

Steffen Hürter, Sebastian Götz und Heinz Bernhardt

Vergleich von simulierten und reellen Schleppkurven von Landmaschinen

An das landwirtschaftliche Wegenetz werden durch die kontinuierliche Größenentwicklung von Landmaschinen neue Anforderungen gestellt. Die Maschinen werden breiter und länger und besitzen mehr Achsen und komplexere Lenksysteme als in der Vergangenheit. Beim landwirtschaftlichen Wegebau hat dies insbesondere Auswirkungen auf die Planung der Kurven. In der Untersuchung wurden die Schleppkurven aktueller Landmaschinen aufgenommen und es wurde geprüft, ob sie mithilfe einer Software simuliert werden können. Dabei zeigt sich, dass die verwendete Simulationssoftware für die Bestimmung von Schleppkurven für Landmaschinen mit komplexen Lenksystemen hinreichend genau ist.

eingereicht 15. November 2013

akzeptiert 20. Januar 2014

Schlüsselwörter

Schleppkurven, landwirtschaftlicher Wegebau, Simulation

Keywords

Tractrix, road construction, simulation

Abstract

Hürter, Steffen; Götz, Sebastian and Bernhardt, Heinz

Comparison of simulated und real tractrix of agricultural machines

Landtechnik 69(1), 2014, pp. 25–29, 6 figures, 10 references

Farm roads and tracks have to be regularly updated to help meet the requirements of agricultural machinery that continually increases in size. The machines become wider and longer, with more axles and increasingly complex steering systems. With farm road construction this leads to special requirements for the layout of curves in particular. In this investigation the tractrix curves of actual farm machinery were recorded and tests were carried out to determine whether they could be simulated by using appropriate software. The result showed a satisfactory degree of precision by the simulation software in determination of tractrix curves for agricultural machinery with complex steering systems.

Die landwirtschaftliche Betriebs- und Flächenstruktur ist durch ein stetiges Größenwachstum gekennzeichnet. Die notwendige Weiterentwicklung von landwirtschaftlichen Maschinen verändert diese in Form und Größe. Diese Entwicklung wird aktuell in Deutschland durch die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) stark reglementiert [1]. Aber nicht nur der allgemeine Verkehr, sondern auch die landwirtschaftlichen Wege sind davon betroffen. Werden die in die Jahre gekommenen Feldwege von modernen landwirtschaftlichen Maschinen genutzt, kann es zu Beschädigungen der Wege kommen, z. B. aufgrund der hohen Achslast. Wenn ein Feldweg nicht auf die erforderliche Schleppkurve ausgelegt ist, kommt es bei Kurvenfahrten auf längere Sicht zwangsläufig zu einer Zerstörung des Wegbankettes [2].

Im Straßenbau werden zur Planung von Einmündungen bereits Simulationsmodelle angewendet [3; 4; 5; 6]. Um die Eignung von Schleppkurven-Simulationsprogrammen für landwirtschaftliche Traktoren mit Anbaugeräten und Anhängern sowie Selbstfahrern zu prüfen, wurden die Schleppkurven der Fahrzeuge aufgenommen und mit einer Simulation verglichen.

Damit neu gebaute Feldwege für moderne Landmaschinen ausreichend dimensioniert werden, aktualisiert die DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) derzeit die Richtlinie für den ländlichen Wegebau [7].

Material und Methoden

Für einen Vergleich zwischen Realität und Simulation werden im Praxisversuch verschiedene typische Maschinenkombinationen analysiert:

- ein mittelgroßer Allradschlepper (145 kW) mit einem fünfscharigen Anbaupflug und einem Frontanbaugewicht,

- ein Allradschlepper (133 kW) mit einem Tandemstarrdeichselanhänger,
- ein Allradschlepper (133 kW) mit zwei Gelenkdeichselanhängern,
- ein sechsstufiger Zuckerrübenroder und
- ein mittelgroßer Mähdrescher (5,10 m Arbeitsbreite) mit nachgezogenem Schneidwerksanhänger.

Die Aufzeichnung der Schleppkurven findet in einer ausreichend großen Halle mit Betonfußboden statt. Für den Fahrer ist eine 90°-Kurve markiert, die den aktuellen Vorgaben für landwirtschaftlichen Wegebau entspricht (**Abbildung 1**).

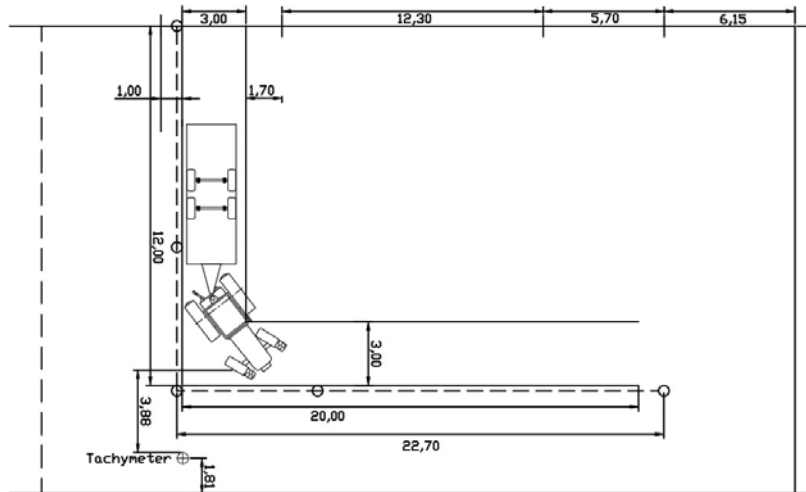
Die Bestimmung der bis zu acht Einzelkurven der Schleppkurven erfolgt sowohl aus Zeit- und Kostengründen als auch technischen Schwierigkeiten mit eng nebeneinanderliegenden Antennen nicht mit GNSS-Technik. Die Kurven werden daher mit verschiedenfarbigem Sand aufgezeichnet und mittels Ta-

chymeter digitalisiert. Die bei den Messungen auftretenden Ungenauigkeiten < 2 cm lagen innerhalb der Spannweite anderer Untersuchungen [8].

Für die Simulation werden die Fahrzeuge in dem Schleppkurvenprogramm autoTURN als Gittermodell auf Basis der Fahrzeugabmessungen und möglichen Einschlagwinkeln abgebildet. Die digitalisierte reelle Kurve wird in das Programm eingefügt und dient als Vorlage und Konstruktionshilfe. Die digital abgebildeten Fahrzeuge werden daran entlanggeführt und beschreiben so die simulierte Schleppkurve. Als Ergebnis werden die digitalisierte reelle Schleppkurve und die simulierte Schleppkurve übereinander gelegt und analysiert.

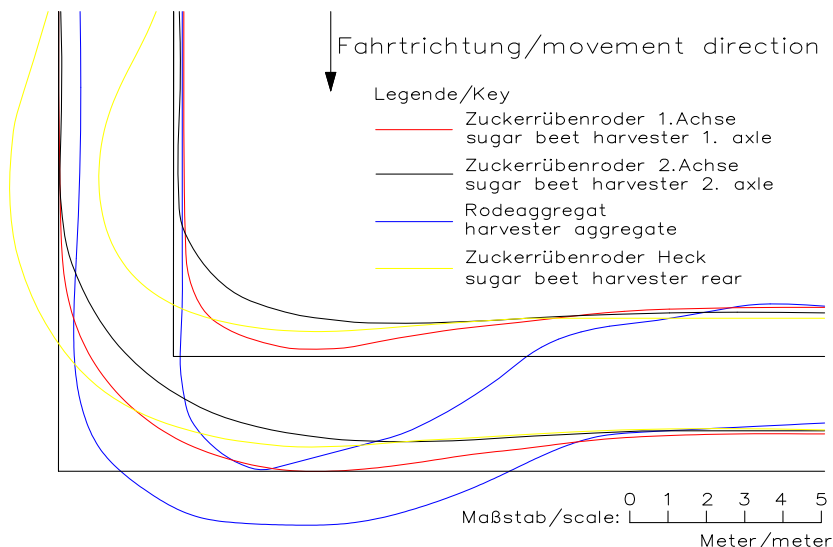
Für den Vergleich wird sowohl der überfahrene als auch der überstrichene Flächenbedarf ermittelt. Die überfahrene Fläche, die lediglich vom Fahrwerk des Fahrzeugs beansprucht wird, gibt die Abmessungen für die befestigte Fahrbahn vor. Die von

Abb. 1



Versuchsaufbau
Fig. 1: Experimental setup

Abb. 2



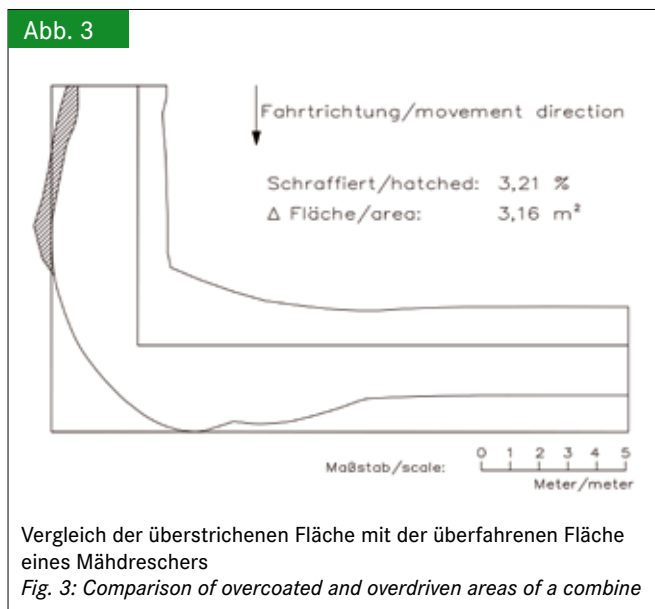
Schleppkurve des Zuckerrübenroders
Fig. 2: Tractrix of a sugar beet harvester

der gesamten Fahrzeugkombination überstrichene Fläche dagegen gibt bei der Kurvenfahrt an, welcher Freiraum über die Fahrbahn hinaus ohne Hindernisse vorzuhalten ist. Diese Differenzierung der Flächen ist für die Standardmodelle im Straßenverkehr nicht notwendig [9; 10].

Ergebnisse

Ergebnis des praktischen Versuchs

Abbildung 2 zeigt die gemessenen Schleppkurvenelemente eines zweiachsigen Zuckerrübenrodgers mit gleichzeitiger Knick- und Achsschenkelenkung. Die rote und die schwarze Linie der ersten und zweiten Achse begrenzen die überfahrene Fläche des Roders, während die blaue und die gelbe Linie die vordere und hintere Außenkante des Roders und somit die überstrichene Fläche abbilden.



Als Vergleichsmaß für die Schleppkurven wird die Kurvenschnittlinie genutzt. Dieses Maß basiert auf der Länge der Winkelhalbierenden vom Schnittpunkt der beiden äußeren Wegränder bis zur inneren Linie der Schleppkurve. Diese Kurvenschnittlinie beträgt beim Traktor mit Pflug 2,67 m, beim Traktor mit Tandemanhänger 7,72 m, beim landwirtschaftlichen Gliederzug 8,41 m, beim Zuckerrübenroder 6,69 m und beim Mähdrescher 7,40 m.

Bei der Aufzeichnung der Schleppkurven wird sowohl die überstrichene Fläche als auch die überfahrene Fläche abgebildet. Die Differenz der überfahrenen zur überstrichenen Fläche wird ermittelt und beträgt z.B. beim Mähdrescher 3,21 % (Abbildung 3) und beim Zuckerrübenroder 21,25 %.

Simulation der Schleppkurven und Vergleich mit den gemessenen Kurven

Für die Simulation der Fahrzeuge werden die benötigten Fahrzeugparameter in vorgefertigte Fahrzeugmodelle eingesetzt. Anschließend werden sie an den reellen Hüllkurven positioniert und wie die reellen Fahrzeuge durch die Kurve geführt. Durch die identischen Kurvenfahrten kann daraufhin die Genauigkeit der Simulation ermittelt werden. Die simulierten Fahrzeuge haben das gleiche Kurvenverhalten wie ihre reellen Vorbilder und überstreichen die Flächen in der Simulation nahezu in gleicher Form wie in der Realität. Allerdings sind auch Abweichungen zu verzeichnen: Beim Versuchsgespann Allradschlepper mit Vollandpflug und Anbaugewicht beispielsweise beträgt diese 5,62 % (Abbildung 4), was dem größten gemessenen Wert entspricht, der im gesamten Versuch festgestellt worden ist. Für die Software ist es unproblematisch, die Anbaugeräte zu simulieren. Sehr genau ist die Simulation für Maschinenkombinationen, die aus einer Zugmaschine und Anhängern bestehen, da die Fahrzeugkombination den bereits implementierten LKW-Modellen sehr nahe kommt. Beim Vergleich von Simulation und Realität des Allradschleppers mit Tandemstarr-

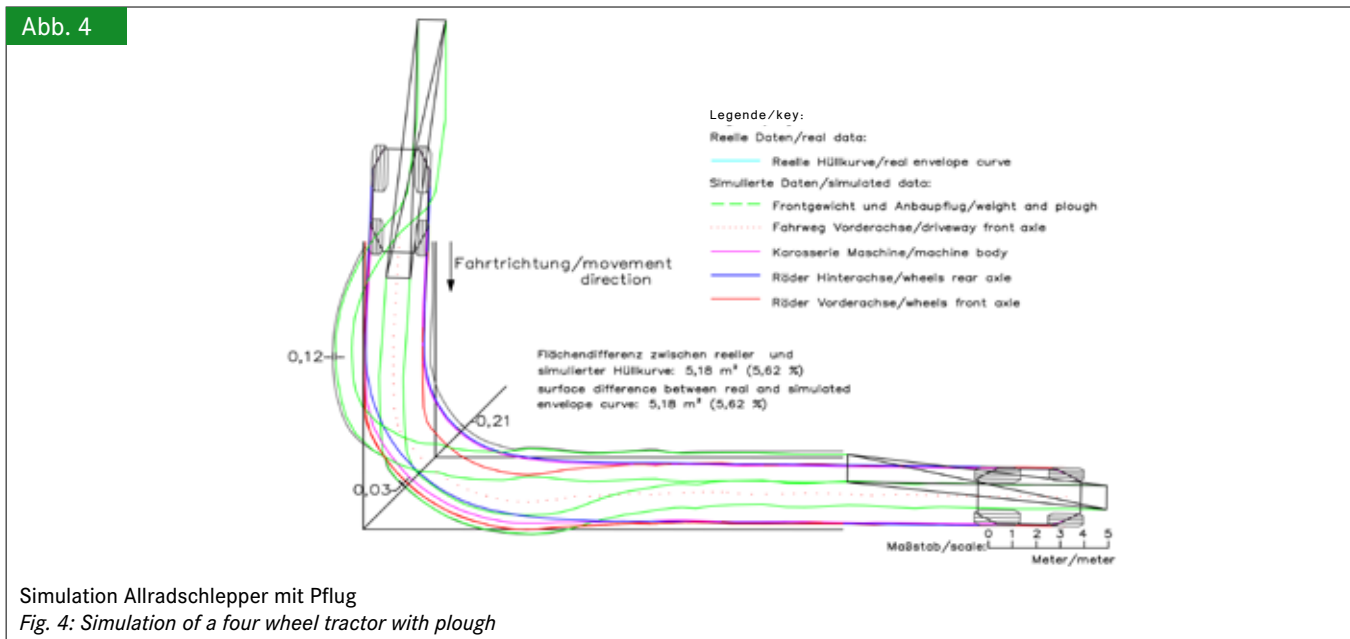
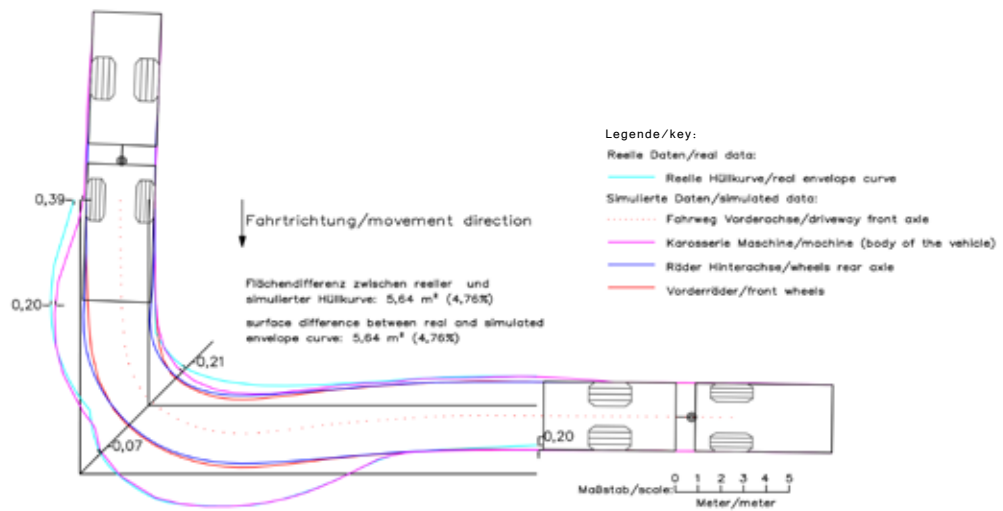


Abb. 5



Schleppkurvensimulation Zuckerrübenroder
 Fig. 5: Tractrix simulation of a sugar beet harvester

deichselanhänger weicht der Wert lediglich um 2,69 % ab. Beim Maschinengespann Allradschlepper mit zwei Gelenkdeichselanhängern betrug der Unterschied 3,89 %. Diese Werte sind hinreichend genau, sodass sie zukünftig zur Vorplanung im Wegebau herangezogen werden können. Dagegen ergeben sich aus dem individuellen Einfluss des Fahrers bei der Maschinenlenkung weitaus größere Abweichungen als zwischen Versuch und Simulation.

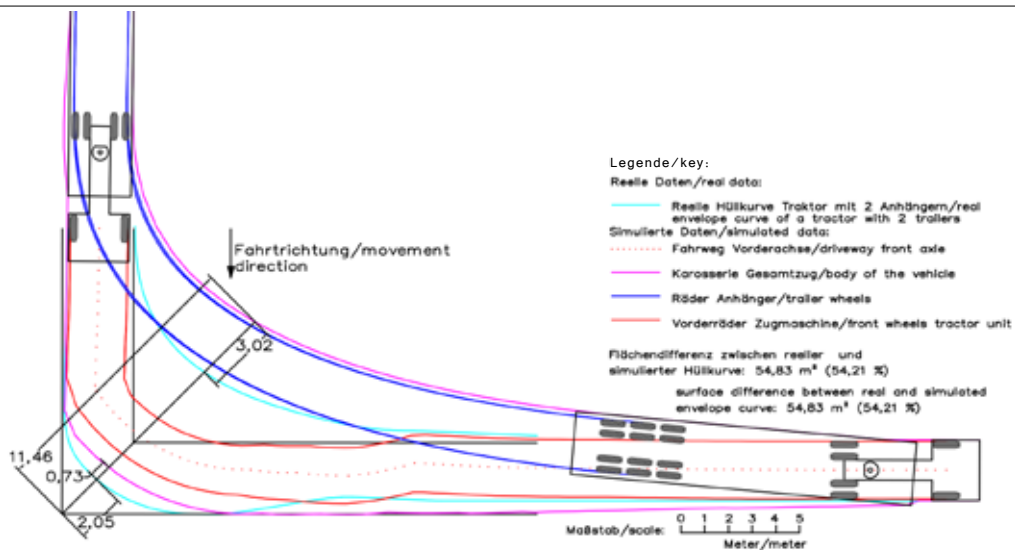
Bei selbstfahrenden Maschinen wie Zuckerrübenroder und Mähdrescher mit Schneidwerksanhänger ist die Konstruktion der Fahrzeugmodelle ein wenig komplizierter. Der Zuckerrübenroder wird mithilfe zweier Fahrzeuge konstruiert, um die Kombination aus Knicklenkung und Achslenkung zu simulieren. Die Abweichung beträgt 4,76 % (Abbildung 5). Beim Vergleich der Kurven fällt auf, dass das Heck des Rübenroders in

der Realität etwas früher ausschwenkt als in der Simulation, da zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung in der Simulation noch nicht berücksichtigt werden konnte, dass die Allradlenkung und die Knicklenkung am Fahrzeug abhängig voneinander zusammenarbeiten.

Bei der Konstruktion des Mähdreschers besteht die Schwierigkeit in der Abbildung der Fahrzeughecklenkung. Für die Simulation wird daher ein rückwärtsfahrendes Fahrzeug mit Anhänger eingesetzt. Die Abweichung von Simulation und Realität beträgt 5,16 % und liegt in der gleichen Größenordnung wie bei den anderen Maschinen.

Um den Flächenbedarf landwirtschaftlicher Fahrzeuge ins Verhältnis zu dem von anderen Transportfahrzeugen setzen zu können, wird eine Schleppkurve für einen Sattelzug simuliert und mit der in der Untersuchung größten Schleppkur-

Abb. 6



Schleppkurvensimulation, Vergleich Sattelzug und Traktor mit zwei Gelenkdeichselanhängern
 Fig. 6: Tractrix simulation, comparison of a truck and a tractor with two trailer

venfläche des Allradschleppers mit zwei Gelenkdeichselanhängern verglichen. Das Ergebnis zeigt, dass die weit verbreitete Aussage, dass Landmaschinen mit Straßenabmessungen mehr Probleme haben, so nicht haltbar ist. Die Strecke der Winkelhalbierenden beim landwirtschaftlichen Gliederzug beträgt 8,41 m und beim Sattelzug 11,46 m (**Abbildung 6**). Selbst bei der Analyse der überstrichenen Fläche passt diese immer noch in die Spurfläche des Sattelzugs.

Schlussfolgerungen

Die Vergleiche von simulierten und reellen Schleppkurven zeigen, dass mit der Simulationssoftware Schleppkurven für landwirtschaftliche Maschinen in ausreichender Genauigkeit erzeugt werden können. Bei der Planung von Feldwegen kann der Flächenbedarf von ausscherenden Maschinen- oder Anbauteilen simuliert werden, sodass die Lage und die Größe von Sicherheitsflächen und Fahrbahnen bestimmt werden können. Somit kann im Voraus berücksichtigt werden, dass sowohl die Fahrbahn als auch der Freiraum für den überstrichenen Bereich ausreichend dimensioniert werden.

Literatur

- [1] Heitmann, G. (2012): Landwirtschaftliche Fahrzeuge im Straßenverkehr, Bonn, aid Infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz e.V.
- [2] KTBL (2005): Landwirtschaftliche Wege, Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
- [3] Osterloh, H. (1991): Straßenplanung mit Klothoiden und Schleppkurven - Einrechnung von Trasse und Gradienten, Wiesbaden, Bauverlag
- [4] Fong, K. T.; Chenu, D. C. (1986): Simulation of truck turns with a computer model, Design and operational effects of geometrics, Transportation Research Record 1100, pp. 20-29
- [5] Weyand, C.; Balcerak, E.; Zobel, D. (2011): A generic method to determine space-saving corridor segments for trucks with one-axle trailer, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 7-11 Dec. 2011, Phuket, pp. 620-625
- [6] Sayers, M.W. (1991): Exact Equations for Tractrix Curves Associated with Vehicle Offtracking. Vehicle System Dynamics 20(5), pp. 297-308
- [7] Kuratorium für Wasser und Kulturbauwesen und Deutscher Verband für Wasserwirtschaft (Hg.) (1976): RLW 1975: Richtlinien für den ländlichen Wegebau. Hamburg, Paul Parey Verlag
- [8] Gräfe, G.; Heister, H.; Wirth, W. (2001): Schleppkurven-Symposium 2001. München, Eigenverlag Universität der Bundeswehr München
- [9] Schult, R.; Holzwarth, J (1988): Der Flächenbedarf repräsentativer Lastzug- und Sattelzugkombinationen im Straßenverkehr, Straßenverkehrstechnik 32(1), S. 8-16
- [10] Haller, W. (1983): Fahrgeometrische Bemessung von Verkehrsanlagen mit Schleppkurven. Straße und Autobahn 34(11), S. 471-474

Autoren

Steffen Hürter ist Student der TU München und bearbeitete die Fragestellung im Rahmen seiner Bachelorarbeit, **Sebastian Götz** war wissenschaftlicher Mitarbeiter und Betreuer und **Prof. Dr. Heinz Bernhardt** ist Ordinarius des Lehrstuhls für Agrarsystemtechnik der Technischen Universität München, Am Staudengarten 2, 85354 Freising, E-Mail: heinz.bernhardt@wzw.tum.de

Danksagung

Der Firma Transsoft Solutions wird für die Unterstützung bei der Implementierung in die Software AutoTURN® gedankt. Weiterer Dank gilt der DWA für die finanzielle und technische Unterstützung bei der Versuchsdurchführung sowie dem BBLV Hofheim für die Untersuchungsmaschinen und den Versuchsstandort.