

Simulationsgestützte Entwicklung eines Lenkkonzeptes für Routenzüge

Simulation-based development of a steering concept for tugger trains

Stephan Ulrich
Rainer Bruns
Konstantin Krivenkov

Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik (MTL)
Helmut-Schmidt-Universität

Schleppzüge haben für den innerbetrieblichen Materialtransport in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Wichtige Eigenschaften sind die Manövrierbarkeit und die Spurtreue, da sie maßgeblich den Flächenbedarf bestimmen. In diesem Beitrag wird das Nachlaufverhalten von Schleppzügen, die sich durch ihr Fahrwerks- und Lenkkonzept unterscheiden, untersucht sowie eine neue Lenkinematik vorgestellt. Um die Spurtreue der verschiedenen Konzepte objektiv vergleichen zu können, werden zunächst Fahrmanöver und ein Gütekriterium definiert, so dass die Abweichungen von der Spurtreue quantitativ beschrieben und verglichen werden können. Mit einem in diesem Beitrag vorgestellten analytischen Modell können bereits für die stationäre Kreisfahrt wichtige Aussagen über die Spurabweichungen getroffen werden. Zusätzlich werden Simulationen durchgeführt, die eine tiefere physikalische Modellierung und die Untersuchung komplexerer Fahrmanöver erlauben. Außerdem wird dargestellt, dass auch die Art des Fahrmanövers Einfluss auf die Spurabweichung hat. Fahrwerks- und Lenkkonzepte, die bei stationärer Kreisfahrt ein sehr gutes Nachlaufverhalten aufweisen und bisher als spurtreu bezeichnet wurden, zeigen beim Ein- oder Ausfahren aus der Kurve zum Teil erhebliche Spurabweichungen. Mit diesen Erkenntnissen wird ein neues Lenkkonzept vorgestellt, das sich insbesondere durch einen sehr einfachen Aufbau sowie eine hohe Spurtreue auszeichnet.

[Schlüsselwörter: Routenzug, Schleppzug, innerbetrieblicher Transport, Spurtreue, Lenkkonzept]

Tugger trains became more important for in-house transport in the last years. Important properties of these trains are the manoeuvrability and the tracking capability, because they determine the space requirements. In this article the tracking capability of tugger trains with different steering concepts is discussed. To compare the directional stability objectively driving manoeuvres and a quality criterion are defined. With an analytic model important results for the steady-state circular course drive can

be calculated. Additionally more complex driving manoeuvres are simulated. It can be demonstrated that the nature of the driving manoeuvres influences the tracking capability. Steering concepts that are directional stable at steady state circular courses are unstable at not-circular courses. With the help of these results a new steering concept is developed which is distinguished by a very simple design a good directional stability.

[Keywords: tugger train, in-house transport, tracking capability, steering concept]

1 EINLEITUNG

Neben den klassischen Anwendungsbereichen, wie dem Gepäcktransport auf Flughäfen und Bahnhöfen werden Routenzüge zunehmend zur Materialversorgung von Montagearbeitsplätzen in der Produktion verwendet. Gerade für den innerbetrieblichen Materialtransport haben sie auch im europäischen Raum in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Ein Grund für den zunehmenden Einsatz von Routenzügen in der Produktion ist der Wunsch, Arbeitsplätze hochfrequent mit dem benötigten Materialien wirtschaftlich versorgen zu können, um die Bevorratung möglichst gering zu halten. Die geforderte erhöhte Flexibilität in der Produktion erfordert auch eine leicht wandelbare Materialversorgung.

Vor diesem Hintergrund ist der Routenzug als Bindeglied zwischen effizienten aber unflexiblen Stetigförderern und flexibel einsetzbaren aber für die ständige Versorgung von Produktionslinien ineffizienten Unstetigförderern wie Flurförderzeugen zu sehen.

Ein Routen- oder Schleppzug besteht aus einem motorisch angetriebenen Schleppfahrzeug und einem oder mehreren Anhängern. Die Anhänger müssen einfach, schnell und ohne weitere technische Hilfsmittel be- und entladen werden können. Gerade im Produktionsumfeld ist zudem die Spurtreue der Anhänger eine wichtige Eigenschaft, da sie maßgeblich den benötigten Flächenbedarf beeinflusst und sicherheitsrelevant ist.

Weitere Informationen zum Einsatz und zur Technik von Routenzügen sind u.a. in [BEU1988], [BEU1990] und [SCH1998] zu finden. Die Studie [GUE2012] zeigt den aktuellen Stand und die Entwicklung des Einsatzes von Routenzügen.

2 ACHS- UND LENKKONZEPTE

Auf dem Markt ist eine Vielzahl unterschiedlicher Achs- und Lenkkonzepte verfügbar, angefangen von sehr einfachen, wie z.B. Anhänger mit Mitlaufrollen bis zu aufwändigen Allradgelenkten Routenzügen, die aktiv durch Stellmotoren gelenkt werden. Bei der Entwicklung oder Auswahl eines Konzeptes muss abgewogen werden, ob ein einfaches und günstiges Konzept, das jedoch ggfs. über eine schlechte Spurtreue verfügt, verwendet wird, oder teure Routenzüge mit aufwändigen Lenkmechanismen genutzt werden sollen.

Eine Auswahl vielfach verwendeter Achs- und Lenkmechanismen, anhand derer im Folgenden die Spurtreue diskutiert wird, ist in Abbildung 1 dargestellt. Grundsätzlich kann zwischen 2-Rad- und 4-Rad-Anhängern unterschieden werden. Die 2-Rad-Anhänger verfügen in der Regel über eine starre Deichsel, die über eine Kupplung mit der Deichsel des nächsten Anhängers verbunden ist. Der Drehpunkt der Kupplung, der maß-

geblich das Lenkverhalten beeinflusst, kann mittig oder weiter vorn angeordnet sein.

Die Räder sind nicht gelenkt. Diese einfache Bauweise hat jedoch den Nachteil, dass die Achsen unter den Lasten angeordnet sind, so dass die Last entsprechend angehoben werden muss. Zudem sind die Anhänger abgekoppelt nicht standsicher.

Als Beispiele für das Lenkkonzept 4-Rad-Anhänger sind die Drehschemellenkung und die Allrad-Achsschenkellenkung genannt. Bei der Drehschemellenkung ist eine starre Deichsel mit der vorderen Achse verbunden und an den vorderen Anhänger angekoppelt. Beim Abbiegen des vorderen Fahrzeuges, wird über die Deichsel die gesamte vordere Achse eingelenkt. Ein deutlich aufwändigeres System ist die Allrad-Achsschenkellenkung. Hier werden alle Räder gelenkt. Dies kann entweder aktiv durch Stellmotoren oder mechanisch geschehen. Die motorische Lösung erfordert die Versorgung jedes Anhängers mit elektrischer oder hydraulischer Leistung sowie die Weiterleitung von Steuer- und Sensorsignalen. Bei der mechanischen Lenkung, wird über die Auslenkung der Deichsel ein Hebelmechanismus betätigt, der die einzelnen Räder verstellt. Auch diese Lösung ist mit einem erheblichen konstruktiven Aufwand verbunden. Insbesondere die Anbindung der hinteren Achse, ist gerade bei der Verwendung von U-Rahmen, bei denen der Lenkmechanismus über den oberen Rahmen geführt werden muss, aufwändig und verschleißanfällig.

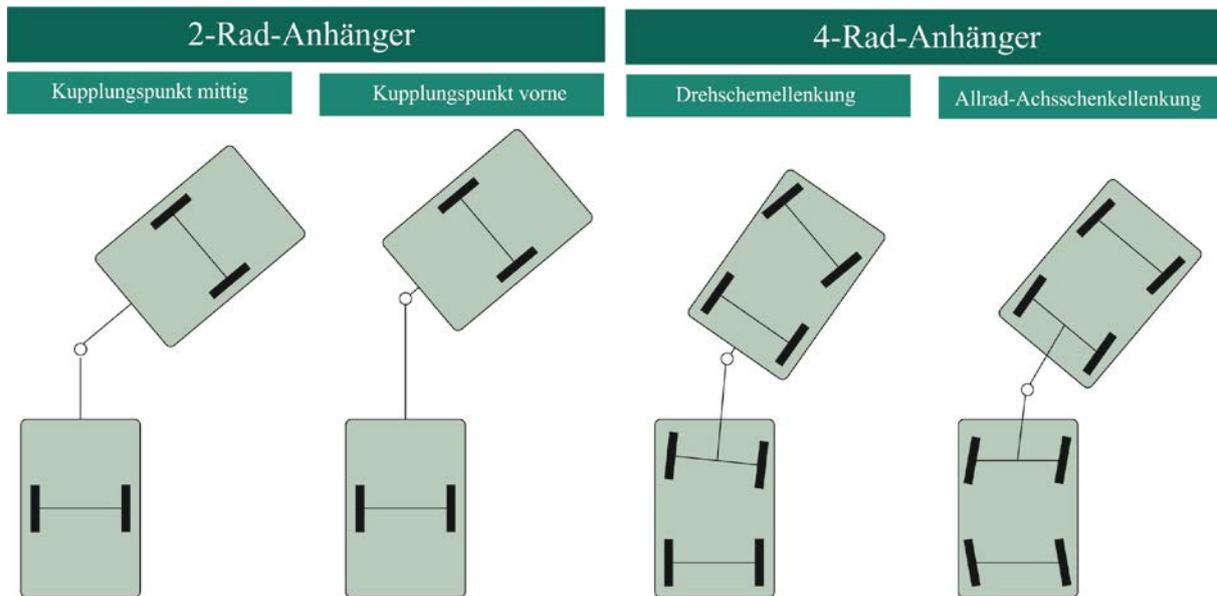


Abbildung 1. Beispiel für Lenk- und Achskonzepte von Routenzuganhängern

Zur Analyse der Spurtreue dieser Konzepte ist es notwendig neben der stationären Kreisfahrt, bei der der Lenkradius konstant ist auch instationäre Vorgänge mit veränderlichem Kurvenradius zu betrachten. Beispielsweise ist der 2-Rad-Anhänger mit mittig angeordnetem Kupplungspunkt bei stationärer Kreisfahrt spurtreu (Abbildung 2). In einigen Veröffentlichungen wird dieses Konzept daher auch als spurlaufend bezeichnet. Betrachtet man jedoch denselben Routenzug beim Hineinfahren in eine Kurve, so stellt man fest, dass der Anhänger erheblich von der Spur abweicht (Abbildung 3). Er wird zunächst entgegen der Kurve ausgelenkt. Dies ist gerade für ungeübte Fahrer problematisch, da das Ausschwenken vielfach nicht zum Erfahrungswissen gehört.

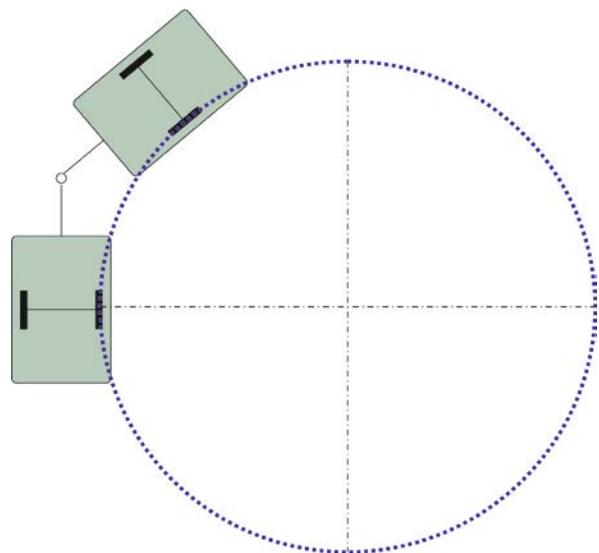


Abbildung 2. 2-Rad-Anhänger mit starrer Deichsel mit mittigem Kupplungspunkt bei stationärer Kreisfahrt

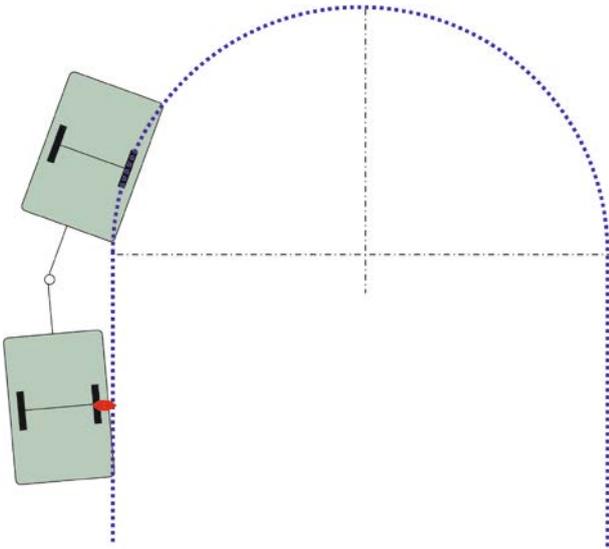


Abbildung 3. 2-Rad-Anhänger mit starrer Deichsel mit mittigem Kupplungspunkt beim Hineinfahren in die Kurve

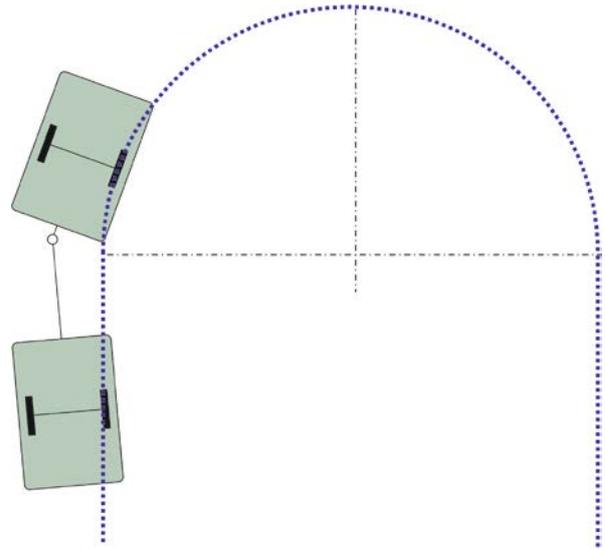


Abbildung 5. 2-Rad-Anhänger mit starrer Deichsel mit Kupplungspunkt vorn beim Hineinfahren in die Kurve

Der 2-Rad-Anhänger mit weiter vorn angeordneten Kupplungspunkt zieht hingegen bei stationärer Kurvenfahrt in die Kurve, ist aber bei Änderungen des Kurvenradius deutlich gutmütiger, weshalb dieses Konzept auch vielfach verwendet wird (Abbildung 4 und 5).

Der 4-Rad-Anhänger mit Drehschemellenkung zieht ebenfalls leicht in die Kurve, während der allradgelenkte bei entsprechender Einstellung der Lenkinematik bzw. Steuerung der Stellmotoren spurtreu läuft (Abbildung 6 und 7).

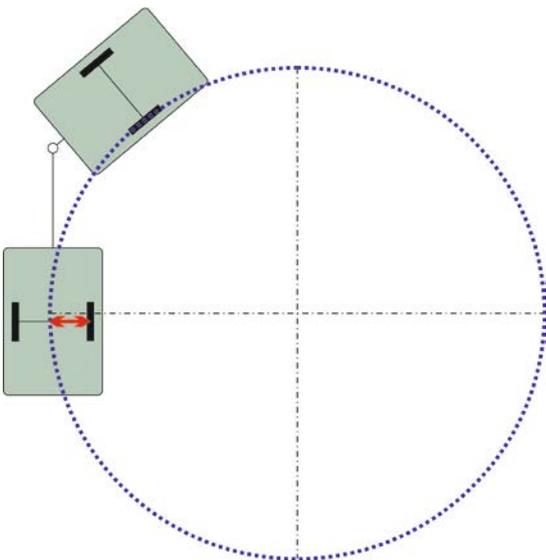


Abbildung 4. 2-Rad-Anhänger mit starrer Deichsel mit Kupplungspunkt vorn bei stationärer Kreisfahrt

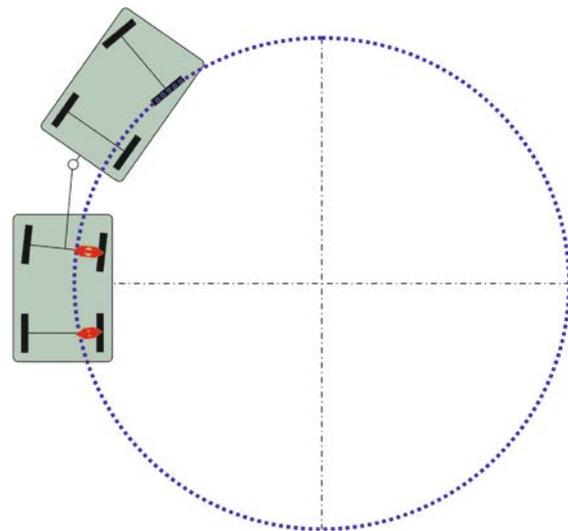


Abbildung 6. 4-Rad-Anhänger mit Drehschemellenkung bei stationärer Kreisfahrt

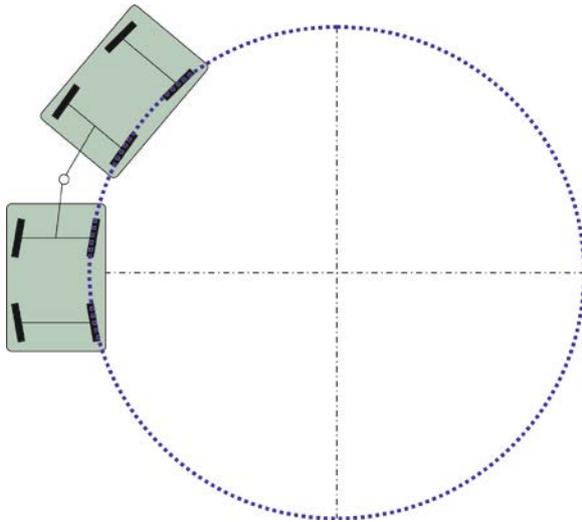


Abbildung 7. 4-Rad-Anhänger mit Allrad-Achsschenkelneigung bei stationärer Kreisfahrt

Wird auch bei dem Vierradgelenkten das Hineinfahren in die Kurve betrachtet, so zeigt sich bei gleicher Lenkinematik bzw. Ansteuerung der Stellmotoren ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Spurabweichung. Auch dieses Konzept wird vielfach als spurtreu bezeichnet, da nur die stationäre Kreisfahrt betrachtet wird.

Diese Darstellung lässt vermuten, dass es kein Lenkkonzept geben kann, das in allen Situationen spurtreu ist, solange der Lenkeinschlag des jeweiligen Rades in einer festen Form mit dem aktuellen Lenkeinschlag des ihm vorausfahrenden Rades verkoppelt ist. Die alleinige Information des Lenkeinschlages des vorausfahrenden Rades reicht für die Einstellung des Lenkwinkels nicht aus, da keine Information über die aktuelle Lage des Fahrzeuges berücksichtigt wird.

Bei jedem Lenkkonzept, das diese feste Kopplung hat, muss daher ein Kompromiss angestrebt werden, der eine möglichst geringe Gesamspurabweichung in den relevanten Fahrsituationen hat. Die Spurtreue in allen Fahrsituationen könnte durch ein aktives Lenksystem mit Lenkmotoren realisiert werden, das neben dem aktuellen Lenkeinschlag, weitere Informationen wie die Lenkeinschlagsänderung verwendet.

Die Darstellung zeigt, dass die einfache Betrachtung der stationären Kreisfahrt, nicht ausreicht die Spurtreue eines Routenzuges zu beurteilen. Eine allgemein anerkannte Maßzahl, die die Gesamspurabweichung in relevanten Fahrsituationen quantifiziert, könnte helfen die Spurtreue der Routenzugkonzepte vergleichbar zu machen.

3 GÜTEKRITERIUM UND TESTSZENARIEN

Eine exakte Definition der Spurtreue von Routenzügen ist den Autoren nicht bekannt. Es wird daher vorgeschlagen hierunter folgendes zu verstehen:

Ein Routenzug ist spurtreu, wenn sich korrespondierende Punkte des Schleppfahrzeugs und der Anhänger stets auf der gleichen Bahnkurve (Trajektorie) bewegen.

Es ist offensichtlich, dass eine mathematisch exakte Spurtreue technisch nicht realisierbar ist. Bereits kleinste Störungen z.B. durch den Schräglauf der Räder würden zu Abweichungen zwischen den Bahnkurven führen.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist die „Spurtreue“ als Gütekriterium für das Nachlaufverhalten der Anhänger ungeeignet, da sie als binäre Größe nur die beiden Ausprägungen „treu“ oder „nicht treu“ besitzt. Um das Nachlaufverhalten der Routenzuganhänger quantitativ bewerten zu können, wird deshalb im Folgenden statt der Spurtreue die Spurabweichung als Gütekriterium herangezogen. Die Spurabweichung wird dabei als maximaler Abstand Δs zwischen der Bahnkurve eines Referenzpunktes des Schleppfahrzeugs und der Bahnkurve des korrespondierenden Punktes eines Anhängers definiert, wobei der Abstand normal zur Bahnkurve des Referenzpunktes gemessen wird (vgl. Abbildung 8). Das Vorzeichen der Spurabweichung ist positiv, wenn die Bahnkurve des Referenzpunktes näher am lokalen Krümmungsmittelpunkt verläuft als die Bahnkurve des Anhängerpunktes. Bei Kurvenfahrten ist die Spurabweichung also positiv, wenn der Anhänger einen größeren Kreis als das Schleppfahrzeug durchläuft. Die so definierte Spurabweichung ist eine Länge und somit eine dimensionsbehaftete Größe. Für die vergleichende Beurteilung der Güte des Nachlaufverhaltens ist es daher sinnvoll, die Spurabweichung auf eine Bezugslänge zu beziehen und somit dimensionslos zu machen. Hier wurde als Bezugslänge die Länge L_a der Anhänger gewählt, um die relative Spurabweichung ρ zu bilden:

$$\rho = \frac{\Delta s}{L_a}$$

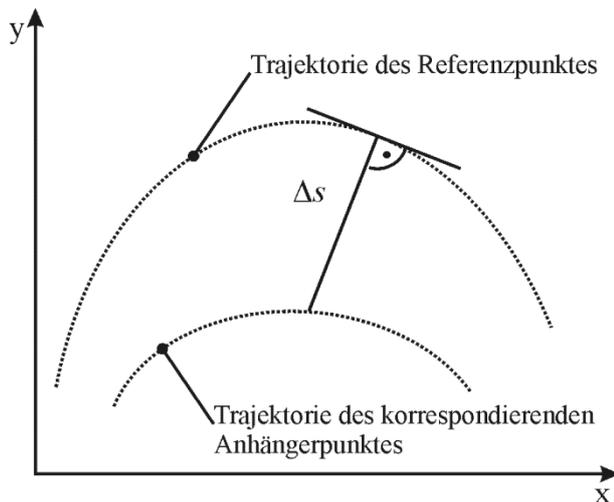


Abbildung 8. Geometrische Bestimmung der Spurbewegung

Durch das eingeführte Gütekriterium kann die Spurbewegung quantifiziert werden. Um verschiedene Fahrwerks- und Lenkkonzepte vergleichen zu können, müssen Test-szenarien definiert werden, die zur Ermittlung des Gütekriteriums verwendet werden können. Wesentliche Parameter sind

- die Trajektorie des Schleppfahrzeugreferenzpunktes,
- die Geschwindigkeit beim Durchfahren der Trajektorie sowie
- der Beladungszustand der Anhänger.

Die Trajektorie sollte einerseits praxisrelevant sein und andererseits alle möglichen Effekte, die die Spurbewegung beeinflussen können, abdecken. Eine naheliegende Trajektorie ist die Kreisfahrt mit konstantem. Diese wird für die durchgeführten Untersuchungen insbesondere für den Vergleich der analytischen Lösung mit den Simulationsergebnissen genutzt. Im Folgenden wird jeweils ein Kurvenradius von 3.000 mm verwendet.

Eine deutlich höhere Praxisrelevanz im Lager- oder Produktionsbereich hat hingegen der U-Turn, bei dem auch das Hinein- und Hinausfahren aus der Kurve untersucht werden kann.

4 ANALYTISCHE BERECHNUNG DER SPURABWEICHUNG

4.1 SPURABWEICHUNG VON 2-RAD-ANHÄNGERN

Für die Berechnung der Spurbewegungen der vier bis fünf Anhänger eines Routenzugs genügt es, einen

einzelnen Anhänger isoliert zu betrachten. Die resultierenden Gleichungen können dann beginnend beim ersten Anhänger sukzessive auf alle weiteren Anhänger angewendet werden. Hierzu werden die Anhänger von vorne nach hinten durchnummeriert (Index i). Für jeden Anhänger wird dann ausgehend von der Lage des jeweiligen Schlepppunktes $P_{s,i}$ der Radius $R_{a,i}$ der Kreisbahn des fiktiven Rades in der Mitte der Radachse bestimmt. Der Schlepppunkt ist der Ort der Kupplung des Schleppers bzw. des voranfahrenden Anhängers. Der Schlepppunkt bewegt sich auf einem Kreis mit dem Radius $R_{s,i}$. Da die Räder ohne Schräglauf abrollen, muss die Gerade durch den Schlepppunkt und durch den Achsmittelpunkt $P_{a,i}$ die Kreisbahn von $P_{a,i}$ tangieren. Wie in Abbildung 7 dargestellt ist, spannen der Kreismittelpunkt P_0 , der Schlepppunkt $P_{s,i}$ und der Achsmittelpunkt $P_{a,i}$ ein rechtwinkliges Dreieck auf. Nach dem Satz von Pythagoras gilt daher für den Kreisbahnradius $R_{a,i}$ des Anhängermittelpunktes:

$$R_{a,i}^2 = R_{s,i}^2 - \left(L_d + \frac{L_a}{2} \right)^2$$

Hierin wurde für den Abstand zwischen dem Schlepppunkt und dem Achsmittelpunkt die Summe aus Deichsellänge L_d und der halben Anhängerlänge L_a eingesetzt. Für die Berechnung der Spurbewegung wird der Mittelpunkt der Schlepperhinterachse P_{sh} als Referenzpunkt und der Mittelpunkt $P_{a,i}$ der jeweiligen Anhängerachse als korrespondierender Punkt gewählt. Die gesuchte Spurbewegung ist dann gleich der Differenz der entsprechenden Kurvenradien.

$$\rho_i = \frac{R_{a,i} - R_{sh}}{L_a} = \frac{1}{L_a} \cdot \left[\sqrt{R_{s,i}^2 - (L_d + 0,5L_a)^2} - R_{sh} \right]$$

Bei der sukzessiven Berechnung der Bahnradien und Spurbewegungen der Anhänger muss beachtet werden, dass sich die Bahnradien der Schlepppunkte von Anhänger zu Anhänger ändern. Der Schlepppunkt des ersten Anhängers ist der Ort der Kupplung des Schleppers. Befindet sich die Kupplung mit einem Abstand L_k hinter der Hinterachse des Schleppers, so bewegt sich die Kupplung und somit der Schlepppunkt des ersten Anhängers auf einer Kreisbahn mit dem Radius

$$R_k = R_{s1} = \sqrt{R_{sh}^2 + L_k^2}$$

Die Schlepppunkte $P_{s,i}$ der weiteren Anhänger sind die Orte der Kupplungen der jeweils voranfahrenden Anhänger. Wie aus der Abbildung 7 ersichtlich ist, bilden auch die drei Punkte P_0 , $P_{a,i}$ und $P_{s,i}$ ein rechtwinkliges Dreieck, so dass für die Bahnradien der Schlepppunkte gilt:

$$R_{s,i+1} = \sqrt{R_{a,i}^2 + \left(\frac{L_a}{2}\right)^2}$$

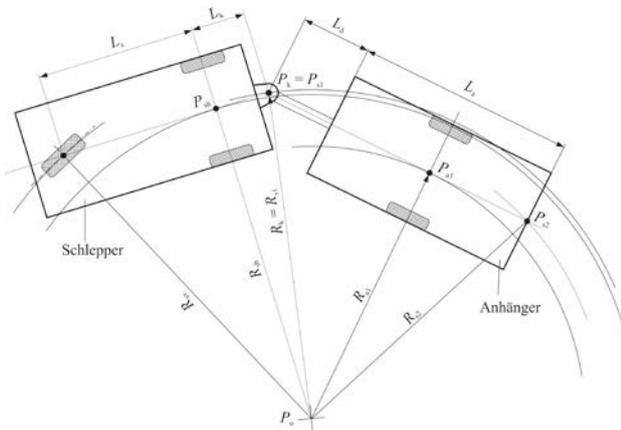


Abbildung 9. Geometrische Größen des 2-Rad-Anhängers

Die Anwendung der hergeleiteten Gleichungen auf ein praxisnahes Beispiel zeigt, dass bei der Kreisfahrt eines Routenzugs mit Zweiradanhängern erhebliche Spurabweichungen auftreten. Mit den Daten eines handelsüblichen 2-Rad-Anhängers (vgl. Tabelle 1) ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Werte für die Fahrt auf einem engen Kreis mit einem Radius von 3.000 mm bezogen auf den Mittelpunkt der Vorderachse des Schleppers.

Tabelle 1: Maße der 2-Rad-Anhänger

Anhängerslänge	$L_a = 2040 \text{ mm}$
Anhängersbreite	$B_a = 990 \text{ mm}$
Deichsellänge	$L_d = 650 \text{ mm}$
Kurvenradius Schlepper	$R_{s1} = 3000 \text{ mm}$
Abstand Kupplung/Achse	$L_k = 490 \text{ mm}$
Achsabstand Schlepper	$L_s = 1460 \text{ mm}$

Tabelle 2: Kurvenradien und Spurabweichungen des 2-Rad-Anhängers bei der Kreisfahrt

i	$R_{s,i}$ [mm]	$R_{a,i}$ [mm]	ρ_i
----------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------

1	3000	2492	-0,23
2	2693	2112	-0,42
3	2346	1647	-0,64
4	1938	982	-0,97
5	1416	-	-

Mit diesem Routenzug ließe sich ein derartig enger Kreis nur mit vier Anhängern fahren, da der Kurvenradius des fünften Anhängers negativ wird. Die Kreisfahrt ist für Routenzüge kein Fahrmanöver, das im praktischen Einsatz gefahren werden muss. Bei einer 180°-Kehrwende (U-Turn) wird aber immerhin ein Halbkreis durchfahren. Aufgrund der Spurabweichungen der Anhänger werden diese hierbei nicht der Bahnkurve des Schleppfahrzeugs genau folgen, sondern die Kurve etwas „abkürzen“, wodurch es zu Kollisionen mit Personen oder Gegenständen kommen kann.

4.2 SPURABWEICHUNG VON 4-RAD-ANHÄNGERN

Bei den vierrädrigen Anhängern (C- oder U-Rahmen mit Allrad-Achsschenkelenkung) werden alle Räder durch die Deichsel mithilfe einer Lenkinematik aktiv gelenkt, wobei die Lenkwinkel der beiden Räder einer Achse jeweils gleich groß sind. Die Vorderräder werden entgegengesetzt zu den Hinterrädern eingelenkt. Die Lenkwinkel der Vorderräder und der Hinterräder sind somit betragsmäßig gleich groß; sie besitzen jedoch unterschiedliche Vorzeichen.

Für die Berechnung der Bahnradien der Achsmittelpunkte $P_{av,i}$ und $P_{ah,i}$ wird davon ausgegangen, dass die Lenkwinkel $\varphi_{v,i}$ der Vorderräder gleich dem Winkel φ_d zwischen der Deichsel und der Mittelachse des Anhängers sind (vgl. Abbildung 8). Der Geschwindigkeitsvektor in der Vorderachsmittelpunkt zeigt dann in Richtung der Deichsel, so dass die Gerade durch die Punkte $P_{s,i}$ und $P_{av,i}$ den Bahnkreis des Achsmittelpunktes tangiert. Folglich spannen die Punkte P_0 , $P_{s,i}$ und $P_{av,i}$ wieder ein rechtwinkliges Dreieck auf und es gilt:

$$R_{av,i+1} = \sqrt{R_{s,i}^2 - L_d^2}$$

Da die Lenkwinkel vorne und hinten betragsmäßig gleich groß sind, sind auch die Bahnradien der Achsenmittelpunkte gleich groß:

$$R_{av,i} = R_{ah,i}$$

Beim 4-Radanhängers ist es sinnvoll, den Anhängersmittelpunkt P_m als korrespondierenden Punkt für die Be-

stimmung der Spurbabweichung zu wählen. Der zugehörige Kurvenradius $R_{m,i}$ ergibt sich aus den geometrischen Verhältnissen zu:

$$R_{m,i} = \sqrt{R_{av,i}^2 - 0,25 L_a^2}$$

Hiermit erhält man schließlich die normierte Spurbabweichung des i -ten Anhängers:

$$\rho_i = \frac{1}{L_a} \left[\sqrt{R_{s,i}^2 - L_d^2 - 0,25 L_a^2} - R_{sh} \right]$$

Die Kupplungen am Heck der Anhänger liegen im Allgemeinen nur kurz hinter der Hinterachse. Für den Schlepppunkt des nachfolgenden Anhängers kann daher näherungsweise der Kurvenradius des Mittelpunktes der Hinterachsen verwendet werden:

$$R_{s,i+1} \approx R_{ah,i}$$

In der Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Berechnung für einen handelsüblichen 4-Rad-Anhänger (vgl. Tabelle 3) bei der Kreisfahrt mit einem Kurvenradius des Mittelpunktes der Vorderräder des Schleppers von 3.000 mm dargestellt.

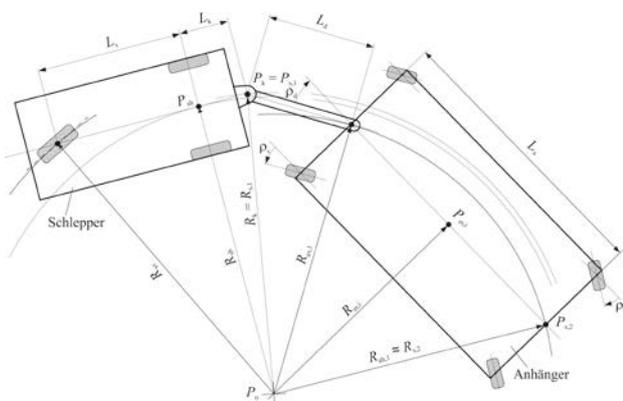


Abbildung 10. Geometrische Größen des 4-Rad-Anhängers

Tabelle 3: Maße des 4-Rad-Anhängers

Anhängerlänge	$L_a = 2760$ mm
Anhängerbreite	$B_a = 1540$ mm
Deichsellänge	$L_d = 1080$ mm
Kurvenradius Schlepper	$R_{s1} = 3300$ mm
Abstand Kup-	$L_k = 490$ mm

plung/Achse	
Achsabstand Schlepper	$L_s = 1460$ mm

Tabelle 4: Kurvenradien und Spurbabweichungen des 4-Rad-Anhängers bei der Kreisfahrt

i	$R_{s,i}$ [mm]	$R_{a,i}$ [mm]	ρ_i	$R_{m,i}$ [mm]
1	3000	2799	-0.19	2435
2	2799	2582	-0.28	2182
3	2582	2345	-0.39	1896
4	2345	2082	-0.51	1558
5	2082	1779	-0.67	1123

Die Spurbabweichungen ρ_i der Anhänger sind beim 4-Radfahrwerk deutlich kleiner als beim 2-Radfahrwerk. Dennoch werden insbesondere die hinteren Anhänger erheblich in die Kurve hineingezogen. Würde der Routenzug z.B. eine Kehrtwende (U-Turn) um ein Hindernis herum fahren, so könnten auch hier die hinteren Anhänger mit dem Hindernis kollidieren.

5 ENTWICKLUNG EINES NEUEN LENKKONZEPTES

Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Routenzug mit einem neuen Lenkkonzept entwickelt, der folgenden Anforderungen gerecht werden soll:

- **Einfach:** Das Achs- und Lenkkonzept soll möglichst einfach aufgebaut sein. Insbesondere soll keine Lenkinformation von einer Achse zur nächsten übertragen werden müssen. Dadurch kann auf komplizierte mechanische Lenkstrukturen verzichtet werden. Außerdem muss keine elektrische oder hydraulische Verbindung zwischen Schlepper und den einzelnen Routenzuganhängern vorgesehen werden.
- **Geringe Spurbabweichung:** Trotz passiver Lenkung sollen in allen Fahrsituationen nur geringe Spurbabweichungen auftreten.
- **Modular:** Die Routenzuganhänger sollen leicht austauschbar sein, so dass je nach Anforderung

C-, E- oder U-Rahmen verwendet werden können.

Diese Anforderungen werden gelöst, indem zunächst der Rahmen und das Fahrwerk baulich voneinander getrennt werden (Abbildungen 9 und 10). Das Transportmodul, hier beispielhaft als U-Rahmen ausgeführt, wird jeweils vorn und hinten fest an das Achsmodul gekoppelt.

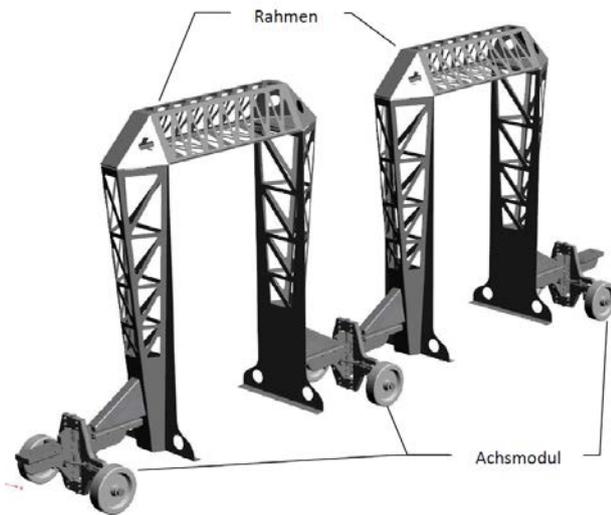


Abbildung 11. 3D-Modell der Rahmen- und Achsmodule des Routenzuges

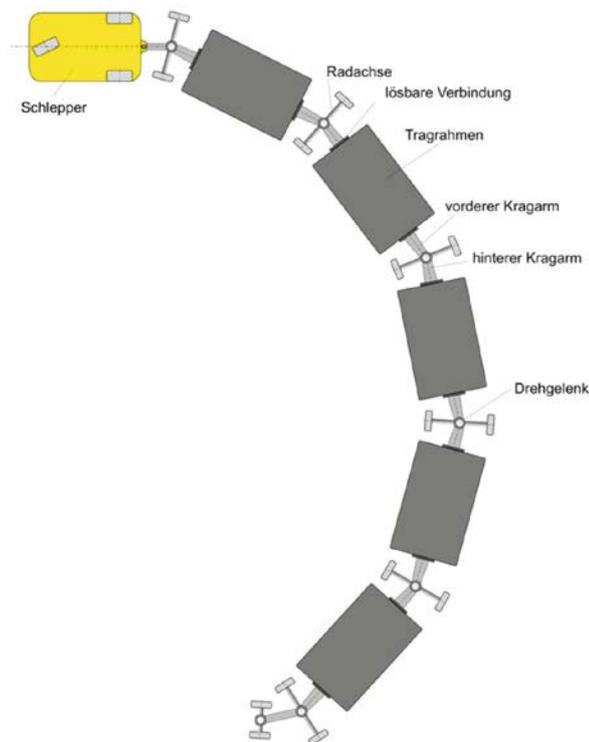


Abbildung 12. Modularer Routenzug

Die Achsmodule bestehen jeweils aus zwei Kragarmen zur Anbindung der Lastmodule, einer Radachse und einer Koppelstangen die den Kragarm über eine Linearführung mit der Radachse verbinden (Abbildung 11). Diese Kinematik führt dazu, dass die Lenkwinkel zwischen Rad- und Längsachse des vorderen und hinteren Kragarms gleich sind.

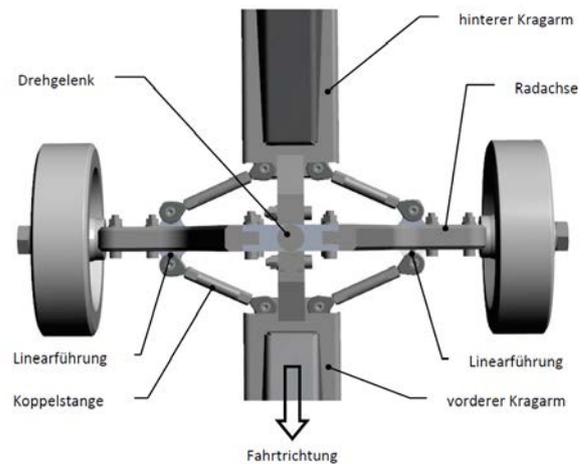


Abbildung 13. 3D-Modell des Achsmoduls des Routenzuges

Bei stationärer Kreisfahrt läuft die Verlängerung jeder Radachse dementsprechend genau durch den Kreismittelpunkt. Die Spurtreue für die stationäre Kreisfahrt ist dadurch auf eine sehr einfache Art gewährleistet. Die Lastmodule zwischen den Radachsen sind einfach austauschbar, da kein Lenkgestänge oder keine Medienversorgung über die Anhänger geführt werden muss. Es ist dadurch auch möglich, in einem Routenzug unterschiedliche Lastmodule einzusetzen und je nach Bedarf auszutauschen. Zudem muss die Last nicht wie bei den diskutierten 2-Rad-Anhängern über die Räder gehoben werden.

Wie das oben diskutierte einachsige Lenkkonzept mit mittig angeordnetem Kupplungspunkt, ist auch dieses in der dargestellten Form beim Hinaus- und Hineinfahren in die Kurve nicht spurtreu, wie im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

6 SIMULATION DER SPURABWEICHUNG

Bei der Simulation der Kinematik von Routenzügen werden in jedem Zeitschritt ausgehend von der Bewegung des Schleppers sukzessive von vorn nach hinten die translatorischen und rotatorischen Geschwindigkeiten der einzelnen Anhänger bzw. Elemente unter Vernachlässi-

gung des Schräglaufs der Räder berechnet. Die Bewegung des Schleppers wird dabei für das jeweilige Fahrmanöver aus den Zeitverläufen der Fahrgeschwindigkeit und des Lenkwinkels bestimmt. Die nachfolgende numerische Integration ergibt sowohl die beiden Ortskoordinaten eines Referenzpunktes als auch den Lagewinkel des jeweils betrachteten Anhängers.

Die Vernachlässigung des Schräglaufs der Räder vereinfacht das Simulationsmodell gegenüber einer vollständigen Dynamiksimulation erheblich und ermöglicht trotzdem die Untersuchung des Nachlaufverhaltens bei komplexen instationären Fahrmanövern. Das seitliche Ausbrechen eines Anhängers infolge von Querkräften (Fliehkräfte bei schneller Kurvenfahrt, Deichselzugkräfte bei engen Kurvenfahrten) lässt sich mit dem Kinematikmodell allerdings nicht simulieren.

Zur weiteren Vereinfachung wurde das in der Fahrzeugtechnik bewährte Einspurmodell verwendet, bei dem die beiden Räder einer Radachse zu einem fiktiven, mittig angeordneten Ersatzrad zusammengezogen werden. Die Modellierung des Bewegungsverhaltens der unterschiedlichen Routenzugkonzepte ließ bereits vor der eigentlichen Simulation wesentliche grundsätzliche Gemeinsamkeiten der unterschiedlichen Anhängerfahrwerke deutlich erkennen. Denn alle untersuchten Routenzüge können durch eine Kette aus starren Kettengliedern, die jeweils paarweise durch Drehgelenke mit vertikaler Drehachse verbunden sind, abgebildet werden. Die Kettenglieder eines Routenzugs können dabei durchaus unterschiedlich lang sein. Jedem Kettenglied, das eine Deichsel oder einen Anhänger darstellen kann, wird dann eine i.a. lenkbare Radachse zugeordnet. Die Fahrwerkskonzepte unterscheiden sich jedoch durch die Position der Radachse auf dem Kettenglied und die Art und Weise, wie der Lenkwinkel aus den lokalen Lagegrößen gebildet wird.

Mithilfe der Kinematiksimulation wurde das Nachlaufverhalten der drei unterschiedlichen Routenzüge beim Durchfahren eines U-Turns mit einem Kurvenradius von 3 m untersucht. Die Routenzüge mit den Zwei- und den Vierradanhängern bestehen jeweils aus fünf Anhängern. Der Routenzug mit dem neuartigen Lenkmechanismus hat stattdessen zehn Anhänger, die jedoch deutlich kürzer sind. Die Transportkapazitäten aller drei Routenzüge sind somit vergleichbar.

Als wesentliches Ergebnis der Kinematik Simulation sind in den Abbildungen 14 bis 16 die Bahnkurven (Trajektorien) des Mittelpunktes der Schlepperhinterachse und der Anhängermittelpunkte aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist, dass die zwei- und vierradrigen Anhänger die enge Kurve stark schneiden. Dagegen liegen die Trajektorien der Anhänger mit dem neuen Lenkmechanismus trotz der großen Anzahl von Anhängern relativ

nahe beieinander. Allerdings ist hier auch eine Spurbreitung zur Kurvenaußenseite zu beobachten.

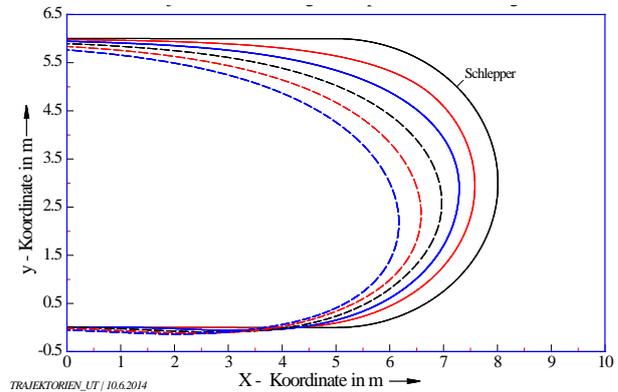


Abbildung 14. Trajektorien der Anhängermittelpunkte des 2-Rad-Anhängers

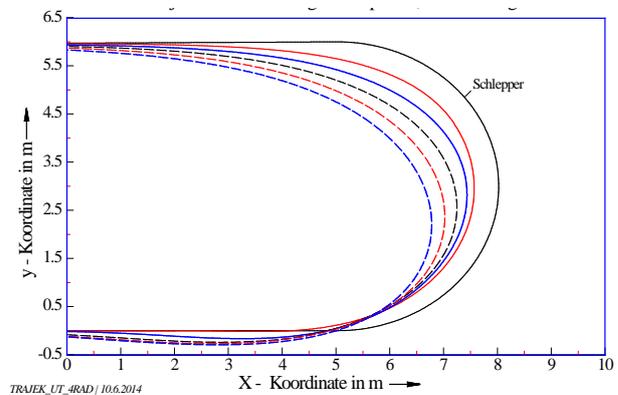


Abbildung 15. Trajektorien der Anhängermittelpunkte des 4-Rad-Anhängers

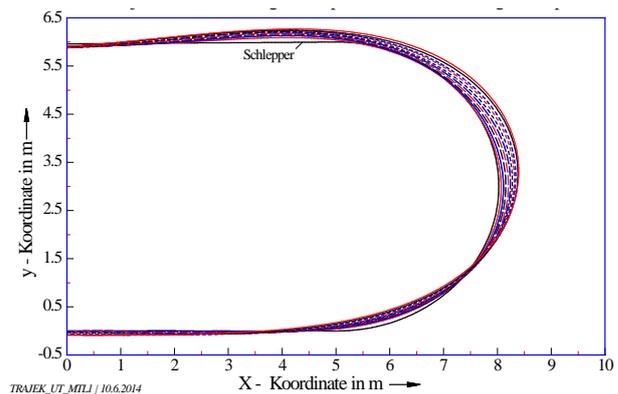


Abbildung 16. Trajektorien der Anhängermittelpunkte des neuen Routenzug-Konzeptes

Figure 1.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wird die Spurtreue von typischen Fahrwerks- und Lenkkonzepten von Routenzügen untersucht. Um die Spurtreue quantitativ bestimmen zu können und vergleichbar zu machen, werden zunächst ein Gütekriterium definiert und Testszenarien vorgeschlagen. Dieses könnte zukünftig in den Typenblättern der Anhänger für ausgewählte Fahrmanöver angegeben werden, um dem Anwender eine bessere Abschätzung des Platzbedarfes für die Fahrgassen der Routenzüge zu ermöglichen.

Ein entwickeltes analytisches Modell erlaubt die Untersuchung der Spurtreue und die Ermittlung des Gütekriteriums für die stationäre Kreisfahrt. Diese Berechnung zeigt erhebliche Spurabweichungen für die vielfach eingesetzten Konzepte. Mit einem entwickelten Simulationsmodell werden auch komplexere Fahrmanöver, wie das Hinein- und Hinausfahren aus einer Kurve untersucht. Es wird gezeigt, dass insbesondere Lenkkonzepte, die bei der stationären Kreisfahrt spurtreu sind - und bisher vielfach als spurtreu bezeichnet wurden - hier erhebliche Abweichungen im Nachlaufverhalten aufweisen.

Mithilfe der gewonnen Erkenntnisse wird eine neue besonders einfach aufgebaute Lenkinematik vorgestellt, die ein gutes Nachlaufverhalten hat und ohne eine aufwendige Weiterleitung der Lenkinformation an die nachfolgenden Achsen auskommt. In nachfolgenden Arbeiten soll die vorgestellte Lenkinematik weiterentwickelt werden, um das Nachlaufverhalten weiter zu verbessern.

LITERATUR

- [BEU1988] Kraftbetriebene Flurförderzeuge - Schlepper und schleppende Flurförderzeuge, DIN 15172, Beuth Verlag, Berlin 1988
- [BEU1990] Kraftbetriebene Flurförderzeuge - Schleppzüge mit ungebremsten Anhängern, VDI-Richtlinie 3973, Beuth Verlag, Berlin 1990
- [GUE2012] Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport - Ergebnisse einer Studie, Technische Universität München - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Studie, Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günther u.a.
- [HIN1994] Modellbildung und Regelung induktiv geführter Kommissionierfahrzeuge, Universität der Bundeswehr Hamburg,

Fachbereich Maschinenbau, Dissertation, Dipl.-Ing. Claus Hinrichsen, Hamburg 1994

[SCH1998] Fördermaschinen Hebezeuge, Aufzüge Flurförderzeuge, Fördertechnik und Baumaschinen; ab Seite 372, Martin Scheffler, Klaus Feyrer, Karl Matthias, Vieweg Verlag 1998, ISBN 3-528-06626-1

[SCH2010] Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, Dieter Schramm, Manfred Hiller, Roberto Bardini, Springer Verlag 2010, ISBN 978-3-540-89315-8

Dr.-Ing. Stephan Ulrich hat Physikalische Ingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Berlin studiert und ist seit 2006 am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik tätig.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns hat Luft- und Raumfahrttechnik in Braunschweig studiert und ist seit 1992 Leiter des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Technische Logistik an der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg.

M.Eng. Konstantin Krivenkov studierte Maschinenbau und Berechnung und Simulation mechanischer Systeme an der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg und ist seit 2010 am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik tätig.

Address: Helmut-Schmidt-University, Holstenhofweg 85, D - 22043 Hamburg, Phone: +49 (0)40 / 6541-2512, Fax: +49 (0)40 / 6541 2495
E-Mail: stephan.ulrich@hsu-hh.de