1 Inhaltsverzeichnis

0 AUFGABENSTELLUNG 0

1 INHALTSVERZEICHNIS 1

2 ZWECK DER ARBEIT 3

3 ZUSAMMENFASSUNG 4

4 GRUNDLAGEN 5

4.1 FAHRDYNAMISCHE BEGRIFFE NACH DIN 70‘000 5
4.2 DAS ANTIBLOCKIERSYSTEM ABS 7
4.3 GESETZLICHER HINTERGRUND 7
4.3.1 RÄDER/ REIFEN 7
4.3.2 AUTOMATISCHE BLOCKIERVERHINDERER (ABV) 8
4.4 DEFINITION MASSENTRÄGHEITSMOMENT 8

5 VERSUCHSFAHRZEUGE 9

5.1 OPEL ASTRA 20 TD 9
5.1.1 TECHNISCHE DATEN 9
5.2 MERCEDES-BENZ E 320 10
5.2.1 TECHNISCHE DATEN 10

6 VERSUCHSANORDNUNG 10

6.1 MESSAUFBAU 10
6.1.1 MESSGERÄTE 12
6.1.2 GENAUIGKEIT DER MESSGERÄTE 17
6.1.3 FEHLERRECHNUNG 17
6.2 VERSUCHSAUFBAU 18
6.2.1 ALLGEMEINES 18
6.2.2 VERSUCHSKONFIGURATIONEN 18
6.2.2.1 Opel Astra 20 TD 18
6.2.2.2 Mercedes-Benz E 320 19

7 RAD/REIFEN-EINFLUSS AUF DIE ABS-REGELGÜTE 19

7.1 EINLEITUNG 19
7.2 TRÄGHEITSMOMENTE DER RÄDER 19
7.2.1 EINLEITUNG 19
7.2.2 PRÜFAUFBAU 20
7.2.3 MESSRESULTATE 21
7.2.3.1 Interpretation 21
7.3 MESSUNGEN IM VSZV 22
7.3.1 BESCHREIBUNG DER FAHRMANÖVER 22
7.3.1.1 Notbremsung auf μ-Sprung 23
7.3.1.2 Notbremsung auf μ-Split 23
7.3.1.3 Notbremsung in der Kurve auf μ-Split 24
7.3.2 MESSRESULTATE OPEL ASTRA 20 TD 25
7.3.2.1 Erläuterungen 25
7.3.2.2 Diagramme 27
7.3.2.3 Interpretation 29
7.3.3 MESSRESULTATE MERCEDES-BENZ E320 30
7.3.3.1 Diagramme 30
7.3.3.2 Interpretation 32
7.4 MESSUNGEN IN VAUFFELIN 32

7.4.1 BESCHREIBUNG DES FAHRMANÖVERS 32
7.4.2 MESSRESULTATE OPEL ASTRA 20 TD 33
7.4.2.1 Interpretation 34
7.4.3 MESSRESULTATE MERCEDES-BENZ E320 34
7.4.3.1 Interpretation 35

8 UNTERSUCHUNG PRIORITÄTENFOLGE ESP / ABS 36

8.1 EINLEITUNG 36
8.2 DIE FAHRDYNAMIKREGELUNG ESP 36
8.3 MESSUNGEN 36
8.3.1 ZIEL 36
8.3.2 PROBAND 37
8.4 BESCHREIBUNG DER FAHRMANÖVER 37
8.4.1 NOTBREMSUNG MIT FAHRSPURWECHSEL 37
8.4.2 KURVENFAHRT MIT ANSCHLIESSENDER NOTBREMSUNG 38
8.5 MESSRESULTATE 39

9 SCHLUSSFOLGERUNGEN 42

9.1 EINFLUSS VON RAD/REIFENKOMBINATIONEN AUF DIE ABS-REGELGÜTE 42
9.2 PRIORITÄTENFOLGE ELEKTRONISCHER HILFSSYSTEME (ESP/ABS) 43

10 PERSÖNLICHES SCHLUSSWORT 44

11 ABBILDUNGSVERZEICHNIS 45

12 LITERATURVERZEICHNIS 46

2 Zweck der Arbeit

Die Primäraufgabe bestand darin, den Einfluss verschiedener Rad/ Reifenkombinationen auf die ABS-Regelgüte zu untersuchen. Speziell soll die Auswirkung des Massenträgheitsmomentes, verursacht durch unterschiedliche Felgeninnendurchmesser, überprüft werden. Dazu standen zwei Versuchsträger verschiedener Fahrzeugklassen, mit je vier ungleichen Felgensätzen, zur Verfügung.

Die Sekundäraufgabe umfasste eine Untersuchung der Prioritätenfolge elektronischer Hilfssysteme (ABS/ ESP) bei kritischen Fahrmanövern.

Bemerkung:
Der vorliegende Diplomarbeitsbericht darf in keiner Hinsicht als Vergleichstest zwischen den

- Zwei verschiedenen Fahrzeugtypen/ Marken
- Verschiedenen Reifenhersteller und Typen
- Verschiedenen Felgenhersteller und Typen

dienen. Die verwendeten Fahrzeuge und die entsprechenden Rad/ Reifenkombinationen wurden rein zufällig ausgewählt. Das Ziel war nur Felgen mit verschiedenen Innendurchmessern zu erhalten, die auf den entsprechenden Fahrzeugtyp montiert werden konnten.

3 Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit wurden fahrdynamische Messungen mit zwei verschiedenen Fahrzeugen durchgeführt. Als Prüfstrecken dienten eine öffentliche Strasse in Vauffelin und das Gelände des Verkehrs-Sicherheits-Zentrum-Veltheim.

In einem ersten Punkt untersuchte man den Einfluss verschiedener Rad/ Reifenkombinationen auf die ABS-Regelung der beiden Testfahrzeuge.

Dabei richtete sich das Hauptinteresse auf das unterschiedliche Massenträgheitsmoment der verwendeten Räder. Mithilfe von praktischen Versuchen konnte festgestellt werden, dass mit zunehmendem Felgeninnendurchmesser die Massenträgheit der Räder zunimmt.
Bei den anschliessenden Testfahrten (ABS-Bremsungen) wurde der Effekt der unterschiedlichen Trägheitsmomente am Fahrzeug untersucht.
Als Schlussfolgerung lässt sich sagen, dass der Einfluss des Reifens auf das ABS-System, gegenüber dem des Massenträgheitsmomentes, überwiegt.

Modernere Fahrzeuge verfügen über mehrere elektronische Hilfssysteme, welche die aktive Sicherheit erhöhen. Das heisst sie sollen aktiv Fahrzeugunfälle verhindern.

In einem zweiten Punkt wurde überprüft, welches der beiden elektronischen Hilfssysteme ABS / ESP (Fahrdynamikregelung) gegenüber dem anderen Vorrang besitzt.

Die Theorie besagt, dass die Fahrdynamikregelung ESP gegenüber dem Antiblockiersystem ABS Priorität hat. Mithilfe von Fahrversuchen sollte dieser Sachverhalt praktisch bewiesen werden. Bedauerlicherweise war dies nicht möglich. Somit konnte die in der Fachliteratur gemachte Aussage weder bestätigt noch widerlegt werden.

4 Grundlagen

4.1 Fahrdynamische Begriffe nach DIN 70‘000

Die Vorzeichen sind wie folgt festgelegt [16]:

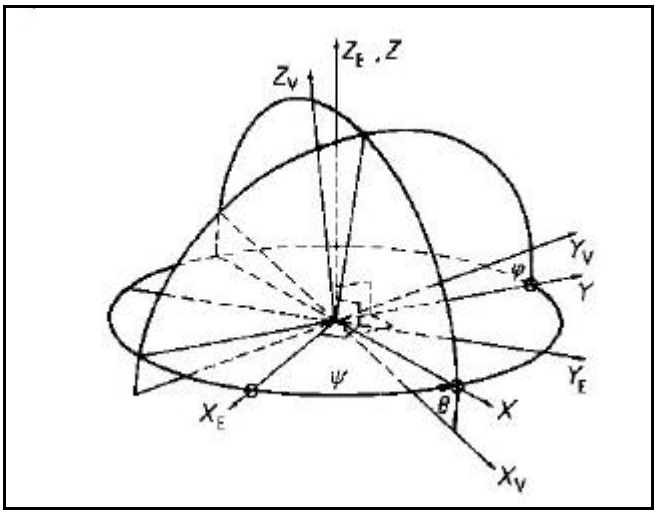

Abbildung 1: Koordinatensystem

X, Y, Z **Horizontiertes Koordinatensystem** (en: intermediate axis system):
Rechtwinkliges Rechtssystem, dessen XY-Ebene in der $X_E Y_E$-Ebene liegt.

X_E, Y_E, Z_E **Ortsfestes Koordinatensystem** (en: earth-fixed axis system):
Rechtwinkliges Rechtssystem, das an einen Ort gebunden ist.

X_V, Y_V, Z_V **Fahrzeugfestes Koordinatensystem** (en: vehicle axis system):
Rechtwinkliges Rechtssystem, mit einem beliebigen Koordinatenursprung im Fahrzeug.

X_W, Y_W, Z_W **Radfestes Koordinatensystem** (en: wheel axis system):
Rechtwinkliges Rechtssystem, dessen $X_W Y_W$-Ebene in der $X_E Y_E$-Ebene liegt. Die X_W-Achse ist die Schnittlinie der Radebene mit der $X_E Y_E$-Ebene und zeigt nach vorn. Der Ursprung liegt im Radaufstandspunkt.

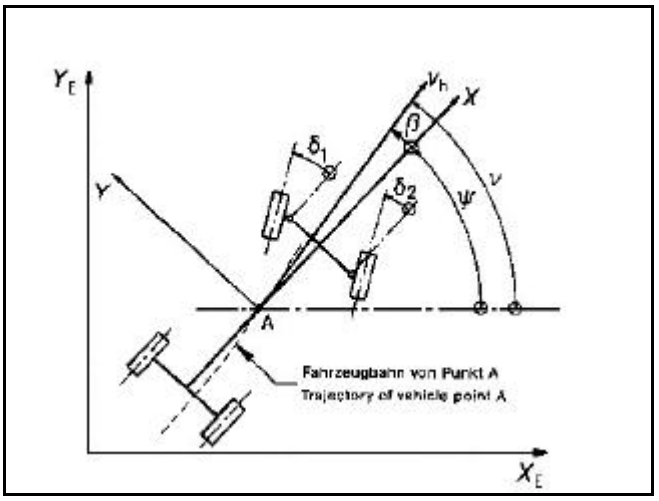

Abbildung 2: Winkeldefinition

Die in den Bildern dargestellten Winkel sind positiv. Das heisst, ein Fahrzeug in der Linkskurve und/oder beim Bremsen hat positive Winkel.

Grössen der linearen Bewegung:

Fahrzeuggeschwindigkeit $\vec{v}$: Vektorielle Grösse, welche die Geschwindigkeit des Ursprungs des fahrzeugfesten Koordinatensystems im ortsfesten Koordinatensystem beschreibt.

Längsgeschwindigkeit v_X: Komponente der Fahrzeuggeschwindigkeit in Richtung der X-Achse.

Quergeschwindigkeit v_Y: Komponente der Fahrzeuggeschwindigkeit in Richtung der Y-Achse.

Fahrzeugbeschleunigung $\vec{a}$: Vektorielle Grösse, welche die Beschleunigung des Ursprungs des fahrzeugfesten Koordinatensystems im ortsfesten Koordinatensystem beschreibt.

Längsbeschleunigung a_X: Komponente der Fahrzeugbeschleunigung in Richtung der X-Achse.

Querbeschleuningung a_Y: Komponente der Fahrzeugbeschleunigung in Richtung der Y-Achse.

Grössen der Drehbewegung:

Gierwinkel ψ: Winkel (X_E, X), der sich aus einer Drehung um die Z_E-Achse ergibt.

Winkelgeschwindigkeiten:

Die Winkelgeschwindigkeiten können im fahrzeugfesten Koordinatensystem sowie auch im horizontierten Koordinatensystem definiert werden.

Fahrzeugfeste

Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$: Winkelgeschwindigkeit um die Z_V-Achse (fahrzeugfestes Koordinatensystem). Die Giergeschwindigkeit ist positiv, wenn sie sich im Uhrzeigersinn um die in positiver Richtung betrachtete Z_V-Achse dreht.

$$\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt}$$

Lenkung:

Radlenkwinkel δ: Winkel zwischen X-Achse und X_W-Achse. Er ist bei positiver Drehung um die Z_W-Achse positiv.

Lenkradwinkel δ_H: Verdrehwinkel des Lenkrades gemessen aus der Geradeausstellung. Er ist bei Linkskurve des Fahrzeugs positiv.

Radstand l: Abstand zwischen den Radaufstandspunkten der beiden Räder auf der gleichen Seite des Fahrzeuges auf die X-Achse projiziert.

4.2 Das Antiblockiersystem ABS

ABS ist ein auf Daimler Benz eingetragenes Warenzeichen. Es gehört zum Oberbegriff der automatischen Blockierverhinderer (ABV).
Das Anti-Blockier-System (ABS) ist eine Regeleinrichtung, die bewirkt, dass beim Bremsen eines Rades die Bremskraft nicht die Reibungskraft zwischen Rad und Untergrund überschreiten kann, so dass ein Blockieren des Rades verhindert wird. Dadurch wird das Fahrzeug bestmöglich verzögert und bleibt auch während des Bremsens lenkbar. An jedem Rad befindet sich ein Drehzahlsensor, der mit dem zentralen Steuergerät des ABS verbunden ist. Die Drehzahlen der Räder werden ständig untereinander und mit der tatsächlichen Fahrgeschwindigkeit verglichen. Sinkt die Drehzahl eines Rades überproportional ab, erkennt die Hydraulik die Blockiergefahr und reduziert sofort den Hydraulikdruck in der entsprechenden Bremsleitung.

Leistungsfähige Antiblockiersysteme müssen folgende Kriterien zur Regelgüte erfüllen:

1. Erhaltung der Fahrstabilität durch Bereitstellung ausreichender Seitenführungskräfte an den Hinterrädern.
2. Erhaltung der Lenkbarkeit durch Bereitstellung ausreichender Seitenführungskräfte an den Vorderrädern.
3. Bremswegverkürzung gegenüber Blockierbremsungen durch optimale Ausnutzung des Kraftschlusses zwischen Reifen und Fahrbahn.
4. Schnelle Anpassung des Bremsdruckes an unterschiedliche Kraftschlussbeiwerte.
5. Gewährleistung kleiner Regelamplituden des Bremsmomentes zur Vermeidung von Fahrwerkschwingungen.

4.3 Gesetzlicher Hintergrund

4.3.1 Räder/ Reifen

Von der Seite des Gesetzgebers darf nicht jede beliebige Felge auf ein Fahrzeug montiert werden. Entsprechende Vorschriften finden sich in der „Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge“ kurz VTS [8].

Andere Felgen als die Serienräder dürfen nur auf ein Fahrzeug montiert werden, wenn sie im entsprechenden Typenschein bzw. in der Typengenehmigung eingetragen sind. Sie gelten somit als nicht melde- und nicht prüfpflichtig.

Wenn eine nicht typengeprüfte Felge an einem Fahrzeug angebracht werden möchte, ist aus der Sicht des Gesetzgebers die durch Veränderung der Einpresstiefe variierende Spurweite von Interesse.Die Spurweite darf nur um ein bestimmtes Mass durch die Felge verändert werden. Wenn ein bestimmter Wert überschritten wird, verlangt man vom Fahrzeughersteller oder vom Umbauer eine entsprechende Garantie. In beiden Fällen ist für die jeweilige Felge eine Eignungserklärung des Felgenherstellers oder des ursprünglichen Fahrzeugherstellers erforderlich.

Weiterführende Angaben zur Thematik:

- VTS, Artikel [8]: 56_3
  58
  59

- VSA Richtlinien Nr. 2A [9]: 513
  514
- FEE Ordner 6 [15]: ECE Regelung 30
- E.T.R.T.O Standards [13]: P1 ÷ P38

4.3.2 Automatische Blockierverhinderer (ABV)

Für die Prüfung automatischer Blockierverhinderer, schreibt die VTS (Anhang 7, Ziffer 18) folgende Richtline vor: 71/320/EWG, Ziffer 5 und 6 des Anhang X. (identisch ECE Regelung 13 [15], Ziffer 5 und 6).

Hauptpunkt der Prüfung ist die Kraftschlussausnutzung. Die Ausnutzung des Haftwertes durch den ABV berücksichtigt die tatsächliche Zunahme des Bremsweges über seinen theoretischen Minimalwert.

4.4 Definition Massenträgheitsmoment

Die Trägheit ist die Eigenschaft eines physikalischen Systems, auf eine äussere Einwirkung verzögert zu reagieren. Als Trägheit der Masse (→ Beharrungsvermögen) bezeichnet man das Bestreben jedes Körpers, seinen Bewegungszustand beizubehalten. Bei Rotationsbewegungen wird nicht mehr von einer Massenträgheit gesprochen, sondern von einem Massenträgheitsmoment.

Allgemeine Formel:

$$\boxed{J = m \cdot r^2}$$

J = Massenträgheitsmoment [kg · m^2]
m = Masse [kg]
r = Trägheitsradius

Einheit: [kg · m^2]

5 Versuchsfahrzeuge

Es wurden uns zwei Probanden[1] unterschiedlicher Fahrzeugklassen zur Verfügung gestellt. Dabei handelte es sich um einen Opel Astra 20 TD mit dem ABS-System 5.3 von Bosch und um einen Mercedes-Benz E320 mit dem ESP/ABS-System 1.0 von Mercedes / Bosch.

5.1 Opel Astra 20 TD

5.1.1 Technische Daten

Marke:	Opel
Typ:	Astra G 20TD
Art des Fahrzeuges:	Caravan
Antriebskonzept:	Frontantrieb
Getriebe Typ:	Handgeschaltet
Anzahl Gänge:	5
Reifendimension:	195/60 R 15 88H
Felgengrösse :	6J X 15H2 ET49
Spurweite VA:	1464 mm (ET 49)
Spurweite HA:	1464 mm (ET 49)

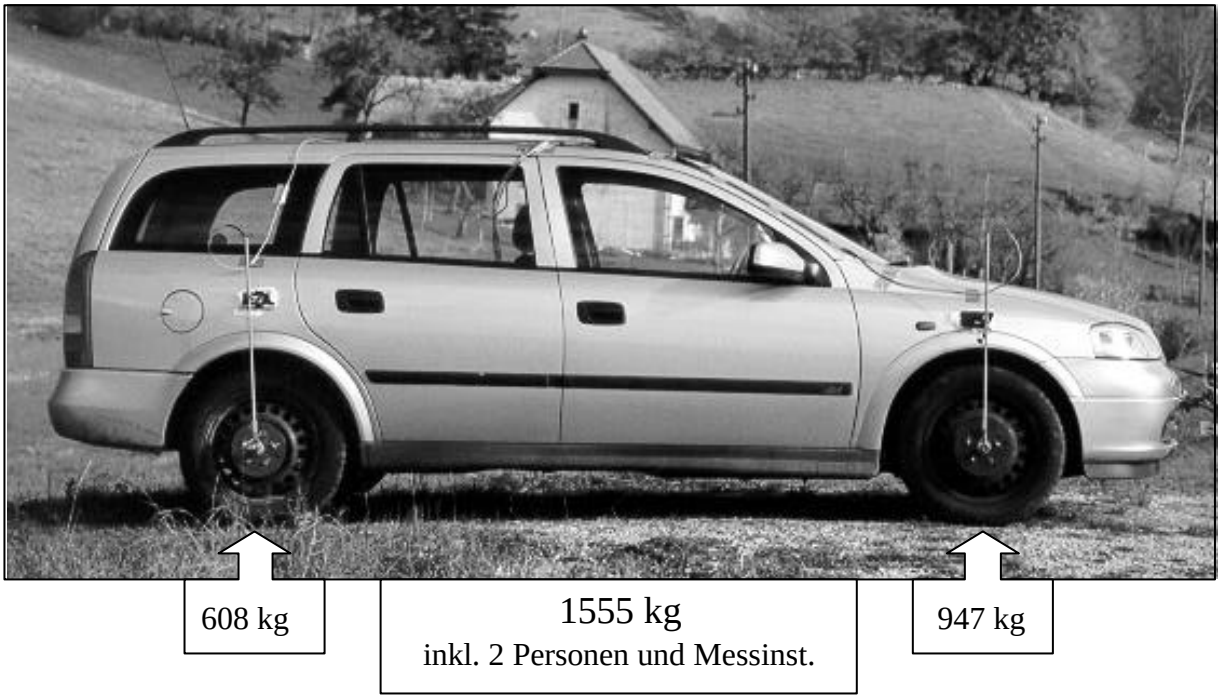

Abbildung 3: Opel Astra

[1] Für detaillierte Angaben siehe Anhang 2

5.2 Mercedes-Benz E 320

5.2.1 Technische Daten

Marke:	Mercedes-Benz
Typ:	E 320
Art des Fahrzeuges:	Limousine
Antriebskonzept:	Hinterachsantrieb
Getriebe Typ:	Automat
Anzahl Gänge:	5
Reifendimension:	215/55 R 16 93H
Felgengrösse :	7.5J X 16 H2 ET41
Spurweite VA:	1534 mm – 1560 mm
Spurweite HA:	1528 mm – 1453 mm

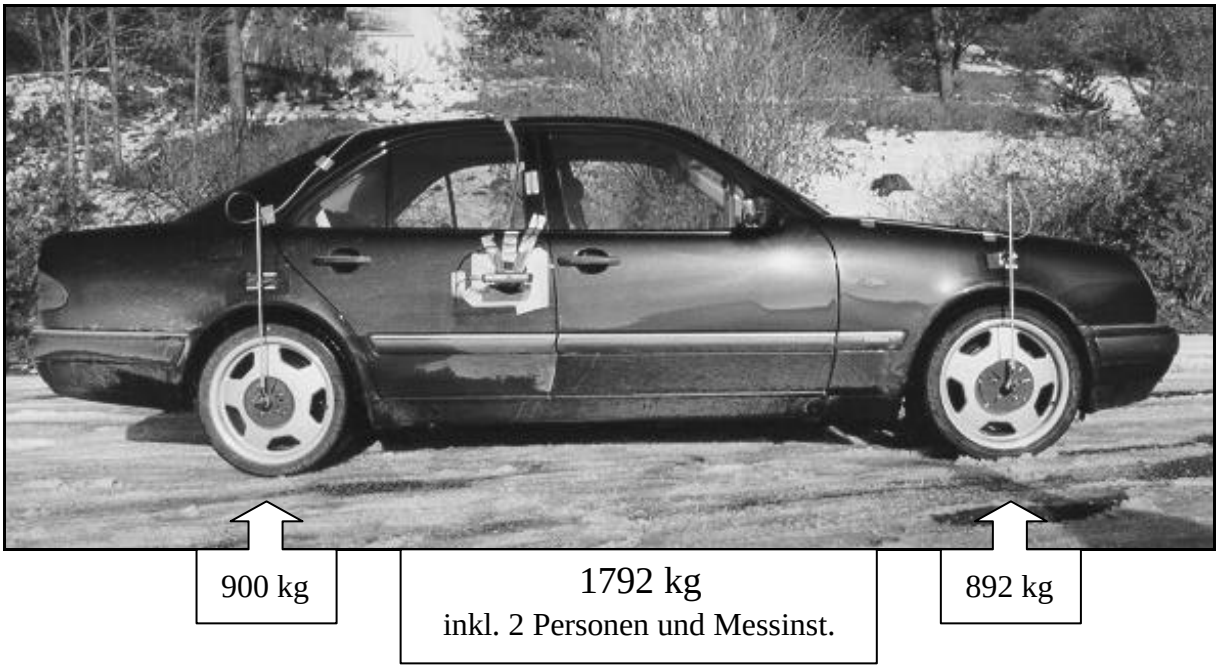

Abbildung 4: Mercedes-Benz

6 Versuchsanordnung

6.1 Messaufbau

Um die Beeinflussung der ABS-Regelgüte zu analysieren, wurden folgende Messapparate in die Probanden eingebaut. Wegen Problemen bei den ersten Messungen in Veltheim verwendete man anstelle des Datron V2 Sensors (Nr. 3), beim Mercedes-Benz den Datron M3 Sensor (auf dem Bild nicht dargestellt).

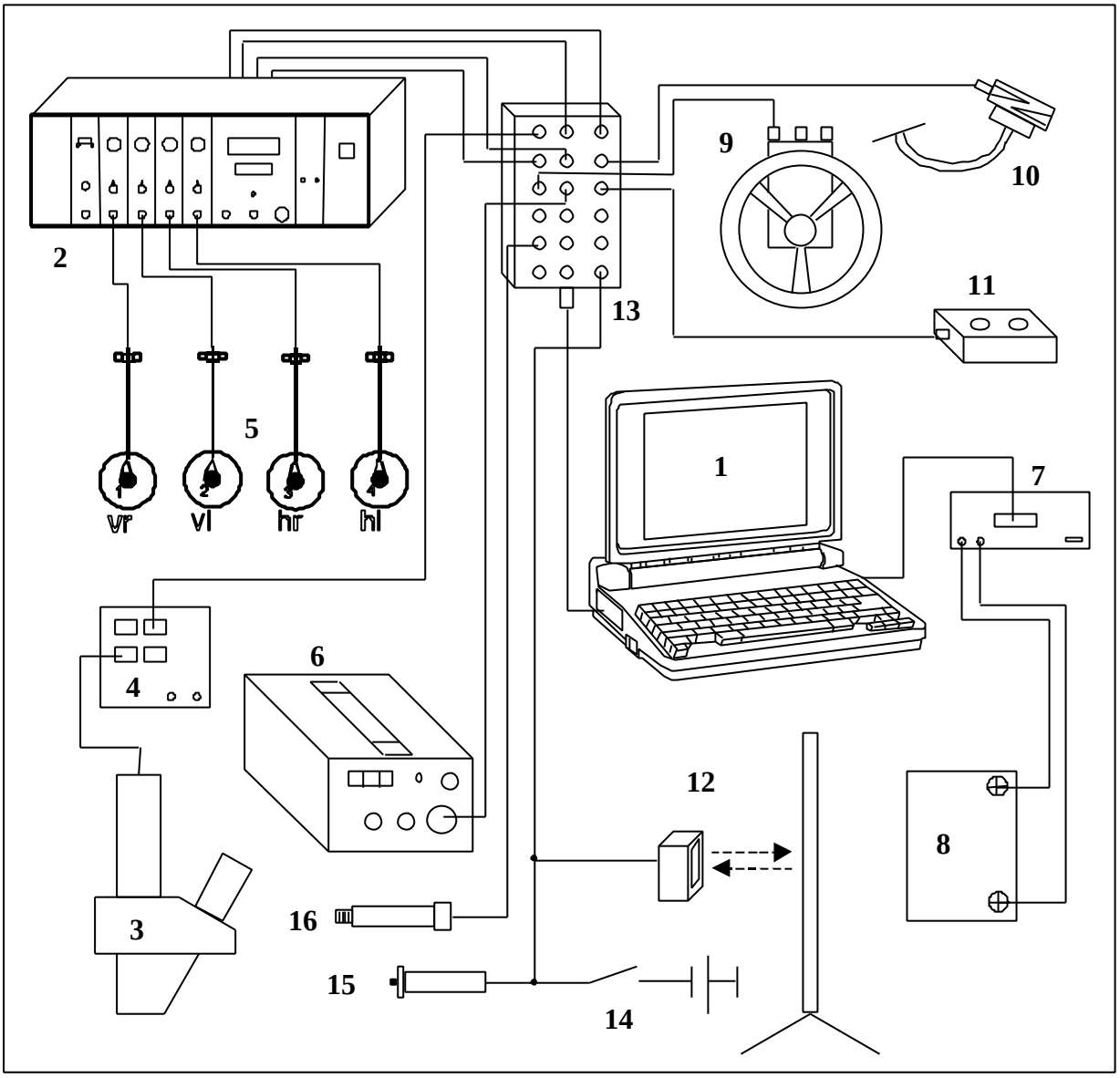

Abbildung 5: Messaufbau

Legende:

Nr.	Bezeichnung	Int. Bez.	Nr.	Bezeichnung	Int. Bez.
1	Laptop mit Messkarte	Inlite Nr. 3	9	Messlenkrad	F 06
2	MiRa-Messgerät (mit Akku)	F 14	10	Pedalkraftsensor	F 09
3	Datron V 2 / Datron M 3	F 02 / F 03	11	Gierratensensor	F 07
4	Datron Sensorelektronik	F 02 / F 03	12	Lichtschranke	-
5	Raddrehzahlgeber	-	13	Messbox	-
6	Stabilisierte Plattform	F 05	14	Fusspedalkontakt	-
7	DC/AC Wandler	-	15	Handauslösetaster	-
8	Spannungsversorgung	-	16	Drucksensoren	D 08 / D.10

6.1.1 Messgeräte

Laptop mit Messkarte:
Es handelt sich um ein Notebook mit 32 MB Ram Arbeitsspeicher und einer Taktfrequenz von 120 MHz. Der Laptop arbeitet mit dem Betriebssystem Windows 95. Die gemessenen Daten werden über die Messkarte direkt ins MS Excel eingelesen.

Hersteller: Kontron AG Int. Bez.: Inlite Nr.3

MiRa Messgerät:
Der MiRa-Trennverstärker soll bei Messungen mit dem PC, in erster Linie, die Messkarte vor Überspannungen schützen. Gleichzeitig soll die Spannung des Messsignals der Eingangsspannung der Messkarte angepasst werden. Der Begriff Trennverstärker bedeutet, dass das Ein- und Ausgangssignal galvanisch getrennt wird.

Hersteller: HTA Biel-Bienne Abteilung A Int. Bez.: F14

Datron V2:
Der Sensor DATRON V2 arbeitet nach dem Prinzip des korrelationsoptischen Verfahrens. Dabei wird eine rauhe, beleuchtete Oberfläche durch ein Objekt auf ein Gitter von, in gleichen Abständen angeordneten, streifenförmigen Photodioden abgebildet. Der Photostrom dieser Dioden weist eine bestimmte Frequenz auf, die direkt proportional zur Relativgeschwindigkeit der Photodioden zur Oberfläche ist. Somit ist eine Bestimmung des Weges nach Betrag und Richtung möglich.

Abbildung 6: Datron V2

Hersteller: Datron Messtechnik GmbH Typ: V2 Int. Bez.: F02

Datron M3:
Die Datron-Mikrowellensensoren arbeiten nach dem Prinzip des Dopplereffektes. Unter dem Dopplereffekt versteht man die Frequenzverschiebung einer reflektierten Strahlung nach Aussendung auf eine bewegte Oberfläche. Der Mikrowellen-Doppler-Sensor dient zur Geschwindigkeits- und Wegmessung.

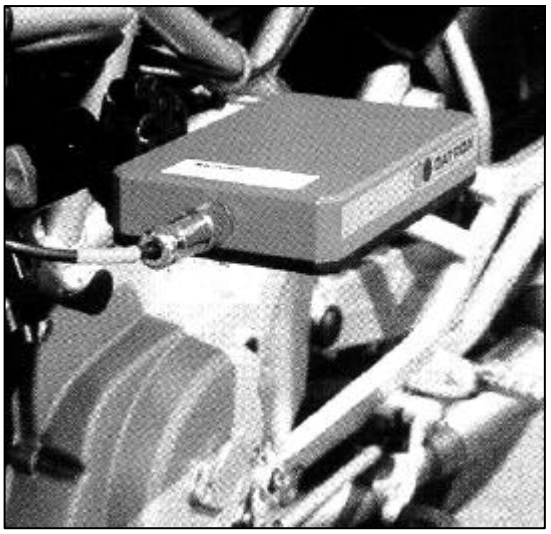

Abbildung 7: Datron M3

Hersteller: Datron Messtechnik GmbH Typ: M3 Int. Bez.: F03

Raddrehzahlgeber:
Die Radgeschwindigkeit wurde mittels Impulsgebern aufgenommen. Ausgangssignale an den Raddrehzahlgeber: 360 Impulse pro Umdrehung, max. 35,4 s^{-1} = 12,7 kHz.

Abbildung 8: Raddrehzahlgeber

Hersteller: HTA Biel-Bienne Abteilung A Int. Bez.: keine

Stabilisierte Plattform:

Die stabilisierte Plattform hat die Aufgabe, in einem Fahrzeug eine horizontale Bezugsebene darzustellen und diese unabhängig von Nick- und Rollbewegungen des Fahrzeuges aufrechtzuerhalten. Zur Darstellung dieser horizontalen Bezugsebene dient ein Lotkreisel. Die Plattform kann nun in dieser Bezugsebene die Beschleunigungen des Fahrzeuges aufnehmen und als elektrisches Signal abgeben. Der auf dem Gehäuse angegebene Pfeil muss mit der Richtung in welcher die Beschleunigung aufgenommen werden soll übereinstimmen.

Hersteller: Novotechnik Typ: K212-2b Int. Bez.: F05

Messlenkrad:

Für die Messung des Lenkwinkels wird ein spezielles Messlenkrad verwendet. Der Lenkradwinkel wird über ein Potentiometer auf die Sensorelektronik übertragen und anschliessend direkt im Laptop ausgewertet. Zusätzlich ist im Messlenkrad eine Messnabe mit Dehnungsmessstreifen integriert, mit welcher das Lenkmoment erfasst werden kann. Dieses Lenkmoment wurde aber bei unseren Untersuchungen nicht benötigt.

Benutzter Anschluss: Lenkradwinkel grob Messbereich: +/- 720 °
Empfindlichkeit: 360 °/V

Abbildung 9: Messlenkrad

Hersteller: KYOWA Typ: SFA 022CS YB-503A Int. Bez.: F 06

Pedalkraftsensor:
Zur Ermittlung der Bremskraftwerte bei einer Bremsprüfung dient der Pedalkraftsensor. Er misst die aufgebrachte Pedalkraft und zeigt sie Analog an. Die Auswertelektronik besitzt jedoch einen Ausgang, über welchen die Sensorsignale direkt auf die Messkarte des PC`s übertragen werden können.

Abbildung 10: Pedalkraftsensor

Hersteller:	Datron GmbH	Typ: PTM-LP	Int. Bez.:	F 09

Gierratensensor:
Mit dem Gierratensensor wird der Gierwinkel sowie die Giergeschwindigkeit ermittelt. Er arbeitet nach dem Prinzip der Piezo-Quarz-Technik. Der GyroChip wird mit 12V DC gespiesen und liefert ein analoges Ausgabesignal.

Hersteller:	Systron Donner Inertial Division	Typ: AQRS	Int. Bez.:	F 07

Lichtschranke:
Damit beim Fahrmanöver „m-Sprung“ der genaue Zeitpunkt der Haftwertsänderung ersichtlich wird, wurde bei Beginn der Gleitpiste eine Lichtschranke aufgestellt. Dieses Lichtschrankensignal erzeugt im Auswerte-Makro eine Spannungsspitze, welche den Auswertevorgang vereinfachte.

Abbildung 11: Lichtschranke

Fusspedalkontakt:
Bei allen ABS-Fahrversuchen wurden die Messungen mit einem Fusspedalkontakt ausgelöst. Dabei handelt es sich um einen Kontaktstreifen, welcher unter geringer Krafteinwirkung die Triggerung startet. Dieser Kontaktstreifen wurde auf dem Pedalkraftsensor befestigt.

Handauslösetaster:
Damit bei den ESP-Fahrversuchen der Zeitpunkt der Triggerung selbst gewählt werden konnte, erfolgte die Auslösung mittels eines Handauslösetasters.

Drucksensoren:
Zur Erfassung der Bremsdrücke vorne rechts und hinten rechts wurden zwei Drucksensoren montiert. Der Zweck dieser beiden Sensoren war, ein Bremseingriff des ESP-Systems (bei den ESP-Fahrversuchen) sichtbar zu machen. Die rechte Seite wurde gewählt, da laut Theorie bei einem übersteuernden Fahrzeug in einer Linkskurve vorne rechts ein Bremseingriff erfolgt. Zudem weisen die m-Split Fahrmanöver rechts den niedrigeren Haftwert auf.

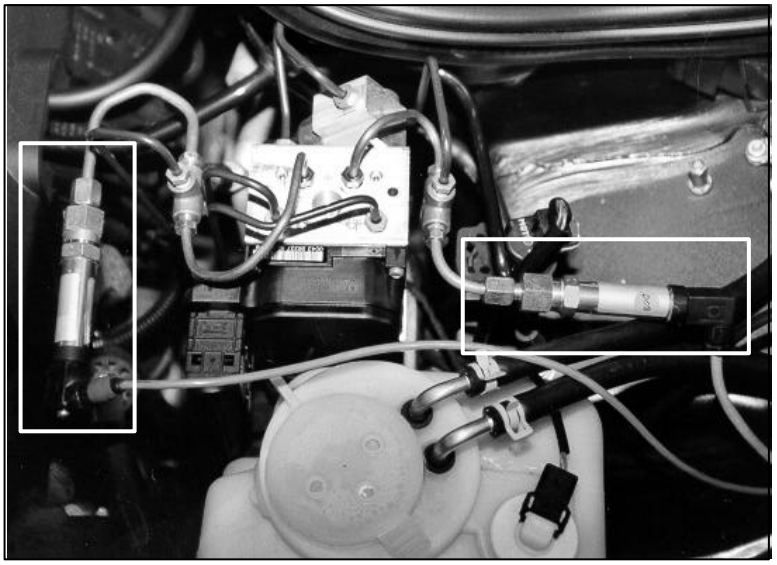

Abbildung 12: Drucksensoren

Hersteller: Keller Druckmesstechnik AG Typ: PA-21R Int. Bez.: D 08 / D 10

6.1.2 Genauigkeit der Messgeräte

Messgerät:	Kenngrösse:	Genauigkeit:	Verstärkung:	Int.Bez.
Datron V 2	Längsgeschwindigkeit	+/- 0,5%	20 (km/h)/V	F 02
Datron M 3	Längsgeschwindigkeit	+/- 0,5%	20 (km/h)/V	F 03
Raddrehzahlgeber	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	Je nach Rad	-
Opel 15 Zoll	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	25 (km/h)/V	-
Opel 16 Zoll	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	24.86 (km/h)/V	-
Opel 17 Zoll	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	25.44 (km/h)/V	-
Opel 18 Zoll	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	25 (km/h)/V	-
Mercedes 16 Zoll	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	26.09 (km/h)/V	-
Mercedes 17 Zoll	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	26.17 (km/h)/V	-
Mercedes 18 Zoll VA	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	26.21 (km/h)/V	-
Mercedes 18 Zoll HA	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	26.13 (km/h)/V	-
Mercedes 19 Zoll VA	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	26.62 (km/h)/V	-
Mercedes 19 Zoll HA	Radgeschwindigkeit	+/- 0,3 s^{-1}	26.38 (km/h)/V	-
Stabilisierte Plattform	Querbeschleunigung	+/- 0.15 m/s^2	1.82 (m/s^2)/V	F 05
Messlenkrad	Lenkradwinkel	+/- 2°	360 °/V	F 06
Pedalkraftsensor	Pedalkraft	+/- 1%	1051 N/V	F 09
Gierratensensor	Giergeschwindigkeit	+/- 0.5 °/s	47.13 (°/s)/V	F 07
Drucksensoren	Druck	+/- 1%	16 bar/V	D 08 / D 10
Radlastwaage	Radlast	+/- 0.1 kg	-	K 19

6.1.3 Fehlerrechnung

Weil jedes Resultat fehlerbehaftet ist, gilt es die Grösse des Fehlers abzuschätzen. Durch mehrmaliges messen und durch errechnen eines Streumasses wurden diese zufälligen Fehler berücksichtigt. Dazu berechneten wir die Standardabweichung. Die Grundidee der Standardabweichung ist es, eine Art durchschnittlicher Abweichung vom Mittelwert zu bestimmen. Es wurden jeweils fünf Messungen je Versuch durchgeführt. Die in Vauffelin durchgeführten Messungen[2] sowie die Messungen im VSZV[3] auf „m-Sprung“ wurden mit den folgenden Formeln korrigiert.

Standardabweichung:

$$s = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}$$

Arithmetisches Mittel:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i$$

s = Standardabweichung
N = Anzahl Messungen (5)
$\bar{x}$ = Arithmetisches Mittel
x_i = Gemessene Werte

Der entscheidende Vorteil der Standardabweichung liegt darin, dass sie in exakt derselben Einheit gemessen wird wie die entsprechenden Lageparameter.

Bei den restlichen Messungen im VSZV („m-Split“ und „m-Split Kurve“) sind die Messgerätegenauigkeiten zu berücksichtigen.

[2] Siehe Bericht 7.3
[3] Siehe Bericht 7.2

6.2 Versuchsaufbau

6.2.1 Allgemeines

Die entsprechenden Fahrversuche wurden, soweit nicht in Biel (Vauffelin) möglich, im Verkehrs-Sicherheits-Zentrum Veltheim durchgeführt. Bremsversuche aus höheren Geschwindigkeiten konnten in Vauffelin[4] inszeniert werden. Diese Versuche erfolgten auf trockener Strasse. Die Messungen auf verschiedenen Haftwerten wurden auf Grund der Reproduzierbarkeit und der Platzverhältnisse auf dem Areal des Verkehrs-Sicherheits-Zentrums (VSZV) in Veltheim[5] durchgeführt. Diese Versuche wurden auf nasser Fahrbahn gefahren.

6.2.2 Versuchskonfigurationen

Bei den Rad / Reifenkombinationen wurden zwischen zwei Versuchstypen unterschieden. Sind die Felgengrössen der Vorder- und der Hinterräder identisch, so bezeichnen wir diese Kombinationen im Folgenden als „konventionelle-Bereifung“. Um den Einfluss von unterschiedlichen Massenträgheitsmomenten zu erfassen, wurden zudem noch Versuche mit unterschiedlichen Felgengrössen der Vorder- und Hinterachse gefahren. Diese Zusammenstellungen bezeichnen wir als „misch-Bereifung“. Um eine maximale Differenz zu erhalten, werden die grösste und die kleinste Felgengösse dazu verwendet. In den folgenden Tabellen sind die Felgen- und Reifendimensionen der getesteten Fahrzeugräder zusammengetragen. Die Radmassen und Massenträgheitsmomente[6] beziehen sich jeweils auf ein Rad.

6.2.2.1 Opel Astra 20 TD

Konventionelle-Bereifung:

Felgendimension:	Reifendimension:	Radmasse [kg]:	Massenträgheitsmoment [kg m^2]:
6JX15 H2 ET49	195/60 R15 88H	15,7	0,88
6JX16 H2 ET49	205/50 R16 87V	18,2	0,97
7,5JX17 H2 ET38	215/45 ZR 17 87	18,2	1,12
8JX18 H2 ET35	225/35 ZR 18 83	23	1,23

Misch-Bereifung:

Montage:	Felgendimension:	Reifendimension:
Vorderachse Hinterachse	6JX15 H2 ET49 8JX18 H2 ET35	195/60 R15 88H 225/35 ZR 18 83
Vorderachse Hinterachse	8JX18 H2 ET35 6JX15 H2 ET49	225/35 ZR 18 83 195/60 R15 88H

[4] Siehe Bericht 7.3
[5] Siehe Bericht 7.2
[6] Siehe Anhang 5

6.2.2.2 Mercedes-Benz E 320

Konventionelle-Bereifung:

Felgendimension:	Reifendimension:	Radmasse [kg]:	Massenträgheitsmoment [kgm^2]:
7,5JX16 H2 ET41	215/55 R16 93H	18	1,02
8JX17 H2 ET37	235/45 ZR17 94	22	1,13
9JX18 H2 ET35	VA) 235/40 ZR18 91	23,5	1,43
	HA) 265/55 ZR18 93	24	1,53
9JX19 H2 ET44	VA) 245/35 ZR19 93	25	1,55
	HA) 275/30 ZR19 96	25,6	1,6

Misch-Bereifung:

Montage:	Felgendimension:	Reifendimension:
Vorderachse Hinterachse	7,5JX16 H2 ET41 9JX19 H2 ET44	215/55 R16 93H 275/30 ZR 19 96
Vorderachse Hinterachse	9JX19 H2 ET44 7,5JX16 H2 ET41	245/35 ZR 19 93 215/55 R16 93H

7 Rad/Reifen-Einfluss auf die ABS-Regelgüte

7.1 Einleitung

Von der Theorie her war man überzeugt, dass durch die unterschiedlichen Felgeninnendurchmesser auch unterschiedliche Massenträgheitsmomente vorhanden sind. Unklar war jedoch in welcher Grössenordnung sich diese bewegen. Damit ersichtlich wurde, welcher Unterschied zwischen den getesteten Räder besteht, sollte das Massenträgheitsmoment dieser Räder gemessen oder errechnet werden. Die so erhaltenen Messwerte sollen ebenfalls die Auswertung der Fahrzeugversuche erleichtern. Es gibt mehrere Möglichkeiten die Massenträgheit eines Körpers zu bestimmen. Die wohl genauste Methode wäre das Anfertigen eines Querschnittes des Objektes. Der Querschnitt wird dann in einzelne Flächen aufgeteilt und dessen Schwerpunkte mittels „Satz von Steiner“ zum Gesamtmassenträgheitsmoment addiert. Zudem besteht die Möglichkeit durch ein Pendel auf das Massenträgheitsmoment zu schliessen. Dazu kann ein Drill-Pendel oder ein physikalisches Pendel benutzt werden.

7.2 Trägheitsmomente der Räder

7.2.1 Einleitung

Aufgrund der Einfachheit und der ausreichenden Genauigkeit führten wir die Messungen mit einem physikalischen Pendel durch. Die Basis dieser Versuche stellte eine Auswuchtmaschine dar, welche über keinen motorischen Antrieb verfügt. An diese Auswuchtmaschine wurde ein definiertes Flacheisen als Pendel befestigt. Durch Messen der Periodendauer des Pendels alleine und der Periodendauer, wenn zusätzlich ein Rad montiert wird, kann über eine Differentialgleichung 2. Grades auf das Massenträgheitsmoment des Rades zurückgeschlossen werden. Die errechneten Resultate sollten nicht als Absolutwerte betrachtet werden, da der Reibungswiderstand und der Luftwiderstand nicht in der Berechnung berücksichtigt wurden. Jedoch kann eine Aussage über die Massenträgheitserhöhung eines Rades gegenüber des Serienrades gemacht werden.

7.2.2 Prüfaufbau

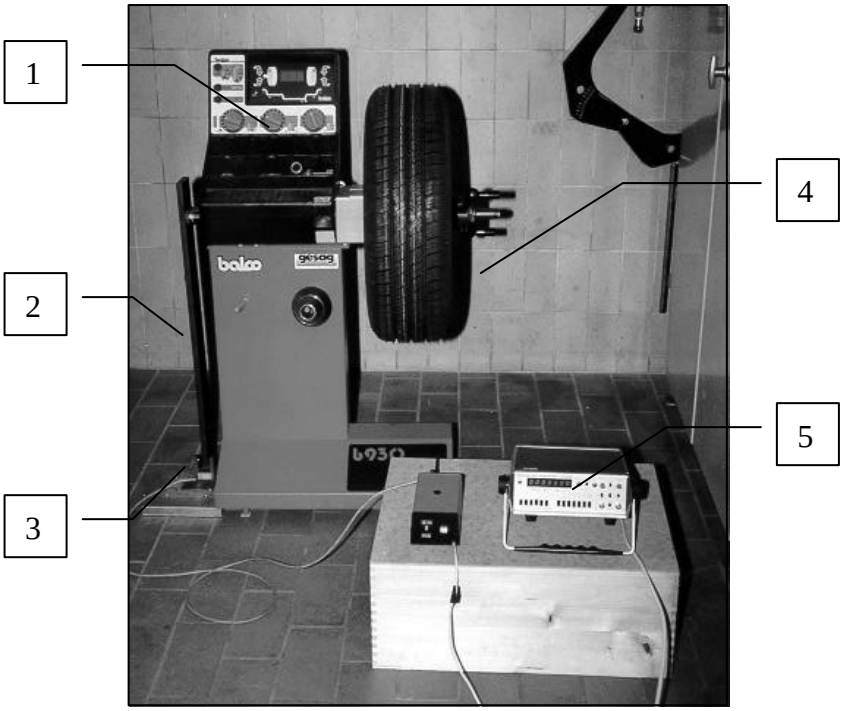

Abbildung 13: physikalisches Pendel

Legende:

Nr.	Bezeichnung:	Typ:
1	Auswuchtmaschine	Balco b930
2	Pendel 735 x 80 x 15 (m = 6,658 kg)	Flacheisen
3	Lichtschranke	k.A.
4	Zu messendes Rad	Diverse
5	Präzisions Stoppuhr	Universal Counter Timer RACAL-DANA 9903

7.2.3 Messresultate

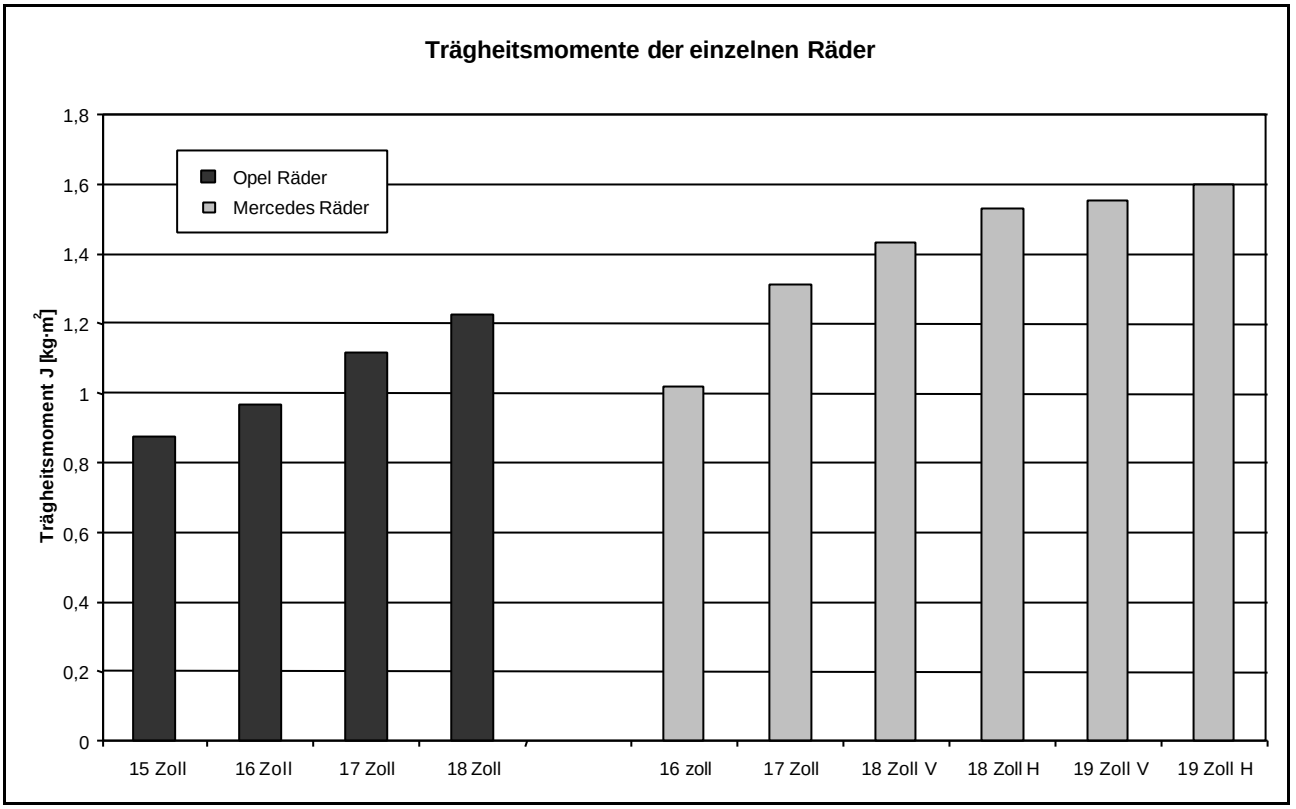

Abbildung 14: Trägheitsmomente der Testräder

Die vorgängig erhofften Resultate bestätigten sich, da bei allen Felgen mit zunehmendem Innendurchmesser auch das Massenträgheitsmoment zunahm. Die Serienräder beider Fahrzeuge zeichneten sich durch die jeweils tiefsten Werte aus. Die Differenzen zwischen den vorderen und hinteren Rädern (Mercedes 18 und 19 Zoll), werden alleine durch die unterschiedlichen Reifendimensionen verursacht.

7.2.3.1 Interpretation

Die mit den Pendelversuchen errechneten Werte sagen noch nichts über die Auswirkungen während einer Verzögerung bzw. Beschleunigung aus. Um den Effekt zu verdeutlichen, wurde die benötigte Kraft während einer Abbremsung für ein Rad errechnet. Dabei sind Werte aus den praktischen Fahrversuchen eingeflossen:

v_1 = 46 km/h (Reifenumfangsgeschwindigkeit vor der Verzögerung)
v_2 = 8 km/h (Reifenumfangsgeschwindigkeit nach der Verzögerung)

➔ Δv = 38 km/h

t = 0.15 sec (Benötigtes Zeitintervall)

➔ α = 236.14 rad/s^2 (Berechnete mittlere Winkelbeschleunigung)

Die Berechnung der Kraft erfolgte mit den folgenden Formeln:

$$M = J \cdot a \qquad M = F \cdot r = F \cdot r_{dyn} \qquad F \cdot r_{dyn} = J \cdot a \qquad F = \frac{J \cdot a}{r_{dyn}}$$

M = Drehmoment [Nm]
J = Massenträgheitsmoment [kgm^2]
a = Winkelbeschleunigung [rad/s^2]
F = Kraft [N]
r_{dyn} = Dynamischer Reifenradius [m]

Somit benötigt das Serienrad (15 Zoll) des Opels 694 [N], des Mercedes (16 Zoll) 775 [N]. Im nachfolgenden Diagramm ist der zusätzliche Kraftaufwand sowie der prozentuale Zuwachs dargestellt.

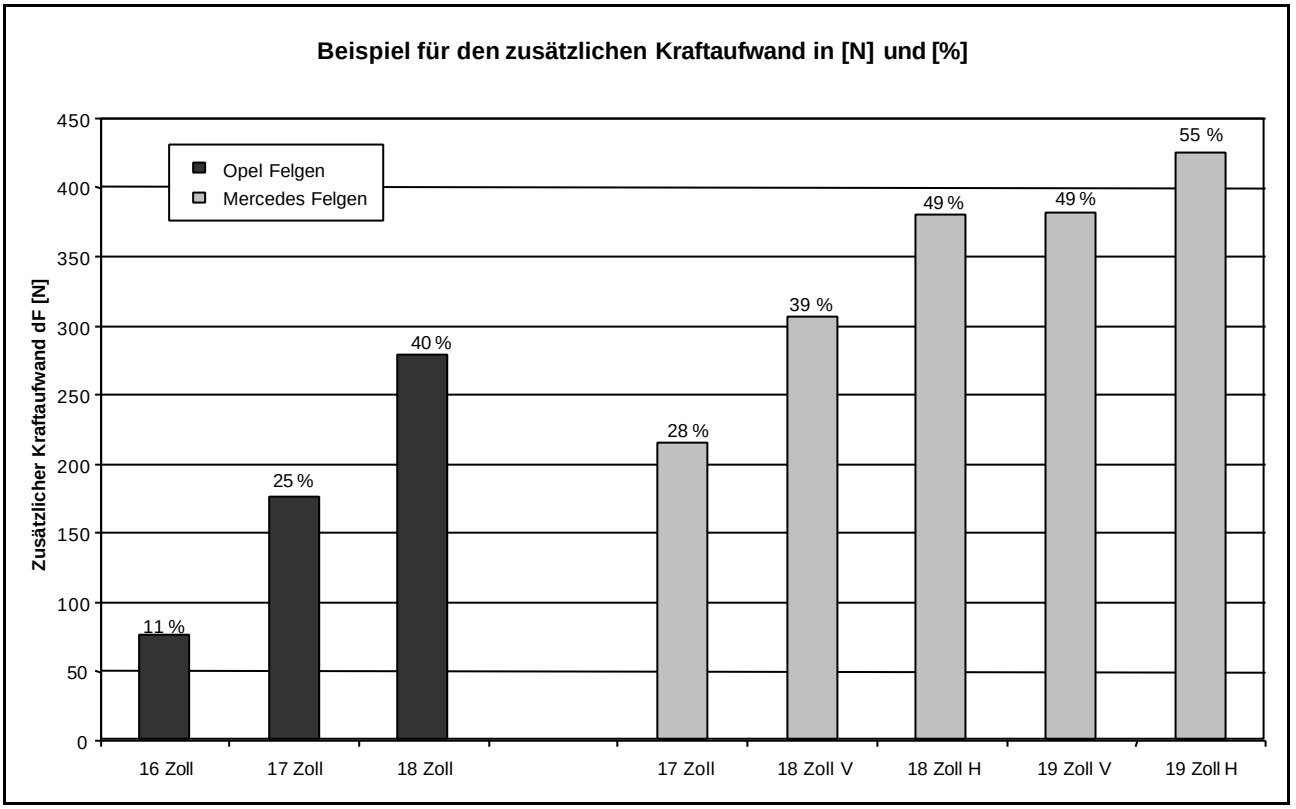

Abbildung 15: Beispiel für den zusätzlichen Kraftaufwand

Wenn ein Rad mit einem höheren Massenträgheitsmoment in der selben Zeit gleich beschleunigt werden muss, erfordert dies eine deutliche Kraftzunahme gegenüber dem Serienrad.

7.3 Messungen im VSZV

Um Messungen auf verschiedenen Haftwerten durchzuführen, durften wir die Teststrecke des Verkehrs-Sicherheits-Zentrum-Veltheim benutzen. Zudem stand uns der Ausbildungsleiter des VSZV als Testfahrer zur Verfügung. Mit dessen Hilfe konnten die Versuche reproduzierbar gefahren werden.

7.3.1 Beschreibung der Fahrmanöver

Um den Einfluss der verschiedenen Rad-Massenträgheitsmomtente auf die ABS-Regelgüte zu erfassen wurden folgende Fahrversuche durchgeführt.

7.3.1.1 Notbremsung auf m-Sprung

Das Fahrmanöver µ-Sprung wählten wir, um die schnelle Anpassung des Bremsdruckes an unterschiedliche Kraftschlussbeiwerte zu überprüfen. Zudem soll dieser Versuch die Problematik der Radbeschleunigung und der Radverzögerung auf schlechtem Haftwert aufzeigen.

Der Aufzeichnungsbeginn erfolgt durch die Bremspedalbetätigung bei der Bremsauslösung. Der Bremsbeginn befindet sich bei den Pylonen 10 m vor der Gleitpiste. Die beim Gleitbelag aufgestellte Lichtschranke dient als Auswertungshilfe. Die Datenaufnahme soll nach dem Fahrzeugstillstand (auf der Gleitpiste) beendet sein.

Bedingungen:

- Veltheim, Piste B
- µ-Sprung
- Bremsbeginn auf Asphalt rauh nass (µ=0,65)
- Bremsende auf Schleuderpiste nass (µ=0.32)
- v = 60 km/h
- Bremsbetätigung soll so schnell wie möglich erfolgen
- Motor ausgekuppelt
- Min. Bremspedalkraft 500 N
- Kurskorrektur durch Fahrer
- Testgewicht: Leergewicht + zwei Personen + Messeinrichtung

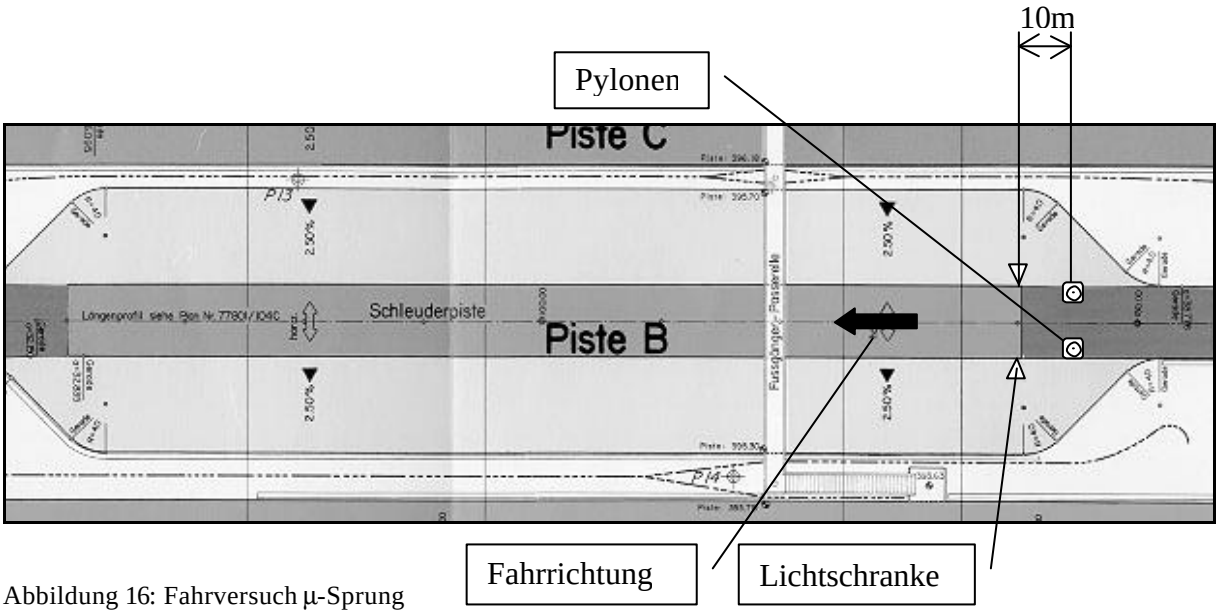

Abbildung 16: Fahrversuch µ-Sprung

7.3.1.2 Notbremsung auf m-Split

Mit diesem Fahrversuch soll die Erhaltung der Fahrstabilität während einer ABS-Bremsung überprüft werden. Dazu sind vorwiegend die Daten des Lenkradwinkels sowie die Giergeschwindigkeit des Fahrzeuges von Bedeutung.

Der Aufzeichnungsbeginn erfolgt durch die Bremspedalbetätigung bei der Bremsauslösung. Der Bremsbeginn befindet sich bei den Pylonen 20 m nach Beginn der Gleitpiste. Die Datenaufnahme soll nach dem Fahrzeugstillstand (auf der Gleitpiste) beendet sein.

Bedingungen:

- Veltheim, Piste B
- µ-Split
- rechts Schleuderpiste nass (µ=0.32), links Asphalt rauh nass (µ=0.65)
- v = 50 km/h
- Bremsbetätigung soll so schnell wie möglich erfolgen
- Motor ausgekuppelt
- Min. Bremspedalkraft 500 N
- Kurskorrektur durch Fahrer
- Testgewicht: Leergewicht + zwei Personen + Messeinrichtung

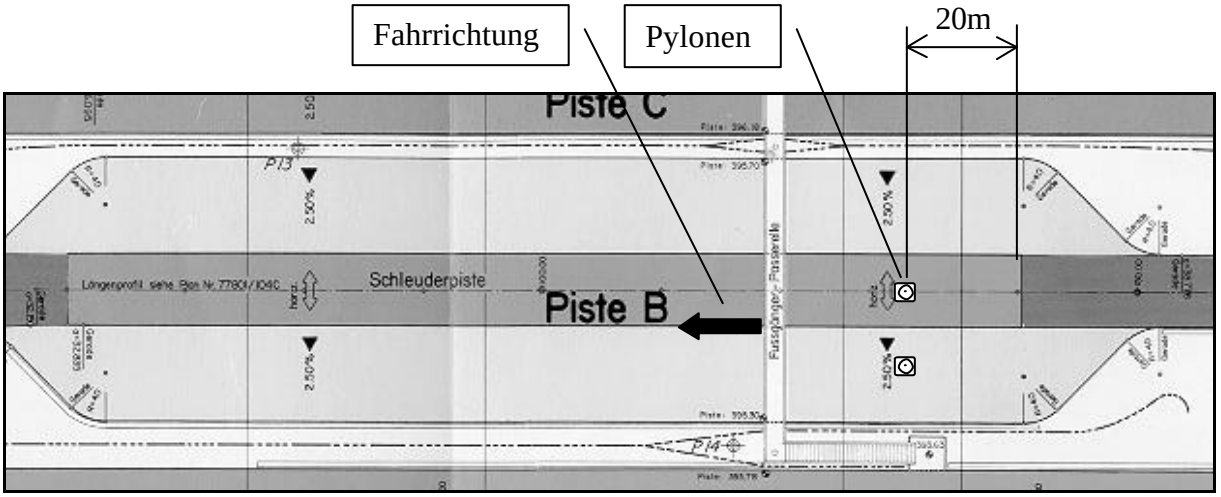

Abbildung 17: Fahrversuch µ-Split

7.3.1.3 Notbremsung in der Kurve auf µ-Split

Das Fahrmanöver µ-Split in der Kurve dient zur Beurteilung der Lenkbarkeit und der Fahrstabilität während einer ABS-Bremsung in einer Kurve. Dazu sind vorwiegend die Daten des Lenkradwinkels sowie die Giergeschwindigkeit des Fahrzeuges von Bedeutung.

Der Aufzeichnungsbeginn erfolgt durch die Bremspedalbetätigung bei der Bremsauslösung. Der Bremsbeginn befindet sich bei den Pylonen 10 m nach Beginn der Gleitpiste. Die Datenaufnahme soll nach dem Fahrzeugstillstand beendet sein.

Bedingungen:

- Veltheim, Piste B, Kurvenradius 29m
- Linkskurve
- µ-Split
- rechts Schleuderpiste nass (µ=0.38), links Asphalt rauh nass (µ=0.65)
- v = 40 km/h
- Bremsbetätigung soll so schnell wie möglich erfolgen
- Motor ausgekuppelt
- Min. Bremspedalkraft 500 N
- Kurskorrektur durch Fahrer
- Testgewicht: Leergewicht + zwei Personen + Messeinrichtung

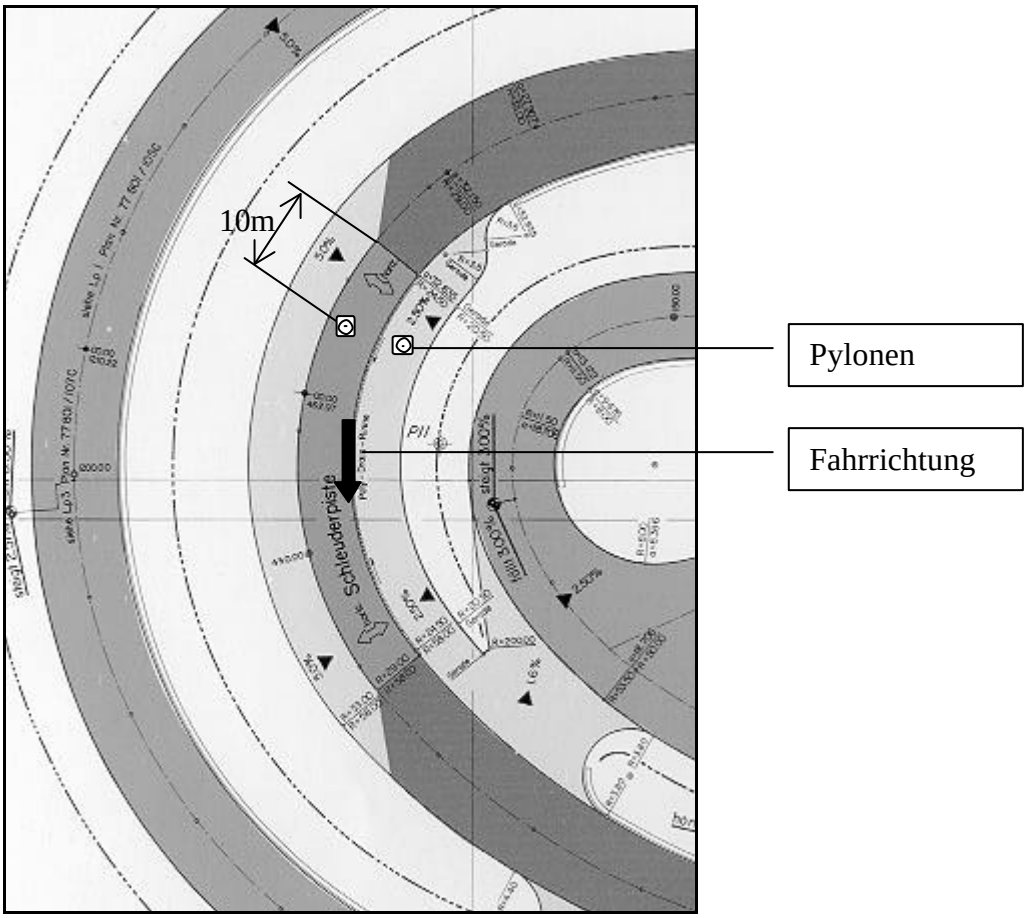

Abbildung 18: Fahrversuch μ-Split Kurve

7.3.2 Messresultate Opel Astra 20 TD

7.3.2.1 Erläuterungen

Um das Diagramm „Druckaufbauverzögerung, μ -Sprung“ richtig zu verstehen, ist zuerst eine kleine Erklärung notwendig. Bei den Kriterien zur Regelgüte[7] eines ABS wird gefordert, dass sich der Bremsdruck schnell an unterschiedliche Kraftschlusswerte anpasst. Beim Fahrmanöver μ-Sprung (siehe folgendes Diagramm), baut sich der Bremsdruck kontinuierlich auf und beginnt entsprechend den Befehlen des Steuergerätes zu regeln. Nach ziemlich genau einer Sekunde fällt der Bremsdruck rapide ab.
Was war geschehen? Schon ein paar Millisekunden vorher fährt das geregelte Rad auf den Belag mit deutlich geringerem Haftwert. Da aber das ABS nur mit zeitlicher Verzögerung den Haftwertunterschied erkennt, wird das entsprechende Rad am Anfang überbremst. Der Bremsdruck muss also schnell abgesenkt werden, damit sich die Bremse löst und somit das Rad wieder beschleunigen kann. Sobald das Rad auf dem neuen Haftwert genügend Drehzahl aufweist, erfolgt der erste Druckaufbau auf dem niedrigeren Kraftschlusswert.

Die Dauer dieser Druckaufbauverzögerungen (im Diagramm Δt) war von grossem Interesse und wurde somit im Diagramm „Druckaufbauverzögerung, μ -Sprung“ visuell dargestellt.

[7] Siehe Bericht 4.2

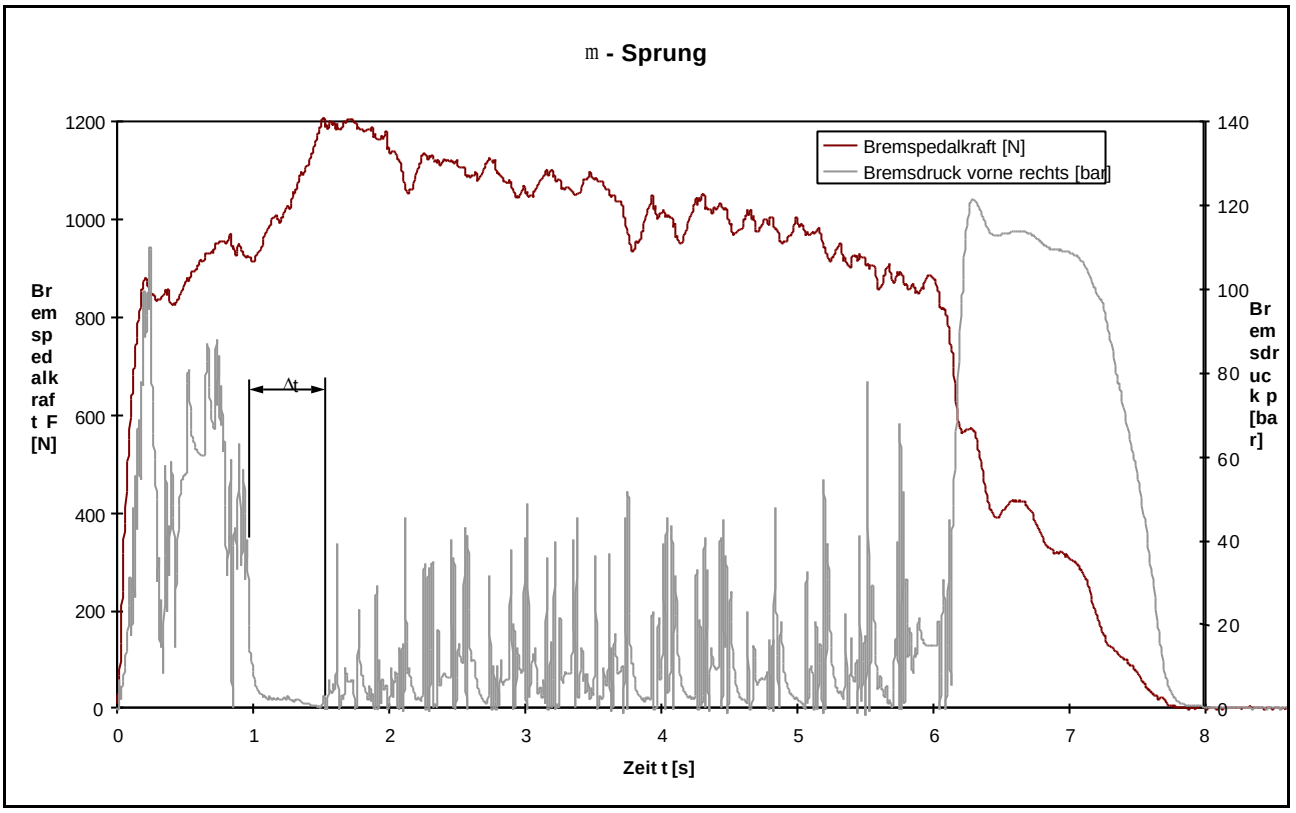

Abbildung 19: µ-Sprung

Der Ausdruck „Gradient“ soll als Mass, die Steigung der Winkelbeschleunigung darstellen. Mit anderen Worten, wieviel Zeit benötigt ein Rad, von dem minimalen zum maximalen Beschleunigswert. Mathematisch gesehen, handelt es sich um die 3. Ableitung des Weges. Demzufolge müsste ein Rad mit einem geringerem Massenträgheitsmoment, hohe Gradientwerte erzielen.

7.3.2.2 Diagramme

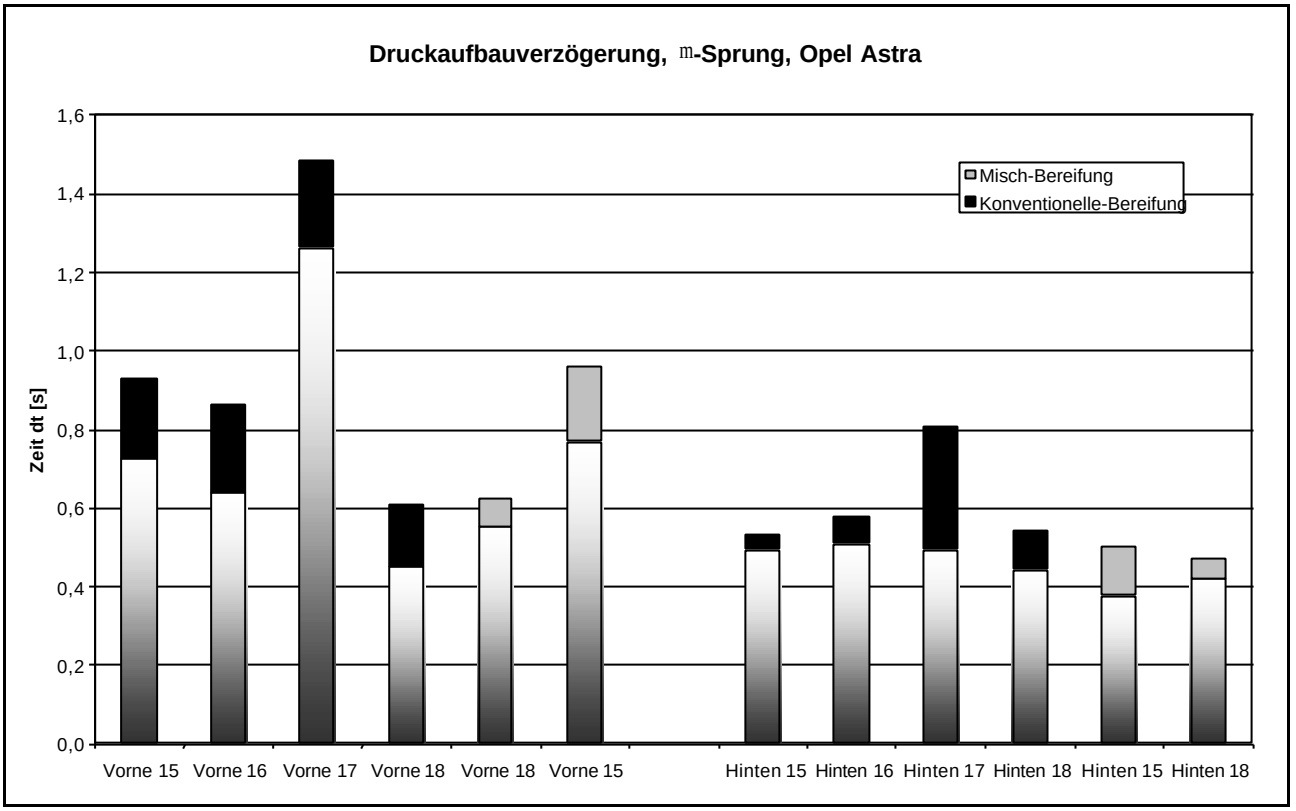

Abbildung 20: Druckaufbauverzögerung, µ-Sprung, Opel Astra

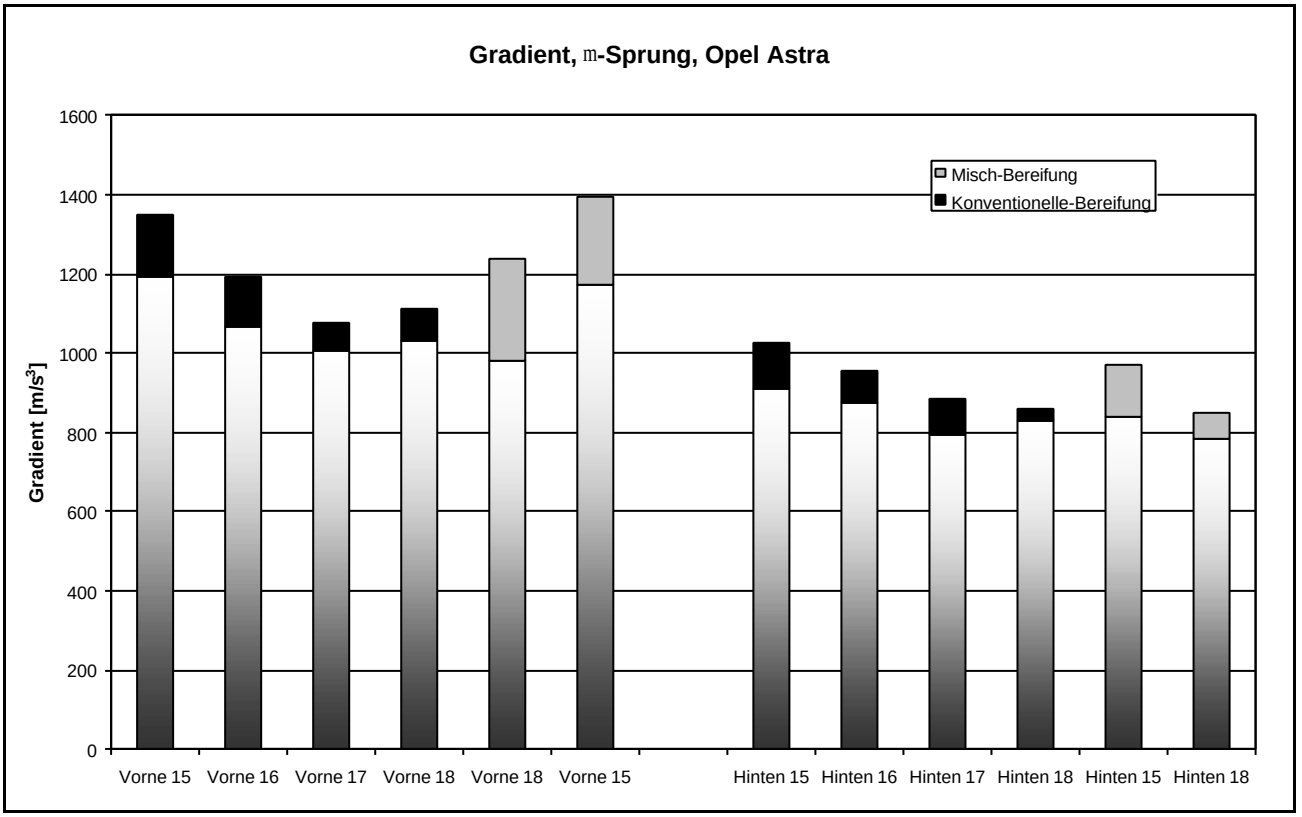

Abbildung 21: Gradient, μ-Sprung, Opel Astra

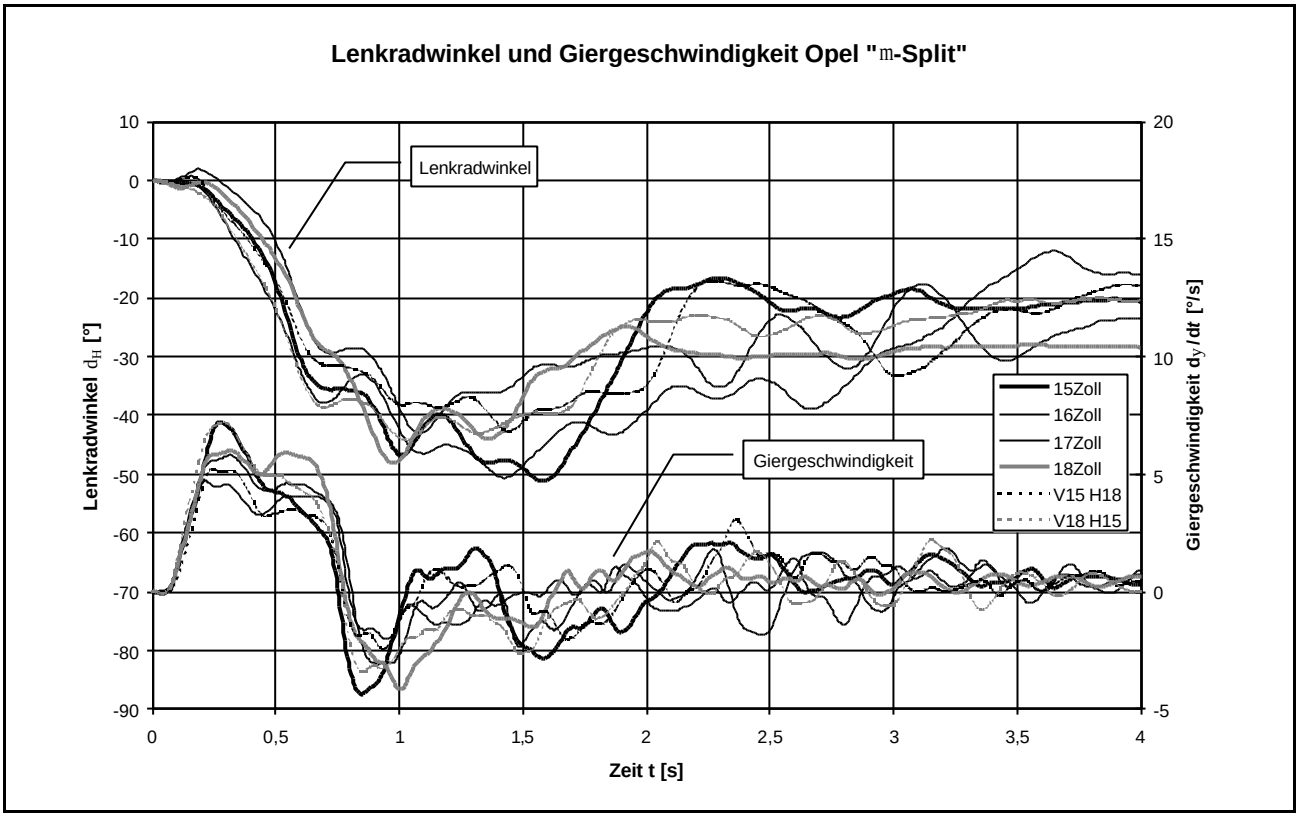

Abbildung 22: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Opel μ-Split

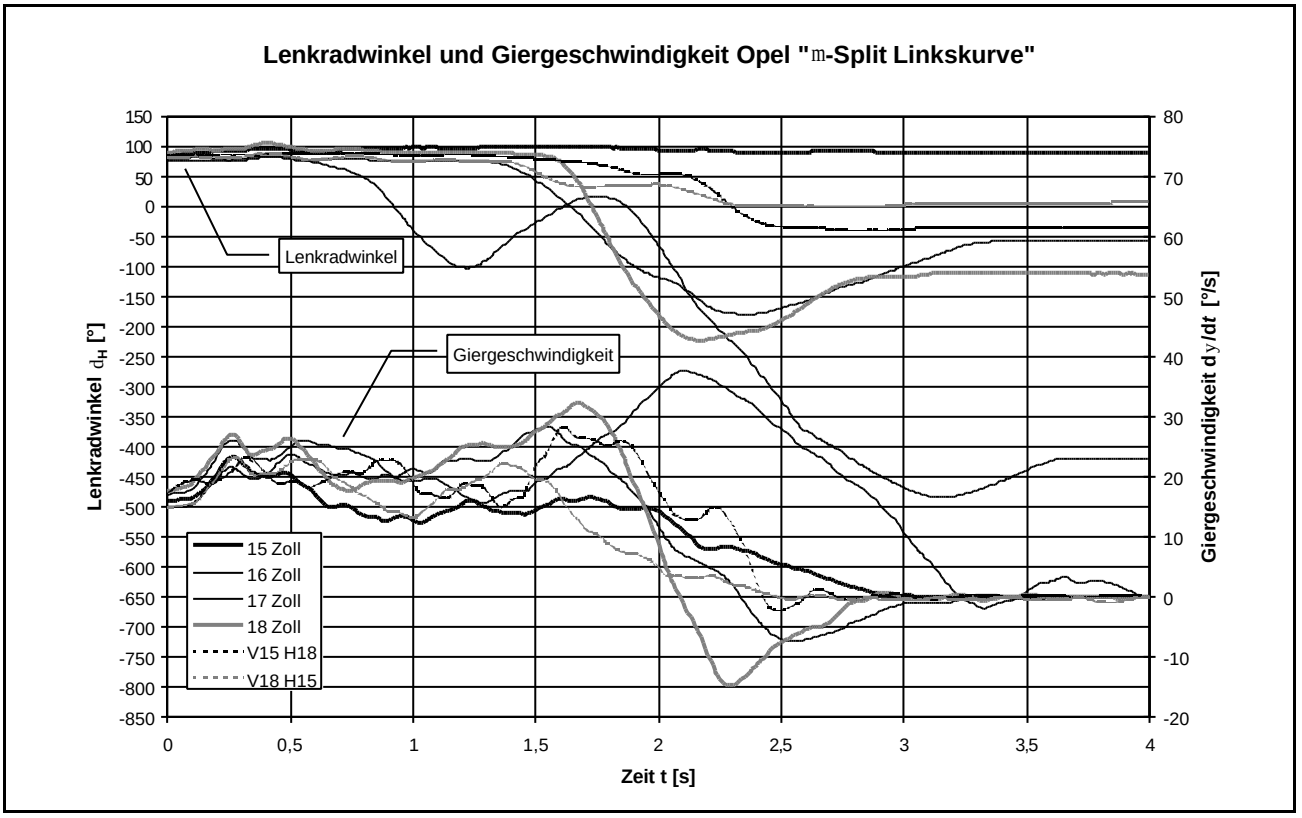

Abbildung 23: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Opel μ-Split Linkskurve

7.3.2.3 Interpretation

Abbildung 20: Druckaufbauverzögerung, m-Sprung, Opel Astra
Erstaunlicherweise nehmen die Druckaufbauverzögerungszeiten an der Vorderachse mit zunehmendem Massenträgheitsmoment ab. Ausnahme bildet das 17 Zoll Rad, dessen Wert sich stark von den anderen Rädern abhebt. Dieser Ausreisser ist einerseits mit dem Alter des Reifen, und andererseits mit dem geringen negativen Profilanteil zu erklären. Leicht bessere Anpassungszeiten gegenüber dem 15 und 16 Zoll Rad, zeigte das 18 Zoll Rad. Das grösste Massenträgheitsmoment konnte durch einen fabrikneuen Reifen kompensiert werden.

An der Hinterachse sind keine signifikanten Unterschiede sichtbar. Die hohe Standardabweichung am 17 Zoll Rad ist wiederum auf das Alter und den negativen Profilanteil zurückzuführen.

Die Mischbereifung ergibt keinen nennenswerten Einfluss.

Abbildung 21: Gradient, m-Sprung, Opel Astra
An der Vorderachse hebt sich nur das 15 Zoll Rad gegenüber den restlichen 3 Rädern in geringem Masse ab. Es zeigt sich, dass das Rad mit dem kleinsten Massenträgheitsmoment den grössten Gradienten bei der Winkelbeschleunigung aufweist. Es kann somit während einer ABS Bremsung tendenziell am schnellsten verzögert bzw. beschleunigt werden.

An den Räder der Hinterachse ist ein ähnlicher Trend ersichtlich, jedoch mit geringfügigeren Abweichungen.

Bei dieser Darstellung ist kein merklicher Einfluss der Reifen sichtbar.

Die misch-Bereifung ergibt keinen nennenswerten Einfluss.

Abbildung 22: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Opel m-Split
Beim Lenkradwinkel ist keine eigentliche Gesetzmässigkeit zu erkennen. Die grössten Unterschiede (im Bereich von ± 10°) sind bei rund 2.5 Sekunden erkennbar. Bei Fahrzeugstillstand (bei ca. 4 Sekunden) pendeln sich die Werte bei etwa -20° ein.

Mit Hilfe der Giergeschwindigkeit lässt sich keine Aussage bezüglich dem Einfluss der verschiedenen Rädern erzielen.

Abbildung 23: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Opel m-Split Linkskurve
Das 15 Zoll Rad ermöglicht eine einwandfreie Bremsung in der Kurve, ohne das der Fahrer mit Lenkkorrekturen nachhelfen muss. Beim 16 und 18 Zoll Rad treten ähnliche Lenkkorrekturen auf. Da das Fahrzeug übersteuert, muss der Fahrer um ca. 3/4 Lenkradumdrehungen korrigieren, um es auf Kurs zu halten. Hier dürfte die Grösse der Reifenaufstandsfläche (abnehmende Flächenpressung) einen wesentlichen Einfluss haben. Das 17 Zoll Rad fällt durch enorme Lenkradkorrekturen negativ auf, welche wiederum durch das Alter und die Profilgestaltung hervorgerufen werden könnten.

Die Mischbereifungen verlangen keine grossen Lenkradbewegungen. Auch das breite 18 Zoll Rad an der Hinterachse verlangt keine schwerwiegenden Lenkmanöver.
Die Giergeschwindigkeit des 15 Zoll Rades, nimmt während der Bremsung kontinuierlich ab. Dies lässt auf eine problemlose Abbremsung zurückschliessen. Die Mischbereifung und das 16 Zoll Rad folgen mit Abweichungen dieser Tendenz. Das 17 Zoll Rad folgt nicht dem allgemeinen Verlauf der Giergeschwindigkeit.

7.3.3 Messresultate Mercedes-Benz E320

7.3.3.1 Diagramme

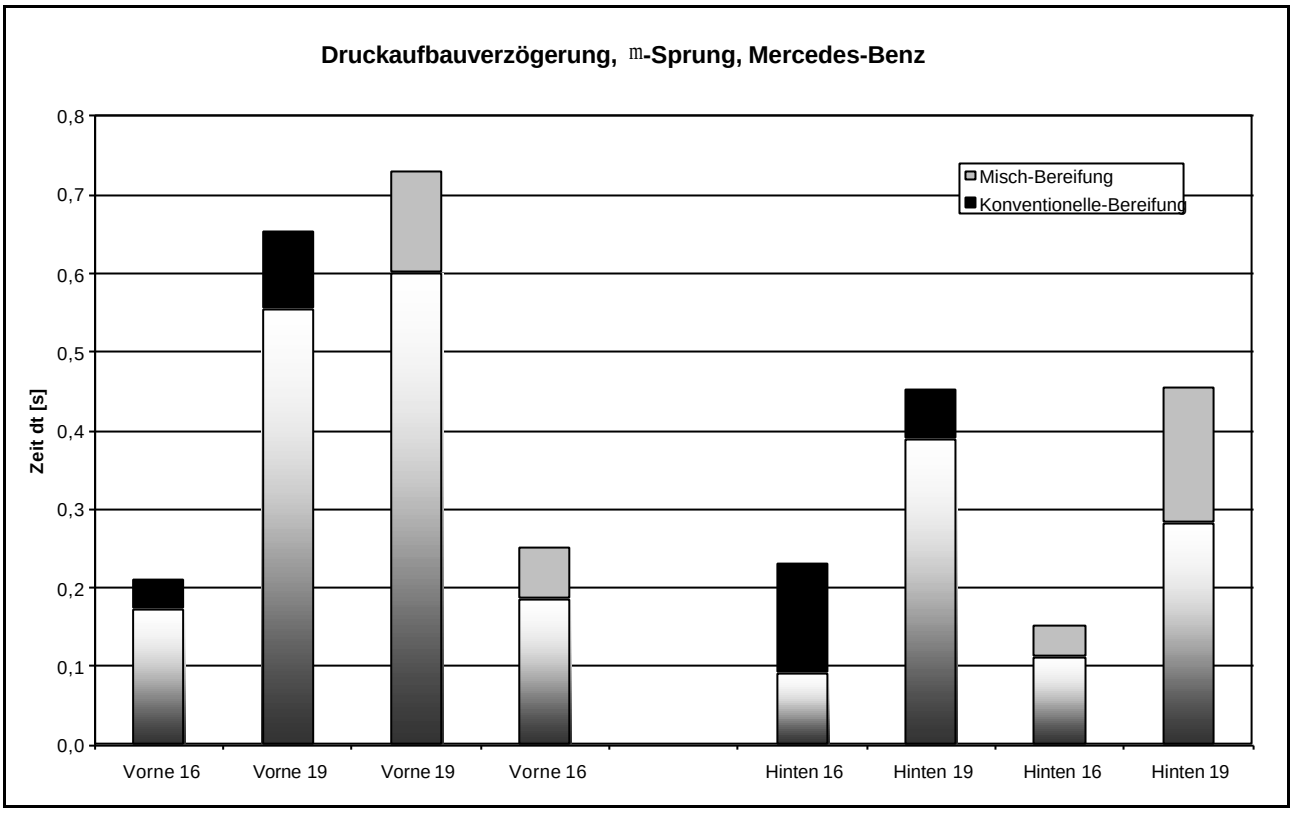

Abbildung 24: Druckaufbauverzögerung, µ-Sprung, Mercedes-Benz

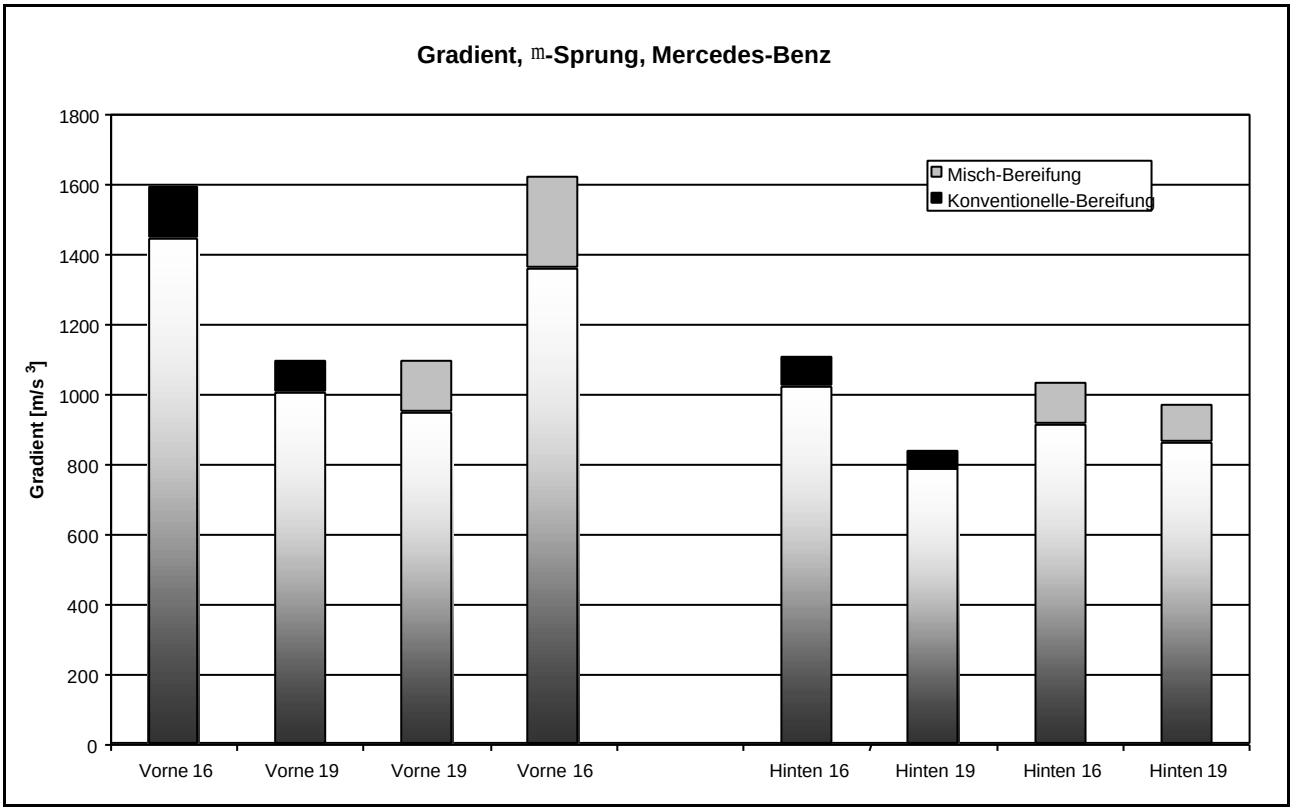

Abbildung 25: Gradient, µ-Sprung, Mercedes-Benz

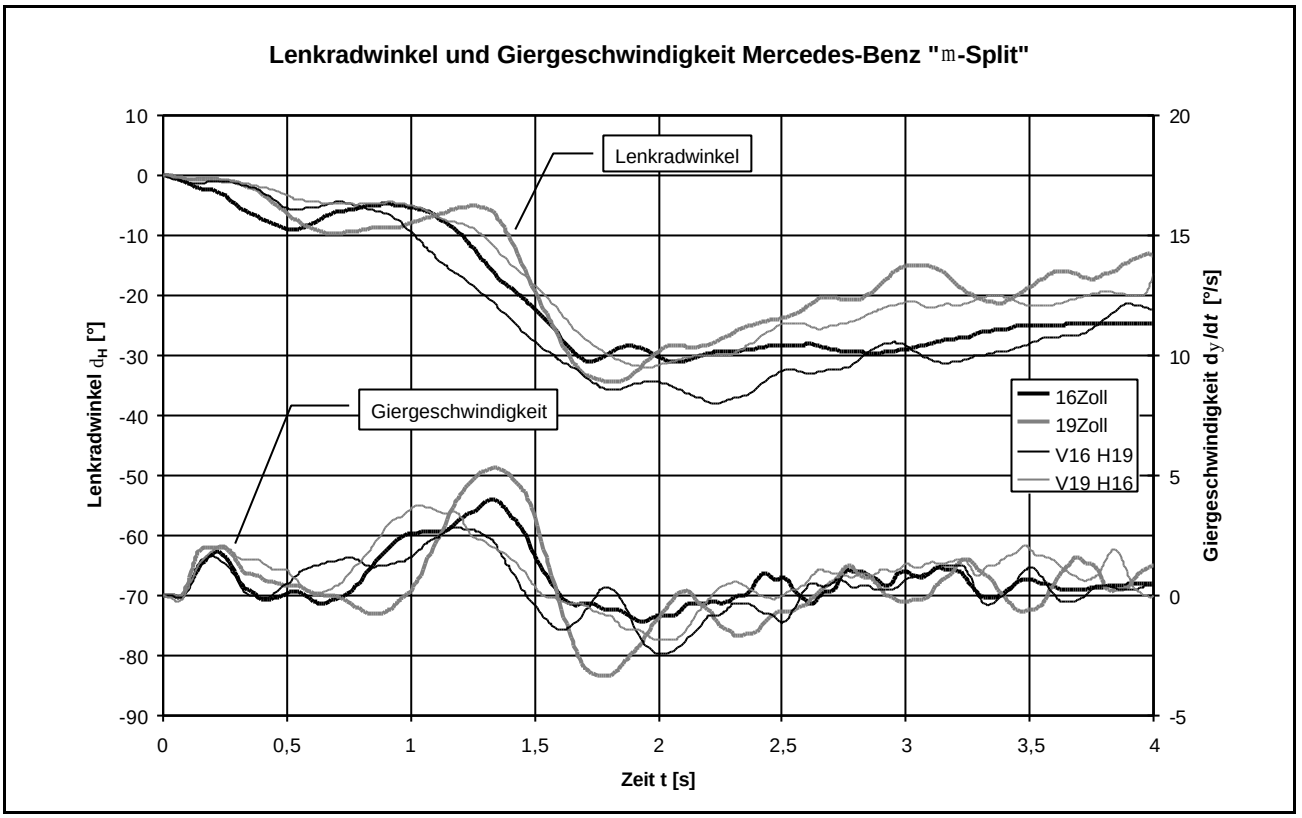

Abbildung 26: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Mercedes-Benz µ-Split

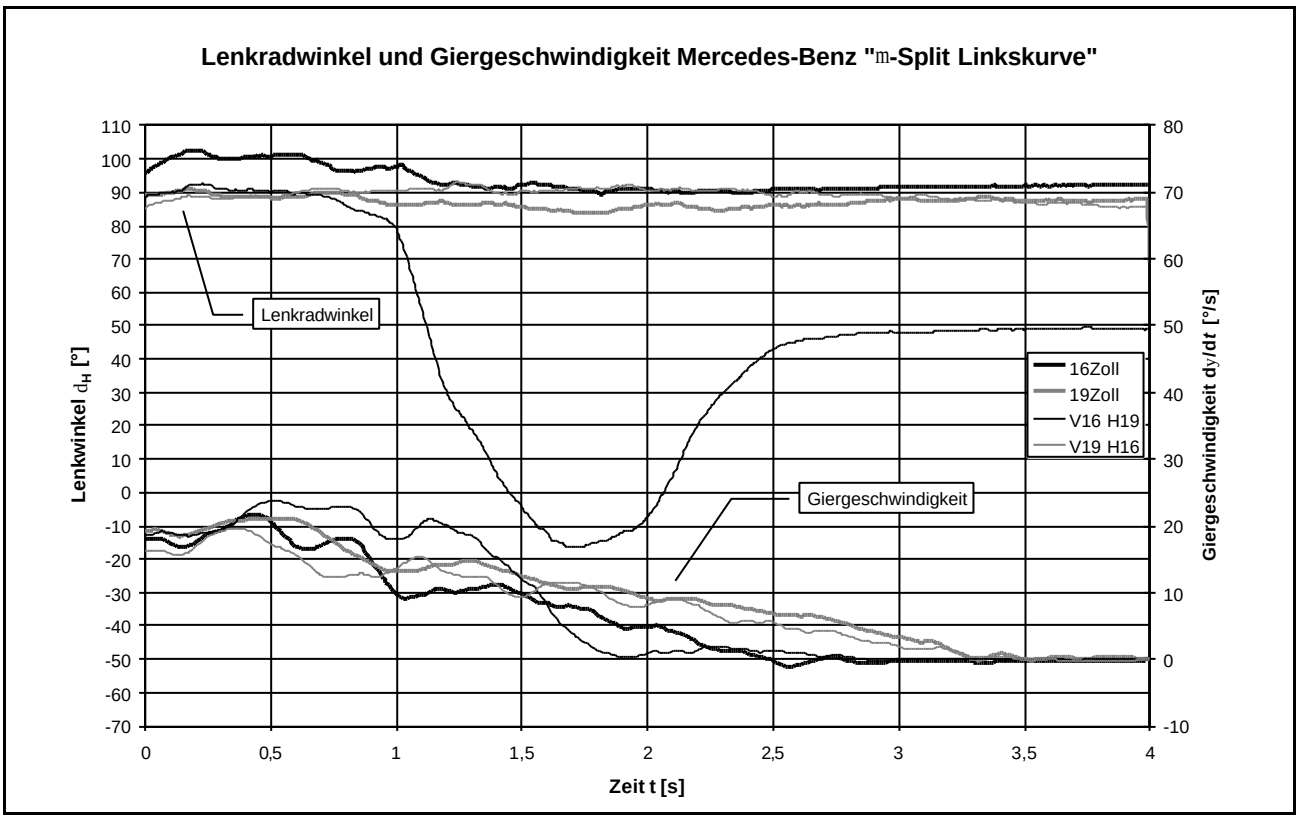

Abbildung 27: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Mercedes-Benz µ-Sprung Linkskurve

7.3.3.2 Interpretation

Abbildung 24: Druckaufbauverzögerung, m-Sprung, Mercedes-Benz
Dieses Diagramm bestätigt, die in der Theorie gemachte Aussage, dass ein Rad mit einem grösseren Massenträgheitsmoment längere Anpassungszeiten beim Wechsel von unterschiedlichen Haftwerten benötigt. Dies gilt für die Vorder- und Hinterachse. Der Reifeneinfluss dürfte geringer sein, da beide Reifen das selbe Produktionsjahr aufweisen.

Die Mischbereifung ergibt keinen nennenswerten Einfluss.

Abbildung 25: Gradient, m-Sprung, Mercedes-Benz
Es zeigt sich wiederum, dass ein Rad mit geringerem Massenträgheitsmoment, am schnellsten beschleunigt werden kann. Das 16 Zoll Rad hebt sich markant vom 19 Zoll Rad ab.
Die selbe Tendenz, jedoch etwas weniger ausgeprägt, ist an der Hinterachse erkennbar.

Die Mischbereifung ergibt keinen nennenswerten Einfluss.
Abbildung 26: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Mercedes-Benz m-Split

Alle Rad/Reifen Kombinationen weisen ähnliche Zahlenwerte auf. Die geringfügigen Unterschiede lassen keine eindeutigen Einflüsse der verschiedenen Räder auf das ABS erkennen.

Abbildung 27: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Mercedes-Benz m-Sprung Linkskurve
Alle Rad/Reifen Kombinationen weisen ähnliche Zahlenwerte auf, die Abbremsung erfolgt überaus spurgetreu. Ausgenimmen die Kombination der Mischbereifung, mit einem Breitreifen an der Hinterachse. Dort kommt das Fahrzeug in eine übersteuernde Tendenz, welche am Lenkrad mit ca. 100° korrigiert werden muss.

7.4 Messungen in Vauffelin

Damit der Einfluss der Geschwindigkeit sichtbar wird, wurden zu den Fahrversuchen in Veltheim noch ABS-Bremsungen aus 110 km/h durchgeführt. Diese Bremsungen aus höheren Geschwindigkeiten wurden in Vauffelin vollzogen. Die Messungen erfolgten auf einem ebenen Abschnitt der Strasse von Romont in Richtung Vauffelin.

7.4.1 Beschreibung des Fahrmanövers

Der Aufzeichnungsbeginn erfolgt durch die Bremspedalbetätigung bei der Bremsauslösung. Der Bremsbeginn befindet sich bei Pylonen, welche am Fahrbahnrand aufgestellt wurden.

Bedingungen:
- v = 110 km/h
- trockene Strasse (μ=0.62)
- Bremsbetätigung soll so schnell wie möglich erfolgen
- Motor ausgekuppelt
- Min. Bremspedalkraft 500 N
- Kurskorrektur durch Fahrer
- Testgewicht: Leergewicht + zwei Personen + Messeinrichtung
- Bremsung erfolgt bis zu einer Fahrzeuggeschwindigkeit von ca. 40 km/h (von Wichtigkeit sind die ersten Regelzyklen des ABS-Systems)

7.4.2 Messresultate Opel Astra 20 TD

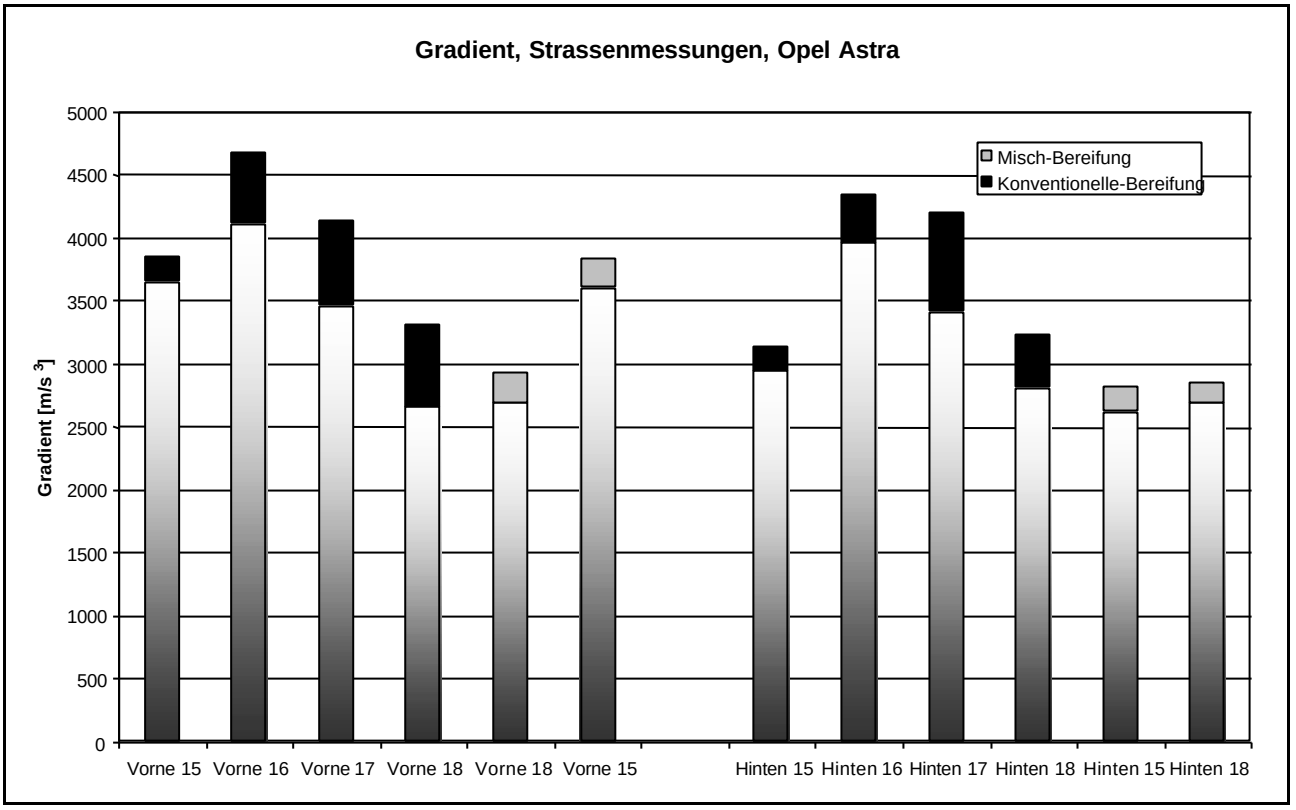

Abbildung 28: Gradient, Strassenmessungen, Opel Astra

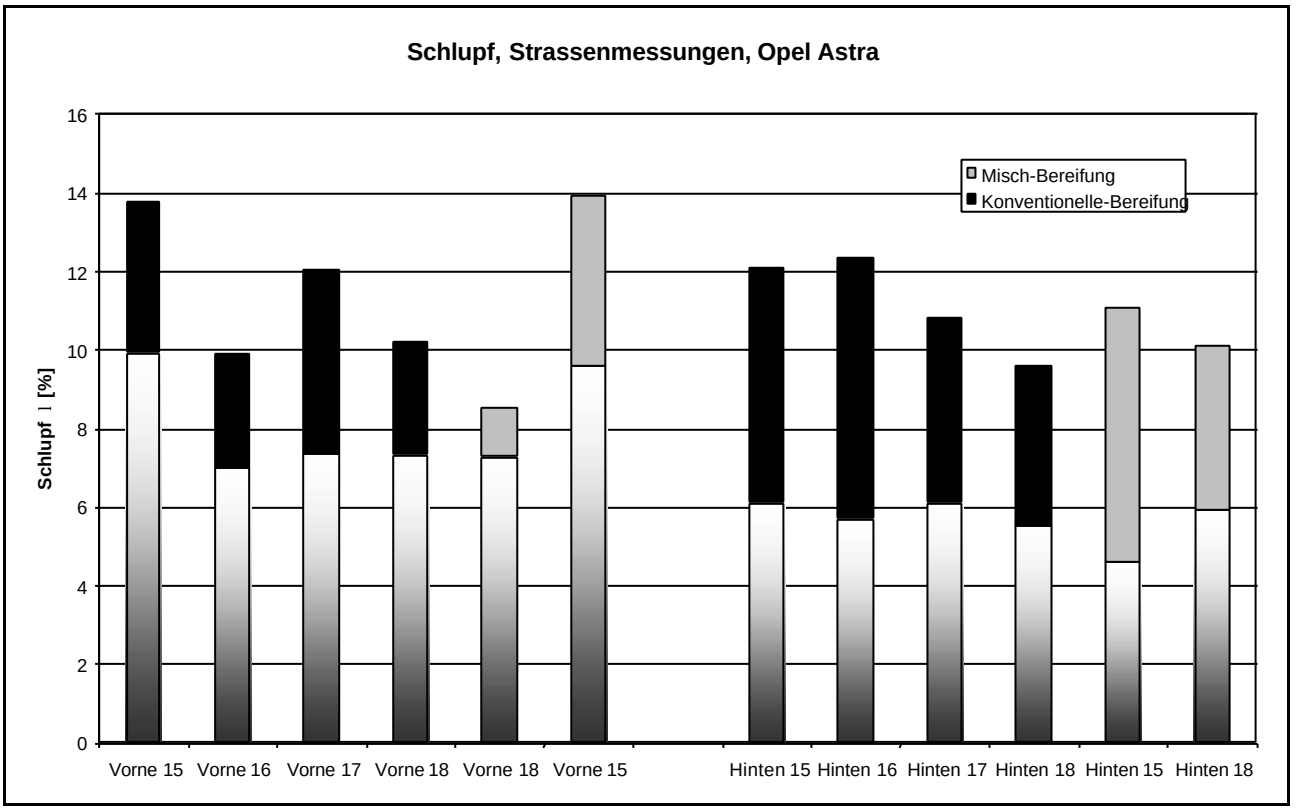

Abbildung 29: Schlupf, Strassenmessungen, Opel Astra

7.4.2.1 Interpretation

Abbildung 28: Gradient, Strassenmessungen, Opel Astra

Tendenziell beschleunigen die Räder mit der grösseren Massenträgheit etwas langsamer. Ausnahme bildet die Seriendimension (15 Zoll), welche tiefere Werte als das 16 Zoll Rad aufweist.

Auch an der Hinterachse sind diese Trends in ähnlichem Masse sichtbar.

Gegenüber der entsprechenden konventionellen Bereifung, sind bei der misch-Bereifung keine nennenswerte Unterschiede sichtbar.

Abbildung 29: Schlupf, Strassenmessungen, Opel Astra

Mit Ausnahme des 15 Zoll Rades, haben alle Räder Schlupfwerte im selben Bereich. Das Serienrad fällt, wie bei der Gradientenbetrachtung, aus diesem Trend heraus.

An der Hinterachse sind keine Unterschiede wahrnehmbar.

Gegenüber der entsprechenden konventionellen Bereifung, sind bei der misch-Bereifung keine nennenswerte Unterschiede sichtbar.

7.4.3 Messresultate Mercedes-Benz E320

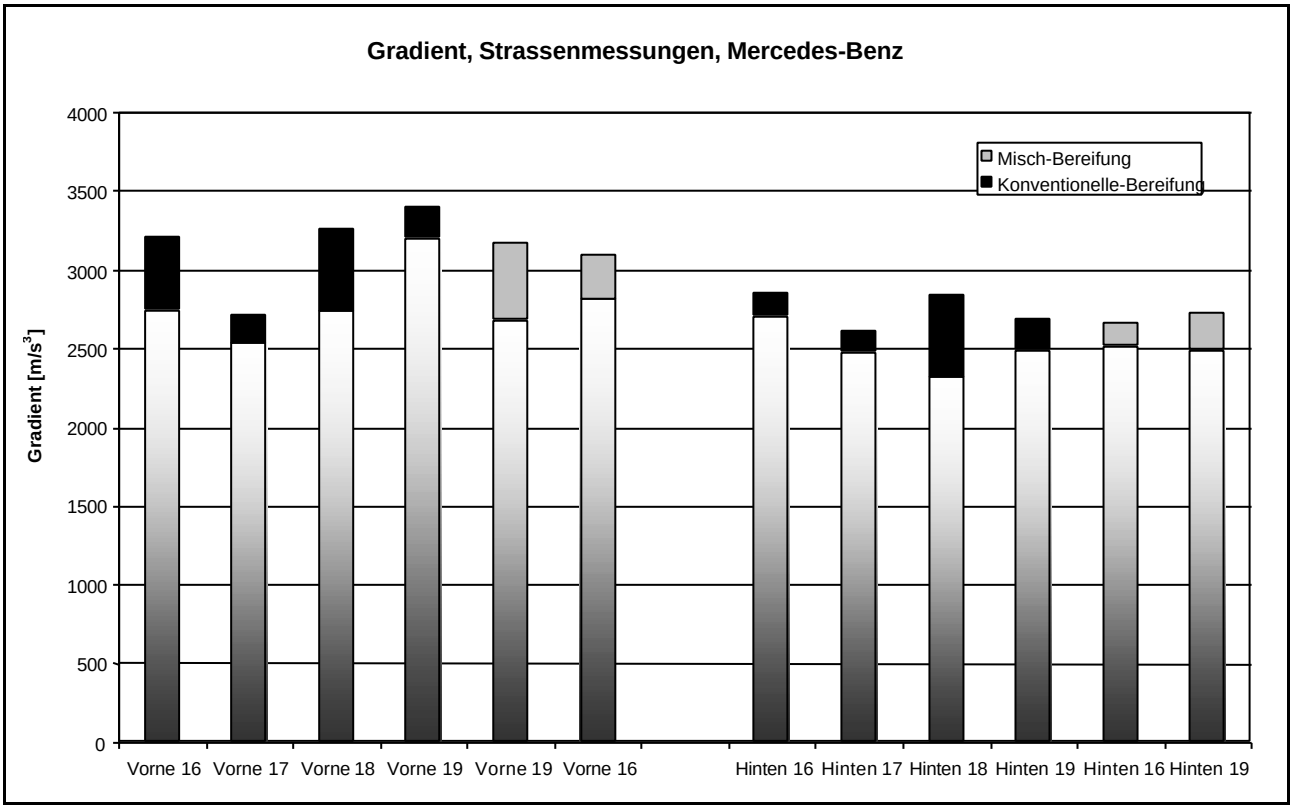

Abbildung 30: Gradient, Strassenmessungen, Mercedes-Benz

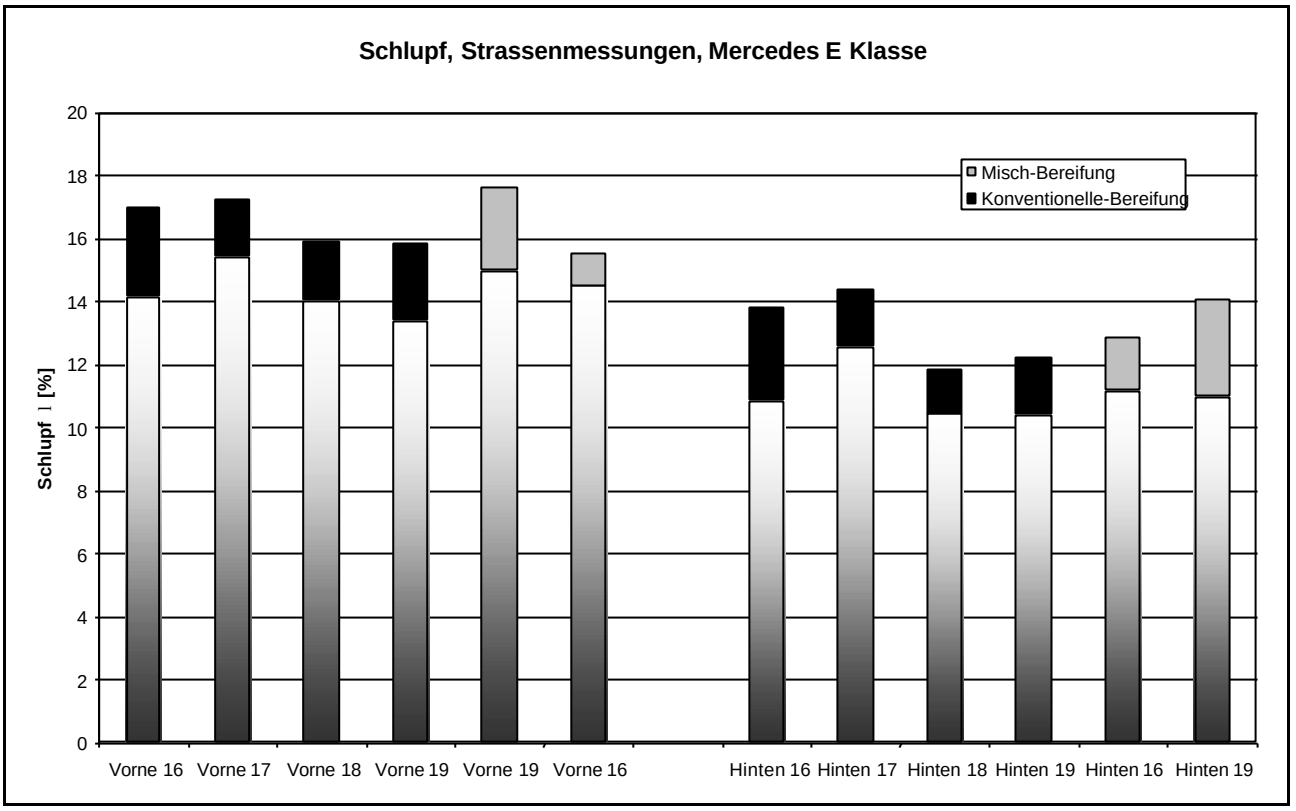

Abbildung 31: Schlupf, Strassenmessungen, Mercedes-Benz

7.4.3.1 Interpretation

Abbildung 30: Gradient, Strassenmessungen, Mercedes-Benz

Die 16 und 18 Zoll Räder befinden sich auf dem selben Werteniveau. Die tiefsten Beschleunigungsänderungen erreicht das 17 Zoll Rad. Erstaunlich gute Werte erzielt das 19 Zoll Rad mit dem grössten Massenträgheitsmoment.

An der Hinterachse sind keine Unterschiede wahrnehmbar.

Gegenüber der entsprechenden konventionellen Bereifung, sind bei der misch-Bereifung keine nennenswerte Unterschiede sichtbar.

Abbildung 31: Schlupf, Strassenmessungen, Mercedes-Benz

Die Räder an der Vorderachse unterscheiden sich nicht signifikant.

Die Hinterachsräder unterscheiden sich ebenfalls nicht wesentlich. Ausser das 17 Zoll Rad zeigt eine leicht erhöhte Schlupftendenz auf.

Gegenüber der entsprechenden konventionellen Bereifung, sind bei der misch-Bereifung keine Nennenswerte Unterschiede sichtbar.

8 Untersuchung Prioritätenfolge ESP / ABS

8.1 Einleitung

Bei der zweiten Aufgabe innerhalb der Diplomarbeit, handelte es sich um die Untersuchung der Aus-wirkungen der Prioritätenfolgen bei elektronischen Hilfssystemen (ABS/ ESP[8]) bei kritischen Fahrmanövern. Anders ausgedrückt möchte man nun wissen, welches der beiden Systeme nun gegenüber dem anderen die Regelpriorität besitzt. Wenn man dieser Frage in der Theorie[9] nachgeht, gibt es eine eindeutige Antwort:

Das ESP ist mit seiner Funktion den Regelsystemen ABS und ASR[10] übergeordnet.

Begründet wird dieser Sachverhalt mit dem allgemein gültigen Kriterium für die Beurteilung von ABS – Systemen, in welcher folgende Prioritätenfolge steht:

1. Stabilität
2. Lenkfähigkeit
3. Bremsweg

Es ist also möglich, dass ein mit der ESP ausgerüstetes Fahrzeug bei entsprechenden Fahrmanöver einen längeren Bremsweg aufweist, dafür aber stabil in der Spur und lenkfähig bleibt.
Mit Hilfe von einem Fahrzeug mit ESP sollte nun ermittelt werden, ob diese Theorie auch stimmt, und wie sich diese beiden elektronischen Hilfssysteme bei praktischen Versuchen gegenseitig beeinflussen.
Als Bedingung wurde gefordert, dass die Messungen mit dem gleichen Messaufbau wie bei den vorangegangenen ABS Untersuchungen durchgeführt werden.

8.2 Die Fahrdynamikregelung ESP

Das ESP ist ein aktives Sicherheitssystem zur Verbesserung der Fahrzeug-Stabilität in allen Fahrsituationen. Es nutzt die vorhandene Bremsanlage eines Fahrzeuges, um das Fahrzeug zu „lenken“. Mehrere Sensoren überwachen dabei den Fahrzustand des Autos mit dem Lenkverhalten des Fahrers. Drohende Instabilität, Unter- bzw. Übersteuern werden von den ESP Sensoren sofort registriert. Durch die Einzelradabbremsung und ein Eingreifen in das Motormanagement wird das Fahrzeug wieder stabilisiert. ESP ergänzt die bekannten Funktionen des ABS, der ASR und der MSR[11].

8.3 Messungen

8.3.1 Ziel

Absicht dieser Fahrversuche ist es, die Regelprioritäten der elektronischen Hilfssysteme zu erfassen. Bei kritischen Fahrmanövern soll ersichtlich werden, ob das ESP durch den Eingriff des ABS-Systems beeinflusst wird, respektive ob sich die ABS-Regelung sich durch einen ESP Eingriff beein-flussen lässt.

[8] Electronic Stability Program, auch FDR genannt
[9] [3], S. 206
[10] Antriebs-Schlupf-Regelung
[11] Motor-Schleppmoment-Regelung

Zu diesem Zweck wurden zwei unterschiedliche Fahrmanöver durchgeführt. Jedes Fahrmanöver wurde 5 mal wiederholt um genügend Messungen zu erhalten.

Alle Versuche wurden mit der Serienbereifung (215/ 55 R16) durchgeführt.

8.3.2 Proband

Mercedes-Benz E 320[12], ausgerüstet mit Mercedes/Bosch ESP Ver. 1.0

8.4 Beschreibung der Fahrmanöver

8.4.1 Notbremsung mit Fahrspurwechsel

Messauslösung erfolgte per Handtaster.

Prüfstrecke: Veltheim, Piste B, Rutschbelag

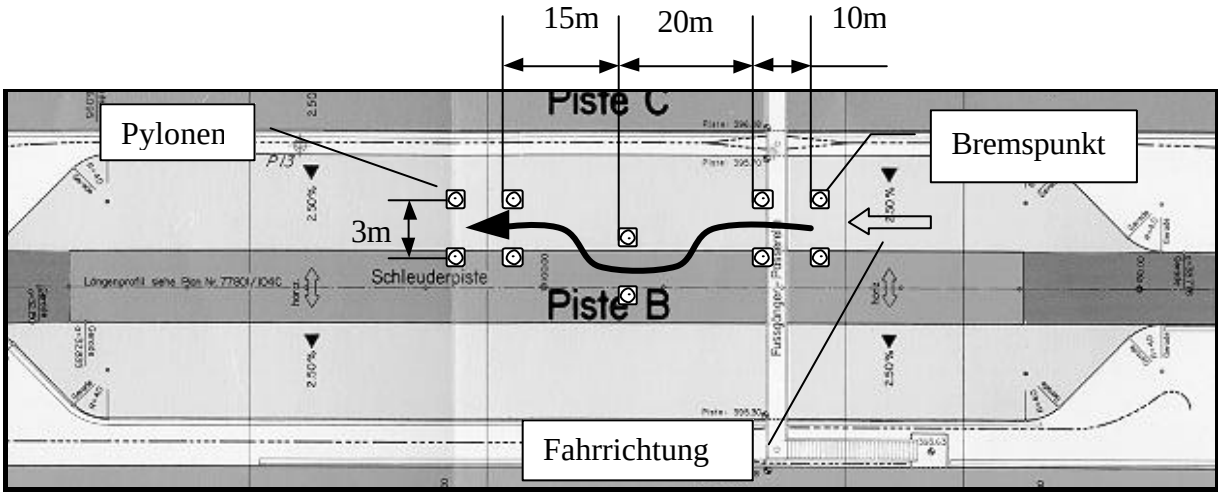

Abbildung 32: Notbremsung mit Fahrspurwechsel

Bedingungen:

- μ-Homogen hoch(μ = 0.65) bei Bremsbeginn auf Asphalt rauh
- Fahrspurwechsel auf Rutschbelag (μ = 0.35)
- μ-Homogen hoch (μ = 0.65) nach Fahrspurwechsel auf Asphalt rauh
- v = 65 km/h
- Testgewicht: Leergewicht + zwei Personen + Messeinrichtung
- Das ABS-System soll aktiv sein, bevor die Fahrdynamikregelung eingreift

Idee:
Nach der Notbremsung soll das Fahrzeug mit dem Spurwechsel auf dem Rutschbelag destabilisiert werden, damit ein Eingreifen des ESP provoziert wird.

[12] Technische Daten: Siehe Bericht 5.2

8.4.2 Kurvenfahrt mit anschliessender Notbremsung

Messauslösung erfolgt per Handtaster

Prüfstrecke: Veltheim, Piste B, Kurve West, Rutschbelag

Bedingungen:

- µ-Homogen (µ = 0.38) bei Bremsbeginn
- Kurvenradius 29 m
- v = 40 km/h
- Testgewicht: Leergewicht + zwei Personen + Messeinrichtung
- Die Fahrdynamik-Regelung soll aktiv sein bevor das ABS-System eingreift

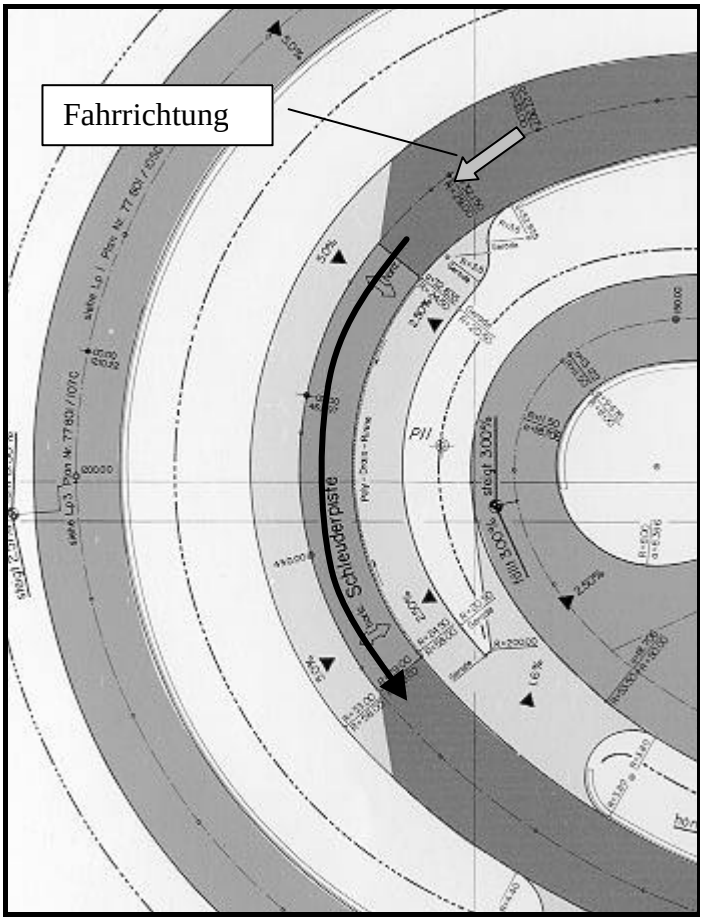

Abbildung 33: Kurvenfahrt mit anschliessender Notbremsung

Idee:
Der Fahrer fährt mit einer überhöhten Geschwindigkeit in die Kurve ein, so dass es auf dem Rutschbelag zu einem zu hohen Schwimmwinkel kommt. Das ESP soll diesen Umstand erkennen und somit das Fahrzeug entsprechend dem Fahrerwunsch auf dem Sollkurs halten. Sobald der Fahrer erkennt (mit Hilfe der ESP Warnleuchte oder z.T. subjektiv), dass das ESP eingreift soll er eine Notbremsung einleiten.

8.5 Messresultate

Schon während den Vorbereitungen und bei den Vorversuchen in Vauffelin kündigte sich ein Hauptproblem an. Es war nicht möglich am ESP System ein Abgriff vorzunehmen, um den Einschaltzustand (logisch 0 oder 1) der Fahrdynamikregelung zu überwachen.
Das Mercedes Fahrzeug verfügt wohl über eine ESP Warnlampe am Armaturentableau. Diese blinkt in periodischen Abständen auf, wenn die FDR in Betrieb ist. Im weiteren leuchtet diese bei zeitlich kurzen Eingriffen des ESP erst gar nicht auf. Leider blinkt die Warnlampe auch auf, sobald das ASR in Funktion tritt. Zu guter Letzt werden die Instrumente des Armaturenbrettes über einen CAN Bus angesteuert, was ein Abgriff des Signals mit konventionellen Messeinrichtungen verunmöglicht.
Auch eine Anfrage an den ESP-Experten des Schweizer Importeurs von Mercedes brachte keine vernünftige Lösung hervor. Einzige denkbare Möglichkeit wäre, die Schaltzustände jedes einzelnen Schaltventils der ESP/ ABS Regelung zu überwachen und dann mit Hilfe einer entsprechenden Matrix auszuwerten. Anhand dieser Tabelle wäre es denkbar die entsprechenden logischen Zustände des ESP zu kontrollieren. Aufgrund der Auflage von der Aufgabenstellung her, dass diese Versuche mit derselben Messkonfiguration wie für die ABS Untersuchung aufzunehmen sind, und zeitliche Aspekte dagegen sprachen, wurde eine solche Lösung nicht realisiert.
Ein zuverlässige Aussage bezüglich des Einschaltzustandes des ESP war somit nicht möglich.

Da das ESP an allen vier Rädern über die Bremsen eingreift, sollten auch an allen vier Bremsleitungen der Bremsdruck aufgezeichnet werden. Bedauerlicherweise waren von den ABS Versuchen her nur auf der rechten Fahrzeugseite, je einer vorne und hinten, 2 Druckgeber installiert, welche den Bremsdruck registrierten. Die dabei ermittelten Ergebnisse liessen sich somit nur bedingt interpretieren.

Als weiteres Handicap erwies sich die Tatsache, dass das ESP mit dem ASR eng gekoppelt ist. Das ASR limitiert immer wieder den Antriebsschlupf mit Hilfe von Bremseingriffen und Reduktion der Motorleistung. So war es schwierig zu beurteilen, ob Bremsdruckveränderungen (vor der Notbremsung) am Hinterrad nun das ESP oder das ASR bewirkt haben. Wie zuvor schon erwähnt, gibt es für die Funktion des ASR keine separate Kontrollampe um seine Funktion getrennt vom ESP zu beobachten.

Auch die im voraus definierten Fahrmanöver eigneten sich nur bedingt um konkrete Aussagen zu machen. Einerseits war die Reproduzierbarkeit der Fahrmanöver nicht beliebig erreichbar. Obwohl ein sehr routinierter Instruktor des VSZV das Fahrzeug sehr überzeugend pilotierte, sind nun einmal Fahrmanöver im Grenzbereich nicht immer exakt wiederholbar.
Anderseits wurde das Fahrzeug in der Kurve (Fahrmanöver 2) nicht genügend destabilisiert, dass das ESP eingriff. So versuchte der Fahrer mit einem kurzen Tritt aufs Gaspedal am Scheitelpunkt ein Übersteuern zu provozieren, was dann auch erreicht wurde. Das ESP trat sofort in Funktion mit einem Bremseingriff am vorderen rechten Rad.

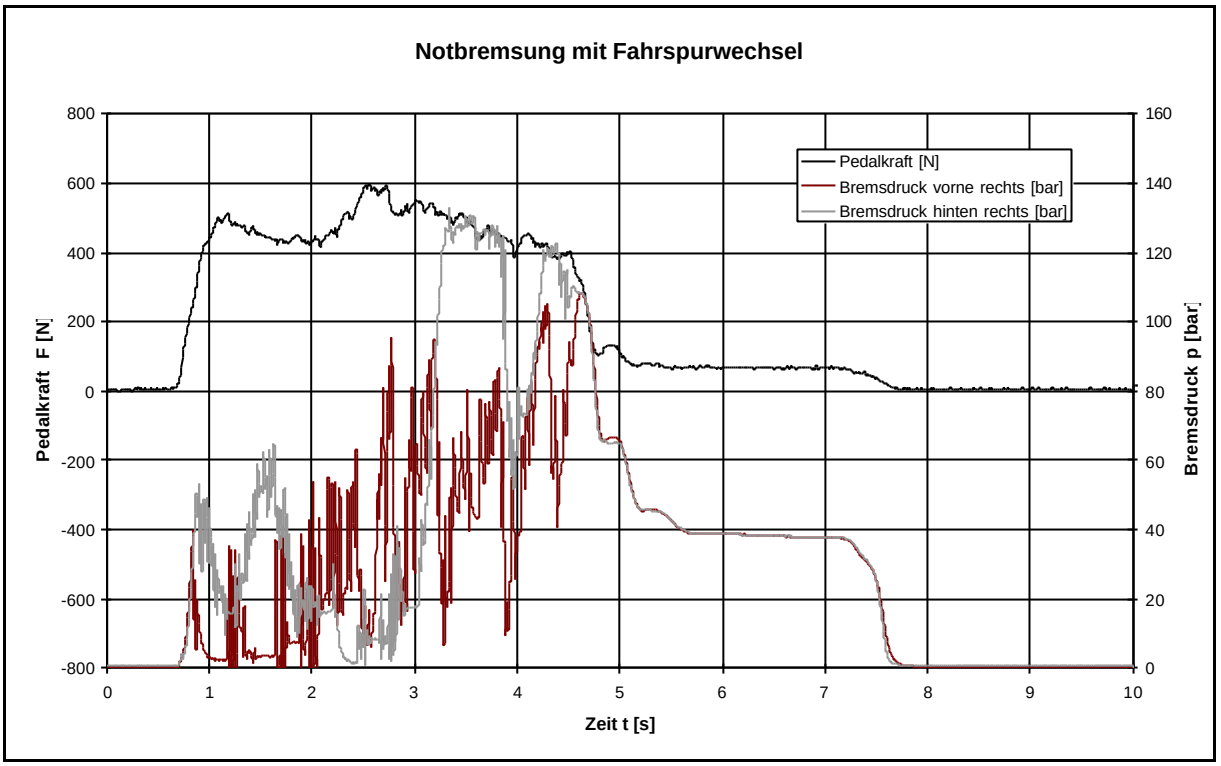

Abbildung 34: Notbremsung mit Fahrspurwechsel

Die einzelnen Druckanstieg- und Drucklösephasen sind gut ersichtlich. Jedoch welches der elektronischen Hilfssysteme die Befehlpriorität hat, kann nicht definiert werden.

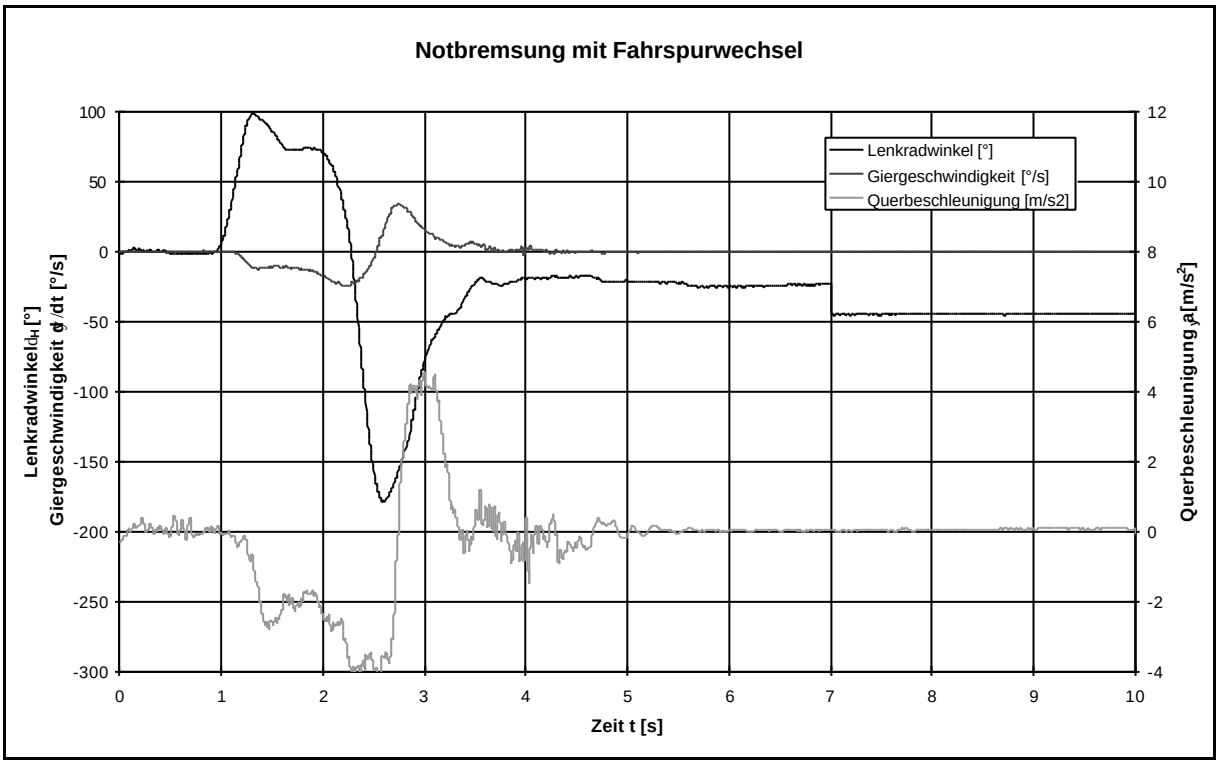

Abbildung 35: Notbremsung mit Fahrspurwechsel

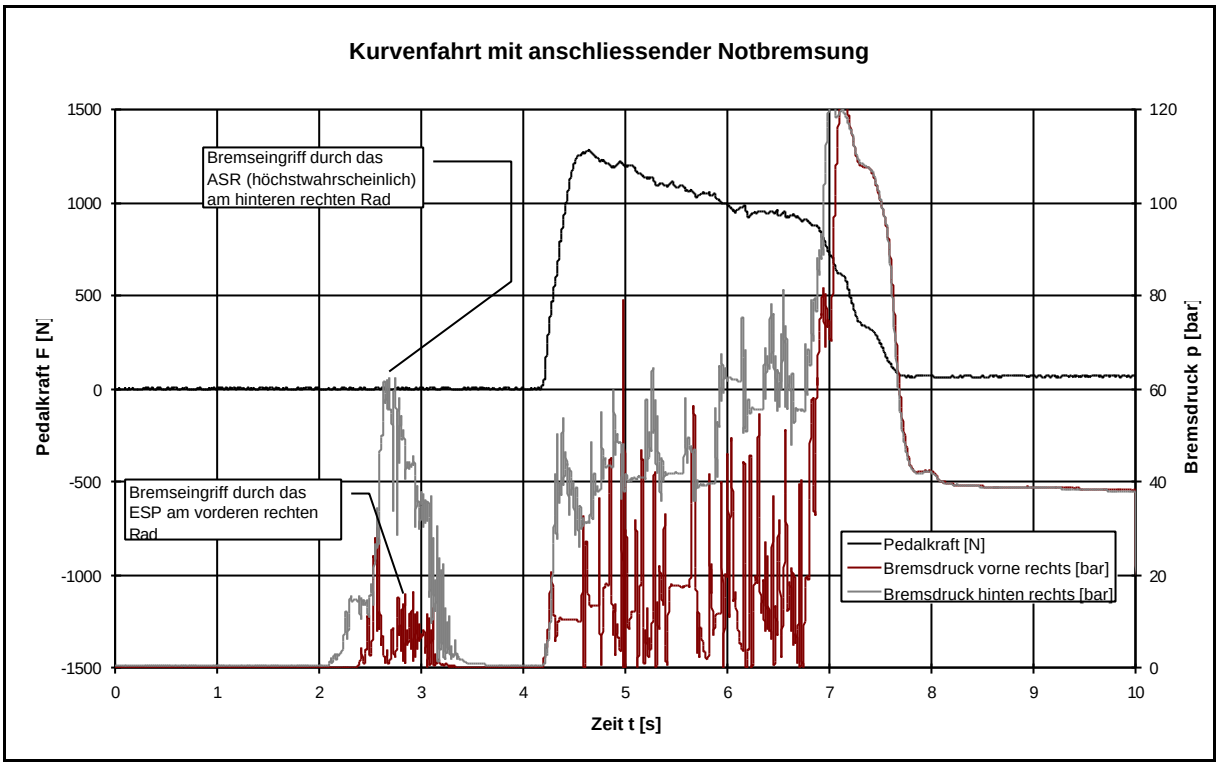

Abbildung 36: Kurvenfahrt mit anschliessender Notbremsung

Diese Intervention des ESP (über den Bremsdruck) war zeitlich so kurz, dass diese schon wieder abgeschlossen war, als der Fahrer die Notbremsung einleitete.

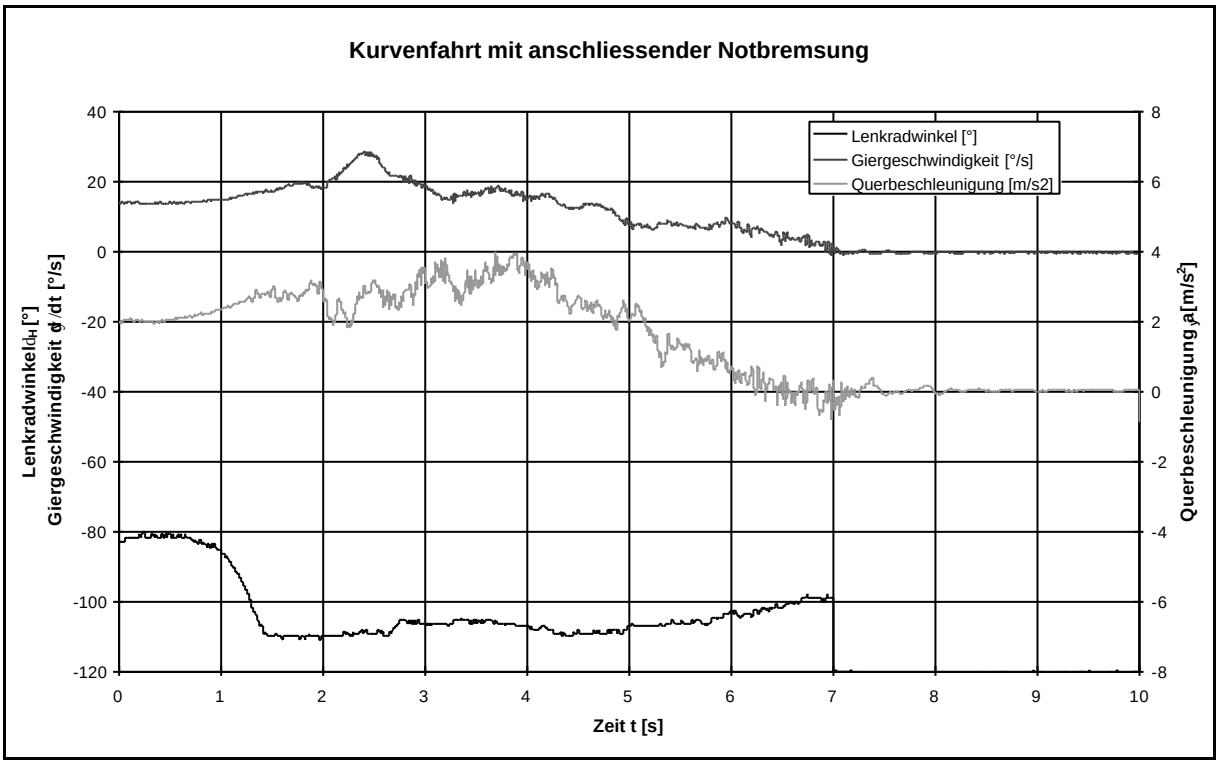

Abbildung 37: Kurvenfahrt mit anschliessender Notbremsung

9 Schlussfolgerungen

9.1 Einfluss von Rad/Reifenkombinationen auf die ABS-Regelgüte

Das Ziel der Aufgabe, den Einfluss verschiedener Radtypen auf die ABS-Regelung von Grossserienfahrzeugen, wurde erreicht.
Die durchgeführten Messungen in Vauffelin und Veltheim ergaben unterschiedliche Resultate, welche auf die verschiedenen Rad/ Reifenkombinationen zurückzuführen sind.

Das Hauptinteresse galt dem Fahrmanöver „Notbremsung auf μ-Sprung“ (Veltheim) sowie den Bremsversuchen aus höheren Geschwindigkeiten (Vauffelin). Diese Messungen waren einfacher zu reproduzieren und wurden deshalb stärker gewichtet.

Die Messergebnisse der Druckaufbauverzögerung (μ-Sprung), in welchen die beiden Fahrzeuge gegensätzliche Tendenzen aufwiesen, ergeben keinen eindeutigen Hinweis auf den Einfluss des Massenträgheitsmomentes. Demzufolge müssen andere Parameter einen grösseren Einfluss auf das Messresultat bewirkt haben.

Bei der Untersuchung des Gradienten (μ-Sprung) zeigen beide Fahrzeuge den selben Trend auf. Das jeweilige Rad mit der geringsten Massenträgheit, wird am schnellsten Beschleunigt, und kann somit vom ABS besser geregelt werden.

Bei den gemessen Gradientwerten auf trockener Strasse (Vauffelin) sind keine signifikanten Einflüsse der Rad/ Reifenkombiationen auf das ABS-System erkennbar. Der bessere Haftwert auf trockener Strasse, lässt keine deutlichen Unterschiede erkennen. Dies gilt ebenfalls für die Untersuchung des Schlupfes.

Die Eigenschaften des jeweils auf der Felgen montierten Reifens, hat einen grösseren Einfluss auf die Regelgüte des ABS, als das wirkende Massenträgheitsmoment. Das bedeutet, dass ein fabrikneuer Reifen auf einer 19 Zoll Felge mit einem hohen Massenträgheitsmoment bessere Werte erzielt kann als ein älterer 16 Zoll Reifen mit 1,6 mm Mindestprofiltiefe.

Demzufolge besteht kein Handlungsbedarf, für Räder mit erhöhtem Massenträgheitsmoment, eine entsprechende gesetzliche Prüfvorschrift zu erarbeiten.

Für zukünftige Arbeiten mit ähnlicher Thematik ist folgende Empfehlung zu beachten:

- Es sollen nicht zu viele Parameter auf einmal verändert werden. Bei der Montage einer grösseren Felge werden Beispielsweise neben der Massenträgheit zusätzlich die Reifen-aufstandfläche, Reifenfederrate, Lenkrollhalbmesser und die Spurweite (→ ET) verändert.

9.2 Prioritätenfolge elektronischer Hilfssysteme (ESP/ABS)

Das Ziel der 2. Teilaufgabe der Diplomarbeit muss als nicht erreicht bezeichnet werden.

Die in der Theorie gemachten Aussagen bezüglich der Regelprioritäten können somit weder bestätigt noch als falsch bezeichnet werden.

Das Scheitern dieser Teilaufgabe ist zum Teil auf den nicht ermöglichten Abgriff des ESP Signals zurückzuführen. Die immer komplexer werdenden Fahrzeugelektrik/-elektronik Systeme mit CAN Bus werden solche Probleme auch in naher Zukunft hervorrufen. Des weiteren darf die verwendete Messgerätkonfiguration als nicht optimal betrachtet werden.

Für zukünftige Arbeiten in der selben Richtung ist zu empfehlen, genügend Zeit für die Vormessungen einzubeziehen, um geeignete reproduzierbare Fahrmanöver zu definieren.

10 Persönliches Schlusswort

In den vergangenen zwei Monaten durften wir eine sehr abwechslungsreiche und aufregende Diplomarbeit zum Schluss unseres Studiums erleben. Als gelernte Automechaniker war es uns gestattet, wieder einmal richtiges Werkzeug in die Hand nehmen. Selbst Fräsmaschine und Drehbank kamen zur Anfertigung spezieller Adapter zum Einsatz.

Dank der neu Verdoppelung Diplomarbeitszeit wurde ein selbständiges Arbeiten ermöglicht, was wiederum unseren Kenntnissen im Bereich der Messtechnik zu Gute kam. Aber auch das wiederholte Auftreten von kleinen Problemen mit der Messinstallation, widerlegte die landläufige Meinung, dass man etwas „schnell“ messen kann.

An dieser Stelle möchten wir uns bei folgenden Personen und Unternehmen bedanken:

- Michelin SA, 1762 Givisiez, Herr V. Kurt, die uns Reifen und Felgen zur Verfügung stellten.
- Mercedes-Benz (Schweiz) AG, 8952 Schlieren, den Herren Lüthi, Gamper und Baumgartner, die uns ein Fahrzeug zur Verfügung stellten und uns mit technischen Auskünften/ Unterlagen unterstützten.
- Delta Motor AG, 6205 Eich, Herr F. Wyder, die uns Reifen und Felgen zur Verfügung stellten.
- Lorinser Sportservice, 2560 Nidau, Herr Moos, die uns Felgen zur Verfügung stellten.
- Dunlop Pneus SA, 8305 Dietlikon, Herr Meyer, die uns Reifen zur Verfügung stellten.
- Continental Suisse SA, 8953 Dietikon, die uns Reifen zur Verfügung stellten.
- Opel Suisse SA, 2503 Biel, den Herren Röthlisberger und Schenk, für die Unterstützung mit technischen Auskünften/ Unterlagen.
- Robert Bosch AG, CH-8112 Otelfingen, den Herren Galli und Sutter für ihre technischen Auskünfte.
- Robert Bosch GmbH, 70442 Stuttgart, Herr Alexander Eichhorn, für seine technischen Auskünfte rund um das ABS.
- J. Sigrist, Ausbildungsleiter des VSZV, der uns sein fahrerisches Können für die notwendigen Fahrmanöver zur Verfügung stellte.
- Verkehrs-Sicherheits-Zentrum (VSZV), 5106 Veltheim, dass wir abends ihre Pisten für unsere Messungen benützen durften.
- Den Assistenten M. Iseli, W. Krähenbühl, U. Fecker und M. Strub für ihre fachtechnische und moralische Unterstützung während den vergangenen zwei Monaten.
- Unserem Dozent für Physik und Dynamik, U. Rettenmund, für seine praktischen und theoretischen Ratschläge bei den Pendelversuchen.
- Unserem Dozent für Fahrzeugmechanik, B. Gerster, für seine fachtechnische Unterstützung.

Vauffelin, den 17. Dezember 1999

Guido Aregger Patrick Fluri

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Koordinatensystem 5
Abbildung 2: Winkeldefinition 5
Abbildung 3: Opel Astra 9
Abbildung 4: Mercedes-Benz 10
Abbildung 5: Messaufbau 11
Abbildung 6: Datron V2 12
Abbildung 7: Datron M3 13
Abbildung 8: Raddrehzahlgeber 13
Abbildung 9: Messlenkrad 14
Abbildung 10: Pedalkraftsensor 15
Abbildung 11: Lichtschranke 15
Abbildung 12: Drucksensoren 16
Abbildung 13: physikalisches Pendel 20
Abbildung 14: Trägheitsmomente der Testräder 21
Abbildung 15: Beispiel für den zusätzlichen Kraftaufwand 22
Abbildung 16: Fahrversuch μ-Sprung 23
Abbildung 17: Fahrversuch μ-Split 24
Abbildung 18: Fahrversuch μ-Split Kurve 25
Abbildung 19: μ-Sprung 26
Abbildung 20: Druckaufbauverzögerung, μ-Sprung, Opel Astra 27
Abbildung 21: Gradient, μ-Sprung, Opel Astra 28
Abbildung 22: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Opel μ-Split 28
Abbildung 23: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Opel μ-Split Linkskurve 28
Abbildung 24: Druckaufbauverzögerung, μ-Sprung, Mercedes-Benz 30
Abbildung 25: Gradient, μ-Sprung, Mercedes-Benz 30
Abbildung 26: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Mercedes-Benz μ-Split 31
Abbildung 27: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit Mercedes-Benz μ-Sprung Linkskurve 31
Abbildung 28: Gradient, Strassenmessungen, Opel Astra 33
Abbildung 29: Schlupf, Strassenmessungen, Opel Astra 33
Abbildung 30: Gradient, Strassenmessungen, Mercedes-Benz 34
Abbildung 31: Schlupf, Strassenmessungen, Mercedes-Benz 35
Abbildung 32: Notbremsung mit Fahrspurwechsel 37
Abbildung 33: Kurvenfahrt mit anschliessender Notbremsung 38
Abbildung 34: Notbremsung mit Fahrspurwechsel 40
Abbildung 35: Notbremsung mit Fahrspurwechsel 40
Abbildung 36: Kurvenfahrt mit anschliessender Notbremsung 41
Abbildung 37: Kurvenfahrt mit anschliessender Notbremsung 41

12 Literaturverzeichnis

[1] „Fahrzeugmechanik“ – Kurs von Hr. B. Gerster

[2] „Labor – Ordner 1, 2“ – Fahrzeugmechanik

[3] „Fahrsicherheit im Kfz“ – Robert Bosch GmbH – 1. Aufl. 1993 ISBN 3-528-03875-6

[4] „Fahrwerktechnik: Fahrverhalten“ – Vogel Verlag – 2. Aufl. 1991
ISBN 3-8023-0774-7

[5] „Fahrwerktechnik: Kraftfahrzeugtechnik“ – Vogel Verlag – 1. Aufl. 1993
ISBN 3-8023- 0477-2

[6] „Kraftfahrtechnisches Taschenbuch“ – VDI Verlag – Robert Bosch GmbH – 22. Aufl. 1995
ISBN 3-18-419122-2

[7] „Technische Formelsammlung“ – Gieck Verlag – 30. Aufl. 1995 ISBN 3-920379-21-7

[8] „Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge (VTS)“ –
EDMZ, 3000 Bern – 19.6.1995, Stand 1999

[9] „Richtlinien Nr. 2A, Abändern und Umbauen von Motorwagen“ – Vereinigung der
Strassenverkehrsämter, 3001 Bern – 22. November 1996

[10] „Der sichere Weg zur Meisterprüfung im Kfz-Handwerk“ – Vogel Verlag – 1. Aufl. 1996
ISBN 3-8023-1423-9

[11] „ABS Antiblockiersysteme“ – Autodata Limited – Erschienen 1993
ISBN 0-85666-691-2

[12] „ABS Antiblockiersysteme“ – Autodata Limited – Erschienen 1995
ISBN 0-85666-774-9

[13] „Standards Manual 1999“ – E.T.R.T.O, B-1060 Brussel

[14] „Nutzen und Wirkungsweise der Fahrdynamikregelung ESP“ – Dr. A. van Zanten –
Tagungsunterlage vom 9. Int. Automobiltechnisches Symposium Wil, 23.4.1999

[15] „FEE (Fahrzeugtechnik EWG/ ECE)“ – Ordner 5 & 6 – Kirschbaumverlag, Bonn 1999 –
ISBN 37812 1392 7 Grundwerk einschliesslich 37. Ergänzungslieferung

[16] „Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten Begriffe“ ISO 8855 Auflage 1991, modifiziert