

Alexander Weidler

# **Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung**

**D 93**  
**ISBN 3 - 936100 – 14 – 4**

**Institut für Maschinenelemente**

Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9  
70569 Stuttgart  
Tel. (0711) 685 – 6170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor





# **Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung**

Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität  
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-  
Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von

**Dipl.-Ing. Alexander Weidler**

aus Böblingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. M. Bargende

Tag der Einreichung: 22.12.2004

Tag der mündlichen Prüfung: 25.07.2005

INSTITUT FÜR MASCHINENELEMENTE IMA

2005



*Meiner Familie,*

*die mich unentwegt unterstützt hat*





## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart. Die Untersuchungen waren Teil eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekts.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem geschätzten Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Lechner, dem ehemaligen Leiter des Instituts für Maschinenelemente der Universität Stuttgart, der leider die Fertigstellung dieser Arbeit nicht miterleben konnte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, geschäftsführender Direktor des Instituts für Maschinenelemente der Universität Stuttgart danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir gewährten Möglichkeiten am Institut.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bargende vom Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart bedanke ich mich für die Übernahme des Mitberichts und die kritische Durchsicht meiner Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Binz vom Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau der Universität Stuttgart danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und die Anregungen im Vorfeld meiner Prüfung.

Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Institut für das hervorragende Klima, welches die Zeit als Assistent nicht nur wissenschaftlich sondern auch menschlich zu einem vollen Erfolg werden ließ.

Ein ganz besonders herzlicher Dank gilt Herrn Dr.-Ing. C. Gitt, der mich durch die konstruktive Diskussion der Ergebnisse unterstützt hat. Weiterhin möchte ich mich bei den Herren Dipl.-Ing. W. Novak, C. Maisch, Dipl.-Ing. M. Stockmeier und Dipl.-Ing. M. Wacker bedanken, die Ihren Teil zum Gelingen beigetragen haben. Nicht zuletzt danke ich Herrn Dr.-Ing. M. Kunz, der mich in die Mysterien von FASIMA eingeführt hat und mir wertvolle Tipps für mich als Simulant gab.

Ganz besonders herzlich danke ich meinen Familien, in erster Linie meiner Frau Alexandra und meinem Sohn Jonas, die viel Verständnis und Geduld für mich aufbrachten, ohne die diese Arbeit sicher nicht zustande gekommen wäre.

Stuttgart, im Juli 2005

Alexander Weidler



# Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Kurzfassung	II
Abkürzungen und Formelzeichen	III
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Fahrsimulation	3
2.2 Strecken- und Geschwindigkeitsvorgaben	5
2.3 Getriebeerprobung	5
2.4 Betriebsfestigkeit	6
3 Simulationsumgebung	7
3.1 Streckenaufzeichnungssystem SASIMA	7
3.2 Verkehrssimulationsprogramm VERSIMA	8
3.3 Triebstrangsimulationsprogramm FASIMA	8
4 Kenngrößen	9
4.1 Kenngrößen von Geschwindigkeitsprofilen	9
4.2 Kenngrößen der Streckencharakteristik	10
4.2.1 Mittlere Steigung M	11
4.2.2 Kurvenkenngrößen R	13
5 Vorgehensweise zur Ermittlung der Parametereinflüsse	16
5.1 Simulationsmodell und Referenzkonfiguration	16
5.2 Triebstrangspezifische Einflüsse	19
5.3 Streckenspezifische Einflüsse	22
5.4 Fahrerspezifischer Einfluss	23
5.5 Klassierung der Belastungen	23
5.6 Wöhlerlinie	25
5.7 Berechnung der relativen Schädigung	26
5.8 Raffung	28
6 Ergebnisse der Parametervariationen	30
6.1 Fahrzeuggewicht	31
6.1.1 Durchschnittsgeschwindigkeit	31
6.1.2 Ganganteile	32
6.1.3 Gangbeschleunigungen	33
6.1.4 Relative Schädigung	36

6.1.5	Fazit	40
6.2	Motorisierung	41
6.2.1	Durchschnittsgeschwindigkeit	41
6.2.2	Ganganteile	42
6.2.3	Gangbeschleunigungen	43
6.2.4	Relative Schädigung	45
6.2.5	Fazit	49
6.3	Hinterachsübersetzung	50
6.3.1	Durchschnittsgeschwindigkeit	50
6.3.2	Ganganteile	51
6.3.3	Gangbeschleunigungen	52
6.3.4	Relative Schädigung	54
6.3.5	Fazit	58
6.4	Schaltprogramm	59
6.4.1	Durchschnittsgeschwindigkeit	59
6.4.2	Ganganteile	60
6.4.3	Gangbeschleunigungen	61
6.4.4	Relative Schädigung	63
6.4.5	Fazit	67
6.5	Höhenprofil	68
6.5.1	Durchschnittsgeschwindigkeit	68
6.5.2	Ganganteile	69
6.5.3	Gangbeschleunigungen	71
6.5.4	Relative Schädigung	73
6.5.5	Fazit	78
6.6	Kurvigkeit	79
6.6.1	Durchschnittsgeschwindigkeit	79
6.6.2	Ganganteile	80
6.6.3	Gangbeschleunigungen	82
6.6.4	Relative Schädigung	84
6.6.5	Fazit	88
6.7	Wunschgeschwindigkeit	89
6.7.1	Durchschnittsgeschwindigkeit	89
6.7.2	Ganganteile	90
6.7.3	Gangbeschleunigungen	91
6.7.4	Relative Schädigung	93
6.7.5	Fazit	97
6.8	Überblick über den Einfluss der Parametervariationen	98
7	Zusammenfassung und Ausblick	101
8	Literatur	103

## Abstract

### Determining Time Saving Factors in Gearbox Testing

The shortening of launch cycles and increased cost pressure along with a simultaneous rise in quality is standing in the way of the development of new generations of cars. One proposal for resolving this conflict is to shorten complex and time consuming vehicle testing. The aim is to perform briefer tests by varying different parameters. The difficulty lies in determining the parameters in such a way that any damage caused in testing tallies with what is incurred under real conditions. Using simulation tools to do so offers the possibility to match the selection of parameters to be varied to the vehicle to be tested and thus to determine the potential for time saving ahead of testing.

The simulation environment developed at Stuttgart University's Institute of Machine Components (IMA) offers the possibility to test power trains set up at random on measured or synthetic road test-routes for strain, consumption, drivability, etc. This simulation environment consists of the test-route recording system SASIMA, the traffic simulation program VERSIMA and the driving simulation program FASIMA.

This work examines the effect of a series of typical test parameters on damage to gearing and its time saving potential when testing an automated manual gear change. On the basis of tested parameters for each individual gear the overall load complexes are determined which are used to perform damage accumulation calculations and compare them to a damage benchmark. As a result we get the relative damage to the individual gears relative to the test parameters. On the basis of the damage mechanism at hand a determination is made of whether or not any shortening is permissible. The result is a matrix, which reflects the parameters' potential for time saving on the gears and the entire transmission. In order to be able to assess measured or artificially produced speed and test-route profiles, parameters have been derived for evaluating speed, height and cornering profiles. These parameters enable the potential effect of these profiles on any transmission damage to be determined.

Vehicle specific parameters under test were vehicle weight, engine torque, rear axle ratio and the type of shift, i.e. manual or automatic gear change. Altitude profile and the degree of bends were chosen as test-route specific parameters, whilst the choice of speed was selected as a driver specific parameter.

As a test result we get a matrix, which contains the qualitative and quantitative effect of the parameters on any damage to the individual gears' teeth. From this it can be inferred that in order to save time testing transmissions gear specific tests must be run.

## Kurzfassung

### Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung

Die Entwicklung neuer Automobilgenerationen ist konfrontiert mit der Verkürzung der Markteinführungszyklen, gesteigertem Kostendruck bei gleichzeitiger Steigerung der Qualität. Ein Ansatz, diesen Konflikt zu lösen, ist die aufwendige und zeitintensive Fahrerprobung der Fahrzeuge zu verkürzen. Es wird angestrebt, zeitlich geraffte Versuche durch die Variation verschiedener Parameter durchzuführen. Die Schwierigkeit besteht darin, die Parameter so zu bestimmen, dass die Schädigung in der Erprobung mit der im realen Einsatz übereinstimmt. Der Einsatz von Simulationswerkzeugen bietet hier die Möglichkeit, die Auswahl der zu variierenden Parameter auf das zu prüfende Fahrzeug abzustimmen, und so im Vorfeld der Erprobung das Raffungspotential zu ermitteln.

Die am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart entwickelte Simulationsumgebung bietet die Möglichkeit, beliebig aufgebaute Triebstränge auf gemessenen oder synthetischen Fahrstrecken hinsichtlich Belastungen, Verbrauch, Fahrbarkeit etc. zu untersuchen. Diese Simulationsumgebung setzt sich aus dem Streckenaufzeichnungssystem SASIMA, dem Verkehrssimulationsprogramm VERSIMA und dem Fahrsimulationsprogramm FASIMA zusammen.

In dieser Arbeit wird der Einfluss einer Reihe typischer Versuchsparameter auf die Schädigung der Verzahnungen und ihre Möglichkeit der zeitlichen Raffung bei der Erprobung eines automatisierten Handschaltgetriebes untersucht. Für die einzelnen Gänge werden in Abhängigkeit der untersuchten Parameter die Lastkollektive ermittelt, mit denen Schadensakkumulationsrechnungen durchgeführt und auf eine Referenzschädigung bezogen werden. Als Resultat liegen die relativen Schädigungen der einzelnen Gänge in Abhängigkeit der untersuchten Parameter vor. Anhand des vorliegenden Schädigungsmechanismus wird bestimmt, ob die Raffung zulässig ist oder nicht. Das Ergebnis ist eine Matrix, die das Raffungspotential der Parameter auf die Gänge und das gesamte Getriebe widerspiegelt. Um gemessene oder synthetisch erzeugte Geschwindigkeits- und Streckenprofile beurteilen zu können, wurden Kenngrößen zur Bewertung der Geschwindigkeits-, der Höhen- und der Kurvenprofile hergeleitet. Anhand dieser Kenngrößen kann das Einflusspotential dieser Profile auf die Schädigung des Getriebes ermittelt werden.

Untersucht wurden als fahrzeugspezifische Parameter das Fahrzeuggewicht, das Motormoment, die Hinterachsübersetzung und die Art des Schaltprogramms, ob manuelle oder automatische Gangwahl. Als streckenspezifische Parameter wurde das Höhenprofil und die Kurvigkeit, als fahrerspezifischer Parameter die Wunschgeschwindigkeit gewählt.

Als Untersuchungsergebnis liegt eine Matrix vor, die den qualitativen und quantitativen Einfluss der Parameter auf die Schädigung der Verzahnungen der einzelnen Gänge enthält. Daraus lässt sich ableiten, dass zur zeitraffenden Erprobung von Getrieben gangspezifische Versuche gefahren werden müssen.

## Abkürzungen und Formelzeichen

### Abkürzungen

FASIMA	Am IMA entwickeltes Fahrsimulationsprogramm
IMA	Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart
SASIMA	Am IMA entwickeltes Streckenaufzeichnungssystem
ASG	Automatisiertes Schaltgetriebe
VERSIMA	Am IMA entwickeltes Verkehrssimulationsprogramm
3D	Dreidimensional












### Formelzeichen

$a$	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung
$a_m$	$\text{m/s}^2$	Mittlere Beschleunigung
$a_{m,n}$	$\text{m/s}^2$	Mittlere Gangbeschleunigung im Gang $n$
$\bar{a}_{m,n}$	$\text{m/s}^2$	Mittlere gewichtete Gangbeschleunigung im Gang $n$
$a_n$	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung im Gang $n$
$A_{\text{quer}}$	$\text{m}^2$	Querspanntfläche
$c_W$		Luftwiderstandsbeiwert
$ds$	$\text{m}$	Infinitesimales Weginkrement
$dt$	$\text{s}$	Infinitesimales Zeitinkrement
$f_R$		Rollreibungsbeiwert Reifen
$F_Z$	$\text{N}$	Fahrwiderstand
$h$	$\text{m}$	Höhe
$h_i$	$\text{m}$	Höhenelement $i$
$h_i'$	$\text{m}$	Modifiziertes Höhenelement $i$
$h_{\text{Start}}$	$\text{m}$	Starthöhe
$i$		Laststufe
$i$		Laufvariable
$i_{Ha}$		Hinterachsübersetzung
$i_{Ha,vmax}$		Hinterachsübersetzung für Maximalgeschwindigkeit
$k$		Wöhlerlinienexponent
$KU$	$\text{gon/km}$	Kurvigkeit
$KU_i$	$\text{gon/km}$	Kurvigkeit des Streckenabschnitts $i$
$L$	$\text{m}$	Länge des Kreisbogens
$m$		Gesamtzahl der Laststufen
$m$		Steigung
$M$		Steigungskenngröße
$\bar{m}$		Mittlere Steigung
$m_F$	$\text{kg}$	Fahrzeugmasse
$m_i$		Steigung des Streckenabschnitts $i$

$MQA$	gon/km	Mittlere quadratische Abweichung der Kurvigkeit
$n$		Gangvariable
$n_{ab}$	1/min	Getriebeabtriebsdrehzahl
$N_D$		Dauerfestigkeitsschwingspielzahl
$n_{eq}$		Equivalente Lastspielzahl
$n_i$		Schwingspiele der Stufe $i$
$N_i$		Ertragbare Schwingspielzahl der Laststufe $i$
$n_{Mot}$	1/min	Motordrehzahl
$R$	gon/km	Kurvenkenngröße
$r$	m	Radius
$r_i'$	m	Modifizierter Radius des Streckenelements $i$
$r_i$	m	Radius des Streckenelements $i$
$S$		Gesamtschädigung
$s$	m	Weg
$s_{ges}$	m	Gesamtstrecke
$s_i$		Schädigung der Stufe $i$
$s_i$	m	Wegelement $i$
$s_{koll}$		Absolute Kollektivschädigung
$s_{koll,ref}$		Absolute Kollektivschädigung der Referenzkonfiguration
$s_n$	m	Wegstrecke im Gang $n$
$S_{rel}$		Relative Schädigung
$T$	Nm	Drehmoment
$T$	s	Gesamtzeit
$t$	s	Zeit
$T_D$	Nm	Dauerfestigkeitsmoment
$T_{eq}$	Nm	Equivalentes Lastmoment
$T_i$	Nm	Lastmoment der Laststufe $i$
$T_{Mot}$	Nm	Motormoment
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$v_m$	m/s	Durchschnittsgeschwindigkeit
$v_{max}$	m/s	Maximalgeschwindigkeit
$v_W$	m/s	Wunschgeschwindigkeit
$x$		Skalierungsfaktor
$\alpha$	°	Drosselklappenwinkel
$\alpha$	°	Steigungswinkel
$\rho_L$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte von Luft



**Pfeilnomenklatur**

Pfeil	Bedeutung für relative Schädigung über Parameteränderung
	Nahezu konstant
	Leicht linear steigend
	Leicht linear fallend
	Stark linear steigend
	Bis Referenz marginal fallend, dann degressiv leicht steigend
	Zunächst steigend, nach Maximum fallend
	Zunächst leicht steigend, nach Maximum leicht fallend
	Zunächst leicht fallend, nach Minimum leicht steigend
	Progressiv steigend
	Progressiv stark steigend
	Degressiv fallend



## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Entwicklung neuer Automobilgenerationen ist konfrontiert mit der Verkürzung der Markteinführungszyklen, gesteigertem Kostendruck bei gleichzeitiger Steigerung der Qualität. Ein Ansatz, um diesen Konflikt zu lösen, ist die aufwendige und zeitintensive Fahrerprobung der Fahrzeuge zu verkürzen. Es wird angestrebt, zeitlich geraffte Versuche durch die Variation verschiedener Parameter durchzuführen. Die Schwierigkeit besteht darin, die Parameter so zu bestimmen, dass die Schädigung in der Erprobung, mit der im realen Einsatz beim Kunden zu erwartenden, übereinstimmt. Der Einsatz von Simulationswerkzeugen bietet hier die Möglichkeit, die Auswahl der zu variierenden Parameter auf den späteren Kundeneinsatz und das zu prüfende Fahrzeug abzustimmen, und so im Vorfeld der Erprobung das Raffungspotential zu ermitteln.

Bauteile werden heutzutage nach dem Prinzip der Betriebsfestigkeit ausgelegt. Dies bedeutet, dass das Bauteil entsprechend der während des Betriebs zu erwartenden Belastung dimensioniert wird. Dies vermeidet zum einen teure und schwere Überdimensionierungen, zum anderen müssen nicht hinnehmbare Unterdimensionierungen, die einen Ausfall des Bauteils und daraus resultierende Kundenreklamationen zur Folge hätten, ausgeschlossen werden. Für die betriebsfeste Auslegung ist die genaue Kenntnis der zu erwartenden Belastungen unabdingbar. Diese Belastungen in Form von Lastkollektiven können mittels Messungen bei Versuchsfahrten oder im Feldeinsatz bei Kunden ermittelt werden. Nachteil dieser Methode ist der hohe zeitliche Aufwand sowie die enormen Kosten, die damit verbunden sind. Aus diesem Grund eignet sich diese Methode nicht für Voruntersuchungen zur Bestimmung der Parameter für eine geraffte Erprobung.

Zur Ermittlung von Lastkollektiven bietet sich der Einsatz von Simulationswerkzeugen an, mit deren Hilfe schnell Parameterstudien durchgeführt werden können. Ein Vorteil beim Einsatz von Simulationen ist, dass die Randbedingungen konstant gehalten werden können und Tendenzen der Auswirkungen von Variationen frühzeitig erkannt werden. Ein weiterer Vorteil beim Einsatz moderner Computer besteht durch die meist weit höher als Echtzeit betragende Rechengeschwindigkeit. Zur Bestimmung von Versuchsparametern bietet die Simulation die Möglichkeit, weniger Erfolg versprechende Parameter im Vorfeld der Erprobung auszuschließen und so einen Zeit- und Kostennutzen zu gewinnen.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Reihe von typischen Versuchsparametern und deren Einfluss auf die relative Schädigung und ihre Möglichkeit für die Raffung in der Erprobung eines automatisierten Handschaltgetriebes zu untersuchen. Die Einflüsse gliedern sich dabei in fahrzeug-, strecken- und fahrerspezifische Parameter. Die gewählten fahrzeugspezifischen Parameter sind das Fahrzeuggewicht, die Motorisierung, die Hinterachsübersetzung und die Art des Schaltprogramms. Als streckenspezifische Parameter wurden das Höhenprofil und die Kurvigkeit, als fahrerspezifischer Parameter die Wunschgeschwindigkeit untersucht. Für die ausgesuchten Parameter werden Lastkollektive der einzelnen Gänge ermittelt, mit denen Schadensakkumulationsrechnungen durchgeführt und auf eine Referenzschädigung bezogen werden. Als Resultat liegen die relativen Schädigungen der einzelnen

Gänge in Abhängigkeit der untersuchten Parameter vor. Anhand des vorliegenden Schädigungsmechanismus wird entschieden, ob die Raffung zulässig ist oder nicht. Das Ergebnis ist eine Matrix, die das Raffungspotential der Parameter auf die Gänge und das gesamte Getriebe widerspiegelt.

In Kapitel 2 wird der Stand der Technik der für die Arbeit relevanten Themen aufgezeigt. Neben der Fahrsimulation wird auf die Ermittlung von Strecken- und Geschwindigkeitsvorgaben, die Getriebeerprobung und die Grundlagen der Betriebsfestigkeit eingegangen. Die am Institut für Maschinenelemente (IMA) entwickelte Simulationsumgebung mit dem Streckenaufzeichnungssystem SASIMA, dem Verkehrssimulationsprogramm VERSIMA und dem Triebstrangsimulationsprogramm FASIMA wird in Kapitel 3 ausgeführt. Kapitel 4 befasst sich mit der Ermittlung von Kenngrößen zur Beschreibung von Geschwindigkeitsprofilen und der Streckencharakteristik. In Kapitel 5 wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der Lastkollektive und der Berechnung der relativen Schädigung erläutert. Das Kapitel gliedert sich dabei in die Darstellung des Simulationsmodells und der Referenzkonfiguration, der untersuchten Parameter, des verwendeten Klassierverfahrens und der Berechnung der relativen Schädigung. Die Ergebnisse der Parametervariationen werden in Kapitel 6 beschrieben und erläutert. Kapitel 7 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf mögliche Anwendungen ab.

## 2 Stand der Technik

Zur Verkürzung der Entwicklungs- und Erprobungszeiten wird auf rechnergestützte Methoden zur Ermittlung der Belastungen und Lebensdauern von Bauteilen zurückgegriffen. Hierfür ist es notwendig, reale physikalische Modelle in mathematischen Modellen abzubilden und diese mit geeigneten Programmen auszuwerten. Als Ergebnisse dieser Auswertungen liegen unter anderem die Belastungen einzelner Bauteile über der Zeit vor, die zur Ermittlung der Lebensdauer verwendet werden.

Zur Simulation von Antriebssträngen werden die realen Triebstränge meist in Form von mathematischen Differentialgleichungen dargestellt. Diese Differentialgleichungen können analytisch oder numerisch gelöst werden. Resultat der Simulation sind Aussagen über das dynamische Verhalten des Triebstrangs, wie z.B. die Analyse von Leistungsflüssen in komplexen Getriebebauformen /70/.

Eine spezielle Form der Triebstrangsimulation stellt die Fahrsimulation dar. Hier wird ein Antriebsstrang mit seinem Verhalten auf einer vorgegebenen Strecke simuliert /19/. Mögliche Ergebnisse dieser Fahrsimulationen sind unter anderem die Lastkollektivvermittlung /41, 75/, die Optimierung von Betriebsstrategien /39/, die Bestimmung von Fahrleistungen /69/, die Ermittlung der Antriebsstrangdynamik /71/ oder des Kraftstoffverbrauchs /1, 40/. Als weitere Einsatzmöglichkeit bieten sich Parameterstudien zur Ermittlung von Einflüssen auf Lastkollektive /41/ oder zur Beurteilung von innovativen Antriebskonzepten /15/ an.

Die dauerfeste Auslegung von Bauteilen oder Baugruppen fordert, dass nur Beanspruchungs-Zeitfunktionen zugelassen werden, die beliebig oft ohne Versagen ertragbar sind. Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen müssen häufig Beanspruchungen oberhalb der Dauerfestigkeit zugelassen werden. Diese Auslegung von Bauteilen oder Baugruppen wie z.B. Fahrzeuggetriebe erfolgt heute nach den Regeln der Betriebsfestigkeit /22/. Diese Art der Bauteildimensionierung hielt zuerst im Flugzeugbau zur Gewichthsoptimierung Einzug /16/. Eine betriebsfeste Auslegung bedeutet dabei, dass das Bauteil eine endliche Lebensdauer hat. Aufgabe des Ingenieurs ist es dabei, die Konstruktion so anzupassen, dass die Lebensdauer bei den zu erwartenden Lasten der geforderten Nutzungsdauer entspricht oder diese knapp übersteigt. Basis jeder Betriebsfestigkeitsrechnung sind die Ermittlung zuverlässiger Lastkollektive, die Kenntnis der Wöhlerlinien als Werkstoffkennwert und die Schadensakkumulationshypothese zur Berechnung der Schädigungswirkung des Lastkollektivs.

Die Überprüfung der Betriebsfestigkeit der Getriebe wird im Allgemeinen im Fahrversuch oder auf Prüfständen vorgenommen /56/.

### 2.1 Fahrsimulation

Unter dem Begriff der Fahrsimulation versteht man eine spezielle Form der Triebstrangsimulation auf einer vorgegebenen Strecke. Fahrsimulationen werden durchgeführt zur Simulation der Längs- und Querdynamik, Belastungsermittlung im Antriebsstrang und die

Ermittlung von Leistungsflüssen in komplexen Getriebekonzepten. Für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit ist die Fahrzeuglängsdynamik von ausschlaggebender Bedeutung. Aus diesem Grund wird im Weiteren unter einer Fahrsimulation eine Simulation der Fahrzeuglängsdynamik verstanden /68/.

Fahrsimulationsprogramme lassen sich unter anderem durch die Art des Simulationsverfahrens unterscheiden. In /30/ werden die Simulationsverfahren in die Kategorien Regressions-, statistische und deterministische Verfahren untergliedert.

Bei Simulationsprogrammen, die nach dem Regressionsverfahren arbeiten, werden die Korrelationen einzelner Parameter nach dem Prinzip der Regressionsanalysen berechnet. Die Einsatzmöglichkeiten dieser Verfahren sind beschränkt, da nur Interpolationen von bereits bekannten Parametern erzielbar sind. Heute haben Regressionsverfahren nur noch eine untergeordnete Bedeutung, da dynamisches Verhalten von Antriebssträngen nicht darstellbar ist.

Die statistischen Verfahren verwenden gegenüber den Regressionsverfahren zumindest die Fahrdynamikgleichungen. Jedoch sind dynamische Fahrsimulationen nur bedingt möglich, da die Ergebnisse lediglich durch die Analyse weniger statistischer Eingangsgrößen bestimmt werden.

Den derzeitigen Stand der Technik stellen die deterministischen Verfahren dar. Die Simulation der Triebstränge erfolgt hierbei unter der Verwendung der Fahrdynamikgleichungen. Die deterministischen Verfahren lassen sich wiederum durch die Topologieabhängigkeit, die Art der Kopplung der einzelnen Triebstrangelemente und den Typus der Kausalkette unterscheiden.

Die Unterscheidung der Topologie wird in topologieunabhängige und topologieabhängige Simulationswerkzeuge vorgenommen. Topologieunabhängige Programme können beliebig aufgebaute Triebstränge untersuchen, die von einem Anwender ohne Programmierkenntnisse zusammengestellt werden können. Dies erlaubt eine sehr große Flexibilität in der Anwendung. Topologieabhängige Programme werden speziell auf eine Triebstranganwendung optimiert und sind dadurch unflexibel aber auch sehr schnell in der Rechengeschwindigkeit.

Bei der Art der Kopplung wird zwischen einer starren und einer flexiblen Kopplung der Triebstrangelemente unterschieden. Ein Modellansatz mit starrer Kopplung lässt keine Untersuchungen von Triebstrangschwingungen und hochdynamischen Vorgängen zu. Die starre Kopplung bietet jedoch die Möglichkeit von großen Integrationsschrittweiten und somit eine hohe Rechengeschwindigkeit. Die flexible Kopplung ist für die Betrachtung von Schwingungsmechanismen unabdingbar. Hierbei werden die einzelnen Triebstrangkomponenten durch Feder-Dämpfer-Elemente verbunden, die die realen Schwingungs- und Dämpfungseigenschaften abbilden.

Die Art der Kausalkette wird unterschieden in *Ursache-Wirkung* und *Wirkung-Ursache*. Bei der Modellierung nach dem *Ursache-Wirkung*-Prinzip wird der Triebstrang von der Stellgröße Fahrer aus betrachtet und den Einfluss einer Fahrervorgabe, der *Ursache*, auf die Fahrzeugdynamik, der *Wirkung*, berechnet. Im Gegensatz hierzu wird bei dem *Wirkung-Ursache*-Prinzip aus einer vorgegebenen Sollgeschwindigkeit der Sollzustand des Systems im nächsten Integrationsschritt bestimmt. Aus diesem Sollzustand, der *Wirkung*,

wird entgegengesetzt durch den Triebstrang auf die notwendigen Fahrereingaben, den *Ursachen*, zurückgerechnet, damit der Sollzustand erreicht wird.

Die Kopplung der Elemente lässt eine weitere Unterscheidung zu. Programme mit einer starren Kopplung der Triebstrangelemente lassen keine Berechnung von Schwingungen in den Bauteilen zu und werden hauptsächlich für Spezialanwendungen wie die Verbrauchsberechnung eingesetzt /4, 21/. Programme mit elastischer Kopplung bieten darüber hinaus weitere Untersuchungsmöglichkeiten wie die Bestimmung von Schwingungen und den daraus resultierenden Lasten im Triebstrang. Nahezu alle modernen, kommerziell angebotenen Fahrsimulationsprogramme zeichnen sich durch eine elastische Kopplung der Elemente aus /13, 24, 29, 60, 74, 76/, so auch das verwendete Programm FASIMA /45, 64/.

## 2.2 Strecken- und Geschwindigkeitsvorgaben

Für die Fahrsimulation sind als Eingangsdaten neben den triebstrangspezifischen Daten ein Strecken- und Geschwindigkeitsprofil notwendig. Als Streckenprofil können synthetische, am Rechner erzeugte Profile, verwendet werden. Diese Streckenprofile können z.B. eine ebene, gerade Strecke oder eine Steigungsrampe sein. Diese synthetischen Profile sind nur für theoretische Untersuchungen einsetzbar. Für realistische Fahrsimulationen werden gemessene Streckenprofile verwendet, für deren Ermittlung diverse Messsysteme einsetzbar sind /2, 32, 74/. Als zweite Vorgabe ist ein Geschwindigkeitsprofil notwendig, welchem in der Fahrsimulation gefolgt wird. Dieses Geschwindigkeitsprofil kann ebenfalls bei Messfahrten aufgezeichnet werden /2, 32, 55/. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die Geschwindigkeitsprofile synthetisch mit Hilfe von Verkehrssimulationsprogrammen generiert werden /58/. Die Vorteile in der synthetischen Generierung liegen in der Wiederholbarkeit der Randbedingungen wie Verkehrsumfeld, Fahrercharakteristik und Fahrzeugeigenschaften und in der Möglichkeit, schnell Parameterstudien dieser Randbedingungen zu erstellen.

## 2.3 Getriebeerprobung

In der Getriebeerprobung wird die rechnerisch ermittelte Betriebsfestigkeit praktisch überprüft. Zum einen werden die Getriebe im Fahrzeug verbaut als Dauerläufer im Fahrversuch getestet /49/. Hierbei werden die Getriebe mit unterschiedlichen Einsatzprofilen und –strecken eingesetzt, die dem zu erwartenden Kundenprofil weitgehend entsprechen /36, 37/. Weiter werden Fahrversuche unter erschwerten Bedingungen durchgeführt, die zu einer Verkürzung der Erprobungszeiten führen sollen. Parameter, die hier variiert werden, sind u.a. das Streckenprofil /7, 35, 61/, das Streckenprofil und die Fahrercharakteristik /18/ oder das Fahrzeuggewicht /43/.

Um den hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand der Fahrerprobung zu reduzieren, werden Getriebe auf Prüfständen untersucht /12, 17, 54, 62/. Die Vorteile der Prüfstandserprobung gegenüber von Fahrversuchen sind unter anderem, die Möglichkeit Dauerlaufversuche durchzuführen, die unabhängig von Witterungseinflüssen, gewerkschaftlich geregelter Arbeitszeiten oder gesetzlicher Bestimmungen wie z.B. maximale Lenkzeiten sind. Weiter

können Versuche mit den zu erwartenden Maximallasten durchgeführt werden, wie z.B. Missbrauchstests. Als Basis der Prüfstandsversuche können gemessene oder synthetisch generierte Lastkollektive dienen. Zur Ermittlung der gemessenen Lastkollektive werden Messungen von Kundenprofilen, standardisierter Fahrprofile oder firmeninterner Teststrecken durchgeführt. Synthetische Lastkollektive können mittels Fahrsimulation oder anhand statistischer Verfahren generiert werden.

## **2.4 Betriebsfestigkeit**

Unter dem Begriff der Betriebsfestigkeit versteht man die Auslegung von schwingenden Bauteilen auf eine bestimmte Lebensdauer unter der Annahme von zu erwartenden Lasten. Durch eine betriebsfeste Auslegung werden die Bauteile so dimensioniert, dass sie nur eine bestimmte Anzahl von Lastwechseln ertragen können. Im Gegensatz hierzu steht die dauerfeste Auslegung von Bauteilen, bei der eine beliebig hohe Anzahl von Lastwechseln vom Bauteil ertragbar ist /6, 14, 16, 20 - 22/.

Die betriebsfeste Bemessung dient dem Leichtbau und verfolgt in erster Linie zwei Ziele. Zum einen wird durch die Verringerung der Masse des Bauteils z.B. ein geringerer Treibstoffverbrauch, weniger Materialeinsatz bei der Herstellung oder mehr Nutzlast ermöglicht. Zum anderen wird durch den Leichtbau die Funktion von Bauteilen sichergestellt bzw. ermöglicht, z.B. dauerfeste Flugzeuge würden nicht fliegen.

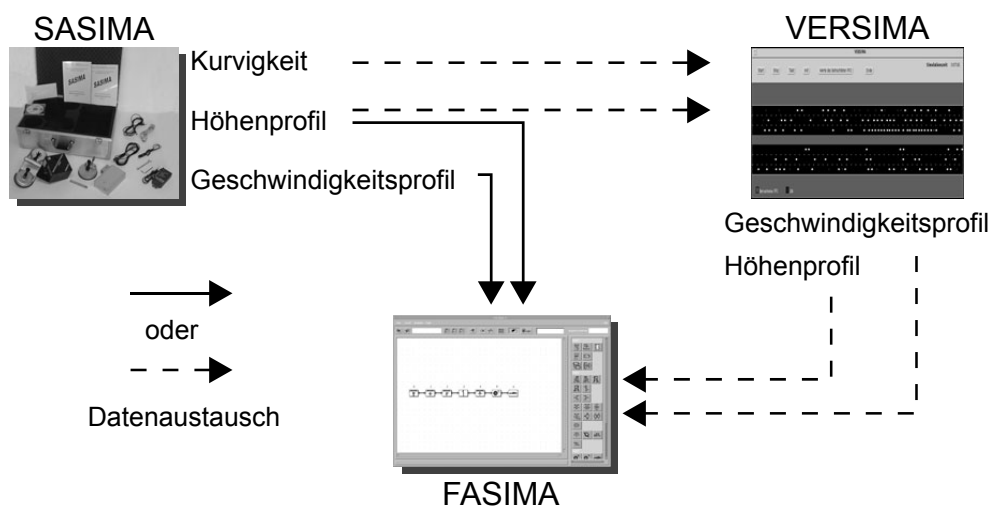


### 3 Simulationsumgebung

Seit über 25 Jahren existiert am Institut für Maschinenelemente (IMA) eine Projektgruppe Fahrsimulation, welche die Entwicklung und den Einsatz von rechnergestützten Werkzeugen für die Fahrsimulation vorantreibt. Im Rahmen dieser Projektgruppe wurde eine Simulationsumgebung geschaffen, die sich in die Werkzeuge

- SASIMA (Kap. 3.1),
- VERSIMA (Kap. 3.2) und
- FASIMA (Kap. 3.3)

gliedert. Mit diesen Werkzeugen steht eine Umgebung zur Verfügung, um Strecken- und Geschwindigkeitsprofile aufzuzeichnen, synthetische Geschwindigkeitsprofile zu erzeugen und Fahrsimulationen durchzuführen. In Bild 3.1 ist der Zusammenhang der drei Werkzeuge dargestellt.



**Bild 3.1:** Simulationsumgebung am IMA

Die mit SASIMA gemessenen Geschwindigkeits- und Streckenprofile können direkt für eine Fahrsimulationsrechnung in FASIMA verwendet werden. Es besteht weiter die Möglichkeit, das aufgezeichnete Streckenprofil für eine Verkehrssimulation in VERSIMA zu verwenden. Das mit dem Verkehrssimulationsprogramm VERSIMA ermittelte Geschwindigkeitsprofil kann wiederum direkt mit dem Höhenprofil aus SASIMA in FASIMA für eine Fahrsimulation verwendet werden.

#### 3.1 Streckenaufzeichnungssystem SASIMA

Der Name SASIMA ist ein Akronym der Bezeichnung „StreckenAufzeichnungssystem am IMA“. Mit SASIMA können beliebige Strecken mit beliebigen Fahrzeugen vermessen werden [32, 72]. SASIMA ermöglicht dabei die dreidimensionale Vermessung von Strecken. Dies bedeutet, dass über dem Weg und der Zeit die Geschwindigkeit, die Höhe und

die Kurvigkeit aufgezeichnet werden. Mit Hilfe der Tastatur des an das Messsystem angeschlossenen Laptops lassen sich Markierungen wie z.B. Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Ortsdurchfahrten in der Streckendatei einfügen. Das Messsystem besteht aus einem Laptop, einem Radarsensor und einer Messeinheit, die einen Kreisel- und einen Höhsensor beinhaltet. Dieses Messsystem ist durch seine kompakten Abmessungen und das geringe Gewicht innerhalb kurzer Zeit an beliebige Fahrzeuge applizierbar.

### 3.2 Verkehrssimulationsprogramm VERSIMA

Der Name VERSIMA ist ein Akronym der Bezeichnung „**VER**kehrs**S**imulation am **IMA**“. Mit VERSIMA können synthetische Geschwindigkeitsprofile auf Landstraßen und Autobahnen auf einem vorgegebenen Streckenprofil oder einer ebenen, geraden Strecke generiert werden [41, 58]. Als mikroskopisches Verkehrssimulationsprogramm betrachtet VERSIMA nicht nur Verkehrsströme sondern jede Fahrer-/Fahrzeug-Kombination innerhalb des betrachteten Verkehrsumfeldes. Die Fahrer-/Fahrzeug-Kombinationen werden mittels stochastischer Verteilungen ermittelt. Parameter dieser Verteilungen sind die Verkehrsstärke, die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsumfeldes und der prozentuale Lkw-Anteil. Eine Fahrer-/Fahrzeug-Kombination aus dem Verkehrsumfeld wird ausgewählt zur Erzeugung des Geschwindigkeitsprofils. Hierfür sind Angaben spezieller Fahrzeugdaten und zur Fahrermentalität dieser Fahrer-/Fahrzeug-Kombination notwendig. Als Ergebnis der Verkehrssimulation liegt ein Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit des Streckenprofils, des gewählten Verkehrsumfeldes und der spezifizierten Fahrer-/Fahrzeug-Kombination vor.

### 3.3 Triebstrangsimulationsprogramm FASIMA

Der Name FASIMA ist ein Akronym der Bezeichnung „**FA**hr**S**imulation am **IMA**“. Das Fahrstrangsimulationsprogramm FASIMA bietet die Möglichkeit, beliebige Antriebsstränge zu modellieren und zu simulieren. Ergebnisse der mit FASIMA durchgeführten Simulationen sind unter anderem die Belastungen im Triebstrang, Verbräuche, Fahrleistungen oder die Optimierung von Betriebsstrategien.

FASIMA ist ein modulares, topologie-ungebundenes Triebstrangsimulationsprogramm [41, 64]. In einer Modulbibliothek sind für die einzelnen Triebstrangkomponenten wie Motor, Kennungswandler, Bremsen, Reifen verschiedene Module hinterlegt, die entsprechend dem abzubildenden Antriebsstrang gekoppelt und parametrisiert werden. Dadurch sind beliebige konventionelle und alternative Antriebskonzepte modellierbar. Um den Antriebsstrang entsprechend der Geschwindigkeitsvorgaben zu bewegen, werden mittels einer Fahrer/Triebstrangsteuerung die Steuer- und Regelvorgänge während der Simulation ermittelt und ausgeführt.

Durch den schwingungsfähigen Ansatz aus der Mehrkörperdynamik bestehen alle Triebstrangmodule grundsätzlich aus einer Trägheitsmasse, einer Feder/Dämpferkombination und einer Übersetzung. In Abhängigkeit der Eigenschaften der einzelnen Module werden diese noch um Eigenschaften wie Wirkungsgrade oder eingeprägte Momente ergänzt.

## 4 Kenngrößen

Im Folgenden werden Kenngrößen hergeleitet, mit denen die in FASIMA verwendeten Streckendaten bezüglich ihrer Streckencharakteristik und ihres Geschwindigkeitsprofils beschreibbar sind. Zur Vergleichbarkeit verschiedener Geschwindigkeitsprofile werden nach /63/ als Kenngrößen

- die Durchschnittsgeschwindigkeit,
- die mittlere Beschleunigung und
- die mittlere gewichtete Beschleunigung

herangezogen.

Als maßgebliche Merkmale der Streckencharakteristik nennt /27/ unter anderem

- die Kurvigkeit bzw. Krümmung und
- die Längsneigung,

die in dieser Arbeit angewendet werden.

### 4.1 Kenngrößen von Geschwindigkeitsprofilen

Um die Geschwindigkeitsprofile, die allen Simulationen zu Grunde liegen, vergleichbar zu machen, ist es notwendig, Kenngrößen zu definieren, die die Geschwindigkeitsprofile mit charakteristischen Werten beschreiben.

Als gängige Kenngröße nennt /50/ die Durchschnittsgeschwindigkeit  $v_m$ , die sich aus dem Verlauf der Geschwindigkeit über der Zeit

$$v_m = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (3.1)$$

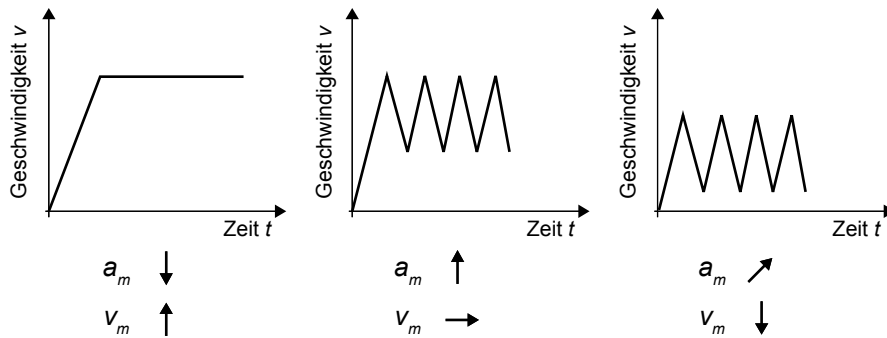
berechnet. Wenn die Gesamtstrecke  $s_{ges}$  und die dafür benötigte Zeit  $T$  bekannt sind, berechnet sich die Durchschnittsgeschwindigkeit mit

$$v_m = \frac{s_{ges}}{T}. \quad (3.2)$$

Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist zur Beurteilung des Geschwindigkeitsprofils und dem Verhalten des Fahrzeugs nur bedingt geeignet. Hierfür wird nach /50, 63/ die mittlere Beschleunigung  $a_m$  eingeführt, die sich mit

$$a_m = \frac{1}{T} \int_0^T |a(t)| dt \quad (3.3)$$

berechnet. In Bild 4.1 sind die Begriffe *Durchschnittsgeschwindigkeit*  $v_m$  und *mittlere Beschleunigung*  $a_m$  visualisiert.



**Bild 4.1:** Durchschnittsgeschwindigkeit  $v_m$  und mittlere Beschleunigung  $a_m$

Im ersten Fall ist die Fahrt des Fahrzeugs ungestört. Es beschleunigt auf seine Wunschgeschwindigkeit und hält diese in weiten Bereichen konstant. Die mittlere Geschwindigkeit ist hoch, die mittlere Beschleunigung nimmt einen sehr niedrigen Wert ein. Im zweiten Fall versucht das Fahrzeug seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen, wird aber dabei gestört. Dadurch sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit leicht und die mittlere Beschleunigung steigt durch die häufigen Beschleunigungen und Verzögerungen stark. Im dritten Fall wird das Fahrzeug noch stärker gestört. Es erreicht die Wunschgeschwindigkeit nicht mehr. Dadurch sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit stark und die mittlere Beschleunigung liegt bei einem Wert zwischen dem des ersten und zweiten Falls.

Nach /63/ lässt sich mit Gleichung (3.3) aus der mittleren Beschleunigung die mittlere, gangspezifische Beschleunigung

$$a_{m,n} = \frac{1}{T} \int_0^T |a_n(t)| dt \quad (3.4)$$

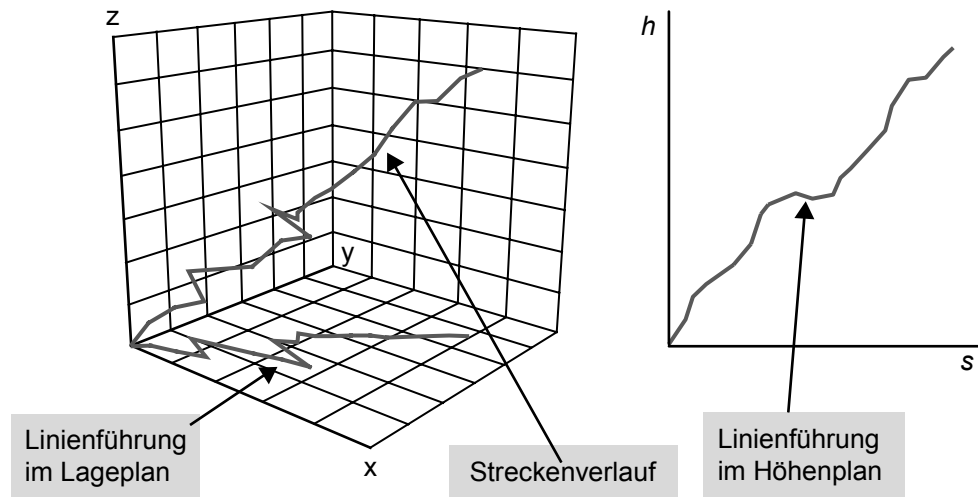
herleiten. Die Ganganteile der einzelnen Gänge sind stark von verschiedenen Einflussgrößen abhängig. Um eine Vergleichbarkeit der mittleren, gangspezifischen Beschleunigung herzustellen wird auf die gewichtete mittlere Gangbeschleunigung

$$\bar{a}_{m,n} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T |a_n(t)| dt \right) \cdot \frac{s_n}{s_{ges}} \quad (3.5)$$

übergegangen. Durch die Gewichtung der mittleren Gangbeschleunigung mit dem Anteil der in diesem Gang gefahrenen Strecke werden die unterschiedlichen Ganganteile berücksichtigt. Die mittlere gewichtete Gangbeschleunigung ist keine einfach deutbare physikalische Größe. Sie ist nach /41/ als *Einwirkdauer der Beschleunigung* zu verstehen, in die sowohl die Intensität der Beschleunigungen als auch die deren Dauer eingehen.

## 4.2 Kenngrößen der Streckencharakteristik

Bei der Linienführung einer Strecke wird nach dem Lage- und Höhenplan unterschieden. In Bild 4.2 ist der dreidimensionale Streckenverlauf dargestellt. Durch Projektion des Streckenverlaufs auf die x-y-Ebene erhält man die Linienführung im Lageplan. Die Höhe  $h$ , dargestellt über dem zurückgelegten Weg  $s$ , ergibt die Linienführung im Höhenplan, das so genannte Höhenprofil.



**Bild 4.2:** Definition der Streckenführung

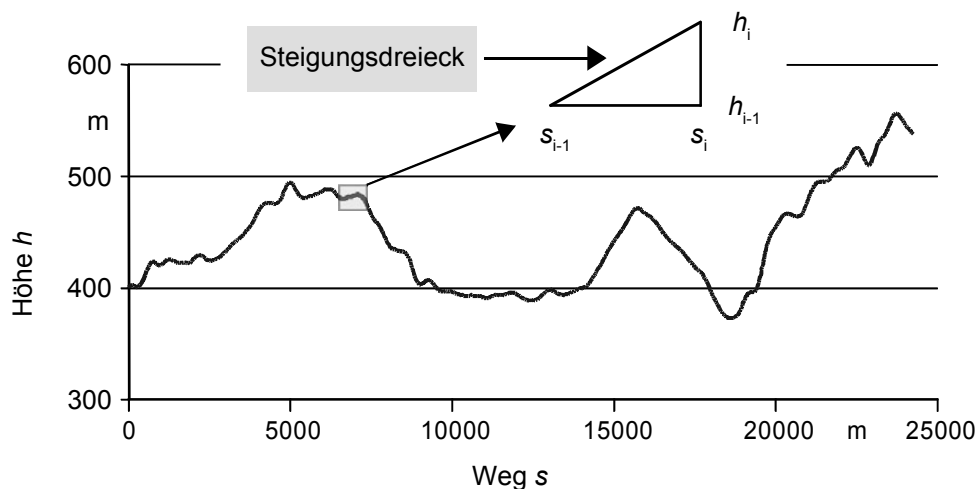
Durch die Unterscheidung des Streckenverlaufs bezüglich Lage- und Höhenplan wird eine getrennte Betrachtung der streckencharakteristischen Einflüsse möglich.

#### 4.2.1 Mittlere Steigung $M$

Die Linienführung im Höhenplan entspricht dem Höhenprofil der Strecke, das durchfahren wird. Je nach Verlauf des Höhenprofils werden sich unterschiedliche Schädigungen ergeben. Dies macht die Herleitung einer Kenngröße notwendig, durch deren Wert die Streckencharakteristik bezüglich des Höhenprofils interpretierbar wird /48/. Die aufgezeichnete Strecke liefert zu jedem Wegpunkt die zugehörige Höhe. Damit kann bei der Herleitung der Kenngröße auf die Betrachtung der Steigungen eingegangen werden.

Das Höhenprofil besteht aus Streckenelementen mit Steigung  $m > 0$ , Gefällen  $m < 0$  und flachen Teilstücken mit  $m = 0$ .

Bild 4.3 zeigt das Höhenprofil einer Strecke mit dem Steigungsdreieck eines Streckenelementes.



**Bild 4.3:** Höhenprofil mit Steigungsdreieck

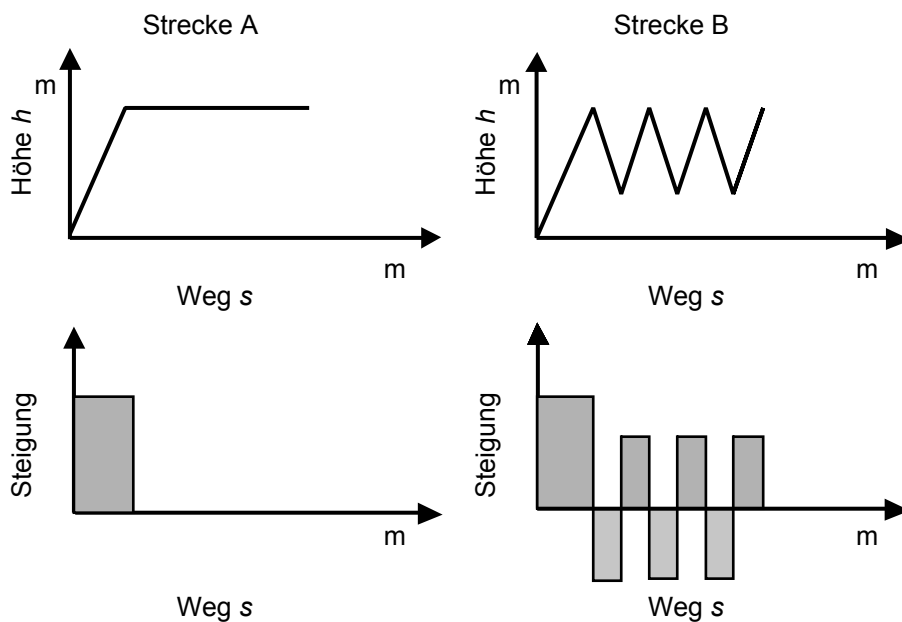
Die Steigung  $m_i$  eines Streckenelementes  $i$  berechnet sich zu

$$m_i = \frac{h_i - h_{i-1}}{s_i - s_{i-1}} \quad (3.6)$$

Berechnet man nun die mittlere Steigung  $\bar{m}$  der Strecke mit

$$\bar{m} = \frac{1}{s_{ges}} \int_0^{s_{ges}} m(s) ds \quad (3.7)$$

dann ergibt sich das in Bild 4.4 dargestellte Problem.



**Bild 4.4:** Höhenprofile und Steigungsprofile der Strecken A und B

Die Strecken A und B haben ein unterschiedliches Höhenprofil, da aber in die Berechnung positive sowie negative Steigungen eingehen, sind die mittleren Steigungen gleich. Deshalb ist die mittlere Steigung  $\bar{m}$  als Kenngröße nicht verwendbar. Streckenelemente ohne Steigung haben bezüglich der Einflussgröße Steigung keine Auswirkungen auf die Gangkollektive, sodass bei der Steigungskenngröße  $M$  die Streckenelemente mit  $m = 0$  unberücksichtigt bleiben.

Aus den verbleibenden Streckenanteilen mit  $m \neq 0$  ergibt sich die mittlere Steigung  $M$  der Strecke

$$M = \frac{1}{s_{ges}} \int_0^{s_{ges}} |m(s)| ds \quad \text{für } m_i \neq 0 \quad (3.8)$$

Die mittlere Steigung  $M$  stellt nun einen Mittelwert der Beträge der Steigungen bzw. Gefälle einer Strecke der Länge  $s_{ges}$  dar und wird im Weiteren als Steigungskenngröße  $M$  bezeichnet.

### 4.2.2 Kurvenkenngrößen $R$

Bei der Ausarbeitung von Kenngrößen, die speziell die Linienführung im Lageplan beschreiben, wird eine analytische Untersuchung der Streckenführung notwendig. Dabei wird das Fahrband in seine einzelnen Streckenelemente zerlegt. Unter einem Streckenelement wird eine Gerade, eine Klothoide oder ein Kreisbogen verstanden. Eine Klothoide bezeichnet einen Übergangsbogen zwischen zwei Kurven oder einer Geraden und einer Kurve mit linearer Krümmungszu- bzw. abnahme. Die Klothoide hat dabei die Eigenschaft, dass der Kehrwert des Radius  $r$  proportional zur Länge des Kurvenbogens  $L$  ist /7/.

$$\frac{1}{r} \sim L \quad (3.9)$$

#### Mittlere Kurvigkeit ( $KU$ )

Da die Streckencharakteristik u.a. einen Einfluss auf das Fahrverhalten und somit auf die Entstehung von Straßenverkehrsunfällen hat, wurde in früheren Untersuchungen von /8/ versucht, die Streckencharakteristik durch Kenngrößen zu beschreiben. Unter anderem wurde die mittlere Kurvigkeit  $KU$  der Gesamtstrecke eingeführt, die sich zu

$$KU = \frac{1}{s_{ges}} \sum_i (KU_i \cdot s_i) \quad (3.10)$$

berechnet. Die mittlere Kurvigkeit  $KU$  /59/ liefert einen Wert für die Winkeländerung pro gefahrenen Kilometer. Die Winkeländerung wird in für die in der Messtechnik üblichen Einheit  $gon$  angegeben. Der Zusammenhang der einzelnen Winkleinheiten ist mit den Beziehungen  $360^\circ \triangleq 2 \cdot \pi \text{ rad} \triangleq 400 \text{ gon} \rightarrow 1 \text{ rad} \approx 63,7 \text{ gon}$  gegeben.

#### Mittlere quadratische Abweichung ( $MQA$ )

Eine weitere Möglichkeit Strecken zu vergleichen, ist die Berechnung der mittleren quadratischen Abweichung  $MQA$  der Kurvigkeit. Da die mittlere Kurvigkeit und die Einzelkurvigkeiten bekannt sind, wird die mittlere quadratische Abweichung

$$MQA = \sqrt{\frac{1}{s_{ges}} \sum_i ((KU_i - KU)^2 \cdot s_i)} \quad (3.11)$$

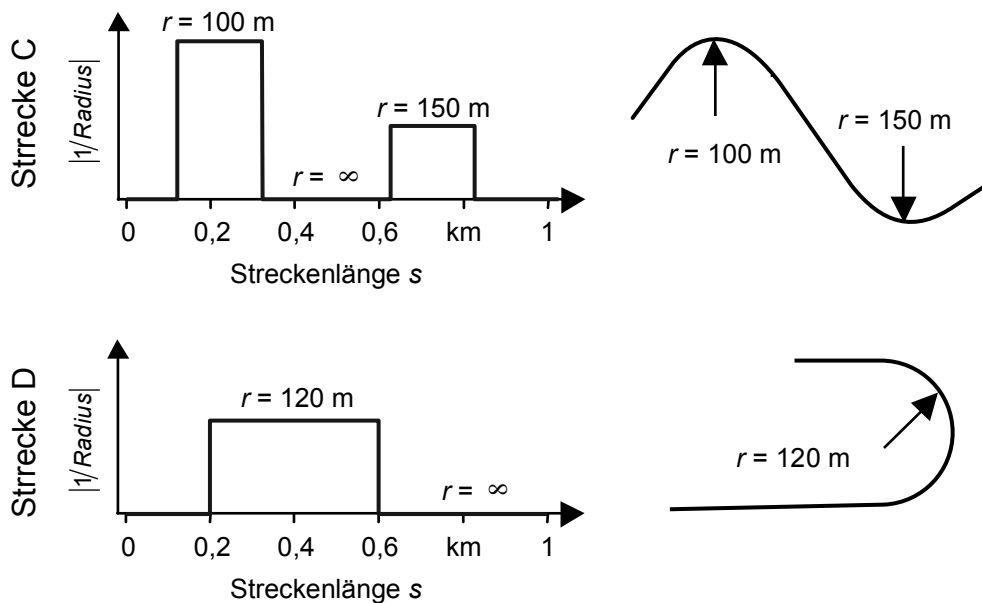
eingeführt, die einer durch die Länge gewichteten Standardabweichung der Kurvigkeiten der Einzelemente entspricht. Die  $MQA$  beschreibt die Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert. Bei einer großen  $MQA$  ist die Streuung der Einzelkurvigkeiten um die mittlere Kurvigkeit groß, das heißt die Strecke hat einen inhomogenen Verlauf. Ist die  $MQA$  gering, wird die Strecke eine ausgeglichene, homogene Linienführung aufweisen.

### Fallbeispiele

Die gefundenen Kenngrößen  $KU$  und  $MQA$  werden im Folgenden anhand von zwei Streckenvergleichen bezüglich ihrer Aussagekraft diskutiert.

Bei dem ersten Streckenvergleich werden die Strecken C und D verglichen, die die gleiche mittlere Kurvigkeit haben, Bild 4.5. Beim zweiten Streckenvergleich werden die Strecken E und F gegenübergestellt, wobei beide Strecken die gleiche mittlere quadratische Abweichung aufweisen.

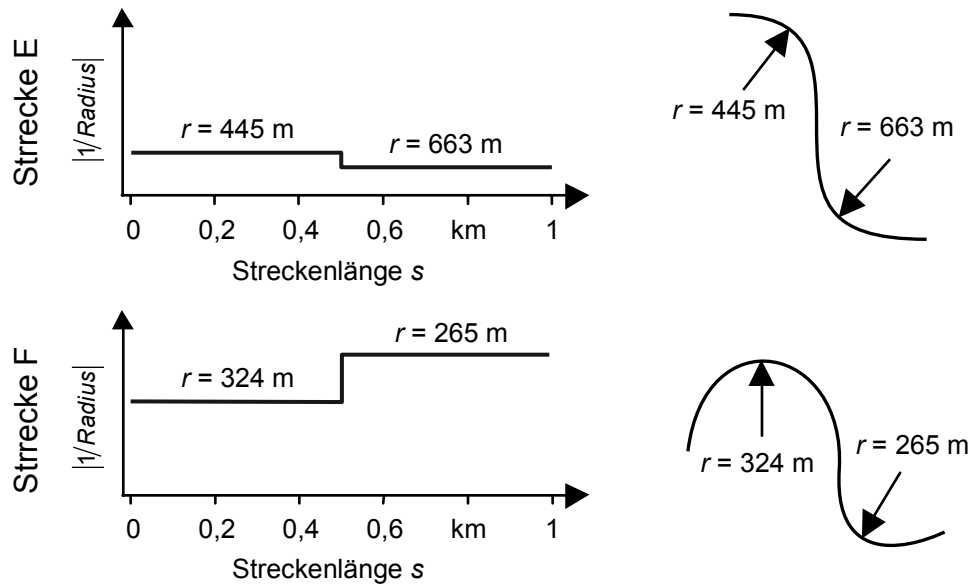
Die Strecken C bis F haben eine Streckenlänge von jeweils einem Kilometer. Jede Strecke wird durch ein Radiendiagramm links im Bild dargestellt und durch eine Skizze der Linienführung rechts im Bild dargestellt. Im Radiendiagramm ist der Radius über der Strecke dargestellt. Zu beachten ist, dass die Radienwerte in Richtung Abszisse größer werden. Verläuft die Strecke auf der Abszisse, so hat sie einen Radienwert von unendlich, was einer Geraden entspricht. Die Skizze der Linienführung stellt den Verlauf der Strecke im Lageplan dar, siehe Bild 4.2. Sie entspricht dem Streckenverlauf, den man einer Straßenkarte entnehmen kann.



**Bild 4.5:** Streckenvergleich mit mittlerer Kurvigkeit  $KU = \text{const.}$

Beide Streckenverläufe haben zwar die gleiche mittlere Kurvigkeit, durch ihre Linienführung werden sich aber verschiedene Geschwindigkeitsverläufe und somit verschiedene Getriebelastkollektive ergeben. Es wird deutlich, dass bei diesem Streckenvergleich die mittlere Kurvigkeit als alleinige Kenngröße nicht ausreicht. Erst die zusätzliche Betrachtung der  $MQA$  macht eine eindeutige Interpretation möglich.





**Bild 4.6:** Streckenvergleich mit mittlerer quadratischer Abweichung  $MQA = \text{const.}$

Die Strecken E und F haben die gleiche  $MQA$  und somit die gleiche Streuung. Da sich die Streuungen aber um verschiedene mittlere Kurvigkeiten bewegen, ist deren Auswirkung auf den Streckenverlauf unterschiedlich. Es wird deutlich, dass bei diesem Streckenvergleich die Kenngröße  $MQA$  die Linienführung nicht ausreichend darstellt. Erst die zusätzliche Betrachtung der mittleren Kurvigkeit  $KU$  macht eine eindeutige Interpretation möglich.

### Kurvenkenngröße $R$

Anhand der Fallbeispiele wird deutlich, dass die Interpretation der Linienführung im Lageplan durch eine einzige Kenngröße nicht ausreicht. Jede Strecke wird durch  $KU$  und  $MQA$  bezüglich der Linienführung im Lageplan ausreichend beschrieben. Will man nun verschiedene Strecken mit verschiedenen Linienführungen im Lageplan mit nur einer Kenngröße erfassen, wird auf die kombinierte Kenngröße  $R$  übergegangen /48/, die sich zu

$$R = \sqrt{KU^2 + MQA^2} \quad (3.12)$$

berechnet.

## 5 Vorgehensweise zur Ermittlung der Parametereinflüsse

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der Einflüsse der untersuchten Parameter auf das Getriebelastkollektiv und die daraus resultierende relative Schädigung erläutert. Allen untersuchten Parametervariationen liegt die in Kap. 5.1 beschriebene Referenzkonfiguration zu Grunde.

Die ausgewählten Parameter lassen sich in die folgenden Kategorien

- Triebstrangspezifische Einflüsse (Kap. 5.2),
- Streckenspezifische Einflüsse (Kap. 5.3) und
- Fahrerspezifischer Einfluss (Kap. 5.4)

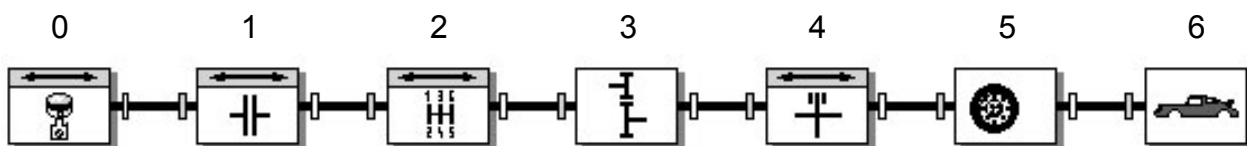
gliedern.

Zur Ermittlung des Einflusses einzelner Parameter auf die Getriebebelastung muss die Belastung mit einem geeigneten Zählverfahren kollektiviert werden. In Kap. 5.5 wird das verwendete, so genannte Verweildauerverfahren, erläutert.

In Kap. 5.6 werden die für die Abschätzung der Schädigung benötigten werkstoff- oder bauteilspezifischen Festigkeitsdaten anhand einer Wöhlerlinie ermittelt. Die Berechnung der relativen Schädigungen mittels einer Schadensakkumulationsrechnung wird in Kap. 5.7 erläutert.

### 5.1 Simulationsmodell und Referenzkonfiguration

Den Simulationen liegt ein Fahrzeug der Mittelklasse mit einem Standardantrieb mit frontlängs eingebautem Motor mit Hinterachsantrieb zu Grunde. Das in FASIMA aufgebaute Simulationsmodell ist in Bild 5.1 dargestellt.

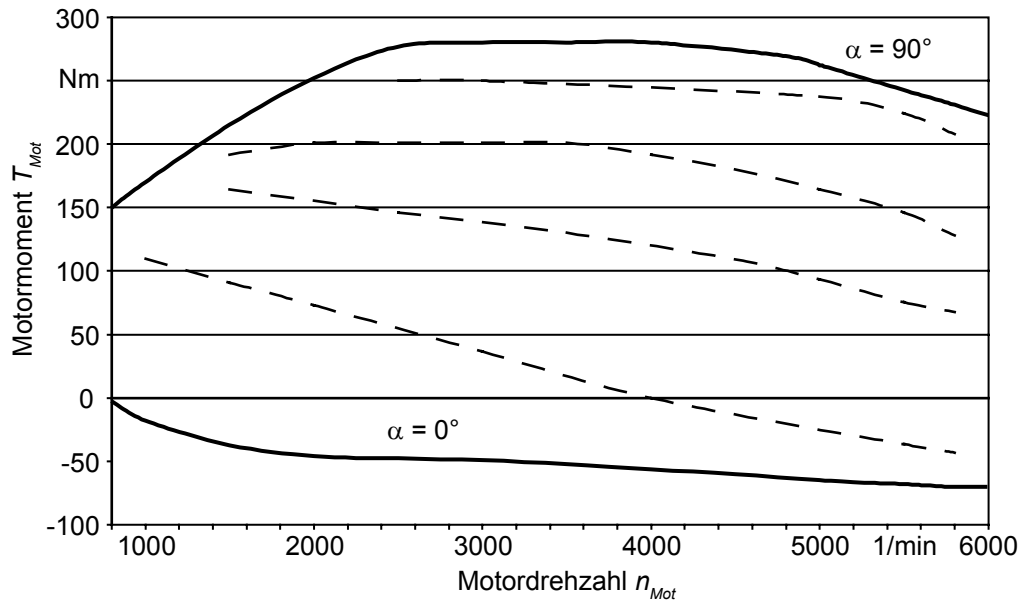


**Bild 5.1:** Simulationsmodell in FASIMA

Das Simulationsmodell besteht aus den im Folgenden erläuterten Modulen. Angetrieben wird der Antriebsstrang von dem Modul 0, dem Verbrennungsmotor. Es schließt daran das Modul 1, die Kupplung an. In Modul 2 wird das automatisierte 6-Gang Schaltgetriebe (ASG), welches als *Sequentronic* beworben wird, abgebildet. Modul 3 beinhaltet das Hinterachsgetriebe. Es folgen die Bremse in Modul 4 und das Reifenmodell in Modul 5. Abgeschlossen wird der Antriebsstrang von dem Fahrzeug in Modul 6.

Im Folgenden wird die so genannte Referenzkonfiguration, der alle Parametervariationen zu Grunde liegen, beschrieben. Die Referenzkonfiguration setzt sich aus einem Referenztriebstrang, einem Referenzfahrer und einer Referenzstrecke mit einem Referenzgeschwindigkeitsprofil zusammen.

Das modellierte Referenzfahrzeug entspricht einem Mittelklassefahrzeug der Marke DaimlerChrysler. Die notwendigen Daten wurden nach /5, 25, 26/ ermittelt. Der Referenztriebstrang wird von einem 2,3 Liter Motor mit Kompressor angetrieben. Modelliert wird der Verbrennungsmotor über das Momentenkennfeld, Bild 5.2.



**Bild 5.2:** Momentenkennfeld des Referenzfahrzeugs mit Linien konstanter Drosselklappenwinkel  $\alpha$

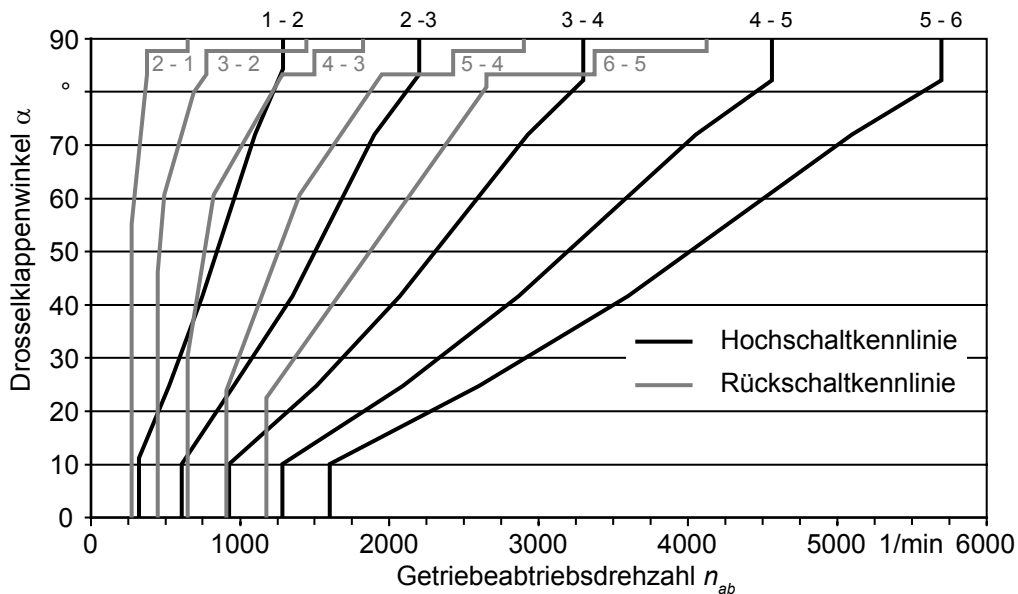
In dem Momentenkennfeld sind die Motormomente über der Motordrehzahl dargestellt. Das Momentenkennfeld enthält die Volllast- und die Schubkennlinie mit den Drosselklappenwinkeln  $\alpha = 90^\circ$  bzw.  $\alpha = 0^\circ$ . Weiter sind die Linien konstanter Drosselklappenstellung enthalten. Zwischen dem Drosselklappenwinkel und dem Motormoment besteht kein proportionaler Zusammenhang. Die Linien konstanter Drosselklappenwinkel verdichten sich in Richtung der Volllastkennlinie. Die maximale Motorleistung beträgt ca. 145 kW bei einer Drehzahl von 5500 1/min. Das maximale Motormoment bei einer Drehzahl von 2500 1/min beträgt ca. 280 Nm. Die Drehungleichförmigkeiten eines realen Verbrennungsmotors und die damit verbundenen Drehmomentschwankungen wurden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, da die Ermittlung des tendenziellen Einflusses von Parametervariationen Focus der Arbeit war.

Das automatisierte Schaltgetriebe *Sequentronic* verfügt über sechs Vorwärtsgänge. Die Gangwahl erfolgt entweder automatisch von der Getriebesteuerung oder manuell vom Fahrer. In Tabelle 1 sind die Übersetzungen des Getriebes aufgeführt.

**Tabelle 1:** Übersetzungen des automatisierten Schaltgetriebes /5/

Gang $n$	1	2	3	4	5	6
Übersetzung $i$	4,459	2,614	1,723	1,245	1,0	0,838

Die Gangwahl wird in dem Simulationsmodell über so genannte Schaltkennlinien bewerkstelligt, Bild 5.3.



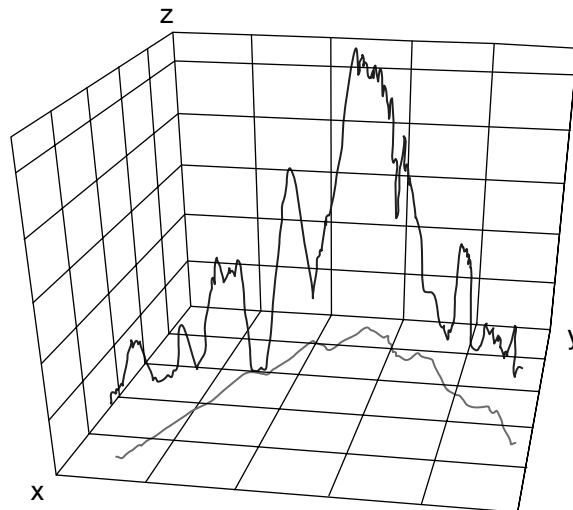
**Bild 5.3:** Schaltkennfeld der Referenzkonfiguration

In Abhängigkeit des Drosselklappenwinkels und der Getriebeabtriebsdrehzahl werden im Automatikmodus die Schaltpunkte für das Getriebe ermittelt. Beim Überschreiten einer Hochschaltkennlinie wird in den jeweiligen Gang hochgeschaltet, beim Unterschreiten einer Rückschaltkennlinie in den entsprechenden Gang zurück geschaltet.

Das Hinterachsgetriebe hat in der Referenzkonfiguration eine Übersetzung von  $i_{ha} = 3,27$ . Weitere Fahrzeugdaten der Referenzkonfiguration sind das Fahrzeugleergewicht inklusive Fahrer und Treibstoff von 1500 kg, der Luftwiderstandsbeiwert  $c_w = 0,29$  und die Querspanntfläche  $A_{quer} = 2,03 \text{ m}^2 / 5/$ .

Allen Simulationen liegt ein Referenzgeschwindigkeitsprofil zu Grunde, das mit einem Referenzfahrer in VERSIMA erzeugt wurde. Der Referenzfahrer kann als ein mäßig sportlicher Fahrer mit gutem Schätzvermögen eingeordnet werden. Die Referenzwunschgeschwindigkeit beträgt 110 km/h. Die Referenzwunschgeschwindigkeit ist bewusst, dem üblichen Trend zum schnelleren Fahren /47/ folgend, über der allgemeinen Geschwindigkeitsbegrenzung auf Bundes- und Landstraßen /66/ gewählt.

Die Referenzstrecke wurde mit dem Aufzeichnungssystem SASIMA auf einer Landstraße im Schwarzwald gemessen. Die Strecke ist eine bergige, kurvenreiche, gut ausgebaute Landstraße. In Bild 5.4 ist die Referenzstrecke als Linie im dreidimensionalen Raum dargestellt.



**Bild 5.4:** 3D-Darstellung der Referenzstrecke mit Projektion in die x-y-Ebene

Die Projektion der Strecke auf die x-y-Ebene ergibt die Linienführung im Lageplan, die der Darstellung von Straßenkarten entspricht.

## 5.2 Triebstrangspezifische Einflüsse

Im Folgenden werden die Parametervariationen zur Untersuchung der triebstrangspezifischen Einflüsse erläutert. Die triebstrangspezifischen Parameter werden dabei innerhalb physikalisch und praktisch sinnvoller Grenzen variiert. Für jede Variation wird ein spezielles Geschwindigkeitsprofil erzeugt, da durch die Triebstrangmodifikationen das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs stark beeinflusst wird. Die untersuchten triebstrangspezifischen Parameter sind

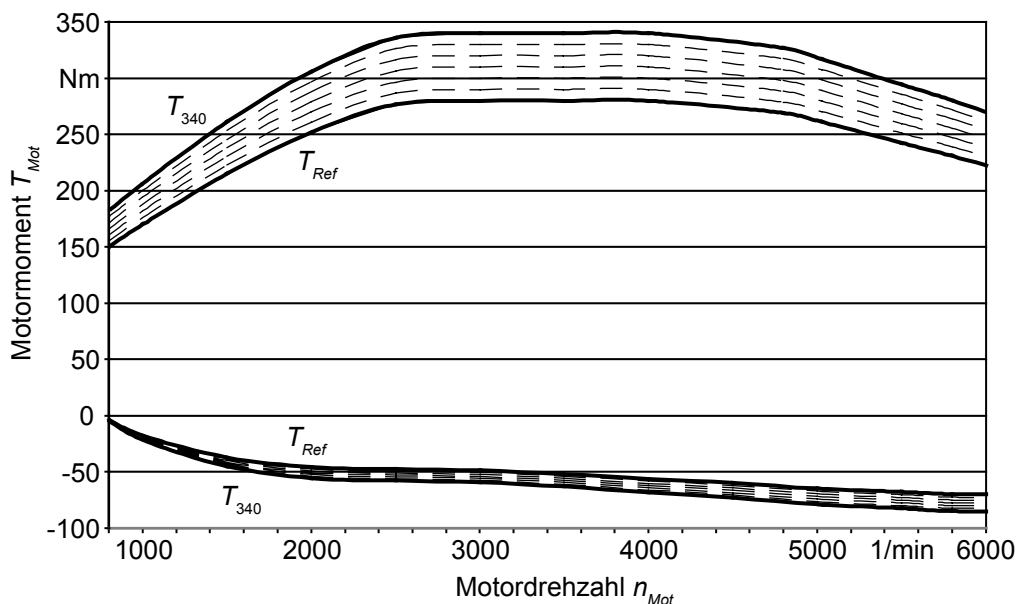
- das Fahrzeuggewicht,
- die Motorisierung,
- die Hinterachsübersetzung und
- das Schaltprogramm.

### Fahrzeuggewicht

Das Fahrzeuggewicht wird ausgehend vom Fahrzeugleergewicht inklusive Treibstoff und Fahrer von 1500 kg in Schritten von jeweils 200 kg erhöht. Das maximale simulierte Fahrzeuggewicht beträgt 4900 kg. Das Gewicht wird dabei so verteilt, dass bis zum Erreichen des maximal zulässigen Gesamtgewichts die zusätzliche Masse als Zuladung im Fahrzeug betrachtet wird. Für höhere Gewichte wird die Zusatzmasse als Anhänger modelliert. Dieses Vorgehen ist zur Berücksichtigung der Traktionsverhältnisse an der Antriebsachse notwendig und entspricht dem üblichen Vorgehen.

## Motorisierung

Die Motorisierung der Referenzkonfiguration mit einem maximalen Motormoment von 280 Nm wird für die variierten Konfigurationen in Schritten von jeweils 10 Nm bis zu einem maximalen Moment von 340 Nm angehoben. In Bild 5.5 sind die Volllastkennlinien der modifizierten Motorvarianten und die Schubkennlinie dargestellt.



**Bild 5.5:** Motorkennfeld mit modifizierten Volllastkennlinien

Die Volllast- und die Schubkennlinien sind jeweils proportional verschoben. Die Anpassung der Motorisierung und der Drosselklappenkennlinien erfolgt ausschließlich durch die Skalierung der Referenzkennlinien. Im Folgenden werden die Variationen über das maximale Motormoment identifiziert.

## Hinterachsübersetzung

Über die Hinterachsübersetzung werden das Beschleunigungspotential und die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs beeinflusst. Die Varianten wurden durch Skalierung der Referenzhinterachsübersetzung von 85 % bis zu 115 % in 5 %-Schritten generiert. In Tabelle 2 sind die Varianten der Hinterachsübersetzung mit der jeweiligen Höchstgeschwindigkeit aufgeführt.

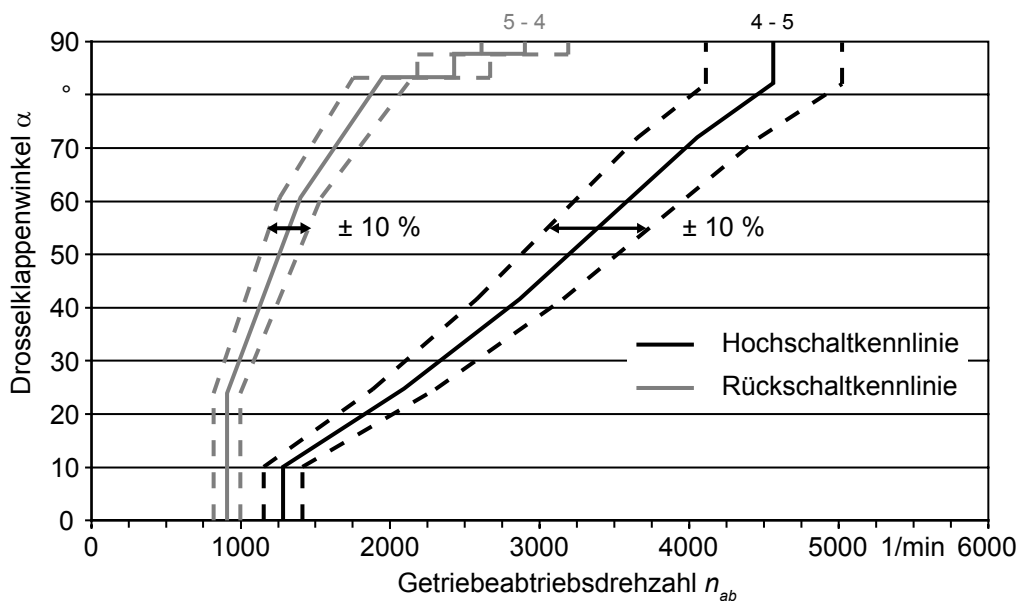
**Tabelle 2:** Hinterachsübersetzungen und Maximalgeschwindigkeit

$i_{Ha}$	2,78	2,94	3,11	3,27	3,43	3,60	3,76
$v_{max}$ in km/h	222,1	226,0	227,5	228,1	229,3	227,4	224,2

Die Referenzhinterachsübersetzung mit  $i_{Ha} = 3,27$  stellt dabei die 100 % Variante dar. Die maximale Höchstgeschwindigkeit wird mit der Hinterachsübersetzung  $i_{Ha,vmx} = 3,43$  erreicht. Kleinere Übersetzungen sind unterdrehende Auslegungen, die eher verbrauchsorientiert sind. Größere Übersetzungen sind überdrehende Auslegungen, die sportlicher sind /44/.

## Schaltprogramm

Die Art des Schaltprogramms wird in dieser Arbeit als triebstrangspezifischer Parameter betrachtet, da im Automatikmodus die Gangwechsel vollautomatisch anhand der Schaltkennlinien ausgeführt werden. Das verwendete automatisierte Schaltgetriebe kann in einem zweiten Modus betrieben werden. Im manuellen Modus kann der Fahrer mittels Schaltwippen oder am Wählhebel den Schaltvorgang auslösen. Der eigentliche Gangwechsel erfolgt wiederum automatisiert. Der Fahrerwunsch wird in dieser Arbeit wieder über Schaltkennlinien abgebildet. In Bild 5.6 sind exemplarisch die Hochschaltung 4 – 5 und die Rückschaltung 5 – 4 dargestellt.



**Bild 5.6:** Exemplarische Schaltkennlinien für den manuellen Modus

Zu erkennen ist ein gestrichelt dargestellter Bereich, der  $\pm 10\%$  der jeweiligen Schaltdrehzahl beträgt. Innerhalb dieses Schaltbereichs wird über einen Zufallsalgorithmus entschieden, wann geschaltet wird. Dieser Schaltbereich spiegelt das Fahrerverhalten wider, in einem bestimmten Bereich der Motordrehzahl zu schalten. Diese Schaltpunkte variieren mit einer gewissen Streubreite um eine fahrerabhängige Schaltkennlinie /31/. Diese unscharfe Schaltkennlinie beeinflusst die Schalthäufigkeit und Gangwahl. Das Schaltprogramm wird als triebstrangspezifischer Parameter gewertet, da die Schaltbereiche aus den triebstrangspezifischen Schaltkennlinien abgeleitet wurden.

### 5.3 Streckenspezifische Einflüsse

Als streckenspezifische Parameter wurden

- das Höhenprofil und
- die Kurvigkeit

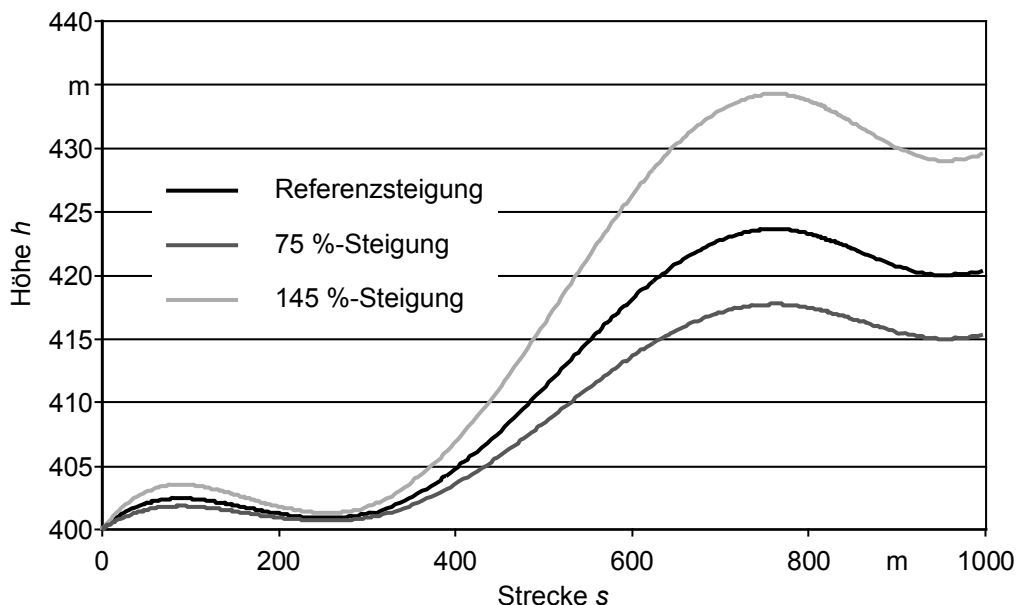
ausgewählt, da diese beiden Parameter die Fahrzeuglängsdynamik am stärksten beeinflussen [9, 27, 33, 38, 42, 48, 65]. Die streckenspezifischen Parameter werden dabei innerhalb praktisch sinnvoller Grenzen variiert. Für jede Variation wird ein spezielles Geschwindigkeitsprofil erzeugt, da durch die Streckenmodifikationen das Beschleunigungsverhalten und das Geschwindigkeitsprofil des Fahrzeugs stark beeinflusst werden.

#### Höhenprofil

Zur Untersuchung des Einflusses des Höhenprofils wurden aus der Referenzstrecke 14 weitere Strecken abgeleitet. Für die modifizierte Strecke wurde jeder Punkt des Höhenprofils mit

$$h'_i = h_i + (h_i - h_{Start}) \cdot x \quad (4.1)$$

modifiziert. Jeder Punkt des Höhenprofils  $h_i$  wird dabei in Abhängigkeit von der Starthöhe  $h_{Start}$  um den Faktor  $x$  variiert. Der Skalierungsfaktor wird in den Grenzen  $0,75 \leq x \leq 1,45$  in Schritten von 0,05 verändert. In Bild 5.7 sind Ausschnitte der Höhenprofile für die Referenzstrecke und zwei modifizierte Höhenprofile dargestellt.



**Bild 5.7:** Ausschnitt verschiedener Höhenprofile über der Strecke

Zu erkennen ist, dass durch die Skalierung mit Gleichung (4.1) alle Streckenabschnitte skaliert werden. Dadurch werden sowohl Steigungen als auch Gefällstrecken steiler bzw. flacher.



## Kurvigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses der Kurvigkeit wurden aus der Referenzstrecke zehn weitere Strecken mit modifiziertem Kurvenverlauf hergeleitet. Für die modifizierte Strecke wurde jeder Radienabschnitt der Strecke mit

$$r_i' = r_i \cdot x \quad (4.2)$$

modifiziert. Der Skalierungsfaktor  $x$  wird in den Grenzen  $0,75 \leq x \leq 1,25$  in Schritten von 0,05 verändert. Als Beschränkungen der Radien gilt  $20 \text{ m} \leq r_i' \leq 1000 \text{ m}$ . Radien größer 1000 m wurden dabei als Geraden betrachtet, da für solch große Radien fahrphysikalisch keine Einschränkungen bestehen. Radien kleiner 20 m wurden nicht nach unten skaliert, da kleinere Radien auf üblichen Landstraßen sehr selten oder gar nicht vorkommen.

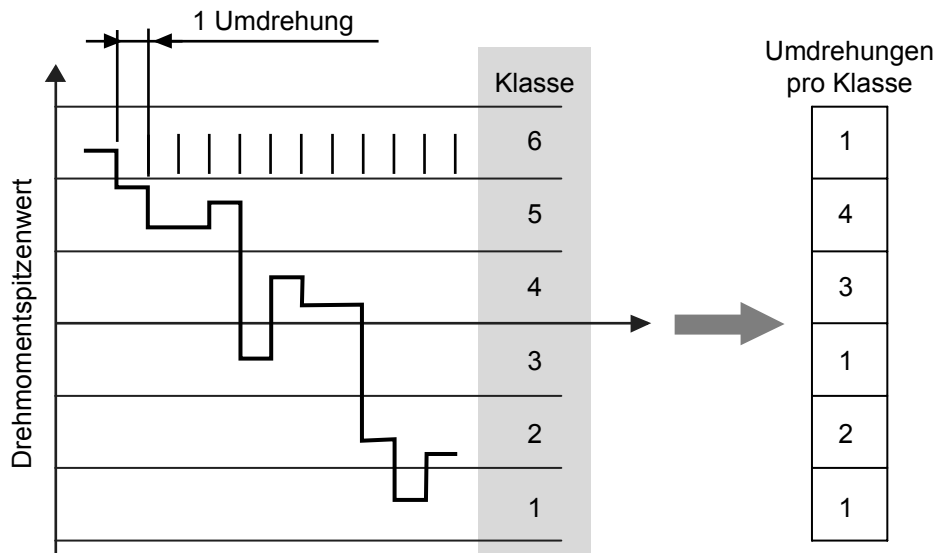
## 5.4 Fahrerspezifischer Einfluss

Das Fahrverhalten lässt sich unter anderem durch die Wunschgeschwindigkeit und das Beschleunigungsverhalten von ökonomisch über normal bis sportlich klassifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird als fahrerspezifischer Parameter die Wunschgeschwindigkeit gewählt. Die Wunschgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, die der Fahrer auf einer geraden, ebenen Straße ohne Verkehrseinflüsse einstellt /58/.

Die wahre, gefahrene Geschwindigkeit weicht von der Wunschgeschwindigkeit im Einzelnen deutlich nach unten ab. Die Variation der Wunschgeschwindigkeit erfolgt im Bereich von 100 km/h bis 130 km/h in Schritten von 5 km/h. Die Referenzwunschgeschwindigkeit beträgt 110 km/h. Die Wunschgeschwindigkeiten liegen teilweise deutlich über der im Allgemeinen erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h außerhalb geschlossener Ortschaften /66/. Die Wunschgeschwindigkeiten wurden bewusst über der erlaubten Höchstgeschwindigkeit gewählt, da, wie allgemein bekannt im Fahrversuch diese Geschwindigkeit meist übertreten wird /47/.

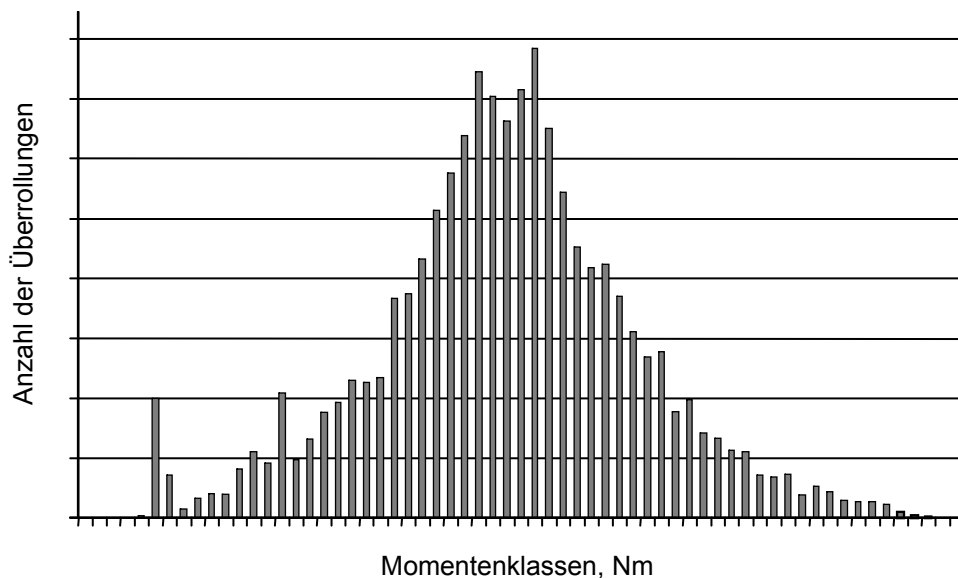
## 5.5 Klassierung der Belastungen

Unter einer Klassierung versteht man eine Methode zur Bestimmung von Lastspielzahlen zeitvarianter Spannungszustände in Bauteilen mittels eines Zählverfahrens. Zur Kollektivbildung besteht die Möglichkeit aus einer Reihe von Zählverfahren zu wählen /11, 20, 23, 73/. Die Belastung an der Verzahnung einzelner Gangstufen bei Stirnradverzahnungen, die mit einem Zahnrad im Eingriff stehen, ist eine rein schwellende oder rein wechselnde Belastung gegeben. Zur Kollektivierung solcher Belastungen eignen sich einparametrische Klassierverfahren. In FASIMA wird das so genannte Verweildauerverfahren /10/ verwendet. In Bild 5.8 ist das Verfahren schematisch dargestellt.



**Bild 5.8: Klassierung nach dem Verweildauerverfahren**

Bei dem Verweildauerverfahren wird in jeder Umdrehung eines Zahnrades das höchste auftretende Moment bestimmt und der Zähler der entsprechenden Klasse in einem Vektor um eins erhöht. Als Ergebnis einer Simulation liegen dann für alle Gänge Lastkollektive vor, wie sie in Bild 5.9 qualitativ dargestellt sind.



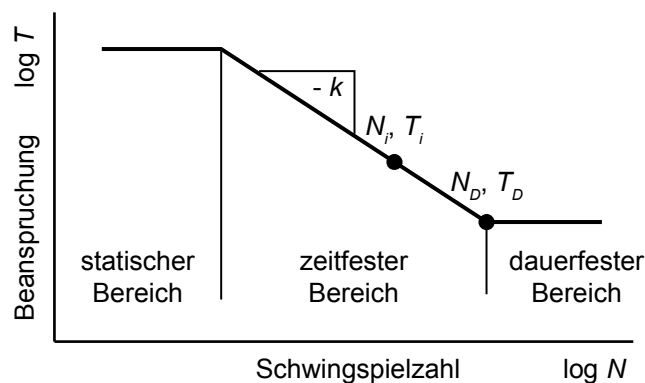
**Bild 5.9: Exemplarisches Lastkollektiv für einen einzelnen Gang**

Dargestellt sind die Anzahl der Überrollungen über den einzelnen Momentenklassen. Aus Bild 5.9 lässt sich direkt ablesen, ob der Gang vor allem für Beschleunigungen oder als Fahrgang, d.h. für Fahrten mit nahezu konstanter Geschwindigkeit verwendet wird. Bei einem Gang der vorwiegend für Beschleunigungen verwendet wird, wird der überwiegende Teil der Überrollungen bei sehr hohen Drehmomenten liegen. Bei einem Fahrgang werden die Überrollungen im Bereich niedriger bis mittlerer Drehmomente liegen.

## 5.6 Wöhlerlinie

Die Wöhlerlinie gibt an, wie oft eine Werkstoffprobe oder ein Bauteil mit einer Beanspruchung auf einem festen Beanspruchungsniveau belastet werden kann. Wöhlerlinien können im so genannten Einstufenversuch experimentell ermittelt werden. Hierbei wird eine Werkstoffprobe oder ein Bauteil mit einem festen Beanspruchungsniveau mit so vielen Lastspielzahlen belastet, bis die Probe oder das Bauteil versagt /22/. Als weitere Möglichkeit Wöhlerlinien zu ermitteln, können synthetische Wöhlerlinien berechnet werden /14, 28/.

In Bild 5.10 ist eine Skizze einer Wöhlerlinie dargestellt. In der doppellogarithmischen Darstellung wird die Wöhlerlinie durch drei Geraden abgebildet.



**Bild 5.10: Skizze einer Wöhlerlinie**

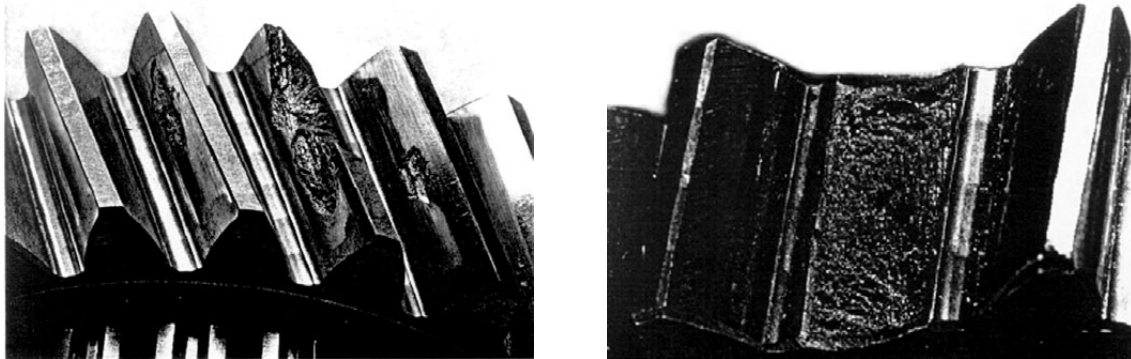
Es sind drei Bereiche der Wöhlerlinie zu erkennen. Der erste Bereich bis ca.  $10^3$  Schwingspiele wird als statischer Bereich bezeichnet. Man spricht hier auch von der statischen Festigkeit. Der zweite Bereich ist der zeitfeste Bereich. Der zeitfeste Bereich wird vom Dauerfestigkeitspunkt mit der Schwingspielzahl  $N_D$  und der dazugehörigen Dauerfestigkeit  $T_D$  begrenzt. Die Dauerfestigkeit wird im Allgemeinen bei  $N_D = 10^6 \dots 10^7$  angenommen. Die charakteristische Größe  $k$  für die Wöhlerliniensteigung im Zeitfestigkeitsbereich lässt sich mit der Formel

$$\frac{N_i}{N_D} = \left( \frac{T_D}{T_i} \right)^k \quad (4.3)$$

berechnen. Dabei sind  $N_i$  und  $T_i$  die Schwingspielzahl und die Beanspruchung im zeitfesten Bereich.

Wöhlerlinien werden immer für verschiedene Ausfallwahrscheinlichkeiten, z.B. 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit oder 10 % Ausfallwahrscheinlichkeit, angegeben /3, 44/. Wöhlerlinien sind jeweils nur für einen bestimmten Werkstoff und eine bestimmte Belastungsart gültig, z.B. Zug, Schub, Biegung, Torsion oder eine kombinierte Belastung, für die sie ermittelt wurden. Weiterhin sind sie nur für ein bestimmtes Spannungsverhältnis, z.B. rein schwelend oder rein wechselnd, gültig.

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Bauteilwöhlerlinien haben die Wöhlerliniensteigung für Grübchenbildung  $k = 15$  und für Zahnbruch  $k = 9$  /44/. In Bild 5.11 sind die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch dargestellt.



**Bild 5.11: Grübchenbildung und Zahnbruch nach /44/**

In der linken Hälfte von Bild 5.11 sind Ausbrüche unterschiedlicher Größe an den Zahnflanken zu erkennen, den so genannten Grübchen. In der rechten Hälfte ist ein am Zahnfuß gebrochener Zahn dargestellt.

## 5.7 Berechnung der relativen Schädigung

Mit den ermittelten Lastkollektiven und der Wöhlerlinie wird eine so genannte Schadensakkumulation /22/ durchgeführt. Grundlage der Schadensakkumulation ist die Betrachtung der wahren Beanspruchung, dem Lastkollektiv, gegenüber der Beanspruchbarkeit, der Wöhlerlinie. Die Schadensakkumulationshypothesen gehen davon aus, dass ein Bauteil während der Beanspruchung Arbeit aufnimmt. Die aufgenommene Arbeit im Verhältnis zur maximal ertragbaren Arbeit gilt als Maß der vorhandenen Schädigung /51/.

Laut der häufig verwendeten Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner /22, 53/, oft auch als *Miner original* bezeichnet, berechnet sich die absolute Schädigung einer einzelnen Laststufe  $i$  zu

$$s_i = \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_i}{N_D \cdot \left(\frac{T_i}{T_D}\right)^{-k}} \quad (4.4)$$

Hierbei sind  $T_i$  die Momente,  $n_i$  die Schwingspielzahl und  $N_i$  die ertragbare Schwingspielzahl der Laststufe  $i$ . Der Dauerfestigkeitspunkt ist durch  $T_D$  und  $N_D$  und die Steigung der Wöhlerlinie durch den Exponenten  $k$  gegeben. Die absolute Gesamtschädigung  $S$  über alle Laststufen  $m$  wird mit

$$S = \sum_{i=1}^m s_i = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_D \cdot \left(\frac{T_i}{T_D}\right)^{-k}} \quad (4.5)$$

berechnet.

Aus dem eindimensionalen Lastkollektiv (Kap. 5.5) lässt sich nach /46/ mit

$$n_{eq} = n_1 + n_2 + \dots + n_m \quad (4.6)$$

und

$$T_{eq} = \left( \frac{n_1 \cdot T_1^k + n_2 \cdot T_2^k + \dots + n_m \cdot T_m^k}{n_{eq}} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.7)$$

eine schädigungsäquivalente Momenten-/Schwingspielzahl berechnen.

Die absolute Schädigung durch ein komplettes Lastkollektiv berechnet sich mit Gleichung (4.6) und (4.7) in (4.5) eingesetzt zu

$$s_{koll} = \frac{n_{eq}}{N_D \cdot \left( \frac{T_{eq}}{T_D} \right)^{-k}} \quad (4.8)$$

Hierbei ist der Dauerfestigkeitspunkt mit dem Dauerfestigkeitsmoment  $T_D$  und der Dauerfestigkeitslastspielzahl  $N_D$  enthalten. Da der Dauerfestigkeitspunkt nicht, wohl aber die Wöhlerliniensteigung  $k$  bekannt ist, geht man über zur relativen Schädigung.

Die relative Schädigung ergibt sich aus dem Verhältnis der Schädigung des betrachteten Lastkollektivs zur Schädigung des Referenzkollektivs

$$S_{rel} = \frac{s_{koll}}{s_{koll,ref}} = \frac{n_{eq}}{N_D \cdot \left( \frac{T_{eq}}{T_D} \right)^{-k}} \cdot \frac{N_D \cdot \left( \frac{T_{eq,ref}}{T_D} \right)^{-k}}{n_{eq,ref}} = \frac{n_{eq} \cdot T_{eq}^k}{n_{eq,ref} \cdot T_{eq,ref}^k} \quad (4.9)$$

Durch den Übergang zur relativen Schädigung reduziert sich die notwendige Information auf die Wöhlerliniensteigung, die über den Werkstoff bekannt ist. Die relative Schädigung gibt das Schädigungspotential des Lastkollektivs der Simulation mit variierten Parametern gegenüber dem Referenzlastkollektiv an.

Es werden Untersuchungen zu den zwei Hauptversagensarten von Zahnrädern gemacht. Diese Versagensarten sind Grübchenbildung und Zahnbruch /10, 44/, siehe auch Bild 5.11. Die Wöhlerliniensteigungen für den Werkstoff wurden dabei der Literatur entnommen, Kap. 5.6. Die Bildung der Lastkollektive berücksichtigt hierbei, dass die stärker beanspruchte Flanke für Grübchenbildung die Zugflanke ist und somit für das Lastkollektiv zur Berechnung der Grübchenschädigung ausschließlich Zugmomente kollektiviert werden. Für die Berechnung der Zahnbruchschädigung sind sowohl Zug- als auch Schubmomente relevant, sodass beide kollektiviert werden.

## 5.8 Raffung

Das Verhältnis zwischen der Schädigung im Versuch unter erschwerten Bedingungen und im Feldeinsatz wird in bestimmten Fällen als Raffungsfaktor bezeichnet. Allgemein ist dieser Faktor definiert als das Verhältnis zwischen der Lebensdauer unter normalen Einsatzbedingungen und der Lebensdauer unter zeitraffenden Versuchsbedingungen unter der Voraussetzung gleicher Ausfallsmechanismen /34, 52, 67/. Bei Fahrzeuggetrieben ist ein Versagen durch Zahnbruch unter normalen Einsatzbedingungen nahezu ausgeschlossen /44/. In der vorliegenden Untersuchung bedeutet dies, dass der maßgebende Versagensfall Grübchenbildung heißt und nur dann von Raffung zu sprechen ist, wenn die Versagensart unter den verschärften Prüfbedingungen ebenfalls Grübchenbildung ist und die relative Schädigung größer oder gleich 1 ist.

Zur Beurteilung der Ergebnisse sind einige Sonderfälle der Raffungsfaktoren zu betrachten. Zum einen ist dies der Raffungsfaktor mit dem Wert 1,0. Hierbei handelt es sich nicht um einen zeitraffenden Versuch, sondern um einen Versuch, der die normalen Einsatzbedingungen widerspiegelt. Ein weiterer Fall, in dem eindeutig von Raffung gesprochen werden kann, ist gegeben, wenn die relative Grübchenschädigung über der relativen Zahnbruchschädigung liegt. In diesem Fall ist die maßgebende Versagensart wie im Feldeinsatz eindeutig die Grübchenbildung.

Schwieriger ist die Bewertung für den Fall, dass die *relative* Zahnbruchschädigung höher als die *relative* Grübchenschädigung ist. Ob von Raffung gesprochen werden darf, hängt von der *absoluten* Schädigung des Bauteils im Versuch ab. Ist die *absolute* Zahnbruchschädigung geringer als die *absolute* Grübchenschädigung, so kann von Raffung gesprochen werden. Für den umgekehrten Fall ist die Raffung unzulässig.

Die absolute Schädigung im Versuch berechnet sich mit

$$\text{relative Schädigung} = \frac{\text{absolute Schädigung}_{\text{Versuch}}}{\text{absolute Schädigung}_{\text{Feld}}}. \quad (4.10)$$

Zur Erläuterung ein Fallbeispiel, anhand dessen die Problematik beschrieben wird. In Tabelle 3 sind die angenommenen *absoluten* Schädigungen im Feldeinsatz aufgeführt.

**Tabelle 3: Absolute Schädigungen Feld**

	Absolute Schädigungen im Feld	
	Grübchen	Zahnbruch
1. Fall	0,50	0,20
2. Fall	0,50	0,40

Die fiktiven *relativen* Schädigungen sind in Tabelle 4 dargestellt.

**Tabelle 4: Relative Schädigungen**

Relative Schädigung	
Grübchen	Zahnbruch
1,50	2,50

Mit Gleichung (4.10) berechnen sich die *absoluten* Schädigungen im Versuch mit den Werten aus Tabelle 3 und 4 zu den in Tabelle 5 aufgeführten Werten.

**Tabelle 5: Absolute Schädigungen im Versuch**

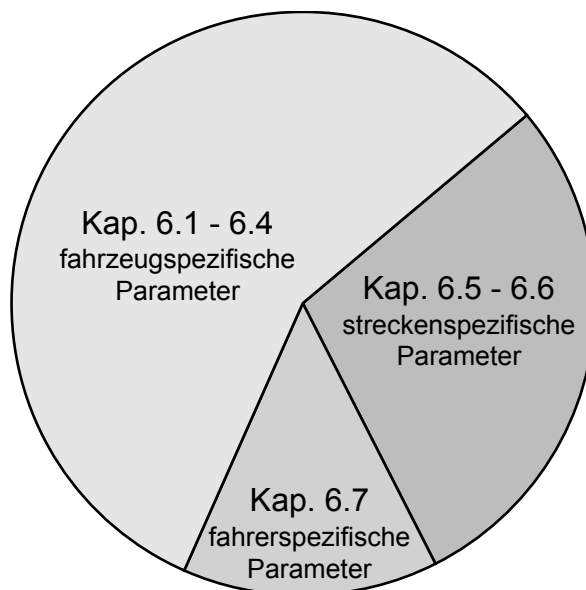
	Absolute Schädigungen im Versuch		
	Grübchen	Zahnbruch	Raffung zulässig
1. Fall	0,75	0,50	ja
2. Fall	0,75	1,00	nein

Im 1. Fall ist die *absolute* Grübchenschädigung höher als die *absolute* Zahnbruchschädigung, und somit darf von Raffung gesprochen werden. Im 2. Fall ist die *absolute* Zahnbruchschädigung höher als die *absolute* Grübchenschädigung, und damit ist die Raffung nicht zulässig.

## 6 Ergebnisse der Parametervariationen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung der Einflüsse der Parametervariationen auf die relativen Schädigungen der einzelnen Gänge beschrieben. Die in den Simulationen ermittelten Lastkollektive werden hierbei auf die Referenzlastkollektive aus Kap. 5.1 bezogen. Hierbei wurde jeweils nur ein Parameter variiert, alle anderen Parameter wurden aus der Referenzkonfiguration beibehalten. Zur Quantifizierung der Einflüsse werden, nach der in Kap. 5.7 beschriebenen Weise, die relativen Schädigungen der einzelnen Gänge berechnet.

Die untersuchten Parameter lassen sich in die im Bild 6.1 dargestellten Kategorien einteilen.



**Bild 6.1: Spezifizierung der Parameter**

Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen fahrzeugspezifischen Parameter sind

- das Fahrzeuggewicht (Kap. 6.1),
- das Motormoment (Kap. 6.2),
- die Hinterachsübersetzung (Kap. 6.3) und
- das Schaltprogramm (Kap. 6.4).

Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen streckenspezifischen Parameter sind

- das Höhenprofil (Kap.6.5) und
- die Kurvigkeit (Kap.6.6).

In Kap. 6.7 werden die Einflüsse der Wunschgeschwindigkeit als fahrerspezifischer Einfluss erläutert. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Kap. 6.8 mit einer Aussage über die Zulässigkeit der Raffung zusammengefasst.

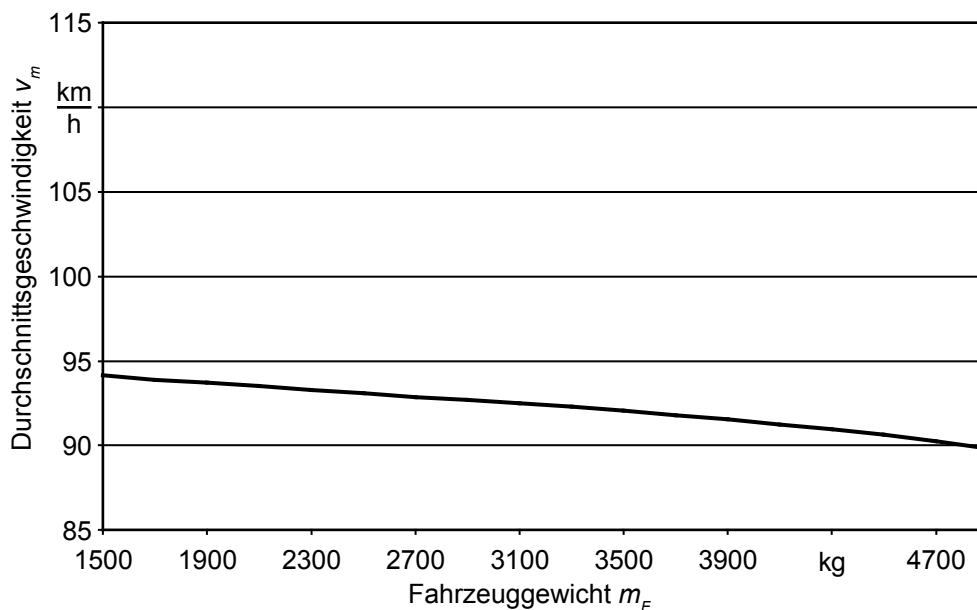


## 6.1 Fahrzeuggewicht

Der untersuchte fahrzeugspezifische Parameter Fahrzeuggewicht wurde, ausgehend von der Referenzkonfiguration mit einem Fahrzeuggewicht von 1500 kg, in Schritten von jeweils 200 kg bis zu 4900 kg variiert.

### 6.1.1 Durchschnittsgeschwindigkeit

In Bild 6.2 ist die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über dem Parameter Fahrzeuggewicht dargestellt.



**Bild 6.2:** Erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über dem Fahrzeuggewicht

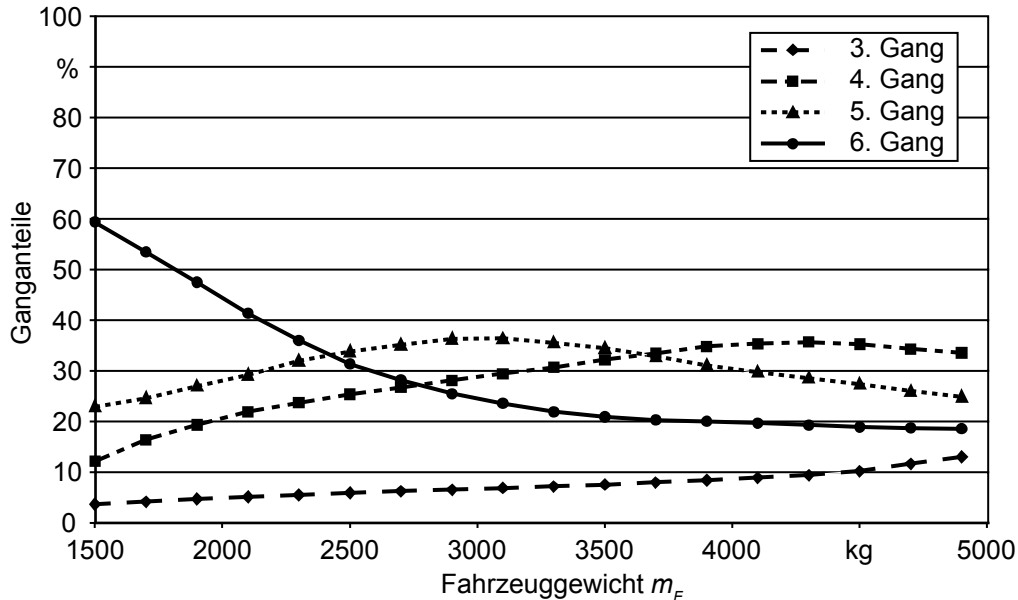
Ausgehend von einer Durchschnittsgeschwindigkeit der Referenzkonfiguration von ca. 94 km/h sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit mit steigendem Fahrzeuggewicht. Das Fahrzeuggewicht geht in die Fahrwiderstandsgleichung /44/

$$F_Z = m_F \left( a + g (f_R + \tan \alpha_{St}) \right) + \frac{1}{2} \rho_L c_W A_{quer} v^2$$

über den Steigungs-, den Beschleunigungs- und Rollwiderstand ein. Die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit beim maximalen, simulierten Fahrzeuggewicht von 4900 kg beträgt nur noch knapp 90 km/h. Die Wunschgeschwindigkeit und das Streckenprofil entsprechen bei allen Simulationen denen der Referenzkonfiguration.

### 6.1.2 Ganganteile

In Bild 6.3 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Gänge über dem Parameter Fahrzeuggewicht dargestellt.



**Bild 6.3:** Ganganteile über dem Fahrzeuggewicht

Die Anteile des 1. und 2. Gangs sind aufgrund des hohen Geschwindigkeitsniveaus auf der simulierten Landstraße sehr gering, sodass sie im Weiteren nicht beschrieben werden.

#### 3. Gang

Der Anteil des 3. Gangs steigt mit zunehmendem Fahrzeuggewicht. Durch den steigenden Beschleunigungswiderstand werden Anteile aus den höheren Gängen in den 3. Gang verschoben. Im Bereich von sehr hohen Fahrzeuggewichten steigt der Anteil des 3. Gangs stark, da durch den wachsenden Steigungswiderstand zusätzlich Anteile aus dem 4. Gang verlagert werden. Der Ganganteil steigt ausgehend von 4 % für die Referenzkonfiguration bis auf 13 % für ein Fahrzeuggewicht von 4900 kg.

#### 4. Gang

Der Anteil des 4. Gangs steigt mit zunehmendem Fahrzeuggewicht bis ca. 4300 kg stark. Durch den steigenden Fahrwiderstand werden vermehrt Anteile aus den höheren Gängen in den 4. Gang verlagert. Für Fahrzeuggewichte größer 4300 kg sinkt der Ganganteil leicht. In diesem Bereich sind die von den höheren Gängen hinzugewonnenen Anteile geringer als die in den 3. Gang abgegebenen Anteile. Durch den wachsenden Fahrwiderstand können hier Teile der Strecke nicht mehr im 4. Gang befahren werden. Der Anteil des 4. Gangs steigt von 12 % bis maximal 36 %.

#### 5. Gang

Mit zunehmendem Fahrzeuggewicht steigt der Anteil des 5. Gangs zunächst. Durch den steigenden Fahrwiderstand werden mehr Anteile aus dem 6. Gang hinzugewonnen als in

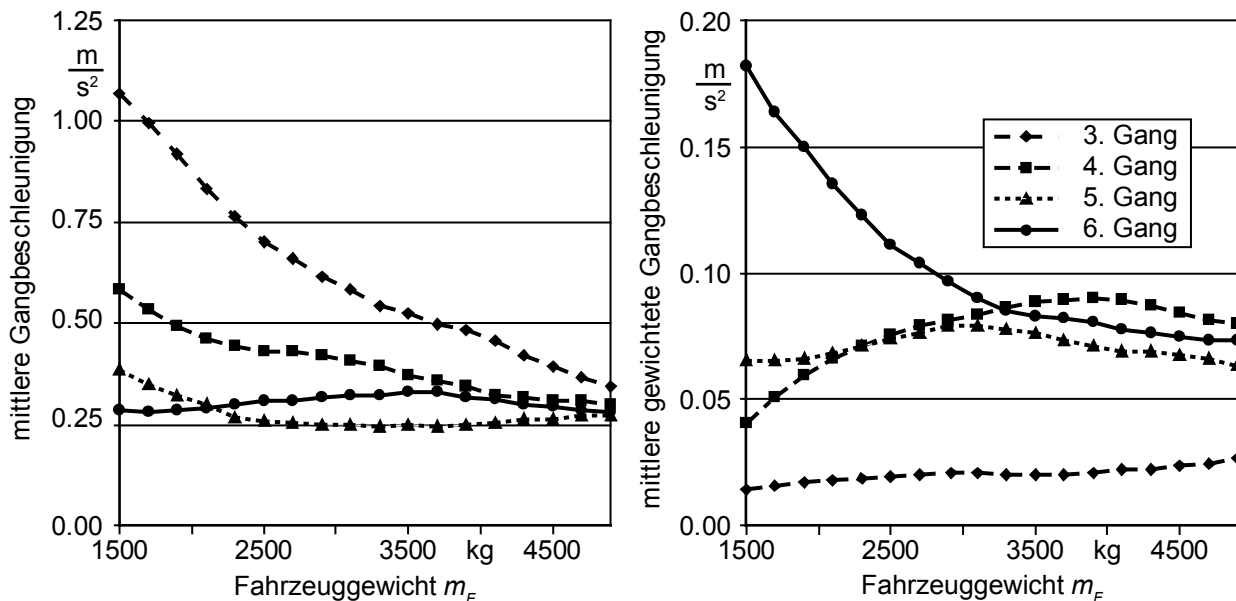
den 4. Gang abgegeben werden. Für Fahrzeuggewichte größer 3000 kg sinkt der Anteil des 5. Gangs wieder. In diesem Bereich nimmt der Fahrwiderstand sehr stark zu, sodass große Anteile in die unteren Gänge verschoben werden. Der Anteil des 5. Gangs steigt von 23 % für die Referenzkonfiguration auf maximal 36 %. Für ein Fahrzeuggewicht von 4900 kg beträgt der Ganganteil nur noch 25 %.

## 6. Gang

Der Anteil des 6. Gangs sinkt mit zunehmendem Fahrzeuggewicht stark. Die Abnahme ist im Bereich von geringen bis zu mittleren Fahrzeuggewichten sehr stark zu verzeichnen. In diesem Bereich wird die Fahrdynamik im 6. Gang durch das steigende Fahrzeuggewicht sehr stark beeinflusst. Im Bereich von mittleren bis sehr hohen Fahrzeuggewichten ist die Abnahme gering. Trotz steigender Fahrzeuggewichte werden weiterhin flachere Streckenanteile mit konstanter, hoher Geschwindigkeit oder Gefällstrecken im 6. Gang befahren. Der Anteil des 6. Gangs sinkt von 60 % für die Referenzkonfiguration auf 19 % für das maximale, simulierte Fahrzeuggewicht.

### 6.1.3 Gangbeschleunigungen

In Bild 6.4 sind die mittleren Beschleunigungen und die mittleren gewichteten Beschleunigungen über dem Parameter Fahrzeuggewicht dargestellt.



**Bild 6.4:** Mittlere Gangbeschleunigung und mittlere gewichtete Gangbeschleunigung über dem Fahrzeuggewicht

Auf die Beschreibung des 1. und 2. Gangs wird aufgrund der geringen Ganganteile im Weiteren verzichtet.

## 3. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang sinkt mit steigendem Fahrzeuggewicht stark. Der 3. Gang wird nahezu ausschließlich für Beschleunigungsvorgänge genutzt. Durch den steigenden Beschleunigungswiderstand und zusätzlichen Steigungswiderstand wird das Be-

schleunigungspotential stark eingeschränkt. Des Weiteren werden die Streckenanteile, die von höheren Gängen hinzugewonnen werden, mit geringeren Beschleunigungsvorgaben befahren, sodass die resultierende mittlere Beschleunigung sinkt.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 3. Gang steigt mit zunehmendem Fahrzeuggewicht. Der Rückgang der mittleren Beschleunigung wird durch die Zunahme der Ganganteile überkompensiert, sodass die mittlere gewichtete Beschleunigung ansteigt.

#### 4. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang sinkt mit steigendem Fahrzeuggewicht. Durch das steigende Fahrzeuggewicht erhöht sich der Beschleunigungs- und Steigungswiderstand. Dadurch wird das Beschleunigungspotential beschränkt. Zusätzlich werden Ganganteile aus höheren Gängen in den 4. Gang verschoben. Diese Anteile weisen eine geringere Beschleunigung auf. Sehr starke Beschleunigungen, die bei geringen Fahrzeuggewichten im 4. Gang gefahren werden können, werden bei hohen Fahrzeuggewichten in den 3. Gang verlagert. Dadurch sinkt die mittlere Beschleunigung im 4. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang steigt für zunehmende Fahrzeuggewichte bis ca. 3900 kg. Für sehr hohe Fahrzeuggewichte sinkt die mittlere gewichtete Beschleunigung wieder. Im Gegensatz dazu nimmt die mittlere Beschleunigung über den gesamten Bereich der Fahrzeuggewichte. Der Verlauf der mittleren gewichteten Beschleunigung wird durch den Verlauf des Ganganteils im 4. Gang bestimmt, der für Fahrzeuggewichte bis ca. 4300 kg steigt und danach wieder abfällt.

#### 5. Gang

Für Fahrzeuggewichte bis ca. 2500 kg sinkt die mittlere Beschleunigung im 5. Gang. Durch das höhere Fahrzeuggewicht wird das Beschleunigungspotential beschränkt. Zusätzlich werden Streckenanteile mit hohen bis sehr hohen Beschleunigungsvorgaben in den 4. Gang abgegeben und Anteile mit geringeren Beschleunigungsvorgaben aus dem 6. Gang hinzugewonnen. Durch den höheren Fahrwiderstand werden auch vermehrt Streckenanteile mit hoher, konstanter Geschwindigkeit anstatt im 6. im 5. Gang gefahren. Für Fahrzeuggewichte zwischen 2500 kg und 3900 kg verändert sich die mittlere Beschleunigung marginal. Durch die hohe Durchschnittsgeschwindigkeit liegt der Betriebsbereich des Getriebes hier im 5. Gang, sodass viele Beschleunigungen in diesem Gang ausgeführt werden müssen. Die Beschleunigungen auf Gefällstrecken können weiterhin mit großer Intensität erfolgen, da hier der höhere Beschleunigungswiderstand durch den geringeren Steigungswiderstand kompensiert wird. Für sehr hohe Fahrzeuggewichte steigt die mittlere Beschleunigung wieder leicht. Dies ist dadurch zu erklären, dass in diesem Bereich Steigungstrecken mit geringen Beschleunigungsvorgaben aber mit großer Steigung im 4. Gang gefahren werden müssen. Durch die Verlagerung der Streckenanteile mit geringer Beschleunigung aus dem 5. Gang heraus steigt die mittlere Beschleunigung im 5. Gang in diesem Bereich.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang steigt bis zu Fahrzeuggewichten von 2900 kg und sinkt danach wieder. Dieser Verlauf wird durch die Veränderung der Anteile des 5. Gangs bewirkt.

## 6. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang steigt bis zu Fahrzeuggewichten von 3700 kg. Das Beschleunigungspotential im 6. Gang ist sehr gering, sodass vor allem Streckenanteile mit geringen Beschleunigungen oder konstanter Geschwindigkeit im 6. Gang befahren werden. Höhere Beschleunigungswerte werden nur auf Gefällstrecken erzielt. Durch die steigenden Fahrzeuggewichte werden vermehrt Steigungsstrecken mit konstanter Geschwindigkeit bzw. Beschleunigungen in den 5. Gang verlagert. Gefällstrecken werden weiterhin im 6. Gang befahren. Durch die auf diesen Strecken erzielten, hohen Beschleunigungswerte steigt die mittlere Beschleunigung im 5. Gang. Für Fahrzeuggewichte größer 3700 kg sinkt die mittlere Beschleunigung wieder. Bei sehr hohen Fahrzeuggewichten steigen der Beschleunigungs- und der Steigungswiderstand ebenso stark. Durch diesen hohen Widerstand können nur noch sehr geringe Beschleunigungsvorgaben erfüllt werden. Alle höheren Beschleunigungswerte werden in die unteren Gänge verlagert, sodass die mittlere Beschleunigung im 6. Gang sinkt.

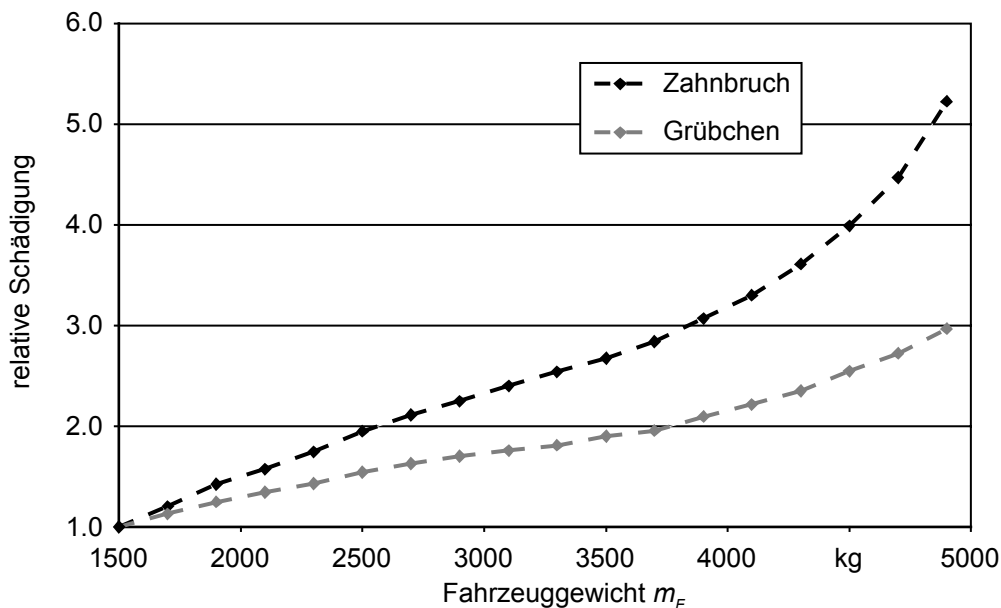
Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang sinkt über den gesamten Bereich der Fahrzeuggewichte. Dieser Effekt ist durch die geringe Änderung der mittleren Beschleunigung in Bezug auf den Anteil des 6. Gangs begründet.

### 6.1.4 Relative Schädigung

Im Folgenden werden die relativen Schädigungen, nach der in Kap. 5.7 beschriebenen Vorgehensweise, erläutert. Die relativen Schädigungen der Gänge 1 und 2 werden nicht betrachtet, da der Streckenanteil dieser Gänge sehr gering ausfällt.

#### 3. Gang

In Bild 6.5 sind die relativen Schädigungen des 3. Ganges für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Fahrzeuggewicht dargestellt.



**Bild 6.5:** Relative Schädigung des 3. Ganges über dem Fahrzeuggewicht

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung des 3. Ganges steigt mit zunehmendem Fahrzeuggewicht. Zum einen steigen die Anteile des 3. Ganges mit zunehmendem Fahrzeuggewicht. Zum anderen nehmen die für Beschleunigungen und Fahrten an Steigungen notwendigen Drehmomente zu. Höhere Drehmomente wirken stark schädigend. Im Bereich sehr hoher Fahrzeuggewichte ist durch den sehr stark ansteigenden Ganganteil ein sehr starker Anstieg der relativen Schädigung zu verzeichnen. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 3,0 wird bei einem Fahrzeuggewicht von 4900 kg erreicht.

#### Zahnbruch

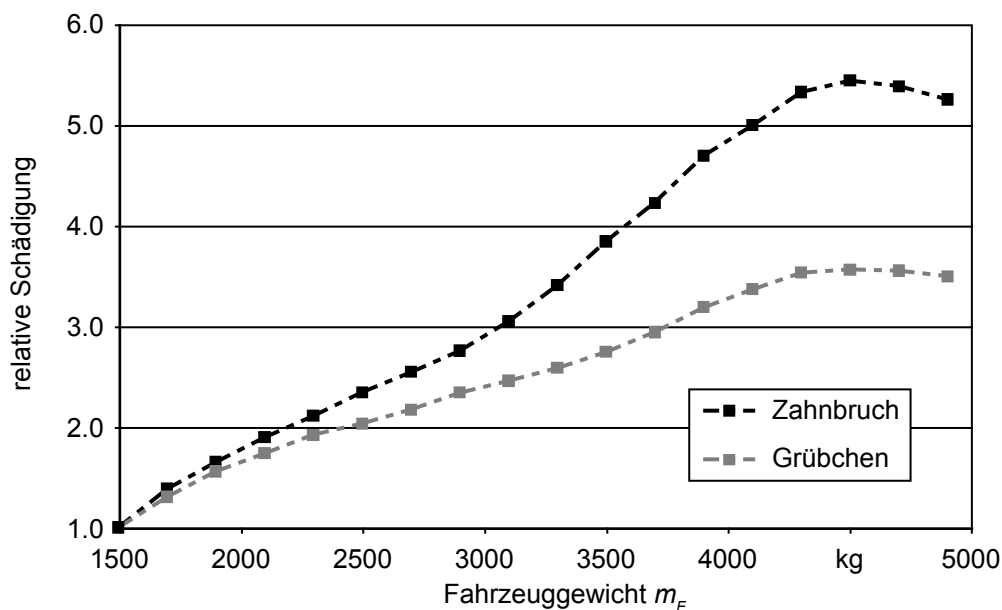
Die relative Zahnbruchschiädigung im 3. Gang zeigt einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf zur relativen Grübchenschädigung im 3. Gang. Die Werte für Zahnbruch liegen dabei aber stets über denen für Grübchenbildung. Die maximale relative Zahnbruchschiädigung von ca. 5,2 wird ebenfalls bei einem Fahrzeuggewicht von 4900 kg erreicht.

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang nimmt über dem gesamten Bereich der Fahrzeuggewichte ab. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 3. Gang und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung zeigt einen tendenziell ähnlichen Verlauf wie die relativen Schädigungen. Es besteht somit ein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 3. Gang und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

#### 4. Gang

In Bild 6.6 sind die relativen Schädigungen des 4. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Fahrzeuggewicht dargestellt.



**Bild 6.6: Relative Schädigung des 4. Gangs über dem Fahrzeuggewicht**

##### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 4. Gang steigt von der Referenzkonfiguration bis zu einem Fahrzeuggewicht von 4500 kg. Für noch höhere Fahrzeuggewichte sinkt die relative Grübchenschädigung wieder. Die Anteile des 4. Gangs steigen mit zunehmendem Gewicht bis 4300 kg. Das äquivalente Lastmoment bleibt in diesem Bereich über dem Fahrzeuggewicht nahezu konstant. Für noch höhere Fahrzeuggewichte steigt das äquivalente Lastmoment leicht, der Ganganteil sinkt dagegen stärker. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 3,6 liegt bei einem Fahrzeuggewicht von 4300 kg.

##### Zahnbruch

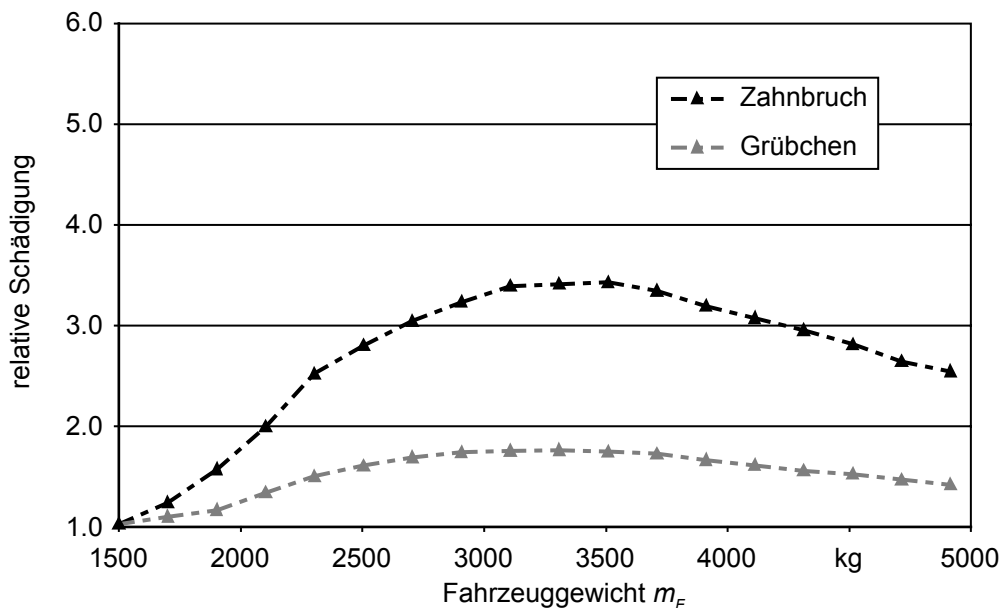
Die relative Zahnbruchschiädigung im 4. Gang zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf wie bei der relativen Grübchenschädigung. Die Werte der relativen Zahnbruchschiädigung liegen aber bei allen Fahrzeuggewichten deutlich über denen der relativen Grübchenschädigung. Die maximale relative Zahnbruchschiädigung von ca. 5,5 wird bei einem Fahrzeuggewicht von 4500 kg erreicht.

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang sinkt über den gesamten Bereich des Fahrzeuggewichts, sodass kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung und den relativen Schädigungen zu erkennen ist.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf zu denen der relativen Schädigungen, sodass ein klarer Zusammenhang zu erkennen ist.

## 5. Gang

In Bild 6.7 sind die relativen Schädigungen des 5. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Fahrzeuggewicht dargestellt.



**Bild 6.7: Relative Schädigung des 5. Gangs über dem Fahrzeuggewicht**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung steigt im 5. Gang von der Referenzkonfiguration ausgehend bis zu einem Fahrzeuggewicht von 3300 kg. Für noch höhere Fahrzeuggewichte sinkt die relative Schädigung wieder. Der Verlauf der relativen Schädigung folgt dem Verlauf des Anteils des 3. Gangs. Das äquivalente Lastmoment bleibt über den gesamten Bereich des Fahrzeuggewichts nahezu unverändert. Die relative Schädigung erreicht bei einem Fahrzeuggewicht von 3300 kg den maximalen Wert von ca. 1,7.

### Zahnbruch

Der Verlauf der relativen Zahnbruchschädigung im 5. Gang verläuft qualitativ sehr ähnlich zum Verlauf der relativen Grübchenschädigung. Die Werte für Zahnbruch liegen dabei stets höher als für Grübchenbildung. Den maximalen Wert von ca. 3,4 erreicht die relative Zahnbruchschädigung bei einem Fahrzeuggewicht von 3500 kg.

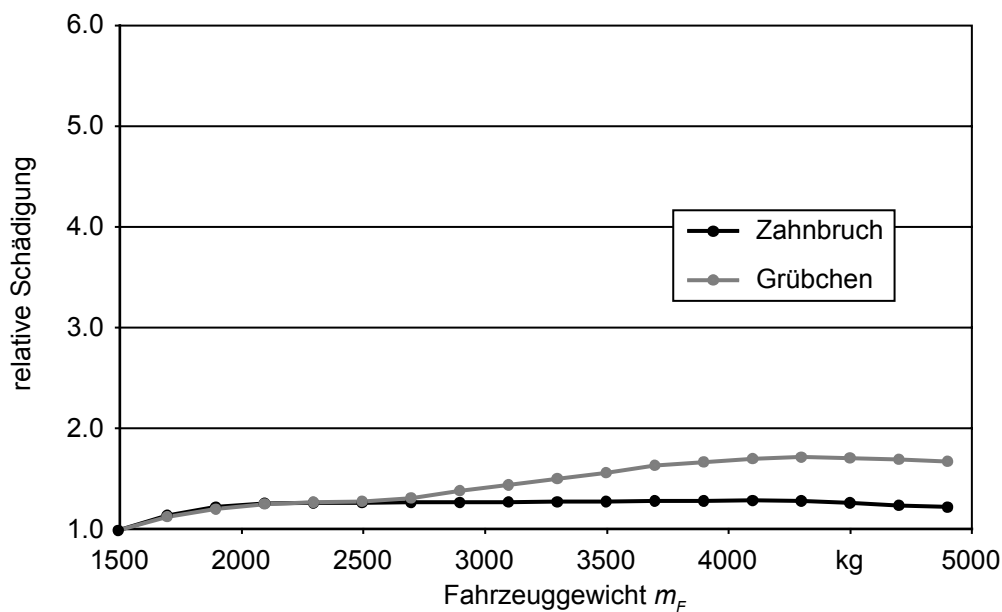
Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang sinkt bis zu einem Fahrzeuggewicht von 3300 kg, um danach wieder anzusteigen. Der Verlauf ist somit gegenläufig zu den relativen Schädigungen im 5. Gang. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 5. Gang und den relativen Schädigungen im 5. Gang.



Die mittlere gewichtete Beschleunigung steigt vom Referenzgewicht bis zu einem Fahrzeuggewicht von 3100 kg und fällt danach wieder. Der Verlauf der relativen Schädigungen und der mittleren gewichteten Beschleunigung ist ähnlich und somit besteht ein Zusammenhang zwischen den relativen Schädigungen im 5. Gang und der mittleren gewichteten Beschleunigung im 5. Gang.

## 6. Gang

In Bild 6.8 sind die relativen Schädigungen des 6. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Fahrzeuggewicht dargestellt.



**Bild 6.8:** Relative Schädigung des 6. Gangs über dem Fahrzeuggewicht

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 6. Gang steigt mit dem Fahrzeuggewicht bis zu sehr hohen Fahrzeuggewichten von 4300 kg leicht. Für darüber hinausgehende Fahrzeuggewichte sinkt die relative Schädigung wieder leicht. Das äquivalente Lastmoment steigt über den gesamten Bereich des Fahrzeuggewichts. Dies wird aber durch den sehr starken Rückgang der Ganganteile fast kompensiert, sodass nur eine geringe Zunahme der relativen Schädigung zu verzeichnen ist. Das Maximum der relativen Schädigung bei einem Fahrzeuggewicht von 4300 kg erreicht einen Wert von ca. 1,7.

### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschiädigung im 6. Gang steigt mit zunehmendem Fahrzeuggewicht bis zu einem Gewicht von 4100 kg leicht. Für Fahrzeuggewichte über 4100 kg sinkt die relative Schädigung wieder leicht. Die relative Zahnbruchschiädigung liegt in allen Bereichen deutlich unter den Werten der relativen Grübchenschädigung. In einem weiten Bereich von 2100 bis 4300 kg bleibt die relative Zahnbruchschiädigung nahezu konstant. Die maximale relative Schädigung von 1,3 ist bei einem Fahrzeuggewicht von 4100 kg erreicht.









Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang steigt bis zu einem Fahrzeuggewicht von 3500 kg und sinkt danach wieder. Der Verlauf der mittleren Beschleunigung stimmt nur sehr bedingt mit den Verläufen der relativen Schädigungen überein.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang sinkt über den gesamten Bereich des Fahrzeuggewichts. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang.

### 6.1.5 Fazit

In Tabelle 6 sind die Einflüsse des Fahrzeuggewichts qualitativ und quantitativ aufgeführt.

**Tabelle 6: Einfluss des Fahrzeuggewichts**

	Grübchen		Zahnbruch	
3. Gang		3,0		5,2
4. Gang		3,6		5,5
5. Gang		1,7		3,4
6. Gang		1,7		1,3

Für den 3. bis 5. Gang ist der Wert der relativen Zahnbruchschiidigung immer höher als die relative Grübchenschädigung. Abweichend davon ist im 6. Gang die relative Grübchenschädigung höher. Tendenziell sind die Verläufe der relativen Schädigung innerhalb eines Gangs sehr ähnlich. Die Gänge untereinander sind nicht vergleichbar. Quantitativ ist die Schädigung in den Gängen 3 und 4 höher als in den Gängen 5 und 6.

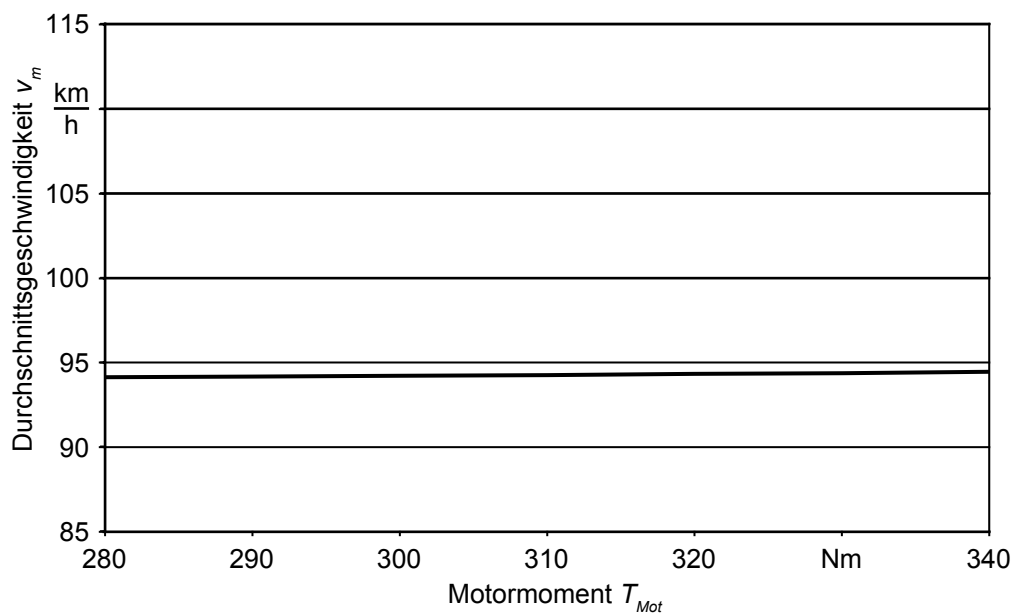
Der Parameter Fahrzeuggewicht kann nur zur Raffung des 6. Gangs herangezogen werden, da nur im 6. Gang die relative Grübchenschädigung höher als die relative Zahnbruchschiidigung ist.

## 6.2 Motorisierung

Ausgehend von der Referenzmotorisierung mit einem Motormoment von 280 Nm wurde das Motormoment in Schritten von 10 Nm bis auf 340 Nm angehoben.

### 6.2.1 Durchschnittsgeschwindigkeit

In Bild 6.9 ist die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über dem Parameter Motormoment dargestellt.

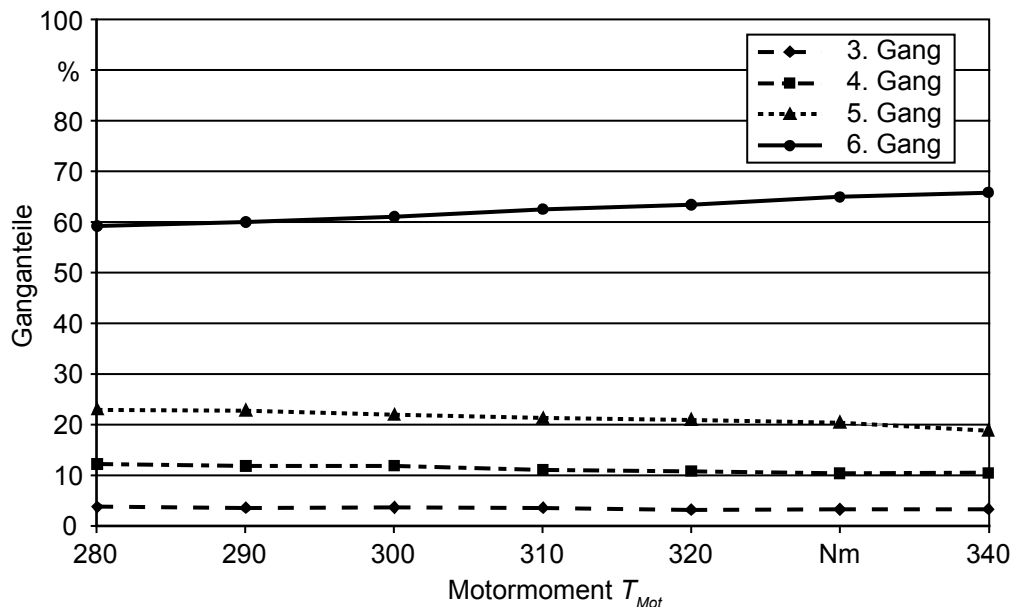


**Bild 6.9:** Erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über dem Motormoment

Die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit der Referenzkonfiguration von ca. 94 km/h steigt mit zunehmendem Motormoment nur marginal. Das zu fahrende Geschwindigkeitsprofil wird nicht durch das Fahrzeug sondern durch die Wunschgeschwindigkeit und den Fahrstil bestimmt. Da der Fahrstil als mäßig aggressiv eingestuft werden kann, ist schon die Referenzkonfiguration ausreichend motorisiert. Die Wunschgeschwindigkeit und das Streckenprofil entsprechen bei allen Simulationen denen der Referenzkonfiguration.

### 6.2.2 Ganganteile

In Bild 6.10 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Gänge über dem Parameter Motormoment dargestellt.



**Bild 6.10: Ganganteile über dem Motormoment**

Die Anteile des 1. und 2. Gangs sind aufgrund des hohen Geschwindigkeitsniveaus auf der simulierten Landstraße sehr gering, sodass sie im Weiteren nicht beschrieben werden.

#### 3. Gang

Der Anteil des 3. Gangs nimmt mit steigendem Motormoment leicht ab, da Steigungen und Beschleunigungsvorgänge in höheren Gängen ausgeführt werden können, sodass weniger in den 3. Gang zurück geschaltet wird und Anteile in die höheren Gänge verschoben werden. Ausgehend von einem Ganganteil der Referenzkonfiguration mit ca. 4 % sinkt der Ganganteil für die maximale Motorisierung auf ca. 3 %.

#### 4. Gang

Der Anteil des 4. Gangs sinkt mit zunehmendem Motormoment. Wie auch beim 3. Gang muss durch das höhere Motormoment seltener zurück geschaltet werden. Dadurch werden Anteile in die höheren Gänge verschoben. Ausgehend von einem Ganganteil von ca. 12 % sinkt der Anteil für die maximale Motorisierung auf ca. 10 %.

#### 5. Gang

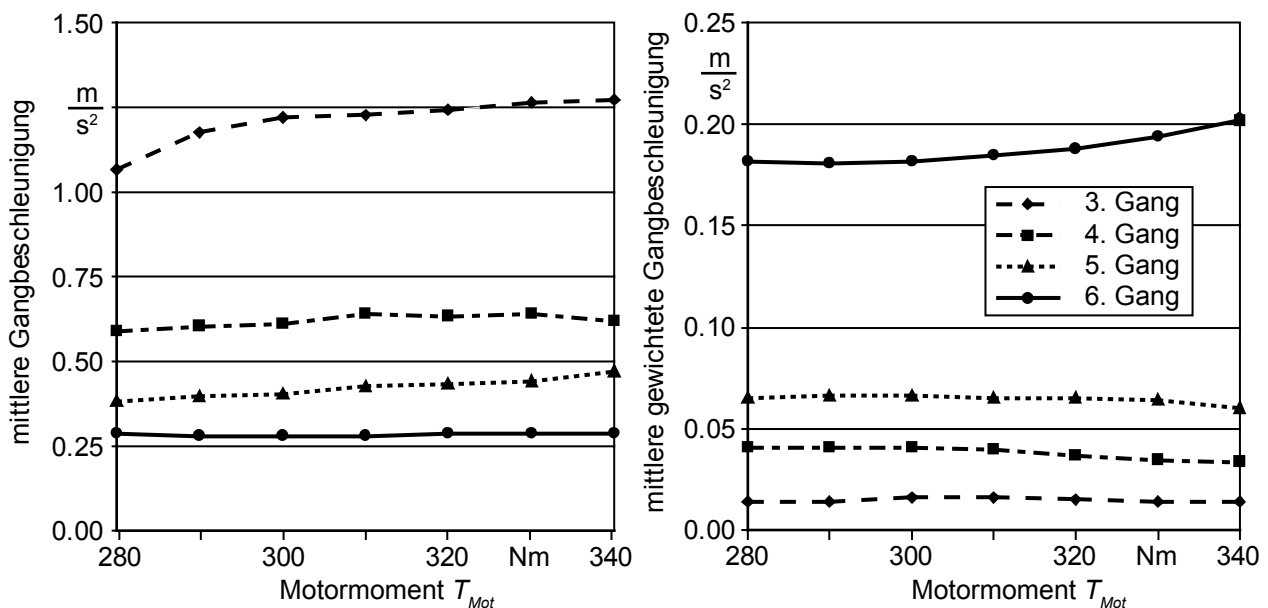
Der Anteil des 5. Gangs sinkt ebenfalls mit zunehmendem Motormoment. Wie auch bei den Gängen 3 und 4 muss seltener zurück geschaltet werden, dadurch sinkt der Anteil des 5. Gangs von ca. 23 % auf ca. 19 %.

## 6. Gang

Der Anteil des 6. Gangs steigt mit zunehmendem Motormoment. Durch das höhere Motormoment können vermehrt Steigungen und Beschleunigungsvorgänge im 6. Gang ausgeführt werden. Dadurch steigt der Ganganteil von ca. 60 % auf ca. 66 % für die höchste Motorisierung.

### 6.2.3 Gangbeschleunigungen

In Bild 6.11 sind die mittleren Beschleunigungen und die mittleren gewichteten Beschleunigungen der einzelnen Gänge über dem Parameter Motormoment dargestellt.



**Bild 6.11: Mittlere Gangbeschleunigung und mittlere gewichtete Gangbeschleunigung über dem Motormoment**

Auf die Beschreibung des 1. und 2. Gangs wird aufgrund der geringen Ganganteile im Weiteren verzichtet.

## 3. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment über den gesamten Bereich. Der 3. Gang wird nahezu ausschließlich für Beschleunigungsvorgänge benutzt. Durch das höhere Motormoment verbessern sich das Beschleunigungsvermögen und damit auch die mittlere Beschleunigung. Die Beschleunigungsvorgänge werden kürzer und intensiver. Dadurch kann schneller hochgeschaltet werden.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 3. Gang steigt bis zu einem Motormoment von 310 Nm leicht um danach wieder leicht zu sinken. Im Bereich bis 310 Nm überwiegt der Einfluss der steigenden mittleren Beschleunigung, für höhere Motormomente überwiegt der Einfluss der sinkenden Ganganteile.

#### 4. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang steigt bis zu einem Motormoment von 330 Nm. Für noch höhere Motormomente sinkt die mittlere Beschleunigung wieder leicht. Durch das höhere Motormoment steigt das Beschleunigungspotential und somit die mittlere Beschleunigung. Die Beschleunigungsvorgänge werden kürzer und intensiver. Dadurch kann schneller hochgeschaltet werden. Bei sehr hohen Motormomenten werden Anteile mit intensiven Beschleunigungen bei hohen Geschwindigkeiten vermehrt im 5. Gang gefahren, sodass die mittlere Beschleunigung im 4. Gang sinkt.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang sinkt über den gesamten Bereich des Motormoments. Der sinkende Ganganteil überkompensiert den Einfluss der steigenden mittleren Beschleunigung.

#### 5. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang steigt über den gesamten Bereich des Motormoments. Durch das steigende Motormoment nimmt das Beschleunigungspotential im 5. Gang zu. Die Beschleunigungsphasen werden intensiver und kürzer. Dadurch kann schneller hochgeschaltet werden.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang sinkt über den gesamten Bereich des Motormoments. Der Einfluss des sinkenden Ganganteils überkompensiert die Steigerung der mittleren Beschleunigung im 5. Gang.

#### 6. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang bleibt über den gesamten Bereich des Motormoments nahezu konstant. Einerseits wird das Beschleunigungspotential mit steigendem Motormoment größer, andererseits wird durch das gestiegene Beschleunigungspotential früher in den 6. Gang geschaltet. Somit werden die Beschleunigungen zwar intensiver, dafür werden die Anteile mit konstanter Geschwindigkeit ebenfalls größer.

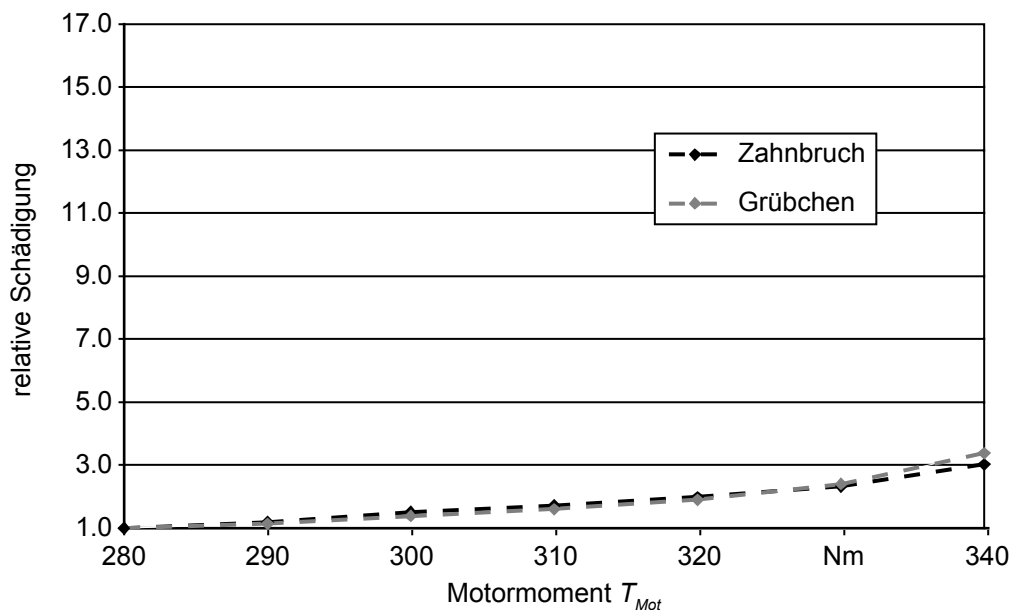
Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment. Die mittlere Beschleunigung bleibt nahezu konstant, aber der Ganganteil nimmt zu.

### 6.2.4 Relative Schädigung

Im Folgenden werden die relativen Schädigungen, nach der in Kap. 5.7 beschriebenen Vorgehensweise, erläutert. Die relativen Schädigungen der Gänge 1 und 2 werden nicht betrachtet, da der Streckenanteil dieser Gänge sehr gering ausfällt.

#### 3. Gang

In Bild 6.12 sind die relativen Schädigungen des 3. Ganges für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Motormoment dargestellt.



**Bild 6.12: Relative Schädigung des 3. Ganges über dem Motormoment**

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 3. Gang steigt über den gesamten Bereich des Motormoments. Durch das erhöhte Motormoment wird früher hochgeschaltet und die geforderte Leistung bei geringerer Drehzahl und höherem Moment erzeugt. Die maximale relative Grübchenschädigung im 3. Gang ist ca. 3,4 bei einem Motormoment von 340 Nm.

#### Zahnbruch

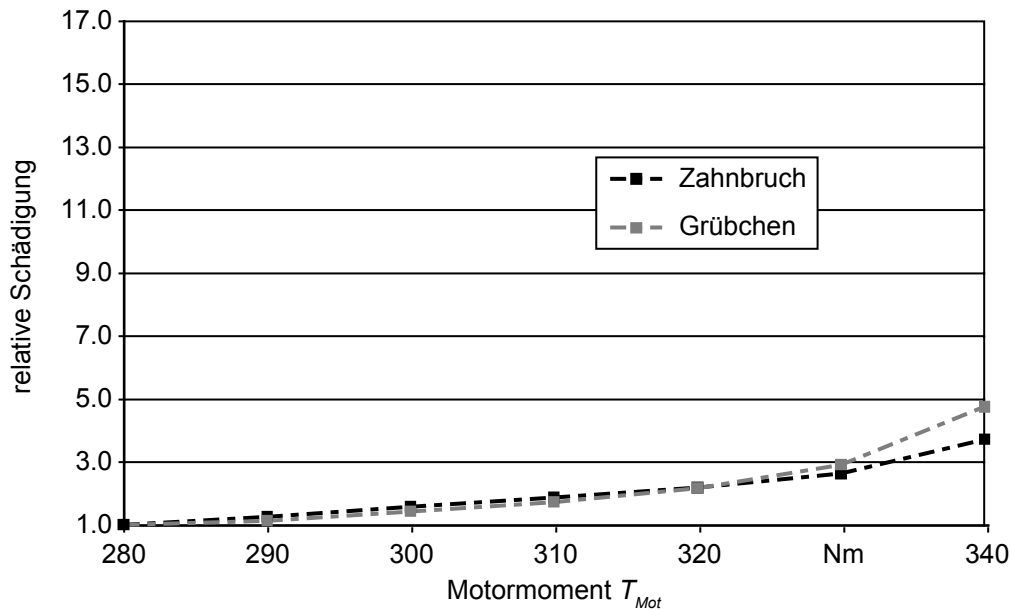
Die relative Zahnbruchschiädigung im 3. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment. Die maximale relative Zahnbruchschiädigung wird bei einem Motormoment von 340 Nm mit ca. 3,0 erreicht. Die relative Zahnbruchschiädigung liegt bis zu einem Motormoment von 320 Nm leicht über der relativen Grübchenschädigung. Für höhere Momente liegt die relative Zahnbruchschiädigung unterhalb der relativen Grübchenschädigung.

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment. Entgegen der relativen Schädigung verzeichnet die mittlere Beschleunigung bei geringen Motormomenten die größte Änderung. Somit besteht nur ein bedingter Zusammenhang zwischen mittlerer Beschleunigung und relativer Schädigung.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung hat ein Maximum bei mittleren Motormomenten. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

#### 4. Gang

In Bild 6.13 sind die relativen Schädigungen des 4. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Motormoment dargestellt



**Bild 6.13: Relative Schädigung des 4. Gangs über dem Motormoment**

##### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 4. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment. Durch das erhöhte Motormoment wird früher hochgeschaltet und die geforderte Leistung bei geringerer Drehzahl und höherem Moment erzeugt. Die maximale relative Grübchenschädigung im 4. Gang ist ca. 4,7 bei einem Motormoment von 340 Nm.

##### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschiädigung im 4. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment. Die maximale relative Zahnbruchschiädigung wird bei einem Motormoment von 340 Nm mit ca. 3,7 erreicht. Die relative Zahnbruchschiädigung liegt bis zu einem Motormoment von 320 Nm leicht über der relativen Grübchenschädigung. Für höhere Momente liegt die relative Zahnbruchschiädigung unterhalb der relativen Grübchenschädigung.

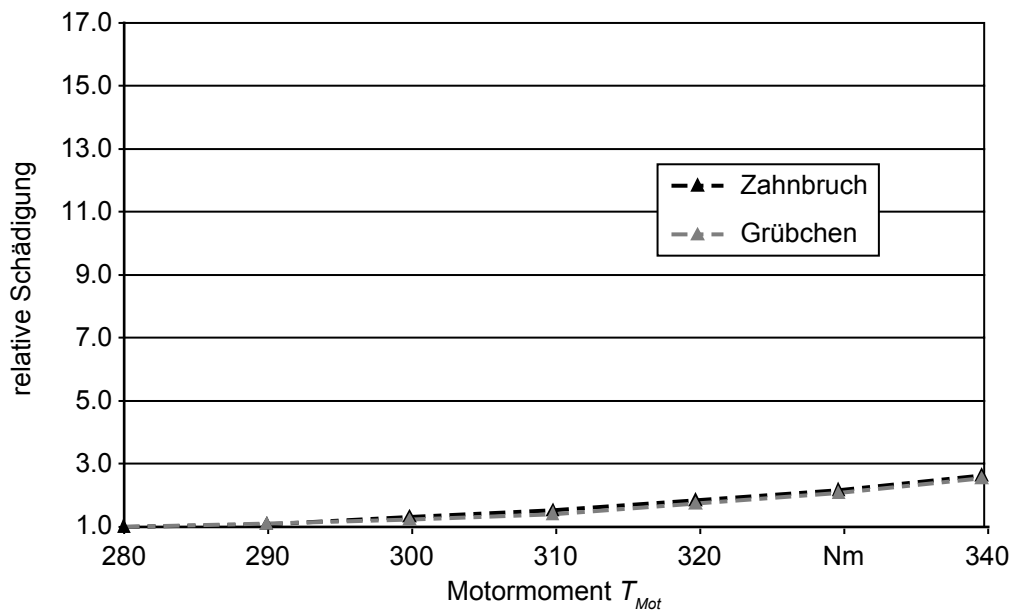
Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang steigt bis zu hohen Motormomenten und sinkt für sehr hohe Motormomente wieder leicht. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung und den relativen Schädigungen.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang sinkt mit steigendem Motormoment. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung und den relativen Schädigungen.



## 5. Gang

In Bild 6.14 sind die relativen Schädigungen des 5. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Motormoment dargestellt.



**Bild 6.14: Relative Schädigung des 5. Gangs über dem Motormoment**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 5. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment. Durch das erhöhte Motormoment wird früher hochgeschaltet und die geforderte Leistung bei geringerer Drehzahl und höherem Moment erzeugt. Die maximale relative Grübchenschädigung im 5. Gang ist ca. 2,5 bei einem Motormoment von 340 Nm.

### Zahnbruch

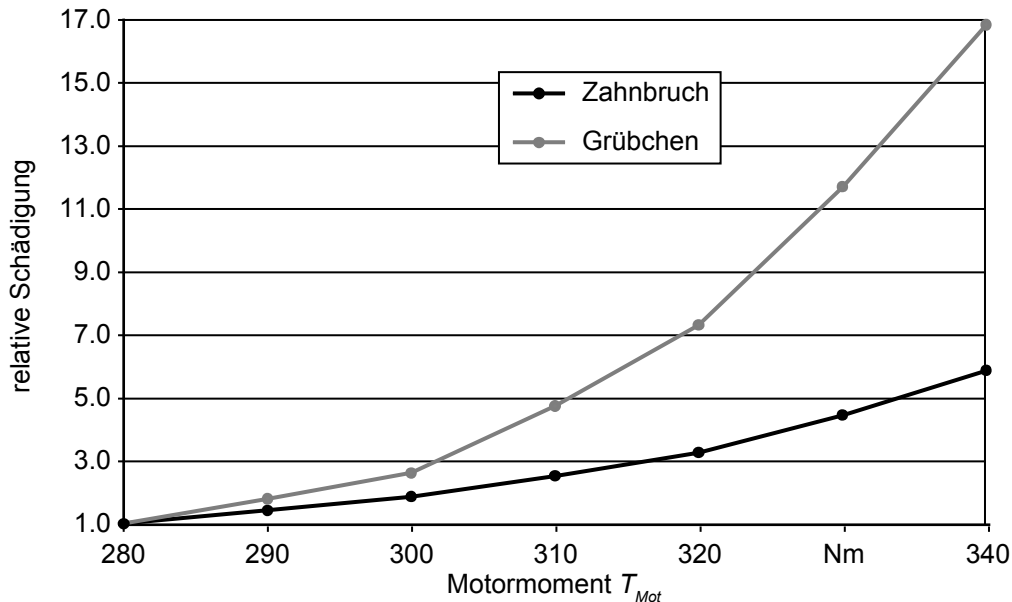
Die relative Zahnbruchschiädigung im 5. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment. Die maximale relative Zahnbruchschiädigung wird bei einem Motormoment von 340 Nm mit ca. 2,6 erreicht. Die relative Zahnbruchschiädigung liegt im 5. Gang immer leicht über der relativen Grübchenschädigung.

Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment. Die mittlere Beschleunigung nimmt dabei für steigende Motormomente wie die relativen Schädigungen progressiv zu. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung und den relativen Schädigungen im 5. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang nimmt mit steigendem Motormoment leicht ab. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung und den relativen Schädigungen im 5. Gang.

## 6. Gang

In Bild 6.15 sind die relativen Schädigungen des 6. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Motormoment dargestellt.



**Bild 6.15: Relative Schädigung des 6. Gangs über dem Motormoment**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 6. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment. Durch das erhöhte Motormoment wird später heruntergeschaltet und die geforderte Leistung bei geringerer Drehzahl und höherem Moment erzeugt. Der 6. Gang wird länger gehalten, da mehr Steigungen und Beschleunigungen im 6. Gang gefahren werden können. Die maximale relative Grübchenschädigung im 6. Gang ist ca. 16,8 bei einem Motormoment von 340 Nm.

### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschiidigung im 6. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment. Die maximale relative Zahnbruchschiidigung wird bei einem Motormoment von 340 Nm mit ca. 5,9 erreicht. Die relative Zahnbruchschiidigung liegt im 6. Gang immer deutlich unter der relativen Grübchenschädigung.











Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang bleibt mit steigendem Motormoment nahezu konstant. Somit besteht zwischen der mittlerem Beschleunigung und den relativen Schädigungen kein Zusammenhang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmendem Motormoment leicht progressiv. Somit besteht ein klarer Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung und den relativen Schädigungen.

### 6.2.5 Fazit

In Tabelle 7 sind die Einflüsse des Motormoments qualitativ und quantitativ aufgeführt.

**Tabelle 7: Einfluss des Motormoments**

	Grübchen		Zahnbruch	
				
3. Gang		3,4		3,0
4. Gang		4,7		3,7
5. Gang		2,5		2,6
6. Gang		16,8		5,9

Die relativen Schädigungen aller Gänge für beide Schädigungsmechanismen zeigen einen progressiven Verlauf der Schädigung. Für die Gänge 3 und 4 liegt die relative Grübchenschädigung immer im Bereich der relativen Zahnbruchschädigung. Die relative Grübchenschädigung des 6. Ganges liegt immer weit über der relativen Zahnbruchschädigung. Die Verläufe der relativen Schädigungen der einzelnen Gänge sind qualitativ vergleichbar. Quantitativ unterscheidet sich der 6. Gang deutlich von den unteren Gängen. Die Verläufe der relativen Schädigungen für die beiden Schädigungsmechanismen sind innerhalb eines Ganges qualitativ sehr ähnlich.

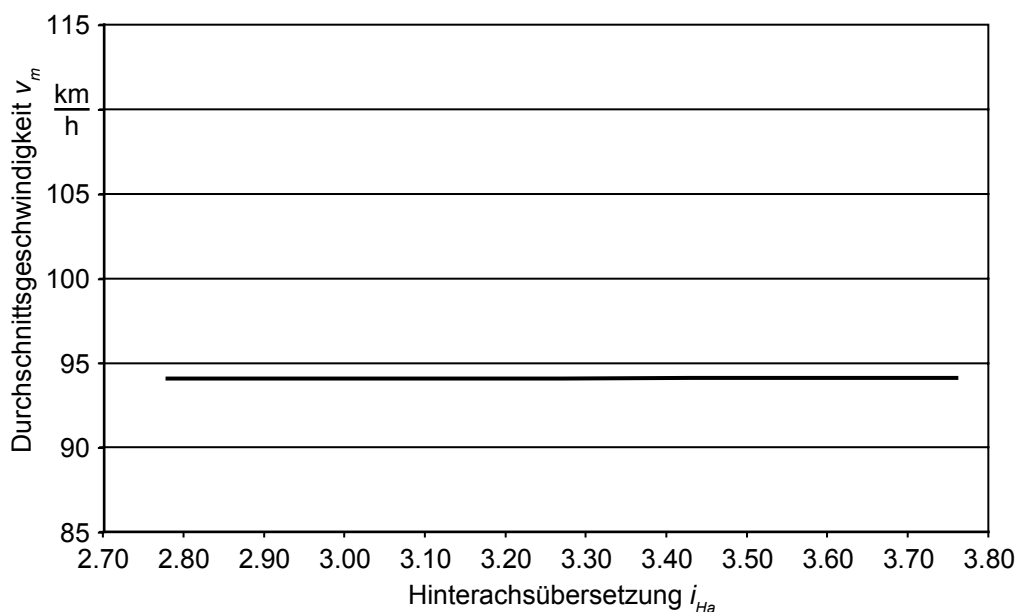
Zur Raffung eignet sich somit der Parameter Motormoment definitiv für die Gänge 3, 4 und 6, da hier die relativen Grübchenschädigungen über denen der relativen Zahnbruchschädigungen liegen. Für den 5. Gang müssen die absoluten Schädigungen betrachtet werden, da hier die relative Zahnbruchschädigung leicht über der relativen Grübchenschädigung liegt. Somit besteht unter Umständen die Möglichkeit der Raffung mit dem Parameter Motormoment für das gesamte Getriebe im Versuch.

### 6.3 Hinterachsübersetzung

Ausgehend von der Referenzkonfiguration mit einer Hinterachsübersetzung  $i_{Ha} = 3,27$  wurden jeweils drei Konfigurationen mit einer längeren Hinterachsübersetzung und einer kürzeren Hinterachsübersetzung untersucht.

#### 6.3.1 Durchschnittsgeschwindigkeit

In Bild 6.16 ist die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über dem Parameter Hinterachsübersetzung dargestellt.

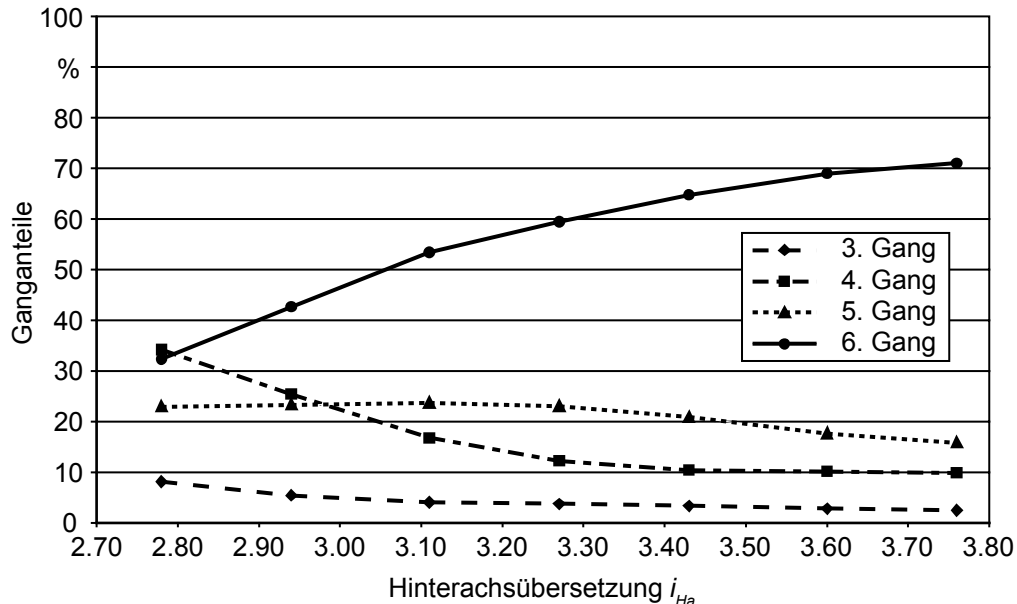


**Bild 6.16: Erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über der Hinterachsübersetzung**

Die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit ist von der gewählten Hinterachsübersetzung nahezu unabhängig. Die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt bei allen untersuchten Varianten ca. 94 km/h. Das zu fahrende Geschwindigkeitsprofil wird nicht durch das Fahrzeug, sondern durch die Wunschgeschwindigkeit und den Fahrstil bestimmt. Da der Fahrstil als mäßig aggressiv eingestuft werden kann, ist das Beschleunigungspotential aller Konfigurationen ausreichend. Die Wunschgeschwindigkeit und das Streckenprofil entsprechen bei allen Simulationen denen der Referenzkonfiguration.

### 6.3.2 Ganganteile

In Bild 6.17 sind die Anteile der einzelnen Gänge in Abhängigkeit des Parameters Hinterachsübersetzung dargestellt.



**Bild 6.17: Ganganteile über der Hinterachsübersetzung**

Die Anteile des 1. und 2. Gangs sind aufgrund des hohen Geschwindigkeitsniveaus auf der simulierten Landstraße sehr gering, sodass sie im Weiteren nicht beschrieben werden.

#### 3. Gang

Der Anteil des 3. Gangs sinkt mit steigender Hinterachsübersetzung. Durch die höhere Übersetzung  $i_{Ha} > i_{Ha,ref}$  steigt die Motordrehzahl, sodass seltener zurück geschaltet wird. Bei den längeren Hinterachsübersetzungen  $i_{Ha} < i_{Ha,ref}$  muss häufiger zurück geschaltet werden, um dem Beschleunigungswunsch folgen zu können. Für sehr hohe Hinterachsübersetzungen ist die Abnahme des Ganganteils geringer, da bei diesen Übersetzungen der 3. Gang nicht für das hohe Geschwindigkeitsprofil der Strecke ausgelegt ist. Der Ganganteil sinkt von ca. 8 % für  $i_{Ha} = 2,78$  auf ca. 2 % für  $i_{Ha} = 3,76$ .

#### 4. Gang

Der Anteil des 4. Gangs nimmt mit steigender Hinterachsübersetzung aus den gleichen Gründen wie im 3. Gang ab. Ebenfalls ist die Abnahme des Ganganteils für hohe bis sehr hohe Hinterachsübersetzungen geringer. Der Anteil des 4. Gangs sinkt von ca. 34 % für  $i_{Ha} = 2,78$  auf ca. 10 % für  $i_{Ha} = 3,76$ .

#### 5. Gang

Der Anteil des 5. Gangs steigt von sehr kleinen Hinterachsübersetzungen ausgehend bis zu einer Übersetzung von  $i_{Ha} = 3,11$  leicht. Für höhere Übersetzungen ist dann eine deutliche Abnahme des Ganganteils zu verzeichnen. Mit steigender Hinterachsübersetzung können

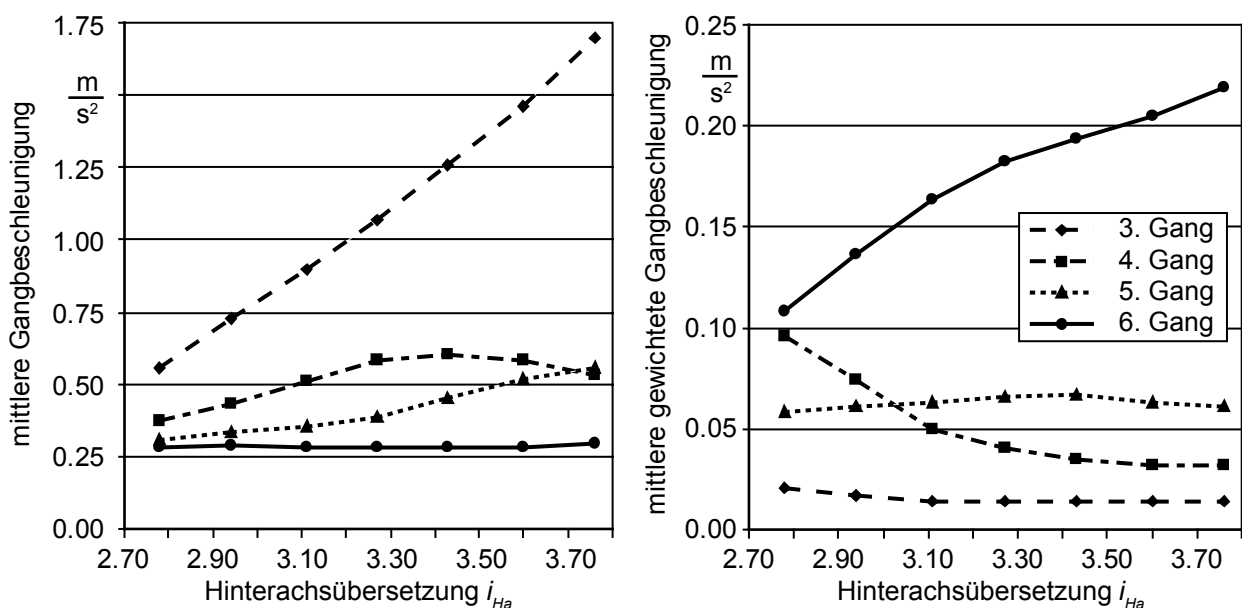
größere Anteile in höheren Gängen gefahren werden. Der 5. Gang bekommt dadurch Anteile der unteren Gänge hinzu, gibt aber seinerseits Anteile an den 6. Gang ab. Für Hinterachsübersetzungen größer 3,11 sind die Anteile aus den unteren Gängen geringer als die an den 6. Gang abgegebenen. Der Anteil des 5. Gangs sinkt von ca. 23 % für  $i_{Ha} = 2,78$  auf ca. 16 % für  $i_{Ha} = 3,76$ .

## 6. Gang

Der Anteil des 6. Gangs steigt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Durch die höhere Hinterachsübersetzung steigt das Drehzahlniveau des Motors, sodass zum einen das Beschleunigungspotential im 6. Gang steigt. Zum anderen werden auch Streckenanteile mit geringerer, konstanter Geschwindigkeit durch die steigende Motordrehzahl im 6. Gang gefahren. Der Anteil des 6. Gangs steigt von ca. 32 % für  $i_{Ha} = 2,78$  auf ca. 71 % für  $i_{Ha} = 3,76$ .

### 6.3.3 Gangbeschleunigungen

In Bild 6.18 sind die mittleren Beschleunigungen und die mittleren gewichteten Beschleunigungen der einzelnen Gänge über dem Parameter Hinterachsübersetzung dargestellt.



**Bild 6.18: Mittlere Gangbeschleunigung und mittlere gewichtete Gangbeschleunigung über der Hinterachsübersetzung**

Auf die Beschreibung des 1. und 2. Gangs wird aufgrund der geringen Ganganteile im Weiteren verzichtet.

## 3. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang steigt mit zunehmender Hinterachsübersetzung sehr stark. Die größere Übersetzung bedingt eine höhere Motordrehzahl mit einem größeren Beschleunigungspotential. Der 3. Gang wird nahezu ausschließlich für Beschleunigungsvorgänge genutzt, sodass die mittlere Beschleunigung mit dem Beschleunigungspotential steigt.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 3. Gang sinkt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Die steigende mittlere Beschleunigung wird durch den sinkenden Ganganteil überkompensiert.

#### 4. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang steigt bis zu einer Hinterachsübersetzung von 3,43. Für höhere Übersetzungen sinkt die mittlere Beschleunigung. Mit zunehmender Hinterachsübersetzung steigt das Beschleunigungspotential im 4. Gang. Dadurch steigt die mittlere Beschleunigung zunächst, da bei niedrigen Hinterachsübersetzungen der 4. Gang nahezu ausschließlich für Beschleunigungsvorgänge genutzt wird. Bei sehr großen Hinterachsübersetzungen werden Beschleunigungen vermehrt im 5. Gang ausgeführt, sodass die mittlere Beschleunigung im 4. Gang wieder absinkt.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang sinkt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Der Verlauf der sinkenden Ganganteile bestimmt den Verlauf der mittleren gewichteten Beschleunigung.

#### 5. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang steigt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Durch das höhere Drehzahlniveau des Motors steigt das Beschleunigungspotential. Außerdem werden Streckenanteile mit konstanter Geschwindigkeit und Anteile mit geringen Beschleunigungen vermehrt im 6. Gang gefahren.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang steigt bis zu einer Hinterachsübersetzung von 3,43 leicht. Für höhere Übersetzungen sinkt die mittlere gewichtete Beschleunigung leicht. Bis zu der Hinterachsübersetzung  $i_{Ha} = 3,43$  wird der Verlauf durch die steigende mittlere Beschleunigung bestimmt, darüber hinaus bestimmt der sinkende Ganganteil den Verlauf der mittleren gewichteten Beschleunigung.

#### 6. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang bleibt über den gesamten Bereich der Hinterachsübersetzung nahezu konstant. Durch das höhere Drehzahlniveau steigt das Beschleunigungspotential im 6. Gang. Es werden aber auch vermehrt Streckenanteile des 5. Gangs mit konstanter Geschwindigkeit oder geringen Beschleunigungen im 6. Gang gefahren. Dies kompensiert das größere Beschleunigungspotential.

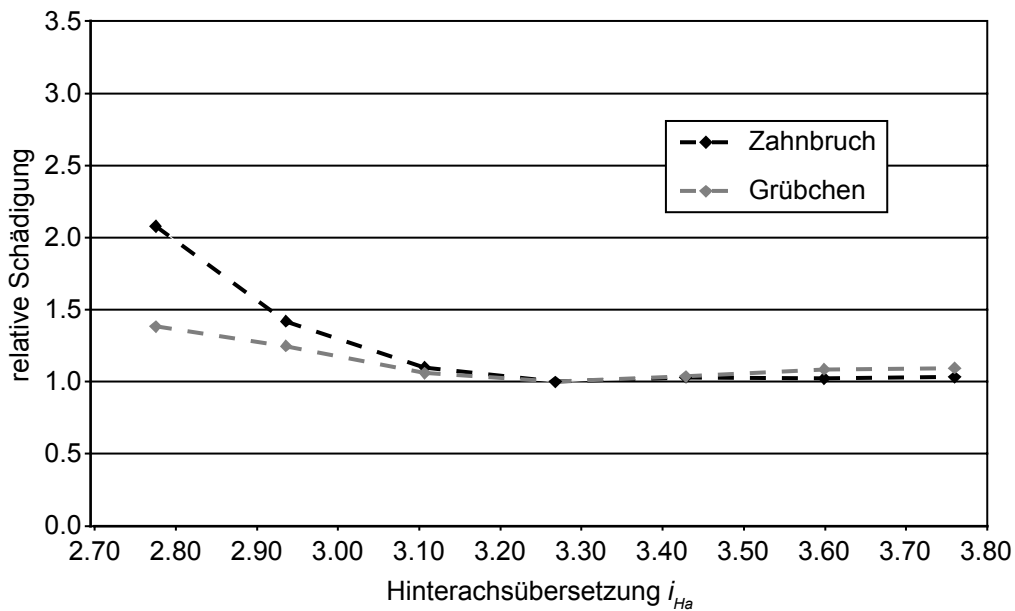
Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Dieser Verlauf ist durch die steigenden Ganganteile begründet.

### 6.3.4 Relative Schädigung

Im Folgenden werden die relativen Schädigungen, nach der in Kap. 5.7 beschriebenen Vorgehensweise, erläutert. Die relativen Schädigungen der Gänge 1 und 2 werden nicht betrachtet, da der Streckenanteil dieser Gänge sehr gering ausfällt.

#### 3. Gang

In Bild 6.19 sind die relativen Schädigungen des 3. Ganges für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Hinterachsübersetzung dargestellt.



**Bild 6.19: Relative Schädigung des 3. Ganges über der Hinterachsübersetzung**

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 3. Gang sinkt mit zunehmender Hinterachsübersetzung zunächst. Für Übersetzungen größer der Referenzübersetzung steigt die relative Grübchenschädigung wieder leicht. Für geringe Hinterachsübersetzungen wird mit höherem Motormoment gefahren, welches stark schädigend ist. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,4 wird bei einer Hinterachsübersetzung von 2,78 erreicht.

#### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschiädigung im 3. Gang nimmt mit zunehmender Hinterachsübersetzung zunächst ab. Für Übersetzungen größer der Referenzübersetzung steigt die relative Zahnbruchschiädigung wieder leicht. Für Übersetzungen kleiner der Referenzübersetzung liegen die Werte der relativen Zahnbruchschiädigung über denen der relativen Grübchenschädigung, für Übersetzungen größer der Referenzübersetzung liegen sie darunter. Die maximale relative Zahnbruchschiädigung von ca. 2,1 wird bei einer Hinterachsübersetzung von 2,78 erreicht.

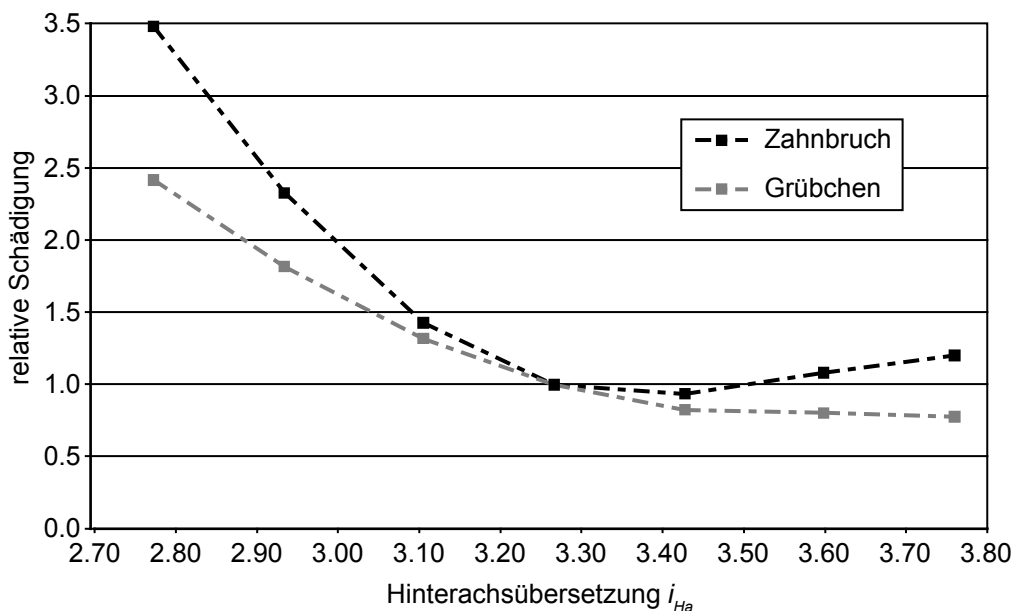


Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang steigt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung und den relativen Schädigungen.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 3. Gang sinkt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Die Verläufe von der mittleren gewichteten Beschleunigung und den relativen Schädigungen sind qualitativ sehr ähnlich. Es besteht somit ein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung und den relativen Schädigungen für den 3. Gang.

#### 4. Gang

In Bild 6.20 sind die relativen Schädigungen des 4. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Hinterachsübersetzung dargestellt.



**Bild 6.20: Relative Schädigung des 4. Gangs über der Hinterachsübersetzung**

##### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 4. Gang fällt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Für geringe Hinterachsübersetzungen wird mit höherem Motormoment gefahren, welches stark schädigend ist. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 2,4 wird bei einer Hinterachsübersetzung von 2,78 erreicht.

##### Zahnbruch

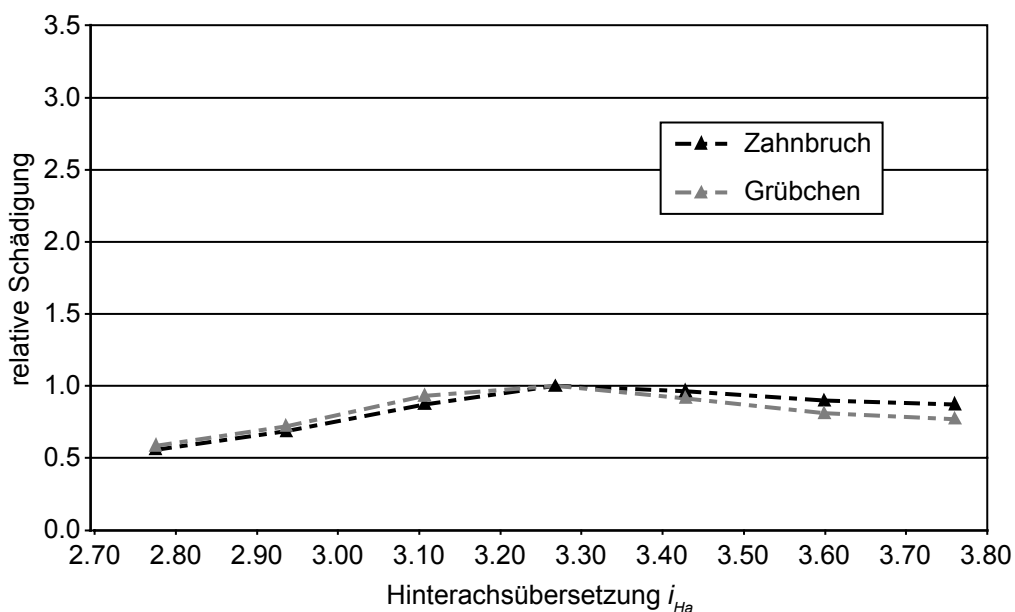
Die relative Zahnbruchschiädigung im 4. Gang sinkt bis zu einer Hinterachsübersetzung von 3,43 ab. Für größere Hinterachsübersetzungen steigt die relative Zahnbruchschiädigung gegenüber der relativen Grübchenschädigung wieder leicht. Die Werte der relativen Zahnbruchschiädigung liegen immer über denen der relativen Grübchenschädigung. Die maximale relative Zahnbruchschiädigung von ca. 3,5 wird bei einer Hinterachsübersetzung von 2,78 erreicht.

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang ist entgegengesetzt zu den Verläufen der relativen Schädigungen, sodass kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung und den relativen Schädigungen im 4. Gang besteht.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang fällt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Der qualitative Verlauf ist dem der relativen Grübchenschädigung sehr ähnlich, dem der relativen Zahnbruchschiädigung bedingt ähnlich. Somit besteht zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung und der relativen Grübchenschädigung ein klarer Zusammenhang. Zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung und der relativen Zahnbruchschiädigung besteht nur ein bedingter Zusammenhang.

## 5. Gang

In Bild 6.21 sind die relativen Schädigungen des 5. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Hinterachsübersetzung dargestellt.



**Bild 6.21: Relative Schädigung des 5. Gangs über der Hinterachsübersetzung**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 5. Gang steigt mit zunehmender Hinterachsübersetzung zunächst. Für Übersetzungen größer der Referenzübersetzung sinkt die relative Grübchenschädigung wieder. Die maximale relative Grübchenschädigung von 1,0 wird bei der Referenzübersetzung erreicht. Mit steigender Übersetzung werden mehr Beschleunigungen aus dem 4. in den 5. Gang verlagert. Dadurch steigen die Momente. Gleichzeitig werden aber sehr viele Anteile in den 6. Gang verschoben. Dadurch sinkt die relative Grübchenschädigung für Übersetzungen größer der Referenzübersetzung.

### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschiädigung weist einen sehr ähnlichen Verlauf zu der relativen Grübchenschädigung auf. Die maximale relative Zahnbruchschiädigung von 1,0 wird ebenfalls bei der Referenzübersetzung erreicht. Für Hinterachsübersetzungen kleiner der Refe-

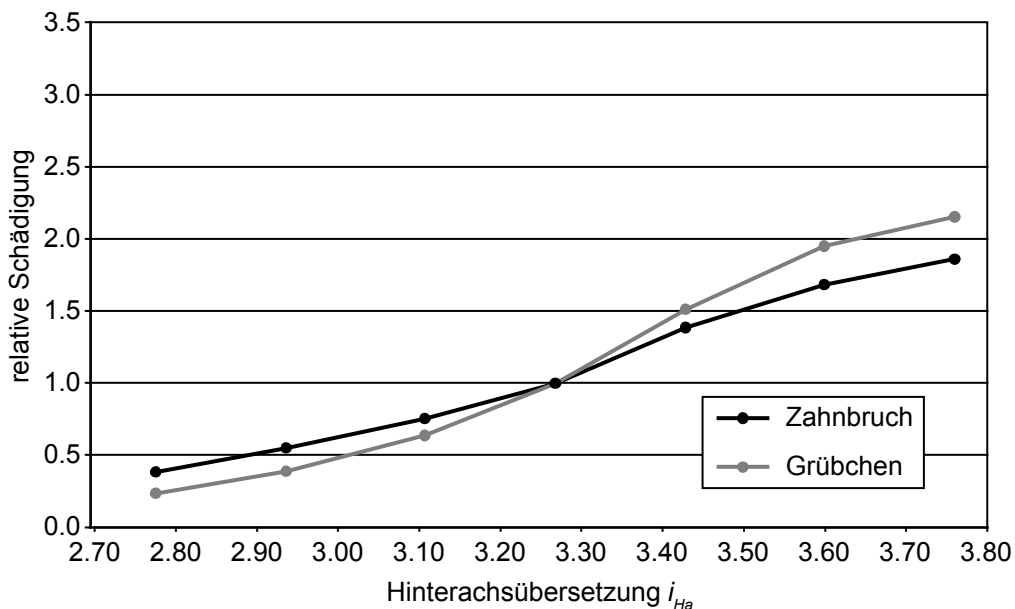
renzübersetzung liegen die Werte der relativen Zahnbruchschädigung unter der relativen Grübchenschädigung, für Übersetzungen größer der Referenzübersetzung liegen sie darüber.

Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang steigt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung und den relativen Schädigungen im 5. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang steigt bis zur Referenzübersetzung leicht und fällt für größere Übersetzungen wieder. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung und den relativen Schädigungen im 5. Gang.

## 6. Gang

In Bild 6.22 sind die relativen Schädigungen des 6. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Hinterachsübersetzung dargestellt.



**Bild 6.22: Relative Schädigung des 6. Gangs über der Hinterachsübersetzung**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 6. Gang steigt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Durch das höhere Beschleunigungspotential bei höheren Hinterachsübersetzungen werden vermehrt Beschleunigungen und Ganganteile vom 5. in den 6. Gang verschoben. Dadurch steigen die Momente und Überrollungen im 6. Gang. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 2,2 wird bei einer Hinterachsübersetzung von 3,76 erreicht.

### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschädigung im 6. Gang hat einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf zur relativen Grübchenschädigung. Die maximale relative Zahnbruchschädigung von ca. 1,9 wird bei einer Hinterachsübersetzung von 3,76 erreicht. Für Hinterachsübersetzungen kleiner der Referenzübersetzung liegen die relativen Zahnbruchschädigungen über denen

der relativen Grübchenschädigung. Für höhere Übersetzungen liegen die relativen Zahnbruchschädigungen unter den Werten der relativen Grübchenschädigung.









Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang bleibt bei zunehmender Hinterachsübersetzung nahezu konstant. Somit besteht zwischen der mittleren Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang kein Zusammenhang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmender Hinterachsübersetzung. Der qualitative Verlauf der mittleren gewichteten Beschleunigung und der relativen Schädigungen weisen aber qualitativ deutliche Unterschiede auf. Somit besteht nur ein bedingter Zusammenhang zwischen mittlerer gewichteter Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang.

### 6.3.5 Fazit

In Tabelle 8 sind die Einflüsse der Hinterachsübersetzung qualitativ und quantitativ aufgeführt.

**Tabelle 8: Einfluss der Hinterachsübersetzung**

	Grübchen		Zahnbruch	
3. Gang		1,4		2,1
4. Gang		2,4		3,5
5. Gang		1,0		1,0
6. Gang		2,2		1,9

Die relativen Schädigungen innerhalb eines Gangs zeigen qualitativ einen sehr ähnlichen Verlauf. Quantitativ unterscheiden sich die relativen Schädigungen innerhalb der Gänge 3 und 4 deutlich. Die Verläufe der einzelnen Schädigungsmechanismen über die Gänge betrachtet, zeigen qualitativ und quantitativ einen sehr großen Unterschied auf. Die größten relativen Schädigungen weist der 4. Gang auf. Die relativen Schädigungen im 5. Gang sind für alle abgeleiteten Konfigurationen kleiner als die der Referenzkonfiguration.

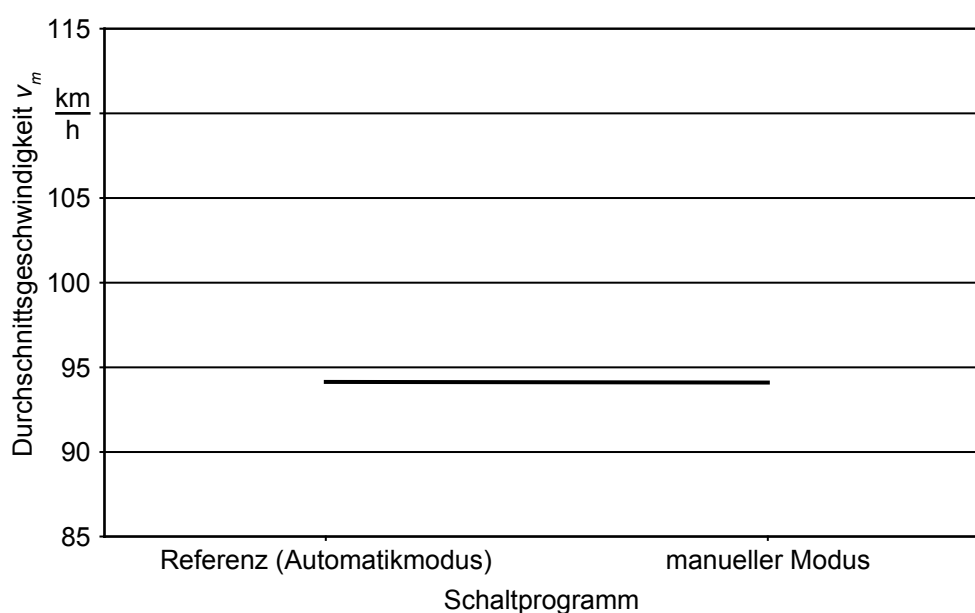
Der Parameter Hinterachsübersetzung eignet sich nur zur Raffung des 6. Gangs, da nur hier die relative Grübchenschädigung über der relativen Zahnbruchschädigung liegt.

## 6.4 Schaltprogramm

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen des Einflusses des Schaltprogramms auf die relativen Schädigungen beschrieben. Das Schaltprogramm als getriebe-spezifischer Parameter wurde hierbei zwischen dem Automatikmodus und dem manuellen Modus variiert.

### 6.4.1 Durchschnittsgeschwindigkeit

In Bild 6.23 ist die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über dem Parameter Schaltprogramm dargestellt.

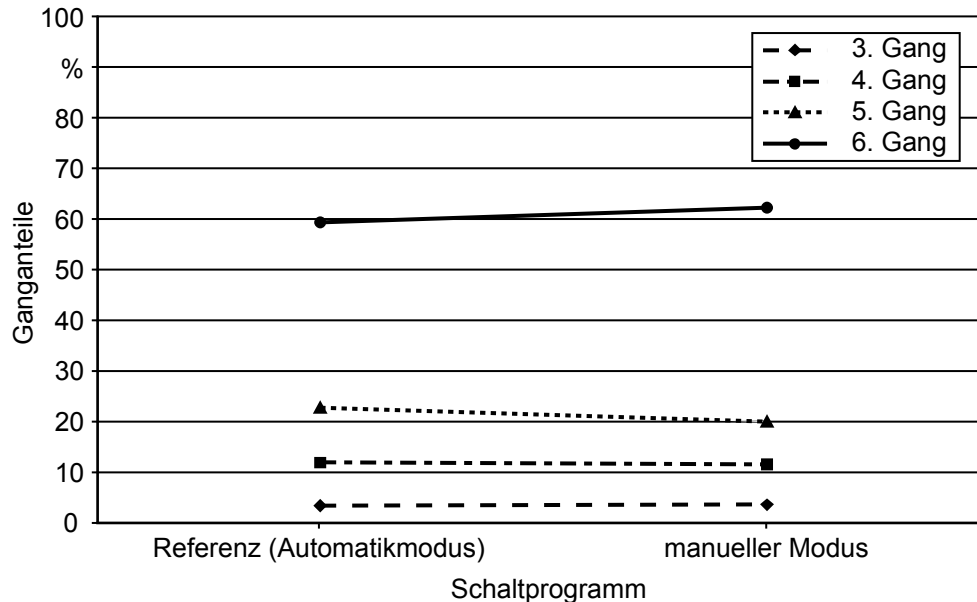


**Bild 6.23:** Erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über dem Schaltprogramm

Die Wahl des Schaltprogramms hat nahezu keinen Einfluss auf die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit. Die Durchschnittsgeschwindigkeit bleibt mit ca. 94 km/h konstant. Die Wahl des Schaltprogramms hat nur einen marginalen Einfluss auf das Beschleunigungspotential des Fahrzeugs und somit auch nur einen untergeordneten Einfluss auf die Durchschnittsgeschwindigkeit.

### 6.4.2 Ganganteile

In Bild 6.24 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Gänge über dem Parameter Schaltprogramm dargestellt.



**Bild 6.24: Ganganteile über dem Schaltprogramm**

Die Anteile des 1. und 2. Gangs sind aufgrund des hohen Geschwindigkeitsniveaus auf der simulierten Landstraße sehr gering, sodass sie im Weiteren nicht beschrieben werden.

#### 3. Gang

Der Anteil des 3. Gangs wird durch die Wahl des Schaltprogramms nicht beeinflusst, da der 3. Gang vornehmlich für starke Beschleunigungen bei hoher Drosselklappenstellung verwendet wird. Der Anteil des 3. Gangs bleibt mit ca. 6 % nahezu konstant.

#### 4. Gang

Der Anteil des 4. Gangs sinkt minimal mit Änderung des Schaltprogramms. Der Anteil des 4. Gangs bleibt mit ca. 12 % nahezu konstant.

#### 5. Gang

Der Anteil des 5. Gangs sinkt mit Änderung des Schaltprogramms leicht von ca. 23 % im Automatikmodus auf ca. 20 % für das manuelle Schaltprogramm.

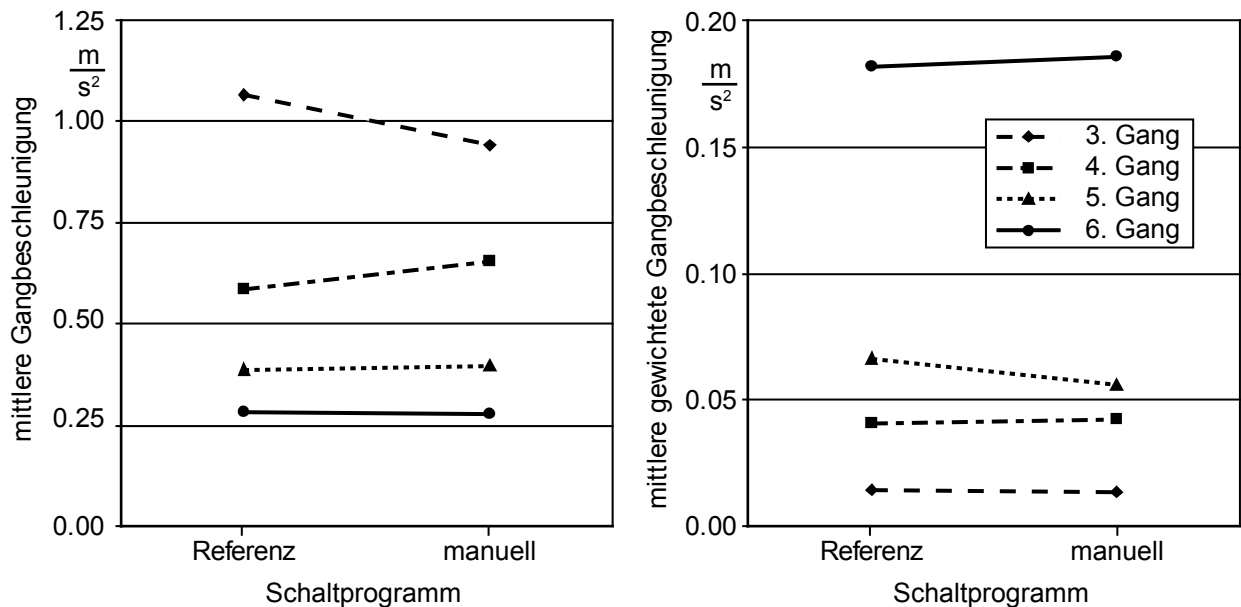
#### 6. Gang

Der Anteil des 6. Gangs steigt mit Änderung des Schaltprogramms leicht von ca. 60 % im Automatikmodus auf ca. 62 % für das manuelle Schaltprogramm.

Die Veränderungen der Ganganteile kommen durch die höhere Schalzhäufigkeit zustande. Während im Automatikmodus im Mittel 610 Schaltungen auf der Referenzstrecke ausgeführt werden, sind es im manuellen Modus im Mittel 648 Schaltungen. Durch die häufigeren Schaltungen werden die Gänge unterschiedlich lange gehalten.

### 6.4.3 Gangbeschleunigungen

In Bild 6.25 sind die mittleren Beschleunigungen und die mittleren gewichteten Beschleunigungen der einzelnen Gänge über dem Parameter Schaltprogramm dargestellt.



**Bild 6.25: Mittlere Gangbeschleunigung und mittlere gewichtete Gangbeschleunigung über dem Schaltprogramm**

Auf die Beschreibung des 1. und 2. Ganges wird aufgrund der geringen Ganganteile im Weiteren verzichtet.

#### 3. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang sinkt mit Änderung des Schaltprogramms. Der Anteil des 3. Ganges bleibt zwar nahezu konstant, die absolute Anzahl der Überrollungen steigt aber im manuellen Modus. Im manuellen Modus werden mehr Schaltungen als im Automatikmodus durchgeführt. Dadurch werden mehr Anteile mit niedrigen Beschleunigungswerten im 3. Gang durchgeführt. Somit sinkt die mittlere Beschleunigung im 3. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 3. Gang sinkt durch den nahezu konstanten Ganganteil und die sinkende mittlere Beschleunigung leicht.

#### 4. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang steigt mit der Änderung des Schaltprogramms. Der Anteil des 4. Ganges bleibt nahezu konstant, die absolute Anzahl der Überrollungen nimmt aber im 4. Gang ab. Dadurch wird der 4. Gang weniger als Fahrgang sondern mehr als Beschleunigungsgang verwendet. Dadurch steigt die mittlere Beschleunigung im 4. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang steigt durch den nahezu konstanten Ganganteil und die steigende mittlere Beschleunigung leicht.

## 5. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang steigt mit der Änderung des Schaltprogramms leicht. Der Anteil des 5. Gangs und die absolute Anzahl der Überrollungen im 5. Gang sinken im manuellen Modus. Dadurch sinken die Anteile mit geringen Beschleunigungswerten, die vermehrt im 6. Gang gefahren werden. Somit steigt die mittlere Beschleunigung im 5. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang sinkt durch den geringeren Anteil des 5. Gangs trotz steigender mittlerer Beschleunigung im 5. Gang.

## 6. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang sinkt mit der Änderung des Schaltprogramms leicht. Die hinzugewonnenen Anteile aus dem 5. Gang haben geringe Beschleunigungswerte, sodass die mittlere Beschleunigung im 6. Gang abnimmt.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt trotz sinkender mittlerer Beschleunigung durch die steigenden Ganganteile im 6. Gang.

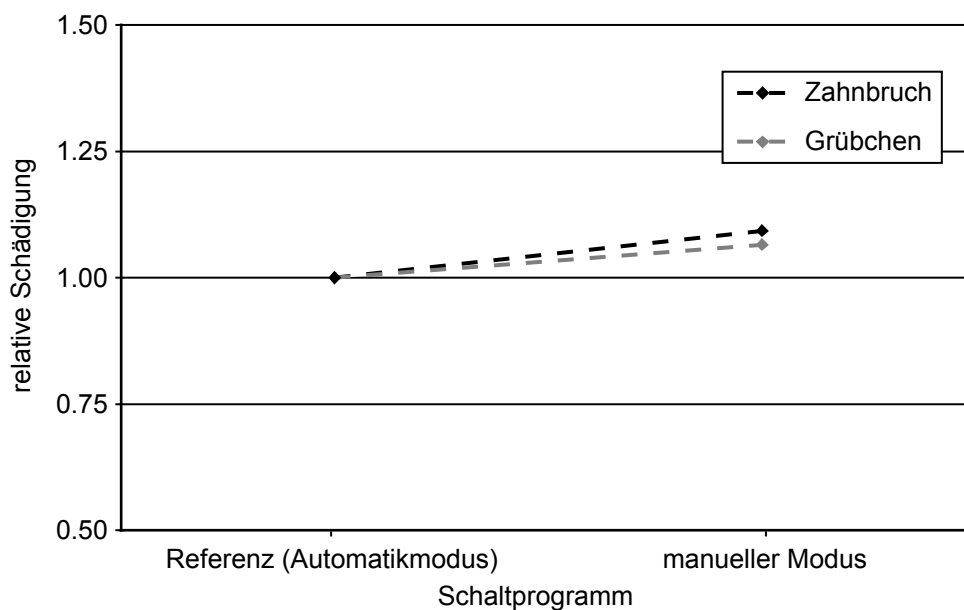


### Relative Schädigung

Im Folgenden werden die relativen Schädigungen, nach der in Kap. 5.7 beschriebenen Vorgehensweise, erläutert. Die relativen Schädigungen der Gänge 1 und 2 werden nicht betrachtet, da der Streckenanteil dieser Gänge sehr gering ausfällt.

#### 3. Gang

In Bild 6.26 sind die relativen Schädigungen des 3. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Schaltprogramm dargestellt.



**Bild 6.26: Relative Schädigung des 3. Gangs über dem Schaltprogramm**

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 3. Gang steigt leicht auf den Wert 1,07 für das manuelle Schaltprogramm. Zum einen steigt die absolute Anzahl der Überrollungen, zum anderen steigen die im 3. Gang gefahrenen Momente leicht.

#### Zahnbruch

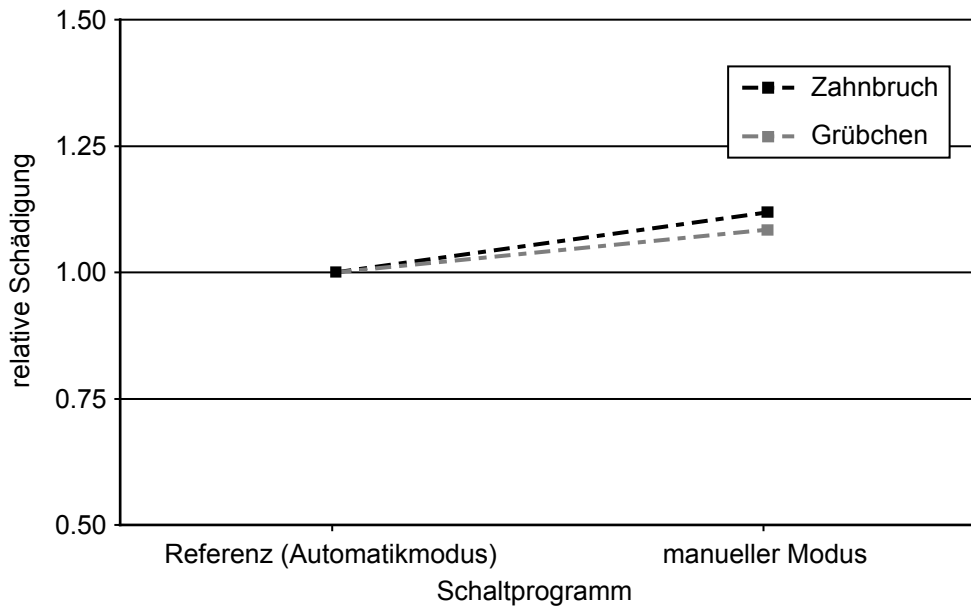
Die relative Zahnbruchschiädigung im 3. Gang steigt leicht auf den Wert 1,09 für das manuelle Schaltprogramm.

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang sinkt. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 3. Gang und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 3. Gang sinkt. Es besteht somit kein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 3. Gang und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

#### 4. Gang

In Bild 6.27 sind die relativen Schädigungen des 4. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Schaltprogramm dargestellt.



**Bild 6.27: Relative Schädigung des 4. Gangs über dem Schaltprogramm**

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 4. Gang steigt leicht auf den Wert 1,08 für das manuelle Schaltprogramm. Die absolute Zahl der Überrollungen sinkt mit Änderung des Schaltprogramms, aber die im 4. Gang gefahrenen Momente steigen, sodass die relative Grübchenschädigung im 4. Gang ansteigt.

#### Zahnbruch

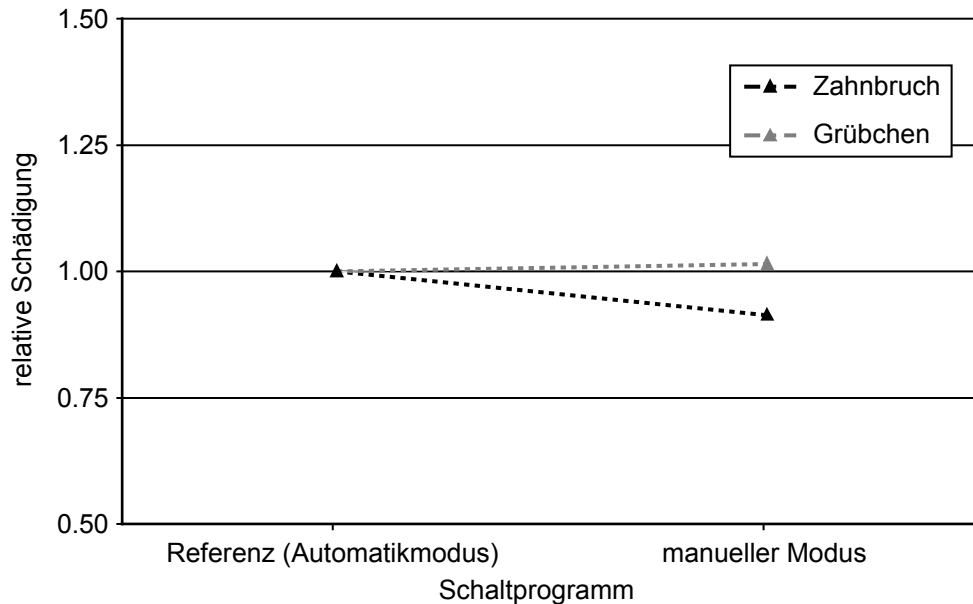
Die relative Zahnbruchschädigung im 4. Gang steigt leicht auf den Wert 1,12 für das manuelle Schaltprogramm.

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang steigt mit Änderung des Schaltprogramms. Somit besteht ein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 4. Gang und den relativen Schädigungen im 4. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang steigt mit Änderung des Schaltprogramms leicht, sodass ein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 4. Gang und den relativen Schädigungen besteht.

## 5. Gang

In Bild 6.28 sind die relativen Schädigungen des 5. Ganges für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Schaltprogramm dargestellt.



**Bild 6.28: Relative Schädigung des 5. Ganges über dem Schaltprogramm**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 5. Gang steigt minimal auf den Wert 1,01 für das manuelle Schaltprogramm. Das steigende äquivalente Moment im 5. Gang wird nahezu kompensiert durch die verringerte Anzahl der Überrollungen.

### Zahnbruch

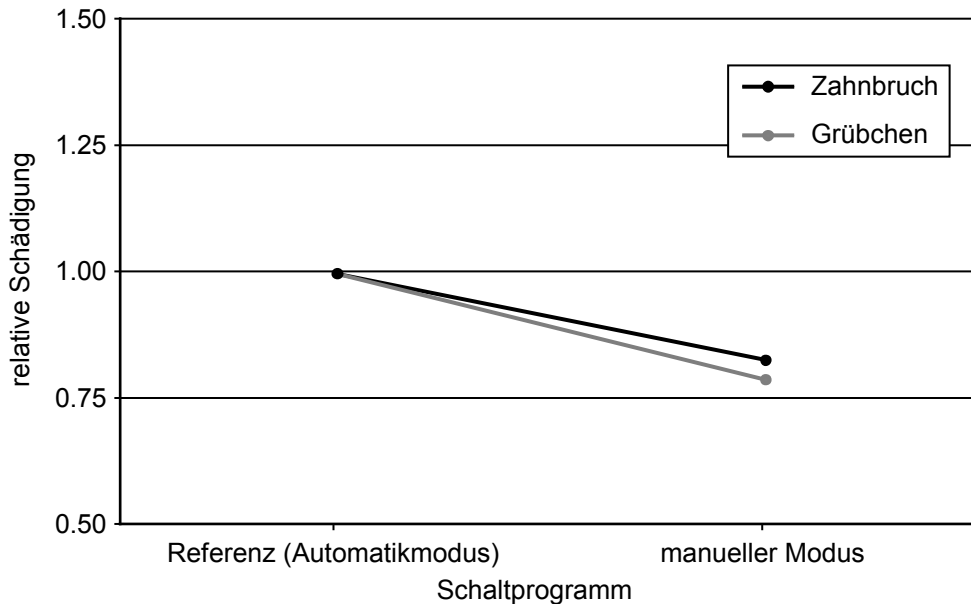
Die relative Zahnbruchschiädigung im 5. Gang sinkt auf den Wert 0,91 für das manuelle Schaltprogramm. Die verringerte Anzahl der Überrollungen übersteigt den Einfluss des leicht erhöhten äquivalenten Moments, sodass die relative Zahnbruchschiädigung sinkt.

Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang steigt mit der Änderung des Schaltprogramms leicht. Somit besteht zwischen der mittleren Beschleunigung im 5. Gang und der relativen Grübchenschädigung ein Zusammenhang. Zwischen der mittleren Beschleunigung und der relativen Zahnbruchschiädigung im 5. Gang besteht kein Zusammenhang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang sinkt mit der Änderung des Schaltprogramms. Es besteht somit kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung und der relativen Grübchenschädigung im 5. Gang. Zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 5. Gang und der relativen Zahnbruchschiädigung im 5. Gang besteht ein Zusammenhang.

## 6. Gang

In Bild 6.29 sind die relativen Schädigungen des 6. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Schaltprogramm dargestellt.



**Bild 6.29: Relative Schädigung des 6. Gangs über dem Schaltprogramm**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 6. Gang sinkt auf den Wert 0,79 für das manuelle Schaltprogramm. Die steigende Anzahl der Überrollungen wird durch das geringere äquivalente Moment überkompensiert, sodass die relative Grübchenschädigung sinkt.

### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschiädigung im 6. Gang sinkt auf den Wert 0,83 für das manuelle Schaltprogramm.

Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang sinkt mit der Änderung des Schaltprogramms leicht, sodass ein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang besteht.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt mit der Änderung des Schaltprogramms. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang.

#### 6.4.4 Fazit

In Tabelle 9 sind die Einflüsse des Schaltprogramms qualitativ und quantitativ aufgeführt.

**Tabelle 9: Einfluss des Schaltprogramms**

	Grübchen		Zahnbruch	
3. Gang	→	1,07	→	1,09
4. Gang	→	1,08	↗	1,12
5. Gang	→	1,01	↘	0,91
6. Gang	↘	0,79	↘	0,83

Innerhalb der Gänge ist qualitativ eine gute Übereinstimmung für die Gänge 3, 4 und 6 zu erkennen. Abweichend davon gibt es innerhalb des 5. Ganges einen Unterschied für die beiden Versagensarten. Quantitativ liegt ebenfalls bis auf den 5. Gang eine gute Übereinstimmung vor. Innerhalb der relativen Grübchenschädigung gibt es bis auf den 6. Gang eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung. Innerhalb der relativen Zahnbruchschädigung gibt es jeweils zwischen dem 3. und 4. Gang und dem 5. und 6. Gang eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung.

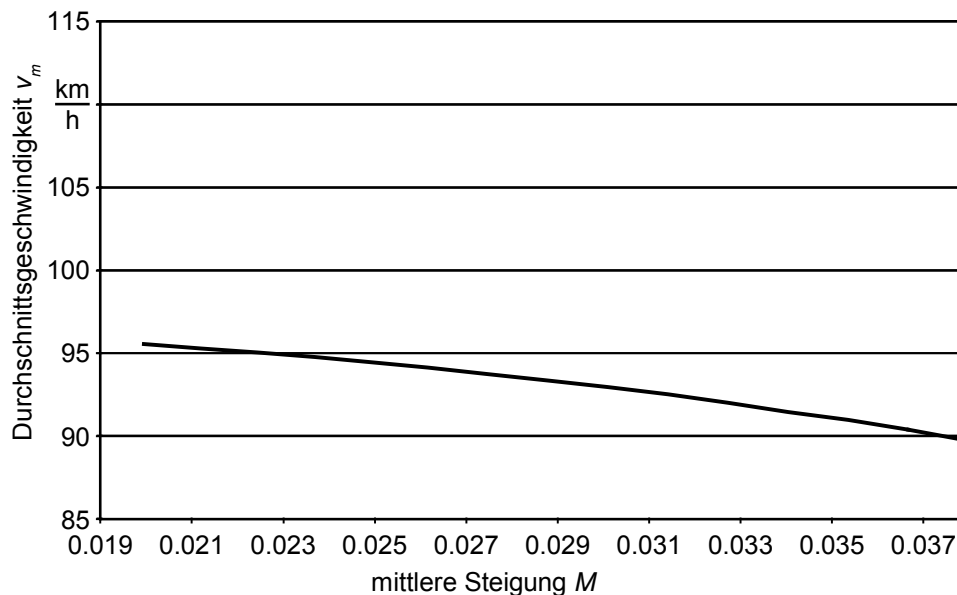
Der Parameter Schaltprogramm eignet sich nicht zur Raffung, da entweder die relative Grübchenschädigung unter der relativen Zahnbruchschädigung oder unter der Schädigung der Referenzkonfiguration liegt.

## 6.5 Höhenprofil

Das Höhenprofil beeinflusst das Geschwindigkeitsprofil des Fahrzeugs sehr stark. Die Steigung geht über die Fahrwiderstandsgleichung direkt in den Leistungsbedarf des Fahrzeugs ein. Um der Geschwindigkeitsvorgabe folgen zu können, ist bei gleicher Geschwindigkeit eine höhere Leistung notwendig.

### 6.5.1 Durchschnittsgeschwindigkeit

Steigungen beeinflussen das Geschwindigkeitsprofil nachhaltig. Mit wachsender Steigung wird das Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs begrenzt. In Bild 6.30 ist die mittlere Geschwindigkeit über dem Parameter mittlere Steigung  $M$  dargestellt.

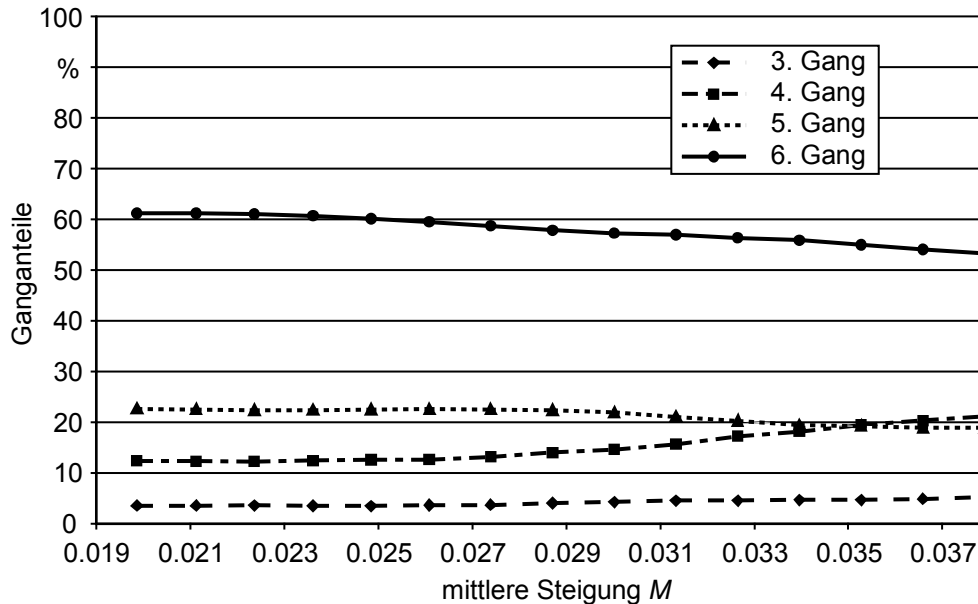


**Bild 6.30: Erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über der mittleren Steigung**

Bei einer unveränderten Wunschgeschwindigkeit des Fahrers von 110 km/h sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 96 km/h auf ca. 90 km/h. Dies ist durch das schlechtere Beschleunigungsvermögen bedingt durch den wachsenden Steigungswiderstand zu erklären.

### 6.5.2 Ganganteile

In Bild 6.31 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Gänge über dem Parameter mittlere Steigung  $M$  dargestellt.



**Bild 6.31: Ganganteile über der mittleren Steigung**

Die Anteile der Gänge 1 und 2 sind auf der Landstraße sehr gering, sodass diese beiden Gänge im Folgenden nicht betrachtet werden.

#### 3. Gang

Der Anteil des 3. Gangs steigt mit zunehmender mittlerer Steigung. Im Bereich von sehr geringen Steigungen ist die Zunahme sehr gering. Fast alle Steigungen können in höheren Gängen befahren werden. Nur für sehr starke Beschleunigungen, z.B. aus Kurven heraus, muss in den 3. Gang zurück geschaltet werden. Ab mittleren bis hohen Steigungen nimmt der Anteil des 3. Gangs stark zu. In diesem Bereich wird häufiger in den 3. Gang für Beschleunigungen zurück geschaltet. Bei sehr hohen mittleren Steigungen nimmt der Anteil des 3. Gangs nochmals stärker zu. Hier wird auch für Konstantfahrten in den 3. Gang zurück geschaltet. Der Anteil des 3. Gangs steigt von 3 % bei sehr geringen Steigungen bis zu 5 % bei sehr großen Steigungen.

#### 4. Gang

Mit zunehmender mittlerer Steigung nimmt der Anteil des 4. Gangs zu. Dabei ist die Zunahme im Bereich von sehr kleinen bis mittleren Steigungen sehr gering. Bei diesen Steigungen können noch fast alle Anstiege in den höheren Gängen gefahren werden, sodass nur für sehr starke Beschleunigungen in den 4. Gang zurück geschaltet werden muss. Im Bereich mittlerer bis sehr hoher Steigungen wächst der Ganganteil sehr stark. In diesem Bereich der Steigungen wird häufiger für Beschleunigungen, aber auch vermehrt für Streckenanteile mit konstanter Geschwindigkeit aus den höheren Gängen in den 4. Gang zu-

rück geschaltet. Der Anteil des 4. Gangs nimmt von 12 % bei sehr geringen Steigungen bis zu 21 % bei sehr großen Steigungen zu.

### 5. Gang

Der Anteil des 5. Gangs bleibt im Bereich sehr kleiner bis mittlerer Steigungen nahezu konstant. Zum einen können die meisten Steigungen weiterhin im 5. Gang gefahren werden. Anteile, die nicht mehr im 5. Gang gefahren werden können, werden durch hinzugewonnene Anteile aus dem 6. Gang ausgeglichen. Für mittlere bis hohe Steigungen nimmt der Anteil des 5. Gangs ab. In diesem Bereich wird vermehrt für Beschleunigungen aber auch Streckenanteile mit konstanter Geschwindigkeit in den 4. Gang zurück geschaltet. Die Abnahme des Ganganteils wird teilweise durch die Verschiebung von Anteilen aus dem 6. Gang gemindert. Der Anteil des 5. Gangs sinkt von 23 % bei sehr geringen Steigungen bis auf 19 % bei sehr großen Steigungen.

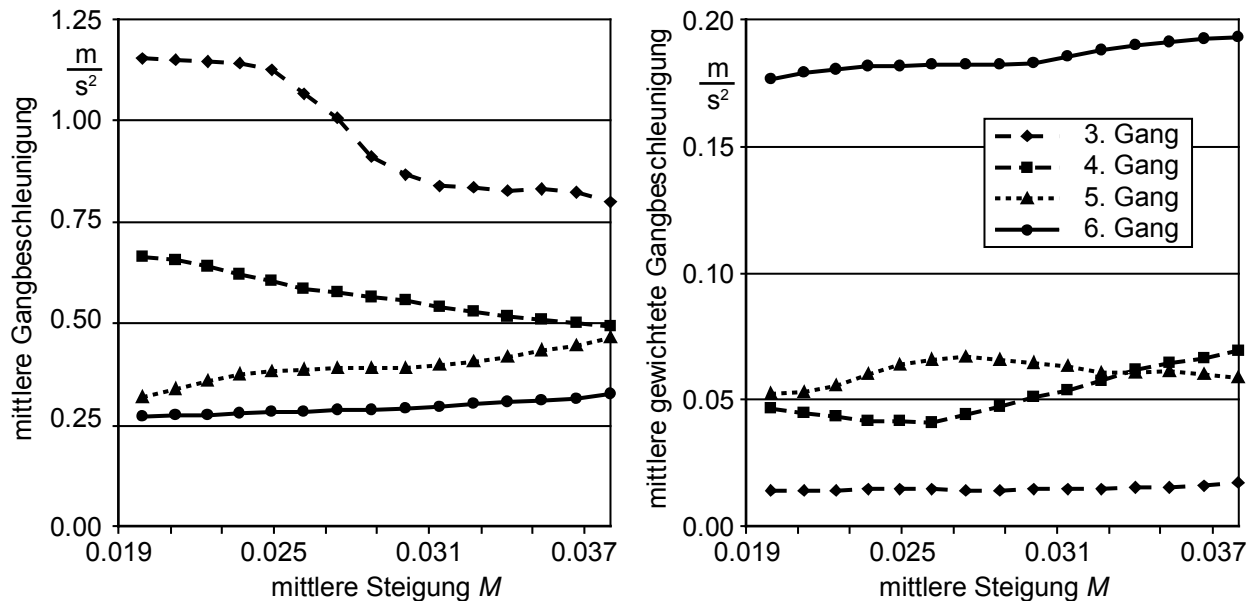
### 6. Gang

Der Anteil des 6. Gangs sinkt mit zunehmender mittlerer Steigung. Im Bereich von sehr kleinen bis kleinen Steigungen sinkt der Ganganteil nur leicht, da die meisten Steigungen die Konstantfahrt und die Beschleunigungen kaum behindern. Für kleine bis sehr hohe Steigungen sinkt der Ganganteil stark. Hier werden die Beschleunigungen aber auch vermehrt Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit behindert, sodass in kleinere Gänge zurück geschaltet werden muss. Der Anteil des 6. Gangs sinkt von 61 % bei sehr geringen Steigungen bis auf 53 % bei sehr großen Steigungen.



### 6.5.3 Gangbeschleunigungen

In Bild 6.32 sind die mittleren Beschleunigungen und die mittleren gewichteten Beschleunigungen der einzelnen Gänge über dem Parameter mittlere Steigung  $M$  dargestellt.



**Bild 6.32: Mittlere Gangbeschleunigung und mittlere gewichtete Gangbeschleunigung über der mittleren Steigung**

Auf die Beschreibung des 1. und 2. Ganges wird aufgrund der geringen Ganganteile im Weiteren verzichtet.

#### 3. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang sinkt mit zunehmender mittlerer Steigung. Einerseits werden durch die größeren Steigungen Beschleunigungen behindert, andererseits werden Ganganteile mit niedrigen Beschleunigungswerten aus höheren Gängen in den 3. Gang verlagert.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 3. Gang nimmt mit zunehmender mittlerer Steigung leicht zu. Der steigende Ganganteil überkompensiert dabei die Abnahme der mittleren Gangbeschleunigung.

#### 4. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang fällt mit zunehmender mittlerer Steigung. Wie im 3. Gang werden zum einen Beschleunigungen durch die größer werdenden Steigungen behindert, zum anderen werden Streckenanteile mit konstanter Geschwindigkeit oder niedrigen Beschleunigungswerten aus höheren Gängen in den 4. Gang verlagert.

Die mittlere gewichtete Gangbeschleunigung sinkt im Bereich sehr kleiner bis mittlerer Steigungen leicht. In diesem Bereich hat die Abnahme der mittleren Beschleunigung einen größeren Einfluss als die leichte Zunahme des Ganganteils. Für mittlere bis sehr hohe Steigungen nimmt die mittlere gewichtete Gangbeschleunigung zu. In diesem Bereich hat die

Zunahme des Ganganteils gegenüber der sinkenden Gangbeschleunigung den größeren Einfluss.

## 5. Gang

Mit zunehmender mittlerer Steigung nimmt die mittlere Beschleunigung im 5. Gang leicht zu. Durch den erhöhten Steigungswiderstand werden vermehrt Streckenanteile mit Beschleunigungen und mit konstanter Geschwindigkeit an Steigungen in die unteren Gänge verlagert. Gleichzeitig verbessert sich aber das Beschleunigungsvermögen auf Gefällstrecken. Diese Streckenanteile werden weiterhin im 5. Gang gefahren. Somit steigt die mittlere Beschleunigung mit zunehmender mittlerer Steigung.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung nimmt von sehr kleinen bis zu mittleren Steigungen leicht zu. Durch den in diesem Bereich nahezu gleich bleibenden Ganganteil und die leicht steigende mittlere Beschleunigung steigt hier die mittlere gewichtete Beschleunigung leicht. Im Bereich von mittleren bis hohen Steigungen fällt die mittlere gewichtete Beschleunigung leicht. Der sinkende Anteil des 5. Gangs überwiegt den Einfluss der leicht steigenden mittleren Beschleunigung. Im Bereich von sehr hohen mittleren Steigungen verändert sich die mittlere gewichtete Beschleunigung kaum. Die Einflüsse des leicht sinkenden Ganganteils und der leicht steigenden mittleren Beschleunigung kompensieren sich.

## 6. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmender mittlerer Steigung leicht. Die Erklärung ist analog der im 5. Gang. Durch den erhöhten Steigungswiderstand werden vermehrt Streckenanteile mit Beschleunigungen und mit konstanter Geschwindigkeit an Steigungen in die unteren Gänge verlagert. Gleichzeitig verbessert sich aber das Beschleunigungsvermögen auf Gefällstrecken. Diese Streckenanteile werden weiterhin im 6. Gang gefahren. Somit steigt die mittlere Beschleunigung mit zunehmender mittlerer Steigung.

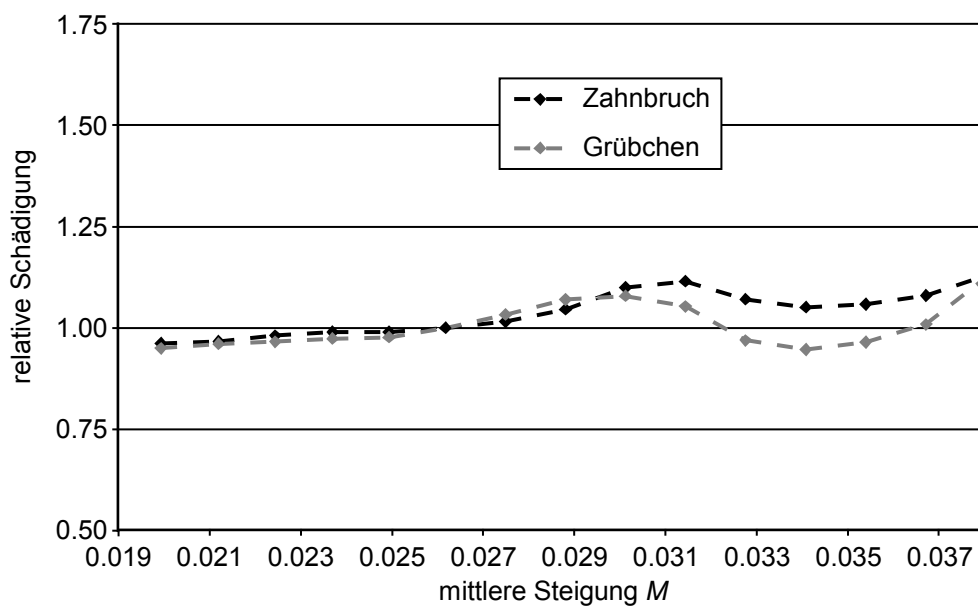
Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmender mittlerer Steigung. Die ansteigende mittlere Beschleunigung übersteigt den Einfluss des verringerten Ganganteils.

### 6.5.4 Relative Schädigung

Im Folgenden werden die relativen Schädigungen, nach der in Kap. 5.7 beschriebenen Vorgehensweise, erläutert. Die relativen Schädigungen der Gänge 1 und 2 werden nicht betrachtet, da der Streckenanteil dieser Gänge sehr gering ausfällt.

#### 3. Gang

In Bild 6.33 sind die relativen Schädigungen des 3. Ganges für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter mittlere Steigung  $M$  dargestellt.



**Bild 6.33: Relative Schädigung des 3. Ganges über der mittleren Steigung**

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 3. Gang steigt für sehr geringe bis mittlere Steigungen leicht. Durch den erhöhten Steigungswiderstand sind höhere Momente erforderlich, die in einer höheren relativen Schädigung resultieren. Für den Bereich von mittleren bis hohen Steigungen fällt die relative Schädigung leicht. Durch vermehrtes Rückschalten erhöht sich der Anteil des 3. Ganges. Dabei sinkt das Drehmoment, da die Leistung bei höheren Drehzahlen erzeugt wird. Der Einfluss des Rückgangs des Drehmoments überwiegt den Einfluss des erhöhten Ganganteils. Im Bereich hoher bis sehr hoher Steigungen nimmt die relative Schädigung wieder zu. Die erforderlichen Drehmomente zur Überwindung des Steigungswiderstands und die im 3. Gang gefahrenen Anteile steigen weiter. Dadurch steigt die relative Schädigung wieder. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,12 wird bei einer mittleren Steigung von 0,038 erreicht.

#### Zahnbruch

Der Verlauf der relativen Zahnbruchschiädigung ist dem der relativen Grübchenschädigung qualitativ sehr ähnlich. Die relative Zahnbruchschiädigung nimmt bis zu mittleren Steigungswerten leicht zu. Im Bereich mittlerer bis hoher Steigungswerte sinkt die relative

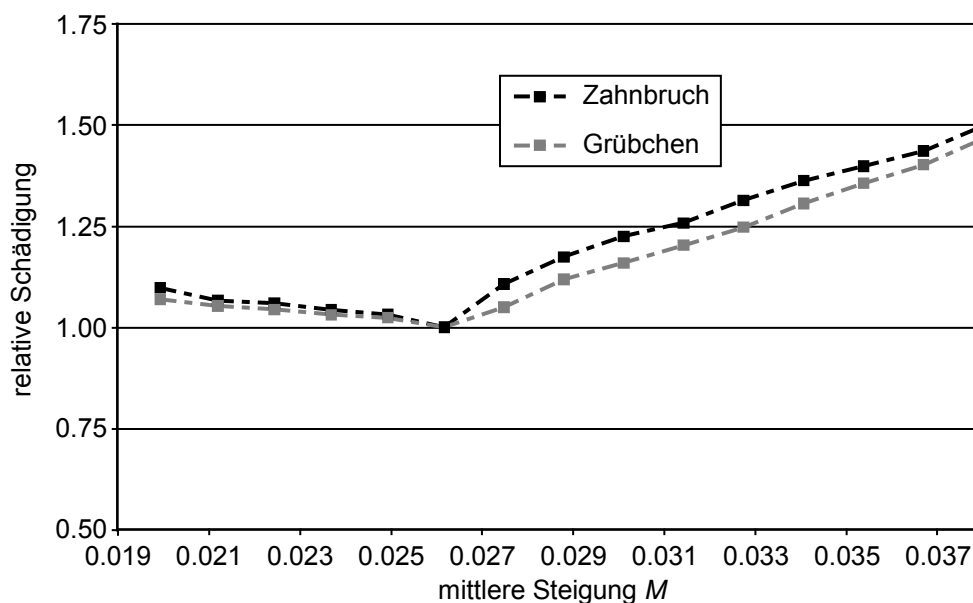
Zahnbruchschädigung leicht. Im Bereich sehr hoher Steigungen nimmt die relative Zahnbruchschädigung wieder zu. Die maximale relative Zahnbruchschädigung von ca. 1,13 wird bei einer mittleren Steigung von 0,038 erreicht.

Die mittlere Beschleunigung sinkt im 3. Gang über den gesamten Bereich der mittleren Steigung. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 3. Gang und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung zeigt im 3. Gang einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf zu den relativen Schädigungen im 3. Gang. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

#### 4. Gang

In Bild 6.34 sind die relativen Schädigungen des 4. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter mittlere Steigung  $M$  dargestellt.



**Bild 6.34: Relative Schädigung des 4. Gangs über der mittleren Steigung**

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 4. Gang sinkt im Bereich von sehr kleinen mittleren Steigungen bis zur Referenzsteigung. Der Anteil des 4. Gangs steigt in diesem Bereich kaum. Durch die vermehrten Rückschaltungen aus höheren Gängen in den 4. Gang und vom 4. Gang in den 3. Gang verschiebt sich das Drehmoment zu kleineren Werten. Dadurch sinkt die relative Schädigung. Für den Bereich von der Referenzsteigung bis zu sehr großen mittleren Steigungen nimmt die relative Schädigung des 4. Gangs zu. Durch die vermehrten Rückschaltungen steigt der Anteil des 4. Gangs stark. Durch die zunehmende mittlere Steigung wachsen der Steigungswiderstand und die damit notwendigen Drehmomente an. Dadurch nimmt die relative Schädigung zu. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,47 wird bei einer mittleren Steigung von 0,038 erreicht.

### Zahnbruch

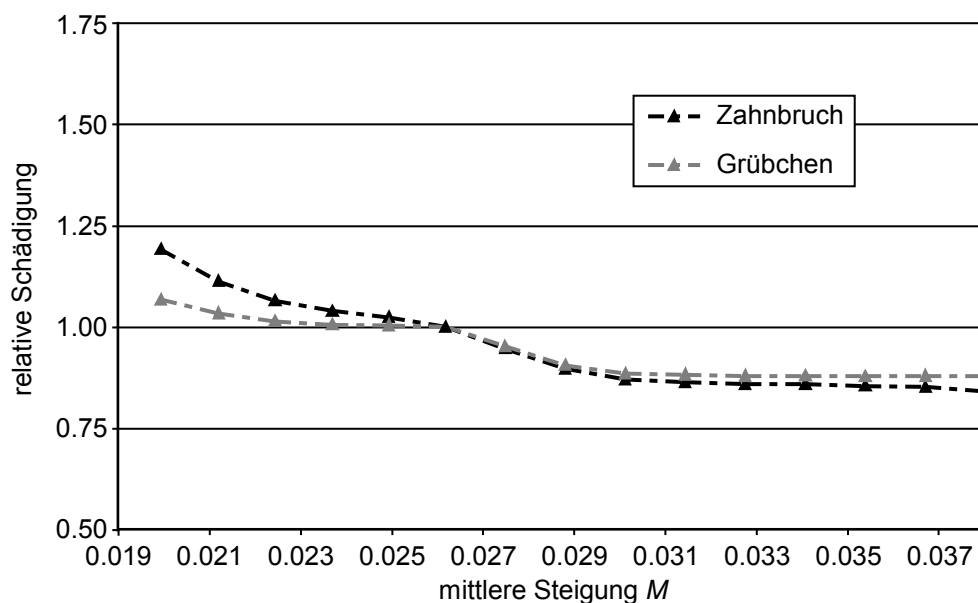
Der Verlauf der relativen Zahnbruchschädigung ist dem der relativen Grübchenschädigung qualitativ sehr ähnlich. Die relative Zahnbruchschädigung im 4. Gang nimmt im Bereich sehr kleiner Steigungen bis zur Referenzsteigung leicht ab. Für Steigungen größer der Referenzsteigung nimmt die relative Schädigung zu. Die Zunahme der Ganganteile überkompensiert den Einfluss des geringeren äquivalenten Lastmoments. Die maximale relative Zahnbruchschädigung von ca. 1,50 wird bei einer mittleren Steigung von 0,038 erreicht.

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang nimmt über den gesamten Bereich der mittleren Steigung ab. Es besteht somit kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 4. Gang und den relativen Schädigungen im 4. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang zeigt qualitativ einen sehr ähnlichen Verlauf wie die relativen Schädigungen im 4. Gang. Dieser Verlauf entspricht dem Verlauf der relativen Schädigungen im 4. Gang. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 4. Gang und den relativen Schädigungen im 4. Gang.

### 5. Gang

In Bild 6.35 sind die relativen Schädigungen des 5. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter mittlere Steigung  $M$  dargestellt.



**Bild 6.35: Relative Schädigung des 5. Gangs über der mittleren Steigung**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung des 5. Gangs nimmt über den gesamten Bereich ab. Für Steigungen bis zu mittleren Werten wird an Anstiegen vermehrt aus dem 6. in den 5. Gang bzw. vom 5. in den 4. Gang zurück geschaltet. Dadurch bleibt der Anteil des 5. Gangs nahezu konstant. Die Leistung wird hierbei jedoch bei höheren Drehzahlen und somit niedrigeren Momenten erzeugt. Dadurch sinkt die relative Schädigung. Für Steigungen ab mitt-

leren Werten sinkt der Anteil des 5. Gangs. Immer häufiger können Beschleunigungen aber auch Konstantfahrten nicht mehr im 5. Gang gefahren werden. Die verbleibenden Anteile werden mit erhöhtem Moment befahren. Der Einfluss des sinkenden Ganganteils überwiegt hierbei aber den Einfluss des steigenden Moments. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,07 wird bei einer mittleren Steigung von 0,02 erreicht.

### Zahnbruch

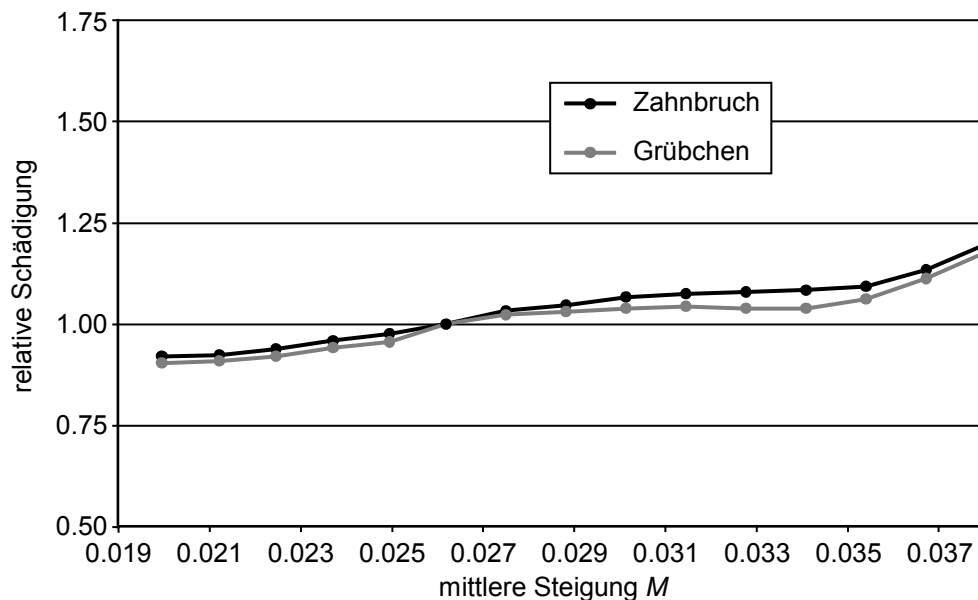
Der Verlauf der relativen Zahnbruchschiädigung ist dem der relativen Grübchenschädigung qualitativ sehr ähnlich. Die relative Zahnbruchschiädigung im 5. Gang nimmt über den gesamten Bereich der mittleren Steigung ab. Die maximale relative Zahnbruchschiädigung von ca. 1,19 wird bei einer mittleren Steigung von 0,02 erreicht.

Die mittlere Beschleunigung des 5. Gangs nimmt über den gesamten Bereich der mittleren Steigung zu. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 5. Gang und den relativen Schädigungen im 5. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung steigt zunächst, um danach wieder leicht zu sinken. Somit ist kein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 5. Gang und den relativen Schädigungen im 5. Gang zu erkennen.

### 6. Gang

In Bild 6.36 sind die relativen Schädigungen des 6. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter mittlere Steigung  $M$  dargestellt.



**Bild 6.36: Relative Schädigung des 6. Gangs über der mittleren Steigung**

### Grübchenbildung

Die relative Schädigung im 6. Gang steigt bis zu mittleren Steigungen. Durch den erhöhten Steigungswiderstand wird vermehrt zurück geschaltet. Dadurch sinkt der Anteil des 6. Gangs. Die verbleibenden Anteile werden mit einem erhöhten Moment gefahren. Der Einfluss der Erhöhung des Moments überwiegt den Einfluss der Verringerung des Gang-

anteils. Im Bereich mittlerer bis hoher Steigungen sinkt die relative Schädigung leicht. Durch den weiter zunehmenden Steigungswiderstand werden Anstiege vermehrt in kleineren Gängen befahren, die Anteile des 6. Gangs sinken weiter. Die Gefällstrecken werden mit zunehmender mittlerer Steigung ebenfalls steiler, sodass hier das Beschleunigungspotential im 6. Gang zunimmt und die notwendigen Momente sinken. Dadurch sinkt auch die relative Schädigung. Für hohe bis sehr hohe mittlere Steigungen nimmt die relative Schädigung wieder zu. In diesem Bereich steigt das notwendige Moment durch den Steigungswiderstand an Anstiegen weiter. Auch verhältnismäßig kleine Steigungen fordern ein hohes Moment. Schnell gefahrene Streckenabschnitte erfordern die Nutzung des 6. Gangs, sodass nicht zurück geschaltet wird. Dadurch steigt die relative Schädigung. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,18 wird bei einer mittleren Steigung von 0,038 erreicht.

### Zahnbruch

Der Verlauf der relativen Zahnbruchschädigung ist dem der relativen Grübchenschädigung qualitativ sehr ähnlich. Die relative Zahnbruchschädigung des 6. Gangs steigt im gesamten Bereich der mittleren Steigungen. Die steigenden Momente durch den erhöhten Steigungswiderstand überkompensieren die sinkenden Ganganteile durch die Rückschaltungen. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,20 wird bei einer mittleren Steigung von 0,038 erreicht.









Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang steigt über den gesamten Bereich der mittleren Steigung. Es besteht somit ein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt über den gesamten Bereich der mittleren Steigung. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang.

### 6.5.5 Fazit

In Tabelle 10 sind die Einflüsse des Höhenprofils qualitativ und quantitativ aufgeführt.

**Tabelle 10: Einfluss der mittleren Steigung**

	Grübchen		Zahnbruch	
3. Gang		1,12		1,13
4. Gang		1,47		1,50
5. Gang		1,07		1,19
6. Gang		1,18		1,20

Die relativen Schädigungen innerhalb eines Gangs zeigen qualitativ und quantitativ einen sehr ähnlichen Verlauf. Einzig innerhalb des 5. Gangs sind quantitative Unterschiede deutlich. Die Verläufe der einzelnen Schädigungsmechanismen über die Gänge betrachtet, zeigen einen qualitativ und quantitativ sehr großen Unterschied auf. Die größten relativen Schädigungen weist der 3. Gang auf.

Der Parameter mittlere Steigung  $M$  eignet sich nicht zur Raffung, da die relative Zahnbruchschädigung immer höher als die relative Grübchenschädigung ist. Unter Umständen eignen sich noch höhere, als die untersuchten mittleren Steigungen zur Raffung des 3. Gangs.

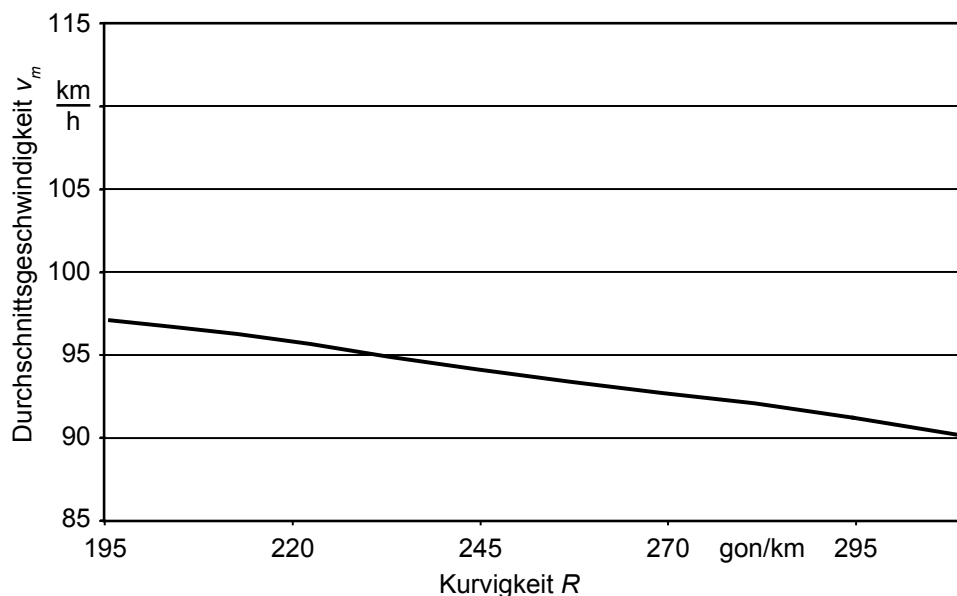


## 6.6 Kurvigkeit

Der folgende Abschnitt befasst sich mit dem Einfluss der Kurvigkeit auf die relative Schädigung. Die Kurvigkeit einer Strecke beeinflusst das Fahrverhalten nachhaltig. Vor einer Kurve wird der Fahrer gezwungen, seine Geschwindigkeit zu reduzieren, nach der Kurve wird er beschleunigen, um wieder seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Der Kurvenradius bestimmt mit seinen physikalischen Grenzen die maximal mögliche Kurvengeschwindigkeit.

### 6.6.1 Durchschnittsgeschwindigkeit

In Bild 6.37 ist die mittlere Geschwindigkeit über dem Parameter mittlere Kurvigkeit  $R$  dargestellt.

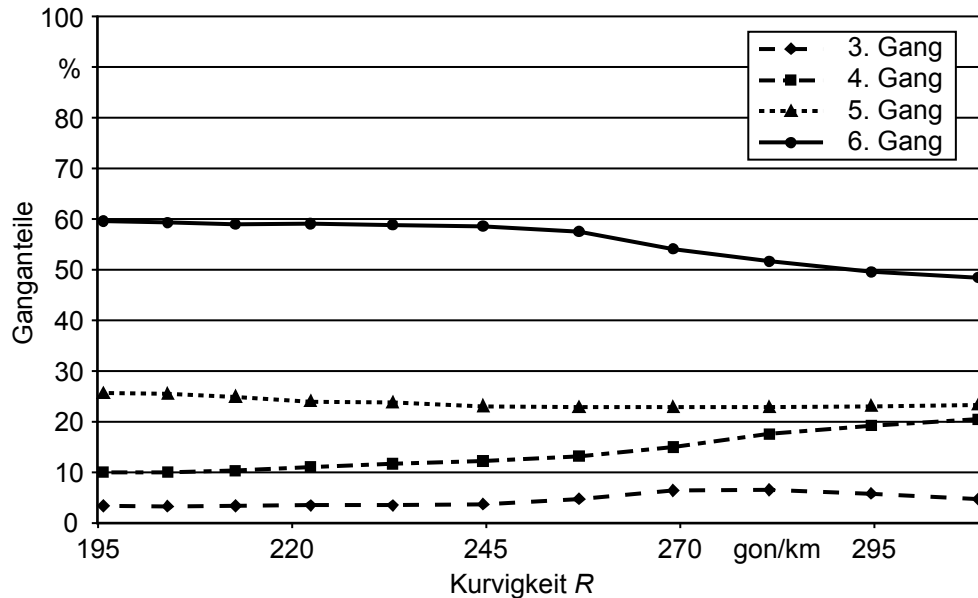


**Bild 6.37:** Erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über der mittleren Kurvigkeit

Die Kurvigkeit beeinflusst die Durchschnittsgeschwindigkeit über die gesamte Fahrstrecke sehr stark. Die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers bleibt hierbei unverändert bei 110 km/h. Zu erkennen ist, dass mit steigender Kurvigkeit die Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 97 km/h auf ca. 90 km/h absinkt. Dies ist damit zu erklären, dass die physikalisch fahrbare, mögliche Kurvengeschwindigkeit durch die kleineren Radien sinkt. Um die physikalischen Grenzen einzuhalten, ist der Fahrer gezwungen, vor der Kurve die Geschwindigkeit zu reduzieren. Ein steigender Parameter  $R$  bedeutet dabei, dass die Kurvigkeit der Strecke zunimmt. Die Referenzstrecke hat eine Kurvigkeit von  $R \approx 245$  gon/km.

### 6.6.2 Ganganteile

In Bild 6.38 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Gänge über dem Parameter mittlere Kurvigkeit  $R$  dargestellt.



**Bild 6.38:** Ganganteile über der mittleren Kurvigkeit

Die Anteile des 1. und 2. Gangs sind aufgrund des hohen Geschwindigkeitsniveaus auf der simulierten Landstraße sehr gering, sodass sie im Weiteren nicht beschrieben werden.

#### 3. Gang

Der Anteil des 3. Gangs ist bei Kurvigkeiten kleiner der Referenzkurvigkeit nahezu konstant. Das Fahrzeug wird durch die Kurven kaum gebremst, die nachfolgenden Beschleunigungen sind nicht so intensiv und erfolgen auf sehr hohem Geschwindigkeitsniveau. Für Kurvigkeiten größer der Referenzkurvigkeit steigen die Anteile des 3. Gangs. Durch die enger werdenden Kurven sinkt die Kurvengeschwindigkeit. Für den nachfolgenden Beschleunigungsvorgang wird vermehrt in den 3. Gang zurück geschaltet. Bei sehr großer Kurvigkeit von  $R > 285$  gon/km erkennt man, dass der Ganganteil des 3. Gangs wieder abnimmt. Bei sehr großen Kurvigkeiten sinkt die Kurvengeschwindigkeit weiter, sodass vermehrt in den 2. Gang zurück geschaltet wird. Der Anteil des 3. Gangs steigt von ca. 3 % bei sehr geringen Kurvigkeiten bis zu ca. 5 % bei sehr großen Kurvigkeiten.

#### 4. Gang

Der Anteil des 4. Gangs steigt mit zunehmender Kurvigkeit kleiner der Referenzkurvigkeit leicht. Bei steigender Kurvigkeit muss die Geschwindigkeit vor den Kurven immer stärker reduziert werden. Nach der Kurve wird stärker beschleunigt, um wieder die Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Für diese Beschleunigungen wird in den 4. Gang zurück geschaltet. Für Kurvigkeiten größer der Referenzkurvigkeit steigt der Anteil des 4. Gangs stark. Dies ist zum einen durch die Rückschaltungen zum Beschleunigen zu erklären. Durch die geringeren Kurvengeschwindigkeiten wird der 4. Gang aber auch vermehrt für

Konstantfahrten verwendet und Anteile der höheren Gänge auf den 4. Gang verlagert. Der Anteil des 4. Ganges steigt über die betrachtete Kurvigkeit von ca. 10 % auf ca. 20 %.

### 5. Gang

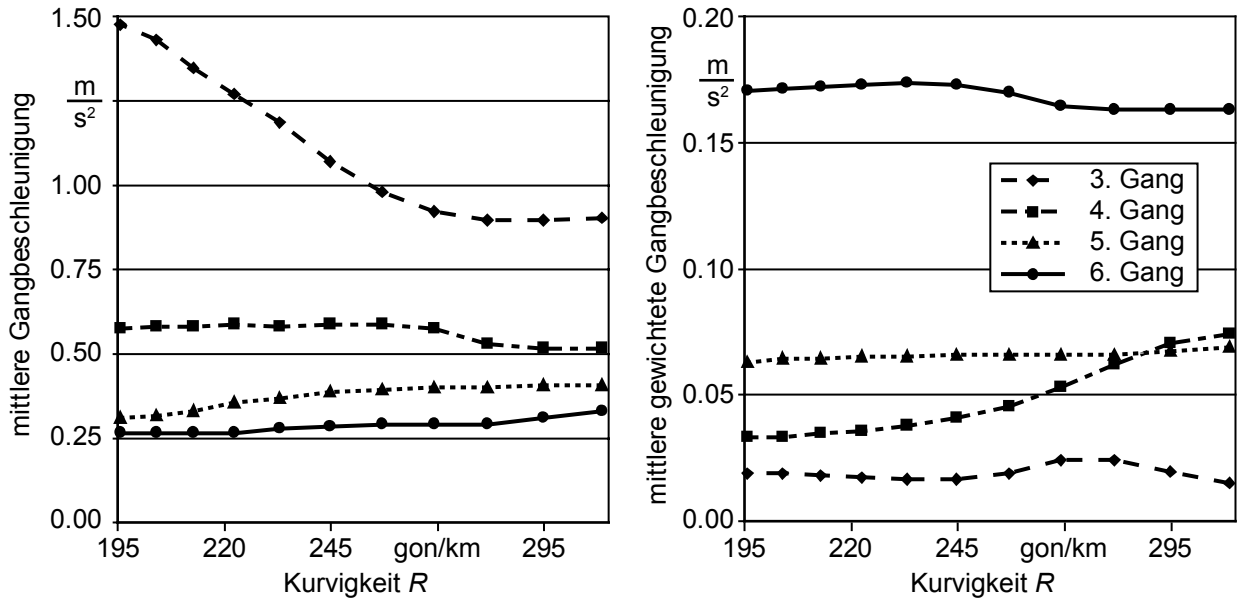
Die Anteile des 5. Ganges steigen von sehr kleinen Kurvigkeiten ausgehend zuerst leicht, um dann bis zu sehr hohen Kurvigkeiten wieder leicht abzusinken. Für sehr geringe Kurvigkeiten sind die Kurvengeschwindigkeiten so hoch, dass häufig kaum verzögert werden muss und daher der 5. Gang nur selten für Beschleunigungsvorgänge aus den Kurven verwendet wird. Für leicht steigende Kurvigkeiten muss vermehrt aus dem 6. Gang zurück geschaltet werden, um die geforderte Beschleunigungsleistung bereitzustellen. Mit weiter steigenden Kurvigkeiten sinken die Kurvengeschwindigkeiten, und es wird vermehrt zum Herausbeschleunigen in den 4. Gang zurück geschaltet. Bei extrem hoher Kurvigkeit steigt der Anteil des 5. Ganges wieder leicht. Durch die sehr kleinen Kurvenradien sinkt die Geschwindigkeit stark, sodass auch leichte Kurven nicht mehr im Geschwindigkeitsbereich des 6. Ganges gefahren werden können und in den 5. Gang zurück geschaltet wird. Der Anteil des 5. Ganges sinkt von ca. 26 % bei sehr geringen Kurvigkeiten bis auf ca. 23 % bei sehr großen Kurvigkeiten.

### 6. Gang

Der Anteil des 6. Ganges sinkt mit größerer Kurvigkeit über den gesamten Bereich. Bei steigender Kurvigkeit muss die Geschwindigkeit vor den Kurven immer stärker reduziert und nach der Kurve stärker beschleunigt werden, um wieder die Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Um die geforderten Beschleunigungen zu erreichen, wird vermehrt zurück geschaltet, es werden Anteile des 6. Ganges auf die unteren Gänge verlagert. Für Kurvigkeiten kleiner der Referenzkurvigkeit ist diese Abnahme des Ganganteils gering. Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Fahrzeugs liegt sehr hoch. Die meisten Streckenanteile werden im Geschwindigkeitsbereich des 6. Ganges gefahren. Der Anteil des 6. Ganges sinkt von ca. 60 % bei sehr geringen bis auf ca. 49 % bei sehr großen Kurvigkeiten.

### 6.6.3 Gangbeschleunigungen

In Bild 6.39 sind die mittleren Gangbeschleunigungen und die mittleren gewichteten Gangbeschleunigungen über dem Parameter mittlere Kurvigkeit  $R$  dargestellt.



**Bild 6.39: Mittlere Gangbeschleunigung und mittlere gewichtete Gangbeschleunigung über der mittleren Kurvigkeit**

Auf die Beschreibung des 1. und 2. Gangs wird aufgrund der geringen Ganganteile im Weiteren verzichtet.

#### 3. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang sinkt mit steigender Kurvigkeit bis zu einem Minimum bei hohen Kurvigkeiten, um dann wieder leicht anzusteigen. Mit steigender Kurvigkeit sinken die fahrbaren Kurvengeschwindigkeiten. Das Herausbeschleunigen aus Kurven wird durch die physikalischen Grenzen eingeschränkt, sodass das Beschleunigungspotenzial im 3. Gang nicht genutzt werden kann. Die sinkende Durchschnittsgeschwindigkeit hat zur Folge, dass vermehrt Streckenanteile im 3. Gang bei Konstantfahrt gefahren werden. Dadurch sinkt die mittlere Gangbeschleunigung. Bei sehr hohen Kurvigkeiten sinken die Kurvengeschwindigkeiten so weit, dass Beschleunigungsanteile aus dem 4. Gang auf den 3. Gang verlagert werden. Dadurch steigt die mittlere Gangbeschleunigung wieder leicht.

Die mittlere gewichtete Gangbeschleunigung sinkt mit steigender Kurvigkeit bis zur Referenzkurvigkeit. Dies ist durch den nahezu konstanten Ganganteil und die sinkende Gangbeschleunigung zu erklären. Mit steigender Kurvigkeit steigt die mittlere gewichtete Gangbeschleunigung im 3. Gang bis zu einem Maximum, um danach wieder zu fallen. Der Einfluss des Ganganteils ist in diesem Bereich stärker als der Einfluss der mittleren Gangbeschleunigung.

#### 4. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang bleibt bis zu hohen Kurvigkeiten nahezu konstant, um dann leicht zu sinken. Nach einem Minimum steigt dann die mittlere Gangbeschleunigung wieder leicht. Bei steigender Kurvigkeit steigen die notwendigen Beschleunigungsvorgänge im 4. Gang. Gleichzeitig steigen die Konstantfahrtanteile im 4. Gang durch Verlagerung aus den höheren Gängen. Diese beiden Effekte kompensieren sich. Bei sehr hohen Kurvigkeiten wird das Beschleunigungsvermögen durch die Kurvenverläufe begrenzt, dadurch sinkt die mittlere Gangbeschleunigung. Bei extrem hoher Kurvigkeit werden vermehrt Beschleunigung im 4. Gang ausgeführt, die zuvor im 5. Gang erfolgten. Hierdurch steigt die mittlere Gangbeschleunigung im 4. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang steigt mit zunehmender Kurvigkeit. Dies ist durch den ansteigenden Ganganteil zu erklären. Bis zu mittleren bis hohen Kurvigkeiten steigt der Ganganteil bei gleich bleibender mittlerer Beschleunigung leicht. Bei hohen bis sehr hohen Kurvigkeiten steigt der Ganganteil sehr stark. Dieser Effekt überkompensiert die leichte Abnahme der mittleren Gangbeschleunigung.

#### 5. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang steigt mit zunehmender Kurvigkeit. Mit zunehmender Kurvigkeit sinken die Konstantfahrtanteile im 5. Gang. Vor Kurven muss stärker verzögert und am Kurvenende wieder beschleunigt werden. Diese Beschleunigungen werden mit steigender Kurvigkeit intensiver.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang steigt mit zunehmender Kurvigkeit. In Bereichen, in denen der Ganganteil konstant bleibt, steigt die mittlere Beschleunigung, in Bereichen, in denen die Ganganteile zunehmen, bleiben die mittleren Beschleunigungen nahezu konstant. Dadurch steigen die mittleren gewichteten Beschleunigungen im 5. Gang über den gesamten Bereich der Kurvigkeit.

#### 6. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang nimmt über der Kurvigkeit zu. Durch die steigende Kurvigkeit verringert sich die Durchschnittsgeschwindigkeit. Vor den enger werdenden Kurven muss stärker verzögert und nach den Kurven stärker beschleunigt werden, um wieder die Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Die stärkeren Verzögerungen und Beschleunigungen steigern die mittleren Beschleunigungen im 6. Gang.

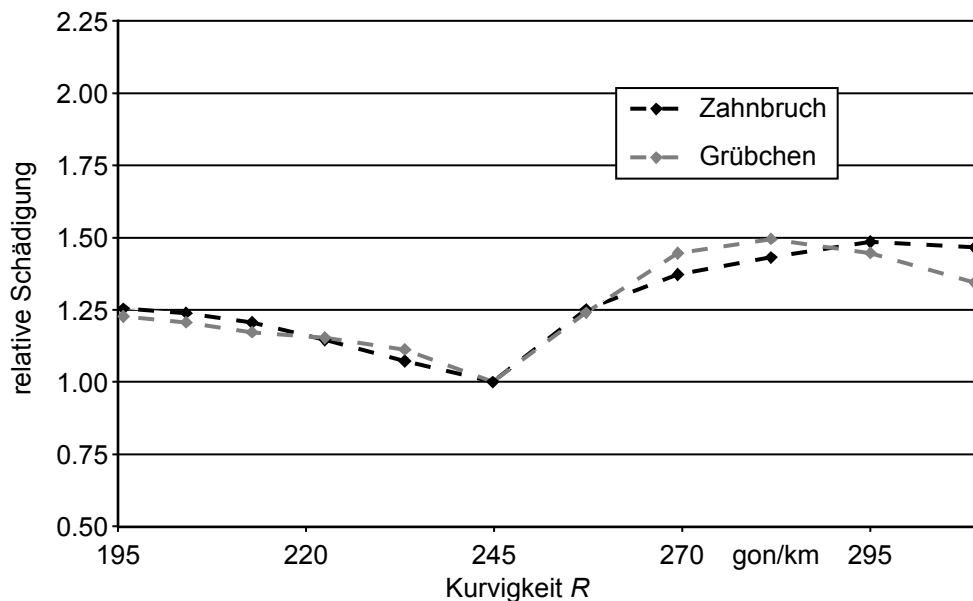
Die mittleren gewichteten Beschleunigungen im 6. Gang steigen bis zur Referenzkurvigkeit leicht. Dies ist durch den nahezu konstanten Ganganteil und die steigende mittlere Beschleunigung zu erklären. Im Bereich von der Referenzkurvigkeit bis zu hohen Kurvigkeiten sinkt die mittlere gewichtete Beschleunigung. Dies ist durch den stark fallenden Ganganteil zu erklären, der die leicht steigende mittlere Beschleunigung überkompensiert. Im Bereich sehr hoher Kurvigkeiten verändert sich die mittlere gewichtete Gangbeschleunigung kaum. Dies ist durch den leicht fallenden Ganganteil und die leicht steigende mittlere Gangbeschleunigung zu erklären.

### 6.6.4 Relative Schädigung

Im Folgenden werden die relativen Schädigungen, nach der in Kap. 5.7 beschriebenen Vorgehensweise, erläutert. Die relativen Schädigungen der Gänge 1 und 2 werden nicht betrachtet, da der Streckenanteil dieser Gänge sehr gering ausfällt.

#### 3. Gang

In Bild 6.40 sind die relativen Schädigungen für den 3. Gang über der mittleren Kurvigkeit  $R$  dargestellt.



**Bild 6.40: Relative Schädigung des 3. Ganges über der mittleren Kurvigkeit**

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 3. Gang fällt mit steigender Kurvigkeit bis zur Referenzkurvigkeit. Für Kurvigkeiten größer der Referenzkurvigkeit steigt die relative Schädigung bis zu einem Maximum bei einer Kurvigkeit von 282 gon/km. Für höhere Kurvigkeiten sinkt die relative Grübchenschädigung wieder. Bei geringen Kurvigkeiten kann das Beschleunigungsvermögen im 3. Gang gut genutzt werden. Bei steigender Kurvigkeit kann das Beschleunigungsvermögen nicht mehr voll genutzt werden. Für extrem hohe Kurvigkeiten bieten die sehr engen Kurven zu wenig Möglichkeit, das Beschleunigungsvermögen des 3. Ganges zu nutzen. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,49 wird bei einer mittleren Kurvigkeit von 282 gon/km erreicht.

#### Zahnbruch

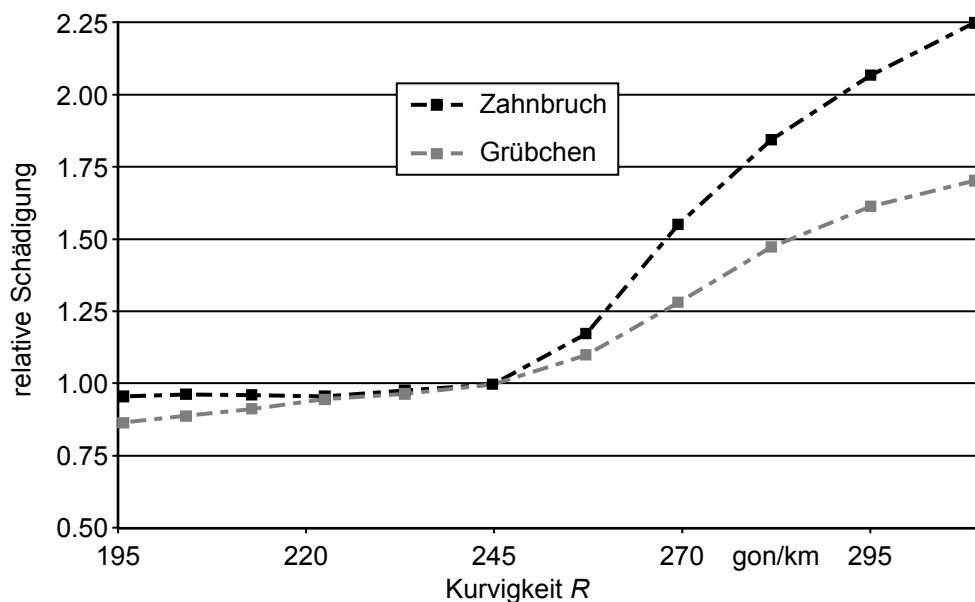
Die relative Zahnbruchschiädigung zeigt einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf zu der relativen Grübchenschädigung. Die relative Zahnbruchschiädigung im 3. Gang sinkt für steigende Kurvigkeiten kleiner der Referenzkurvigkeit. Das Maximum der relativen Zahnbruchschiädigung liegt bei höheren Kurvigkeiten als das Maximum der relativen Grübchenschädigung. Die maximale relative Zahnbruchschiädigung von ca. 1,49 wird bei einer mittleren Kurvigkeit von 295 gon/km erreicht.

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang fällt mit zunehmender mittlerer Kurvigkeit. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 3. Gang und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 3. Gang sinkt bis zur Referenzkurvigkeit. Für größere Kurvigkeiten steigt die mittlere gewichtete Beschleunigung wieder und bildet bei einer Kurvigkeit von 282 gon/km ein Maximum aus. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 3. Gang und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

#### 4. Gang

In Bild 6.41 sind die relativen Schädigungen für den 4. Gang über der mittleren Kurvigkeit  $R$  dargestellt.



**Bild 6.41: Relative Schädigung des 4. Gangs über der mittleren Kurvigkeit**

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 4. Gang steigt mit zunehmender Kurvigkeit. Durch die zunehmende Kurvigkeit wird vermehrt in den 4. Gang zum Beschleunigen zurück geschaltet. Durch die sinkende Durchschnittsgeschwindigkeit wird der 4. Gang zusätzlich häufiger für Konstantfahrten verwendet. Für Kurvigkeiten kleiner der Referenzkurvigkeit steigt die relative Schädigung leicht. Für Kurvigkeiten größer der Referenzkurvigkeit steigt die relative Schädigung stark. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,70 wird bei einer mittleren Kurvigkeit von 308 gon/km erreicht.

#### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschiädigung zeigt einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf zu der relativen Grübchenschädigung. Für sehr geringe Kurvigkeiten steigt die relative Zahnbruchschiädigung geringfügig bis zur Referenzkurvigkeit. Im Bereich von Kurvigkeiten größer der Referenzkurvigkeit steigt die relative Zahnbruchschiädigung im 4. Gang stark. Die ma-

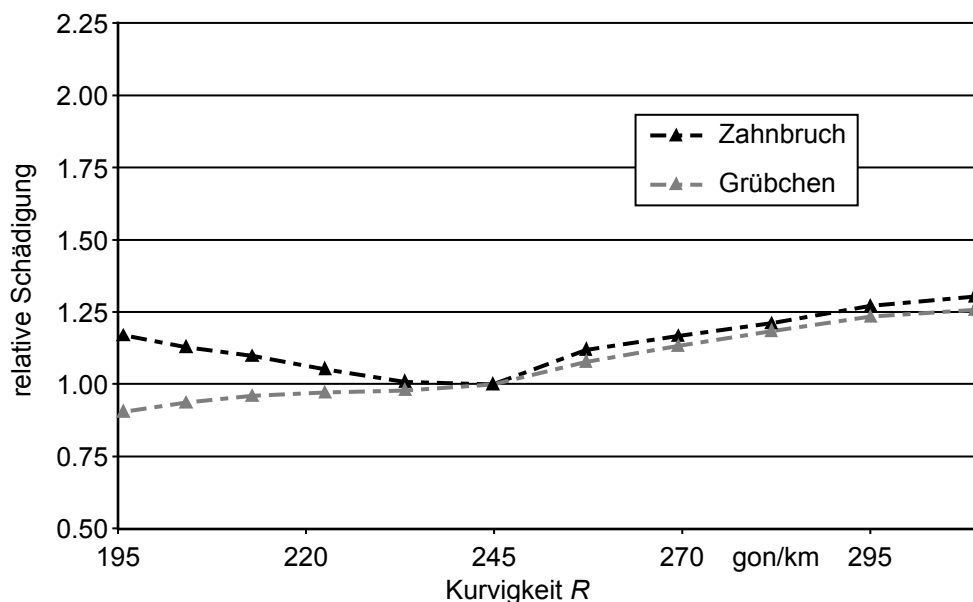
ximale relative Zahnbruchschiädigung von ca. 2,25 wird bei einer mittleren Kurvigkeit von 308 gon/km erreicht.

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang sinkt mit zunehmender Kurvigkeit leicht. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 4. Gang und den relativen Schädigungen im 4. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang steigt mit zunehmender Kurvigkeit. Die Verläufe der mittleren gewichteten Beschleunigung im 4. Gang und der relativen Schädigungen zeigen qualitativ eine sehr gute Übereinstimmung. Somit besteht ein klarer Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 4. Gang und den relativen Schädigungen im 4. Gang.

## 5. Gang

In Bild 6.42 sind die relativen Schädigungen für den 5. Gang über der mittleren Kurvigkeit  $R$  dargestellt.



**Bild 6.42: Relative Schädigung des 5. Gangs über der mittleren Kurvigkeit**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 5. Gang steigt über die gesamte Kurvigkeit. Durch die sinkende Durchschnittsgeschwindigkeit geht der Anteil des 5. Gangs zurück. Durch die häufigeren und stärkeren Verzögerungen und anschließenden Beschleunigungen steigen die Momente. Diese hohen Momente wirken stark schädigend. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,26 wird bei einer mittleren Kurvigkeit von 308 gon/km erreicht.

### Zahnbruch

Der Verlauf der relativen Zahnbruchschiädigung im 5. Gang gliedert sich in zwei Bereiche. Im Bereich von Kurvigkeiten kleiner der Referenzkurvigkeit sinken die relativen Schädigungen für zunehmende Kurvigkeit. Für Kurvigkeiten größer der Referenzkurvigkeit steigt



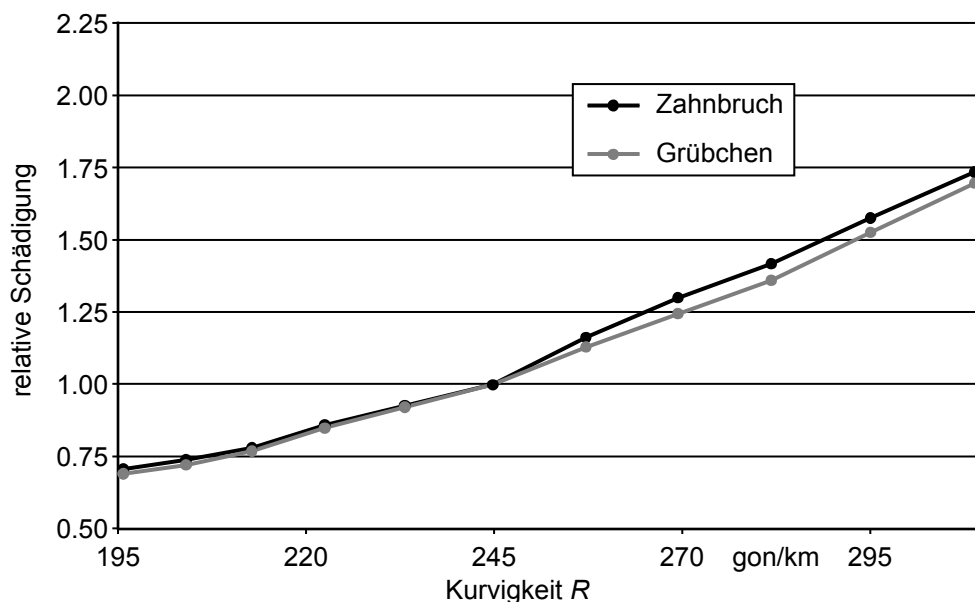
die relative Schädigung. Die maximale relative Zahnbruchs­chädigung von ca. 1,30 wird bei einer mittleren Kurvigkeit von 308 gon/km erreicht.

Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang steigt bis zu hohen Kurvigkeiten und fällt danach wieder. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 5. Gang und den relativen Schädigungen im 5. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang steigt mit zunehmender Kurvigkeit leicht. Zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 5. Gang und der relativen Grübchenschädigung im 5. Gang besteht ein bedingter Zusammenhang. Zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung und der relativen Zahnbruchs­chädigung im 5. Gang besteht kein Zusammenhang.

## 6. Gang

In Bild 6.43 sind die relativen Schädigungen für den 6. Gang über der mittleren Kurvigkeit  $R$  dargestellt.



**Bild 6.43: Relative Schädigung des 6. Gangs über der mittleren Kurvigkeit**

### Grübchenbildung

Die relative Schädigung im 6. Gang steigt mit zunehmender Kurvigkeit stark. Mit größerer Kurvigkeit werden die Verzögerungen und Beschleunigungen häufiger und intensiver. Intensivere Beschleunigungen haben höhere Momente zur Folge, diese höheren Momente wirken stark schädigend. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,70 wird bei einer mittleren Kurvigkeit von 308 gon/km erreicht.

### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchs­chädigung zeigt einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf zu der relativen Grübchenschädigung. Die relative Schädigung des 6. Gangs steigt mit zunehmender Kurvigkeit stark. Die maximale relative Zahnbruchs­chädigung von ca. 1,73 wird bei einer mittleren Kurvigkeit von 308 gon/km erreicht.









Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmender Kurvigkeit leicht. Somit besteht ein bedingter Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmender Kurvigkeit zunächst leicht und sinkt für Kurvigkeiten größer der Referenzkurvigkeit. Es besteht somit zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang kein Zusammenhang.

### 6.6.5 Fazit

In Tabelle 11 sind die Einflüsse der mittleren Kurvigkeit auf die relativen Schädigungen qualitativ und quantitativ aufgeführt.

**Tabelle 11: Einfluss der mittleren Kurvigkeit**

	Grübchen		Zahnbruch	
3. Gang		1,49		1,49
4. Gang		1,70		2,25
5. Gang		1,26		1,30
6. Gang		1,70		1,73

Die relativen Schädigungen innerhalb eines Gangs zeigen qualitativ im 3. und 6. Gang einen sehr ähnlichen Verlauf. Im 4. und 5. Gang sind die Verläufe sehr unterschiedlich. Quantitativ sind die Verläufe innerhalb der Gänge bis auf den 4. Gang sehr ähnlich. Der qualitative Verlauf der relativen Grübchenschädigung ist in den Gängen 4 bis 6 sehr ähnlich. Der Verlauf der Grübchenschädigung im 3. Gang weicht davon ab. Quantitativ gibt es deutliche Unterschiede im Verlauf der relativen Grübchenschädigung. Der qualitative und quantitative Verlauf der Zahnbruchsädigung der einzelnen Gänge weicht sehr stark voneinander ab. Die größten relativen Schädigungen weist der 3. Gang auf.

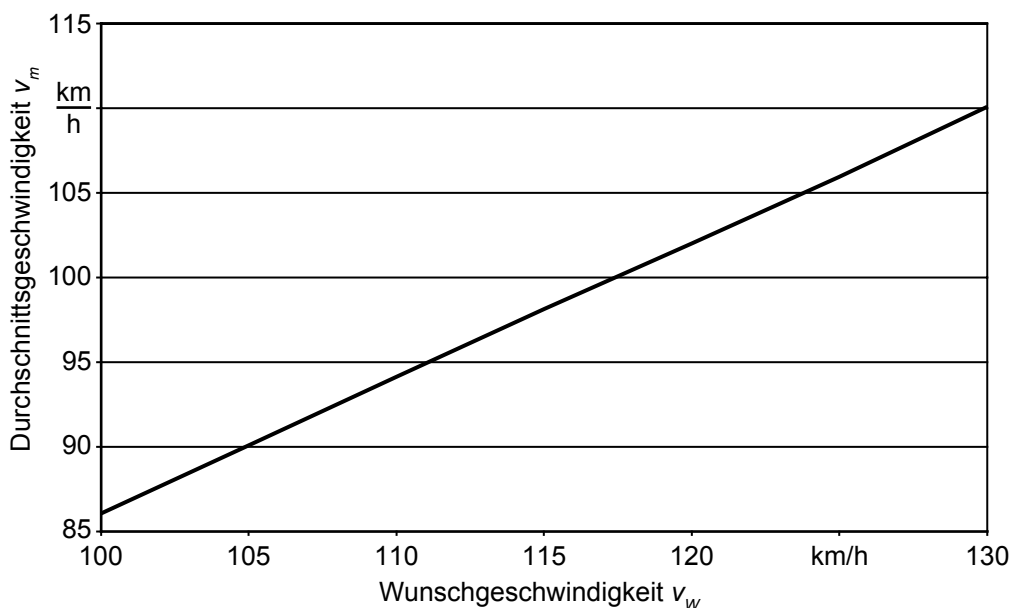
Der Parameter mittlere Kurvigkeit  $R$  eignet sich nur zur Raffung des 3. Gangs und hier auch nur eingeschränkt. Für alle anderen Gänge liegt die relative Grübchenschädigung unter der relativen Zahnbruchsädigung und somit ist für diese Gänge eine Raffung nicht zulässig.

## 6.7 Wunschgeschwindigkeit

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen des Einflusses der Wunschgeschwindigkeit auf die relativen Schädigungen beschrieben. Die Wunschgeschwindigkeit als fahrerspezifischer Parameter wurde hierbei in 10 km/h Schritten von 100 km/h bis 130 km/h variiert.

### 6.7.1 Durchschnittsgeschwindigkeit

In Bild 6.44 ist die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über dem Parameter Wunschgeschwindigkeit dargestellt

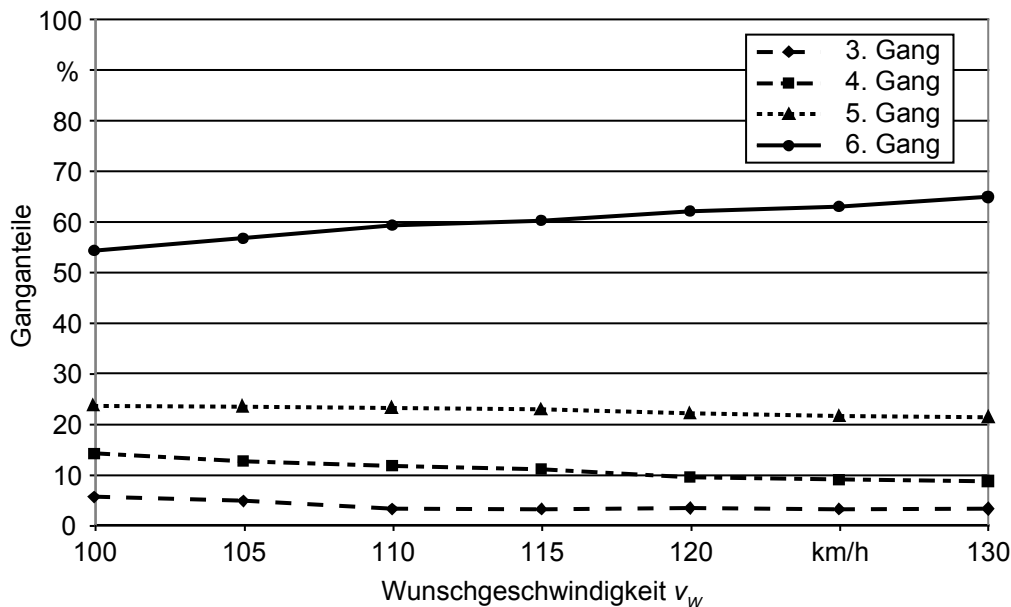


**Bild 6.44: Erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit über der Wunschgeschwindigkeit**

Zu erkennen ist, dass die Wunschgeschwindigkeit einen nahezu linearen Einfluss auf die erzielte Durchschnittsgeschwindigkeit hat. Die Durchschnittsgeschwindigkeit steigt von ca. 86 km/h auf ca. 110 km/h. Das gefahrene Geschwindigkeitsprofil wird bei höheren Wunschgeschwindigkeiten stärker durch die Streckentopologie, insbesondere durch die Kurvigkeit beeinflusst. Das Geschwindigkeitsprofil weist dadurch bei höheren Wunschgeschwindigkeiten stärkere Verzögerungen und Beschleunigungen als bei niedrigen Wunschgeschwindigkeiten auf. Das Streckenprofil und die Fahrzeugkonfiguration entsprechen bei allen Simulationen der Referenzkonfiguration.

### 6.7.2 Ganganteile

In Bild 6.45 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Gänge über dem Parameter Wunschgeschwindigkeit dargestellt.



**Bild 6.45: Ganganteile über der Wunschgeschwindigkeit**

Die Anteile des 1. und 2. Gangs sind aufgrund des hohen Geschwindigkeitsniveaus auf der simulierten Landstraße sehr gering, sodass sie im Weiteren nicht beschrieben werden.

#### 3. Gang

Der Anteil des 3. Gangs sinkt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit leicht. Durch die steigende Durchschnittsgeschwindigkeit verlagert sich das Geschwindigkeitsprofil in den Bereich höherer Gänge, sodass der 3. Gang nur noch für sehr starke Beschleunigungen bzw. wenige Streckenanteile mit sehr geringer Geschwindigkeit verwendet wird. Der Anteil des 3. Gangs sinkt von ca. 6 % bei Wunschgeschwindigkeit 100 km/h auf ca. 4 % bei Wunschgeschwindigkeit 130 km/h.

#### 4. Gang

Der Anteil des 4. Gangs sinkt ebenfalls mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Durch die steigende Durchschnittsgeschwindigkeit verlagert sich das Geschwindigkeitsprofil in den Bereich höherer Gänge, sodass der 4. Gang nur noch für starke Beschleunigungen bzw. wenige Streckenanteile mit geringer Geschwindigkeit verwendet wird. Der Anteil des 4. Gangs sinkt von ca. 15 % bei Wunschgeschwindigkeit 100 km/h auf ca. 9 % bei Wunschgeschwindigkeit 130 km/h.

#### 5. Gang

Der Anteil des 5. Gangs sinkt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit minimal. Durch das höhere Geschwindigkeitsprofil bekommt der 5. Gang Anteile aus den unteren Gängen

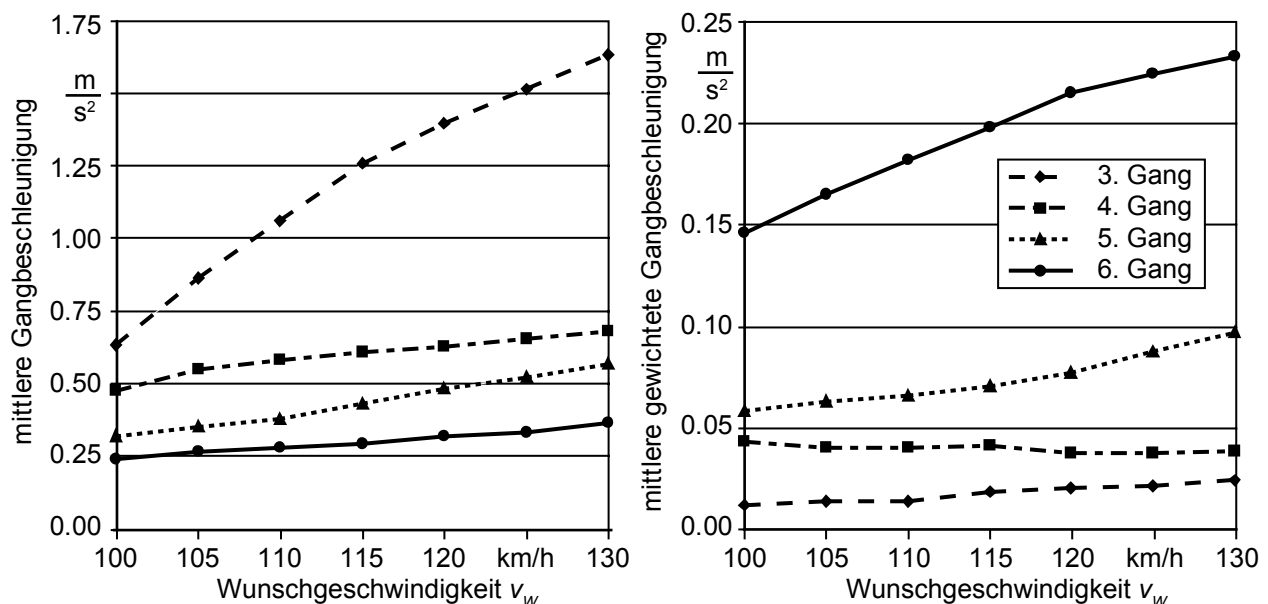
hinzu, gibt aber etwas mehr Anteile an den 6. Gang weiter. Der Anteil des 5. Gangs sinkt von ca. 23 % bei Wunschgeschwindigkeit 100 km/h auf ca. 22 % bei Wunschgeschwindigkeit 130 km/h.

## 6. Gang

Der Anteil des 6. Gangs steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit deutlich. Durch das schnellere Geschwindigkeitsprofil werden Streckenanteile mit moderaten Beschleunigungen und konstanter, hoher Geschwindigkeit vermehrt im 6. Gang gefahren. Der Anteil des 6. Gangs steigt von ca. 55 % bei Wunschgeschwindigkeit 100 km/h auf ca. 65 % bei Wunschgeschwindigkeit 130 km/h.

### 6.7.3 Gangbeschleunigungen

In Bild 6.46 sind die mittleren Beschleunigungen und die mittleren gewichteten Beschleunigungen der einzelnen Gänge über dem Parameter Wunschgeschwindigkeit dargestellt.



**Bild 6.46: Mittlere Gangbeschleunigung und mittlere gewichtete Gangbeschleunigung über der Wunschgeschwindigkeit**

Auf die Beschreibung des 1. und 2. Gangs wird aufgrund der geringen Ganganteile im Weiteren verzichtet.

## 3. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit stark. Durch das steigende Geschwindigkeitsprofil wird der 3. Gang zunehmend nur für starke bis sehr starke Beschleunigungen verwendet. Die Streckenanteile mit konstanter Geschwindigkeit nehmen mit zunehmender Geschwindigkeit deutlich ab.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 3. Gang nimmt ebenfalls deutlich zu. Der Einfluss der steigenden mittleren Beschleunigung überkompensiert den verringerten Ganganteil.

#### 4. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit deutlich. Wie im 3. Gang wird durch das höhere Geschwindigkeitsprofil der 4. Gang vermehrt für starke Beschleunigung und weniger als Fahrgang verwendet.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 4. Gang sinkt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit leicht. Die sinkenden Ganganteile haben einen größeren Einfluss als die steigende mittlere Beschleunigung.

#### 5. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit deutlich. Bei höheren Wunschgeschwindigkeiten wird das Geschwindigkeitsprofil durch die Streckentopologie stärker beeinflusst. Dadurch werden die Verzögerungen und anschließenden Beschleunigungen intensiver. Infolge dessen steigt die mittlere Beschleunigung im 5. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang steigt ebenfalls deutlich. Da der Ganganteil nahezu konstant bleibt, wird der Verlauf der mittleren gewichteten Beschleunigung durch die steigende mittlere Beschleunigung bestimmt.

#### 6. Gang

Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Wie im 5. Gang werden die Verzögerungen und Beschleunigungen durch das Streckenprofil bei höheren Wunschgeschwindigkeiten intensiver. Dadurch steigt die mittlere Beschleunigung im 6. Gang.

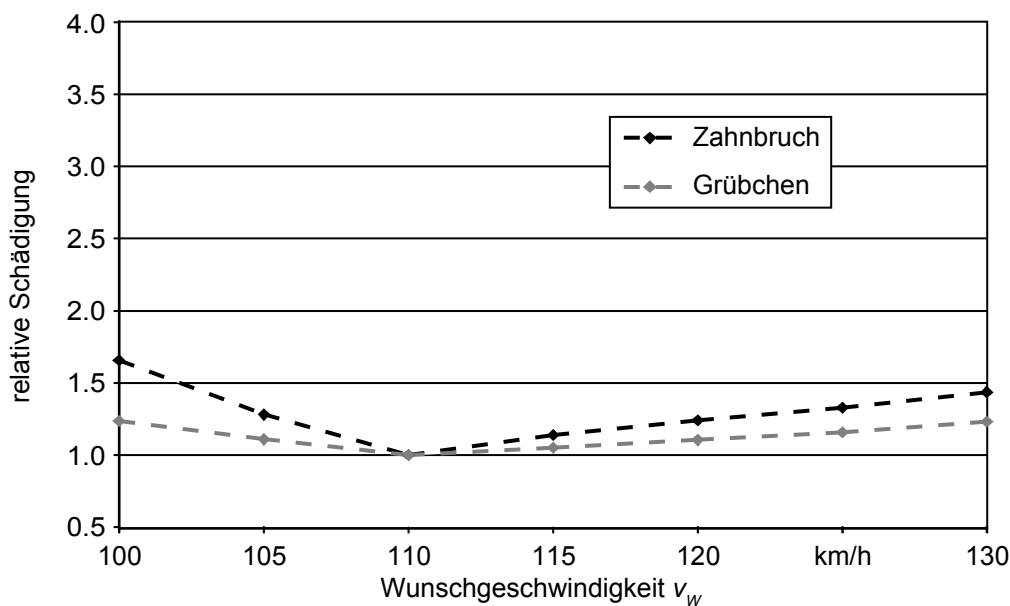
Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt stark. Der Verlauf der mittleren gewichteten Beschleunigung wird durch den steigenden Ganganteil und die steigende mittlere Beschleunigung bestimmt.

### 6.7.4 Relative Schädigung

Im Folgenden werden die relativen Schädigungen, nach der in Kap. 5.7 beschriebenen Vorgehensweise, erläutert. Die relativen Schädigungen der Gänge 1 und 2 werden nicht betrachtet, da der Streckenanteil dieser Gänge sehr gering ausfällt.

#### 3. Gang

In Bild 6.47 sind die relativen Schädigungen des 3. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Wunschgeschwindigkeit dargestellt.



**Bild 6.47: Relative Schädigung des 3. Gangs über der Wunschgeschwindigkeit**

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 3. Gang sinkt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit zunächst. Für höhere Wunschgeschwindigkeiten als die Referenzwunschgeschwindigkeit steigt die relative Grübchenschädigung wieder. Für geringe Wunschgeschwindigkeiten liegt das gefahrene Geschwindigkeitsprofil häufiger im Bereich des 3. Gangs. Dadurch steigt der Anteil des 3. Gangs. Für steigende Wunschgeschwindigkeiten nimmt der Anteil des 3. Gangs ab. Bei höheren Wunschgeschwindigkeiten wird die Fahrt durch die Streckentopologie, insbesondere durch Kurven, stärker beeinträchtigt. Somit muss häufiger und intensiver beschleunigt werden. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,24 wird bei einer Wunschgeschwindigkeit von 100 km/h erreicht.

#### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschiädigung zeigt einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf wie die relative Grübchenschädigung. Die relative Zahnbruchschiädigung nimmt ebenfalls bis zur Referenzwunschgeschwindigkeit ab und steigt für höhere Wunschgeschwindigkeiten wieder. Die relative Zahnbruchschiädigung liegt immer über den Werten der relativen Grüb-

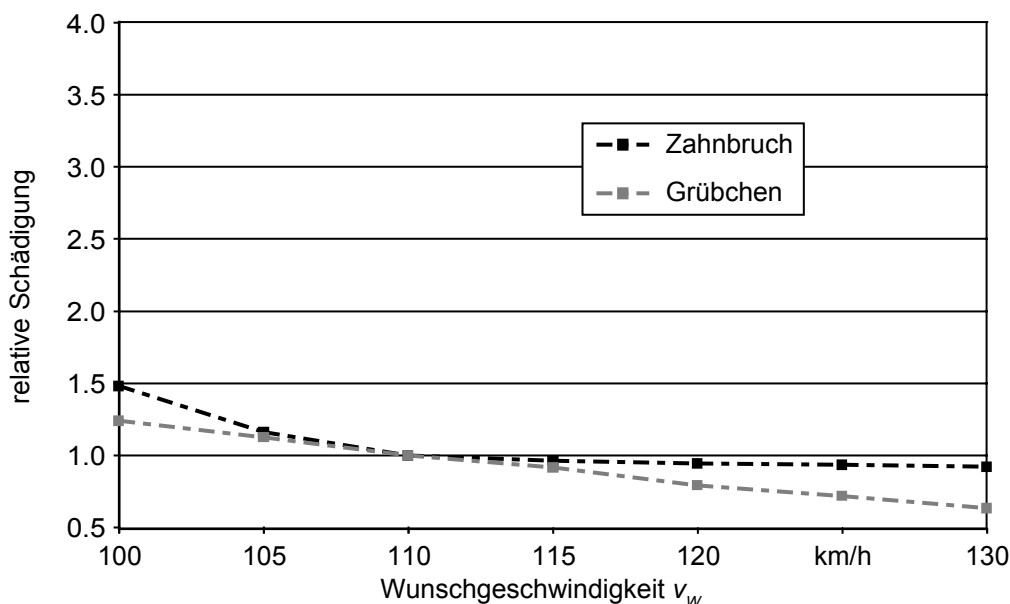
chenschädigung. Die maximale relative Zahnbruchsädigung von ca. 1,66 wird bei einer Wunschgeschwindigkeit von 100 km/h erreicht.

Die mittlere Beschleunigung im 3. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 3. Gang und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 3. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 3. Gang und den relativen Schädigungen im 3. Gang.

#### 4. Gang

In Bild 6.48 sind die relativen Schädigungen des 4. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Wunschgeschwindigkeit dargestellt.



**Bild 6.48: Relative Schädigung des 4. Gangs über der Wunschgeschwindigkeit**

#### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 4. Gang sinkt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Mit steigender Wunschgeschwindigkeit verschiebt sich das gefahrene Geschwindigkeitsprofil aus dem Bereich des 4. Gangs heraus. Der 4. Gang wird weiterhin für Beschleunigungen verwendet, verliert aber Fahranteile. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 1,24 wird bei einer Wunschgeschwindigkeit von 100 km/h erreicht.

#### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchsädigung zeigt einen qualitativ ähnlichen Verlauf wie die relative Grübchenschädigung. Die relative Zahnbruchsädigung sinkt für zunehmende Wunschgeschwindigkeiten. Abweichend vom Verlauf der relativen Grübchenschädigung sind der steilere Verlauf für kleine Wunschgeschwindigkeiten und der flachere Verlauf für hohe Wunschgeschwindigkeiten. Die Werte der relativen Zahnbruchsädigung liegen immer über den Werten der relativen Grübchenschädigung. Die maximale relative Zahn-



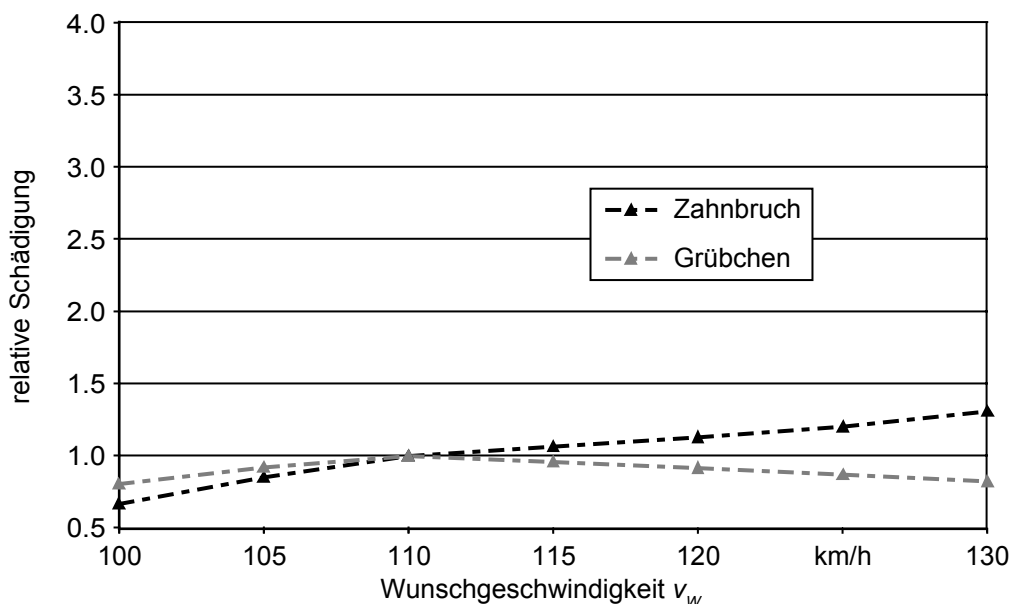
bruchschädigung von ca. 1,48 wird bei einer Wunschgeschwindigkeit von 100 km/h erreicht.

Die mittlere Beschleunigung im 4. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Somit besteht kein Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 4. Gang und den relativen Schädigungen im 4. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung sinkt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Es besteht somit ein Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 4. Gang und den relativen Schädigungen im 4. Gang.

## 5. Gang

In Bild 6.49 sind die relativen Schädigungen des 5. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Wunschgeschwindigkeit dargestellt.



**Bild 6.49: Relative Schädigung des 5. Gangs über der Wunschgeschwindigkeit**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 5. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit bis zur Referenzwunschgeschwindigkeit. Für höhere Wunschgeschwindigkeiten sinkt die relative Grübchenschädigung wieder. Der prozentuale Anteil des 5. Gangs ändert sich mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit nur marginal. Die absolute Anzahl der Überrollungen im 5. Gang sinkt aber mit steigender Wunschgeschwindigkeit. Aus diesem Grund sinkt die relative Grübchenschädigung trotz steigender Momente für höhere Wunschgeschwindigkeiten. Die maximale relative Grübchenschädigung von 1,0 wird bei der Referenzwunschgeschwindigkeit von 110 km/h erreicht.

### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschädigung steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Für Wunschgeschwindigkeiten größer der Referenzwunschgeschwindigkeit zeigt sich ein von der relativen Grübchenschädigung abweichender Verlauf. Die relative Zahnbruchschädi-

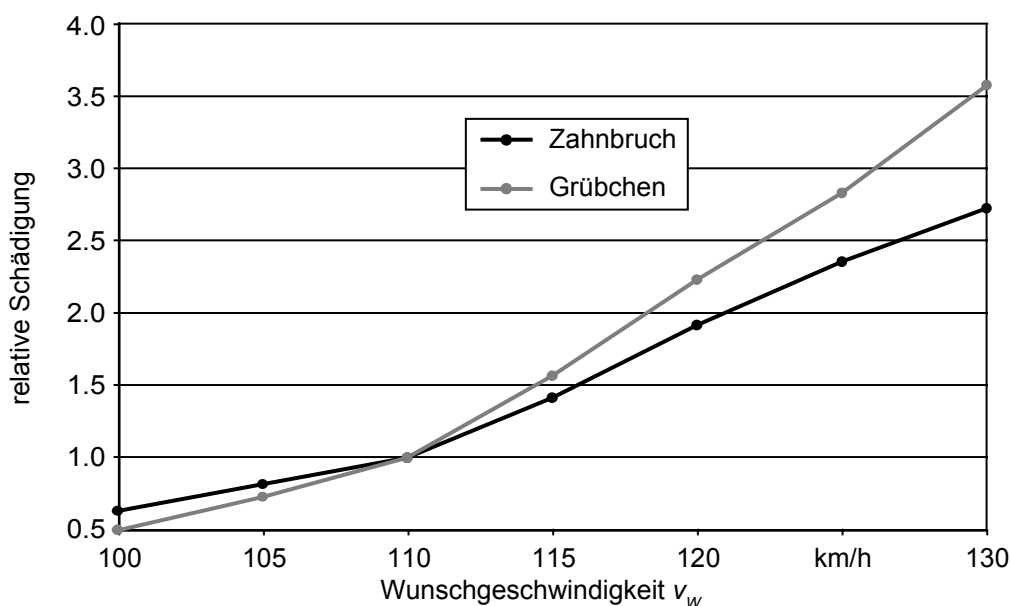
gung steigt trotz sinkender absoluter Überrollungen, da die für den Zahnbruch relevanten Schubmomente stärker ansteigen. Die maximale relative Zahnbruchschädigung von ca. 1,31 wird bei einer Wunschgeschwindigkeit von 130 km/h erreicht.

Die mittlere Beschleunigung im 5. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Zwischen der mittleren Beschleunigung im 5. Gang und der relativen Grübchenschädigung im 5. Gang besteht kein Zusammenhang. Für die mittlere Beschleunigung im 5. Gang und die relative Zahnbruchschädigung im 5. Gang besteht ein direkter Zusammenhang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang steigt für zunehmende Wunschgeschwindigkeiten. Somit besteht für die mittlere gewichtete Beschleunigung im 5. Gang kein Zusammenhang mit der relativen Grübchenschädigung im 5. Gang. Für die relative Zahnbruchschädigung im 5. Gang besteht ein Zusammenhang mit der mittleren gewichteten Beschleunigung im 5. Gang.

## 6. Gang

In Bild 6.50 sind die relativen Schädigungen des 6. Gangs für die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch über dem Parameter Wunschgeschwindigkeit dargestellt.



**Bild 6.50: Relative Schädigung des 6. Gangs über der Wunschgeschwindigkeit**

### Grübchenbildung

Die relative Grübchenschädigung im 6. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Zum einen steigen der Ganganteil und die absolute Anzahl der Überrollungen, zum anderen nehmen die Momente zu. Die maximale relative Grübchenschädigung von ca. 3,59 wird bei einer Wunschgeschwindigkeit von 130 km/h erreicht.

### Zahnbruch

Die relative Zahnbruchschädigung im 6. Gang zeigt einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf wie die Grübchenschädigung im 6. Gang. Die Werte der relativen Zahnbruchschädigungen liegen für Wunschgeschwindigkeiten kleiner der Referenzwunschgeschwindigkeit über

denen der jeweiligen relativen Grübchenschädigung. Für höhere Wunschgeschwindigkeiten liegen die Werte der relativen Zahnbruchsädigung unter denen der relativen Grübchenschädigung. Die maximale relative Zahnbruchsädigung von ca. 2,74 wird bei einer Wunschgeschwindigkeit von 130 km/h erreicht.









Die mittlere Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Es besteht somit ein direkter Zusammenhang zwischen der mittleren Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang.

Die mittlere gewichtete Beschleunigung im 6. Gang steigt mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit. Der Verlauf der mittleren gewichteten Beschleunigung zeigt aber einen degressiven Verlauf. Es besteht somit nur ein bedingter Zusammenhang zwischen der mittleren gewichteten Beschleunigung im 6. Gang und den relativen Schädigungen im 6. Gang.

### 6.7.5 Fazit

In Tabelle 12 sind die Einflüsse der Wunschgeschwindigkeit qualitativ und quantitativ aufgeführt.

**Tabelle 12: Einfluss der Wunschgeschwindigkeit**

	Grübchen		Zahnbruch	
3. Gang		1,24		1,66
4. Gang		1,24		1,48
5. Gang		1,0		1,31
6. Gang		3,59		2,74

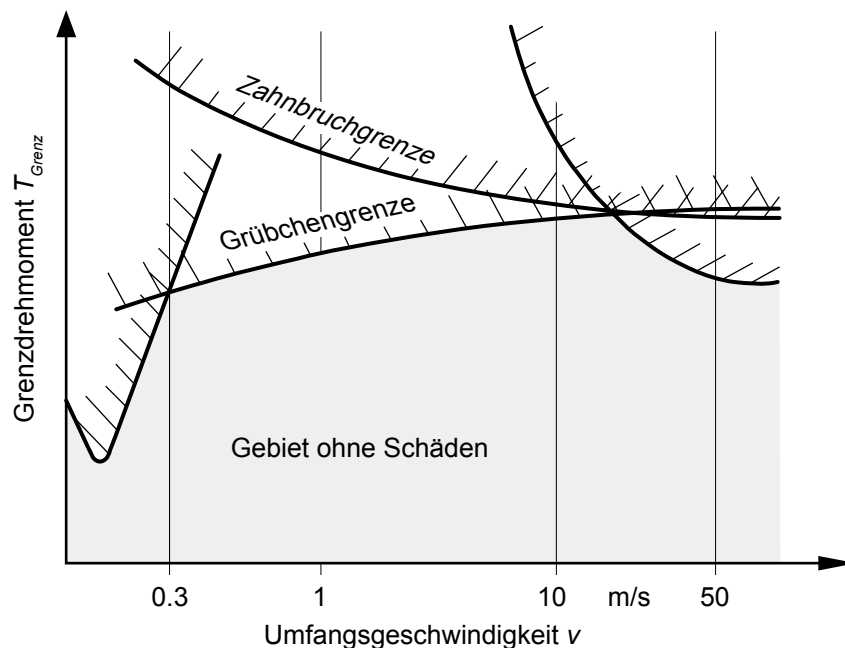
Innerhalb der Gänge zeigt sich für die Gänge 3 und 6 ein qualitativ ähnlicher Verlauf der relativen Schädigung. Für den 4. und 5. Gang bestehen im qualitativen Verlauf deutliche Unterschiede. Quantitativ liegen die relativen Grübchenschädigungen der Gänge 3 bis 5 unter der relativen Zahnbruchsädigung. Für den 6. Gang liegt der Wert der relativen Grübchenschädigung über der relativen Zahnbruchsädigung.

Innerhalb der Schädigungsmechanismen zeigen sich sehr unterschiedliche qualitative Verläufe der relativen Schädigungen. Quantitativ sind die maximalen relativen Schädigungen innerhalb der Schädigungsmechanismen in den Gängen 3 bis 5 relativ ähnlich.

Der Parameter Wunschgeschwindigkeit eignet sich nur zur Raffung des 6. Gangs, da nur hier die relative Grübchenschädigung über der relativen Zahnbruchsädigung liegt.

## 6.8 Überblick über den Einfluss der Parametervariationen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Einflüsse der untersuchten Parameter auf die Längsdynamik des Fahrzeugs und daraus resultierend auf die Lastkollektive der Gänge und die relativen Schädigungen beschrieben. Damit eine Verkürzung der Versuchsdauer zulässig ist und man von Raffung sprechen darf, muss die Schädigungsart des untersuchten Bauteils die gleiche sein, wie die Schädigungsart, die im realen Feldeinsatz vorkommt. In Bild 6.51 sind die Grenzdrehmomente für die verschiedenen Versagensarten über der Umfangsgeschwindigkeit dargestellt.



**Bild 6.51: Qualitative Grenzdrehmomente für Grübchenbildung und Zahnbruch nach /44/**

In der vorliegenden Arbeit werden die Versagensarten Grübchenbildung und Zahnbruch betrachtet. Für Drehmomente unterhalb der jeweiligen Linie tritt keine Schädigung auf. Im Fall des untersuchten automatisierten Handschaltgetriebes ist der zu erwartende Versagensmechanismus für die Zahnradstufen die Grübchenbildung. Nur wenn bei dem verschärften Versuchsprogramm die *absolute* Grübchenschädigung einen höheren Wert aufweist als die *absolute* Zahnbruchschädigung, ist die Raffung zulässig.

Nach Kap. 5.8 müssen für eine eindeutige Aussage die absoluten Schädigungen im Feldeinsatz bekannt sein. Da diese für diese Betrachtung nicht vorlagen, muss hierfür eine Abschätzung herangezogen werden. Nach /57/ ist das Verhältnis der Sicherheiten gegen Grübchenbildung und Zahnbruch

$$\frac{\text{Sicherheit gegen Zahnbruch}}{\text{Sicherheit gegen Grübchenbildung}} = 1,3.$$

Somit gilt für die absoluten Schädigungen im Feldeinsatz das konträre Verhältnis von

$$\frac{S_{\text{Zahnbruch}}}{S_{\text{Grübchen}}} \approx 0,8.$$

Folglich können die ermittelten relativen Schädigungen für die Bewertung der Zulässigkeit der Raffung in folgende Kategorien eingeteilt werden.

Die erste Kategorie umfasst die Fälle, in denen die relative Grübchenschädigung kleiner 1,0 ist. Hier wirkt der Versuch nicht zeitraffend und ist somit zur Erprobung nicht zielführend und wurde als unzulässig gewertet.

Die zweite Kategorie umfasst die Fälle, in denen der Wert der relativen Grübchenschädigung größer gleich der relativen Zahnbruchschiädigung und größer 1,0 ist. Wie in Kap. 5.8 erläutert, ist hier die *absolute* Grübchenschädigung größer als die *absolute* Zahnbruchschiädigung und somit die Raffung zulässig.

Für die restlichen Fälle ist die relative Grübchenschädigung kleiner als die relative Zahnbruchschiädigung und größer 1,0. Für die Fälle, in denen die relative Grübchenschädigung kleiner als die relative Zahnbruchschiädigung ist, müssen nach Kap. 5.8 zwei Möglichkeiten unterschieden werden. Das Grenzverhältnis der relativen Schädigungen beträgt

$$\frac{S_{\text{rel,Grübchen}}}{S_{\text{rel,Zahnbruch}}} > 0,8.$$

Da dieses Grenzverhältnis eine gewisse Unschärfe aufweist, wurde ein Bereich von

$$0,7 \leq \frac{S_{\text{rel,Grübchen}}}{S_{\text{rel,Zahnbruch}}} \leq 0,9$$

gewählt, in dem keine definitive Aussage über die Zulässigkeit der Raffung getroffen wurde. Für Verhältnisse der relativen Schädigungen von

$$\frac{S_{\text{rel,Grübchen}}}{S_{\text{rel,Zahnbruch}}} > 0,9$$

wird die Raffung als zulässig, für Verhältnisse der relativen Schädigungen von

$$\frac{S_{\text{rel,Grübchen}}}{S_{\text{rel,Zahnbruch}}} < 0,7$$

als unzulässig gewertet.

In Tabelle 13 sind nach vorigen Unterteilungen für die einzelnen Gänge und das gesamte Getriebe Bewertungen für die Zulässigkeit der Raffung vorgenommen worden. Hierbei ist die Zulässigkeit der Parametervariationen und deren quantitativen Einfluss aufgeführt.

**Tabelle 13: Übersicht über die Zulässigkeit der Parametervariation und deren quantitativen Einfluss**

Kapitel	Parameter	Raffung zulässig/maximaler Wert								
		3. Gang		4. Gang		5. Gang		6. Gang		gesamtes Getriebe
6.1	Fahrzeuggewicht	-		-		-		+	1,7	-
6.2	Motorisierung	+	3,4	+	4,7	+	2,5	+	16,8	+
6.3	Hinterachsübersetzung	-		-		-		+	2,2	-
6.4	Schaltprogramm	+	1,1	+	1,1	-		-		-
6.5	Höhenprofil	+	1,1	+	1,5	?	1,1	+	1,2	?
6.6	Kurvigkeit	+	1,5	?	1,7	+	1,3	+	1,7	?
6.7	Wunschgeschwindigkeit	?	1,2	?	1,2	-		+	3,6	?

+ Raffung zulässig

- Raffung unzulässig

? keine Aussage möglich

Für die Fälle, dass eine Raffung zulässig ist oder dass keine definitive Aussage möglich ist, wurde der Raffungswert aufgeführt. Es wird deutlich, dass zur zeitlich verkürzten Erprobung unter Umständen mehrere Versuchsläufe notwendig sind, die jeweils spezielle Gänge testet.

Die in /41/ eingeführten Kenngrößen *mittlere Beschleunigung* und *mittlere gewichtete Beschleunigung* zur Beurteilung von Geschwindigkeitsprofilen wurden zur Bewertung des verkehrsspezifischen Parameters Verkehrsstärke eingesetzt. Da diese Kenngrößen leicht messbar bzw. leicht zu ermitteln sind, wurde in dieser Arbeit die Möglichkeit untersucht, diese Kenngrößen zur Beurteilung des Einflusses der hier gewählten Parameter heranzuziehen. Dies ist generell nicht möglich, da für keinen der Parameter eine qualitative oder quantitative Übereinstimmung der Verläufe der mittleren Beschleunigung bzw. der mittleren gewichteten Beschleunigung mit den Verläufen der relativen Schädigungen für alle Gänge gegeben ist. Die beiden Kenngrößen können für die vorliegenden Parameter nur zur Beurteilung des Einflusses dieser Parameter auf die Fahrzeuglängsdynamik aber nicht zur Beurteilung des Einflusses auf die relativen Schädigungen dienen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die betriebswirtschaftlichen Anforderungen nach Verkürzung der Markteinführungszyklen bei minimierten Kosten und gesteigerter Qualität steht der Entwicklungsprozess von Automobilen unter erhöhtem Druck. Ein Lösungsansatz ist es, zeitintensive und kostspielige Fahrerproben durch verschärfte Prüfbedingungen zu verkürzen. Unter der Voraussetzung, dass der im Versuch auftretende Schädigungsmechanismus mit dem im Feldeinsatz vorkommenden übereinstimmt, ist die verschärfte Prüfung zulässig. In diesem Fall spricht man von Raffung.

Um den Erfolg und die Zulässigkeit von Erprobungen zu gewährleisten, bietet sich die Möglichkeit, im Vorfeld Untersuchungen mittels Fahrsimulation durchzuführen. In der vorliegenden Arbeit wurden mit unterschiedlichen fahrzeug-, strecken- und fahrerspezifischen Parametern Studien zu deren Einfluss auf die relative Schädigung der Zahnradstufen eines automatisierten Sechsgang-Handschatgetriebes betrieben. Hierzu wurden die in den einzelnen Gängen auftretenden Belastungen mit Hilfe eines geeigneten Klassierverfahrens kollektiviert. Mit einer Schadensakkumulationsrechnung wurden die parameter-abhängigen Lastkollektive auf die Referenzschädigung bezogen und somit der Einfluss der Parameter auf die relative Schädigung ermittelt.

Innerhalb dieser Arbeit wurden als fahrzeugspezifische Parameter das Fahrzeuggewicht, die Motorisierung, die Hinterachsübersetzung und die Art des Schaltprogramms untersucht. Als streckenspezifische Einflussgrößen wurden das Höhenprofil und die Kurvigkeit und als fahrerspezifischer Parameter die Wunschgeschwindigkeit gewählt.

Zur Untersuchung der streckenspezifischen Parameter Höhenprofil und Kurvigkeit wurden für jede dieser Streckeneigenschaften eine Kenngröße hergeleitet, anhand derer die Strecken beurteilt werden können. Für das Höhenprofil ist dies die mittlere Steigung  $M$  und für die Kurvigkeit die mittlere Kurvigkeit  $R$ . Für die Betrachtung der Streckeneinflüsse wurden aus der gemessenen Referenzstrecke vierzehn Strecken mit unterschiedlichen Höhenprofilen und zehn Strecken mit unterschiedlichen Kurvigkeiten abgeleitet.

Für die ausgesuchten Parameter wurden die Lastkollektive der einzelnen Gänge für die beiden Schädigungsmechanismen Grübchenbildung und Zahnbruch ermittelt. Mit den Lastkollektiven wurden Schadensakkumulationsrechnungen durchgeführt und auf die Referenzschädigung bezogen. Anhand der relativen Schädigung kann überprüft werden, ob die Raffung zulässig ist oder nicht. Das Ergebnis ist eine Matrix, die das Raffungspotential der Parameter auf die Gänge und das gesamte Getriebe widerspiegelt.

Die ermittelten relativen Schädigungen für Grübchenbildung und Zahnbruch lassen die Einteilung der Einflüsse der verschiedenen Parameter auf die Zulässigkeit der Raffung von Fahrversuchen in drei Kategorien zu. Die erste Kategorie umfasst die Ergebnisse, in denen die relative Grübchenschädigung höher als die relative Zahnbruchschädigung ist. In diesem Fall ist die Raffung eindeutig zulässig. Die zweite Kategorie der Ergebnisse umfasst die unzulässigen Raffungen, da in diesem Fall die relative Zahnbruchschädigung sehr viel höher als die relative Grübchenschädigung ist. In der dritten Kategorie sind die Fälle zu-

sammengefasst, in denen ohne genaue Kenntnis von Bauteilwöhlerlinien keine konkrete Aussage über die Zulässigkeit der Raffung möglich ist.

Als Untersuchungsergebnis der Parametervariationen wurde ermittelt, dass keiner der gewählten, in der Fahrerprobung häufig eingesetzten Parameter zur Raffung des gesamten Getriebes dient. Daraus lässt sich ableiten, dass zur zeitraffenden Erprobung von Getrieben gangspezifische Versuche gefahren werden müssen.

Es wurde untersucht, in wieweit sich die mittlere Gangbeschleunigung und die mittlere gewichtete Gangbeschleunigung zur Beurteilung des Einflusses der untersuchten Parameter auf die relative Schädigung heranziehen lassen, da diese Kenngrößen messtechnisch einfach zu ermitteln sind. Ergebnis der Untersuchung ist, dass sich keine generelle Übereinstimmung in qualitativer wie quantitativer Hinsicht zwischen der mittleren Gangbeschleunigung bzw. der mittleren gewichteten Gangbeschleunigung und der relativen Schädigungen erkennen lässt. Für einzelne Gänge lässt sich für spezielle Parameter ein Zusammenhang erkennen, jedoch für keinen Parameter für das gesamte Getriebe.

In einer weiterführenden Arbeit sollten die gewonnenen Erkenntnisse auf ein reales Fahrzeuggetriebe übertragen werden, für welches Bauteilwöhlerlinien vorliegen und somit der Einfluss der Parametervariationen auf die absolute Schädigung bestimmbar sind. Diese Untersuchungen sollten zum einen mit Hilfe der Fahrsimulation durchgeführt und zum anderen parallel dazu durch Prüfstandsversuche experimentell abgesichert werden. Zur Überprüfung der Ergebnisse der streckenspezifischen Parameter sollten Messfahrten auf Strecken mit unterschiedlicher Topologie durchgeführt werden, um die Korrelation der streckenspezifischen Kenngrößen zu ermitteln.



## 8 Literatur

- /1/ Anduszies H, Steierwald G, Wacker M: Simulation des Fahrtverlaufs, des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen. VDI Berichte Nr. 1007, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992, S. 227 – 244
- /2/ Apold D, Wellmanns H, Sciuto M, Hellmund R: Mobile Ermittlung von topologischen Straßendaten für dynamische Prüfstandsversuche und Rechnersimulationen. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 102, 2000, S. 410 – 417
- /3/ Bertsche B, Lechner G: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Springer Verlag Berlin, 2004
- /4/ Brandt, Hubertus: Rechnerunterstützte Gestaltung der Dauererprobung bei PKW-Automatikgetrieben. Dissertation, Technische Universität München, 1993
- /5/ C 230 Kompressor Sportcoupé. <http://www.mercedes-benz.de/>, DaimlerChrysler, Stuttgart, 2004
- /6/ Cottin D, Puls E: Angewandte Betriebsfestigkeit, Hanser Fachbuchverlag 1992
- /7/ Demel M: Schwerstarbeit für Mann und Maschine. ZF Ring International, Ausgabe Okt.-Nov., Friedrichshafen, 2000, S. 26
- /8/ Die hauseigene Teststrecke - Contidrom. <http://www.conti-online.com>, Continental, 2004
- /9/ Dilling J: Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 159, Bonn, 1973
- /10/ DIN 3990: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern. Beuth Verlag, Berlin, 1987
- /11/ DIN 45667: Klassiervorgänge für regellose Schwingungen. Beuth Verlag, Berlin, 1985
- /12/ Driveline Testing. [http://www.schenck-dts.com/Driveline\\_Testing.218.0.html](http://www.schenck-dts.com/Driveline_Testing.218.0.html), Schenck Development Test Systems, 2004
- /13/ Eriksson A, Jacobson B: Modular modelling and simulation tool for evaluation of powertrain performance. Int. J. Vehicle Design, Vol. 21, 1999
- /14/ FKM Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. Forschungskuratorium Maschinenbau, 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Ausgabe, Frankfurt, 1998
- /15/ Flaig A: Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation. Dissertation, Universität Stuttgart Institut für Maschinenelemente, 2002
- /16/ Gassner E: Betriebsfestigkeit, eine Bemessungsgrundlage für Konstruktionsteile mit statistisch wechselnden Betriebsbeanspruchungen. Konstruktion 6, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 1954
- /17/ Getriebe-Erprobung. <http://www.apl-landau.de/D/framesgetriebe.html>, APL – Automobil Prüftechnik Landau, 2004
- /18/ Greiner J, Dörr C, Klos W, Schwämmle T: Lastkollektive 7-Gang Automatikgetriebe W7A700, durchgängige Bewertung und Betrachtung im Entwicklungsprozess bei Mercedes-Benz. VDI-Berichte Nr. 1827, 2004, S. 585 – 607
- /19/ Gruening J, Bernard J, Clover C, Hoffmeister K: Driving Simulation, SAE-Paper 980223, 1998
- /20/ Gudehus H, Zenner H: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung. Verlag Stahleisen Düsseldorf, 4. Auflage, 1999
- /21/ Gührer A: Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 1985

- /22/ Haibach E: Betriebsfestigkeit. VDI Verlag Düsseldorf, 1989
- /23/ Hänel B, Haibach E, Seeger T, Wirthgen G, Zenner H: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen – FKM-Richtlinie. VDMA-Verlag, 4. Ausgabe 2002
- /24/ Hasewend W: AVL CRUISE - Fahrleistungs- und Verbrauchssimulation. ATZ 5/2001, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2001
- /25/ Heber K, Eberspächer R, Pätzold R, Rink A: Das neue automatisierte 6-Gang Schaltgetriebe von Mercedes-Benz für Personenkraftwagen (SEQUENTRONIC). 10 Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, DaimlerChrysler AG, Stuttgart, 2001
- /26/ Heber K: Die DaimlerChrysler SEQUENTRONIC für das C-Klasse Sportcoupé. 1. Internationales IIR-Symposium: Innovative Fahrzeuggetriebe, DaimlerChrysler AG, Stuttgart, 2002
- /27/ Hörz E: Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen. Vorlesungsskript; Kapitel 5, Universität Stuttgart; 2003
- /28/ Hück M, Thrainer L, Schütz W: Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguß und Grauguß - Synthetische Wöhlerlinien. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Bericht ABF 11, 1983
- /29/ ITI SimulationX. [http://www.iti.de/simulation/simx\\_about\\_d.htm](http://www.iti.de/simulation/simx_about_d.htm), ITI Dresden, Dresden, 2004
- /30/ Jauch F: Optimierung des Antriebsstrangs von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 1989
- /31/ Jürgensohn T: Hybride Fahrermodelle. Pro Universitate Verlag, Sinzheim, 1997
- /32/ Konnertz J: Entwicklung eines Streckenaufzeichnungssystems auf Mikrocontroller-Basis. Studienarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 1998, unveröffentlicht
- /33/ Köppel G, Bock H: Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kurvigkeit. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Heft 269, Bonn-Bad Godesberg, 1979
- /34/ Krolo A: Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 2004
- /35/ Krolo A: Zuverlässigkeitsabsicherung durch die Ermittlung von Belastungskollektiven, Einsatzverteilung und Raffungsfaktoren in der Nutzfahrzeugentwicklung. Diplomarbeit, DaimlerChrysler, Untertürkheim, 1999, unveröffentlicht
- /36/ Küçükay F: Die Kunst der repräsentativen Erprobung. Tagung Antriebstechnik/ Zahnradgetriebe, TU Dresden, 2000, S.589-607
- /37/ Küçükay F: Rechnerunterstützte Getriebedimensionierung mit repräsentativen Lastkollektiven. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 92, 1990, S. 328 - 333
- /38/ Kühn W: Parameter und Kontrollgrößen für die Bewertung der Streckencharakteristik. Straßenverkehrstechnik, Heft 6, Kirschbaum Verlag, Bonn-Bad Godesberg, 2002
- /39/ Kunz M, Flaig A, Lechner G: Simulation zur Optimierung der Betriebsstrategie des Midibus Cito. Industriebericht, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 1999, unveröffentlicht
- /40/ Kunz M, Weidler A, Niemann K, Lechner G, Bertsche B: Simulationsrechnungen zur Ermittlung des Streckenverbrauchs eines Hybridbusses unter realistischen Bedingungen. Getriebe in Fahrzeugen, VDI-Berichte 1610, VDI, Düsseldorf, 2001
- /41/ Kunz M: Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebebelastkollektive mittels Fahrsimulation. Dissertation, Universität Stuttgart Institut für Maschinenelemente, 2002

- /42/ Lamm R: Fahrdynamik und Streckencharakteristik. Universität Karlsruhe, Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen, Heft 11, 1973
- /43/ Lechner G, Naunheimer H: Automotive Transmissions. Springer Verlag, 1999
- /44/ Lechner G, Naunheimer H: Fahrzeuggetriebe. Springer Verlag, 1994
- /45/ Lechner G, Schiberna P, Spörl T: Triebstrangsimulation – FASIMA II, ein modulares Triebstrangsimulationsprogramm. VDI Berichte Nr. 1175, 1995, S. 67 - 83
- /46/ Linke H: Stirnradverzahnung. Berechnung, Werkstoffe, Fertigung. Hanser Verlag München, ISBN 3-446-18785-5, 1996
- /47/ Maag C, Krüger HP, Breuer K, Benmimoun A, Neunzig D, Ehmanns D: Aggressionen im Straßenverkehr. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Wirtschaftsverlag NW Bremerhaven, 2003
- /48/ Maisch C: Streckenspezifische Einflüsse auf die Lastkollektive eines automatisierten Handschaltgetriebes. Studienarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 2004, unveröffentlicht
- /49/ Marter mit Methode - Die Erprobung der neuen Highend-Luxuslimousine Maybach. Mercedes-Benz Pressearchiv, 2002
- /50/ Mehdorn G: Der Ingenieurbau – Grundwissen, Fahrdynamik / Verkehrsfluß. Ernst & Sohn Verlag Berlin, 1995
- /51/ Miner MA: Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, New York, 1945
- /52/ Nelson W: Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses. Wiley, New York, 1990
- /53/ Palmgren A: Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift 68, VDI, Düsseldorf, 1924, S. 339-341
- /54/ Powertrain Test Bed. <http://tec.avl.com>. AVL, 2004
- /55/ QIC-Speed. CAESAR Data Sheet, CAESAR Datensysteme GmbH, 2004
- /56/ Qualitätskontrolle in der Automobilindustrie - Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. Verband der Automobilindustrie (VDA), 3. Auflage, 2000
- /57/ Schlecht B: Vergleichende Betrachtungen zum Tragfähigkeitsnachweis der Wellen in Sondergetrieben von Tagebaugroßgeräten. VDI-Fachtagung, Fulda, 1998
- /58/ Schiberna P: Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 1998
- /59/ Schlichter HG: Empirischer Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsprofilen und querschnittsbezogenen Geschwindigkeitsverteilungen von Fahrzeugkollektiven auf Landstraßen mit Gegenverkehr. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1977
- /60/ Schreiber U, Schindler J: Complete Vehicle Powertrain Simulation. ATZ worldwide Edition No.: 2001-06, 2001
- /61/ Schyr C, Spreitzer H: Digitaler Streckenatlas für die alpine Antriebsstrangerprobung. Automotive Engineering Partners, 2004
- /62/ Sciuto M, Hellmund R: „Road to Rig“ – Simulationskonzept an Powertrain-Prüfständen in der Getriebeerprobung. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 103, 2001, S. 298 - 306
- /63/ Spinner M: Ermittlung verkehrsspezifischer Einflüsse auf die Getriebelastkollektive. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 2000, unveröffentlicht
- /64/ Spörl T: Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und Anwendung auf Hybridantriebe. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 1996

- /65/ Steierwald G, Buck M: Geschwindigkeitsverhalten auf einbahnigen Ausserortsstrassen in Abhängigkeit von baulichen, betrieblichen und verkehrlichen Randbedingungen. Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesministerium für Verkehr, Heft 621, Bonn, 1992
- /66/ StVO – Straßenverkehrs-Ordnung. Bundesgesetzblatt, Teil I, Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen, 1970, S 1565
- /67/ Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. Teil 2, 3. überarbeitete und erweiterte Aufl., Frankfurt, 2000
- /68/ Vollmer D, Balasubramanian B, Siegert E: Fahrtsimulation unter realistischen Umfeldbedingungen. VDI Berichte Nr. 1007, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992, S. 263 – 280
- /69/ Weidler A, Kunz M, Bertsche B: Simulation der Steigfähigkeit des Midibus Cito mit Generatorübersetzung und neuem Motor OM 924. Industriebericht, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 2000, unveröffentlicht
- /70/ Weidler A: Ermittlung der Leistungsflüsse im Planetengetriebe während eines Anfahrvorgangs, Industriebericht, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 2004, unveröffentlicht
- /71/ Weidler A: Ermittlung des Beschleunigungsvermögens eines leistungsverzweigten Antriebsstrangs, Industriebericht, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 2003, unveröffentlicht
- /72/ Weidler A: SASIMA - Hard- und Software für die Aufzeichnung beliebiger Streckenprofile - Bedienungsanleitung. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 2000, unveröffentlicht
- /73/ Westermann-Friedrich A, Zenner H: Zählverfahren zur Bildung von Kollektiven aus Zeitfunktionen – Vergleich der verschiedenen Verfahren und Beispiele. FVA-Merkblatt Kollektive, Nr. 0/14, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. Frankfurt, 1998
- /74/ Willmerding G: Simulationssystem zur Optimierung des Antriebsstrangs unter Einbeziehung des Verkehrsflusses. Automobiltechnische Zeitschrift 94, Nr. 6, S. 342 – 349, 1992
- /75/ Willmerding G, Häckh J, Berthold A: Driving Cycle, Load and Fatigue Life Predictions Based on Measured Route Data. SAE-Paper 01ATT120, ATT-Tagung, Barcelona, 2001
- /76/ Willmerding G, Häckh J, Körner T: Ein durchgängiges Antriebsstrangsimulationssystem im Entwicklungs- und Optimierungsprozess von Automatikgetrieben. Tagungsband Haus der Technik, München, 2003





# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name Alexander Weidler  
Geburtsdatum, -ort 16.08.1972 in Böblingen  
Staatsangehörigkeit Deutsch  
Familienstand Verheiratet, ein Kind

## Schulbildung

1978 – 1982 Johann-Brücker-Grundschule Schönaich  
1982 – 1991 Max-Planck-Gymnasium Böblingen

## Zivildienst

10/1991 – 12/1992 Stadtjugendring Sindelfingen

## Studium

10/1993 – 10/1999 Studiengang Luft- und Raumfahrttechnik  
Hauptfächer *Flugzeugbau und Leichtbau* und *Flugmechanik und Regelungstechnik*  
Universität Stuttgart

## Berufstätigkeit

1/2000 – 7/2004 Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart  
seit 8/2004 Vorentwicklung Nfz-Getriebe  
DaimlerChrysler AG, Stuttgart





*Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:*

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnelllaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszyinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite
	W. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zu Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahnem mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leakage- und Reibverhalten von Radialwellendichtungen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengen-schmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner; K.-H.Hirschmann; B. Bertsche	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentasterters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenius	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei

Nr.	Verfasser	Titel
		stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas; H.K. Müller	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradverzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteil-suchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Naunheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnradpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnradpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und Anwendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätssysteminformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeug-schleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fang-labyrinth
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräseherstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion

Nr.	Verfasser	Titel
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozeß
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper - und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw- Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck