

**Volkswirtschaftlich gerechtfertigte  
Interventionswerte  
für die Erhaltung von Bundesautobahnen**

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Thomas Stütze  
aus Berlin

von der Fakultät VI -  
Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.- Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. S. Savidis

Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. ETH S. Huschek

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. nat. techn. J. Litzka

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 15. September 2004

Berlin 2004

D 83

## **Danksagung**

Ich danke Herrn Prof. Dr. sc. techn. ETH Siegfried Huschek, der meine Dissertation von der Themenfindung bis zur Fertigstellung fachlich begleitet hat. Insbesondere danke ich für die sehr konstruktiven, nicht immer kurzen Gesprächsrunden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. nat. techn. Johann Litzka danke ich für seine Denkanstösse sowie für die Übernahme der Funktion des Zweitgutachters in meinem Promotionsverfahren.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stavros Savidis möchte ich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses Dank sagen.

Für die Unterstützung danke ich Frau Gerda Baumgarten und Herrn Klaus Melcher sowie Karl und Oliver für die Korrekturlesungen.

Ich bedanke mich herzlich bei meiner Schwester Carola, die sich viel Zeit für die Korrekturen mehrerer Versionen meiner Arbeit nahm und damit wesentlich zum Gelingen der Promotion beigetragen hat.

Für die kontroversen Diskussionen, die mich inhaltlich sehr voran gebracht haben, möchte ich Axel vielmals danken.

Zu ganz besonderem Dank bin ich Nicole verpflichtet, die mich in der schwierigsten Phase meines Schaffens tatkräftig unterstützt hat.

Ich möchte diese Arbeit meinem Vater und meiner Mutter widmen, die mir diesen Weg mit ihrem Fleiss und ihrer Bescheidenheit erst ermöglicht haben.

Berlin, im November 2004

Thomas Stütze

## Abschnittsbetrachtung

- Randbedingungen
- Annahmen
- Zielsetzung

## Eingangsdaten

# Straßenabschnitt

### Verkehrsbelastung

- Fahrzeugflotte FG (EWS)
- Verkehrsstärke DTV, Q
- Verkehrsfluss
- Kostensätze

### Zustandsgrößen

#### Unebenheit (AUN)

- AUN
- Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$
- Verhaltensfunktionen

#### Griffigkeit ( $\mu$ )

- $\mu$  (SCRIM, SRM)
- Verhaltensfunktionen

### Standardmaßnahmen

- Unterhaltung
- Instandsetzung
- Erhaltung
- Einheitspreise EP

## Kostenentwicklung

- Straßenbaulast SBK
- Straßennutzer SNK

# Interventionswerte

### Straßennutzer SNK

- Reisezeitkosten
- Fahrzeugbetriebskosten
- Unfallkosten

AUN,  $\mu_{SCRIM}$

### Straßenbaulast SBK

- Unterhaltung
- Instandsetzung
- Erhaltung

## Wirtschaftlichkeit

- Interner Zinsfuß IZF
- Nettogegenwartswert NGW
- Rentabilität

# Optimierung

Volkswirtschaftlich gerechtfertigte  
Interventionswerte

$\mu_{SCRIM}$

AUN

## Inhaltsverzeichnis

1.	Wissensstand.....	7
1.1	Grundlegende Gedanken zur Straßenerhaltung.....	7
1.2	Straßenerhaltung in der Bundesrepublik Deutschland .....	9
1.3	Betriebswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Analyse in der Straßenerhaltung.....	10
1.4	Volkswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Betrachtung in der Straßenerhaltung.....	11
1.4.1	Grundsätzliche Bemerkungen.....	11
1.4.2	Berechnungsgrundlagen.....	12
1.4.2.1	Kosten .....	12
1.4.2.2	Nutzen .....	12
1.4.3	Wirtschaftlichkeitsindikatoren.....	13
1.4.3.1	Nettgegenwartswert NGW .....	13
1.4.3.2	Interner Zinsfuß IZF .....	13
1.5	Zielsetzung .....	14
2.	Der repräsentative Straßenverkehr.....	16
2.1	Das repräsentative Straßennetz .....	16
2.2	Repräsentative Straßennutzer.....	17
2.2.1	Fahrzeugflotte.....	17
2.2.1.1	Technische Parameter der Repräsentativfahrzeuge.....	19
2.2.1.2	Kostenparameter für den Betriebskostengrundwert BGW .....	21
2.2.2	Verkehrszusammensetzung .....	21
2.2.3	Verkehrsbelastung.....	22
3.	Zustandsgrößen der Fahrbahnoberfläche.....	24
3.1	Griffigkeit .....	24
3.1.1	Griffigkeitskennwerte .....	25
3.1.1.1	Gleitbeiwert $\mu_{SRM}$ .....	25
3.1.1.2	Seitenkraftbeiwert $\mu_{SCRIM}$ .....	26
3.1.1.3	Zusammenhang zwischen Gleitbeiwert $\mu_{SRM}$ und Seitenkraftbeiwert $\mu_{SCRIM}$ .....	27
3.1.2	Verhaltensfunktion $\mu(t)$ .....	28
3.2	Unebenheiten in Längsrichtung.....	30
3.2.1	Unebenheitskennwerte .....	31
3.2.1.1	Allgemeine Unebenheiten in Längsrichtung (AUN).....	31
3.2.1.2	International Roughness Index (IRI) .....	33
3.2.1.3	Present Serviceability Index (PSI = p) .....	34
3.2.2	Verhaltensfunktion AUN(t) .....	35
3.2.3	Rollwiderstandsbeiwert $f_R$ .....	36
3.2.3.1	Reifenbedingte Widerstandskomponenten .....	38
3.2.3.2	Fahrbahnbedingte Widerstandskomponenten .....	38
3.2.4	Zusammenhang zwischen der Unebenheit AUN und dem Rollwiderstandsbeiwert $f_R$ .....	39
3.2.4.1	Kenntnisstand .....	39
3.2.4.2	Herleitung des Zusammenhanges zwischen dem AUN -Wert und $f_R$ .....	41
3.2.5	Komponenten des Rollwiderstandsbeiwertes $f_R$ .....	51
4.	Straßenbaulasträgerkosten SBK.....	51
4.1	Investitionskosten KI.....	53
4.1.1	Instandsetzung .....	54
4.1.2	Erneuerung.....	55

4.2	Verkehrssicherungskosten .....	55
4.3	Laufende Kosten KL .....	56
5.	Straßennutzerkosten SNK .....	58
5.1	Allgemeines .....	58
5.2	Reisezeitkosten ZK .....	59
5.2.1	Zeitkostensatz $WT_{FG}$ .....	59
5.2.2	Maßgebende Geschwindigkeit $V_{FG}$ .....	61
5.2.2.1	Geschwindigkeit als Funktion der Streckencharakteristik $V_{SC} = f(ST, DTV, Q, s, KU)$ .....	61
5.2.2.2	Zulässige Höchstgeschwindigkeit $V_{zul} = f(StVO)$ .....	61
5.2.2.3	Mittlere gefahrene Geschwindigkeit $V_{P\text{ mittel}}$ .....	61
5.2.2.4	$V_{Zus} = f(AUN)$ .....	64
5.3	Fahrzeugbetriebskosten FBK .....	67
5.3.1	Betriebskostengrundwert $BGW_{FG}$ .....	67
5.3.2	Kraftstoffbezogene Betriebskosten $BKF_{FG}(AUN)$ .....	68
5.3.3	Kostenvergleich $\Delta ZK - \Delta FBK$ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit $V_{AUN}$ .....	75
5.3.3.1	Zusätzliche Reisezeitkosten $\Delta ZK$ infolge $V(AUN)$ .....	76
5.3.3.2	Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten $\Delta FBK$ infolge $V(AUN)$ .....	77
5.4	Beanspruchung auf (Mit-)Fahrer, Ladegut und die Straße infolge AUN .....	79
5.4.1	AUN - Beanspruchungskomponente für den Fahrer .....	80
5.4.2	AUN - Beanspruchungskomponente für das Ladegut .....	81
5.4.3	AUN - Beanspruchungskomponente für die Straße .....	83
5.5	Unfallkosten UK .....	84
5.5.1	Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe $A_N$ .....	86
5.5.1.1	Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe $A_N$ nach Schulze/ Dames .....	87
5.5.1.2	Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe $A_N$ nach Kamplade/ Schmitz .....	89
5.5.1.3	Aktuelle Untersuchungen .....	90
5.5.1.4	Durchschnittliche Unfallhäufigkeit und durchschnittliches Griffigkeitsniveau .....	92
5.5.2	Veränderung der Unfallkosten .....	92
5.5.2.1	Unfallrate UR als Funktion der Griffigkeit $\mu_{SCRIM\ 80}$ .....	93
5.5.2.2	Veränderung der Unfallrate $\Delta UR$ .....	95
5.5.2.3	Veränderung der Unfallkosten $\Delta UK$ .....	95
5.5.2.4	Französische Untersuchungen der École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) .....	97
5.6	Zusätzliche Straßennutzerkosten $\Delta SNK$ durch Baustellensituation .....	98
6.	Nutzen-Kosten-Analyse als Entscheidungskriterium wirtschaftlich gerechtfertigter Interventionswerte .....	100
6.1	Grundsätzliches .....	100
6.2	Analysekriterien .....	101
6.2.1	Nettgegenwartswert NGW .....	101
6.2.1.1	Kosten .....	101
6.2.1.2	Nutzen .....	101
6.2.1.3	Betrachtungszeitraum $n$ .....	102
6.2.1.4	Diskontsatz .....	102
6.2.2	Interner Zinsfuß IZF .....	105
6.2.3	Rentabilitätsgrenze .....	105
6.3	Analyseprogramm GEEP 1.0 (German Economic Evaluation Program) .....	106
6.4	Ableitung der volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte IW .....	107
6.4.1	Griffigkeit $\mu_{SCRIM\ 80}$ .....	108

6.4.1.1	Maßnahme 1: Dünne Schichten im Kalteinbau (DSK).....	110
6.4.1.2	Maßnahme 2: Deckschicht im Hocheinbau 40mm (DH).....	112
6.4.1.3	Maßnahme 3: Deckschicht im Tiefeinbau 40mm (DT).....	114
6.4.2	Unebenheit AUN.....	116
6.4.2.1	Maßnahme 2: Deckschicht im Hocheinbau 40mm (DH).....	117
6.4.2.2	Maßnahme 3: Deckschicht im Tiefeinbau 40mm (DT).....	119
7.	Schlussfolgerungen.....	121
7.1	Entwicklung des Rechenprogramms GEEP 1.0 .....	122
7.2	Volkswirtschaftlich gerechtfertigter Interventionswert für die Griffigkeit $IW_{\mu_{SCRIM 80}}$ .....	122
7.3	Volkswirtschaftlich gerechtfertigter Interventionswert für die Allgemeinen Unebenheiten in Längsrichtung $IW_{AUN}$ .....	123
7.4	Bedeutung für die Praxis .....	123
8.	Zusammenfassung.....	124
9.	Quellenverzeichnis.....	126
	Anhang .....	136

## 1. Wissensstand

### 1.1 Grundlegende Gedanken zur Straßenerhaltung

Ein gut ausgebautes, leistungsfähiges und intaktes Straßennetz ist für die gesamtwirtschaftliche Entwicklung eines jeden Landes von entscheidender Bedeutung. Es stellt auch in Zeiten der New Economy die Visitenkarte und das Rückgrat der Volkswirtschaft dar. So bemerkt Paqué [001]: „Es wäre naiv zu glauben, dass die allgegenwärtige Verbesserung der Kommunikation über weite Strecken den Bedarf an funktionstüchtigen Verkehrswegen reduzieren würde.[...] Im Zeitalter der globalisierten Kommunikation wird der Gütertausch zwischen Ländern und Regionen verdichtet und nicht ausgedünnt; und entsprechend wird der Bedarf nach einer funktionstüchtigen Infrastruktur weiter steigen [...].“

Die Straßen – insbesondere die Bundesfernstraßen – werden auch in Zukunft wichtigster Verkehrsträger in Deutschland sein. Schon heute werden über 70 % der gesamten Verkehrsleistungen im Güter- und Personenverkehr über die Straßen abgewickelt- Tendenz steigend [002][003][004].

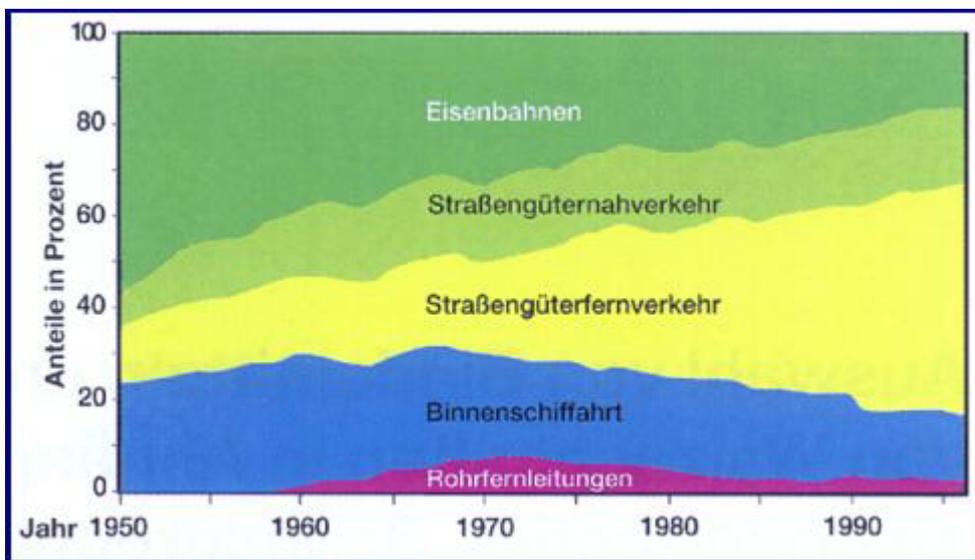


Abb. 1.1: Verteilung des Güterverkehrs auf die Infrastruktursysteme der Bundesrepublik Deutschland [003]

Neue Prognosen im Rahmen der Fortschreibung des Bundesverkehrswegeplanes weisen bis 2015 einen weiteren Zuwachs im Güterverkehr von fast 70 % und im Personenverkehr von 20 % aus [002].

**Abb. 1.1** zeigt die Entwicklung des Anteils der Straße am Güterverkehr. Lag der Gütertransport auf der Straße 1950 noch bei ca. 20 %, so hat sich der Anteil bis zum Ende der Neunziger Jahre vervierfacht. Die Integration der neuen EU-Staaten wird zusätzlich zu einem überdurchschnittlichen Verkehrswachstum, besonders im Ost-West-Verkehr führen, da die Beitrittsländer weniger auf die Schiene, als vielmehr auf den Straßenverkehr setzen. Die Sicherstellung der ständigen Funktionstüchtigkeit des vorhandenen Straßennetzes ist demnach für Wirtschaft und Gesellschaft von entscheidender Bedeutung. Bei den investierten Vermögenswerten von rd. 171 Mrd. € (Bruttoanlagevermögen 1999) für die Bundesfernstraßen [004] versteht sich die verlässliche Bewahrung von Substanz und Funktion zudem von selbst.

Wie kann die Funktionstüchtigkeit dieses Straßennetzes definiert, realisiert und letztendlich auch finanziert werden ? Da viele Straßenneubauprojekte in den letzten Jahren fertiggestellt wurden, wird sich zukünftig die Gewichtung noch mehr auf die Erhaltung des bestehenden Netzes legen. Bei einem Blick in das Investitionsprogramm des Bundes, Teil Bundesfernstraßen, für den Zeitraum 1999 bis 2002, zeigt sich bereits heute, dass bei einem ausgewiesenen Gesamtinvestitionsvolumen von 16,2 Mrd. €, der mit rd. 7,1 Mrd. € veranschlagte Teil für die Erhaltung [004] von „erheblicher finanzieller Bedeutung“ ist. Auf diesen Sachverhalt wird zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal eingegangen.

Wie gut müssen also unsere Straßen sein, bzw. welchen Kriterien müssen sie genügen ? Die leeren Haushaltskassen der öffentlichen Hand betonen die Sensibilität der Ausgaben öffentlicher Gelder zunehmend. Mehr denn je müssen diese Investitionen Wirtschaftlichkeitskriterien genügen und zudem die politischen Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit inhaltlich überzeugen. Dies wird in den kommenden Jahren nicht nur, aber gerade für den Straßenbau von vordringlicher Bedeutung sein. Ein weiterer Aspekt ist die in den letzten Jahren stetig steigende Ausgabenbelastung der Straßennutzer durch Steuererhöhungen. Dazu bemerkt *Schmuck* [005] bereits 1988, dass das Verhältnis zwischen den Einnahmen aus dem Straßennutzerbetrieb (Mineralölsteuer, Kfz- Steuer, etc.) zu den Nettoausgaben von Bund, Ländern und Gemeinden bei ca. 160 % und in den Jahren bis 1990 unter der Grundlage aller direkten Einnahmen bis auf über 190 % ansteigen wird. Neuere Berechnungen [003] gehen hier bereits von einer Überdeckung von mehr als 300 % aus. Mit der Einführung der LKW-Maut auf den Bundesautobahnen werden die Einnahmen nochmals ansteigen.

Die Rechtfertigung dieser politisch zu vertretenden Tatsache ist mehr als fragwürdig, obwohl erhobene Steuern im Gegensatz zur bevorstehenden Maut per Definition nicht quellengebunden eingesetzt werden müssen.

Zudem heißt es nach §3 des Bundesfernstraßengesetzes (FStrG): „Die Träger der Straßenbaulast haben nach Ihrer Leistungsfähigkeit die Bundesfernstraßen in einem dem regelmäßigen Verkehrsbedürfnis genügenden Zustand zu bauen, zu unterhalten, zu erweitern oder sonst zu verbessern“. *Domhan* und *Bartlisperger* [006] zeigen ferner mögliche Interdependenzen zwischen der Verantwortung der Baulasträger und den Straßennutzern.

Aus den genannten Sachverhalten leitet sich für die Straßenerhaltung eine wirtschaftliche Optimierung unter Berücksichtigung der Straßennutzer und deren Kosten ab. Eine Forderung, die bei Straßeninvestitionen in Schwellen- und Entwicklungsländern bereits seit Jahren in starkem Maße berücksichtigt wird [007].

*Schmuck* [016] bemerkt zu dem Begriff Wirtschaftlichkeit: „Wirtschaftliche Fragen der baulichen Straßenerhaltung standen, von wenigen Ausnahmen abgesehen, in der Vergangenheit immer im Schatten technischer Frage- und Aufgabenstellungen. [...]. ‚Wirtschaftlichkeitsvergleiche‘ zwischen Entscheidungsalternativen, z.B. bei der Wahl von Bauweisen, Erhaltungsmaßnahmearten und –zeitpunkten, erfordern die Berücksichtigung von ‚Gestehungskosten‘ und ‚Folgekosten‘, und zwar unter Einbeziehung des Zeitpunktes ihres Anfalls“. Nur unter Berücksichtigung aller Beteiligten des Systems Straße kann ein wirtschaftlich haltbares Managementsystem installiert werden.

## 1.2 Straßenerhaltung in der Bundesrepublik Deutschland

Die Straßenerhaltung beinhaltet alle Maßnahmen, die der Verkehrssicherheit und Sicherungspflicht, der Substanzerhaltung und der Erhaltung des Gebrauchswertes von Verkehrsflächen einschließlich der Nebenanlagen dienen [017].

Die Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Str 01) [018] bilden die aktuellen Erhaltungsgrundlagen in Deutschland. Sie umfassen alle (großflächigen) Maßnahmen der Instandsetzung und Erneuerung an Straßenbefestigungen und gelten in erster Linie für die Bundesfernstraßen. Neben der Implementierung der Ordnungsdaten zur Lokalisierung einzelner homogener Abschnitte ist die Bewertung der Netzqualität durch die Zustandserfassung und –bewertung ZEB von fundamentaler Bedeutung. Die in regelmäßigen Abständen messtechnisch erfassten Zustandsgrößen der Fahrbahnoberfläche werden normiert und anschließend bewertet. Der Bewertungshintergrund beruht auf statistischen Auswertungen empirisch ermittelter Häufigkeitsverteilungen für die erfassten Zustandsgrößen im gesamten Netz.

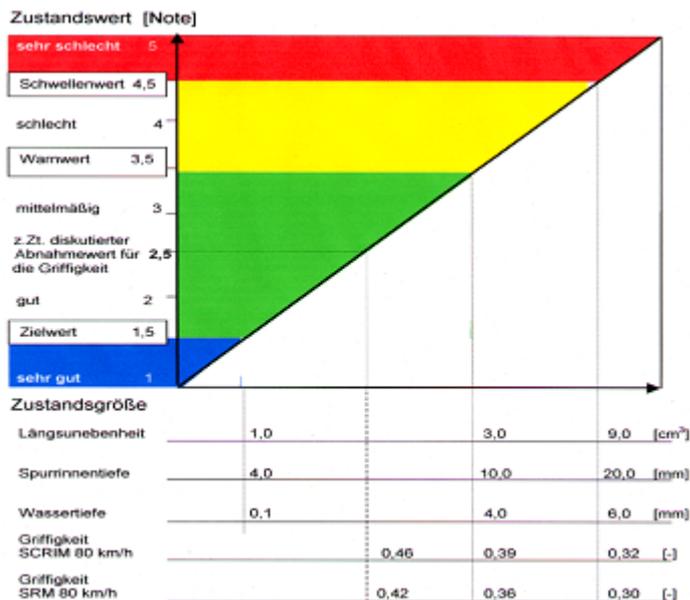


Abb. 1.2: Normierungsfunktionen der Zustandsgrößen für Straßen der Funktionsklasse 1 [020]

Die 15%-Grenze der kumulativen Häufigkeit stellt den Warnwert dar, dessen Erreichen Anlass zu genauer Beobachtung, zur Analyse der Ursachen des schlechten Zustandes und ggf. zur Planung geeigneter Maßnahmen gibt. Die 5%-Grenze bezeichnet den Schwellenwert, dessen Erreichen bauliche oder verkehrsbeschränkende Maßnahmen nach sich ziehen muss [020]. Er wird daher auch als Eingreifwert bezeichnet und stellt folglich einen Interventionswert dar. Die definierten Grenzwerte sind aus allgemeinen Plausibilitätsbetrachtungen und Expertenbefragungen abgeleitet worden und sind somit als subjektiv begründete Vorschläge anzusehen.

Die dimensionsbehafteten Zustandsparameter werden Zustandsgrößen genannt. Mit den Normierungsfunktionen werden diese Zustände bewertet und in dimensionslose Zustandswerte überführt. Gewichtet bilden sie den Gebrauchswert GEB bzw. den Substanzwert SUB. Der größere der beiden Werte stellt den Gesamtwert dar. Erreicht ein Zustandswert den Warnwert (3,5), so schlägt dieser Wert ohne Gewichtung durch; der schlechteste Wert bildet gleichzeitig den Gebrauchs- bzw. Substanzwert (Durchschlagsregel). Die beschriebene Vorgehensweise ist in der **Abb. 1.3** dargestellt.

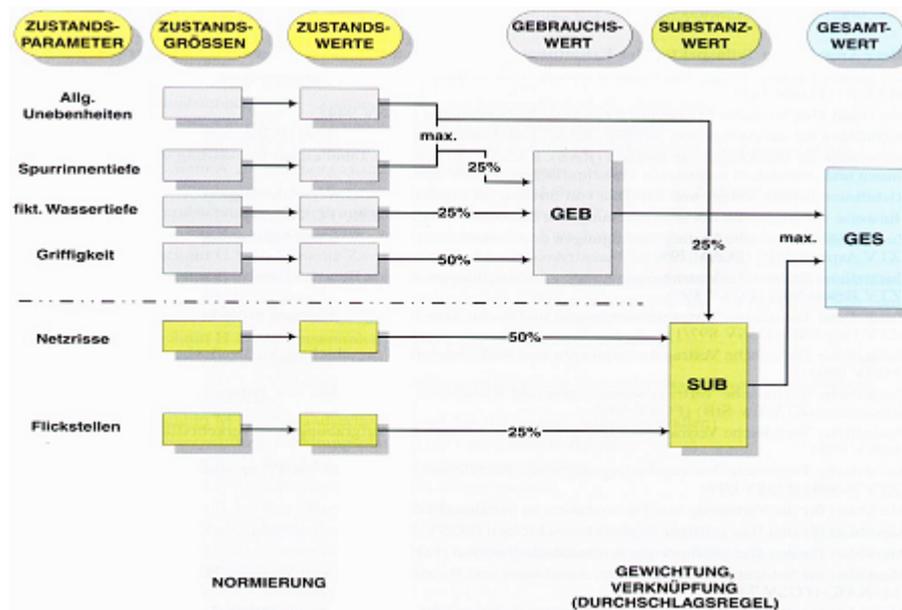


Abb. 1.3: Verknüpfung und Gewichtung zur Darstellung des Gebrauchswertes, des Substanz- und des Gesamtwertes für Asphaltstraßen [018]

Anhand des Gesamtwertes des Netzes können für qualitativ homogene Abschnitte je nach Schadensbild und Intensität Maßnahmen geplant und durchgeführt werden.

### 1.3 Betriebswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Analyse in der Straßenerhaltung

Für eine betriebswirtschaftliche Optimierung ist das Verhältnis von Aufwand und Ertrag einer betrieblichen Maßnahme - unabhängig vom Markt - das Erfolgsmaß [021]. Der Ertrag bzw. Nutzen, der sich bei der Straßenerhaltung einstellt, ist die Substanz- oder Zustandsverbesserung des betrachteten Abschnittes nach der Durchführung einer Maßnahme im Vergleich zur Ausgangssituation. Stellt man die Zustandsentwicklung der Maßnahme- und der Ausgangsoption über einen Zeitraum graphisch dar, ergibt sich der Nutzen aus der Differenz der Flächen „unter der Kurve“ [022] (s. Abb. 1.4).

Das in der Bundesrepublik Deutschland angewandte Softwarepaket VIAPMS [023] zieht für die Nutzenermittlung derzeit einen aus den einzelnen Zustandsmerkmalen zusammengesetzten Gesamtzustandswert heran. Der daraus abgeleitete „Nutzen“ ist nicht monetärer, sondern qualitativer Art. Er leitet sich lediglich aus der Qualitätssteigerung der Fahrbahnoberfläche ab.

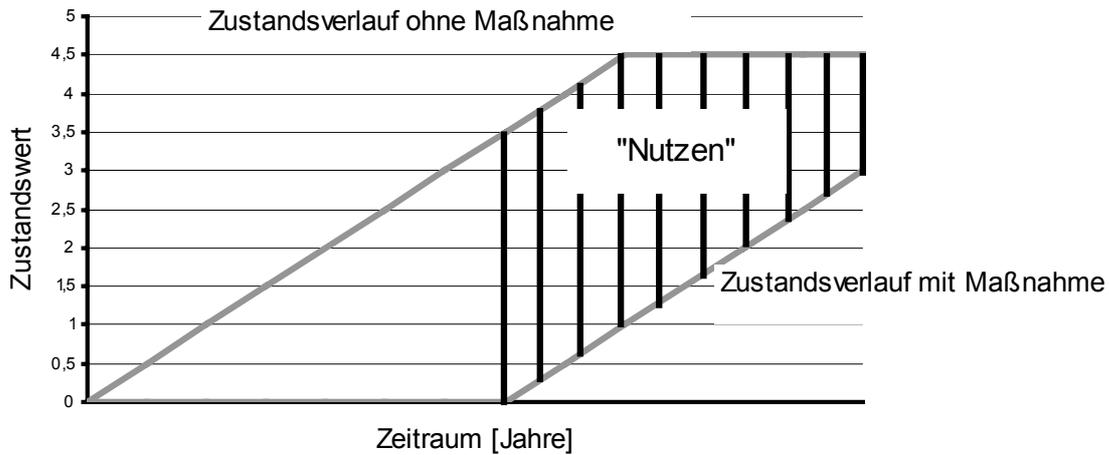


Abb. 1.4: Differenz der Flächen „unter der Kurve“ als Nutzen einer Maßnahme [022]

Nach [026] wird das Nutzen-Kosten-Verhältnis aufsteigend für die diskontierten jährlichen Einheitskosten (bzw. Einheitsnutzen) verschiedener Maßnahmen gelistet. Wirksamkeit bzw. Nutzen werden abschnittsweise (Länge, DTV) gewichtet. Die effektivsten Maßnahmen bilden zusammen die „konvex Einhüllende“ (gebildet aus S1, S3 und S5 in **Abb. 1.5**), auf der sich das (betriebswirtschaftliche) Optimum befindet. Die Wahl der geeigneten Maßnahme wird in Abhängigkeit von finanziellen Restriktionen (Budgetvorgaben) ermittelt.

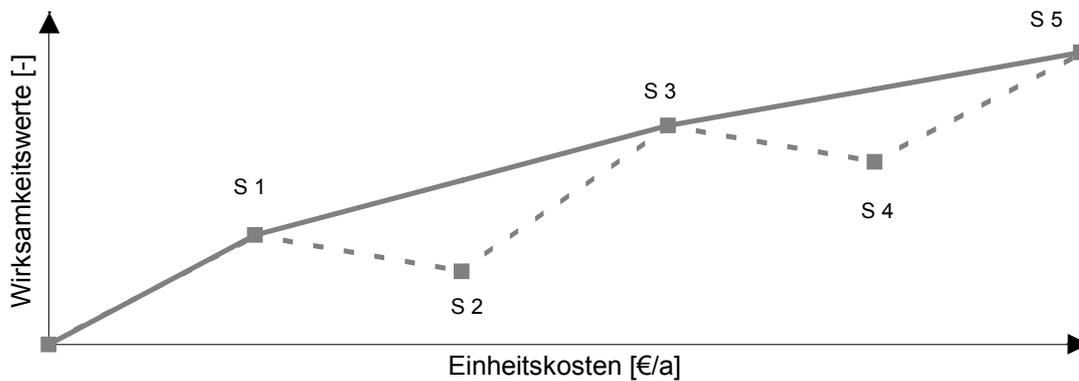


Abb. 1.5: „Konvex Einhüllende“ aus gewichteter Maßnahmenreihung [026]

## 1.4 Volkswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Betrachtung in der Straßenerhaltung

### 1.4.1 Grundsätzliche Bemerkungen

Die volkswirtschaftliche Betrachtungsweise beinhaltet die Gesamtheit der wirtschaftlich miteinander verflochtenen und von einander abhängigen Einzelwirtschaften in einem Wirtschaftsraum. Die Optimierung eines Einzelsystems garantiert nicht das Optimum des Gesamtsystems, vielmehr

müssen bei der Suche nach dem (finanziell) richtigen Erhaltungsaufwand alle relevanten Kosten berücksichtigt und zu einem Gesamtkostenminimum geführt werden.

So sind bei der Straßenerhaltung neben den Erhaltungskosten und dem (Rest-)Wert der Straße auch die Straßennutzerkosten, die Umweltkosten und die Kosten Dritter zu berücksichtigen. Nur so wird man bei dem System Straße der oben genannten Zusammenhänge gerecht.

### 1.4.2 Berechnungsgrundlagen

Bei den volkswirtschaftlichen Nutzen-Kosten-Analysen handelt es sich ebenfalls um wirtschaftliche Vergleichsrechnungen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Alternativen hinsichtlich des technischen Ziels und Betrachtungszeitraumes vergleichbar sind. Die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme kann immer nur im Vergleich zu einer Referenzsituation (Basisoption) analysiert werden. Als Referenz- bzw. Basisoption dient als einfachste Variante der „Nichts-Tun-Fall“ oder aber auch der bisher praktizierte Erhaltungsaufwand [007]. Den Kosten der Maßnahme werden die aus der Maßnahme resultierenden Nutzen gegenübergestellt, welche sich bei einem verbesserten Straßenzustand aus den Einsparungen an Straßennutzerkosten, Sozial- und Umweltkosten ergeben.

Die Einsparungen der Sozial- und Umweltkosten (SUK) spielen bei der Planung und dem Bau neuer Straßen eine sehr wichtige Rolle. Der Einfluss bei der Erhaltung ist jedoch als gering zu bezeichnen und findet bei den Kraftstoffeinsparungen ausreichend Berücksichtigung. Die Sozial- und Umweltkosten (SUK) werden daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht mehr berücksichtigt.

#### 1.4.2.1 Kosten

Bei der vergleichenden Bewertung werden die Kosten, die als Folge der Maßnahme anfallen, den Kosten der Basisoption gegenübergestellt. Zu den Folgekosten der Maßnahmedurchführung gehören neben den Bau- und Verkehrssicherungskosten auch die zusätzlichen Straßennutzerkosten infolge Baustellensituation. Die Differenz der Kosten mit und ohne Maßnahme stellen die Gesamtkosten dar.

#### 1.4.2.2 Nutzen

Unter dem Nutzen einer Maßnahme wird neben der Qualitätsverbesserung des Straßenkörpers die Einsparung von Straßennutzer- und Straßenbulasträgerkosten verstanden. Die Durchführung der Maßnahme bewirkt eine Verbesserung der Fahrbahnoberfläche, was zu Einsparungen bei den Fahrzeugbetriebs-, Reisezeit- und Unfallkosten sowie bei der baulichen Unterhaltung auf der Seite der Straßenbulasträger während der Gewährleistungsphase führen wird. Diese Kosteneinsparungen werden als Nutzen definiert [007].

„Kosten [und demnach auch Nutzen] sind nur in der Höhe zu berücksichtigen, wie ihnen ein Verbrauch an Arbeit, Kapital und natürlichen Ressourcen gegenübersteht. Entsprechend sind Steuern [...] und Subventionen auszuklammern“ [115]. In der englischsprachigen Literatur finden auch die Begriffe „financial costs“ (Kosten inkl. Steuern) und „economic costs“ (steuerbereinigte Kosten) Verwendung.

Die Gesamtkosten bzw. der Gesamtnutzen über den Betrachtungszeitraum ergeben sich aus der Aufsummierung der jährlichen, diskontierten, steuerbereinigten Kosten bzw. Nutzen.

### 1.4.3 Wirtschaftlichkeitsindikatoren

Die zu untersuchenden Maßnahmen werden unter Einbeziehung der errechneten Kosten und Nutzen mit Hilfe der Wirtschaftlichkeitsindikatoren, dem Nettogegenwartswert NGW und dem internen Zinsfuß IZF, einer gesamtwirtschaftlichen Bewertung unterzogen.

#### 1.4.3.1 Nettogegenwartswert NGW

Der Nettogegenwartswert NGW, auch Kapitalwert C genannt, bezeichnet die Summe aller auf einen Bezugszeitpunkt auf- und/ oder abgezinste Kosten und Nutzen inkl. des Restwertes der Investition am Ende des Betrachtungszeitraumes. Die Lage des Bezugszeitpunktes ist dabei unerheblich, er muss nur einheitlich zugrunde gelegt werden.

$$NGW = - \sum_{i=1}^n K_i * \frac{1}{q^i} + \sum_{i=1}^n N_i * \frac{1}{q^i} + R * \frac{1}{q^n} - I \quad [€] \quad (\text{GI. 1.1})$$

mit:

- i - Jahr in dem Betrachtungszeitraum
- n - Betrachtungszeitraum [Jahre]
- $\Sigma$  - Aufsummierung über die Jahre i bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes n
- $K_i$  - Kostendifferenz in dem Jahr i (Straßenerhaltung)
- q - Zinsfaktor =  $1 + \frac{p}{100}$
- p - Kalkulationszinssatz [%]
- $N_i$  - Nutzen in dem Jahr i
- R - Restwert der Investition am Ende des Betrachtungszeitraumes n
- I - Investition

Bei der Überprüfung der Vorteilhaftigkeit (Akzeptanz) einer Investition muss gelten:  $NGW > 0$

Eine Investition für eine Erhaltungsmaßnahme ist nur dann sinnvoll, wenn der zu erwartende Nutzen die Kosten übersteigt. Andernfalls ist sie als Verlust zu definieren.

#### 1.4.3.2 Interner Zinsfuß IZF

Der interne Zinsfuß IZF wird iterativ mit Hilfe des Nettogegenwartswertes bestimmt. Bei der Anwendung des internen Zinsfußes als Kalkulationszinssatz ist der Nettogegenwartswert gleich Null. Daher bezeichnet man den IZF auch als kritischen Zinssatz  $p_k$ . Ist der Kalkulationszinssatz größer als der berechnete interne Zinsfuß, so ist der Nettogegenwartswert kleiner Null.

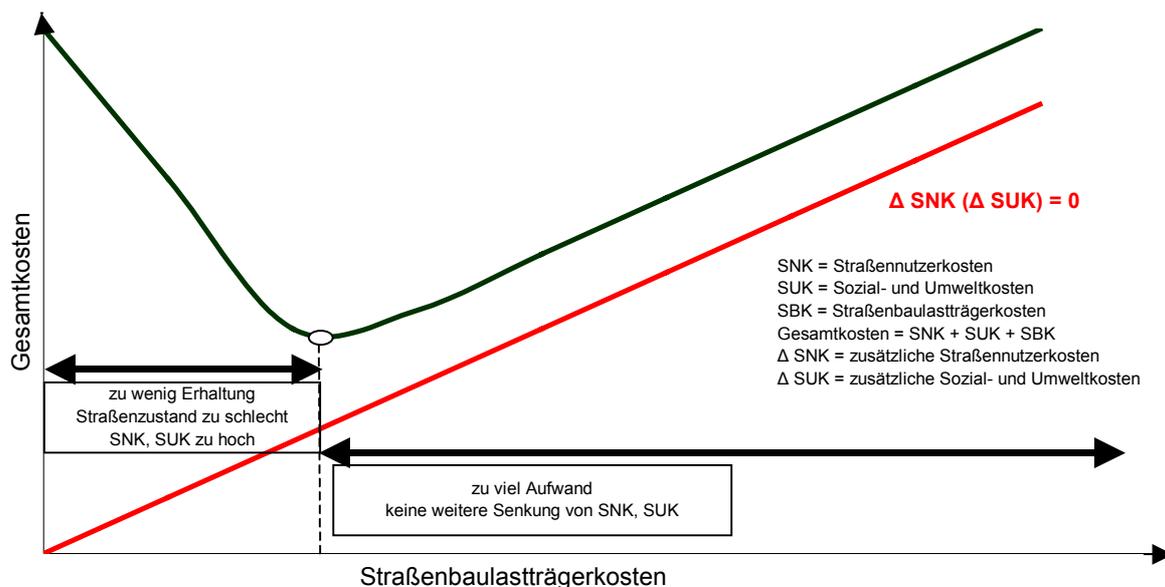
$$NGW = 0 = - \sum_{i=1}^n K_i * \frac{1}{q_k^i} + \sum_{i=1}^n N_i * \frac{1}{q_k^i} + R * \frac{1}{q_k^n} - I \quad [€]$$

$$IZF = p_k = (q_k - 1) * 100 \quad [‰] \quad (\text{GI. 1.2})$$

Eine Investition ist immer dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn ihr interner Zinsfuß IZF größer als der Kalkulationszinssatz (Marktzins) ist. Die interne Verzinsung des investierten Geldes innerhalb der Maßnahme ist dann größer als der Zinssatz am Kapitalmarkt. Bei einem Vergleich mehrerer Investitionsmaßnahmen ist jene zu wählen, die den höchsten internen Zinsfuß aufweist (Kriterium der Priorität).

### 1.5 Zielsetzung

Aus den oben genannten Gründen hat das moderne Management der Straßenerhaltung die Aufgabe, alle Beteiligten des Systems Straße mit einzubeziehen, also neben dem Straßenbaulastträger auch die Straßennutzer, welche die Straße letztlich finanzieren. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Straßennutzerkosten  $\Delta SNK$ , des veränderten Straßenzustandes, des DTVs und der Investition der Erhaltungsmaßnahme inkl. der Wertentwicklung über einen definierten Betrachtungszeitraum, lassen sich volkswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Analysen für Erhaltungsmaßnahmen durchführen. **Abb. 1.6** zeigt die qualitative Vorgehensweise mit dem Ziel der Kostenoptimierung.



**Abb. 1.6:** Qualitative Entwicklung der Straßennutzer- und der Sozial- und Umweltkosten mit dem Erhaltungsaufwand

Nutzen-Kosten-Untersuchungen werden explizit nach der Bundeshaushaltsordnung (BHO) §7 Abs. 2 und dem Haushaltsgrundsätzegesetz (HGRG) §6 Abs. 2 „für geeignete Maßnahmen von erheblicher finanzieller Bedeutung“ gefordert [008][009][010].

Zudem sieht *Bartlsperger* [006] die Bereitstellung öffentlicher Güter unter hoheitlichem Regime als eines der wichtigsten Anwendungsgebiete der wohlfahrtsökonomischen Nutzen-Kosten-Analyse dar.

Für den Neubau von Straßen werden solche Untersuchungen im Rahmen der Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS) [010] schon seit langem gefordert. Wie der Kostenvergleich des Bundes zeigt, bestehen jedoch keine gravierenden finanziellen Unterschiede zwischen Erhaltungs- und Neubaufwendungen. Folglich sollten auch die gleichen

Untersuchungskriterien für Investitionen der Straßenerhaltung wie bei Investitionen für den Neubau gelten. In Forschungsprojekten jüngerer Datums [011] wurde diese Forderung ebenfalls klar umrissen und als notwendig formuliert.

Die aktuelle Erhaltungsplanung in Deutschland mit dem aus der Machbarkeit und statistischen Festlegungen abgeleiteten Bewertungshintergrund der Zustandserfassung und –bewertung (ZEB) ist nicht mehr ausreichend. In der Zustandsbewertung müssen vielmehr die Straßennutzerkosten Berücksichtigung finden. Die Eingreif- bzw. Interventionswerte sollten daher auch auf Wirtschaftlichkeitskriterien und nicht wie bisher nur auf Machbarkeiten und Expertenbefragungen beruhen. *Bartlsperger* zeigt in seinem Gutachten zur Rechtsfrage der Einführung der „Richtlinien zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe“<sup>1</sup> auf, dass die Bewertung der Verkehrssicherheit auch aus dem Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Unfallgeschehen zu erfolgen hat. Gleiches gilt für die anderen Zustandsgrößen in Bezug auf die Nutzerkosten.

Ausgehend von diesen Grundgedanken sind in dieser Arbeit Lösungsansätze für die Interventionswerte auf Autobahnen formuliert, die volkswirtschaftlich gerechtfertigt sind und den Forderungen der gesamtwirtschaftlichen Optimierung genügen. Für Bundesstraßen werden lediglich Lösungswege programmtechnisch vorbereitet aber nicht hergeleitet.

Die Arbeit beschränkt sich auf die Oberflächeneigenschaften Griffigkeit  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  und Allgemeine Unebenheiten in Längsrichtung AUN. Aus der Nichtberücksichtigung der restlichen Zustandsgrößen nach der ZEB darf keine Irrelevanz gegenüber der Straßennutzerkosten gefolgert werden, vielmehr wird aus Gründen des Umfangs und der Übersichtlichkeit der Schwerpunkt auf die genannten Größen gelegt (**s. 3.**).

Die Ergebnisse werden für einen repräsentativen Abschnitt der Bundesautobahnen hergeleitet und diskutiert. Die programmtechnische Lösung GEEP 1.0 soll aber weitestgehend für das gesamte Netz der Bundesfernstraßen gelten (**s. Anhang A5**).

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, fundierte Zusammenhänge zwischen den Nutzen und Kosten von Erhaltungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Straßenbaulastträger und Straßennutzer herzuleiten. Des Weiteren sollen Diskussionen in der Nutzen-Kosten-Analyse vorgebracht und neu positioniert werden. Mit der volkswirtschaftlichen Betrachtung und Herleitung der Interventionswerte können die Bewertungskriterien der Straßenzustände unter einem neuen und in der heutigen Zeit wichtigen Gesichtspunkt analysiert und diskutiert werden.

Damit wird der Grundgedanke des 1976 gegründeten und erst Ende der Neunziger Jahre wieder ins Leben gerufenen Arbeitsausschusses für „Wirtschaftlichkeitsfragen der Straßenbefestigungen“ der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen erneut aufgegriffen [015][016].

---

<sup>1</sup> Das Gutachten ist von der FGSV zur Rechtsfrage der Einführung der „Richtlinien zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe“ in Auftrag gegeben worden: Bartlsperger, R: „Rechtsgutachten zur Straßengriffigkeit“, Erlangen 1998

## 2. Der repräsentative Straßenverkehr

### 2.1 Das repräsentative Straßennetz

Das Netz der Bundesautobahnen bildet in dieser Arbeit aufgrund seiner Bedeutung für den Personen- und Güterverkehr die Grundlage für die Herleitung der volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte.

Bei der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Unterhaltungsmaßnahmen mit Hilfe der Wirtschaftlichkeitsindikatoren werden hier Betrachtungen grundsätzlicher Art und Weise angestrebt, d.h. der Ansatz für das betrachtete System soll soweit wie möglich Allgemeingültigkeit besitzen.

Stellvertretend für alle möglichen Querschnittstypen, Verkehrsbelastungen und -zusammensetzungen wird der „Durchschnittsfall“ analysiert, der sich aus der Mittelung über alle Bundesautobahnen Deutschlands ergibt.

In den folgenden Punkten wird ein repräsentativer, durchschnittlicher Abschnitt für das Autobahnnetz hergeleitet. Es wird dabei von einem ungehinderten Verkehrsfluss ausgegangen, da Stausituationen in aller Regel nicht auf Fahrbahnzustände zurückzuführen sind, sondern im Allgemeinen die Konsequenz aus Kapazitätsengpässen darstellen. Dieser Fall ist demnach nicht Gegenstand der Arbeit und bleibt daher unberücksichtigt.

Die durchschnittliche Verkehrsstärke auf bundesdeutschen Autobahnen liegt mit dem Erhebungsstand 1999 bei einem DTV von 48.000 [Kfz/24h] (als Betrachtungseinheit ist der Durchschnitt aller Wochentage zugrunde gelegt; „alle Tage“) [004][033]. Zur Gewährleistung des ungehinderten Verkehrsflusses des durchschnittlichen täglichen Verkehrs werden die dafür ausreichenden Regelquerschnitte nach der RAS – Q herangezogen [010][032].

Bundesautobahn: ST 1.21; ST 1.31

Die Querschnittsgestaltung (Anzahl und Breite der Fahrstreifen) hat sowohl einen Einfluss auf die Höhe der Maßnahme- und Unterhaltungskosten (**s. 4.3**) als auch auf die Ermittlung der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit (**s. 5.2.2.3**). Zur Bestimmung des repräsentativen Querschnittes dient die prozentuale Aufteilung des bundesweiten Netzes in Abschnitte mit zwei- und mindestens dreistreifigen Richtungsfahrbahnen. Die Aufteilung der zweibahnigen Bundesautobahnen stellt sich wie folgt dar:

Länge der Autobahnabschnitte in [km] nach					
2-bahnige BAB mit Fahrstreifen insgesamt					
4	5	6	7	≥ 8	Σ
8.643	540	2.347	36	36	11.602

Tabelle 2.1: Länge der Bundesautobahnen, nach der Zahl der Fahrbahnen und Fahrstreifen [km] (Stand 2002) [034]

Bei den Autobahnabschnitten mit insgesamt fünf Fahrstreifen wird zu 50 % (270 km) von zwei Richtungsfahrstreifen und zu 50 % (270 km) von drei Richtungsfahrbahnen ausgegangen. Das Autobahnnetz lässt sich demnach wie folgt nach der Anzahl Richtungsfahrstreifen aufteilen:

Länge der Autobahnabschnitte in [km] nach Anzahl Richtungsfahrstreifen insgesamt		
2	≥ 3	Σ
8.643 + 270 = <b>8913</b>	2.347 + 270 + 36 + 36 = <b>2.689</b>	<b>11.602</b>
<b>76,8 %</b>	<b>23,2 %</b>	<b>100 %</b>

Tabelle 2.2: Länge und prozentualer Anteil der Bundesautobahnen nach der Zahl der Richtungsfahrstreifen [km]

Werden die Breiten der Regelquerschnitte nach **Tab. 2.2** gewichtet, so ergibt sich für den repräsentativen Fahrbahnquerschnitt eine mittlere Breite von 11,50 m pro Richtungsfahrbahn.

Darüber hinaus wird ein ebener und gerader Streckenabschnitt von 1,0 km Länge zugrunde gelegt. Der repräsentative Abschnitt einer deutschen Autobahn lässt sich zusammenfassend wie folgt beschreiben:

DTV:	48.000 Kfz/24h
Länge:	$l = 1,0$ km
Breite:	$b = 11,50$ m (eine Richtungsfahrbahn)
Kurvigkeit:	$KU = 0$ gon
Steigung/ Gefälle:	$s = 0\%$

## 2.2 Repräsentative Straßennutzer

Die Betrachtung des Systems Straße als wirtschaftliche Gesamtheit erfordert auch die Berücksichtigung der Straßennutzer. Dazu müssen die Straßennutzer definiert sowie die repräsentativen Fahrzeugmodelle mit allen fahrtechnisch relevanten Parametern ermittelt werden.

### 2.2.1 Fahrzeugflotte

Unterschieden werden die Straßennutzer nach ihrer Art der Fortbewegung (motorisiert und nicht motorisiert) sowie nach der genutzten Fahrzeugart. Das nicht motorisierte Nutzerkollektiv, welches Fußgänger, Fahrradfahrer etc. zusammenfasst, ist für die Betrachtung der Autobahnen ohne Bedeutung und bleibt unberücksichtigt.

Das motorisierte Nutzerkollektiv ist sehr heterogen. Eine Übersicht dazu zeigt ein Auszug aus dem zentralen Fahrzeugregister des Kraftfahrt – Bundesamtes [035]. Danach waren mit dem Stand Januar 2002 53.305.930 Kraftfahrzeuge gemeldet. Die Anzahl gliedert sich in 6,7% Kraft- und Dreiräder, 83,2% PKW, 0,2% Omnibusse, 5,0% LKW, 3,6% Zugmaschinen und 1,3% übrige Kfz wie Wohnmobile oder Einsatzfahrzeuge (**s. Abb. 2.1**). Mit 89,9% stellen die Krafträder und PKW in der Fahrzeuggruppe P zusammengefasst den größten Anteil der Fahrzeugflotte dar.

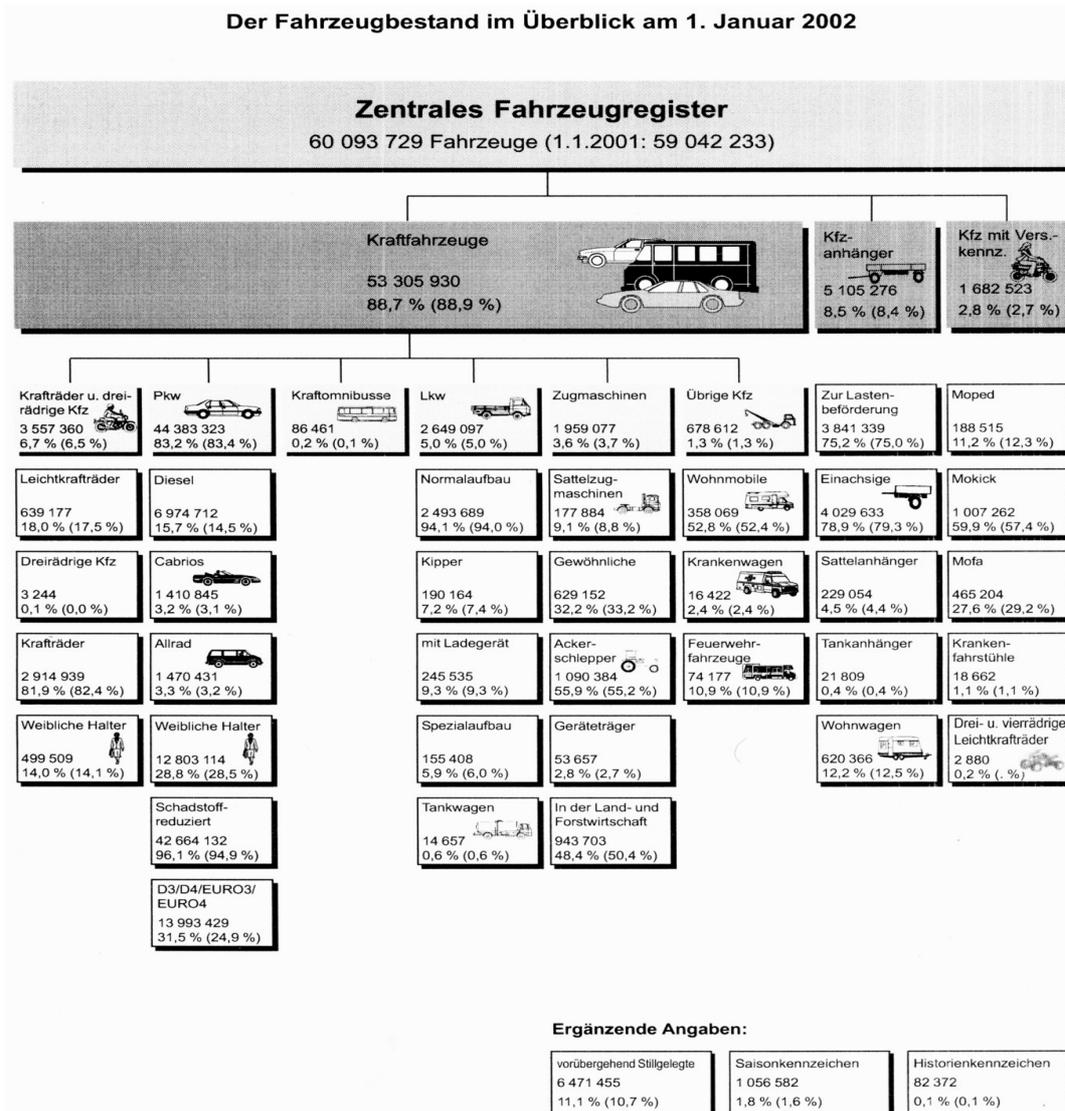


Abb. 2.1: Fahrzeugbestand im Überblick (Januar 2002) [035]

Die Schaffung einer einheitlichen und übersichtlichen Bewertung der Straßennutzer setzt eine Einteilung der gesamten Fahrzeugflotte in Fahrzeuggruppen (FG) voraus. Jede Fahrzeuggruppe FG wird dabei durch ein repräsentatives Kraftfahrzeug dargestellt.

Die Fahrzeugflotte, die das bundesweite Autobahnnetz frequentiert, kann in die vier Fahrzeuggruppen Pkw (P), Busse (B), Lkw (L) und Zugmaschinen (Z) unterteilt werden (s. Abb. 2.2) [010].

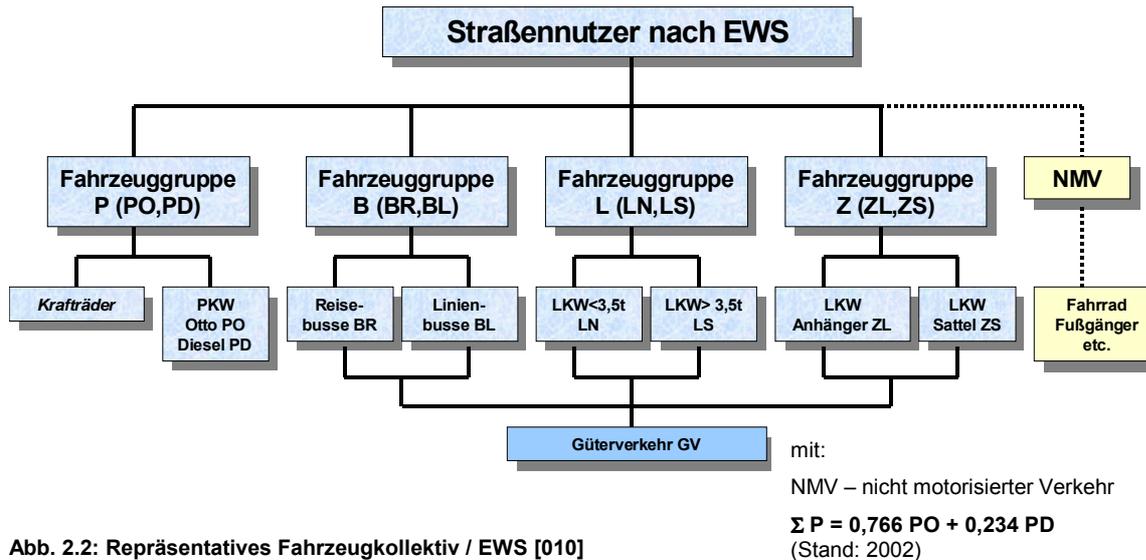


Abb. 2.2: Repräsentatives Fahrzeugkollektiv / EWS [010]

Zur Konkretisierung der Fahrzeuggruppen müssen die Repräsentativfahrzeuge genauer beschrieben und ihre technischen Parameter ermittelt werden.

### 2.2.1.1 Technische Parameter der Repräsentativfahrzeuge

Für die Fahrzeuggruppen wird ein Repräsentativfahrzeug ermittelt, das die Bandbreite sämtlicher Fahrzeuge dieser Gruppe umfasst. Die Repräsentativfahrzeuge sind fiktiv und stellen nach den Bestands- und Herstellerdaten gewichtet einen Mittelwert der Fahrzeuge der Gruppe dar. Im Einzelnen werden unter den technischen Parametern der Repräsentativfahrzeuge die folgenden Größen verstanden:

- Leistung [KW]
- Hubraum [cm<sup>3</sup>]
- Fahrzeuggewicht m [kg]
- Querspanfläche A [m<sup>2</sup>]
- $c_w$ - Wert [-]
- dynamischer Reifenhalmmesser  $r_{dyn}$  [m]

Bei der Mittelung wird dabei von einer Linearität zwischen Bestand (nach Hubraum bzw. Leistung) und der Laufleistung ausgegangen.

Im Folgenden soll kurz die Vorgehensweise zur Ermittlung der technischen Parameter für die Fahrzeuggruppen P und Z dargestellt werden. Nähere Angaben zu den technischen Parametern der restlichen Fahrzeuggruppen sind **Anhang A1** zu entnehmen.

Die repräsentativen technischen Parameter der Fahrzeuguntergruppen Pkw Otto (PO) und Pkw Diesel (PD) wurde in Abhängigkeit der Hubraumklassen und Hersteller (28 Fahrzeuge verschiedener Hersteller), getrennt nach Kombi und Limousinen, ermittelt. Bei der Zusammenführung der Kombi- und Limousinendaten wurde dabei von einem Kombianteil von 18,4 % an der Pkw-Flotte (Stand 2002) ausgegangen [033] (s. **Anhang A1**).

Die Ermittlung des durchschnittlichen Gewichtes des Repräsentativfahrzeuges basierte dabei auf dem Leergewicht<sup>2</sup>. Unter Berücksichtigung des mittleren Besetzungsgrades der Pkw auf bundesdeutschen Autobahnen von 1,65 [037] mit einem durchschnittlichen Personengewicht von 75 kg konnte folglich das durchschnittliche Gewicht berechnet werden.

Der dynamische Reifenhalmmesser  $r_{dyn}$  wurde nach der Formel der European Tyre and Rim Technical Organization (ETRTO) bestimmt.

$$r_{dyn} = \frac{\text{Abrollumfang}}{2\pi} \text{ [cm] (ETRTO)}$$

Dabei wurde der Abrollumfang in Abhängigkeit der Reifengrößen (Herstellerangaben) ermittelt [038].

Die technischen Parameter der Repräsentativfahrzeuge der Fahrzeuguntergruppen PO und PD sind in den **Tabellen 2.3** und **2.4** dargestellt.

Repräsentative technische Parameter	Wert	Kommentar
Leistung [KW]	87	klassengewichtet ( <b>Anhang A1</b> )
Hubraum [cm³]	1743	klassengewichtet ( <b>Anhang A1</b> )
Gewicht m [t]	1,399	Leergewicht + mittlerer Besetzungsgrad
Querspanfläche A [m²]	2,02	klassen- und herstellergewichtet ( <b>Anhang A1</b> )
Luftwiderstandsbeiwert $c_w$ [-]	0,31	klassengewichtet ( <b>Anhang A1</b> )
Dynamischer Reifenhalmmesser $r_{dyn}$ [m]	0,31	klassengewichtet ( <b>Anhang A1</b> )

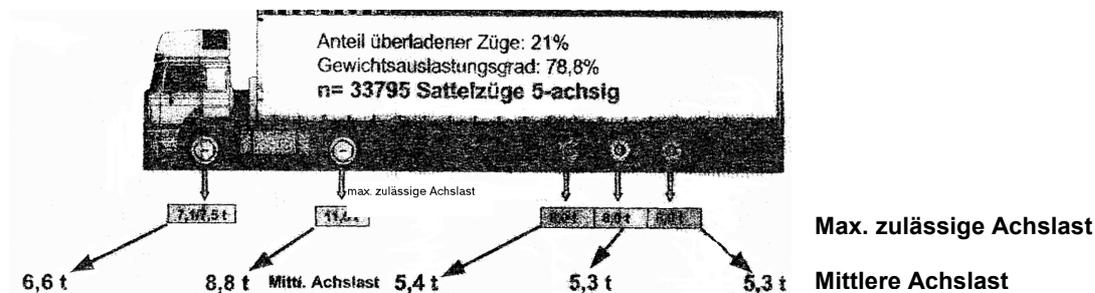
**Tabelle 2.3: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe PO**

Repräsentative technische Parameter	Wert	Kommentar
Leistung [KW]	75	klassengewichtet ( <b>Anhang A1</b> )
Hubraum [cm³]	1871	klassengewichtet ( <b>Anhang A1</b> )
Gewicht m [t]	1,429	Leergewicht + mittlerer Besetzungsgrad
Querspanfläche A [m²]	2,03	klassen- und herstellergewichtet ( <b>Anhang A1</b> )
Luftwiderstandsbeiwert $c_w$ [-]	0,31	klassengewichtet ( <b>Anhang A1</b> )
Dynamischer Reifenhalmmesser $r_{dyn}$ [m]	0,31	klassengewichtet ( <b>Anhang A1</b> )

**Tabelle 2.4: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe PD**

Im Gegensatz zur Pkw – Flotte liegt den repräsentativen Fahrzeugdaten von Bussen und Lastkraftwagen das zulässige Gesamtgewicht unter Berücksichtigung der mittleren Auslastung zugrunde.

Für die Fahrzeuggruppe der Zugmaschinen konnten konkrete Fahrzeugdaten und Gewichtsmessungen [039] herangezogen werden. Das Repräsentativfahrzeug der Fahrzeuggruppe Z ist in **Abb. 2.3** gezeigt.



**Abb. 2.3: Repräsentativfahrzeug für die Fahrzeuggruppe Z [039]**

<sup>2</sup> Leergewicht nach EU – Norm: Leergewicht des Fahrzeuges zzgl. Gewicht für halbe Tankfüllung (fahrbereit)

Die technischen Parameter der Fahrzeuggruppe Z sind in der **Tabelle 2.5** dargestellt.

Repräsentative technische Parameter	Wert	Kommentar
Leistung [KW]	370	Herstellerangaben ( <b>Anhang A1</b> )
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	15940	Herstellerangaben ( <b>Anhang A1</b> )
Gewicht m [t]	31,4	BAB Messungen: Auslastungsgrad 78,5 % [039]
Querspanfläche A [m <sup>2</sup> ]	9,27	Herstellerangaben ( <b>Anhang A1</b> )
Luftwiderstandsbeiwert c <sub>w</sub> [-]	0,75	nach <i>Mitschke</i> [040]
Dynamischer Reifenhalmmesser r <sub>dyn</sub> [m]	0,52	Reifengrößen [038] [039]

**Tabelle 2.5: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe Z**

In **Tabelle 2.6** sind die technischen Parameter zusammengefasst aufgeführt. Sie repräsentieren die Fahrzeuggruppen und bilden gleichzeitig die Grundlage für die Bestimmung der kraftstoffbezogenen Betriebskosten (**s. 5.3.2**).

Fahrzeuggruppe FG	Leistung [KW]	Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	Fahrzeugmasse [kg]	Querspanfläche [m <sup>2</sup> ]	Luftwiderstandsbeiwert []	Dyn. Reifenhalmmesser [m]
PO	87	1743	1399	2,02	0,31	0,31
PD	75	1871	1429	2,03	0,31	0,31
B	260	11950	10200	7,51	0,65	0,50
L	110	4250	7300	8,30	0,66	0,43
Z	370	15940	31400	9,27	0,75	0,52

**Tabelle 2.6: Übersicht der technischen Parameter je Fahrzeuggruppe FG**

### 2.2.1.2 Kostenparameter für den Betriebskostengrundwert BGW

Der Betriebskostengrundwert BGW erfasst die Beiträge aus fahrleistungsabhängigen Abschreibungen der Fahrzeuge wie Instandhaltung, Wartung, Reifenverschleiß und Ölverbrauch [036].

Die Kostenparameter für den Betriebskostengrundwert stellen sich wie folgt dar:

- Abnutzung [€/100km]
- Reifenverschleiß [€/100km]
- Reparatur, Wartung und Schmierstoffe [€/100km]

Die Parameter für den Betriebskostengrundwert werden nur in Form von Kosten für jede Fahrzeuggruppe gemittelt angegeben (**s. 5.3.1**).

Zur Darstellung des repräsentativen Straßenverkehrs spielen neben den Fahrzeugeigenschaften auch die Verkehrszusammensetzung und –belastung eine wesentliche Rolle.

### 2.2.2 Verkehrszusammensetzung

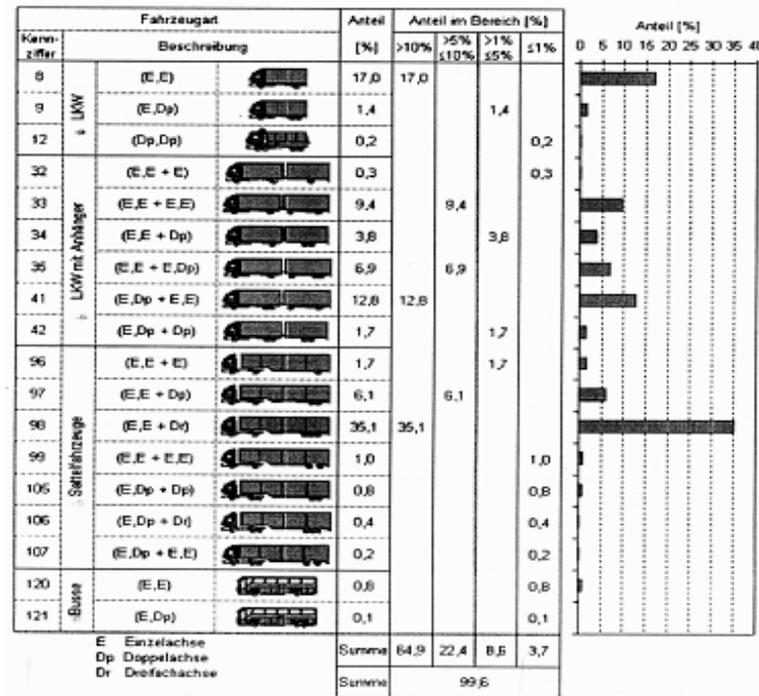
Für die rechnerische Bestimmung der durchschnittlichen Zusammensetzung des Verkehrs auf dem Autobahnnetz wird der Bundesdurchschnitt der verkehrlichen Belastung zugrunde gelegt:

- **Bundesautobahn:** DTV = 48.000 [Kfz/24h] mit:  
DTV<sub>P</sub> = 40.896 [Kfz/24h] (85,2%)  
DTV<sub>GV</sub> = 7104 [Kfz/24h] (14,8%) [004][033]

Die Fahrzeuggruppe P wird fahrleistungsabhängig in die Untergruppen PO und PD unterteilt:

$$PO = 0,766 \cdot P \text{ und } PD = 0,234 \cdot P \text{ [010][033]}$$

Für den Güterverkehr GV, der die Fahrzeuggruppen B,L und Z beschreibt, ergibt sich die Verteilung nach **Abb. 2.4** [039].



**Abb. 2.4:** Verteilung des Güterverkehrs auf die mittleren Fahrzeugsilhouetten [039]

Fahrzeuggruppe L: 18,7 %

Fahrzeuggruppe Z: 80,3 %

Fahrzeuggruppe B: 1,0 % in der Gruppe Güterverkehr.

Daraus lässt sich für die durchschnittliche Verkehrsstärke des Autobahnnetzes die in **Tabelle 2.7** dargestellte Verteilung angeben:

Fahrzeuggruppe FG	Anteil DTV		% in Fahrzeuggruppe	
	[%]	[Kfz/24h]	P	GV
PO	65,3	31.344	76,6	-
PD	19,9	9.552	23,4	-
			100,0	-
L	2,8	1.344	-	18,7
Z	11,9	5.712	-	80,3
B	0,1	48	-	1,0
Σ	100,0	48.000	-	100,0

**Tabelle 2.7:** Durchschnittlicher Anteil der Fahrzeuggruppen FG am DTV auf bundesdeutschen Autobahnen BAB

### 2.2.3 Verkehrsbelastung

Die Querschnittsbelastung durch den Verkehr erfolgt jedoch nicht gleichmäßig. Vielmehr müssen innerhalb eines Tages und eines Jahres Schwankungen der Verkehrsstärke berücksichtigt werden. Dazu werden Zeitabschnitte t mit der Dauer T [h/a] mit annähernd gleicher Verkehrsstärke zusammengefasst. Für die Zeitabschnitte t berechnet sich die Verkehrsstärke Q je Fahrtrichtung allgemein nach der Gleichung:

$$Q_{FG} = k_{FG} * \frac{DTV_{FG}}{RI} [Kfz / h] \quad \text{mit:} \quad \begin{matrix} RI: \text{Fahrtrichtung} \\ k: \text{Verkehrsanteile in t} \end{matrix}$$

Der Faktor  $k$  berücksichtigt die Fahrzeuggruppenanteile in den einzelnen Zeitabschnitten  $t$  und trägt dabei sowohl der unterschiedlichen Verkehrssituationen über 24 h („rush –hour“, Nachtzeit etc.) als auch dem saisonbedingten Einfluss (Urlaub, Werktage, Feiertage etc.) Rechnung. Ziel dieser Aufteilung ist die Bestimmung der unterschiedlichen Straßennutzerkosten in den einzelnen Stundengruppen  $t$ . Der Unterschied resultiert dabei in erster Linie aus den unterschiedlich gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeiten je Stundengruppe (**s. 5.2.2.3**).

Die Verkehrsstundengruppen sind in fünf Zeitabschnitte für den Jahresdurchschnitt „Alle Tage“ angegeben [010].

	BAB		B		
	$k_{ges}$	$k_{GV}$	$k_{ges}$	$k_{GV}$	
alle Tage	1	0,0971	0,0622	0,1212	0,0735
	2	0,0892	0,0622	0,1091	0,0735
	3	0,0809	0,0622	0,0965	0,0735
	4	0,0690	0,0622	0,0731	0,0735
	5	0,0313	0,0345	0,0293	0,0309

**Tabelle 2.8:  $DTV_{ges}$  – und  $DTV_{GV}$  – Anteile  $k$  für Zeitabschnitte  $t$  mit annähernd gleichartigem Verkehrsablauf**

Die Verkehrsstärke ergibt sich getrennt für den Gesamt- bzw. Güterverkehr in den fünf Verkehrsstundengruppen zu:

$$Q_{ges1-5} = k_{ges1-5} * \frac{DTV_{ges}}{2} \quad [Kfz/h]$$

$$Q_{GV1-5} = k_{GV1-5} * \frac{DTV_{GV1-5}}{2} \quad [Kfz/h] \quad \text{(Gl. 2.1)}$$

$$Q_{P1-5} = k_{ges1-5} * \frac{DTV_{ges}}{2} - Q_{GV1-5} \quad [Kfz/h] \quad \text{(Gl. 2.2)}$$

Setzt man den durchschnittlichen täglichen Verkehr auf bundesdeutschen Autobahnen von 48.000 Kfz/24h unter der Berücksichtigung der Verkehrsanteile  $k$  in den Verkehrsstundengruppen  $t$  an, so ergeben sich die folgenden Verkehrsbelastungen:

Verkehrsstundengruppe $t$	Anzahl Stunden pro Jahr [h/a]	Verkehrsstärke Güterverkehr $Q_{GV}$	Verkehrsstärke alle Fahrzeuggruppen $Q_{ges}$	Verkehrsstärke Fahrzeuggruppe P $Q_P$
1	90	221	2330	2109
2	120	221	2141	1920
3	390	221	1942	1721
4	1500	221	1656	1435
5	6660	122	751	629

**Tabelle 2.9: Verkehrsstärken  $Q_{ges}$ ,  $Q_{GV}$  und  $Q_P$  einer Fahrtrichtung für die fünf Verkehrsstundengruppen  $t$**

Die Definition der repräsentativen Fahrzeugflotte schafft die Voraussetzungen für die genaue Ermittlung der aktuellen Straßennutzerkosten SNK auf Autobahnen. Gemeinsam mit der Definition des repräsentativen Autobahnabschnittes stellt sie die Basis für die volkswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Analyse dar.

### 3. Zustandsgrößen der Fahrbahnoberfläche

Der Zustand der Fahrbahnoberfläche ist für Straßennutzer und Fahrzeugbetrieb hinsichtlich der Kosten von entscheidender Bedeutung. Um den Zusammenhang zwischen Straßenzustand und Straßennutzerkosten quantifizieren zu können, müssen vorab die Zustandsmerkmale der Fahrbahnoberfläche beschrieben werden.

Die Straßenzustandsmerkmale, auch Zustandsgrößen genannt, verschlechtern sich in der Regel im Laufe der Zeit in Abhängigkeit des Straßenaufbaues (SN-Wert), der Verkehrsbeanspruchung DTV<sup>(SV)</sup> sowie der klimatischen Bedingungen (Niederschlag, Frost, Temperatur).

Die Zustandsgrößen, die im Rahmen der ZEB messtechnisch erfasst werden, sind die Griffigkeit, die Allgemeinen Unebenheiten in Längsrichtung, die Spurrinnentiefe (und fiktive Wassertiefe), sowie Netzkisse, Flickstellen und ggf. Kantenbrüche (s. 1.2). In Bezug auf die Straßennutzer sind die Zustandsgrößen der Straße von unterschiedlicher Bedeutung. Nicht jede Größe besitzt einen signifikanten Einfluss auf den Fahrzeugbetrieb bzw. ist dieser unbekannt. So haben z.B. Unebenheiten im Querprofil (Spurrinnen bei der bituminösen Bauweise, Plattenversätze in der Längsfuge bei der Betonbauweise) keinen nachgewiesenen signifikanten Einfluss auf die fahrleistungsabhängigen Straßennutzerkosten. Der quantitative Einfluss auf die Unfallhäufigkeit konnte ebenfalls bis zum heutigen Tag nicht nachgewiesen werden. Gleiches gilt für die Substanzmerkmale der Fahrbahn. Zudem ist der wechselseitige Einfluss der Zustandsgrößen ebenfalls nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Im weiteren Verlauf werden die Allgemeinen Unebenheiten in Längsrichtung und die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche als dominierende Straßenzustandsmerkmale hinsichtlich der Beeinflussung der Straßennutzer und deren Kosten betrachtet. Diese Annahme korrespondiert auch mit internationalen Erfahrungen [013][014].

Die Längsunebenheiten haben den mit Abstand größten Einfluss auf die Fahrzeugbetriebskosten und die benötigte Reisezeit [041][042][043]. Die Griffigkeit besitzt einen Einfluss auf die „relative Unfallhäufigkeit bei Nässe“ und damit auf die Unfallkosten [044][045][046].

In den folgenden Abschnitten werden die beiden Zustandsgrößen Unebenheiten in Längsrichtung und Griffigkeit, sowie deren zeitliche Entwicklung (Verhaltensfunktionen) beschrieben.

#### 3.1 Griffigkeit

„Unter der Griffigkeit einer Fahrbahndecke ist der Einfluss zu verstehen, den ihre Oberfläche durch ihre stoffliche Beschaffenheit und insbesondere durch ihre geometrische Feingestalt auf die Größe der maximal vom Reifen auf die Straße abstützbaren Antriebs-, Brems- und Seitenkräfte ausübt (auch bezeichnet als Kraftschlussvermögen oder Gleitwiderstand der Straßenoberfläche). Während trockene Straßen außer bei grober Verschmutzungen im allgemeinen stets eine hohe und nur wenig von der Geschwindigkeit abhängige Griffigkeit bieten, sind nasse Straßen in ihrem Griffigkeitsverhalten sehr unterschiedlich. Mit zunehmender Geschwindigkeit sinkt die Griffigkeit der Straßen bei Nässe mehr oder weniger stark ab“ [047].

Für die Größe des Gleitreibungswiderstandes, der durch den Reibungskoeffizienten  $\mu$  definiert wird, sind die Mikro- und Makrotextur die maßgebenden Charakteristika der Fahrbahnoberfläche.

$$\mu = R/N$$

R = tangential wirkende Reibungskraft zwischen Reifen und Fahrbahn

N = senkrecht zur Kontaktfläche wirkende Kraft (Radlast)

Der relevante Fall zur Bestimmung der Griffigkeit leitet sich aus dem ungünstigsten Fall, der nassen Fahrbahnoberfläche, ab.

Generell gilt, dass mit steigender Wasserfilmdicke das Kraftschlussvermögen abnimmt. In diesem Fall können sich die Adhäsionskomponente (molekulare Bindungskräfte zwischen Reifen/Gesteinsoberfläche) und die Hysteresekomponente (Verformungsenergie des Gummis durch Makrotexturelemente) weniger ausbilden. Die Ausbildung der beiden Komponenten ist neben der gefahrenen Geschwindigkeit maßgeblich von der Qualität der Mikro- und Makrotextur abhängig.

Das schlechte Griffigkeitsniveau eines Straßenabschnittes macht sich daher bei Nässe besonders nachhaltig bemerkbar [020].

### 3.1.1 Griffigkeitskennwerte

Die Ermittlung der Zustandsgröße Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche wird mit einer definierten Wasserfilmdicke unter verschiedenen, konstanten Geschwindigkeiten gemessen. Die Griffigkeitsmessungen sind Reibungsmessungen (Kraftschlussmessungen) unter gewählten Versuchsbedingungen. Für die Wahl der Versuchsbedingungen (Reibungsart, Reifentyp, Radlast, Annäherungsgrad der Straßenoberfläche, Messgeschwindigkeiten u.a.) bestehen unterschiedliche Möglichkeiten. Im In- und Ausland wurden zahlreiche Messgeräte verschiedener Bauart entwickelt. Für diese Arbeit sind die beiden Messprinzipien SRM und SCRIM von Bedeutung und werden im Folgenden vorgestellt.

Neben einer kurzen Erläuterung wird der Zusammenhang beider Kennwerte untersucht, da viele Messwerte ausschließlich als  $\mu_{\text{SRM}}$ -Werte vorliegen. Für die vorliegende Arbeit wird jedoch der  $\mu_{\text{SCRIM}}$ -Wert grundsätzlich als maßgebend betrachtet.

#### 3.1.1.1 Gleitbeiwert $\mu_{\text{SRM}}$

Der Stuttgarter Reibungsmesser basiert auf dem Messprinzip des blockierten Schlepprades. Grundidee dieses Prinzips war dabei die Simulation der Gefahrenbremsung mit blockierten Rädern. Diese Situation ist jedoch mit zunehmender Verbreitung der ABS-Systeme an Fahrzeugen selten geworden. Aus diesem Grund findet das Messprinzip in Deutschland immer weniger Verwendung. In **Abb. 3.1** ist der Bewertungshintergrund für den Gleitbeiwert  $\mu_{\text{SRM}}$  dargestellt.

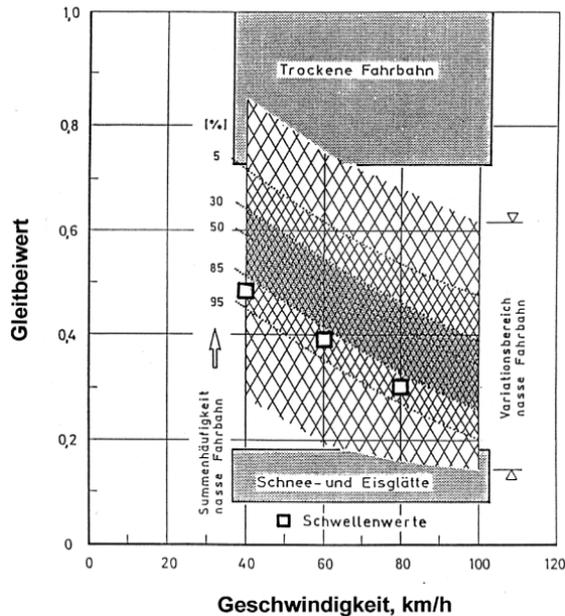


Abb. 3.1: Bewertungshintergrund für den Gleitbeiwert  $\mu_{SRM}$  [020]

Der Gleitbeiwert  $\mu_{SRM}$  war viele Jahre der Bezugswert für die Bewertung der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen in der Bundesrepublik Deutschland [047]. Mittlerweile ist dieser Bezugswert jedoch aus rein ökonomischen und organisatorischen Gründen von dem am schräglaufenden Rad gemessenen Seitenkraftbeiwert  $\mu_{SCRIM}$  abgelöst worden [048].

### 3.1.1.2 Seitenkraftbeiwert $\mu_{SCRIM}$

Die „Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine“ (SCRIM) ist ein in England entwickeltes Gerät zur Messung des Seitenkraftbeiwertes. Der Unterschied dieser Messmethode zu der des Stuttgarter Reibungsmessers besteht in dem um  $20^\circ$  zur Fahrtrichtung schräggestellten Messrad. Durch den Schräglaufwinkel des Messrades werden die Konfliktsituationen Kurvenfahrt und Schleudern mit einem erhöhten Griffigkeitsbedarf simuliert. Die Schrägstellung des Reifens zur Fahrtrichtung bewirkt eine Seitenkraft auf das Rad. Der Quotient aus der gemessenen Seitenkraft  $F_y$  und der bekannten Radlast  $F_z$  ergibt den Seitenkraftbeiwert (s. Abb. 3.2).

$$\mu_{SCRIM} = F_y / F_z$$

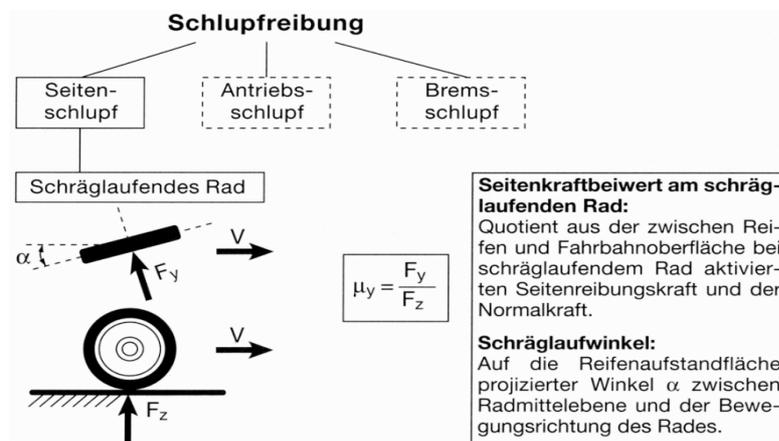
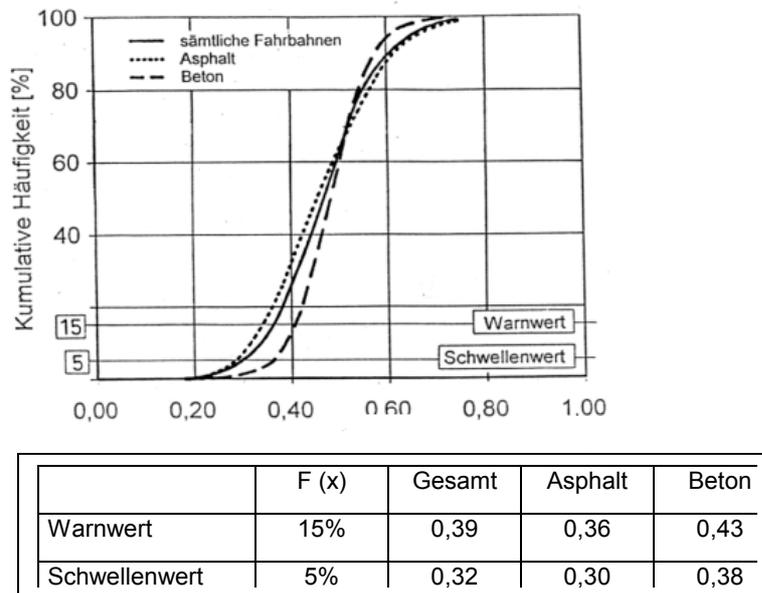


Abb. 3.2: Messprinzip der SCRIM [048]

Der Bewertungshintergrund für den Seitenkraftbeiwert wurde aus dem Datenkollektiv der Zustandserfassung des gesamten deutschen Autobahnnetzes (1. Fahrstreifen) von 1992 entwickelt (**s. Abb. 3.3**) [020].



**Abb. 3.3: Seitenkraftbeiwert  $\mu_{\text{SCRIM}80}$ , Bewertungshintergrund [020]**

### 3.1.1.3 Zusammenhang zwischen Gleitbeiwert $\mu_{\text{SRM}}$ und Seitenkraftbeiwert $\mu_{\text{SCRIM}}$

Seit Gebrauch beider Messsysteme (SRM, SCRIM) sind immer wieder Korrelationen zwischen den beiden Messwerten ermittelt worden.

Bereits 1975/1976 fanden im Rahmen der deutsch- französischen Zusammenarbeit unter der Leitung der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast) [049] erste vergleichende Griffigkeitsmessungen mit dem SRM und der SCRIM statt.

Vergleichsmessungen jüngerer Datums wurden 1999 und 2001 auf der Versuchsstrecke Bamberg im Rahmen einer Forschungsarbeit zur Entwicklung der Oberflächeneigenschaften [058][059] durchgeführt.

Die umfangreichsten Untersuchungen jedoch sind der Forschungsarbeit „Vergleichsmessungen zwischen dem Stuttgarter Reibungsmesser und der Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine im Hinblick auf ihre Einsatzmöglichkeiten im Rahmen des Managements der Straßenerhaltung“ [055][056] von 1989 zu entnehmen. Die Vergleichsmessungen umfassten 21 Vergleichsmessstrecken sowie einen Langstreckenrundkurs von 206 km.

Aus diesem Messprogramm ermittelte *Hiersche* [056] für die Messgeschwindigkeit von  $V_{\text{Mess}} = 80$  km/h die lineare Beziehung

$$\mu_{\text{SCRIM}80} = 1,076\mu_{\text{SRM}80} + 0,006 \quad R = 0,873 \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Aufgrund des Umfangs dieser Vergleichskampagne und des befriedigenden Regressionskoeffizienten stellt in dieser Arbeit die **Gleichung 3.1** die Grundlage für die Umrechnungen der unterschiedlichen Griffigkeitskennwerte dar.

Die Ergebnisse der erwähnten Untersuchungen sind in **Abb. 3.4** graphisch dargestellt.

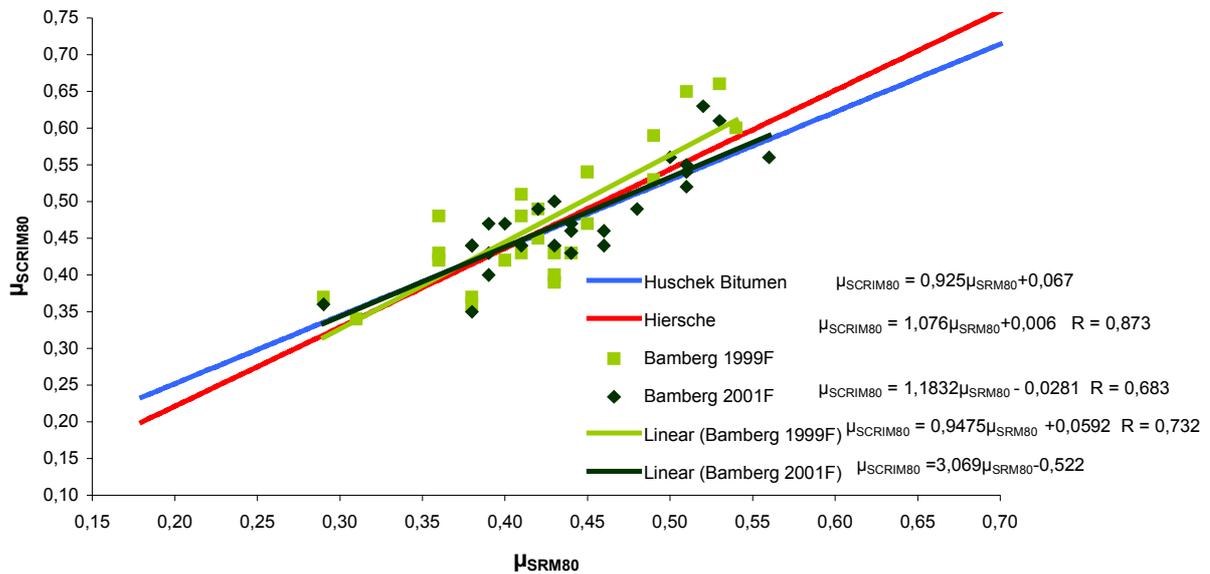


Abb. 3.4: Übersicht ermittelter Zusammenhänge zwischen den Griffigkeitskennwerten  $\mu_{SRM80}$  -  $\mu_{SCRIM80}$  [056][058][059]

### 3.1.2 Verhaltensfunktion $\mu(t)$

Die Veränderung eines Zustandsmerkmals der Fahrbahnoberfläche mit der Zeit wird als Verhaltensfunktion  $f(t)$  bezeichnet. Sie kann auch als Prognose für die Entwicklung des Merkmals in Abhängigkeit der Zeit, Witterung, des Verkehrs und des Aufbaus der Straße interpretiert werden.

Eine sehr praxisnahe Variante zur Aufstellung einer Verhaltensfunktion besteht in der Langzeitbeobachtung ausgewählter Bereiche.

Das Forschungsprojekt "Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Mineralstoffe auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltdeckschichten hinsichtlich Griffigkeit, Querebenheit und Reifengeräuschen" [058] war eine solche Langzeitstudie. Insgesamt wurden 21 variierte Asphaltmischungen und vier Standardmischungen in jeweils 200 m langen Abschnitten über die gesamte Fahrbahnbreite eingebaut. Die messtechnische Erfassung der Felder erstreckte sich von 1991 bis 2000 in Abständen eines Jahres [059].

Aus den vorliegenden Messergebnissen wurde für jedes Versuchsfeld die Regressionsfunktion ermittelt, die die zeitliche Veränderung der Zustandsgröße  $\mu_{SRM80}$  am genauesten beschreibt. Zwei Varianten von Regressionsfunktionen wurden dabei näher untersucht (s. Abb. 3.5).

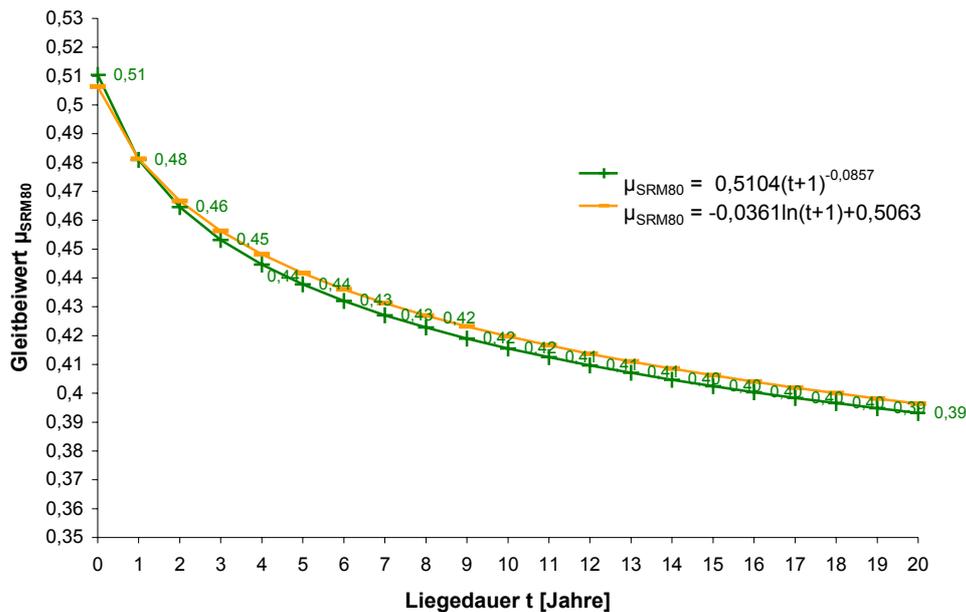


Abb. 3.5: Regressionsmodelle für die Verhaltensfunktion  $\mu_{\text{SRM80}}$

Nach den Auswertungen sämtlicher Versuchsfelder ergaben die Potenz- und die Logarithmusfunktion die besten Ergebnisse zur allgemeinen Beschreibung der Griffigkeitsentwicklung und deren Grenzwertverlauf [059]. **Abb. 3.5** zeigt den qualitativen Verlauf der Griffigkeitsentwicklung. In den ersten Liegejahren nimmt die Griffigkeit verhältnismäßig stark ab, im Weiteren flacht die Kurve deutlich ab und nimmt schließlich einen asymptotischen Verlauf an. Der Bildung der mittleren Verhaltensfunktion ist die Potenzfunktion zugrunde gelegt worden.

Über alle Felder gemittelt ergaben sich die folgenden Verhaltensfunktionen:

$$\mu_{\text{SRM80}} = 0,5104 * (t+1)^{-0,0857} \quad \text{für den Fahrstreifen}$$

$$\mu_{\text{SRM80}} = 0,5313 * (t+1)^{-0,0398} \quad \text{für den Überholstreifen}$$

Ausgedrückt durch den Seitenkraftbeiwert  $\mu_{\text{SCRIM80}}$  lauten die Verhaltensfunktionen wie folgt :

$$\mu_{\text{SCRIM80}} = 0,5552 * (t+1)^{-0,0846} \quad \text{für den Fahrstreifen} \quad \text{(Gl. 3.2)}$$

$$\mu_{\text{SCRIM80}} = 0,5777 * (t+1)^{-0,0393} \quad \text{für den Überholstreifen} \quad \text{(Gl. 3.3)}$$

Im weiteren Verlauf der Arbeit stellen die Funktionen  $\mu_{\text{SCRIM80}}(t)$  die Grundlage für die Beschreibung des Verhaltens der Zustandsgröße Griffigkeit dar.

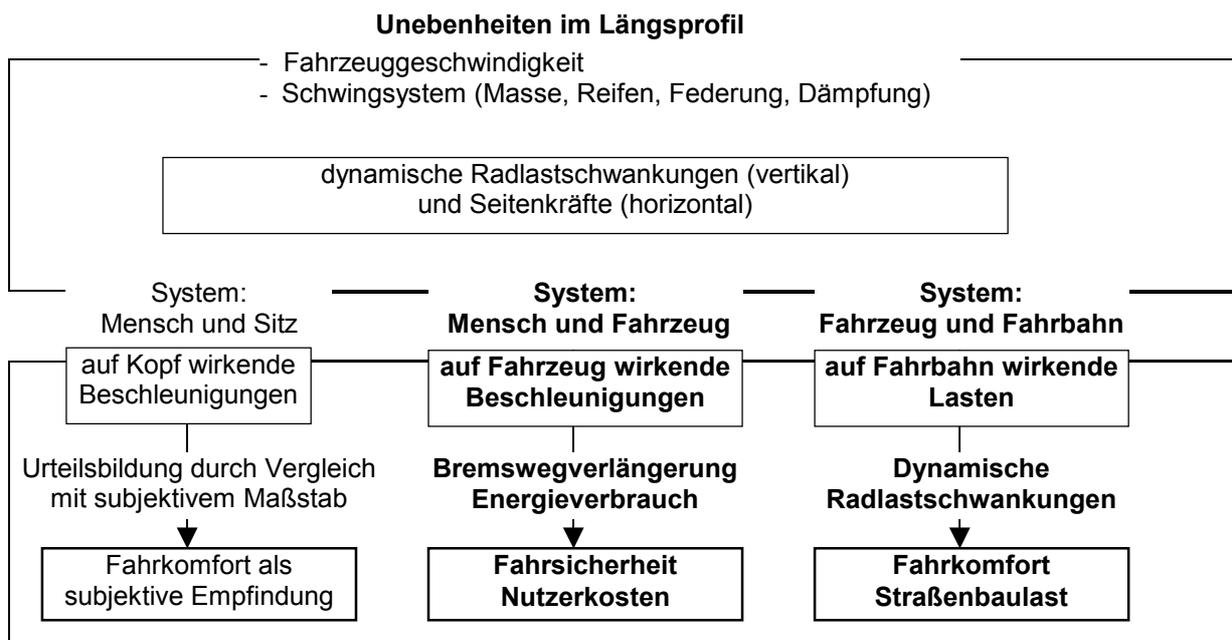
Die Anfangsgriffigkeit einer Neubau- oder Erhaltungsmaßnahme liegt nach der ermittelten Verhaltensfunktion bei  $\mu_{\text{SCRIM80}} = 0,56$ . Diese relativ geringe Anfangsgriffigkeit ist auf die Nichtabstreung sämtlicher Versuchsfelder zurückzuführen. Analysen von erzielten Anfangsgriffigkeiten (hierunter wurden Griffigkeitsmessungen bis zu zwei Jahre nach Herstellung zusammengefasst) auf Autobahnen in Brandenburg [071] und Bayern [132] [133] ergaben zum Teil deutlich höhere Werte als 0,56. Anfangsgriffigkeiten von  $< 0,55$  wurden hingegen kaum erreicht.

Daraus folgt, dass es bautechnisch unproblematisch ist, einen Griffigkeitswert von  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,56$  für neue Fahrbahnoberflächen herzustellen. Die ermittelte Verhaltensfunktion ist demnach als gute, nicht zu optimistische Näherung an die realen Verhältnisse zu verstehen.

### 3.2 Unebenheiten in Längsrichtung

Die Unebenheiten in Längsrichtung einer Fahrbahnoberfläche regen Fahrzeuge in Abhängigkeit ihrer Geschwindigkeit zu Schwingungen an, wodurch sich auch die Fahrwiderstände und damit der erforderliche Energiebedarf für die Fortbewegung eines Fahrzeuges verändern. Der Mensch reagiert durch sein subjektives Schwingungsempfinden auf die Unebenheiten und kann dadurch negativ beeinflusst werden. Auch der Straßenkörper wird durch zusätzlich auftretende Vertikallasten mehr beansprucht.

Diese Unebenheiten im Längsprofil werden in der Zustandserfassung und -bewertung als „Allgemeine Unebenheiten in Längsrichtung“, kurz AUN, bezeichnet. Ihre Auswirkungen sind zusammengefasst in **Abb. 3.6.** gezeigt.



**Abb. 3.6:** Auswirkungen von Straßenunebenheiten [020]

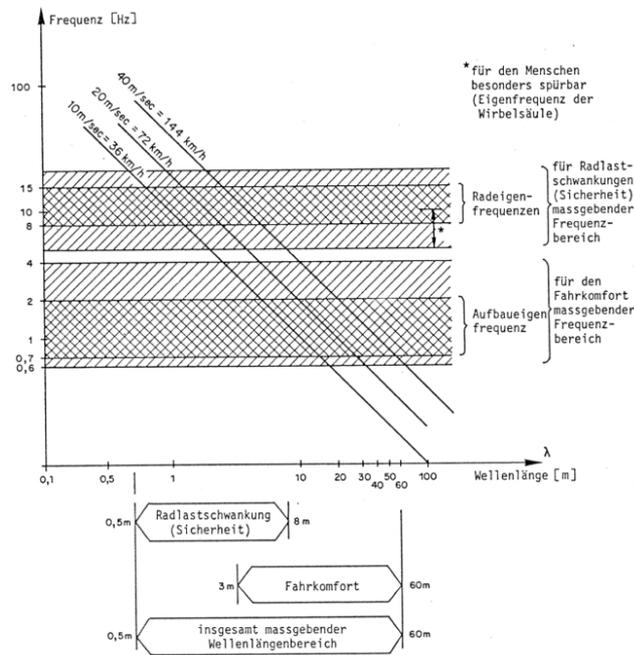
Die Unebenheitsarten können sehr unterschiedlich sein. Prinzipiell lassen sie sich in die Kategorien

- regellose Unebenheiten
- periodische Unebenheiten und
- Einzelhindernisse

unterteilen.

Nach *Mitschke et. al.* [062] können Fahrbahnunebenheiten für das Fahrzeugschwingverhalten als regellose Unebenheiten aufgefasst und als solche mathematisch beschrieben werden. Dabei sind die Wellenlänge  $\lambda$ , die Eigenfrequenz des Fahrzeuges sowie die gefahrene Geschwindigkeit maßgebend.

Beispielhaft für einen Pkw ist der relevante Wellenlängenbereich in Abhängigkeit vom Bereich der Eigenfrequenzen und der Fahrgeschwindigkeit in **Abb. 3.7** dargestellt. Aus Untersuchungen an Fahrzeugen mit Insassen ist bekannt, dass die wesentlichen schwingungstechnischen Eigenschaften für die Fahrsicherheit im Bereich von 0,5 bis 10 Hz liegen. Für den Fahrkomfort liegt der relevante Schwingungsbereich bei 10 bis 30 Hz. Daraus ergeben sich für die weiteren Betrachtungen die maßgebenden Wellenlängen (**s. Abb. 3.7**).



**Abb. 3.7: Aus Eigenfrequenzen und Fahrgeschwindigkeiten resultierende Bereiche maßgebender Wellenlängen [062]**

In Deutschland hat sich die spektrale Dichte als Maß für die Unebenheit von Fahrbahnen in Längsrichtung durchgesetzt. Sie soll im Folgenden neben anderen, international gebräuchlichen Unebenheitskennwerten, kurz skizziert werden.

### 3.2.1 Unebenheitskennwerte

#### 3.2.1.1 Allgemeine Unebenheiten in Längsrichtung (AUN)

Im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) wird die spektrale Dichte  $\Phi_h(\Omega_0)$  als Beschreibung der Allgemeinen Unebenheiten in Längsrichtung AUN verwendet. Nach *Steinauer et. al.* [061] wird die spektrale Dichte aus der idealisierten Annahme der harmonischen Folge von Hindernissen (Wellenstraße), deren Amplitudenbandbreite über die Wellenlängen gemittelt werden, abgeleitet. Dieses Leistungsdichte-Spektrum beschreibt die Wellen, die mit ihren Amplituden das Straßenlängsprofil ausmachen. „Sie basiert auf der Vorstellung, dass sich eine irgendwie geartete Schwingung – und bei Straßenunebenheiten handelt es sich gewissermaßen um ‚in Asphalt bzw. Beton erstarrte Schwingungen‘ – als eine Überlagerung vieler verschiedener verstehen lässt [(**Abb. 3.8**)]. [...] Die Ordinate enthält die Amplituden-, die Abszisse die Wellenlängen-Information. Der Abfall der Kurve beschreibt eine allgemeine Beobachtung bei Straßenspektren: niedrige Frequenzen bzw. lange Wellen sind mit größeren, hohe Frequenzen also kurze Wellenlängen, mit kleineren Amplituden

im Längsprofil der Straßenoberfläche vertreten. Im doppelt logarithmischen Maßstab aufgetragen, lässt sich der Kurvenverlauf vereinfachend durch eine ausmittelnde Gerade beschreiben. Ihre Steigung - für die meisten Straßen um 2 - nennt man ‚Welligkeit‘ ( $w$ ). Ihre ‚Höhe‘ - das allgemeine Amplituden-Niveau der Straße - wird durch das ‚Unebenheitsmaß‘ (AUN) gekennzeichnet“.

Das Längsprofil einer Straße wird kontinuierlich durch Laser- bzw. Ultraschallmessungen aufgenommen und die beschriebenen Kenngrößen bestimmt. Zur Kennzeichnung der Längsunebenheit nach der ZEB dient die spektrale Unebenheitsdichte für die Bezugswellenlänge  $\lambda_0 = 6,3 \text{ m}$  und wird in der Einheit  $[\text{cm}^3]$  angegeben.

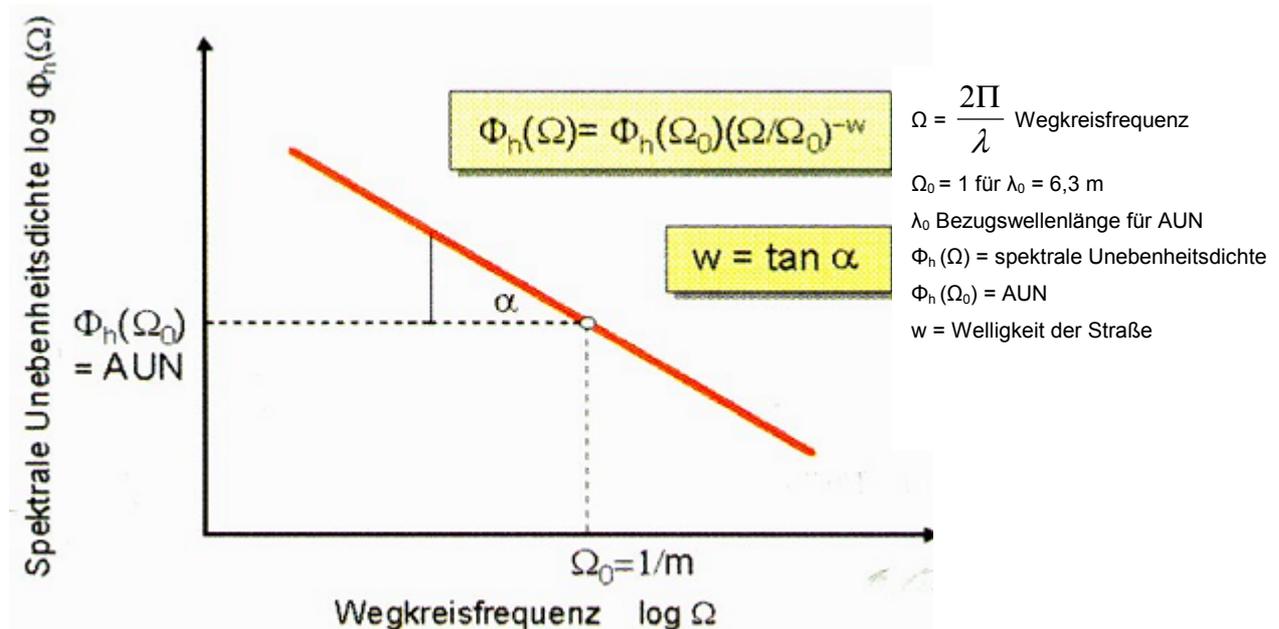


Abb. 3.8: Spektrale Leistungsdichte [061]

Die spektrale Leistungsdichte ist zwar ein fahrdynamisch aussagefähiger Kennwert, straßenbautechnisch jedoch abstrakt und nur rechnergestützt zu ermitteln. Ferner ist kritisch anzumerken, dass der Kennwert periodische Unebenheiten und Einzelhindernisse sowie Wirkungen der Unebenheiten auf die Straßennutzer, das Ladegut und die Straßenbeanspruchung (**s. 5.4**) nur unzureichend berücksichtigt.

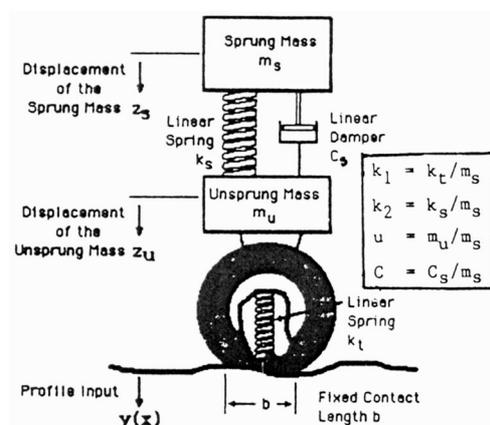
*Steinauer et. al.* [150] beschreibt und quantifiziert mit dem Längsebenheitswirkindex (LWI) die Wirkungen der Unebenheiten auf den Straßennutzer, das Ladegut und die Radlast und stellt damit eine gute Ergänzung zur Bewertung der Unebenheiten in Längsrichtung innerhalb der ZEB dar. Ungeachtet dieser Tatsache ist der AUN-Wert allerdings der bisher einzige, für die ZEB maßgebende Kennwert.

Aus diesem Grund bildet er folglich die Grundlage der Unebenheitsbetrachtungen in dieser Arbeit. Alle anderen Unebenheitskennwerte sind entweder als historisch bzw. für das deutsche Bewertungssystem als irrelevant zu bezeichnen. Sie sollen aber aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Ergebnissen berücksichtigt werden.

### 3.2.1.2 International Roughness Index (IRI)

Der International Roughness Index IRI ist eine mathematisch definierte, statistische Zusammenfassung des Längenprofils in der Radspur einer Straße. Der Index ist als durchschnittlicher, korrigierter Wert der Neigungen zu interpretieren, der sich aus den absoluten Höhendifferenzen gegenüber dem Bezugslevel über eine festgelegte Distanz (in aller Regel 1000 m) berechnet [119][120]. Er kann durch die mathematische Simulation des sogenannten „Quarter-car“ Modells bestimmt werden (s. **Abb. 3.9**). Der IRI ist definiert als der Effektivwert der Relativbewegung zwischen der gefederten Masse  $z_s$  und der ungefederten Masse  $z_u$  eines Standardfahrzeuges bezogen auf die festgelegte Distanz  $\Delta l$ .

$$IRI = \frac{1}{\Delta l} * \sqrt{\sum (z_s - z_u)^2} \quad \left[ \frac{m}{km} \right]$$



**Abb. 3.9:** „Quarter-Car“ Modell Simulation zur Bestimmung des International Roughness Index IRI [119]

Die Bandbreite des IRI verläuft von 0 m/km für eine absolut ebene Straße, über 4 m/km für eine Straße mit wenigen Unebenheiten bis hin zu 18 m/km für eine stark geschädigte, mit einzelnen Schlaglöchern versehene Straße. Auf internationaler Ebene sind viele Messkampagnen zur Bestimmung des IRI und seinem Einfluss auf die Fahrzeugnutzerkosten durchgeführt worden [042][043]. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage des Highway Development and Management Systems (HDM IV) [041].

Im Rahmen großangelegter, europaweiter Messkampagnen [063], ergaben Vergleiche unterschiedlicher Unebenheitsindikatoren einen empirischen Zusammenhang zwischen dem AUN-Wert und dem IRI. Allerdings liegen der Korrelation nur drei Wertepaare zugrunde. Sie ist dementsprechend unsicher (s. **Abb. 3.10**).

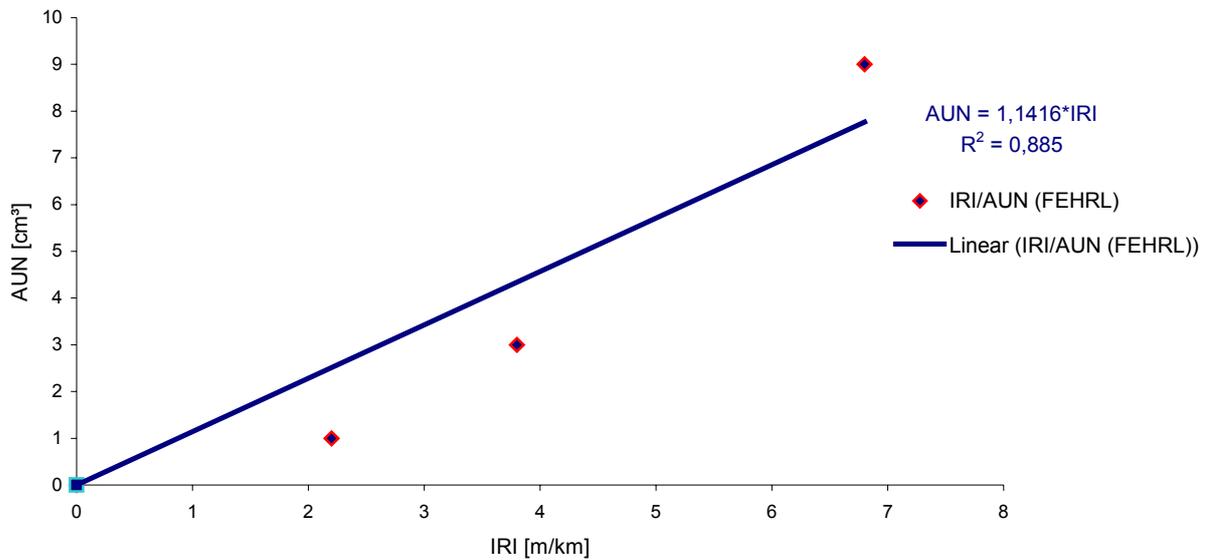


Abb. 3.10: Zusammenhang zwischen AUN [cm³] und IRI [m/km] [063]

**3.2.1.3 Present Serviceability Index (PSI = p)**

Der Befahrbarkeitswert PSI (Present Serviceability Index), in der Literatur oft vereinfachend p genannt, ist beim AASHO-Test Ende der '50er bis Mitte der '60er Jahre entwickelt worden. Er beschreibt das subjektive Empfinden von Versuchspersonen hinsichtlich der Befahrbarkeit von Fahrbahnen unterschiedlicher Qualität. Auch wenn die Zusammenhänge keine Aktualität mehr aufweisen, so stellen sie doch die Grundlage der ersten und bisher auch einzigen Berechnungen der Straßennutzerkosten in Deutschland dar [027][031].

PSI	Befahrbarkeit (subjektiv)
5 - 4	sehr gut
4 - 3	gut
3 - 2	mittel
2 - 1	schlecht
1 - 0	sehr schlecht

Tabelle 3.1: Subjektive Bewertung der Befahrbarkeit psi (AASHO) [020]

Diese Abschätzung der Fahrbahnqualität wurde im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen [064] in den Bewertungshintergrund der ZEB eingebunden. Näherungsweise lassen sich zwischen dem AUN-Wert und dem psi die folgenden Beziehungen ableiten:

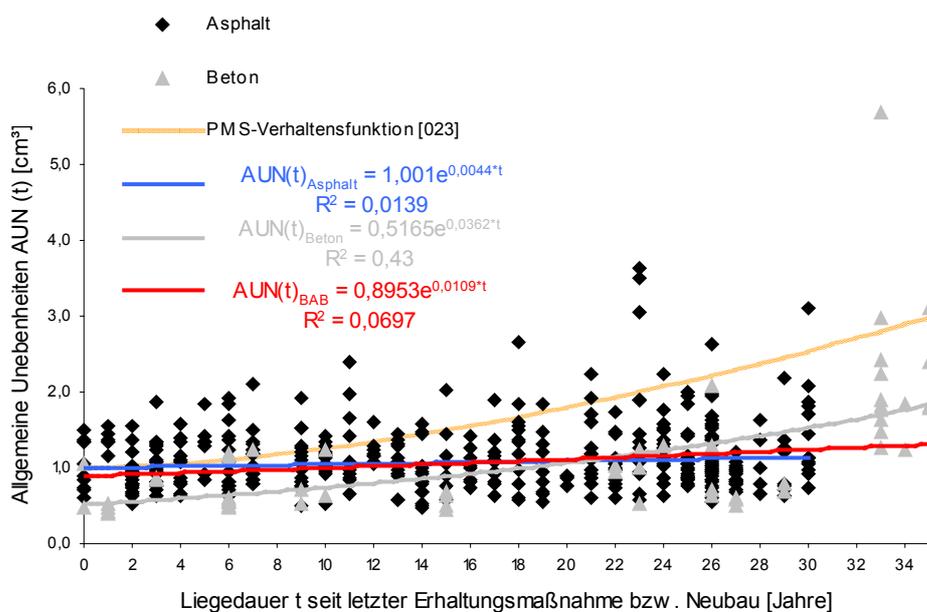
$$\frac{psi}{-0,99} + 4,7 = AUN \quad \text{für } AUN \leq 3 \text{ bzw. } psi \geq 1,685 \text{ (Zustandsgröße } \leq \text{ Warnwert)}$$

$$-6,06 psi + 13,21 = AUN \quad \text{für } AUN > 3 \text{ bzw. } psi < 1,685 \text{ (Zustandsgröße } > \text{ Warnwert)}$$

Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass es sich bei dem Befahrbarkeitswert  $\psi$  nicht um einen reinen Längsunebenheitsindex handelt. Vielmehr fließen weitere Größen, wie z.B. die Spurrinnentiefe mit ein, die den Fahrkomfort subjektiv verändern können. Die Beziehung zwischen  $\psi$  und dem AUN-Wert muss demnach als sehr grob bezeichnet werden. Allerdings dient die Betrachtung des Befahrbarkeitsindex  $\psi$  lediglich dazu, frühere Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ansatzweise mit den in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnissen vergleichen zu können. Weder der IRI noch der  $\psi$  werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit für die Herleitung aktueller Zusammenhänge in Wirtschaftlichkeitsfragen verwendet.

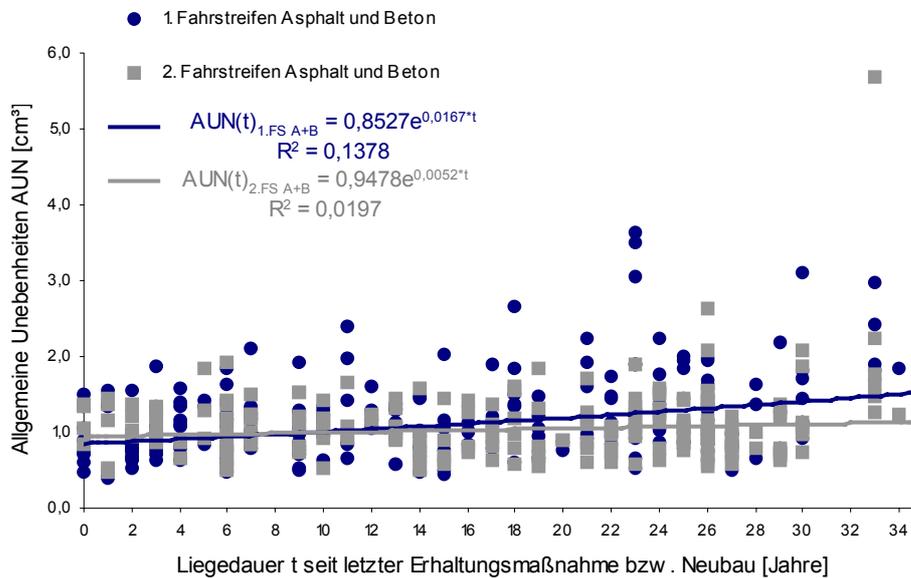
### 3.2.2 Verhaltensfunktion AUN(t)

Die Bildung der Verhaltensfunktion basiert auf gemessenen Zustandsgrößen, die im Rahmen der ZEB für Autobahnen aufgenommen wurden [121]. Sie werden zur Herleitung von Verhaltensfunktionen getrennt nach Asphalt- und Betondeckschichten herangezogen [065]. Die Datensätze sowie die Zusammenfassung der über 50.000 100 m- Abschnitte zu größeren homogenen Abschnitten sind **Anhang A2** zu entnehmen. Im Folgenden sind lediglich die Ergebnisse dieser Untersuchungen graphisch dargestellt. **Abb. 3.11** zeigt die Datenauswertungen getrennt für Asphalt- und Betonoberflächen. Dabei sind die Zustandsgrößen des 1. und 2. Fahrstreifens zusammengefasst. Der in rot dargestellte Funktionsverlauf zeigt die Korrelation zwischen allen Zustandsgrößen der homogenen Abschnitte und der Liegedauer, die als Zeitraum seit Durchführung der letzten Deckschichterneuerung definiert ist. Zum Vergleich ist die Verhaltensfunktion der niedrigsten Verhaltensklasse VK des in Deutschland aktuellen Pavement Management Systems (PMS) [023] in die Ergebnisdarstellung eingebunden (orange).



**Abb. 3.11: Verhaltensfunktionen AUN(t) nach Asphalt- und Betonbauweise getrennt, 1. und 2. FS gemeinsam [065]**

In einem zweiten Schritt sind die gemessenen Zustandsdaten des 1. und 2. Fahrstreifens unabhängig von der Bauweise zusammengefasst (s. **Abb. 3.12**).



**Abb. 3.12: Verhaltensfunktionen AUN (t) nach 1. und 2. Fahrstreifen getrennt, für Asphalt und Beton gemeinsam [065]**

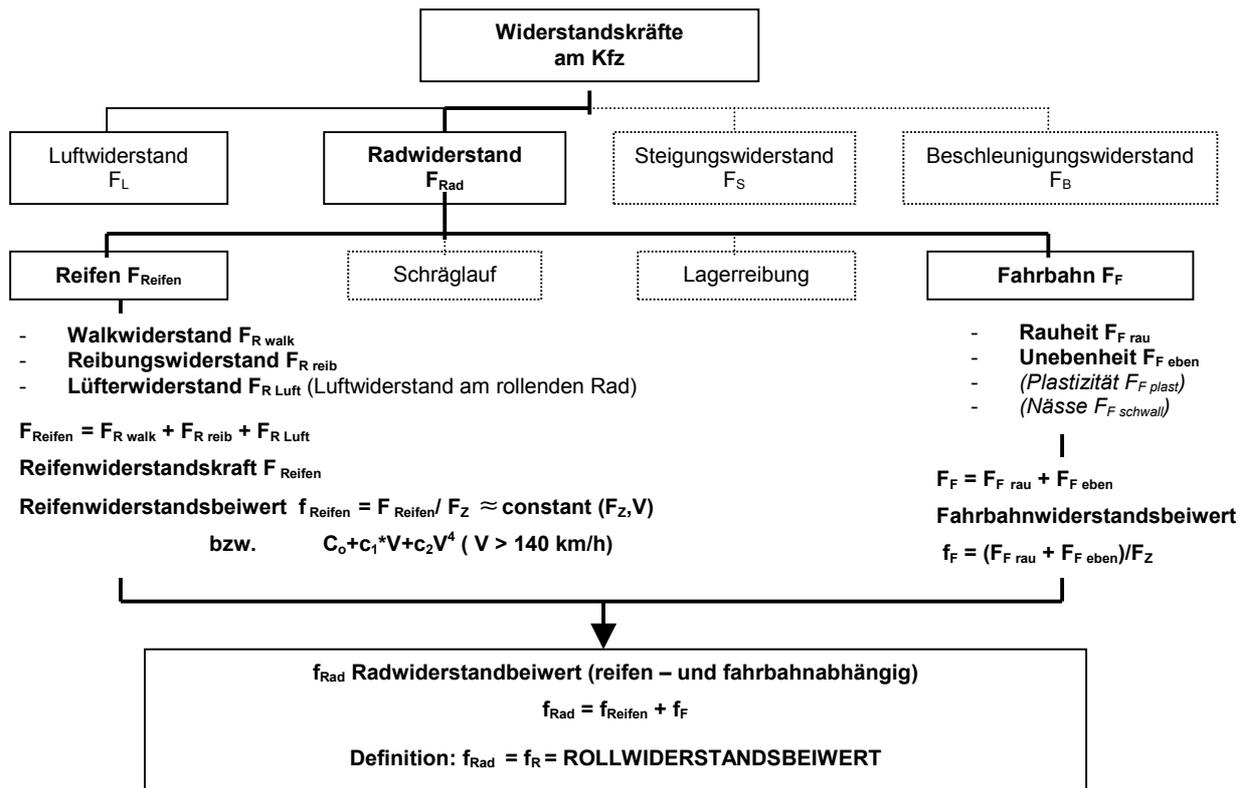
Die Ergebnisse zeigen eine sehr große Streuung der AUN-Werte in Abhängigkeit der Zeit. Generell lässt sich aber die eindeutige Tendenz einer über die Zeit geringen Zunahme der AUN-Werte ableiten. Selbst nach einer Liegedauer von mehr als 30 Jahren ist das Erreichen des nach der ZEB formulierten Schwellenwertes von 9 cm<sup>3</sup> nicht zu erkennen. Ferner konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Verkehrsbelastung und den AUN-Werten festgestellt werden [065]. Diese Untersuchungsergebnisse sprechen eindeutig für die Tragfähigkeit der Fahrbahnen und damit für eine ausreichende Dimensionierung nach der RStO. Zusätzlich wird den Schäden, die zu Tragfähigkeitsverlusten führen können, durch die gute, routinemäßige Unterhaltung vorgebeugt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die gemittelte Verhaltensfunktion für beide Bauweisen, in **Abb. 3.11** in rot dargestellt, verwendet.

$$\text{AUN}(t)_{\text{BAB}} = 0,8953 * e^{0,0109 * t} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

### 3.2.3 Rollwiderstandsbeiwert $f_R$

In der Literatur wird die Begriffsdefinition des Widerstandes am rollenden Reifen teilweise unterschiedlich vorgenommen (z.B. „Grundwiderstandsbeiwert  $f_G$ “, „Radwiderstandsbeiwert“). Sie sollen hier aber äquivalent zu dem Begriff Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  gesehen werden.

In **Abb. 3.13** sind sämtliche an einem Fahrzeug auftretenden Widerstandskräfte dargestellt. Die Relevanz der einzelnen Größen in Bezug auf den Rollwiderstandsbeiwert wird im Folgenden kurz erörtert.



- so gekennzeichnete Widerstandsgrößen werden für die Herleitung AUN –  $f_R$  nicht berücksichtigt

Abb. 3.13: Widerstandskräfte am (rollenden) Kfz

Die Widerstandskräfte am Fahrzeug setzen sich aus den Komponenten

- Luftwiderstand  $F_L$
- Radwiderstand  $F_{Rad}$
- Steigungswiderstand  $F_S$  und
- Beschleunigungswiderstand  $F_B$

zusammen.

Der Steigungswiderstand  $F_S$  und der Beschleunigungswiderstand  $F_B$  sind Widerstandsgrößen, die keinen Einfluss auf den Rollwiderstandsbeiwert nehmen. Sie ergeben sich aus der Überwindung von Steigungen bzw. Trägheit bei einem Beschleunigungsvorgang des Fahrzeuges.

Der Luftwiderstand  $F_L$  findet bei der Herleitung des Zusammenhanges zwischen den AUN-Werten und dem Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  Berücksichtigung und wird in 3.2.4.2 erläutert.

Zur Beschreibung des Rollwiderstandsbeiwertes bleibt folglich der Radwiderstand  $F_{Rad}$  übrig.

Der Radwiderstand  $F_{Rad}$  eines Fahrzeuges ergibt sich aus den Widerstandskomponenten

- Reifendeformation
- fahrbahnbedingte Widerstände
- Schräglauf
- Lagerreibung.

Betrachtet man die Komponenten etwas genauer, lassen sich der Schräglauf des Rades sowie die Lagerreibung als fahrzeugspezifische Kenngrößen definieren. Sie beeinflussen die Widerstandskräfte am Rad, nehmen jedoch keinen Einfluss auf den Rollwiderstandsbeiwert.

Der Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  setzt sich folglich aus den Komponenten der reifen- und fahrbahnbedingten Widerstände zusammen.

### 3.2.3.1 Reifenbedingte Widerstandskomponenten

Die Reifenwiderstände ergeben sich aus der Verformung (Walkung) eines luftbereiften Rades (Feder-Dämpfer-Modell)  $F_{R\ walk}$  und den Relativbewegungen zwischen Fahrbahn und Laufstreifen, dem sogenannten Teilgleiten sowohl in Längs- als auch in Querrichtung in der Reifenaufstandsfläche (Latsch)  $F_{R\ reib}$ . Durch die Abrollbewegung entsteht an der Reifenoberfläche zusätzlich ein Lüfterwiderstand  $F_{R\ Luft}$ . Zusammen ergeben diese Größen den Reifenwiderstand  $F_{Reifen}$ :

$$F_{Reifen} = F_{R\ walk} + F_{R\ reib} + F_{R\ Luft}$$

Der Reifenwiderstand steigt nahezu linear mit der Achslast  $F_Z$  an. Der Quotient beider Größen ist der im Rahmen üblicher fahrzeugtechnischer Berechnungen als konstant über die Achslast und Geschwindigkeit angenommene dimensionslose Reifenwiderstandsbeiwert  $f_{Reifen} = F_{Reifen} / F_Z$  [040][066]. Durch einen steigenden Reifeninnendruck nimmt der Widerstandsbeiwert als Folge verminderter Verformung des Reifens und Verkleinerung der Reibwiderstände durch eine geringere Latschfläche ab. Das erklärt auch die geringeren Rollwiderstandsbeiwerte der Nutzkraftwagenreifen gegenüber den Pkw- Reifen.

Aus Versuchsstandmessungen der Reifenindustrie sind Widerstandsbeiwerte von 0,010 für Pkw-Reifen und bis zu 0,008 für Lkw-Reifen ermittelt worden [040][066].

### 3.2.3.2 Fahrbahnbedingte Widerstandskomponenten

Der fahrbahnbedingte Radwiderstand  $F_F$  wird durch die folgenden Komponenten hervorgerufen:

- Rauheit (Mikro- Makrotextur)  $F_{F\ rau}$
- Unebenheit  $F_{F\ eben}$
- (Plastizität  $F_{F\ plast}$ )
- (Nässe  $F_{F\ schwall}$ ).

Die Widerstandskomponenten, die durch die Plastizität von Fahrbahnen sowie durch Nässe entstehen, stellen Sonderfälle dar und sollen nicht weiter berücksichtigt werden.

#### *Rauheit und Unebenheit.*

Fahrbahnunebenheiten werden von dem System Reifen/ Fahrzeugaufbau aufgefangen, gedämpft und gefedert. Bei der Dämpfung wird kinetische Energie in Wärme umgewandelt. Die aufgebrachte Bewegungsarbeit wird um die Dämpfungsarbeit reduziert [066]. Ähnlich verhält es sich mit der Rauheit. Im Mikro- und Makrobereich stellen die einzelnen Mineralstoffkörner „kleine Hindernisse“ dar. Bei der Überrollung werden am Reifen Feder- und Dämpferarbeit aktiviert. Der Verlust an Bewegungsarbeit fällt im Vergleich zu den Unebenheiten jedoch deutlich geringer aus.

Beide Komponenten ergeben zusammen die fahrbahnbedingte Widerstandskraft  $F_F$ .

$$F_F = F_{F \text{ uneben}} + F_{F \text{ rau}}$$

Die Summe der reifen- und fahrbahnbedingten Widerstandskomponenten ergibt somit den Rollwiderstand  $F_{\text{Roll}} = F_{\text{Reifen}} + F_F$

Der Quotient aus Rollwiderstandskraft und Achslast  $F_Z$  ist der dimensionslose

$$\text{Rollwiderstandsbeiwert } f_R = F_{\text{Roll}} / F_Z = (F_{\text{Reifen}} + F_F) / F_Z .$$

### 3.2.4 Zusammenhang zwischen der Unebenheit AUN und dem Rollwiderstandsbeiwert $f_R$

#### 3.2.4.1 Kenntnisstand

Der Zusammenhang zwischen dem AUN- und Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  ist für die gemeinsame Betrachtung von Straßenbau und Kraftfahrzeugtechnik von fundamentaler Bedeutung, da er das „Schließen der Nahtstelle zwischen den beiden Fachgebieten“ darstellt. Die Straßenqualität findet in Simulationsrechnungen des rollenden Fahrzeuges nur über den Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  Berücksichtigung.

Der aktuelle Kenntnisstand von Rollwiderstandsbeiwerten auf realen, befestigten Straßen ist jedoch unzureichend. Vielmehr handelt es sich bei den bisherigen Betrachtungen um sehr grobe Eingrenzungen oder aus der Literatur abgeleiteten Schätzwerten. Einen Überblick dazu gibt **Abb. 3.14**.

#### 3.14.

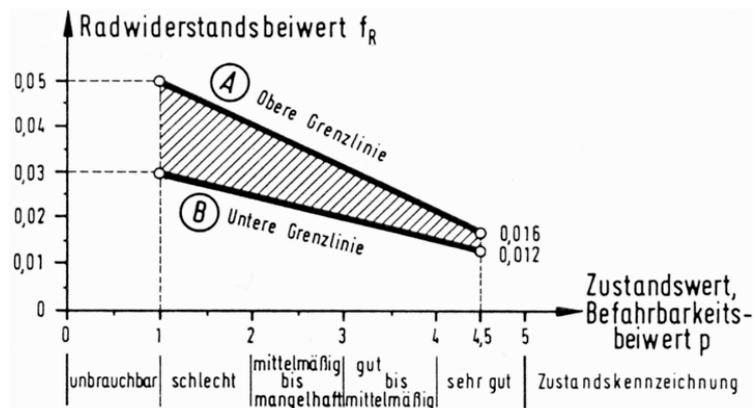
Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche	RWS	Helling	Mitschke/Jante	Buschmann/Koessler
ebene Beton- oder bituminöse Oberflächen	0,012	0,01-/.0,02 (auch ebenes Pflaster)	0,01-/.0,014	0,01-/.0,014
noch ebene Beton- oder bituminöse Oberflächen	0,018			
leicht unebene bituminöse Oberflächen oder Betonfahrbahnen geringe Setzungen	0,025			
unebene gewölbte bituminöse Oberflächen bzw. Setzungen und häufigere Stufenbildung bei Zementbeton	0,035	0,02-/.0,03	gutes Steinpflaster 0,02	Pflaster eben 0,015-/.0,02
stark verformte bituminöse Oberflächen ausgeprägte Spurrinnen Schlaglöcher starke Stufen bei Zementbeton	0,050		0,035	Pflaster uneben 0,033
Schotter gewalzt		0,02-/.0,03		0,02

**Abb. 3.14: Rollwiderstandsbeiwerte in Abhängigkeit des Zustandes der Fahrbahnoberfläche [067]**

Die angegebenen Werte basieren auf den Bestimmungen der Rollwiderstandsbeiwerte in Prüfständen und theoretischen Überlegungen zur Fahrbahnverschlechterung. Zudem besteht ein Problem in der

ungenauen Beschreibung des Zustandes der Fahrbahnoberfläche. Eine genaue Zuordnung zu der heute gebräuchlichen Zustandsgröße AUN ist praktisch nicht möglich.

Ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Rollwiderstandsbeiwert (hier Radwiderstand genannt) und dem durch den Befahrbarkeitsbeiwert  $\psi$  beschriebenen Zustand der Fahrbahnoberfläche ist trotz der beschriebenen Schwierigkeiten erstmalig von *Schmuck* [069] hergestellt worden.



**Abb. 3.15: Befahrbarkeitswert und Rollwiderstandsbeiwert (Pkw) – Annahme eines Beziehungsbereiches für wirtschaftliche und energiewirtschaftliche Vergleichsrechnungen – nach Schmuck [069]**

Aus theoretischen Überlegungen folgt *Schmuck* [069]: „Mit einiger Sicherheit kann davon ausgegangen werden, dass die den Befahrbarkeitsbeiwerten  $p$  [ $\psi$ ] zuzuordnenden Radwiderstandsbeiwerte  $f_R$  innerhalb des in [Abb. 3.15] schraffierten Bereiches liegen. Die Verwendung der unteren Grenzklinie B in wirtschaftlichen und energiewirtschaftlichen Vergleichsrechnungen bedeutet eine Rechenoperation mit im Ergebnis annähernd niedrigsten Aufwandswerten [...]“. Aus diesem Grund hat sich *Schmuck* auf die in **Abb. 3.16** als „recht grobe Näherung“ bezeichnete Beziehung zwischen dem  $\psi$ -Wert und  $f_R$  festgelegt. Sie bildet die Grundlage für seine sehr umfangreichen Betrachtungen der Staßennutzerkosten und deren Entwicklung mit zunehmender Fahrbahnverschlechterung.

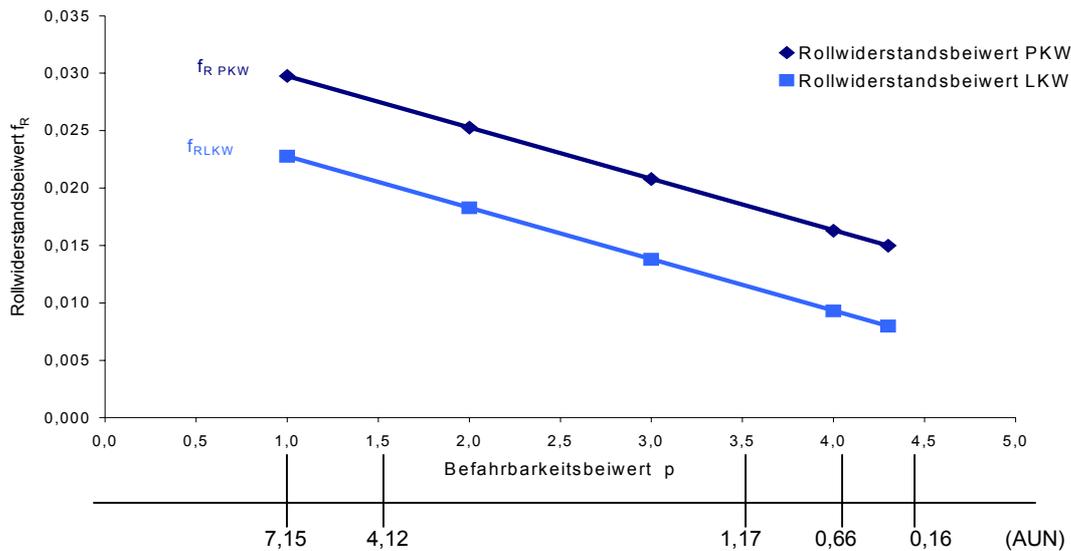


Abb. 3.16: Zusammenhang zwischen dem Befahrbarkeitsbeiwert  $\psi$  und dem Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  [027]

In der unteren Skala ist der Zusammenhang zwischen den AUN-Werten und  $\psi$  nach den beschriebenen Beziehungen aus 3.2.1 dargestellt. Es sei hier noch einmal betont, dass diese Beziehung mehr auf Annahmen als auf Vergleichsmessungen beruht und deshalb nur eingeschränkt aussagekräftig ist.

### 3.2.4.2 Herleitung des Zusammenhanges zwischen dem AUN -Wert und $f_R$

Es bestehen gute Kenntnisse über die Widerstandskomponenten des Reifens durch die Entwicklungsforschung der Reifenindustrie, im Zusammenspiel mit den realen Straßenzustandsbedingungen herrscht jedoch ein Wissensdefizit.

Als Folge der mangelnden Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen der Unebenheit einer Fahrbahn und dem Rollwiderstandsbeiwert eines Fahrzeuges sind im Rahmen dieser Arbeit dazu Ausrollversuche durchgeführt und ausgewertet worden. Sie sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

Ausrolllängen von bewegten Fahrzeugen hängen fahrbahnseitig von der Rauheit und Unebenheit und damit vom Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  ab. Durch Ausrollversuche auf Fahrbahnen mit unterschiedlicher Unebenheit lassen sich demnach Zusammenhänge zwischen den Ausrolllängen und dem AUN-Wert sowie dem Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  ableiten. Grundlage der Ableitung ist der Energieerhaltungssatz der Mechanik:

Die Summe aus Lage-, Bewegungs- und Spannungsenergie ist bei reibungsfrei verlaufenden mechanischen Vorgängen in einem energetisch abgeschlossenen System konstant [070].

Für das rollende Fahrzeug ergibt sich daraus die Zugkraftgleichung:

$$F_Z = F_R + F_L + F_{ST} + F_B \quad (\text{Gl. 3.5})$$

mit  $F_R$  = Radwiderstandskraft [N]  
 $F_L$  = Luftwiderstandskraft [N]

$F_{ST}$  = Steigungswiderstand [N]

 $F_B$  = Beschleunigungswiderstand [N]

bzw. als Energieerhaltungssatz:

$$F_Z \cdot l = W_B = \frac{1}{2} m v^2 = W_{kin} = (F_R + F_L + F_{ST} + F_B) \cdot l \quad \text{mit}$$

 $l$  = Strecken- bzw. Ausrolllänge [m]

 $m$  = Fahrzeugmasse [kg]

 $v$  = Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]

 $W_B$  = Beschleunigungsarbeit [Nm]

 $W_{kin}$  = kinetische Energie [Nm]

#### Beschreibung der Ausrollversuche:

Die Ausrollversuche sind auf verschiedenen Strecken mit unterschiedlichen Fahrzeugen durchgeführt worden. Eine Übersicht der Versuchsstrecken und der verwendeten Fahrzeuge sowie der gemittelten AUN- Werte ist in den **Tabellen 3.2** und **3.3** gegeben. Die Einzelmessergebnisse, Rand- und Versuchsbedingungen sowie die Darstellung der Versuchsfahrzeuge sind **Anhang A3** zu entnehmen.

Strecke	Bezeichnung der Strecke	mittlere AUN [cm <sup>3</sup> ]
1	Messstrecke 1	17,91
2	Messstrecke 2	0,55
3	Messstrecke 3	0,58
4	Messstrecke 4	7,05
5	Messstrecke 5	0,92
6	Messstrecke 6	15,96
7	Messstrecke 7	0,58
8	Messstrecke 8	1,12

**Tabelle 3.2: Übersicht der Versuchsstrecken zur Bestimmung der Ausrolllängen**

Fahrzeug	Masse m [kg]	Querspanfläche A [m <sup>2</sup> ]	Luftwiderstandsbeiwert C <sub>w</sub> [-]
Chevy	2940	3,80	0,40
LKW <sub>SRM</sub>	8500	5,98	0,68
Golf <sub>JM</sub>	1310	2,05	0,31
Seat <sub>FEM</sub>	1333	2,03	0,32
Golf <sub>FEM</sub>	1355	2,05	0,31

**Tabelle 3.3: Übersicht der Versuchsfahrzeuge mit den ausrollrelevanten technischen Daten**

Der ursprüngliche Versuchsumfang von 8 Strecken \* 14 Messungen (7 Hin- + 7 Rückmessungen) \* 5 Versuchsfahrzeugen = 560 Messungen konnte aufgrund von teils widrigen Randbedingungen (Streckensperrungen, Witterung etc.) nicht komplett durchgeführt werden. Am Ende der Versuchskampagne standen ca. 350 Messungen für die Auswertung zur Verfügung (**s. Anhang A3**).

**Versuchsdurchführung:**

Das mit geeichter Weg- und Geschwindigkeitsmessanlage (Peiselerrad) ausgestatte Versuchsfahrzeug wurde auf 40 km/h beschleunigt und ab einer zuvor festgelegten Startmarkierung durch das Schalten in den Leerlauf in den freien Ausrollvorgang überführt. Das Schalten in den Leerlauf stellte dabei den Startpunkt der Messung dar. Nach Ausrollbeginn wurden im Abstand von zehn Sekunden die Geschwindigkeitsdaten aufgenommen (Zeit-Geschwindigkeits-Stützstellen) und nach Fahrzeugstillstand die Gesamtausrolllänge  $l$  bestimmt. Die Dokumentation der Daten erfolgte durch Ablesung von der Geräteanzeige und der Eintragung in vorgefertigte Tabellen. Zusätzlich wurde die Makrorauheit mittels „Sandfleck-Methode“ bestimmt sowie die lokalen Temperaturen und Luftdruckdaten zur Berechnung des Luftwiderstandes  $F_L$  vom meteorologischen Institut der Freien Universität Berlin abgerufen [073].

Zu den Versuchsbedingungen muss ergänzend angemerkt werden, dass sämtliche Versuchsstrecken nach den Kriterien einer geraden und ausreichenden Ausrolllänge ausgesucht wurden. Ferner wurde zur Vermeidung des Schwallwiderstandes (Widerstand beim Verdrängen von Wasser) nur auf trockenen Strecken gemessen. Minimale Einflüsse aus dem Längsgefälle  $s$  wurden durch die Mittlung der Hin- und Rückmessung ausgeglichen.

Für die Berechnungen folgt daraus:

$F_{ST} \approx 0$ , ebene Strecken bzw. Mittlung der Hin- und Rückmessung (kann nur bei kleinem  $s$  angenommen werden)

$F_B = 0$ , keine Beschleunigung

Die Arbeitsgleichung (**Gl.3.5**) reduziert sich demnach auf die Anteile des Roll- und Luftwiderstandes:

$F_Z = F_R + F_L$  bzw. bei Betrachtung der Energie

$$W_B = W_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 = (F_R + F_L) \cdot l \quad [Nm] = [kg \cdot \frac{m^2}{s^2}] \quad (\text{Gl. 3.6})$$

Die beiden Kräfte  $F_R$  und  $F_L$  werden näher betrachtet:

**Rollwiderstandskraft  $F_R$** 

Die Rollwiderstandskraft  $F_R$  berechnet sich aus der Masse  $m$  des Versuchsfahrzeuges, der Erdbeschleunigung  $g$  und dem Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$ .

$$F_R = f_R \cdot G = f_R \cdot m \cdot g \quad [N]$$

mit:

$$g = \text{Erdbeschleunigung} = 9,81 \quad [\frac{m}{s^2}]$$

$$m = \text{Masse des Fahrzeuges} \quad [kg]$$

$$f_R = \text{Rollwiderstandsbeiwert} \quad [-]$$

**Luftwiderstandskraft  $F_L$** 

Der Luftwiderstandskraft  $F_L$  eines Fahrzeuges verändert sich quadratisch mit der gefahrenen Geschwindigkeit  $v$ :

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho_L \cdot v^2 \quad [N] = \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

mit:

 $c_w$  = Luftwiderstandsbeiwert []A = Querspanfläche [m<sup>2</sup>] $\rho_L$  = Dichte der Luft [kg/m<sup>3</sup>]

v = Ausrollgeschwindigkeit [m/s]

Der Luftwiderstandsbeiwert  $c_x$  ist stark von dem Anströmwinkel der Luft  $\tau_L$  abhängig  $c_x = c_x(\tau_L)$  [040]. Für die Versuchsauswertungen wurde näherungsweise mit dem bekannten Luftwiderstandsbeiwert  $c_w = c_x(\tau_L=0)$  gerechnet.

Die Luftdichte  $\rho_L$  verändert sich mit dem Barometerstand b in bar und der Temperatur T in °C nach der Gleichung:

$$\frac{\rho_L}{\text{kg} / \text{m}^3} = \frac{348,7 \cdot \frac{b}{\text{bar}}}{273,2 + \frac{T}{^\circ\text{C}}} \quad [040]$$

mit:

b = Luftdruck [bar]

T = Temperatur [°C]

Aufgrund der veränderlichen Wetterdaten ergab sich praktisch für jeden neuen Versuch in der Auswertung eine andere Luftdichte  $\rho_L$ . Für die Auswertung der Ausrollversuche ist daher für jeden Versuchstag eine mittlere Luftdichte  $\rho_L$  aus den aufgenommenen Wetterdaten [073] berechnet worden. Die Tageswerte sind zusammengefasst **Tabelle 3.4** zu entnehmen.

Fahrzeug	Anteil Messungen	Datum	Temperatur	Luftdruck		Dichte Luft $\rho_L$
			[°C]	[hPa]	[bar]	[kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Chevy Beauville</b>						
3	$\frac{3}{9}$	12.12.02	- 5 °C	1.029 hPa	1,029	1,338
1	$\frac{1}{9}$	13.12.02	- 6 °C	1.030 hPa	1,030	1,344
4	$\frac{4}{9}$	14.12.02	- 4 °C	1.029 hPa	1,029	1,333
1	$\frac{1}{9}$	15.12.02	- 4 °C	1.025 hPa	1,025	1,328
<b>Lkw SRM 40km/h</b>						
2	$\frac{2}{5}$	14.03.03	4 °C	1.037 hPa	1,037	1,304
3	$\frac{3}{5}$	18.03.03	9 °C	1.032 hPa	1,032	1,275
<b>Lkw SRM 30km/h</b>						
1	$\frac{1}{2}$	19.03.03	4 °C	1.026 hPa	1,026	1,290
1	$\frac{1}{2}$	06.04.03	3 °C	1.019 hPa	1,019	1,286
<b>Golf III<sub>JM</sub></b>						
3	$\frac{3}{6}$	29.03.03	16 °C	1.015 hPa	1,015	1,223
1	$\frac{1}{6}$	24.04.03	9 °C	1017 hPa	1,017	1,257
2	$\frac{2}{6}$	24.04.03	16 °C	1019 hPa	1,019	1,229
<b>Seat</b>						
3	$\frac{3}{7}$	12.04.03	11 °C	1.018 hPa	1,018	1,249
3	$\frac{3}{7}$	21.04.03	10 °C	1.018 hPa	1,018	1,253
1	$\frac{1}{7}$	26.04.03	11 °C	1.013 hPa	1,013	1,243
<b>Golf III<sub>FEM</sub></b>						
4	$\frac{4}{5}$	13.04.03	12 °C	1.026 hPa	1,026	1,254
1	$\frac{1}{5}$	25.04.03	18 °C	1017 hPa	1,017	1,218

Tabelle 3.4: Mittlere Luftdichte  $\rho_L$  über die Anzahl der Messungen und Versuchstage

Die für die Berechnung des Luftwiderstandes benötigte Geschwindigkeit  $v$  stellt sich über die Ausrollzeit als veränderliche Größe dar.

Es gilt:

$$v = v(t) \text{ mit}$$

$$v = v(t=0) = 40 \text{ km/h}$$

$$v = v(t=t_e) = 0 \text{ km/h}$$

Mit Hilfe der alle zehn Sekunden aufgenommenen Zeit-Geschwindigkeits-Stützstellen aus den Versuchen konnte mittels polynomer Regression der Geschwindigkeitsverlauf  $v(t)$  für jedes Fahrzeug ermittelt werden (**s. Anhang A3**). Um die weiteren Berechnungsschritte übersichtlicher zu gestalten, wird eine mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  als Ersatz der polynomen Regression hergeleitet:

**a:** Gleichung unter Verwendung der mittleren Geschwindigkeit  $v_m$ :

$$W_{v_m} = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot v_m^2 \cdot l + f_R \cdot m \cdot g \cdot l$$

**b:** Gleichung unter Verwendung der Geschwindigkeitsfunktion  $v(t)$ :

$$W_{v(t)} = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot \int_0^{l_e} v^2(t) \, ds + \int_0^{l_e} f_R \cdot m \cdot g \cdot ds$$

mit:

$$\frac{ds}{dt} = v(t) \text{ bzw. } ds = v(t) \cdot dt$$

$$\int_0^{l_e} ds = l$$

$$W_{v(t)} = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot \int_0^{t_e} v^2(t) \cdot v(t) \cdot dt + f_R \cdot m \cdot g \cdot l$$

$$W_{v(t)} = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot \int_0^{t_e} v^3(t) \, dt + f_R \cdot m \cdot g \cdot l$$

$W_{v_m} = W_{v(t)}$  (beide Betrachtungen müssen dieselbe Energie ergeben !)

$$\mathbf{W}_{v_m} = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot v_m^2 \cdot l + f_R \cdot m \cdot g \cdot l = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot \int_0^{t_e} v^3(t) \, dt + f_R \cdot m \cdot g \cdot l = \mathbf{W}_{v(t)}$$

$$v_m^2 \cdot l = \int_0^{t_e} v^3(t) \, dt$$

$$v_m = \left[ \frac{1}{l} \int_0^{t_e} v^3(t) \, dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

Mit der hergeleiteten Gleichung kann die für jeden Ausrollvorgang ermittelte Geschwindigkeitsfunktion  $v(t)$  durch eine mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  ersetzt werden. Der weitere Rechenweg wird dadurch erheblich vereinfacht.

Die Auswertung der Integration der polynomen Regression sämtlicher Fahrzeuge und Strecken ist in **Tabelle 3.5** dargestellt.

Fahrzeug	Strecke	Ausrollzeit $t_e$	$\int v(t) dt = l_e$	$\int v^3(t) dt$	$v_0$	$v_m$	% von $v_0$
		[s]	[m]	[m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
<b>Chevy</b>	1	102,8	365,5	20263,9	11,1	7,4	66,8
	2	89,8	437,7	24601,1	11,1	7,5	67,7
	3	95,2	451,9	25404,2	11,2	7,5	67,2
	4	104,4	425,2	22255,8	11,0	7,2	65,8
	5	108,2	414,8	22016,4	11,2	7,3	65,1
	6	100,2	389,3	19788,9	11,0	7,1	64,9
<b>Seat</b>	2	77,9	400,1	23308,3	11,1	7,6	68,8
	3	82,1	416,3	23920,4	11,0	7,6	68,6
	4	73,7	359,6	20049,4	11,0	7,5	67,8
	5	95,3	418,5	23025,5	11,2	7,4	66,1
	6*	-	368,5	-	11,1	-	-
	7	108,2	422,2	21147,8	10,9	7,1	64,7
	8	81,9	421,5	22594,8	11,3	7,3	65,0
	<b>Golf_JM</b>	5	102,0	436,1	23801,5	11,2	7,4
7		107,0	425,7	21617,4	11,0	7,1	64,6
6*		-	387,0	-	11,1	-	-
2		84,4	426,1	24494,7	11,1	7,6	68,4
3		87,9	430,9	24302,1	11,1	7,5	67,8
4		108,8	389,9	19200,3	10,7	7,0	65,5
<b>Golf_FEM</b>	2	85,2	435,9	25264,4	11,1	7,6	68,7
	3	91,3	448,3	25420,7	11,1	7,5	67,9
	4	92,4	423,4	22860,3	11,0	7,3	66,9
	5	119,4	448,7	24226,6	11,2	7,3	65,4
	6	92,1	381,6	20890	11,3	7,4	65,7
	<b>LKW</b>	1	89,9	449,3	25827,2	11,1	7,6
2		109,5	575,9	34305	11,2	7,7	69,2
3		115,0	556,5	31749,3	11,2	7,6	67,5
4		139,4	514,5	26746,6	11,0	7,2	65,4
5		140,4	574,1	30074,5	11,2	7,2	64,5
6		101,9	311,1	9389,54	8,5	5,5	64,6
7		115,5	338,3	9589,78	8,2	5,3	64,7

Mit:  $v_0$  = Geschwindigkeit zu Beginn des Ausrollversuches  
 \* = keine Zeit- Geschwindigkeitsstützstellen vorhanden

**Tabelle 3.5: Auswertung der Geschwindigkeits-Zeit-Funktionen für alle Versuchsfahrzeuge**

Die Auswertungen zeigen, dass die mittlere Geschwindigkeit mit  $v_m = \frac{2}{3} v_0$  als eine sehr gute Näherung zur Bestimmung des durchschnittlichen Staudruckes während der Ausrollphase angenommen werden kann. Mit der hergeleiteten Beziehung folgt für den Energieerhaltungssatz:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 = (f_R \cdot m \cdot g + \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot (\frac{2}{3} v_0)^2) \cdot l \quad [\text{Nm}] \quad (\text{Gl. 3.7})$$

mit:  $\rho_L$  = siehe **Tabelle 3.4**

Somit lässt sich für jedes Fahrzeug ein direkter Zusammenhang zwischen Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  und Ausrolllänge  $l_e$  ableiten:

$$\frac{1}{2 \cdot l} \cdot m \cdot v_0^2 = (f_R \cdot m \cdot g + \frac{2}{9} \cdot c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot v_0^2)$$

$$f_R = \frac{\left( \frac{m \cdot v_0^2}{2 \cdot l} - c_W \cdot A \cdot \frac{2}{9} \cdot \rho_L \cdot v_0^2 \right)}{m \cdot g} \quad \text{bzw.} \quad f_R = \frac{\left( \frac{W_{kin}}{l} - F_L \right)}{m \cdot g} \quad (\text{Gl. 3.8})$$

Die Ergebnisse der Ausrollversuche (Mittelwerte aus allen Hin- und Rückmessungen) sowie die berechneten Rollwiderstandsbeiwerte  $f_R$  sind **Tabelle 3.6** zu entnehmen.

Messstrecke	Fhzmasse m [kg]	Erdbeschl. g [m/s <sup>2</sup> ]	$C_W$ - Wert [-]	Q.fläche A [m <sup>2</sup> ]	Datum [-]	Luftdichte $\rho_L$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$V_0$ [m/s]	$l_{\text{mittel}}$ [m]	Rollwiderstandsbeiwert $f_R$ [-]	$AUN_{\text{mittel}}$ [cm <sup>2</sup> ]
<b>CHEVY</b>										
1	2940	9,81	0,40	3,80	14.12.02	1,333	11,11	357	0,01570	17,91
2	2940	9,81	0,40	3,80	14.12.02	1,333	11,11	436	0,01250	0,55
3	2940	9,81	0,40	3,80	14.12.02	1,333	11,11	449	0,01208	0,58
4	2940	9,81	0,40	3,80	13.12.02	1,344	11,11	417	0,01314	7,05
5	2940	9,81	0,40	3,80	15.12.02	1,328	11,11	423	0,01295	0,92
6	2940	9,81	0,40	3,80	12.12.02	1,338	11,11	386	0,01436	15,96
<b>LKW<sub>SRM</sub></b>										
1	8500	9,81	0,68	5,98	18.03.03	1,275	11,11	402	0,01394	17,91
2	8500	9,81	0,68	5,98	18.03.03	1,275	11,11	542	0,00990	0,55
3	8500	9,81	0,68	5,98	18.03.03	1,275	11,11	522	0,01035	0,58
4	8500	9,81	0,68	5,98	14.03.03	1,304	11,11	486	0,01120	7,05
5	8500	9,81	0,68	5,98	14.03.03	1,304	11,11	518	0,01040	0,92
<b>PKW<sub>GOLFJM</sub></b>										
2	1310	9,81	0,31	2,05	29.03.03	1,223	11,11	423	0,01321	0,55
3	1310	9,81	0,31	2,05	29.03.03	1,223	11,11	429	0,01301	0,58
4	1310	9,81	0,31	2,05	29.03.03	1,223	11,11	405	0,01387	7,05
5	1310	9,81	0,31	2,05	24.04.03	1,229	11,11	425	0,01314	0,92
6	1310	9,81	0,31	2,05	24.04.03	1,257	11,11	387	0,01455	15,96
7	1310	9,81	0,31	2,05	24.04.03	1,229	11,11	430	0,01296	0,58
<b>PKW<sub>Seat</sub></b>										
2	1333	9,81	0,32	2,03	21.04.03	1,253	11,11	400	0,01402	0,55
3	1333	9,81	0,32	2,03	21.04.03	1,253	11,11	415	0,01345	0,58
4	1333	9,81	0,32	2,03	21.04.03	1,253	11,11	360	0,01577	7,05
5	1333	9,81	0,32	2,03	12.04.03	1,249	11,11	414	0,01349	0,92
6	1333	9,81	0,32	2,03	26.04.03	1,243	11,11	369	0,01536	15,96
7	1333	9,81	0,32	2,03	12.04.03	1,249	11,11	419	0,01331	0,58
8	1333	9,81	0,32	2,03	12.04.03	1,249	11,11	427	0,01303	1,12
<b>PKW<sub>GOLFEM</sub></b>										
2	1355	9,81	0,31	2,05	13.04.03	1,254	11,11	435	0,01282	0,55
3	1355	9,81	0,31	2,05	13.04.03	1,254	11,11	447	0,01243	0,58
4	1355	9,81	0,31	2,05	25.04.03	1,218	11,11	423	0,01328	7,05
5	1355	9,81	0,31	2,05	13.04.03	1,254	11,11	450	0,01234	0,92
6	1355	9,81	0,31	2,05	13.04.03	1,254	11,11	388	0,01457	15,96

**Tabelle 3.6: Streckenmittelwerte Ausrolllängen  $l$  und Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  für alle Versuchsfahrzeuge**

Die ermittelten Ausrolllängen und berechneten Rollwiderstandsbeiwerte lassen sich nun in Abhängigkeit der AUN-Werte darstellen. Die Ergebnisse sind in **Abb. 3.17** und **3.18** gezeigt.

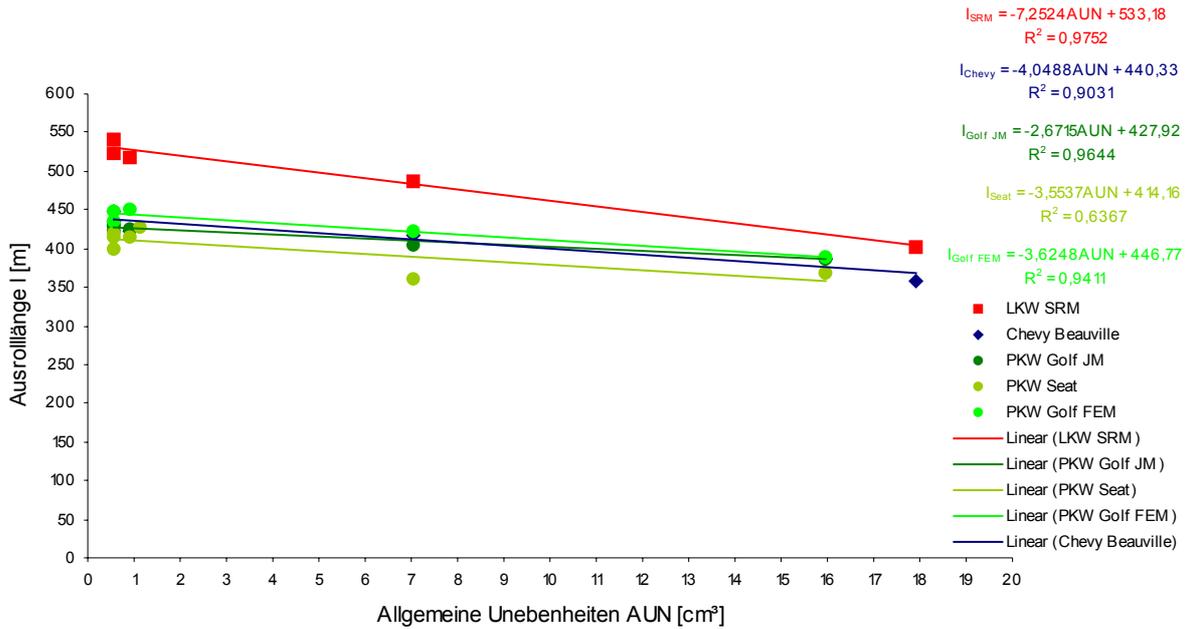


Abb. 3.17: Statistische Korrelation zwischen der Ausrolllänge  $I_{Kfz}$  und den AUN

Alle statistischen Korrelationen zeigen sehr gute Regressionskoeffizienten. Ferner ist in den Ergebnissen der Unterschied zwischen dem niedrigeren Rollwiderstandsbeiwert für den LKW (rot) und den Rollwiderstandsbeiwerten der PKW (grün/blau) sehr deutlich zu sehen. Der Unterschied verdeutlicht die Tatsache, dass der Reifeninnendruck als wesentlicher Aspekt bei der Bestimmung des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$  anzusehen ist. Als Bewertungsorientierung sind in **Abb. 3.18** der Warnwert (WW) und der Schwellenwert (SW) für die Funktionsklasse I nach der ZEB angegeben.

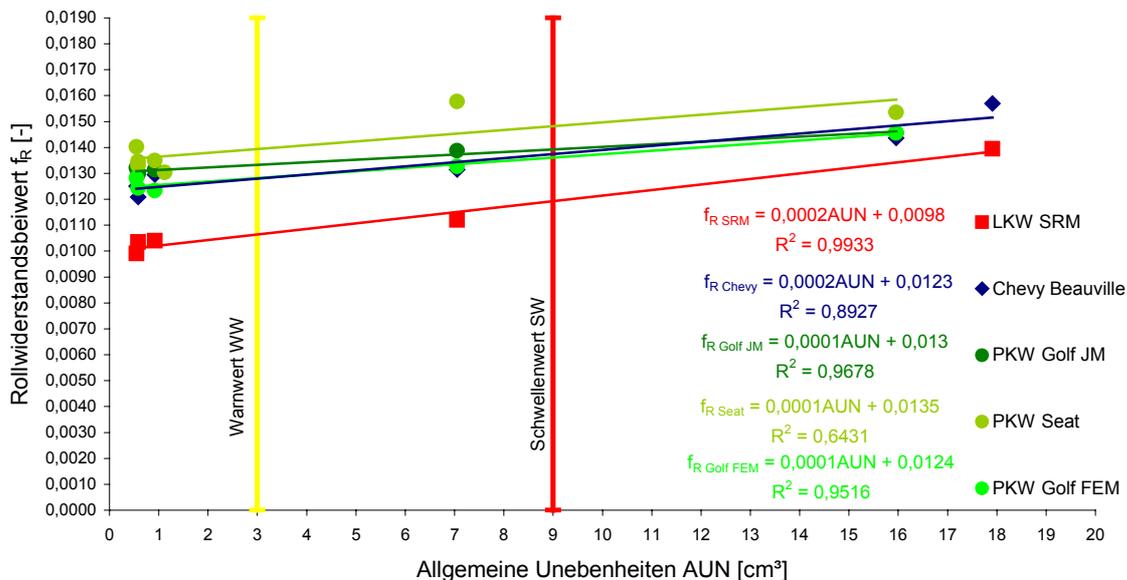
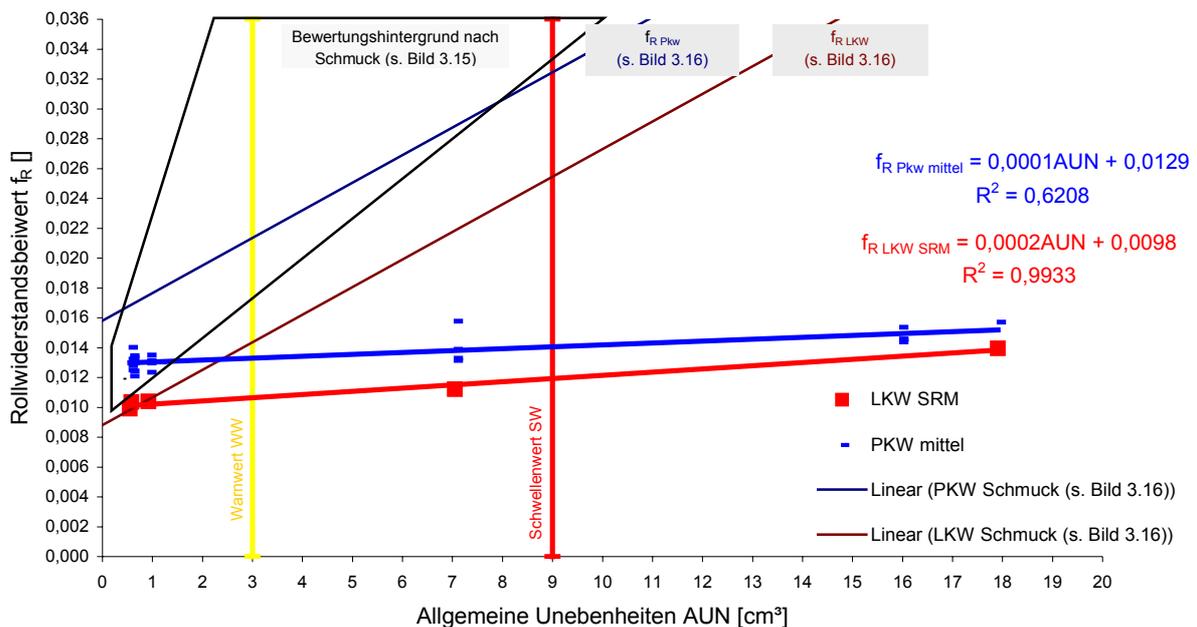


Abb. 3.18: Zusammenhang zwischen dem Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  und den Allgemeinen Unebenheiten AUN

Der funktionale Zusammenhang zwischen dem Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  und AUN -Wert kann fahrzeugabhängig wie folgt angegeben werden:

LKW:  $f_{R\ SRM} = 0,0002AUN + 0,0098$   
 PKW 1:  $f_{R\ Chevy} = 0,0002AUN + 0,0123$   
 PKW 2:  $f_{R\ Golf\ JM} = 0,0001AUN + 0,013$   
 PKW 3:  $f_{R\ Seat} = 0,0001AUN + 0,0135$   
 PKW 4:  $f_{R\ Golf\ FEM} = 0,0001AUN + 0,0124$

Die Ergebnisse der PKW-Messungen werden als charakteristischer Durchschnittswert der Fahrzeuggruppe P zu einem mittleren Rollwiderstandsbeiwert  $f_{R\ mittel}$  zusammengefasst. Daraus resultiert der schlechtere Regressionskoeffizient gegenüber den ermittelten Einzelergebnissen (**Abb. 3.19**).



**Abb. 3.19: Mittlerer Rollwiderstandsbeiwert  $f_{R\ mittel}$  für Pkw in Abhängigkeit der Allgemeinen Unebenheiten AUN**

Mit den hergeleiteten Zusammenhängen zwischen dem Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  und den Allgemeinen Unebenheiten AUN

$f_{R\ PKW\ mittel} = 0,0001 * AUN + 0,0129$  (Gl. 3.9)

$f_{R\ Lkw\ mittel} = 0,0002 * AUN + 0,0098$  (Gl. 3.10)

ist eine direkte funktionale Abhängigkeit zwischen dem Zustand der Fahrbahnoberfläche und Fahrwiderstand eines Fahrzeuges abgeleitet worden. Die beiden Funktionen stellen die Basis für die Berechnungen der veränderlichen Fahrzeugbetriebskosten  $\Delta FBK$  in Abhängigkeit der Straßenverschlechterung dar (s. 5.3.2).

Bei der Herleitung bleibt kritisch anzumerken, dass zur Bestimmung des Rollwiderstandsbeiwertes für Lkw lediglich ein Fahrzeug älteren Baujahrs zur Verfügung stand.

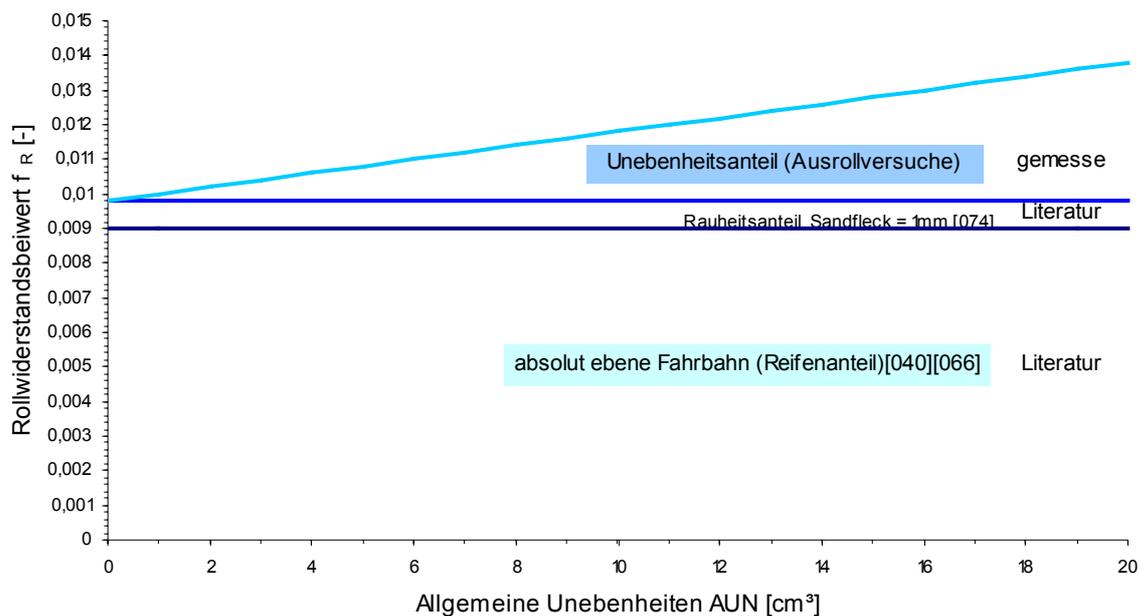
Die getrennte Betrachtung des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$  für Pkw und Lkw wird in Anlehnung an die Literatur [040][066] vorgenommen.

Vergleicht man die hergeleiteten Ergebnisse mit den Grundlagen der bisherigen Wirtschaftlichkeitsanalysen, so lässt sich eine eindeutige quantitative Überbewertung des Einflusses der Unebenheiten auf den Rollwiderstand in der Vergangenheit erkennen. Die in früheren Arbeiten

angenommenen Einflüsse sind allenfalls auf unbefestigten, stark geschädigten Fahrbahnoberflächen vorhanden und haben nichts mit den Betrachtungen des Autobahnnetzes zu tun. So sind Rollwiderstandsbeiwerte von  $f_R > 0,015$  auf Bundesautobahnen als unrealistisch zu bezeichnen.

### 3.2.5 Komponenten des Rollwiderstandsbeiwertes $f_R$

Als abschließende Betrachtung sollen kurz die Anteile der verschiedenen Einflussgrößen auf den Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  beschrieben werden. Der Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  lässt sich qualitativ in die Widerstandskomponenten des Reifen-, Rauheits- und Unebenheitsanteils untergliedern (s. **Abb. 3.20**).



**Abb. 3.20: Anteil des Reifens, der Rauheit und der AUN am Rollwiderstandsbeiwert [040][066] [074][075]**

Der quantitativen Aufteilung des Rollwiderstandes liegen die Messergebnisse dieser Arbeit und die Rollwiderstandsbeiwerte der Reifenmessungen aus der Literatur zugrunde. Der Anteil der Rauheit ergibt sich aus der Differenz der gemessenen Werte und des Reifenanteils. Der hier gezeigte quantitative Anteil der Rauheit stimmt mit Untersuchungen des Einflusses der Rauheit auf den Rollwiderstand [074][075] nahezu überein.

Der sehr große Anteil des Reifens ist unverkennbar. So liegt dessen Widerstandsanteil bei einer Unebenheit von  $AUN = 9 \text{ cm}^3$  immer noch bei über 80 % und unterstreicht damit seine Dominanz. Der Restanteil des Widerstandes ist durch den Straßenbaulastträger beeinflussbar. Für den Kraftstoffverbrauch ist aber der Gesamtwiderstand die einzig maßgebende Größe.

## 4. Straßenbaulastträgerkosten SBK

Nach Darstellung der Zustandsverschlechterung von Fahrbahnoberflächen stellt sich für den Straßenbaulastträger die Frage nach den Konsequenzen. Grundsätzlich hat der Straßenbaulastträger

der im BGB § 836 verankerten Pflicht der Straßenerhaltung nachzukommen und ist folglich angehalten, der Zustandsverschlechterung entgegenzuwirken. Die Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen haben die Intention der Sicherung von Leistungsfähigkeit, Verkehrssicherheit und der Substanz unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit [018]. Die Definition der baulichen Erhaltung von Straßen zeigt **Abb. 4.1**.

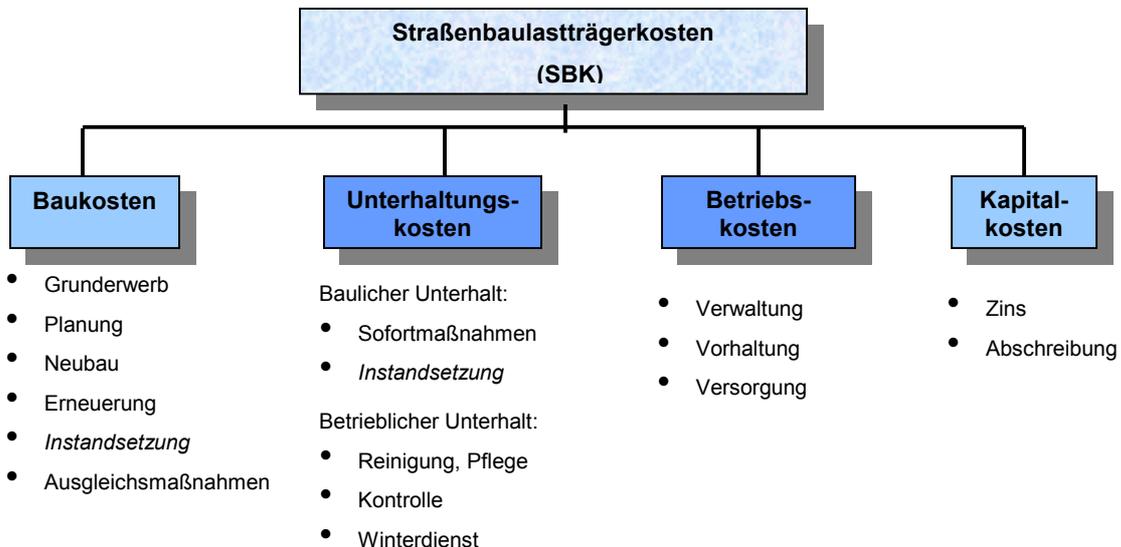
<b>Bauliche Erhaltung</b>	<b>Unterhaltung (Instandhaltung)</b>	örtlich-punktueller oder kleinflächige Maßnahmen (z.B. Vergießen von Rissen, kleinflächige Flickarbeiten)
	<b>Instandsetzung</b>	<b>I 1 – auf der Deckschicht</b> (z.B. Oberflächenbehandlung, Dünnschichtbelag)
		<b>I 2 – an der Deckschicht</b> (z.B. Hoch-/ Tiefeinbau der Deckschicht)
	<b>Erneuerung</b>	<b>E 1 – an der Decke</b> (z.B. Hoch- oder Tiefeinbau mehrerer (Deck-)Schichten)
		<b>E 2 – an Tragschicht(en) / am Oberbau</b> (z.B. Verstärkung, Tiefeinbau einschließlich der Tragschicht(en))

**Abb. 4.1: Übersicht der Begriffssystematik der Straßenerhaltung [018]**

Qualitätsverbessernde Veränderungen durch Um- und Ausbaumaßnahmen sowie kapazitätserweiternde Maßnahmen gehören nicht zur baulichen Erhaltung.

Die bauliche Erhaltung führt zum einen zu einer Wertsteigerung der Straßenkörpers, zum anderen verbessern sich die Gebrauchseigenschaften für den Straßennutzer, was Kosteneinsparungen hervorruft.

Die Erhaltungsmaßnahmen sind konsequenterweise auch mit Kosten verbunden, die sich durch Einheitspreise berechnen lassen. Neben den Maßnahmekosten müssen aber noch weitere Kosten Berücksichtigung finden. Eine Übersicht zeigt **Abb. 4.2**.



**Abb. 4.2: Detaillierte Gliederung der Straßenbaulastträgerkosten SBK**

Die Kosten der Straßenbaulastträger lassen sich in die Komponenten der Investitionskosten KI sowie der laufenden Kosten KL unterteilen. Der Übergang ist fließend. So können größere, periodisch wiederkehrende (Bau-) Kosten in einem Haushalt durchaus als laufende Kosten definiert werden [010].

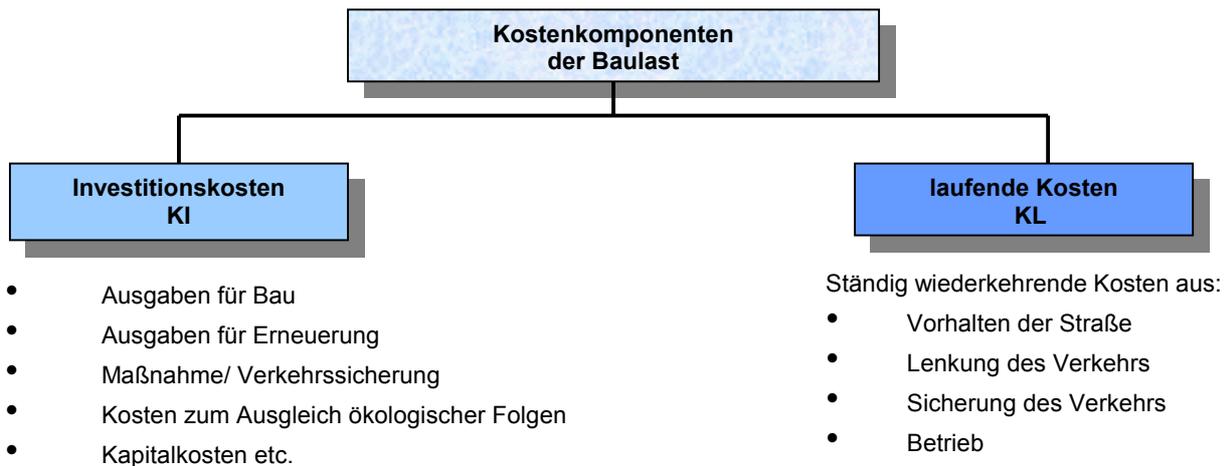


Abb. 4.3: Unterteilung der Straßenbaulast nach Kostenkomponenten

#### 4.1 Investitionskosten KI

Unter dem Begriff Investitionskosten KI werden sowohl Ausgaben für die Durchführung einer Maßnahme als auch zugehörige Kapitalkosten verstanden. Kapitalkosten sind in erster Linie Kosten, die durch Zinsen und Kapitalaufnahme entstehen.

$$KI_a = \sum_b A_b * \left(\frac{1}{1+p}\right)^r \quad [€/a]$$

mit:

$A_b$  = Ausgaben für eine Bauleistung b und zugehörige Kapitalkosten bezogen auf das Jahr a [€]

b = Ziffer der Bauleistung nach Leistungsverzeichnis

p = Kalkulationszinssatz [%]

r = Auf-/Abzinsungszeitraum [a]

Der Auf- bzw. Abzinsungszeitraum r berücksichtigt das Bezugsjahr und stellt die Aktualisierung der Kosten dar (Barwert).

Die im Jahr a getätigte Bauleistung b hat einen Wertzuwachs des Anlagevermögens des betrachteten Netzes zur Folge, der über den Abschreibungszeitraum  $d_b$  wieder abnimmt.

Die Abschreibungszeiträume einer Bauleistung beschreiben die mittlere Lebensdauer in Jahren bis zum völligen ökonomischen Wertverlust. Dabei wird von einer linearen Abschreibung ausgegangen, bei der sich der Wertverlust gleichmäßig über die mittlere Lebensdauer verteilt. Grundlage für die Abschreibungszeiträume sind die Richtwerte der EWS [010] (s. **Tabelle 4.1**).

Wertzuwachs und Abschreibungszeitraum bestimmen in der Nutzen-Kosten-Analyse den Restwert R der Bauleistung b aus dem Jahr a, der am Ende des Betrachtungszeitraumes n als Nutzen angesetzt werden muss.

Der Restwert einer Bauleistung wird wie folgt berechnet:

$$R_{KB_a} = KB_a * \left(1 - \frac{n}{d_b}\right) * \left(\frac{1}{1+p}\right)^n \quad [€] \quad \text{für } d_b > n, \text{ sonst}$$

$$R_{KB_a} = KB_a * (0,01) * \left(\frac{1}{1+p}\right)^n \quad [€]$$

mit:

- $KB_a$  - Maßnahmekosten bezogen auf das Jahr a [€]  
 $p$  - Kalkulationszinssatz [%]  
 $n$  - Betrachtungszeitraum [a]  
 $d_b$  - Abschreibungszeitraum der Teilleistung [a]

Lfd. Nr. b	Teilleistungen	Abschreibungszeitraum $d_b$ [a]
<b>1.</b>	<b>Nichtabschreibungsfähige Leistungen</b>	
1.1	Planung und Bauleitung	00
1.2	Grunderwerb und Entschädigung	00
1.3	Andere nicht abzuschreibende Leistungen	00
<b>2.</b>	<b>Abschreibungsfähige Anlagen für den Straßenverkehr</b>	
2.1	Untergrund, Unterbau, Wälle, Frostschutzschichten und Ausgleichsmaßnahmen, sofern sie nicht in anderen Teilleistungen erfasst sind	100
2.2	Entwässerung	75
2.3	Tragschichten	50
2.4	Fahrbahndecken (auch Bussonderspuren)	
2.4.1	Asphalt	
2.4.1.1	Binder	25
2.4.1.2	Deckschicht	12,5
2.4.2	Beton	25
2.4.3	Pflaster	50
2.5	Brücken	50
2.6	Stützwände	50
2.7	Tunnel	50
2.8	Ausstattung	10
2.9	Lärmschutzwände und -fenster	25

**Tabelle 4.1: Richtwerte für die Abschreibungszeiträume  $d_b$  abschreibungsfähiger Teilleistungen [010]**

Bauteilleistungen b, die der Substanz- und Wertsteigerung eines Straßenkörpers dienen und den anerkannten Regeln der Baukunst genügen, werden in Standardmaßnahmenleistungskataloge [076][077][078] aufgenommen. Aus diesen Standardmaßnahmen können die der substanziellen Optimierung dienenden Leistungen ausgesucht und als Vorbereitung zur Vergabe an Dritte ausgeschrieben werden. Wichtig bei der Auswahl der Maßnahme sind neben dem Einheitspreis auch die Lebensdauer sowie die Wirkung (Rücksetzwert) auf die zu verbessernden Zustandsgrößen (in dieser Arbeit: Unebenheit und Griffigkeit). Unterschieden wird dabei zwischen Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen.

#### 4.1.1 Instandsetzung

Die Instandsetzung zielt auf großflächigere Maßnahmen mit einer maximalen Schichtdicke von 40 mm ab und verbessert bei fachgerechter Ausführung die Zustandsgrößen und damit den Straßenkörper nachhaltig.

Die hier gewählten Instandsetzungsmaßnahmen sind dem Maßnahmenkatalog des PMS [023] entnommen:

Maßnahmeart	Code	Dicke [mm]	Einheitspreis [€/m <sup>2</sup> ]	Rücksetzwert		Lebensdauer [Jahre]	
				AUN	μ <sub>SCRIM</sub>	AUN	μ <sub>SCRIM</sub>
Dünnschichtbelag	DB	20	4,63	-	optimal	-	5
Deckschicht im Tiefeinbau	DT	40	8,44	optimal	optimal	12,5	12,5
Deckschicht im Hocheinbau	DH	40	6,73	optimal	optimal	12,5	12,5

**Tabelle 4.2: Ausgewählte Instandsetzungsmaßnahmen für BAB (Kostenstand 1.1.2000) [023]**

Der Rücksetzwert beschreibt den Verbesserungsgrad der Zustandsgröße nach Fertigstellung der Maßnahme.

Der Rücksetzwert „optimal“ bedeutet ein Zurücksetzen der Zustandsgröße auf den Zielwert.

Die Lebensdauer der Maßnahme ist als durchschnittlicher Erfahrungswert anzusehen [018]. Gleichzeitig richtet sich der Betrachtungszeitraum  $n$  der Nutzen-Kosten-Analyse nach der Lebensdauer der analysierten Maßnahme (s. 6.2.1.3).

Der Auftragnehmer hat den fachgerechten Einbau und die Qualität der Maßnahme über die Gewährleistungsdauer von zwei Jahren zu garantieren [134][136].

#### 4.1.2 Erneuerung

Die Erneuerung zielt im Gegensatz zur Instandsetzung auf die Verbesserung mehrerer Schichten bzw. einer Verstärkung des Oberbaus und damit auf eine verbesserte Tragfähigkeit ab. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit bleibt dieser Aspekt jedoch unberücksichtigt.

## 4.2 Verkehrssicherungskosten

Werden Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen ergriffen, führt die Baustellensituation neben den Maßnahmekosten durch die Sicherung der Arbeitsstelle zu weiteren Kosten. Sicherungsmaßnahmen an Arbeitsstellen zum Schutz der Arbeitenden und der Straßennutzer sind Bestandteil der Verkehrssicherungspflicht und müssen folglich durchgeführt werden. Grundlage für die Absicherung stellen die Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) [140] dar. Sie beinhalten sowohl verkehrsbeeinflussende als auch allgemeinverbindliche Informationen zur Leitung des Verkehrs im Bereich einer Baustelle. Bauliche Maßnahmen sind dabei so durchzuführen, dass der Straßenbetrieb die geringst möglichen Störungen erfährt. Der Einfluss der Baustelle auf die Straßennutzerkosten wird unter diesen Gesichtspunkten noch gesondert betrachtet (s. 5.5).

Für die zu analysierenden Instandsetzungsmaßnahmen mit einer Loslänge von 1 km Richtungsfahrbahn werden zwei Tagesbaustellen mit jeweils halbseitiger Sperrung gewählt. Die Absicherung erfolgt dabei nach den RSA – Regelplänen D III/ [140].

Dieser Sicherungsmaßnahme wird die Pauschalsumme von 700,- € / Tag [147][148] zugrunde gelegt.

Die Gesamtverkehrssicherungskosten ergeben sich demnach aus der Summe der beiden Tagessätze.

Zusammen mit den Maßnahmekosten bilden sie die Herstellungskosten für die Instandsetzung von 1 km Richtungsfahrbahn.

### 4.3 Laufende Kosten KL

Die laufenden Kosten KL eines Abschnittes über den Betrachtungszeitraum ergeben sich aus der Summe der auf- bzw. abgezinsten jährlich laufenden Kosten unter Berücksichtigung der Abschnittslänge.

$$KL_a = \sum_i KL_{a,i} * \left(\frac{1}{1+p}\right)^r * LG_i \quad [€/a] \quad [010]$$

mit:

$KL_{a,i}$  = jährlich laufende Kosten für den Netzabschnitt i [€/km\*a]

$LG_i$  = Länge des betrachteten Abschnittes [km]

$p$  = Kalkulationszinssatz [%]

$r$  = Auf-/Abzinsungszeitraum [a]

Die Straßenunterhaltung und Betriebsaufgaben werden von den 186 Autobahnmeistereien durchgeführt. Die Leistungen und Anforderungen umfassen im Wesentlichen

- bauliche Unterhaltung
- Winterdienst
- Grünpflege
- Reinigung und Entsorgung
- verkehrstechnische Dienste
- Schadensbeseitigung.

Die bauliche Unterhaltung beinhaltet Sofortmaßnahmen und Maßnahmen kleineren Umfangs. Die Reinigung, Kontrolle und Pflege sowie der Winterdienst werden als betrieblicher Unterhalt verstanden. Sämtliche Aufgaben halten die Betriebsbereitschaft des Autobahnnetzes aufrecht. Der Umfang dieser Arbeiten ist vor allem von Straßentyp, Anzahl und Größe der Kunstbauten sowie Ausstattungsmerkmalen des Straßenquerschnittes abhängig (**s. Tab. 4.3**).

	Straßentyp ST			Laufende Kosten KL <sub>a</sub> [€/km*a]
Autobahnen	1.11	Rampe	3.11	9.500
	1.21	2 FS	3.21	22.500
	1.22		3.22	21.500
	1.31	3 FS	3.31	26.500
	1.32		3.32	25.500
	1.41	4 FS	3.41	30.500
	1.42		3.42	29.500
Sonstige Außerortsstraßen (übergeordnetes Straßennetz)		2.10		12.500
	2.11		2.12	10.500
	2.13		2.14	10.000
		2.21		20.500
		2.22		19.500
		2.31		24.500
		2.32		23.500

Tabelle 4.3: Durchschnittliche Grundwerte der Laufenden Kosten KL<sub>a</sub> , Kostenstand 2000 [010][033]

Für den repräsentativen Abschnitt des Autobahnnetzes werden die laufenden Kosten nach der Querschnittsaufteilung im Gesamtnetz nach 2.2.1 gewichtet und zu einem mittleren Kostensatz zusammengefasst:

$$KL_{a,BAB} = 22.000 \text{ [€/km*a]} * 0,768 + 26.000 \text{ [€/km*a]} * 0,232 \approx 23.000 \text{ [€/km*a]}$$

Diese durchschnittlichen laufenden Kosten KL<sub>BAB</sub> = 23.000 €/km\*a lassen sich nach Abb. 4.4 in die Anteile baulicher und betrieblicher Unterhaltung gliedern.

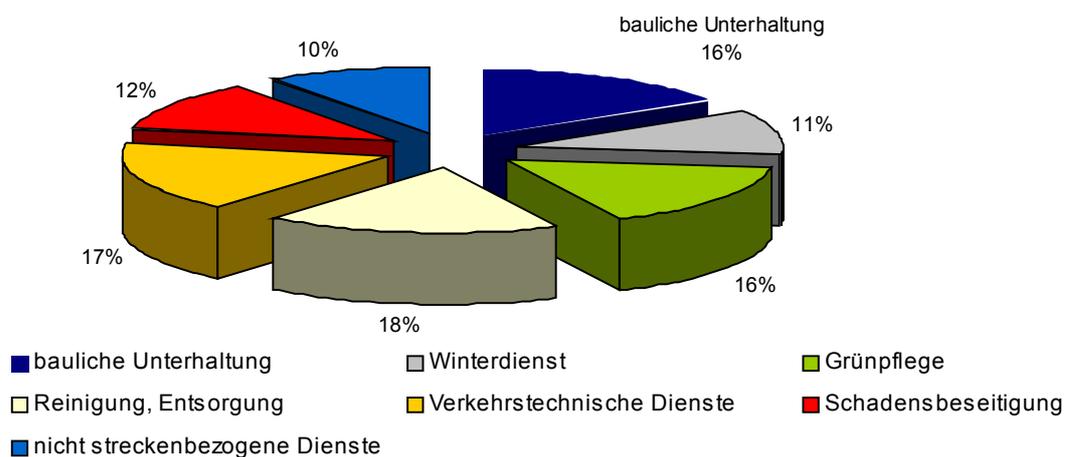


Abb. 4.4: Kostenstruktur der Straßenunterhaltung für Autobahnen (1993) [135]

Wird eine Erhaltungsmaßnahme durchgeführt, reduzieren sich die laufenden Kosten im Erstellungsjahr und über den Gewährleistungszeitraum um den Anteil der baulichen Unterhaltung. In diesem Zeitraum hat der Auftragnehmer der Erhaltungsmaßnahme für die bauliche Qualität zu garantieren und folglich die bauliche Unterhaltung durchzuführen.

$KL_{\text{Maßnahmejahr} - \text{Gewährleistungszeitraum}} = 23.000 \text{ [€/km*a]} - 16 \% \text{ bauliche Unterhaltung} = 19.320 \text{ [€/km*a]}$ .

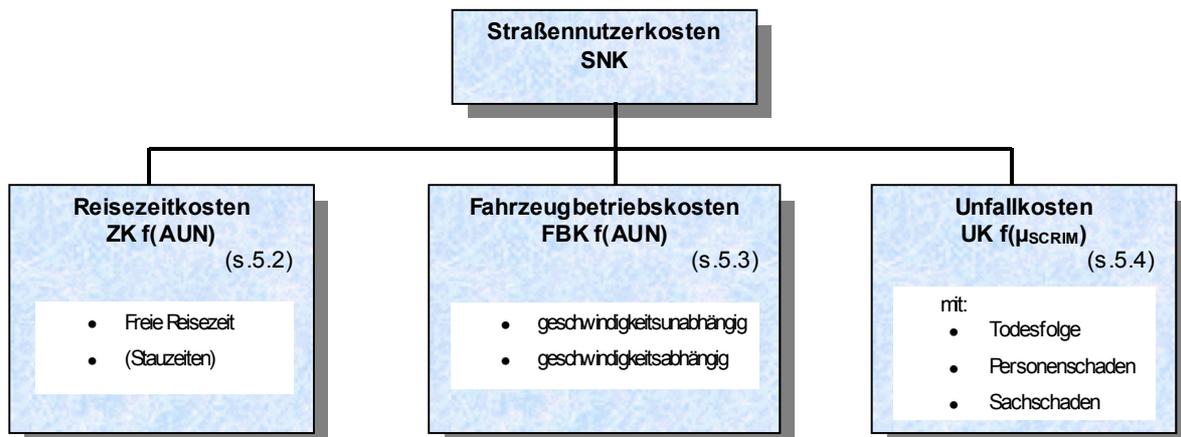
Der Straßenbaulastträger hat im Zeitraum der Maßnahmedurchführung bis zum Ende der Gewährleistungsdauer Einsparungen hinsichtlich der laufenden Kosten von jährlich 3.680 €/km\*a. Diese Einsparungen sind in den Wirtschaftlichkeitsanalysen als Nutzen der Maßnahme zu berücksichtigen.

## 5. Straßennutzerkosten SNK

### 5.1 Allgemeines

Unter den Straßennutzerkosten SNK werden Reisezeit-, Fahrzeugbetriebs- sowie mögliche Unfallkosten verstanden, die den Straßennutzern beim Durchfahren eines Streckenabschnittes entstehen. Neben der individuellen Fahrweise hat auch der Straßenzustand einen Einfluss auf die Höhe der Straßennutzerkosten.

Ihre Abhängigkeit von den Zustandsgrößen Allgemeinen Unebenheiten in Längsrichtung AUN und Griffigkeit  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  werden in diesem Kapitel untersucht. **Abb. 5.1** zeigt die Aufteilung der Straßennutzerkosten in die Teilkostenbereiche und deren Abhängigkeit von den Zustandsgrößen.



**Abb. 5.1: Straßennutzerkosten SNK und Teilkostenbereiche**

Die Straßennutzerkosten SNK setzen sich aus der Summe der Teilkostenbereiche zusammen:

$$SNK = ZK (AUN) + FBK (AUN) + UK (\mu_{\text{SCRIM } 80}) \quad [€/a]$$

Da die Wirkung des Fahrbahnzustandes auf Fahrzeuge und damit auf Kostenstrukturen teilweise unterschiedlich sein kann, müssen Differenzierungen in der Fahrzeugflotte vorgenommen werden. Die jährlichen Straßennutzerkosten für das betrachtete Netz werden folglich als Summe der Teilabschnitte  $i$ , Fahrtrichtung  $RI$ , Fahrzeuggruppen  $FG$  und der Verkehrsstundengruppen  $t$  verstanden.

Vereinfachend wird in beiden Fahrtrichtungen von der gleichen Verkehrsstärke ausgegangen, so dass mit der Hälfte des angegebenen DTV für eine Fahrtrichtung gerechnet wird. Daraus folgt für die Berechnung der jährlichen Straßennutzerkosten  $SNK_a$  eines Netzabschnittes i:

$$SNK_a = \sum_t \sum_{FG} (ZK(AUN) + FBK(AUN) + UK(\mu_{SCRIM 80})) \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

mit:

$SNK_a$	- jährliche Straßennutzerkosten
t	- Nummer eines Zeitraumes mit annähernd gleichartigem Verkehrsablauf
FG-	- Anteil der Fahrzeuggruppe FG am DTV
ZK-	- Reisezeitkosten
FBK-	- Fahrzeugbetriebskosten
UK-	- Unfallkosten

## 5.2 Reisezeitkosten ZK

Jede Ortsveränderung ist von der Reisezeit abhängig. Unter den Reisezeitkosten ZK wird der ökonomische Wert der Aktivitäten verstanden, die alternativ in der Reisezeit durchgeführt werden könnten bzw. durch die Reisezeit verhindert werden [036].

$$ZK = \sum_t \sum_{FG} \left( \frac{Q}{V} \right)_{t,FG} * T_t * LG * WT_{FG} \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

mit:

ZK	- Reisezeitkosten	[€/a]
Q	- Verkehrsstärke (t, FG)	[Kfz/h]
V	- maßgebende Geschwindigkeit (t, FG)	[km/h]
T	- Dauer des Zeitraumes mit annähernd gleicher Verkehrsstärke	[h/a]
$WT_{FG}$	- Zeitkostensatz für die Fahrzeuggruppe FG	[€/Kfz*h]
LG	- Länge des betrachteten Netzabschnittes	[km]
$FG_{FG}$	- Anteil der Fahrzeuggruppe FG am DTV	[%]
t	- Nummer eines Zeitraumes mit annähernd gleichartigem Verkehrsablauf	

Bedingt durch das unterschiedliche Verkehrsaufkommen innerhalb eines Tages variieren die maßgebenden Geschwindigkeiten z.T. erheblich. Der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) wird daher in verschiedene Verkehrsstundengruppen t mit unterschiedlichen Verkehrsstärken aufgeteilt (**s. 5.2.2**).

### 5.2.1 Zeitkostensatz $WT_{FG}$

Der ökonomische Wert der alternativen Verwendung einer Stunde Fahrzeit wird als Zeitkostensatz  $WT$  [€/Kfz\*h] bezeichnet. Die Monetarisierung der Reisezeit erfolgt nach den Gesichtspunkten des Fahrtzweckes. Die Zeitkostensätze beinhalten die Vorhalte- und Lohnkosten bei den gewerblich genutzten Fahrzeuggruppen L, B und Z sowie die Reisezeitkosten der Insassen privat genutzter Pkw

und der Buspassagiere [010]. Die Ermittlung der Zeitkostensätze gewerblich genutzter Fahrzeuge (Güterverkehr GV) umfasst neben den anteiligen Lohnkosten auch die durch Fahrzeiten beeinflussten Vorhaltungskosten. Weiterhin werden die (steuer- und versicherungsbereinigten) Abschreibungen des Anlagekapitals, die Unterstellung und die Allgemeinkosten berücksichtigt [036]. In **Tabelle 5.1** sind die Zeitkostensätze  $WT_{FG}$  getrennt nach werk-, sonn- und feiertags mit dem Kostenstand von 1995 aufgeführt.

Fahrzeuggruppe FG	Zeitkostensätze $WT_{FG}$ [€/ (Kfz*h)]	
	normalwerktags urlaubswerktags w,u	sonntags/ feiertags s
Pkw (P)	5,50	2,75
Lkw (L)	21,00	21,00
Lastzug (Z)	30,00	30,00
Bus (B)	62,50	62,50

**Tabelle 5.1: Zeitkostensätze nach Fahrzeuggruppen, Kostenstand 1995 [010]**

Die Unterscheidung der Zeitkostensätze zwischen Werk- und Sonntagen spielt lediglich bei der Fahrzeuggruppe P eine Rolle. Bei allen anderen Fahrzeuggruppen wird ausschließlich von einer betrieblichen Nutzung ausgegangen. Der DTV wird in dieser Arbeit als Jahresdurchschnittswert ohne Unterteilung in Wochenzeiten betrachtet, so dass für die Fahrzeuggruppe P ein mittlerer Zeitkostensatz  $WT_P$  ausreichend ist. Der motorisierte Individualverkehr (Fahrzeuggruppe P) teilt sich nach Verkehrsleistungspersonenkilometer in 40,3 % gewerblichen und 59,7 % privaten Anteil [033] auf. Der mittlere jährliche Kostensatz ergibt sich folglich aus den gewichteten Summen der Anteile.

$$WT_{P_{\text{mittel}}} = 0,403 * 5,50 + 0,597 * 2,75 = 3,86 \quad [€/Kfz * h]$$

Zur Aktualisierung der Zeitkostensätze auf den Preisstand 2000 wird der gemittelte Index = 114 für die tariflichen Stundenlöhne der Arbeiter und Angestellten herangezogen (Basiswert 1995 = 100) [080]. Die aktualisierten Zeitkostensätze  $WT_{FG}$  für den Jahresdurchschnitt sind, auf 10 Cent gerundet, **Tabelle 5.2** zu entnehmen.

Fahrzeuggruppe FG	Zeitkostensätze $WT_{FG}$ [€/ (Kfz*h)]
	alle Tage
Pkw (P)	4,40
Lkw (L)	23,90
Lastzug (Z)	34,20
Bus (B)	71,30

**Tabelle 5.2: Aktualisierte, durchschnittliche Zeitkostensätze nach Fahrzeuggruppen, Kostenstand 2000 [010][033][080]**

### 5.2.2 Maßgebende Geschwindigkeit $V_{FG}$

Die maßgebende Geschwindigkeit  $V_{FG}$  jeder Fahrzeuggruppe beeinflusst die Dauer, die ein Straßennutzer zum Durchfahren eines Streckenabschnittes der Länge  $l$  benötigt. Sie ist die variable Größe der Bestimmung der Reisezeitkosten. Als Einflussgrößen der Geschwindigkeit gelten neben der Streckencharakteristik der Fahrbahnzustand und die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten nach der Straßenverkehrsordnung StVO. Der mit Abstand einflussreichste Faktor - die Motivation des Fahrzeugführers, ohne einschränkende Rahmenbedingungen (Wetter, Linienführung u.a.) eine bestimmte Geschwindigkeit zu fahren - wird mit dem Geschwindigkeitsmodell nach *Kellermann* [082] beschrieben (s. 5.2.2.3).

Die maßgebende Geschwindigkeit  $V_{FG}$  lässt sich folglich aus den vier Teilaspekten

- Streckencharakteristik  $\Rightarrow V_{SC} = f(ST, DTV, Q, s, KU)$  (s. 5.2.2.1)
- Geschwindigkeitsbeschränkung  $\Rightarrow V_{zul} = f(StVO)$  (s. 5.2.2.2)
- mittlere gefahrene Geschwindigkeit  $\Rightarrow V_{mittel}$  (s. 5.2.2.3)
- Fahrbahnzustand  $\Rightarrow V_{Zus} = f(AUN)$  (s. 5.2.2.4)

herleiten. Andere Einflussfaktoren, wie Witterungsbedingungen, die z.T. eine nachhaltige Auswirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit haben, bleiben unberücksichtigt, da sie seitens des Straßenbaulastträgers nicht beeinflussbar sind.

#### 5.2.2.1 Geschwindigkeit als Funktion der Streckencharakteristik $V_{SC} = f(ST, DTV, Q, s, KU)$

Die prognostizierte Geschwindigkeit einer Fahrzeuggruppe, die sich aus der Streckencharakteristik ergibt, ist empirisch aus den Entwurfs-elementen und der Verkehrssituation des betrachteten Abschnittes hergeleitet. Generell lässt sich eine Steigerung der durchschnittlichen Geschwindigkeit mit Zunahme der Fahrbahnbreite feststellen. Die Geschwindigkeitsfunktionen für die Fahrzeuggruppen sind der EWS [010] zu entnehmen.

#### 5.2.2.2 Zulässige Höchstgeschwindigkeit $V_{zul} = f(StVO)$

Geschwindigkeitsbegrenzungen beeinflussen die gefahrene Geschwindigkeit und damit die Reisezeit nachhaltig. Sie können dauerhaft oder temporär verwendet werden und unterschiedlichste Gründe haben. In Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sollte daher für jeden Streckenabschnitt eine Abfrage der beschränkten Geschwindigkeit vorgesehen werden. Grundlage dieser Nutzen-Kosten-Analysen soll jedoch der Fall ohne Geschwindigkeitsbegrenzung sein. Es gelten lediglich die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten für die Fahrzeuggruppen L,Z und B nach der StVO, da sie dauerhaft und netzweit sind [079][081]:

$V_B = 100 \text{ km/h}$ ,  $V_L = 80 \text{ km/h}$ ,  $V_Z = 80 \text{ km/h}$ .

#### 5.2.2.3 Mittlere gefahrene Geschwindigkeit $V_{P \text{ mittel}}$

Zur Abschätzung des Geschwindigkeitsverhaltens der Fahrzeuggruppe P auf Autobahnen wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast) Messstellen ausgewertet, an denen keine baulichen,

verkehrlichen oder witterungsbedingten Einflüsse auf das freie Fahrverhalten zu erwarten waren. Unverzerrt durch Veränderungen der Verkehrs, lässt sich der Verkehrsstärke des Streckenabschnittes eine mittlere gefahrene Geschwindigkeit zuordnen. Eine solche lineare Geschwindigkeits-Verkehrsstärkenbeziehung (V-Q Beziehung) für zwei- und dreistreifige Richtungsfahrbahnen ohne Tempolimit ist von *Kellermann* [082] ermittelt worden.

Lkw-Klasse	Q <sub>1</sub> Q <sub>2</sub> Q <sub>3</sub> Q <sub>max</sub>	0 ... Q <sub>1</sub> (konstant)	Q <sub>1</sub> ... Q <sub>2</sub> bzw. Q <sub>1</sub> ... Q <sub>max</sub>	Q <sub>2</sub> ... Q <sub>3</sub>	Q <sub>3</sub> ... Q <sub>max</sub>
< 15 %	870 2000 3000 3200	V <sub>m</sub> = 138,0	V <sub>m</sub> = 154,0 – 0,0184 * Q	V <sub>m</sub> = 160,4 – 0,0216 * Q	V <sub>m</sub> = 404,6 – 0,103 * Q
15 – 25 %	700 2000 2800 3000	V <sub>m</sub> = 138,0	V <sub>m</sub> = 150,2 – 0,0174 * Q	V <sub>m</sub> = 161,6 – 0,0231 * Q	V <sub>m</sub> = 403,5 – 0,1095 * Q
> 25 %	580 2700	V <sub>m</sub> = 138,0	V <sub>m</sub> = 155,7 – 0,0303 * Q		

**Tabelle 5.3: Geschwindigkeits- Verkehrsstärke Beziehungen für zweistreifige Richtungsfahrbahnen ohne Tempolimit, V in [km/h] [082]**

Lkw-Klasse	Q <sub>1</sub> Q <sub>2</sub> Q <sub>3</sub> Q <sub>max</sub>	0 ... Q <sub>1</sub> (konstant)	Q <sub>1</sub> ... Q <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub> ... Q <sub>3</sub> bzw. Q <sub>2</sub> ... Q <sub>max</sub>	Q <sub>3</sub> ... Q <sub>max</sub>
< 15 %	1400 3600 5000	V <sub>m</sub> = 143,0	V <sub>m</sub> = 153,5 – 0,0076 * Q	V <sub>m</sub> = 256,9 – 0,0364 * Q	
> 15 %	1000 2200 3500 4500	V <sub>m</sub> = 143,0	V <sub>m</sub> = 149,1 – 0,0061 * Q	V <sub>m</sub> = 157,7 – 0,01 * Q	V <sub>m</sub> = 289,7 – 0,0477 * Q

**Tabelle 5.4: Geschwindigkeits- Verkehrsstärke Beziehungen für dreistreifige Richtungsfahrbahnen ohne Tempolimit, V in [km/h] [082]**

Für den repräsentativen Autobahnabschnitt ergeben sich aus diesen Beziehungen mit den Eingangswerten

- Anteilsklasse LKW (GV) am Gesamtverkehr: 14,8 %
- Verkehrsstärke Q nach den Verkehrsstundengruppen
- Gewichtung in der zwei- und dreistreifigen Richtungsfahrbahnen

die folgenden mittleren Geschwindigkeiten V<sub>Pmittel</sub>:

Mittlere gefahrene Geschwindigkeit der Fahrzeuggruppe P		V <sub>Pmittel</sub> [km/h]							
		t	Q <sub>P</sub> [Kfz/h]	2-streifig		3-streifig		gesamt	
V <sub>m</sub> [km/h]	V <sub>m</sub> [km/h]			V <sub>m</sub> [km/h]	Gew. [%]	V <sub>m</sub> [km/h]	Gew. [%]	V <sub>Pmittel</sub> [km/h]	
14,8 % LKW- Anteil	1	2109	160,4 – 0,0216 * Q	153,5 – 0,0076 * Q	114,8	76,8	137,5	23,2	<b>120,1</b>
	2	1920	154,0 – 0,0184 * Q	153,5 – 0,0076 * Q	118,7	76,8	138,9	23,2	<b>123,4</b>
	3	1721	154,0 – 0,0184 * Q	153,5 – 0,0076 * Q	122,3	76,8	140,4	23,2	<b>126,5</b>
	4	1435	154,0 – 0,0184 * Q	153,5 – 0,0076 * Q	127,6	76,8	142,6	23,2	<b>131,1</b>
	5	629	138,0	143,0	138,0	76,8	143,0	23,2	<b>139,2</b>

**Tabelle 5.5: Mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuggruppe P auf bundesdeutschen Autobahnen ohne Tempolimit**

Die Kellermann- Formeln sind an zwei Querschnitten brandenburgischer Bundesautobahnen [146] überprüft worden.

Für einen dreistreifigen Richtungsfahrbahnquerschnitt der A9 im südlichen Brandenburg ergab die Zählstelle eine mittlere gefahrene Geschwindigkeit der Fahrzeuggruppe P über den gesamten Querschnitt von  $V_P = 143$  km/h. Das entspricht exakt dem berechneten Wert. Für einen zweistreifigen Richtungsfahrbahnquerschnitt der A 15 im östlichen Brandenburg wurde eine mittlere Geschwindigkeit von  $V_P = 136$  km/h bestimmt. Dies liegt nur etwas unter der nach Kellermann prognostizierten Geschwindigkeit ( $V_P = 138$  km/h), was auf den Einflussbereich einer Geschwindigkeitsbegrenzung (120 km/h) unmittelbar vor dem betrachteten Querschnitt zurückzuführen ist. Beide Kontrollrechnungen bestätigen die Kellermann – Formeln. Andere Querschnitte konnten aufgrund bestehender Geschwindigkeitsbegrenzungen nicht überprüft werden.

Die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten für die Fahrzeuggruppen B,L und Z nach der StVO sowie die mittleren gefahrenen Geschwindigkeiten der Fahrzeuggruppe P nach Kellermann dienen als Grundlage für die Berechnung der (unabhängig vom Fahrbahnzustand entstehenden) Reisezeitkosten ZK.

Ein Überblick der Geschwindigkeiten der Fahrzeuggruppen FG in den Verkehrsstundengruppen t ist in **Tabelle 5.6** gegeben.

		Verkehrsstärke $Q_{FG}$				$V_{FG}$ [km/h]				Zeitkostensatz $WT_{FG}$			
t	Dauer T	$Q_P$	$Q_L$	$Q_Z$	$Q_B$	$V_P$	$V_L$	$V_Z$	$V_B$	$WT_P$	$WT_L$	$WT_Z$	$WT_B$
[ ]	[h/a]	[Kfz/h]				[km/h]				[€/Kfz*h]			
1	90	2109	41	178	2	120	80	80	100	4,40	23,90	34,20	71,30
2	120	1920	41	178	2	123	80	80	100				
3	390	1721	41	178	2	127	80	80	100				
4	1500	1435	41	178	2	131	80	80	100				
5	6660	629	22	99	1	139	80	80	100				

**Tabelle 5.6: Verkehrsstärke  $Q_{FG}$  und mittlere Geschwindigkeit  $V_{FG}$  und Zeitkostensätze**

Daraus ergeben sich die Reisezeitkosten ZK zu:

$$ZK = \sum_t \sum_{FG} \left( \frac{Q}{V} \right)_{t,FG} * T_t * LG * WT_{FG} \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

$$ZK = \sum_t \left( \frac{Q_{FG}}{V_{FG}} \right) * T_t * LG * WT_{FG} \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

$$ZK = \sum_t \left( \left( \frac{Q_P}{V_P} \right) * WT_P + \left( \frac{Q_L}{V_L} \right) * WT_L + \left( \frac{Q_Z}{V_Z} \right) * WT_Z + \left( \frac{Q_B}{V_B} \right) * WT_B \right) * T_t * LG \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

$$ZK_{t=1} = ((17,58) * 4,40 + (0,51) * 23,90 + (2,23) * 34,20 + (0,02) * 71,30) * 90 * 1,0 = 15.050,97 \text{ €/km*a}$$

$$ZK_{t=2} = ((15,61) * 4,40 + (0,51) * 23,90 + (2,23) * 34,20 + (0,02) * 71,30) * 120 * 1,0 = 19.027,80 \text{ €/km*a}$$

$$ZK_{t=3} = ((13,55) * 4,40 + (0,51) * 23,90 + (2,23) * 34,20 + (0,02) * 71,30) * 390 * 1,0 = 58.305,39 \text{ €/km*a}$$

$$ZK_{t=4} = ((10,95) * 4,40 + (0,51) * 23,90 + (2,23) * 34,20 + (0,02) * 71,30) * 1500 * 1,0 = 207.091,50 \text{ €/km*a}$$

$$ZK_{t=5} = ((4,53) * 4,40 + (0,28) * 23,90 + (1,24) * 34,20 + (0,01) * 71,30) * 6660 * 1,0 = 464.501,70 \text{ €/km*a}$$

$$\mathbf{ZK_{ges} = 763.977,36 \text{ €/km*a}}$$

Die bisher betrachteten Geschwindigkeiten zeigen sich allerdings unabhängig vom Zustand der Fahrbahnoberfläche. Lediglich Fahrbahnquerschnitt und Verkehrsstärke bilden die Einflussgrößen auf die gefahrenen Geschwindigkeiten  $V_{FG}$ .

#### 5.2.2.4 $V_{Zus} = f(AUN)$

Mit der Verschlechterung des Straßenzustandes ändert sich das Fahrverhalten der Straßennutzer mehr oder weniger deutlich. Der Zusammenhang zwischen gefahrener Geschwindigkeit und Fahrbahnqualität ist in internationalen Feldstudien [042][084][089] untersucht worden. In Deutschland wurden entsprechende Untersuchungen bisher nicht durchgeführt. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf bundesdeutsche Verhältnisse soll im Folgenden kurz diskutiert werden. Die Ergebnisse der internationalen Studien sind im Wesentlichen in der

- a. AASHO – Studie [085][094]
  - b. Vehicle Speeds and Operating Costs – Studie (HDM) [041]
- zusammengefasst worden.

##### zu a.:

Die AASHO – Studie (**A**merican **A**ssociation of **S**tate **H**ighway **O**fficials), eine groß angelegte Feldstudie in den USA Ende der '50er bis Mitte der '60er Jahre, hatte das Ermitteln von Verhaltensmodellen der Oberflächen und Straßenaufbauten unter verschiedensten Bedingungen zur Aufgabe [083]. Als sogenannte „Special Study“ [084] wurde unter anderem das Fahrerverhalten auf unterschiedlichen Fahrbahnzuständen ermittelt und ausgewertet. Unter der Annahme, dass nur das Fahrverhalten der Fahrzeuggruppe P nachhaltig verändert würde, ergab sich für das Geschwindigkeitsverhalten in Abhängigkeit des Fahrbahnzustandes die Funktion

$$V_P(\text{psi}) = 57,75 * \text{psi}^{0,538} \quad [\text{km/h}] \quad [085]. \quad \text{psi - present serviceability index}$$

Als der für lange Zeit einzig formulierte Zusammenhang, fand dieser Eingang in Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen [086][087]. Unter Berücksichtigung der Beziehung zwischen dem psi und den AUN-Werten (**s. 3.2.1.3**) ergeben sich in Abhängigkeit der AUN-Werte die folgenden Geschwindigkeiten:

$$V_P(AUN) = 57,75 * (-0,99 * (AUN - 4,7))^{0,538} \quad \text{für } AUN \leq WW \text{ bzw.}$$

$$V_P(AUN) = 57,75 * \left( \frac{AUN - 13,21}{-6,06} \right)^{0,538} \quad \text{für } AUN > WW \quad WW - \text{Warnwert } (3,0 \text{ cm}^3)$$

Die errechneten Geschwindigkeiten für den Warnwert ( $AUN = 3 \text{ cm}^3$ ) von  $V_P = 76,42 \text{ km/h}$  bzw. für den Schwellenwert ( $AUN = 9 \text{ cm}^3$ ) von  $V_P = 47,47 \text{ km/h}$  erweisen sich als völlig unrealistisch und viel zu niedrig. Vielmehr zeigen heutige Erfahrungswerte einen deutlich geringeren Einfluss des Zustandes der Fahrbahnoberfläche auf die gefahrene Geschwindigkeit. Gerade die Entwicklung der Fahrzeugtechnik lässt wesentlich höhere Fahrgeschwindigkeiten bzw. mehr Fahrkomfort bei zunehmender Fahrbahnverschlechterung zu (**s. Abb. 3.19**). Allerdings soll an dieser Stelle auch noch einmal betont werden, dass es sich bei dem psi nicht ausschließlich um einen Längsunebenheitsindex

handelt, sondern weitere Zustandsgrößen mit in diesen Wert einfließen (z.B. die Spurrinntiefe) (**s. 3.2.1.3**). Der Zusammenhang aus der AASHO- Studie wird hier nicht weiter verfolgt.

**zu b.:**

Einen weitaus fundierteren Wissensschatz über diese Zusammenhänge beinhaltet das HDM IV-Rechenprogramm. Neben den von der Weltbank koordinierten, weltweit durchgeführten Studien [042][043], sind gerade in den letzten Jahren auch Untersuchungen für europäische Verhältnisse vorangetrieben worden. Diese Ergebnisse [088][089] wurden in das Highway Development and Management System [041] implementiert. Das Modell der Geschwindigkeitsberechnung [090] soll in den Grundsätzen kurz dargestellt und auf die durchschnittliche deutsche Fahrzeugflotte angewendet werden.

Betrachtet wird nur das sog. „free speed model“, die freie Geschwindigkeit ohne Staumodellierung. Die Mittelung der Geschwindigkeitssegmente für die Fahrt bergauf und bergab ergibt die freie Geschwindigkeit der Fahrzeuggruppe FG. Das Modell der Geschwindigkeitsberechnung lautet:

$$VS_{FG} = \frac{e^{\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}}{\left[\left(\frac{1}{VDRIVE}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VBRAKE}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VCURVE}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VROUGH}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VDESIR}\right)^{\frac{1}{\beta}}\right]^{\beta}} \quad [041]$$

Die Formel setzt sich aus beschränkten Teilgeschwindigkeiten zusammen, die im einzelnen von den Charakteristika des betrachteten Straßenabschnittes und des Fahrzeuges beeinflusst werden.

$VS_{FG}$  - freie Geschwindigkeit der Fahrzeuggruppe FG

VDRIVE – Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrzeugdaten wie Motorleistung, Karosserie etc.

VBRAKE – Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Bremskraft des Fahrzeuges (Bergabfahrt)

VCURVE – Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Kurvigkeit der Straße

VROUGH – Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrbahnunebenheit

VDESIR – Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse (Idealgeschwindigkeit)

$\beta$  - fahrzeugabhängiger Weibull- Parameter (Verteilung der prognostizierten Geschwindigkeit)

$\sigma$  - (geschätzter) Korrekturwert des Standardfehlers bei der Geschwindigkeitsermittlung [041]

Für den in dieser Arbeit betrachteten Fall der geraden und ebenen Strecke und mit  $\sigma = 0$  für alle Fahrzeuge reduziert sich die Gleichung zu

$$VS_{FG} = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{VDRIVE}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VROUGH}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VDESIR}\right)^{\frac{1}{\beta}}\right]^{\beta}} \quad [m/s]$$

VDRIVE gibt im Wesentlichen die Zusammenhänge der Zugkraftgleichung wieder. Die gefahrene Geschwindigkeit wird in Abhängigkeit der Motorleistung, des Staudrucks (Querspanfläche A,  $c_w$ ) und des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$  dargestellt.

$VDRIVE = f(\text{Leistung [KW]}, A [m^2], c_w [], r_{dyn} [m], \text{Anzahl Räder}, f_R \text{ (IRI) [m/km]})$  (**s. 2.2**) [041]

VROUGH beschreibt die Geschwindigkeit der Vertikalbewegung des Fahrzeuges, die durch Fahrbahnunebenheiten verursacht wird.

$$VROUGH = \frac{ARVMAX}{VROUGH_{a0} * IRI_{av}} \quad [041]$$

mit:

ARVMAX – max. zulässige Geschwindigkeit der Radaufhängung in Vertikalrichtung

$VROUGH_{a0}$  - Regressionskoeffizient abhängig der Fahrzeuggruppe FG

$IRI_{av}$  - International Roughness Index (durchschnittlich)

In dieser Geschwindigkeitskomponente kommt der unmittelbare Zusammenhang zwischen gefahrener Geschwindigkeit und der Unebenheit zum Ausdruck.

VDESIR beschreibt die Geschwindigkeitsfunktion, die sich aus Linienführung und Entwurfsmerkmalen ergibt.

$$VDESIR = \text{MIN} \left[ VDESIR0, \frac{PLIMIT \cdot 1,1}{3,6} \right] \quad [041]$$

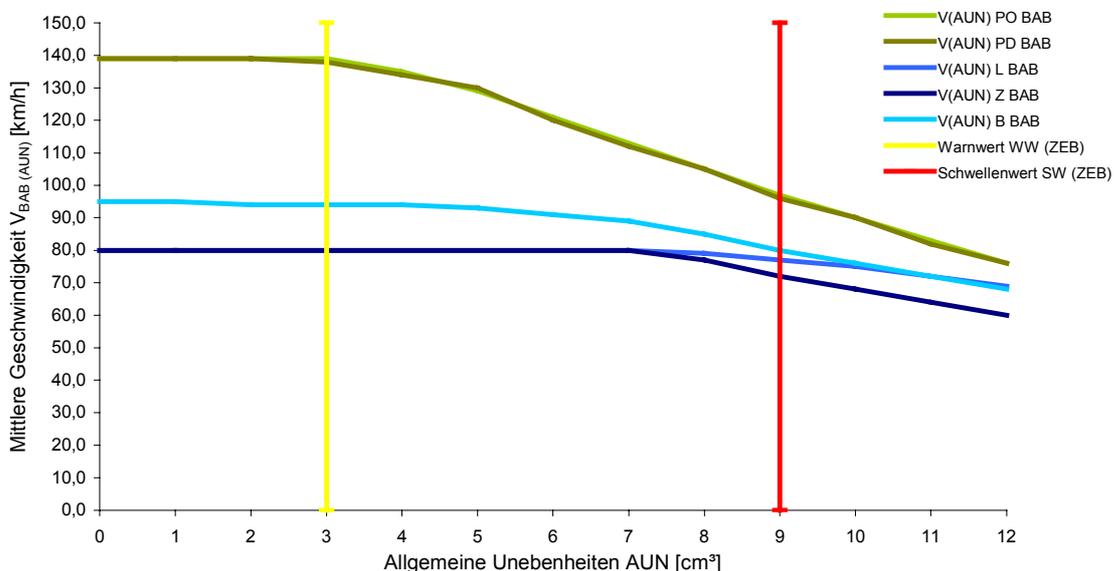
mit:

VDESIR0 – Entwurfsgeschwindigkeit ohne Geschwindigkeitsbegrenzungen

PLIMIT – Entwurfsgeschwindigkeit mit vorhandenen Geschwindigkeitsbegrenzungen

mit  $\beta = f(\text{FG P}) = 0,151$ ;  $\beta = f(\text{FG L}) = 0,137$ ;  $\beta = f(\text{FG Z}) = 0,110$ ;  $\beta = f(\text{FG B}) = 0,110$ ;

Das Ergebnis der zu erwartenden Geschwindigkeiten der Fahrzeuge einzelner Fahrzeuggruppen FG  $V_{FG}$  in Abhängigkeit des AUN-Wertes auf einer deutschen Autobahn ist in **Abb. 5.2** dargestellt. Bei der Anpassung an die deutschen Verhältnisse werden die Geschwindigkeiten nach *Kellermann* [082] (freie Anfangsgeschwindigkeit der Fahrzeuggruppe P) und die Vorgaben der StVO berücksichtigt.



**Abb. 5.2:** Mittlere Geschwindigkeitsentwicklung  $V_{FG}$  der Fahrzeugflotte in Abhängigkeit vom AUN-Wert [041][149]

Die Ergebnisse zeigen einen deutlich stärkeren Einfluss des AUN-Wertes auf das Fahrverhalten der Fahrzeuggruppe P als auf die anderen Fahrzeuggruppen.

In **Kapitel 5.3.3** wird die von der Unebenheit abhängige Geschwindigkeit und ihre Bedeutung für die Straßennutzerkosten noch einmal aufgegriffen.

### 5.3 Fahrzeugbetriebskosten FBK

Die Fahrzeugbetriebskosten umfassen alle Kosten, die durch den Gebrauch eines Fahrzeuges entstehen. Sie werden in den geschwindigkeitsunabhängigen Betriebskostengrundwert  $BGW_{FG}$  und die kraftstoffbezogene Komponente  $BKF_{FG}$  unterteilt.

$$FBK = \sum_t \sum_{FG} (BGW_{FG} + BKF_{FG}) * Q_{t,FG} * T_t * LG \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

mit:

FBK	- Fahrzeugbetriebskosten	[€/a]	
$BGW_{FG}$	- Betriebskostengrundwert der Fahrzeuggruppe FG	[€/Kfz* km]	(s. 5.3.1)
$BKF_{FG}$	- kraftstoffbezogene Betriebskosten der FG	[€/Kfz* km]	(s. 5.3.2)
Q	- Verkehrsstärke (t, FG)	[Kfz/h]	(s. 2.3.2)
T	- Dauer des Zeitraumes mit annähernd gleicher Verkehrsstärke	[h/a]	(s. 2.3.2)
LG	- Länge des betrachteten Netzabschnittes	[km]	
$FG_{FG}$	- Anteil der Fahrzeuggruppe FG am DTV	[%]	(s. 2.3.2)
t	- Nummer eines Zeitraumes mit annähernd gleichartigem Verkehrsablauf		(s. 2.3.2)

#### 5.3.1 Betriebskostengrundwert $BGW_{FG}$

Unter den geschwindigkeitsunabhängigen Betriebskosten werden die Kosten, die durch Abschreibung, Schmiermittel, Reifen, Instandhaltung und Wartung sowie durch Vorhaltung bedingt sind, zusammengefasst [036].

Der Betriebskostengrundwert ist als fahrzeug- und fahrleistungsgewichteter Repräsentativwert einer Fahrzeuggruppe zu betrachten. Der Betriebskostengrundwert der Fahrzeuguntergruppen PO (Ottomotor) und PD (Dieselmotor) sind in dem Betriebskostengrundwert  $BGW_P$  zusammengefasst [010][091].

Fahrzeuggruppe FG	Betriebskostengrundwert $BGW_{FG}$
[-]	[€/km*Kfz]
P	0,09
L	0,15
Z	0,25
B	0,47

Tabelle 5.7: Betriebskostengrundwert  $BGW_{FG}$  nach Fahrzeuggruppen, Kostenstand 2000 [010][033][091]

Der Betriebskostengrundwert ist vom Zustand der Fahrbahnoberfläche abhängig. Mit steigender Unebenheit nehmen Verschleiß und damit die Kosten für Instandhaltung und Wartung zu. Gesicherte Erkenntnisse bezüglich dieses Zusammenhanges sind aber bisher nur im Rahmen des Highway Development and Management Systems (HDM IV) [041] – allerdings für andere Verhältnisse - formuliert worden. In Deutschland liegen keine quantifizierbaren Ergebnisse vor.

Ferner ist durch die Kraftfahrzeugentwicklung der Einfluss des Fahrbahnzustandes auf den Verschleiß im Verlauf der letzten Jahre deutlich geringer geworden. Der Einfluss des Fahrbahnzustandes wird daher nur beim Kraftstoffverbrauch berücksichtigt.

**5.3.2 Kraftstoffbezogene Betriebskosten  $BK_{FG}$  (AUN)**

Die kraftstoffbezogenen Betriebskosten  $BK_{FG}$  stellen den veränderlichen Teil der Fahrzeugbetriebskosten dar. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Kraftstoffverbrauches ist seit den '70er Jahren aus ökonomischen und ökologischen Beweggründen intensiv untersucht worden und heute für jede Fahrzeuggruppe bekannt.

Die Kenntnisse über die Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauches vom Fahrbahnzustand sind jedoch als sehr grob und ungenau zu bezeichnen. In den Richtlinien für wirtschaftliche Vergleichsrechnungen im Straßenwesen [068] wurde 1971 erstmalig der Versuch unternommen, den Einfluss des Fahrbahnzustandes auf die Fahrzeugbetriebskosten zu berücksichtigen. *Meewes et. al.* [015] leitete 1975 theoretisch eine mathematische Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauches von der Geschwindigkeit, Linienführung und Qualität der Fahrbahnoberfläche ab. Alle Zusammenhänge sind jedoch als recht grob und verhältnismäßig ungenau zu bezeichnen.

Die Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauches vom Fahrbahnzustand ist daher unter Berücksichtigung der Beziehung zwischen dem AUN- und Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  in dieser Arbeit untersucht worden. Der geschwindigkeitsabhängige Kraftstoffverbrauch KV zeigt sich als Funktion der Fahrzeugkenngrößen und des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$ . Mit Hilfe von Motorkennfeldern [096] eines Fahrzeuges kann der Kraftstoffverbrauch für alle Fahrbahnzustände simulativ bestimmt werden. Diese Kraftstoffverbrauchssimulationen sind für die Repräsentativfahrzeuge am Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Berlin von Fahrzeugingenieuren durchgeführt worden [097]. Somit konnten konkrete Kraftstoffverbrauchsformeln für die einzelnen Fahrzeuggruppen hergeleitet werden.

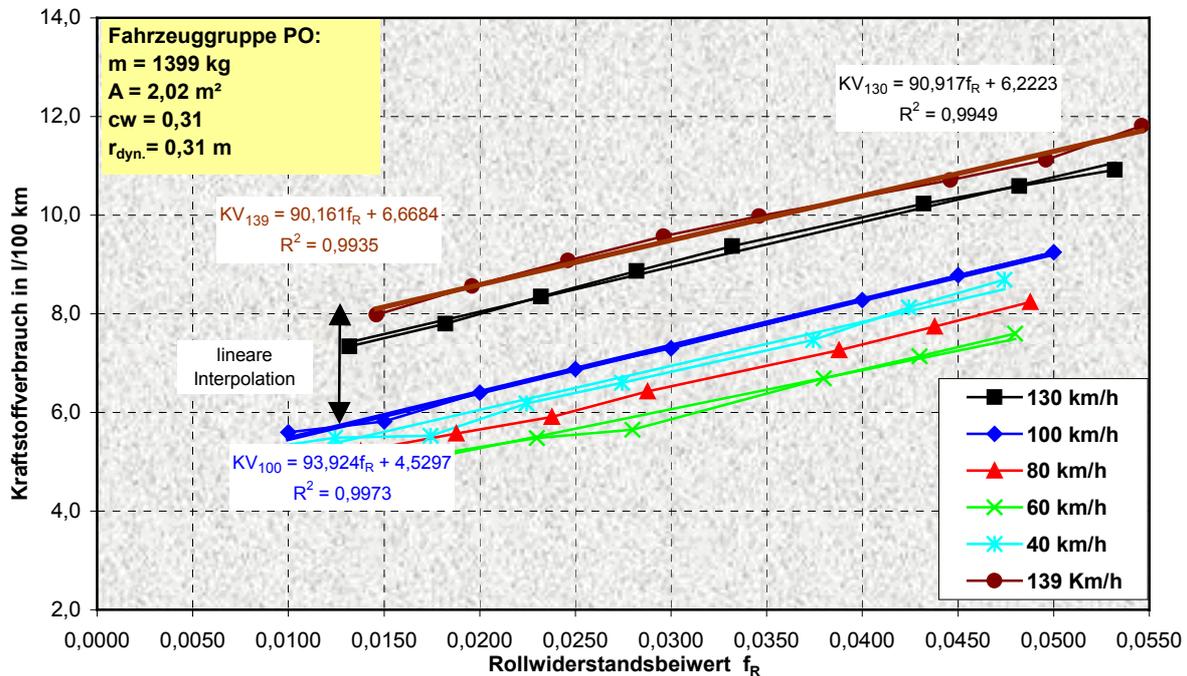
**Tabelle 5.9** zeigt die für die Kraftstoffverbrauchssimulation notwendigen technischen Eingangsparameter.

FG	PO/ PD				B/ L/ Z			
	m [kg]	A [m <sup>2</sup> ]	$C_W$ []	$r_{dyn}$ [m]	m [t]	A [m <sup>2</sup> ]	$C_W$ []	$r_{dyn}$ [m]
Fiz- werte	1399/ 1429	2,02/ 2,03	0,31	0,31	10,2/ 7,3/ 31,4	7,51/ 8,30/ 9,27	0,65/ 0,66/ 0,75	0,50/ 0,43/ 0,52
V [km/h]	140 130 100 80 60 40				100 80 60 40			

**Tabelle 5.8: Berechnungsmatrix zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauches nach der Fahrwiderstandssimulation [097]**

Neben der Geschwindigkeit V wurde der Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  variiert. Als Ergebnis kann der Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Straßenzustandes ( $f_R \leftrightarrow$  AUN) dargestellt werden.

Exemplarisch für die ermittelten Kraftstoffverbrauchsfunctionen zeigt **Abb. 5.3** die Ergebnisse der Fahrzeuggruppe PO. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit wird dabei durch lineare Interpolation ermittelt.



**Abb. 5.3:** Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$  und der Geschwindigkeit  $V$ , FG PO [097]

Für den relevanten Geschwindigkeitsbereich der Fahrzeuggruppe PO leitet sich aus den Ergebnissen nachfolgender Kraftstoffverbrauch ab (**s. Abb. 5.3**).

$$KV_{PO}(V, f_R) = 0,0536 \cdot V + 93,924 \cdot f_R - 0,8303 \quad [l/100km]$$

Zur Übersicht sind nachfolgend auch die Kraftstoffverbrauchsfunctionen der restlichen Fahrzeuggruppen angegeben. Alle weiteren Ergebnisse sind **Anhang A4** zu entnehmen.

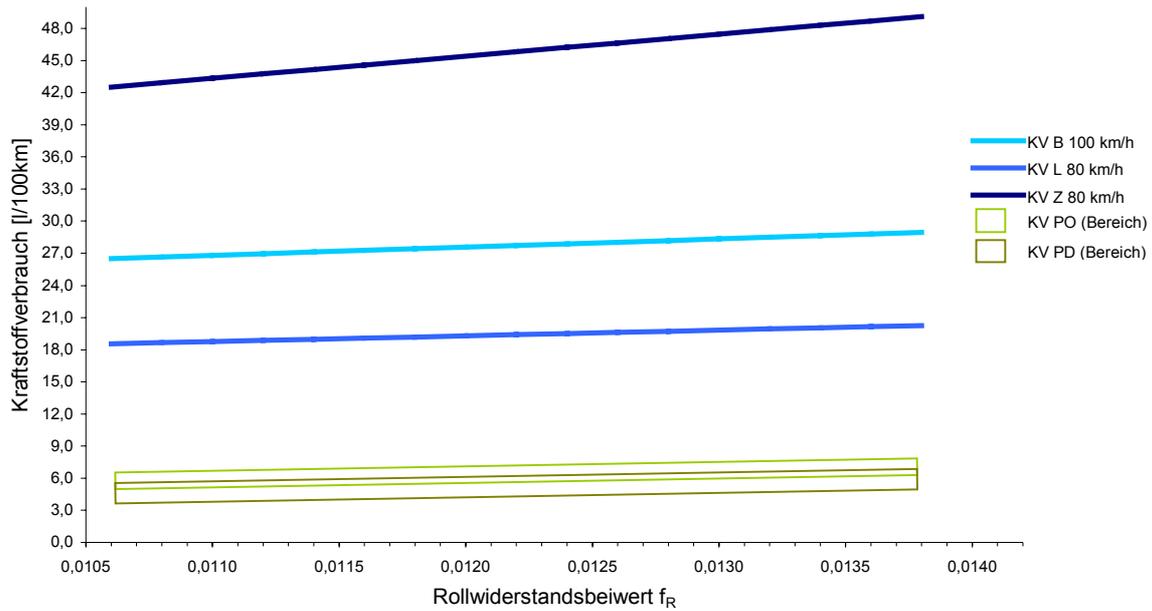
$$KV_{PD}(V, f_R) = 0,0540 \cdot V + 100,79 \cdot f_R - 2,0809 \quad [l/100km]$$

$$KV_{L\ 80\ km/h}(f_R) = 533,98 \cdot f_R + 12,895 \quad [l/100km]$$

$$KV_{Z\ 80\ km/h}(f_R) = 2060,2 \cdot f_R + 20,681 \quad [l/100km]$$

$$KV_{B\ 80\ km/h}(f_R) = 765,05 \cdot f_R + 18,383 \quad [l/100km]$$

Graphisch sind die Ergebnisse in **Abb. 5.4** dargestellt. Für die Fahrzeuggruppen PO und PD ist als Folge der unterschiedlichen Geschwindigkeiten in den Verkehrsstundengruppen  $t$  ein Verbrauchsbereich zusammenfassend gezeigt.



**Abb. 5.4:** Einfluss des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$  auf den Kraftstoffverbrauch der repräsentativen Fahrzeuge der FG

Mit dem funktionalen Zusammenhang zwischen dem AUN- und Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$

$$f_{R \text{ Pkw mittel}} = 0,0001 \cdot \text{AUN} + 0,0129 \quad (\text{Gl. 3.9})$$

$$f_{R \text{ Lkw mittel}} = 0,0002 \cdot \text{AUN} + 0,0098 \quad (\text{Gl. 3.10})$$

lässt sich folglich der Kraftstoffverbrauch KV als Funktion der Unebenheiten schreiben.

$$\text{KV}_{\text{PO}}(V, \text{AUN}) = 0,0536 \cdot V + 0,0094 \cdot \text{AUN} + 0,38 \quad [\text{l}/100\text{km}]$$

$$\text{KV}_{\text{PD}}(V, \text{AUN}) = 0,0540 \cdot V + 0,01 \cdot \text{AUN} - 0,78 \quad [\text{l}/100\text{km}]$$

$$\text{KV}_{\text{L 80 km/h}}(\text{AUN}) = 0,107 \cdot \text{AUN} + 18,128 \quad [\text{l}/100\text{km}]$$

$$\text{KV}_{\text{Z 80 km/h}}(\text{AUN}) = 0,412 \cdot \text{AUN} + 40,871 \quad [\text{l}/100\text{km}]$$

$$\text{KV}_{\text{B 80 km/h}}(\text{AUN}) = 0,153 \cdot \text{AUN} + 25,880 \quad [\text{l}/100\text{km}]$$

Diese Funktionen beschreiben demnach den unmittelbaren Zusammenhang zwischen den Unebenheiten in Längsrichtung AUN und dem Kraftstoffverbrauch KV (**Abb. 5.5**).

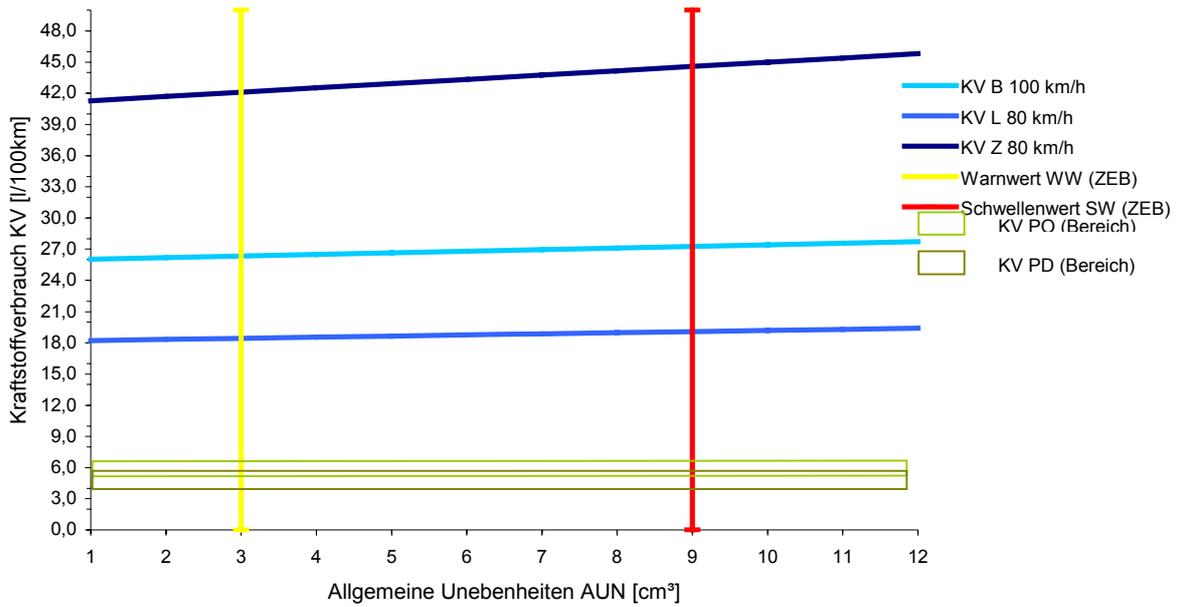


Abb. 5.5: Einfluss der Allgemeinen Unebenheiten AUN auf den Kraftstoffverbrauch der FG

Das Ergebnis kann auch als Veränderung des Kraftstoffverbrauches  $\Delta KV$  formuliert werden (Abb. 5.6). Unter der Veränderung des Kraftstoffverbrauches wird hier der Mehrverbrauch an Kraftstoff beim Durchfahren eines Streckenabschnittes mit dem gemessenen AUN-Wert im Vergleich zum gleichen Streckenabschnitt mit einem AUN-Wert =  $1\text{cm}^3$  verstanden.

$$\Delta KV_{FG} = KV_{FG} (AUN) - KV_{FG} (AUN = 1) \quad [l/100km]$$

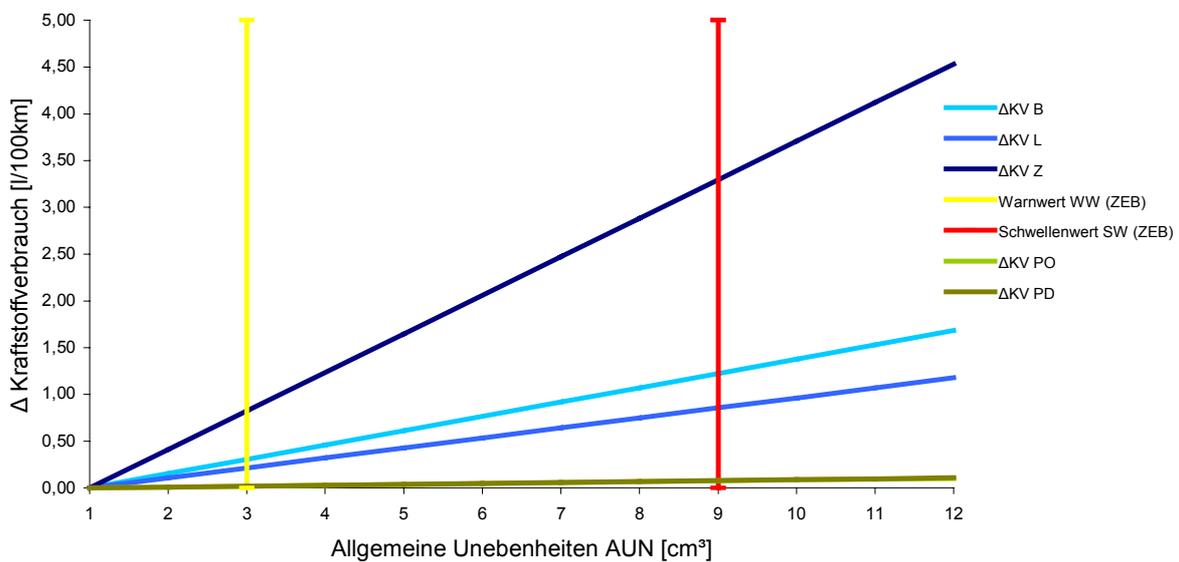


Abb. 5.6: Veränderung des Kraftstoffverbrauches  $\Delta KV$  als Funktion der Allgemeinen Unebenheiten AUN

Unter Berücksichtigung des Kraftstoffkostensatzes  $K_k$  lassen sich die kraftstoffbezogenen Betriebskosten BKF für jede Fahrzeuggruppe FG berechnen. Bei der Fahrzeuggruppe PO wird der

Kostensatz für Benzin angesetzt, alle anderen Fahrzeuggruppen werden per Definition mit Dieselmotoren betrieben.

Die kraftstoffbezogenen Betriebskosten ergeben sich aus dem Produkt des Kraftstoffverbrauches  $KV_{FG}$  und dem Kraftstoffkostensatz  $K_K$ , der steuerbereinigt in Ansatz gebracht wird (s. 1.4.2.2).

$$BKF_{FG} = \frac{KV_{FG}(V_{FG}, f_R) \cdot K_K}{100} \quad [€/ km \cdot Kfz]$$

mit:

$BKF_{FG}$	- kraftstoffbezogene Betriebskosten der Fahrzeuggruppe	[€/ km·Kfz]
$KV_{FG}(V_{FG}, f_R)$	- Kraftstoffverbrauch der FG	[l/100km·Kfz]
$K_K$	- Kraftstoffkostensatz	[€/l]
$V_{FG}$	- maßgebende Fahrgeschwindigkeit der Fahrzeuggruppe	[km/h]
$f_R$	- Rollwiderstandsbeiwert	[-]

Kraftstoffart	Kraftstoffkostensatz $K_K$
[-]	[€/l]
Benzin	0,46
Diesel	0,38

Tabelle 5.9: Kraftstoffkostensatz  $K_K$  nach Kraftstoffart, Kostenstand 2000 [010][033][079]

Unter Berücksichtigung des Zusammenhanges zwischen dem AUN- und Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  können die kraftstoffbezogenen Betriebskosten als Funktion der Unebenheit angegeben werden.

$$BKF_{FG} = f(V, AUN) = \frac{KV_{FG}(V, AUN) \cdot K_K}{100} \quad [€/km \cdot Kfz]$$

$$BKF_{PO, V} = \frac{(0,0536 \cdot V + 0,0094 \cdot AUN + 0,38) \cdot K_{K \text{ Benzin}}}{100} \quad [€/km \cdot Kfz]$$

$$BKF_{PD, V} = \frac{(0,054 \cdot V + 0,107 \cdot AUN - 0,78) \cdot K_{K \text{ Diesel}}}{100} \quad [€/km \cdot Kfz]$$

$$BKF_{L, V = 80 \text{ km/h}} = \frac{(0,107 \cdot AUN + 18,128) \cdot K_{K \text{ Diesel}}}{100} \quad [€/km \cdot Kfz]$$

$$BKF_{Z, V = 80 \text{ km/h}} = \frac{(0,412 \cdot AUN + 40,871) \cdot K_{K \text{ Diesel}}}{100} \quad [€/km \cdot Kfz]$$

$$BKF_{B, V = 100 \text{ km/h}} = \frac{(0,153 \cdot AUN + 25,880) \cdot K_{K \text{ Diesel}}}{100} \quad [€/km \cdot Kfz]$$

Die durchschnittlichen jährlichen Fahrzeugbetriebskosten FBK ergeben sich folglich aus der Summe des Betriebskostengrundwertes  $BGW_{FG}$  und der vom AUN-Wert abhängigen kraftstoffbezogenen Betriebskosten  $BKF_{FG}$ .

$$FBK = \sum_t \sum_{FG} (BGW_{FG} + BKF_{FG}(AUN)) \cdot Q_{t,FG} \cdot T_t \cdot LG \quad \left[ \frac{€}{a} \right]$$

**Tabelle 5.10** zeigt in einer Übersicht (unterteilt nach Fahrzeuggruppen) die Eingangswerte zur Berechnung der Fahrzeugbetriebskosten.

		Verkehrsstärke Q <sub>FG</sub>				Kraftstoffbezogene Betriebskosten BKF <sub>FG</sub>					Betriebskostengrundwert BGW <sub>FG</sub>			
t	Dauer T	Q <sub>P</sub>	Q <sub>L</sub>	Q <sub>Z</sub>	Q <sub>B</sub>	BKF <sub>PO</sub>	BKF <sub>PD</sub>	BKF <sub>L</sub>	BKF <sub>Z</sub>	BKF <sub>B</sub>	BGW <sub>PO, PD</sub>	BGW <sub>L</sub>	BGW <sub>Z</sub>	BGW <sub>B</sub>
[-]	[h/a]	[Kfz/h]				[€/km*Kfz]					[€/km*kfz]			
1	90	2109	41	178	2	0,03	0,02	0,07	0,16	0,10	0,09	0,15	0,25	0,47
2	120	1920	41	178	2	0,03	0,02	0,07	0,16	0,10				
3	390	1721	41	178	2	0,03	0,02	0,07	0,16	0,10				
4	1500	1435	41	178	2	0,03	0,02	0,07	0,16	0,10				
5	6660	629	22	99	1	0,04	0,03	0,07	0,16	0,10				

**Tabelle 5.10: Eingangswerte zur Bestimmung der Fahrzeugbetriebskosten der Fahrzeugflotte bei AUN = 1cm<sup>3</sup>**

Exemplarisch wird der Rechenweg für die Bezugsgröße AUN = 1cm<sup>3</sup> bei einer Streckenlänge von 1 km aufgezeigt. Für alle anderen Fahrbahnzustände sind die Fahrzeugbetriebskosten in **Tabelle 5.11** aufgeführt.

$$\begin{aligned}
 FBK_{PO} &= ((0,12) \cdot (2109 \cdot 90 + 1920 \cdot 120 + 1721 \cdot 390 + 1435 \cdot 1500) + (0,13) \cdot 629 \cdot 6660) \cdot 0,766 = 713.449 \\
 FBK_{PD} &= ((0,11) \cdot (2109 \cdot 90 + 1920 \cdot 120 + 1721 \cdot 390 + 1435 \cdot 1500) + (0,12) \cdot 629 \cdot 6660) \cdot 0,234 = 200.601 \\
 FBK_L &= (0,15 + 0,07) \cdot (41 \cdot 90 + 41 \cdot 120 + 41 \cdot 390 + 41 \cdot 1500 + 22 \cdot 6660) = 51.389 \\
 FBK_Z &= (0,25 + 0,16) \cdot (178 \cdot 90 + 178 \cdot 120 + 178 \cdot 390 + 178 \cdot 1500 + 99 \cdot 6660) = 426.829 \\
 FBK_B &= (0,47 + 0,10) \cdot (2 \cdot 90 + 2 \cdot 120 + 2 \cdot 390 + 2 \cdot 1500 + 1 \cdot 6660) = 6.129 \\
 \mathbf{FBK_{AUN=1} &= 1.389.319 \text{ [€/km*RI*a]}}
 \end{aligned}$$

		BKF [€/km*Kfz]											FBK <sub>FG</sub> (AUN)							
		PO v = in[km/h]					PD v = in[km/h]					L <sub>80</sub>	Z <sub>80</sub>	B <sub>100</sub>	PO	PD	L	Z	B	gesamt
AUN		120	123	127	131	139	120	123	127	131	139	80	80	100						
1	0,031	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	0,023	0,024	0,024	0,026	0,069	0,157	0,100	711.616	200.138	51.012	420.359	6.193	<b>1.389.319</b>	
2	0,031	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	0,023	0,024	0,025	0,026	0,070	0,158	0,102	711.862	200.846	51.107	421.977	6.215	<b>1.392.005</b>	
3	0,031	0,032	0,033	0,034	0,036	0,023	0,023	0,024	0,025	0,027	0,070	0,160	0,104	712.108	201.553	51.201	423.594	6.236	<b>1.394.692</b>	
4	0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,023	0,024	0,025	0,026	0,027	0,071	0,162	0,106	712.354	202.260	51.296	425.212	6.257	<b>1.397.379</b>	
5	0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,024	0,024	0,025	0,026	0,028	0,071	0,163	0,108	712.600	202.967	51.390	426.829	6.278	<b>1.400.065</b>	
6	0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,024	0,025	0,026	0,026	0,028	0,071	0,165	0,110	712.847	203.675	51.485	428.447	6.299	<b>1.402.752</b>	
7	0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,025	0,025	0,026	0,027	0,028	0,072	0,166	0,112	713.093	204.382	51.579	430.064	6.320	<b>1.405.439</b>	
8	0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,025	0,026	0,026	0,027	0,029	0,072	0,168	0,114	713.339	205.089	51.674	431.682	6.342	<b>1.408.125</b>	
9	0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,025	0,026	0,027	0,028	0,029	0,073	0,169	0,116	713.585	205.796	51.769	433.299	6.363	<b>1.410.812</b>	
10	0,032	0,033	0,033	0,034	0,036	0,026	0,026	0,027	0,028	0,030	0,073	0,171	0,118	713.831	206.503	51.863	434.917	6.384	<b>1.413.499</b>	
11	0,032	0,033	0,034	0,035	0,036	0,026	0,027	0,028	0,028	0,030	0,073	0,173	0,120	714.078	207.211	51.958	436.534	6.405	<b>1.416.185</b>	
12	0,032	0,033	0,034	0,035	0,037	0,027	0,027	0,028	0,029	0,030	0,074	0,174	0,122	714.324	207.918	52.052	438.152	6.426	<b>1.418.872</b>	

Betriebskostengrundwert BGW <sub>FG</sub>				Verkehrsstärke Q <sub>FG</sub>					
BGW <sub>PO, PD</sub>	BGW <sub>L</sub>	BGW <sub>Z</sub>	BGW <sub>B</sub>	t	Dauer T	Q <sub>P</sub>	Q <sub>L</sub>	Q <sub>Z</sub>	Q <sub>B</sub>
[€/km*kfz]				[-]	[h/a]	[Kfz/h]			
0,09	0,15	0,25	0,47	1	90	2109	41	178	2
				2	120	1920	41	178	2
				3	390	1721	41	178	2
				4	1500	1435	41	178	2
				5	6660	629	22	99	1

**Tabelle 5.11: Fahrzeugbetriebskosten FBK als Funktion der AUN [€/a]**

Die Berechnungen der Fahrzeugbetriebskosten für die repräsentative Fahrzeugflotte auf Autobahnen sind tabellenkalkulatorisch ermittelt worden. Das Schema ist in **Tab. 5.11** dargestellt. Der Bewertungshintergrund nach der ZEB ist in Form des Warn- (gelb) und Schwellenwertes (rot) angegeben.

Graphisch werden die Absolutwerte der Fahrzeugbetriebskosten und die Kostendifferenz in Bezug auf den Fahrzeugbetrieb bei einer Fahrbahnebenheit von  $AUN = 1\text{cm}^3$  dargestellt (**s. Abb. 5.7 und 5.8**).

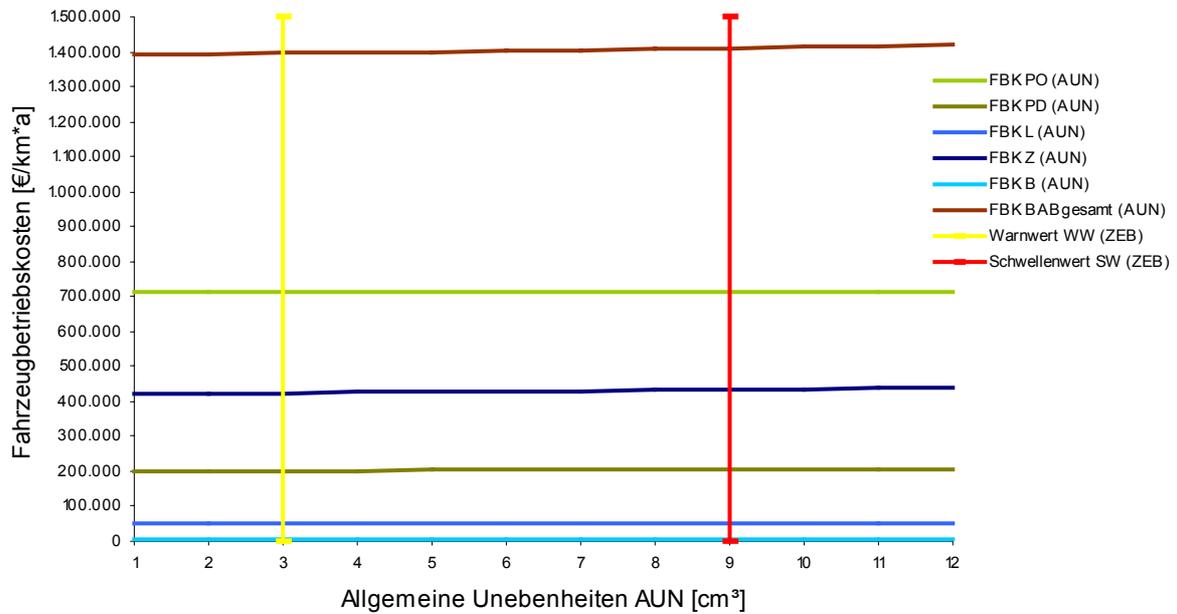


Abb. 5.7: Fahrzeugbetriebskosten  $FBK_{FG}$  für  $DTV/2 = 24.000$ , BAB, in Abhängigkeit der AUN [€/km\*a]

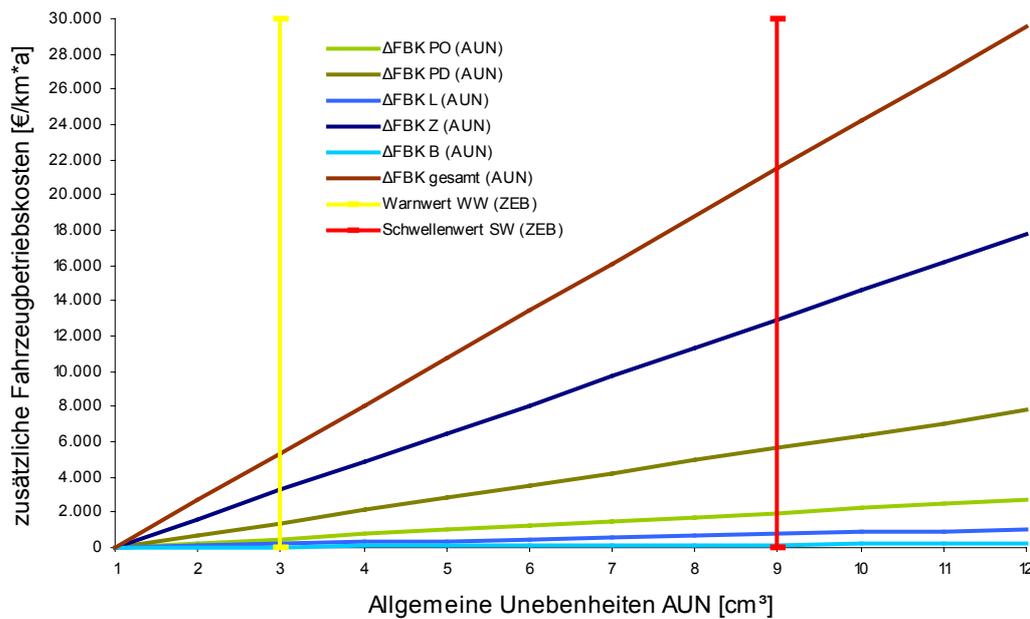


Abb. 5.8: Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten  $\Delta FBK_{BAB}$   $DTV/2 = 24.000$  in Abhängigkeit der AUN [€/km\*a]

Im Gegensatz zu den eingangs erwähnten, bisher verfügbaren sehr ungenauen Zusammenhängen zwischen Kraftstoffverbrauch KV und allgemein formulierten Fahrbahnzuständen, ist hier konkret eine Funktionalität abgeleitet, die den Einfluss der AUN-Werte auf die Fahrzeugbetriebskosten monetarisiert und sich folglich in die Nutzen-Kosten-Analysen integrieren lässt.

Im Vergleich zu den hier abgeleiteten Ergebnissen gehen andere Studien von einem wesentlich stärkeren Einfluss der Unebenheiten auf die Fahrzeugbetriebskosten aufgrund extrem formulierter Randbedingungen bzw. theoretischer Annahmen aus. In der US-amerikanischen Pavement Ncat Test Track Studie [141] z.B. ist der Zusammenhang zwischen dem mittleren Kraftstoffverbrauch und den Fahrbahnunebenheiten aus einem siebenwöchigen Dauerfahrversuch (führerlos) eines Schwerlasttransporters (670 KN) vor und nach der Durchführung einer Erhaltungsmaßnahme ohne Berücksichtigung der Witterung etc. ermittelt worden. Bei der schwedischen VETO-Studie [142] hingegen ist der Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Fahrbahnunebenheiten theoretisch errechnet worden. Grundlage waren dabei physikalische Ableitungen aus Energieverlusten von über Einzelhindernisse rollenden Fahrzeugen. Zusammen mit den Ergebnissen der HDM III – Studien wurde daraus das VETO- Programm entwickelt.

Dieses lässt auf eine wirtschaftlich sichere Prognose der vorliegenden Arbeit schließen.

### 5.3.3 Kostenvergleich $\Delta ZK - \Delta FBK$ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit $V_{AUN}$

Die Fahrgeschwindigkeit besitzt einen doppelten Einfluss auf die Straßennutzerkosten SNK. Sie beeinflusst neben den Reisezeitkosten ZK (s. 5.2) auch den Kraftstoffverbrauch (s. 5.3.2). Mit abnehmender Geschwindigkeit V erhöhen sich die Reisezeitkosten ZK. Der Kraftstoffverbrauch und damit die Fahrzeugbetriebskosten nehmen hingegen tendenziell ab.

Diese Mehr- und Minderkosten werden in diesem Abschnitt quantitativ gegenübergestellt, um dem möglichen Einfluss der AUN-Werte auf die gefahrene Geschwindigkeit Rechnung zu tragen.

Den Vergleichsrechnungen liegt das Geschwindigkeitsmodell nach dem HDM IV zugrunde (s. 5.2.2.4).

Wenn von einer Verringerung des Kraftstoffverbrauches bei abnehmender Geschwindigkeit ausgegangen wird, so bezieht sich diese Aussage auf den geschwindigkeitsrelevanten Bereich von Autobahnen. In Bereichen kleinerer Geschwindigkeiten steigt der Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Wahl des Getriebeganges erneut an (s. Anhang A4).

Der qualitative Verlauf der Kostenentwicklungen wird zur Vereinfachung ohne Berücksichtigung der Verkehrsstundengruppen t bestimmt.

Daraus folgt für die Berechnung der Reisezeitkosten ZK:

$$ZK = \sum_t \sum_{FG} \left( \frac{Q}{V_{(AUN)}} \right)_{t,FG} * T_t * LG * WT_{FG} \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

$$\approx \sum_{FG} \left( \frac{(DTV/2) * Ant_{FG}}{V_{(AUN)FG}} \right) * 365 * LG * WT_{FG} \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

ZK - Reisezeitkosten [€/a]

Q - Verkehrsstärke (t, FG) [Kfz/h]

V	- maßgebende Geschwindigkeit (t, FG)	[km/h]
T	- Dauer des Zeitraumes mit annähernd gleicher Verkehrsstärke	[h/a]
WT <sub>FG</sub>	- Zeitkostensatz für die Fahrzeuggruppe FG	[€/Kfz*h]
LG	- Länge des betrachteten Netzabschnittes	[km]
Ant <sub>FG</sub>	- Anteil der Fahrzeuggruppe FG am DTV	[%]
t	- Nummer eines Zeitraumes mit annähernd gleichartigem Verkehrsablauf.	

Für die Fahrzeugbetriebskosten FBK lässt sich die Gleichung wie folgt formulieren:

$$FBK = \sum_t \sum_{FG} (BGW_{FG} + BKF(V_{AUN})_{FG}) * Q_{t,FG} * T_t * LG \quad \left[ \frac{\text{€}}{\text{a}} \right]$$

$$\approx \sum_{FG} (BGW_{FG} + BKF(V_{AUN})_{FG}) * (DTV / 2) * Ant_{FG} * 365 * LG \quad \left[ \frac{\text{€}}{\text{a}} \right]$$

mit:

DTV/2 = 48.000/2 = 24.000 [Kfz/24h] (durchschnittliche Verkehrsbelastung BAB pro Fahrtrichtung)

- PO = 65,3 %
- PD = 19,9 %
- L = 2,8 %
- Z = 11,9 %
- B = 0,1 %                      **(s. 2.3.2)**

### 5.3.3.1 Zusätzliche Reisezeitkosten ΔZK infolge V(AUN)

Für die Berechnung der Reisezeitkosten ergibt sich aus den genannten Größen

$$ZK = 8,76 * 10^6 \text{ [Kfz* km/a]} * \sum_{FG} \left( \frac{Ant_{FG}}{V_{(AUN)FG}} \right) * WT_{FG} * LG$$

mit:

Ant <sub>FG</sub>	- Anteil der Fahrzeuggruppe FG am DTV
V <sub>(AUN)</sub>	- Geschwindigkeitsmodell nach HDM IV
WT <sub>FG</sub>	- Zeitkostensatz der Fahrzeuggruppe FG ( <b>Tabelle 5.2</b> )
LG	- Abschnittslänge

Die Ergebnisse sind in **Tabelle 5.12** dargestellt. Es werden sowohl die Reisezeitkosten ZK<sub>gesamt</sub> für die gesamte Fahrzeugflotte als auch die Veränderung der Reisezeitkosten ΔZK mit veränderlichen AUN-Werten aufgeführt. Die zusätzlichen Reisezeitkosten ΔZK werden durch die Gleichung

$$\Delta ZK = ZK_{AUN} - ZK_{AUN=1} \text{ [€/a]}$$

bestimmt.

AUN [cm³]	V <sub>gesamt</sub> (angepasst HDM IV) [km/h]					ZK <sub>f(V, AUN)</sub> [€/a]						Δ ZK
	PO	PD	L	Z	B	PO	PD	L	Z	B	ZK gesamt	
0	139	139	80	80	95	181.074	55.182	73.277	445.643	6.575	761.750	0
1	139	139	80	80	95	181.074	55.182	73.277	445.643	6.575	761.750	0
2	139	139	80	80	94	181.074	55.182	73.277	445.643	6.645	761.820	70
3	139	138	80	80	94	181.074	55.582	73.277	445.643	6.645	762.220	470
4	135	134	80	80	94	182.710	56.096	73.277	445.643	6.645	764.371	2.621
5	129	130	80	80	93	185.355	56.052	73.277	445.643	6.716	767.043	5.293
6	121	120	80	80	91	195.530	60.084	73.277	445.643	6.864	781.397	19.647
7	113	112	80	80	89	207.145	63.691	73.277	445.643	7.018	796.774	35.023
8	105	105	79	77	85	210.942	64.284	74.205	463.006	7.348	819.785	58.035
9	97	96	77	72	80	215.366	66.316	76.132	495.159	7.807	860.780	99.030

Tabelle 5.12: Reisezeitkosten ZK in Abhängigkeit der veränderlichen Geschwindigkeit V(AUN)

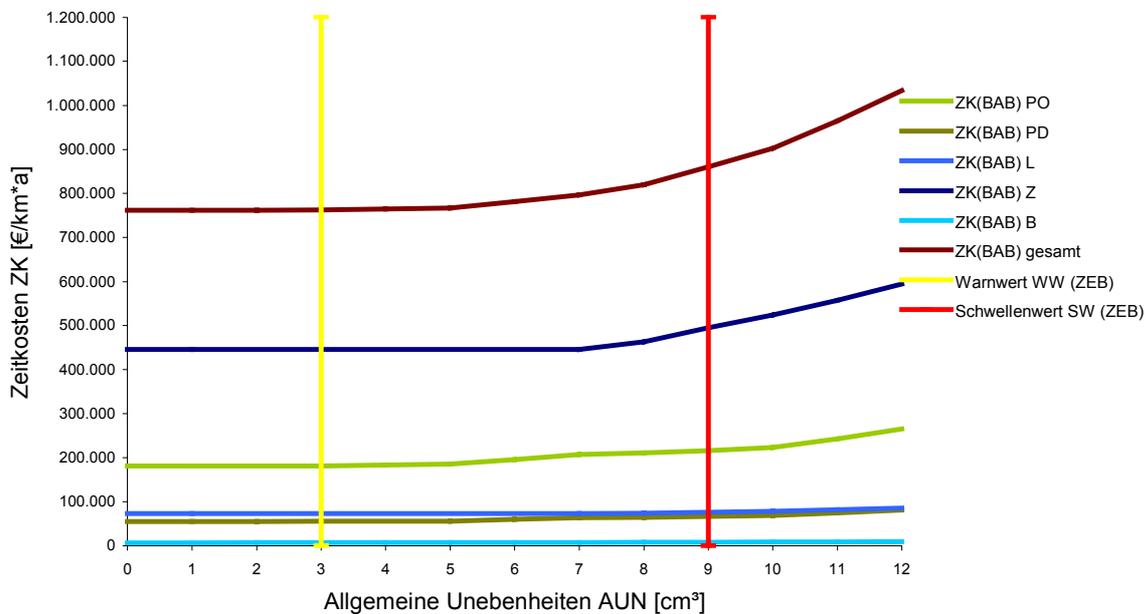


Abb. 5.9: Reisezeitkosten ZK in Abhängigkeit der AUN, ZK = f(AUN)

Erst bei der Überschreitung des Schwellenwertes ist ein deutlicher Einfluss der AUN-Werte auf das Geschwindigkeitsniveau und damit auf die Reisezeitkosten zu verzeichnen.

### 5.3.3.2 Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten ΔFBK infolge V(AUN)

Für die Berechnung des Kraftstoffverbrauches KV wird in Abhängigkeit des prognostizierten Geschwindigkeitsbereiches V(AUN) linear interpoliert. Die Interpolationsgrenzen sind durch die ermittelten Kraftstoffverbrauchsfunktionen gegeben (s. Anhang A4).

$$FBK = 8,76 \cdot 10^6 \text{ [Kfz} \cdot \text{km/a]} \cdot \sum_{FG} BGW_{FG} + BKF(V_{AUN})_{FG} \cdot Ant_{FG}$$

mit:

BGW – Betriebskostengrundwert der Fahrzeuggruppe FG (**Tabelle 5.7**)

$$BKF = \frac{KV(V, AUN) * K_K}{100} \quad (\text{s. 5.3.2})$$

KV – Kraftstoffverbrauchsfunktion, geschwindigkeits- und unebenheitsabhängig (**Tab. 5.13**)

K<sub>K</sub> – Kraftstoffkostensatz

FG [-]	AUN – Bereich [cm³]	V – Bereich [km/h]	Mittlerer Kraftstoffverbrauch KV (V,AUN) [l/km]
PO	0 – 9	139 - 97	$KV = 0,0536 * V + 0,0094 * AUN + 0,38$
PD	0 – 9	139 – 97	$KV = 0,0540 * V + 0,0100 * AUN - 0,78$
L	0 – 20	80 – 40	$KV = 0,018 * V + 0,0950 * AUN + 4,644$
Z	0 – 20	80 – 40	$KV = 0,1 * V + 0,4212 * AUN + 32,1758$
B	0 – 20	100 – 40	$KV = 0,21 * V + 0,1389 * AUN + 6,1207$

**Tabelle 5.13: Kraftstoffverbrauch als Funktion der Geschwindigkeit V und der AUN (lineare Interpolation, Anhang A4)**

Mit den beschriebenen Funktionen lassen sich für jede Unebenheit in Abhängigkeit der veränderlichen Geschwindigkeit der Kraftstoffverbrauch und folglich die Fahrzeugbetriebskosten FBK berechnen.

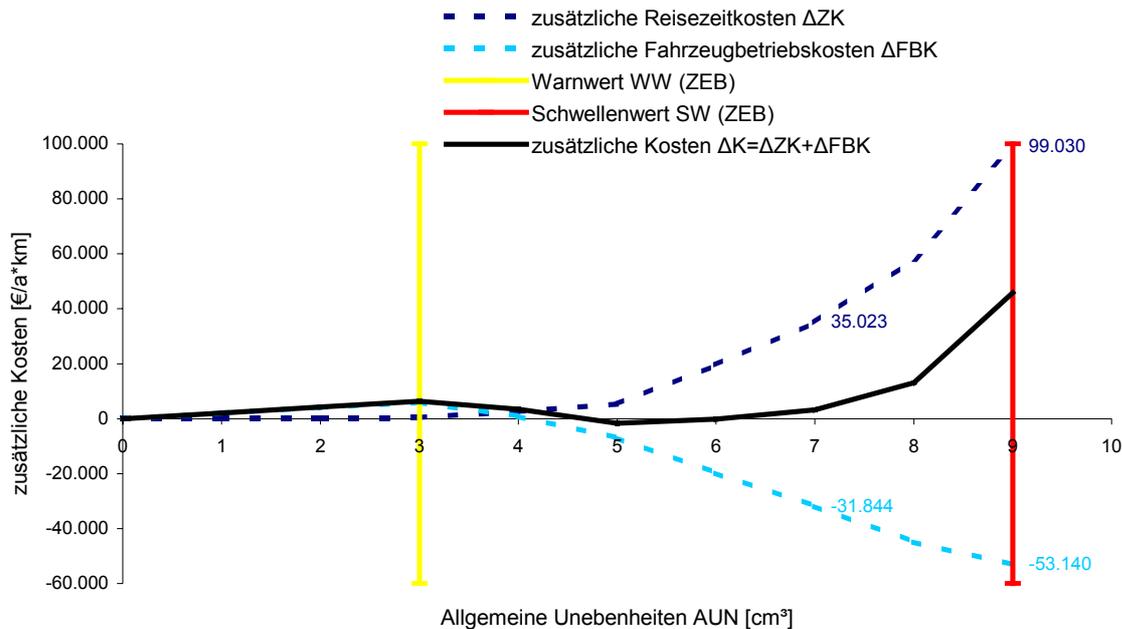
AUN [cm³]	V <sub>(angepasst HDM IV)</sub> [km/h]					FBK <sub>f(V, AUN)</sub> [€/a]						
	PO	PD	L	Z	B	PO	PD	L	Z	B	FBK <sub>gesamt</sub>	Δ FBK
0	139	139	80	80	95	720.869	201.447	54.542	419.757	4.985	<b>1.401.600</b>	<b>0</b>
1	139	139	80	80	95	721.116	201.513	54.631	421.426	4.990	<b>1.403.675</b>	<b>2.075</b>
2	139	139	80	80	94	721.363	201.579	54.719	423.094	4.987	<b>1.405.744</b>	<b>4.144</b>
3	139	138	80	80	94	721.611	201.288	54.808	424.763	4.992	<b>1.407.461</b>	<b>5.861</b>
4	135	134	80	80	94	716.217	199.923	54.896	426.431	4.997	<b>1.402.464</b>	<b>864</b>
5	129	130	80	80	93	708.002	198.559	54.985	428.100	4.994	<b>1.394.639</b>	<b>-6.961</b>
6	121	120	80	80	91	696.966	195.048	55.074	429.768	4.985	<b>1.381.840</b>	<b>-19.760</b>
7	113	112	80	80	89	685.930	192.252	55.162	431.437	4.975	<b>1.369.756</b>	<b>-31.844</b>
8	105	105	79	77	85	674.894	189.814	55.083	431.917	4.952	<b>1.356.660</b>	<b>-44.940</b>
9	97	96	77	72	80	670.079	187.019	54.836	431.605	4.922	<b>1.348.460</b>	<b>-53.140</b>

**Tabelle 5.14: Fahrzeugbetriebskosten FBK als Funktion der Geschwindigkeit und der AUN**

Die zusätzlichen Gesamtkosten ΔK aus dem Einfluss der AUN-Werte auf die gefahrene Geschwindigkeit V(AUN) bilden sich aus der Summe der Teilkostenbereiche zusätzlicher Reisezeit- und Fahrzeugbetriebskosten.

$$\Delta K = f(V_{AUN}) = \Delta ZK_{V(AUN)} + \Delta FBK_{V(AUN)}$$

Das Ergebnis ist in **Abb. 5.10** graphisch dargestellt.



**Abb. 5.10:** Zusätzliche Kosten  $\Delta K = \Delta ZK + \Delta FBK$  in Abhängigkeit der AUN (als Einflussgröße auf die Geschwindigkeit)

Im Bereich bis  $AUN = 7 \text{ cm}^3$  kann näherungsweise von einer Kostenneutralität ausgegangen werden, d.h. die zusätzlichen Reisezeitkosten  $\Delta ZK$  durch die längere Fahrdauer werden durch die Einsparungen infolge verminderten Kraftstoffverbrauches weitestgehend kompensiert: Es gilt  $\Delta K \approx 0$ . Erst bei  $AUN > 7 \text{ cm}^3$  nimmt der Einfluss der verminderten Fahrgeschwindigkeit auf die Reisezeitkosten  $ZK$  durch die Unebenheiten im Vergleich zum Kraftstoffverbrauch überproportional zu. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird jedoch näherungsweise von einer Kostenneutralität ausgegangen, da AUN-Werte  $> 7 \text{ cm}^3$  auf bundesdeutschen Autobahnen praktisch nicht auftreten (**s. Abb. 3.11**). Der Einfluss der AUN-Werte auf die Fahrgeschwindigkeit auf bundesdeutschen Autobahnen findet demnach keine weitere Berücksichtigung.

#### 5.4 Beanspruchung auf (Mit-)Fahrer, Ladegut und die Straße infolge AUN

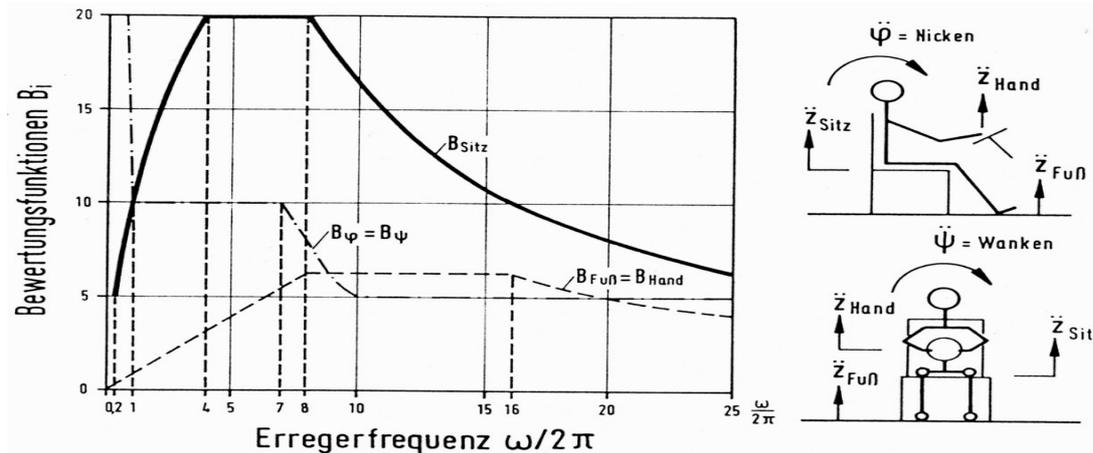
Neben bisher genannter Einflüsse der AUN-Werte auf das Fahrzeug und den Betrieb müssen noch weitere Aspekte der Einflussnahme vollständigshalber berücksichtigt werden.

Fahrzeuge werden bei der Überfahrt von unebenen Fahrbahnen zu Schwingungen angeregt, die wiederum einen direkten Einfluss auf die zusätzliche Straßenbeanspruchung und damit auf die Lebensdauer der Straße haben. Zusätzlich wirken sich die Schwingungen negativ auf das Befinden der Insassen sowie die Sicherheit des Ladegutes aus. Diese drei Aspekte sollen im Folgenden kurz erläutert und hinsichtlich der Ableitung möglicher Interventionswerte bewertet werden.

**5.4.1 AUN - Beanspruchungskomponente für den Fahrer**

Nach *Steinauer et. al.* [061] lassen sich unter rein schwingungstechnischen Gesichtspunkten Fahrzeug und Mensch als Mehrmassenschwinger betrachten, die durch die Überfahrt über die unebene Straßenoberfläche einem stochastischen Erregerprozess unterworfen werden.

Die Grundlage heutiger Schwingungsbewertungen bildet das technische Regelwerk VDI 2057, ISO 2631 [100]. Die sogenannte Komfortanalyse zur Berechnung der gesundheitlichen Gefährdung infolge der auf einen Menschen am Arbeitsplatz einwirkenden Ganzkörperschwingungen beruht auf dem Verfahren der bewerteten Schwingstärke (**Abb. 5.12**).

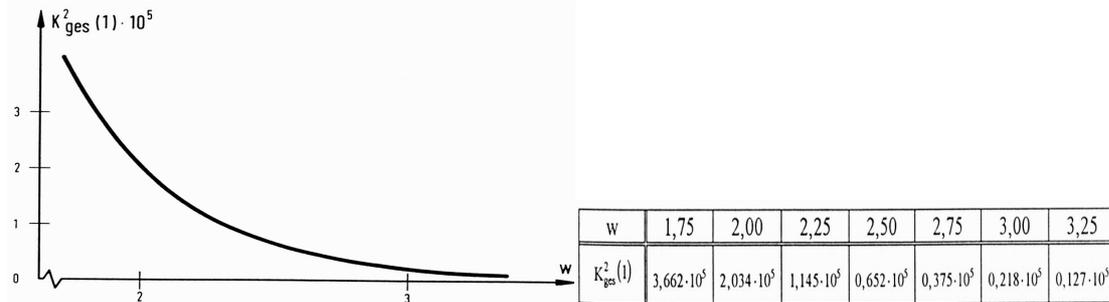


**Abb. 5.11: Bewertung der Schwingstärken in Abhängigkeit der Erregerfrequenz und der Schwingungseinleitungsstellen für den im Kraftfahrzeug sitzenden Menschen [101][102]**

Bei bekanntem relevanten Frequenzbereich des fahrenden Fahrzeuges (**3.2.1**) kann die Komfortziffer  $k$  ermittelt werden zu:

$$K_i = B_i(\omega) \cdot \ddot{z}_{i, \text{eff}}$$

Die Varianz der Komfortziffer  $k^2$  wird als fahrzeugspezifische Kennlinie dargestellt (**Abb. 5.13, Tab. 5.15**).



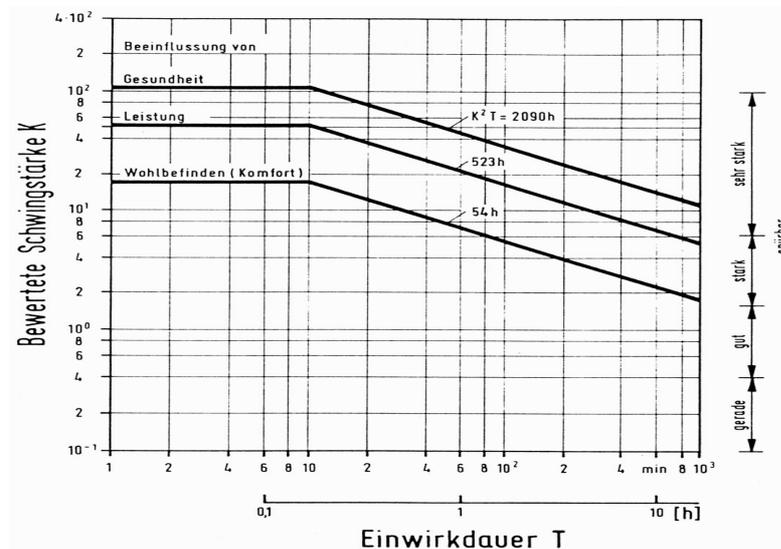
**Abb. 5.12: Gemittelte Gesamtstreuung  $K_{ges}^2(1)$  der repräsentativen Fahrzeuge als Funktion der Welligkeit  $w$  [101]**

**Tabelle 5.15: Gemittelte Gesamtstreuung  $K_{ges}^2(1)$  der repräsentativen Fahrzeugflotte als Funktion der Welligkeit  $w$  [101]**

Mit den spektralen Kenngrößen der Fahrbahn  $\Phi_h(\Omega_0) = AUN$  und der Welligkeit  $w$  lässt sich folglich für jeden Fahrbahnzustand in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit  $v$  die Komfortziffer  $K$  ermitteln:

$$K_{ges}^2 = \Phi_h(\Omega_0) \cdot v^{w-1} \cdot K_{ges}^2(1) \text{ [101][102]}$$

Unter Berücksichtigung der Einwirkzeiten kann die Erreichbarkeit physischer Grenzen wie Wohlbefinden, Leistungs- und gesundheitliche Schadensgrenzen festgestellt werden [100][101][102]. Das Ergebnis ist in **Abb. 5.14** dargestellt.



**Abb. 5.13:** Bewertete Schwingstärke in Abhängigkeit von der Einwirkdauer bei gleicher Beanspruchung für die Kriterien „Wohlbefinden“, „Leistung“ und „Gesundheit“ nach VDI 2057, Blatt 3 [100][101][102]

Die Grenzbelastungen hängen über die Beziehung

$$K^2 * T = \text{const.}$$

$$\Phi h (\Omega_0) * v^{w-1} * K_{\text{ges}}^2(1) * T = \text{const. bzw.}$$

$$AUN * v^{w-1} * K_{\text{ges}}^2(1) * T = \text{const.}$$

zusammen.

*Mitschke et. al.* [103] legt für den Schwellenwert das Erreichen der Leistungsfähigkeit bei  $K_{\text{ges}} = 56$  (damit  $K^2 * T = 523 \text{ h}$ ) und den Warnwert 50 % unterhalb des Schwellenwertes mit  $K_{\text{ges}} = 38$  fest. Aus der o.g. Beziehung ergibt sich dann für den zu berechnenden Schwellenwert AUN

$$AUN_{\text{SW (grenz)}} = \frac{523h/T}{v^{w-1} * K_{\text{ges}}^2(1)}$$

Setzt man nach der RAS-N [104] die durchschnittliche Verbindungsdauer von  $T = 2\text{h}$  für Bundesautobahnen an, berechnet sich Schwellenwert bei einer durchschnittlichen Welligkeit  $w \approx 2$  (**s. 3.2.1**) und der im vorliegenden Fall am höchsten gefahrenen Geschwindigkeit  $v = 139 \text{ km/h}$  (**s. 5.2**) (da den kleinsten Schwellenwert ergebend) zu

$$AUN_{\text{SW (grenz)}} = \frac{261,5}{139 * 2,034 * 10^5} = 9,25 * 10^{-6} \text{ m}^3 \approx 9 \text{ cm}^3$$

#### 5.4.2 AUN - Beanspruchungskomponente für das Ladegut

Die Ladegutbeanspruchung wird durch die Amplitude der Beschleunigung angegeben. Verwendbare Aussagen hierzu finden sich in den Prüfvorschriften für Verpackungen [105][106] und in den

Gütertarifvorschriften der Deutschen Bundesbahn. Die Übersicht sämtlicher Grenzwerte der Beanspruchungskomponenten sind **Tab. 5.16** zu entnehmen.

Bewertungs-kriterium	Maßstab	Warngrenze	Eingreifgrenze
Fahr-sicherheit	dyn. Radlast $\frac{\hat{F}_{z,dyn}}{F_{z,stat}}$	0,5	1,0
		Kraftschluß	Radabheben
Straßen-beanspruchung	dyn. Radlast Stoßfaktor $n = f(\hat{F}_{z,dyn})$	1,34	1,62
		10-t-Lkw-Achse	
		$\lambda=1,64$ ; 5-%-Wert	$\lambda=3$ ; 0,15-%-Wert
Schwing-beanspruchung der Insassen	Aufbaube-schleunigung $\hat{z}_2$ [m/s <sup>2</sup> ]	1,6	2,3
		Abhängig von Anregungsform und Frequenz; hier: stationärer Zustand, 4 Hz < $\omega/2\pi$ < 5 Hz	
Ladegut-beanspruchung	Aufbaube-schleunigung $\hat{z}_2$ [m/s <sup>2</sup> ]	3	5
		Angaben der Deutschen Bundesbahn	Prüfvorschlag der BFSV

**Tabelle 5.16: Vorschläge für Bewertungsmaßstäbe und Grenzwerte zur Beurteilung von Fahrzeugschwingungen für die Beanspruchungskomponenten [103]**

Aus der Übersicht ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Beanspruchung der Insassen aufgrund strengerer Grenzwerte im Vergleich zur Ladegutbeanspruchung und Fahrsicherheit die maßgebende Beanspruchungskomponente darstellt. Durch die niedrigeren Richtwerte der Aufbaubeschleunigung für Insassen ergeben sich niedrigere Komfortziffern und damit für die Intervention kleinere AUN-Werte als für die Ladegutbeanspruchung (**s. 5.4.1**).

Für den aus der Leistungsgrenze des Menschen abgeleiteten AUN- Schwellenwert gilt:

$$AUN_{SW(grenz)} \geq 9 \text{ cm}^3 = AUN_{ZEB SW}$$

*Mitschke et. al.* [103] bemerkt jedoch zu diesem Thema: „Grundsätzlich ist in allen Überlegungen zur Schwingungsbeanspruchung der Insassen zu bedenken, dass die Akzeptanz von Beanspruchungen bei Menschen sehr unterschiedlich ausfällt und erheblich von Einflüssen wie z.B. der Gewöhnung an eine Beanspruchung geprägt ist; [...]. Deshalb sollte dieses Bewertungskriterium für die Schwingungsbewertung z. Zt. nur als ergänzender Aspekt und nicht als streng gültige Begrenzung angesehen werden“.

Aus diesem Grund lässt sich kein absoluter, allgemeingültiger Interventionswert definieren. Das Erreichen der Leistungsgrenze als Eingreifwert zu definieren, erscheint im Hinblick auf die Verkehrssicherheit sinnvoll. Allerdings lassen sich bei der Überschreitung der Grenze die Folgen kaum monetarisieren. Die Frage stellt sich auch nicht zwingend, da der ermittelte Eingreifwert mit dem Interventionswert der ZEB übereinstimmt.

Als Schlussfolgerung dieser Betrachtungen bleibt festzuhalten, dass sowohl aus der Beanspruchung der Insassen als auch des Ladegutes unterhalb des aktuell gültigen Interventionswertes von  $AUN = 9,0 \text{ cm}^3$  keine zusätzlichen volkswirtschaftlich relevanten Kosten entstehen dürften, so dass diesem Aspekt im weiteren Verlauf dieser Arbeit keine weitere Bedeutung zukommt.

### 5.4.3 AUN - Beanspruchungskomponente für die Straße

Fahrzeuge belasten den Straßenaufbau auf absolut ebenen Fahrbahnen mit ihrer statischen Achslast. Ihre Schadenwirkung beruht genähert auf der Formel der 4. Potenz [020]. Treten auf der Fahrbahn Unebenheiten auf, so entstehen beim Überfahren Vertikalbeschleunigungen der Fahrzeuge - die sogenannten dynamischen Achslasten.

Der Bezug zwischen den Unebenheiten der Straße und den am Fahrzeug auftretenden Schwingungen wird durch Vergrößerungsfunktionen hergestellt.

Aus analytischen Modellen und Untersuchungen an ausgewählten Lastkraftwagen auf Strecken mit bekannten AUN-Werten ist für die zusätzliche Straßenbeanspruchung der folgende Zusammenhang hergeleitet worden:

$$\text{Zusätzliche Straßenbeanspruchung} = \frac{\vartheta_{dyn}}{\vartheta_{stat}} = 1\% \dots 7\% * \frac{AUN}{cm^3} \quad [\%] \quad [061][099]$$

mit:

$\vartheta_{dyn}$  = dynamische Radlast [KN]

$\vartheta_{stat}$  = statische Radlast [KN]

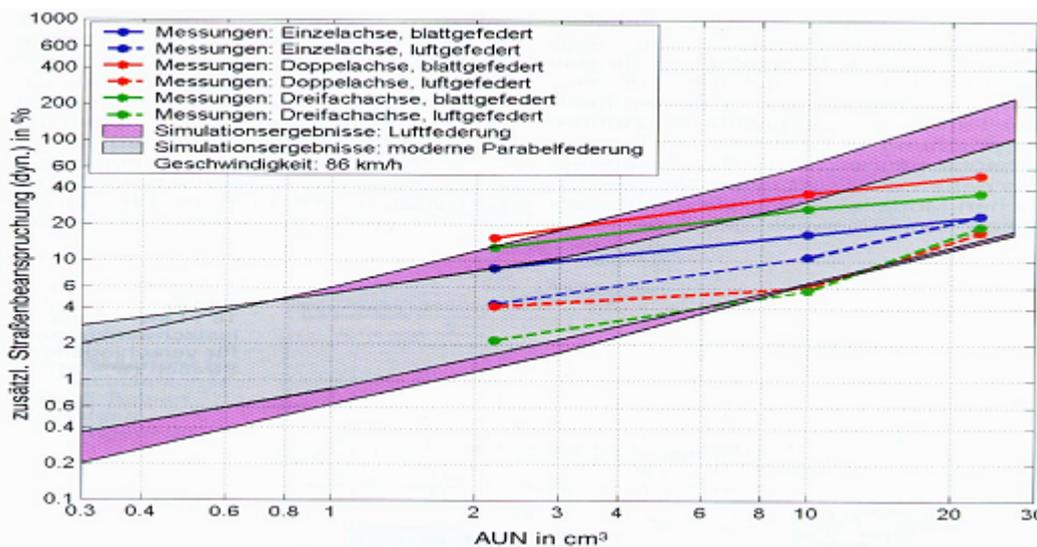


Abb. 5.14: Einfluss der Unebenheit auf die Straßenbeanspruchung, Vergleich mit Daten aus der Literatur [061]

Die Straße wird durch die Schwingungsanregung der Fahrzeuge auf unebenen Fahrbahnen nach der o.g. Formel zusätzlich belastet. Dabei stellt der erstgenannte Wert das Mittel, der zweite Wert eher den Einzelfall, das Einzelhindernis dar.

Unter Berücksichtigung der Welligkeit wird von einem Anstieg der Straßenbeanspruchung mit steigenden AUN-Werten ausgegangen, der in der doppelt logarithmischen Darstellung näherungsweise linear verläuft.

Als Fazit dieser Untersuchungen kann festgehalten werden, dass nur sehr ebene Straßen ( $\leq 1cm^3$ ) keine zusätzlichen Beanspruchungen durch dynamische Radlasten erfahren. Steigt der AUN-Wert an, werden die zusätzlichen Beanspruchungen größer. Sie bewirken eine Verkürzung der durchschnittlichen Lebensdauer und damit einen schnelleren Wertverlust des Straßenkörpers. Dieser

Sachverhalt unterstützt die Forderung nach einem Anheben des Interventionswertes, soll aber nicht als einzelnes Kriterium für die Ableitung des Interventionswertes herangezogen werden.

### 5.5 Unfallkosten UK

Grundlage der volkswirtschaftlichen Bewertung von Straßenverkehrsunfällen und der daraus abgeleiteten Einheitskosten sind die in der amtlichen Statistik erfassten und polizeilich registrierten Unfälle. In Abhängigkeit der Unfallkategorie (schwerste Unfallfolge) werden die Unfallfolgen monetarisiert und über die Unfallkostendichte UKD in Abhängigkeit der Straßenkategorie dargestellt. Als Unfallfolgen gelten Produktionsausfälle, Wohlfahrtsverluste durch Invalidität, Freizeitausfälle, medizinische Behandlungskosten, Reparaturkosten der Kfz, anteilige Verwaltungskosten der Versicherungen, Rechtsfolge- sowie Polizeikosten [010]. Die Relevanz der Unfallkosten leitet sich aus den entstehenden volkswirtschaftlichen Kosten durch Unfallfolgen ab. Im Jahr 2000 lagen die auf deutschen Autobahnen verursachten Unfallkosten bei insgesamt 4,19 Mrd. €.

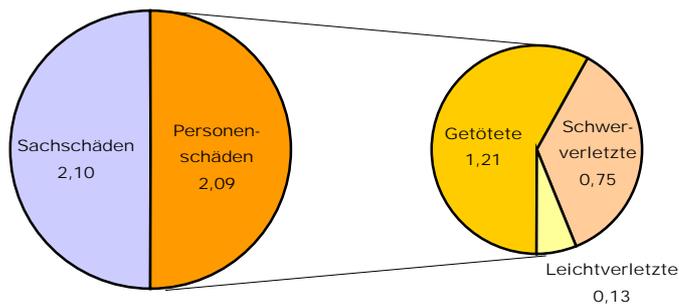


Abb. 5.15: Volkswirtschaftliche Unfallkosten auf BAB in der Bundesrepublik Deutschland 2000 [Mrd. €] [107][151]

Die Unfallkosten auf den Autobahnen sind in den letzten Jahren nahezu konstant geblieben, da der Rückgang der Getöteten durch die stetig steigenden Sachschadenskosten nahezu kompensiert wurde [152]. Zur Bestimmung der mittleren jährlichen Unfallkosten UK werden aus der Anzahl der polizeilich erfassten Unfälle mit und ohne Personenschäden und der Gesamtfahrleistung die Unfallraten UR bestimmt.

Die durchschnittliche Unfallrate UR für Unfälle mit Personenschäden liegt auf Autobahnen im Jahr 2000 mit einer Jahresfahrleistung von 203,4 Mrd. km bei  $0,126 \text{ U}/10^6 \text{ Kfz} \cdot \text{km}$  [122][151]. Die durchschnittliche Unfallrate UR für Unfälle mit Sachschäden errechnet sich für das gleiche Jahr zu  $0,687 \text{ U}/10^6 \text{ Kfz} \cdot \text{km}$  [151].

$$\text{UR (P)}_{\text{BAB mittel}} = 0,126 \text{ [U}/10^6 \text{ Kfz} \cdot \text{km}] \quad [122][151]$$

$$\text{UR (S)}_{\text{BAB mittel}} = 0,687 \text{ [U}/10^6 \text{ Kfz} \cdot \text{km}] \quad [151]$$

Auf bundesdeutschen Autobahnen beträgt sie damit unabhängig der schwersten Unfallfolge

$$\text{UR}_{\text{BAB mittel}} = 0,126 + 0,687 = 0,813 \text{ [U}/10^6 \text{ Kfz} \cdot \text{km}] \quad \text{durchschnittliche Unfallrate UR}_{\text{BAB}}$$

Die jährlichen Unfallkosten UK auf einem betrachteten Streckenabschnitt berechnen sich zu

**UK = 1000 \* UKD \* I**

**[€/a] [010]**

mit:

- UK - Unfallkosten [€/a]
- UKD =  $365 * 10^{-6} * UKR * DTV$  Unfallkostendichte [1000€/km\*a]
- UKR =  $UR(P)*WU(P)+UR(S)*WU(S)$  Unfallkostenrate [€/1000Kfz\*km]
- UR(P,S) = Unfallrate (Personen-/Sachschaden) [U/10<sup>6</sup>Kfz\*km]
- WU(P,S) = Unfallkostensatz (Personen-/Sachschaden) [€/U]
- I - Länge des betrachteten Abschnittes. [km]

Um die Kosten vergleichen zu können, wird in Anlehnung an die Bestimmung der Reisezeit- und Fahrzeugbetriebskosten lediglich eine Fahrtrichtung betrachtet.

$$UK = 1000 * 365 * 10^{-6} * \frac{DTV}{2} * (UR(P) * WU(P) + UR(S) * WU(S)) * l \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

$$UK = 0,365 * \frac{DTV}{2} * (UR(P) * WU(P) + UR(S) * WU(S)) * l \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

Die pauschalen Unfallkostensätze WU (P,S) sind nach den volkswirtschaftlichen Bewertungskriterien hergeleitet und berücksichtigen neben den direkten Unfallkosten auch die Unfallfolgekosten [153]. Sämtliche Wertansätze beinhalten keine fixen Kostenbestandteile; sie sind steuer- und subventionsbereinigt und korrespondieren somit mit den Wertansätzen des Bundesverkehrswegeplanes. Die Wertansätze mit dem Kostenstand 2000 sind **Tabelle 5.17** zu entnehmen. Die Unfallkategorien „Unfälle mit Getöteten oder Schwerverletzten“ sowie „Unfälle mit Leichtverletzten“ werden zusammengefasst, weil für die Einzelerfassung die Grenzen der Unfallkategorien schwierig zu definieren sind. Aus diesen Gründen wird der gemittelte Allgemeinfall als Berechnungsgrundlage herangezogen. Gleiches gilt für die Unfallkategorien mit Sachschäden.

Unfallkategorie (Schwerste Unfallfolge)	Unfallkostensätze WU [€/U]				
	außerorts		innerorts		
	Autobahn* (1)	Landstraße** (2)	Verkehrsstr. (3)	Erschl.straße (4)	Gesamt (5)
SP: Unfall mit Getöteten oder Schwerverletzten	300.000	270.000	160.000	130.000	145.000
LV: Unfall mit Leichtverletzten	31.000	18.000	12.500	10.000	11.000
P: Unfall mit Personenschaden	105.000	110.000	45.000	33.500	38.500
SS: Schwerwiegender Unfall mit Sachschaden	18.500	13.000	12.000	11.500	11.500
LS: Sonstiger Unfall mit Sachschaden	8.000	6.000	6.000	5.500	5.500
S: Unfall mit Sachschaden	10.500	7.000	6.500	5.500	6.000

\* Autobahn: Zweibahnig planfrei geführte Außerortsstraße  
 \*\* Landstraße: Einbahnige Außerortsstraße

**Tabelle 5.17: Pauschale Kostensätze WU [€/U] für Straßenverkehrsunfälle – Preisstand 2000 [107]**

**WU (P)<sub>BAB</sub> = 105 [1000€/U]**

**WU (S)<sub>BAB</sub> = 10,5 [1000€/U]**

Mit den Unfallraten UR und Unfallkostensätzen WU lässt sich die durchschnittliche Unfallkostenrate UKR bestimmen.

$$UKR_{BAB} = 0,126 * 105 + 0,687 * 10,5 = 20,44 \text{ [€/1000Kfz*km]}$$

Die Unfallkosten UK eines Autobahnabschnittes (Richtungsfahrbahn) ergeben sich folglich in Abhängigkeit der Verkehrsstärke und Länge des betrachteten Abschnittes zu

$$UK_{BAB} = 0,365 * \frac{DTV}{2} * (20,44) * l \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right] \text{ zu}$$

$$UK_{BAB} = 3,73 * DTV * l \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right] \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Für den durchschnittlich ermittelten DTV von 48.000 Kfz/24h (Stand 2000) betragen die durchschnittlichen jährlichen Unfallkosten  $UK_{BAB \text{ RI/ km}}$  damit 179.040 € pro km und Fahrtrichtung.

Für das gesamte Autobahnnetz ergeben sich durchschnittliche jährlichen Unfallkosten von  $UK_{BAB} = 179.040 \text{ €/(km RI)} * 2 \text{ RI} * 11.712 \text{ km} = 4.193.832.960,- \text{ €} = 4,19 \text{ Mrd. €}$ .

Im Vergleich zu den Reisezeit- ZK und Fahrzeugbetriebskosten FBK sind die abschnittsbezogenen Unfallkosten UK jedoch nicht nach einzelnen Fahrzeuggruppen FG aufgeschlüsselt, sondern pauschal auf den DTV und Querschnitt bezogen.

Es stellt sich nun die Frage, welchen Einfluss der Fahrbahnzustand auf die ermittelten durchschnittlichen Unfallkosten UK hat.

### 5.5.1 Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe $A_N$

Die Unfallraten UR stellen die Durchschnittswerte für die Unfallhäufigkeit des betrachteten Autobahnnetzes dar. Schon allein aus dem sozialen Anspruch heraus leiten sich die Bestrebungen nach einem Absenken der Unfallzahlen ab. Daraus ergibt sich die Frage nach den Unfallursachen bzw. Einflussfaktoren.

*Hiersche et. al.* [109] bemerkt, dass in den Unfalldatenbanken das Fehlverhalten der Verkehrsteilnehmer als Unfallursache mit einem Anteil von ca. 90 % mit großem Abstand an erster Stelle genannt wird. Allerdings ergaben weiterführende Studien zur Unfallursache eine deutliche Verlagerung hin zur Fahrbahn, ohne jedoch die zentrale Bedeutung des fehlerhaften Fahrverhaltens in Frage zu stellen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich das Feld der Einflussgrößen auf die Unfälle als äußerst komplex erweist und die Isolierung einer einzelnen Größe äußerst schwierig ist.

Als primäre Einflussgröße auf die Verkehrssicherheit ist seitens der Fahrbahnoberfläche die Griffigkeit zu nennen.

*Huschek* [060] erwähnt zu dem Thema, dass der Kraftschluss zwischen Reifen und trockener Fahrbahn sehr hoch ist. Das Problem des Griffigkeitsverlustes macht sich ausschließlich auf nasser Fahrbahnoberfläche bemerkbar. Folglich kommt der Betrachtung der Nassunfälle eine besondere Bedeutung zu.

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Unfallhäufigkeit auf nassen Straßen und der Griffigkeit, der mit der „relativen Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$ “ beschrieben wird. Unter der relativen Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$  eines betrachteten Abschnittes wird das Verhältnis zwischen der Anzahl

der Unfälle auf nasser Fahrbahn  $U_N$  und der Gesamtzahl der Unfälle verstanden, die sich aus der Summe der Anzahl der Unfälle auf nasser und auf trockener Fahrbahn  $U_N + U_T$  ergeben.

$$A_N = U_N / (U_N + U_T) \quad [\%] \quad [044]$$

mit :

$U_N$  = Anzahl Unfälle bei Nässe

$U_T$  = Anzahl Unfälle auf trockener Fahrbahn

$U_N + U_T$  = Gesamtanzahl Unfälle

Der Durchschnitt der relativen Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$  auf dem Bundesfernstraßennetz liegt bei ca. einem Drittel der Gesamtunfallzahl, kann jedoch abhängig von Witterungsbedingungen innerhalb eines Jahres Schwankungen unterworfen sein. Wenn man bedenkt, dass nur während ca. 10-14% des Jahres Niederschläge mit fahrbahnoberflächenbedeckender Intensität fallen, stellt das Verhältnis einen sehr hohen Anteil dar [112]. Steigt der Verhältniswert an, d.h. wird der Anteil der Unfälle bei Nässe bezogen auf die Gesamtunfallzahl größer, liegt mit großer Wahrscheinlichkeit ein geringes Griffigkeitsniveau vor.

Trotz des in der Literatur immer wieder beschriebenen offenkundigen Zusammenhanges zwischen Unfällen bei Nässe und der Griffigkeit liegen bis heute nur sehr wenige Arbeiten mit konkreten Ergebnissen vor [044][045][108][110].

Anfang der 80er Jahre sind in Deutschland erstmalig großflächige Griffigkeitsmessungen mit der SCRIM durchgeführt worden. Gemeinsam mit den gesammelten Unfalldaten wurde hierdurch eine umfassendere Unfallanalyse möglich. Als zusammenfassendes Ergebnis dieser Untersuchungen konnte der stetige Abfall der Unfallzahl bei Nässe mit steigender Griffigkeit festgehalten werden. *Potschka* [108] bekräftigt diese Tendenz anhand eines Praxisbeispiels. Dabei ist ein 25 km langer Abschnitt mit schlechter Griffigkeit von  $\mu_{SCRIM80} = 0,45$  durch Aufrauharbeiten mit einem deutlich höheren Griffigkeitsniveau von  $\mu_{SCRIM80} = 0,65$  versehen worden. Der Vergleich der Unfallsituation vor und nach Durchführung der Maßnahme ergab einen Rückgang der Gesamtunfälle um 50 %, bei den Nassunfällen sogar um 80 %. Netzweit wurden jedoch solche praxisorientierten Auswertungen kaum vorgenommen. In den folgenden Abschnitten sollen die bisher umfangreichsten Arbeiten zu diesem Thema vorgestellt werden.

### 5.5.1.1 Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe $A_N$ nach Schulze/ Dames

Eine sehr umfangreiche Studie stellt die Arbeit von *Schulze, Dames et.al.* [044] dar. Basierend auf den polizeilich registrierten Unfällen mit Personen- bzw. schweren Sachschäden wurden Griffigkeitsmessungen an den Unfallstellen nach dem Prinzip des blockierten Schlepprades (Stuttgarter Reibungsmesser) durchgeführt. Um die Wahrscheinlichkeit der Griffigkeit als (Mit-) Unfallursache erheblich zu steigern, fanden nur Strecken mit mindestens 10 registrierten Unfällen ( $U_{Anzahl} \geq 10$ ) Berücksichtigung. Diese Vorgehensweise ist in anderen Studien übernommen worden. Die Datensätze und die daraus gefolgerte Näherungsfunktion sind **Abb. 5.16** zu entnehmen. *Schulze et. al.* [044] kommt zu dem Schluss, dass nur in den Extrembereichen („unterhalb des Richtwertes

gemäß Merkblatt über die Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe und bei überdurchschnittlich guten Griffigkeitswerten“) gesicherte Erkenntnisse erwartet werden können!

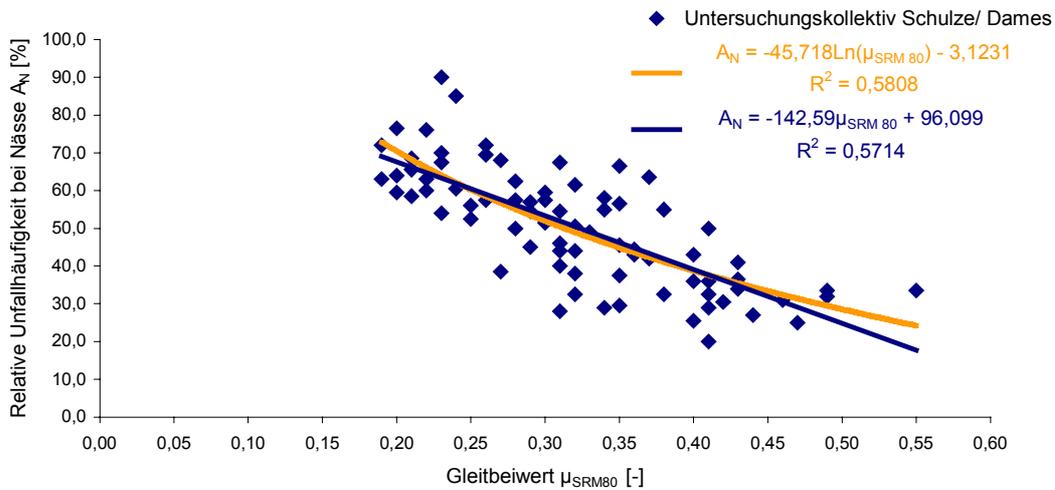


Abb. 5.16: Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$  nach Schulze/ Dames [044] in Abhängigkeit des Gleitbeiwertes  $\mu_{SRM80}$

Für die ermittelten Ergebnisse der Unfallhäufigkeit und Messung des Gleitbeiwertes  $\mu_{SRM80}$  ergibt sich der Zusammenhang:

$$A_N = - 45,72 \ln(\mu_{SRM80}) - 3,12 \quad [\%] \quad \text{Schulze/ Dames}$$

Die Griffigkeitsmessungen wurden mit dem Stuttgarter Reibungsmesser durchgeführt. Die Beziehung zwischen der Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$  und dem Gleitbeiwert  $\mu_{SRM80}$  erfolgt durch Umrechnung der ermittelten Gleitbeiwerte mit der Beziehung nach Hiersche [056].

$$\mu_{SCRIM80} = 1,076\mu_{SRM80} + 0,006 \quad (\text{s. Gl. 3.1})$$

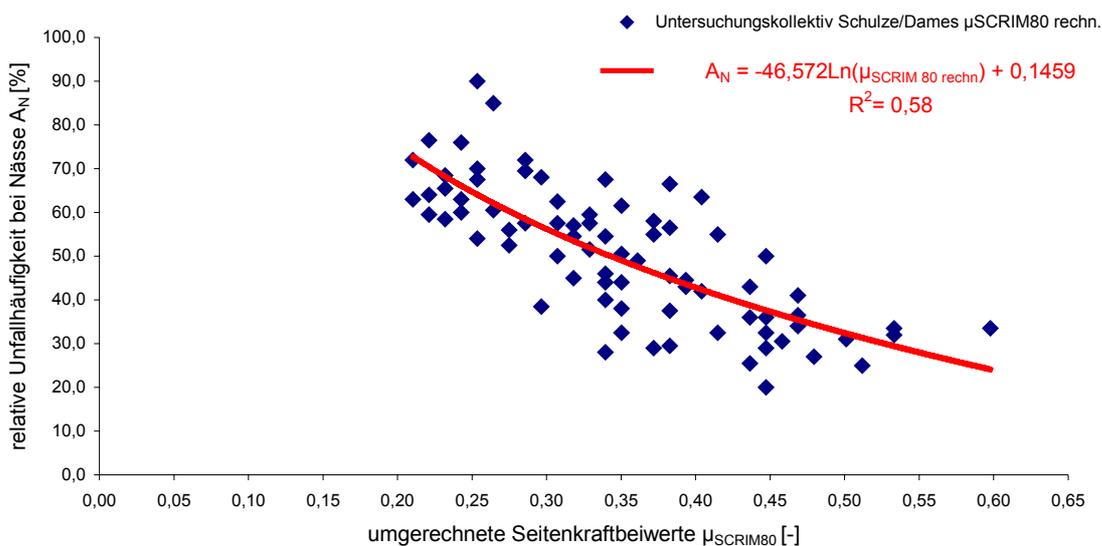


Abb. 5.17: Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$  in Abhängigkeit von  $\mu_{SCRIM80}$  (rechnerisch) (rechnerisch)

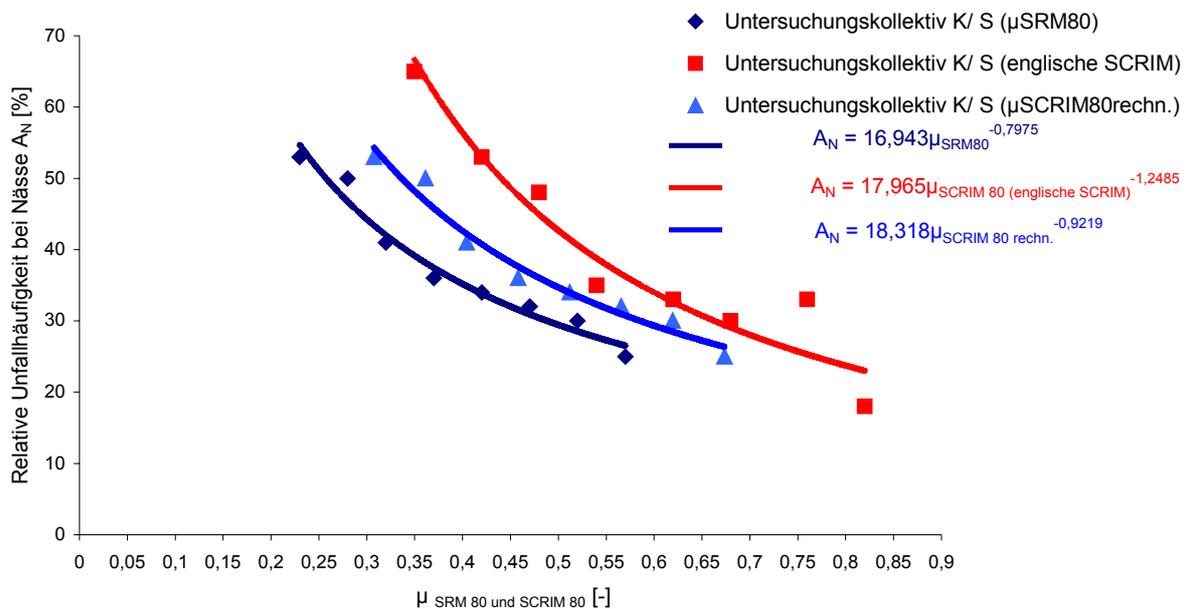
$$A_N = A_N (\mu_{SCRIM80 \text{ rechnerisch}}) = - 46,572 * \ln(\mu_{SCRIM80}) + 0,1459$$

Die relative Unfallhäufigkeit bei Nässe kann folglich als Funktion der Griffigkeit  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  beschrieben werden.

### 5.5.1.2 Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe $A_N$ nach Kamplade, Schmitz

Bei den Untersuchungen von *Kamplade, Schmitz* [045] sind ca. 500 km Richtungsfahrbahn im Bereich des Autobahnnetzes Köln betrachtet worden. Für die Griffigkeitsmessung stand ein SRM und eine SCRIM zur Verfügung. Der Ansatz der Mindestanzahl an Unfällen pro Strecke wurde in Anlehnung an Schulze/ Dames gewählt.

Um eine repräsentative Datenmenge zugrunde legen zu können, wurde der Zusammenhang zwischen den Unfallzahlen bei Nässe und der Griffigkeit für acht „gleichbreite Griffigkeitsbereiche“, getrennt nach SRM und SCRIM, hergeleitet. Die Ergebnisse mit dem Mittelwert dieser Bereiche sind in **Abb. 5.18** dargestellt. *Kamplade, Schmitz* [045] geben für die gewählten Funktionsverläufe keine Korrelationskoeffizienten an.



**Abb. 5.18:** Relative Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$  nach Kamplade, Schmitz [045]

Der Funktionsverlauf  $A_N(\mu_{\text{SCRIM } 80 \text{ rech.}})$  basiert ebenfalls auf der o.g. Umrechnung der SRM- Werte in SCRIM- Werte nach Hiersche. In **Abb. 5.18** ist die Verlaufskurve mit den Daten der englischen SCRIM gegenüber den umgerechneten Werten nach rechts verschoben. Die von den deutschen Messergebnissen abweichenden Ergebnisse der englischen SCRIM lassen sich auf die Schwierigkeiten in der Anwendung und Problematik des Treffens der Radspur durch die gedrehte Anordnung am Messfahrzeug (Großbritannien: „Linksverkehr“) zurückführen [045].

Mit den hergeleiteten Zusammenhängen kann folglich der Einfluss der Griffigkeit auf das Unfallgeschehen bei Nässe funktional beschrieben und quantifiziert werden (**Abb. 5.19**).

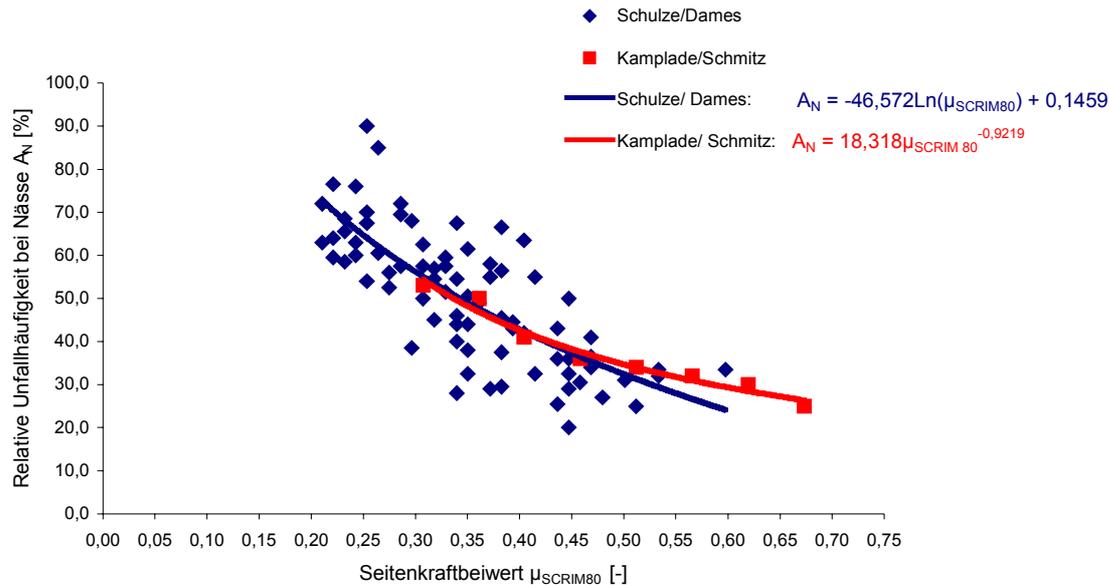


Abb. 5.19: Vergleich der Ansätze der Relativen Unfallhäufigkeit bei Nässe nach Schulze/Dames und Kamplade/Schmitz

**Schulze/ Dames:**  $A_N = A_N(\mu_{\text{SCRIM80}}) = -46,572 * \ln(\mu_{\text{SCRIM80}}) + 0,1459$  [%] (Gl. 5.2)

**Kamplade/ Schmitz:**  $A_N = A_N(\mu_{\text{SCRIM80}}) = 18,318 * \mu_{\text{SCRIM80}}^{-0,9219}$  [%] (Gl. 5.3)

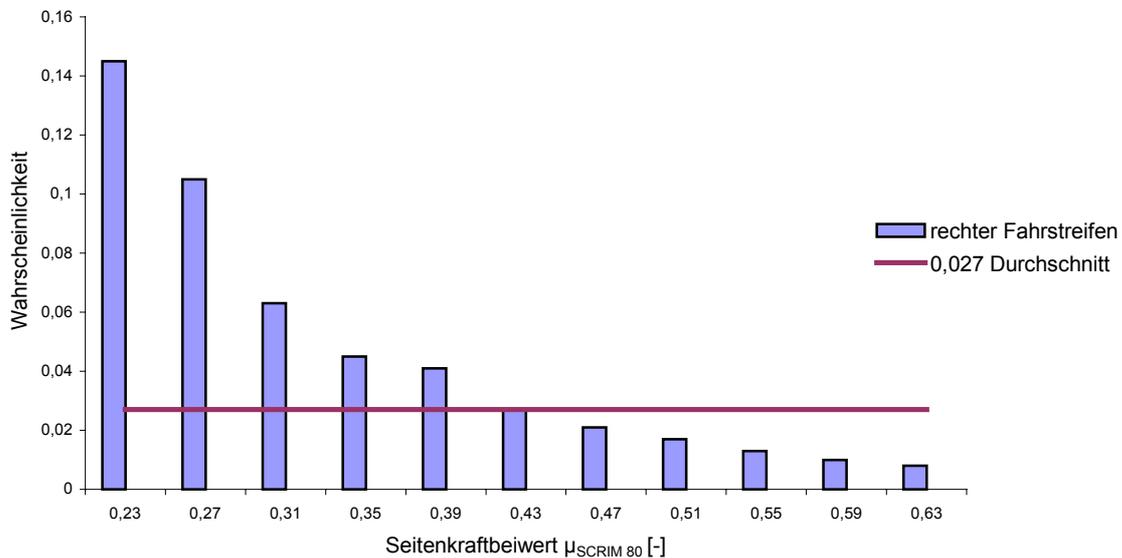
Die durchschnittliche Unfallrate UR ist jedoch nicht nach Unfällen auf trockener und nasser Fahrbahn differenziert. Sie beinhaltet vielmehr alle aufgetretenen Unfälle in dem betrachteten Abschnitt. Es ist deshalb notwendig, die vorgestellten Funktionen der relativen Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$  auf die Gesamtheit der Unfälle zu beziehen, um so die Unfallrate UR als Funktion der Griffigkeit darstellen zu können (s. 5.5.2.1).

### 5.5.1.3 Aktuelle Untersuchungen

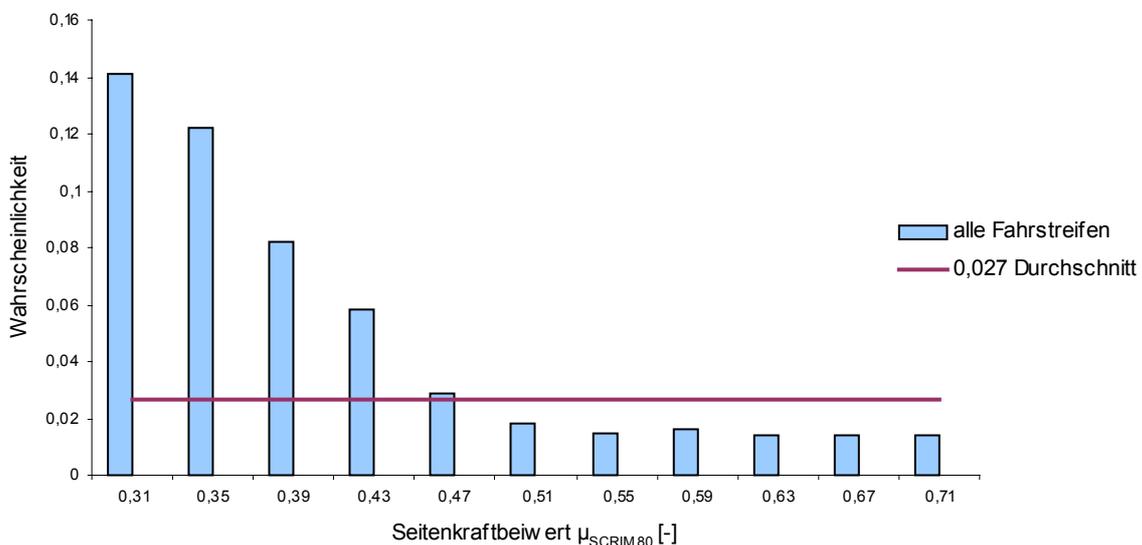
In einer weiteren Forschungsarbeit von Mayer *et. al.* [110] zum Thema Veränderung der Unfallraten in Abhängigkeit der Griffigkeit sind Unfall- und Griffigkeitsdaten aus den Ländern Bayern und Nordrhein-Westfalen kombiniert, ausgewertet und analysiert worden. Aus der Datenlage heraus war es nicht möglich, die Veränderung der „Relativen Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$ “ mit der Griffigkeit zu quantifizieren.

Bei der Betrachtung der Griffigkeit in den Nass- Unfallhäufungsstellen (UHS) im Vergleich zum Griffigkeitsniveau des gesamten Netzes wurde jedoch als signifikanter Unterschied festgestellt, dass die Griffigkeit in den bei Nässe unfallauffälligen Bereichen deutlich niedriger ist als im gesamten betrachteten Netz. Als Nass- Unfallhäufungsstellen (Nass- UHS) werden Straßenstellen definiert, auf denen bei nasser Fahrbahn eine bestimmte Zahl gleichartiger Unfälle überschritten wird [123]. Dieser Griffigkeitsunterschied wurde bei den unfallauffälligen Bereichen während Trockenheit nicht festgestellt. Eine überdurchschnittliche Verkehrsbelastung und der daraus folgenden Griffigkeitsabnahme konnte daraus demnach nicht geschlossen werden. Als Ergebnisse sind die

Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Unfallhäufungsstellen bei Nässe über die Griffigkeit des Fahrstreifens (**Abb. 5.20**) und des Mittelwertes aller Fahrstreifen aufgetragen (**Abb. 5.21**).



**Abb. 5.20:** Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein einer Nass-Unfallhäufungsstelle in Abhängigkeit der Griffigkeit des rechten Fahrstreifens [110]



**Abb. 5.21:** Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein einer Nass-Unfallhäufungsstelle in Abhängigkeit der Griffigkeit aller Fahrstreifen [110]

Unabhängig vom Griffigkeitsniveau wurde die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins einer Nass-UHS im untersuchten Netz mit 0,027 bestimmt. Diese durchschnittliche Wahrscheinlichkeit korrespondiert mit dem durchschnittlichen Griffigkeitsniveau von  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,49$  (**Abb. 5.21**).

Aus diesen Ergebnissen folgt, dass das Absinken der Griffigkeit unter den Durchschnittswert einen erheblichen Einfluss auf die Unfallhäufungen bei Nässe hat. So ist die Wahrscheinlichkeit einer Nass-UHS bei einer Griffigkeit aller Fahrstreifen von 0,43 schon doppelt so hoch wie bei einer Griffigkeit von

0,49. Viermal höher wird die Wahrscheinlichkeit bei einem Absinken der Griffigkeit aller Fahrstreifen von 0,49 auf 0,35.

Ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Griffigkeit und der Unfallhäufigkeit bei Nässe konnte nach Mayer *et. al.* [110] zwar nicht hergeleitet werden. Sie unterstützt aber eindeutig die Ergebnisse der Untersuchungen von Schulze/ Dames und Kamplade/ Schmitz.

#### 5.5.1.4 Durchschnittliche Unfallhäufigkeit und durchschnittliches Griffigkeitsniveau

Die durchschnittliche Unfallrate UR des bundesdeutschen Autobahnnetzes ist als gemittelter Wert über alle Fahrstreifen und Deckschichtarten anzusehen. Grundlage ist die Gesamtheit aller im Netz der bundesdeutschen Autobahnen aufgetretenen Unfälle im Verhältnis zur Gesamtfahrleistung. Der ermittelten durchschnittlichen Unfallrate wird der mittlere, nach der Deckschichtart gewichtete Seitenkraftbeiwert  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  aller Fahrstreifen gegenübergestellt. Hierfür werden die Gleitbeiwerte der letzten ZEB- Kampagne 97/98 herangezogen (**Abb. 5.22**) [114].

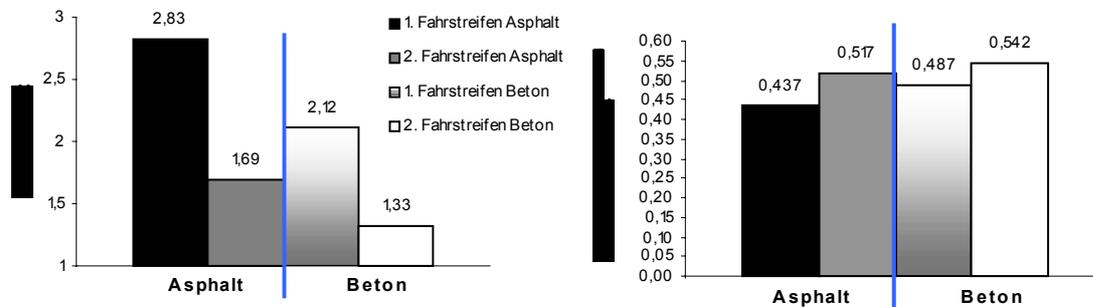


Abb. 5.22: ZEB 97/98: Fahrstreifenbezogene Zustandswerte [114] und Zustandsgrößen umgerechnet nach [020]

Die Unterteilung der Deckenarten in 72 % Asphalt und 28 % Beton im bundesweiten Autobahnnetz [034] ergeben einen netzweiten Mittelwert für die Griffigkeit von  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,49$ . Die durchschnittliche Unfallrate UR wird folglich auf eine Griffigkeit von 0,49 bezogen.

Setzt man die durchschnittliche Griffigkeit in die Gleichungen nach Schulze/ Dames und Kamplade/ Schmitz (Gl. 5.2 und 5.3) ein, ergibt sich für die relative Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$

$$A_{N \text{ S/D}} = -46,572 * \ln(0,49) + 0,1459 = 33 \% \quad (\text{Schulze/ Dames})$$

$$A_{N \text{ K/S}} = 18,318 * 0,49^{-0,9219} = 35 \% \quad (\text{Kamplade/ Schmitz})$$

Das Ergebnis von ca. einem Drittel bestätigt die in der Literatur [044][045][108][110][111] angegebenen Durchschnittswerte für das Bundesautobahnnetz.

#### 5.5.2 Veränderung der Unfallkosten

Die Unfallkosten UK werden unabhängig vom Fahrbahnzustand (trocken, nass) angegeben. Die Bestimmung der Unfallkosten UK als Funktion der Griffigkeit setzt das Umrechnen der relativen Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$  auf das gesamte Unfallgeschehen voraus.

### 5.5.2.1 Unfallrate UR als Funktion der Griffigkeit $\mu_{\text{SCRIM } 80}$

Folgende Annahmen werden für die Umrechnung der relativen Unfallhäufigkeit bei Nässe  $A_N$  auf die Gesamtzahl der Unfälle getroffen:

Die Anzahl der Unfälle auf trockener Fahrbahn bleibt von der Griffigkeit unbeeinflusst, d.h. die Unfälle auf trockener Fahrbahn bleiben trotz Veränderung der Griffigkeit gleich [060]. Die Unfälle auf winterglatter Fahrbahn werden vernachlässigt. Daraus folgt:

$$A_N = \frac{U_N}{U_N + U_T} * 100 \quad [\%]$$

mit:

$U_N$  - Anzahl Unfälle auf nasser Fahrbahn

$U_T$  - Anzahl Unfälle auf trockener Fahrbahn - konstant

$$U_{\text{gesamt}} = U_N + U_T$$

Die Veränderung der Unfallrate  $V_U$  mit veränderter Griffigkeit  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  lässt sich bestimmen zu:

$$V_U = \frac{U_2}{U_1}$$

mit:

$U_1$  - Anzahl Unfälle bei dem Griffigkeitsniveau  $\mu_{\text{SCRIM } 80 \ 1}$

$U_2$  - Anzahl Unfälle bei dem Griffigkeitsniveau  $\mu_{\text{SCRIM } 80 \ 2}$

$$V_U = \frac{U_{N2} + U_T}{U_{N1} + U_T} \quad (\text{Gl. 5.4})$$

mit:

$$A_N = \frac{U_N}{U_N + U_T} \Rightarrow U_N + U_T = \frac{U_N}{A_N} \quad (\text{in 5.4})$$

$$V_U = \frac{U_{N2} * A_{N1}}{U_{N1} * A_{N2}} \quad (\text{Gl. 5.5})$$

mit:

$$U_T = \text{konstant} = \left(\frac{1}{A_N} - 1\right) * U_N \Rightarrow \left(\frac{1}{A_{N1}} - 1\right) * U_{N1} = \left(\frac{1}{A_{N2}} - 1\right) * U_{N2} \Rightarrow \frac{U_{N2}}{U_{N1}} = \frac{\left(\frac{1}{A_{N1}} - 1\right)}{\left(\frac{1}{A_{N2}} - 1\right)} \quad (\text{in 5.5})$$

$$V_U = \frac{\left(\frac{1}{A_{N1}} - 1\right) * A_{N1}}{\left(\frac{1}{A_{N2}} - 1\right) * A_{N2}}$$

$$V_U = \frac{1 - A_{N1}}{1 - A_{N2}} = \frac{1 - A_{N1}(\mu_{\text{SCRIM } 80})}{1 - A_{N2}(\mu_{\text{SCRIM } 80})} \quad (\text{Gl. 5.6})$$

Aus **Gleichung 5.6** ergibt sich für die Veränderung der Gesamtanzahl der Unfälle  $V_U$ , getrennt nach den beiden unterschiedlichen Funktionsansätzen für den Durchschnitt ( $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,49/ A_N$ )

Schulze/ Dames ( $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,49/ A_N = 33\%$ ):

$$V_{U \text{ S/D}} = \frac{1 - A_{N1 \text{ S/D}}}{1 - A_{N2}} = \frac{1 - 0,33}{1 - A_{N2}} = \frac{0,67}{1 - A_{N2}} = \frac{0,67}{1 - A_{N2 \text{ S/D}} (\mu_{\text{SCRIM } 80})}$$

Kamplade/ Schmitz ( $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,49/ A_N = 35\%$ ):

$$V_{U \text{ K/S}} = \frac{1 - A_{N1 \text{ K/S}}}{1 - A_{N2}} = \frac{1 - 0,35}{1 - A_{N2}} = \frac{0,65}{1 - A_{N2}} = \frac{0,65}{1 - A_{N2 \text{ K/S}} (\mu_{\text{SCRIM } 80})}$$

Die mittlere Unfallrate UR lässt sich somit als Funktion der Griffigkeit darstellen:

$$UR(\mu_{\text{SCRIM } 80}) = UR \cdot V_U \quad [U/10^6 \text{Kfz} \cdot \text{km}]$$

$$UR(\mu_{\text{SCRIM } 80}) = UR \cdot \frac{1 - A_{N1}}{1 - A_{N2} (\mu_{\text{SCRIM } 80})} \quad [U/10^6 \text{Kfz} \cdot \text{km}]$$

Mit der mittleren Unfallrate für Bundesautobahnen von 0,813 ergibt sich

$$UR_{\text{BAB}}(\mu_{\text{SCRIM } 80}) = 0,813 \cdot \frac{1 - A_{N1}}{1 - A_{N2} (\mu_{\text{SCRIM } 80})} \quad [U/10^6 \text{Kfz} \cdot \text{km}] \quad (\text{Gl. 5.7})$$

Für die beiden unterschiedlichen funktionalen Ansätze folgt schließlich:

Schulze/ Dames:

$$UR(\mu_{\text{SCRIM } 80})_{\text{BAB S/D}} = 0,813 \cdot \frac{67}{99,8541 + 46,572 \cdot \ln(\mu_{\text{SCRIM } 80})} \quad [U/10^6 \text{Kfz} \cdot \text{km}]$$

Kamplade/ Schmitz:

$$UR(\mu_{\text{SCRIM } 80})_{\text{BAB K/S}} = 0,813 \cdot \frac{65}{100 - 18,318 \cdot \mu_{\text{SCRIM } 80}^{-0,9219}} \quad [U/10^6 \text{Kfz} \cdot \text{km}]$$

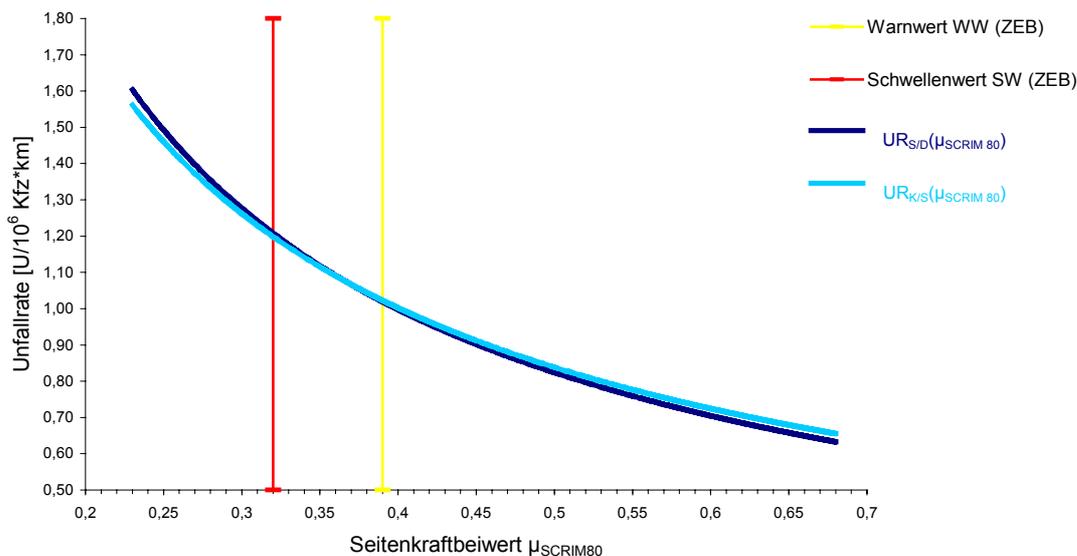


Abb. 5.23: Funktionsmodelle der Unfallrate UR für BAB in Abhängigkeit des Gleitbeiwertes  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$

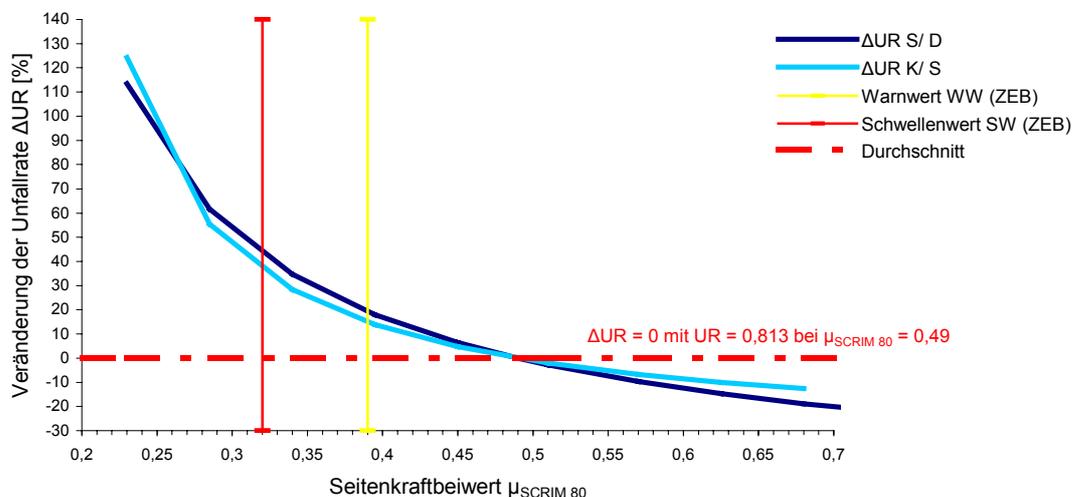
Beide Funktionsmodelle haben einen ähnlichen Verlauf und zeigen einen starken Anstieg der Unfallrate für Griffigkeitswerte  $\mu_{\text{SCRIM}} \leq 0,45$ . In den Resultaten unterscheiden sich die beiden Modelle nur geringfügig, so dass auch eine Zusammenfassung der Ergebnisse gerechtfertigt wäre. Der Rechen- und Lösungsweg wird in dieser Arbeit jedoch mit beiden Modellen getrennt aufgezeigt. Nur so können die Lösungsansätze und die zugehörigen Ergebnisse eindeutig der jeweiligen Studie zugeordnet und die - wenn auch minimalen - Ergebnisdifferenzen diskutiert werden.

### 5.5.2.2 Veränderung der Unfallrate $\Delta UR$

Um den Einfluss der Griffigkeit auf das Unfallgeschehen deutlicher herauszustellen, wird die Veränderung der Unfallrate  $\Delta UR$  dargestellt. Es gilt:

$$\Delta UR = \frac{UR_{\mu_{\text{SCRIM}} 80} - UR_{\mu_{\text{SCRIM}} 80 = 0,49}}{UR_{\mu_{\text{SCRIM}} 80 = 0,49}}$$

Wie in **Abb. 5.24** ersichtlich, steigt allein im Griffigkeitsbereich zwischen  $\mu_{\text{SCRIM}} = 0,49$  und  $\mu_{\text{SCRIM}} = 0,39$  (Warnwert WW nach der ZEB) die Unfallrate um ca. 15 % an. Zwischen dem Warnwert und dem Schwellenwert ( $\mu_{\text{SCRIM}} = 0,32$ ) beträgt die Differenz bereits 20%.



**Abb. 5.24:** Veränderung der Unfallrate  $\Delta UR$  auf BAB in Abhängigkeit der Griffigkeit  $\mu_{\text{SCRIM}} 80$

Bei Betrachtung der Unfallkosten UK kommt der Veränderung der Griffigkeit folglich eine außerordentlich große Bedeutung zu.

### 5.5.2.3 Veränderung der Unfallkosten $\Delta UK$

Mit der Veränderung der Unfallrate ändern sich auch die Unfallkosten UK. Nach **Gleichung 5.1** ergeben sich die griffigkeitsabhängigen Unfallkosten UK ( $\mu_{\text{SCRIM}} 80$ ) zu:

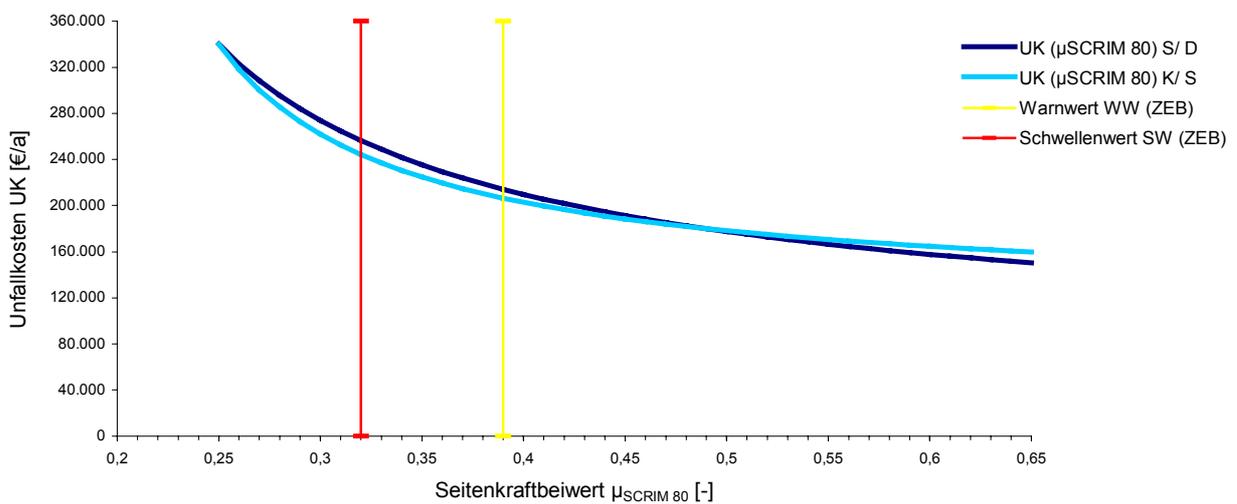
$$UK_{BAB}(\mu_{SCRIM\ 80}) = 3,73 \cdot DTV \cdot I \cdot f(\mu_{SCRIM\ 80}) \quad \left[\frac{\text{€}}{a}\right]$$

Diese Funktion spiegelt den unmittelbaren Zusammenhang zwischen der Zustandsgröße Griffigkeit  $\mu_{SCRIM\ 80}$  und den Straßennutzerkosten in Form der Unfallkosten wider. Damit lassen sich für jeden Griffigkeitszustand die zu erwartenden Unfallkosten UK berechnen.

$$UK_{S/D\ BAB}(\mu_{SCRIM\ 80}) = 3,73 \cdot DTV \cdot I \cdot \frac{67}{99,8541 + 46,572 \cdot \ln(\mu_{SCRIM\ 80})} \quad \left[\frac{\text{€}}{a}\right] \quad \text{Schulze/ Dames}$$

$$UK_{K/S\ BAB}(\mu_{SCRIM\ 80}) = 3,73 \cdot DTV \cdot I \cdot \frac{65}{100 - 18,318 \cdot \mu_{SCRIM\ 80}^{-0,9219}} \quad \left[\frac{\text{€}}{a}\right] \quad \text{Kamplade/ Schmitz}$$

**Abb. 5.25** zeigt die durchschnittlichen Unfallkosten UK auf dem repräsentativen deutschen Autobahnquerschnitt für 1 km Fahrtrichtung.



**Abb. 5.25:** Durchschnittliche Unfallkosten  $_{BAB}$  je Fahrtrichtung in Abhängigkeit der Griffigkeit

Um den Einfluss der Griffigkeit auf die Kostenstrukturen der Unfälle noch deutlicher herauszuheben, wird auch hier die Veränderung der Unfallkosten  $\Delta UK$  dargestellt.

$$\Delta UK = \frac{UK_{\mu_{SCRIM\ 80}} - UK_{\mu_{SCRIM\ 80}=0,49}}{UK_{\mu_{SCRIM\ 80}=0,49}} \cdot 100 \quad [\%]$$

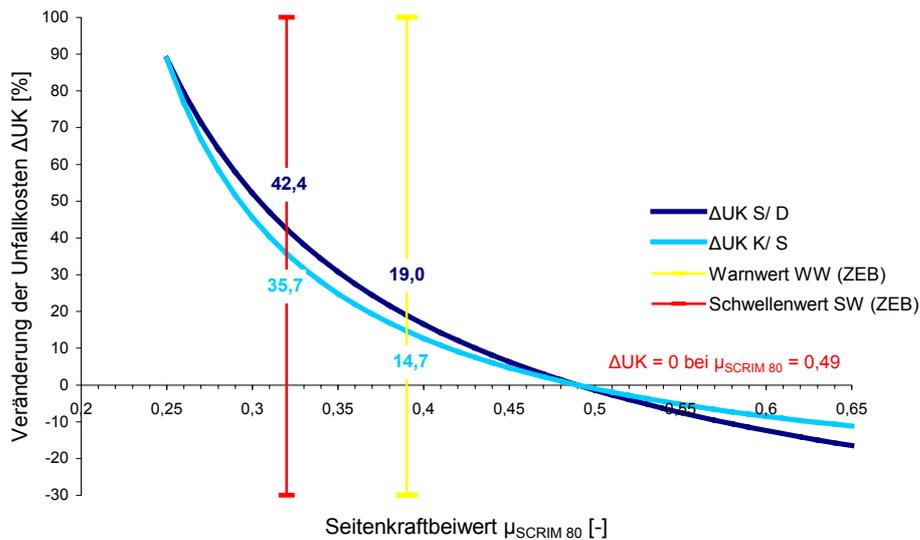


Abb. 5.26: Veränderung der Unfallkosten  $\Delta\text{UK}_{\text{BAB}}$  in Abhängigkeit der Griffigkeit

Der große Einfluss der Griffigkeit auf die Unfallkosten dokumentiert die volkswirtschaftliche Relevanz dieser Abhängigkeit.

#### 5.5.2.4 Französische Untersuchungen der École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

Um die ermittelten Ergebnisse zu untermauern, wird zusätzlich auf eine französische Studie verwiesen.

Die École National des Ponts et Chaussées (ENPC) hat auf der Route National 4 in Frankreich den Zusammenhang zwischen Unfallrate und Griffigkeit untersucht. Ein Abschnitt von insgesamt 208 km mit 201 Unfällen wurde analysiert und funktional beschrieben [050][057]. Das Ergebnis ist in **Abb. 5.27** dargestellt. Die deutlich geringeren Absolutwerte der Unfallzahlen gegenüber den deutschen Ergebnissen sind mit dem geringeren Verkehrsaufkommen zu erklären. Hinsichtlich der sich mit der Griffigkeit verändernden Unfallrate  $\Delta\text{UR}$  zeigt die französische Studie jedoch eine stärkere Auswirkung als die beschriebenen, aus den deutschen Untersuchungen abgeleiteten Ergebnisse.

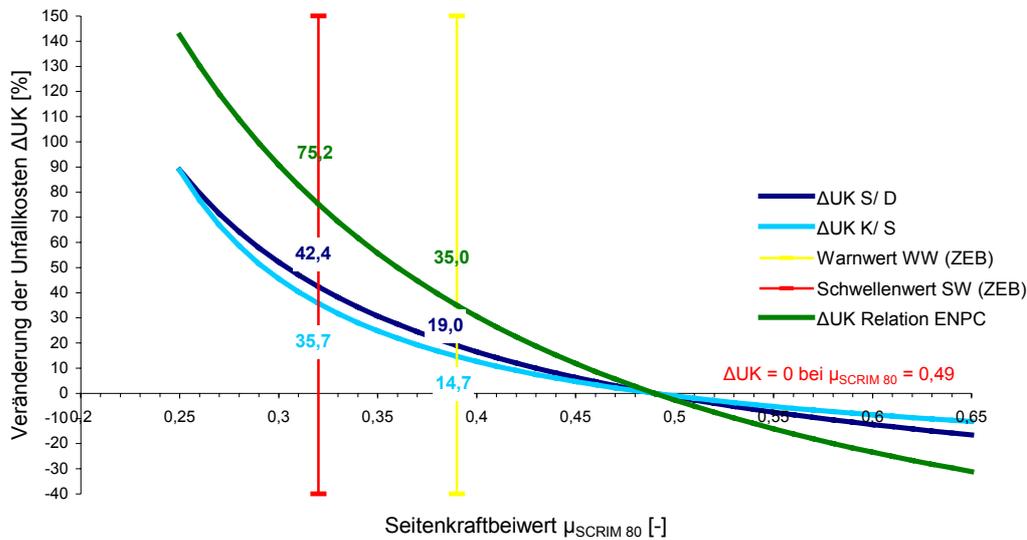


Abb. 5.27: Vergleich der zusätzlichen Unfallkosten  $\Delta UK_{BAB}$  nach französischer Studie [057] mit den Ergebnissen nach Schulze/ Dames und Kamplade/ Schmitz

### 5.6 Zusätzliche Straßennutzerkosten $\Delta SNK$ durch Baustellensituation

Als letzter Punkt muss noch der Aspekt der zusätzlichen Straßennutzerkosten durch Baustellensituationen Berücksichtigung finden. Maßnahmedurchführungen beeinflussen die Straßennutzerkosten durch Geschwindigkeitsreduktion und erhöhtes Unfallrisiko im Baustellenbereich.

Geschwindigkeitsreduktion	$\Delta KV$
	$\Delta ZK$
Erhöhtes Unfallrisiko	$\Delta UK$

Tabelle 5.18: Einfluss der Baustellensituation auf die Straßennutzer [013][094][144]

Die Höhe der zusätzlichen Straßennutzerkosten  $\Delta SNK_{Bst}$  hängt maßgeblich von der Querschnittsbeeinträchtigung und der Dauer der Baustelle ab. Zusätzlich wird in der Baustellensituation mit und ohne Stau unterschieden. Für die Instandsetzungsmaßnahmen auf 1 km Richtungsfahrbahn sind zwei Tagesbaustellen à 12 h vorgesehen (s. 4.2).

Durth [143] kommt in einer Studie hinsichtlich der Auswirkungen von Tagesbaustellen auf Autobahnen zu dem Ergebnis, dass die Stauwahrscheinlichkeit bundesweit bei 30 % liegt.

Abhängig von der Anzahl der Richtungsfahstreifen kann demnach die Ermittlung der zusätzlichen Straßennutzerkosten als Folge der Geschwindigkeitsreduktion bei „Tagesbaustellen mit Fahstreifenreduzierung“ nach Oefner [031] vorgenommen werden. Der zusätzliche Kraftstoffverbrauch in der Stausituation im Annäherungsbereich der Baustelle wird durch die

Kraftstoffeinsparungen aus der verminderten Geschwindigkeit im Baustreckenbereich nahezu kompensiert und vernachlässigt.

Die zusätzlichen Reisezeitkosten  $\Delta ZK_{Bst}$  berechnen sich aus den Reisezeitkosten im Annäherungsbereich unter Berücksichtigung der Stauwahrscheinlichkeit und den zusätzlichen Reisezeitkosten im Baustreckenbereich. In der Summe ergeben sie

$$\Delta ZK_{Bst} = 1.500,- \text{ €/Tagesbaustelle.}$$

Für die Erhaltung von 1 km Richtungsfahrbahn entstehen folglich zusätzliche Reisezeitkosten in Höhe von

$$\Delta ZK_{1km Ri} = 2 * 1.500,- \text{ €/Tagesbaustelle} = 3.000,- \text{ €/km RI .}$$

Bei der Untersuchung der Unfallhäufigkeit in Baustellenbereichen wird grundsätzlich nach der Verkehrsführung unterschieden. So haben Baustellensituationen mit Verschwenkungen in den Gegenverkehr generell ein höheres Unfallrisiko als Querschnittsverengungen ohne Verschwenkungen, wie es in der Regel bei Tagesbaustellen der Fall ist.

Untersuchungen von *Laffont et. al.* [145] in Baustellenbereichen mit Fahrstreifenreduzierung, aber

ohne Überleitung in den Gegenverkehr, ergaben einen Unfallratenfaktor  $\Psi_R = \frac{UR_{Bst}}{UR_0} = 1,4$ .

Daraus lassen sich die zusätzlichen Unfallkosten durch Baustellensituation  $\Delta UK_{Bst}$  bestimmen.

$$\Delta UK_{Bst} = 1000 * \frac{DTV}{2} * 10^{-6} * 365 * UR * WU * l * k * \Psi_R \quad \text{und mit:}$$

$$UR * WU = UKR_{BAB \text{ mittel}} = 20,44 \text{ [€/1000Kfz*km]} \text{ (s. 5.5)}$$

$$\Delta UK_{Bst} = 0,365 * \frac{DTV}{2} * 20,44 * l * k * \Psi_R$$

mit:

l - Länge der Baustellenstrecke (1 km Annäherungsbereich + 1 km Baustrecke)

k - jährlicher Anteil der Baustellensituation (2 Tage/ Jahr)

$\Psi_R$  - Unfallratenfaktor (1,4).

Daraus ergeben sich die zusätzlichen Unfallkosten infolge Baustellensituation.  $\Delta UK_{Bst} = 0,365 *$

$$\frac{DTV}{2} * 20,44 * 2 * \frac{2}{365} * 1,4 = 2.750,- \text{ €/ 2 Tagesbaustellen}$$

Für die Maßnahmedurchführung auf 1 km Richtungsfahrbahn entstehen zusätzliche Unfallkosten durch Baustellensituation von  $\Delta UK_{1 km Ri} = \text{rd. } 3.000,- \text{ €}$ .

Die gesamten zusätzlichen Straßennutzerkosten infolge Baustellensituation für die Erhaltung von 1 km Richtungsfahrbahn ergeben sich folglich aus der Summe der Teilbeträge:

$$\Delta SNK_{1 km Ri} = \Delta ZK_{1km Ri} + \Delta UK_{1 km Ri} = 3.000 \text{ €} + 3.000 \text{ €} = 6.000 \text{ €}$$

Die zusätzlichen Straßennutzerkosten infolge Baustellensituation müssen in der Nutzen-Kosten-Analyse als Kosten berücksichtigt werden und mindern entsprechend den Nutzen der Maßnahme.

Die in **Kapitel 5** aufgezeigten Zusammenhänge dokumentieren und monetarisieren die Abhängigkeit der Straßennutzerkosten von den Zustandgrößen AUN und  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$ . Sie bilden die Grundlage des analytischen Rahmens des Wirtschaftlichkeitsanalyseprogramms GEEP und damit die Voraussetzungen der Nutzen-Kosten-Analysen.

Damit wurde ein rechentechnischer Ansatz formuliert und implementiert, der es ermöglicht, Fragen der Straßenerhaltung unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten analysieren und beantworten zu können.

## **6. Nutzen-Kosten-Analyse als Entscheidungskriterium wirtschaftlich gerechtfertigter Interventionswerte**

### **6.1 Grundsätzliches**

„Gebe ich die Steuergelder effizient aus?“: Diese Frage muss sich der Staat als Verwalter des Steueraufkommens stellen. Übertragen auf die Verkehrswege muss unter anderem der volkswirtschaftliche Nutzen der Straßenerhaltung analysiert werden.

Die gesamtwirtschaftliche Bewertung erwogener Verkehrswegeprojekte erfolgt im Rahmen der Nutzen-Kosten-Analyse grundsätzlich anhand des Vergleiches der Nutzen- und Kostensituation mit und ohne Maßnahme (Planfall gegenüber dem Vergleichsfall). Bei den modernisierten Verfahren des Bundesverkehrswegeplanes (BVWP 03) [115] werden zusätzlich die Auswirkungen der Maßnahmen auf die Umwelt und die sozioökonomischen Veränderungen der Umgebung als Entscheidungskriterien für die wohlfahrtsökonomische Analyse herangezogen. Diese beiden zusätzlichen Entscheidungskriterien werden in der Umweltrisikoeinschätzung und der Raumwirksamkeitsanalyse (Motivation der Mobilität Beschäftigungssicherung etc.) berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Arbeit ist aber die rein wirtschaftliche Betrachtung ausreichend, da Erhaltungsmaßnahmen im Wesentlichen nur auf die Nutzung der bestehenden Straße Einfluss haben. Der projektübergreifende Einfluss durch Schaffung von Arbeitsplätzen etc. ist, wenn überhaupt, nur als marginal zu bezeichnen und kann somit vernachlässigt werden.

*Hanusch* [125] bemerkt, dass die Nutzen-Kosten-Analyse konsequent von der individualistischen Bewertung ausgeht. „Sie unterstellt, dass die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Projektwirkungen allein auf der Grundlage der Präferenzen von Konsumenten zu erfolgen habe. Hinter ihrem methodischen Grundkonzept steht demnach das Prinzip der Konsumentensouveränität ebenso wie die demokratische Vorstellung, das Interesse der einzelnen und nicht ein ominöses Staatsinteresse bestimme letztlich das Wohl der Gesamtgesellschaft. Organstaatliche Ideen finden folglich keinen Eingang in ihr Kalkül“.

Der Straßennutzer steht somit im Vordergrund der Analysen, da er durch die Verpflichtung zu Steuerabgaben sowohl auf Seiten der Straßenbauinvestitionen als auch auf der der Kosteneinsparungen durch verminderten Verbrauch und geringere Unfallraten zu finden ist.

## 6.2 Analysekriterien

Für die Nutzen-Kosten-Analyse müssen Analysekriterien und Eingangsdaten festgelegt werden, mit deren Hilfe die Wirtschaftlichkeitsindikatoren Nettogegenwartswert NGW und interner Zinsfuß IZF zu bestimmen sind.

### 6.2.1 Nettogegenwartswert NGW

Der Nettogegenwartswert NGW wird aus der Differenz aus Nutzen und Kosten, die über den gesamten Analysezeitraum anfallen, berechnet. Wird eine Maßnahme durchgeführt, ist von einem verbesserten Fahrbahnzustand auszugehen, was zu Einsparungen sowohl bei den Unfallkosten UK als auch bei Zeit- und Fahrzeugbetriebskosten führt (**s. 5**). Die Investition im Rahmen der Maßnahme ist folglich immer mit einem Nutzen in Verbindung zu setzen. Die für die Bestimmung der beiden Wirtschaftlichkeitsindikatoren relevanten Größen stellen dabei jeweils die Ausgaben- bzw. Nutzendifferenzen  $\Delta SBK$  bzw.  $\Delta SNK$  dar.

#### 6.2.1.1 Kosten

$$K_i * \frac{1}{q^i} = (\Delta SBK_{i1-0} + \Delta SNK_{iB1-0}) * \frac{1}{q^i} = [(SBK_{i1} - SBK_{i0}) + (SNK_{iB1} - SNK_{iB0})] * \frac{1}{q^i} \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

mit:

$K_i$  - Ausgabendifferenz im Jahr  $i$

$SBK_{i0}$  - Straßenbaulastträgerkosten für die Basisoption im Jahr  $i$

$SBK_{i1}$  - Straßenbaulastträgerkosten für die Maßnahme 1 im Jahr  $i$

$SNK_{iB0}$  - Straßennutzerkosten in der Baustellensituation für die Basisoption (=0)

$SNK_{iB1}$  - Straßennutzerkosten in der Baustellensituation für die Maßnahme 1

$q$  - Zinsfaktor =  $1 + \frac{p}{100}$

$p$  - Kalkulationszinssatz [%]

Die Kosten werden zum einen aus den Mehrausgaben des Straßenbaulastträgers  $\Delta SBK_{1-0}$  durch die höheren Investitionen bei der Basisoption gegenüber der Vergleichs- bzw. Basisoption bestimmt. Durch die Baustellenbehinderung entstehen dem Straßennutzer während der Durchführung der Maßnahme zusätzliche Kosten  $\Delta SNK_{B1-0}$ . Diese resultieren aus den zusätzlichen Reisezeitkosten und der erhöhten Unfallgefahr im Baustellenbereich (**s. 5.6**).

#### 6.2.1.2 Nutzen

Die Nutzen ergeben sich aus den eingesparten Straßennutzerkosten sowie den eingesparten laufenden Kosten des Straßenbaulastträgers während der Gewährleistungsdauer der Maßnahme. In der Gewährleistungsphase kommt der Unternehmer für die mögliche bauliche Unterhaltung des Straßenabschnittes auf und entlastet für diese Zeit den Straßenbaulastträger. Ein weiterer Nutzen

besteht in der Qualitätssteigerung des Straßenkörpers nach Maßnahmedurchführung. Dieser Wertgewinn wird durch den Restwert R der Investition am Ende des Analysezeitraumes n ausgedrückt (**s. 4.1**).

$$\begin{aligned}
 N_i \cdot \frac{1}{q^i} &= (\Delta SNK_{i0-1} + \Delta KL_{i0-1}) \cdot \frac{1}{q^i} + R \cdot \frac{1}{q^n} \\
 &= [(SNK_{i0} - SNK_{i1}) + (KL_0 - KL_1)] \cdot \frac{1}{q^i} + R \cdot \frac{1}{q^n} \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]
 \end{aligned}$$

mit:

- $N_i$  - Nutzen in dem Jahr i
- $SNK_{i1}$  - Straßennutzerkosten für den Straßenzustand im Jahr i nach der Maßnahme 1
- $SNK_{i0}$  - Straßennutzerkosten für den Straßenzustand im Jahr i bei der Basisoption
- $KL_{i0}$  - laufende Kosten des Straßenbaulastträgers im Jahr i bei der Basisoption
- $KL_{i1}$  - laufende Kosten des Straßenbaulastträgers im Jahr i bei der Maßnahmeoption
- R - Restwert der Investitionsmaßnahme am Ende des Betrachtungszeitraumes n (**s. 4.1**)
- n - Betrachtungszeitraum.

Um den Nettogegenwartswert bestimmen zu können, müssen neben den Kosten und Nutzen zusätzlich der Betrachtungszeitraum n und der Kalkulationszinssatz p (abgeleitet aus dem Diskontsatz) festgelegt werden.

### 6.2.1.3 Betrachtungszeitraum n

Der Betrachtungszeitraum n der Nutzen-Kosten-Analyse, d. h. der Zeitraum, in dem Nutzen und Kosten der jeweiligen Projekte erfasst und gegenübergestellt werden, bestimmt sich durch den gewogenen Durchschnitt der Lebensdauer der einzelnen Projektbestandteile. Mit dieser Vorgehensweise erübrigt sich der Ansatz von Reinvestitionen. Bei der Deckschichterneuerung wird eine durchschnittliche Lebensdauer von 12,5 Jahren angenommen, für die Dünnen Schichten im Kalteinbau DSK werden fünf Jahre angesetzt [018].

Bei einem Betrachtungszeitraum, der kleiner als die durchschnittliche Lebensdauer der durchgeführten Maßnahme ist, wird der Restwert gemäß des linearen Ansatzes des Wertverzehr angesetzt (**Kap.4**).

### 6.2.1.4 Diskontsatz

Die anfallenden Nutzen und Kosten zur Berechnung des Nettogegenwartswertes werden mit den diskontierten Nutzen und Kosten berechnet. Nach *Moosmayer* [126] stellt sich folglich die fundamentale Frage der objektiv richtigen Diskontierungsrate. Gibt es diese überhaupt? Wenn ja, wie hoch bzw. niedrig muss sie bei staatlichen und oder nichtstaatlichen Investitionen sein?

Der Einfluss der Zeit kommt bei (finanziellen) Ereignissen unmittelbar in dem Phänomen der Verzinsung zum Ausdruck. Der Zinssatz stellt den Zeitwert der Investitionen und der damit

verbundenen Kosten und Nutzen dar. Über den Betrachtungszeitraum werden alle Nutzen und Kosten auf einen einheitlichen Zeitpunkt bezogen.

Der zweite wesentliche Aspekt bei der Bestimmung des Zinssatzes ist der Risikozuschlag. Er berücksichtigt unter anderem alle Produktionskosten einer Unternehmung, die mit der Investition in Verbindung stehen. Ferner ist eine Entschädigung für Risiken und Unsicherheiten möglicher Gewinne in der Zukunft vorgesehen.

Der Staat hat gegenüber dem privaten Investor die Möglichkeit, das Risiko der Kapitalaufnahme auf den Schultern der Steuerzahler zu verteilen, woraus sich eine Garantie der Tilgung ergibt (Zwang des Steuersystems). Die Risiken der Kapitalaufnahme werden dadurch erheblich vermindert, was zu geringeren Kosten bei der Kapitalbeschaffung führt [127][128][129]. Das Risiko der Unsicherheit von Effizienzprognosen bei bereits errichteter Infrastruktur kann zudem aufgrund der kleinen Anzahl von unbekanntem Einflussgrößen und Störfaktoren als gering angesehen werden und spricht demnach für einen geringen Risikozuschlag [130].

Ein letzter Punkt betrifft den Grundsatz der Wohlfahrtsökonomie. Mit einem steigenden Zinssatz wird der Nutzen zukünftiger Generationen abgewertet. Da die Kosten in aller Regel zu Beginn des Projektes und damit am Anfang des Betrachtungszeitraumes anfallen, die Nutzen jedoch zu einem teilweise wesentlich späteren Zeitpunkt eintreten, wird mit der Steigerung des Zinssatzes nach kapitalmarktorientierten Gesichtspunkten (Geldwert, Risiko, etc.) das Gewicht zunehmend auf den Kostenteil gelenkt. Dies stellt einen Vorgang dar, der mit wohlfahrtsökonomischen Gedanken nicht in Einklang zu bringen ist. Der Staat darf sich bei der Entscheidungsfindung über langfristige und bedeutsame Investitionsentscheidungen nicht von kurzfristigen Risikoerwägungen leiten lassen. Ein ausgewogener Zinssatz, der sowohl dem Konsumverzicht in der Gegenwart durch Einsatz des Geldes in die Investition als auch der Nutzengewinnung zukünftiger Generationen Rechnung trägt, erscheint hier als sinnvoll.

Aus den genannten Gründen wird nicht der sehr heterogene Marktzins, sondern der konstante, an den Bundesverkehrswegeplan 03 angelehnte Kalkulationszinssatz von 3 % zugrunde gelegt [131][116][117].

Unterstützend für den festgelegten Zinssatz kann die Darstellung der Leitzinsentwicklung der Deutschen Bundesbank der letzten Jahre herangezogen werden (**s. Abb. 6.1**). Volkswirtschaftliche Untersuchungen gehen bei der Zinsentwicklung der nächsten 10 Jahre von einem dauerhaft niedrigen Niveau von  $\leq 3,0$  % aus [131]. Daraus folgernd ist der Staat in der Lage, Kapital zu einem Zinssatz von 3% beschaffen zu können.

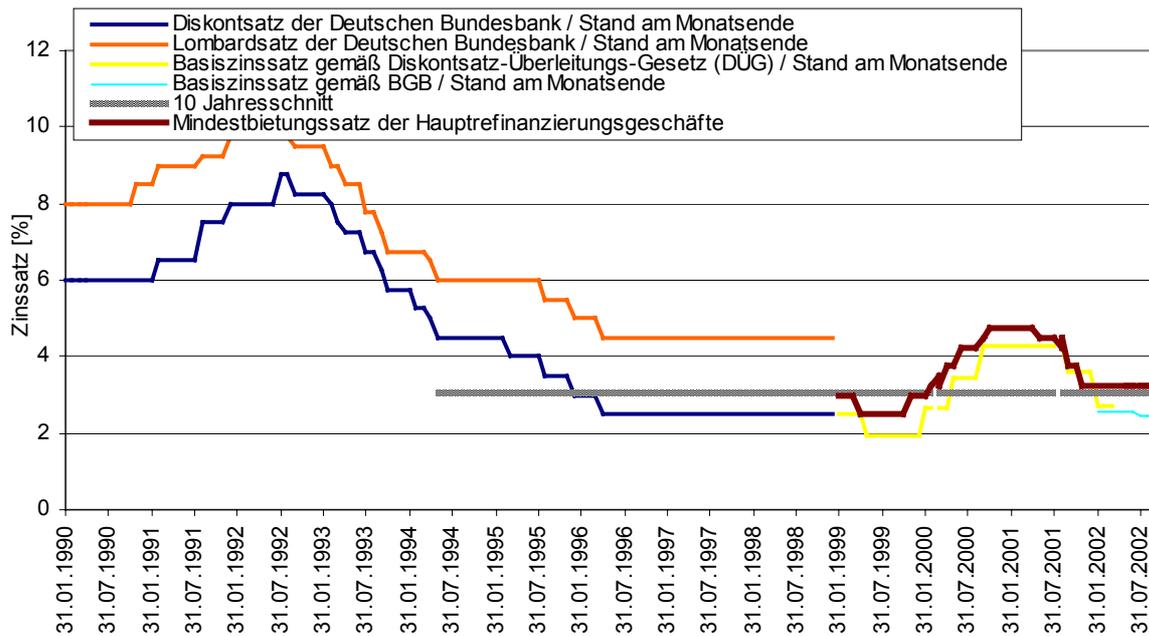


Abb. 6.1: Entwicklung der Leitzinssätze in Deutschland und Europa (Währungsunion) seit 1990, Deutsche Bundesbank

Für private Investoren hingegen liegen z.T. andere Bewertungs- und Kapitalbeschaffungsmaßstäbe vor. Sie werden in aller Regel kapitalmarktorientierter handeln und einen höheren Zinssatz zur wirtschaftlichen Kalkulation heranziehen müssen. Dieser Umstand wird bei der Festlegung der Rentabilitätsgrenze berücksichtigt.

Mit den definierten Größen lässt sich der Nettogegenwartswert NGW wie folgt berechnen:

$$\text{NGW} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \frac{1}{q^i} - \sum_{i=1}^n K_i \cdot \frac{1}{q^i} + R \cdot \frac{1}{q^n} \quad [\text{€}] \quad \text{bzw.}$$

$$\text{NGW} = \sum_{i=1}^n (\Delta \text{SNK}_{i0-1} + \Delta \text{KL}_{i0-1}) * \frac{1}{q^i} - \sum_{i=1}^n (\Delta \text{SBK}_{i1-0} + \Delta \text{SNK}_{i1-0}) * \frac{1}{q^i} + R \cdot \frac{1}{q^n} ]$$

mit:

$N_i$ : Nutzen aus dem  $i$ -ten Jahr [€]

$K_i$ : Kosten aus dem  $i$ -ten Jahr  $A_i$  [€]

$n$ : Betrachtungszeitraum [Jahre]

$R$ : Restwert der Investition am Ende des Betrachtungszeitraumes  $n$  [€] (**s. 4.1**)

$q$ : Zinsfaktor  $q = 1 + p / 100$

$p$ : Kalkulationszinssatz.

Bewertete Maßnahmen gelten als rentabel bzw. wirtschaftlich, wenn deren Nutzen größer als deren Kosten sind. Der Nettogegenwartswert NGW muss bei dieser Forderung größer als Null sein; das Kriterium der wirtschaftlichen Akzeptanz lautet:  $\text{NGW} > 0$ .

### 6.2.2 Interner Zinsfuß IZF

Der interne Zinsfuß stellt den zweiten Wirtschaftlichkeitsindikator dar. Wird mit dem Nettogegenwertwert grundsätzlich die (wirtschaftliche) Akzeptanz einer Maßnahme überprüft, kann mit dem internen Zinsfuß eine Prioritätenlistung vorgenommen werden. Grundprinzip ist die Bestimmung der internen Verzinsung bei bekannten (nichtdiskontierten) Kosten und Nutzen über den gesamten Betrachtungszeitraum. Bestimmt wird der kritische interne Zins  $p_k$ , für den gerade die Kosten gleich den Nutzen sind, der Nettogegenwertwert NGW demnach gleich Null ist.

$$\text{NGW} = 0 = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \frac{1}{q_k^i} - \sum_{i=1}^n K_i \cdot \frac{1}{q_k^i} + R \cdot \frac{1}{q_k^n} \quad [\text{€}] \quad \text{bzw.}$$

$$\text{NGW} = 0 = \sum_{i=1}^n (\Delta \text{SNK}_{i0-1} + \Delta \text{KL}_{i0-1}) \cdot \frac{1}{q_k^i} - \sum_{i=1}^n (\Delta \text{SBK}_{i1-0} + \Delta \text{SNK}_{i1-0}) \cdot \frac{1}{q_k^i} + R \cdot \frac{1}{q_k^n} \quad [\text{€}]$$

$$\text{IZF} = p_k = (q_k - 1) \cdot 100 \quad [\%]$$

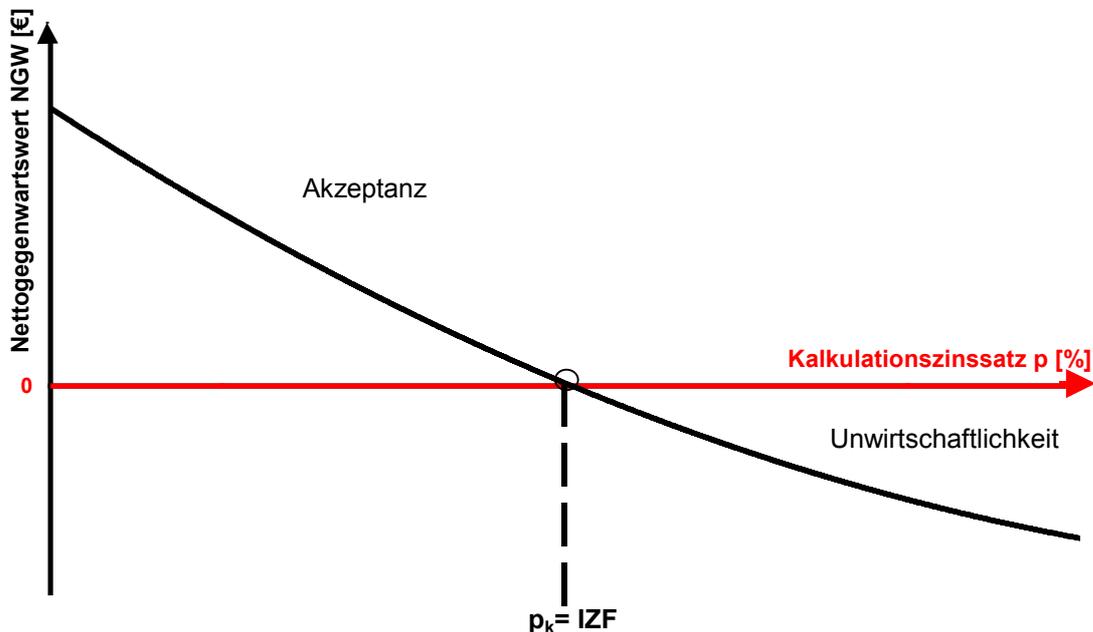


Abb. 6.2: Qualitative Darstellung des internen Zinsfußes IZF

Ist das Kriterium der wirtschaftlichen Akzeptanz erfüllt ( $\text{NGW} > 0$ ), liegt folglich auch der interne Zinsfuß über dem Kalkulationszinssatz (**s. Abb. 6.2**). Da aufgrund unterschiedlicher Investitionsvolumina einzelner Maßnahmen die Absolutbeträge nicht immer miteinander verglichen werden können, stellt der interne Zinsfuß eine Vergleichsmöglichkeit der analysierten Maßnahmen dar. Somit können Prioritätenlistungen für die Maßnahmen aufgestellt werden. Je höher der interne Zinsfuß ist, desto wirtschaftlich sinnvoller ist das investierte Geld eingesetzt.

### 6.2.3 Rentabilitätsgrenze

Die wirtschaftliche Akzeptanz einer Maßnahme ist also gegeben, wenn die resultierenden Nutzen größer als die Kosten bzw. die interne Verzinsung  $\text{IZF} \geq p$  sind.

Alle Maßnahmen, die dieses Kriterium erfüllen, sind wirtschaftlich sinnvoll. Andernfalls sind sie als unwirtschaftlich zu verwerfen.

Werden die Grenzen der Rentabilität aus Aspekten der Kostensicherheit oder aus finanziellen Engpässen höher gesetzt, so geschieht das immer aus subjektiven Entscheidungskriterien heraus. Der Grundsatz der Nutzen-Kosten-Analyse ist dann nicht mehr gewahrt [125].

So bemerkt *Baum* [138] in seinen Kernthesen zur Bundesverkehrswegeplanung 2003, dass die Einführung der Dringlichkeitsstufe aufgrund finanzieller Unterdeckung zu einem Ausschluss sinnvoller und auch notwendiger Projekte führt. Durch die Anhebung der Rentabilitätsgrenze werden Projekte verworfen, die volkswirtschaftlich gerechtfertigt sind. Diese Vorgehensweise ist als äußerst fragwürdig und wirtschaftlich inakzeptabel zu bezeichnen.

Allerdings muss auch erwähnt werden, dass der Diskontsatz durchaus Schwankungen unterworfen sein kann bzw. die Beschaffungskosten für Investoren unterschiedlich sein können. Wie bereits bei den Ausführungen zum Diskontsatz erwähnt, werden private Investoren kapitalmarktorientierter kalkulieren und folglich bei Wirtschaftlichkeitsanalysen höhere Kalkulationszinssätze zugrunde legen. Mit der Festlegung des Kalkulationszinssatzes wird aber gleichzeitig die Rentabilitätsgrenze definiert. Um diesen Schwankungen Rechnung zu tragen, wird für die Auswertung und Analyse der Maßnahmen zur Straßenerhaltung neben der wohlfahrtsökonomisch abgeleiteten Rentabilitätsgrenze von 3 % die zweite kapitalmarktorientierte Rentabilitätsgrenze von 12 % eingeführt. Sie deckt weitestgehend mögliche Schwankungen von Leitzinsen ab und berücksichtigt die Schuldensituation des Bundes sowie die Interessen privater Investoren. Ferner lehnt das zusätzliche Rentabilitätskriterium an Entscheidungshilfen der europäischen Kommission für internationale Finanzierungshilfen an [139].

Die Rentabilitätsgrenze wird festgelegt durch die Gleichung:

$$\text{Kalkulationszinssatz } p = p_k = \text{interner Zinsfuß IZF}$$

**Das Interventionsniveau, bei dem die Durchführung der Maßnahme in Bezug auf die Basisoption eine interne Verzinsung gleich dem Kalkulationszinssatz erreicht, stellt dabei per Definition den volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswert dar.**

Die Ergebnisse stellen folglich einen Interventionsbereich zwischen den definierten Rentabilitätsgrenzen dar.

### 6.3 Analyseprogramm GEEP 1.0 (German Economic Evaluation Program)

Für die rechen technisch sehr komplexe Nutzen-Kosten-Analyse von Straßenerhaltungsmaßnahmen ist das Rechenprogramm GEEP 1.0 entwickelt worden.

Es berücksichtigt neben den Kosten der Straßenbaulastträger, wie den Maßnahme-, Verkehrssicherungs- sowie den laufenden Kosten, auch die relevanten Straßennutzerkosten. Die in dieser Arbeit hergeleiteten Zusammenhänge zwischen den Zustandsgrößen AUN bzw.  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  und den Straßennutzerkosten SNK bilden dabei die Grundlage dieses Programms.

Unter der Angabe des Straßentyps (Autobahn, Bundesstraße) und der Querschnittsdaten der Richtungsfahrbahn sowie des durchschnittlichen täglichen Verkehrs DTV, können Maßnahmen der Straßenerhaltung einer volkswirtschaftlichen Nutzen-Kosten-Analyse unterzogen werden.

Zur detaillierten Bestimmung der Kostenentwicklung sind die in dieser Arbeit vorgestellten Einheitspreise und Kostensätze eingebunden worden. Wie in den folgenden Ergebnisanalysen ebenfalls dargestellt, ist der Kalkulationszinssatz, der gleichzeitig die Rentabilitätsgrenze markiert, variabel annehmbar; die Kostenentwicklungen werden sowohl diskontiert als auch nicht diskontiert über den Betrachtungszeitraum dargestellt.

Die Ergebnisse werden in Form des Nettogegenwartswertes NGW und des internen Zinsfußes IZF dargestellt und ermöglichen die Berechnung des volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswertes. Die detaillierte Programmbeschreibung ist **Anhang A5** zu entnehmen.

Das Programm bildet die Berechnungsgrundlage der im Folgenden dargestellten Ergebnisse.

#### **6.4 Ableitung der volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte IW**

Bei der Festlegung der volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte werden die Erhaltungsmaßnahmen, die zur Verbesserung der Unebenheiten bzw. Griffigkeit beitragen, mit der Basisoption „routinemäßige Unterhaltung“ verglichen. Aus diesem Vergleich lassen sich die Wirtschaftlichkeitsindikatoren bestimmen. Dabei wird der Interventionswert, der gerade zu der Erfüllung der Rentabilitätskriterien führt, als volkswirtschaftlich gerechtfertigter Interventionswert definiert. Zusammenfassend werden in **Tabelle 6.1** alle Eingangsgrößen für die volkswirtschaftliche Analyse des repräsentativen Abschnittes einer Autobahn im Überblick dargestellt.

Straßentyp	BAB
Breite:	11,50 m
DTV	48.000 [Kfz/24h]
DTV <sup>SV</sup>	7.104 [Kfz/24h]
Verkehrszuwachs p.a.	2,5 %
Analysezeitraum:	
Deckenerneuerung	12,5 Jahre
Dünne Schichten im Kalteinbau	5 Jahre
Diskontsatz	3,0 % ; 12,0 %
Betrachtete Zustandsgrößen	$\mu_{\text{SCRIM } 80}$ , AUN
routinemäßige Unterhaltung	
Basisoption	23.000 €/ km*a
Maßnahmeoption	
Gewährleistungsdauer	19.320 €/ km*a
sonst	23.000 €/ km*a
Maßnahmeoption 1	Dünne Schichten im Kalteinbau DSK EP = 4,63 €/m <sup>2</sup> , Verkehrssicherung: 1.400,- € betrachtete Zustandsgrößen: Griffigkeit $\mu_{\text{SCRIM } 80}$ ; $\mu_{\text{SCRIM } 80}(t) = 0,5552 * (t+1)^{-0,0846}$ mittlere Lebensdauer: 5 Jahre ( $\mu_{\text{SCRIM } 80}$ ) <b>[134]</b> Gewährleistungsdauer: 2 Jahre
Maßnahmeoption 2	Deckschicht im Hocheinbau 40 mm DH EP = 6,73 €/m <sup>2</sup> , Verkehrssicherung: 1.400,- € betrachtete Zustandsgrößen: Griffigkeit $\mu_{\text{SCRIM } 80}$ ; $\mu_{\text{SCRIM } 80}(t) = 0,5552 * (t+1)^{-0,0846}$ Allgemeine Unebenheiten AUN; $\text{AUN}(t) = 0,8953 * e^{0,0109 * t}$ mittlere Lebensdauer: 12,5 Jahre ( $\mu_{\text{SCRIM } 80}$ , AUN) Gewährleistungsdauer: 2 Jahre
Maßnahmeoption 3	Deckschicht im Tiefeinbau 40 mm DT EP = 8,44 €/m <sup>2</sup> , Verkehrssicherung: 1.400,- € betrachtete Zustandsgrößen: Griffigkeit $\mu_{\text{SCRIM } 80}$ ; $\mu_{\text{SCRIM } 80}(t) = 0,5552 * (t+1)^{-0,0846}$ Allgemeine Unebenheiten AUN; $\text{AUN}(t) = 0,8953 * e^{0,0109 * t}$ mittlere Lebensdauer: 12,5 Jahre ( $\mu_{\text{SCRIM } 80}$ , AUN) Gewährleistungsdauer: 2 Jahre

**Tabelle 6.1: Eingangsgrößen der volkswirtschaftlichen Nutzen-Kosten-Analyse für den repräsentativen Abschnitt einer Bundesautobahn**

Ausgehend von diesen Grundgrößen werden für die drei Maßnahmeoptionen Nutzen-Kosten-Analysen durchgeführt und die volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte für die beiden Zustandsgrößen Griffigkeit und Allgemeine Unebenheiten in Längsrichtung AUN bestimmt.

#### 6.4.1 Griffigkeit $\mu_{\text{SCRIM } 80}$

Zur Verbesserung der Griffigkeit kommen die drei in **Tab. 6.1** genannten Maßnahmeoptionen in Frage.

Die Nutzen der Maßnahmen seitens der Straßennutzer resultieren aus den verringerten Unfallkosten UK. In Anlehnung an die hergeleiteten Abhängigkeiten (**s. 5.4.2**) wird eine griffigkeitsbedingte Veränderung der Unfallhäufigkeit erst bei  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  – Werten von  $< 0,49$  angenommen.

Das Prinzip der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist in **Abb. 6.3** und **6.4** für die unterschiedlichen Maßnahmen gezeigt.

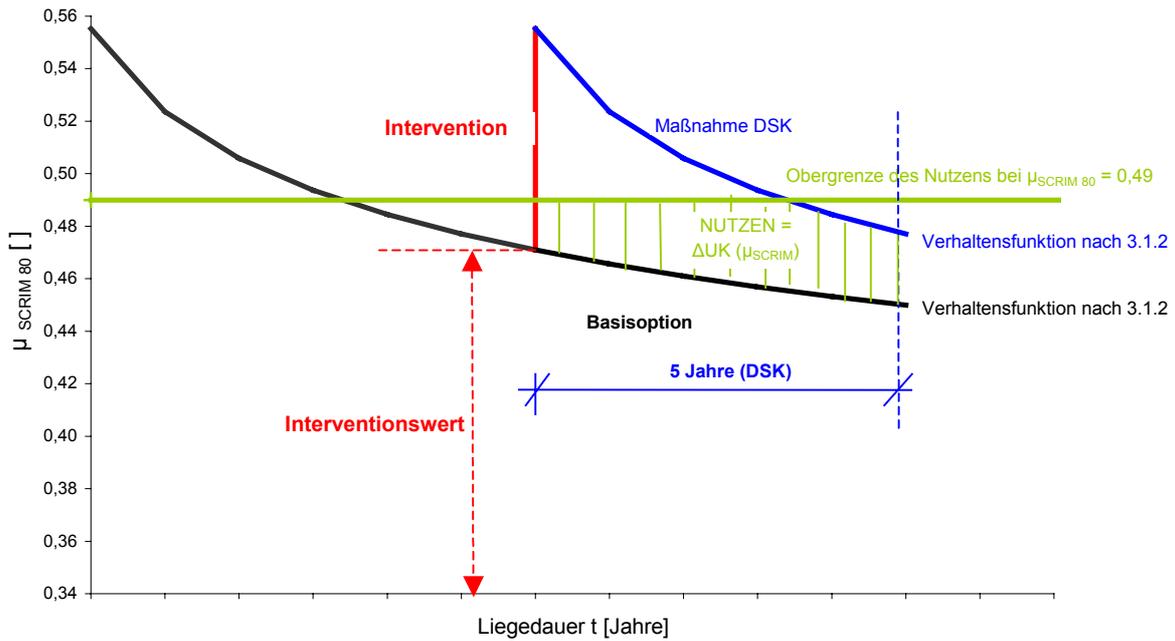


Abb. 6.3: Prinzipieller Vergleich der Maßnahme „Dünne Schichten im Kalteinbau DSK“ zur Basisoption

Die Dünnen Schichten im Kalteinbau DSK bewirken während ihrer durchschnittlichen Lebensdauer von fünf Jahren eine Griffigkeitsverbesserung. Die Unfallkosten UK für die Basis- und die Maßnahmeoption in diesen fünf Jahren werden nach den Ansätzen

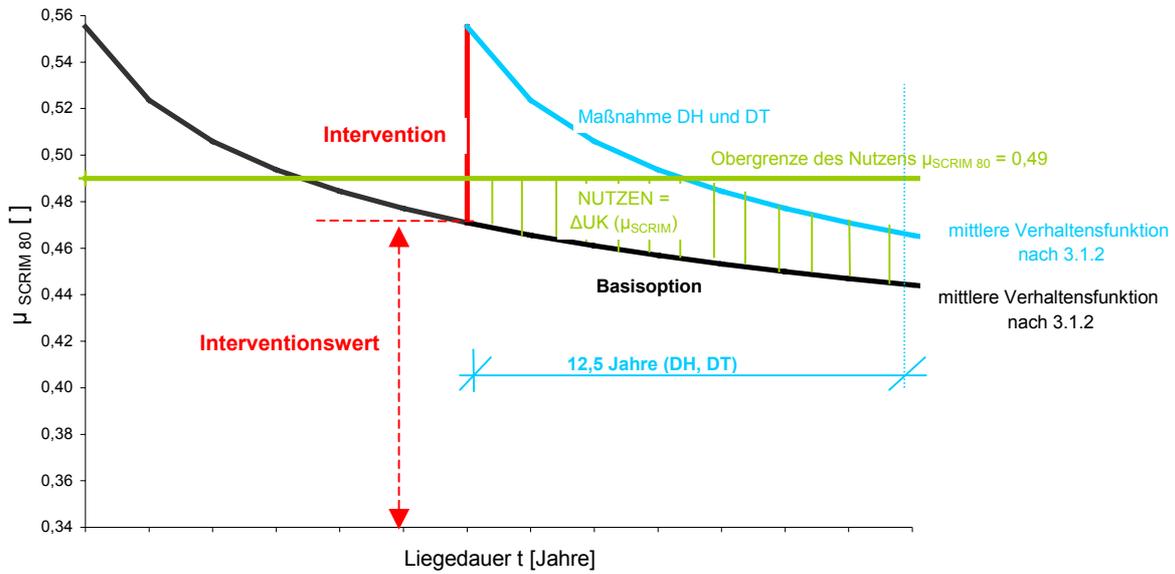
$$UK_{S/D\ BAB} (\mu_{SCRIM\ 80}) = 3,73 \cdot DTV \cdot I \cdot \frac{67}{99,8541 + 46,572 \cdot \ln(\mu_{SCRIM80})} \left[ \frac{\text{€}}{a} \right] \quad \text{Schulze/ Dames}$$

$$UK_{K/S\ BAB} (\mu_{SCRIM\ 80}) = 3,73 \cdot DTV \cdot I \cdot \frac{65}{100 - 18,318 \cdot \mu_{SCRIM\ 80}^{-0,9219}} \left[ \frac{\text{€}}{a} \right] \quad \text{Kamplade/ Schmitz}$$

berechnet (s. 5.4.2).

Nutzen der Maßnahme aus eingesparten Unfallkosten  $\Delta UK = UK_{\text{Basisoption}} - UK_{\text{Maßnahmeoption}}$

Der Gesamtnutzen resultiert aus der Summe der eingesparten Unfallkosten, dem Restwert der Maßnahme am Ende des Betrachtungszeitraumes und den eingesparten laufenden Kosten der baulichen Unterhaltung während der Gewährleistungszeit. Dem Nutzen stehen die Maßnahme- und Verkehrssicherungskosten sowie die zusätzlichen Straßennutzerkosten infolge Baustellensituation gegenüber.



**Abb. 6.4:** Prinzipieller Vergleich der Maßnahmen der Deckenerneuerung DH und DT zur Basisoption

Bei den Vergleichen der Deckschichterneuerung zur Basisoption gilt Gleiches wie bei den Dünnen Schichten im Kalteinbau. Lediglich der Analysezeitraum verlängert sich - bedingt durch die längere Lebensdauer - auf 12,5 Jahre.

Sämtliche Ergebnisse werden in Form des internen Zinsfußes IZF dargestellt.

**6.4.1.1 Maßnahme 1: Dünne Schichten im Kalteinbau (DSK)**

Das Ergebnis der Nutzen-Kosten-Analysen für die Dünnen Schichten im Kalteinbau DSK ist in den **Abb. 6.5** und **6.6** dargestellt. Aufgrund der beiden unterschiedlichen Ansätze zur Berechnung der Unfallkosten und der zwei berücksichtigten Rentabilitätsgrenzen von IZF = 3 % bzw. 12 %, ergeben die Analysen volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionsbereiche.

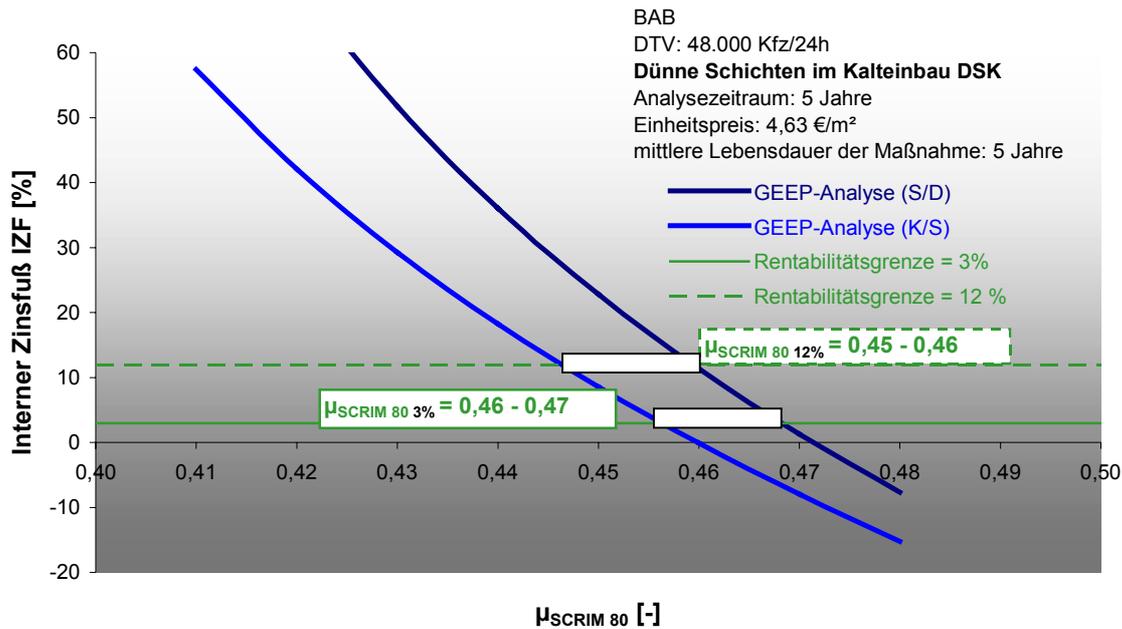


Abb. 6.5: Interner Zinsfuß IZF der Maßnahme DSK in Abhängigkeit des Interventionswertes  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$

Bei einer Rentabilitätsgrenze von  $\text{IZF} = 3\%$  liegt der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  für die durchschnittliche Verkehrsbelastung von 48.000 Kfz/24h zwischen

$$\text{IW } \mu_{\text{SCRIM } 80 \text{ DSK}} = 0,46 \div 0,47$$

Setzt man die Rentabilitätsgrenze bei einer internen Verzinsung von  $12\%$  an, liegt der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert zwischen

$$\text{IW } \mu_{\text{SCRIM } 80 \text{ DSK}} = 0,45 \div 0,46$$

Die eingesparten diskontierten Unfallkosten  $\Delta\text{UK}$  summieren sich in der fünfjährigen Lebenserwartung der Maßnahme auf über 50.000 €/km Richtungsfahrbahn). Zusammen mit den eingesparten Baulastträgerkosten von ca. 7.000 €/km Richtungsfahrbahn) ergeben die Nutzen in der Summe über 57.000 €/km Richtungsfahrbahn) und gleichen damit die entstanden Kosten aus Maßnahmedurchführung, Verkehrssicherung und zusätzlichen Straßennutzerkosten infolge Baustelle aus (s. **Anhang A6**). Das Ergebnis veranschaulicht sehr deutlich, dass die volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte weit über dem Eingreifwert der ZEB von  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,32$  liegen.

Ergänzend ist die Entwicklung der internen Verzinsung für die Durchführung der Maßnahme beim Warnwert  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,39$  und Schwellenwert  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,32$  in Abhängigkeit des DTV dargestellt (**Abb. 6.6**).

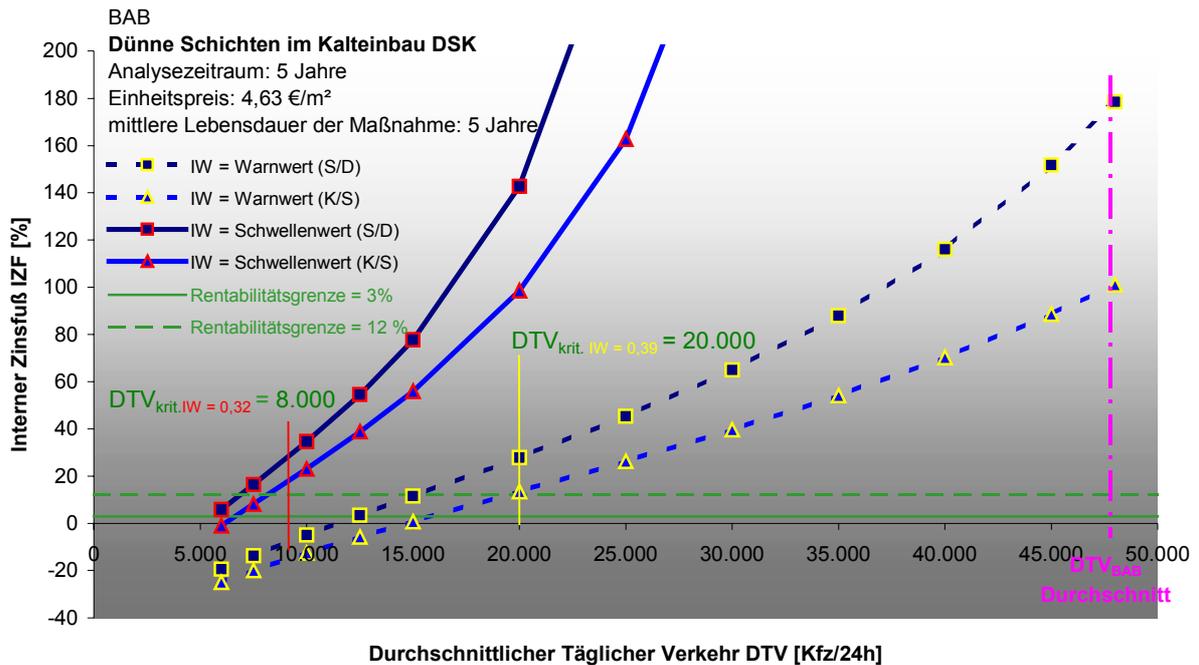


Abb. 6.6: Interner Zinsfuß IZF der Maßnahme DSK für die Interventionswerte 0,39 und 0,32 in Abhängigkeit des DTV

Demnach wäre ein volkswirtschaftlich gerechtfertigter Interventionswert von  $\mu_{SCRIM\ 80} = 0,39$  bereits bei einem DTV zwischen 13.000 und 20.000 [Kfz/24h] (je nach Festlegung der Rentabilitätsgrenze) gegeben. Wird die Interventionsgrenze bei  $\mu_{SCRIM\ 80} = 0,32$  festgelegt, so ist diese bereits bei einer Verkehrsbelastung von ca. 8.000 Kfz/24h als volkswirtschaftlich gerechtfertigt zu bezeichnen.

Nach der aktuellen Vorgehensweise in der Straßenerhaltung bedeutet das für den repräsentativen Autobahnabschnitt ein viel zu spätes Eingreifen. So resultiert aus der Differenz aus volkswirtschaftlich gerechtfertigter Intervention und Intervention nach der ZEB allein bei der Betrachtung der zusätzlichen Unfallkosten ein Verlust von bis zu 400.000 €/ (km Richtungsfahrbahn) ( $NGW\ UK_{\mu\ SCRIM = 0,32} \approx 450.000\ €/km - NGW\ UK_{\mu\ SCRIM = 0,46} \approx 50.000\ €/km$ ).

Alle weiteren Maßnahmen werden im Folgenden nach dem gleichen Auswertungsmuster analysiert.

**6.4.1.2 Maßnahme 2: Deckschicht im Hocheinbau 40mm (DH)**

Die Deckschicht im Hocheinbau DH hat im Vergleich zu den DSK eine längere Lebensdauer. Die Nutzen und Kosten, die aus der Durchführung der Maßnahme entstehen, werden im Betrachtungszeitraum von 12,5 Jahren einander gegenübergestellt.

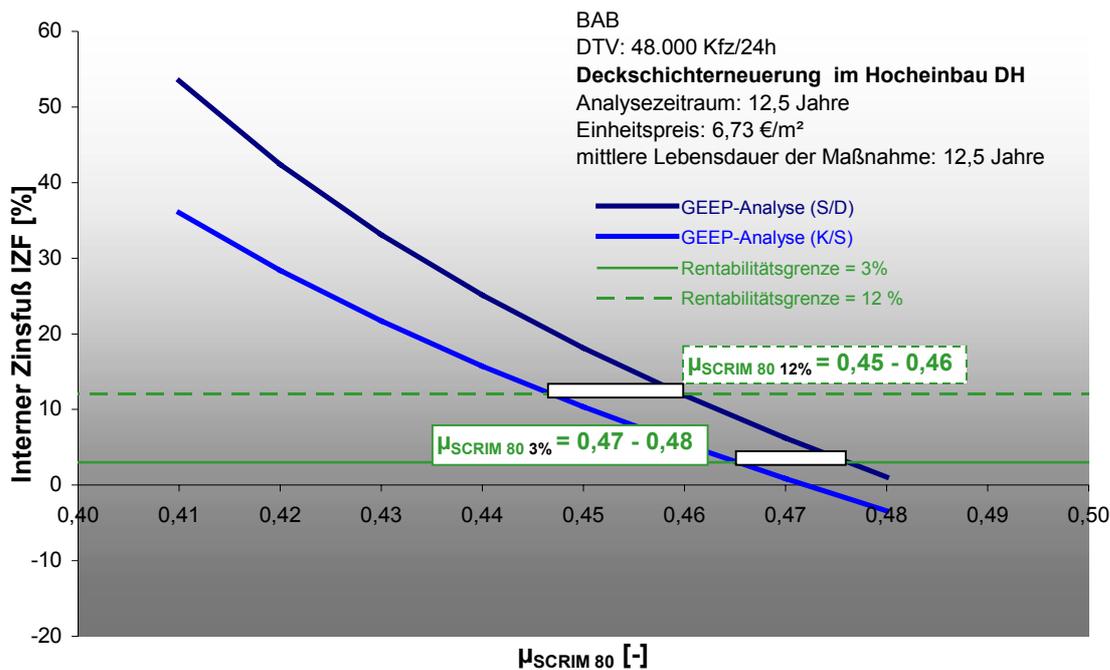


Abb. 6.7: Interner Zinsfuß IZF der Maßnahme  $DH_{40 \text{ mm}}$  in Abhängigkeit des Interventionswertes  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$

Bei der Deckschicht im Hocheinbau DH liegt der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert bei einer Rentabilitätsgrenze von 3 % bereits im Bereich zwischen

$$\text{IW } \mu_{\text{SCRIM } 80 \text{ DH}} = 0,47 \div 0,48$$

Trotz der höheren Baukosten im Vergleich zu den DSK ist ein früheres Intervenieren sinnvoll, was mit der längeren Lebensdauer der Maßnahme erklärt werden kann. Summiert über den Betrachtungszeitraum von 12,5 Jahren, ergeben sich die diskontierten Nutzen  $\Delta\text{UK}$  von über 70.000 €/(km Richtungsfahrbahn) (s. Anhang A6).

Dieser Interventionsbereich liegt damit ebenfalls ein Vielfaches über dem für diese Funktionsklasse vorgeschriebenen Eingreifwert nach der ZEB von  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,32$ .

Wird die Rentabilitätsgrenze bei 12 % festgelegt, liegt der Interventionsbereich zwischen

$$\text{IW } \mu_{\text{SCRIM } 80 \text{ DH}} = 0,45 \div 0,46$$

Betrachtet man auch hier die Entwicklung der internen Verzinsung der Maßnahmedurchführung bei den Interventionswerten  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,39$  bzw.  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,32$  mit veränderlicher Verkehrsbelastung, ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Dünnen Schichten im Kalteinbau (Abb. 6.8).

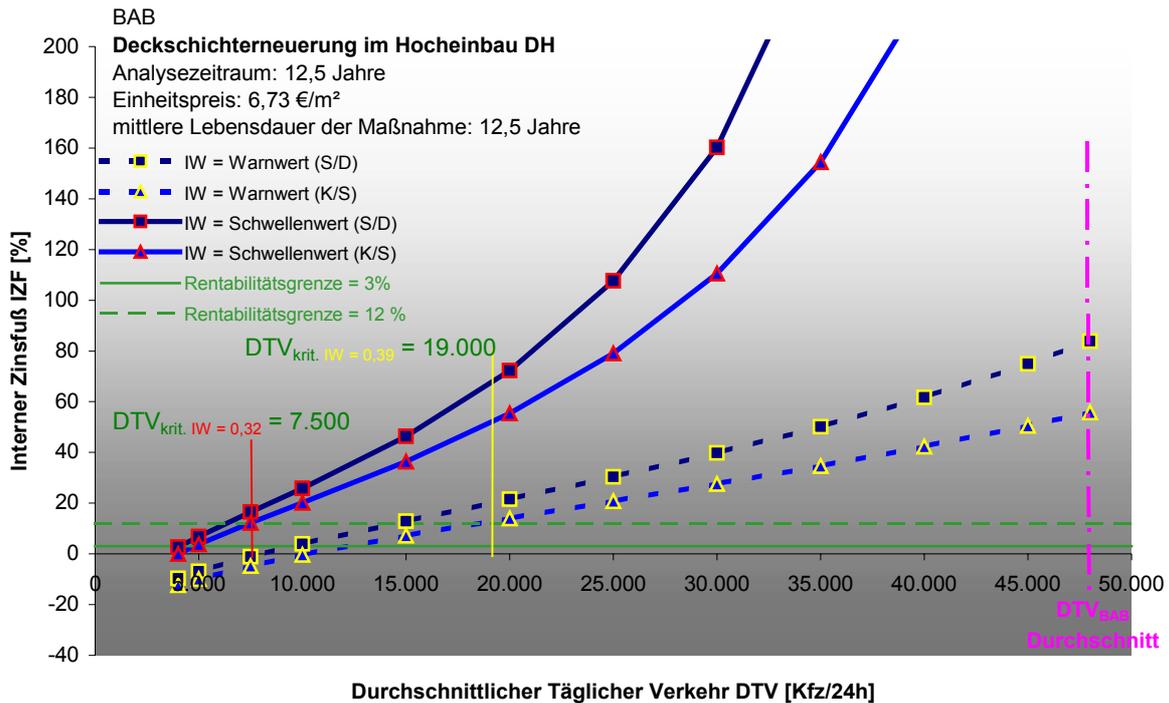


Abb. 6.8: Interner Zinsfuß IZF der Maßnahme DH für die Interventionswerte  $IW = 0,39$  und  $0,32$  in Abhängigkeit des DTV

Die volkswirtschaftliche Rechtfertigung der Interventionswerte nach der ZEB ist ebenfalls bereits bei geringen Verkehrsbelastungen unter 19.000 Kfz/24h gegeben. Die Entwicklung der internen Verzinsung der Maßnahmedurchführung beim Schwellen- bzw. Warnwert mit steigendem DTV veranschaulicht die enorme Diskrepanz zwischen den Interventionswerten der ZEB und den volkswirtschaftlich gerechtfertigten.

Der volkswirtschaftliche Verlust durch **nicht** eingesparte Unfallkosten infolge späterer Intervention liegt bei mehr als 800.000 €/(km Richtungsfahrbahn) ( $NGW_{UK_{\mu SCRIM = 0,32}} \approx 900.000 \text{ €/km} - NGW_{UK_{\mu SCRIM = 0,46}} \approx 70.000 \text{ €/km}$ ).

#### 6.4.1.3 Maßnahme 3: Deckschicht im Tiefeinbau 40mm (DT)

Für die Deckschicht im Tiefeinbau gilt hinsichtlich der Lebensdauer und der Nutzenermittlung gleiches wie bei der Deckschicht im Hocheinbau. Durch den Ausbau der vorhandenen Deckschicht aufgrund der Berücksichtigung von Durchfahrtshöhen, Anbindungen etc., zieht die Maßnahme jedoch höhere Baukosten nach sich. Folglich müssen die Interventionswerte, bei denen die Maßnahme rentabel eingesetzt werden kann, auch etwas niedriger liegen. Das Ergebnis ist in **Abb. 6.9** dargestellt.

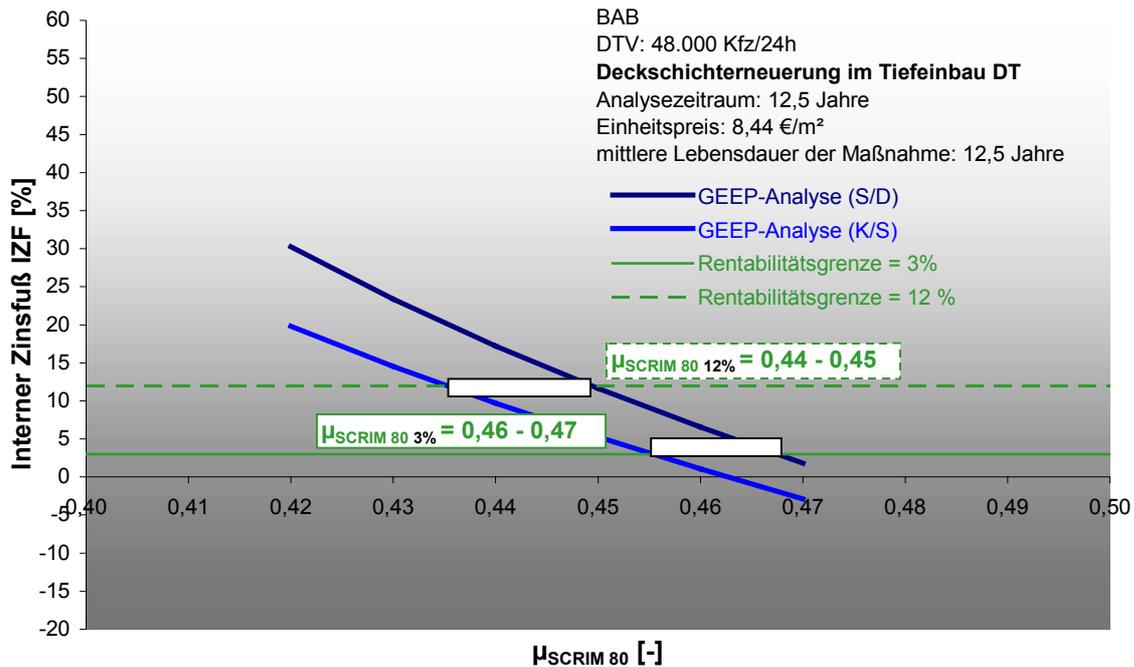


Abb. 6.9: Interner Zinsfuß IZF der Maßnahme DT<sub>40 mm</sub> in Abhängigkeit des Interventionswertes  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$

Je nach Festlegung der Rentabilitätsgrenze liegt der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert zwischen

$\text{IW } \mu_{\text{SCRIM } 80 \text{ DT}} = 0,46 \div 0,47 \text{ (Rentabilitätsgrenze 3\%)}$

$\text{IW } \mu_{\text{SCRIM } 80 \text{ DT}} = 0,44 \div 0,45 \text{ (Rentabilitätsgrenze 12\%)}$

Summiert über den Betrachtungszeitraum von 12,5 Jahren ergeben sich diskontierte Nutzen aus eingesparten Unfallkosten  $\Delta\text{UK}$  von über 90.000 €/(km Richtungsfahrbahn) und gleichen die Kosten aus Maßnahmedurchführung und zusätzlichen Straßennutzerkosten infolge Baustelle aus (**s. Anhang A6**).

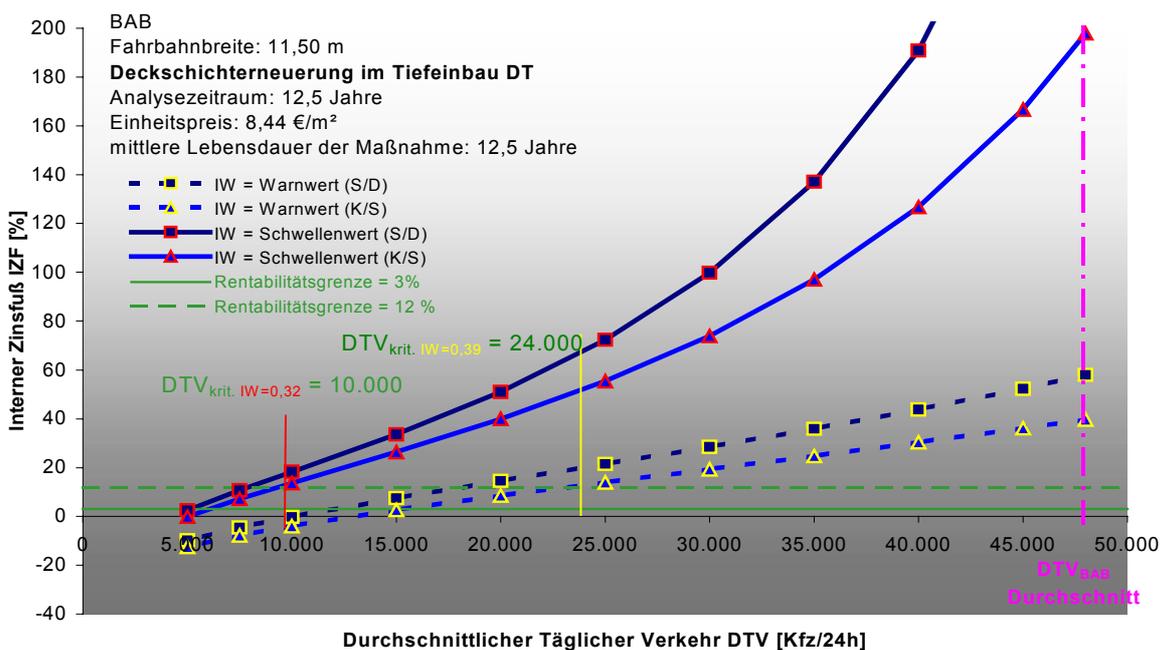


Abb. 6.10: Interner Zinsfuß IZF der Maßnahme DT für die Interventionswerte  $\text{IW} = 0,39$  und  $0,32$  in Abhängigkeit des DTV

Die Entwicklung der internen Verzinsung der Maßnahmedurchführung bei  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,39$  bzw.  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,32$  zeigt praktisch das gleiche Bild wie bei den anderen beiden Maßnahmen. Die Interventionsgrenzen wären schon bei deutlich geringeren Verkehrsbelastungen volkswirtschaftlich gerechtfertigt.

Die Entwicklung der internen Verzinsung der Maßnahmedurchführung mit abnehmender Verkehrsbelastung darf aber nur als theoretische Grenzwertanalyse gesehen werden. Derart niedrige Verkehrszahlen korrespondieren nicht mit der Realität und den durchschnittlichen Unfallraten. Gerade aber diese Tatsache dokumentiert die bedeutend zu niedrigen Interventionswerte nach der ZEB.

Zusammenfassend lässt sich für die Maßnahmen zur Verbesserung der Griffigkeit formulieren:

- Die volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte liegen mit  $\mu_{\text{SCRIM } 80 \text{ IW}} \geq 0,44$  bedeutend höher als die nach der ZEB festgesetzten Interventionswerte, d.h. eine frühere Intervention wäre sinnvoll.
- Der volkswirtschaftliche Verlust als Folge der niedrigen Interventionswerte durch **nicht** eingesparte Unfallkosten UK beträgt unabhängig der Maßnahme mehr als 400.000 €/(km Richtungsfahrbahn).
- Die aus den beiden Rentabilitätsgrenzen resultierenden Ergebnisse unterscheiden sich wenig voneinander.

#### 6.4.2 Unebenheit AUN

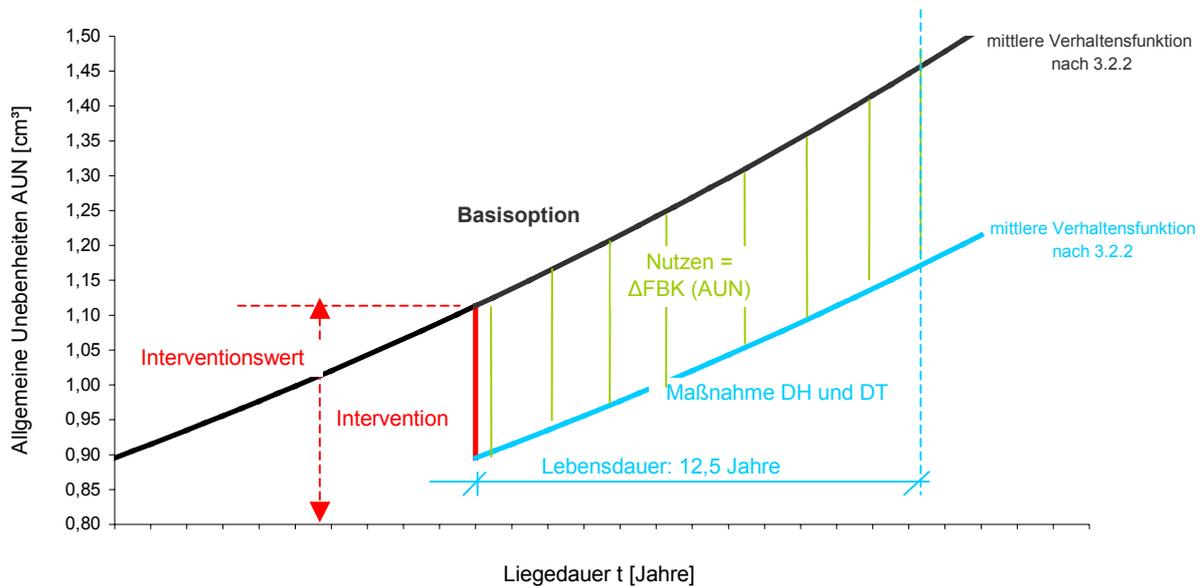
Die AUN-Werte beeinflussen den Kraftstoffverbrauch und damit die Kraftstoffverbrauchskosten in den unterschiedlichen Fahrzeuggruppen nach folgenden Funktionen (**s. 5.3.2**):

$$\begin{aligned} \text{BKF}_{\text{PO}} &= \frac{(0,0536 * V + 0,0094 * AUN + 0,38) * K_{K \text{ Benzin}}}{100} && [\text{€/km} * \text{Kfz}] \\ \text{BKF}_{\text{PD}} &= \frac{(0,054 * V + 0,107 * AUN - 0,78) * K_{K \text{ Diesel}}}{100} && [\text{€/km} * \text{Kfz}] \\ \text{BKF}_{\text{L}} &= \frac{(0,107 * AUN + 18,128) * K_{K \text{ Diesel}}}{100} && [\text{€/km} * \text{Kfz}] \\ \text{BKF}_{\text{Z}} &= \frac{(0,412 * AUN + 40,871) * K_{K \text{ Diesel}}}{100} && [\text{€/km} * \text{Kfz}] \\ \text{BKF}_{\text{B}} &= \frac{(0,153 * AUN + 25,880) * K_{K \text{ Diesel}}}{100} && [\text{€/km} * \text{Kfz}] \quad (\mathbf{s. 5.3.2}) \end{aligned}$$

Der Nutzen der Maßnahmen seitens der Straßennutzer resultiert aus den eingesparten Fahrzeugbetriebskosten durch einen geringeren Kraftstoffverbrauch.

Die Analyse der Interventionswerte für die Unebenheit in Abhängigkeit der durchgeführten Maßnahmen verläuft in Anlehnung an die Vorgehensweise bei der Griffigkeit.

Zur Verbesserung der Unebenheit einer Fahrbahnoberfläche kommen im Gegensatz zur Griffigkeit nur die Maßnahmen der Deckschichterneuerung in Frage. Die Dünnen Schichten im Kalteinbau haben keine nachhaltigen Auswirkungen auf die Unebenheiten und bleiben daher unberücksichtigt. Der prinzipielle Vergleich der beiden Maßnahmen mit der Basisoption ist in **Abb. 6.11** dargestellt.



**Abb. 6.11: Prinzipieller Zustandsverlauf der beiden Maßnahmen DH und DT im Vergleich zur Basisoption**

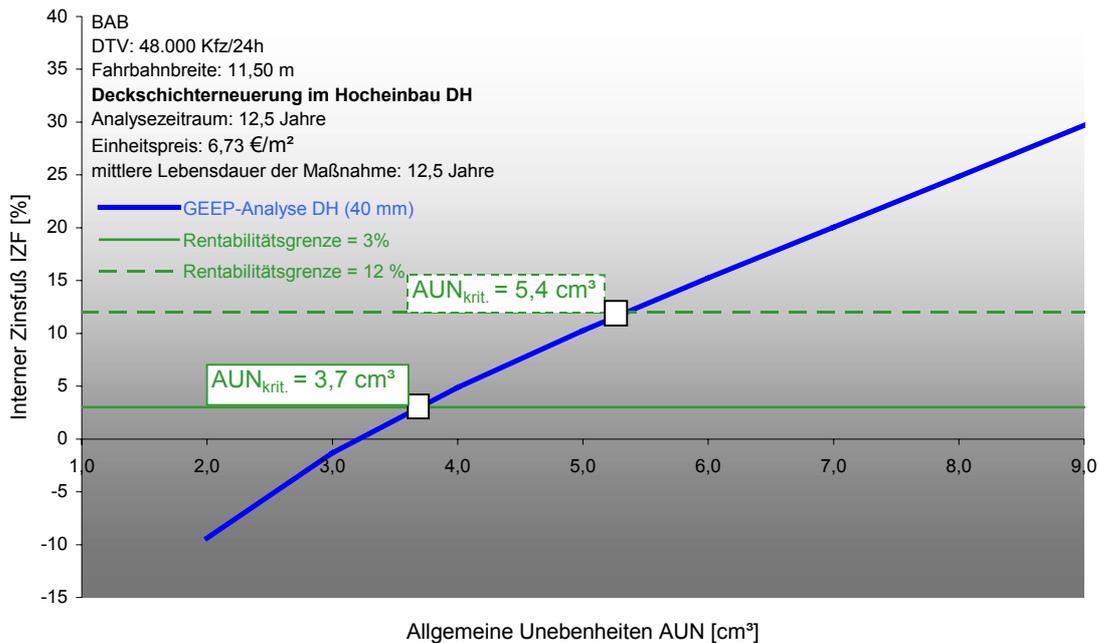
Auch hier werden in der Nutzen-Kosten-Analyse zwei Zustandsvarianten miteinander verglichen. Die beiden Maßnahmen DH und DT werden mit der routinemäßigen Unterhaltung (Basisoption) verglichen. Nach Durchführung der Maßnahmen wird die Zustandsgröße AUN der Fahrbahn auf den Wert 0,9 (genauer 0,8953)  $\text{cm}^3$  zurückgesetzt (s. 3.2.2).

Bei der Maßnahmedurchführung wird von einer optimalen Einbauqualität ausgegangen, so dass der Rücksetzwert auch erreicht wird. In der Praxis auftretende Baumängel finden keine Berücksichtigung. Dies gilt im Übrigen auch für die Maßnahmen zur Verbesserung der Griffigkeit.

Der Gesamtnutzen, der sich aus der Verbesserung der Allgemeinen Unebenheiten AUN ergibt, resultiert aus eingesparten Fahrzeugbetriebskosten  $\Delta\text{FBK}$  und während der Gewährleistungsdauer eingesparten laufenden Kosten  $\Delta\text{KL}$ .

#### 6.4.2.1 Maßnahme 2: Deckschicht im Hocheinbau 40mm (DH)

Das zusammenfassende Ergebnis der Nutzen-Kosten-Analyse für die Deckschicht im Hocheinbau DH ist in **Abb. 6.12** gezeigt.



**Abb. 6.12:** Interner Zinsfuß IZF der Maßnahme DH<sub>40 mm</sub> in Abhängigkeit des Interventionswertes AUN

Der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert liegt bei der Rentabilitätsgrenze von 3 % bei

$$\mathbf{IW\ AUN_{DH} = 3,7\ cm^3.}$$

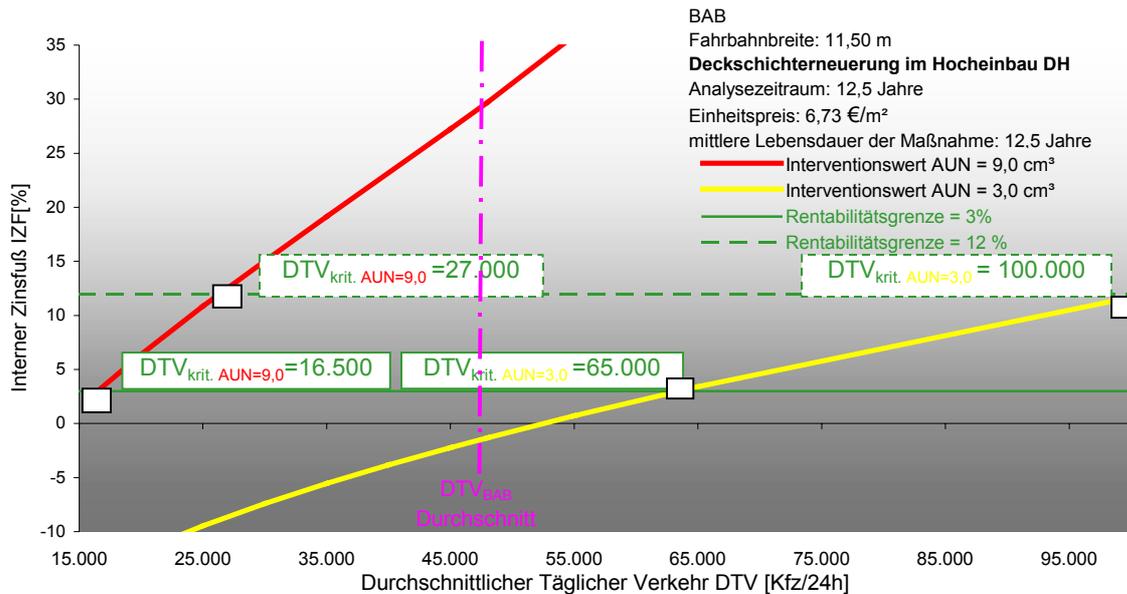
Wird die Rentabilitätsgrenze auf 12 % angehoben, liegt der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert bei

$$\mathbf{IW\ AUN_{DH} = 5,4\ cm^3.}$$

Summiert über den Betrachtungszeitraum von 12,5 Jahren ergeben sich diskontierte Nutzen aus dem eingesparten Kraftstoffverbrauch von über 75.000 €/(km Richtungsfahrbahn). Zusammen mit den eingesparten Straßenbaulastträgerkosten während der Gewährleistungsphase, gleichen sie die Ausgaben der Maßnahme, der Verkehrssicherungskosten und der zusätzlichen Straßennutzerkosten infolge Baustellensituation aus (**s. Anhang A6**).

Ergänzend ist auch hier die Entwicklung der internen Verzinsung der Maßnahmedurchführung beim Warnwert AUN = 3,0 cm<sup>3</sup> und Schwellenwert AUN = 9,0 cm<sup>3</sup> in Abhängigkeit des DTV gezeigt (**s.**

**Abb. 6.13**).



**Abb. 6.13:** Interner Zinsfuß IZF der Maßnahme DH für die Interventionswerte IW =3,0 und 9,0 in Abhängigkeit des DTV

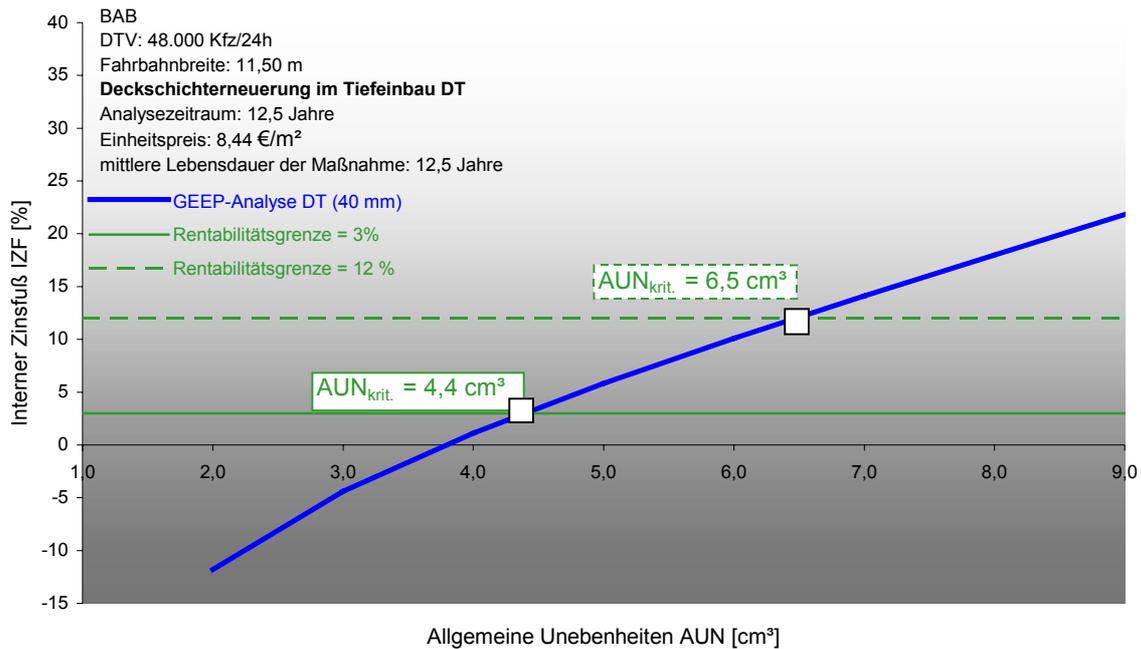
Der interne Zinsfuß IZF der Maßnahmedurchführung beim Warnwert ist für den Durchschnitt der Verkehrsbelastung  $DTV_{BAB} = 48.000$  Kfz/24h negativ und folglich als unwirtschaftlich zu definieren. Die volkswirtschaftlich gerechtfertigte Intervention beim Schwellenwert ist bereits bei einer deutlich geringeren Verkehrsbelastung als der durchschnittlichen erreicht.

Durch den niedrigen Schwellenwert nach der ZEB beläuft sich der volkswirtschaftliche Verlust als Folge **nicht** eingesparter Fahrzeugbetriebskosten im Analysezeitraum auf rd. 150.000 €/km Richtungsfahrbahn) ( $NGW FBK_{AUN=9,0} \approx 225.000$  €/km –  $NGW FBK_{AUN=3,7} \approx 75.000$  €/km).

#### 6.4.2.2 Maßnahme 3: Deckschicht im Tiefeinbau 40mm (DT)

Die Analyse der Maßnahme Deckschicht im Tiefeinbau unterscheidet sich gegenüber der Maßnahme 2 lediglich durch die höheren Baukosten. Die Ergebnisse der volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte liegen folglich über denen der Deckschicht im Hocheinbau. Das Ergebnis ist in

**Abb. 6.14** dargestellt.



**Abb. 6.14: Interner Zinsfuß IZF der Maßnahme DT<sub>40 mm</sub> in Abhängigkeit des Interventionswertes AUN**

Für die Rentabilitätsgrenze von 3 % liegt der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert bei

$$\text{IW AUN}_{\text{DT}} = 4,4 \text{ cm}^3.$$

Bei einer Rentabilitätsgrenze von 12 % liegt der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert bereits bei

$$\text{IW AUN}_{\text{DT}} = 6,5 \text{ cm}^3.$$

Betrachtet wird auch hier die Entwicklung des internen Zinsfußes IZF der Maßnahmedurchführung beim Warn- bzw. Schwellenwert.

Für eine volkswirtschaftlich gerechtfertigte Intervention beim Warnwert muss der DTV bereits zwischen 80.000 bis 130.000 Kfz/24h liegen.

Beim Schwellenwert liegt die Verkehrsbelastung, bei der die Maßnahme als volkswirtschaftlich gerechtfertigt eingesetzt werden kann, mit 20.000 bis 33.000 Kfz/24h etwa um die Hälfte unter dem durchschnittlichen DTV (s. **Abb. 6.15**).

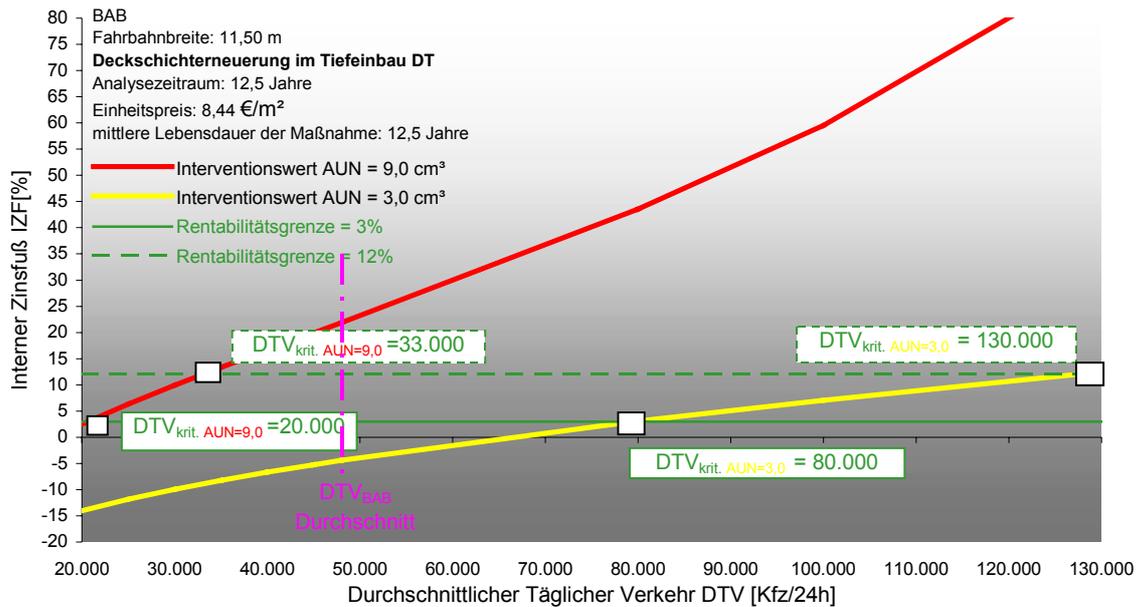


Abb. 6.15: Interner Zinsfuß IZF der Maßnahme DT für die Interventionswerte 3 und 9 cm<sup>3</sup> in Abhängigkeit des DTV

Vergleicht man den Mehrverbrauch der Fahrzeugflotte an Kraftstoff, der durch den höheren Interventionswert von AUN = 9,0 cm<sup>3</sup> gegenüber AUN = 4,4 bzw. 6,5 cm<sup>3</sup> entsteht, liegt der über den Betrachtungszeitraum entstehende Verlust bei bis zu 125.000 €/(km Richtungsfahrbahn) (**s. Anhang A6**).

Zusammenfassend lässt sich für die Maßnahmen zur Verbesserung der Unebenheiten in Längsrichtung feststellen:

- Die volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte liegen unter dem Erhaltungsniveau der ZEB, d.h. eine frühere Intervention als die nach der ZEB aktuelle (Schwellenwert) wäre sinnvoll.
- Die Verluste auf Seiten der Straßennutzer bei dem höheren Interventionswert der ZEB resultieren aus dem Mehrverbrauch an Kraftstoff und belaufen sich auf bis zu 150.000 €/(km Richtungsfahrbahn).
- Der aktuelle Interventionswert der ZEB von 9,0 cm<sup>3</sup> kann lediglich bei einer Verkehrsbelastung bis 24.000 Kfz/24h und damit der Hälfte des durchschnittlichen DTV auf Autobahnen als volkswirtschaftlich gerechtfertigt interpretiert werden.

## 7. Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit sind die Interventionswerte für die Zustandsgrößen Allgemeine Unebenheiten in Längsrichtung AUN und Griffigkeit  $\mu_{SCRIM 80}$  einschließlich der volkswirtschaftlichen Auswirkung näher untersucht worden. Ziel waren die Durchführung einer Nutzen-Kosten-Analyse für die Maßnahmen

- Dünne Schichten im Kalteinbau DSK
- Deckschichternewerung im Hocheinbau DH
- Deckschichternewerung im Tiefeinbau DT

sowie daraus abgeleitete volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswerte für einen repräsentativen Abschnitt des deutschen Autobahnnetzes.

Im Einzelnen können die Ergebnisse dieser Arbeit wie folgt zusammengefasst werden:

### 7.1 Entwicklung des Rechenprogramms GEEP 1.0

Für die rechentechnisch sehr komplexe Nutzen-Kosten-Analyse von Straßenerhaltungsmaßnahmen ist das Rechenprogramm GEEP 1.0 entwickelt worden.

Es berücksichtigt neben den Kosten der Straßenbaulastträger auch die relevanten Kosten der Straßennutzer. Die in dieser Arbeit hergeleiteten Zusammenhänge zwischen den Zustandsgrößen AUN bzw.  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  und den Straßennutzerkosten SNK bilden dabei die Grundlage dieses Programms. Die Kosten für Umwelt und Dritte sind nicht berücksichtigt, da Umweltentlastungen aufgrund einer verbesserten Fahrbahnoberfläche als marginal zu bezeichnen sind.

Die Ergebnisse werden in Form des Nettogegenwartswertes und internen Zinsfußes IZF dargestellt und ermöglichen die Berechnung des volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswertes.

Das GEEP stellt damit eine ideale Ergänzung zu aktuellen Managementsystemen dar.

### 7.2 Volkswirtschaftlich gerechtfertigter Interventionswert für die Griffigkeit $IW \mu_{\text{SCRIM } 80}$

Der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert für Maßnahmen zur Verbesserung der Griffigkeit liegt im Bereich von

$$IW \mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,44 \div 0,48$$

Dieser Interventionsbereich liegt damit deutlich über dem aktuellen Schwellenwert nach der ZEB von  $\mu_{\text{SCRIM } 80} = 0,32$ .

Folglich wären auf ca. 50 % des gesamten bundesdeutschen Autobahnnetzes griffigkeitsverbessernde Maßnahmen volkswirtschaftlich gerechtfertigt. Ferner bedeutet die Diskrepanz zwischen dem ermittelten und aktuell gültigen Interventionswert einen volkswirtschaftlichen Verlust allein durch nicht eingesparte Unfallkosten von bis zu 128.000 €/km \*a ((= 800.000 €/km Richtungsfahrbahn \* 2)/ 12,5 Jahre) .

**Der derzeit geltende Schwellenwert für Autobahnen von 0,32 ist eindeutig zu niedrig und muss korrigiert werden.**

Kritisch anzumerken ist jedoch, dass der Zusammenhang zwischen Unfallgeschehen und Griffigkeit einer großen Streuung unterworfen ist. Die Isolierung von fahrbahnbedingten Unfallursachen ist mit Schwierigkeiten verbunden.

Die Abhängigkeit des Unfallgeschehens von der Griffigkeit ist unbestritten und auch statistisch nachweisbar. Allerdings bedarf es weiterer Untersuchungen zur Präzisierung der funktionalen Abhängigkeit.

### 7.3 Volkswirtschaftlich gerechtfertigter Interventionswert für die Allgemeinen Unebenheiten in Längsrichtung $IW_{AUN}$

Der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert für Maßnahmen zur Verbesserung der Unebenheiten in Längsrichtung liegt im Bereich von

$$IW_{AUN} = 3,7 \div 6,5 \text{ cm}^3$$

Dieser Interventionsbereich befindet sich damit unterhalb des aktuellen Schwellenwertes nach der ZEB von  $AUN = 9,0 \text{ cm}^3$ .

Es ist aber bekannt, dass selbst die niedrigeren Interventionswerte der Nutzen-Kosten-Analyse in der Praxis kaum erreicht werden, so dass sich die Situation nicht so dramatisch wie bei der Betrachtung der Griffigkeit darstellt. Als Folge der volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte wären lediglich auf 3% des gesamten bundesdeutschen Autobahnnetzes unebenheitsverbessernde Maßnahmen gerechtfertigt.

Die Diskrepanz zwischen dem ermittelten und aktuell gültigen Interventionswert nach der ZEB von  $AUN = 9,0 \text{ cm}^3$  hat einen volkswirtschaftlichen Verlust durch nicht eingesparte Kraftstoffverbrauchskosten von bis zu 24.000 €/km \*a zur Folge ((= 150.000 €/km Richtungsfahrbahn \* 2)/ 12,5 Jahre).

**Der derzeit geltende Schwellenwert für Autobahnen von  $9,0 \text{ cm}^3$  ist eindeutig zu hoch und muss korrigiert werden.**

Bei den Nutzen-Kosten-Analysen der Erhaltungsmaßnahmen ist nur von der Verbesserung einer Zustandsgröße ausgegangen worden. In aller Regel werden durch eine Erhaltungsmaßnahme sowohl die Unebenheit als auch die Griffigkeit verbessert, was eine zusätzliche Senkung der Straßennutzerkosten zur Folge hat.

Für eine Anhebung des Interventionswertes spricht ferner auch die zusätzliche Fahrbahnbeanspruchung durch dynamische Radlasten, die bereits bei Fahrbahnebenheiten von  $AUN > 1,0 \text{ cm}^3$  entstehen. Sie bewirken eine Verkürzung der durchschnittlichen Lebensdauer und damit einen schnelleren Wertverlust des Straßenkörpers.

### 7.4 Bedeutung für die Praxis

Die hier gezeigten Ergebnisse beruhen auf repräsentativen Durchschnittswerten für das deutsche Autobahnnetz. Sie zeigen, dass der aktuelle Interventionswert (Schwellenwert) nach der ZEB für die Griffigkeit viel zu niedrig und für die Allgemeinen Unebenheiten in Längsrichtung  $AUN$  zu hoch ist.

Das Interventionsniveau muss für die Griffigkeit und die Unebenheit aus volkswirtschaftlicher Sicht korrigiert werden.

Da die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung von der Verkehrsbelastung sehr stark beeinflusst werden, wird vorgeschlagen, verkehrsstärkenabhängige Interventionswerte einzuführen.

Für die bundesdeutschen Autobahnen wird eine Neugliederung der Zustandsbewertung vorgeschlagen. Die aktuelle ZEB kann lediglich für eine Verkehrsbelastung bis maximal 30.000 Kfz/ 24h als (volkswirtschaftlich) gerechtfertigt akzeptiert werden. Die Zustandsbewertung sollte nach vier Verkehrsbelastungsbereichen wie folgt unterteilt werden :

$$DTV < 30.000 \text{ Kfz/ 24h}$$

$$30.000 \text{ Kfz/ 24h} \leq DTV < 75.000 \text{ Kfz/ 24h}$$

$$75.000 \text{ Kfz/ 24h} \leq \text{DTV} < 100.000 \text{ Kfz/ 24h}$$

$$\text{DTV} \geq 100.000 \text{ Kfz/ 24h}$$

Diese Unterteilung setzt für die Verkehrsstärke ausreichende Straßenquerschnitte nach der RAS-Q voraus, die einen freien Verkehrsfluss gewährleisten.

Bei Entscheidungen zur Erhaltungsstrategie bundesdeutscher Autobahnen muss in Zukunft die Nutzen-Kosten-Analyse unter angemessener Berücksichtigung der Straßennutzerkosten, wie sie schon in der Bundeshaushaltsordnung (BHO) und dem Haushaltsgrundsätzegesetz (HGRG) für Maßnahmen erheblicher finanzieller Bedeutung gefordert wird, herangezogen werden.

## 8. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde für Erhaltungsmaßnahmen auf bundesdeutschen Autobahnen eine volkswirtschaftlich orientierte Nutzen-Kosten-Analyse durchgeführt. Es wurden Wege aufgezeigt, der Forderung der Bundeshaushaltsordnung BHO nach Nutzen-Kosten-Analysen für Maßnahmen von erheblicher finanzieller Bedeutung zu entsprechen. Darüber hinaus wurden die nach der ZEB definierten Schwellenwerte für die Griffigkeit  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  und die Allgemeinen Unebenheiten in Längsrichtung AUN hinsichtlich ihrer volkswirtschaftlichen Bedeutung einer kritischen Betrachtung unterzogen.

Neben dem Rechenansatz mussten die Kostenarten und Wirtschaftlichkeitsindikatoren für die volkswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Analyse definiert werden, da diese Vorgehensweise im Rahmen der Straßenerhaltung bisher nicht üblich war. Der Schwerpunkt lag dabei auf den Kostenkomponenten der Straßenbaulastträger SBK und der Straßennutzer SNK.

Bei der Nutzen-Kosten-Analyse handelt es sich um eine vergleichende Analyse, bei der eine Maßnahmeoption mit einer Basisoption verglichen wird. Auf Grund unterschiedlicher Zustandsentwicklungen der Fahrbahnoberfläche vor und nach Maßnahmedurchführung, ergeben sich Qualitätsunterschiede, die unterschiedliche Straßennutzerkosten SNK zur Folge haben. Daraus folgernd mussten die Straßennutzerkosten SNK als veränderliche Größe in Abhängigkeit der Zustandsgrößen  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  und AUN ermittelt werden.

Die Straßennutzerkosten wurden für das Nutzerkollektiv einer deutschen Autobahn berechnet. Als Grundlage diente die Übersicht über das Fahrzeugkollektiv nach den Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS), die das Nutzerkollektiv in die Fahrzeuggruppen Pkw (P), Busse (B), Lkw (L) und Zugmaschinen (Z) unterteilt. Für die konkretere Beschreibung der repräsentativen Straßennutzer wurde diese Einteilung durch die technischen Parameter der Repräsentativfahrzeuge, die zur Kraftstoffverbrauchsermittlung notwendig sind, ergänzt. Zusammen mit der durchschnittlichen Verkehrsbelastung von 48.000 Kfz/24h (DTV) und Aufteilung des Gesamtverkehrs in die Fahrzeuggruppen konnte somit das repräsentative Nutzerkollektiv der deutschen Autobahnen definiert werden.

Die Straßennutzerkosten SNK setzen sich aus den drei Teilkostenbereichen Reisezeit- ZK, Fahrzeugbetriebs- FBK und Unfallkosten UK zusammen. Es wurde eine Abhängigkeit dieser Teilkostenbereiche von den Zustandsgrößen Allgemeine Unebenheiten in Längsrichtung AUN bzw. Griffigkeit  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  ermittelt.

Um einen direkten Zusammenhang zwischen der Zustandsgröße AUN und Fahrzeugbetriebskosten (Kraftstoffverbrauch KV) herstellen zu können, wurde experimentell eine funktionale Abhängigkeit zwischen dem in der Fahrzeugtechnik verwendeten Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$  und dem AUN-Wert hergeleitet. Dies erfolgte mittels sogenannter Ausrollversuche verschiedener Fahrzeuge auf Fahrbahnoberflächen mit unterschiedlichen Unebenheiten. Getrennt nach den Fahrzeuggruppen Pkw und Lkw konnten folgende Ergebnisse ermittelt werden:

$$f_{R \text{ Pkw}} = 0,0001 * AUN + 0,0129$$

$$f_{R \text{ Lkw}} = 0,0002 * AUN + 0,0098$$

Diese Gleichungen wurden in die Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchssimulationsrechnungen jeder Fahrzeuggruppe integriert und ergaben folglich die Fahrzeugbetriebskosten als Funktion der AUN-Werte FBK (AUN).

Basierend auf den Studien über die relative Unfallhäufigkeit bei Nässe nach Schulze/ Dames bzw. Kamplade/ Schmitz konnten die Unfallhäufigkeit bei Nässe und die daraus resultierenden Unfallkosten UK als Funktion der Griffigkeit  $\mu_{\text{SCRIM}}$  hergeleitet werden.

Beide abgeleiteten Funktionen zeigen mit einem starken Anstieg der durchschnittlichen Unfallkosten UK mit abnehmender Griffigkeit durchaus ähnliche Ergebnisse.

Der Einfluss steigender AUN-Werte auf die gefahrene Geschwindigkeit  $V$  wurde in den Teilkostenbereichen Reisezeitkosten ZK und Kraftstoffverbrauchskosten berücksichtigt, und es konnte gezeigt werden, dass sich diese beiden Kosten annähernd kompensieren.

Die infolge einer Erhaltungsmaßnahme eingesparten Straßennutzerkosten sind somit in erster Linie durch eingesparte Fahrzeugbetriebs- und Unfallkosten bedingt.

Auf Seiten des Straßenbulasträgers stellen die Maßnahme- und Verkehrssicherungskosten sowie die laufenden Kosten in der Summe die Straßenbulasträgerkosten SBK dar.

Als maßgebende Erhaltungsmaßnahmen wurden der Dünnschichtbelag DB, die Deckschicht im Tiefenbau DT und die Deckschicht im Hocheinbau DH exemplarisch untersucht.

In der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden dann die Gesamtkosten der Maßnahmeoption aus Straßenbulasträgerkosten und zusätzlichen Straßennutzerkosten während der Baustellensituation dem Gesamtnutzen, der sich aus eingesparten Straßennutzer- und Straßenbulasträgerkosten im Betrachtungszeitraum ergibt, gegenübergestellt.

Der volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswert für die Zustandsgröße Griffigkeit  $\mu_{\text{SCRIM}}$  ergab sich für die durchschnittliche Verkehrsbelastung von 48.000 Kfz/24h auf bundesdeutschen Autobahnen zu: IW  $\mu_{\text{SCRIM}} = 0,44$  und  $0,48$ . Diese Werte liegen deutlich über dem derzeit geltenden Warn- und Schwellenwert der ZEB.

Für die volkswirtschaftlich gerechtfertigten Interventionswerte der Allgemeinen Unebenheiten in Längsrichtung AUN wurden mit  $IW_{\text{AUN}} = 3,7$  bis  $6,5 \text{ cm}^3$  Werte berechnet, die unter dem derzeit gültigen Schwellenwert der ZEB liegen.

Die Ergebnisse zeigen, dass für die Erhaltung von Bundesautobahnen aus volkswirtschaftlicher Sicht ein höheres Interventionsniveau als das heute maßgebende sinnvoll wäre und dass die Vorgehensweise nach der ZEB stärker auf die Verkehrsbelastung ausgerichtet werden sollte.

Sämtliche funktionalen Zusammenhänge, die eine gesamtwirtschaftliche Bewertung einer Erhaltungsmaßnahme ermöglichen, wurden in dem Analyseprogramm GEEP 1.0 zusammengefasst.

**9. Quellenverzeichnis**

- [001] Paqué, K.H.;  
Neue Wege für die Neuen Länder – Thesen für den Aufbau Ost  
Deutscher Straßen- und Verkehrskongress Leipzig 1998, FGSV 2000, S.14.
- [002] Naumann, J.; Hahn, S.;  
Das Management der Straßenerhaltung in Deutschland  
Straße und Autobahn 3/03, 54. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 2003, S.125-130.
- [003] Rasch, G.;  
Der moderne Asphaltstraßenbau, Herausforderungen und Perspektiven  
Vortrag an der Technischen Universität Berlin, Juni 2003, Fachgebiet Straßenwesen  
Norddeutsche Mischwerke GmbH, Berlin 2003.
- [004] -  
Straßenbaubericht 2000  
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 2000, S.7-16.
- [005] Schmuck, A.;  
Straßenbaubedarf und Finanzierung des Straßenbaues, S.5-17,  
ISSN – Verkehrsplanung und Straßenwesen- Heft 28, Bundeswehruniversität München, 1988.
- [006] Domhan, M.; Bartlsperger, R.;  
Verantwortung der Baulastträger für die Griffigkeit bei Nässe und andere  
Oberflächeneigenschaften der Straße  
Deutscher Straßen- und Verkehrskongress Leipzig 1998, FGSV 2000, S.131-136.
- [007] Huschek, S.; Stütze, T.;  
Das Highway Development and Management System HDM IV – ein volkswirtschaftlicher  
Rechenansatz für die Straßenerhaltung  
Straße und Autobahn 3/02, 53. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 2002, S.121-124.
- [008] -  
Das System der öffentlichen Haushalte  
Bundesministerium der Finanzen, Berlin 2000.
- [009] -  
Das Haushaltssystem der Bundesrepublik Deutschland  
Bundesministerium der Finanzen, Berlin 2001.
- [010] -  
Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen EWS  
Aktualisierung der RAS-W 86, Ausgabe 1997  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1997.
- [011] Hülsemann, U.;  
Maßnahmenbewertung in der Straßenerhaltung unter Einbeziehung der Empfehlungen der  
Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS)  
Straße und Autobahn 10/00, 51. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 2000, S.635-642.
- [012] Gumprecht, G.; Sparmann, J.M.;  
Die Festlegung von Griffigkeitsanforderungen als Beitrag zur Verkehrssicherheit  
Straße und Autobahn 6/03, 54. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 2003, S.329-334.
- [013] Scazziga, I.;  
Ermittlung der Nutzerkosten für das Management der Straßenerhaltung, FA 19/90,  
Schlussbericht  
Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute (VSS), Zürich 1998.
- [014] -  
Caractéristiques de surface des revêtements routiers : leur interaction et leur optimisation  
Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), Paris 1984.
- [015] Meewes, V., Rothengatter, W.;  
Neufassung der Zeitkosten- und Betriebskostenansätze für wirtschaftliche  
Vergleichsrechnungen im Straßenwesen  
Straßenverkehrstechnik 4/76, 20. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 1976, S.117-120.

- [016] Schmuck, A.;  
Zur Bedeutung wirtschaftlich orientierter Entscheidungen in der Straßenerhaltung  
Straße und Autobahn 8/97, 48.Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 1997, S.417.
- [017] -  
Arbeitspapier Nr. 9/B 1 zur Systematik der Straßenerhaltung, Teil B, Abschnitt B 1, Hinweise  
für die Vorbereitung von Entscheidungen bei der Straßenerhaltung  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1985.
- [018] -  
Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen, Ausgabe 01  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 2002.
- [019] -  
Arbeitspapier Nr. 9/D zur Systematik der Straßenerhaltung, Teil D, Zustandsbewertung  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1990.
- [020] Huschek, S.;  
Straßenerhaltung  
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Straßenwesen, Eigendruck 2001.
- [021] Recktenwald, H.C.;  
Wörterbuch der Wirtschaft, 11. Auflage  
Alfred Körner Verlag, Stuttgart 1990, S.76-77.
- [022] Maerschalk, G.;  
Entwicklung eines Pavement Management Systems für die Erstanwendung in Deutschland  
Deutscher Straßen- und Verkehrskongress Hamburg 2000, FGSV 2001.
- [023] Maerschalk, G.;  
VIAPMS 6.1, Anwenderhandbuch zum Inhalt des PMS, 1.Auflage  
Ingenieurbüro SEP Maerschalk, München 2001, S.16-70.
- [024] Pollei, L.; Rübensam, J.;  
Auswertung von Forschungsarbeiten zur Systematik der Straßenerhaltung  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMVBW, Heft 772, Bonn 1999.
- [025] Emde, W.; Fabian, L.; Gerz, U.;  
Anwendbarkeit geschlossener Systeme des Managements der Straßenerhaltung  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 609, Bonn 1991.
- [026] Maerschalk, G.;  
Erstellung einer ablauffähigen Folge von Algorithmen für die Planung von  
Erhaltungsmaßnahmen und der Mittelverwendung im Rahmen eines PMS  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 751, Bonn 1997, S.105-112.
- [027] Schmuck, A.;  
Straßenerhaltung mit System, Grundlagen des Managements  
Kirschbaum Verlag, Bonn 1987.
- [028] Oefner, G.;  
Ein Beitrag zur modellgestützten Vorbereitung von straßenbautechnischen Entscheidungen  
ISSN – Verkehrsplanung und Straßenwesen- Heft 12, Bundeswehruniversität München, 1983.
- [029] Gräfer, H.; Scheld, G.; Beike, R.;  
Finanzierung: Grundlagen, Institutionen, Instrumente und Kapitalmarkttheorie, 2. erweiterte  
und überarbeitete Auflage  
Steuer- und Wirtschaftsverlag, Hamburg 1994.
- [030] Kruschwitz, L.;  
Investitionsrechnung, 4. Auflage  
Walter de Gruyter, Berlin – New York 1990.
- [031] Oefner, G.;  
Handbuch für die wirtschaftliche Vergleichsrechnung im Management der Straßenerhaltung  
Baulastträger- und Nutzerkosten  
ISSN – Verkehrsplanung und Straßenwesen- Heft 27, Bundeswehruniversität München, 1988.

- [032] -  
Richtlinien für die Anlagen von Straßen RAS, Teil: Querschnitte RAS-Q 96  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1996.
- [033] -  
Verkehr in Zahlen 2001/ 2002  
BMVBW, Deutscher Verkehrsverlag, Hamburg 2001.
- [034] -  
Der Elsner, Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen 2003  
Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg 2003, S. B176-B180.
- [035] -  
Statistische Mitteilungen, Reihe 2: Kraftfahrzeuge Jahresband 2002  
Kraftfahrt- Bundesamt, Flensburg 2002.
- [036] -  
Kommentar zur EWS, Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen,  
Aktualisierung der RAS-W 86, Ausgabe 1997  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1997.
- [037] Friedel, B.; Glaeser, K-P.; Krupp, R.;  
Kopfstützen in Personenkraftwagen, S.4-5,  
Zeitschrift für Verkehrssicherheit 38. Jahrgang, Heft 1/ I. Quartal 1992, Verlag TÜV Rheinland.
- [038] -  
Technischer Ratgeber Nutzfahrzeug- Reifen Ausgabe 2002  
Continental, [www.continental.de](http://www.continental.de), [Stand: September 2002].
- [039] -  
FGSV-Arbeitspapier: Einflussgrößen für die freie Bemessung von Verkehrsflächen, Entwurf 02  
Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat S 4, Bergisch Gladbach 2002, unveröffentlicht.
- [040] Mitschke, M;  
Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band A: Antrieb und Bremsung  
Springer- Verlag, Berlin - Heidelberg 1972 und 1995, S.5-43.
- [041] Odoki, J.B; Kerali, H.G.R;  
HDM-IV volume 4, Analytical Framework and Model Descriptions, S. E2-1 – E2-79,  
The Highway Development and Management Series, The World Road Association 1999.
- [042] Hide,H; Abaynayaka, S.W; Sayer, I; Wyatt, R.J;  
The Kenya road transport cost study: research on vehicle operating costs  
Transport and Road Research Laboratory, Report 672, Crowthorne Berkshire 1975.
- [043] -  
Road user cost study in India, Final Report  
Central Road Research Institute, New Delhi, India 1982.
- [044] Wehner, B.; Schulze, K.-H.; Dames, J.; Lange, H.;  
Untersuchungen über die Verkehrssicherheit bei Nässe  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 189, Bonn 1975, S.3-31.
- [045] Kamplade, J.; Schmitz, H.;  
Erfassen und Bewerten der Fahrbahngriffigkeit mit den Messverfahren SRM und SCRIM,  
Forschungsberichte, S.33-41, A10-A14,  
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Straßenverkehrstechnik, Bergisch Gladbach 1984.
- [046] Wehner, B.;  
Veränderung der Straßenoberfläche durch Verkehr und Wetter insbesondere bezüglich der  
Straßengriffigkeit  
Der Bauingenieur 40, Heft 1, 1965.
- [047] -  
Merkblatt über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Ausgabe 1968  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1968, S.3.

- [048] -  
TP Griff-StB (SCRIM) Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau,  
Teil: Messverfahren SCRIM, Ausgabe 2001  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 2001.
- [049] Kamplade, J.;  
Internationale Vergleichsmessungen zur Straßengriffigkeit, Forschungsbericht  
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Straßenverkehrstechnik, Köln 1979, S.2-20, A4.
- [050] Huschek, S.;  
Coopération franco- allemande  
Technische Universität Berlin, Februar 2003.
- [051] Schulze, K.-H.;  
Typen der Oberflächenfeingestalt und ihre Wirkung auf den Reibungswiderstand bei Nässe  
Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Nr.26  
Technische Universität Berlin 1968.
- [052] Huschek, S.; Dames, J.; Lindner, J.;  
Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 574, Bonn 1989.
- [053] Huschek, S.;  
Prüfanlage Wehner/ Schulze (PWS)  
Umdruck zur Straßenerhaltung, TU Berlin, Juni 1997.
- [054] Huschek, S.;  
Die Griffigkeitsprognose mit der Verkehrssimulation nach Wehner/ Schulze  
Bitumen, 64.Jahrgang, Heft 1/2002, Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V. Hamburg.
- [055] Dames, J.; Hahn, S. ; Kamplade, J.; Potschka; Wolf;  
Auswertung der Forschungsarbeit: Vergleichsmessungen zwischen dem Stuttgarter  
Reibungsmesser und der Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine im Hinblick  
auf ihre Einsatzmöglichkeiten im Rahmen des Managements der Straßenerhaltung  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1989, unveröffentlicht.
- [056] Hiersche, E.-U.;  
Vergleichsmessungen zwischen dem Stuttgarter Reibungsmesser und der Sideway-force  
Coefficient Routine Investigation Machine im Hinblick auf Ihre Einsatzmöglichkeiten im  
Rahmen des Managements der Straßenerhaltung, Forschungsauftrag Nr.: 04.129 G 85 C  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Bonn 1989, S. A7.33-41.
- [057] Gothié, M.;  
Coopération franco- allemande  
École Nationale de Ponts et Chaussées, Februar 2003.
- [058] Dames, J.; Huschek, S.; Lindner, J.;  
Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Mineralstoffe auf das  
Gebrauchsverhalten von Asphaltdeckschichten hinsichtlich Griffigkeit, Querebenheit und  
Reifengeräusche  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 754, Bonn 1997, S.3-13.
- [059] Huschek, S.;  
Entwicklung der Oberflächeneigenschaften auf der Versuchsstrecke Bamberg A 70,  
Messtechnische Erfassung 1999 – 2003, FE – Nr. 06.070/1999/BGB  
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 1999.
- [060] Huschek, S.;  
Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe  
Straße und Autobahn 3/95, 46. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 1995, S.166-171.
- [061] Steinauer, B.; Ueckermann, A.;  
Die Längsunebenheit - auch eine Beanspruchungskomponente für Straße und Fahrer  
Straße und Autobahn 8/01, 52. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 2001, S.445.

- [062] Mitschke, M; Klingner, B; Braun, H;  
Zulässige Amplituden und Wellenlängen herausragender Unebenheitsanteile- Einfluss von Einzelhindernissen und Periodizitäten auf Fahrkomfort, Straßen-, Fahrzeug- und Ladegutbeanspruchung sowie Fahrsicherheit  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 710, Bonn 1995, S.13-15.
- [063] de Wit, L.B.; Kempkens, E.; Sjögren, L.; Ducros, D.M.;  
Filter Experiment, Organisation and carrying-out a comparison experiment of high speed longitudinal and transverse road evenness measuring equipment used in Europe  
Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL), Brüssel 1999.
- [064] -  
FGSV – Arbeitspapier Nr. 9/E 1, Systematik der Straßenerhaltung, Teil E, Abschnitt E 1, Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für Erhaltungsmaßnahmen – Außerortsstraßen – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1988.
- [065] Schwarz, S.;  
Ermittlung der Verhaltensfunktion der Zustandsgröße Allgemeine Unebenheiten in Längsrichtung (AUN) für Asphalt- und Betonoberflächen auf bundesdeutschen Autobahnen, Diplomarbeit  
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Straßenwesen, Berlin 2003.
- [066] Wallentowitz, H.;  
Kraftfahrzeugtechnik I  
Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen, Aachen 1997, S.20-47.
- [067] Meewes, V.;  
Ermittlung der Betriebskosten der Straßenbenutzer in Abhängigkeit von Straßen- und Verkehrsbedingungen  
Strassenverkehrstechnik, Heft 4/75, Kirschbaum Verlag, Bonn 1975, S.109-118.
- [068] -  
Richtlinien für wirtschaftliche Vergleichsrechnungen im Straßenwesen RWS, Ausgabe April 1971  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1971.
- [069] Schmuck, A.;  
Straßenzustand, Straßenerhaltung und Energieverbrauch  
Straße und Autobahn 10/ 84, 35. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 1984 S.411-413.
- [070] Dorn, F.; Bader, F.;  
Physik  
Hermann Schroedel Verlag KG, Hannover 1975.
- [071] -  
Zustandserfassung und –bewertung der Bundesfernstraßen im Land Brandenburg  
Brandenburgisches Landesamt für Verkehr und Straßenbau, Dahwitz – Hoppegarten 2000.
- [072] -  
Zustandserfassung und –bewertung der Bundesfernstraßen im Land Berlin  
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen, Wohnen und Verkehr, Berlin 2000.
- [073] -  
Wetterdaten aktuell, stündliche Wetteraufzeichnungen  
Meteorologisches Institut der Freien Universität Berlin, Berlin 2002/ 2003.
- [074] -  
Vergleichsmessungen des Rollwiderstandes auf der Straße und im Prüfstand, Berichte Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik Heft 20, Bergisch Gladbach 1996, S.23-37.
- [075] Böhm, F. ;  
Simulationsrechnung hochfrequenter Überrollvorgänge von Fahrzeugreifen  
Technische Universität Berlin, Institut für Mechanik, Berlin 2003.
- [076] -  
STLK 113, Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau, Leistungsbereich 113, Asphaltdecken, Ausgabe September 1995  
Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1995.

- [077] -  
STLK 112, Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau, Leistungsbereich 112,  
Tragschichten, Ausgabe September 1995  
Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1995.
- [078] -  
STLK 106, Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau, Leistungsbereich 106,  
Erdbau, Ausgabe November 1993  
Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1993.
- [079] -  
ARAL Verkehrstaschenbuch 2001/2002, 44. Auflage  
Aral Aktiengesellschaft & Co. KG, Public Relations und Medien, Bochum 2001.
- [080] -  
Tarifindex Bundesrepublik Deutschland  
Statistisches Bundesamt Deutschland, [www.destatis.de](http://www.destatis.de), [Stand: Februar 2003].
- [081] -  
Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen, HAV  
Verkehrstechnischer Kommentar, 11. Auflage  
Kirschbaum Verlag, Bonn 1999, S.208-215.
- [082] Kellermann, G.;  
Geschwindigkeitsverhalten im Autobahnnetz 1992  
Straße und Autobahn 5/95, 46.Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 1995, S.283-287.
- [083] Highway Research Board  
AASHO Road Test, Technical Staff Papers, Special Report 66, Publication 933  
National Academy of Sciences- National Research Council, Washington, D.C. 1961.
- [084] Highway Research Board  
AASHO Road Test, Report 6, Special Studies, Publication 955  
National Academy of Sciences- National Research Council, Washington, D.C. 1962.
- [085] Haas, R.; Hudson, W. R.;  
Pavement Management Systems  
Mc Graw- Hill Book Company, New York 1978.
- [086] Becker, H.;  
Ermittlung von Nutzerkosten, Heft 10, S.111  
ISSN – Verkehrsplanung und Straßenwesen- Heft 10, Bundeswehruniversität München, 1982.
- [087] Schmuck, A.; Breiter, B.; Oefner, G.;  
Optimierung von Instandsetzungsstrategien und Einführung technologischer und  
wirtschaftlicher Trendmodelle in Wirtschaftlichkeitsrechnungen  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 438, Bonn 1985, S.7-10.
- [088] Watanatada, T.; Harral, C.; Paterson, W.D.O.; Dhareshwar, A.M.; Bhandari, A. Tsunokawa, K.;  
The Highway Design and Maintenance Standards Model, Volume 1.  
The World Bank, Washington D.C. 1987.
- [089] Watanatada, T.; Dhareshwar, A.M.; Rezende Lima, P.R.S.;  
Vehicle Speeds and Operating Costs, Models for Road Planning and Management  
The World Bank, Washington D.C. 1987.
- [090] Roy, I.;  
Geschwindigkeitsabhängige Aspekte der Straßennutzerkosten im analytischen Rahmenwerk  
vom HDM IV, Seminararbeit  
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Straßenwesen, Berlin 2001.
- [091] ADAC  
Informationen aus der Fahrzeugtechnik, ADAC Autokosten 2002  
ADAC Verlag, München 2002.

- [092] Boesefeldt, J.; Emde, W.; Schellhöf, V.; Heusch, H.;  
Entwicklungen von Modellansätzen zur Ermittlung von Zeit- und Betriebskosten im Rahmen  
von Wirtschaftlichkeitsfragen zur Straßenbefestigung  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 343, Bonn 1981.
- [093] Förster, H.-J.;  
Der Einfluss der Straße auf den Kraftstoffverbrauch  
Straße und Autobahn 2/80, 31. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 1980, S.51-58.
- [094] Schmuck, A; Breiter, B; Oefner, G; Rezanka, S.;  
Entwicklung praxishere Verfahren zur Ermittlung der Straßennutzerkosten für  
straßenbautechnische Entscheidungen  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 514, Bonn 1987, S.1-14.
- [095] -  
Richtlinien für die Anlagen von Straßen RAS, Teil: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, RAS-W  
Ausgabe 1986  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1986.
- [096] Daimler-Chrysler  
Motorkennfelder der Nutzkraftfahrzeuge  
Daimler-Chrysler AG, [www.mercedes-benz.de](http://www.mercedes-benz.de), [Stand: November 2003].
- [097] Pucher, H.;  
Motorprozesstechnik  
Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen TU Berlin, [www.vkm.tu-berlin.de](http://www.vkm.tu-berlin.de), [Stand: Febr. 03].
- [098] Risse, H.-J.;  
Rollwiderstand und Kraftstoffverbrauch  
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 88/6, Wiesbaden 1986, S.383-388.
- [099] Hahn, W.-D.;  
Auswirkungen der Nutzfahrzeugkonstruktion auf die Straßenbeanspruchung  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 483, Bonn 1986.
- [100] -  
Beurteilung der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen –  
Schwingungseinwirkung auf den menschlichen Körper  
Verein Deutscher Ingenieure, Richtlinie VDI 2057, Blatt 2, Düsseldorf 1981.
- [101] Steinauer, B.;  
Harmonisierung zwischen Befahrbarkeitszustand und Ausbaustandard von Straßen, S.10-30  
ISSN – Verkehrsplanung und Straßenwesen- Heft 38, Bundeswehruniversität München, 1994.
- [102] Mitschke, M.;  
Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band B: Schwingungen 2. Auflage  
Springer Verlag, Berlin 1984.
- [103] Mitschke, M.; Braun, H.; Liesner, W.;  
Ermittlung zulässiger Amplituden und Wellenlängen periodischer Fahrbahnebenheiten unter  
den Gesichtspunkten Straßen- und Ladegutbeanspruchung, Fahrsicherheit und  
Schwingempfinden (Lösungsansätze)  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 466, Bonn 1986, S.71-85.
- [104] -  
Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Leitfaden für die funktionale Gliederung des  
Straßennetzes, RAS-N, Ausgabe 1988  
Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1988.
- [105] -  
Mechanische Versand- und Prüfbeanspruchungen im Überseeversand, Betriebsblätter für  
Überseeverpackung  
Beratungs- und Forschungsstelle für Versandverpackung e.V., Hamburg 1979.
- [106] -  
Handbuch der Verpackung, Rationalisierungsgemeinschaft Verpackung  
Erich-Schmidt-Verlag, Berlin 1981.

- [107] Höhnscheid, K.-J.; Köppel, W.; Krupp, R.; Meewes, V.;  
Kostensätze für die volkswirtschaftliche Bewertung von Straßenverkehrsunfällen  
Straßenverkehrstechnik 1/02, 46. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 2002, S.38-39.
- [108] Potschka, V.;  
Die Bedeutung der Straßenoberflächeneigenschaften für die Verkehrssicherheit, S.20-25  
Straßen- und Tiefbau 10/88, 42. Jahrgang, Giesel Verlag für Publizität, Isernhagen 1988.
- [109] Hiersche, E.-U.; Tenzinger, B.;  
Untersuchung des ursächlichen Zusammenhangs zwischen Unfallgeschehen und Griffigkeit  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 587, Bonn 1990, S.5-70.
- [110] Mayer, G.; van der Sluis, S.; Steinauer, B.;  
Signifikante Griffigkeitswerte aus Verkehrssicherheitssicht, S.101-126  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMVBW, Heft 841, Bonn 2002.
- [111] Engels, K.;  
Die Bedeutung der Griffigkeit für die Verkehrssicherheit  
Straßen- und Tiefbau 10/11/83, 37. Jahrgang, Giesel Verlag für Publizität, Isernhagen 1983.
- [112] Kalender, U.;  
Wechselwirkung Reifen/Fahrbahnoberfläche auf den Kraftschluss bei Nässe und hohen  
Fahrgeschwindigkeiten bei Verwendung verschiedener Reifentypen  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 498, Bonn 1987, S.10-15.
- [113] Meewes, V.; Degener, S.;  
Führen und Auswerten von Unfalltypen-Steckkarten- Das neue Merkblatt für die Auswertung  
von Straßenverkehrsunfällen, Teil 1  
Straßenverkehrstechnik 7/98, 42. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 1998, S.345-350.
- [114] Woltereck, G.;  
Zweite Zustandserfassung auf Bundesautobahnen – Ergebnisse und Folgerungen  
Straße und Autobahn 1/99, 50. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 1999, S.27-34.
- [115] -  
Bundesverkehrswegeplan 2003, Grundzüge der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsmethodik  
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin 2002, S.19-60.
- [116] Schmuck, A.; Oefner, G.; Rezanka, S.;  
Strategiemodellverfahren zur Ermittlung des Finanzbedarfs für die Erhaltung des  
Straßenoberbaues  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 456, Bonn 1986.
- [117] Hehenberger, F.;  
Grundlagen zur Entwicklung von Expertensystemen für das Management der  
Straßenerhaltung  
ISSN – Verkehrsplanung und Straßenwesen- Heft 36, Bundeswehruniversität München, 1993.
- [118] Bartlsperger, R.;  
Rechtsgutachten zu einer Richtlinie zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1999, unveröffentlicht.
- [119] Paterson, W.D.O.;  
Road deterioration and maintenance effects, Models for planning and management  
The World Bank, Washington 1987.
- [120] Sayers, M.W.; Gillespie, T.D.; Queiroz, C.A.V.;  
The International Road Roughness Experiment  
The World Bank, Washington 1986.
- [121] -  
BAB Hessen, Aufbau-, Verkehrs- und Zustandsdaten 2002  
Hessisches Landesamt für Strassen- und Verkehrswesen, Wiesbaden 2002.
- [122] -  
Straßenverkehrsunfälle in Deutschland  
Bundesanstalt für Straßenwesen, [www.bast.de](http://www.bast.de), [Stand: Juni 2003].

- [123] -  
Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen – Teil 1: Führen und Auswerten  
von Unfalltypen- Streckenkarten, Ausgabe 1998  
Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1998.
- [124] Lohrberg, K.;  
Der Bundesverkehrswegeplan 2003- was ist anders als 1992  
Straße und Autobahn 11/03, 54. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 2003, S.633-636.
- [125] Hanusch, H.;  
Nutzen-Kosten-Analyse, 2. Auflage  
WiSo Kurzlehrbücher, Reihe Volkswirtschaft, Verlag Franz Vahlen, München 1994.
- [126] Moosmayer, E.;  
Gibt es eine objektiv richtige Diskontierungsrate ?  
Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, Verkehrs-Verlag J. Fischer, Düsseldorf 1983, S.95-99.
- [127] von Hirschhausen, C.; Beckers, T.;  
Privatisierung der Bundesautobahnen über Konzessionsmodelle – Alternative Konzepte,  
offene Fragen und wirtschaftspolitische Schlussfolgerungen  
Technische Universität Berlin, FG Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP), Berlin 2003.
- [128] Arrow, K.J., Lind, R.C.;  
Uncertainty and the evaluation of public investment decisions  
American Economic Review, Washington 1970.
- [129] Ewers, H.-J., Tegner, H.;  
Entwicklungschancen der privaten Realisierung von Verkehrsinfrastruktur in Deutschland  
Forschungs- und Anwendungsverbund Verkehrssystemtechnik Berlin FAV, Berlin 2000.
- [130] Klein, M.;  
Risks, Taxpayers and the role of Government in Project Finance  
Policy Research Working Paper, World Bank, Washington D.C. 1988.
- [131] -  
Aktualisierung der Beförderungskosten für die Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) –  
Schlussbericht  
Bundesministerium für Verkehr, Bauen und Wohnen, Berlin 1998.
- [132] Schellenberger, M.;  
Die Herstellung dauerhafter Griffigkeit in der Praxis  
Straße und Autobahn 11/03, 54. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 2003, S.648-651.
- [133] -  
Abnahmeprüfung der Griffigkeiten AD Südbayern  
Autobahndirektion Südbayern, Deckenerhaltung und –neubau, München 2003.
- [134] -  
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die bauliche Erhaltung von  
Verkehrsflächen – Asphaltbauweisen (ZTV BEA- StB 98)  
Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 1998.
- [135] -  
Strassen in Deutschland, 2. Auflage  
Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1995.
- [136] -  
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt  
(ZTV Asphalt- StB 01)  
Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 2001.
- [137] -  
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton  
(ZTV Beton- StB 01)  
Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 2001.

- [138] Baum, H.;  
Kernthesen zur Bundesverkehrswegeplanung 2003  
Stellungnahme für den Verband der Automobilindustrie (VDA) e.V.  
Verband der Automobilindustrie e.V, Frankfurt am Main 2003, S.24-25.
- [139] -  
Finanzierungsvorschläge für Verkehr und Infrastruktur, unveröffentlicht  
Europäische Kommission, EuropeAid, Amt für Zusammenarbeit, Brüssel 2003.
- [140] -  
Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen RSA, Ausgabe 1995  
Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1995.
- [141] Powell, B.;  
The NCAT Pavement Test Track, Final Report 2002  
National Center for Asphalt Technology, Auburn 2003.
- [142] Hammarström, U., Karlsson, B.;  
VETO- a computer program for calculation of transport costs as a function of road standard  
Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping 1997.
- [143] Durth, W;  
Auswertungen zur Baustellensituation  
Straße und Autobahn 2/01, 52. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 2001, S.61-64.
- [144] Pichler, W.;  
Gesamtwirtschaftliche Entscheidungen  
Tagung Management des Straßenoberbaues, Klagenfurt 1991.
- [145] Laffont, S., Schmidt, G.;  
Empfehlungen zur Minderung von Stau- und Unfallrisiko bei einstreifigen Verkehrsführungen  
in Autobahnbaustellen der neuen Bundesländer  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 701, Bonn 1995, S.25-68.
- [146] -  
Dauerzählstellen auf brandenburgischen Autobahnen  
Brandenburgisches Autobahnamt, Stolpe 2003.
- [147] -  
Baustellensicherung, Rechtsgrundlagen und Kosten  
Bayerisches Innenministerium, [www.innenministerium.bayern.de](http://www.innenministerium.bayern.de) , [Stand: Februar 2004].
- [148] -  
Baustellen-Absperr-Service, Kostengrundlage 2004  
B.A.S. Verkehrstechnik AG, Leipzig 2004.
- [149] Bennet, C. R.; Paterson, W. D. O.;  
HDM-IV volume 5, A Guide to Calibration and Adaptation  
The Highway Development and Management Series, The World Road Association 1999.
- [150] Steinauer, B.; Kempkens, E.; Ueckermann, A.;  
Zustandserfassung und –bewertung der Bundesfernstraßen – Verbessertes Verfahren zur  
Beurteilung der Längsebenheit  
Straße und Autobahn 1/03, 54. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 2003, S.29-37.
- [151] -  
Verkehr; Fachserie 8; Reihe 7, Verkehrsunfälle 2000  
Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden 2002.
- [152] Höhenscheid, K.-J.; Straube, M.;  
Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland 2000  
Wissenschaftliche Informationen der Bundesanstalt für Straßenwesen, Info 12/02  
Bundesanstalt für Straßenwesen, [www.bast.de](http://www.bast.de), [Stand: November 2003].
- [153] Brannolte, U.; Grösel, J.; Köppel, H.W.; Naumann, W.; Meewes, V.; Pischner, T.;  
Poxleitner, J.; Vosdellen, L.;  
Stand und Entwicklung der „Empfehlungen für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an  
Straßen“ (EWS)  
Straße und Autobahn 12/99, 50. Jahrgang, Kirschbaum Verlag, Bonn 1999, S.646-650.

# Anhang

## Anhänge A

A1 Repräsentative Fahrzeugflotte .....	139
A 1.1: Mittlung der technischen Parameter der Repräsentativfahrzeuge PO und PD, fahrzeuggewichtet .....	140
A 1.2: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe PO.....	141
A 1.3: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe PD.....	141
A 1.4: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe B .....	141
A 1.5: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe L.....	142
A 1.6: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe Z.....	142
A2 Verhaltensfunktion AUN(t).....	143
A 2.1: Datensätze für die Zustandserfassung und -bewertung (Übersicht).....	144
A 2.2: BAB -homogene Abschnitte und Bildung der Verhaltensfunktionen- Schema.....	145
A 2.3: Aufbau – Datei BAB (ca. 1.200 Datensätze) – Auszug.....	146
A 2.4: Verkehr – Datei BAB (ca. 230 Datensätze) – Auszug.....	146
A 2.5: Zustand – Datei BAB (ca. 47.000 Datensätze) – Auszug .....	146
A 2.7: Verhaltensfunktion AUN (t) – BAB, Asphalt 2. Fahrstreifen .....	147
A 2.8: Verhaltensfunktion AUN (t) – BAB, Beton 1. Fahrstreifen.....	148
A 2.9: Verhaltensfunktion AUN (t) – BAB, Beton 2. Fahrstreifen.....	148
A3 Ausrollversuche.....	149
A 3.1: Versuchsfahrzeug 1, Chevrolet Van 20, PKW, Technische Daten .....	150
A 3.2: Versuchsfahrzeug 2, VW Golf 3 GT (JM), PKW, Technische Daten.....	150
A 3.3: Versuchsfahrzeug 3, VW Golf 3 (FEM), PKW, Technische Daten.....	150
A 3.4: Versuchsfahrzeug 4, Seat Ibiza, PKW, Technische Daten .....	151
A 3.5: Versuchsfahrzeug 5, Mercedes Benz, SRM, LKW, Technische Daten.....	151
A 3.6: Übersicht der Lage der Versuchsstrecken.....	152
A 3.7: Versuchsstrecke 1 .....	153
A 3.8: Versuchsstrecke 2 .....	153
A 3.9: Versuchsstrecke 3 .....	153
A 3.10: Versuchsstrecke 4 .....	154
A 3.11: Versuchsstrecke 5 .....	154
A 3.12: Versuchsstrecke 6 .....	154
A 3.13: Versuchsstrecke 7 .....	155
A 3.14: Versuchsstrecke 8 .....	155
A 3.15: Übersicht der Messungen – Ausrolllängen Chevrolet Van 20.....	156

A 3.16:	Übersicht der Messungen – Ausrolllängen VW Golf 3 GT (JM).....	156
A 3.17:	Übersicht der Messungen – Ausrolllängen VW Golf 3 (FEM).....	157
A 3.18:	Übersicht der Messungen – Ausrolllängen Seat Ibiza.....	157
A 3.19:	Übersicht der Messungen – Ausrolllängen LKW SRM.....	158
A 3.20:	Übersicht der Messungen – Geschwindigkeitsstützstellen Chevrolet Van 20.....	159
A 3.21:	Übersicht der Messungen – Geschwindigkeitsstützstellen Golf 3 GT (JM).....	160
A 3.22:	Übersicht der Messungen – Geschwindigkeitsstützstellen Golf 3 (FEM).....	161
A 3.23:	Übersicht der Messungen – Geschwindigkeitsstützstellen Seat Ibiza.....	162
A 3.24:	Übersicht der Messungen – Geschwindigkeitsstützstellen LKW SRM.....	163
A4	Kraftstoffverbrauch $f(f_R)$ .....	164
A 4.1:	Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes $f_R$ und der Geschwindigkeit V Fahrzeuggruppe PO.....	165
A 4.2:	Kraftstoffverbrauch als lineare Funktion KV ( $f_R, V$ ), Fahrzeuggruppe PO.....	165
A 4.3:	Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes $f_R$ und der Geschwindigkeit V Fahrzeuggruppe PD.....	166
A 4.4:	Kraftstoffverbrauch als lineare Funktion KV ( $f_R, V$ ), Fahrzeuggruppe PD.....	166
A 4.5:	Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes $f_R$ und der Geschwindigkeit V Fahrzeuggruppe L.....	167
A 4.6:	Kraftstoffverbrauch als lineare Funktion KV ( $f_R, V$ ), Fahrzeuggruppe L.....	167
A 4.7:	Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes $f_R$ und der Geschwindigkeit V Fahrzeuggruppe Z.....	168
A 4.8:	Kraftstoffverbrauch als lineare Funktion KV ( $f_R, V$ ), Fahrzeuggruppe Z.....	168
A 4.9:	Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes $f_R$ und der Geschwindigkeit V Fahrzeuggruppe B.....	169
A 4.10:	Kraftstoffverbrauch als lineare Funktion KV ( $f_R, V$ ), Fahrzeuggruppe B.....	169
A5	GEEP 1.0.....	170
A6	Ergebnisdokumentation.....	184
A 6.1:	Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Dünne Schichten im Kalteinbau DSK“, $IW_{\mu \text{ SCRIM } 80} = 0,46(8)$ .....	185
A 6.2:	Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Deckschicht im Hocheinbau DH“, $IW_{\mu \text{ SCRIM } 80} = 0,47(6)$ .....	185
A 6.3:	Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Deckschicht im Tiefeinbau DT“, $IW_{\mu \text{ SCRIM } 80} = 0,46(7)$ .....	186
A 6.4:	Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Deckschicht im Hocheinbau DH“, $IW_{\text{AUN}} = 3,7 \text{ cm}^3$ .....	186
A 6.5:	Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Deckschicht im Tiefeinbau DT“, $IW_{\text{AUN}} = 4,4 \text{ cm}^3$ .....	187
A 6.6:	Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Deckschicht im Tiefeinbau DT“, $IW_{\text{AUN}} = 9,0 \text{ cm}^3$ .....	187

# Anhang

## A1 Repräsentative Fahrzeugflotte

**Fahrzeuggruppe PO (Pkw - Otto)**

Hubraumklasse		Limousine							Anteil in Hubraumklasse [%]
KBA [cm³]	Leistung [kw]	Hubraum [cm³]	leer [kg]	Frontfläche A [m²]	cw [l]	A * cw	dynamischer Reifenhalbmesser [m]		
bis 999	42	983	954	2,01	0,32	0,64	0,31	1	
bis 1199	50	1183	1040	2,04	0,33	0,67	0,31	1	
bis 1399	59	1377	1142	1,95	0,33	0,64	0,31	0,789	
bis 1999	89	1745	1277	2,01	0,29	0,58	0,31	0,789	
bis 2499	125	2331	1424	2,05	0,28	0,57	0,31	0,789	
bis 2999	152	2823	1521	2,05	0,28	0,57	0,31	0,789	
> 3000	223	4173	1796	2,06	0,29	0,60	0,31	0,789	

Hubraumklasse		Kombi							Anteil in Hubraumklasse [%]
KBA [cm³]	Leistung [kw]	Hubraum [cm³]	leer [kg]	Frontfläche A [m²]	cw [l]	A * cw	dynamischer Reifenhalbmesser [m]		
bis 999	-	-	-	-	-	-	-	0	
bis 1199	-	-	-	-	-	-	-	0	
bis 1399	55	1390	1303	2,03	0,32	0,65	0,31	0,211	
bis 1999	90	1781	1400	2,06	0,32	0,66	0,31	0,211	
bis 2499	127	2352	1570	2,05	0,34	0,70	0,31	0,211	
bis 2999	156	2852	1634	2,05	0,33	0,68	0,31	0,211	
> 3000	204	3978	1752	2,06	0,32	0,66	0,31	0,211	

Hubraumklasse		Fahrzeuggruppe PO						
KBA [cm³]	Leistung [kw]	Hubraum [cm³]	leer [kg]	Frontfläche A [m²]	cw [l]	A * cw	dynamischer Reifenhalbmesser [m]	
bis 999	42	983	954	2,01	0,32	0,64	0,31	
bis 1199	50	1183	1040	2,04	0,33	0,67	0,31	
bis 1399	58	1380	1176	1,97	0,33	0,64	0,31	
bis 1999	89	1753	1303	2,02	0,30	0,60	0,31	
bis 2499	125	2335	1455	2,05	0,29	0,60	0,31	
bis 2999	153	2829	1545	2,05	0,29	0,60	0,31	
> 3000	219	4132	1787	2,06	0,30	0,61	0,31	

**Fahrzeuggruppe PD (Pkw - Diesel)**

Hubraumklasse		Limousine							Anteil in Hubraumklasse [%]
KBA [cm³]	Leistung [kw]	Hubraum [cm³]	leer [kg]	Frontfläche A [m²]	cw [l]	A * cw	dynamischer Reifenhalbmesser [m]		
bis 999	-	-	-	-	-	-	-	1	
bis 1199	45	1191	881	2,02	0,30	0,61	0,31	1	
bis 1399	50	1399	1164	2,04	0,31	0,63	0,31	1	
bis 1999	75	1834	1306	2,01	0,31	0,62	0,31	0,737	
bis 2499	107	2326	1557	2,05	0,28	0,57	0,31	0,737	
bis 2999	138	2827	1611	2,06	0,27	0,56	0,31	0,737	
> 3000	163	3412	1875	2,06	0,28	0,58	0,31	0,737	

Hubraumklasse		Kombi							Anteil in Hubraumklasse [%]
KBA [cm³]	Leistung [kw]	Hubraum [cm³]	leer [kg]	Frontfläche A [m²]	cw [l]	A * cw	dynamischer Reifenhalbmesser [m]		
bis 999	-	-	-	-	-	-	-	0	
bis 1199	-	-	-	-	-	-	-	0	
bis 1399	-	-	-	-	-	-	-	0	
bis 1999	83	1897	1472	2,06	0,33	0,68	0,31	0,263	
bis 2499	111	2370	1653	2,05	0,32	0,66	0,31	0,263	
bis 2999	136	2820	1690	2,07	0,32	0,66	0,31	0,263	
> 3000	145	3222	1760	2,08	0,31	0,64	0,31	0,263	

Hubraumklasse		Fahrzeuggruppe PD						
KBA [cm³]	Leistung [kw]	Hubraum [cm³]	leer [kg]	Frontfläche A [m²]	cw [l]	A * cw	dynamischer Reifenhalbmesser [m]	
bis 999	-	-	-	-	-	-	-	
bis 1199	45	1191	881	2,02	0,30	0,61	0,31	
bis 1399	50	1399	1164	2,04	0,31	0,63	0,31	
bis 1999	77	1851	1350	2,02	0,32	0,64	0,31	
bis 2499	108	2338	1582	2,05	0,29	0,60	0,31	
bis 2999	137	2825	1632	2,06	0,28	0,58	0,31	
> 3000	158	3362	1845	2,07	0,29	0,59	0,31	

**A 1.1: Mittlung der technischen Parameter der Repräsentativfahrzeuge PO und PD, fahrzeuggewichtet**

Repräsentative technische Parameter	Wert	Kommentar
Leistung [KW]	87	klassengewichtet
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	1743	klassengewichtet
Gewicht m [t]	1,399	nach Bestand: Leergewicht + mittlerer Besetzungsgrad 1,65 x 75 kg (EU Norm) [037]
Querspanfläche A [m <sup>2</sup> ]	2,02	mittlere Querspanfläche nach Herstellerangaben: klassen- und herstellergewichtet
Luftwiderstandsbeiwert c <sub>w</sub> [-]	0,31	nach Herstellerangaben: klassengewichtet
Dynamischer Reifenhalmmesser r <sub>dyn</sub> [m]	0,31	$r_{\text{dyn}} \approx \frac{\text{Abrollumfang}}{2\pi}$ (nach ETRTO) mit der gängigen mittleren Reifengröße für Pkw nach [038]: 205/55 R 16 1928

#### A 1.2: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe PO

Repräsentative technische Parameter	Wert	Kommentar
Leistung [KW]	75	klassengewichtet
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	1871	klassengewichtet
Gewicht m [t]	1,429	nach Bestand: Leergewicht + mittlerer Besetzungsgrad 1,65 x 75 kg (EU Norm) [037]
Querspanfläche A [m <sup>2</sup> ]	2,03	mittlere Querspanfläche nach Herstellerangaben: klassen- und herstellergewichtet
Luftwiderstandsbeiwert c <sub>w</sub> [-]	0,31	nach Herstellerangaben: klassengewichtet
Dynamischer Reifenhalmmesser r <sub>dyn</sub> [m]	0,31	$r_{\text{dyn}} \approx \frac{\text{Abrollumfang}}{2\pi}$ (nach ETRTO) mit der gängigen mittleren Reifengröße für Pkw nach [038]: 205/55 R 16 1928

#### A 1.3: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe PD

Repräsentative technische Parameter	Wert	Kommentar
Leistung [KW]	260	Herstellerangaben: Daimler- Chrysler
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	11950	Herstellerangaben: Daimler- Chrysler
Gewicht m [t]	10,2	nach Bestand: zulässiges Gesamtgewicht Auslastungsgrad: 60 % [039]
Querspanfläche A [m <sup>2</sup> ]	7,51	mittlere Querspanfläche nach Herstellerangaben: MAN 19,5%, Daimler-Chrysler 29,8%, Kaessbohrer 20,6%;
Luftwiderstandsbeiwert c <sub>w</sub> [-]	0,65	nach Mitschke [040]
Dynamischer Reifenhalmmesser r <sub>dyn</sub> [m]	0,50	$r_{\text{dyn}} \approx \frac{\text{Abrollumfang}}{2\pi}$ (nach ETRTO) mit den gängigen Reifengrößen (ohne Linienbusse) [038] : 275/70 R 22,5 2920 315/80 R 22,5 3280 295/80 R 22,5 3185 Σ/3: 3128

#### A 1.4: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe B

Repräsentative technische Parameter	Wert	Kommentar
Leistung [KW]	110	Herstellerangaben: Daimler- Chrysler
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	4250	Herstellerangaben: Daimler- Chrysler
Gewicht m [t]	7,3	nach Bestand: zulässiges Gesamtgewicht Auslastungsgrad: 60 % [039]
Querspanntfläche A [m <sup>2</sup> ]	8,3	mittlere Querspanntfläche nach Mitschke [040]: Plane: 8,8 (mittel) Pritsche: 6,9 (mittel) Koffer: 9,2 (mittel) $\Sigma/3$ : 8,3
Luftwiderstandsbeiwert c <sub>w</sub> [-]	0,66	nach Mitschke [040]: Plane: 0,83 (mittel) Pritsche: 0,48(mittel) Koffer: 0,68 (mittel) $\Sigma/3$ : 0,66
Dynamischer Reifenhalmmesser r <sub>dyn</sub> [m]	0,43	$r_{dyn} \approx \frac{\text{Abrollumfang}}{2\Pi}$ (nach ETRTO) mit den gängigen Reifengrößen [038] [039] : 275/70 R 22,5 2920 315/80 R 22,5 3280 295/80 R 22,5 3185 385/65 R 22,5 3250 215/75 R 17,5 2390 zusätzl. Betrachtung der leichteren LKW (bis 7,5t) 225/70 R 15,0 2112 205/75 R 16,0 2170 225/75 R 17,5 2390 235/75 R 17,5 <u>2430</u> $\Sigma/9$ : 2681

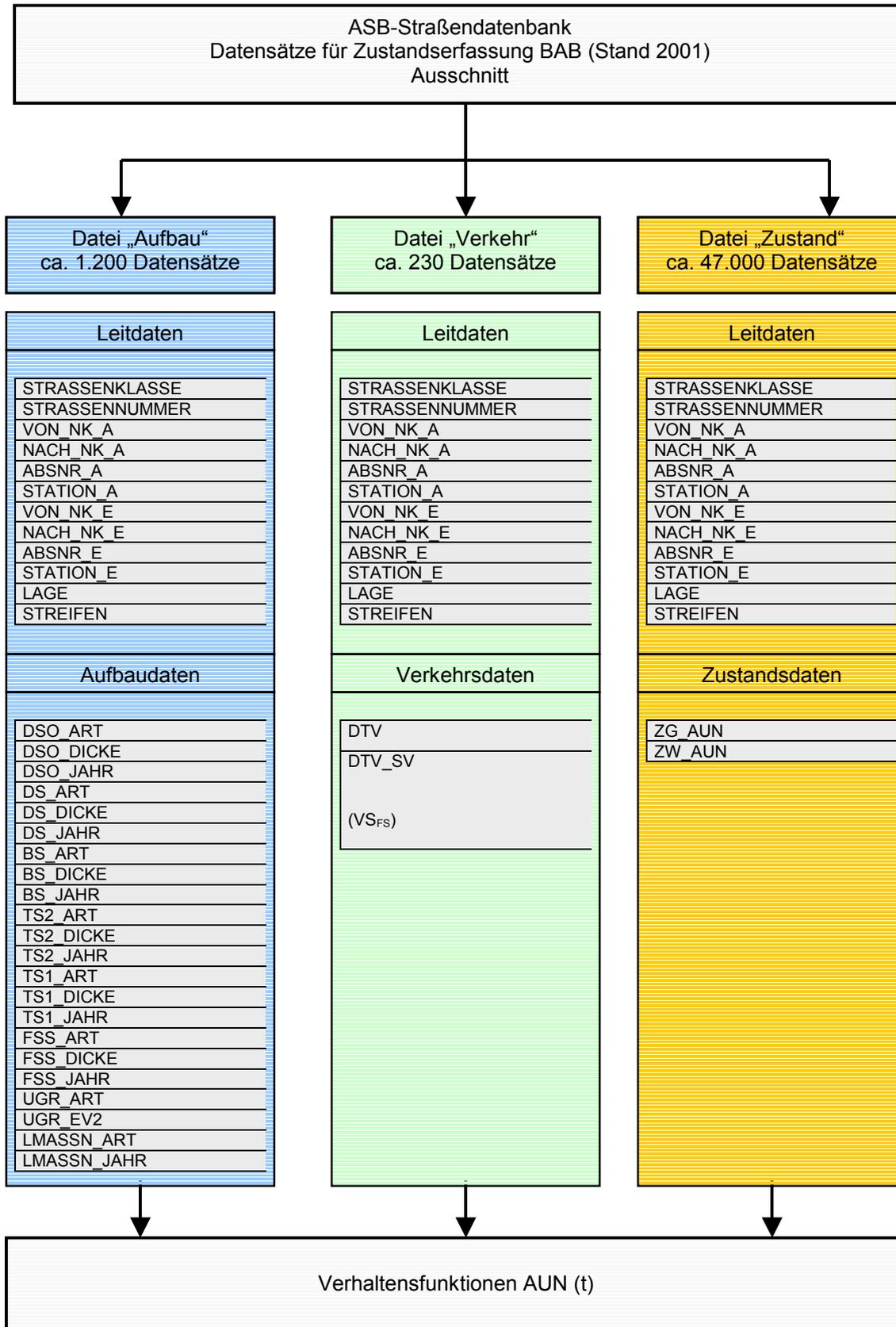
#### A 1.5: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe L

Repräsentative technische Parameter	Wert	Kommentar
Leistung [KW]	370	Herstellerangaben: Daimler- Chrysler
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	15940	Herstellerangaben: Daimler- Chrysler
Gewicht m [t]	31,4	Nach BAB Messungen '99 : Auslastungsgrad 78,5 % [039]
Querspanntfläche A [m <sup>2</sup> ]	9,27	mittlere Querspanntfläche nach Herstellern: MAN: 9,19 (mittel) Daimler Chrysler: 9,34 (mittel) $\Sigma/2$ : 9,27
Luftwiderstandsbeiwert c <sub>w</sub> [-]	0,75	nach Mitschke [040]: Zug: 0,85 (mittel) Sattel: 0,75(mittel) Sattel (Schild): 0,65 (mittel) $\Sigma/3$ : 0,75
Dynamischer Reifenhalmmesser r <sub>dyn</sub> [m]	0,52	$r_{dyn} \approx \frac{\text{Abrollumfang}}{2\Pi}$ (nach ETRTO) mit den gängigen Reifengrößen [038] [039] : 315/80 R 22,5 3280 295/80 R 22,5 3185 385/65 R 22,5 3250 $\Sigma/3$ : 3238

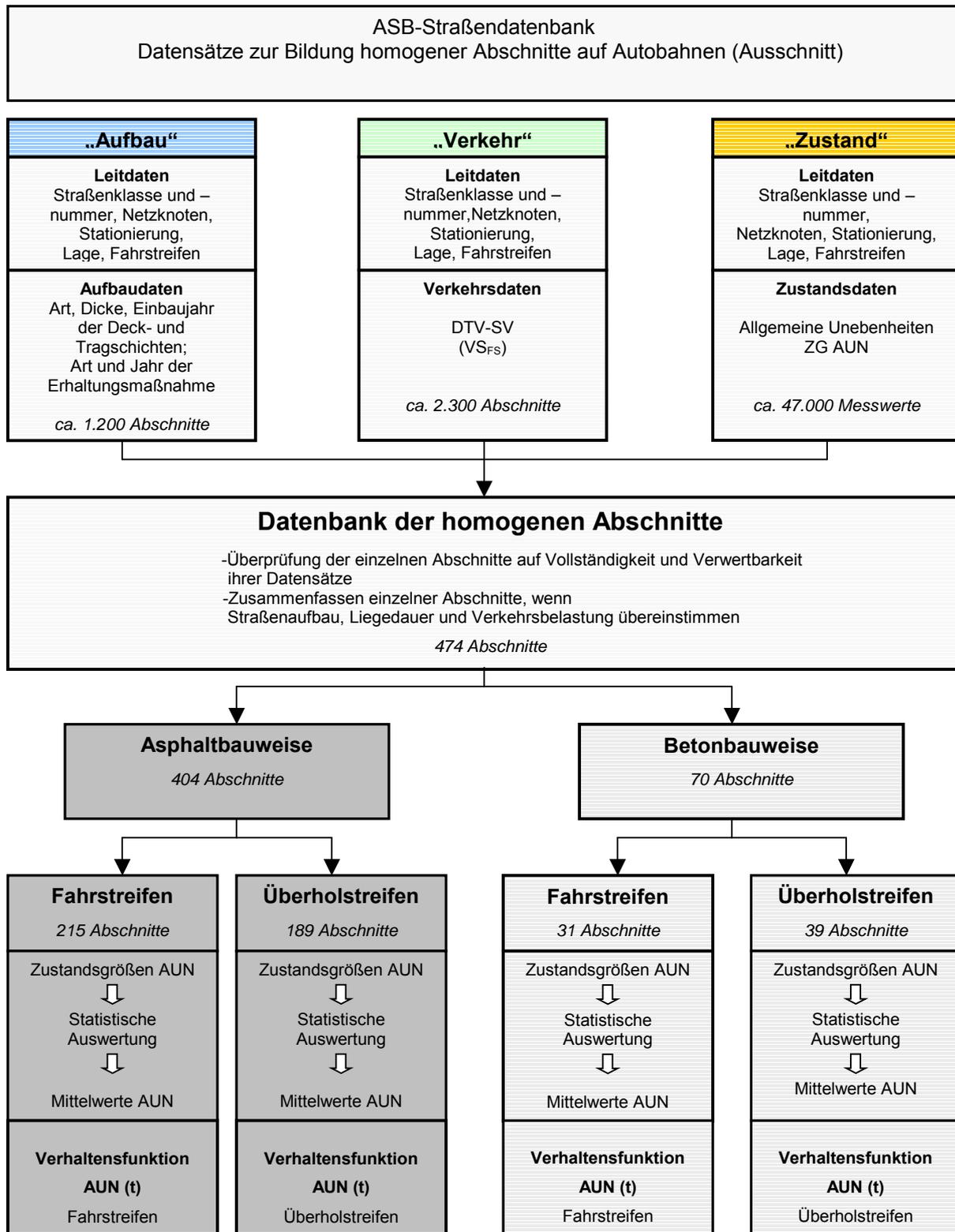
#### A 1.6: Technische Parameter des Repräsentativfahrzeuges der Fahrzeuggruppe Z

# Anhang

## A2 Verhaltensfunktion AUN(t)



A 2.1: Datensätze für die Zustandserfassung und -bewertung (Übersicht)



**A 2.2: BAB -homogene Abschnitte und Bildung der Verhaltensfunktionen- Schema**

Leitdaten												Aufbaudaten				
STRKL	STRNR	LAGE	STREIFEN	VON_NK_A	NACH_NK_A	ABSNR_A	STATION_A	VON_NK_E	NACH_NK_E	ABSNR_E	STATION_E	DS_ART	DS_DICKE	DS_JAHR		
A	X	L	1	X	X	1	0	X	X	1	371	...	GA	4	1976	...
A	X	L	23	X	X	1	0	X	X	1	1270	...	GA	4	1974	...
A	X	L	1	X	X	1	371	X	X	1	1671	...	GA	4	1996	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

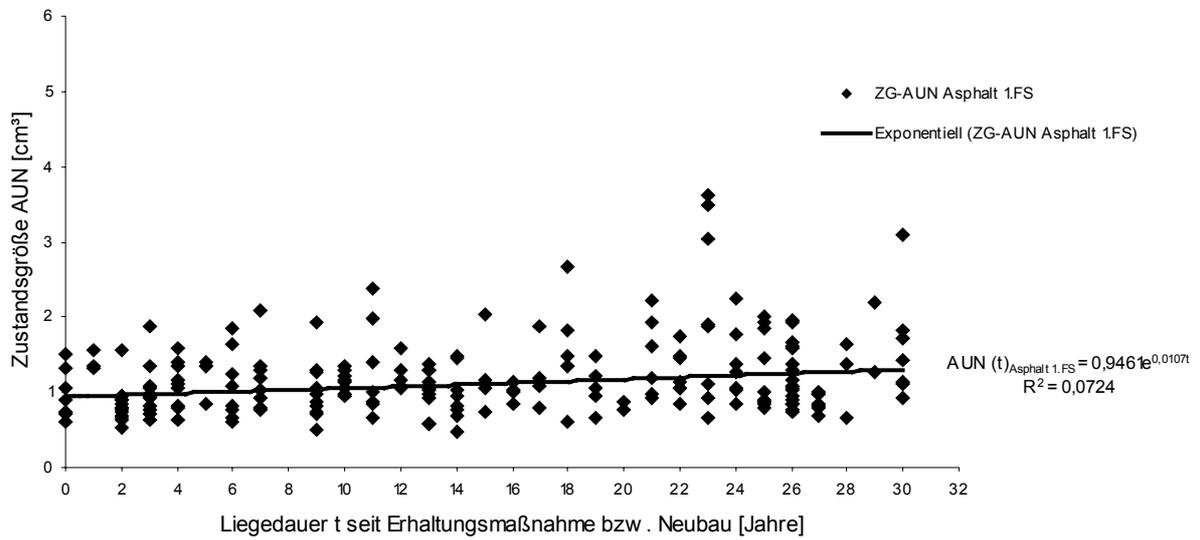
A 2.3: Aufbau – Datei BAB (ca. 1.200 Datensätze) – Auszug

Leitdaten												Verkehrsdaten			
STRKL	STRNR	LAGE	STREIFEN	VON_NK_A	NACH_NK_A	ABSNR_A	STATION_A	VON_NK_E	NACH_NK_E	ABSNR_E	STATION_E	DTV	DTV_SV		
A	X	M	9	X	X	1	0	X	X	1	7864	...	81391	13021	...
A	X	M	9	X	X	2	0	X	X	2	2247	...	87498	12320	...
A	X	M	9	X	X	3	0	X	X	3	15131	...	101782	11999	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

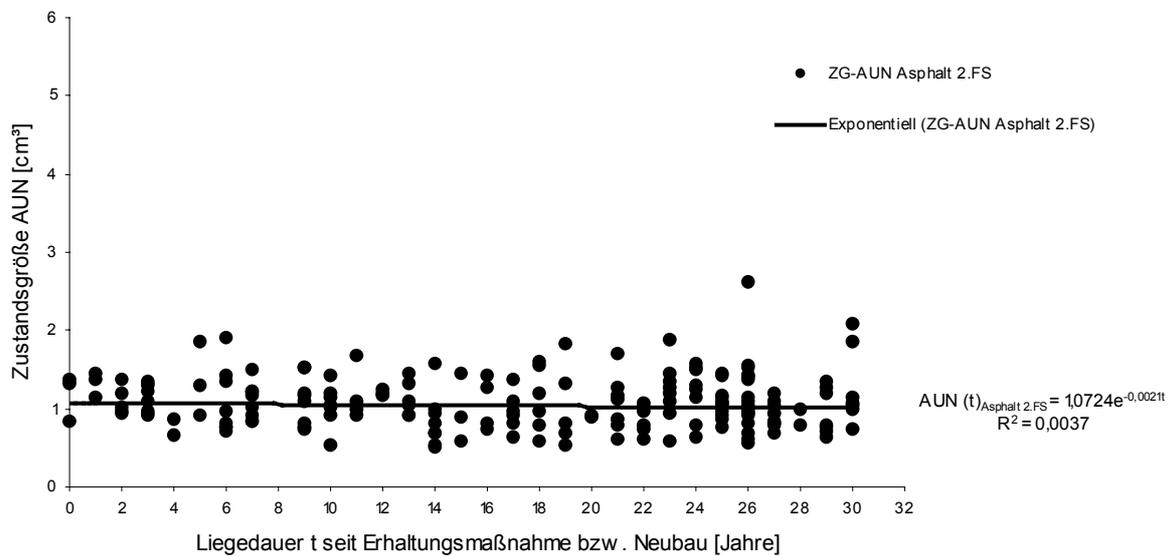
A 2.4: Verkehr – Datei BAB (ca. 230 Datensätze) – Auszug

Leitdaten												Zustandsdaten			
STRKL	STRNR	LAGE	STREIFEN	VON_NK_A	NACH_NK_A	ABSNR_A	STATION_A	VON_NK_E	NACH_NK_E	ABSNR_E	STATION_E	ZG_AUN	ZW_AUN		
A	X	L	1	X	X	1	0	X	X	1	100	...	1,82	2,32	...
A	X	L	1	X	X	1	100	X	X	1	200	...	2,29	2,79	...
A	X	L	1	X	X	1	200	X	X	1	300	...	1,8	2,3	...
A	X	L	1	X	X	1	300	X	X	1	400	...	1,72	2,22	...
A	X	L	1	X	X	1	400	X	X	1	500	...	0,66	1	...
A	X	L	1	X	X	1	500	X	X	1	600	...	0,44	1	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

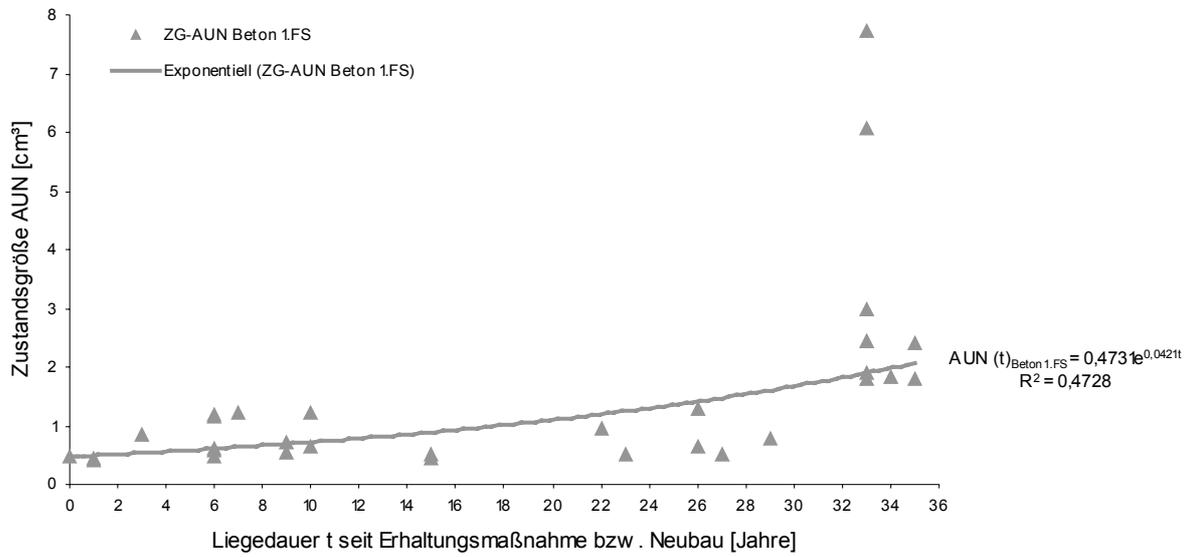
A 2.5: Zustand – Datei BAB (ca. 47.000 Datensätze) – Auszug



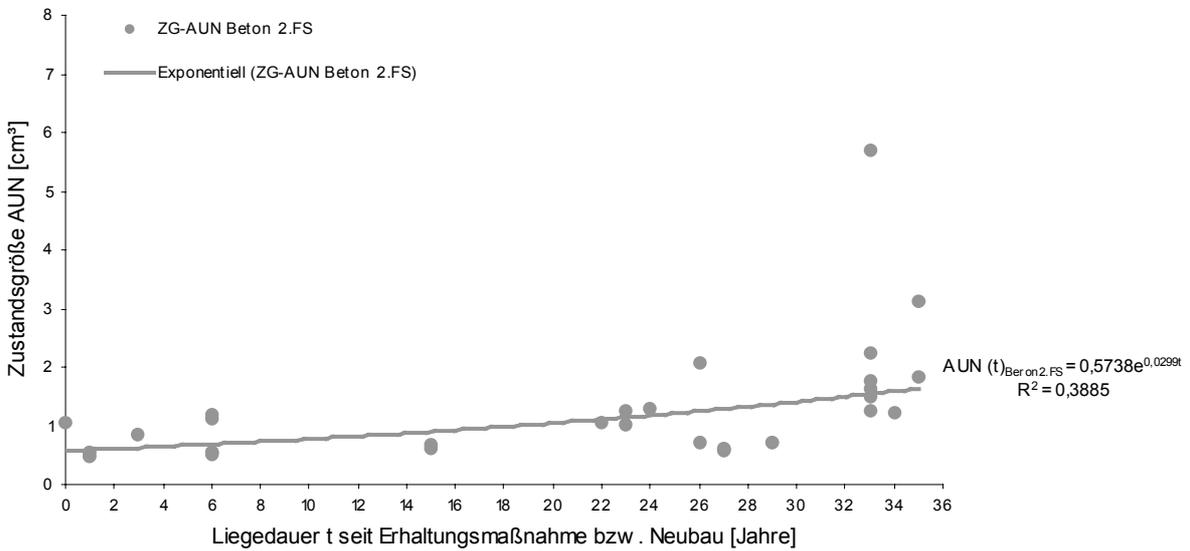
A 2.6: Verhaltensfunktion AUN (t) – BAB, Asphalt 1. Fahrstreifen



A 2.7: Verhaltensfunktion AUN (t) – BAB, Asphalt 2. Fahrstreifen



**A 2.8: Verhaltensfunktion AUN (t) – BAB, Beton 1. Fahrstreifen**



**A 2.9: Verhaltensfunktion AUN (t) – BAB, Beton 2. Fahrstreifen**

# **Anhang**

# **A3 Ausrollversuche**

**Chevrolet Van 20**

Technische Daten:

Gewicht:<sup>\*</sup> 2.940 kg  
 C<sub>w</sub>-Wert: 0,40  
 Querspanfläche A: 3,90 m<sup>2</sup>

\*: Leergewicht + Fahrzeugbesatzung + halbe Tankfüllung

**A 3.1: Versuchsfahrzeug 1, Chevrolet Van 20, PKW, Technische Daten****VW Golf 3 (JM)**

Technische Daten:

Gewicht:<sup>\*</sup> 1.310 kg  
 C<sub>w</sub>-Wert: 0.31  
 Querspanfläche A: 2.05 m<sup>2</sup>

\*: Leergewicht + Fahrzeugbesatzung + halbe Tankfüllung

**A 3.2: Versuchsfahrzeug 2, VW Golf 3 GT (JM), PKW, Technische Daten****VW Golf 3 (FEM)**

Technische Daten:

Gewicht:<sup>\*</sup> 1.355 kg  
 C<sub>w</sub>-Wert: 0.31  
 Querspanfläche A: 2.05 m<sup>2</sup>

\*: Leergewicht + Fahrzeugbesatzung + halbe Tankfüllung

**A 3.3: Versuchsfahrzeug 3, VW Golf 3 (FEM), PKW, Technische Daten**

**Seat Ibiza**

Technische Daten:

Gewicht:\* 1.333 kg

 $C_w$ -Wert: 0.32Querspanfläche A: 2.03 m<sup>2</sup>

\*: Leergewicht + Fahrzeugbesatzung + halbe Tankfüllung

**A 3.4: Versuchsfahrzeug 4, Seat Ibiza, PKW, Technische Daten****Mercedes Benz LKW (SRM)**

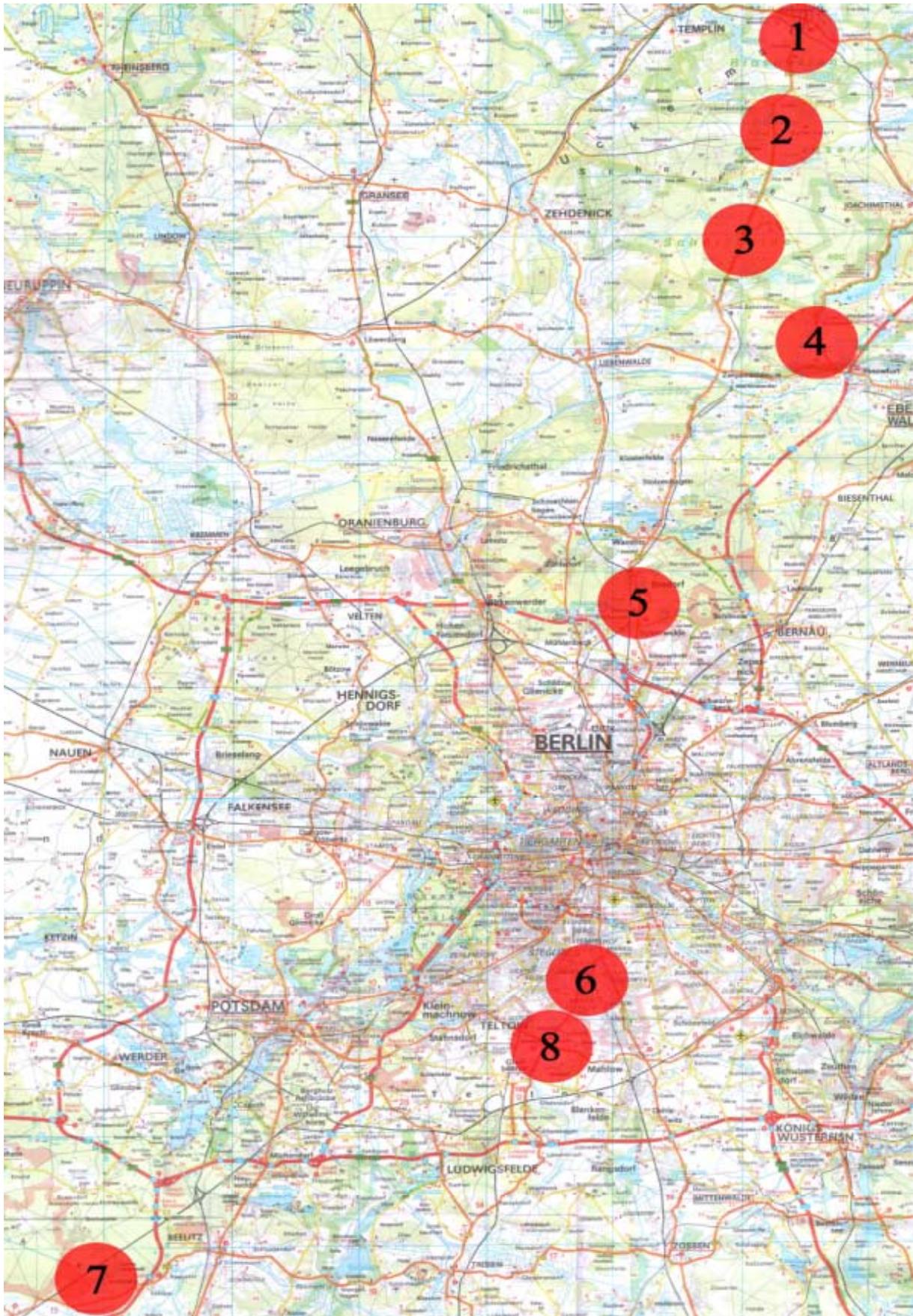
Technische Daten:

Gewicht:\* 8.500 kg

 $C_w$ -Wert: 0.68Querspanfläche A: 5.98 m<sup>2</sup>

\*: Leergewicht + Fahrzeugbesatzung + halbe Tankfüllung

**A 3.5: Versuchsfahrzeug 5, Mercedes Benz, SRM, LKW, Technische Daten**



A 3.6: Übersicht der Lage der Versuchsstrecken



Versuchsstrecke 1:  
Gesamtlänge der Messstrecke = 450 m,  $AUN_{\text{mittel}} = 17,91 \text{ cm}^3$

**A 3.7: Versuchsstrecke 1**



Versuchsstrecke 2:  
Gesamtlänge der Messstrecke = 600 m,  $AUN_{\text{mittel}} = 0,55 \text{ cm}^3$

**A 3.8: Versuchsstrecke 2**



Versuchsstrecke 3:  
Gesamtlänge der Messstrecke = 600 m,  $AUN_{\text{mittel}} = 0,58 \text{ cm}^3$

**A 3.9: Versuchsstrecke 3**



Versuchsstrecke 4:  
Gesamtlänge der Messstrecke = 550 m,  $AUN_{\text{mittel}} = 7,05 \text{ cm}^3$

**A 3.10: Versuchsstrecke 4**



Versuchsstrecke 5:  
Gesamtlänge der Messstrecke = 650 m,  $AUN_{\text{mittel}} = 0,92 \text{ cm}^3$

**A 3.11: Versuchsstrecke 5**



Versuchsstrecke 6:  
Gesamtlänge der Messstrecke: 500 m,  $AUN_{\text{mittel}} = 15,96 \text{ cm}^3$

**A 3.12: Versuchsstrecke 6**



Versuchsstrecke 7:

Gesamtlänge der Messstrecke = 750 m,  $AUN_{\text{mittel}} = 0,58 \text{ cm}^3$

**A 3.13: Versuchsstrecke 7**



Versuchsstrecke 8:

Gesamtlänge der Messstrecke = 500 m,  $AUN_{\text{mittel}} = 1,12 \text{ cm}^3$

**A 3.14: Versuchsstrecke 8**

Mess- strecke	Straße	Orientierung [Ort]	SBA	Netzknoten [VNK-NNK]	Team	AnzahlMessungen [Stck]	V <sub>mess</sub> [km/h]	I <sub>Ausroll-mittel</sub> [m]	I <sub>Streckenmittel</sub> [m]	[VNK-NNK]		Mittel <sub>Richtung1-2</sub>	Mittel <sub>Mittel1-1</sub>	AUN <sub>Mittel</sub> [cm <sup>2</sup> ]
										Richtung 1	Richtung 2			
1	X	X	X	X	Meißner	5	40	357	357	341		357	357	17,91
										363				17,91
										361				17,91
										358				17,91
										363				17,91
2	X	X	X	X	Meißner	5	40	440	436	432	449	442	0,55	
										440	435	433	0,55	
										415	426	421	0,55	
										445	444	445	0,55	
										431	451	441	0,55	
3	X	X	X	X	Meißner	5	40	443	449	456	466	461	0,58	
										455	452	449	0,58	
										436	453	445	0,58	
										439	455	447	0,58	
										433	453	443	0,58	
4	X	X	X	X	Meißner/Stütze	5	40	440	417	391	397	394	7,05	
										393	410	420	7,05	
										481	383	432	7,05	
										469	371	420	7,05	
										447	387	417	7,05	
5	X	X	X	X	Meißner	5	40	365	423	356	480	418	0,92	
										480	358	469	0,92	
										349	482	416	0,92	
										366	485	426	0,92	
										365	480	423	0,92	
6	X	X	X	X	Moeller/Stütze	5	40	443	386	430			15,96	
										329	431	330	15,96	
										427	324	376	15,96	
										463	327	395	15,96	
										460	336	398	15,96	
7	X	X	X	X						-	-	-	0,58	
										-	-	-	0,58	
										-	-	-	0,58	
										-	-	-	0,58	
8	X	X	X	X						-	-	-	1,12	
										-	-	-	1,12	
										-	-	-	1,12	
										-	-	-	1,12	

**A 3.15: Übersicht der Messungen – Ausrolllängen Chevrolet Van 20**

Mess- strecke	Straße	Orientierung [Ort]	SBA	Netzknoten [VNK-NNK]	Team	AnzahlMessungen [Stck]	V <sub>mess</sub> [km/h]	I <sub>Ausroll-mittel</sub> [m]	I <sub>Streckenmittel</sub> [m]	[VNK-NNK]		Mittel <sub>Richtung1-2</sub>	Mittel <sub>Mittel1-1</sub>	AUN <sub>Mittel</sub> [cm <sup>2</sup> ]
										Richtung 1	Richtung 2			
1	X	X	X	X						-	-	-	-	17,91
										-	-	-	17,91	
										-	-	-	17,91	
										-	-	-	17,91	
										-	-	-	17,91	
2	X	X	X	X	Moeller/Stütze	6/5	40	415	423	405	433	419	0,55	
										430	402	413	0,55	
										425	434	430	0,55	
										420	428	424	0,55	
										425	432	429	0,55	
3	X	X	X	X	Moeller/Stütze	5/6	40	427	429	422	419	421	0,58	
										431	418	426	0,58	
										429	428	429	0,58	
										435	443	439	0,58	
										429	437	433	0,58	
4	X	X	X	X	Moeller/Stütze	5/5	40	407	405	411	400	406	7,05	
										402	401	405	7,05	
										422	417	420	7,05	
										412	404	408	7,05	
										388	379	384	7,05	
5	X	X	X	X	Stütze	6/6	40	372	425	368	451	410	0,92	
										478	374	506	0,92	
										365	488	427	0,92	
										380	457	419	0,92	
											485	479	0,92	
6	X	X	X	X	Stütze	6/6	40	448	387	442	344	393	15,96	
										325	458	313	15,96	
										454	318	386	15,96	
										444	324	384	15,96	
										439	320	380	15,96	
7	X	X	X	X	Stütze	6/6	40	501	430	531	377	454	0,58	
										358	506	354	0,58	
										483	354	419	0,58	
										511	353	432	0,58	
										465	357	411	0,58	
8	X	X	X	X						-	-	-	1,12	
										-	-	-	1,12	
										-	-	-	1,12	
										-	-	-	1,12	

**A 3.16: Übersicht der Messungen – Ausrolllängen VW Golf 3 GT (JM)**

Mess- strecke []	Straße []	Orientierung [Ort]	SBA []	Netzknoten [VNK-NNK]	Team []	AnzahlMessungen [Stck]	V <sub>mess</sub> [km/h]	I <sub>Ausroll-mittel</sub> [m]	I <sub>Streckenmittel</sub> [m]	[VNK-NNK]		MittelRechnung1-2 MittelMittel-:	AUN <sub>Mittel</sub> [cm]
										Richtung 1	Richtung 2		
1	X	X	X	X						-	-	-	17,91
										-	-	-	17,91
										-	-	-	17,91
										-	-	-	17,91
										-	-	-	17,91
2	X	X	X	X	Meißner	6/6	40	428 442	435	422	449	435	0,58
										415	460	437	0,55
										433	431	432	0,55
										426	428	427	0,55
										432	447	439	0,55
3	X	X	X	X	Meißner	6/6	40	453 441	447	470	444	457	0,58
										456	464	460	0,58
										442	438	440	0,58
										455	437	446	0,58
										449	445	447	0,58
4	X	X	X	X	Meißner	6/6	40	426 420	423	436	415	426	7,05
										432	424	428	7,05
										424	419	422	7,05
										425	431	428	7,05
										419	423	421	7,05
5	X	X	X	X	Meißner	7/7	40	383 516	449	392	528	460	0,92
										389	494	441	0,92
										374	517	445	0,92
										385	527	456	0,92
										371	511	441	0,92
6	X	X	X	X	Meißner	7/7	40	446 330	388	477	375	426	15,96
										435	314	374	15,96
										445	324	384	15,96
										448	314	381	15,96
										447	329	388	15,96
7	X	X	X	X						-	-	-	0,58
										-	-	-	0,58
										-	-	-	0,58
										-	-	-	0,58
										-	-	-	0,58
8	X	X	X	X						-	-	-	1,12
										-	-	-	1,12
										-	-	-	1,12
										-	-	-	1,12
										-	-	-	1,12

**A 3.17: Übersicht der Messungen – Ausrolllängen VW Golf 3 (FEM)**

Mess- strecke []	Straße []	Orientierung [Ort]	SBA []	Netzknoten [VNK-NNK]	Team []	AnzahlMessungen [Stck]	V <sub>mess</sub> [km/h]	I <sub>Ausroll-mittel</sub> [m]	I <sub>Streckenmittel</sub> [m]	[VNK-NNK]		MittelRechnung1-2 MittelMittel-:	AUN <sub>Mittel</sub> [cm]
										Richtung 1	Richtung 2		
1	X	X	X	X						-	-	-	17,91
										-	-	-	17,91
										-	-	-	17,91
										-	-	-	17,91
										-	-	-	17,91
2	X	X	X	X	Meißner	5/4	40	394 405	400	391	402	397	0,55
										394	404	399	0,55
										394	408	401	0,55
										398	407	402	0,55
										394			400
3	X	X	X	X	Meißner	5/5	40	414 415	415	415	423	419	0,58
										414	416	415	0,58
										411	413	412	0,58
										415	415	415	0,58
										415	409	412	0,58
4	X	X	X	X	Meißner	6/6	40	353 367	360	350	372	361	7,05
										352	370	361	7,05
										354	363	359	7,05
										353	367	360	7,05
										352	363	357	7,05
5	X	X	X	X	Meißner	6/7	40	368 397	382	374	472	423	0,92
										358	459	408	0,92
										369	457	413	0,92
										365	467	416	0,92
										365	470	418	0,92
6	X	X	X	X	Meißner	4/4	40	401 337	369	405	340	372	15,96
										400	338	369	15,96
										399	335	367	15,96
										398	334	366	15,96
													369
7	X	X	X	X	Meißner	8/7	40	507 329	419	500	333	416	0,58
										519	335	427	0,58
										502	328	415	0,58
										509	319	414	0,58
										510	330	420	0,58
8	X	X	X	X	Meißner	4/5	40	460 393	427	461	384	422	1,12
										396	430	430	1,12
										461	389	426	1,12
										453	397	425	1,12
											398		427

**A 3.18: Übersicht der Messungen – Ausrolllängen Seat Ibiza**

Mess- strecke	Straße	Orientierung	SBA	Netzknoten	Team	Anzahl <sub>Messungen</sub>	V <sub>mess</sub>	I <sub>Ausroll-mittel</sub>	I <sub>Streckenmittel</sub>	[VNK-NNK]		Mittel <sub>Richtung1-2</sub>	Mittel <sub>Mittel1-2</sub>	AUN <sub>Mittel</sub>
										[Stck]	[km/h]			
1	X	X	X	X	Melcher/Stütze	5/6	40	402	402	401	-	-	402	17,91
								0		405	-	-		17,91
										398	-	-		17,91
										412	-	-		17,91
										398	-	-		17,91
										395	-	-		17,91
2	X	X	X	X	Melcher/Stütze	5	40	521	542	526	549	538	542	0,55
								562		531	560	546		0,55
										518	555	537		0,55
										512	587	550		0,55
										520	560	540		0,55
														0,55
3	X	X	X	X	Melcher/Stütze	5/6	40	506	522	499	559	529	522	0,58
								537		512	529	521		0,58
										518	555	537		0,58
										501	508	505		0,58
										501	536	519		0,58
											535			0,58
4	X	X	X	X	Melcher/Stütze	5/6	40	456	486	456	537	497	487	7,05
								516		456	544	500		7,05
										459	494	477		7,05
										447	523	485		7,05
										462	490	476		7,05
											507			7,05
5	X	X	X	X	Melcher/Stütze	5	40	402	518	410	645	528	518	0,92
								633		394	621	508		0,92
												0		0,92
												0		0,92
												0		0,92
														0,92
6	X	X	X	X	Melcher/Stütze	6	30	366	292	371	230	301	292	15,96
								229		363	227	295		15,96
										369	228	299		15,96
										353	233	293		15,96
										340	228	284		15,96
										340	227	284		15,96
7	X	X	X	X	Melcher/Stütze	5	30	388	315	381	247	314	315	0,58
								241		396	242	319		0,58
										376	242	309		0,58
										403	238	321		0,58
										386	235	311		0,58
														0,58
8	X	X	X	X				-		-	-	-		1,12
								-		-	-	1,12		
								-		-	-	1,12		
								-		-	-	1,12		
								-		-	-	1,12		
								-		-	-	1,12		

A 3.19: Übersicht der Messungen – Ausrolllängen LKW SRM

	Richtung						y				
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]
Messstrecke 1	10	9.69	9.17	9.03	9.06	9.19					
	20	6.92	7.22	7.08	6.97	7.28					
	30	5.53	5.83	5.72	5.72	5.81					
	40	4.22	4.28	4.47	4.22	4.22					
	50	2.31	2.47	2.39	2.36	2.44					
	60	1.17	1.72	1.50	1.67	1.75					
	70	0.25	0.67	0.69	0.72	0.72					
	80			0.06							
	90										
	taes [s]	76	80	81	78	80					
	laes [m]	341	363	361	358	363					

	Richtung						y				
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]
Messstrecke 2	10	9.36	9.53	9.19	9.64	9.61	9.19	9.28	9.06	9.67	9.64
	20	7.75	7.92	7.61	8.03	8.00	7.81	7.72	7.67	8.14	8.11
	30	6.42	6.44	6.17	6.58	6.56	6.56	6.39	6.31	6.67	6.69
	40	5.03	5.03	4.83	5.25	5.00	5.36	5.11	5.06	5.33	5.39
	50	3.83	3.89	3.61	3.94	3.78	4.19	3.92	3.92	4.06	4.06
	60	2.72	2.75	2.47	2.83	2.72	3.14	2.83	2.78	2.94	2.97
	70	1.81	1.86	1.58	1.86	1.78	2.11	1.78	1.75	1.86	1.86
	80	0.83	0.86	0.72	0.83	0.78	1.11	0.78	0.75	0.81	0.72
	90				0.06		0.17				
	taes [s]	90	89	90	92	89	92	89	89	89	88
	laes [m]	435	435	415	445	431	449	431	426	444	451

	Richtung						y				
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]
Messstrecke 3	10	9.64	9.69	9.81	9.78	9.75	9.44	9.47	9.25	9.42	9.33
	20	8.03	8.08	8.17	8.17	8.19	7.97	7.86	7.72	7.86	7.75
	30	6.75	6.67	6.69	6.78	6.72	6.67	6.56	6.36	6.44	6.39
	40	5.36	5.28	5.28	5.31	5.31	5.31	5.25	5.03	5.03	5.06
	50	4.19	4.08	4.03	4.14	4.14	4.17	4.14	3.94	3.94	3.94
	60	3.08	2.92	2.86	2.94	2.94	3.08	3.03	2.89	2.86	2.86
	70	2.19	2.00	1.97	2.00	2.00	2.03	2.00	1.94	1.83	1.89
	80	1.31	1.14	1.11	1.14	1.14	1.28	1.17	0.94	0.86	0.92
	90	0.50	0.36	0.33	0.36	0.39	0.47	0.56	0.17	0.11	0.17
	taes [s]	97	96	95	95	96	98	99	94	92	93
	laes [m]	466	449	453	454	453	456	452	436	439	433

	Richtung						y				
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]
Messstrecke 4	10	9.28	9.14	9.39	9.33	9.42	9.31	9.25	9.22	9.28	9.00
	20	7.39	7.25	7.47	7.47	7.53	7.28	7.22	7.28	7.50	7.17
	30	6.11	5.92	6.08	6.19	6.17	5.72	5.72	5.72	5.81	5.56
	40	4.94	5.00	5.06	5.25	5.11	4.50	4.50	4.58	4.72	4.44
	50	3.61	3.83	3.72	3.83	3.89	3.72	3.72	3.78	3.92	3.67
	60	2.53	2.67	2.61	2.86	2.81	2.56	2.36	2.53	2.69	2.58
	70	1.97	1.86	1.78	2.08	2.06	1.53	1.31	1.64	1.67	1.50
	80	1.25	1.36	1.25	1.50	1.44	0.92	0.67	0.94	1.03	0.67
	90	0.69	0.83	0.47	0.94	0.89	0.17	0.17	0.36	0.39	0.19
100	0.14	0.14		0.31	0.33						
	taes [s]	104	101	99	109	107	93	91	96	95	99
	laes [m]	391	410	481	469	447	397	429	383	371	406

	Richtung						y				
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]
Messstrecke 5	10	9.19	9.03	8.86	9.06	9.08	9.53	9.58	9.50	9.31	9.47
	20	7.25	7.00	7.00	7.28	7.25	7.97	7.92	7.89	7.86	7.94
	30	5.56	5.56	5.39	5.64	5.61	6.58	6.39	6.58	6.58	6.56
	40	4.03	4.17	3.97	4.22	4.17	5.39	5.28	5.36	5.28	5.31
	50	2.58	2.86	2.72	2.97	2.92	4.33	4.03	4.25	4.25	4.19
	60	1.42	1.58	1.47	1.81	1.61	3.33	3.19	3.39	3.25	3.33
	70	0.36	0.47	0.36	0.50	0.56	2.50	2.47	2.67	2.42	2.75
	80						1.64	1.69	1.89	1.75	1.89
	90						0.83	1.00	1.14	1.31	1.06
100						0.00	0.28	0.33	0.78	0.36	
	taes [s]	75	75	74	76	76	100	104	105	111	107
	laes [m]	356	358	349	366	365	480	469	482	485	480

	Richtung						y				
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]
Messstrecke 6	10	8.94	8.92	9.33	9.22	9.00	8.67	8.50	8.67	8.92	
	20	7.47	7.39	7.78	7.56	7.11	6.44	6.31	6.83	6.86	
	30	6.11	6.03	6.42	6.17	5.58	5.11	4.92	4.94	5.03	
	40	5.03	4.81	5.28	5.00	4.36	3.56	3.44	3.33	3.47	
	50	3.78	3.75	4.19	4.00	3.14	2.03	1.94	1.83	1.97	
	60	2.78	2.83	3.17	3.08	2.31	0.69	0.64	0.64	0.81	
	70	1.97	1.97	2.31	2.25	1.28					
	80	1.11	1.08	1.56	1.53						
	90	0.53	0.44	0.81	0.83						
100	0.00			0.14	0.00						
	taes [s]	100	103	103	108	100	70	70	67	69	
	laes [m]	430	427	463	460	431	330	324	327	336	

**A 3.20: Übersicht der Messungen – Geschwindigkeitsstützstellen Chevrolet Van 20**

Richtung	x						x						
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]
Messstrecke 2	10	9,42	9,47	9,50	9,53	9,42	9,50	9,47	9,44	9,50	9,44	9,33	
	20	7,61	7,92	7,94	7,86	7,89	8,03	7,86	7,72	7,86	7,81	7,86	
	30	6,28	6,39	6,47	6,42	6,33	6,61	6,53	6,39	6,58	6,44	6,53	
	40	4,89	5,03	5,06	5,00	5,08	5,17	5,25	5,17	5,19	5,17	5,25	
	50	3,50	3,69	3,67	3,67	3,83	3,86	4,00	3,92	4,00	4,00	4,03	
	60	2,53	2,56	2,44	2,47	2,64	2,67	2,72	2,69	2,75	2,78	2,78	
	70	1,19	1,28	1,36	1,33	1,44	1,50	1,50	1,53	1,50	1,61	1,69	
	80	0,19	0,28	0,39	0,33	0,50	0,50	0,42	0,44	0,50	0,42	0,53	
	90												
	taes [s]	85	84	84	84	85	85	85	84	84	84	85	85
laes [m]	405	402	425	420	426	432	433	423	434	428	432		

Richtung	x						x						
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]
Messstrecke 3	10	9,58	9,31	9,42	9,42	9,28		9,31	9,42	9,25	9,42	9,31	
	20	7,89	7,78	7,92	7,97	7,67		7,75	7,81	7,72	8,00	7,83	
	30	6,17	6,39	6,44	6,56	6,36		6,22	6,36	6,36	6,61	6,42	
	40	4,89	4,89	5,00	5,17	5,14		5,00	5,14	5,17	5,22	5,28	
	50	3,69	3,61	3,83	3,86	3,97		3,69	3,86	3,92	4,06	4,06	
	60	2,56	2,53	2,61	2,69	2,78		2,53	2,58	2,78	2,86	2,83	
	70	1,53	1,42	1,53	1,53	1,72		1,44	1,42	1,64	1,81	1,69	
	80	0,58	0,42	0,69	0,67	0,75		0,33	0,50	0,69	0,83	0,78	
	90												
	taes [s]	87	85	89	90	91		85	87	89	91	90	
laes [m]	422	418	429	435	429		419	426	428	443	437		

Richtung	y						y						
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]
Messstrecke 4	10	9,08	8,75	8,97	8,78	8,69		9,17	8,75	9,17	8,97	8,78	
	20	7,25	7,19	7,22	0,00	7,33		7,28	6,97	7,33	7,22	6,94	
	30	5,97	5,83	5,89	0,00	5,83		5,83	5,64	5,94	5,78	5,67	
	40	4,58	4,47	4,58	4,67	4,31		4,47	4,31	4,67	4,56	4,36	
	50	3,53	3,33	3,36	3,61	3,17		3,33	3,19	3,47	3,31	3,08	
	60	2,64	2,50	2,50	2,78	2,25		2,31	2,36	2,67	2,36	2,08	
	70	1,61	1,64	1,81	1,78	1,64		1,61	1,58	1,89	1,64	1,19	
	80	0,67	0,72	0,86	0,86	0,69		0,75	0,83	0,97	0,83	0,53	
	90												
	100												
taes [s]	88	90	92	90	89		89	92	93	94	90		
laes [m]	411	401	412	422	388		400	408	417	404	379		

Richtung	x						x						
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]
Messstrecke 5	10	0,00	2,66	2,68	0,00			9,58	9,64			9,50	9,50
	20	0,00	2,26	2,27	2,24			8,14	8,17	8,06	8,08	8,06	
	30	0,00	1,94	1,91	1,88			0,00	7,00	6,89	6,75	6,72	6,78
	40	0,00	1,61	1,57	1,52			0,00	5,81	5,64	5,47	5,47	5,56
	50	0,00	1,30	1,27	1,25			0,00	4,69	4,56	4,50	4,39	4,44
	60	0,00	1,05	0,98	0,93			0,00	3,78	3,53	3,33	3,44	3,47
	70		0,80					0,00	2,89	2,64	2,33	2,61	2,53
	80							0,00	1,94	1,47	1,58	1,72	1,61
	90							0,00	0,83	0,64	0,58	0,75	0,56
	100												
taes [s]	62	71	65	63			107	98	95	96	98	96	
laes [m]	368	374	380	365			451	506	488	457	485	479	

Richtung	x						x						
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]
Messstrecke 6	10												
	20												
	30												
	40												
	50												
	60												
	70												
	80												
	90												
	100												
taes [s]	87	87	88	93	86	87	68	66	64	65	66	67	
laes [m]	442	458	454	444	439	451	344	313	318	324	320	331	

Richtung	x						x						
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]
Messstrecke 7	10		9,44	9,33	9,44	9,33	9,50		8,89	8,92	8,92	8,89	8,81
	20		7,78	8,06	7,78	7,53	7,78		7,11	7,14	7,14	7,06	7,11
	30		6,56	6,31	6,56	6,22	6,44		5,33	5,33	5,33	5,42	5,31
	40		5,31	5,39	5,33	5,03	5,33	4,25	3,94	4,00	4,00	4,06	3,92
	50		4,28	4,11	4,33	3,89	4,28	3,08	2,64	2,94	2,94	2,83	2,78
	60		3,56	3,22	3,61	2,94	3,58	2,00	1,69	1,47	1,47	1,69	1,67
	70		2,94	2,53	3,00	2,28	2,94	0,86	0,44	0,33	0,33	0,44	0,53
	80		2,36	1,97	2,44	1,75	2,47						
	90	2,11	1,75	1,53	1,83	1,25	1,72						
	100	1,44	1,03	1,00	1,00	1,17							
taes [s]	119	113	119	114	120	118	78	75	75	78	75	75	
laes [m]	531	506	483	511	465	511	377	354	354	353	352	352	

A 3.21: Übersicht der Messungen – Geschwindigkeitsstützstellen Golf 3 GT (JM)

Richtung	X							X							
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]
Messsstrecke 2	10	9,53	9,44	9,53	9,50	9,58	9,56		9,56	9,61	9,44	9,47	9,39	9,42	
	20	7,94	7,86	8,06	7,86	8,08	8,14		8,11	8,17	7,94	7,94	7,97	7,94	
	30	6,56	6,39	6,58	6,44	6,56	6,64		6,78	6,89	6,56	6,58	6,56	6,47	
	40	5,11	5,00	5,14	5,08	5,14	5,22		5,47	5,64	5,25	5,31	5,42	5,42	
	50	3,78	3,69	3,89	3,78	3,83	4,00		4,22	4,39	3,94	3,92	4,25	4,14	
	60	2,53	2,36	2,64	2,56	2,58	2,78		3,00	3,19	2,67	2,64	3,03	2,89	
	70	1,28	1,25	1,61	1,50	1,56	1,78		1,78	1,97	1,53	1,44	1,94	1,72	
	80	0,28	0,19	0,56	0,56	0,56	0,72		0,61	0,78	0,39	0,28	0,81	0,53	
	90														
	tges [s]	84	82	86	86	85	88		86	87	84	83	88	85	
lges [m]	422	415	433	426	432	441		449	460	431	428	447	441		

Richtung	X							X							
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]
Messsstrecke 3	10	9,53	9,56	9,47	9,36	9,50	9,44		9,47	9,44	9,39	9,47	9,47	9,36	
	20	7,97	8,17	7,94	7,83	7,97	7,94		8,11	8,06	7,92	8,06	8,03	7,94	
	30	6,56	6,92	6,58	6,47	6,56	6,53		6,81	6,69	6,56	6,67	6,78	6,64	
	40	5,22	5,56	5,31	5,19	5,22	5,08		5,56	5,36	5,22	5,33	5,36	5,33	
	50	4,03	4,25	4,03	3,94	3,92	3,72		4,47	4,25	4,11	4,22	4,14	4,22	
	60	2,86	3,19	2,75	2,86	2,78	2,39		3,31	3,08	2,97	3,06	3,03	3,03	
	70	1,94	2,14	1,67	1,81	1,81	1,19		2,28	2,00	1,94	2,00	1,86	1,92	
	80	0,97	1,11	0,72	0,81	0,78	0,31		1,33	1,17	1,03	1,11	0,89	0,89	
	90	0,11	0,22						0,44	0,22		0,33	0,08	0,08	
	tges [s]	92	93	90	89	89	84		95	93	89	94	92	92	
lges [m]	444	464	438	437	445	420		470	456	442	455	449	448		

Richtung	X							X							
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]
Messsstrecke 4	10	9,39	9,39	9,14	9,17	9,22	9,22		9,28	9,28	9,25	9,31	9,17	9,25	
	20	7,56	7,56	7,44	7,50	7,36	7,42		7,42	7,53	7,42	7,56	7,56	7,44	
	30	6,22	6,22	6,11	6,11	6,08	6,00		5,83	5,92	5,89	6,11	6,00	5,89	
	40	5,19	5,19	5,11	5,11	5,03	5,08		4,78	4,89	4,69	4,97	4,78	4,69	
	50	4,00	4,00	4,03	4,03	3,89	3,92		3,92	4,00	3,81	4,06	4,00	3,81	
	60	2,75	2,75	2,69	2,69	2,50	2,67		2,56	2,64	2,47	2,53	2,92	2,50	
	70	1,81	1,81	1,64	1,69	1,53	1,61		1,50	1,58	1,31	1,83	1,67	1,39	
	80	1,17	1,17	0,78	0,78	0,69	0,83		0,81	0,81	0,47	0,92	0,69	0,67	
	90	0,33	0,33		0,03	0,17	0,11					0,25	0,17		
	100														
tges [s]	93	94	89	92	93	92		89	90	90	91,5	93	89		
lges [m]	436	432	424	425	419	422		415	424	419	431	423	410		

Richtung	X							X							
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]
Messsstrecke 5	10	9,25	9,19	9,14	9,11	9,00	9,19	9,11	9,64	9,50	9,53	9,64	9,50	9,53	9,47
	20	7,64	7,56	7,44	7,50	7,31	7,53	7,50	8,31	8,17	8,17	8,28	8,08	8,17	8,14
	30	6,03	6,08	5,89	6,08	5,78	6,00	5,89	7,11	6,81	6,89	7,06	6,78	7,03	6,86
	40	4,69	4,69	4,39	4,69	4,36	4,67	4,56	6,03	5,58	5,81	5,89	5,69	5,89	5,81
	50	3,33	3,36	3,03	3,33	3,11	3,39	3,25	4,89	4,47	4,69	4,92	4,61	4,78	4,69
	60	2,08	2,08	1,75	2,03	1,75	2,03	1,94	4,03	3,58	3,92	4,11	3,89	4,00	3,81
	70	0,86	0,72	0,50	0,47	0,53	0,89	0,72	3,17	2,81	3,06	3,11	3,03	3,19	2,92
	80								2,17	2,00	2,17	2,28	2,06	2,25	1,94
	90								1,50	1,03	1,47	1,42	1,42	1,58	1,31
	100								0,75	0,08	0,75	0,67	0,72	0,92	0,67
tges [s]	77	75	75	74	75	78	78	109	101	110	110	110	112	109	
lges [m]	392	389	374	385	371	391	382	528	494	517	527	511	524	509	

Richtung	X							X							
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]
Messsstrecke 6	10	9,44	9,39	9,22	9,44	9,42	9,42	9,31	9,06	8,89	8,94	8,83	8,89	8,92	8,89
	20	7,97	7,81	7,89	7,86	7,97	7,92	7,89	7,11	7,00	7,14	6,81	6,86	6,92	7,03
	30	6,67	6,31	6,47	6,44	6,44	6,39	6,33	5,44	5,08	5,25	5,11	5,19	5,22	5,14
	40	5,36	5,08	5,25	5,31	5,22	5,19	5,08	3,83	3,44	3,58	3,42	3,53	3,69	3,61
	50	4,28	3,94	4,14	4,17	4,06	4,00	3,89	2,31	1,69	1,89	1,89	2,00	1,97	1,97
	60	3,25	2,92	3,06	2,94	2,97	2,86	2,72	0,89	0,22	0,44	0,33	0,67	0,64	0,58
	70	2,25	1,78	1,94	2,08	2,00	1,83	1,72							
	80	1,25	0,75	1,17	1,03	0,94	1,03	0,92							
	90	0,28	0,14		0,08	0,28		0,39							
	100														
tges [s]	94	93	90	91	95	90	94	69	62	64	63	69	64	63	
lges [m]	477	435	445	448	447	440	433	375	314	324	314	329	325	326	

A 3.22: Übersicht der Messungen – Geschwindigkeitsstützstellen Golf 3 (FEM)

	Distanz							v							
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v7 [m/s]
Messstrecke 2	10	0 30	0 42	0 30	0 30	0 36			0 36	0 36	0 36	0 33			
	20	7 64	7 72	7 75	7 78	7 78			7 78	7 78	7 86	7 78			
	30	6 14	6 22	6 22	6 22	6 14			6 31	6 33	6 36	6 31			
	40	4 60	4 75	4 75	4 60	4 60			4 80	4 02	4 07	4 02			
	50	3 22	3 31	3 33	3 33	3 33			3 53	3 58	3 58	3 58			
	60	1 07	1 07	1 07	2 06	2 00			2 10	2 22	2 31	2 31			
	70	0 75	0 72	0 72	0 86	0 75			0 89	0 94	1 03	1 06			
	80														
	90														
	100														
tmes [s]	77	77	77	80	77			78	79	80	79				
lmes [m]	301	304	304	308	304			402	404	408	407				
Messstrecke 3	10	0 42	0 30	0 36	0 42	0 31			0 33	0 28	0 28	0 33	0 31		
	20	7 04	7 81	7 78	7 78	7 75			7 78	7 78	7 81	7 78	7 78		
	30	6 56	6 44	6 44	6 44	6 36			6 30	6 42	6 36	6 36	6 47		
	40	5 11	5 03	4 07	5 00	4 80			4 07	4 07	4 07	5 00	5 00		
	50	3 81	3 72	3 69	3 78	3 61			3 69	3 69	3 86	3 69	3 69		
	60	2 53	2 42	2 36	2 36	2 31			2 53	2 47	2 42	2 47	2 42		
	70	1 44	1 22	1 19	1 17	1 11			1 31	1 31	1 22	1 33	1 31		
	80	0 33	0 28	0 25	0 11	0 17			0 25	0 17	0 17	0 17	0 14		
	90														
	100														
tmes [s]	83	83	83	81	82			83	82	82	82	81			
lmes [m]	423	416	413	415	409			415	414	411	415	415			
Messstrecke 4	10	8 80	8 86	9 00	8 07	9 00	0 03								
	20	6 02	6 02	7 00	7 03	7 00	7 00								
	30	5 22	5 22	5 42	5 36	5 33	5 44								
	40	3 83	3 04	4 28	4 25	4 14	4 25								
	50	2 83	2 80	2 04	2 04	2 04	3 00								
	60	1 67	1 67	1 39	1 42	1 58	1 53								
	70	0 30	0 56	0 08	0 03	0 11	0 10								
	80														
	90														
	100														
tmes [s]	75	75	71	71	71	72		77	78	72	72	75	73		
lmes [m]	350	352	354	353	352	357		372	370	363	367	363	366		
Messstrecke 5	10	9 14	9 08	9 14	9 17	9 14	9 19		9 39	9 36	9 44	9 44	9 39	9 47	
	20	7 53	7 33	7 67	7 33	7 36	7 53		7 07	7 04	7 80	8 06	8 06	7 04	
	30	6 00	5 75	5 89	5 86	5 86	5 92		6 67	6 58	6 53	6 58	6 67	6 53	
	40	4 58	4 25	4 36	4 30	4 36	4 47		5 44	5 25	5 31	5 33	5 53	5 36	
	50	3 14	2 75	3 06	2 07	2 02	3 17		4 33	4 14	4 11	4 22	4 36	4 11	
	60	1 72	1 33	1 56	1 64	1 58	1 75		3 33	3 25	3 06	3 22	3 42	3 08	
	70	0 11	0 17	0 33	0 00	0 31	0 33		2 50	2 03	2 28	2 42	2 47	2 25	
	80	0	0	0	0	0	0		1 67	1 33	1 47	1 61	1 58	1 31	
	90	0	0	0	0	0	0		0 75	0 61	0 53	0 67	0 50	0 47	
	100														
tmes [s]	71	72	73	72	72	73		98	98	96	90	95	96		
lmes [m]	374	358	369	365	365	375		472	459	457	467	470	456		
Messstrecke 6	10														
	20														
	30														
	40														
	50														
	60														
	70														
	80														
	90														
	100														
tmes [s]	80		90	91	93	k Δ		72	67	67	70				
lmes [m]	387		400	405	399	398		340	338	335	334				
Messstrecke 7	10	33 7	34 1	33 0	34 1	34 1	34		31 4	31 6	31 4	31 4	31 5	31 1	
	20	28	28 6	28 4	28 2	28 5	28 4		24 8	24 7	24 7	24	24 7	24 4	
	30	22 8	23 6	23 2	23 2	23 3	23 1		18 5	18 7	18 7	18 3	18 8	18 5	
	40	18 8	19 0	19 2	19 5	19 6	19 1		13 2	13 4	12 9	12 6	13 3	13	
	50	15	15 7	15 7	15 7	15 7	15 4		8 5	8 4	8 1	7 4	8 3	8 4	
	60	11 8	12 4	12	12 1	12 2	11 9		4 7	4 9	3 6	3	4	4 2	
	70	9 3	9 9	9 1	9 6	9 6	9 3		0 5	1 2	0 3	0	0 5	1	
	80	7 5	8 1	7 1	7 6	7 7	7 2								
	90	6 1	6 6	5 5	5 8	6 2	5 4								
	100	4 7	5 1	3 9	4 3	4 7	4								
tmes [s]	125	126	120	120	124	135		72	74	71	67	72	73		
lmes [m]	500	519	502	509	510	504		333	335	328	319	330	330		
Messstrecke 8	10	0 75	0 78	0 75	0 78				0 28	0 47	0 33	0 44	0 42		
	20	8 42	8 33	8 42	8 30				7 81	8 00	7 83	8 00	8 03		
	30	6 04	6 04	7 03	6 80				6 25	6 44	6 33	6 56	6 47		
	40	5 58	5 58	5 56	5 44				4 75	4 92	4 86	4 97	5 00		
	50	4 33	4 30	4 36	4 22				3 22	3 53	3 44	3 58	3 53		
	60	3 14	3 22	3 08	3 00				1 69	1 04	1 78	1 83	1 02		
	70	1 92	2 00	1 97	1 83				0 11	0 31	0 33	0 42	0 42		
	80	0 75	0 86	0 86	0 72										
	90														
	100														
tmes [s]	88	89	88	87				71	72	72	74	74			
lmes [m]	461	463	461	453				384	396	389	397	398			

A 3.23: Übersicht der Messungen – Geschwindigkeitsstützstellen Seat Ibiza

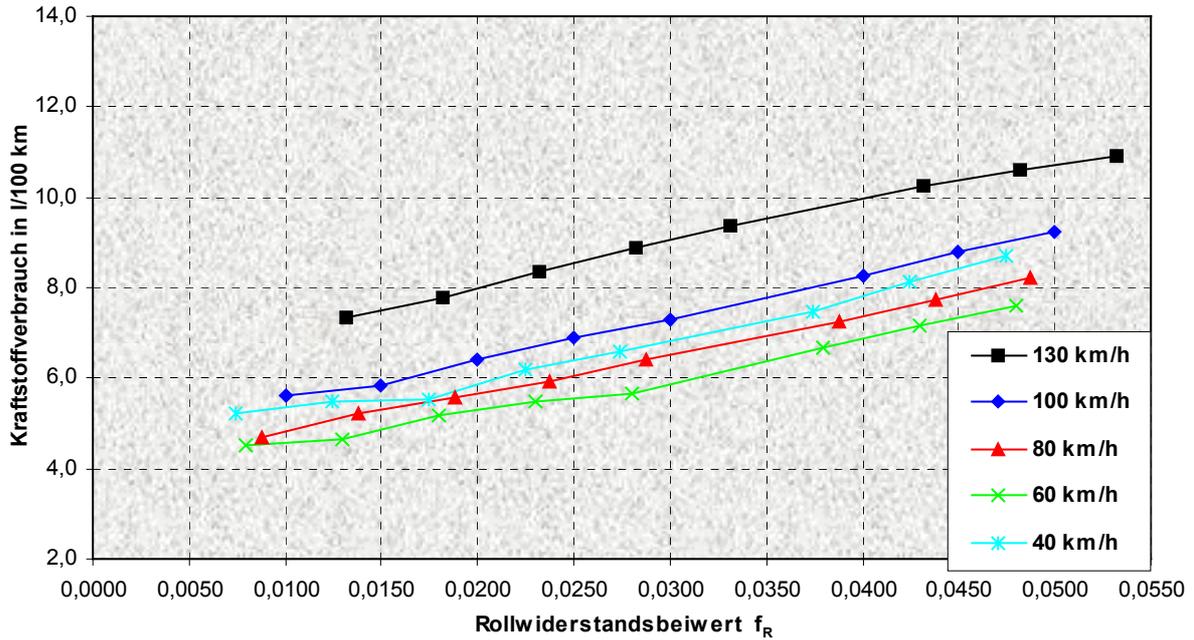
	Distanz							v					
	t [s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]	v1 [m/s]	v2 [m/s]	v3 [m/s]	v4 [m/s]	v5 [m/s]	v6 [m/s]
Messstrecke 1	10	9 72	9 17	8 44	7 78	7 78	9 44						
	20	9 17	8 06	7 78	7 78	7 78	9 44						
	30	7 78	6 04	6 30	6 67	6 30	6 30						
	40	6 39	5 56	5 28	5 56	5 56	5 28						
	50	3 89	4 17	3 61	3 61	3 61	3 61						
	60	2 78	3 33	2 78	2 78	2 78	2 78						
	70	2 22	2 50	1 04	1 04	1 67	1 67						
	80	0 83	1 04	0 83	1 11	0 56	0 83						
	90												
	100												
tnes [s]	86	94	90	91	86	85							
lnes [m]	401	405	398	412	398	395							
Messstrecke 2	10	10 00	10 00	10 28	10 00	10 00	9 72	10 00	10 00	10 28	10 00		
	20	8 89	8 89	8 89	8 61	8 89	8 61	8 89	8 89	8 89	9 17	8 89	
	30	7 78	7 78	7 78	7 50	7 78	7 50	7 78	7 78	8 06	7 78		
	40	6 67	6 30	6 30	6 30	6 67	6 67	6 04	6 67	6 04	6 04		
	50	5 28	5 56	5 00	5 28	5 28	5 56	5 83	5 56	6 11	5 83		
	60	3 89	4 17	3 89	3 89	4 17	4 44	4 72	4 44	5 00	4 72		
	70	3 61	3 61	3 33	3 33	3 61	3 61	3 61	3 61	3 89	3 89		
	80	2 50	2 50	2 50	2 50	2 50	2 50	2 78	3 06	3 06	3 06		
	90	1 67	1 67	1 39	1 67	1 67	1 67	1 04	2 22	2 22	2 50	2 22	
	100	0 56	0 83	0 28	0 56	0 56	0 83	0 83	1 11	0 83	1 11	2 22	
tnes [s]	106	105	105	107	106	109	109	110	110	111	111		
lnes [m]	526	531	518	512	520	540	540	560	555	587	580		
Messstrecke 3	10	10 28	10 00	10 00	10 00	10 00	10 00	9 72	9 72	9 72	9 72		
	20	8 89	8 61	8 89	8 61	8 61	8 89	8 33	8 33	8 33	8 33		
	30	7 78	7 50	7 78	7 50	7 78	7 50	7 22	7 22	7 50	7 22		
	40	6 67	6 30	6 04	6 30	6 30	6 30	6 11	6 11	6 11	6 11		
	50	5 56	5 28	5 83	5 28	5 28	5 56	5 00	5 28	5 28	5 28		
	60	4 72	4 17	4 44	4 17	4 17	4 44	3 89	4 17	4 17	3 89	3 89	
	70	3 89	3 33	3 33	3 33	3 61	3 33	2 78	3 06	3 06	3 06	3 06	
	80	3 06	2 50	2 78	2 22	2 50	2 50	2 22	2 50	2 50	2 50	2 22	
	90	2 50	1 67	1 04	1 11	1 39	1 67	1 39	1 67	1 67	1 39	1 11	
	100	1 67	0 83	0 83	0 28	0 56	0 83	0 56	0 83	0 56	0 56	0 56	
tnes [s]	126	110	113	107	107	109	109	109	107	108	106		
lnes [m]	559	529	555	508	536	535	499	512	518	501	501		
Messstrecke 4	10	9 44	9 44	9 44	9 44	9 44	9 44	9 44	9 44	9 72	9 44	9 44	
	20	8 06	8 06	8 06	8 06	8 06	8 06	8 06	8 33	8 33	8 33	8 06	
	30	6 67	6 39	6 67	6 39	6 67	6 67	6 67	6 94	6 67	6 67	6 39	
	40	5 56	5 56	5 56	5 56	5 56	5 56	5 56	5 56	5 56	5 56	5 28	
	50	4 44	4 44	4 44	4 44	4 72	4 72	5 00	5 00	4 44	4 72	4 44	
	60	3 33	3 33	3 61	3 33	3 61	3 61	3 61	3 89	3 61	3 89	3 61	
	70	2 50	2 50	2 50	2 50	2 78	2 78	3 06	3 06	2 78	2 78	2 78	
	80	1 67	1 67	1 67	1 67	2 22	2 22	2 78	2 50	2 22	2 50	2 22	1 04
	90	1 11	1 11	1 11	0 83	1 11	1 11	2 22	2 22	1 67	1 04	1 67	1 11
	100	0 56	0 28	0 56	0 28	0 56	0 56	1 04	1 67	1 11	1 67	0 83	0 83
tnes [s]	110	111	106	105	110	137	137	152	117	139	141	140	
lnes [m]	456	456	459	447	462	537	544	494	523	490	507		
Messstrecke 5	10	36	34					36	35				
	20	30	29					32	31				
	30	24	23					29	28				
	40	20	19					25	25				
	50	14	14					22	21				
	60		9					19	18				
	70	7	5					16	15				
	80	4	1					14	13				
	90	1						12	10				
	100							9	9				
tnes [s]	94	83					142	145					
lnes [m]	410	394					645	621					
Messstrecke 6	10	7 22	7 22	7 22	7 22	7 22	7 22	6 04	6 67	7 22	6 04	6 04	6 04
	20	6 39	6 39	6 39	6 11	6 11	6 11	5 56	5 28	5 28	5 56	5 56	5 28
	30	5 28	5 28	5 28	5 28	5 00	5 00	3 89	3 61	3 61	3 89	3 61	3 89
	40	4 17	4 17	4 44	4 17	3 89	3 89	2 78	2 50	2 50	2 78	2 50	2 78
	50	3 33	3 33	3 61	3 33	3 33	3 33	1 39	1 39	1 39	1 39	1 39	1 39
	60	2 78	2 78	2 78	2 78	2 50	2 50	0 28	0 28	0 28	0 28	0 28	0 28
	70	2 22	1 04	2 22	1 04	1 04	1 04						
	80	1 67	1 39	1 67	1 11	1 11	1 11						
	90	0 83	0 83	0 83	0 56	0 56	0 56						
	100			0 28	0 28								
tnes [s]	100	108	104	108	101	105	61	62	62	61	61	61	
lnes [m]	371	363	369	353	341	340	230	227	228	233	228	227	
Messstrecke 7	10	7 22	7 22	7 22	7 22	7 50	7 22	6 04	6 04	7 22	6 04	6 04	6 04
	20	6 11	6 39	6 11	6 11	6 39	6 11	5 83	5 56	5 56	5 00	5 56	5 56
	30	5 00	5 00	5 00	5 00	5 00	5 00	4 17	3 89	3 89	3 61	3 89	3 89
	40	4 17	4 17	3 89	4 17	4 17	4 17	2 78	2 78	2 78	2 50	2 78	2 78
	50	3 33	3 61	3 33	3 61	3 61	3 61	1 67	1 67	1 67	1 11	1 67	1 67
	60	3 06	3 06	2 78	3 06	3 06	3 06	0 28	0 83	0 83		0 56	0 56
	70	2 50	2 50	2 50	2 22	2 50	2 50						
	80	1 04	1 04	1 04	1 04	1 04	1 04						
	90	1 39	1 39	1 11	1 39	1 39	1 39						
	100	0 83	0 83	0 83	0 83	0 83	0 83						
tnes [s]	123	144	120	158	123	123	62	69	69	60	66	66	
lnes [m]	381	396	376	403	386	386	247	242	242	238	235	235	

- Versucheschwindigkeit 30 km/h

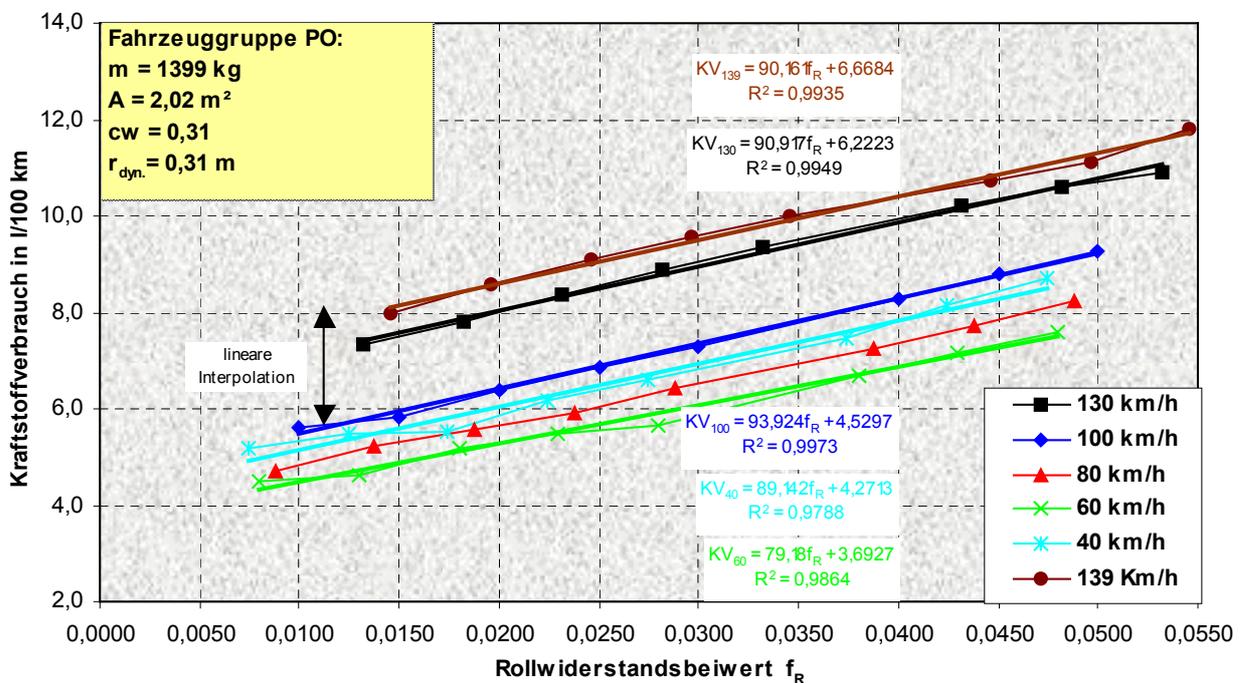
A 3.24: Übersicht der Messungen – Geschwindigkeitsstützstellen LKW SRM

# Anhang

## A4 Kraftstoffverbrauch $f(f_R)$

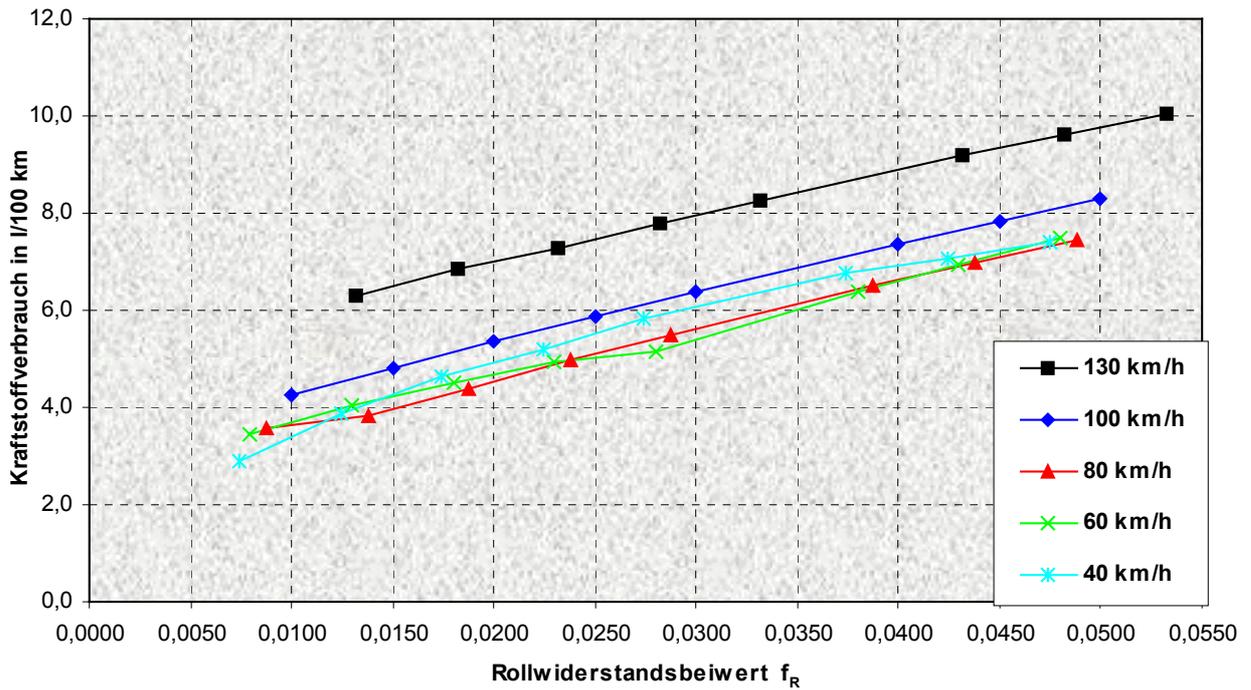


A 4.1: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$  und der Geschwindigkeit  $V$   
 Fahrzeuggruppe PO  
 Kraftstoffverbrauchssimulation; FG Verbrennungskraftmaschinen, Technische Universität Berlin

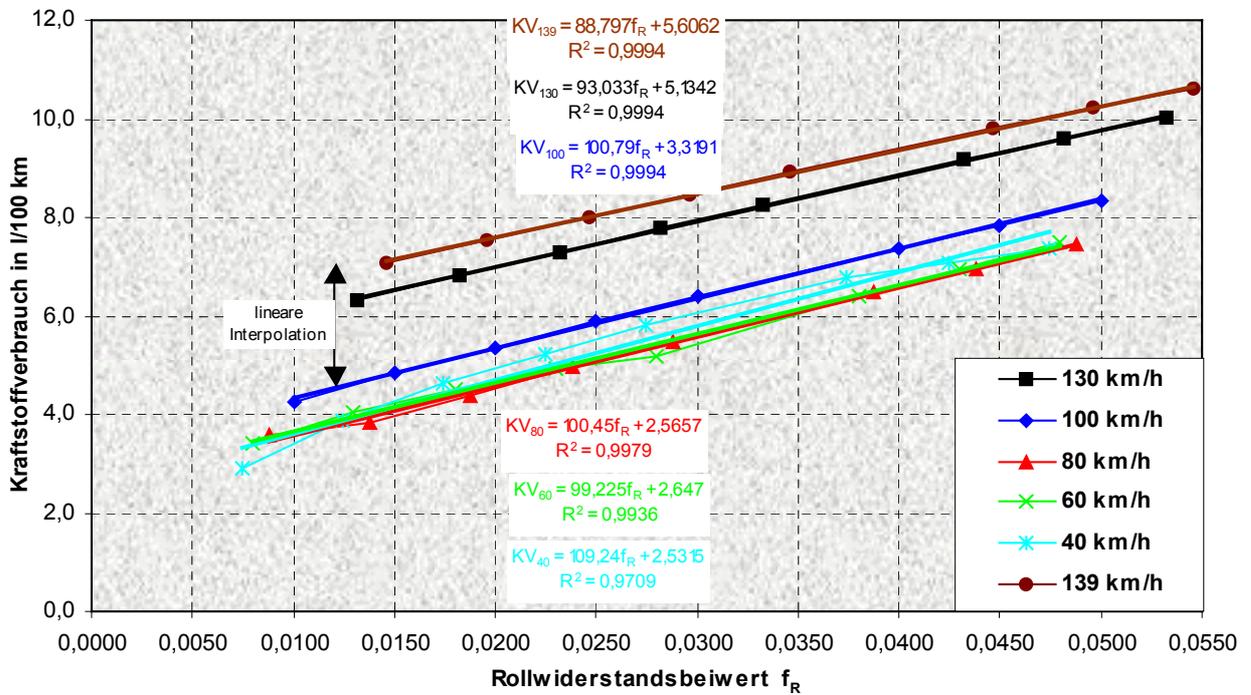


A 4.2: Kraftstoffverbrauch als lineare Funktion  $KV(f_R, V)$ , Fahrzeuggruppe PO

lineare Interpolation:  $KV_{PO}(f_R, V) = 93,924 * f_R + 0,0536 * V - 0,8303$

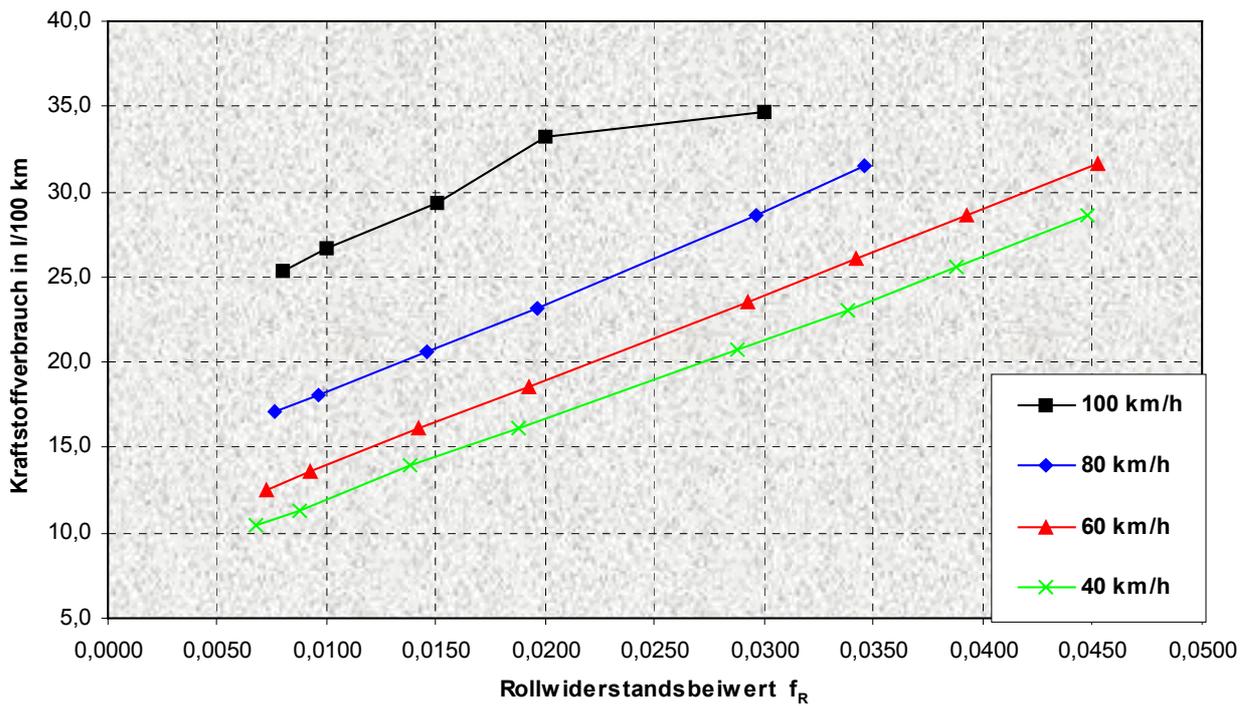


**A 4.3: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$  und der Geschwindigkeit  $V$**   
 Fahrzeuggruppe PD  
 Kraftstoffverbrauchssimulation; FG Verbrennungskraftmaschinen, Technische Universität Berlin

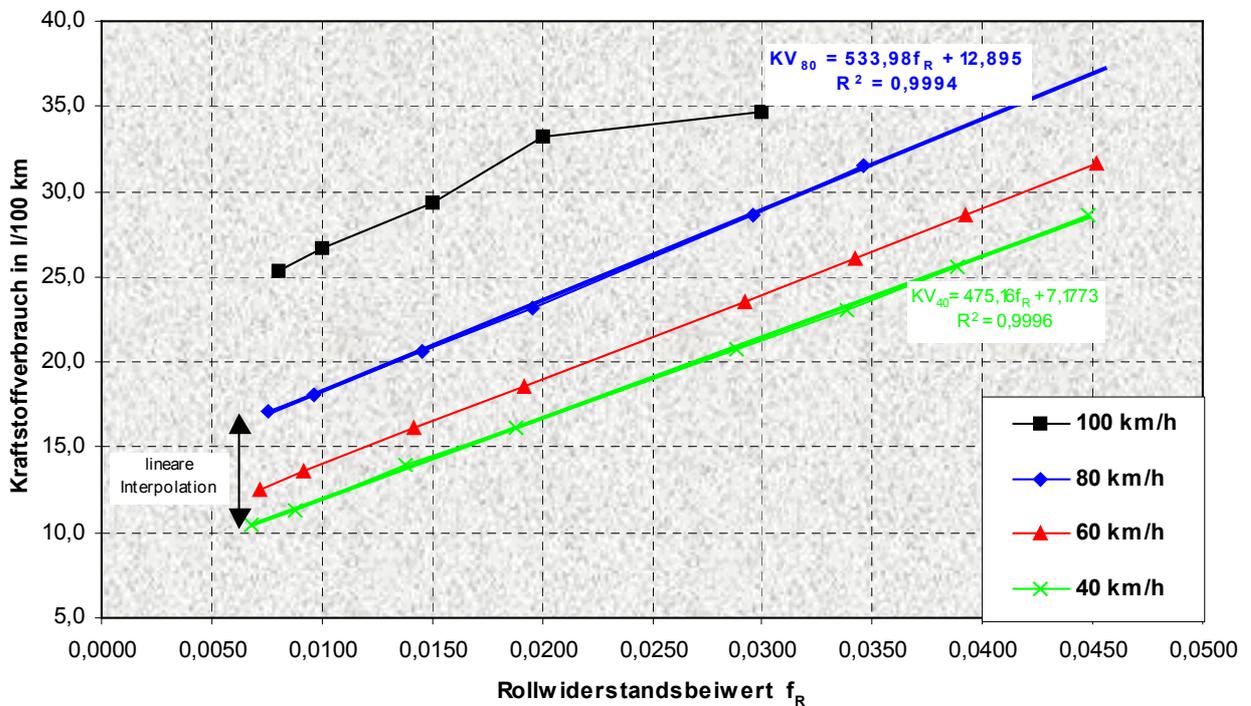


**A 4.4: Kraftstoffverbrauch als lineare Funktion  $KV(f_R, V)$ , Fahrzeuggruppe PD**

**lineare Interpolation:  $KV_{PD}(f_R, V) = 100,79 * f_R + 0,0540 * V - 2,0809$**

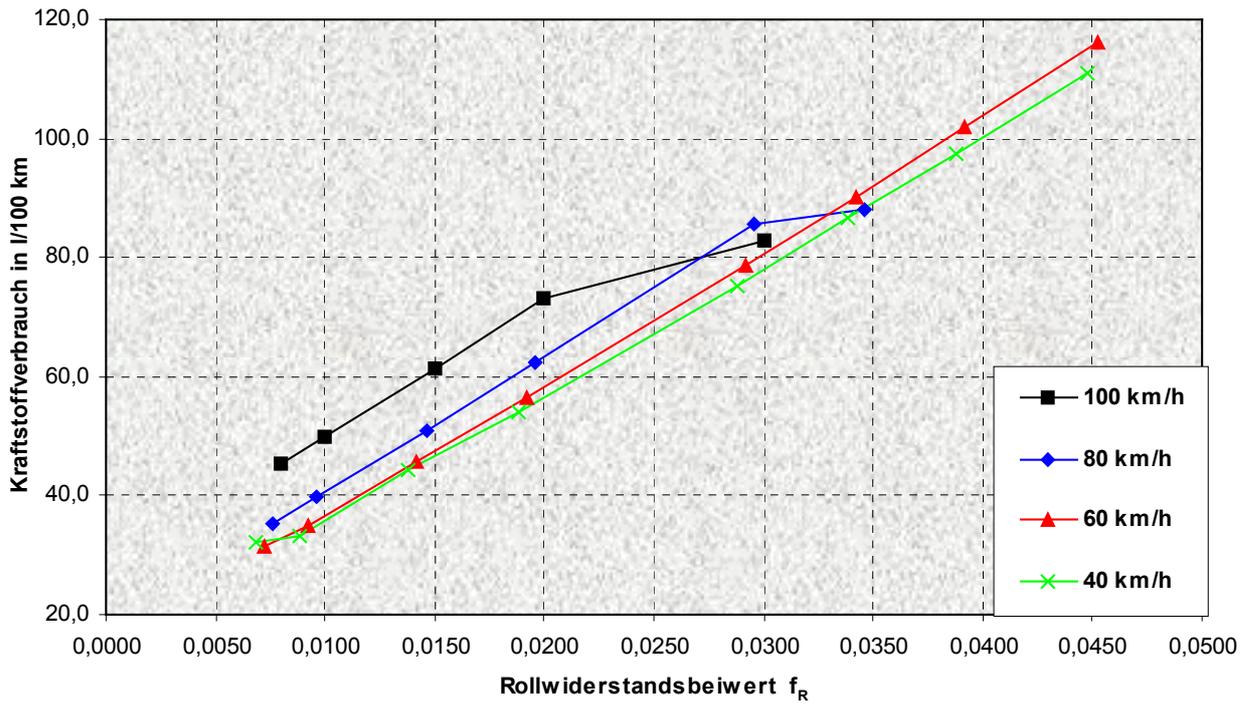


A 4.5: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$  und der Geschwindigkeit  $V$   
 Fahrzeuggruppe L  
 Kraftstoffverbrauchssimulation; FG Verbrennungskraftmaschinen, Technische Universität Berlin

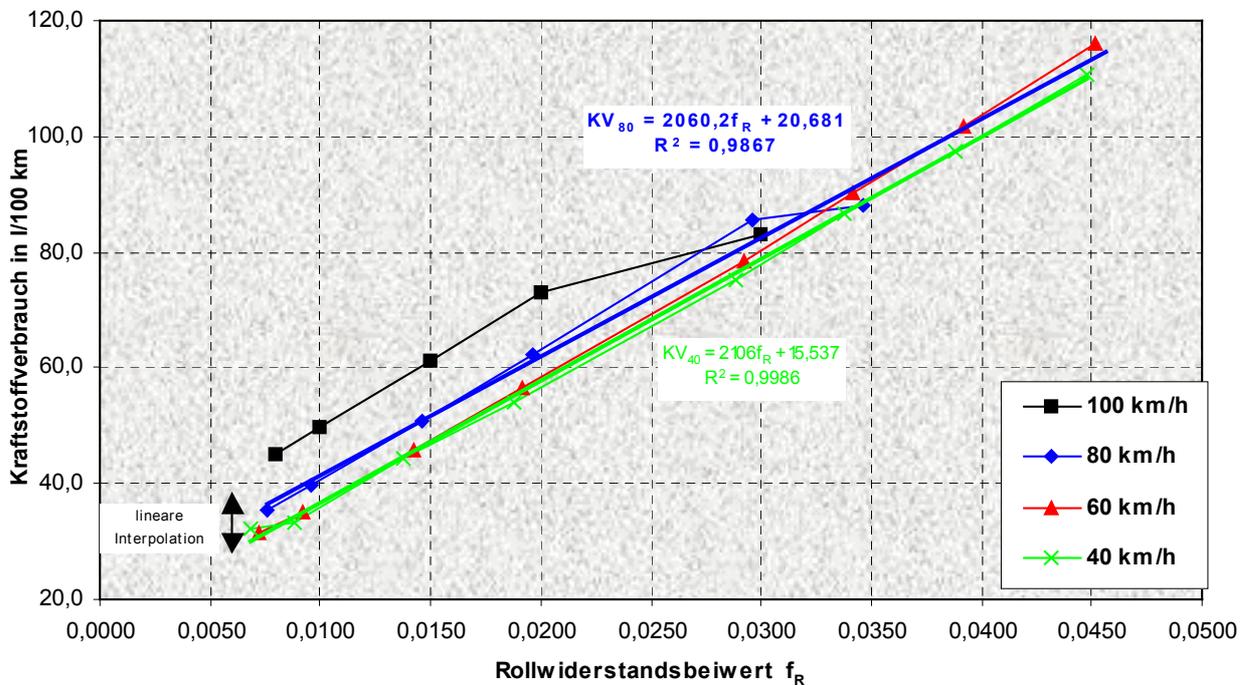


A 4.6: Kraftstoffverbrauch als lineare Funktion  $KV(f_R, V)$ , Fahrzeuggruppe L

lineare Interpolation:  $KV_L(f_R, V) = 475,16 * f_R + 0,18 * V - 0,00127$

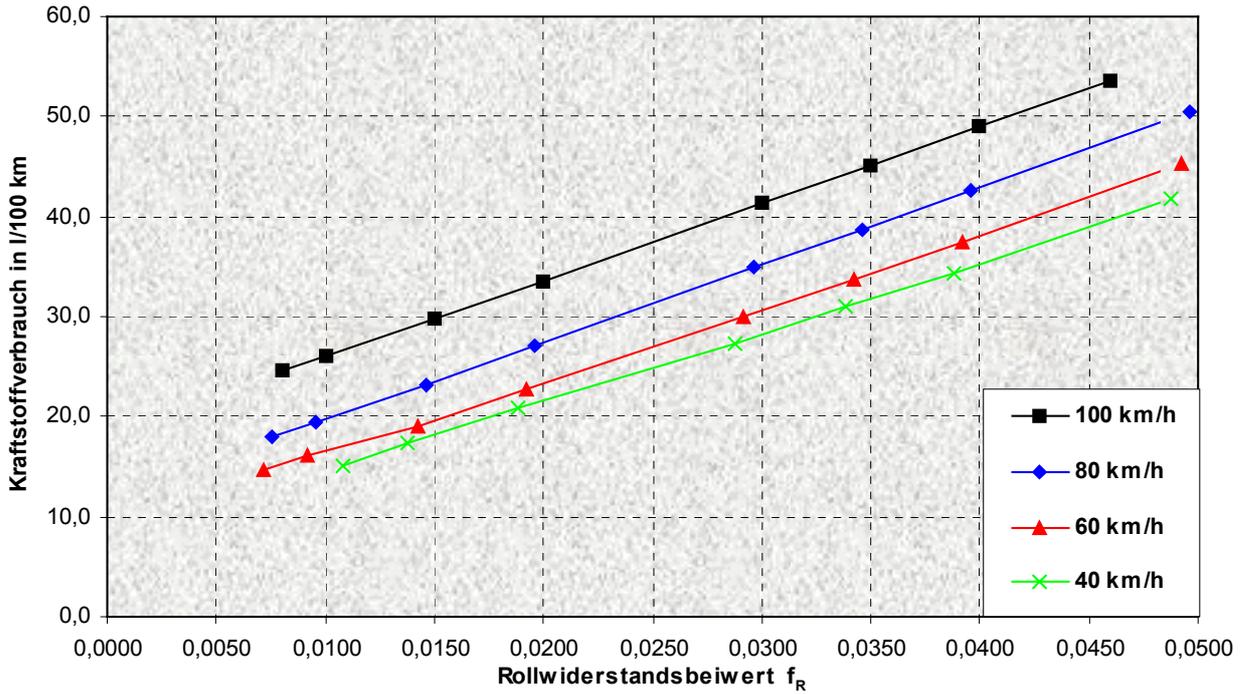


**A 4.7:** Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$  und der Geschwindigkeit  $V$   
 Fahrzeuggruppe Z  
 Kraftstoffverbrauchssimulation; FG Verbrennungskraftmaschinen, Technische Universität Berlin

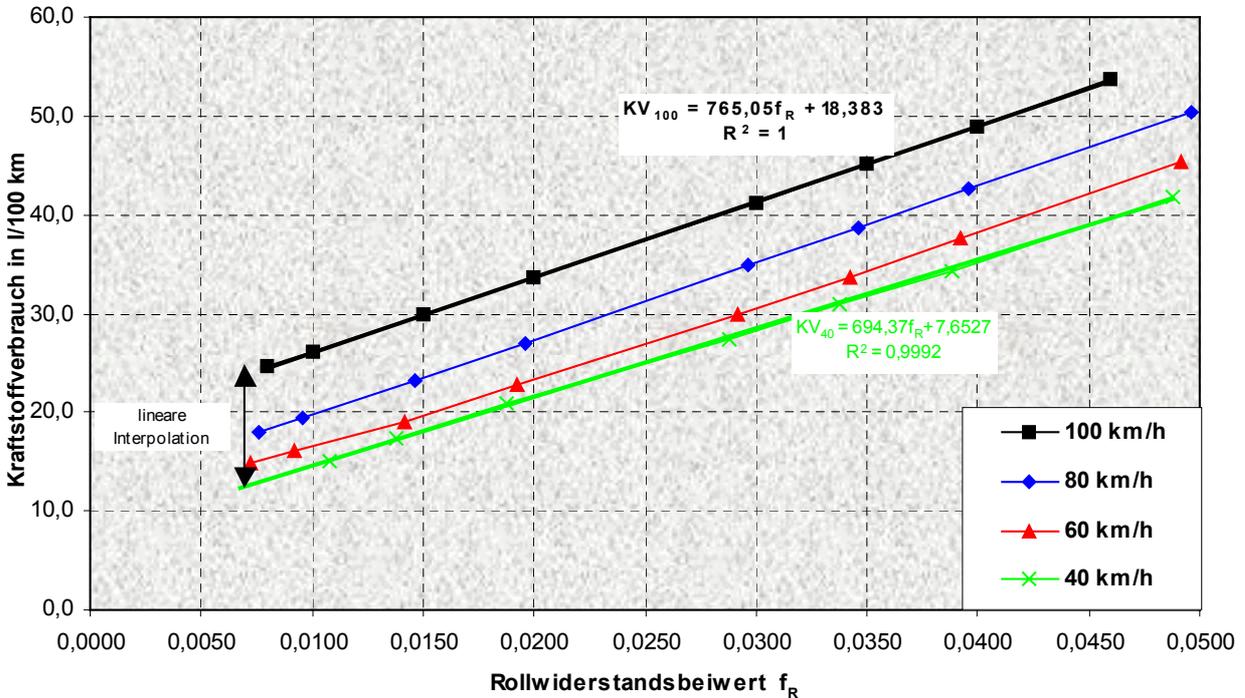


**A 4.8:** Kraftstoffverbrauch als lineare Funktion  $KV(f_R, V)$ , Fahrzeuggruppe Z

**lineare Interpolation:  $KV_Z(f_R, V) = 2106 \cdot f_R + 0,1 \cdot V + 11,537$**



A 4.9: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes  $f_R$  und der Geschwindigkeit V Fahrzeuggruppe B Kraftstoffverbrauchssimulation; FG Verbrennungskraftmaschinen, Technische Universität Berlin



A 4.10: Kraftstoffverbrauch als lineare Funktion  $KV(f_R, V)$ , Fahrzeuggruppe B

lineare Interpolation:  $KV_B(f_R, V) = 694,37 * f_R + 0,21 * V - 0,6793$

# **Anhang A5 GEEP 1.0**

# **GEEP 1.0**

## **German Economic Evaluation Program**

**Dipl.-Ing. T. Stütze**

**August 2003**

## Handbuch GEEP 1.0

### Einführung

Das **German Economic Evaluation Program** GEEP 1.0 ist am Fachgebiet Straßenwesen der Technischen Universität Berlin entwickelt und implementiert worden.

Mit dem Programm besteht die Möglichkeit, Erhaltungsmaßnahmen auf Bundesfernstraßen der wirtschaftlichen Bewertung und Prioritätenlistung zu unterziehen. Unter Berücksichtigung der Straßenbaulastträger- und Straßennutzerkosten wird eine Nutzen-Kosten-Analyse durchgeführt. Die zu analysierende Erhaltungsmaßnahme wird dabei mit einer Basisoption verglichen, wobei sowohl die Erhaltungs- als auch Basisoption frei wählbar sind. Das Programm liefert als Ergebnisse die Wirtschaftlichkeitsindikatoren:

- Nettogegenwartswert NGW
- Interner Zinsfuß IZF
- Nutzen/Kosten-Verhältnis

$$\text{NGW} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \frac{1}{q^i} - \sum_{i=1}^n K_i \cdot \frac{1}{q^i} + R \cdot \frac{1}{q^n} \quad [\text{€}] \quad \text{bzw.}$$

$$\text{NGW} = \sum_{i=1}^n (\Delta \text{SNK}_{i0-1} + \Delta \text{SUK}_{i0-1} + \Delta \text{KL}_{i0-1}) * \frac{1}{q^i} - \sum_{i=1}^n (\Delta \text{SBK}_{i1-0} + \Delta \text{SNK}_{i1-0}) * \frac{1}{q^i} + R \cdot \frac{1}{q^n} \quad [\text{€}]$$

mit:

N<sub>i</sub>: Nutzen aus dem i-ten Jahr [€]

K<sub>i</sub>: Kosten aus dem i-ten Jahr A<sub>i</sub> [€]

n: Betrachtungszeitraum [Jahre]

R: Restwert der Investition am Ende des Betrachtungszeitraumes n [€]

q: Zinsfaktor  $q = 1 + p / 100$

p: Diskontsatz

Interner Zinsfuß IZF:

Der Interne Zinsfuß ist der kritische interne Zins  $p_k$ , für den die Kosten gleich den Nutzen sind.

$$\text{NGW} = 0 = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \frac{1}{q_k^i} - \sum_{i=1}^n K_i \cdot \frac{1}{q_k^i} + R \cdot \frac{1}{q_k^n} \quad [\text{€}] \quad \text{bzw.}$$

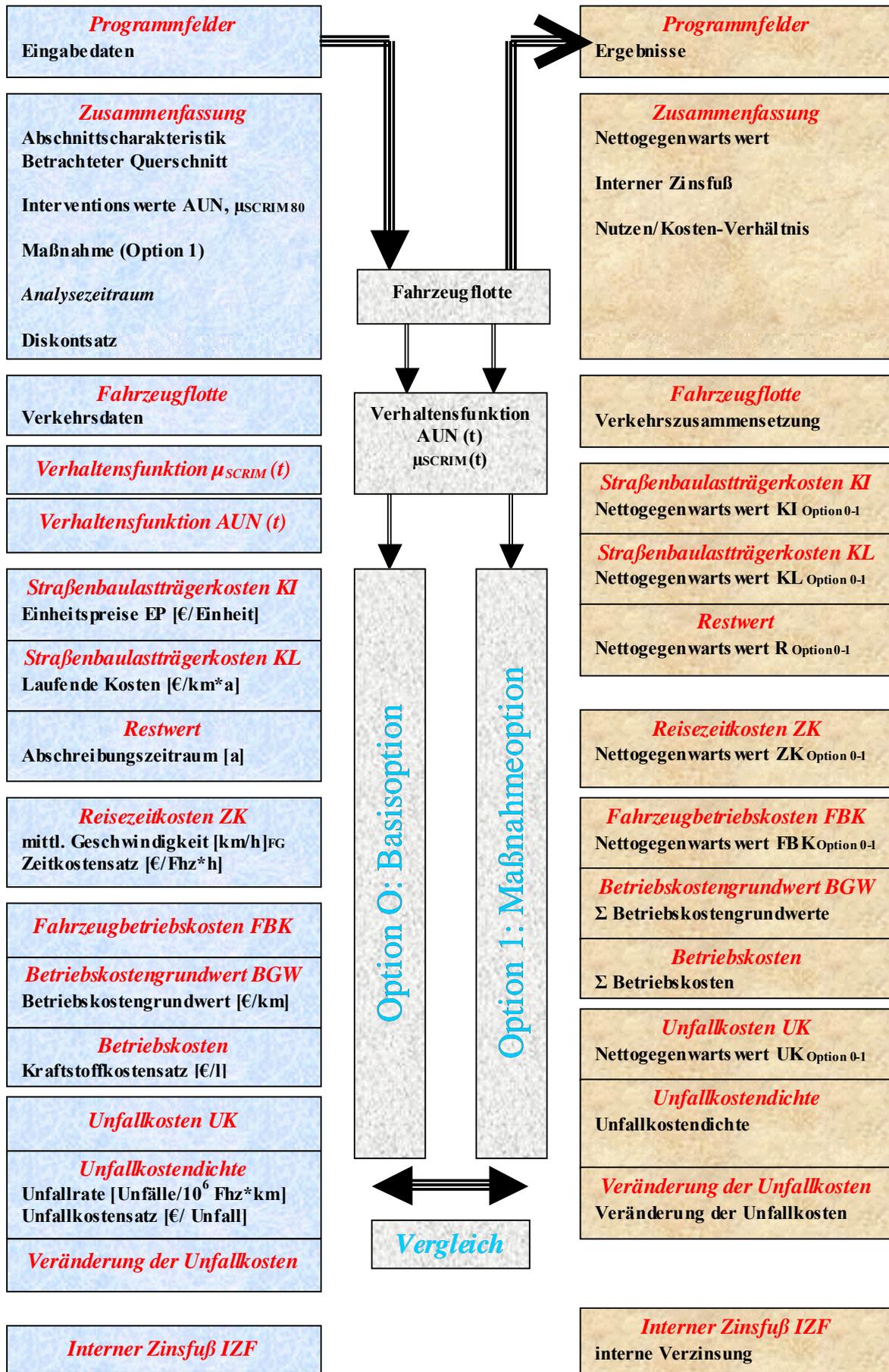
$$\text{NGW} = 0$$

$$= \sum_{i=1}^n (\Delta \text{SNK}_{i0-1} + \Delta \text{SUK}_{i0-1} + \Delta \text{KL}_{i0-1}) * \frac{1}{q_k^i} - \sum_{i=1}^n (\Delta \text{SBK}_{i1-0} + \Delta \text{SNK}_{i1-0}) * \frac{1}{q_k^i} + R \cdot \frac{1}{q_k^n} \quad [\text{€}]$$

$$\text{IZF} = p_k = (q_k - 1) * 100 \quad [\%]$$

Das Nutzen/Kosten-Verhältnis wird aus dem Quotient der Nutzen und Kosten ermittelt.

Das Ablaufschema des Programms wird im folgenden Organigramm als Übersicht gezeigt.



Das Programm gliedert sich in 15 Arbeitsblätter, deren Benutzeroberflächen weitestgehend selbsterklärend bzw. mit Kommentaren versehen sind.

Die Felder für die Eingabewerte sind blau hinterlegt und müssen für die Nutzen-Kosten-Analyse vollständig ausgefüllt werden. Bei geforderten formatierten Eingabeaufforderungen steht ein Kommentarfeld zur Verfügung, welches die Eingabemöglichkeiten vorgibt (s. **Abb. 1**).

**GEEP 1.0**

**Straßenerhaltung/ Straßenerneuerung**  
**Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsanalyse der gewählten Maßnahme**

**Zusammenfassung**

Fahrzeugflotte

Verhaltensfunktion  $\mu(t)$

Verhaltensfunktion AUN(t)

Straßenbaulastträgerkosten KI

Straßenbaulastträgerkosten KL

Restwert

Reisezeit ZK

Fahrzeugbetriebskosten FBK

Betriebskostengrundwert BGW

Betriebskosten BKF

Unfallkosten UK

Unfallkostendichte UKD

Veränderung der Unfallkosten

Interner Zinsfuß IZF

**Strecke/ Netz:**  
**Allgemeine Abschnittscharakteristik:**  
 Straßentyp:   
 Bezeichnung:   
 Netzknoten: VNK:  NNK:

**betrachteter Querschnitt:** Basisoption Maßnahme  
 Querschnittsbreite [m]:  11,5  
 Abschnittslänge [km]:  1,0  
 Fahrbahnoberfläche:  AB

**Verkehrsdaten:**  
 DTV im Basisjahr:  [Kfz/24h]  
 Zuwachsrate:  [%]  
 Entw. DTV n. Fertigstellung  [%]

**Fahrzeugflotte:**  
 Anteil PKW (PO):  [%]  
 Anteil PKW (PD):  [%]  
 Anteil LKW (L):  [%]  
 Anteil Lastzug (Z):  [%]  
 Anteil Bus (B):  [%]

**Intervention f(Zustand):**  
 untersuchte Zustandsgröße:

Zustandsgröße	
AUN [cm³]	$\mu_{SCRIM 80}$ [-]
3,7	0,555
WW<ZG<SW	ZG>WW
DH	DH
opt	opt
opt	opt

Interventionswert: 0,5552  
 Intervention bei:   
 Maßnahme:   
 Rücksetzwert:   
 Lebensdauer:   
**Unterhaltung, Erhaltung:**  
 Option 0: Basisoption: routinemäßige Unterhaltung  
 Option 1: Maßnahme: Deckschicht im Hocheinbau, 40mm

**Wirtschaftlichkeitsindikatoren:**  
 Diskontsatz:  [%]

Kommentarfeld

Arbeitsblätter

**Abb. 1: Unterstützendes Kommentarfeld zur formatierten Eingabe**

Der Zugriff in die Programmstruktur ist für den Nutzer nicht möglich. Die Ergebnisfelder sind grau hinterlegt.

**Arbeitsblatt 1: Zusammenfassung – Übersicht**

Das Arbeitsblatt ist in die Bereiche Dateneingabe und –übersicht sowie Ergebnisdarstellung unterteilt.

Dateneingabe:

Straßentyp: Die Strecke bzw. das Netz wird durch den Straßentyp charakterisiert.

Ziffer	Straßentyp
1	BAB
2	B (s. Abb. 1)

Andere Eingaben sind nicht möglich, es werden nur diese beiden Straßentypen analysiert.

Netzknoten: Die Netzknotenangabe dient zur Identifizierung der analysierten Teilabschnitte.

Querschnittsbreite: Für die Angabe der Querschnittsbreite [m] ist das Querschnittsprofil einer Fahrtrichtung maßgebend. Die Verkehrsbelastung wird mit DTV/2 angesetzt.

Abschnittslänge: Länge des zu analysierenden Abschnittes in [km].

Basisjahr: Bezugsjahr für die Verhaltensfunktionen mit Jahr des Neubaus oder Erneuerung.

Jahr der Maßnahme: Jahr, in dem die Zustandsgrößen den definierten Interventionswert erreichen werden.

Maßnahmebeginn: Jahr des Maßnahmebeginns.

Maßnahmeende: Ende der Durchführung der Maßnahme. Erstreckt sich die Durchführung der Maßnahme über mehrere Jahre, so werden die Erhaltungskosten gleichmäßig über die Anzahl der Jahre verteilt.

Analysezeitraum: Zeitraum der Analyse ab Fertigstellung der Maßnahme. Programmtechnisch ist der Analysezeitraum auf 30 Jahre beschränkt und lehnt sich an die durchschnittliche Lebenserwartung der Maßnahme an.

Entwicklung des DTV nach Fertigstellung: prognostizierte Verkehrszunahme nach Querschnittserweiterung, sonst: 0%.

Intervention:

Untersuchte Zustandsgröße:

1: AUN

2:  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$

Interventionswert: Auslösen der vorgesehenen Maßnahme bei Erreichen des Wertes, getrennt nach AUN und  $\mu_{\text{SDCRIM } 80}$ . Für den Interventionswert  $\mu_{\text{SCRIM } 80}$  gilt:

$$\mu_{\text{SCRIM } 80 \text{ IW}} \leq 0,55$$

Maßnahme: Bezeichnungen nach dem **Arbeitsblatt 5**

Wirtschaftlichkeitsindikatoren:

Diskontsatz: aktueller kalkulatorischer Zinssatz. Die Voreinstellung hält sich an den Bundesverkehrswegeplan 2003 (3%).

Die Ergebnisse Nettogegenwartswert NGW, Interner Zinsfuß IZF und Nutzen/Kosten-Verhältnis sind im unteren Teil des Arbeitsblattes aufgeführt.

## **Arbeitsblatt 2: Fahrzeugflotte**

Die Bestimmung der Fahrzeugflotte in der Zusammensetzung und Menge erfolgt automatisch in Abhängigkeit des im **Arbeitsblatt 1** definierten Straßentyps.

Die Anzahl der Stunden pro Jahr der Zeitabschnitte t ergeben in der Summe 8760 h (365 x 24 h). Bei Fehlermeldung müssen die Eingaben korrigiert werden (**s. Abb. 2**). Der relevante Fall der durchschnittlichen Verkehrsanteile k wird durch die Definition des Straßentyps bestimmt und erfolgt automatisch.

**GEEP 1.0**

Zusammenfassung

Fahrzeugflotte

Verhaltensfunktion  $\mu(t)$

Verhaltensfunktion AUN(t)

Straßenbaulasträgerkosten KI

Straßenbaulasträgerkosten KL

Restwert

Reisezeit ZK

Fahrzeugbetriebskosten FBK

Betriebskostengrundwert BGW

Betriebskosten BKF

Unfallkosten UK

Unfallkostendichte UKD

Veränderung der Unfallkosten

Interner Zinsfuß IZF

**Fahrzeugflotte:**  
Ermittlung der durchschnittlichen Fahrzeugflotte

DTV: 48.000 [Kfz/24h]  
Zuwachsrate: 2,5 [%]  
Straßentyp ST: 1

**Straßentyp ST / Verkehrsbelastung**

ST 1. (BAB)		Summe FG		ST 2. (B)	
[%]	[Kfz/24h]	[%]	[Kfz/24h]	[%]	[Kfz/24h]
65,3	31.344			70,05	n.r.
19,9	9.552			21,40	n.r.
		85,2	40.896		n.r.
2,8	1.344			4,62	n.r.
11,9	5.712			3,16	n.r.
0,1	48			0,77	n.r.
		14,8	7.104		
<b>Summe Kfz insgesamt:</b>	<b>48.000</b>	<b>100,0</b>	<b>48.000</b>	<b>100,0</b>	

Relevanter Fall		Summe FG	
[%]	[Kfz/24h]	[%]	[Kfz/24h]
65,30	31.344		
19,90	9.552		
		85,20	40.896
2,80	1.344		
11,90	5.712		
0,10	48		
		14,80	7.104
<b>Summe Kfz insgesamt:</b>	<b>48.000</b>	<b>100,0</b>	<b>48.000</b>

Fehlermeldung

**Verkehrsbelastung durchschnittliche Anteile k für Zeitabschnitte t (alle Tage)**

Zeitabschnitt t	Anzahl Stunden pro Jahr	BAB		B		relevanter Fall BAB	
		$k_{ges}$	$k_{GV}$	$k_{ges}$	$k_{GV}$	$k_{ges}$	$k_{GV}$
1	80	0,0971	0,0622	0,1212	0,0735	<b>0,0971</b>	<b>0,0622</b>
2	120	0,0892	0,0622	0,1091	0,0735	<b>0,0892</b>	<b>0,0622</b>
3	390	0,0809	0,0622	0,0965	0,0735	<b>0,0809</b>	<b>0,0622</b>
4	1.500	0,0690	0,0622	0,0731	0,0735	<b>0,069</b>	<b>0,0622</b>
5	6.660	0,0313	0,0345	0,029	0,0309	<b>0,0313</b>	<b>0,0345</b>
	<b>8750</b>	Summe=18760 h, Angaben falsch!					

Abb. 2: Falsche Angaben der Anzahl Stunden der Zeitabschnitte t pro Jahr

**Arbeitsblatt 3: Verhaltensfunktion  $\mu_{SCRIM 80}(t)$**

Darstellung der implementierten Verhaltensfunktion für die Zustandsgröße Griffigkeit  $\mu_{SCRIM 80}$ . Änderungen durch den Nutzer sind nicht möglich.

**Arbeitsblatt 4: Verhaltensfunktion AUN(t)**

Darstellung der implementierten Verhaltensfunktion für die Zustandsgröße AUN. Änderungen durch den Nutzer sind nicht möglich.

**Arbeitsblatt 5: Straßenbaulastträgerkosten – Investitionskosten KI**

Die folgenden Maßnahmen sind vorgesehen:

- DSK: Dünne Schichten im Kalteinbau
- DH: Deckschichten im Hocheinbau 40mm und
- DT: Deckschichten im Tiefeinbau 40mm

Die Angabe der Einheitspreise erfolgt in [€/m²]. Die Voreinstellungen beziehen sich auf den Kostenstand 2000. Die Ausgaben für die durchzuführende Maßnahme werden mit den Querschnittsdaten und dem Einheitspreis berechnet.

GEEP 1.0

**Straßenbaulastträgerkosten SBK  
Investitionskosten KI**

Zusammenfassung

---

Fahrzeugflotte

---

Verhaltensfunktion μ(t)

---

Verhaltensfunktion AUN(t)

---

Straßenbaulastträgerkosten KI

---

Straßenbaulastträgerkosten KL

---

Restwert

---

Reisezeit ZK

---

Fahrzeugbetriebskosten FBK

---

Betriebskostengrundwert BGW

---

Betriebskosten BKF

---

Unfallkosten UK

---

Unfallkostendichte UKD

---

Veränderung der Unfallkosten

---

Interner Zinsfuß IZF

**Maßnahmeoptionen:**

Maßnahmeart	Einheitspreis			Rücksetzwert	
	[€/m²]	[€/m]	[€/km]	AUN	μ <sub>SCRIM</sub>
DSK	4,63	53,25	53.245,00	-	opt
40 mm DH	6,73	77,40	77.395,00	opt	opt
40 mm DT	8,44	97,96	97.060,00	opt	opt

gewählte Maßnahme: DH (DSK DH DT)

**betrachteter Abschnitt:**  
 Abschnittslänge Basisoption: 1 [km]  
 Abschnittslänge Maßnahme: 1 [km]

**Ausgaben Abschnitt:**  
 Ausgabe A Basisoption: €  
 Ausgabe A Maßnahme: **77.395,00** €

Basisjahr: 2004 [Jahr]  
**Jahr der Maßnahme:**  
 Beginn: 2004 [Jahr]  
 Ende: 2004 [Jahr]  
 Analysezeitraum: 12,5 [Anzahl Jahre]

Maßnahmeoptionen und Einheitspreis

Verkehrssicherung Bz  
Verkehrssicherung M:

**Diskontierter Wert der Maßnahme im Jahr i**

Jahr im Analysezeitraum	Ausgabe A Basisoption [€]	Ausgabe A Maßnahme [€]	Gewährleistung Maßnahme [Jahr]	Differenz [€]	Diskontfaktor
1	-	78.795	1	78.795	1,00
2	-	-	2	-	0,97
3	-	-	-	-	0,94
4	-	-	-	-	0,92
5	-	-	-	-	0,89
6	-	-	-	-	0,86
7	-	-	-	-	0,81
8	-	-	-	-	0,79
9	-	-	-	-	0,77
10	-	-	-	-	0,74
11	-	-	-	-	0,72

Summe aus Maßnahme und Verkehrssicherung

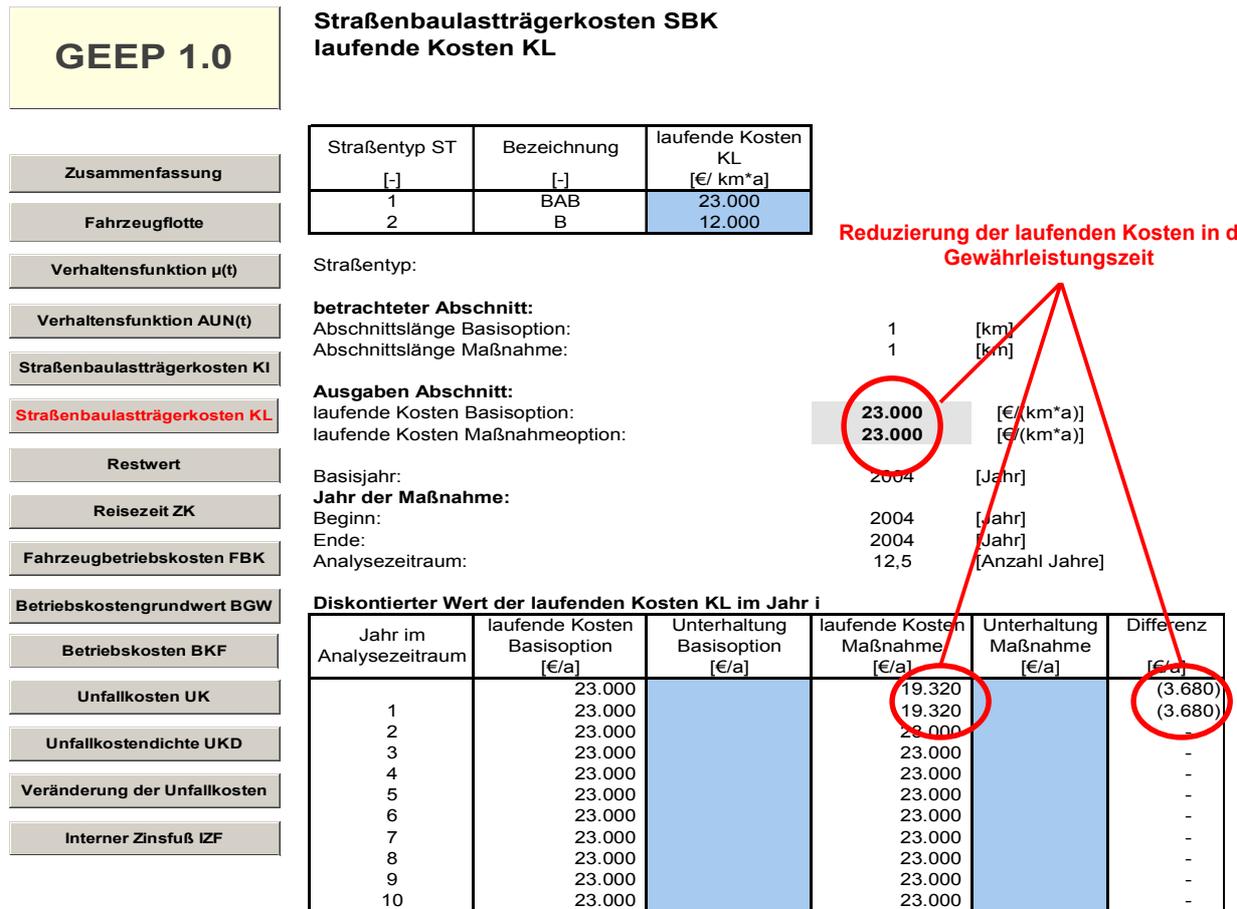
Abb. 3: Mögliche Maßnahmen und Einheitspreis in [€/m²]

Die Investitionskosten als Summe aus den Maßnahme- und Verkehrssicherungskosten werden über den Betrachtungszeitraum jährlich diskontiert dargestellt.

**Arbeitsblatt 6: Straßenbaulastträgerkosten – laufende Kosten KL**

Angabe der durchschnittlichen laufenden Kosten für BAB und B in [€/km\*a]. Die laufenden Kosten werden über den Betrachtungszeitraum jährlich diskontiert dargestellt.

In der Gewährleistungsdauer der Maßnahme (2 Jahre) werden die laufenden Kosten um den Betrag der baulichen Unterhaltung reduziert (s. Abb. 4).



**Reduzierung der laufenden Kosten in der Gewährleistungszeit**

Abb. 4: Laufende Kosten KL für die Basis- und die Maßnahmeoption

**Arbeitsblatt 7: Restwert**

Für die Erhaltungsmaßnahme wird in Abhängigkeit des Abschreibungszeitraumes  $d_b$  und Analysezeitraumes  $n$  der Restwert nach dem linearen Abschreibungsmodell bestimmt (**s. Abb. 5**). Der Analysezeitraum  $n$ , d. h. der Zeitraum, in dem Nutzen und Kosten der jeweiligen Projekte erfasst werden, bestimmt sich durch den gewogenen Durchschnitt der Lebensdauer der einzelnen Projektbestandteile. Bei der Deckschichtenerneuerung wird eine durchschnittliche Lebensdauer von 12,5 Jahren angenommen. Für die Dünnen Schichten im Kalteinbau DSK wird eine durchschnittliche Lebenserwartung von 5 Jahren angesetzt.

## GEEP 1.0

### Restwert

**Konstruktion:**

Abschreibungszeitraum a:	12,5	[Jahre]
Analysezeitraum:	12,5	[Jahre]
Restwert der Konstruktion:	1	[%]

Jahre	Konstruktionsrestwert Basisoption [€]	Konstruktionsrestwert Maßnahme [€]	Differenz [€]	Diskontfaktor
12	-	788	788	0,70
<b>GW Restwert</b>				<b>€</b>

Richtwerte für Abschreibungszeiträume

lfd. Nr.:	Teilleistung	Abschreibungszeitraum [a]	Restwert (20 Jahre) [%]
<b>2. Abschreibungsfähige Anlagen für den Straßenverkehr</b>			
2.1	Untergrund, Unterbau, FSS	100	80
2.2	Entwässerung	75	73
2.3	Tragschichten	50	60
2.4	Fahrbahndecken (auch Busspuren)		
2.4.1	Asphalt		
2.4.1.1	Binder	25	20
2.4.1.2	Deckschicht	12,5	1
2.4.2	Beton	25	20
2.4.3	Pflaster	50	60
2.5	Brücken	50	60
2.6	Stützwände	50	60
2.7	Tunnel	50	60
2.8	Ausstattung	10	1
2.9	Lärmschutzwände	25	20

Abb. 5: Richtwerte für (lineare) Abschreibungszeiträume

**Arbeitsblatt 8: Reisezeitkosten ZK**

$$ZK = \sum_t \sum_{FG} \left( \frac{Q}{V} \right)_{t,FG} * T_t * LG * WT_{FG} \quad \left[ \frac{€}{a} \right]$$

Mittlere Geschwindigkeit V: Angabe in [km/h] für alle 5 Fahrzeuggruppen in den 5 Zeitabschnitten t.

Zeitkostensatz WT<sub>FG</sub>: Angabe für alle 5 Fahrzeuggruppen in [€/Kfz\*h] für den Fall „alle Tage“.

Im Jahr der Maßnahmedurchführung erhöhen sich die Reisezeitkosten ZK infolge Baustellenbehinderung. Die zusätzlichen Reisezeitkosten werden automatisch berücksichtigt (**s. Abb. 6**). Andernfalls wird von einer Kostenneutralität ausgegangen, d.h. die gefahrene Geschwindigkeit verändert sich nicht mit den AUN. Die Differenz zwischen Basis- und Maßnahmeoption ist folglich Null.

GEEP 1.0

Zusammenfassung

Fahrzeugflotte

Verhaltensfunktion  $\mu(t)$

Verhaltensfunktion AUN(t)

Straßenbaulastträgerkosten KI

Straßenbaulastträgerkosten KL

Restwert

Reisezeit ZK

Fahrzeuggesteuerkosten FBK

Betriebskostengrundwert BGW

Betriebskosten BKF

Unfallkosten UK

Unfallkostendichte UKD

Veränderung der Unfallkosten

Interner Zinsfuß IZF

Reisezeitkosten ZK

**Verkehrsdaten:**  
 DTV im Basisjahr: 48.000 [Kfz/24h]  
 Zuwachsrate p: 2,5 [%]

**Verkehrsbelastung Q und mittlere Geschwindigkeit V**

Zeitabschnitt t	Anzahl Stunden pro Jahr	Verkehrsstärke Q [Kfz/h]					ZK/t [€/km*a]
		Q <sub>PD</sub>	Q <sub>PP</sub>	Q <sub>L</sub>	Q <sub>Z</sub>	Q <sub>B</sub>	
1	80	1.616	494	42	178	1	
2	120	1.471	449	42	178	1	
3	390	1.318	403	42	178	1	
4	1.500	1.099	336	42	178	1	
5	6.660	482	147	23	99	1	

Zeitabschnitt t	Anzahl Stunden pro Jahr	mittlere Geschwindigkeit V [km/h]					ZK/t [€/km*a]
		V <sub>PD</sub>	V <sub>PP</sub>	V <sub>L</sub>	V <sub>Z</sub>	V <sub>B</sub>	
1	80	120	120	80	80	100	13.347,29
2	120	123	123	80	80	100	18.980,67
3	390	127	127	80	80	100	58.152,01
4	1500	131	131	80	80	100	206.542,17
5	6660	139	139	80	80	100	463.129,18

Zeitkosten ZK: 760.151,33

**Zeitkostensatz WT<sub>FG</sub>:**

Fahrzeuggruppe FG	Zeitkostensätze WT <sub>FG</sub> [€/ (Kfz*h)] alle Tage
Pkw (P)	4,40
Lkw (L)	23,90
Lastzug (Z)	34,20
Bus (B)	71,30

**zusätzliche Zeitkosten infolge Baustelle  $\Delta ZK_{Bst}$**   
 Basisoption: 3.000 € (Basisjahr)  
 Maßnahme: 3.000 € (Basisjahr)

**betrachteter Abschnitt:**  
 Abschnittslänge Basisoption: 1 [km]  
 Abschnittslänge Maßnahme: 1 [km]

**Basisjahr:** 2004 [Jahr]  
**Jahr der Maßnahme:**  
 Beginn: 2004 [Jahr]  
 Ende: 2004 [Jahr]  
 Analysezeitraum: 12,5 [Anzahl Jahre]

Zusätzliche Reisezeitkosten infolge Baustelle  $\Delta ZK_{Bst}$

Jahr im Analysezeitraum	ZG AUN Basisoption [cm³]	ZG AUN Maßnahme [cm³]	DTV/2	Zeitkosten Basisoption [€/a]	Zeitkosten Maßnahme [€/a]	Differenz [€/a]	Diskontfaktor
1	3,70	0,90	24.000	760.151	763.151	(3.000)	1,00
2	3,74	0,91	24.600	779.155	779.155	-	0,97
2	3,78	0,92	25.215	798.634	798.634	-	0,94

Abb. 6: Zusätzliche Reisezeitkosten infolge Baustelle  $\Delta ZK_{Bst}$

**Arbeitsblatt 9: Fahrzeugbetriebskosten FBK**

$$FBK = \sum_t \sum_{FG} (BGW_{FG} + BKF_{FG}) * Q_{t,FG} * T_t * LG \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

Das Arbeitsblatt fasst die Berechnungen der Arbeitsblätter 10 und 11 in einer Übersicht zusammen und gibt den diskontierten Gegenwartswert der eingesparten Fahrzeugbetriebskosten an. Das Arbeitsblatt enthält keine Eingabeaufforderungen.

**Arbeitsblatt 10: Betriebskostengrundwert BGW**

Angabe des geschwindigkeitsunabhängigen Betriebskostengrundwertes in [€/Kfz\*km] für die fünf Fahrzeuggruppen. Die Voreinstellung bezieht sich auf den Kostenstand 2000 (s. Abb. 7).

## GEEP 1.0

### Betriebskostengrundwert BGW

**Zusammenfassung**

**Fahrzeugflotte**

**Verhaltensfunktion  $\mu(t)$**

**Verhaltensfunktion AUN(t)**

**Straßenbaulasträgerkosten KI**

**Straßenbaulasträgerkosten KL**

**Restwert**

**Reisezeit ZK**

**Fahrzeugbetriebskosten FBK**

**Betriebskostengrundwert BGW**

**Betriebskosten BKF**

**Unfallkosten UK**

**Unfallkostendichte UKD**

**Veränderung der Unfallkosten**

**Interner Zinsfuß IZF**

**geschwindigkeitsunabhängiger Betriebskostengrundwert :**

Fahrzeuggruppe FG	BGW [€/km*Kfz]
PO	0,09
PD	0,09
L	0,15
Z	0,25
B	0,47

Kostenstand 2000

**geschwindigkeitsunabhängiger Betrieb**

Zeitraum t	Anzahl Stunden T pro Jahr	Verkehrsst	
		Q <sub>PO</sub>	Q <sub>PD</sub>
1	80	1.616	494
2	120	1.471	449
3	390	1.318	403
4	1.500	1.099	336
5	6.660	482	147

Jahr im Analysezeitraum [Jahre]	BGW+BKF Basisoption AUN	FBK = BGW+BKF <sub>FG(V,AUN)</sub> [€/km*Kfz]								
		PO				PD				
		120	123	127	131	139	120	123	127	131
	3,70	0,121	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
1	3,74	0,121	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
2	3,78	0,121	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
3	3,82	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
4	3,86	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
5	3,91	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
6	3,95	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
7	3,99	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
8	4,04	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
9	4,08	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
10	4,13	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
11	4,17	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
12	4,22	0,122	0,122	0,123	0,124	0,126	0,112	0,112	0,113	0,114
13	N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 7: Betriebskostengrundwert BGW mit Kostenstand 2000 (Grundeinstellung)

Die Tabelle zeigt im unteren Teil die Summe aus BGW und BKF für die Basis- und Maßnahmeoption.

**Arbeitsblatt 11: Kraftstoffbezogene Betriebskosten BKF<sub>FG</sub>**

$$BKF_{FG} = \frac{KV_{FG}(V, AUN) * K_k}{100} \quad \left[ \frac{\text{€}}{\text{km} * \text{Kfz}} \right]$$

Der Kraftstoffkostensatz  $K_k$  ist steuerbereinigt für Benzin- und Dieselmotoren in [€/l] anzugeben. Der Voreinstellung ist der Kostenstand 2000 zugrunde gelegt. Für die Basis- und Maßnahmeoption werden die BKF nach den angegebenen Funktionen in tabellarischer Form dargestellt (s. Abb. 8).

<b>GEEP 1.0</b>		<b>Kraftstoffbezogene Betriebskosten BKF<sub>FG</sub></b>									
		<b>Kraftstoffkostensatz K<sub>K</sub> [€/l]:</b>									
<b>Zusammenfassung</b>		Kraftstoffart		Kraftstoffkostensatz K <sub>K</sub>							
<b>Fahrzeugflotte</b>		[-]		[€/l]							
<b>Verhaltensfunktion μ(t)</b>		Benzin		0,46							
<b>Verhaltensfunktion AUN(t)</b>		Diesel		0,38							
<b>Straßenbauasträgerkosten KI</b>		<b>Kraftstoffverbrauchsfunktionen</b>									
<b>Straßenbauasträgerkosten KL</b>											
<b>Restwert</b>											
<b>Reisezeit ZK</b>											
<b>Fahrzeugbetriebskosten FBK</b>											
<b>Betriebskostengrundwert BGW</b>											
<b>Betriebskosten BKF</b>											
<b>Unfallkosten UK</b>											
<b>Unfallkostendichte UKD</b>											
<b>Veränderung der Unfallkosten</b>											
<b>Interner Zinsfuß IZF</b>											

Jahr im Analysezeitraum [Jahre]	BKF Basisoption AUN	Funktion f(V,AUN)						BKF <sub>PO</sub>					
		PO	PD	L	Z	B	120	123	127	131	139	120	
1	3,70						0,031	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
2	3,74						0,031	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
3	3,78						0,031	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
4	3,82						0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
5	3,86						0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
6	3,91						0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
7	3,95						0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
8	3,99						0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
9	4,04						0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
10	4,08						0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
11	4,13						0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
12	4,17						0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
13	4,22						0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,022	
14	N/A						-	-	-	-	-	-	
15	N/A						-	-	-	-	-	-	
16	N/A						-	-	-	-	-	-	
17	N/A						-	-	-	-	-	-	
18	N/A						-	-	-	-	-	-	
19	N/A						-	-	-	-	-	-	
20	N/A						-	-	-	-	-	-	
21	N/A						-	-	-	-	-	-	
22	N/A						-	-	-	-	-	-	
23	N/A						-	-	-	-	-	-	
24	N/A						-	-	-	-	-	-	
25	N/A						-	-	-	-	-	-	
26	N/A						-	-	-	-	-	-	
27	N/A						-	-	-	-	-	-	
28	N/A						-	-	-	-	-	-	
29	N/A						-	-	-	-	-	-	
30	N/A						-	-	-	-	-	-	

Abb. 8: Kraftstoffverbrauchsfunktionen und tabellarische Darstellung der BKF

**Arbeitsblatt 12: Unfallkosten UK**

Das Arbeitsblatt liefert eine Übersicht der jährlichen, diskontierten eingesparten Unfallkosten UK und wird nach den Ansätzen Schulze/ Dames und Kamplade/ Schmitz unterschieden. Das Arbeitsblatt enthält keine Eingabeaufforderungen.

**Arbeitsblatt 13: Unfallkostendichte UKD**

$$UKD = 365 * 10^{-6} * \frac{DTV}{2} * (UR(P) * WU(P) + UR(S) * WU(S)) * V_u \quad \left[ \frac{\text{€}}{a} \right]$$

Durchschnittliche Unfallrate UR: Angabe in Anzahl Unfälle pro 10<sup>6</sup> Kfz\*km, Eingabeaufforderungen getrennt nach BAB und B. Für die durchschnittliche Unfallrate wird die schwerste Unfallfolge (Personen- oder Sachschaden) herangezogen. Die Voreinstellung ist der bundesdeutsche Durchschnitt.

Unfallkostensatz WU: Die Unfallkostensätze WU [1000€/U] sind getrennt nach BAB und B für die schwerste Unfallfolge Personen- (WU(P)) und Sachschaden (WU(S)) anzugeben. Der Voreinstellung ist der bundesdeutsche Durchschnitt mit Stand 2000 zugrunde gelegt.

**Arbeitsblatt 14: Veränderung der Unfallrate  $V_U$**

Darstellung der Veränderungsfunktion  $V_U$  der Unfallrate als Funktion der Griffigkeit  $\mu_{SCRIM80}$

$$UR(\mu_{SCRIM80})_{BAB\ S/D} = 0,813 \cdot \frac{67}{99,8541 + 46,572 \cdot \ln(\mu_{SCRIM80})} \quad [U/10^6 Kfz \cdot km]$$

$$UR(\mu_{SCRIM80})_{BAB\ K/S} = 0,813 \cdot \frac{65}{100 - 18,318 \cdot \mu_{SCRIM80}^{-0,9219}} \quad [U/10^6 Kfz \cdot km]$$

Die Veränderung der Unfallrate wird erst bei dem Grenzwert  $\mu_{SCRIM80} < 0,49$  berücksichtigt. Andernfalls bleibt die Unfallrate unverändert ( $V_U = 1,0$ ) (s. **Abb. 9**). Das Arbeitsblatt enthält keine Eingabeaufforderungen.

**GEEP 1.0**

**Veränderung der Unfallrate  $V_U$**

Veränderung der Unfallrate  
 $V_U$  bei  $\mu_{SCRIM} < 0,49$

Veränderung der Unfallrate  $V_U$  :

S/ D:  $V_U = 0,67 / (100 - 99,8541 + 46,572 \ln(\mu_{SCRIM80}))$

K/ S:  $V_U = 0,65 / (100 - 18,318 \mu_{SCRIM80}^{-0,9219})$

Jahr im Analysezeitraum [Jahre]	Griffigkeit $\mu_{SCRIM}$ (t) [-]	Griffigkeit $\mu_{SCRIM}$ (t) [-]	Veränderung der Unfallrate $V_{U\ S/D}$ Basisoption	Veränderung der Unfallrate $V_{U\ S/D}$ Maßnahme
1	0,56	0,56	1,00	1,00
2	0,52	0,52	1,00	1,00
3	0,51	0,51	1,00	1,00
4	0,49	0,49	1,00	1,00
5	0,48	0,48	1,01	1,01
6	0,48	0,48	1,02	1,02
7	0,47	0,47	1,03	1,03
8	0,47	0,47	1,04	1,04
9	0,46	0,46	1,05	1,05
10	0,46	0,46	1,06	1,06
11	0,45	0,45	1,06	1,06
12	0,45	0,45	1,07	1,07
13	0,45	0,45	1,07	1,07
14	N/A	N/A	N/A	N/A
15	N/A	N/A	N/A	N/A
16	N/A	N/A	N/A	N/A
17	N/A	N/A	N/A	N/A
18	N/A	N/A	N/A	N/A
19	N/A	N/A	N/A	N/A
20	N/A	N/A	N/A	N/A
21	N/A	N/A	N/A	N/A
22	N/A	N/A	N/A	N/A
23	N/A	N/A	N/A	N/A
24	N/A	N/A	N/A	N/A

**Abb. 9: Veränderung der Unfallrate  $V_U$  bei  $\mu_{SCRIM} < 0,49$**

**Arbeitsblatt 15: Interner Zinsfuß IZF**

Das Arbeitsblatt fasst die Kostendifferenzen aus allen Arbeitsblättern zusammen. Iterative Bestimmung des internen Zinsfußes. Das Arbeitsblatt enthält keine Eingabeaufforderungen.

# Anhang

## A6 Ergebnisdokumentation

**Intervention f(Zustand):**

untersuchte Zustandsgröße: 2

Zustandsgröße	
AUN [cm³]	$\mu_{SCRIM\ 80}$ [-]
0,9	0,468
ZG<WW	ZG>WW
DSK	DSK
-	opt
-	5

Interventionswert: 0,8953  
 Intervention bei:  
 Maßnahme:  
 Rücksetzwert:  
 Lebensdauer:

**Unterhaltung, Erhaltung:**

Option 0: Basisoption: routinemäßige Unterhaltung  
 Option 1 Maßnahme: Dünne Schichten im Kalteinbau

**Wirtschaftlichkeitsindikatoren:**

Diskontsatz 3% [%]

NGW Konstruktionskosten: Option 1 - Option 0

NGW Unterhaltungskosten: Option 1 - Option 0

NGW Restwert: Option 1 - Option 0

NGW Reisezeitkosten: Option 0 - Option 1

NGW Fahrzeugbetriebskosten: Option 0 - Option 1

NGW Unfallkosten: Option 0 - Option 1

<b>Option 1</b>	<b>NGW:</b>	<b>Nutzen - Kosten</b>	<b>=</b>	$\{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) - (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$	<b>=</b>	<b>322</b>
	<b>N/K :</b>	<b>Nutzen/Kosten</b>	<b>=</b>	$\{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$	<b>=</b>	<b>1,01</b>
	<b>EJNK :</b>	<b><u>1.Jahr Nutzen</u></b>	<b>=</b>	$\{(\Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$	<b>=</b>	
		<b>Kosten</b>				
	<b>IZF (Diskontsatz für NGW = 0)</b>			<b>Interner Zinsfuß</b>	<b>=</b>	<b>3,23%</b>

**A 6.1: Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Dünne Schichten im Kalteinbau DSK“,  $IW_{\mu\ SCRIM\ 80} = 0,46(8)$**

**Intervention f(Zustand):**

untersuchte Zustandsgröße: 2

Zustandsgröße	
AUN [cm³]	$\mu_{SCRIM\ 80}$ [-]
0,9	0,476
ZG<WW	ZG>WW
DH	DH
opt	opt
opt	opt

Interventionswert: 0,8953  
 Intervention bei:  
 Maßnahme:  
 Rücksetzwert:  
 Lebensdauer:

**Unterhaltung, Erhaltung:**

Option 0: Basisoption: routinemäßige Unterhaltung  
 Option 1 Maßnahme: Deckschicht im Hocheinbau, 40mm

**Wirtschaftlichkeitsindikatoren:**

Diskontsatz 3% [%]

NGW Konstruktionskosten: Option 1 - Option 0

NGW Unterhaltungskosten: Option 1 - Option 0

NGW Restwert: Option 1 - Option 0

NGW Reisezeitkosten: Option 0 - Option 1

NGW Fahrzeugbetriebskosten: Option 0 - Option 1

NGW Unfallkosten: Option 0 - Option 1

<b>Option 1</b>	<b>NGW:</b>	<b>Nutzen - Kosten</b>	<b>=</b>	$\{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) - (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$	<b>=</b>	<b>364</b>
	<b>N/K :</b>	<b>Nutzen/Kosten</b>	<b>=</b>	$\{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$	<b>=</b>	<b>1,01</b>
	<b>EJNK :</b>	<b><u>1.Jahr Nutzen</u></b>	<b>=</b>	$\{(\Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$	<b>=</b>	
		<b>Kosten</b>				
	<b>IZF (Diskontsatz für NGW = 0)</b>			<b>Interner Zinsfuß</b>	<b>=</b>	<b>3,09%</b>

**A 6.2: Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Deckschicht im Hocheinbau DH“,  $IW_{\mu\ SCRIM\ 80} = 0,47(6)$**

**Intervention f(Zustand):**

untersuchte Zustandsgröße:

2

Zustandsgröße	
AUN [cm³]	$\mu_{SCRIM\ 80}$ [-]
0,9	0,467
ZG<WW	ZG>WW
DT	DT
opt	opt
opt	opt

Interventionswert: **0,8953**  
 Intervention bei:  
 Maßnahme:  
 Rücksetzwert:  
 Lebensdauer:

**Unterhaltung, Erhaltung:**

Option 0: Basisoption: routinemäßige Unterhaltung  
 Option 1: Maßnahme: Deckschicht im Tiefeinbau, 40mm

**Wirtschaftlichkeitsindikatoren:**

Diskontsatz 3% [%]

**WI<sub>S/D</sub>**

NGW Konstruktionskosten: Option 1 - Option 0	€:	<b>98.460</b>
NGW Unterhaltungskosten: Option 1 - Option 0	€:	<b>-7.253</b>
NGW Restwert: Option 1 - Option 0	€:	<b>691</b>
NGW Reisezeitkosten: Option 0 - Option 1	€:	<b>-3.000</b>
NGW Fahrzeugbetriebskosten: Option 0 - Option 1	€:	
NGW Unfallkosten: Option 0 - Option 1	€:	<b>94.479</b>
<b>Option 1</b>	<b>NGW:</b>	<b>Nutzen - Kosten</b> = $\{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) - (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$ = <b>963</b>
	<b>N/K :</b>	<b>Nutzen/Kosten</b> = $\{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$ = <b>1,01</b>
	<b>EJNK :</b>	<b>1.Jahr Nutzen</b> = $\{(\Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$ =
		<b>Kosten</b>
	<b>IZF (Diskontsatz für NGW = 0)</b>	<b>Interner Zinsfuß</b> = <b>3,19%</b>

**A 6.3: Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Deckschicht im Tiefeinbau DT“,  $IW_{\mu_{SCRIM\ 80}} = 0,46(7)$**

**Intervention f(Zustand):**

untersuchte Zustandsgröße:

1

Zustandsgröße	
AUN [cm³]	$\mu_{SCRIM\ 80}$ [-]
3,7	0,5552
WW<ZG<SW	ZG>WW
DH	DH
opt	opt
opt	opt

Interventionswert:  
 Intervention bei:  
 Maßnahme:  
 Rücksetzwert:  
 Lebensdauer:

**Unterhaltung, Erhaltung:**

Option 0: Basisoption: routinemäßige Unterhaltung  
 Option 1: Maßnahme: Deckschicht im Hocheinbau, 40mm

**Wirtschaftlichkeitsindikatoren:**

Diskontsatz 3% [%]

**WI<sub>S/D</sub>**

NGW Konstruktionskosten: Option 1 - Option 0	€:	<b>78.795</b>
NGW Unterhaltungskosten: Option 1 - Option 0	€:	<b>-7.253</b>
NGW Restwert: Option 1 - Option 0	€:	<b>553</b>
NGW Reisezeitkosten: Option 0 - Option 1	€:	<b>-3.000</b>
NGW Fahrzeugbetriebskosten: Option 0 - Option 1	€:	<b>77.434</b>
NGW Unfallkosten: Option 0 - Option 1	€:	<b>-3.000</b>
<b>Option 1</b>	<b>NGW:</b>	<b>Nutzen - Kosten</b> = $\{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) - (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$ = <b>445</b>
	<b>N/K :</b>	<b>Nutzen/Kosten</b> = $\{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$ = <b>1,01</b>
	<b>EJNK :</b>	<b>1.Jahr Nutzen</b> = $\{(\Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$ =
		<b>Kosten</b>
	<b>IZF (Diskontsatz für NGW = 0)</b>	<b>Interner Zinsfuß</b> = <b>3,10%</b>

**A 6.4: Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Deckschicht im Hocheinbau DH“,  $IW_{AUN} = 3,7\text{ cm}^3$**

**Intervention f(Zustand):**

untersuchte Zustandsgröße:

1

Interventionswert:

Intervention bei:

Maßnahme:

Rücksetzwert:

Lebensdauer:

Zustandsgröße	
AUN [cm³]	μ <sub>SCRIM 80</sub> [-]
4,4	0,555
WW<ZG<SW	ZG>WW
DT	DT
opt	opt
opt	opt

0,5552

**Unterhaltung, Erhaltung:**

Option 0: Basisoption: routinemäßige Unterhaltung

Option 1 Maßnahme: Deckschicht im Tiefenbau, 40mm

**Wirtschaftlichkeitsindikatoren:**

Diskontsatz

3% [%]

W<sub>I S/D</sub>

NGW Konstruktionskosten: Option 1 - Option 0

€: 98.460

NGW Unterhaltungskosten: Option 1 - Option 0

€: -7.253

NGW Restwert: Option 1 - Option 0

€: 691

NGW Reisezeitkosten: Option 0 - Option 1

€: -3.000

NGW Fahrzeugbetriebskosten: Option 0 - Option 1

€: 96.760

NGW Unfallkosten: Option 0 - Option 1

€: -3.000

Option 1

NGW: Nutzen - Kosten

$$= \{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) - (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$$

= 244

N/K : Nutzen/Kosten

$$= \{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$$

= 1,00

EJNK : 1.Jahr Nutzen  
Kosten

$$= \{(\Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$$

=

IZF (Diskontsatz für NGW = 0)

Interner Zinsfuß

= 3,04%

**A 6.5: Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Deckschicht im Tiefenbau DT“, I<sub>WAUN</sub> = 4,4 cm<sup>3</sup>**

**Intervention f(Zustand):**

untersuchte Zustandsgröße:

1

Interventionswert:

Intervention bei:

Maßnahme:

Rücksetzwert:

Lebensdauer:

Zustandsgröße	
AUN [cm³]	μ <sub>SCRIM 80</sub> [-]
9,0	0,555
ZG=SW	ZG>WW
DT	DT
opt	opt
opt	opt

0,5552

**Unterhaltung, Erhaltung:**

Option 0: Basisoption: routinemäßige Unterhaltung

Option 1 Maßnahme: Deckschicht im Tiefenbau, 40mm

**Wirtschaftlichkeitsindikatoren:**

Diskontsatz

3% [%]

W<sub>I S/D</sub>

NGW Konstruktionskosten: Option 1 - Option 0

€: 98.460

NGW Unterhaltungskosten: Option 1 - Option 0

€: -7.253

NGW Restwert: Option 1 - Option 0

€: 691

NGW Reisezeitkosten: Option 0 - Option 1

€: -3.000

NGW Fahrzeugbetriebskosten: Option 0 - Option 1

€: 223.760

NGW Unfallkosten: Option 0 - Option 1

€: -3.000

Option 1

NGW: Nutzen - Kosten

$$= \{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) - (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$$

= 127.244

N/K : Nutzen/Kosten

$$= \{(\Delta R_{1,0} + \Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$$

= 2,40

EJNK : 1.Jahr Nutzen  
Kosten

$$= \{(\Delta ZK_{1,0} + \Delta FBK_{1,0} + \Delta UK_{1,0}) / (\Delta SBK_{k1,0} + \Delta SBK_{u1,0})\}$$

=

IZF (Diskontsatz für NGW = 0)

Interner Zinsfuß

= 21,78%

**A 6.6: Wirtschaftlichkeitsindikatoren „Deckschicht im Tiefenbau DT“, I<sub>WAUN</sub> = 9,0 cm<sup>3</sup>**