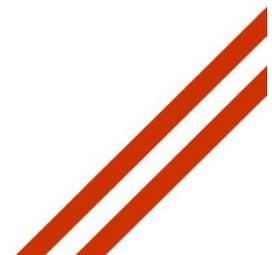


Fahrdynamik – Untersuchungsmethoden zur Ermittlung des Zusammenhangs von traktionsrelevanten Parametern Abschlussbericht

Manfred Nadlinger

Dezember 2017



Fahrdynamik – Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von traktionsrelevanten Parametern

Dezember 2017

Dipl.-HLFL-Ing. Manfred Nadlinger

Angaben zum Projektträger

HBLFA Francisco Josephinum
BLT WIESELBURG
Rottenhauserstraße 1
3250 Wieselburg
Kontaktperson: Manfred Nadlinger
Tel: 07416/52175-62058
Email: Manfred.nadlinger@josephinum.at



**MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH**

HBLFA FRANCISCO JOSEPHINUM
WIESELBURG

Impressum

Herausgeber:

HBLFA Francisco Josephinum, A-3250 Wieselburg
des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Direktor:

HR Dipl.-Ing. Alois Rosenberger

Leiter für Forschung und Innovation:

HR Dipl.-Ing. Heinrich Prankl

Für den Inhalt verantwortlich:

Dipl.HLFL-Ing. Manfred Nadlinger

Redaktion:

BLT Wieselburg
Tel.: +43 (0)7416 52175-0
E-Mail: blt@josephinum.at
Web: blt.josephinum.at

Druck, Verlag und ©2017

HBLFA Francisco Josephinum, A-3250 Wieselburg
Alle Rechte vorbehalten

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung und Zielsetzung	7
2	Stand des Wissens	8
	Einflüsse auf das Fahrverhalten landwirtschaftlicher Fahrzeuge	8
3	Methodisches Vorgehen	9
3.1	Beschreibung des Versuchsaufbaues	9
3.2	Verwendete Messtechnik	10
3.3	Messstellen am Traktor.....	10
3.4	Versuchsanstellungen.....	14
4	Ergebnisse	15
4.1	Einfluss der Lenkungsart auf die Fahrdynamik am Hang	15
4.2	Einfluss der Lenkungsart auf den Lenkwinkel	20
4.3	Einfluss der Lenkungsart auf die Drehrate	21
4.4	Verhalten des Traktors bei stationärer Kreisfahrt	23
4.5	Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerks auf die Belastung der Vorderachse.....	26
4.6	Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerks auf die Nickbewegungen des Traktors.....	28
4.7	Einfluss der Ballastierung auf das Fahrverhalten und die Fahrsicherheit auf der Straße	28
5	Zusammenfassung	31
6	Abbildungsverzeichnis	32

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Systeme für die Fahrdynamikregelung in Kraftfahrzeugen werden bereits seit 1995 in Fahrzeugen verbaut. Zunächst wurden diese beim PKW eingesetzt und sind mittlerweile auch von den Nutzfahrzeugen nicht mehr wegzudenken. Der Wissensstand über die fahrdynamischen Eigenschaften von landwirtschaftlichen Fahrzeugen ist im Gegensatz zu PKW und LKW sehr gering. Steigende Fahrgeschwindigkeiten und Gesamtmassen, sowie eine Steigerung der Arbeitsleistung und der Einsatzgrenzen veränderten die fahrdynamischen Eigenschaften der Landmaschinen erheblich. Auch die Belastungsanforderungen an die Fahrzeuge werden immer größer. Durch die besondere Topografie der landwirtschaftlichen Flächen in Österreich, werden landwirtschaftliche Fahrzeuge oftmals an ihren fahrdynamischen Grenzbereichen gefahren. Bei allen unterschiedlichen Einsatzbedingungen ist immer eine ausreichende Traktion der Räder die Voraussetzung für die optimale Leistungsübertragung der Räder auf den Boden und der Fahrsicherheit. Nur mit einem guten fahrdynamischen Verhalten der Fahrzeuge, ist die Effizienz und Sicherheit von landwirtschaftlichen Fahrzeugen im Feld und auf der Straße gewährleistet.

Die BLT untersucht im Rahmen ihrer Prüftätigkeit seit vielen Jahren die Zugleistung von Traktoren unter standardisierten Bedingungen. Diese Untersuchungen werden beim OECD Code 2 Tests an Traktoren durchgeführt. Dabei werden Erkenntnisse über die Kraftübertragung auf den Boden, Wirkungsgrad, Reifeneinfluss u.a.m. gewonnen. Abgesehen von der Bestimmung des Schlupfes war es bisher nicht möglich, fahrdynamische Untersuchungen durchzuführen. Traktionsrelevante Parameter haben unmittelbare Auswirkung auf die Effizienz der Energieumsetzung und damit auf die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Das Ziel des Projektes war, die Erarbeitung von Untersuchungsmethoden zur Beurteilung von traktionsrelevanten Parametern und fahrdynamischen Eigenschaften von landwirtschaftlicher Fahrzeugen bzw. Fahrzeug-Gerätekombinationen unter verschiedensten Einsatzbedingungen. Aufbauend darauf sollen Methoden zur Untersuchung von Einflussparametern erarbeitet werden, die fahrdynamische Eigenschaften von landwirtschaftlichen Fahrzeugen bzw. Fahrzeug-Gerätekombinationen bestimmen. Das Projekt diene daher auch zur Gewinnung von Erfahrungswerten, wie Versuche anzustellen sind, um bei unterschiedlichsten Einsatzverhältnissen, die fahrdynamischen Einflüsse untersuchen zu können. Im Vordergrund stand die Sicherheit beim Fahren im Feld, am Hang und auf der Straße, ohne Beeinträchtigung der Effizienz der Arbeit. Eine Untersuchung dieser Einflussparameter unter Praxisbedingungen in der Landwirtschaft ist im Vergleich zum PKW oder Nutzfahrzeug ungleich schwieriger. Die Fahrbahnen bei den PKW-Tests sind weitgehend einheitlich. Die wichtigsten Variablen sind unterschiedliche Zuladungen, Reifenarten und Fahrgeschwindigkeiten. Landwirtschaftliche Fahrzeuge fahren auf verschiedensten Untergründen, mit unterschiedlichsten Ballastierungsvarianten, Reifendrücken, Reifenarten, Hangneigungen, Federungssystemen, Lenkungsarten usw. Durch diese Vielfalt an Einflüssen sind auch fahrdynamische Untersuchungen aufwändiger, bis praxismgerechte Aussagen getroffen werden können. Am Ende des Projekts sollte klar sein, wie Versuche anzustellen sind, um die verschiedensten Einflüsse auf die Fahrdynamik von Landmaschinen untersuchen zu können.

2 STAND DES WISSENS

Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten haben sich in der Vergangenheit vor allem auf die Optimierung der Bereifung, die Einführung einer Reifendruckregelung, sowie auf die Entwicklung von Schwingungstilgungs- und Federungssystemen konzentriert. Untersuchungen der Fahrzeugdynamik landwirtschaftlicher Maschinen, sowie deren beeinflussende Parameter wurden bisher nur wenige durchgeführt. Bisherige Untersuchungen beschränkten sich in erster Linie auf die Schwingungsoptimierung von Fahrersitz, Vorderachsfederung und Kabinenfederung. Die Vorderachsfederung bringt nicht nur eine Schwingungsreduktion am Fahrersitz sondern erhöht die Fahrsicherheit bei der Straßenfahrt mit Anbaugeräten. Gefederte Hinterachsen haben einen wesentlichen Einfluss auf das sogenannte "Power Hopping", also das unkontrollierte rhythmische Springen des Traktors unter schwerer Zuglast und bei ungünstigen Last-, Reifen- und Bodenverhältnissen. Im Steilgelände wurden Stufenlosgetriebe und 2-Achs-Lenkungssysteme eingeführt. Die Optimierung der Gewichtsverteilungen an Fahrzeugen ist auf Grund der konstruktiven Vorgaben aber nur in gewissen Grenzen möglich. Zusatzgewichte helfen Traktion und Lenkeigenschaften insbesondere im Vorderachsbereich zu erhalten, erhöhen aber das Gesamtgewicht. Weitere Forschungsbereiche beschäftigen sich mit der gezielten Regelung der Antriebsdrehmomente auf die Räder (torque vectoring). Viele Einflussfaktoren sind aber nur unzureichend untersucht. Die Auswirkung verschiedener Lenkungsarten, Ballastierungsverhältnisse oder Reifendrucke auf das Fahrverhalten im Gelände, auf Grasnarbenschonung oder der optimalen Leistungsübertragung wurden bisher nur unzureichend untersucht. Gezielte fahrdynamische Untersuchungen wurden bisher nur bei Straßenverkehrsfahrzeugen durchgeführt (PKW, LKW). Die Untersuchungsziele dabei waren, eine sichere Straßenlage, Veränderungen in der Rahmengenometrie, Reifen, Bremsen, Fahrerassistenz- und Stabilisierungssysteme usw.. Die Schwerpunkte im Bereich Landmaschinen waren Untersuchungen zur Effizienzsteigerung, der Traktion, Bodenverdichtung und Bearbeitungsqualität und wendiger die Sicherheit im Gelände und auf der Straßen.

Einflüsse auf das Fahrverhalten landwirtschaftlicher Fahrzeuge

- Boden und Untergrundverhältnisse im Feld (nasser Boden, trockener Boden, Bewuchshöhe und Bewuchsdichte, Bodenart usw.)
- Straßenverhältnisse beim Transport (nass, trocken, Asphalt, Schotter oder Wiese)
- Steilheit des Geländes (dabei sind wieder die Boden und Untergrundverhältnisse von Bedeutung)
- Bereifung (Reifentyp, Dimension, Reifendruck und Reifenzustand, Alter der Reifen, Zwillingsbereifung ja-nein)
- Ballastierung und Gewichtsverteilung (Leerfahrt, mit Frontballast, mit Heckballast, mit Front- und Heckballast)
- Mit oder ohne Allrad, Hundegang (Traktion, Schlupf und Hangtauglichkeit)
- Dämpfungseigenschaften einer Schwingungstilgung (Hubwerkes vorne und hinten)
- Einfluss der Federungssysteme auf das Fahrverhalten beim Transport und im Gelände (Vorderachs-, Kabinen- und Sitzfederung)
- Einfluss der Bremssysteme auf das Fahrverhalten und die Sicherheit
- Einfluss der Lenkungsarten auf das Fahrverhalten und die Hangstabilität des Fahrzeuges
- Getriebeeigenschaften (Schaltgetriebe, Stufenlosgetriebe)
- Motor- Getriebesteuerung
- Schwerpunktlage des Fahrzeuges und der Beladung
- uvam.

3 METHODISCHES VORGEHEN

Die Versuche wurden vorwiegend im Praxiseinsatz und auf den hauseigenen Teststrecken der BLT durchgeführt. Die genaue Versuchsplanung und Versuchsdurchführung war stark von den vorhandenen Anbaugeräten und den jeweiligen Gegebenheiten und Arbeiten vorort auf den Versuchsbetrieben abhängig. Für die Untersuchungen war eine umfassende messtechnische Ausstattung des Versuchsfahrzeuges, wie die Applikation der Sensoren mit der Messdatenerfassung und die Erstellung eines Messprogrammes notwendig. Aufbauend auf der Datenauswertung wurde versucht geeignete Auswerte- und Beurteilungsmethoden zu entwickeln, um die Ergebnisse besser beurteilen zu können.

3.1 Beschreibung des Versuchsaufbaues

Als Versuchsfahrzeug wurden ein Lindner Traktor „Lintrac“ mit 75 kW Leistung mit Allradantrieb und Hinterradlenkung eingesetzt. Auf dem Traktor wurden verschiedenste Sensoren verbaut und an ein Messdatenerfassungssystem angeschlossen. Die Bedienung der Datenerfassung erfolgte vom Fahrer über ein externes Display. Die gemessenen Daten wurden auf eine SD-Card im Messsystem aufgezeichnet. Nach den einzelnen Versuchseinsätzen wurden die Messdaten ausgelesen und nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet.



Abbildung 1: Versuchsfahrzeug Fa. Lindner „Lintrac“ beim Mulchen

Standardtraktoren sind in der Regel nur mit einer Vorderradlenkung ausgestattet. Der „Lintrac“ verfügte jedoch zusätzlich über eine Hinterradlenkung. Dadurch konnten verschiedene Lenkungsarten (Vorderradlenkung,

Allradlenkung und Hundegang) auf der gleichen Fläche gefahren werden und ihr Einfluss auf die Geländegängigkeit, Grasnabenschonung, Wendigkeit und Kippstabilität untersucht werden. In Abb. 2 links ist die Vorderradlenkung, wie es bei den meisten Standardtraktoren üblich ist dargestellt. Die rechte Abbildung zeigt das Prinzip der Allradlenkung, wo die Räder beider Achsen gleichzeitig gegengleich einlenken. Mit dem Hundegang erreicht man einen parallelen Seitenversatz der Vorder- und Hinterachse.

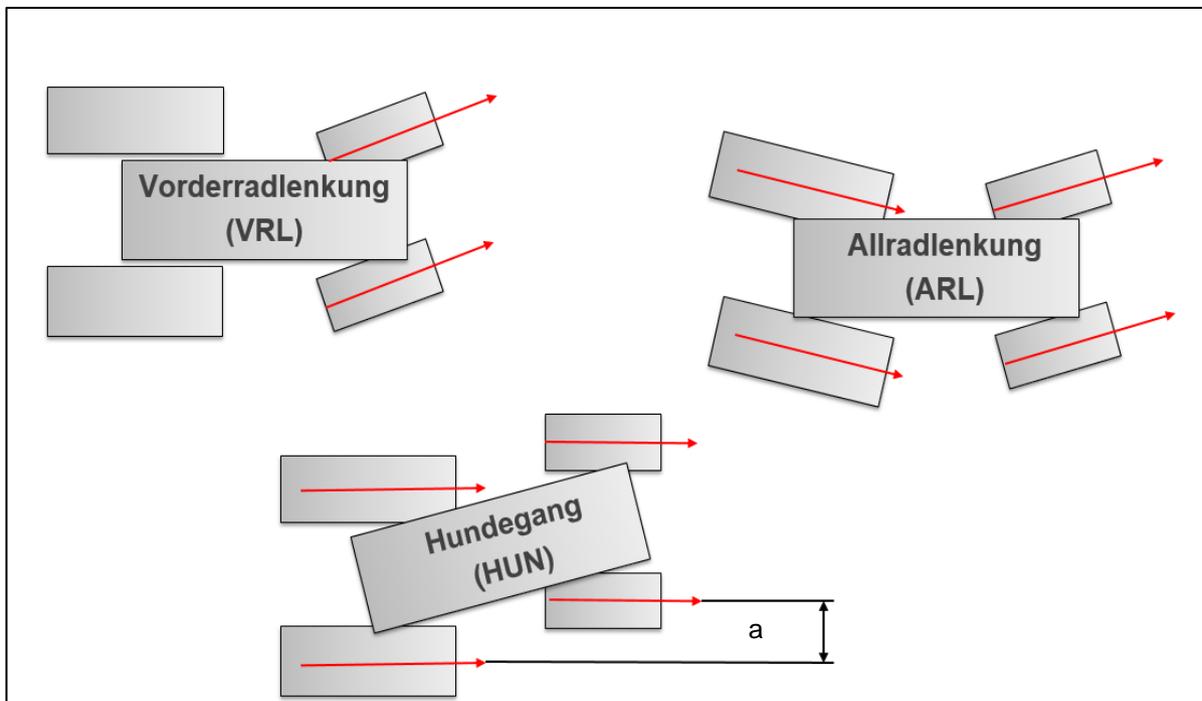


Abbildung 2: Mögliche Lenkungsvarianten am Versuchsfahrzeug

3.2 Verwendete Messtechnik

Um die unterschiedlichsten Einflüsse auf das Fahrverhalten des Fahrzeuges, bei den Versuchseinsätzen beurteilen zu können, wurden diverse Messstellen am Traktor angebracht und an ein Messdatenerfassungssystem angeschlossen. An die Datenerfassung wurde auch ein Fahrdynamik-Messsystem „ADMA“ (Automotive Dynamic Motion Analyzer), wie es auch im PKW und LKW-Fahrversuch verwendet wird, angeschlossen (siehe Abb. 3). Dadurch konnte alle relevanten fahrdynamischen Parameter des Fahrzeuges erfasst werden. Des Weiteren wurden verschiedenste Informationen aus dem CANBUS des Traktors in die Datenerfassung übernommen. Mit einem in das ADMA integrierten RTK-GPS System, erfolgte die exakte ortsspezifische Erfassung der Bewegung des Fahrzeuges im Gelände (siehe Abb. 4 und 5).

3.3 Messstellen am Traktor

- Fahrgeschwindigkeit GPS
- Fahrgeschwindigkeit (theoretisch)
- Nicken (um die Fahrzeugquerachse y)
- Wanken oder Rollen (um die Fahrzeuginnenachse x)
- Gieren (um die Fahrzeughochachse z)
- Lenkwinkel der Vorderachse

- Schwimmwinkel in Fahrtrichtung
- Beschleunigungen in der Traktorkabine körperfest in drei Achsen a_x , a_y , a_z
- Beschleunigung in der Traktorkabine horizontal (unabhängig der Neigung des Traktors immer horizontal) in allen drei Achsrichtungen a_x , a_y , a_z
- Beschleunigung in der Traktorkabine körperfest (an die Neigung des Traktors angepasst) in allen drei Achsrichtungen a_x , a_y , a_z
- Beschleunigungen Vorderachse (z), Hinterachse (z)
- Beschleunigungen des Anbaugerät a_x , a_y , a_z
- Dynamische Aufstandskraft der Vorderachse am Boden
- Zapfwellendrehzahl vorne und hinten
- Antriebsleistung Zapfwelle vorne und hinten
- Fahrweg
- Fahrtrichtung (in den Himmelsrichtungen)
- Drehrate körperfest D_x , D_y , D_z
- Drehrate horizontal D_x , D_y , D_z
- GPS-Position Höhe (Meereshöhe)
- GPS-Position Längengrad
- GPS-Position Breitengrad
- GPS-Position Höhe (zu einem virtuellen Referenzpunkt oder Ausgangspunkt)
- GPS-Position Länge (zu einem virtuellen Referenzpunkt oder Ausgangspunkt)
- GPS-Position Breite (zu einem virtuellen Referenzpunkt oder Ausgangspunkt)
- Geschwindigkeit in Fahrtrichtung GPS
- Geschwindigkeit quer zur Fahrtrichtung GPS
- Geschwindigkeit vertikal zur Fahrtrichtung GPS
- Drehzahl Motor
- Kühler Temperatur
- Position Unterlenker hinten (bezogen auf die Horizontale)
- Position Unterlenker vorne (bezogen auf die Horizontale)
- Motorauslastung
- Kraftstoffverbrauch

Sämtliche Messstellen (siehe Abb. 6) wurden zeitgleich erfasst und gespeichert. Die Auswertung der Daten erfolgte nach jeder Versuchsanstellung im Nachhinein.



Abbildung 3: Messsystem zur Erfassung der Fahrdynamik „ADMA“ Fa. Genesys



Abbildung 4: Messdatenerfassungssystem mit CANBUS-Anschluss an den Traktor



Abbildung 5: GPS- und RTK – Antenne am Traktordach

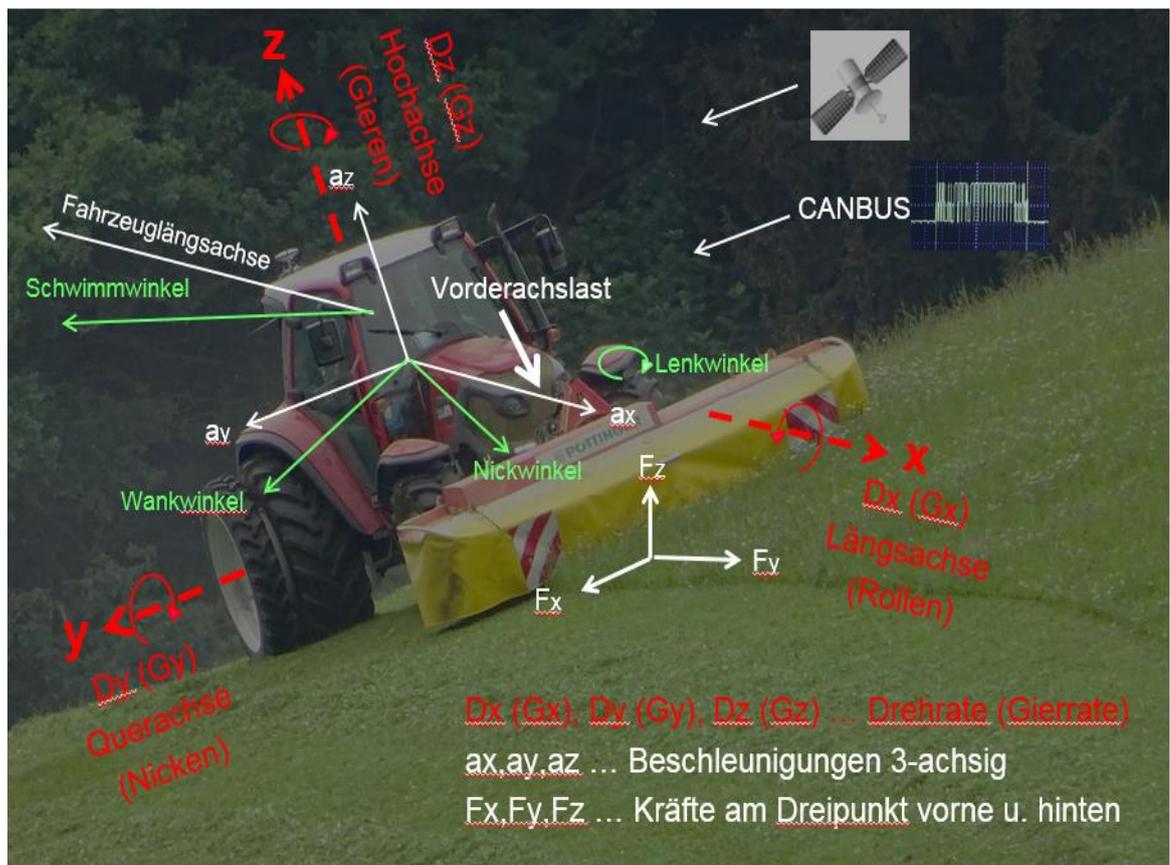


Abbildung 6: Übersicht über fahrdynamische Parameter am Versuchsfahrzeug

Die gewonnenen Messdaten konnten mit Hilfe eines RTK-GPS System auf 2 cm Positionsgenauigkeit den einzelnen Teilflächen zugeordnet werden. Somit war auch ein exakter Bezug der Messergebnisse auf die bearbeiteten Flächen möglich.

3.4 Versuchsanstellungen

Im Unterschied zu PKW und LKW gibt es bei einem landwirtschaftlichen Fahrzeug keine standardisierten Fahrzustände. Der Fahrbahnuntergrund, der Beladungszustand, die Belastung des Traktors durch Anbaugeräte vorne und hinten, die Reifendrucke, Hangneigungen u.v.a.m ändern sich ständig und haben dadurch einen großen Einfluss auf die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeuges. Aus der Vielfalt an möglichen Versuchsanstellung wurden einige bearbeitet.

Durchgeführte Versuchsanstellungen:

- Einfluss der Lenkungsart auf die Fahrdynamik am Hang
- Einfluss der Lenkungsart auf den Lenkwinkel
- Einfluss der Lenkungsart auf Drehrate (z)
- Verhalten des Traktors bei stationärer Kreisfahrt
- Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerks auf die Belastung der Vorderachse
- Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerks auf die Nickbewegungen des Traktors
- Einfluss der Ballastierung auf das Fahrverhalten und die Fahrsicherheit auf der Straße

Mögliche weitere Versuchsanstellungen:

- Einfluss der Lenkungsarten auf Wenderadius (Ebene und am Hang)
- Fahrverhalten des Fahrzeug mit und ohne Ballastierung (Ebene und am Hang)
- Fahrverhalten des Fahrzeuges beim Erzwingen von diversen Fahrzuständen.
- Einfluss der Hangneigung auf den Schwimmwinkel, Gierwinkel und den Schlupf.
- Abtrieb des Fahrzeuges bei unterschiedlichen Beladungszuständen und Hangneigungen.
- Einfluss der Schwingungstilgung auf die Belastung der Anbaugeräte.
- Einfluss des Schwerpunktes der Zuladung auf die Fahrdynamik.
- Einfluss von Reifendruck, Reifenart und Reifenzustand auf die Sicherheit.
- Einfluss unterschiedlicher Anhängerbremsysteme auf die Sicherheit.
- Usw.

4 ERGEBNISSE

Versuche im Praxiseinsatz sind immer stark von der Witterung, der Vegetation und der Bearbeitungsnotwendigkeit der Kulturen zu bestimmten Zeitpunkten abhängig. Die folgenden Ergebnisse zeigen beispielhaft einige fahrdynamischer Fragestellungen, die unter den gegebenen Verhältnissen möglich waren.

4.1 Einfluss der Lenkungsart auf die Fahrdynamik am Hang

Um die Effizienz der drei Lenkungsarten wie Vorderradlenkung, Hinterradlenkung und Hundegang des Versuchstraktors beurteilen zu können, wurden bei verschiedenen Einsatzbedingungen Testfahrten durchgeführt. Hierfür wurden der Schwimmwinkel oder auch Schräglaufwinkel genannt und der Lenkwinkel des Fahrzeuges herangezogen. Der Schwimmwinkel ist jener Winkel, der sich bei der Schichtenlinienfahrt durch die Abtrift der Traktorhinterachse zwischen Traktorlängsachse und der Bewegungsrichtung des Fahrzeuges bildet (siehe Abb.7). Je nach Fahrzeug dem Beladungs- und Fahrzustand und Hangneigung wird die Kraftschlussgrenze in Querrichtung an der Vorder- oder Hinterachse überschritten. Er ist eine Kennzahl nur für die jeweilige vorherrschende Fahrsituation und kann auf andere Fahrzeuge oder Versuchsflächen nicht übertragen werden.

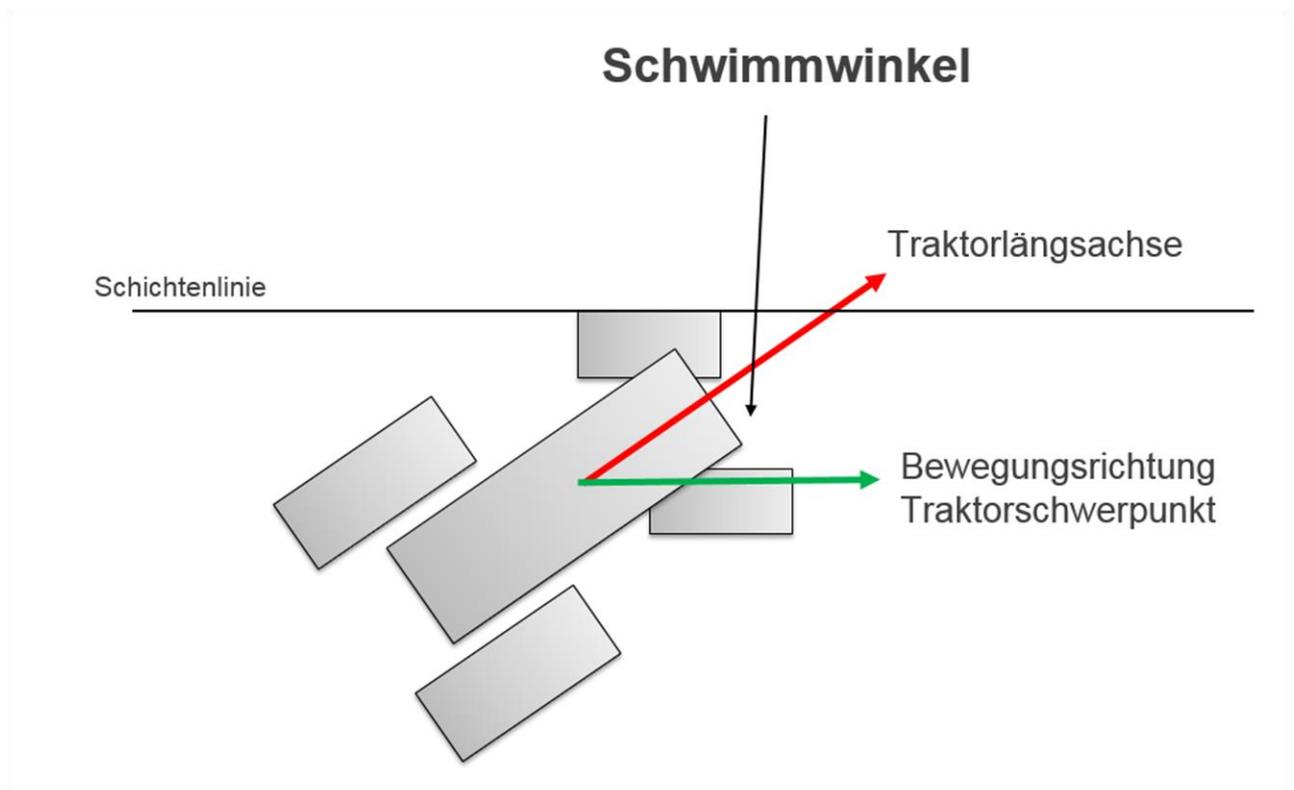


Abbildung 7: Schwimmwinkel oder Schräglaufwinkel zwischen Traktorlängsachse und Bewegungsrichtung

Der Schwimmwinkel spiegelt die jeweilige Fahrsituation in Abhängigkeit der Hangneigung, des Untergrundes (Feuchtigkeit, Pflanzenbewuchs, Bodenart) oder durch Veränderungen am Versuchsfahrzeug (Bereifungsart, Luftdruck, Ballastierung usw.) wieder. Abb. 8 zeigt den Versuchstraktor (Lintrac mit Allradlenkung, Frontmähwerk und Einfachbereifung), beim Mähen in der Schichtenlinie, bei sechs Fahrten hin und zurück.

Die durchschnittliche Hangneigung der Fläche lag bei 47% und die Fahrgeschwindigkeit bei 9 km/h. Der sägezahnartige Verlauf des Wankwinkels entsteht durch unterschiedlichen Hangneigungen der Fläche beim Vorgewende. Über die gesamte Versuchsdauer ist stetige Zunahme des Schwimmwinkels durch die steigende Hangneigung zu erkennen. Durch den Schwimmwinkels kann eine Veränderung in der Fahrdynamik, hervorgerufen durch sich ändernde Umgebungsverhältnisse oder durch Veränderungen am Versuchsfahrzeug sehr gut dargestellt werden kann. Dies gilt nur solange die Vorderräder (durch entsprechende Ballastierung oder Frontanbaugeräte) in der Spur gehalten werden können. Mit Überschreiten der Haftgrenze triftet das Fahrzeug ab, ein Arbeiten ist nicht mehr möglich. Dies ist im 3-D GPS-Positionsverlauf sofort erkennbar.

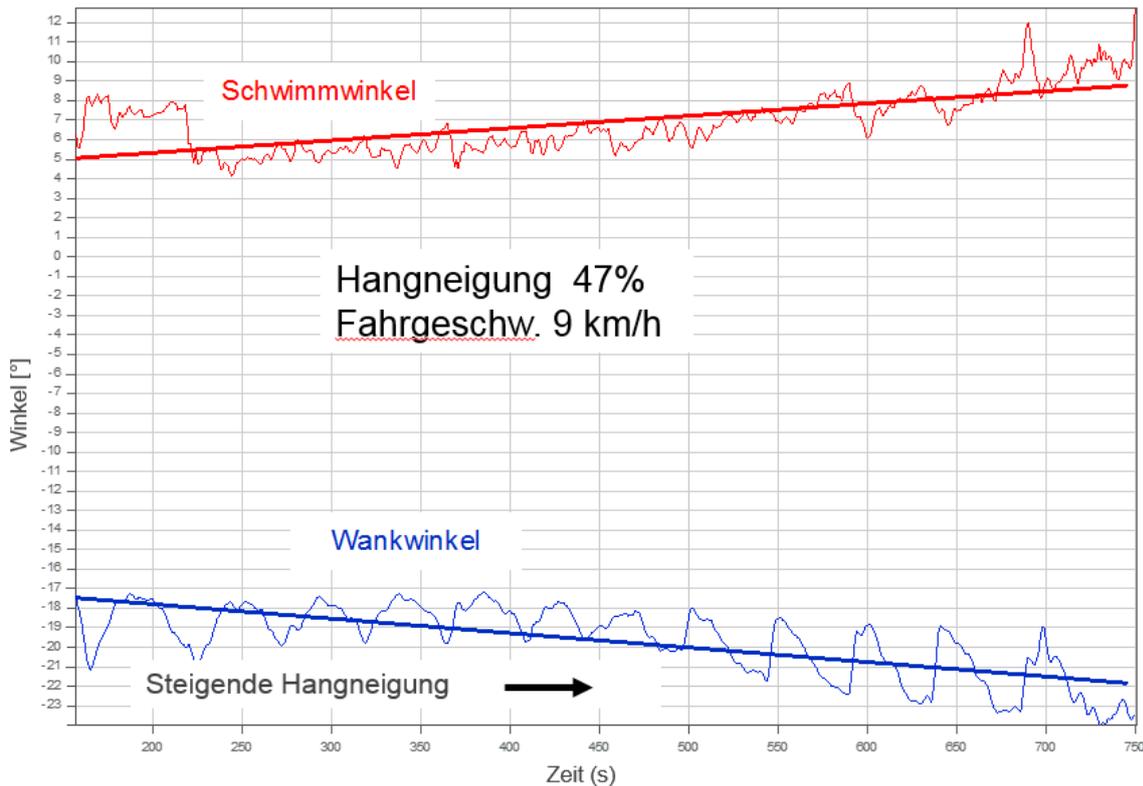


Abbildung 8: Der Schwimmwinkel steigt mit der Hangneigung

Durch die Erfassung der GPS-Positionsdaten war es möglich, die Versuchsflächen dreidimensional abzubilden (siehe Abb. 9). Bei der Auswertung der Ergebnisse konnte dadurch punktgenau die jeweilige Fahrsituation im Gelände mit in die Bewertung einbezogen werden. Mit dieser ortsspezifischen Darstellungsmöglichkeit der Messdaten, wird die Interpretation der Messergebnisse wesentlich erleichtert.

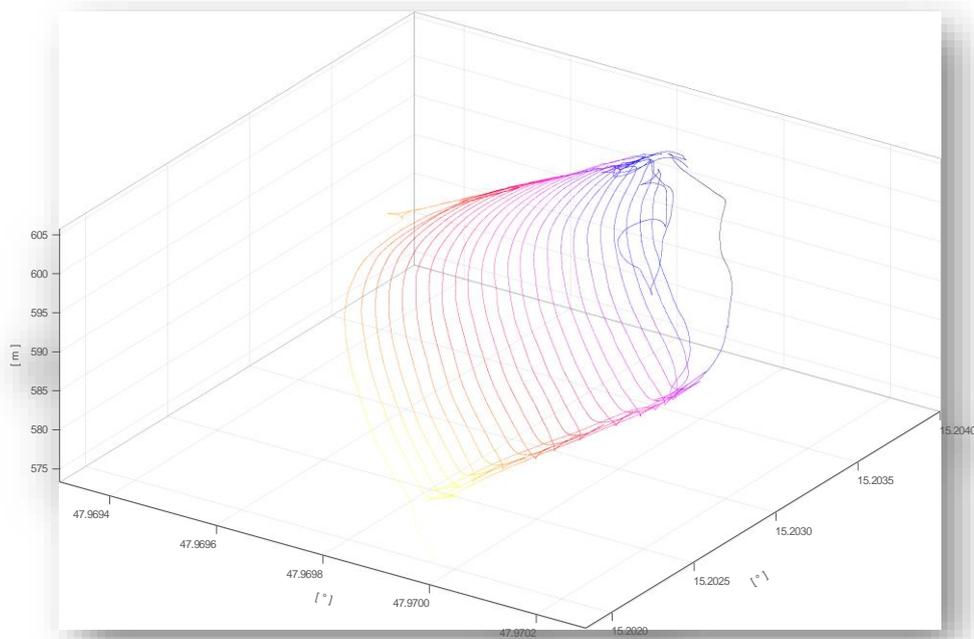


Abbildung 9: 3-D Darstellung der Versuchsfläche



Abbildung 10: Mähen auf der Versuchsfläche

Der Lenkwinkel definiert den Lenkeinschlag der Vorderräder des Traktors zu seiner Längsachse. Er zeigt, wie stark der Fahrer in Abhängigkeit zur Hangneigung Gegenlenken muss bzw. wie oft er korrigierend eingreifen muss um die vorgegebene Fahrspur beizubehalten (siehe Abb.11).

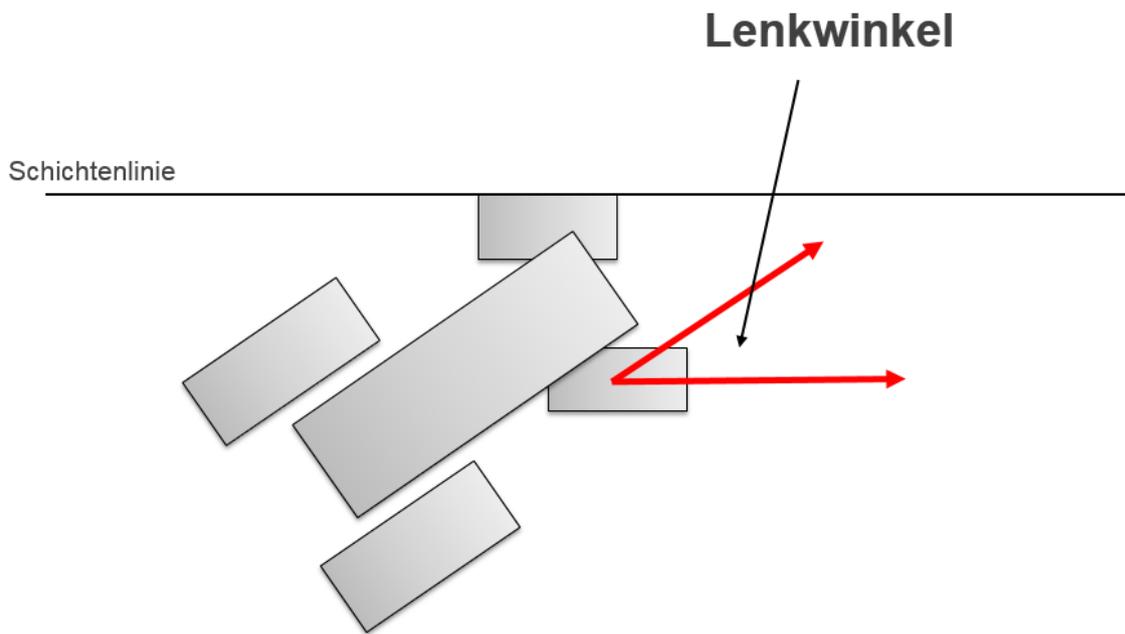


Abbildung 11: Der Lenkwinkel zwischen Traktorlängsachse und Lenkeinschlag der Räder

Um die Fahrspur bei steigender Hangneigung halten zu können nehmen die Lenkkorrekturen (Lenkwinkel) des Fahrers zu (Abb.12). Durch diese Kennzahl können kleine Änderungen am Fahrzeug oder an den Umgebungsbedingungen sofort erkannt, dargestellt und interpretiert werden.

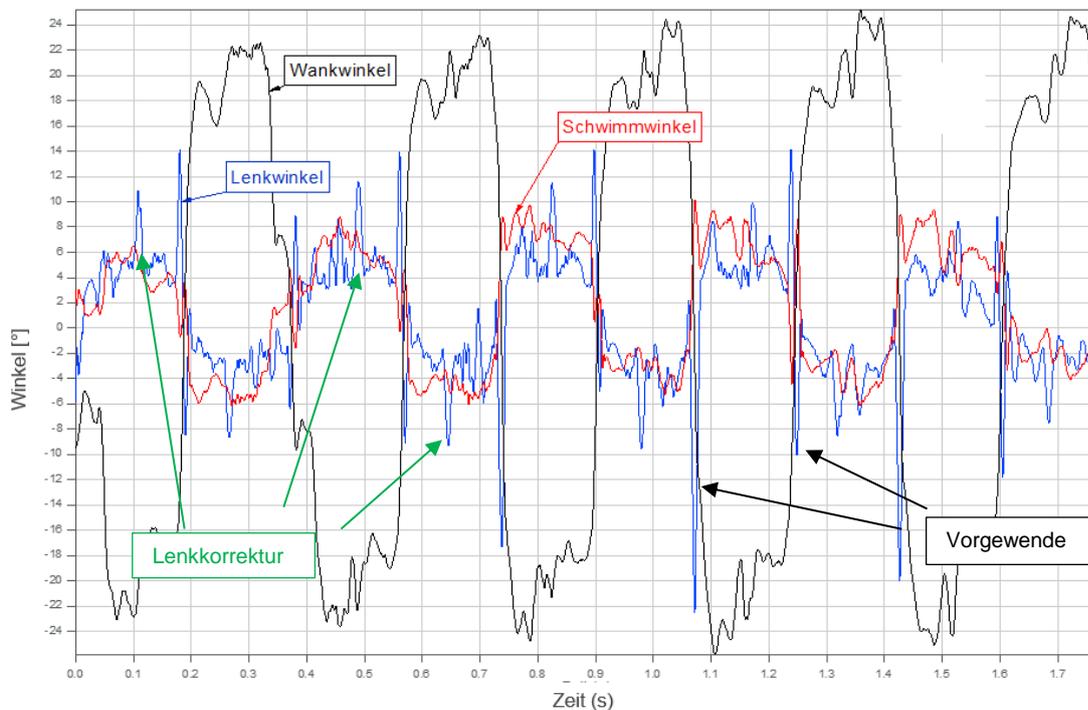


Abbildung 12: Verlauf von Wank-, Lenk- und Schwimmwinkel beim Fahren in der Schichtenlinie

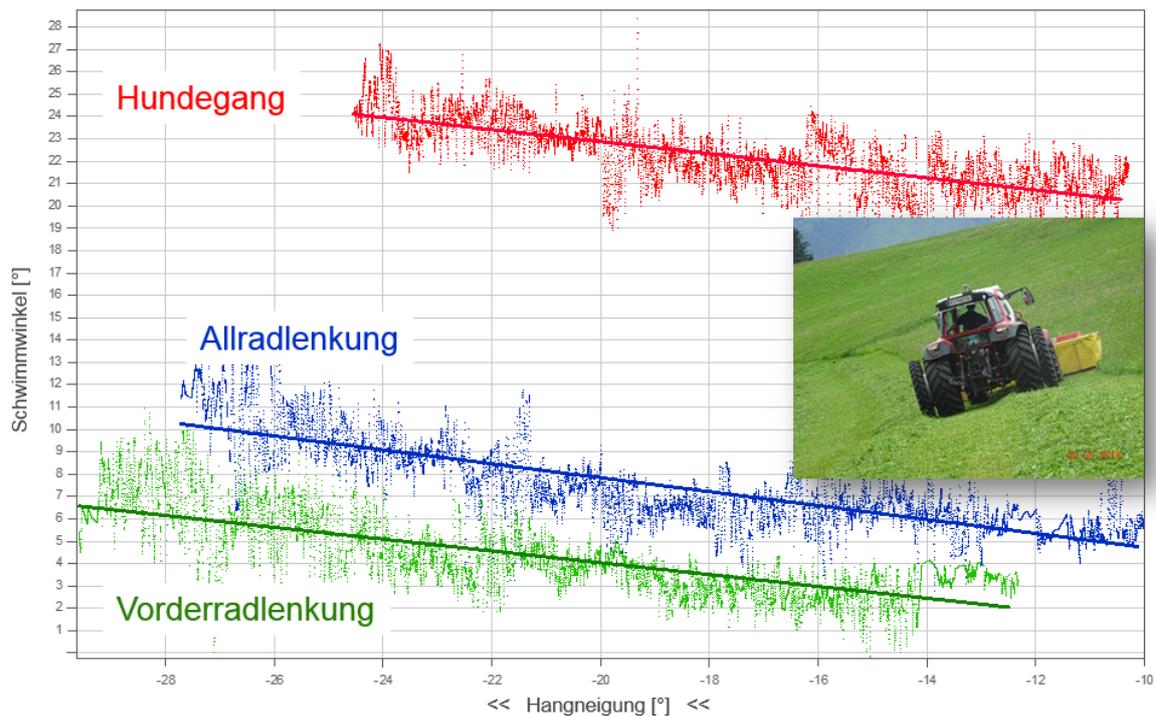


Abbildung 13: Einfluss der Lenkungsart auf den Schwimmwinkel

Im flachen Gelände ist die Lenkungsart von untergeordneter Bedeutung. Nur bei großen Arbeitsmaschinen, wie beim Rübensvollernter nützt man den Hundegang zur Verringerung der Bodenverdichtungen. Eine ganz andere Auswirkung hat die Lenkungsart jedoch am Hang. Dort kann sie zur Wendigkeit, Bodenschonung und Hangstabilität beitragen. Da beim Versuchstraktor verschiedenen Lenkungsarten (Vorderradlenkung, Allradlenkung und Hundegang) möglich waren, konnten damit diverse Versuchsanstellungen durchgeführt werden. Diesmal wurde der Traktor an der Hinterachse mit Doppelbereifung ausgestattet. In Abb. 13 sind die Fahrten in der Schichtenlinie, auf einer Fläche mit steigender Hangneigung von ca. 12 bis 28 Grad und mit verschiedenen Lenkungsarten dargestellt. Bei allen drei Lenkungsarten war der Anstieg des Schwimmwinkels bei steigender Hangneigung gleich. Bei der Vorderradlenkung war der Schwimmwinkel durchgehend um 4 Grad niedriger als bei der Allradlenkung. Ein Offset des Schwimmwinkels bei der Allradlenkung entstand durch das gleichzeitige Einlenken beider Achsen. Die Lenkungsart „Hundegang“ bewirkte durch den seitlichen Versatz der Hinterachse eine Änderung der Lenkgeometrie des Fahrzeuges. Dadurch entstand auch ein großer Offset beim Hundegang in Abb. 13. Beim Hundegang war auch subjektiv eine bessere Kippstabilität im steilen Gelände festzustellen. Der Versatz der Hinterräder musste jedoch bei jedem Wendevorgang manuell auf die andere Seite umgestellt werden (keine Automatik). Die Allradlenkung hatte im steilen Gelände den Vorteil, dass durch den kleinen Wenderadius im Vorgewende das normale „Schwalbenschwanz“ Wendemanöver (Zurückschieben und wieder in die Spur einfahren) entfiel und direkt in einem Zug in die nächste Spur eingefahren werden konnte. Dadurch wurde Zeit gespart und die Grasnarbe geschont. Beim LKW oder PKW treten beim Übersteuern oder Untersteuern des Fahrzeuges Resonanzen auf, die durch sinusförmiges Gegensteuern mit dem Lenkrad kompensiert werden müssen. Beim der Abtrift des Traktors am Hang sind nicht sinusförmige sondern stochastische Lenkradkorrekturbewegungen bzw. Lenkwinkeländerung festzustellen. Die Anregung erfolgt nur auf eine Seite und mit kleiner Fahrgeschwindigkeit, dadurch kann kein Aufschaukeln des Fahrzeuges entstehen.

4.2 Einfluss der Lenkungsart auf den Lenkwinkel

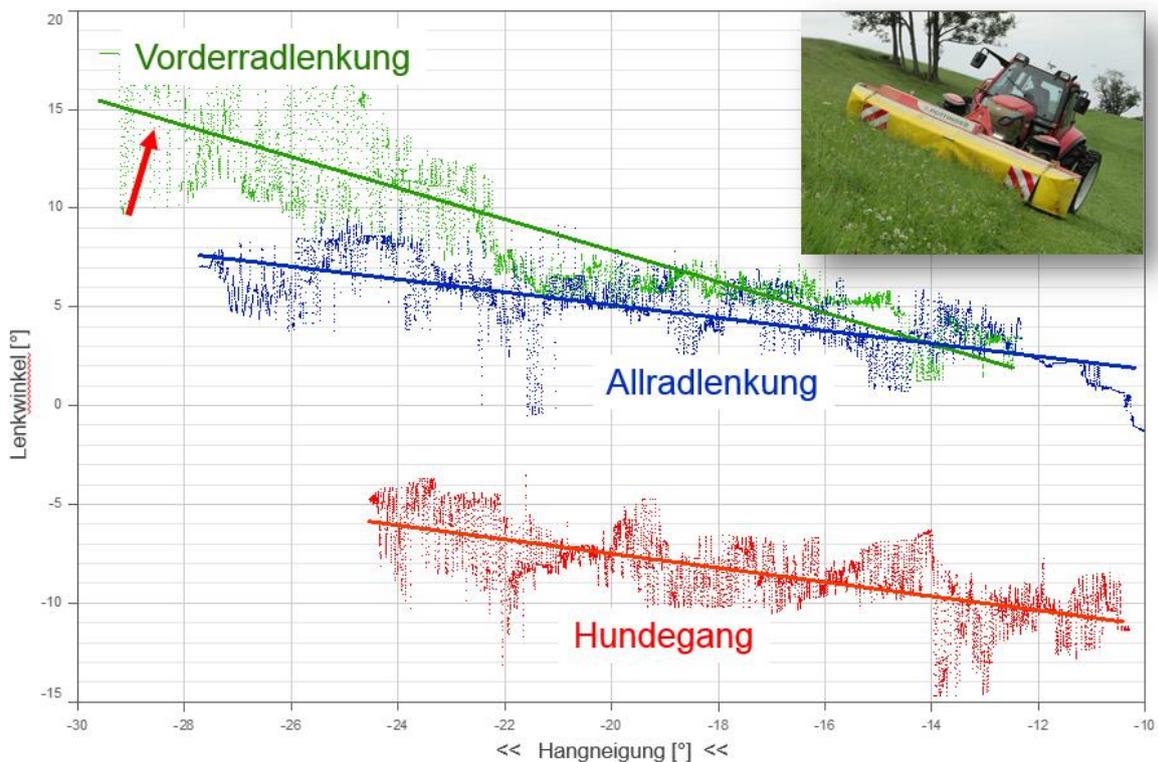


Abbildung 14: Einfluss der Lenkungsart auf den Lenkwinkel

Betrachtet man den Lenkwinkel bei steigender Hangneigung in Abhängigkeit von der Lenkungsart, so ist bei Allradlenkung und Hundegang der Anstieg des Lenkwinkels gleich und bei Vorderradlenkung wird er größer. Das bedeutet, dass durch die Allradlenkung und dem Hundegang eine stabilere Schichtenlinienfahrt erreicht wird als mit der Vorderradlenkung. Mit steigender Hangneigung musste der Lenkeinschlag bei der Vorderradlenkung ständig nachkorrigiert werden, um die Fahrspur zu halten (siehe Abb. 14).



Abbildung 15: Hinterradlenkung beim Versuchsfahrzeug

4.3 Einfluss der Lenkungsart auf die Drehrate

Die Drehrate (D_z) oder auch Gierrate (G_z) genannt gibt an, wie schnell sich der Rotationswinkel (Grad/Sek.) des Traktors um eine Hoch-Achse (z) ändert. Sie wird auch als Winkel-, Rotations- oder Drehgeschwindigkeit bezeichnet. Die Gierrate ist somit auch eine Kennzahl für das Fahrverhalten bzw. Instabilität des Fahrzeuges am Hang. Da bei einem Lenkeinschlag der Allradlenkung, die Vorderräder und Hinterräder sich gleichzeitig (gegengleich) bewegen, ist auch im Vergleich zu den beiden anderen Lenkungsarten die Drehrate höher (siehe Abb. 17). Die Vorderradlenkung und Hundegang haben bei steigender Hangneigung gleiches Verhalten auf die Drehrate, die Allradlenkung weist eine etwas höhere Drehrate um die z -Achse auf.



Abbildung 16: Mähen mit verschiedenen Lenkungsarten (Frontmähwerk)

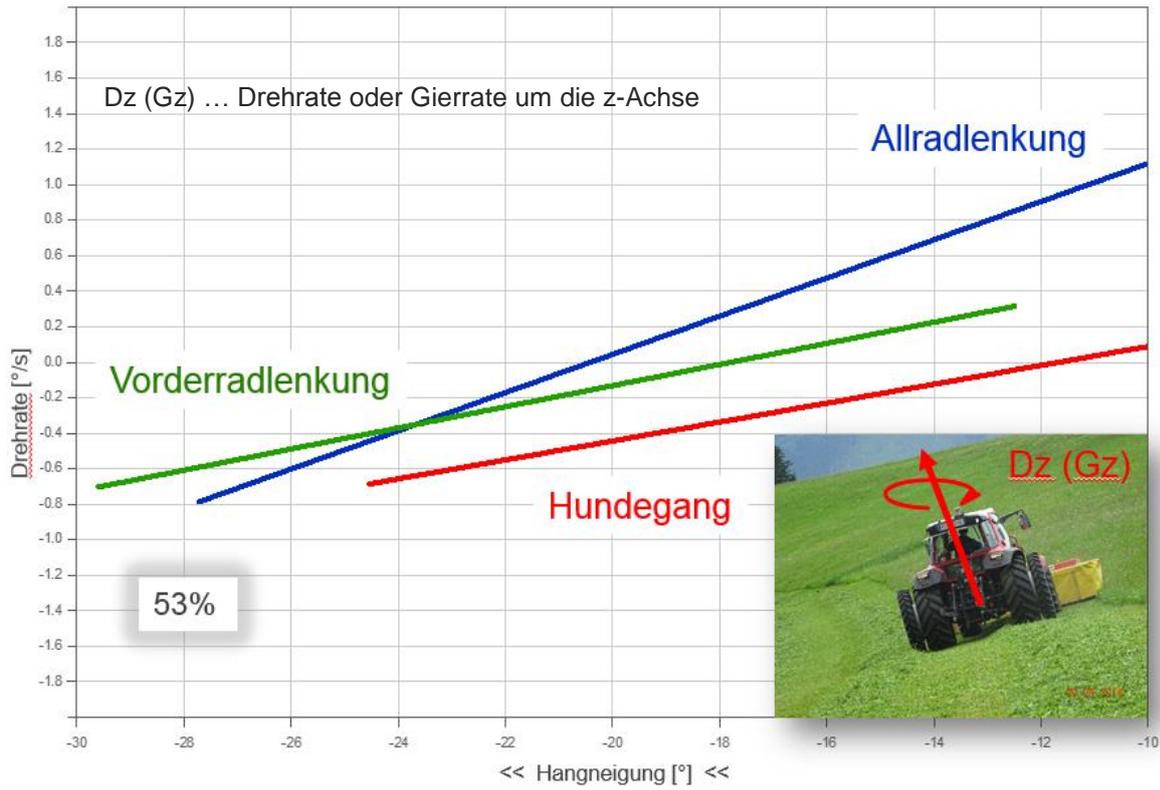


Abbildung 17: Einfluss der Lenkungsart auf die Drehrate (Rotationsgeschwindigkeit um die z-Achse, Dz oder Gz)

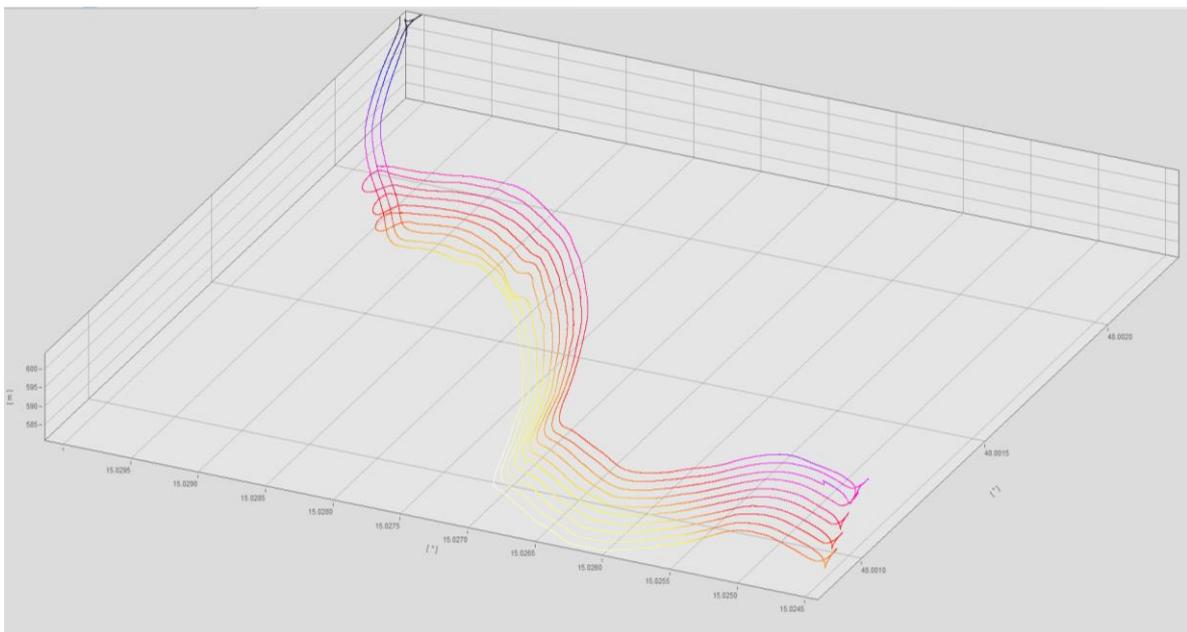


Abbildung 18: 3-D Darstellung der Versuchsfläche

In Abb. 19 ist der Verlauf der Drehrate (z) über die gesamte Versuchsfläche dargestellt. Mit Ausnahme des Vorgewendes, ändert sich bedingt durch das steile Gelände, die Drehrate bei jeder Veränderung des Untergrundes.

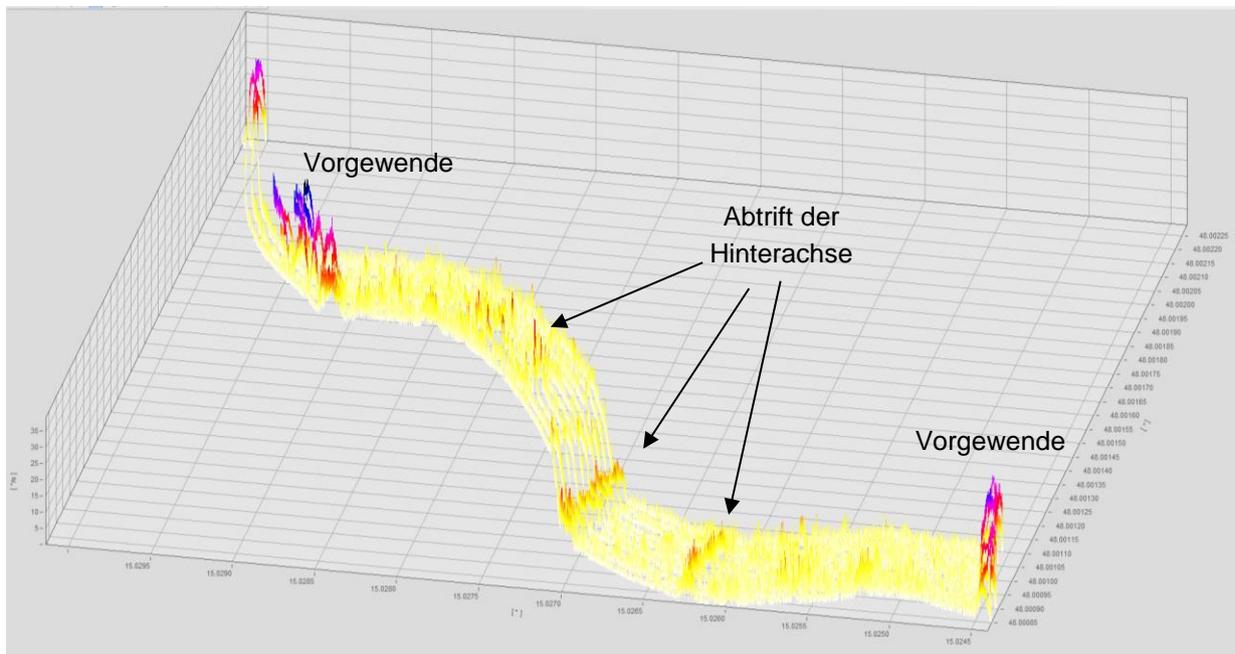


Abbildung 19: Verlauf der Drehrate (z) über die bearbeitete Fläche

4.4 Verhalten des Traktors bei stationärer Kreisfahrt

Das Fahrmanöver „Stationäre Kreisfahrt“ ist eine traditionell angewandte Methode zur Ermittlung der stationären Fahreigenschaften und des Einlenkverhaltens beim PKW. Dabei handelt es sich um eine Kreisfahrt auf einer asphaltierten oder betonierten weitläufigen Fläche. Am häufigsten werden Kreisfahrttests mit konstantem Radius (40m u. 100m) durchgeführt, für den auch eine internationale Norm ISO 4138 vorliegt.

Folgende Variationen der stationären Kreisfahrt beim PKW sind möglich:

1. Stationäre Kreisfahrt mit konstanter Querbeschleunigung (a) und stufenweiser Variation der Fahrgeschwindigkeit (v) sowie des Lenkwinkels (φ) - ($a=\text{konst.}$, $v=\text{var.}$, $\varphi=\text{var.}$).
2. Stationäre Kreisfahrt auf konstantem Fahrspurradius und stufenweiser Variation der Fahrgeschwindigkeit ($r=\text{konst.}$, $v=\text{var.}$)
3. Stationäre Kreisfahrt mit konstanter Fahrgeschwindigkeit und stufenweiser Variation des Lenkeinschlages ($v=\text{konst.}$, $\varphi=\text{var.}$)
4. Stationäre Kreisfahrt mit konstantem Lenkwinkel und stufenweiser Variation der Fahrgeschwindigkeit ($\varphi = \text{konst.}$, $v=\text{var.}$)

Üblicherweise werden folgende Größen als Funktion der Querbeschleunigung aufgetragen:

- Lenkradwinkel
- Schwimmwinkel
- Wankwinkel
- Lenkradmoment

So ein ähnliches Fahrmanöver wurde mit dem Versuchstraktor und dem Scheibenmähwerk an der Fronthydraulik durchzuführen. Da es noch keine Erfahrungswerte mit Traktoren gibt, wurden willkürlich ein Durchmesser von 14 m und eine Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h angenommen (ähnlich einem Kreisverkehr). Die Fahrgeschwindigkeit wurde empirisch ermittelt und lag subjektiv im oberen Geschwindigkeitsbereich des Traktors bei dieser Fahrsituation. Die Versuchsanstellung sollte zeigen, ob relevante fahrdynamische Unterschiede mit Vorderradlenkung und Allradlenkung bei dieser Fahrsituation auftreten (Abb. 20).

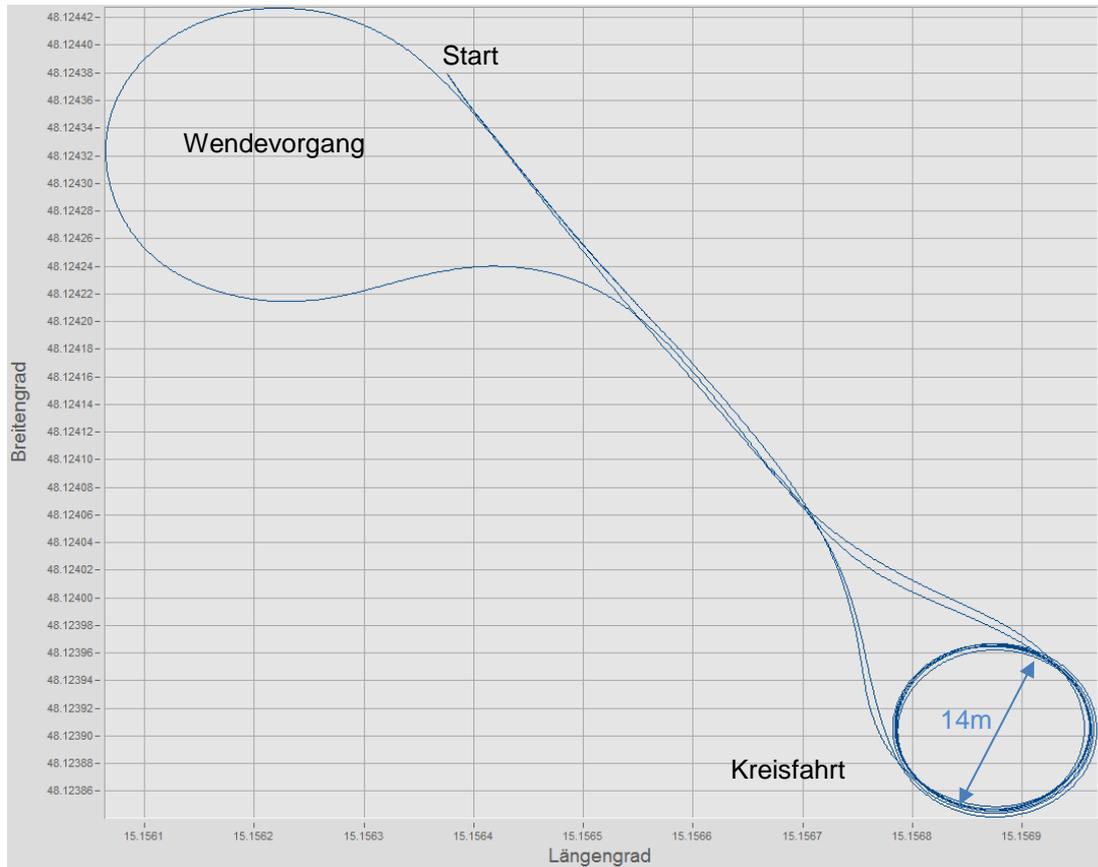


Abbildung 20: Stationäre Kreisfahrt auf der Teststrecke der BLT

In die Kreisfahrt wurde abwechseln einmal von links und von rechts eingefahren. In Abb. 21 sind die Verläufe von Wank- und Nickwinkel bei Vorderradlenkung (VRL) und Allradlenkung (ARL) dargestellt. Deutlich zu erkennen sind starke Resonanzen sowohl beim Nick- als auch beim Wankwinkel, die durch die Walkbewegungen der Vorderräder entstanden sind.

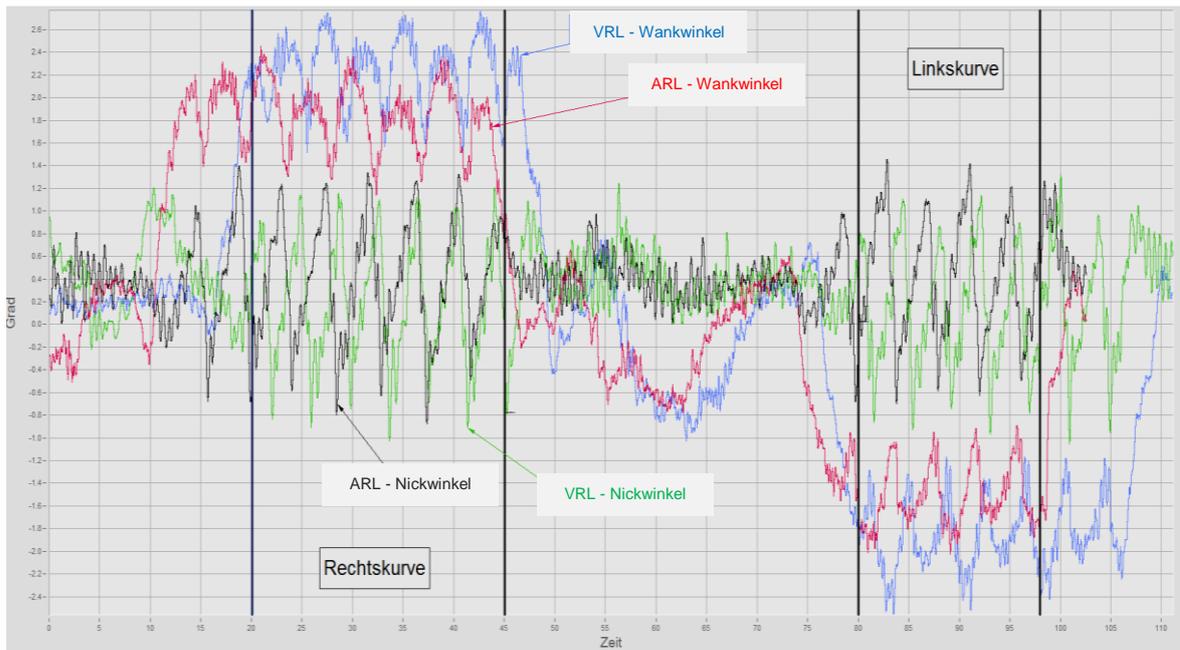


Abbildung 21: Verlauf von Nickwinkel und Wankwinkel bei der stationären Kreisfahrt mit unterschiedlichen Lenkungsarten

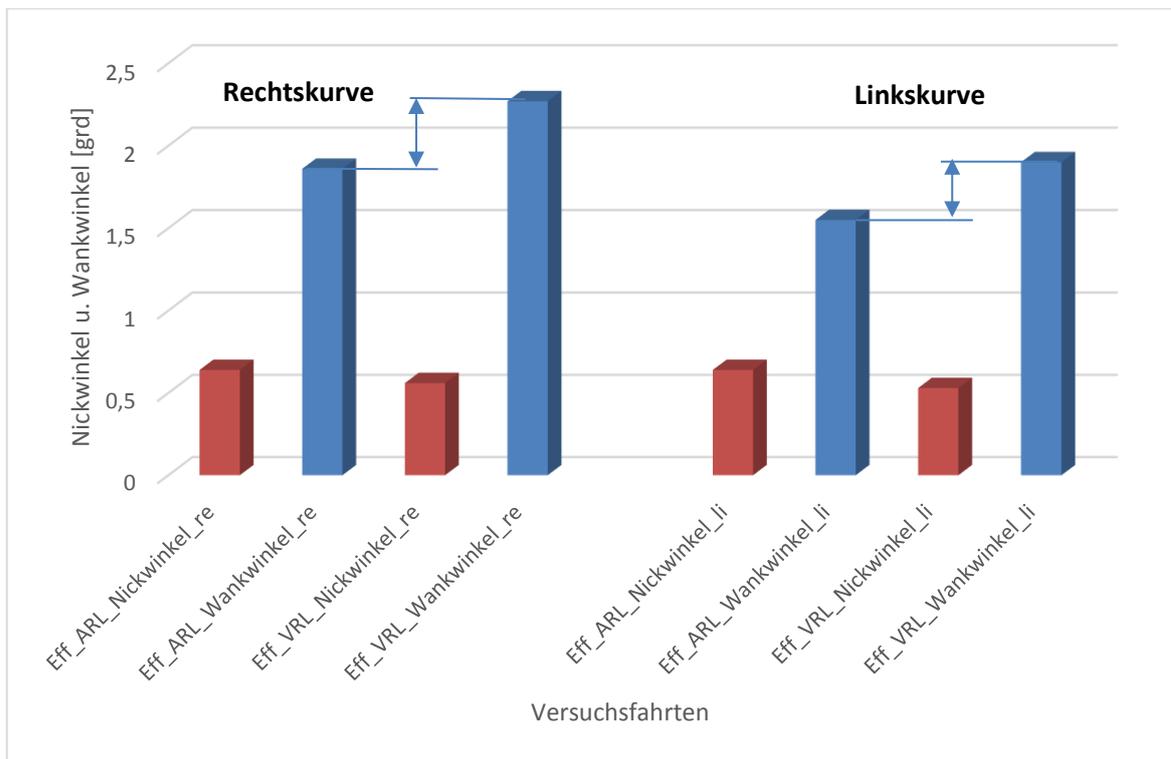


Abbildung 22: Effektivwerte von Nickwinkel und Wankwinkel bei der stationären Kreisfahrt

In Abb. 22 zeigt, dass sowohl bei der Links- als auch bei der Rechtsfahrt im Kreis, der Wankwinkel und dadurch auch die Drehrate um die y-Achse, bei der Allradlenkung im Vergleich zu der Vorderachslenkung um ca. 18 % kleiner sind. Durch das gleichzeitige Einlenken der Vorder- und Hinterräder

ist die Gefahr des Untersteuerns des Fahrzeuges bei der Allradlenkung kleiner als bei Vorderradlenkung. Die Nickbewegungen sind bei der Vorderradlenkung geringfügig kleiner als bei der Allradlenkung.

4.5 Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerks auf die Belastung der Vorderachse

Die Schwingungstilgung des Fronthubwerks dient in erster Linie zur Reduktion der Belastungsspitzen auf die Vorderachse, der Anbaugeräte und der Erhöhung der Fahrsicherheit bei der Straßenfahrt. Andere Traktorhersteller erreichen diesen Effekt über eine gefederte Vorderachse. Um die Effizienz der Schwingungstilgung untersuchen zu können, wurde die Vorderachse mit DMS appliziert (Abb.23). Somit konnte im Fahrbetrieb die dynamische Aufstandskraft der Vorderräder auf den Boden ermittelt werden. Die Versuche wurden auf den hauseigenen Testbahnen (100m, 35 m) der BLT durchgeführt (Abb.24).

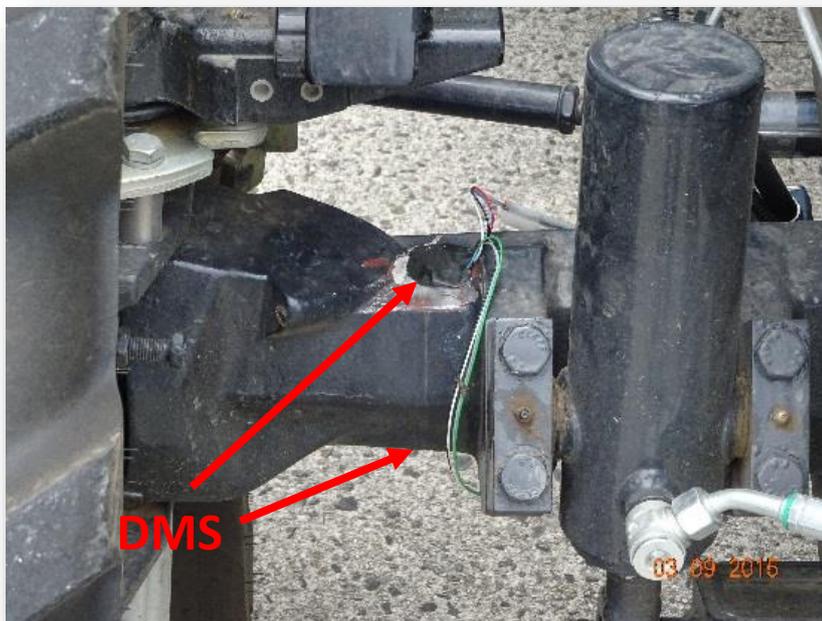


Abbildung 23: Messstellen (DMS) zur Ermittlung der Vorderachslast im Fahrbetrieb



Abbildung 24: Auffahrt auf die Testbahn (100m) mit Ballastierung vorne und hinten

Abb. 25 ist die Verteilung der Kräfte ohne Frontmähwerk (Leerfahrt), mit Frontmähwerk und ein- und ausgeschalteter Schwingungstilgung dargestellt. Bei der Leerfahrt bewirken die Schwingungsanregungen der Testbahn, teilweise eine Unterschreitung der Mindestaufstandskraft von 20% des Eigengewichtes. Die Fahrt mit eingeschalteter Schwingungstilgung zeigt im Vergleich zur Fahrt mit ausgeschalteten Schwingungstilgung eine deutliche Reduktion der Lastspitzen im oberen Lastbereich.

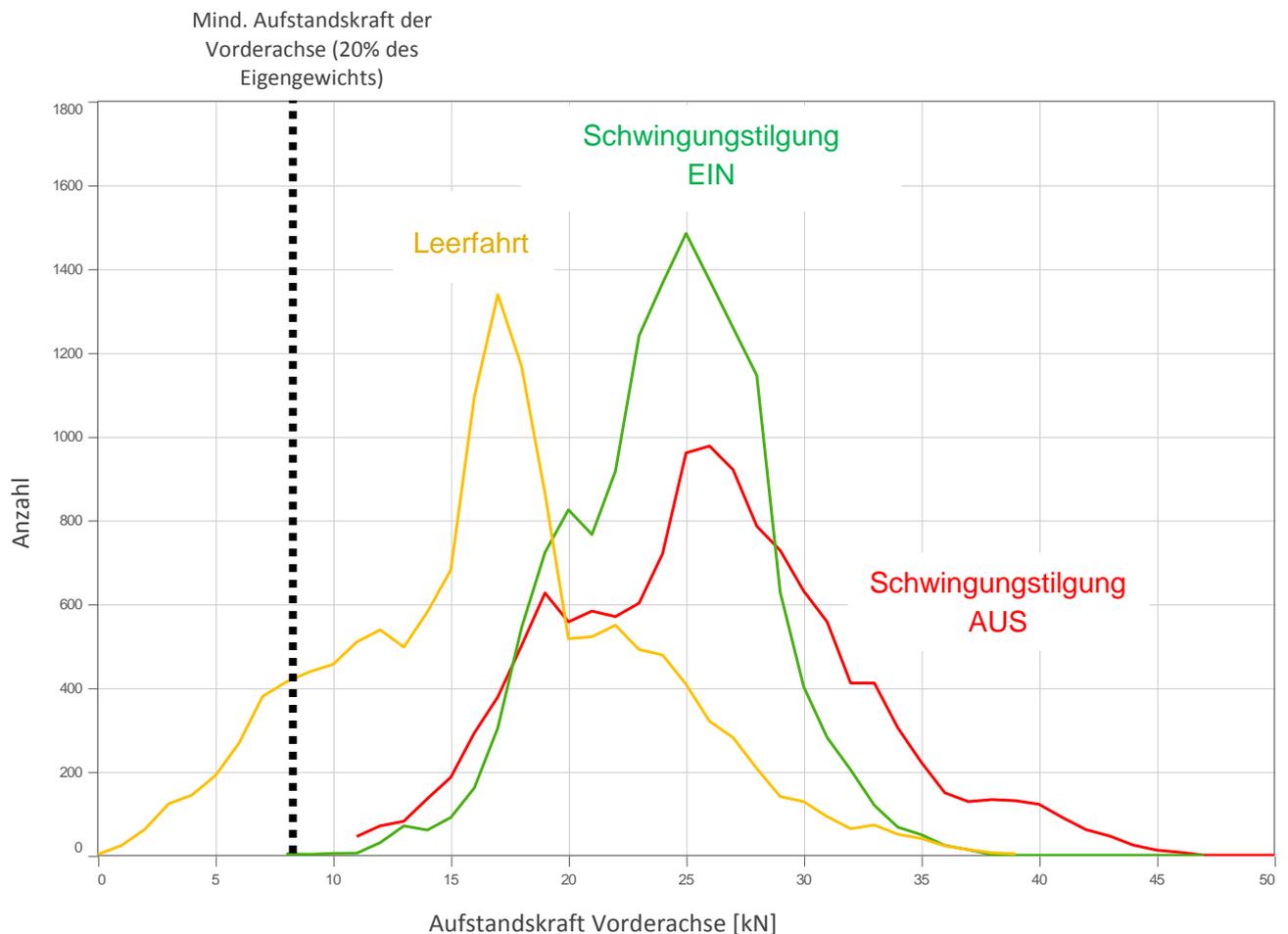


Abbildung 25: Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerkes auf die Aufstandskraft der Vorderachse am Boden (Fahrt über die Testbahn 100m, Lintrac + Frontmähwerk, 20 km/h)

4.6 Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerks auf die Nickbewegungen des Traktors

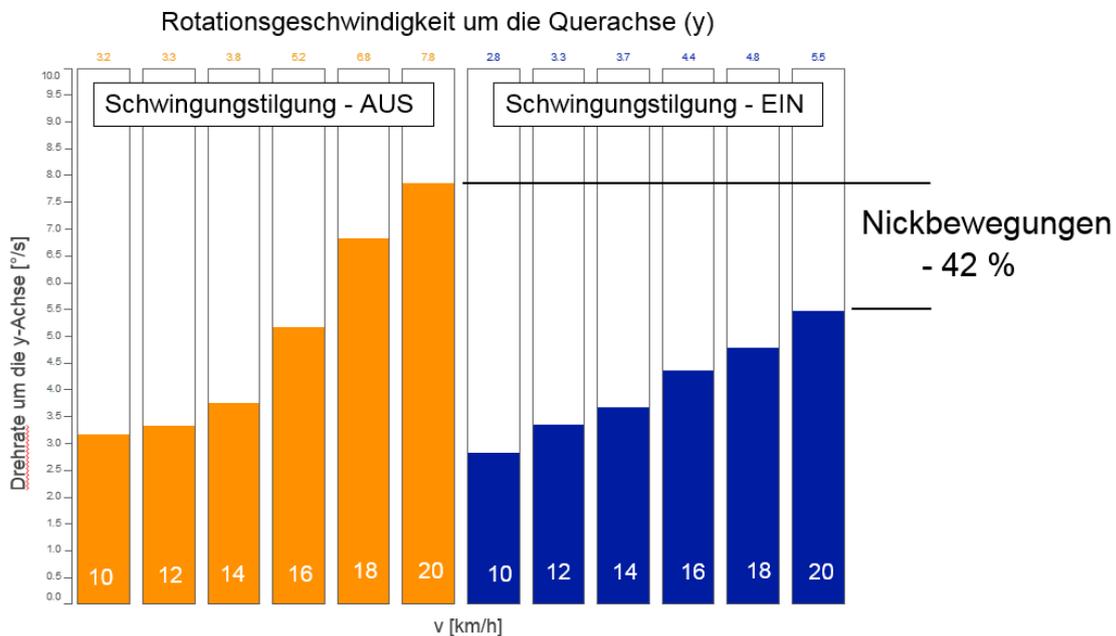


Abbildung 26: Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerkes auf die Nickbewegungen des Traktors bei der Fahrt über die 100m Bahn (Lintrac + Frontmäherwerk)

Durch den zeitlichen Unterschied der Schwingungsanregungen zwischen der Vorder- und Hinterachse des Traktors entstehen Nickschwingungen. Diese Nickbewegungen Traktors führen zu erhöhter Schwingungsbelastung des Fahrers in horizontaler als auch in vertikaler Richtung und zu Belastungsspitzen an den Anbaugeräten. Sie entstehen durch Fahrbahnanregungen (Löcher und Unebenheiten des Untergrundes) und sind unerwünschte Begleiterscheinungen, die die Fahrsicherheit wesentlich beeinflussen. Welchen Effekt die Schwingungstilgung des Fronthubwerkes auf die Reduktion der Nickbewegungen des Traktors hat, ist in Abb. 26 ersichtlich. Ohne Schwingungstilgung ist ein exponentieller Anstieg der Nickbewegungen, mit Schwingungstilgung ist ein linearer Anstieg Nickbewegungen mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit zu beobachten. Die Schwingungstilgung bewirkt eine Reduktion der Nickbewegungen um 42% bei einer Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h. Die Ergebnisse beziehen sich nur auf diese Versuchsanstellung und können nicht auf andere Maschinen übertragen werden.

4.7 Einfluss der Ballastierung auf das Fahrverhalten und die Fahrsicherheit auf der Straße

Durch die steigenden Transportgeschwindigkeiten wird das Thema Fahrsicherheit immer wichtiger. Die Traktorhersteller versuchen durch Federungssysteme, Schwingungstilgungen und Spezialbereifungen die Fahrsicherheit zu steigern. Jedoch die Wirkung ist je nach Fahrzeug sehr unterschiedlich. Der Versuchstraktor war mit keinem Federungssystem, aber dafür mit einer Schwingungstilgung des Front- und Heckhubwerkes ausgestattet. Die Schwingungstilgung der Vorderachse erfolgt über die Hydraulik und das Signal für die Schwingungstilgung des Heckhubwerkes lieferte ein spezieller Oberlenker mit

einer Kraftmessung. Die folgende Darstellung Abb. 27 zeigt die Fahrten mit den verschiedenen Ballastierungszuständen (Leerfahrt, nur Frontballast 540 kg, nur Heckballast 1130 kg und Front- und Heckballast gemeinsam. Als Frontballast wurde das Frontmähwerk, wie es bei den anderen Versuchen verwendet wurde genommen, als Heckballast diente eine pflugähnliche Vorrichtung (Demopflug) mit verschiebbaren Gewichten. Das Gewicht des Heckballastes (ohne Frontballast) wurde mit verschiebbaren Gewichten auf die gerade noch zulässige Achslast von 20% des Traktoreigengewichtes (852kg) eingestellt.

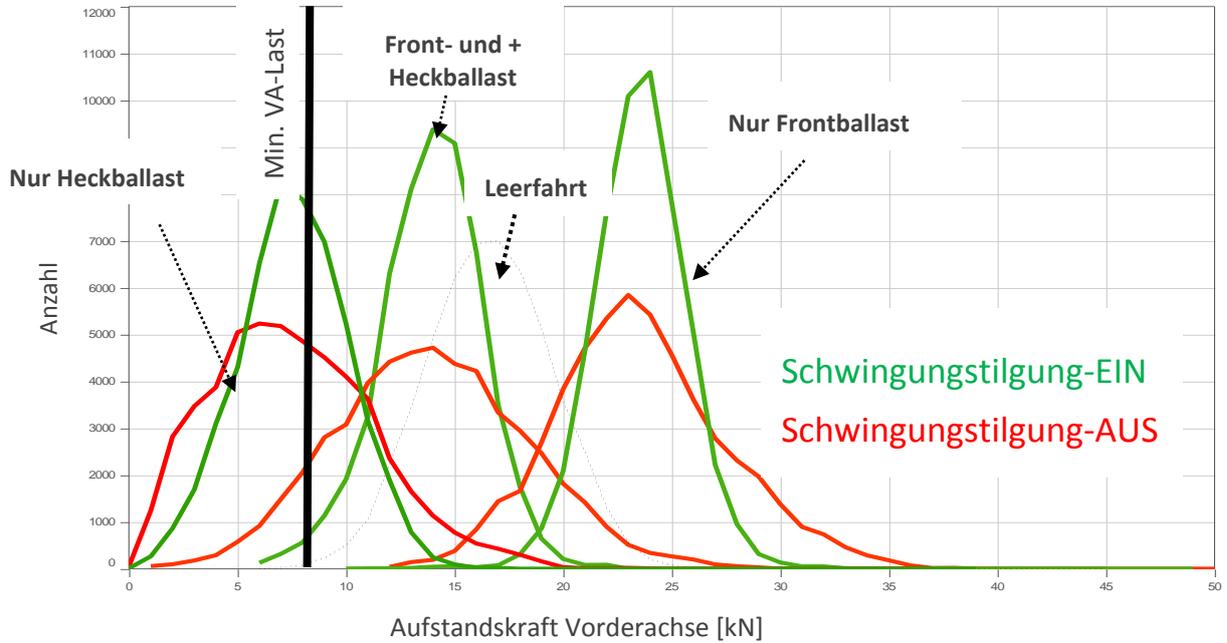


Abbildung 27: Einfluss der Schwingungstilgungen auf die Fahrsicherheit



Abbildung 28: Fahrten mit verschiedenen Ballastierungen über die Testbahnen

Bei allen Versuchsfahrten zeigte sich mit der eingeschalteten Schwingungstilgungen eine deutliche Verringerung der Belastungsspitzen an der Vorderachse und damit auch an den Anbaugeräten. Nur mit dem Heckballast war jedoch die Fahrsicherheit nicht mehr gegeben, da die Räder die notwendige Aufstandskraft auf den Boden nicht mehr erreichen konnten und teilweise den Bodenkontakt verloren. Diese Erkenntnisse beziehen sich jedoch nur auf dieses Fahrzeug unter diesen Verhältnissen. Sie sind auf andere Fahrzeuge nicht übertragbar.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund dieser Untersuchungen an einem Traktor konnten Erfahrungen gewonnen werden, wie Versuche anzustellen sind, um bei unterschiedlichsten Einsatzverhältnissen aussagekräftige Informationen über fahrdynamische Eigenschaften landwirtschaftlicher Fahrzeuges zu erhalten. Besonders interessant die die Daten bei kritische Fahrzustände, wenn der Fahrer durch die ihm zur Verfügung stehenden Eingriffsmöglichkeiten (Lenkrad, Bremspedal) und mit seiner Fahrerfahrung das Fahrzeug nicht mehr selbstständig in einen stabilen Fahrzustand bringen kann. Verschiedene Kennwerte können dann Auskunft über die Bewertung der jeweiligen Fahrsituation des Fahrzeuges geben. Der Schwimmwinkel am Hang ist ein Maß dafür, wie sich die jeweilige Fahrsituation in Abhängigkeit der Hangneigung, des Untergrundes (Feuchtigkeit, Pflanzenbewuchs, Bodenart) oder durch Veränderungen am Versuchsfahrzeug (Bereifungsart, Luftdruck, Ballastierung usw.) widerspiegelt. Die unterschiedliche Art der Lenkung eines Fahrzeuges kann zur Wendigkeit, Bodenschonung und einer Steigerung der Hangstabilität beitragen. Bei allen drei Lenkungsarten war der gleiche Schwimmwinkel mit steigender Hangneigung feststellbar. Nur beim Hundegang entstand durch die starke Änderung der Lenkgeometrie, im Vergleich zum Normalzustand ein Offset in der Darstellung. Der Hundegang bewirkt auch eine bessere Kippstabilität im steilen Gelände. Die Allradlenkung besticht vor allem durch den kleinen Wenderadius und der Zeitersparnis am Vorgewende. Diese Lenkungsart beeinflusst den Lenkwinkel. Bei Allradlenkung und Hundegang ist der Anstieg des Lenkwinkels am Hang gleich, bei Vorderradlenkung wird er mit steigender Hangneigung wesentlich größer als bei den anderen Lenkungsarten. Das bedeutet, dass mit der Vorderradlenkung im steilen Gelände wesentlich häufiger Lenkkorrekturen notwendig sind um die Fahrspur zu halten. Die Drehrate oder Gierrate um die Hochachse (z) ist zum Beispiel bei der Allradlenkung größer als bei den anderen Lenkungsarten, weil das gleichzeitige Einlenken der Räder eine schnellere Reaktion der Drehbewegung des Fahrzeuges bewirkt. Der Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerkes bei Fahren mit Anbaugeräten erhöht die Fahrsicherheit auf der Straße und reduziert die Belastungsspitzen auf das Anbaugerät und den Traktor. Sie reduzierte auch die Nickbewegungen des Testfahrzeuges auf der 100m Testbahn um 42%. Bei allen Versuchsvarianten zeigt sich mit eingeschalteter Schwingungstilgung eine deutliche Verringerung der Belastungsspitzen an der Vorderachse und damit auch an den Anbaugeräten. Bei der Fahrten auf der 100m Testbahn, nur mit dem Heckballast (Demopflug) ist jedoch die Fahrsicherheit nicht mehr gegeben, da die Vorderräder die notwendige Aufstandskraft auf den Boden nicht mehr erreichen und teilweise den Bodenkontakt verlieren. Eine ausreichende Fahrsicherheit auf der Straße wäre bei dieser Versuchsanstellung nicht mehr gegeben. Durch dieses Projekt konnten beispielgebend einzelne fahrdynamische Fragestellungen, Methoden und Erfahrungswerte beim Fahren mit dem Traktor und Anbaugerät erarbeitet werden. Es können in Zukunft verschiedene Ausstattungsvarianten des Fahrzeuges bei unterschiedlichen Einsatzverhältnissen, Bereifungs- und Ballastierungsvarianten auf ihre Effizienz und Sicherheit überprüft werden. Die Informationen und Erkenntnisse, die daraus gewonnen wurden können direkt in die Praxis einfließen und für die Optimierung und Weiterentwicklung der Maschinen oder deren Assistenzsysteme verwendet werden.

6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Versuchsfahrzeug Fa. Lindner „Lintrac“ beim Mulchen	9
Abbildung 2: Mögliche Lenkungsvarianten am Versuchsfahrzeug	10
Abbildung 3: Messsystem zur Erfassung der Fahrdynamik „ADMA“ Fa. Genesys.....	12
Abbildung 4: Messdatenerfassungssystem mit CANBUS-Anschluss an den Traktor.....	12
Abbildung 5: GPS- und RTK – Antenne am Traktordach.....	13
Abbildung 6: Übersicht über fahrdynamische Parameter am Versuchsfahrzeug	13
Abbildung 7: Schwimmwinkel oder Schräglaufwinkel zwischen Traktorlängsachse und Bewegungsrichtung	15
Abbildung 8: Der Schwimmwinkel steigt mit der Hangneigung.....	16
Abbildung 9: 3-D Darstellung der Versuchsfläche	17
Abbildung 10: Mähen auf der Versuchsfläche.....	17
Abbildung 11: Der Lenkwinkel zwischen Traktorlängsachse und Lenkeinschlag der Räder	18
Abbildung 12: Verlauf von Wank-, Lenk- und Schwimmwinkel beim Fahren in der Schichtenlinie	18
Abbildung 13: Einfluss der Lenkungsart auf den Schwimmwinkel	19
Abbildung 14: Einfluss der Lenkungsart auf den Lenkwinkel.....	20
Abbildung 15: Hinterradlenkung beim Versuchsfahrzeug	20
Abbildung 16: Mähen mit verschiedenen Lenkungsarten (Frontmähwerk).....	21
Abbildung 17: Einfluss der Lenkungsart auf die Drehrate (Rotationsgeschwindigkeit um die z-Achse, Dz oder Gz).....	22
Abbildung 18: 3-D Darstellung der Versuchsfläche	22
Abbildung 19: Verlauf der Drehrate (z) über die bearbeitete Fläche	23
Abbildung 20: Stationäre Kreisfahrt auf der Teststrecke der BLT	24
Abbildung 21: Verlauf von Nickwinkel und Wankwinkel bei der stationären Kreisfahrt mit unterschiedlichen Lenkungsarten.....	25
Abbildung 22: Effektivwerte von Nickwinkel und Wankwinkel bei der stationären Kreisfahrt	25
Abbildung 23: Messstellen (DMS) zur Ermittlung der Vorderachslast im Fahrbetrieb	26
Abbildung 24: Auffahrt auf die Testbahn (100m) mit Ballastierung vorne und hinten.....	26
Abbildung 25: Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerkes auf die Aufstandskraft der Vorderachse am Boden (Fahrt über die Testbahn 100m, Lintrac + Frontmähwerk, 20 km/h).....	27
Abbildung 26: Einfluss der Schwingungstilgung des Fronthubwerkes auf die Nickbewegungen des Traktors bei der Fahrt über die 100m Bahn (Lintrac + Frontmähwerk).....	28
Abbildung 27: Einfluss der Schwingungstilgungen auf die Fahrsicherheit.....	29
Abbildung 28: Fahrten mit verschiedenen Ballastierungen über die Testbahnen.....	29

