



Technische
Universität
Braunschweig

INSTITUT FÜR
mobile Maschinen
und Nutzfahrzeuge



Forschungsberichte

Christian Birkmann

**Lastschaltvorgänge in
Mehrfachgruppengetrieben
für Standardtraktoren**

Herausgeber:
Freundes- und Förderkreis des Instituts
für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge e.V.

Shaker Verlag

Lastschaltvorgänge in Mehrfachgruppengetrieben für Standardtraktoren

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: M.Sc. Christian Birkmann

aus: Berlin

eingereicht am: 07.08.2019

mündliche Prüfung am: 28.02.2020

Gutachter: Prof. Dr. Ludger Frerichs

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl Theodor Renius

2020

Forschungsberichte aus dem
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

Christian Birkmann

**Lastschaltvorgänge in Mehrfachgruppengetrieben
für Standardtraktoren**

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7370-6

ISSN 2196-7369

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Vorentwicklung von CLAAS Traktor bei der CLAAS Industrietechnik GmbH in Paderborn und als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN) der TU Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Ludger Frerichs für die Möglichkeit zur Promotion und die Betreuung dieser Arbeit. Ferner möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen, die Möglichkeit in der Lehre tätig zu sein sowie die wertvollen Anregungen in fachlichen und überfachlichen Belangen während der Promotionszeit bedanken.

Mein herzlicher Dank gilt außerdem Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl Th. Renius für die Übernahme des Korreferats, die Durchsicht meiner Arbeit sowie für die konstruktiven Diskussionen und Ratschläge während der Entstehung der Arbeit. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Der Firma CLAAS danke ich für die Möglichkeit und das Vertrauen zur Bearbeitung der Dissertation. Ich möchte mich besonders bei Herrn Dr.-Ing. Thomas Fedde für die Betreuung meiner Promotion seitens CLAAS bedanken. Allen weiteren beteiligten Kollegen bei CLAAS Traktor in Frankreich und Deutschland sowie den Kollegen der CLAAS Industrietechnik GmbH danke ich für die Unterstützung beim Aufbau des Versuchsstands und der Getriebesteuerung sowie bei der Durchführung der Prüfstands- und Fahrversuche.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Uli Otten von der Firma innoVision – engineering für die Konstruktion und den Umbau des Prüfgetriebes sowie für das persönliche Interesse an meiner Arbeit und den fachlichen Austausch zu Lastschaltgetrieben bedanken. Darüber hinaus danke ich den Kollegen der Firma GIMA für die Konstruktion des Prüfgetriebes und die Unterstützung bei der Entwicklung der Getriebesteuerung.

Mein Dank gilt außerdem den Herren Dr.-Ing. Arno Wiedermann, Dr.-Ing. Jan Wieckhorst und M.Sc. Michael Peeters für die hilfreichen Diskussionen zu fachlichen und überfachlichen Themen.

Bei allen aktuellen und ehemaligen Kollegen des IMN möchte ich mich für die angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken. Weiterer Dank gilt allen Studenten, deren Unterstützung im Rahmen von Abschlussarbeiten in diese Arbeit mit eingeflossen ist.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Familie für die Unterstützung und Förderung während meines Studiums und der Tätigkeit bei CLAAS. Durch ihre Unterstützung wurde mein beruflicher Werdegang möglich und ich konnte die vielen Stunden für die Arbeit an der Dissertation aufbringen.

Versmold, im April 2020

Christian Birkmann

Kurzfassung

Volllastschaltbare Getriebe mit hoher Ganganzahl werden in Standardtraktoren aus Kosten- und Bauraumgründen als Gruppen- und Mehrfachgruppengetriebe ausgeführt. Diese Bauweise erfordert bei einigen Gangwechseln getriebeinterne Übersetzungswechsel in mehreren Getriebegruppen. Solche Mehrfachgruppenschaltungen unter Last stellen eine Herausforderung für die Schaltparameterabstimmung dar und können vom Fahrer als ruckbehaftet wahrgenommen werden. Die Analyse existierender Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen zeigt als wesentliches Problem die Synchronisations- und Drehmomentübergaben der vielfach höheren Drehzahl- und Drehmomentsprünge innerhalb der einzelnen Gruppen im Vergleich zum Stufensprung des direkten Getriebegangwechsels. Für einfache Gruppengetriebe mit zwei Gruppen ist weiterhin bekannt, dass sich die Schaltabläufe eines Getriebes nennenswert unterscheiden, wenn sich der größere interne Stufensprung (Hauptstufe) in der ersten anstatt in der zweiten Gruppe befindet. Für Mehrfachgruppenlastschaltungen sind dahingehend keine Aussagen bekannt, obwohl durch die höhere Gruppenanzahl eine Vielzahl möglicher Getriebestrukturen existiert.

In der vorliegenden Arbeit werden systematische Untersuchungen der charakteristischen Besonderheiten und Vorgänge bei Mehrfachgruppenlastschaltungen auf Basis des bekannten Wissens zum Ablauf einfacher Lastschaltungen und einfacher Gruppenlastschaltungen durchgeführt. Daraus resultieren allgemeingültige Beschreibungen des theoretischen Ablaufs von Mehrfachgruppenlastschaltungen für verschiedene Getriebestrukturen und Empfehlungen für die Getriebesteuerung. Beispielsweise sollten die Kupplungen der Hauptstufe und der ausgangsseitigen Getriebe-Gruppe im Drehmoment modulierbar sein, um schwingungsarme Lastschaltvorgänge zu erzielen. Außerdem bieten Getriebe mit Hauptstufe in der hinteren Getriebe-Gruppe Vorteile für Zug-Hochschaltungen und Getriebe mit der Hauptstufe in der ersten Gruppe Vorteile für Zug-Rückschaltungen. Dabei stellen erstgenannte Getriebe geringere Anforderungen an die Getriebesteuerung.

Anhand eines Viergruppengetriebes mit Hauptstufe in der hinteren Gruppe werden die zugehörigen Empfehlungen zum Schaltablauf auf einem Getriebeprüfstand und in der Simulation überprüft. Die Ergebnisse bestätigen die aufgestellten Theorien und die aus der Literatur bekannte Aussage, dass bei jeder Schaltung das Getriebeeingangsdrehmoment kurzzeitig in der kleinsten der beteiligten Übersetzungen übertragen wird. Weiterhin ist die Hauptstufenkupplung mit der größeren nachgelagerten Übersetzung beim Schaltvorgang geringfügig belastet und unterliegt spürbarem Fliehkraftdruckeinfluss im Kupplungskolben, sodass bei der Getriebe-konstruktion genaues Augenmerk auf die Steuerbarkeit dieser Kupplung zu legen ist. Abschließend zeigt die Simulation, dass die direkten Schaltverluste die Effizienz eines Lastschaltgetriebes marginal reduzieren.

Abstract

Full power shift transmissions for standard tractors, that offer a high amount of gears, are based on a “grouped” transmission design, to reduce assembly space and costs. This design requires internal ratio changes within several transmission groups during a few gearshifts, called multi-swap gearshifts. If multi-swaps are performed under load, the application of gearshift parameters is challenging and may lead to jerks during gearshifts. By analyzing existing publications and research papers, it appears that the main problem of multi-swap power shifts are the internal synchronization and the torque transfer of the high internal speed and torque steps. These steps are very high, compared to the steps of the direct gearshift. In addition, the analysis shows that a two-group transmission will offer different gearshift behavior if the bigger internal ratio step (main step) is located in the first group instead of locating in the second group. For multi-swap gearshifts, there are no comparable investigations known, even though a high amount of possible transmission designs and group arrangements exist.

A systematical investigation of the characteristics of multi-swap power shift operations, based on existing knowledge for basic power shifts and power shifts of transmissions with two groups, is presented. The investigation leads to generally applicable descriptions for the behavior of multi-swap power shift operations for different transmission designs and to guidelines for the transmission control. For example, the clutches of the main step and the last transmission group should offer the possibility for torque modulation to assure less oscillating gearshifts. In addition, transmissions that offer the main step within the last group perform better for upshifts, whereas transmissions with the main step within the first group perform better for downshifts. However, the first design requires less complexity of the transmission control.

By means of a power shift transmission, consisting of four groups and offering the main step in the last group, the developed guidelines are verified on a transmission test bench and with a simulation model. The results confirm the developed theory of multi-swap power shifts. They also confirm the fact that the transmission input torque is transferred briefly by the smallest transmission ratio during a multi-swap power shift. Moreover, the clutch of the main step, linked to the higher ratio, transfers less torque and is subjected to noticeable pressure variation due to centrifugal effects. Therefore, the controllability of this clutch should be of high interest during the transmission design. Finally, the simulation model allows investigating the power and energy losses during the multi-swap power shifts. It is shown that the occurring power losses that are directly linked to the gearshift have no big impact on the efficiency of a power shift transmission.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Indizes	XI
Abkürzungen	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Anforderungen und Grundkonzepte für Traktorfahrgetriebe	3
2.2 Gruppenbauweise bei lastschaltbaren Stufengetrieben	7
2.2.1 Prinzip und Begriffsdefinition zur Gruppenbauweise	7
2.2.2 Lastschaltbare Getriebe in Gruppenbauweise bei PKW und NFZ.....	10
2.2.3 Teil- und volllastschaltbare Gruppengetriebe bei Standardtraktoren.....	11
2.3 Grundlagen zur Lastschaltung	16
2.3.1 Lamellenkupplungen als zentrale Lastschaltelemente	16
2.3.2 Bewegungsgleichungen des Triebstrangs	20
2.3.3 Ablauf einfacher Stirnrad- und Umlaufgetriebebeschaltungen	24
2.4 Untersuchungen und Aussagen zum Schaltablauf in Gruppengetrieben.....	30
2.5 Aufbau und Applikation der Getriebesteuerung.....	37
2.5.1 Allgemeine Anforderungen bei Standardtraktoren	37
2.5.2 Steuerungskonzepte für Gruppengetriebe in Standardtraktoren	39
2.5.3 Applikation der Getriebesteuerungsparameter.....	40
3 Zieldefinition und Methodik der Arbeit	45
3.1 Formulierung der Forschungsfrage	45
3.2 Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfrage	47
4 Ablauf der Lastschaltung im Mehrfachgruppengetriebe	49
4.1 Allgemeine Vorüberlegungen.....	49
4.2 Vorgehensweise bei Zug-Hochschaltungen	53
4.2.1 Einfluss der Getriebestruktur	53
4.2.2 Einfluss der Schaltreihenfolge und des Lastzustands	61

4.3	Vorgehensweise bei Zug-Rückschaltungen	62
4.3.1	Einfluss der Getriebestruktur	62
4.3.2	Einfluss der Schaltreihenfolge und des Lastzustands	70
4.4	Aussagen für die Getriebesteuerung.....	73
5	Prüfgetriebe und Simulationsmodell	77
5.1	Vorgehensweise der Untersuchung	77
5.2	Aufbau des Prüfgetriebes	78
5.2.1	Getriebestruktur und Schaltkomponenten.....	78
5.2.2	Getriebesteuerung und Schaltalgorithmus	81
5.3	Modell des Prüfgetriebes.....	85
5.4	Aufbau des Prüfstands.....	88
5.5	Modell des Prüfstands	91
6	Versuchs- und Simulationsergebnisse zum Lastschaltablauf.....	95
6.1	Versuchs- und Simulationsplanung.....	95
6.2	Untersuchungsergebnisse zur Zug-Hochschaltung	98
6.2.1	Mess- und Simulationsergebnisse einer Schaltung bei Volllast	98
6.2.2	Untersuchung zum Getriebeausgangsdrehmomenteinbruch.....	102
6.2.3	Einfluss des Schaltzeitpunktes und des Lastzustands	104
6.3	Untersuchungsergebnisse zur Zug-Rückschaltung	108
6.3.1	Mess- und Simulationsergebnisse einer Schaltung bei Volllast	108
6.3.2	Einfluss der Schaltreihenfolge und des Lastzustands	112
6.4	Schaltinfluss durch Getriebehydraulik und Hauptstufensprung.....	116
6.5	Verlustleistung und Verlustenergie beim Schaltvorgang	119
6.6	Aussagen für die Getriebesteuerung.....	124
7	Erkenntnisse und praktischer Nutzen	127
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	129
	Literaturverzeichnis.....	133
	Anhang.....	145

Formelzeichen und Indizes

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	--	Koeffizient einer Formel / Fahrbereich A des Prüfgetriebes / Ventilanschluss zum Verbraucher
A_{Motor}	%	Prozentuale Auslastung eines Motors bezogen auf das maximale Motordrehmoment
B	--	Koeffizient einer Formel / Fahrbereich B des Prüfgetriebes
$B_1 \dots B_3$	--	Erste bis dritte Bremse des Prüfgetriebes
b	Nm s/rad	Dämpfungskonstante
C	--	Koeffizient einer Formel / Fahrbereich C des Prüfgetriebes
c	Nm/rad	Torsionsfederkonstante einer Welle
c_{Ab}	Nm/rad	Torsionsfederkonstante eines ausgangsseitigen Triebstrangs
c_{Achse}	Nm/rad	Torsionsfederkonstante des Triebstrangs einer Fahrzeugachse
c_M	--	Maschinenkonstante einer E-Maschine
c_{Reifen}	Nm/rad	Torsionsfederkonstante eines Reifens
$c_{Reifen,long}$	N/m	Longitudinale Federkonstante eines Reifens
D	--	Lehrscher Dämpfungsgrad
F	N	Kraft
$F_{Bremstamelle}$	N	Anpresskraft der Reiblamellen einer Bremse
F_{dyn}	N	Dynamische Anpresskraft von Reiblamellen
$F_{Kupplungstamelle}$	N	Anpresskraft von Reiblamellen einer Kupplung
F_N	N	Axiale Anpresskraft von Reiblamellen
$F_{rück}$	N	Rückstellkraft auf Reiblamellen
$F_{Schraubenfeder}$	N	Federkraft von Schraubenfedern
F_{stat}	N	Statische Anpresskraft von Reiblamellen
$F_{Tellerfeder}$	N	Federkraft von Tellerfedern
HI	--	Split-Kupplung „High“ eines Getriebes
I	--	Ventilanschluss zur Stromversorgung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
I_A	A	Ankerstrom einer E-Maschine
$I_{A,soll}$	A	Sollankerstrom einer E-Maschine
$I_{Brems,B1...B3}$	A	Ventilstrom der Bremse B_1 bis B_3 des Prüfgetriebes
$I_{Kupplung,KH}$	A	Ventilstrom der Kupplung K_H des Prüfgetriebes
$I_{Kupplung,KL}$	A	Ventilstrom der Kupplung K_L des Prüfgetriebes
$I_{Kupplung,KV}$	A	Ventilstrom der Kupplung K_V des Traktorgetriebes
I_{Ventil}	A	Strom zur Betätigung eines Ventils
i	--	Übersetzung eines Getriebes
$i_{Getriebe}$	--	Gesamte Getriebeübersetzung des Prüfgetriebes
i_{LS-RV}	--	Übersetzung zwischen Getriebeeingang und Getriebeausgang des Reversiermoduls des Traktorgetriebes
i_{Modus}	--	Übersetzung des High-Low-Modus des Prüfgetriebes
i_{6PS}	--	Übersetzung des Planetengetriebeteils des Prüfgetriebes
$i_{I,1} \dots i_{I,4}$	--	Erste Übersetzung der ersten bis vierten Getriebegruppe
$i_{II,1} \dots i_{II,4}$	--	Zweite Übersetzung der ersten bis vierten Getriebegruppe
$i_{III,2} \dots i_{III,3}$	--	Dritte Übersetzung der zweiten und dritten Getriebegruppe
$i_{IV,2}$	--	Vierte Übersetzung der zweiten Getriebegruppe
J	kgm ²	Trägheitsmasse
$J_{Kupplung,geschlossen}$	kgm ²	Gesamträgheitsmasse einer geschlossenen Kupplung
J_{Motor}	kgm ²	Trägheitsmasse eines Motors
$J_{E-Maschine}$	kgm ²	Trägheitsmasse einer E-Maschine
J_e	kgm ²	Trägheitsmasse des Getriebeeingangs
J_{pl}	kgm ²	Trägheitsmasse der Planetenräder eines Planetengetriebes
J_{prim}	kgm ²	Primärseitige Trägheitsmasse
J_{Reifen}	kgm ²	Trägheitsmasse von Reifen
J_{sek}	kgm ²	Sekundärseitige Trägheitsmasse
J_{zw}	kgm ²	Trägheitsmasse der Zwischenwelle eines Planetengetriebes

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$J_{z2} \dots J_{z3}$	kgm ²	Trägheitsmasse der Zwischenwelle des zweiten und dritten Planetengetriebes
$J_1 \dots J_4$	kgm ²	Trägheitsmasse hinter der ersten bis vierten Getriebegruppe
K_H	--	Kupplung Modus „High“ des Prüfgetriebes
K_L	--	Kupplung Modus „Low“ des Prüfgetriebes
K_V	--	Vorwärtskupplung des Traktorgetriebes
$K_1 \dots K_3$	--	Erste bis dritte Kupplung allgemein / Erste bis dritte Kupplung des Prüfgetriebes
$K_{I,1} \dots K_{I,3}$	--	Kupplung der ersten Übersetzung der ersten bis dritten Getriebegruppe
$K_{II,1} \dots K_{II,3}$	--	Kupplung der zweiten Übersetzung der ersten bis dritten Getriebegruppe
$K_{III,2} \dots K_{III,3}$	--	Kupplung der dritten Übersetzung der zweiten und dritten Getriebegruppe
$K_{IV,2}$	--	Kupplung der vierten Übersetzung der zweiten Getriebegruppe
LO	--	Split-Kupplung „Low“ eines Getriebes
M	Nm	Drehmoment
M_A	Nm	Variables Drehmoment in Gleichung A
M_B	Nm	Variables Drehmoment in Gleichung B
$M_{Bremsen}$	Nm	Übertragenes Drehmoment einer Bremse
M_D	Nm	Drehmoment infolge von Dämpfung
$M_{E-Maschine}$	Nm	Drehmoment einer E-Maschine
$M_{Getriebe,Ab}$	Nm	Ausgangsdrehmoment des Prüfgetriebes
$M_{Getriebe,An}$	Nm	Eingangsdrehmoment des Prüfgetriebes
$M_{Kupplung}$	Nm	Übertragenes Drehmoment einer Kupplung
M_{K1}	Nm	Übertragenes Drehmoment der Kupplung 1
M_{K2}	Nm	Übertragenes Drehmoment der Kupplung 2
M_{Last}	Nm	Lastdrehmoment eines Getriebes
M_{LK}	Nm	Übertragbares Drehmoment einer Lamellenkupplung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
M_{Mot} / M_{Motor}	Nm	Drehmoment eines Motors
$M_{Verbrennung,soll}$	Nm	Solldrehmoment der innermotorischen Verbrennung eines Motors
M_{soll}	Nm	Solldrehmoment
M_a	Nm	Drehmoment eines Getriebeausgangs
M_e	Nm	Drehmoment eines Getriebeeingangs
M_g	Nm	Drehmoment der E-Maschine des Prüfstands
M_{max}	Nm	Maximales Drehmoment eines Motors
M_{nenn}	Nm	Nennndrehmoment eines Motors
$M_{pl,1}$	Nm	Drehmoment am Planetenrad aufgrund von Zahnrad 1
$M_{pl,2}$	Nm	Drehmoment am Planetenrad aufgrund von Zahnrad 2
M_{prim}	Nm	Primärseitiges Drehmoment
M_{sek}	Nm	Sekundärseitiges Drehmoment
$M_{z,1}$	Nm	Verzahnungsdrehmoment am Zahnrad 1
$M_{z,2}$	Nm	Verzahnungsdrehmoment am Zahnrad 2
$M_1 \dots M_4$	Nm	Drehmoment am Ausgang der ersten bis vierten Getriebegruppe
$M_{1,Gang I}$	Nm	Drehmoment am Ausgang der ersten Getriebegruppe in Gang I
$M_{1,Gang II}$	Nm	Drehmoment am Ausgang der ersten Getriebegruppe in Gang II
$M_{I,1} \dots M_{I,4}$	Nm	Übertragenes Drehmoment der ersten Kupplung der ersten bis vierten Getriebegruppe
$M_{II,1} \dots M_{II,4}$	Nm	Übertragenes Drehmoment der zweiten Kupplung der ersten bis vierten Getriebegruppe
$MK_{I,1} \dots MK_{I,4}$	Nm	Übertragbares Drehmoment der ersten Kupplung der ersten bis vierten Getriebegruppe
$MK_{II,1} \dots MK_{II,4}$	Nm	Übertragbares Drehmoment der zweiten Kupplung der ersten bis vierten Getriebegruppe
m	kg	Masse
n	1/min	Drehzahl
$n_{Diff,Kuppl,KH}$	1/min	Differenzdrehzahl der Kupplung K_H des Prüfgetriebes

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$n_{Diff,Kuppl,KL}$	1/min	Differenzdrehzahl der Kupplung K_L des Prüfgetriebes
$n_E\text{-Maschine}$	1/min	Drehzahl einer E-Maschine
$n_{Getriebe,Ab}$	1/min	Ausgangsdrehzahl des Prüfgetriebes
$n_{Getriebe,An}$	1/min	Eingangsdrehzahl des Prüfgetriebes
n_{Motor}	1/min	Drehzahl eines Motors
n_a	1/min	Drehzahl eines Getriebeausgangs
n_e	1/min	Drehzahl eines Getriebeeingangs
n_g	1/min	Drehzahl der E-Maschine des Prüfstands
n_{nenn}	1/min	Nenn Drehzahl eines Motors
$n_{primär}$	1/min	Drehzahl der Primärseite eines Schaltelements
$n_{primär,Bremse}$	1/min	Drehzahl der Primärseite einer Bremse
$n_{primär,Kupplung}$	1/min	Drehzahl der Primärseite einer Kupplung
n_r	1/min	Drehzahl der Überlastschutzkupplung des Prüfstands
$n_{sekundär}$	1/min	Drehzahl der Sekundärseite eines Schaltelements
$n_{sekundär,Kupplung}$	1/min	Drehzahl der Sekundärseite einer Kupplung
n_{soll}	1/min	Solldrehzahl eines Motors
$n_{Trägheitsm.}$	1/min	Drehzahl der Trägheitsmasse des Prüfstands
$n_1 \dots n_4$	1/min	Drehzahl am Ausgang der ersten bis vierten Getriebegruppe
n_I	1/min	Hohlrad drehzahl des ersten Planetengetriebes im Prüfgetriebe
$n_{I,1}$	1/min	Drehzahl der ersten Kupplung der ersten Getriebegruppe
n_{II}	1/min	Hohlrad drehzahl des dritten Planetengetriebes im Prüfgetriebe
$n_{II,1}$	1/min	Drehzahl der zweiten Kupplung der ersten Getriebegruppe
n_{III}	1/min	Drehzahl der Primärseiten von Kupplung K_H und K_L des Prüfgetriebes
n_{IV}	1/min	Drehzahl der Sekundärseiten von Kupplung K_H und K_L des Prüfgetriebes
P	--	Ventilanschluss zur Pumpe

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$P_{Bremse,B1...B3}$	kW	Reibverlustleistung der Bremse B_1 bis B_3 des Prüfgetriebes
$P_{Getr.-Verlust}$	kW	Verlustleistung zwischen Ein- und Ausgang des Prüfgetriebes
$P_{Kupplung,KH}$	kW	Reibverlustleistung der Kupplung K_H des Prüfgetriebes
$P_{Kupplung,KL}$	kW	Reibverlustleistung der Kupplung K_L des Prüfgetriebes
$P_{Kupplung,K1...K3}$	kW	Reibverlustleistung der Kupplungen K_1 bis K_3 des Prüfgetriebes
P_{max}	kW	Maximale Leistung eines Motors
P_{nenn}	kW	Nennleistung eines Motors
P_R	kW	Verlustleistung einer Lamellenkupplung
$p_{Anpress,Kuppl.,KH}$	bar	Anpressdruck der Reiblamellen in Kupplung K_H des Prüfgetriebes
$p_{Anpress,Kuppl.,KL}$	bar	Anpressdruck der Reiblamellen in Kupplung K_L des Prüfgetriebes
$p_{Bremse,B1...B3}$	bar	Ventildruck der Bremse B_1 bis B_3 des Prüfgetriebes
$p_{dyn}(r)$	N/m ²	Dynamischer Steuerdruck in Abhängigkeit des Radius
$p_{Fliehkraft}$	bar	Fliehkraftdruck der Kupplungen K_H und K_L des Prüfgetriebes
p_{hydr}	N/m ²	Statischer hydraulischer Steuerdruck
p_{Kolben}	bar	Von außen gemessener Kolbendruck
$p_{Kupplung,KH}$	bar	Ventildruck der Kupplung K_H des Prüfgetriebes
$p_{Kupplung,KL}$	bar	Ventildruck der Kupplung K_L des Prüfgetriebes
$p_{Kupplung,KV}$	bar	Ventildruck der Kupplung K_V des Traktorgetriebes
p_{Pumpe}	bar	Von der Steuerung bereitgestellter Pumpendruck
$p_1 \dots p_3$	bar	Steuerdruck der Bremsen B_1 bis B_3 des Prüfgetriebes
p_4	bar	Steuerdruck der Kupplung K_H des Prüfgetriebes
p_5	bar	Steuerdruck der Kupplung K_L des Prüfgetriebes
p_6	bar	Steuerdruckversorgung des Prüfgetriebes
p_7	bar	Schmierdruckversorgung des Prüfgetriebes

Zeichen	Einheit	Beschreibung
Q_1	L/min	Volumenstrom der Schmierölversorgung des Prüfgetriebes
q	--	Koordinatenrichtung der Bewegung eines Dämpfers
\dot{q}	1/s	Geschwindigkeit in Koordinatenrichtung q
R	--	Fahrbereich Rückwärts des Prüfgetriebes
RE	--	Split-Kupplung Rückwärts eines Getriebes
$R_1 \dots R_3$	--	Range-Kupplungen eines Getriebes
r	m	Betrachteter Radius
r_{dyn}	m	Dynamischer Reifenradius
r_{ka}	m	Außenradius eines Kupplungskolbens
r_{ki}	m	Innenradius eines Kupplungskolbens
r_{la}	m	Außenradius von Reiblamellenflächen
r_{li}	m	Innenradius von Reiblamellenflächen
r_m	m	Mittlerer Reibradius von Reiblamellen
r_0	m	Bezugsradius
$S_1 \dots S_4$	--	Haupt-Schaltkupplungen eines Getriebes
T	--	Ventilanschluss zum Tank
T_1	°C	Temperatur des Öls im Prüfgetriebesumpf
t_R	s	Rutschzeit einer Lamellenkupplung
t_s	s	Schaltzeit
$t_{Schaltung}$	s	Zeitspanne zur Durchführung einer Schaltung
$t_1 \dots t_6$	s	Zeitpunkte 1 bis 6
U_A	V	Ankerspannung einer E-Maschine
U_{ind}	V	Induktionsspannung einer E-Maschine
$V_1 \dots V_3$	--	Ventilspule der Bremsen B_1 bis B_3 des Prüfgetriebes
V_4	--	Ventilspule der Kupplung K_H des Prüfgetriebes
V_5	--	Ventilspule der Kupplung K_L des Prüfgetriebes
$V_6 \dots V_9$	--	Ventilspulen für Schaltung der Fahrbereiche A bis R des Prüfgetriebes
v_{max}	km/h	Maximale Fahrgeschwindigkeit eines Traktors

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$v_{min,nenn}$	km/h	Minimale Fahrgeschwindigkeit eines Traktors bei Motornennndrehzahl
W_R	kJ	Reibarbeit einer Lamellenkupplung
x	mm	Weg
$x_{Bremskolben}$	mm	Bremskolbenhub
x_{Kolben}	mm	Kolbenhub
$x_{Koppelscheibe}$	mm	Bewegungshub einer Koppelscheibe
z	--	Anzahl Gänge eines Getriebes
$z_{Bremslamelle}$	--	Anzahl Reibflächen einer Lamellenbremse
z_{Feder}	--	Anzahl Federn
$z_{Kupplungslamelle}$	--	Anzahl Reibflächen einer Lamellenkupplung
z_{last}	--	Anzahl der lastschaltbaren Getriebegänge
z_{LK}	--	Anzahl Reibflächen einer Lamellenkupplung
z_{pt}	--	Anzahl der Zähne eines Planetenrades
$z_1 \dots z_4$	--	Anzahl der Zähne der Zahnräder 1 bis 4
ΔF	N	Differenz zwischen zwei Kräften
ΔM	%	Drehmomentanstieg eines Dieselmotors
Δt	s	Zeitdifferenz zwischen zwei Zeitpunkten
$\eta_{Getriebe}$	--	Wirkungsgrad zwischen Ein- und Ausgang des Prüfgetriebes
$\eta_{pt,1}$	--	Verzahnungswirkungsgrad vom Planetenrad zum Zahnrad 1
η_0	--	Verzahnungswirkungsgrad Standgetriebe
$\eta_{2,pt}$	--	Verzahnungswirkungsgrad vom Zahnrad 2 zum Planetenrad
μ	--	Reibungszahl einer Reiblamelle
π	--	Zahl Pi
$\omega_{\dot{O}l}$	1/s	Winkelgeschwindigkeit des Öls im rotierenden Kupplungskolben
ω_{pt}	1/s	Winkelgeschwindigkeit eines Planetenrades

Zeichen	Einheit	Beschreibung
ω_{prim}	1/s	Winkelgeschwindigkeit der Primärseite eines Getriebes oder einer Kupplung
$\omega_{prim}(t_s)$	1/s	Winkelgeschwindigkeit der Primärseite eines Getriebes oder einer Kupplung zum Zeitpunkt t_s
$\omega_{prim,0}$	1/s	Winkelgeschwindigkeit der Primärseite eines Getriebes oder einer Kupplung zu Beginn einer Schaltung
ω_R	1/s	Differenzwinkelgeschwindigkeit zwischen Primär- und Sekundärseite einer Kupplung
ω_{sek}	1/s	Winkelgeschwindigkeit der Sekundärseite eines Getriebes oder einer Kupplung
$\omega_{sek,0}$	1/s	Winkelgeschwindigkeit der Sekundärseite eines Getriebes oder einer Kupplung zu Beginn einer Schaltung
ω_{sync}	1/s	Winkelgeschwindigkeit der Primär- und Sekundärseite eines Getriebes im Synchronpunkt
ω_{ZW}	1/s	Winkelgeschwindigkeit der Zwischenwelle eines Planetengetriebes
$\dot{\omega}_{pl}$	1/s ²	Winkelbeschleunigung eines Planetenrades
$\dot{\omega}_{prim}$	1/s ²	Winkelbeschleunigung der Primärseite eines Getriebes oder einer Kupplung
$\dot{\omega}_{sek}$	1/s ²	Winkelbeschleunigung der Sekundärseite eines Getriebes oder einer Kupplung
$\dot{\omega}_{ZW}$	1/s ²	Winkelbeschleunigung der Zwischenwelle eines Planetengetriebes
$\rho_{öl}$	kg/m ³	Dichte von Hydrauliköl
Φ_E	Wb	Magnetischer Fluss im Erregerkreis einer E-Maschine
φ_{ges}	--	Gesamtspreizung eines Getriebes
φ_{od}	--	Overdrivespreizung eines Getriebes für Motordrehzahlreduktion
φ_{st}	--	Stufensprung zwischen zwei Getriebegängen
φ_{syn}	--	Stufensprung einer synchronisierten Schaltgruppe
$\varphi_{1,1} \dots \varphi_{1,3}$	--	Erster Stufensprung der ersten bis dritten Getriebegruppe

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$\varphi_{II,2} \dots \varphi_{II,3}$	--	Zweiter Stufensprung der zweiten und dritten Getriebegruppe
$\varphi_{III,2}$	--	Dritter Stufensprung der zweiten Getriebegruppe

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AMT	Automatisiertes Schaltgetriebe (Automated Manual Transmission)
APG	Anpassgetriebe
AT	Konventionelles Automatgetriebe (Automated Transmission)
Autom.	Automatische Gangauswahl
CAD	Computerunterstütztes Konstruieren (Computer Aided Design)
CAN	Controller-Area-Network
CASE IH	CASE International Harvester Company
CNH	CASE New Holland
CVT	Stufenlose Getriebe (Continuously Variable Transmission)
DBV	Druckbegrenzungsventil
DCT	Doppelkupplungsgetriebe (Dual Clutch Transmission)
ECO	ökonomisch (economical)
ECU	Motorsteuergerät (Engine Control Unit)
EM	Elektrische Maschine
EMK	Elektromagnetischer Kraft-Regler
EW	Elastische Welle
FPT	Fiat Power Train
GIMA	Groupement International de Mécanique Agricole
GW	Gelenkwelle
Hi-Lo	Zweifach-Lastschaltung
IHC	International Harvester Company
IT	Informationstechnik
JD	John Deere
KS	Klauenschaltung
LSR	Lastschaltbare Reversierung
MT	Manuelles Handschaltgetriebe (Manual Transmission)
NFZ	Nutzfahrzeug
PC	Einzelplatzrechner (Personal Computer)
PG	Planetengetriebe

Abkürzung	Bedeutung
PID	Regler mit Proportional-, Integral- und Differentialanteil
PKW	Personenkraftwagen
PT1	Proportionales Übertragungsglied mit Verzögerung 1. Ordnung
PWM	Pulsweitenmodulation
SKS	Synchronisierte Klauenschaltung
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SR	Synchronisierte Reversierung
SRS	Schieberadschaltung
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung
TD	Torsionsdämpfer
TLS	Teillastschaltung
USA	Vereinigte Staaten von Amerika (United States of America)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VLS	Volllastschaltung
ZF	Zahnradfabrik Friedrichshafen