

Tamás Szakács

# Modellierung und Simulation des Zugwinkels zwischen Anhänger und Zugmaschine

Der Zugwinkel zwischen Anhänger und Zugmaschine von landwirtschaftlichen Transportgespannen ist ein wichtiger Parameter für die Fahrzeuggespann-Querstabilität, der sowohl die Zugmaschinen als auch die Anhängerbewegung beeinflusst. Durch die Bestimmung dieses Wertes kann eine unerwartete Bewegung des Traktors oder des Anhängers anhand der Änderung des Zugwinkelwertes erkannt werden. Für die Bewertung des Zustandes der Fahrzeugstabilität müssen Ist- und Sollwerte (gemessen und errechnet) des Zugwinkels der Deichsel bekannt sein. Zu diesem Zweck muss eine Methode zur Bemessung und Berechnung des Zugwinkelwertes erarbeitet werden.

## Schlüsselwörter

Fahrzeuggespannstabilität, Landwirtschaftliche Transportsysteme, Zugwinkel

## Keywords

Vehicle-train stability, agricultural transport systems, pull-angle

## Abstract

Szakács, Tamás

## Modelling and simulation of tow angle between agricultural tractors and trailers

Landtechnik 65 (2010), no. 3, pp. 178-181, 8 figures, 2 references

The tow angle between tractors and trailers of agricultural transport vehicle combinations is an important parameter if vehicle-train stability is concerned. This angle is affected by both tractor and trailer behavior, thus unexpected movement of any of them can be recognized in unexpected change in tow angle. This makes the tow angle be an excellent parameter of vehicle-train lateral stability determination. In order to determine difference between expected and measured tow angles a measuring and a calculating method has to be developed.

Thema dieser Arbeit war eine Stabilitätsanalyse landwirtschaftlicher Transportsysteme, welche aus landwirtschaftlichem Traktor und Anhänger zusammengesetzt sind. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf Unfälle gerichtet, die durch eine erhöhte Druckkraft an der Deichsel verursacht wurden, hauptsächlich verursacht durch eine erhöhte Schubkraft des Anhängers, unausgeglichene Bremskraftbalancierung oder ungünstige Bodenbedingungen. Als Grundlage für die Entwicklung von Theorien zur Instabilität wurde ein Computermodell entwickelt, mit dem man in der Lage ist, das dynamische Verhalten von Fahrzeuggespannen zu simulieren. Für die Bestimmung der Fahrzeugstabilität benötigt man einen gemessenen und einen errechneten Wert des zu untersuchenden Parameters, der in diesem Fall der Zugwinkel ist. Im Folgenden werden eine Methode zur Berechnung des erwarteten Zugwinkels und ein Messgerät zur Bestimmung des Winkels sowie eine Plausibilitätsprüfung und deren Auswertung vorgestellt.

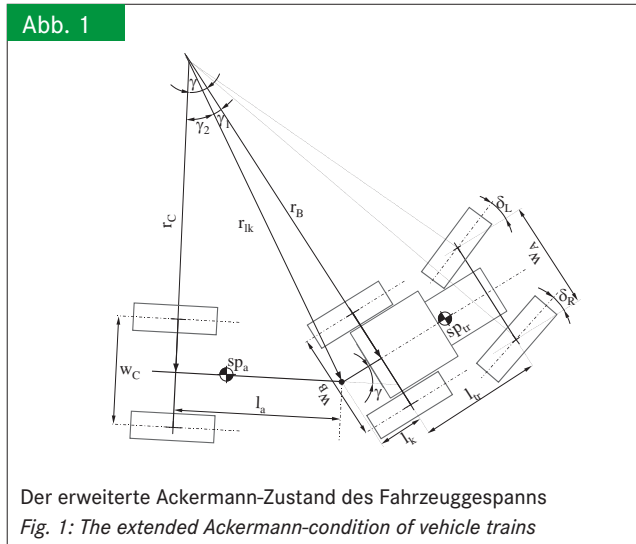
## Material und Methode

Bestimmung des Zugwinkels der Zugmaschine zum Anhänger: Der Zugwinkel (auch Deichselwinkel genannt) ist der Winkel zwischen dem Schlepper und dem Anhänger, wenn sich der Anhänger von der Mittelachse des Gespannes fortbewegt [1]. Befindet sich der Anhänger in der Mittelachse des Gespannes, beträgt der Zugwinkel  $\gamma 0^\circ$ .

Um den voraussichtlichen Wert des Zugwinkels zu bestimmen, wurde die Ackermannbedingung für Fahrzeuggespanne eingeführt. Abbildung 1 zeigt ein Gespann aus Ackerschlepper und angekoppeltem Anhänger.

Der Winkel der gelenkten Räder ( $\delta_L, \delta_R$ ) wird durch die herkömmliche Art der Bestimmung des Lenkungswinkels ei-

nes Vierradfahrzeugs durch die Methode von Ackermann [2] berechnet. Der erweiterte Zustand des Fahrzeugs nach der Definition von Ackermann wird erfüllt, wenn neben den Radachsen des Traktors auch die Räder des Anhängers in die theoretische Krümmungsmitte (Momentanzentrum) zeigen. Der  $\gamma_{stat}$  Zugwinkel im stationären Kurvenzustand kann wie folgt berechnet werden (**Abbildung 1**):



$$\gamma_{stat} = \gamma_1 + \gamma_2 \tag{Gl. 1}$$

wobei  $\gamma_1 = \arctan\left(\frac{l_k}{r_B}\right)$  (Gl. 2)

und  $\gamma_2 = \arcsin\left(\frac{l_a}{r_{lk}}\right) = \arcsin\left(\frac{l_a}{\sqrt{(l_k^2 + r_B^2)}}\right)$  (Gl. 3)

Gleichungen (2) und (3) eingesetzt in Gleichung (1) ergeben:

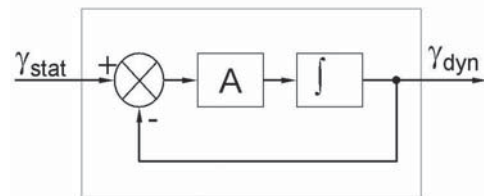
$$\gamma_{stat} = \arctan\left(\frac{l_k}{r_B}\right) + \arcsin\left(\frac{l_a}{\sqrt{(l_k^2 + r_B^2)}}\right) \tag{Gl. 4}$$

Der Wenderadius der Hinterachse ist:

$$r_B = \frac{l_{tr}}{\tan(\delta_L)} + \frac{w_A}{2} \tag{Gl. 5}$$

Der berechnete  $\gamma_{stat}$  statische Zugwinkel wird nur im stationären Krümmungszustand erreicht. Der Grund dafür ist, dass sich der Zugwinkel nur ändert, wenn sich der Fahrzeugzug bewegt. Im Gegensatz dazu verhalten sich die Winkel der gelenkten Räder ( $\delta_L, \delta_R$ ) durch mechanische Gesetzmäßigkeiten immer entsprechend den Ackermannwinkeln.

Abb. 2



Modell für die Ermittlung des tatsächlichen Zugwinkels  
Fig. 2: Model used for the determination of actual pull-angle

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein Modell oder eine Gleichung zu entwickeln, die den Wert des Zugwinkels auch im nicht stationären Zustand beschreibt.

**Abbildung 2** zeigt ein Blockschema für die Ermittlung eines nicht stationären Zugwinkels. Die Variable A ist der Reziprokwert der Zeitkonstante des Systems T1-Type.

In der Gleichung

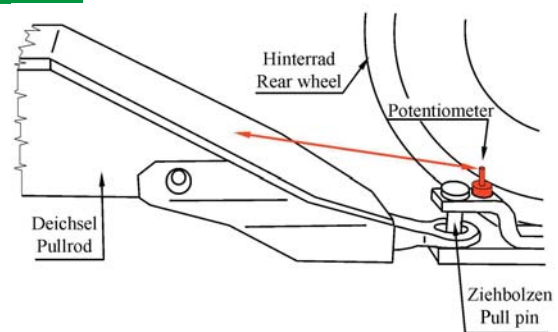
$$A = \frac{v_x^{tr}}{l_a + l_k} \left(\frac{1}{s}\right) \tag{Gl. 6}$$

ist  $v_x^{tr}$  die Traktorgeschwindigkeitkomponente in m/s. Die Zugwinkelermittlung erfolgt mittels einer Differentialgleichung der Form:

$$\frac{1}{A} \frac{d\gamma_{din}}{dt} + \gamma_{din} = \gamma_{stat} \tag{Gl. 7}$$

Messung des Zugwinkels: Ein Vorteil der Stabilitätsmittlung für Fahrzeuggespanne ist die einfache Messung des Zugwinkels. Der Sensor kann an den bereits vorhandenen Anhänger später leicht angebracht werden. **Abbildung 3** zeigt die Montageposition des Winkelmessinstrumentes und **Abbildung 4** zeigt das Messinstrument. Die teleskopische Stange weist am einen Ende einen Kugelkopf und am anderen ein Potentiometer auf, das mit einem Gelenk gekoppelt ist. Diese Stange gleicht alle Bewegungen zwischen Traktor und Anhänger aus; der Zug-

Abb. 3



Messen des Zugwinkels  
Fig. 3: Measuring the tow angle



winkel, der durch das Potentiometer geführt wird, wandelt die Winkelbewegung in ein Spannungssignal um.

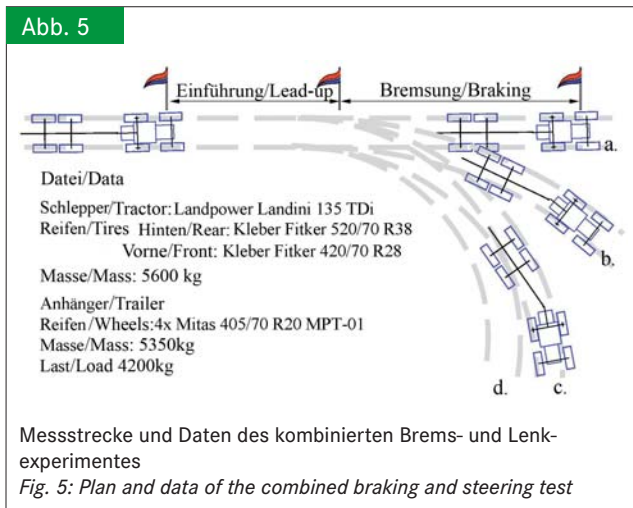
**Validierung durch Feldmessungen**

Kombiniertes Brems- und Lenkexperiment: Die Validierungsmessungen wurden unter Verwendung einer Transportfahrzeugkombination durchgeführt, welche aus dem ungarischen Anhänger SR-10 des Herstellers „Mezőgépfeljesztő Ipari Rt“ mit angetriebener Achse und einem Landini Traktor Landpower 135TDI bestand.

Die Messungen wurden im Bereich der Forstwirtschaft von Kisalföldi Erdőgazdaság Rt. am Standort von Ravazdi Erdészeti durchgeführt. Die Messstrecken sind in der **Abbildung 5** dargestellt. Beide Phasen, die statische Phase und die Bremsphase, waren 30 m lang. Die Lenkwinkel variierten von a bis d mit den Werten 0°, 7°, 15° und 28° (gemessen am linken Vorderrad).

Die Messungen wurden an einem trockenen, sonnigen Tag, bei Umgebungstemperaturen von 20 bis 23 °C, durchgeführt. Der Boden war ein gleichmäßig gepflegter, brauner Waldboden. Die Lichtungen waren mit Gras bedeckt.

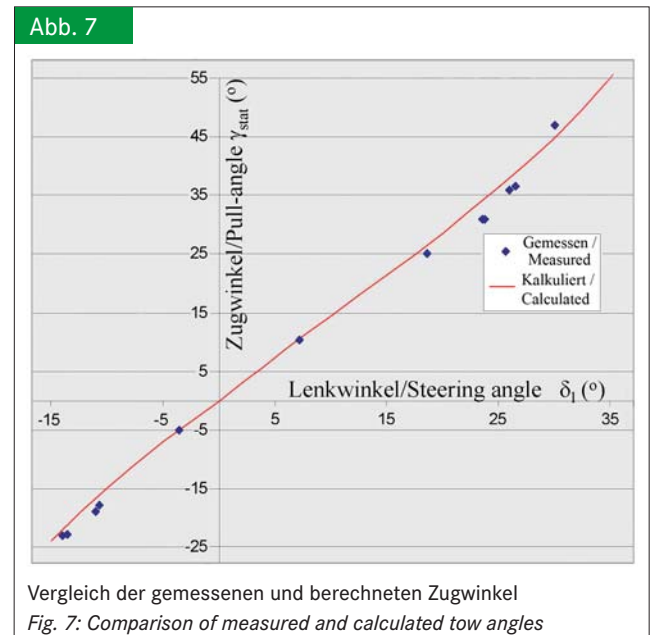
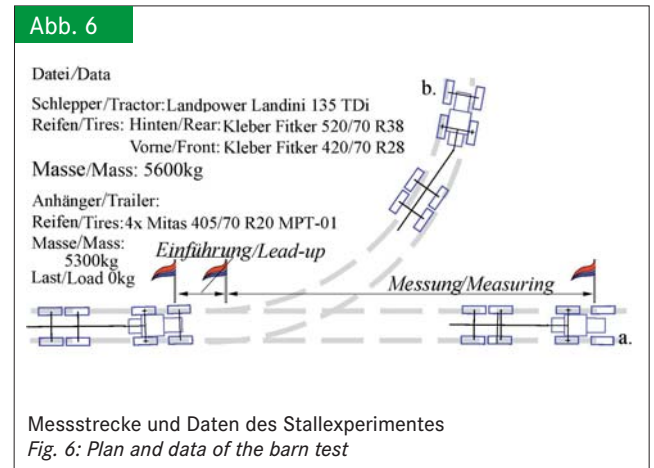
Das Kurvenfahrtexperiment: Das Ziel des Kurvenfahrtexperimentes war die Validierung der Sollwertermittlung vom Zugwinkel im stationären und nicht stationären Zustand. Die Messstrecke begann mit einer Startphase und wurde gefolgt von einer Kreisbewegung bei maximalem Lenkwinkel des Traktors. Das Ziel des Kurvenfahrtexperimentes war es, das Fahrzeugespann in einen extremen Zustand zu bringen, um das Stabilitätsprogramm zu validieren und die Berechnungsmethode des Zugwinkels zu bestätigen. Während des Tests war nur der Anhängerantrieb aktiv.



Das Stallexperiment: Das Stallexperiment wurde in einem unbenutzten Stall durchgeführt, in dem der Boden aus Tierstreu in Form von feinem Sand bestand, der für den Versuchszweck ideal war. Auf dem Boden wurde eine kurze Strecke markiert, um einen nahezu stationären Zustand der Bewegung der Fahrzeugkombination zu erzielen, gefolgt von a) einer 20 m langen, geraden Strecke und b) einer Linkskurve (**Abbildung 6**).

**Ergebnisse**

Zugwinkelermittlung im stationären Zustand: **Abbildung 7** zeigt den Vergleich der gemessenen und berechneten Zugwinkel. Die kontinuierliche Linie auf dem Diagramm zeigt den stationären Zustand der Zugwinkelfunktion (**Gleichung 4**). Die Rauten sind die entsprechenden Zugwinkel-Lenkungswinkel Punktpaare im stationären Zustand, die aus den Daten der Feldmessungen gewonnen wurden. Dieses Resultat validiert die Ermittlungsmethode des Zugwinkels. Das Bestimmtheitsmaß beträgt:  $R^2 = 0,98$ .



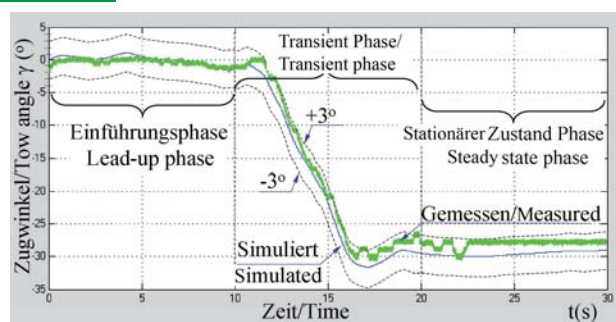
Ermittlung des Zugwinkels im nicht stationären Zustand: Von den erfassten Messdaten des Kurvenfahrt-Experimentes sind Geschwindigkeit, Steuerung und Zugwinkeldaten ausgewählt worden. Um die Messungen zu reproduzieren, wurde ein Computermodell des Transportgespannes geschaffen, welches dem Testmodell gleichwertig und in die Simulationen eingebunden ist. Der Zugwinkel, der anhand der Simulation produziert wurde, wurde mit dem gemessenen Wert verglichen (**Abbildung 8**). Die Abbildung ist in 3 Phasen unterteilt worden, welche als Einführungsphase (Start), Transient Phase (nicht stationär) und stationärer Zustand bezeichnet sind. Ein  $\pm 3$  Grad Toleranzband wurde um den simulierten Zugwinkel gezogen, was 3 Grad absoluter Toleranz und 10 % relativer Toleranz bei 30 Grad des Zugwinkels entspricht. Der gemessene Zugwinkel blieb innerhalb des Toleranzbandes. Das Modell, das für die

Bestimmung des instabilen Zustandes des Zugwinkels benutzt wurde, gibt zufriedenstellende Resultate wieder. Folglich kann es als Parameter zur Fahrzeugzugstabilitätsmittlung genutzt werden.

### Schlussfolgerungen

Anhand einer Serie von Messungen wurde die Methode zur Ermittlung von Zugwinkeln validiert. Der Sollwert des Zugwinkels kann mit dem gemessenen Wert verglichen werden. Mittels der Abweichung kann auf die Stabilität des Fahrzeugzuges geschlossen werden. Unerwartete Änderungen des Zugwinkels können entweder durch den Traktor oder den Anhänger verursacht werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass ein unerwartetes Verhalten von Zugfahrzeugen oder Anhängern bestimmt werden kann, um Unfälle zu vermeiden.

Abb. 8



Vergleich der gemessenen und simulierten Zugwinkel in 3 Phasen  
 Fig. 8: Comparison of measured and simulated tow angles over 3 phases

### Literatur

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Towing definitions on the ProPride Inc. home page. [http://www.propride-hitch.com/trailer\\_sway/towing\\_definitions.html](http://www.propride-hitch.com/trailer_sway/towing_definitions.html), Zugriff am 02.01.2010
- [2] ● Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band C, Springer Verlag, Berlin, 1990

### Autor

**Tamas Szakacs** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität von Óbuda, „Donát Bánki“, Fakultät Maschinenbau und Sicherheitstechnik, Bécsi Út 96/B, 1034 Budapest, Ungarn, E-Mail: szakacs.tamas@gek.szie.hu

### Danksagung

Der Autor dankt der Forstwirtschaft von Kisalföldi Erdőgazdaság Rt für die Bereitstellung der Fahrzeuges, der Mannschaft für das Messen, Prof. Péter Szendrő und Prof. Lajos Laib für die versuchstechnische und weitere Unterstützung sowie Jens Fehrmann und Mario Gröllich für die Hilfe bei der Übersetzung ins Deutsche.