wird der orthogonale Abstand jeder belegten Zelle zu dieser Geraden berechnet. Ist eine Zelle mehrfach belegt, zählt dieser Abstand auch mit der mehrfachen Gewichtung. Dieser Schritt wird mehrfach mit unterschiedlichen Geraden durchgeführt. Es wird die Gerade ausgewählt, die in der direkten Nachbarschaft die meisten weiteren Einträge im Belegtheitsgitter hat. Welcher Bereich der Nachbarschaft analysiert wird, ist durch den maximalen Abstand zur Geraden begrenzt (gepunktete Linien).

Im Beispiel ist die Gerade 2 ausgewählt worden. Der zuvor beschriebene Schritt ist essenziell, da die Auflösung eines Radarsensors nicht ausreichend hoch ist, um die Steigung direkt aus der Messung ablesen zu können. Des Weiteren treten sogenannte „ghost targets“ auf, die Messungen verfälschen können, diese müssen ebenfalls aus der Matrix entfernt werden. Anschließend wird die Steigung der Gerade berechnet sowie der Schnittpunkt mit der x-Achse. Dieser Schnittpunkt entspricht dem Abstand des Fahrzeuges zur Steigung. Nach diesem Schritt ist die Steigungsermittlung beendet. Die berechneten Daten zur Steigung (Abstand und Winkel) werden über den Fahrzeugkommunikationsbus (CAN) an das Getriebesteuergerät übermittelt.

Der ACT-Teil wird durch die Getriebesteuerung abgebildet. In diesem wird der Inhalt der übermittelten CAN-Botschaft (Abstand und Winkel der Steigung) ausgewertet und nach zuvor festgelegten Parametern das Getriebe und der Antrieb entsprechend auf die vor dem Fahrzeug liegende Steigung vorbereitet, indem die aktuelle Fahrstrategie (Übersetzung und Antriebsdrehzahl) unter Berücksichtigung des Umfelds durch den Einsatz des Radarsensors angepasst wird.

Abbildung 12 zeigt zweimal dieselbe Überfahrt einer Steigung am Beispiel eines stufenlosen Getriebes. Bei den roten Linien handelt es sich um die Steigungsüberfahrt mit aktivierter Funktion, bei den blauen Linien um die Überfahrt ohne die aktivierte Funktion.

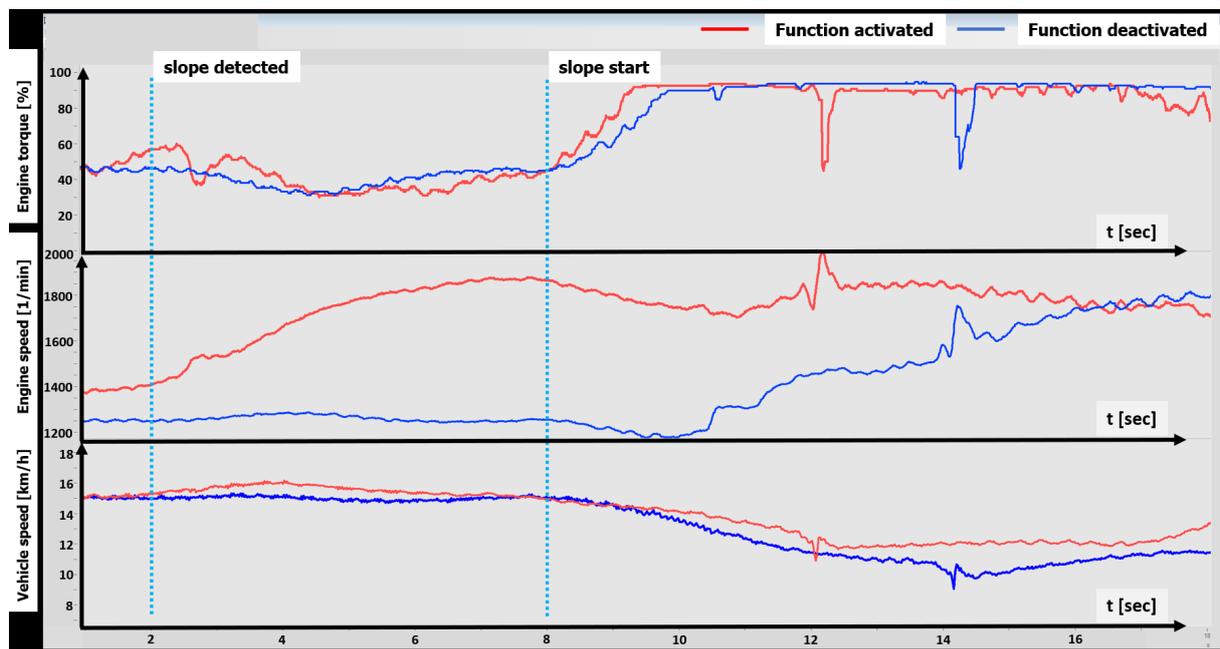


Abbildung 12: Darstellung der Steigungserkennung (© ZF Friedrichshafen AG)

Da das eingesetzte Getriebe eine stufenlose Übersetzung ermöglicht, kann auch die Motordrehzahl stufenlos angehoben werden. Dadurch ist ein höherer Leistungsabruf bzw. eine höhere Leistungsreserve zu Beginn der Steigung möglich. Die Vorverlagerung der Reaktion des Getriebesteuergeräts auf die erkannte Steigung ist hier deutlich zu erkennen. Bei Sekunde 12 findet der Getriebeübersetzungswechsel in der roten Messung statt. Bei der blauen Messung erfolgt der Getriebeübersetzungswechsel erst 2 Sekunden später, bei 14 Sekunden. Unterschiede der Motordrehzahl bei der Einfahrt in die Steigung kommen durch die Versuchsdurchführung zustande. Diese wurden nacheinander durchgeführt, ohne eine fest einstellbare Motordrehzahl. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei aktiver Funktion die Motordrehzahl vor Einfahrt in die Steigung angehoben wird. Unabhängig von der Ausgangsmotordrehzahl bei der Erkennung der Steigung. Das Getriebesteuergerät erhöht die Motordrehzahl, passt die Übersetzung entsprechend an und die Fahrgeschwindigkeit bleibt auf einem höheren Niveau. Dadurch wird die Steigung schneller überfahren. Der Geschwindigkeitseinbruch ist deutlich reduziert.

Schlussfolgerungen

Der Nachweis des Konzepts wurde erfolgreich in einem Traktor implementiert und in einer Off-Highway-Umgebung getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Steigungserkennung mittels Radarsensor zur Umsetzung einer prädiktiven Fahrstrategie möglich ist. Für eine Verbesserung der Erkennung sollte ein Ausgleichsalgorithmus für die Vibrationen des Sensors, welche durch die Montage am Fahrzeug kommen, eingefügt werden. Eine höhere Auflösung des Radarsensors selbst trägt ebenfalls zu einer Verbesserung der Steigungserkennung bei. Da die Erkennungsalgorithmen und die Sensoren fahrzeugunabhängig sind, ist eine Übertragung des Systems in andere Fahrzeuge möglich. Als Vorteile der radarbasierten Steigungserkennung sind folgende Punkte zu nennen:

- Erhöhung der Effizienz oder der Performanz des Fahrzeuges durch Umfelderkennung

- Situative Anpassung der Schaltstrategie
- Verminderung der Schalthäufigkeit
- Verhinderung von Hochschaltungen vor Steigungen
- Verbesserung des Fahrkomforts

Zukünftig könnten folgende Funktionen implementiert werden:

- Ermittlung der realen Fahrzeuggeschwindigkeit (Speed over Ground) zur Schlupferkennung sowie Regelung
- Nutzung von Algorithmen aus dem Automotive-Umfeld zur Objekterkennung mit Fahrerwarnung oder auch Bremsengriff (andere Fahrzeuge, Radfahrer, Fußgänger)

Literatur

Fraunhofer IAF (2020): Radar-Prinzip. <https://www.micro-radar.de/de/technologie/Radar-Prinzip.html>, Zugriff am 14.01.2021

Spektrum Akademischer Verlag (1998): Radar. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/radar/11970>, Zugriff am 14.01.2021

The Mathworks, Inc. (o.J.) Occupancy Grids. <https://de.mathworks.com/help/robotics/ug/occupancy-grids.html>, Zugriff am 14.01.2021

ZF Friedrichshafen AG (o.J., a): Smart Farming (Animation zu Steigungserkennung). https://www.zf.com/products/en/agriculture/highlights/technology_highlights/smart_farming/SmartFarming.html, Zugriff am 21.01.2021

ZF Friedrichshafen AG (o.J., b): TRAXON. <https://www.zf.com/products/de/trucks/traxon/traxon.html>, Zugriff am 30.04.2021

ZF Friedrichshafen AG (o.J., c): ZF ProAI. https://www.zf.com/mobile/de/stories_30336.html, Zugriff am 30.04.2021

Autoren

M.Sc. Stefan Traub, ZF Friedrichshafen AG, Manager, Advanced Engineering, Autonomous Operation, Graf-von-Soden-Platz 1, 88046 Friedrichshafen, Tel.: +49 7541 77-960401, E-Mail: stefan.traub@zf.com

Dipl.-Ing. Markus Birk, ZF Friedrichshafen AG, Advanced Engineering, Autonomous Operation, Graf-von-Soden-Platz 1, 88046 Friedrichshafen

Dr.-Ing. Bastian Volpert, ZF Friedrichshafen AG, Senior Manager, Advanced Engineering Industrial Systems, Graf-von-Soden-Platz 1, 88046 Friedrichshafen

Dipl.-Ing. Manfred Auer, ZF Friedrichshafen AG, System Architect, Agricultural Machinery Systems, Tittlinger Straße 28, 94034 Passau