



# Forschung an der Fakultät für Technische Mathematik und Technische Physik

## Geodätische Aspekte des Forschungsprojekts TRASER *Geodetic Aspects of the Research Project TRASER*

Das Projekt TRASER ist eine fakultätsübergreifende Zusammenarbeit der Institute für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik bzw. Navigation und Satellitengeodäsie und stellt ein konkretes Projekt im Rahmen des Forschungsschwerpunkts VII (Fahrzeugtechnik) an der TU Graz dar. Es beschäftigt sich mit der Trassierungserfassung sowie lauftechnischen und Betriebsfestigkeitsuntersuchungen für Anwendungen im Schienenverkehr. Der Beitrag beschreibt zunächst die Zielsetzung des Projekts und konzentriert sich in der Folge auf die geodätischen Aspekte.

### Zielsetzung

Im Schienenverkehr besteht eine signifikante Wechselwirkung zwischen dem Wegenetz und den Fahrzeugen, die dieses befahren. Die Qualität von Schienennetzen zeigt häufig beträchtliche Unterschiede zwischen verschiedenen Ländern bzw. Betreibern. Die Einführung neuer Fahrzeuge in bestehende Netze kann daher zu großen Betriebsproblemen oder sogar zu schwerwiegenden Unfällen führen. Die Beurteilung der Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Fahrweg erfordert sowohl die Kenntnis des Fahrzeugverhaltens als auch Informationen über die Trassierung des aktuell befahrenen Fahrwegs. Zur Erfassung des Fahrzeugverhaltens steht eine Reihe unterschiedlicher Messsysteme (z.B. Kraft-, Weg-, und Beschleunigungsaufnehmer, Messradsätze) zur Verfügung. Die Trassierung wird meist von speziellen Gleismesswägen erfasst und anschließend mit dem separat gemessenen Fahrzeugverhalten synchronisiert. Dies ist eine bei großen Bahnbetreibern etablierte und weitgehend automatisierte Vorgangsweise. Für Betreiber kleinerer Netze oder Fahrzeughersteller ist jedoch der Einsatz eines Gleismesswagens aufgrund technischer Gegebenheiten oder finanzieller Aspekte oft nicht möglich. Außerdem sind die Ergebnisse verschiedener Gleismesswägen vielfach nur beschränkt vergleichbar. Für Fahrzeughersteller sind Vergleiche der Trassierungen unterschiedlicher Netze daher meist unmöglich.

Der Ansatz, die Trassierung im Rahmen des normalen Fahrbetriebs in einer für lauftechnische Experimente bzw. Betriebsfestigkeitsuntersuchungen ausreichenden Qualität mit einem geeignet ausgestatteten Versuchsfahrzeug selbst zu erfassen, wird zurzeit nur vereinzelt verfolgt. Das Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik hat sich auf derartige Messaufgaben spezialisiert. Durch die gleichzeitige Trassierungserfassung können problematische Belastungen, die auf das Fahrzeug einwirken, den einzelnen Segmenten des Schienennetzes direkt zugeordnet werden (Georeferenzierung).

Diese Aufgabe wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Navigation und Satellitengeodäsie auf Basis einer Integration von Empfängern des Global Positioning System (GPS) mit einem Inertial Navigationssystem (INS) gelöst. Zu diesem Zweck wurde in einer gemeinsamen Anstrengung ein eigenes INS entwickelt, das sich momentan in der Testphase befindet. Einen Grund für die Eigenentwicklung stellt die wissenschaftliche Herausforderung dieser anspruchsvollen Forschungsaufgabe dar.

### Geodätische Aspekte des Projekts *Satellitengestützte Positionierung*

GPS ist ein globales, ständig verfügbares, allwettertaugliches, und frei verwendbares 3D-Positionierungssystem, das auf der Beobachtung künstlicher Erdsatelliten beruht. Durch die Konstellation des Systems wird erreicht, dass jeder Benutzer auf oder nahe der Erde ständig „Sichtverbindung“ zu mindestens vier Satelliten hat (unter Vernachlässigung von Topographie, Bewuchs und Bebauung). Alle Satelliten strahlen kontinuierlich zwei Trägerwellen mit Frequenzen von ca. 1.5 bzw. 1.2 GHz ab, wobei die Trägerwellen durch binäre Phasenmodulation mit Informationen angereichert werden. Die Signale werden durch den Empfänger eines Benutzers aufgenommen und zur Ableitung der Entfernung zu den Satelliten verwendet. Die kinematische Punktbestimmung anhand eines einzelnen Empfängers liefert eine absolute Positionsgenauigkeit von ca. 10 m. Das Ergebnis der Einzelpunktbestimmung kann durch den koordinierten Einsatz zweier oder mehrerer Empfänger verbessert werden, wobei die Rohdaten der Empfänger miteinander kombiniert werden. Die höchste Genauigkeit wird durch Messung der Trägerwellenphase erreicht. Diese liefert jedoch uneindeutige Ergebnisse, da die Phase nur innerhalb eines einzigen Wellenzyklus (ca. 20 cm) eindeutig ist. Zur Lösung dieser Ambiguitäten bedarf es der Kombination der Rohdaten der Empfänger. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen bei kinematischen Anwendungen im Bereich von ca. 0.1-0.5 m. Dieses Verfahren wird als Basislinienbestimmung bezeichnet. Können die Ambiguitäten der Phasenmessung aufgrund widriger Umstände nicht gelöst werden, so liegt die Genauigkeit bei etwa 1-5 m.

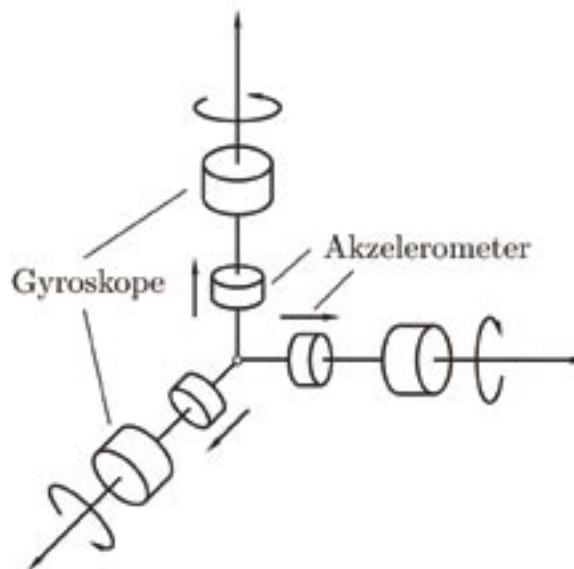


Abb. 1: Schematische Darstellung der Sensoranordnung in einer IMU

### *Elemente der Inertialnavigation*

Ein INS besteht aus einer Inertial Measurement Unit (IMU) sowie aus entsprechender Hard- und Software zur Integration der Differentialgleichungen, die die Messdaten des Systems mit den gesuchten

Bewegungsparametern verknüpfen. In modernen Realisierungen ist die IMU fest mit dem Fahrzeug verbunden („Strapdown“ Systeme). Sie umfasst zwei achsparallele, orthogonale Dreibeine von Akzelerometern und Gyroskopen bzw. Gyros (Abb. 1).

In einer Strapdown IMU realisieren die Akzelerometer ein Koordinatensystem, das eine feste Orientierung relativ zum Fahrzeug besitzt und als Body Frame bezeichnet wird. Die Akzelerometer messen die dreidimensionale spezifische Kraft, die auf das Body Frame einwirkt. Der Kraftvektor hängt vom Koordinatenrahmen ab, in dem die Bewegungsparameter ermittelt werden sollen. Er enthält Anteile, die der Translation des Fahrzeugs zuzurechnen sind (das eigentlich gesuchte „Signal“ in der Navigation), gravitationsbedingte Anziehungskräfte, sowie Scheinkräfte, die durch die Rotation des Body Frame relativ zum Inertialraum (vorstellbar als Raum der Fixsterne) entstehen (Zentrifugal- und Corioliskräfte). Die Akzelerometer messen eine Überlagerung dieser Kräfte und können per se nicht zwischen den verschiedenen Anteilen unterscheiden. Die Gyros werden zur Messung der Winkelgeschwindigkeiten des Body Frame relativ zum Inertialraum eingesetzt. Daraus kann bei bekannter Startorientierung des Fahrzeugs die aktuelle Raumlage (Attitude) des Fahrzeugs durch einmalige numerische Integration berechnet werden.

Um die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu ermitteln, muss die aus den Akzelerometer-Messungen abgeleitete translatorische Beschleunigung einmal numerisch integriert werden. Dafür müssen die störenden Anteile (Gravitation, Zentrifugal- und Corioliskraft) abgespalten werden. Weiters müssen die Messungen anhand der aktuellen Attitude in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert werden. Für die Bestimmung der aktuellen Geschwindigkeit muss die Ausgangsgeschwindigkeit bekannt sein. In einem weiteren Schritt kann die aktuelle Position des Fahrzeugs durch eine weitere numerische Integration des zuvor ermittelten Geschwindigkeitsvektors berechnet werden. Dabei ist die Kenntnis der Ausgangsposition erforderlich. Da zur Ermittlung der aktuellen Bewegungsparameter die jeweils zugehörigen Startwerte erforderlich sind, wird die Inertialnavigation den relativen Positionierungsverfahren zugerechnet. Hierbei akkumulieren sich systematische Fehler der Messung, was zu einer ständigen Abnahme der Navigationsqualität führt.

#### GPS/INS-Integration

Durch die Integration von GPS mit einem INS können die Trassierungsparameter gemäß den Anforderungen von Fahrzeugherstellern erfasst werden. Die beteiligten Systeme liefern komplementär-redundante Beobachtungen, da sie gegenteiligen Messprinzipien folgen. Daraus ergeben sich auch komplementäre qualitative Eigenschaften. Die Stärken von GPS liegen in der Bereitstellung absoluter Positionen und der hohen Langzeit-Genauigkeit; die Schwächen betreffen die relativ geringe Datenrate (vor allem für hochkinematische Bewegungsabläufe), die beschränkte Kurzzeit-Genauigkeit, die mitunter mangelnde örtliche wie zeitliche Verfügbarkeit und die Empfindlichkeit gegenüber äußeren Störeinflüssen und Abschattungen. Im Gegensatz dazu bietet ein INS eine hohe Kurzzeit-Genauigkeit, eine sehr hohe Datenrate, eine unbegrenzte Verfügbarkeit und eine Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Störungen; Nachteile bestehen im Hinblick auf den relativen Charakter der Positionsinformation und die geringe Langzeit-Genauigkeit. Durch die Verknüpfung der wechselseitigen Vorteile der beiden Systeme eignet sich die GPS/INS-Integration hervorragend für die Trassierungserfassung sowie die Georeferenzierung von Belastungsspitzen innerhalb des Projektes TRASER (Abb. 2).

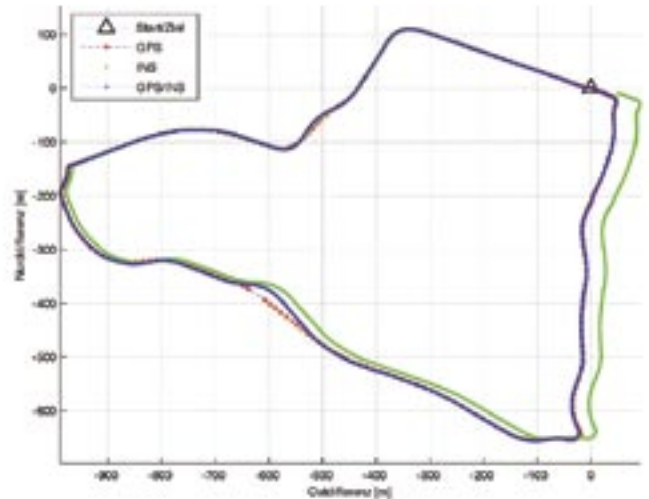


Abb. 2: Beispielhafter Vergleich der 2D-Trajektorien von GPS, freier Inertialnavigation und GPS/INS-Integration. Letztere erlaubt die Überbrückung von GPS-Datenlücken sowie die Korrektur der Abdrift der INS-Positionen

### Geodetic Aspects of the Research Project TRASER

*The project TRASER is an inter-faculty cooperation between the Institutes of Machine Elements and Methods of Development as well as Navigation and Satellite Geodesy. It represents a concrete project in the context of the research focus VII (vehicle technology). The project deals with the recording of the track geometry in the railway sector together with investigations of locomotion and operational stability.*

*In rail transport, there are significant interactions between the railroad and the vehicles. Further, there are often considerable quality differences of railway networks among different countries and operators. Introducing new vehicles to existing networks may, thus, lead to huge operational problems or even heavy accidents. Assessing the interactions between the vehicles and the railroad requires knowledge about both, the actual vehicle behavior and the geometry of the presently traversed railroad segments. For the investigation of the vehicle behavior, a variety of different sensors exists (e.g., accelerometers, extensometers, strain gages). The track geometry is usually recorded and analyzed by dedicated railroad measurement cars and is afterwards synchronized with the vehicle behavior. This approach is widely applied by major railroad operators and provides a high level of automation. However, minor operators or vehicle manufacturers cannot do so due to technical or financial reasons. Furthermore, the results obtained with different measurement cars are often difficult to compare. Vehicle manufacturers can, thus, hardly assess the quality differences between the networks.*

*The approach of recording the track geometry under normal operational conditions (i.e., with a normal railcar supplied with the required sensory) at a quality level sufficient for locomotion and operational-stability investigations is currently rarely applied. The Institute of Machine Elements and Methods of Development has specialized on such measurements. By simultaneously recording the track geometry, problematic loads affecting the vehicles can be directly assigned to certain segments of the railroad (suchlike tasks are known as "georeferencing" in geodesy). The geometric assignment is performed in cooperation with the Institute of Navigation and Satellite Geodesy by integrating receivers of the Global Positioning System (GPS) with an Inertial Navigation System (INS). For this purpose, an own INS was developed in a common effort that is currently in the test phase. One driver for the INS development was the scientific challenge of this ambitious research problem.*