

Optimierte Modellierung von Gabelstapler-Reifen

Simulation der Querdynamik

In der Fahrdynamik von Gabelstaplern kommt dem Reifenverhalten durch die Abbildung der Kraftübertragung vom Fahrzeug auf den Boden eine zentrale Rolle zu. Die Eigenschaften von Industriereifen hinsichtlich der Übertragung von Horizontalkräften sind bisher jedoch weitgehend unbekannt.

Zudem liegt für eine computer-gestützte Simulation der Querdynamik von Gabelstaplern keine optimale Modellierungsart der Reifen vor. In einem derzeit am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik (MTL) der Hamburger Helmut-Schmidt-Universität bearbeiteten Forschungsprojekt wird ein geeignetes Reifenmodell entwickelt. Zur Ermittlung des Reifenverhaltens als Modell-eingabe wird ein Reifenprüfstand realisiert, der speziell auf Industriereifen ausgelegt ist.

- Nils Busch
- Rainer Bruns

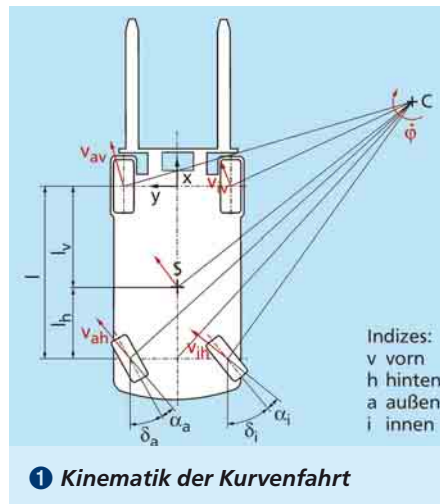
Erkenntnisgewinn durch Forschungsprojekt

Moderne, leistungsstarke Gabelstapler erreichen ein hohes Maß an Fahrdynamik bei gleichzeitig hoher Fahrstabilität in Kurven. Das fahrdynamische Verhalten dieser Fahrzeuge wird zunehmend bereits in der Entwicklungsphase mithilfe computergestützter Simulation untersucht. Als geeignete Methode wird dabei die Mehrkörpersystem-Simulation (MKS-Simulation) angewandt, die außerdem zur frühzeitigen Optimierung weiterer wichtiger Fahrzeugeigenschaften, wie z. B. Schwingungskomfort oder Bauteilbeanspruchung, eingesetzt werden kann. Die Fahrstabilität bei Kurvenfahrt wird maßgeblich durch die Kraftübertragungseigenschaften der Reifen auf den Boden bestimmt. Daher kommt dem verwendeten Reifenmodell für die Güte und Aussagekraft der fahrdynamischen Simulation eine besondere Bedeutung zu. Die Art der Modellierung wird auf die funktionellen Anforderungen der Aufgabenstellung ausgerichtet. Um die Modellparameter mit möglichst geringem Aufwand bestimmen zu können, sind die benötigten Daten auf einem Reifenprüfstand experimentell zu ermitteln. Außerdem werden mit diesem Prüfstand die Kenntnisse über die Reifeneigenschaften erweitert. Im Gegensatz zu Kfz-Reifen,

deren Verhalten seit Jahrzehnten erforscht wird, sind die Eigenschaften von Industriereifen hinsichtlich der Kraftübertragung noch weitgehend unbekannt. Über das Verhalten der überwiegend verwendeten Superelastikreifen (SE-Reifen) im fahrdynamischen Grenzbereich sowie bei großen Schräglaufwinkeln bestehen bisher nur sehr geringe Kenntnisse. Da bislang kein geeigneter Reifenprüfstand für Industriereifen existiert, wird ein solcher im Rahmen des Projektes konzipiert und realisiert. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse können sowohl Hersteller als auch Anwender von Gabelstaplern und Industriereifen die fahrdynamischen Eigenschaften der verwendeten Reifen bewerten.

An dem aktuellen Forschungsprojekt, das von der Forschungsgemeinschaft Intra-logistik, Fördertechnik und Logistiksysteme (FG IFL) des VDMA gefördert wird, sind folgende Unternehmen beteiligt:

- ▶ Jungheinrich AG (FG IFL)
- ▶ Linde Material Handling GmbH (FG IFL)
- ▶ Still GmbH (FG IFL)
- ▶ Berufsgenossenschaft Handel und Waren-distribution
- ▶ Robert Bosch GmbH
- ▶ Continental AG
- ▶ Gumasol Werke Dr. Mayer GmbH & Co. KG
- ▶ Tweco N.V.
- ▶ Volkswagen AG.



1 Kinematik der Kurvenfahrt

Querdynamik von Gabelstaplern

Als Querdynamik wird die Kinetik der veränderlichen bzw. dynamischen Kurvenfahrt eines Fahrzeugs bezeichnet. Sie grenzt sich als Teil der Horizontaldynamik von der Vertikaldynamik (z. B. Schwingungskomfort) ab. Der grundlegende Fahrzustand für querdynamische Betrachtungen ist die stationäre Kreisfahrt. Ein vorgegebener Lenkeinschlag führt zu einem bestimmten Kurvenradius (Bild 1). Der Zusammenhang dieser beiden Größen

enthält eine dynamische Komponente, die von den Schräglaufsteifigkeiten $c_{\alpha i}$ der Reifen an Vorder- und Hinterachse sowie von der Schwerpunktlage des Fahrzeugs in Längsrichtung abhängig ist. Ein grundsätzlich stabiles, untersteuerndes Fahrverhalten ist bei einem unbeladenen Gabelstapler nicht sicher gegeben, da der Schwerpunkt durch das Gegengewicht deutlich hinter der Fahrzeugmitte liegt. Ein übersteuerndes Fahrverhalten ist möglich, wodurch die Spurhaltung des Fahrzeugs bei dynamischer Kurvenfahrt instabil werden kann. Ferner sind bei Gabelstaplern in Kurvenfahrt starke laterale Radlastdifferenzen bis hin zur Entlastung der kurveninneren Räder möglich. Dies beeinflusst einerseits zusätzlich das beschriebene Eigenlenkverhalten, andererseits kann das Fahrzeug seitlich umkippen.

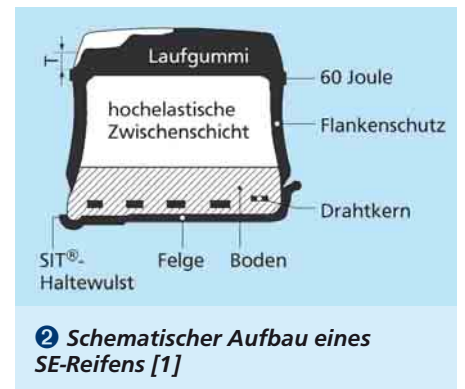
Die einzelnen Reifen unterliegen in der dynamischen Kurvenfahrt folglich unterschiedlichen Belastungen. Das Verhalten des Gesamtfahrzeugs kann nur bestimmt werden, wenn die Zusammenhänge der Einflussgrößen der Reifen bekannt sind und im MKS-Fahrzeugmodell berücksichtigt werden.

Fahrdynamische Besonderheiten des Gabelstaplers im Vergleich zu Kfz sind:

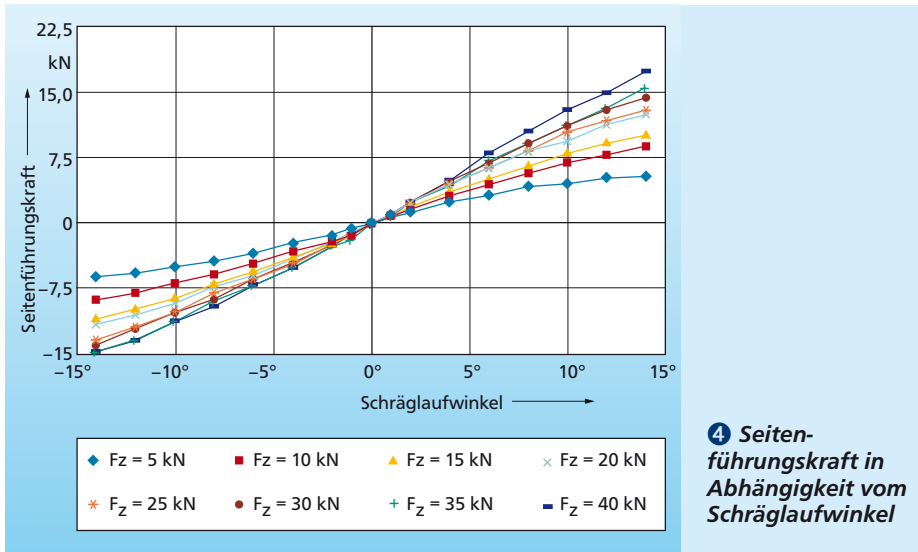
- ▶ Hinterradlenkung
- ▶ starke Varianz der Schwerpunktlage bei Beladung
- ▶ hohes Massenträgheitsmoment um die Fahrzeughochachse
- ▶ Lage der Wankachse durch die Pendelachse (bei Vierrad-Gabelstapler).

Anforderungen an die Reifen

Als Industriereifen für Gabelstapler werden in Europa überwiegend SE-Reifen verwendet. Deshalb bilden sie den Schwerpunkt dieser Untersuchung. SE-Reifen sind Vollgummireifen, die in der Querschnittsgeometrie den Luftreifen ähneln. Sie sind aus mehreren radialen Schichten unterschiedlicher Gummimischungen aufgebaut, die zur Einstellung verschiedener Eigenschaften dienen (Bild 2).



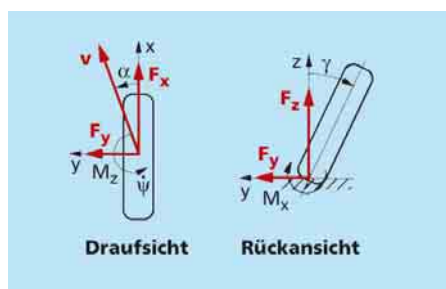
2 Schematischer Aufbau eines SE-Reifens [1]



4 Seitenführungskraft in Abhängigkeit vom Schräglaufwinkel

Historisch entstanden die SE-Reifen aus voll ausgefüllten Luftreifen, um Luftverlust zu vermeiden. Außerdem ist die geringere Einfederung bei Lastaufnahme günstig für die Verwendung an Gabelstaplern.

Als wichtige Eigenschaft eines Industriereifens tritt neben solchen Merkmalen, wie Rollwiderstand, Verschleiß und Preis, zunehmend auch die Fahrstabilität in den Vordergrund. Die Querdynamik eines Gabelstaplers wird maßgeblich durch die Kraftübertragungseigenschaften der Reifen auf die Fahrbahn bestimmt. Die Kraftkomponente, die vorrangig in der Querdynamik interessiert, ist die Seitenführungskraft F_y (Bild 3).



3 Koordinatendefinition im Rad-aufstandspunkt nach ISO 8855

Die qualitativen Zusammenhänge der verschiedenen Einflussgrößen mit der Seitenführungskraft F_y sind für Industrievollreifen weitgehend unbekannt. Allerdings weisen Ansätze solcher Kenntnisse aus der Literatur [2] und aus exemplarischen Messungen auf einem modifizierten Lkw-Reifenprüfstand darauf hin, dass von einem grundlegenden Verhalten ausgegangen werden kann, das dem der Luftreifen ähnlich ist.

Die Seitenführungskraft eines Reifens hängt in erster Linie vom Schräglaufwinkel α ab (Bild 4). Außerdem haben folgende Parameter einen Einfluss:

- ▶ Radlast F_z
- ▶ Radsturz γ
- ▶ Antriebs- oder Bremskraft F_x
- ▶ Rollreibungswert des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes μ .

Eine vorhandene Seitenführungskraft am Rad wird von einem Rückstellmoment M_z um die Hochachse des Rades begleitet, das auch als Lenkmoment bezeichnet wird.

Die Fahrstabilität wird durch die Kraftübertragung des Reifens in der Fahrbahnebene und durch seine Verformungen in seitlicher und vertikaler Richtung beeinflusst. Die Kombination dieser Eigenschaften entscheidet im Zusammenhang mit Schwerpunktlage und Fahrwerkskinematik des Gabelstaplers darüber, ob im Grenzbereich der Fahrstabilität das Fahrzeug schleudert oder kippt.

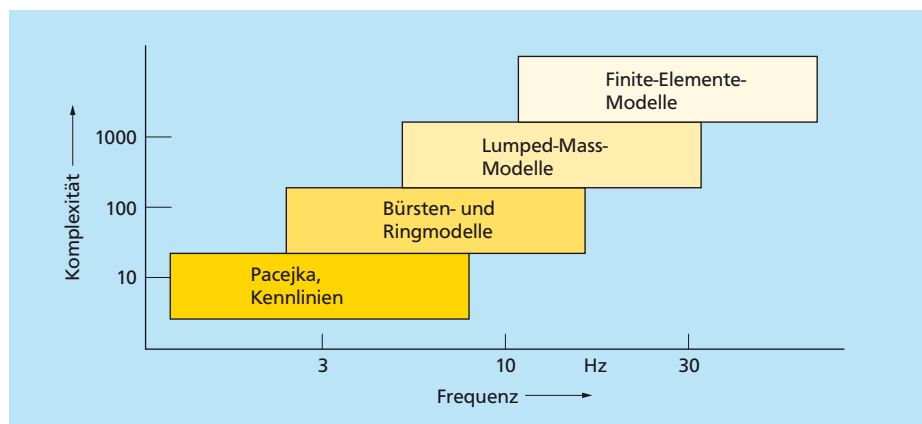
Simulation und Reifenmodell

Die Querdynamik von Gabelstaplern wurde in [3, 4] mithilfe der MKS-Simulation untersucht. Dabei lag der Untersuchungsschwerpunkt auf der seitlichen dynamischen Standsicherheit. In den bestehenden MKS-Fahrzeugmodellen werden Kfz-Reifenmodelle verwendet, die hinsichtlich ihres Funktionsumfangs und der verfügbaren Modellparameter für Gabelstapler nicht optimal geeignet sind. Durch eine Verbesserung in diesen Punkten soll die bestehende Simulationengenauigkeit weiter erhöht werden.

Für unterschiedliche Fragestellungen existieren in der Fahrzeugtechnik bereits verschiedene Reifenmodelle, z. B. zur Untersuchung der Fahrdynamik, des

Komforts oder der Akustik. Diese Modelle lassen sich hinsichtlich des verwendeten methodischen Ansatzes klassifizieren. So finden Finite Elemente-Modelle, kennlinienbasierte Modelle und MKS-Modelle mit unterschiedlichem Modellierungsgrad Anwendung. Die verwendeten Modellparameter können mathematisch oder physikalisch begründet sein. Die Komplexität der mechanischen Modellstruktur wird im Normalfall durch die Art der vorliegenden Fragestellung bestimmt (Bild 5). Für fahrdynamische Untersuchungen, die vergleichsweise niederfrequente Vorgänge darstellen, sind Modellansätze niedriger Komplexität ausreichend. Bei kennlinienbasierten Modellen werden die Eigenschaften des gesamten Reifens in einem einzigen Punkt, dem Kontaktpunkt der Radaufstandsfläche, abgebildet. Die Rechenzeiten und der Aufwand zur Parameterermittlung sind vergleichsweise gering. Statt der direkten Verwendung experimentell ermittelter Reifenkennfelder werden die Reifeneigenschaften bevorzugt durch mathematische Funktionen approximiert, die bei der Berechnung schnell gelöst werden können.

Bestehende Reifenmodelle sind auf die Verhaltensbandbreite von Luftreifen ausgelegt. Die Kombination der dargestellten Anforderungen für Gabelstaplerreifen soll durch einen speziellen Modellansatz erfüllt werden, der auf empirischen Kennlinien basiert. Da vor allem



5 Einordnung der Modellierungsansätze nach Komplexität und Dynamik [5]

für die Seitenführungskraft eine Abhängigkeit von mehreren anderen Parametern besteht, für deren Verläufe keine beschreibenden Gleichungen vorliegen, werden für den Ansatz künstliche neuronale Netze (KNN) verwendet. KNN eignen sich dazu, die gesuchten Ausgabewerte aus einem mehrdimensionalen Kennfeld von Eingangsgrößen anzunähern.

Aufbau eines Reifenprüfstandes

Am MTL wird derzeit ein neuer Reifenprüfstand realisiert, der speziell zur Ermittlung der Eigenschaften von Gabelstaplerreifen ausgelegt ist. So lassen sich vor allem relativ kleine Räder unter hohen Radlasten prüfen. Die Bauart entspricht einem Außen-Trommelprüfstand. Die funktionellen Anforderungen des Reifenmodells müssen als Betriebszustände durch den Prüfstand darstellbar sein. Diese Zustände werden einem Prüfreifen zur Aufnahme von Kennlinien aufgeprägt. Dabei sind maximal mögliche Schräglaufwinkel von bis zu 90° einstellbar. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf den Eigenschaften einer repräsentativen Bandbreite von SE-Reifen. Mithilfe des Prüfstandes lassen sich einerseits Trainingsdatensätze für das Reifenmodell ermitteln. Andererseits kann das Wissen über das Verhalten von Industriereifen erweitert werden.

Resümee und Ausblick

Bei der computergestützten Simulation der Querdynamik von Gabelstaplern bestehen spezielle Anforderungen an das Reifenmodell. Erstellt wurde ein neuer Ansatz für ein querdynamisches Reifenmodell für Gabelstaplerreifen. Die Modell-Eingabeparameter werden mithilfe eines neuen Reifenprüfstandes ermittelt. Mithilfe

dieses Prüfstandes kann das Wissen über das Verhalten der überwiegend verwendeten SE-Reifen erweitert werden. In Zukunft lassen sich dadurch Industriereifen nach neuen Kriterien, die die Fahrdynamik betreffen, beurteilen und auswählen. □

**LogiMAT 2010
Halle 1, Stand 620**

Literatur

- [1] Information der Continental AG, Hannover.
- [2] *Rappen, J.*: Eigenschaften kleiner Industriereifen insbesondere im Hinblick auf Kipp- und Fahrstabilität von Gabelstaplern. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb. 554. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 1988.
- [3] *Busch, N.; Höppner, O.; Bruns, R.*: Entwurf für dynamische Tests von Gabelstaplern. Beurteilung der Standsicherheit. Hebezeuge Fördermittel, Sonderheft Flurförderzeuge 2007, S. 56-58.
- [4] *Rebelle, J.; Mistrot, P.; Poirot, R.*: Development and validation of a numerical model for predicting fork lift truck tip-over. Vehicle System Dynamics, Taylor&Francis, DOI: 10.1080/00423110802381216, London 2008.
- [5] *Meywerk, M.*: CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik. Berlin: Springer 2007.

**Dipl.-Ing. (FH)
Nils Busch**
*ist Wissenschaftlicher
Mitarbeiter am Lehrstuhl
für Maschinenelemente und
Technische Logistik (MTL)
an der Helmut-Schmidt-
Universität Hamburg*



**Prof. Dr.-Ing.
Rainer Bruns**
*ist Leiter des Lehrstuhls
für Maschinenelemente und
Technische Logistik (MTL)
an der Helmut-Schmidt-
Universität Hamburg*

