

Positionsbestimmung und Umfelderkennung in der Formula Student:

Autonom auf der Rennstrecke



(Bild: TUfast Racing Team)

Das TUfast Racing Team ist das studentische Rennteam der TU München. Jedes Jahr vereinigen sich Studenten aller Ingenieursrichtungen, um neben einem Elektro-Rennauto auch einen autonom fahrenden Rennwagen zu entwickeln. Die Jungingenieure profitieren dabei von Kooperationspartnern aus der Industrie.

Von Eva Herrmann und Julius Rückin

Die Formula Student ist ein Motorsportwettbewerb für Studierende in Europa und ermutigt Studententeams, ihre selbstgebauten Rennwagen miteinander zu messen. Die Wettbewerbe werden weltweit nach ähnlichen Regeln durchgeführt, sodass die Teams mit ihren entwickelten Rennfahrzeugen an mehreren, internationalen Wettbewerben teilnehmen können. Austragungsorte sind bekannte Rennstrecken wie beispielsweise Silverstone, der Hockenheimring oder auch der Circuit de Barcelona-Catalunya. Entscheidend über den Erfolg ist aber nicht nur die höchste Geschwindigkeit. Neben den dynamischen Bewertungen (wie Beschleunigung, Brems- und Fahreigenschaften) werden auch statische Aspekte berücksichtigt – das beste Gesamtpaket aus Leistung, Ingenieur-

kunst und Business-Modell ist ausschlaggebend. Zu den statischen Aspekten zählen unter anderem die Gesamtkosten, die Wartungsfreundlichkeit und auch die Zuverlässigkeit.

Die Rennserie ist in nachfolgende drei Kategorien aufgeteilt:

- Combustion (Rennwagen mit Verbrennungsmotor)
- Driverless (Autonomes Rennauto)
- Electric (E-Rennfahrzeug)

Die Technische Universität München ist in den Kategorien Driverless und Electric mit einem eigenen Rennwagen vertreten – im Jahr 2017 war das Rennteam noch in allen drei Klassen am Start. Das TUfast Racing Team umfasst aktuell 70 aktive Mitglieder – die Hälfte davon arbeitet am autonomen Rennwagen „db019“. Im Team unterteilen sich die

Mitglieder auf die Bereiche Autonome Software, Fahrwerk, Aufhängung und Aerodynamik.

Der Wettbewerb wird von der Industrie und Ingenieuren gefördert, um rennsportbegeisterte Studierende weiterzubilden und junge Leute zu ermutigen, einen Ingenieurberuf zu ergreifen. So unterstützt beispielsweise DTC Navigation & Security Solutions die Studierenden in den Bereichen GPS, Optimierung, Rauschen, Frequenzen oder auch mit einer freien Testfläche für das autonome Fahrzeug. Das Ziel ist, innerhalb von acht Monaten das Rennauto zu entwickeln, zu bauen und zu testen.

Herausforderung der Kategorie „Driverless“

Jeden Sommer finden auf europäischen Rennstrecken unterschiedliche Rennen statt, an denen auch das Team der Uni München teilnimmt. Die Kategorie „Driverless“ ist erst seit 2016 Bestandteil der Rennserie und seit 2017 ist das Rennteam der TU München mit einem autonomen Rennwagen der „db“-Reihe vertreten. Der Wettbewerb besteht dabei aus insgesamt acht Disziplinen (Bild 1).

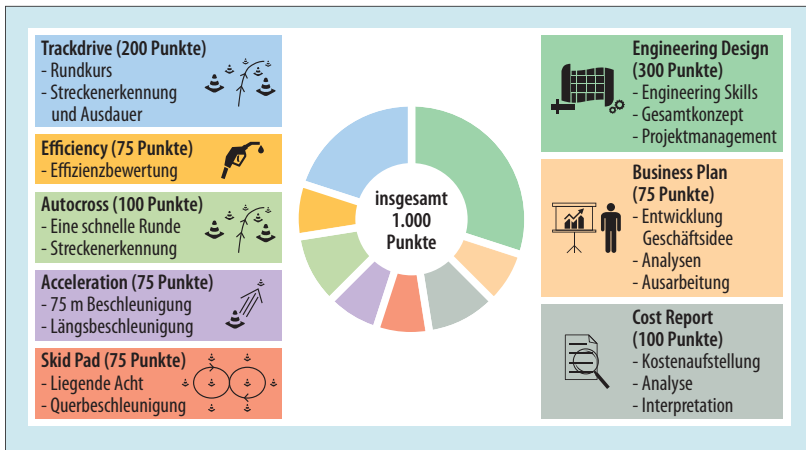


Bild 1. Dynamische und Statische Disziplinen der Formula Student.

(Quelle: TUfast Racing Team)

Bei nachfolgenden dynamischen Disziplinen ist im Vorfeld die genaue Strecke lediglich teilweise bekannt:

- „Acceleration“ – eine Gerade wird mehrfach ausgefahren
- „SkidPad“ – eine liegende Acht wird mehrfach ausgefahren
- „Autocross“ – unbekannte Strecke muss erkannt und eine Runde abgefahren werden
- „Trackdrive“ – Man muss eine unbekannte Strecke erkennen und zehn Runden fahren. Hier geht es darum, schnell die Ideallinie zu finden und jede Runde schneller zu werden.

Darüber hinaus gibt es die sogenannten statischen Disziplinen. So wird beispielsweise im „Business Plan“ eine fiktive Geschäftsidee entwickelt und vor potenziellen Investoren präsentiert. Im Bereich „Cost Report“ wird das wirtschaftliche Verständnis der Teilnehmer geprüft, Make-or-buy-Entscheidungen getroffen und Produktionskosten verglichen. Durch den Mix aus dynamischen und statischen Bewertungen ist ein interdisziplinärer Zusammenschluss der Studierenden erforderlich: Ingenieure aus der Mechanik und der Elektrotechnik werden ebenso benötigt wie Wirtschaftsingenieure oder Business- und Mediastudenten.

Schlussendlich gilt das „Engineering Design“ als Königsdisziplin des Wettbewerbs. Hier erklären und begründen die Jungingenieure ihr Fahrzeugkonzept mit den unterschiedlichen Sensoren (Bild 2). Eine präzise Lokalisierung zählt beim autonomen Fahren zu den

wichtigsten Punkten – im Design und auf der Strecke. Das OxTS RT4003 ermöglicht dabei eine Positionsbestimmung out-of-the-box mit einer Genauigkeit auf bis zu 0,5 cm.

Umfeldererkennung

Besonders im Erkennungsmodul sind hochpräzise Lokalisierungsdaten für den eingebauten LiDAR-Sensor essenziell. Der statische Offset zur GPS-Einheit ermöglicht es, die gescannten Positionen direkt in Relation zur Fahrzeugposition zu setzen. Somit lassen sich Ungenauigkeiten in der Datenverarbeitung reduzieren. Außerdem werden die „Frames“ eines Rotations-LiDARs während einer schnellen Fortbewegung zwangsläufig verzerrt, da die Punkte während einer Umdrehung über 50 - 100 ms akkumuliert werden. Die hochfrequenten Positions-Updates und präzisen Geschwindigkeitsinformationen des OxTS RT4003 können die Verzerrungen über den Zeitstempel je gescannten Punkt und zugehöriger Fahrzeugposition herausrechnen.

Zur Speicherung der unbekannteren Rennstrecke wird während der ersten

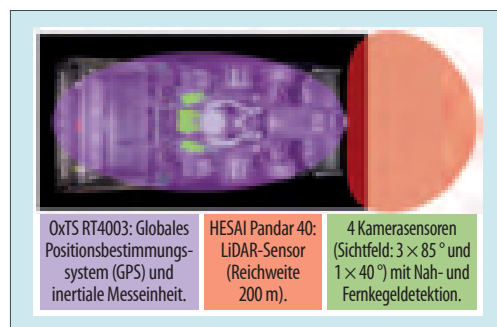


Bild 2. Sensorkonzept für den autonomen Rennwagen db019.

(Quelle: TUfast Racing Team)

Runden eine Karte der Rennstreckenmarkierung angelegt und die Lokalisierung des Rennwagens über die gesamte Strecke gespeichert. Die Kartierung unterstützt bei der Generierung schneller Rundenzeiten, sobald die Rennstrecke nach einer ersten Runde bekannt ist. Die Kartierung und Lokalisierung werden dabei über verschiedene Sensordaten berechnet – beispielsweise von Beschleunigungssensoren, Geschwindigkeitssensoren und OxTS RT4003.

Von großer Bedeutung ist hierbei die genaue Positionsinformation des Präzisions-Inertialnavigationssystems. Die anderen Sensoren können lediglich

longitudinalen Beschleunigungskräften extrahieren (**Bild 3**).

Kartierung und Lokalisierung

Neben der sehr genauen Lokalisierung durch die Zustandsschätzung ist es durch die Schätzung der Fahrzeugorientierung, Geschwindigkeit und Position möglich, ein nahezu reales Abbild der Strecke zu generieren. Dadurch kann im weiteren Rennverlauf die Ideallinie und ein Geschwindigkeitsprofil im Grenzbereich des Fahrzeugs definiert werden. Die Planung der optimalen Rennlinie setzt allerdings eine zuverlässige Erkennung einer geschlossenen Runde voraus, so-

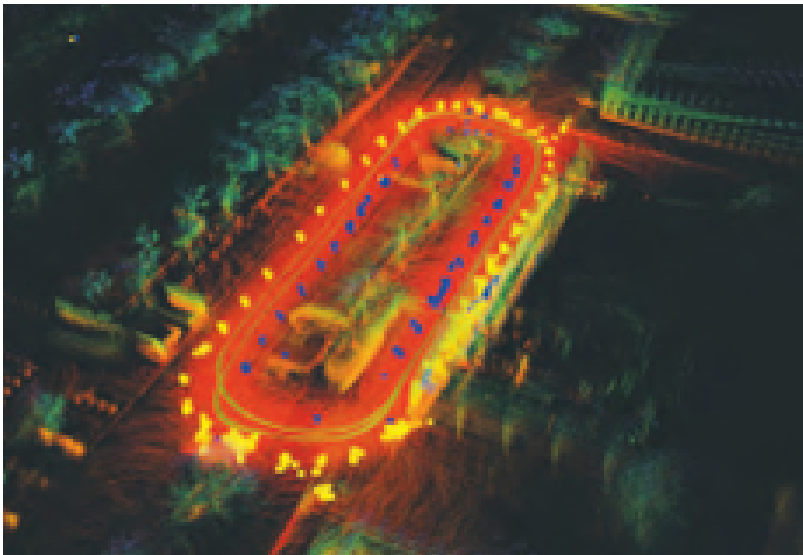


Bild 3. Kartierung der Strecke mit OXTS RT4003.

(Bild: TUfast Racing Team)

indirekt die Position des Autos im Raum ausgeben, sodass durch Integration ein fortlaufend größer werdender Fehler entstehen würde.

Durch Anwendung der Messeinheit wird sichergestellt, dass die gemittelte Positionierung über die Sensorik auch über lange Zeiträume sehr präzise und zuverlässig bleibt. Besonders stabilisierend zur Positionierung durch das leistungsstarke globale Navigationssystem (GNSS) oder inertielle Navigationssystem (INS) ist der integrierte und hocheffiziente Kalman-Filter, mit dessen Hilfe sich aus GPS-Position und Beschleunigungssensorik direkt im RT4003 eine genaue Positionierung, die Geschwindigkeit und Beschleunigung in allen Dimensionen ableiten lässt. Ohne zusätzlichen Implementierungsaufwand lassen sich so hochstabile Positionen auch in fahrdynamischen Grenzbereichen mit enorm hohen lateralen und

longitudinalen Beschleunigungskräften extrahieren. Die Erkennung muss dabei sowohl sehr zuverlässig als auch sehr effizient ausgeführt werden. Durch die hohen Datenraten des OXTS RT4003 bei Position und Geschwindigkeit mit bis zu 200 Hz, kann das Ende der Runde genau und sehr schnell detektiert werden.

Eine Runde ist oftmals durch sehr enge Kurven mit großen lateralen Kräften auf einer Streckenlänge von bis zu 1 km gekennzeichnet. Trotz der Grenzbedingungen ist es mit dem genannten Messsystem möglich, über die gesamte Distanz sowohl eine exakte Positionierung als auch eine genaue Kartierung zu erhalten – was eine zuverlässige Erkennung des Rundenschlusses zulässt. Nach einer Initialisierungszeit von nur wenigen Stunden bewegt sich die geringe bis nicht spürbare Drift in der Position des Autos und der Kartenmerk-

male über die gesamte Distanz im Bereich weniger Zentimeter. Das unterscheidet die Lokalisierung des RT4003 von anderen Algorithmen, wie visuelle Lokalisierungs- und Kartierungsmethoden über LiDAR oder Stereokameras. Im Vergleich zu der äußerst komplexen, schwer zu parametrisierenden und rechenintensiven Klasse von Algorithmen erzielt die Messeinheit mit wenig Kalibrierungsaufwand und einfacher Handhabung bessere Ergebnisse (**Bild 4**). Nachdem die Streckenkartierung und die Planung der Rennlinie abgeschlossen und die Rennstrecke bekannt ist, ist das Rennfahrzeug nicht mehr limitiert auf die Distanz des lokal erkannten Streckenabschnitts. Auf der einen Seite lässt sich so eine deutlich effizientere Rennlinie mit einem agileren Geschwindigkeitsprofil fahren, auf der anderen Seite erhöhen sich jedoch auch die Anforderungen an die Regelung und Lokalisierung.

Regelung

Sobald die Rennstrecke bekannt ist, treten aufgrund der im fahrdynamischen Grenzbereich geplanten Trajektorie neue Anforderungen an den Regler des Fahrzeugs auf. Damit in hohen Geschwindigkeitsbereichen und Passagen mit großen lateralen Kräften das Fahrzeug weiterhin stabil auf den geplanten Bewegungspfad bleibt, ist die Optimierung eines klassischen PID (Proportional Integral Derivative Controller)-Ansatzes nicht ausreichend. Der Regler des Fahrzeugs bezieht die Geschwindigkeit, Schwimmwinkel und die lateralen und longitudinalen Kräfte auf das Fahrzeug mit in die Berechnung des neuen Lenkwinkels in der aktuellen Position ein. Dazu ist eine umfangreiche und hochpräzise Schätzung der Eingangsgrößen erforderlich. Das RT4003 vereinheitlicht dazu effektiv die Berechnung und die Bereitstellung der Größen für die autonome Software und stellt gleichzeitig eine enorme Präzision der Werte sicher. Die Genauigkeit ermöglicht es, am theoretisch geplanten und berechneten Limit des Fahrzeugs auf der Rennlinie zu fahren. Außerdem kann auf der Ideallinie durch die präzisen Schätzungen mit einem geringeren Sicherheitsabstand in der Trajektorie geplant werden, da in der Erfassung der Eingangsgrößen eine größere Sicherheit als mit anderen Sensoren kalkuliert werden kann. Insgesamt resultiert das

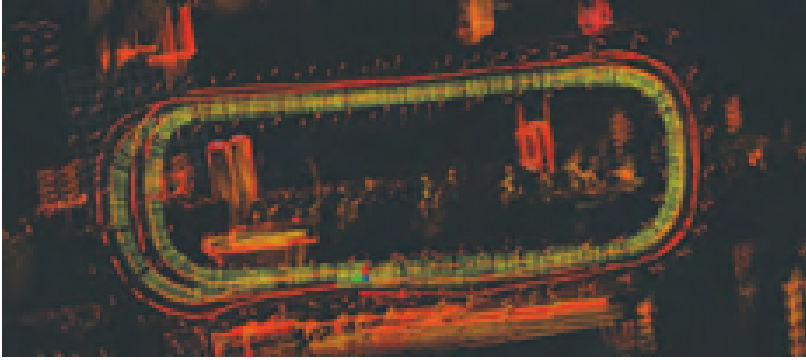


Bild 4. Lokalisierung des Rennwagens über mehrere Runden mit OxTS RT4003. (Bild: TUfast Racing Team)

in einem stabileren Regler und gleichzeitig in einer schnelleren Rennlinie. Durch die diversen Eingangsgrößen ist es möglich, softwareseitig eine aktive Dämpfung der Lenkwinkelkorrektur durch Geschwindigkeitsschätzung in den Regler zu integrieren. Das macht ihn robuster gegen das typisch oszillierende Verhalten eines konventionellen PID-Reglers. Des Weiteren kann durch die Schätzung des Schwimmwinkels der Grenzbereich der Reifen optimal ausgenutzt werden und somit noch mehr Seitenkraft auf die Strecke übertragen werden – resultiert gerade bei sehr kurvigen Rennstrecken in einer deutlich verbesserten Rundenzeit. Neben der Präzision diverser Sensorgrößen, die als Eingangswerte für den Regler dienen, müssen die Werte zudem in sehr hoher Frequenz zur Verfügung gestellt werden. Nur durch die sehr hohe Ausgaberate von 200 Schätzungen

pro Sekunde, kann der „db019“ von der recheneffizienten Implementierung des Reglers profitieren, da in jedem Berechnungsschritt der 200 Regelbefehle pro Sekunde neue Schätzungen für alle relevanten Messgrößen vorliegen. Das lässt das Rennauto noch stabiler auf dem Bewegungspfad fahren und sehr agil kleine Regelfehler korrigieren.

Validierung

Die Validierung des Gesamtsystems in allen Subsystemen ist eine äußerst komplexe Herausforderung. Es ist oft sehr zeitaufwendig oder nicht mit ausreichender Genauigkeit realisierbar, die zugrundeliegenden Lokalisierungen und Positionierungen von Streckengrenzen und der Fahrzeugposition für jeden Zeitpunkt bereitzustellen. Durch die Positionsgenauigkeit des OxTS RT4003 eignet es sich sowohl als

aktiver Teil des autonomen Systems als auch um einzelne Algorithmen, ganze Subsysteme und deren Einfluss aufeinander zu validieren. So können beispielsweise laterale und longitudinale Regelfehler, Kartierungsgenauigkeiten von visuellen Lokalisierungsverfahren und Erkennungsgenauigkeiten der Umgebungswahrnehmung überprüft werden, die auf Machine-Learning-Methoden basieren.

Insgesamt lässt sich das Messequipment sehr vielseitig einsetzen, das sich neben sehr recheneffizienten und sehr schnellen Ausgabefunktionen vor allem auch durch die hohe Genauigkeit in allen bereitgestellten Messgrößen und deren zuverlässige und einfache Integration auszeichnet. *ap*



Eva Herrmann

ist Team Manager TUfast Racing Team 2019. Herrmann studiert Maschinenwesen im Bachelor an der TU München und übernahm im Oktober 2018 die Projektleitung und

das Management des TUfast Racing Teams.



Julius Rückin

ist Technical Director des autonomen Rennwagens „db019“. Rückin studiert Mathematics in Data Sciences im Master an der TU München. Zu Beginn des Jahres 2019 übernahm er die

technische Leitung des Projekts „db019“.