

Asphaltbeanspruchung aus Beschleunigungsvorgängen

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Florian Schäfer

geboren am 30.06.1976 in Schweinfurt

2009

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Hothan

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Edeltraud Straube, Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus

Tag der Promotion: 06. März 2009

Vorwort

Der stetig steigende Schwerverkehr beansprucht die Fahrbahnbefestigungen in vielfältiger Weise. Der Fahrbahnoberflächenzustand von Asphaltbefestigungen verändert sich infolge von Verkehrs- und Klimabeanspruchungen, die durch besondere Beanspruchungen aus Brems- und Beschleunigungsvorgängen überlagert werden können. Durch hohe Verkehrsbeanspruchungen in Kombination mit hohen Temperaturen treten bleibende Verformungen in Form von Spurrinnen auf. Hohe Verkehrsbeanspruchungen in Kombination mit tiefen Temperaturen können zur Rissbildung führen.

Zur Bewertung hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens existieren vereinfachende Ansätze, die in den RSTO (Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen) festgelegt sind. Die Analyse und Prognose der Schadensform plastische Deformation oder Spurrinnenbildung findet sich nirgendwo im Vorschriftenwerk, denn weder ist die systematische Aufbereitung der Verformungsdaten aus Langzeitbeobachtungen noch die Prognosefähigkeit aus Labordaten soweit fortgeschritten, als dass klare Bemessungsregeln für Asphaltbefestigungen hinsichtlich der Spurrinnenbildung aufgestellt werden könnten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich deshalb mit der Untersuchung und Bewertung von Beanspruchungen von Asphaltstraßenbefestigung bei freiem Rollen, Brems- und Beschleunigungsvorgängen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Achslasten, Achskonfigurationen und Reifentypen und unter Einbeziehung unterschiedlicher Temperaturverteilungen innerhalb von Straßenbefestigungen. Detailreiche Untersuchungen vermitteln ein deutliches Bild des Potenzials unterschiedlicher Einflussparameter auf die Versagensformen Spurrinnenbildung und Ermüdung.

Die Arbeit wurde von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz-Universität- Hannover als Dissertation angenommen.

Hannover im Mai 2009

Prof. Dr.-Ing. habil Jürgen Hothan

Kurzfassung:

Spurrinnen sind ein häufiges Schadensbild bei Asphaltstraßen. Besonders oft treten diese an Langsamfahrstellen, Steigungsstrecken und Beschleunigungsbereichen auf. Folglich sind an deren Entstehung die von den Fahrzeugen in die Fahrbahn übertragenen Horizontalkräfte beteiligt. Deren genauer Einfluss auf die Fahrbahnkonstruktion hinsichtlich Wirkungsweise und Höhe ist noch nicht bekannt. Ebenso fehlen meist zur Beanspruchungsermittlung differenzierte Angaben über die Temperaturen in der Fahrbahnbefestigung. Aus diesem Grund wird hier vertieft auf die Temperaturverteilung über die Fahrbahntiefe und auf die zusätzliche Beanspruchung durch Kontaktschubspannungen eines Reifens aus Antriebs- und Bremskräften eingegangen.

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Verkehrsbelastung durch Nutzfahrzeuge bei freiem Rollen, Antrieb und Bremsen. Daraus wird der Einfluss der durch Beschleunigungsvorgänge eingeleiteten Horizontalkräfte hinsichtlich Spannungsverteilung und Schädigungsverhalten bestimmt. Hierbei werden Beanspruchungen durch das Klima in die Berechnungen mit einbezogen, indem Temperaturverteilungen in der Fahrbahnbefestigung aus Wetterdaten ermittelt werden. Zudem werden die vertikalen und horizontalen Kräfte am Rad in Größe und Form bestimmt. Das Schädigungspotential wird im MOHR'schen Spannungsdiagramm aus der Differenz zwischen Hauptspannungskreis und Schädigungsfunktion ermittelt. Zur Abgrenzung gegenüber anderen Einflussgrößen werden die Auswirkungen aus dem Beschleunigungsvorgang mit Auswirkungen unterschiedlicher Reifentypen, Lastverteilungen in der Bodenaufstandsfläche, Bauklassen, Temperaturverteilungen und Achskonfigurationen miteinander verglichen. Abschließend werden eine Gegenüberstellung der hier entwickelten Berechnungsmethode mit dem Tyre Configuration Factor sowie als praktische Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse eine Überprüfung des Steigungsfaktors aus den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues, eine schematische Spurrinnenentwicklung über die Zeit und eine Schädigungsprognose für ein 60 t-Fahrzeug vorgenommen.

Durch die Vielzahl der in der Arbeit berücksichtigten Parameter ergeben sich umfassende Aussagen zum Schädigungsort und zum Schädigungspotential, nicht nur bei Antriebs- und Bremsvorgängen. Das neue Verfahren, mit dem aus den stündlichen Lufttemperatur- und Sonneneinstrahlungsdaten innerhalb eines Tages die Temperaturverteilung in der Fahrbahn bestimmt werden kann, und die hier entwickelte Methode zur Abschätzung des Schädigungspotentials helfen, auf den Einzelfall bezogene Fahrbahnbemessungen durchführen zu können.

Schlagwörter: Asphalt, Beschleunigungskräfte, Temperaturverteilung

Abstract:

Stresses in asphalt pavements due to acceleration forces

Rutting is a common kind of damage on asphalt roads. It develops most often in speed restriction sections as well as in incline and decline sections. Apparently horizontal forces transferred by vehicles to the road are involved. But the exact influence on the pavement in regard to mode and extent has not been identified so far. Moreover, there is a lack of detailed data of the temperature in the pavement, which are needed for calculating the inner stresses. The aim of the following study is both to determine the temperature distribution in the asphalt pavement using climate data and the additional pavement wear due to acceleration forces.

This study deals with the traffic load generated by commercial vehicles while rolling without traction, during propulsion and during deceleration. The influence of the horizontal forces produced by acceleration on the distribution of stresses and on the extent of deterioration is deduced. In order to include stresses created by climatic influences temperature gradients are calculated out of meteorological data. Furthermore, the vertical and horizontal forces at the tyre are determined in detail. The pavement wear is computed out of the distance between MOHR's circle and the curve of failure. In order to distinguish the effects of acceleration from other influences they are compared with the effects of different tyre models, load distributions in the contact patch, road classifications, temperature gradients and axial configurations. Finally the calculation method developed in this study will be compared with the tyre configuration factor. Practical applications of the findings are a verification of the slope factor of the German guideline for pavement dimensioning, a schematic development of ruts over time and a prediction of the deterioration caused by a 60 tons-vehicle.

Thanks to the considerable number of parameters included in the calculations reliable predictions of the location of and the potential for failure - not only during propulsion or deceleration - can be made. The new procedure for calculating the actual temperature gradient in the pavement out of the air temperature and the solar radiation data throughout one day and the new method for estimating the pavement wear help to get an exact and individual dimensioning of the pavement.

keywords: asphalt, acceleration forces, temperature gradients

Streszczenie:

Koleiny są najczęstszym obrazem zniszczeń w nawierzchniach asfaltowych. Dlatego też najczęściej występują w miejscach powolnego ruchu, odcinkach postojowych i strefach przyspieszeń. W powstawaniu deformacji w nawierzchni mają udział pojazdy przenoszące siły poziome. Dokładny wpływ na konstrukcję drogową odnośnie działania i głębokości nie jest dokładnie poznany. Także często brakuje wiadomości o rozkładzie temperatur w podbudowie. Z tego powodu zostało objęte pracą poszerzenie wiedzy na temat rozkładu temperatury w konstrukcji drogowej i przeprowadzono dodatkowo analizę naprężeń kontaktowych nawierzchni z oponą, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu przyspieszeń i hamowań.

Praca zajmuje się obciążeniem ruchu przez pojazdy ciężarowe w ruchu swobodnym toczeniu się, przyspieszeniu i hamowaniu. Stąd otrzymano wpływ sił przyspieszenia, które wywoływały poziome obciążenia, rozkład naprężeń oraz odkształcenia. Dodatkowo w obliczeniach wzięto pod uwagę wpływy klimatu, w których ustalono podział temperatur w konstrukcji drogowej. Także w obliczeniach zostały wyznaczone pionowe i poziome siły w kole na styku z nawierzchnią. Potencjał zniszczeń został ustalony wg diagramu MOHR-a, jako różnica pomiędzy napięciem głównym, a funkcją zniszczeń. Zostały również uwzględnione wielkości wpływów i oddziaływań z przebiegu przyspieszeń, z uwzględnieniem różnych typów ogumienia, podziału obciążenia w miejscu styku z podłożem, rodzaju nawierzchni, rozkładu temperatur i konfiguracji osi obliczeniowych. Na koniec została poddana konfrontacji tutaj rozwinięta metoda obliczeniowa Tyre Configuration Factor do wykorzystania w zastosowaniu praktycznym do kontroli wzrostowych wskaźników z wytycznych dotyczących standaryzacji górnej części korpusu drogowego oraz do schematycznego rozwoju kolein w czasie i procesie zniszczeń dla 60-tonowych pojazdów.

Poprzez różnorodność ujętych w pracy parametrów otrzymuje się kompleksową informację o miejscu i potencjalnych zniszczeniach, nie tylko od wpływu ruchu oraz wpływu hamowania. Mogą zostać określone nowe zawikłane godzinowe temperatury powietrza oraz oddziaływanie promieniowania słonecznego w ciągu dnia oraz rozkład temperatur w korpusie drogowym. Nowo otrzymana metoda może posłużyć do oszacowania potencjalny zniszczeń i ograniczona do pojedynczego odcinka nawierzchni drogowej.

Słowa kluczowe: nawierzchnie asfaltowe, siły przyspieszenia, udział temperatur

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | iv |
| Tabellenverzeichnis | ix |
| Abkürzungsverzeichnis | x |
| | |
| 1 Einleitung | 1 |
| | |
| 2 System der Fahrbahnbefestigung | 3 |
| 2.1 Bemessung nach RStO..... | 3 |
| 2.2 Bestimmung des Fahrbahnaufbaus | 6 |
| 2.3 Modellierung der Fahrbahnkonstruktion..... | 7 |
| 2.4 Theorie der Schädigung | 10 |
| | |
| 3 Temperaturbeanspruchung | 22 |
| 3.1 Grundprinzipien der Wärmeübertragung..... | 22 |
| 3.2 Thermische Stoffparameter..... | 28 |
| 3.3 Thermische Einflussgrößen..... | 35 |
| 3.3.1 Lufttemperatur | 35 |
| 3.3.2 Sonneneinstrahlung | 37 |
| 3.3.3 Langwellige Strahlung | 39 |
| 3.4 Temperaturverteilung mit FEM..... | 40 |
| 3.4.1 Aufbau des Modells..... | 40 |
| 3.4.2 Ergebnisse der Simulationen..... | 42 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.5 | Temperaturverteilung mit Differenzenverfahren | 46 |
| 3.5.1 | Theorie und Simulationsergebnisse..... | 47 |
| 3.5.2 | Sensitivitätsanalyse..... | 50 |
| 3.5.3 | Abschätzung der Temperaturverteilung | 51 |
| 3.6 | Temperaturbedingte mechanische Eigenschaften des Asphalts | 58 |
| 4 | Verkehrsbeanspruchung..... | 64 |
| 4.1 | Abschätzung der Beanspruchungsgröße..... | 64 |
| 4.2 | Ermittlung der Beanspruchungsform | 75 |
| 4.2.1 | Ergebnisse aus empirischen Untersuchungen..... | 75 |
| 4.2.2 | Kontaktdruckverteilung..... | 82 |
| 4.2.3 | Kontaktschubverteilung..... | 90 |
| 5 | Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung..... | 97 |
| 5.1 | Lastfälle..... | 97 |
| 5.2 | Ergebnisse der Spannungsberechnung..... | 101 |
| 5.2.1 | Vergleich 1: Reifentypen | 103 |
| 5.2.2 | Vergleich 2: Lastmodell..... | 106 |
| 5.2.3 | Vergleich 3: Fahrbahnaufbau und –zustand | 109 |
| 5.2.4 | Vergleich 4: Art der Beschleunigung..... | 112 |
| 5.2.5 | Vergleich 5: Höhe der Beschleunigung..... | 116 |
| 5.2.6 | Vergleich 6: Achskombinationen..... | 120 |
| 6 | Schädigungsverhalten | 125 |
| 6.1 | Ergebnisse der Schädigungsuntersuchung | 125 |
| 6.1.1 | Vergleich 1: Reifentypen..... | 126 |
| 6.1.2 | Vergleich 3: Fahrbahnaufbau und –zustand | 128 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.1.3 | Vergleich 4: Art der Beschleunigung | 130 |
| 6.1.4 | Vergleich 5: Höhe der Beschleunigung | 132 |
| 6.1.5 | Vergleich 6: Achskombinationen | 133 |
| 6.2 | Vergleich zu Tyre Configuration Factor | 136 |
| 6.3 | Anwendungsbeispiele | 140 |
| 6.3.1 | Steigungs- und Gefällestrecken | 140 |
| 6.3.2 | Spurrinnenentwicklung von Antriebsachsaggregaten | 143 |
| 6.3.3 | Vergleich zwischen 40 t- und 60 t-Fahrzeug | 145 |
| 7 | Schlussfolgerungen..... | 148 |
| 7.1 | Kernaussagen | 148 |
| 7.2 | Handlungsempfehlungen | 151 |
| 7.3 | Ausblick | 153 |
| 8 | Zusammenfassung | 156 |
| | Literaturverzeichnis | 158 |
| | Anlagen..... | 166 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abb. 2-1: RStO [23], Bauklasse SV - Tafel 1, Zeile 1: Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht..... | 6 |
| Abb. 2-2: RStO [23], Bauklasse III - Tafel 1, Zeile 1: Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht..... | 7 |
| Abb. 2-3: schematischer Aufbau des Fahrbahnmodells | 8 |
| Abb. 2-4: Aufbau des halben Betrachtungsbereiches in der Bauklasse III..... | 9 |
| Abb. 2-5: Arten der Spurrinnenbildung | 12 |
| Abb. 2-6: Schubspannungshypothese [31]..... | 13 |
| Abb. 2-7: MOHR-COULOMB'sche Hypothese [31] | 14 |
| Abb. 2-8: Normalspannungshypothese [31] | 15 |
| Abb. 2-9: LEON'sche Parabel, abhängig von c [31] | 16 |
| Abb. 2-10: Verhältnis von Druck- zu Zugfestigkeit c in Abhängigkeit von der Temperatur | 17 |
| Abb. 2-11: Biegezugfestigkeit β in Abhängigkeit von der Temperatur..... | 18 |
| Abb. 2-12: LEON'sche Parabeln in Abhängigkeit von der Temperatur | 19 |
| Abb. 2-13: Darstellung der Reservenbestimmung mit Beispiel | 20 |
| Abb. 3-1: qualitative Darstellung des Wärmehaushalts an einer Straßenoberfläche | 24 |
| Abb. 3-2: schematisierte Tagesganglinie der Strahlung an einem Sommertag..... | 27 |
| Abb. 3-3: Wärmeleitfähigkeit von ungefrorenen und gefrorenen feuchten Böden nach Kersten, in [3] | 29 |
| Abb. 3-4: Wärmeübergangszahl in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit..... | 34 |
| Abb. 3-5: Jahresganglinien der mittleren Lufttemperatur für 2003 bis 2006 und Durchschnittswerte 1961-1990 (Daten von ISFH und DWD) | 36 |
| Abb. 3-6: Jahresganglinie der täglichen mittleren, minimalen und maximalen Lufttemperatur für 2006 (Daten von ISFH)..... | 37 |
| Abb. 3-7: Jahresganglinie der maximalen Globalstrahlung für 2006 (Daten von ISFH) | 38 |

| | |
|--|----|
| Abb. 3-8: Tagesganglinien der maximalen Globalstrahlung von 2006 (Daten von ISFH und DIN 4710) | 39 |
| Abb. 3-9: Atmosphärische Gegenstrahlung | 40 |
| Abb. 3-10: 2D-Modell zur Temperaturberechnung im FEM-Programm | 41 |
| Abb. 3-11: Temperaturverläufe in der Fahrbahnbefestigung nach Monaten | 43 |
| Abb. 3-12: Tagesganglinien der Fahrbahntemperaturen in verschiedenen Tiefen für Januar und Juli | 44 |
| Abb. 3-13: Temperaturverläufe in verschiedenen Tiefen für einen Durchschnittstag im Juli 2006 | 45 |
| Abb. 3-14: Vergleich der FEM-Simulation und des Differenzenverfahrens..... | 49 |
| Abb. 3-15: exemplarischer Temperaturverlauf für einen Januar, 16.00 Uhr | 54 |
| Abb. 3-16: Reaktion auf Sinus-Schwellimpuls zur Definition des effektiven E-Moduls [33]..... | 59 |
| Abb. 3-17: Dynamischer Zug-Druck-Versuch zur Definition des absoluten E-Moduls [24]..... | 60 |
| Abb. 3-18: Verlauf von $ E^* $ in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Frequenzen für Asphalt-Prototyp [24] | 61 |
| Abb. 3-19: Spannungsverlauf für Vertikalspannung σ_z unter einem rollenden Rad über räumliche Breite λ [24] | 62 |
| Abb. 3-20: Verlauf der Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Temperatur [65] | 63 |
| Abb. 4-1: Umfangskraft am Rad als Funktion der auf die translatorische Geschwindigkeit bezogenen Winkelgeschwindigkeit des Rades, nach [45]..... | 66 |
| Abb. 4-2: schematische Kraftschlussbeanspruchungs-Schlupf-Kurve, nach [45]..... | 67 |
| Abb. 4-3: Kraftschlussbeanspruchungs-Schlupf-Kurven für verschiedene Fahrbahnzustände [45]..... | 68 |
| Abb. 4-4: Kraftschlussbeanspruchungs-Schlupf-Kurven für verschiedene Geschwindigkeiten [45]..... | 68 |
| Abb. 4-5: Kräfte am rollenden Rad, nach [44]..... | 69 |
| Abb. 4-6: Kräfte an der schiefen Ebene | 71 |
| Abb. 4-7: Zug- und Widerstandskraft von 40t-Lkw bei 4%-Steigung | 72 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 4-8: Vertikaldruckspannungen in BAF (normal) [1] | 77 |
| Abb. 4-9: Vertikaldruckspannungen in BAF (Überladung) [6]..... | 77 |
| Abb. 4-10: Längsschubspannungen in BAF [6] | 79 |
| Abb. 4-11: Längskräfte in BAF unter Antrieb [13]..... | 80 |
| Abb. 4-12: Längskräfte in BAF unter Bremsung [13]..... | 80 |
| Abb. 4-13: Querverteilung des Querschubes unter BAF [28]..... | 81 |
| Abb. 4-14: Querschubspannungen in BAF [6]..... | 82 |
| Abb. 4-15: Seitenführungskräfte in BAF | 82 |
| Abb. 4-16: Reifendruckmodell - Aufbau längs | 83 |
| Abb. 4-17: Reifendruckmodell - Aufbau quer..... | 85 |
| Abb. 4-18: Reifendruckmodell in Draufsicht | 86 |
| Abb. 4-19: Lastmodell des Vertikaldrucks bei Überladung [6]..... | 88 |
| Abb. 4-20: Rollkontaktmodell zweier elastischer Walzen, nach [46] | 91 |
| Abb. 4-21: Kontaktschubspannungen bei traktionsbehaftetem Rollkontakt | 94 |
| Abb. 4-22: Kontaktschubspannungen bei traktionsfreiem Rollkontakt | 95 |
| Abb. 5-1: Kontaktschubspannungen bei Beschleunigungsvorgängen | 100 |
| Abb. 5-2: Summenlinie der MISES-Spannung mit Integralen..... | 102 |
| Abb. 5-3: Spannungsbild mit Darstellung der MISES-Integralwerte | 103 |
| Abb. 5-4: Spurrinnenbildungspotential der untersuchten Reifentypen | 105 |
| Abb. 5-5: Ermüdungsrissbildungspotential der untersuchten Reifentypen | 106 |
| Abb. 5-6: Spurrinnenbildungspotential verschiedener Lastmodelle des Reifentyps 425/65 R 22.5..... | 108 |
| Abb. 5-7: Ermüdungspotential verschiedener Lastmodelle des Reifentyps 425/65 R 22.5..... | 109 |
| Abb. 5-8: Vergleich der Bauklassen SV und III hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential | 110 |
| Abb. 5-9: Vergleich der Fahrbahnzustände „5000“ und „warm“ hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential | 111 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 5-10: Vergleich weiterer Fahrbahnzustände mit „5000“ hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential des Reifentyps 495/45 R 22.5 | 112 |
| Abb. 5-11: Vergleich der Beschleunigungsarten hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential des Reifentyps 425/65 R 22.5 | 114 |
| Abb. 5-12: Vergleich der Beschleunigungsarten hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential des Reifentyps 495/45 R 22.5 | 115 |
| Abb. 5-13: Vergleich der Beschleunigungsarten hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential des Reifentyps 295/80 R 22.5 Zw | 115 |
| Abb. 5-14: Einfluss der Beschleunigungshöhe hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential des Reifentyps 425/65 R 22.5 | 117 |
| Abb. 5-15: Einfluss der Beschleunigungshöhe durch Integrale und 10 %- Volumenanteile des Reifentyps 425/65 R 22.5..... | 118 |
| Abb. 5-16: Einfluss der Beschleunigungshöhe bei den Reifentypen 495/45 R 22.5 und Zw 295/80 R 22.5 | 119 |
| Abb. 5-17: Vergleich von Achskombinationen (je 9 t) hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential durch Reifentyp 495/45 R 22.5..... | 121 |
| Abb. 5-18: Vergleich von Achskombinationen (11,5 t – 9 t) hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential durch Reifentyp 495/45 R 22.5..... | 123 |
| Abb. 5-19: Vergleich von Achskombinationen (je 9 t) hinsichtlich Ermüdungspotential durch Reifentyp 495/45 R 22.5 | 124 |
| Abb. 6-1: Schädigungspotential der Reifentypen bei 9 t Belastung | 127 |
| Abb. 6-2: Schädigungspotential unterschiedlicher Fahrbahnzustände des Reifentyps 495/45 R 22.5 bei 9 t Belastung..... | 128 |
| Abb. 6-3: Schädigungspotential des Reifentyps 495/45 R 22.5 bei 9 t Belastung in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur | 130 |
| Abb. 6-4: Vergleich der Beschleunigungsarten hinsichtlich des Schädigungspotentials des Reifentyps 495/45 R 22.5 bei 9 t Belastung..... | 132 |
| Abb. 6-5: Einfluss der Beschleunigungshöhe hinsichtlich des Schädigungspotentials des Reifentyps 495/45 R 22.5 bei 10 t Belastung..... | 133 |
| Abb. 6-6: Vergleich von Achskombinationen hinsichtlich des Schädigungspotentials des Reifentyps 495/45 R 22.5 | 135 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 6-7: Vergleich zwischen TCF und Reserven-Schädigungspotential | 138 |
| Abb. 6-8: Vergleich zwischen Steigungsfaktor und Reserven-Schädigungspotential bei Steigung | 141 |
| Abb. 6-9: Vergleich zwischen Steigungsfaktor und Reserven-Schädigungspotential bei Gefälle | 142 |
| Abb. 6-10: Vergleich zweier Antriebsachsaggregate mittels Spurrinnenentwicklung im Juli | 144 |
| Abb. 6-11: Vergleich zwischen 40 t- und 60 t- Fahrzeug (absolut und lastspezifisch) | 146 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tab. 2-1: Steigungsfaktor f_3 nach RStO [23]..... | 5 |
| Tab. 3-1: Wärmeleitfähigkeit, -kapazität und Dichte verschiedener Stoffe | 31 |
| Tab. 3-2: Albedo-Werte verschiedener Oberflächen..... | 32 |
| Tab. 3-3: Absorptions-/Emissionskoeffizient verschiedener Oberflächen..... | 33 |
| Tab. 3-4: minimale, maximale und mittlere Jahrestemperatur (ISFH) | 36 |
| Tab. 3-5: minimale, maximale und mittlere Globalstrahlung (ISFH) | 37 |
| Tab. 3-6: minimale, maximale und mittlere Oberflächentemperaturen | 43 |
| Tab. 3-7: Formelparameter der Gleichung (3.24) für jeden Monat | 54 |
| Tab. 3-8: Abweichung der Verfahrensergebnisse von der Temperatur, Jahr 2006 | 56 |
| Tab. 3-9: Temperaturwerte für Anwendungsbeispiel der Temperaturbestimmung..... | 58 |
| Tab. 4-1: Höchstneigungen im Straßenverkehr, nach RAS-L [25]..... | 71 |
| Tab. 4-2: Regressionskoeffizienten des Lastmodells nach BLAB [6]..... | 89 |
| Tab. 5-1: Geometrie der Reifentypen..... | 98 |
| Tab. 5-2: Geometrie der Achskombinationen | 101 |

Abkürzungsverzeichnis

Verwendete wichtige Größen und Konstanten

| | |
|----|--|
| A | Fläche [m ²], langwellige Ausstrahlung [W/m ²] |
| AG | atmosphärische Gegenstrahlung [W/m ²] |
| a | Beschleunigung [m/s ²], Temperaturleitzahl [m ² /s] |
| B | bemessungsrelevante Beanspruchung [Aü], Bodenwärmestrom [W/m ²] |
| C | volumetrische Wärmekapazität [J/(m ³ ·K)] |
| c | spezifische Wärmekapazität [J/(g·K)], Verhältnis von Druck- zu Zugfestigkeit [-] |
| E | Elastizitätsmodul [N/mm ²] |
| F | Kraft [N] |
| G | Globalstrahlung [W/m ²] |
| g | Gravitationsbeschleunigung ($\hat{=} 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 10 \text{ m/s}^2$) |
| h | Hebelarm der Rollreibung [m], Höhe [m] |
| i | Steigung [%] |
| L | Konvektion [W/m ²] |
| LB | Breite der BAF [mm] |
| LL | Länge der BAF [mm] |
| m | Masse [kg] |
| N | Anzahl der Lastübergänge [Aü] |
| P | Kontaktnormalkraft (Linienlast) [N/m] |
| p | Druck, Pressung [N/mm ² = 10 bar] |
| Q | Wärmestrahlungsbilanz [W/m ²] |
| q | Staudruck, mittlere Pressung [N/mm ²] |
| R | Radius d. Reifens / d. Walzen [m], Reflexion [W/m ²] |
| S | Schlupf [-] |
| T | Temperatur [°C], Kontakt Schubkraft (Linienlast) [N/m] |
| t | Schubspannung [N/mm ²] |
| u | Windgeschwindigkeit [m/s] |
| V | Geschwindigkeit des Fahrzeuges [km/h] |
| v | Geschwindigkeit des Fahrzeuges [m/s] |

| | |
|----------------------|---|
| W | Widerstandskraft [N] |
| w | Wassergehalt [-], Verformung [mm] |
| x (, ξ) | Längsachse, in Fahrtrichtung [m] |
| y | Querachse, quer zur Fahrtrichtung [m] |
| Z | Zugkraft [N] |
| z (, η) | Hochachse, vertikal in Tiefe [m] |
| α | Albedo [-] |
| α_C, α_E | Lastverteilungsfaktor [-] |
| α_H | Haftgebietslänge [-] |
| α_L | Wärmeübergangszahl [W/(m ² ·K)] |
| β_{bz} | Biegezugfestigkeit [N/mm ²] |
| ε | Emissions-/Absorptionsgrad [-] |
| φ | Drehwinkel [°], Ableitung nach Zeit: Drehwinkelgeschwindigkeit [°/s] |
| κ | Kraftschlussbeanspruchung [-] |
| λ | relative Abplattung [-], Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)] |
| μ | Kraftschlussbeanspruchung, Reibungskoeffizient [-] |
| ν | Querkontraktion [-] |
| ρ | Dichte [kg/m ³] |
| σ | Normalspannung [N/mm ²] |
| σ_{SB} | Stefan-Boltzmann-Konstante nach Gleichung (3.4) |
| τ | Schubspannung [N/mm ²] |

Indices

| | |
|------|--------------------------|
| a | Beschleunigung, Trägheit |
| C | Mittenzone / center |
| d | trocken |
| diff | Differenz |
| E | Randzone / edge |
| e | Eis |
| eff | effektiv |
| G | Gleiten |
| ges | gesamt |
| H | Haften |

| | |
|-----|--|
| i | innen |
| K | kurzwellig |
| k | Kreis- |
| L | Luft, langwellig |
| max | Maximal- |
| R | Rollen, Rad |
| res | resultierend |
| St | Steigung |
| V | Vergleichs- |
| w | Wasser |
| x | horizontale Längsachse, längs zur Fahrtrichtung (x-Richtung) |
| y | horizontale Querachse, quer zur Fahrtrichtung (y-Richtung) |
| z | vertikale z-Achse |

Verwendete Begriffe

| | |
|------------|---|
| AASHO | American Association of State Highway Officials |
| AWF | Axle Wear Factor |
| BAF | Bodenaufstandsfläche |
| BK | Bauklasse |
| DTA | Durchschnittlich tägliche Achsübergänge [Aü/24h] |
| DTV | Durchschnittlich tägliche Verkehrsstärke [Fz/24h] |
| FSS | Frostschuttschicht |
| MISESint | Integral der Gestaltänderungsenergie (-OBEN: oberste 10 cm der Asphaltsschicht [J], -GES: gesamte Asphaltsschicht, auf Dicke bezogen [J/m]) |
| MISES10int | 10 %-Volumenintegral der Gestaltänderungsenergie [J] |
| PWR | Pavement Wear Ratio |
| RStO | Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues |
| TCF | Tyre Configuration Factor |
| ToB | Tragschicht ohne Bindemittel |
| VRSPATA | Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array |
| VWF | Vehicle Wear Factor |

1 Einleitung

Die Asphaltbauweise ist gegenüber den anderen Bauweisen für Fahrbahndecken weit verbreitet. Im Bundesfernstraßennetz sind ca. 72 % Bundesautobahnen und ca. 97 % Bundesstraßen asphaltiert [15]. Im untergeordneten Straßennetz dominieren ebenfalls Asphaltdecken gegenüber den Beton- oder Pflasterdecken. Obwohl die Asphaltbauweise so häufig eingesetzt wird, gibt es noch viele Unklarheiten über die Spannungsreaktionen und Schädigungsentwicklungen in der Fahrbahnbefestigung. Dies liegt im komplexen Verhalten des Baustoffgemisches Asphalt, da dieses aus drei Phasen - Gesteinskörnungen, Bitumen und Luft - aufgebaut ist. Die Gesteinskörnungen verhalten sich elastisch, das Bindemittel thermo-elastoviskos und viskoelastisch. Da die rheologischen Eigenschaften aller Komponenten in das Verhalten des Asphalts einfließen, reagiert dieser teilweise reversibel und teilweise irreversibel. Bei bituminösen Bindemitteln ist neben der Viskosität auch der Elastizitätsmodul temperaturabhängig, so dass zu einer genauen Ermittlung der Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung infolge einer Reifenüberrollung, zusätzlich zu den aufgebrachten Kräften, die Temperaturverteilung bekannt sein muss. Hinsichtlich des Schädigungsverhaltens zeigen die Asphaltbefestigungen, die standardmäßig auf Ermüdungsrisssbildung bemessen werden, heutzutage sehr oft Probleme durch Spurrinnenbildung. Die Spurrinnen, deren Entstehung durch schwere Fahrzeuge und hochsommerliche Bedingungen begünstigt wird, treten gehäuft an Langsamfahrstellen, an Steigungsstrecken und in Beschleunigungsbereichen auf. Ebenso kommt es an Lichtsignalanlagen bedingt durch Anfahr- und Bremsvorgänge vermehrt zu Wellenbildungen. Demzufolge sind an der Spurrinnen- und Wellenbildung häufig durch Beschleunigungsvorgänge eingeleitete Horizontalkräfte beteiligt, deren genauer Einfluss hinsichtlich Höhe der inneren Spannungen und Auswirkung im Schädigungsverhalten noch nicht bekannt ist. Beide Effekte wiederum sind für die Verkehrssicherheit relevant, da allgemein durch Längs- und Querunebenheiten Verkehrsteilnehmer, vor allem Motorradfahrer, gefährdet werden und bei Regen das in den Spurrinnen vorhandene Wasser zu Aquaplaning führt.

So gehen viele Faktoren in die Beanspruchungsberechnung und Bemessung ein, die bislang noch nicht ausreichend erforscht sind. Neben der exakten Kenntnis über das Verformungsverhalten des Asphalts muss ebenso die Belastung durch Klima und Verkehr in detaillierter Form vorliegen. Dementsprechend muss neben der Temperaturverteilung über die Fahrbahntiefe auch die zusätzliche Beanspruchung durch Kontaktschubspan-

nungen aus Antrieb und Bremsen in der Bodenaufstandsfläche von Reifen hinreichend bekannt sein.

In dieser Arbeit wird daher ein vertiefter Blick auf die Verkehrsbelastung durch Nutzfahrzeuge bei freiem Rollen, Antrieb und Bremsen gerichtet. Um die Auswirkungen in den Asphaltsschichten analysieren zu können, wird zuerst die Beanspruchung durch das Klima einbezogen, indem repräsentative Temperaturverteilungen in der Fahrbahnbefestigung aus Wetterdaten ermittelt und im Anschluss in den Berechnungen verwendet werden. Auch werden die aus der Überfahrt eines Rades auftretenden Kräfte in der Reifenaufstandsfläche in ihrer Größe und Form bestimmt. Der Einfluss der Beschleunigungsvorgänge hinsichtlich Spannungsverteilung und Schädigungsverhalten ergibt sich durch Vergleich mit dem freien Rollen und wird gegenüber anderen Einflussgrößen wie Reifentyp, vertikaler Lastverteilung in der Reifenaufstandsfläche, Bauklasse, Temperaturverteilung und Achskonfiguration abgegrenzt. Eine Gegenüberstellung der hier entwickelten Berechnungsmethodik zum Tyre Configuration Factor, die Überprüfung des Steigungsfaktors aus den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues, eine schematische Spurrinnenentwicklung über die Zeit und eine Schädigungsprognose für ein 60 t-Fahrzeug schließen die Arbeit ab.

2 System der Fahrbahnbefestigung

Nach einem Überblick über die in Deutschland gängige Bemessungspraxis werden die Fahrbahnaufbauten beschrieben, welche für die späteren Berechnungen im FE-Programm konstruiert worden sind. Danach wird auf die Theorie der Schädigung einer Fahrbahnkonstruktion eingegangen, woraus im Folgenden eine Methode zur Bestimmung der Schädigung entwickelt wird.

2.1 Bemessung nach RStO

Da in Deutschland die Straßen in der Regel nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues (RStO 01) [23] dimensioniert werden, werden in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls entsprechende Fahrbahnaufbauten berücksichtigt. In diesem Kapitel wird kurz das grundlegende Konzept des Bemessungsverfahrens nach den RStO erläutert, auch werden detailliert die Bereiche herausgestellt, die Antriebs- oder Bremsvorgänge betreffen.

Die Dicke des Oberbaus nach den RStO wird derart bestimmt, dass sowohl Tragfähigkeit als auch Frostsicherheit gewährleistet sind. Eine ausreichende Tragfähigkeit wird durch die bemessungsrelevante Beanspruchung B und eine ausreichende Frostsicherheit durch die frostsichere Mindestdicke des Oberbaus erreicht.

Die Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus setzt sich aus der Ausgangsdicke sowie den Mehr- und Minderdicken zusammen. Die Ausgangsdicke wird durch die Frostempfindlichkeit des Bodens bestimmt, die sich aus der Klassifikation gemäß den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB) ergibt. Die Mehr- und Minderdicken hängen von der regionalen Frosteinwirkungszone, der lokalen Lage der Gradienten, den Wasserverhältnissen und der Ausführung der Randbereiche ab.

Die bemessungsrelevante Beanspruchung B drückt die äquivalenten 10-t-Achsübergänge im zugrunde gelegten Nutzungszeitraum aus. Sie wird mit Hilfe der durchschnittlich täglichen Verkehrsstärke des Schwerverkehrs $DTV^{(SV)}$ in Kombination mit straßenklassenspezifischen Achszahlfaktoren und Lastkollektivquotienten (Methode 1) oder mit Hilfe detaillierter Achslastdaten (Methode 2) errechnet. Dabei wird immer der Fahrstreifen mit der höchsten Verkehrsbelastung durch Schwerverkehr betrachtet. Gleichzeitig gehen die An-

zahl der Fahrstreifen im Querschnitt, die Breite des Fahrstreifens und die Längsneigung in die Berechnung ein.

Die Bestimmung von B bei über die Jahre der Bemessung konstanten Faktoren geschieht gemäß den folgenden beiden Gleichungen:

Methode 1 – Bestimmung von B aus $DTV^{(SV)}$ -Werten

$$B = N \cdot DTV^{(SV)} \cdot f_A \cdot q_{Bm} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365 \quad (2.1)$$

Methode 2: Bestimmung von B anhand von Achslastdaten

$$B = N \cdot \sum_k \left[DTA_k^{(SV)} \cdot \left(\frac{L_k}{L_0} \right)^4 \right] \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365 \quad (2.2)$$

| | | |
|-----|--------------|---|
| mit | N | Anzahl der Jahre des zugrunde gelegten Nutzungszeitraumes |
| | $DTV^{(SV)}$ | Durchschnittlich Tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs in Fz/24h |
| | f_A | Achszahlfaktor in A/Fz |
| | q_{Bm} | mittlerer Lastkollektivquotient |
| | $DTA^{(SV)}$ | Durchschnittlich Tägliche Achsübergänge (Aü) des Schwerverkehrs in Aü/24h |
| | k | Lastklasse, als Gruppe von Einzelachslasten definiert |
| | L_k | mittlere Achslast in der Lastklasse k |
| | L_0 | Bezugsachslast = 10 t |
| | f_1 | Fahrstreifenfaktor |
| | f_2 | Fahrstreifenbreitenfaktor |
| | f_3 | Steigungsfaktor (siehe Tabelle Tab. 2-1) |
| | f_z | mittlerer jährlicher Zuwachsfaktor |

In Gleichung (2.2), mit der in Methode 2 die Achsübergänge der einzelnen Lastklassen in die auf die 10 t-Achse bezogenen äquivalenten Achsübergänge umgerechnet werden, wird das Verhältnis der Achslasten in die vierte Potenz gesetzt. Damit bauen die RStO auf dem Vierte-Potenz-Gesetz auf, welches aus dem AASHO Road Test von 1957 bis 1961 entstanden ist. Infolge geringer Dicken der gebundenen Schichten sind in diesem Großversuch hauptsächlich Ermüdungsrisse aufgetreten. Bei dieser Versagensart ergibt sich das Schädigungsverhalten der Achslasten mit der vierten Potenz. Weitere Versagensar-

ten, insbesondere die Spurrinnenbildung (siehe Theorie der Schädigung, Kapitel 2.4), werden in den RStO nicht berücksichtigt.

Manche Verkehrsflächen werden besonderen Beanspruchungen durch Schwerverkehr ausgesetzt, nach den RStO [23]:

- bei spurfahrendem Verkehr und enger Kurvenfahrt
- bei langsam fahrendem Verkehr
- bei häufigen Brems- und Beschleunigungsvorgängen
- in Kreuzungs- und Einmündungsbereichen
- bei stehendem oder „Stop-and-go-Verkehr“.

Der Einfluss von Steigungsstrecken wird ebenso wie der Einfluss von spurfahrendem Verkehr durch einen Korrekturfaktor (f_3) einkalkuliert, durch den die äquivalenten 10 t-Achsen der bemessungsrelevanten Beanspruchung B erhöht werden (siehe Tab. 2-1).

| Höchstlängsneigung in % | | | Faktor f_3 |
|-------------------------|-----------|----|--------------|
| unter 2 | | | 1,00 |
| 2 | bis unter | 4 | 1,02 |
| 4 | bis unter | 5 | 1,05 |
| 5 | bis unter | 6 | 1,09 |
| 6 | bis unter | 7 | 1,14 |
| 7 | bis unter | 8 | 1,20 |
| 8 | bis unter | 9 | 1,27 |
| 9 | bis unter | 10 | 1,35 |
| 10 | und mehr | | 1,45 |

Tab. 2-1: Steigungsfaktor f_3 nach RStO [23]

In Kreuzungs- und Einmündungsbereichen soll die bemessungsrelevante Beanspruchung B des am stärksten belasteten Fahrstreifens der Anschlussstrecken gelten.

Für die anderen aufgeführten besonderen Beanspruchungen, z. B. Streckenabschnitte mit häufigen Brems- und Beschleunigungsvorgängen, sind keine speziellen Anweisungen vorgegeben. Allgemein „ist zu prüfen, ob den besonderen Beanspruchungen bei der Wahl der Bauweise, bei der Wahl der Baustoffe, ihrer Zusammensetzung und bei der Herstel-

lung einzelner Schichten des Oberbaues Rechnung getragen werden muss, gegebenenfalls auch unter Verstärkung der Asphaltbinderschicht oder unter Anordnung einer Asphaltbinderschicht.“ [23]

2.2 Bestimmung des Fahrbahnaufbaus

Grundlage der nachfolgenden Modelle für die Fahrbahnkonstruktion ist der Fahrbahnaufbau der Bauweise 1 für Asphaltbefestigungen nach den RStO [23] (Tafel 1: Bauweisen mit Asphaltdecke, Zeile 1), der für die Bauklasse SV in Abb. 2-1 und für die Bauklasse III in Abb. 2-2 dargestellt ist. Mit diesen beiden Bauklassen werden sowohl verkehrlich hochbelastete Bundesfernstraßen (BK SV als höchste Bauklasse, was einer bemessungsrelevanten Beanspruchung von mehr als 32 Mio. äquivalenten 10 t-Achsübergängen entspricht) als auch nachgeordnete Straßen (sekundäres Netz – BK III für 0,8 - 3 Mio. äquivalente 10 t-Achsübergänge) repräsentiert.

Folglich ist das gesamte Asphaltpaket – bestehend aus Deck-, Binder- und Tragschicht - in der Bauklasse SV 34 cm dick, in der Bauklasse III 22 cm. Darunter liegt eine Frostschutzschicht (FSS), deren Dicke von der Frosteinwirkung und der Verkehrsbelastung abhängt. Die frostsichere Mindestdicke wird im Folgenden berechnet. Die FSS liegt auf dem Planum auf, welches den Übergang zum anstehenden Boden oder künstlich hergestellten Erdkörper darstellt. Dieses Dreischichtensystem wird sowohl zur Temperatur- als auch zur Spannungsberechnung im Folgenden herangezogen.

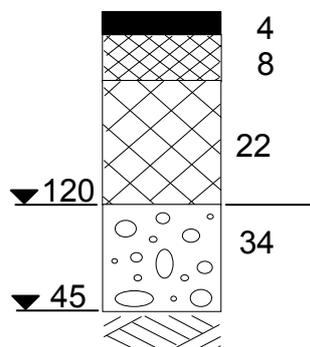


Abb. 2-1: RStO [23], Bauklasse SV - Tafel 1, Zeile 1: Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht

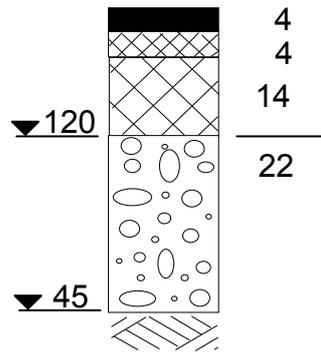


Abb. 2-2: RStO [23], Bauklasse III - Tafel 1, Zeile 1: Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht

Um die Dicke der Frostschutzschicht (FSS) zu bestimmen, wird die Methodik der RStO [23] herangezogen. Die FSS leitet sich aus der Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus ab (siehe Kapitel 2.1). Es wird ein gering bis mittel frostempfindlicher Boden angenommen. Dadurch ergibt sich eine Ausgangsdicke für die Bauklasse SV von 55 cm und für die Bauklasse III von 50 cm. Durch Mehr- und Minderdicken erhöht sich diese um 10 cm (Annahmen: Zone II für Hannover → +5 cm; Einschnitt, Damm ≤ 2,0 m → +5 cm; günstige Wasserverhältnisse → ±0 cm; außerhalb geschlossener Ortslage → ±0 cm). So ist die einzubauende frostsichere Mindestdicke in der Bauklasse SV 65 cm bzw. in der Bauklasse III 60 cm dick. Wird von der frostsicheren Mindestdicke die Dicke des Asphaltpaketes abgezogen, dann bleiben für die FSS bei der Bauklasse SV 31 cm und bei der Bauklasse III 38 cm.

2.3 Modellierung der Fahrbahnkonstruktion

Zur Ermittlung der Spannungen in der Fahrbahnbefestigung werden für die Bauklasse SV und III dreidimensionale parametrisierte Modelle aufgestellt. Auf diese Weise können die Stoffeigenschaften sowie Modell- und Elementgrößen beliebig variiert werden. Die Schichtdicken des Asphaltpaketes und der Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) als FSS ergeben sich aus dem vorherigen Kapitel (BK SV: 34 cm und 31 cm; BK III: 22 cm und 38 cm). In vorangegangenen Untersuchungen [12] ist festgestellt worden, dass bei einer Achse der Einfluss des über zwei Meter entfernten zweiten Rades auf die erzeugten Spannungen gering ist. Daher reicht es aus, nur ein Rad von einer Achse zu betrachten. So kann im Fahrbahnmodell Symmetrie in Querrichtung angenommen werden, wenn die Reifenlängsachse auf der Symmetrieachse liegt. Sobald Beschleunigungsvorgänge oder

2.3 System der Fahrbahnbefestigung - Modellierung der Fahrbahnkonstruktion

auch mehrere Achsen simuliert werden, fällt die Symmetrie in Längsrichtung weg. Daher kann zur weiteren Reduktion des Rechenaufwandes nicht auf ein Viertelmodell zurückgegriffen werden.

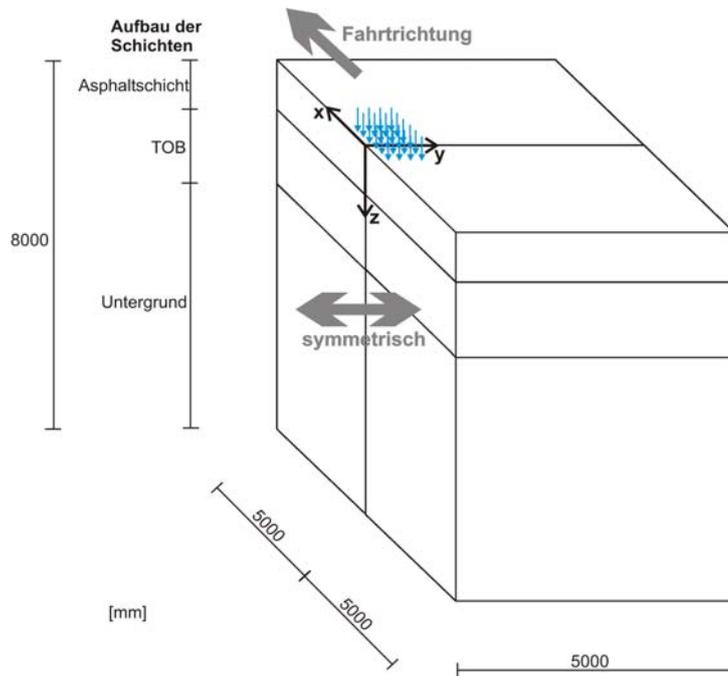


Abb. 2-3: schematischer Aufbau des Fahrbahnmodells

Das halbe Modell ist in Querrichtung 5 m breit, in Längsrichtung 10 m lang und 8 m tief (siehe Abb. 2-3 und Anhang 1). Der Koordinatenursprung liegt an der Oberseite im Schnittpunkt der Symmetrieebene in Querrichtung und in der Mitte in Längsrichtung, dementsprechend im Zentrum des Lasteinleitungsbereiches. Die x-Achse verläuft längs in Fahrtrichtung, die y-Achse entspricht der Querrichtung und die z-Achse gibt die Tiefe innerhalb der Fahrbahnkonstruktion an (Einheiten: mm). Die Unterseite des Modells ist in allen drei möglichen Bewegungsrichtungen fest gelagert, an der Innenfläche, die in der Achse der Längsrichtung verläuft, gelten Symmetriebedingungen in Querrichtung, die Außenseiten sind gegen eine zur Ebene lotrechten Verschiebung gesichert.

Weiterhin ist im Modell die Bezeichnung der Knoten und Elemente so gewählt worden, dass mit der jeweiligen Nummer deren Position in der Fahrbahnbefestigung bestimmbar ist. So kann das Spannungsmaximum genau lokalisiert werden.

Der Bereich, in dem die für die weitere Untersuchung relevanten Spannungen auftreten, entspricht dem Asphaltpaket unterhalb und in der näheren Umgebung der Lasteinleitung und wird im Folgenden Betrachtungsbereich genannt (siehe Abb. 2-4). Dessen Ausdehnung vom Reifenmittelpunkt beträgt in Querrichtung 360 mm, in Längsrichtung 720 mm und dessen Tiefe hängt von der zur jeweiligen Bauweise und Bauklasse gehörenden Asphalt-schichtdicke ab (BK SV: 340 mm oder BK III: 220 mm). Der gesamte Betrachtungsbereich ist in Würfel mit der Kantenlänge 20 mm unterteilt.

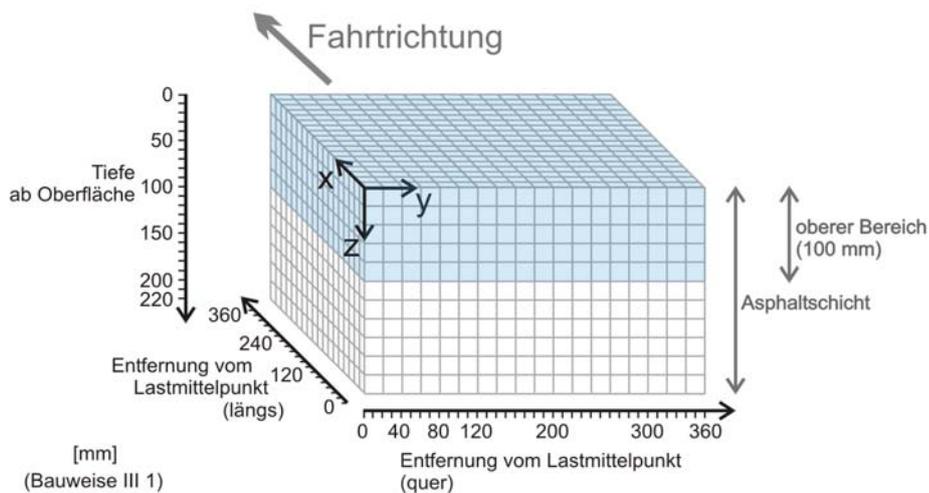


Abb. 2-4: Aufbau des halben Betrachtungsbereiches in der Bauklasse III

Da der Einfluss der Fahrbahnelemente auf die im Betrachtungsbereich vorkommenden Spannungen mit der Entfernung abnimmt, werden die Elemente außerhalb des Betrachtungsbereiches mit zunehmendem Abstand größer, was in Anhang 1 dargestellt ist. Ebenso wird der Einfluss der Elemente mit wachsender Tiefe kleiner; aus diesem Grund besitzen die Elemente in der Asphalt-schicht eine Höhe von 20 mm und in der Frost-schutzschicht von ca. 50 mm. Zudem werden daher die Elemente des Untergrunds mit zunehmender Tiefe größer (siehe Anhang 1).

Der E-Modul und die Querdehnzahl des Asphalts sind temperaturabhängig. Die hier verwendeten Temperaturverläufe über die Tiefe der Asphaltbefestigung und die zugehörigen Werte werden später in Kapitel 3 errechnet. Diese sind für die einzelnen Asphalt-schichten in Anhang 2 aufgelistet. Für die FSS wird ein gleich bleibender E-Modul von 200 N/mm², für den Untergrund ein E-Modul von 45 N/mm² angesetzt. Die Querdehnzahl beträgt für die FSS und den Untergrund konstant $\nu = 0,35$.

Um die Stabilität des aufgestellten Fahrbahnmodells zu testen, sind verschiedene Vergleiche durchgeführt worden. So haben Vergleiche zwischen einem Viertel- und einem Halbmodell bei gleicher Lastaufbringung nur geringe Auswirkungen auf die inneren Spannungen gezeigt, ebenso sind die Symmetriebedingungen durch eine rechtwinklige Drehung des Koordinatensystems für die aufgebrachten Lasten im Halbmodell geprüft worden. Auch belegen die Resultate nach Veränderungen der Modell- und Elementgrößen ein stabiles System.

2.4 Theorie der Schädigung

Eine Schädigung der Fahrbahnkonstruktion kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Dabei nehmen die Größe der Spannungen und ihr Verhältnis zueinander Einfluss auf die Versagensform eines Baustoffgemisches. So kommt es bei Überschreitung einer Maximalschubspannung zum „Fließen“ oder bei Überschreitung einer Maximalspannung zum „Bruch“. Bei der Versagensermittlung ist es entscheidend, dass nicht allein eine Spannungsgröße, sondern alle drei Hauptspannungen einbezogen werden. An der Oberfläche zeigt sich die Schädigung dann zum einen durch Spurrinnen und zum anderen durch Ermüdungsrisse.

Spurrinnenbildung:

Die Spurrinnenbildung wird hauptsächlich durch Schubspannungen hervorgerufen, welche in Abhängigkeit vom Schubspannungsniveau (Verhältnis der vorhandenen zur aufnehmbaren Schubspannung) Kriechvorgänge auslösen. Die Gefahr der Spurrinnenbildung erhöht sich bei hohen Temperaturen und niedrigen Belastungsfrequenzen (gleichbedeutend mit niedrigen Fahrgeschwindigkeiten), wenn im Asphalt die viskosen Eigenschaften dominieren und ein niedriger E-Modul vorhanden ist. Der ungünstigste und somit der maßgebende Fall tritt daher hinsichtlich der Spurrinnenbildung im Sommer auf.

Neben dieser weit verbreiteten Form der Spurrinnenbildung (im Englischen: primary rutting) gibt es zwei weitere Arten:

Entstehen auf dem Planum hohe Belastungen durch vertikale Druckspannungen und sind gleichzeitig die darunter liegenden Schichten nicht ausreichend tragfähig, so kann es zu einer Nachverdichtung des Untergrundes (secondary rutting) kommen. Diese Form der

Spurrinnenbildung tritt aber bei den hier betrachteten höherklassigen Straßenaufbauten (BK SV und III) in den Hintergrund, wenn nach den RStO dimensioniert worden ist. Zum einen verhindert ein ausreichend dicker Oberbau hohe Vertikaldrücke auf das Planum. Zum anderen ergibt der vorgeschriebene Mindestwert für den Verformungsmodul auf dem Planum eine ausreichende Tragfähigkeit des Untergrundes.

Zusätzlich kann es zur Spurrinnenbildung durch Nachverdichtung der Asphaltsschichten kommen. Dieser Fall tritt allerdings lediglich auf, wenn ein Baufehler, nämlich eine mangelhafte Verdichtung der Asphaltsschichten während des Einbaus vorliegt, was vorgeschriebene Verdichtungsgrade in den einschlägigen Vorschriften verhindern sollen.

In Abb. 2-5 sind alle drei Arten der Spurrinnenbildung, aus Schubbeanspruchung (a - primary rutting), aus Nachverdichtung des Untergrundes (b - secondary rutting) und aus Nachverdichtung der Asphaltsschichten bei mangelhafter Verdichtung (c) dargestellt. Während im Fall (a) die Verdrückung ohne Volumenänderung an der Oberfläche sichtbar ist, können die Fälle (b) und (c) nur durch eine Kernbohrung unterschieden werden.

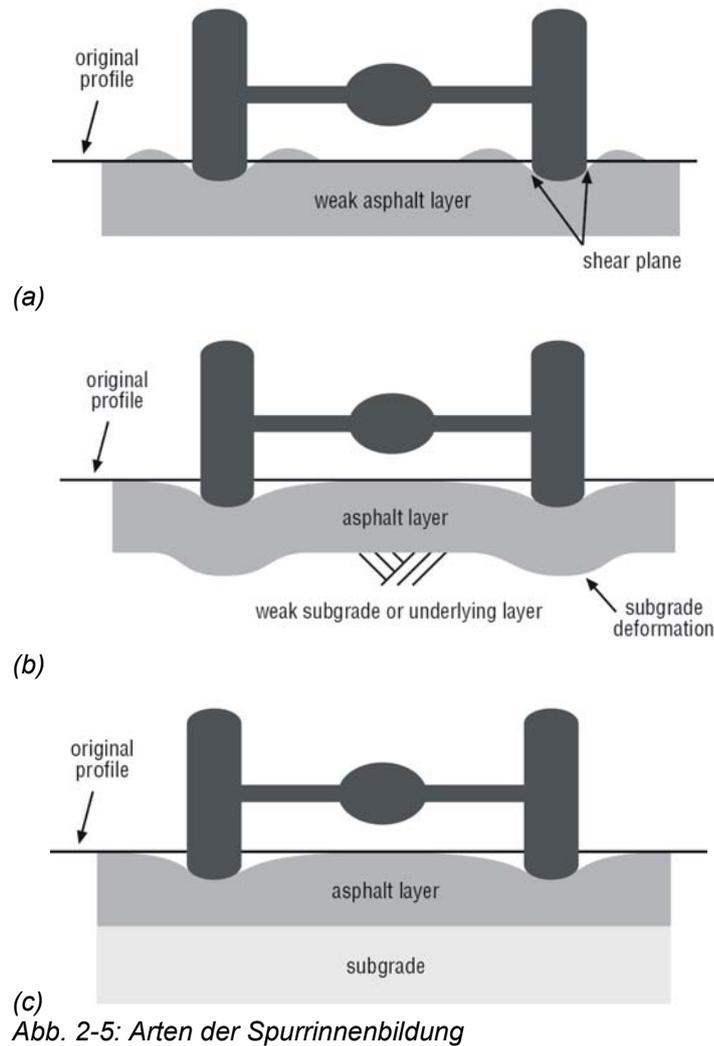


Abb. 2-5: Arten der Spurrinnenbildung

Zur Beschreibung des Spurrinnenbildungspotentials werden je nach Betrachtungsschwerpunkt verschiedene Festigkeitshypothesen angewendet, durch die der mehrdimensionale Spannungszustand in eine eindimensionale Größe – die Vergleichsspannung - umgerechnet wird:

Die **Schubspannungshypothese** nutzt die maximale Hauptschubspannung, welche sich aus der Differenz von maximaler und minimaler Hauptspannung ergibt, als Versagenskriterium. Das Versagen tritt in Form eines Gleitens der Materie in der Schubrichtung auf. Oft wird die Schubspannungshypothese auch in Form der TRESCA-Spannung angegeben, welche der doppelten maximalen Schubspannung entspricht.

$$(\sigma_v =) \tau_{\max} = \tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{TRESCA}{2} \quad (2.3)$$

Im MOHR'schen Diagramm entsprechen die Festigkeitsgrenzlinien Parallelen zur σ -Achse (siehe Abb. 2-6 mit zweidimensionalen Spannungskreisen).

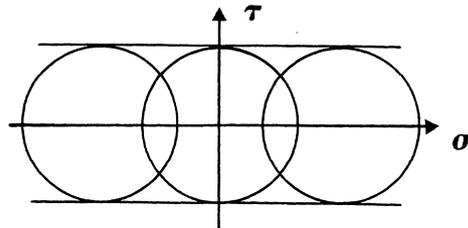


Abb. 2-6: Schubspannungshypothese [31]

Die Hypothese wird bei zähen Stoffen verwendet, wenn Fließ- und Gleitvorgänge das Festigkeitsverhalten dominieren. Da die Lage der MOHR'schen Spannungskreise und somit die Größe der Hauptnormalspannungen nicht in die Berechnung eingehen, ist diese als Bruchkriterium ungeeignet. Ein Stoff mit allseitig gleichgroßer Beanspruchung im Zug- oder Druckbereich bleibt demnach ohne Beanspruchung. Zudem bleibt die mittlere Hauptnormalspannung σ_2 unberücksichtigt.

Die **Gestaltänderungshypothese** ist eine Erweiterung der einfachen Schubspannungshypothese, welche auch die mittlere Hauptnormalspannung σ_2 mit einbezieht. Hier wird davon ausgegangen, dass ein Versagen bei mehrachsiger Beanspruchung erfolgt, falls die Formänderungsenergie eines Volumenelementes einen Grenzwert erreicht. Dabei wird die verrichtete Gestaltänderungsarbeit durch eine Vergleichsspannung σ_V ausgedrückt, welche oft als MISES-Spannung bezeichnet wird:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2.4)$$

Wenn eine axialsymmetrische Spannungsverteilung vorliegt, geht wegen der gleichen Größe zweier Hauptspannungen die Gestaltänderungshypothese in die Schubspannungshypothese über. Hiermit entspricht die Schubspannungshypothese einem Sonderfall der Gestaltänderungshypothese.

Diese Hypothese berücksichtigt zwar die mittlere Hauptnormalspannung σ_2 , somit kann die vorhandene mehrachsige Beanspruchung realitätsnaher abgebildet werden. Allerdings vernachlässigt die Gestaltänderungsarbeit auch den Einbezug der Lage der MOHR'schen Spannungskreise.

Die **MOHR-COULOMB'sche Hypothese** berücksichtigt nach der Theorie der inneren Reibung ein Ansteigen der Schubfestigkeit mit steigendem Druck. Dadurch entsteht die Grenzkurve als eine zur Druckseite hin ansteigende Gerade, deren Steigung ein Maß für den durch innere Reibung (Reibungswinkel φ) erzeugbaren Widerstand gegen eine Verschiebung in der Schubebene darstellt. Ein Versagen tritt ein, wenn einer der MOHR'schen Spannungskreise die Grenzgerade berührt.

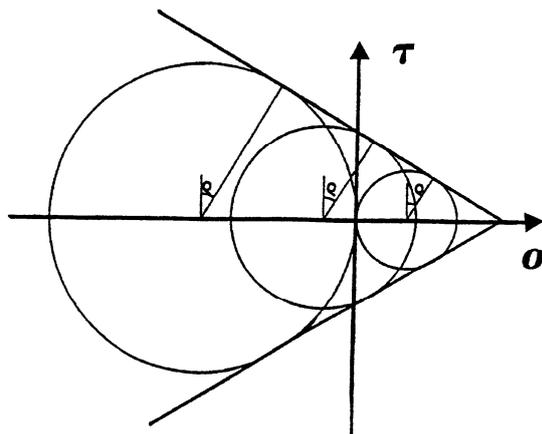


Abb. 2-7: MOHR-COULOMB'sche Hypothese [31]

Ermüdung:

Ermüdungsrisse entstehen aus einer Biegebeanspruchung der Fahrbahnbefestigung, die unterhalb der Lasteinleitung an der Unterseite des Asphaltstichtpaketes horizontal gerichtete Zugspannungen verursacht. Bei einer Absenkung der Temperatur steigen der E-Modul der Asphaltstichten und damit gleichzeitig die Zugspannung an, welche eine Rissbildung einleiten kann. Gleichzeitig nimmt das Relaxationsvermögen des Asphalts bei tiefen Temperaturen erheblich ab. Der ungünstigste und somit der maßgebende Fall tritt daher hinsichtlich der Ermüdungsrissbildung im Winter auf.

Zur Beschreibung der Ermüdungsrissbildung wird die **Normalspannungshypothese** herangezogen, welche die Hauptnormalspannungen als Maßstab für die Anstrengung nutzt.

Da Asphalt höhere Druckfestigkeiten als Zugfestigkeiten besitzt, ist die Zugspannung die entscheidende Größe. Im Versagenszustand tritt senkrecht zur Wirkungsrichtung der maximalen Hauptnormalspannung ein Trennbruch auf.

Die Vergleichsspannung ist somit mit der ersten Hauptnormalspannung identisch:

$$\sigma_v = \sigma_1 \quad (2.5)$$

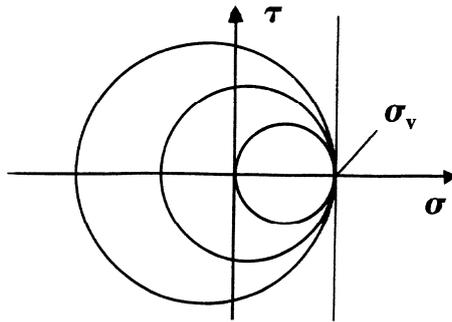


Abb. 2-8: Normalspannungshypothese [31]

Spurrinnenbildung und Ermüdung:

Ebenso wie die Schubspannungs- und Gestaltänderungshypothese schließt auch die MOHR-COULOMB'sche Hypothese ein Rissversagen normal zur maximalen Hauptspannung aus. Auf der anderen Seite wird durch die Normalspannungshypothese kein Fließen wegen Schubspannungsüberschreitung erkannt. Beide Schädigungsarten können nur berücksichtigt werden, wenn eine parabelförmige Grenzlinie Anwendung findet, welche LEON mathematisch in seiner **LEON'schen Parabel** (oder: verbesserte MOHR'sche Hypothese) beschreibt. So wird durch die einhüllende Parabel eine Verknüpfung der Normalspannungshypothese mit der Schubspannungshypothese erreicht.

Die LEON'sche Parabel ist vom Verhältnis der Druck- zur Zugfestigkeit $c = \beta_D / \beta_{BZ}$ abhängig. Liegt c zwischen 1 und 3, muss mit einem Schubbruch gerechnet werden; liegt c über 3 kann bei reiner Zugbeanspruchung ein Trennbruch senkrecht zur maximalen Hauptspannung auftreten. Bei $c = 1$ entspricht die Hypothese der Schubspannungshypothese, bei $c = \infty$ der Normalspannungshypothese.

2.4 System der Fahrbahnbefestigung - Theorie der Schädigung

$$1 < c < 3:$$

$$\tau^2 = -\frac{c-1}{2} \cdot \beta_{bz} \cdot \sigma + \frac{(c+1)^2}{16} \cdot \beta_{bz}^2$$

$$c > 3:$$

$$\tau^2 = -2 \cdot p \cdot (\beta_{bz} - \sigma)$$

(2.6)

$$\text{mit } p = \frac{1}{2} \cdot [(c+2) - 2 \cdot \sqrt{c+1}] \cdot \beta_{bz}$$

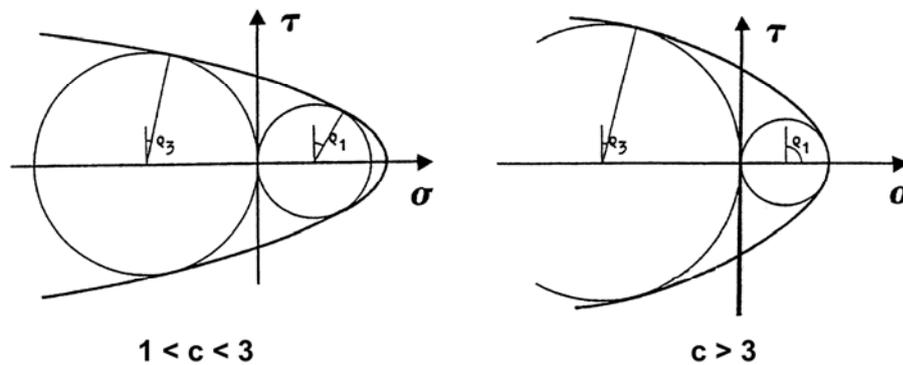


Abb. 2-9: LEON'sche Parabel, abhängig von c [31]

Das Verhältnis von Druck- zur Zugfestigkeit c ist von der Temperatur abhängig, die Funktion wird von HOTHAN [31] beschrieben:

$$c = \left[\frac{(72,7749 - T)}{32,8565} \right]^{1,923} \quad \text{mit } T \leq 40^\circ\text{C} \quad (2.7)$$

Die Funktion ist bis 40°C gültig, bei höheren Temperaturen nimmt der Parameter c konstant einen Wert von 1 an, es kann dann nur ein reines Schubspannungsversagen eintreten (siehe Abb. 2-10).

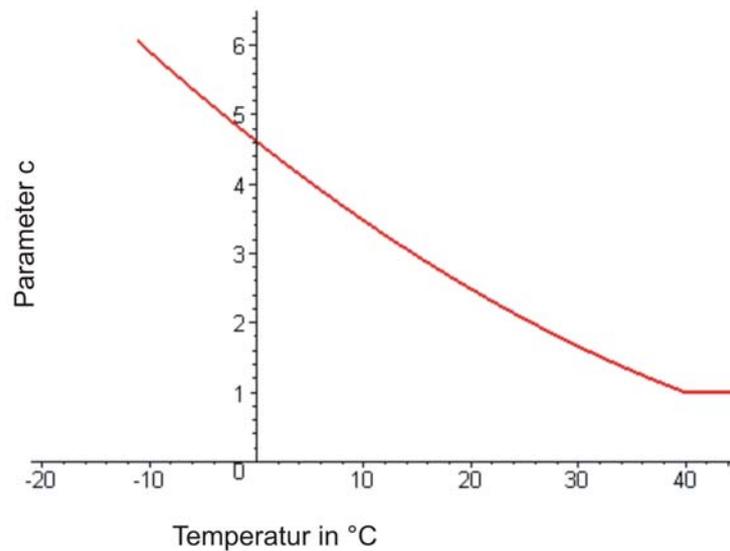


Abb. 2-10: Verhältnis von Druck- zu Zugfestigkeit c in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Biegezugfestigkeit β_{BZ} ist ebenfalls temperaturabhängig. In Abb. 2-11 werden die Funktionskurven der Biegezugfestigkeit nach HAGEMANN [30] und von POHLMANN [50] einander gegenübergestellt.

Aus den Werten β_{BZ} bei verschiedenen Temperaturen von HAGEMANN [30] ist in der vorliegenden Arbeit eine Funktion entwickelt worden, welche die Biegezugfestigkeit β_{BZ} in Abhängigkeit von der Temperatur angibt.

$$\beta_{bz} = 3,2 \cdot e^{-T/33,8} \quad (2.8)$$

Die Biegezugfestigkeitsfunktion von POHLMANN [50] besitzt bei ca. -10 °C ein Maximum. Im Temperaturbereich oberhalb von 0 °C, welcher in der vorliegenden Arbeit ausschließlich betrachtet wird, kann der Verlauf durch folgende Exponentialfunktion angenähert werden:

$$\beta_{bz} = 3,9 \cdot e^{-T/12,1} \quad (2.9)$$

Mit zunehmender Temperatur läuft die Biegezugfestigkeit bei der Funktion nach POHLMANN wesentlich schneller gegen Null als bei der Funktion nach HAGEMANN. Da bei Verwendung der Biegezugfestigkeitskurve nach POHLMANN anhand der aus realistischen Lastfällen in Kapitel 5 errechneten Spannungen ein zu ausgeprägtes Materialversagen prognostiziert wird, gilt im Folgenden ausschließlich die Biegezugfestigkeitsfunktion nach HAGEMANN.

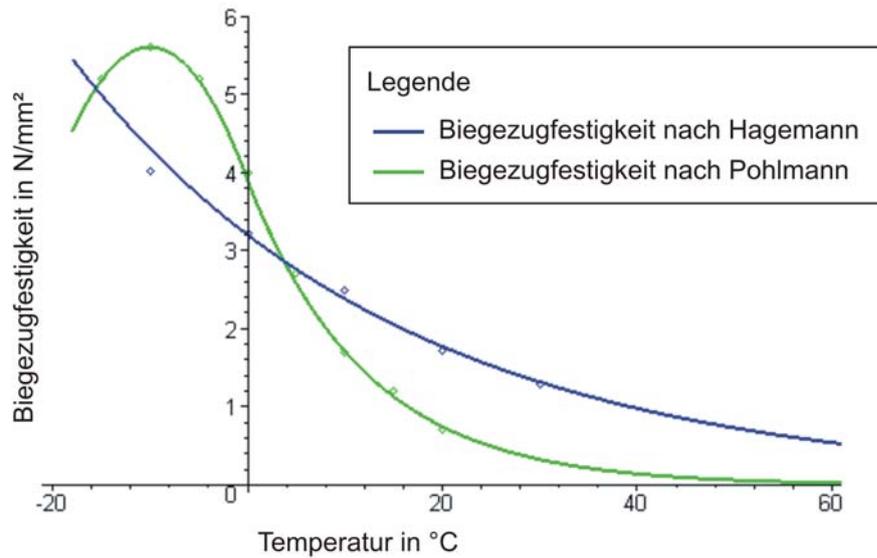


Abb. 2-11: Biegezugfestigkeit β in Abhängigkeit von der Temperatur

Werden der Verhältniswert c nach Gleichung (2.7) und die Biegezugfestigkeit β_{BZ} nach Gleichung (2.8) in die LEON'sche Parabelfunktionen nach Gleichung (2.6) eingesetzt, entstehen die in Abb. 2-12 dargestellten temperaturabhängigen Parabeln. Bei niedrigen Temperaturen können in den Asphaltsschichten höhere Zug- und Schubspannungen aufgenommen werden als bei hohen Temperaturen. So wird in Abb. 2-12 die höchste Zugfestigkeit bei 0 °C erreicht. Ab einer Temperatur von 40 °C wandelt sich die Parabel zu einer Geraden, welche mit noch höheren Temperaturen wie bei 50 °C kleinere Schubfestigkeitswerte τ aufweist.

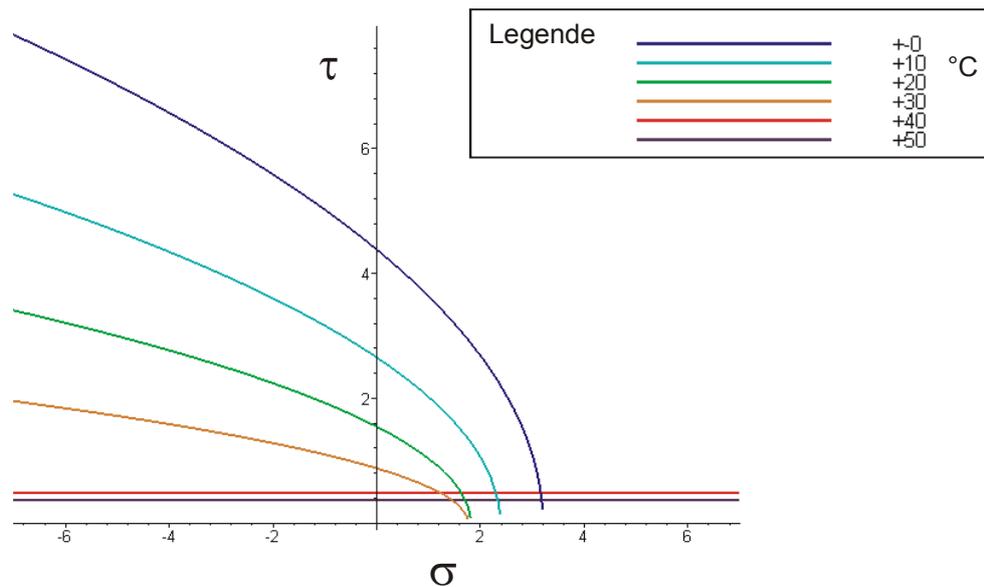


Abb. 2-12: LEON'sche Parabeln in Abhängigkeit von der Temperatur

Da bei hohen Temperaturen sowohl niedrigere Grenzkurven der Schädigung für den Asphalt gelten als auch, wie die Ergebnisse aus Kapitel 5 zeigen werden, niedrigere Spannungen in der Asphaltbefestigung entstehen (und umgekehrt), kann daher erst aus der Überlagerung von vorhandener und aufnehmbarer Spannung in jedem Punkt ein Versagen oder eine Reserve ermittelt werden. Demnach muss nicht die in Kapitel 5 ermittelte Lage des absoluten Spannungsmaximums die Stelle sein, an der die Schädigung in der Fahrbahnbefestigung initiiert wird.

Eine Schädigung tritt ein, wenn der Spannungskreis (mit dem Radius R) aus maximaler und minimaler Hauptspannung die LEON'sche Parabel berührt oder schneidet (Wird R bei festem Mittelpunkt fiktiv so abgeändert, dass sich Hauptspannungskreis und LEON'sche Parabel in einem Punkt berühren, entsteht ein fiktiver R). Ansonsten ist eine Reserve gegen das Materialversagen vorhanden. Die in einem Punkt der Fahrbahnbefestigung existente Reserve entspricht dem minimalen Abstand zwischen Hauptspannungskreis mit dem Radius R und der LEON'schen Parabel ($\text{fiktiver}_R - R$) im Verhältnis zum Abstand zwischen Mittelpunkt des Hauptspannungskreises und fiktivem Schnittpunkt (fiktiver_R). Durch diese hier vorgenommene Definition nimmt die Reserve Werte bis zu 100 % an. Ist die Reserve negativ oder NULL, dann kommt es zum Versagen in Form eines Zugbruchs oder einer Schubverformung.

$$Reserve = \frac{\text{fiktiver } R - R}{\text{fiktiver } R} \quad (2.10)$$

In Abb. 2-13 werden die zur Reservenbestimmung notwendigen Eingangsgrößen dargestellt. Beispielhaft beträgt dort die Reserve $(3 - 2) / 3 = 33 \%$.

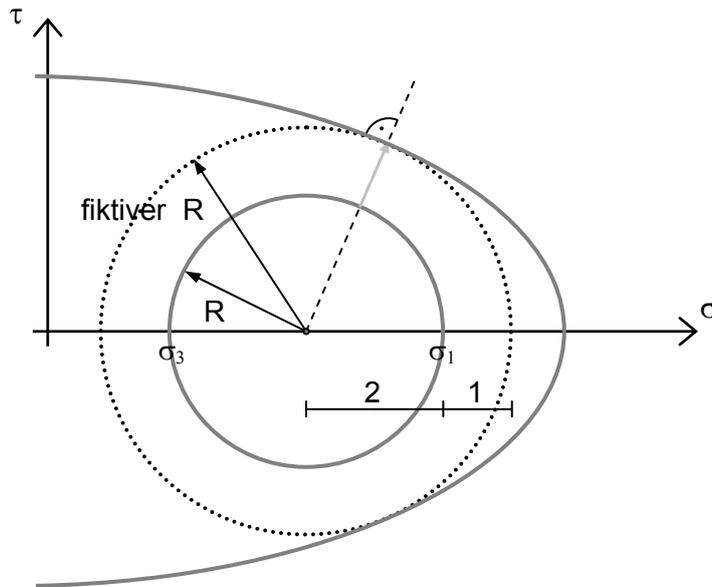


Abb. 2-13: Darstellung der Reservenbestimmung mit Beispiel

Für jeden Punkt im Betrachtungsbereich wird durch einen in dieser Arbeit entwickelten Algorithmus die Kurvenstelle des minimalen Abstands bestimmt und dann wird daraus die Reserve berechnet.

Um eine komplette Doppelachse mit einer Einzelachse hinsichtlich des Schädigungspotentials vergleichen zu können (wie im Vergleich 6 der Kapitel 5 und 6), müssen die Anteile der Schädigung, die durch die aufgebrachte Belastung entsteht, über alle Achsen summiert werden. Der Schädigungsanteil ergibt sich aus dem potenzierten Verhältnis von vorhandener Spannung $\sigma_{\text{vorhanden}}$ zur Spannung $\sigma_{\text{Schädigung}}$, deren Erreichen oder Überschreiten zu einer Schädigung führt. Der Potenzfaktor n ist von der Versagensart abhängig. Die Schädigung durch Spurrinnenbildung aus Schubbeanspruchung erfolgt etwa mit der 2. Potenz der auftretenden Spannungen ($n = 2$). Dieser Zusammenhang ergibt sich aus zahlreichen empirischen Forschungsergebnissen, z. B. aus COST 334 [22]. Daher

verhalten sich die Lebensdauern N zweier Beanspruchungen umgekehrt proportional zu der 2. Potenz ihres Spannungsverhältnisses. Die Schädigung durch Ermüdungsrisse erfolgt etwa mit der 4. Potenz der auftretenden Spannungen. Nach diesem Berechnungshintergrund ergeben sich die Lastäquivalenzfaktoren aus den RStO [23]. Der Schädigungsanteil bzw. das Spannungsverhältnis zwischen vorhandener Belastung und sofortiger Schädigung kann mit Hilfe der Funktion (2.10), mit der die Reserve ermittelt wird, folgendermaßen berechnet werden:

$$\text{Schädigungsanteil} = \left(\frac{\sigma_{\text{vorhanden}}}{\sigma_{\text{Schädigung}}} \right)^n = \left(\frac{R}{\text{fiktiver } R} \right)^n = (1 - \text{Reserve})^n \quad (2.11)$$

Nun ergibt sich bei einer Doppelachse gemäß der Hypothese nach MINER der Schädigungsanteil durch Addition.

3 Temperaturbeanspruchung

Die Temperaturverteilung in einer Asphaltbefestigung ist aus verschiedenen Gründen von Bedeutung. Zum einen hängt der E-Modul der Asphaltsschichten durch das Bindemittel stark von der Temperatur ab. Zum anderen werden die viskosen Eigenschaften, insbesondere das Relaxationsvermögen, durch die Temperatur bestimmt. Dadurch wird ebenso das Schädigungsverhalten des Asphalts beeinflusst.

Im Winter treten durch den hohen E-Modul hohe Zugspannungen auf, welche zur Ermüdungsrissbildung führen. Beim Abkühlen kann sich die Fahrbahnbefestigung aufgrund geometrischer Zwänge nicht zusammenziehen, es kommt zu thermisch induzierten Zugspannungen – kryogenen Spannungen. Das geringe Relaxationsvermögen bei tiefen Temperaturen steigert die Wirkung von kryogenen Spannungen [50].

Im Sommer dominiert das viskose Verhalten im Asphalt. Dies führt zum Fließen und damit zur Spurrinnenbildung. Durch das bei hohen Temperaturen hohe Relaxationsvermögen treten nur sehr geringe kryogene Spannungen auf.

Die theoretischen Grundlagen von thermischen Berechnungen werden in Kapitel 3.1 erläutert. Die Temperaturverteilung der Fahrbahnbefestigung leitet sich sowohl aus den thermophysikalischen Kennwerten der Straßenbaustoffe und des Bodens (siehe Kapitel 3.2) als auch aus der Witterung (siehe Kapitel 3.3) ab; sie wird in den Kapiteln 3.4 und 3.5 auf unterschiedliche Weise berechnet. Zusätzlich wird in Kapitel 3.5.3 ein neues Verfahren zur Abschätzung der Temperatur in der Fahrbahnbefestigung vorgestellt. In Kapitel 3.6 werden aus der Temperaturbeanspruchung tiefenabhängige E-Moduln entwickelt.

3.1 Grundprinzipien der Wärmeübertragung

Zwischen Körpern mit unterschiedlichen Temperaturen findet ein Wärmeaustausch statt. Dabei kann die Wärme durch Leitung, Strahlung oder Konvektion übertragen werden, sie fließt immer in Richtung des kälteren Körpers. Innerhalb von festen Körpern findet nur Wärmeleitung statt, bei Flüssigkeiten und Gasen zusätzlich Konvektion. Eine Wärmestrahlung wird von jedem Körper abgegeben und tritt im Gegensatz zu den anderen beiden Wärmeübertragungsarten auch im luftleeren Raum auf.

Die Einheit der Wärme ist Joule J (= Watt $W \cdot$ Sekunde s), die Einheit der Wärmeübertragung (über eine Fläche in m^2 und einen Zeitraum in s) dementsprechend Watt pro Quadratmeter W/m^2 .

An der Straßenoberfläche wird der Wärmehaushalt durch die Strahlungsbilanz Q und durch die Konvektion L der diese berührenden Luft reguliert. Der Wärmeaustausch in Richtung des Untergrundes geschieht durch den Bodenwärmestrom B (Wärmeleitung). Der Wärmefluss infolge Kondensation und Verdunstung V kann vernachlässigt werden, denn der Energiegewinn aus Kondensation von Wasser an der Straßenoberfläche in der Nacht wird durch den Energieverlust aus Verdunstung am Tag ausgeglichen. Ebenso wird der Einfluss von Niederschlagsereignissen nicht berücksichtigt, da weder die Temperatur des Niederschlags noch die für den Wärmeaustausch relevante Wassermenge bekannt sind. Somit herrscht folgende Wärmehaushaltsgleichung vor, in der sich der Bodenwärmestrom B , die Strahlungsbilanz Q und der Wärmeübergang zur Luft L ausgleichen:

$$B + Q + L (+V) = 0 \tag{3.1}$$

- mit
- B (Boden-)Wärmeleitung in W/m^2
 - Q Wärmestrahlungsbilanz in W/m^2
 - L Wärmeübergang zur Luft in W/m^2
 - V Wärmefluss infolge Verdunstung und Kondensation von Wasser in W/m^2

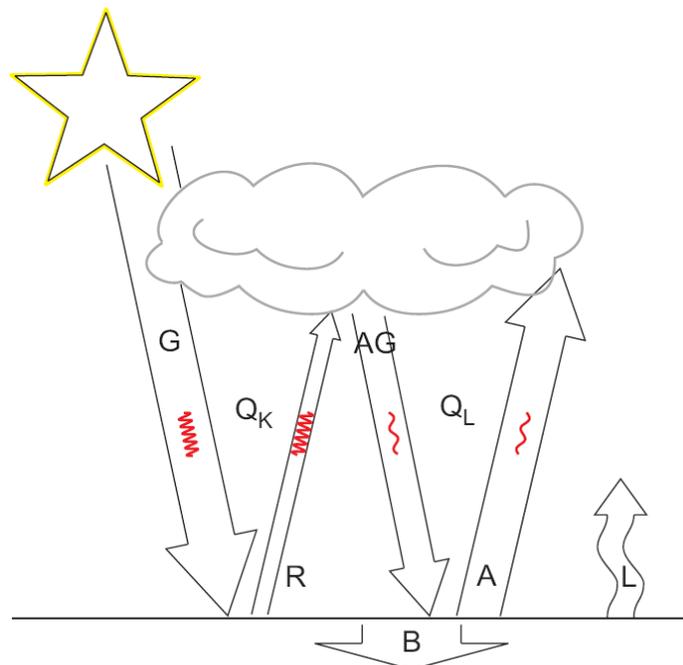


Abb. 3-1: qualitative Darstellung des Wärmehaushalts an einer Straßenoberfläche

In Abb. 3-1 sind die Bestandteile B , Q , L des Wärmehaushalts an der Oberfläche dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert. Die Strahlungsbilanz Q untergliedert sich weiter in Q_K und Q_L bzw. $G - R$ und $AG - A$ (siehe S. 25).

- Wärmeleitung

Der Bodenwärmestrom B basiert auf dem Prinzip der Wärmeleitung. Die Wärmeleitung wird als Wärmefluss in einem Kontinuum in Folge eines Temperaturunterschiedes definiert. Bei der Wärmeleitung wird kinetische Energie zwischen den einzelnen Molekülen übertragen.

Die transportierte Wärmemenge hängt von den Abmessungen des betrachteten Körpers – bei einer (unendlichen) Fläche von der Schichtdicke Δx –, der Zeit, der vorherrschenden Temperaturdifferenz ΔT und der Wärmeleitfähigkeit λ des Materials ab.

$$B = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.2)$$

mit λ Wärmeleitfähigkeit in $W/(m \cdot K)$

ΔT Temperaturdifferenz in K

Δx Schichtdicke in m

- Wärmestrahlung

Die Strahlungsbilanz Q ist die Summe aus Wärmeeinstrahlungen sowie -abstrahlungen und wird in kurzwellige (0,3 – 4,0 μm) und langwellige Wärmestrahlung (4,0 – 100,0 μm) untergliedert.

Die Wärmestrahlung geschieht durch Emission und Absorption von elektromagnetischen Wellen. Dabei emittiert jeder Körper Strahlung, dessen Temperatur höher als die absolute Nulltemperatur (0 K) ist. Die auf einen Körper auftreffende Wärmestrahlung wird teilweise reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz ist der Emissionsgrad ε gleich dem Absorptionsgrad und nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ist die durch die Wärmestrahlung hervorgebrachte Leistung P (in Watt) eines Körpers zur Fläche und zur 4. Potenz der Körpertemperatur proportional.

$$P = \varepsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot A \cdot T^4 \quad (3.3)$$

mit ε Emissions-/Absorptionsgrad

σ_{SB} Stefan-Boltzmann-Konstante

A Fläche in m^2

T Temperatur in K

Der Proportionalitätsfaktor, die Stefan-Boltzmann-Konstante σ_{SB} , lautet:

$$\sigma_{SB} = 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad (3.4)$$

Bei der **kurzwelligigen Strahlung** Q_k teilt sich die Globalstrahlung G in direkte Sonneneinstrahlung D und diffuse Himmelsstrahlung H auf. Um die in den Boden führende, kurzwellige Strahlung zu erhalten, muss der Anteil, welcher von der Oberfläche reflektiert wird, – die Reflexion R – von der Globalstrahlung abgezogen werden. Dies kann auch über die Albedo α (entsprechend eines kurzwelligen Reflexionsgrades) ausgedrückt werden.

$$Q_k = G - R = (D + H) - R = G \cdot (1 - \alpha) \quad (3.5)$$

mit G Globalstrahlung in W/m^2

α Albedo

3.1 Temperaturbeanspruchung - Grundprinzipien der Wärmeübertragung

Die Globalstrahlung G kann über ein Pyranometer direkt gemessen werden (siehe Kapitel 3.3.2).

Die **langwellige Strahlung** Q_L besteht aus der atmosphärischen Gegenstrahlung AG und der langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche A .

$$Q_L = (AG - A) \cdot \varepsilon_L \quad (3.6)$$

mit AG atmosphärische Gegenstrahlung in W/m^2

A langwellige Ausstrahlung des Bodens in W/m^2

ε_L langwelliger Emissions-/Absorptionsgrad

Die langwellige Ausstrahlung des Bodens A lässt sich direkt aus der Gleichung (3.3) in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur T_O berechnen.

$$A = \sigma_{SB} \cdot T_O^4 \quad (3.7)$$

Die atmosphärische Gegenstrahlung AG ist über empirische Formeln ableitbar (siehe Kapitel 3.3.3).

In Abb. 3-2 sind alle Anteile der Wärmestrahlung noch einmal in einer Tagesganglinie dargestellt, um die Wirkung der einzelnen Komponenten auf die Gesamtstrahlung aufzuzeigen.

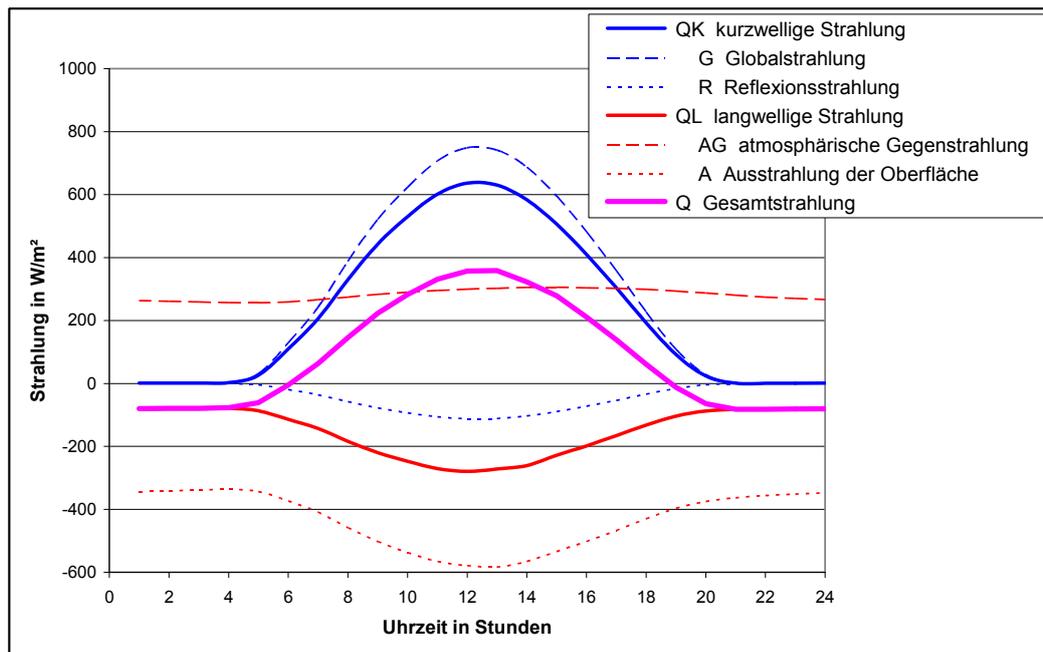


Abb. 3-2: schematisierte Tagesganglinie der Strahlung an einem Sommertag

- Konvektion

Der Wärmeübergang zur Luft L erfolgt durch Konvektion. Die Konvektion überträgt thermische Energie durch den Transport von Teilchen. Im Gegensatz zu erzwungener Konvektion, z. B. Wind, ergibt sich die freie Konvektion ausschließlich durch die aus dem Temperaturunterschied hervorgerufene Dichtedifferenz. Bei steigender Temperatur verringert sich die Dichte der Luft, demnach wird diese wärmere Luft leichter als die sie umgebende kältere Luft und steigt nach oben.

Der Wärmestrom zwischen Luft und einer festen Oberfläche wird durch die Wärmeübergangszahl α_L reguliert.

$$L = \alpha_L \cdot (T_L - T_O) \quad (3.8)$$

mit α_L Wärmeübergangszahl in $W/(m^2 \cdot K)$

T_L Temperatur der Luft in K

T_O Temperatur an der Oberfläche in K

3.2 Thermische Stoffparameter

Die thermophysikalischen Eigenschaften werden durch die Wärmeleitfähigkeit λ , die spezifische Wärmekapazität c , die Dichte ρ , den Emissionsgrad ε und die Wärmeübergangszahl α_L beschrieben. Sie sind in zahlreichen Veröffentlichungen näher spezifiziert [3], [4], [10], [19], [20], [36], [50], [56].

Die **Wärmeleitfähigkeit λ** bestimmt die Höhe des Abflusses der Wärmeenergie in Richtung des Temperaturgefälles. Sie gibt die Wärmemenge an, die je Zeitintervall durch einen Flächenquerschnitt fließt, wenn senkrecht ein Temperaturgefälle von 1°C je Längeneinheit vorhanden ist.

Die Größe der Wärmeleitfähigkeit ist abhängig von der Stoffzusammensetzung, dem Luftporengehalt, dem Feuchtigkeitsgehalt und der Temperatur des Körpers. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit führt zu einem schnellen Temperatúrausgleich in den verschiedenen Tiefen. Dadurch weist die Oberfläche von Schichten mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit in den Mittagsstunden niedrigere Temperaturen auf. Dafür sind in den Nachtstunden durch den Wärmefluss aus dem Untergrund die Oberflächentemperaturen höher. Somit sind Schichten mit hoher Wärmeleitfähigkeit durch die kleineren Extremwerte der Temperaturen an der Oberfläche günstiger. Dies gilt sowohl für das Aufwärmen im Sommer als auch das Abkühlen im Winter (nach POHLMANN, [50]).

Bei **Asphalt** schwanken die Werte von 0,90 bis 2,43 W/(m·K). Asphaltbeton hat eine größere Wärmeleitfähigkeit als Gussasphalt; Asphaltdecken haben eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Asphaltbinder, Asphalttragschichten aus (Basalt-)Splitt eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit als Asphalttragschichten aus Kies [3]. In den weiteren Untersuchungen wird einheitlich für alle Asphaltsschichten eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 1,3$ W/(m·K) angenommen.

Bei den **Frostschuttschichten (FSS)** schwanken die Werte von 2,00 bis 2,40 W/(m·K). Für die FSS wird eine Wärmeleitfähigkeit von 2,2 W/(m·K) angenommen.

Die Wärmeleitfähigkeiten von **Böden** werden von $\lambda = 0,52$ bis 3,30 W/(m·K) angegeben. Es wird zwischen den Bodenarten Ton, Schluff, Sand und Kies unterschieden. Mit zunehmender Dichte oder Feuchtigkeit steigt die Wärmeleitfähigkeit stark an, der Verlauf wird in Funktionen abgeschätzt. Beim Phasenübergang von Wasser zu Eis existiert ein sprunghafter Anstieg der Wärmeleitfähigkeit (siehe Abb. 3-3 nach Kersten, in [3]). In den

Berechnungen wird von einer Wärmeleitfähigkeit für den Boden von $\lambda = 1,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ausgegangen.

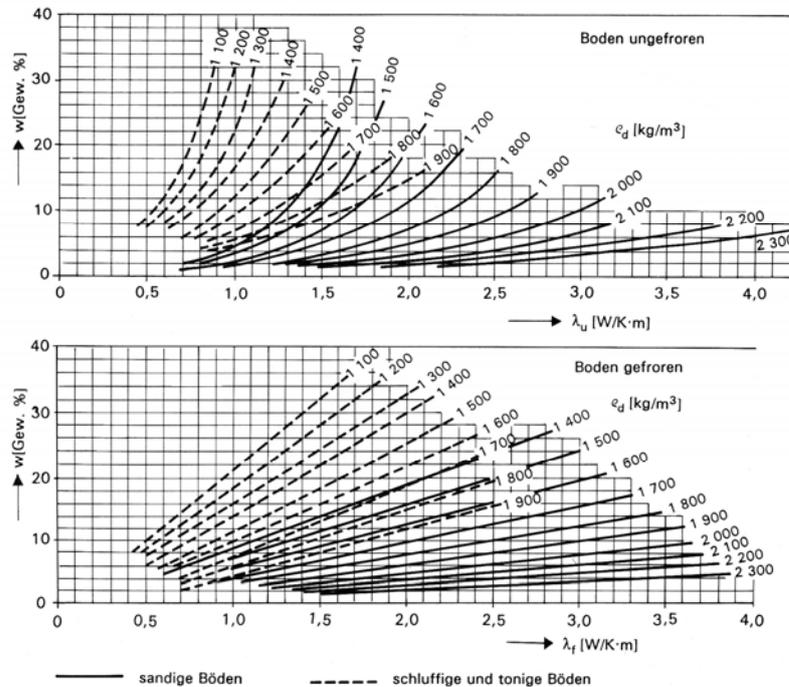


Abb. 3-3: Wärmeleitfähigkeit von ungefrorenen und gefrorenen feuchten Böden nach Kersten, in [3]

Die **spezifische oder gravimetrische Wärmekapazität c** beschreibt die Menge an Wärmeenergie, die benötigt wird, um ein Kilogramm um ein Grad Celsius zu erhöhen.

Neben der gravimetrischen Wärmekapazität c (in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) wird auch die volumetrische Wärmekapazität C (in $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$) verwendet. Diese ist das Produkt aus der gravimetrischen Wärmekapazität c und der (Trocken-)Dichte ρ_d . Sie beschreibt die Wärmemenge, die notwendig ist, um eine Volumeneinheit um ein Grad Celsius zu erhöhen. Bei der Umrechnung auf den volumenbezogenen Wert muss der Wassergehalt w und der Aggregatzustand des Wassers berücksichtigt werden [3].

- über 0°C :

$$C_{>0} = \rho_d \cdot (c + w \cdot c_w) \quad \text{mit } c_w = 4,190 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \quad (3.9)$$

- unter 0°C:

$$C_{<0} = \rho_d \cdot (c + w \cdot c_e) \text{ mit } c_e = 2,116 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)} \quad (3.10)$$

| | | |
|-----|----------|---------------------------|
| mit | ρ_d | Trockendichte |
| | w | Wassergehalt |
| | c_w | Wärmekapazität von Wasser |
| | c_e | Wärmekapazität von Eis |

Die Größe der Wärmekapazität ist abhängig von der Stoffzusammensetzung, dem Wassergehalt und der Temperatur des Körpers. Auf die Oberfläche hat die Wärmekapazität einen geringen Einfluss. Eine höhere Wärmekapazität führt tagsüber zu geringeren Oberflächentemperaturen, da mehr Energie zum Aufheizen der Straße notwendig ist. In der Nacht dauert es dafür länger bis der größere Energievorrat wieder abgegeben wird. Geringe Wärmespeicherfähigkeiten begünstigen das Auftreten kryogener Spannungen [50].

In den **Asphaltschichten** treten Werte von 0,79 bis 1,35 kJ/(kg·K) auf. Zwischen den einzelnen Einbauschichten ist kein Unterschied zu erkennen, nur Asphalttragschichten aus Kies besitzen im Gegensatz zu den anderen Asphaltschichten eine höhere Wärmekapazität von bis zu 1,35 kJ/(kg·K) [3]. Insgesamt wird eine spezifische Wärmekapazität von 0,9 kJ/(kg·K) angenommen.

Die Wärmekapazitäten der **Frostschuttschicht (FSS)** werden mit Werten von 0,8 bis 1,1 kJ/(kg·K) angegeben. Im Weiteren wird von einer spezifischen Wärmekapazität von 1,0 kJ/(kg·K) ausgegangen.

Der **Boden** weist Werte von 0,7 bis 2,5 kJ/(kg·K) auf. Mit Zunahme der Temperatur steigt die Wärmekapazität linear an, nach Kersten ca. 1,5 J/(kg·K), ebenso steigt sie mit höherem Wassergehalt [36]. Es wird eine spezifische Wärmekapazität von 1,5 kJ/(kg·K) verwendet.

Die **Dichte ρ** bestimmt die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, geht aber auch selbst in die Berechnung der thermischen Beanspruchung ein. Teilweise wird die Dichte ohne Wasseranteile als Trockendichte ρ_d angegeben.

Die Dichte hängt von der Stoffzusammensetzung und dem Porengehalt des Körpers ab. Wie bei der Wärmekapazität führt ein höherer Wert an der Oberfläche zu geringfügig niedrigeren Temperaturen, da mehr Energie zum Aufheizen benötigt wird.

In der **Asphaltschicht** nimmt die Dichte Werte von 2,09 bis 2,63 g/cm³ an. Die Asphaltdeckschicht besitzt die höchste Dichte, Gussasphalt und Asphalttragschichten aus Kies weisen gegenüber den anderen Einbauschichten geringere Dichtewerte auf [3]. Für Asphalt wird im Weiteren eine Dichte von 2,5 g/cm³ zugrunde gelegt.

Die Dichte von **Frostschuttschichten (FSS)** schwankt zwischen 1,90 bis 2,14 g/cm³. Im Mittel liegt die Dichte der FSS bei 2,0 g/cm³.

Für die Dichte im **Boden** gibt es eine größere Bandbreite von 1,20 bis 2,30 g/cm³, da die Stoffzusammensetzung stärker variieren kann. Bindiges Erdreich hat eine geringere Dichte als Erdreich mit hohen Sand- und Kiesanteilen. Reine Naturgesteine weisen eine sehr hohe Dichte auf (bis zu 3,0 g/cm³). Es wird eine Dichte von $\rho = 1,8 \text{ g/cm}^3$ angenommen.

| | | Wärmeleitfähigkeit λ W/(m·K) | Wärmekapazität c J/(g·K) | Dichte ρ g/cm ³ |
|--------------------|--------------|---|---|--|
| Asphalt | -decke | 1,30 - 1,40 | 0,88 - 0,98 | 2,50 - 2,63 |
| | -binder | 1,05 - 1,40 | 0,88 - 0,97 | 2,45 - 2,56 |
| | -tragschicht | 0,90 - 2,43 | 0,88 - 1,35 | 2,09 - 2,56 |
| | -beton | 0,90 - 2,43 | 0,79 - 1,35 | 2,09 - 2,63 |
| | Gussasphalt | 1,09 | 0,88 | 2,38 |
| Frostschuttschicht | | 2,00 - 2,40 | 0,80 - 1,10 | 1,90 - 2,14 |
| Boden | trocken | 0,52 - 2,40 | 0,65 - 1,84 | 1,20 - 2,30 |
| | gesättigt | 1,50 - 3,30 | 0,65 - 2,50 | 1,20 - 1,80 |

Tab. 3-1: Wärmeleitfähigkeit, -kapazität und Dichte verschiedener Stoffe

Die Spannweiten der drei oben beschriebenen thermophysikalischen Stoffparameter für die einzelnen Schichten sind in Tab. 3-1 zusammengefasst. Da sie alle das Wärmeverhalten im Inneren der Fahrbahnbefestigung regeln, werden sie im Folgenden ‚innere Stoffparameter‘ genannt. Aus diesen inneren Stoffgrößen ergibt sich die **Temperaturleitzahl a** (in m²/s) durch:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (3.11)$$

Entsprechend der Funktion dringt die Temperatur bei großer Wärmeleitfähigkeit λ und niedriger Wärmekapazität c des Stoffes schnell ein. Ein hoher Wassergehalt im Boden führt zwar zu einer höheren Leitfähigkeit, aber ebenso zu einer erhöhten Wärmekapazität; insgesamt erwärmen sich dadurch feuchte Böden langsamer, kühlen aber auch langsamer aus [10].

Der **Emissionsgrad ϵ** muss für die kurzwellige und langwellige Strahlung gesondert behandelt werden. Die Globalstrahlung als kurzwellige Strahlung wird über die Albedo α abgemindert (vergleiche Gleichung (3.5)), atmosphärische Gegenstrahlung und langwellige Ausstrahlung des Bodens als langwellige Strahlungen über den langwelligen Absorptions-/Emissionskoeffizient ϵ_L (vergleiche Gleichung (3.6)).

Der Reflexionsanteil der Globalstrahlung, die **Albedo α** , hängt vom Zustand der Straßenoberfläche - nass oder trocken, alt oder neu – ab, siehe Tab. 3-2 ([10], [47], [64]). Die Albedo von länger liegendem Asphalt besitzt höhere Werte und streut stärker als neu eingebaute Asphaltchichten; es wird als Mittel $\alpha = 14 \%$ festgesetzt.

| Albedo in % | | Spannweite | gewähltes Mittel |
|---------------|---------|-------------|------------------|
| Asphalt - neu | trocken | 8,5 - 11,6 | 14,0 |
| | nass | 6,8 | |
| Asphalt – alt | trocken | 13,5 - 25,3 | |
| | nass | 13,1 | |
| Beton | | 17,2 - 30,2 | - |
| Schnee | | 40 - 95 | - |

Tab. 3-2: Albedo-Werte verschiedener Oberflächen

Über die Verwendung eines geeigneten Asphaltmischgutes ist eine Vergrößerung der Albedo und damit eine starke Verringerung der Maximaltemperaturen möglich (nach POHLMANN bis zu 10°C), dabei bleibt eine Temperaturdifferenz von bis zu 1°C auch nachts erhalten. Dadurch ergibt sich eine Verbesserung der Verformungsstabilität von hellen Asphaltchichten im Vergleich zu nicht aufgehellten Asphaltdecken um bis zu 50 % [50].

Der langwellige Absorptions-/Emissionskoeffizient ϵ_L ist vom Stoffmaterial abhängig, siehe Tab. 3-3 ([10], [26], [39], [50]).

| Langwelliger Absorptions-/Emissionskoeffizient | Spannweite | gewähltes Mittel |
|--|--------------|------------------|
| Asphalt | 0,90 - 0,98 | 0,92 |
| Beton | 0,88 – 0,96 | - |
| Schnee | 0,005 – 0,03 | - |

Tab. 3-3: Absorptions-/Emissionskoeffizient verschiedener Oberflächen

Ein höherer langwelliger Absorptions-/Emissionskoeffizient führt zu geringfügig niedrigeren Temperaturen, da die emittierte Ausstrahlung, welche gegenüber der Gegenstrahlung überwiegt, zunimmt. In Übereinstimmung mit vielen Untersuchungen wird 0,92 gewählt.

Der die Konvektion regelnde **Wärmeübergangskoeffizient** bzw. die **Wärmeübergangszahl α_L** (aus Gleichung (3.8)) ist von der Windgeschwindigkeit u abhängig, ebenso auch von der Rauheit der Oberfläche und dem Temperaturunterschied ΔT zwischen der Oberfläche und der angrenzenden Luft. Dieser kann auf unterschiedliche Weise berechnet werden:

- nach FRANKENBERGER [64]:

$$\alpha_L = 7 \cdot \sqrt{u} \quad (3.12)$$

- nach Ingenieurbau [44]:

$$\alpha_L = 5,5 \cdot (1 + u^{0,75}) \quad (3.13)$$

- nach KREBS [39]:

$$\alpha_L = 10 \cdot (0,174 + 0,941 \cdot u^{0,366}) \quad (3.14)$$

mit α_L Wärmeübergangskoeffizient in W/(m²·K)

u Windgeschwindigkeit in m/s

Einen Überblick über die Entwicklung dieser Funktionen zeigt Abb. 3-4. Der Kurvenverlauf von KREBS liegt zwischen den beiden anderen Kurven, von einem niedrigen Anfangswert steigt diese zuerst schnell an und berührt die obere Kurve, danach nähert sie sich wieder der unteren Kurve an.

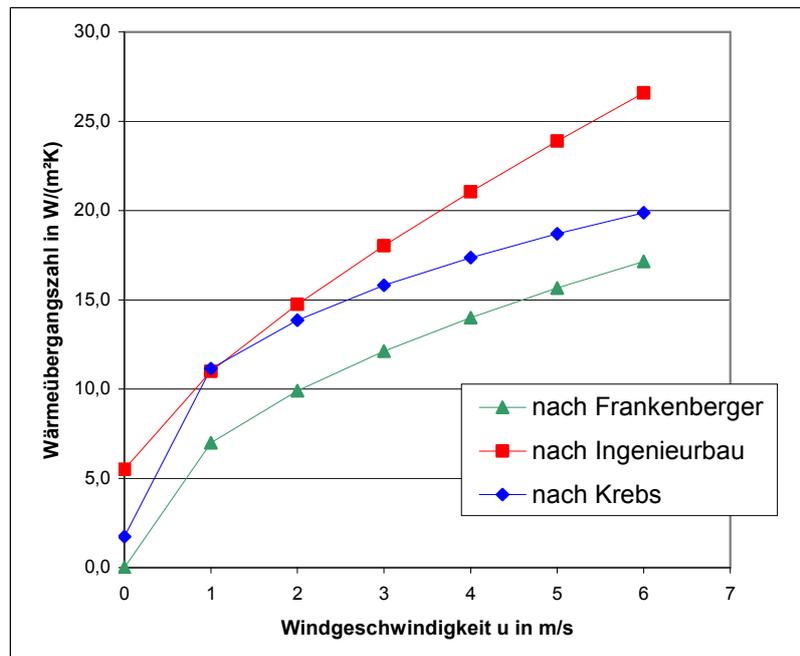


Abb. 3-4: Wärmeübergangszahl in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit u nimmt zur Bodenoberfläche hin ab, bis sie an der Bodenoberfläche in einer Grenzluftschicht eine Geschwindigkeit $u = 0$ erreicht. Nach GEIGER (1961) ergibt sich für u eine Wurzelfunktion in Abhängigkeit von der Bodenhöhe [39]. In Bodennähe beträgt die Windgeschwindigkeit 2 bis 6 m/s, in Süddeutschland ist sie in der Regel geringer als in Norddeutschland. Bei starker Sonneneinstrahlung liegen durch die erhöhte Konvektion um 50 % höhere Werte vor, nachts sind sie um 50% geringer [44].

Um den durch den Verkehr hervorgerufenen zusätzlichen Wind zu berücksichtigen, wird nach KREBS eine dynamisch verursachte Wärmeübergangszahl α_L^* eingeführt. Bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 80 km/h beträgt $\alpha_L^* = 30 \text{ W/(m}^2\text{-K)}$ [39]. Diese ergibt mit der natürlichen Wärmeübergangskoeffizienten eine gemittelte Wärmeübergangszahl $\bar{\alpha}_L$:

$$\bar{\alpha}_L = \frac{(60 - t_W) \cdot \alpha_L + t_W \cdot \alpha_L^*}{60} \quad (3.15)$$

mit t_W gesamte Überfahrtzeit des Verkehrs in min
(je Pkw: 6 s, je Lkw: 11 s)

Insgesamt ergeben sich für die Wärmeübergangszahl α_L realistische Werte zwischen 10 und bis zu 25 W/(m²·K), im Mittel wird für die weiteren Berechnungen $\alpha_L = 13$ W/(m²·K) angenommen.

3.3 Thermische Einflussgrößen

Die Witterung bestimmt als äußere Belastung die Temperaturverteilung in der Fahrbahnbefestigung. Einflussgrößen sind die Lufttemperatur, die Strahlung sowie die relative Luftfeuchtigkeit, der Niederschlag und der Wind.

Durch Aufzeichnungen des Instituts für Solarenergieforschung aus Hameln (ISFH) [35] liegen die Lufttemperatur und die kurzwellige Strahlung der Stadt Hameln für die Jahre 2003 bis 2006 in Stundenwerten vor. Die Daten werden in den beiden folgenden Unterkapiteln 3.3.1 und 3.3.2 näher betrachtet. Für die langwellige Strahlung sind keine stundengenauen Messwerte verfügbar, daher wird sie im Kapitel 3.3.3 theoretisch hergeleitet. Die weiteren Einflussgrößen, relative Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und Wind, werden aus den in den Kapiteln 3.1 und 3.2 genannten Gründen in der vorliegenden Berechnung nicht explizit berücksichtigt. Daher ist eine nähere Betrachtung hier nicht notwendig.

3.3.1 Lufttemperatur

In Abb. 3-5 sind die Monatsganglinien der Lufttemperatur für die Jahre 2003 bis 2006 dargestellt. Außerdem ist ebenfalls von Hameln der mittlere Temperaturverlauf der Jahre 1961-1990 vom Deutschen Wetterdienst (DWD) [17] eingetragen. Über den Durchschnittstemperaturen liegen die Temperaturwerte der Jahre 2003 und 2006. Der Sommer 2003 gilt als „Jahrhundertsommer“ [17], allerdings ist der Juli 2006 wärmer, der Jahresmittelwert 2006 liegt sogar 0,5 °C über dem Jahr 2003 (Werte siehe Tab. 3-4). Insgesamt erreicht der Mittelwert der letzten vier Jahre (2003 bis 2006) eine höhere Temperatur als 9,2 °C, welche dem Durchschnittswert von 1961-1990 [17] entspricht.

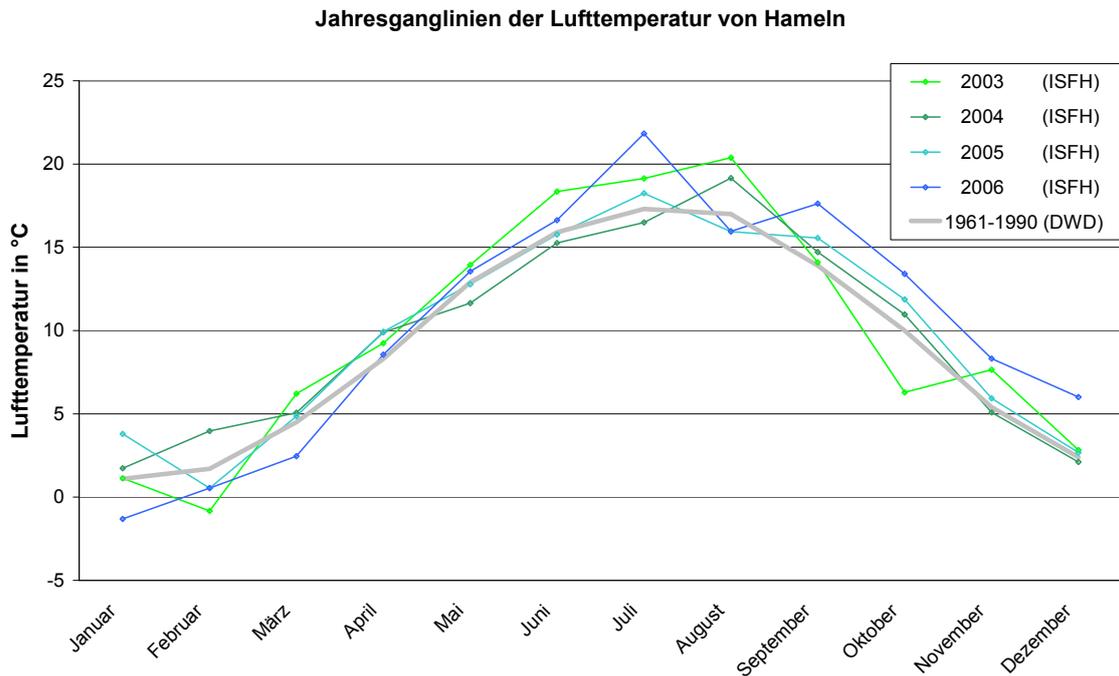


Abb. 3-5: Jahresganglinien der mittleren Lufttemperatur für 2003 bis 2006 und Durchschnittswerte 1961-1990 (Daten von ISFH und DWD)

| Jahr | Min. | Max. | Mittelwert |
|--------|-------|------|------------|
| 2003 | -15,0 | 36,7 | 9,9 |
| 2004 | -6,9 | 31,4 | 9,7 |
| 2005 | -13,2 | 31,6 | 9,9 |
| 2006 | -12,5 | 35,2 | 10,4 |
| gesamt | | | 10,0 |

Tab. 3-4: minimale, maximale und mittlere Jahrestemperatur (ISFH)

Da das Jahr 2006 den aktuellsten Daten entspricht und zudem hohe Temperaturen aufweist, welche die Spurrinnenbildung beschleunigen, wird dieses im Weiteren als Referenzjahr verwendet. Abb. 3-6 zeigt für das Jahr 2006 den Verlauf der mittleren Tagestemperaturen und die zu jedem Tag gehörigen Minimal- und Maximalwerte. Die niedrigste Temperatur ist am 27. Januar um 09:00 Uhr gemessen worden, die höchste Temperatur im Juli (größter Stundenwert am 20.07. um 14:00 Uhr und höchster Tagesmittelwert von 25,6 °C am 26.07.). Die Temperaturschwankungen innerhalb eines Tages sind in den Sommermonaten (Mai – September) stärker ausgeprägt als in den Wintermonaten.

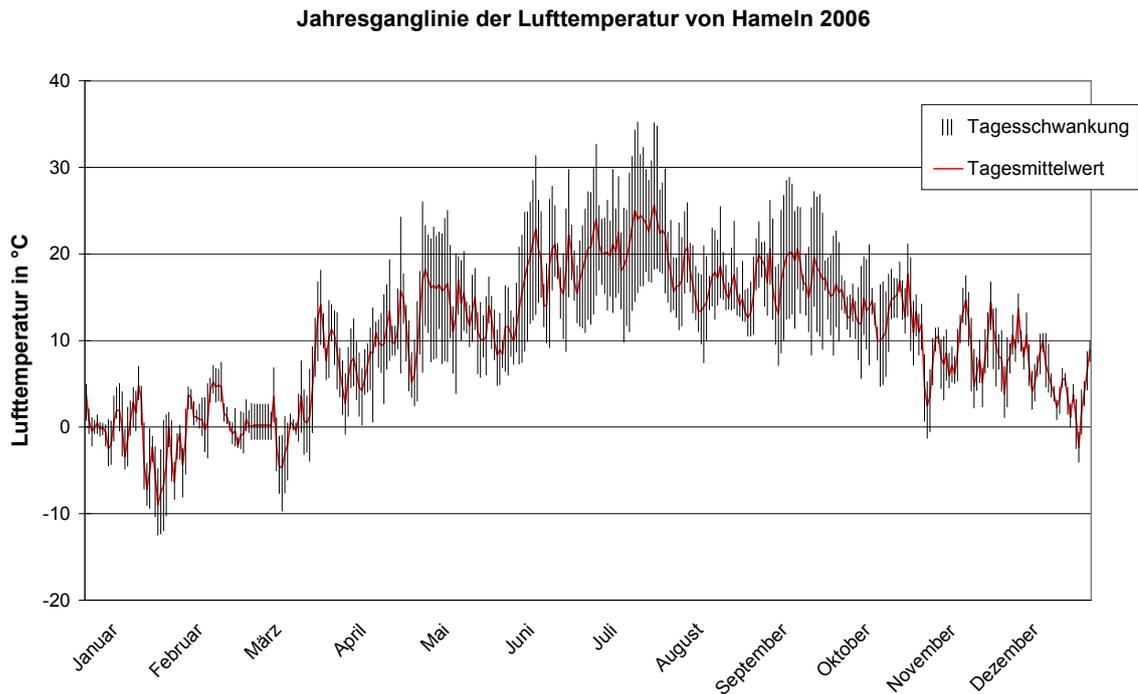


Abb. 3-6: Jahresganglinie der täglichen mittleren, minimalen und maximalen Lufttemperatur für 2006 (Daten von ISFH)

3.3.2 Sonneneinstrahlung

Die Globalstrahlung oder Sonneneinstrahlung wird mit einem Pyranometer gemessen. Sie besitzt sowohl eine Jahresganglinie als auch eine Tagesganglinie. Der jährliche, sinusförmige Verlauf der Globalstrahlung für das Jahr 2006 ist in Abb. 3-7 zu sehen; im Winter ist der monatliche Mittelwert niedriger, im Sommer höher. Im Vergleich zu den Jahren 2003 bis 2005 nach Tab. 3-5 ist zu erkennen, dass zwar im Jahr 2006 die höchste maximale Globalstrahlung auftritt, aber das Jahr 2003 demgegenüber einen höheren Mittelwert aufweist.

| Jahr | Min. | Max. | Mittelwert |
|--------|------|-------|------------|
| 2003 | 0 | 930,6 | 132,4 |
| 2004 | 0 | 930,9 | 117,9 |
| 2005 | 0 | 911,9 | 121,3 |
| 2006 | 0 | 960,8 | 122,8 |
| gesamt | | | 123,6 |

Tab. 3-5: minimale, maximale und mittlere Globalstrahlung (ISFH)

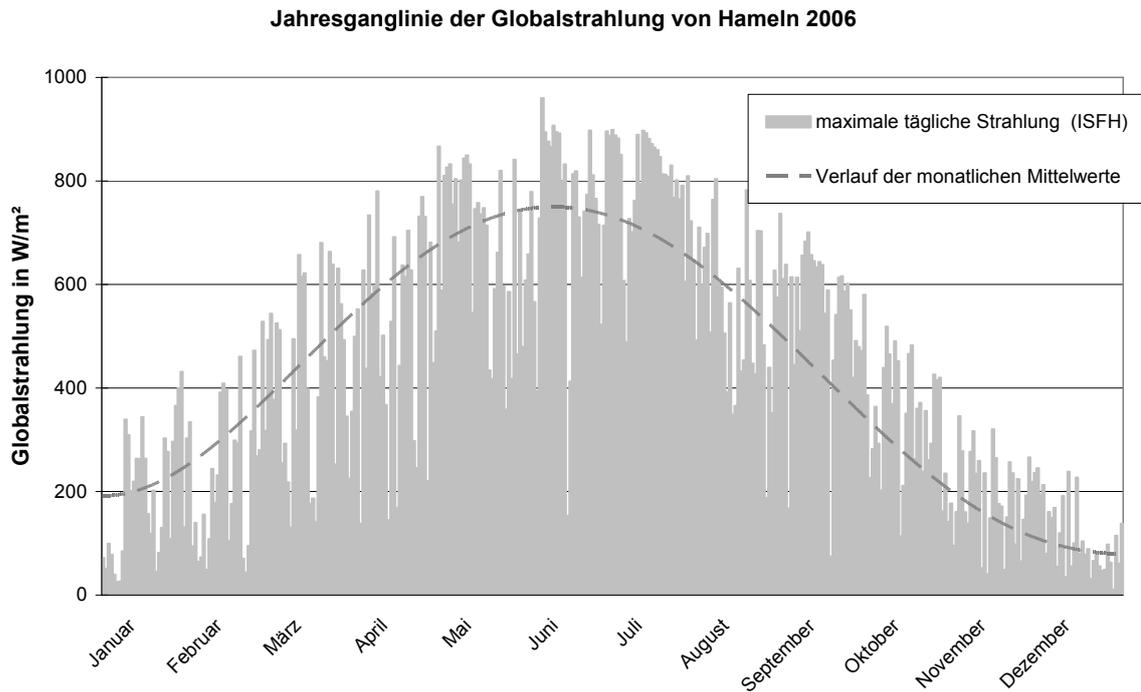


Abb. 3-7: Jahresganglinie der maximalen Globalstrahlung für 2006 (Daten von ISFH)

Abb. 3-8 zeigt die Tagesganglinie der Globalstrahlung für die Tage mit dem größten Stundenwert (07. Juni, um 13:00 Uhr) und der höchsten Gesamtsumme (11. Juni) des Jahres 2006. Im Vergleich hierzu ist auch der statistische Verlauf für einen Tag im Juni aus der DIN 4710 [18] dargestellt. An diesen beiden strahlungsstärksten Tagen tritt die maximale Temperatur erst jeweils um 16:00 Uhr auf, die Temperatur reagiert auf die Globalstrahlung quasi zeitverzögert.

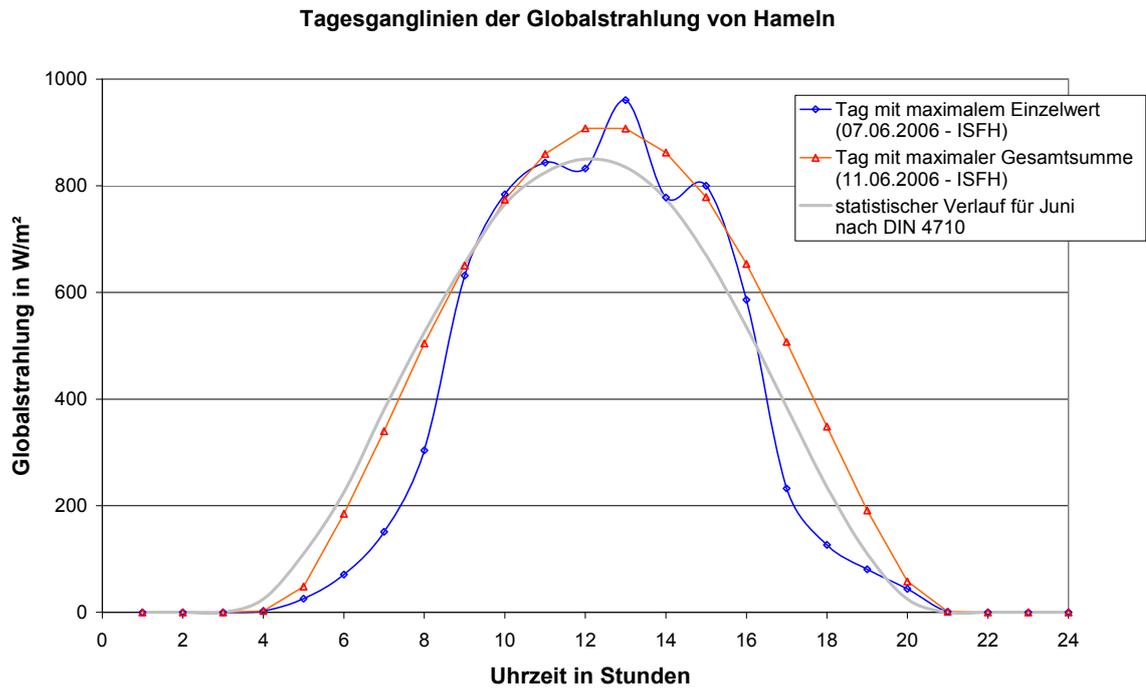


Abb. 3-8: Tagesganglinien der maximalen Globalstrahlung von 2006 (Daten von ISFH und DIN 4710)

3.3.3 Langwellige Strahlung

Die atmosphärische Gegenstrahlung AG kann mit einem Pyrogeometer gemessen werden. Meist, wie auch in diesem Fall, liegen deren Daten nicht vor und müssen daher rechnerisch ermittelt werden.

So kann die atmosphärische Gegenstrahlung AG aus empirischen Formeln abgeleitet werden, beispielsweise nach Baur und Philips (in Häckel, [29]):

$$Q_{AG} = 0,71 \cdot \sigma_{SB} \cdot T_L^4 \quad (3.16)$$

mit σ_{SB} Stefan-Boltzmann-Konstante

T_L Lufttemperatur in °C

Ebenso sind Gegenstrahlungswerte in tabellarischer Form in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit gegeben, z. B. bei Loiskandl [41]. Diese Tabellenwerte sind hier wiederum mittels Mathematikprogramm in Polynomfunktionen umgesetzt worden und zusammen mit der Formel nach Baur und Philips in Abb. 3-9 dargestellt.

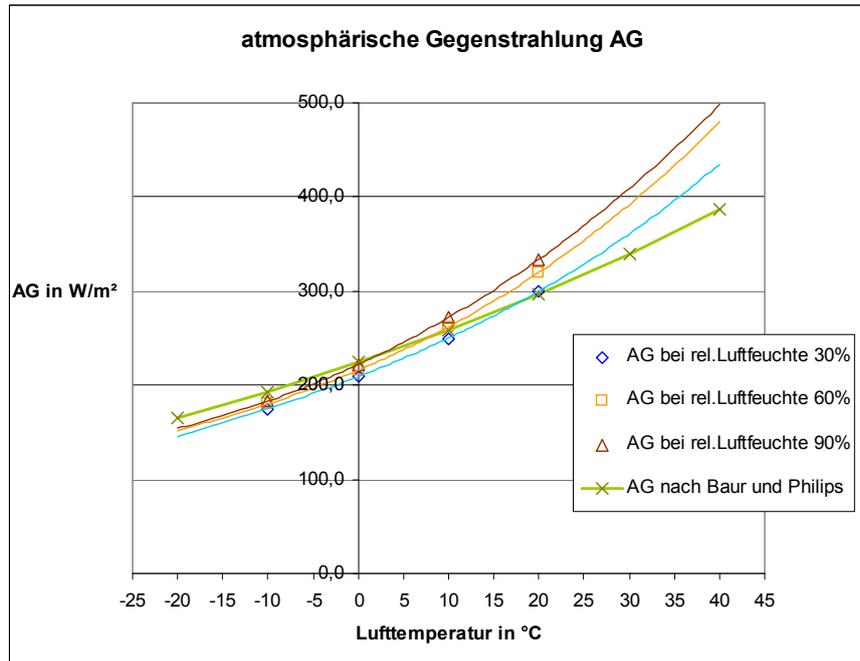


Abb. 3-9: Atmosphärische Gegenstrahlung

Wie die Abb. 3-9 zeigt, liegt der Verlauf der Funktion nach Baur und Philips im Bereich der anderen Kurven. Da diese außerdem die atmosphärische Gegenstrahlung wiedergibt, ohne dass die relative Luftfeuchtigkeit gemessen oder abgeschätzt werden muss, wird sie im Folgenden verwendet.

3.4 Temperaturverteilung mit FEM

Um die Temperatur in der Fahrbahnbefestigung zu ermitteln, wird in einem FEM-Programm ein zweidimensionales Modell der Fahrbahnkonstruktion aufgestellt und in dieses die thermische Beanspruchung übertragen. Zu jedem Zeitpunkt des Jahres, d.h. stundengenau, kann die Temperaturverteilung über die Tiefe ausgegeben werden.

3.4.1 Aufbau des Modells

Neben dem Aufbau des Modells werden hier die Randbedingungen beschrieben, unter denen die Simulation der Temperaturentwicklung durchgeführt wird.

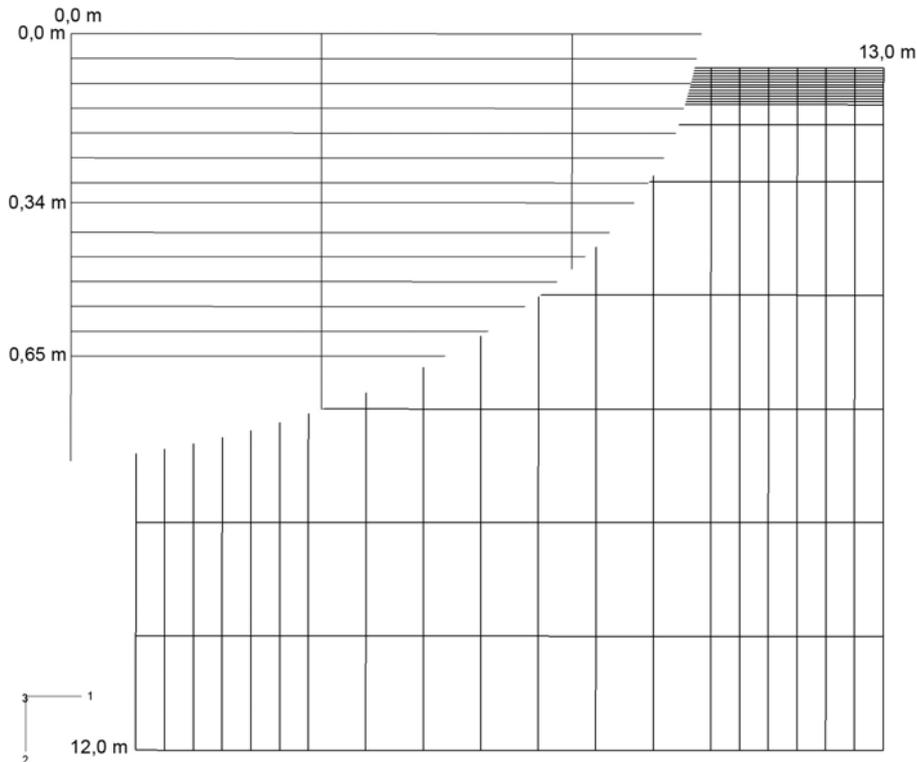


Abb. 3-10: 2D-Modell zur Temperaturberechnung im FEM-Programm

Zur Verringerung des Rechenaufwandes wird die Fahrbahnkonstruktion auf ein zweidimensionales (2D-) Modell reduziert. Hierbei wird nur der Querschnitt der Straße modelliert, und in Längsrichtung eine konstante Temperaturverteilung angenommen. Abb. 3-10 zeigt dieses 13 m breite und 12 m tiefe zweidimensionale Berechnungsmodell. Die 10,0 m breite Asphaltbefestigung mit darunter liegender FSS liegt in der Mitte des Modells, dabei bleiben die Schichtdicken des Asphaltpaketes und der FSS die gleichen wie im dreidimensionalen Modell nach Kapitel 2.2 und 2.3. Die unbefestigten Randbereiche (Mittelstreifen bzw. Bankette) sind jeweils 1,5 m breit und genauso wie die unter der FSS liegenden Schichten mit Bodeneigenschaften versehen. Horizontal in den Übergangsbereichen von der Asphaltsschicht zum Boden ist die Vermaschung enger. Vertikal sind die oberen Schichten feiner modelliert (Asphaltsschicht und FSS im 5 cm-Abstand – siehe linker Ausschnitt von Abb. 3-10). Damit gibt es über die Tiefe acht (BK SV) bzw. sechs (BK III) Knoten, welche innerhalb der Asphaltsschicht liegen. Der sich anschließende Boden ist gröber unterteilt (unterer Bereich im 2 m-Abstand), ohne die Ergebnisse durch diese Vereinfachung zu beeinflussen, da der Einfluss der tiefer liegenden Schichten auf die Temperatur-

entwicklung in der Asphaltsschicht begrenzt ist. Insgesamt besitzt das Modell 20 Knoten in der Breite und 19 in der Tiefe.

Die Temperaturschwankungen nehmen mit wachsender Tiefe ab. Bei einer Messtiefe von ca. 12 m beträgt die Temperatur konstant ca. 10 °C [26]. Daher werden die Knotentemperaturen an der Unterseite des Modells konstant auf 10 °C gesetzt. Für alle restlichen Knoten in den verschiedenen Tiefen werden Startbedingungen vorgegeben. Wenn alle Knoten mit einer Temperatur von 10 °C starten, dann benötigt das System Monate, um sich mit einer Genauigkeit von +/-1 °C auf die realen Werte einzupendeln. Aus diesem Grund wird das Jahr 2003 mehrmals berechnet und die am Jahresende errechneten Knotentemperaturen werden als Startwerte erneut eingesetzt. Für die Folgejahre werden jeweils die Endtemperaturen der Vorjahre verwendet.

Auf die Oberfläche der Asphaltbefestigung wirkt sowohl die Globalstrahlung G als auch die atmosphärische Gegenstrahlung AG . Die Oberfläche der unbefestigten Randbereiche ist normalerweise begrünt und daher keiner direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt. Hier wird nur die atmosphärische Gegenstrahlung AG angesetzt. Dagegen wirken bei beiden Oberflächen die langwellige Ausstrahlung A und die Konvektion L , deren Wärmeübergangskoeffizient α_L sich aber für Asphalt und Boden unterscheidet.

Aus den Strahlungs- und Temperaturwerten der Jahre 2003 bis 2006 (Datenbasis ISFH) wird stündlich die Temperaturverteilung im Modell ermittelt. In einer Datei gesondert ausgegeben werden die in der Mitte der Konstruktion liegenden Knoten von der Oberseite der Asphaltbefestigung bis zur Unterseite des Modells (12 m). Diese Temperaturverteilungen werden in den weiteren Diagrammen dargestellt.

3.4.2 Ergebnisse der Simulationen

Die für jeden Monat gültigen Temperaturverläufe in der Fahrbahnbefestigung sind gemittelt über die Jahre 2003-2006 in Abb. 3-11 dargestellt. Ebenso wie aus den Lufttemperaturen in Kapitel 3.3.1 hervorgeht, sind in Tab. 3-6 die wärmeren Jahre 2003 und 2006 zu erkennen. Durch den Energieverlust aus langwelliger Ausstrahlung von der Erdoberfläche kann die Oberflächentemperatur kleinere Werte aufweisen als die Lufttemperatur (vergleiche minimale Werte von Tab. 3-4 und Tab. 3-6) [50].

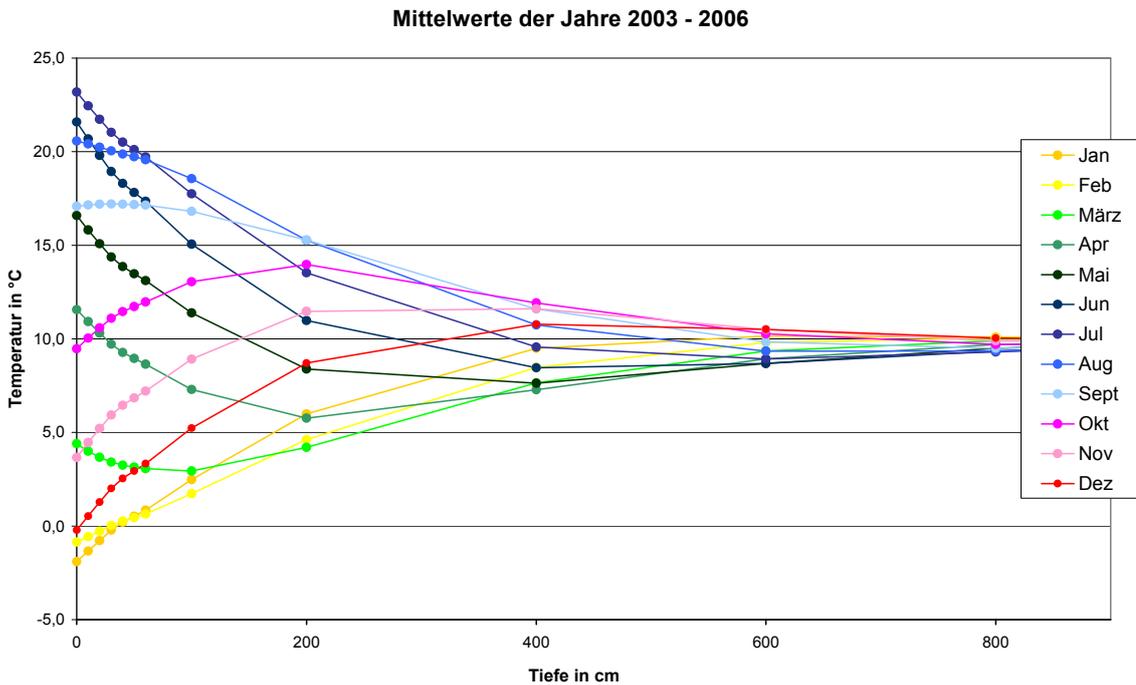


Abb. 3-11: Temperaturverläufe in der Fahrbahnbefestigung nach Monaten

| Jahr | Min. | Max. | Mittelwert |
|--------|-------|------|------------|
| 2003 | -14,7 | 50,1 | 10,9 |
| 2004 | -7,2 | 48,4 | 10,0 |
| 2005 | -11,7 | 49,2 | 10,3 |
| 2006 | -12,7 | 50,9 | 10,8 |
| gesamt | | | 10,7 |

Tab. 3-6: minimale, maximale und mittlere Oberflächentemperaturen

Im Gegensatz zur Globalstrahlung, die im Juni Maximalwerte besitzt (siehe Kapitel 3.3.2), tritt im Jahr 2006 die maximale Oberflächentemperatur ebenso wie die maximale Lufttemperatur (siehe Kapitel 3.3.1) erst im Juli (19.07.2006, 14.00 Uhr) auf. Auch der Tag mit minimaler Oberflächentemperatur stimmt mit dem Tag der minimalen Lufttemperatur am 27.01.2006 überein.

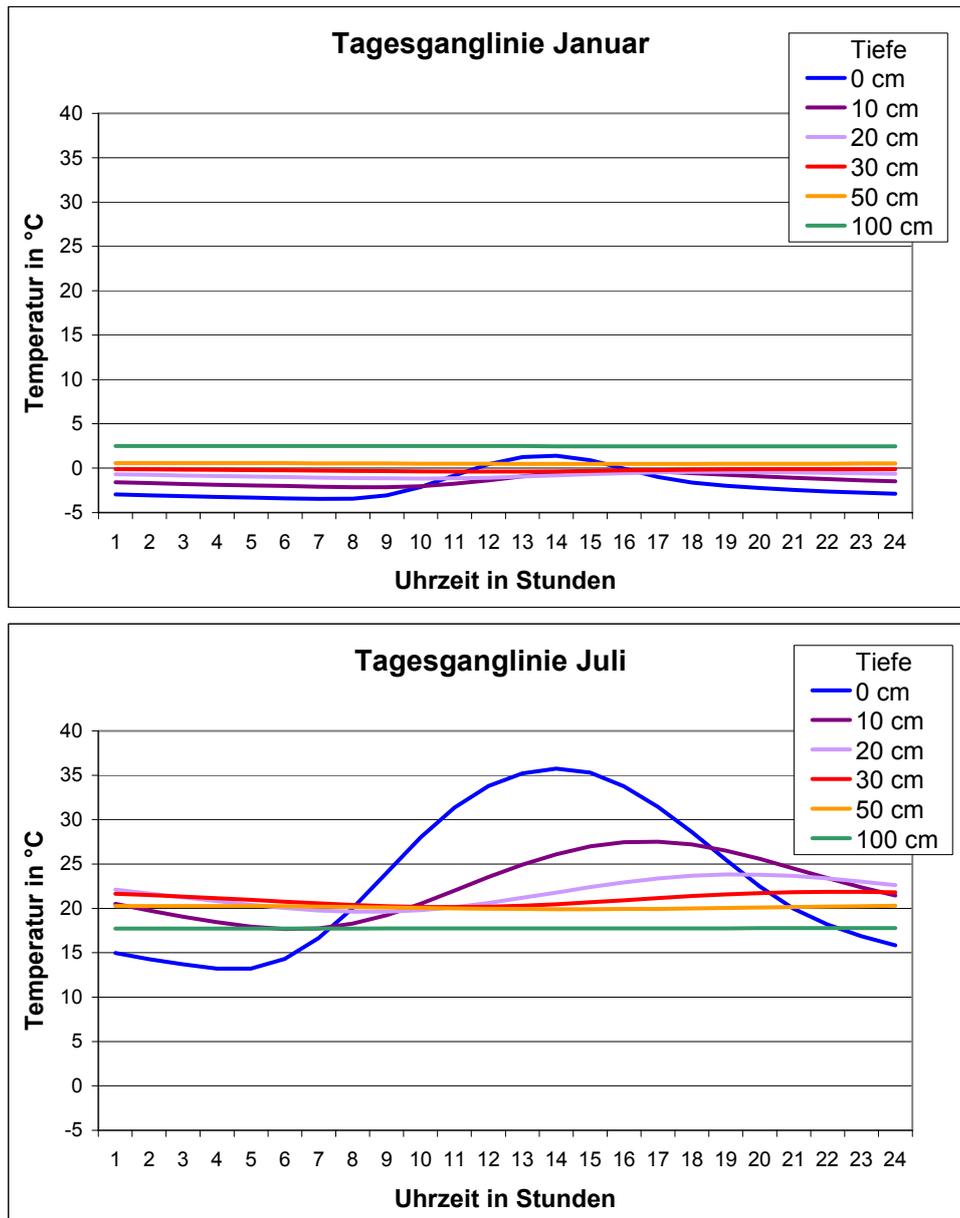


Abb. 3-12: Tagesganglinien der Fahrbahntemperaturen in verschiedenen Tiefen für Januar und Juli

In Abb. 3-12 sind die Tagesganglinien der Temperaturen in verschiedenen Tiefen für einen durchschnittlichen Januar- und Juli-Tag (Winter und Sommer) zu sehen. Die Temperaturen in der Fahrbahnbefestigung nehmen einen zur Lufttemperatur analogen Verlauf, der mit wachsender Tiefe eine größere Phasenverschiebung und kleinere Amplituden aufweist. Wie schon bei der Lufttemperatur festgestellt, sind die Temperaturschwankungen auch in der Fahrbahnbefestigung im Sommer wesentlich größer als im Winter. Bereits in 1,0 m-Tiefe (grüne Kurve) ist in allen Jahreszeiten kaum eine Veränderung der Temperatur über den Tag erkennbar.

Besonders der Juli 2006 weist hohe Fahrbahntemperaturen in der Befestigung auf, wie die über den Monat gemittelten Stundentemperaturverläufe aus Abb. 3-13 zeigen. Die Temperaturen der Fahrbahnbefestigung im Juli 2006 liegen weit über den Mittelwerten aus den Jahren 2003 bis 2006 (siehe Abb. 3-11). Hier sind die Temperaturverläufe an einem Punkt des Querschnitts in zweistündigen Intervallen dargestellt, um die über den Tag verteilten Temperaturkurven in der Fahrbahnbefestigung zu verdeutlichen. Um 04:00 Uhr ist die Oberflächentemperatur am niedrigsten (mit gelben Δ -Symbolen gekennzeichnet), ab 08:00 Uhr steigt die Temperatur an der Oberfläche über die Temperatur im Inneren der Asphaltbefestigung. Um 14:00 Uhr erreicht bereits die Oberflächentemperatur ihren Höhepunkt (mit blauen Δ -Symbolen gekennzeichnet). Danach fallen die Temperaturen wieder, ab 20:00 Uhr sind die Temperaturen an der Oberfläche kleiner als in der Befestigung. Die über den Tag in der Fahrbahnbefestigung mittlere Temperatur – grau dargestellt – wird zweimal täglich durchlaufen, um ca. 09.00 Uhr und um ca. 21.00 Uhr.

Diese Temperaturverteilung im Juli 2006 wird in dieser Untersuchung im Weiteren zur Bemessung verwendet. Dabei wird von einer Temperaturganglinie ausgegangen, die im Bereich von 13.00 Uhr bis 16.00 Uhr liegt (vergleiche S. 98: Fahrbahnzustand „warm“).

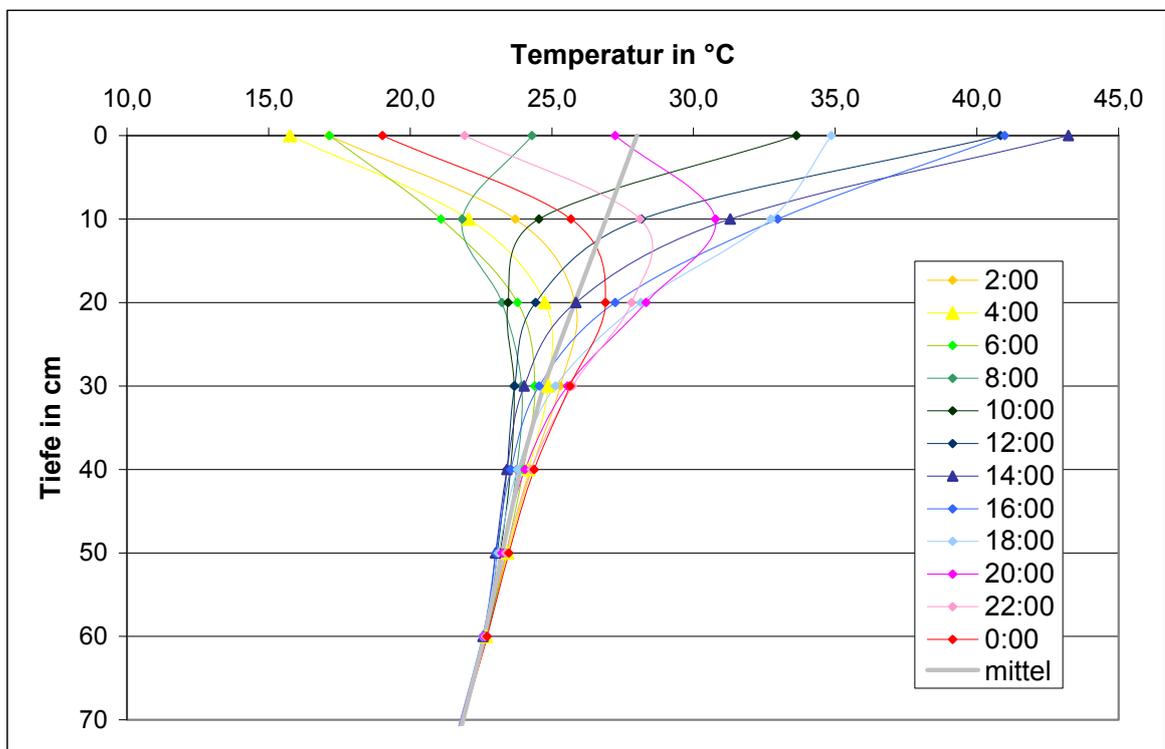


Abb. 3-13: Temperaturverläufe in verschiedenen Tiefen für einen Durchschnittstag im Juli 2006

Aus der Simulation der verschiedenen Bauklassen SV und III zeigen sich sehr geringe Unterschiede. Die höchsten Temperaturdifferenzen zwischen diesen beiden Bauklassen treten im Übergangsbereich zwischen Asphaltsschicht und FSS auf und betragen maximal 1,4 °C, mit einer mittleren Standardabweichung von 0,1 °C. Daher reicht in der Praxis zur Bestimmung der Temperaturverteilung in der Fahrbahnbefestigung eine ungefähre Angabe der Schichtdicken aus. In den weiteren Temperaturberechnungen wird ebenfalls nur eine Bauklasse betrachtet (gewählt: BK SV).

Die relativen Summenhäufigkeiten der Asphaltkörpertemperaturen in verschiedenen Tiefen für die Klimazone II, welche auch Hannover einschließt, sind im Arbeitspapier 25/B2.1 „Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen“ [2] angegeben. Hier liegt die maximale Oberflächentemperatur bei 47 bis 49 °C. Die Differenz zur nächstkleineren Temperaturspanne (45 bis 47 °C) beträgt 0,02 %. Übertragen auf die Stundenhäufigkeit bedeutet dies, dass an ca. 2 Stunden im Jahr eine Temperatur von 47 bis 49 °C erreicht wird. Die Ergebnisse decken sich auch mit den Aussagen von HÄCKEL [29], der im Hochsommer für Asphaltoberflächen eine maximale Temperatur von ca. 48 °C angibt. Die maximalen simulierten Oberflächentemperaturen der Jahre 2004 und 2005 liegen in der Temperaturspanne der maximalen Oberflächentemperaturen des Arbeitspapiers, siehe Tab. 3-6. In den Jahren 2003 und 2006 werden diese Oberflächentemperaturen mit 50 °C und 51 °C überschritten, siehe Tab. 3-6. Allerdings sind diese beiden Jahre auch außergewöhnlich warm gewesen [17].

Bei einer unbefahrenen Straße können Temperaturen von 65 bis 70 °C auftreten; derartige Temperaturen sind in der Praxis gemessen worden [2]. Die im Vergleich relativ niedrigen Werte in dieser Untersuchung und im Arbeitspapier 25/B2.1 sind durch den Einfluss des Verkehrs (siehe Gleichung (3.15)) und die damit gewählte große Wärmeübergangszahl α_L begründbar. Ebenfalls höhere Oberflächentemperaturen sind in der Klimazone I (küstennaher Bereich) zu finden, diese können bis zu ca. 56 °C betragen [2].

3.5 Temperaturverteilung mit Differenzenverfahren

Eine weitere Möglichkeit, die Temperatur in der Fahrbahnbefestigung zu errechnen, ist das modifizierte Temperatur-Differenzen-Verfahren nach BÖLLINGER [9]. Dieses Verfahren ermöglicht eine gegenüber der FE-Methode einfachere und schnellere Ermittlung des Temperaturverlaufs, so dass hiermit die Auswirkungen der einzelnen Werkstoffeigen-

schaften getestet werden und die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Abschätzung der Temperatur in der Fahrbahnbefestigung erprobt wird. Es wird in zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen angewendet, z.B. [50], [64].

3.5.1 Theorie und Simulationsergebnisse

Mit Hilfe des Differenzen-Verfahrens kann die instationäre, eindimensionale Wärmeströmung in festen Körpern ohne innere Wärmequellen bei konstanten Stoffgrößen beschrieben werden. Bei Kenntnis der Lufttemperatur, der Sonneneinstrahlung, der Windgeschwindigkeit, der Untergrundtemperatur und einiger materialspezifischer Parameter lässt sich durch diesen Algorithmus aus einer bekannten Temperaturverteilung die zeitlich darauf folgende Temperaturverteilung ermitteln.

Im Folgenden werden die für das Differenzen-Verfahren notwendigen Funktionen vorgestellt. Die dem Verfahren zugrunde liegende Theorie ist ausführlich bei KREBS und BÖLLINGER [39] beschrieben.

In der Berechnung wird die **Temperaturleitzahl a** in cm^2/h benötigt. Abweichend von Gleichung (3.11) wird in den vorliegenden Berechnungen der Temperaturleitzahl a folgende, einer anderen Einheit (cm^2/h) angepasste Formel benutzt:

$$a = 3600 \cdot \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (3.17)$$

mit λ Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
 c Wärmekapazität in $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$
 ρ Rohdichte in g/cm^3

Innerhalb der Fahrbahnbefestigung kann die **Temperatur $T_{n,k+1}$ an der Tiefenposition n** zum Zeitpunkt $k+1$ in K nach folgender Formel bestimmt werden:

$$T_{n,k+1} = a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T_{n+1,k} - 2 \cdot T_{n,k} + T_{n-1,k}) + T_{n,k} \quad (3.18)$$

mit a Temperaturleitzahl in cm^2/h
 Δt Zeitintervall in h
 Δx Abstand der Tiefenpositionen in cm

3.5 Temperaturbeanspruchung - Temperaturverteilung mit Differenzenverfahren

$T_{n,k}$ Temperatur an der Tiefenposition n zum Zeitpunkt k in K

Zur weiteren Berechnung wird die **fiktive Lufttemperatur** T_L^* in K benötigt:

$$T_L^* = T_L + \frac{Q(t)}{\alpha(u)} \quad (3.19)$$

mit T_L Lufttemperatur in K

$Q(t)$ Strahlungsbilanz als Funktion der Zeit t in W/m^2

$\alpha(u)$ Wärmeübergangszahl als Funktion der Windgeschwindigkeit u in $W/(m^2 \cdot K)$

Mit der fiktiven Lufttemperatur lässt sich die **Temperatur** $T_{1,k+1}$ **an der Tiefenposition 1** zum Zeitpunkt $k+1$ in K berechnen.

$$T_{1,k+1} = a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot \left[T_{2,k} - 2 \cdot T_{1,k} - \frac{T_{L,k}^* - T_{O,k}}{\lambda/\alpha_k} \cdot (\lambda/\alpha_k - \Delta x/200) + T_{L,k}^* \right] + T_{1,k} \quad (3.20)$$

mit $T_{n,k}$ Temperatur an der Tiefenposition n zum Zeitpunkt k in K

$T_{L,k}^*$ fiktive Lufttemperatur zum Zeitpunkt k in K

$T_{O,k}$ Temperatur an der Straßenoberfläche zum Zeitpunkt k in K

α_k Wärmeübergangszahl zum Zeitpunkt k in $W/(m^2 \cdot K)$

Direkt an der Oberfläche der Fahrbahnbefestigung ergibt sich die **Oberflächentemperatur** $T_{O,k+1}$ zum Zeitpunkt $k+1$ in K aus:

$$T_{O,k+1} = - \frac{T_{L,k+1}^* - T_{1,k+1}}{(\lambda/\alpha_{k+1} + \Delta x/200)} \cdot \lambda/\alpha_{k+1} + T_{L,k+1}^* \quad (3.21)$$

mit $T_{L,k+1}^*$ fiktive Lufttemperatur zum Zeitpunkt $k+1$ in K

$T_{1,k+1}$ Temperatur an der Tiefenposition 1 zum Zeitpunkt $k+1$ in K

α_{k+1} Wärmeübergangszahl zum Zeitpunkt $k+1$ in $W/(m^2 \cdot K)$

Das Verfahren ist numerisch stabil, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \quad (3.22)$$

Wird die oben stehende Bedingung nicht eingehalten, so ergeben sich im Jahresverlauf nicht plausible Temperaturen.

Ebenso wie bei der FEM-Untersuchung (siehe Kapitel 3.4) werden mit dem Differenzenverfahren die Jahre 2003 bis 2006 simuliert. Um die in Gleichung (3.22) geforderte Stabilität zu gewährleisten, muss durch die vorgegebenen Parameter (Temperaturleitzahl $a = 21$ cm/h für Asphalt und Boden, $a = 40$ cm/h für Frostschuttschicht, Stundenwerte der Temperatur und der Globalstrahlung) eine Schrittweite von $\Delta x = 10$ cm gewählt werden.

Im Vergleich ergeben das FEM-Programm und das Temperatur-Differenzenverfahren über das Jahr im Mittel gleiche Ergebnisse. Allerdings reagiert die Differenzen-Methode gegenüber FEM an der Oberfläche der Befestigung rascher und sensibler. Stärkere Ausschläge entstehen, wenn plötzliche Änderungen der Strahlungsbilanz (z.B. bei Wärmegeittern) wie in Abb. 3-14 auftreten. Temperaturunterschiede von bis zu 8,4 °C an der Oberfläche sind die Folge, die aber bereits in einer Tiefe von 20 cm stark abklingen. Die mittlere Standardabweichung der beiden Verfahren liegt daher in der Asphalttschicht bei 0,7 bis 1,3 °C. Dagegen weichen die Mittelwerte in der gesamten Fahrbahnbefestigung nur um maximal 0,1 °C voneinander ab.

Insgesamt kann also das Differenzenverfahren für die weiteren Untersuchungen angewendet werden.

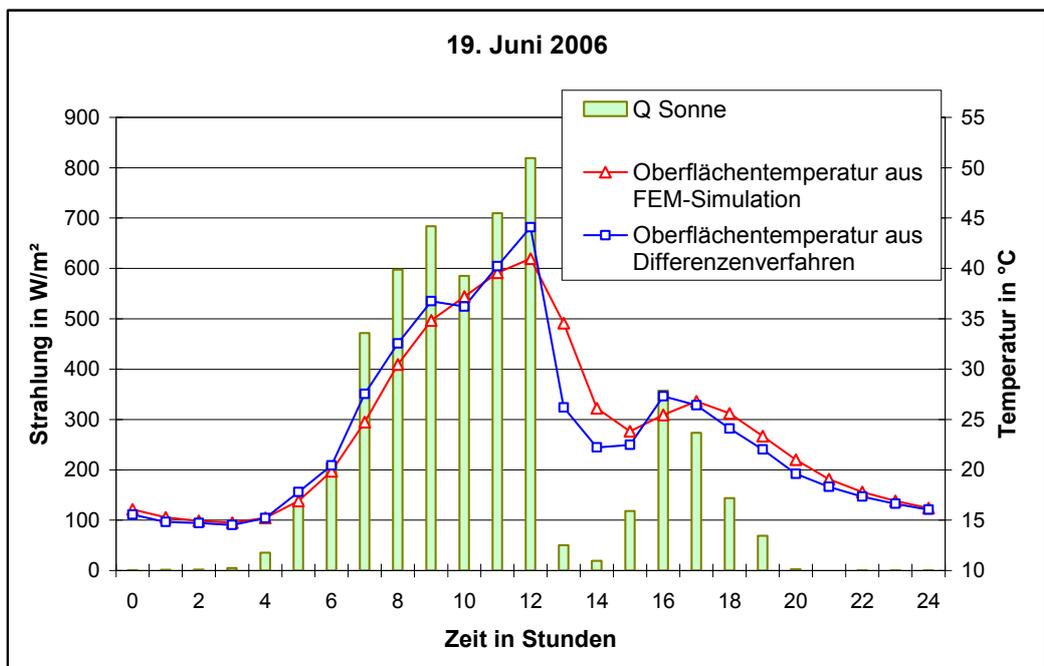


Abb. 3-14: Vergleich der FEM-Simulation und des Differenzenverfahrens

3.5.2 Sensitivitätsanalyse

In einer Parameterstudie werden die Auswirkungen einer Veränderung der thermophysikalischen Eigenschaften (,innere Stoffparameter': Wärmeleitfähigkeit λ , spezifische Wärmekapazität c , Dichte ρ , ,Oberflächenparameter': Albedo α , langwelliger Absorptions-/Emissionskoeffizient ε_L , Wärmeübergangszahl α_L) untersucht. Die Variation der einzelnen Werte richtet sich nach den Spannweiten aus Kapitel 3.2 (siehe Tab. 3-1, Tab. 3-2 und Tab. 3-3). Außerdem wird die Dicke der Asphalt- und Frostschutzschicht variiert, um unterschiedliche Bauklassen zu simulieren. Als Untersuchungsgrundlage dient das komplette Jahr 2006; erfasst werden die mittlere Temperatur, das absolute Maximum und das Minimum des Gesamtjahres. Betrachtet wird zum einen die gesamte Asphalt- und Frostschutzschicht, da die Temperaturen sich dort direkt auf die mechanischen Eigenschaften auswirken, und zum anderen der Untergrund, um Auswirkungen auf diesen zu erkennen.

Die inneren Stoffparameter - λ , c , ρ - zeigen keine großen Auswirkungen auf den Temperaturverlauf; es sei denn, es werden sehr starke Veränderungen vorgenommen, dann haben extreme Werte gegenüber den gewählten Standardwerten größere Auswirkungen (z.B. durch die Verwendung einer sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Bodens folgt eine Minderung des Maximalwertes von bis zu 4,0 °C). Änderungen in der Asphalt- und Frostschutzschicht wirken sich auf den oberen Bereich der Befestigung aus. Die Variation der Parameter in der FSS wirkt sich nicht aus. Änderungen im Boden beeinflussen hauptsächlich den Untergrund.

Bei niedrigerer Wärmeleitfähigkeit λ wird die Temperaturspanne kleiner - das Maximum geringer und das Minimum größer (und umgekehrt). Der Temperaturmittelwert bleibt bei einer Veränderung der Asphaltwerte gleich, sinkt aber mit geringerer Leitfähigkeit im Boden (und umgekehrt). Direkt an der Oberfläche (0 - 10 cm) trifft die in Kapitel 3.2 (S. 28) getroffene Aussage von POHLMANN [50] zu, dass eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Asphalts die Temperaturspanne verringert. In den nachfolgenden Tiefenlagen allerdings sorgt eine hohe Wärmeleitfähigkeit für eine schnelle Anpassung der unteren Schichten an die an der Oberfläche herrschenden Verhältnisse, die Temperaturschwankungen sind größer.

Bei kleinerer Wärmekapazität c oder Dichte ρ fällt das Maximum höher und das Minimum niedriger aus (und umgekehrt). Der Mittelwert ist kaum verändert. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den in Kapitel 3.2 getroffenen Aussagen.

Durch eine hohe Albedo α sinken die Temperaturen in der Fahrbahnbefestigung (und umgekehrt). Es kann eine Verringerung der maximalen Temperaturen um bis zu 5 °C erreicht werden; eine Absenkung von bis zu 10 °C (siehe Kapitel 3.2, nach POHLMANN [50]) ist nach vorgegebenen Albedowerten aus Tab. 3-2 zu keinem Zeitpunkt des Jahres gegeben.

Der langwellige Absorptions-/Emissionskoeffizient ϵ_L beeinflusst mit seinen geringen Schwankungen kaum die Temperatur, höhere Werte führen, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, zu niedrigeren Temperaturen.

Die Wärmeübergangszahl α_L nimmt eine Sonderstellung ein, da sie im Gegensatz zu den anderen Parametern kaum stoffabhängig ist, sondern von der Oberflächenrauheit und Temperatur sowie in hohem Maße von der Windgeschwindigkeit beeinflusst wird. Mit großen Wärmeübergangszahlen sinken die Maximaltemperaturen sehr stark (über 5 °C) (und umgekehrt), der Mittelwert wird kaum verändert. Um die Maximaltemperaturen an einer vorhandenen Straße exakt bestimmen zu können, muss die Verkehrsstärke nach Gleichung (3.15) einbezogen werden.

Ebenso wie bei den Stoffparametern ist der Einfluss von Schichtdicken und dementsprechend verschiedener Bauklassen gering, wie bereits in Kapitel 3.4.2 festgestellt.

Als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse lässt sich festhalten, dass die Stoffparameter aller Schichten mit Ausnahme der Wärmeübergangszahl einen begrenzten Einfluss auf die Temperaturentwicklung haben. Daher reichen im Normalfall für eine Bestimmung der Temperaturverteilung nach Kapitel 3.5.3 allgemein anerkannte Richtwerte der verschiedenen Materialien aus, um die Temperatur hinreichend genau zu ermitteln.

3.5.3 Abschätzung der Temperaturverteilung

Um aus Temperaturdaten in den einzelnen Asphaltsschichten den E-Modul und die viskosen Eigenschaften zu bestimmen, muss über die Befestigungstiefe eine Temperaturverteilung vorliegen. Diese kann nach einer Bohrung und mit in verschiedenen Tiefen angebrachten Temperaturfühlern gemessen werden. Allerdings kann ein unsachgemäßes Vorgehen zu einem gestörten Temperaturverlauf führen. Außerdem ist der Aufwand der Datengewinnung sehr hoch, die Fahrbahnbefestigung geschädigt und das Messergebnis lokal auf den Bereich der Bohrung sowie auf die Anzahl der Temperaturfühler begrenzt.

Daher ist es sinnvoll, nach einem Verfahren zu suchen, mit dessen Hilfe direkt aus der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung sowie historischen Daten und Stoffparametern auf die Temperaturverteilung in einer Befestigung geschlossen werden kann. Grundidee der vorliegenden Methode ist es, ausgehend von einem Startverlauf, die Simulation eines kompletten Tages mit realen Klimadaten auszuführen, um dadurch die Temperatur in den Befestigungsschichten zu erhalten.

Wie in Abb. 3-13 zu sehen ist, sind die Temperaturschwankungen über den Tag im oberflächennahen Bereich der Fahrbahnbefestigung sehr stark, nehmen aber schnell über die Tiefe ab. Wie bei den Lufttemperaturen gibt es im Sommer größere Differenzen der Oberflächentemperaturen. Über einen Tag betragen die Temperaturschwankungen in 1 m-Tiefe weniger als 0,5 °C, innerhalb eines Monats schwanken die Temperaturen dort um maximal 5,0 °C.

Als Annäherung des Temperaturverlaufs kann eine Exponentialfunktion der Form (3.23) dienen (mit T_z = Temperatur in der Tiefe z). An der Oberfläche ($z = 0$) wird der Exponentialausdruck zu 1 und es ergibt sich die Oberflächentemperatur; mit zunehmender Tiefe z läuft die Exponentialfunktion gegen Null, so dass sich die Untergrundtemperatur einstellt. Der Faktor C im Exponenten bestimmt dabei die Geschwindigkeit, mit der sich die Kurve an die Untergrundtemperatur anpasst. Je größer C ist, desto langsamer verläuft die Annäherung an die Untergrundtemperatur:

$$T_z = T_U + (T_O - T_U) \cdot e^{-1/Cz} \quad (3.23)$$

mit T_U Temperatur im Untergrund in °C (entsprechend 10°C)

T_O Temperatur an der Oberfläche in °C

C Funktionsparameter

z Tiefe in Fahrbahnbefestigung in cm

Da aber bei größeren Änderungen der Lufttemperatur lokale Extrempunkte und Wendepunkte im Temperaturverlauf über die Befestigungstiefe eintreten, längerfristig im Frühjahr und Herbst nach Abb. 3-11 oder kurzfristig innerhalb eines Tages durch abrupte Wechsel der Strahlungsintensitäten (vergleiche Abb. 3-15), reicht die Exponentialfunktion der Form (3.23) nicht aus, sondern muss folgendermaßen erweitert werden:

$$T_z = A + (B - A) \cdot e^{-\frac{1}{C} \cdot z} + (D - B) \cdot e^{-\frac{1}{E} \cdot z} + (F - D) \cdot e^{-\frac{1}{G} \cdot z} \quad (3.24)$$

| | | |
|-----|----------------|---|
| mit | <i>A</i> | (fiktive) Temperatur im Untergrund in °C |
| | <i>B</i> | fiktive Oberflächentemperatur in °C |
| | <i>D</i> | Oberflächentemperatur des Monatsmittels in °C |
| | <i>F</i> | reale, aktuelle Oberflächentemperatur in °C |
| | <i>C, E, G</i> | Funktionsparameter |

Der erste Summand in der Gleichung stellt die (fiktive) Temperatur im Untergrund dar, an die sich die darauf folgende Exponentialfunktion angleicht. Die Temperatur *A* muss nicht der realen Untergrundtemperatur T_U von 10 °C entsprechen, da die Exponentialfunktionen mit Realdaten in bis zu 5 m-Tiefe optimiert worden sind und dort höhere oder niedrigere Temperaturen vorliegen können. Die sich an *A* anschließende erste Exponentialfunktion regelt den Temperaturverlauf in der Tiefe, die Größe *B* ist rein fiktiv. Die zweite Exponentialfunktion gilt für den oberflächennahen Bereich: Die Größe *D* entspricht der Oberflächentemperatur des gemittelten Temperaturverlaufs eines Monats, ihr Anteil geht in Abhängigkeit von *E* gegen Null, und so passt sich die Temperatur in der Tiefe an die Kurve der ersten Exponentialfunktion an. Dementsprechend kann durch die ersten drei Summanden für jeden Monat ein mittlerer Temperaturverlauf nach der auf S. 54 beschriebenen Methode ermittelt werden.

Die dritte Exponentialfunktion berücksichtigt durch den Temperaturwert *F* die momentane, vor Ort gemessene Oberflächentemperatur: Ihr Einfluss ist begrenzt, der Wert *G* sehr klein, so dass der Temperaturverlauf nur in den oberen Schichten von den Ergebnissen der über jeden Monat gemittelten Funktion divergiert.

Um die Funktionsweise der Gleichung (3.24) zu verdeutlichen, dient in Abb. 3-15 als Beispiel der Temperaturverlauf eines durchschnittlichen Tages im Januar um 16.00 Uhr. Im Gegensatz zu den Monatsverläufen überlagern sich hier die Bestandteile der einzelnen Glieder der Funktion (3.24) nicht so sehr und sind dadurch besser zu erkennen. Im unteren Bereich von Abb. 3-15 ist der Einfluss der zweiten und dritten Exponentialfunktion über die Tiefe dargestellt. Außerdem wird klar, dass mit der Funktion (3.24) unter eventuellen Erweiterungen nicht nur der mittlere Temperaturverlauf eines Monats nach Abb. 3-11, sondern jede beliebige Tageszeit abbildbar ist.

3.5 Temperaturbeanspruchung - Temperaturverteilung mit Differenzenverfahren

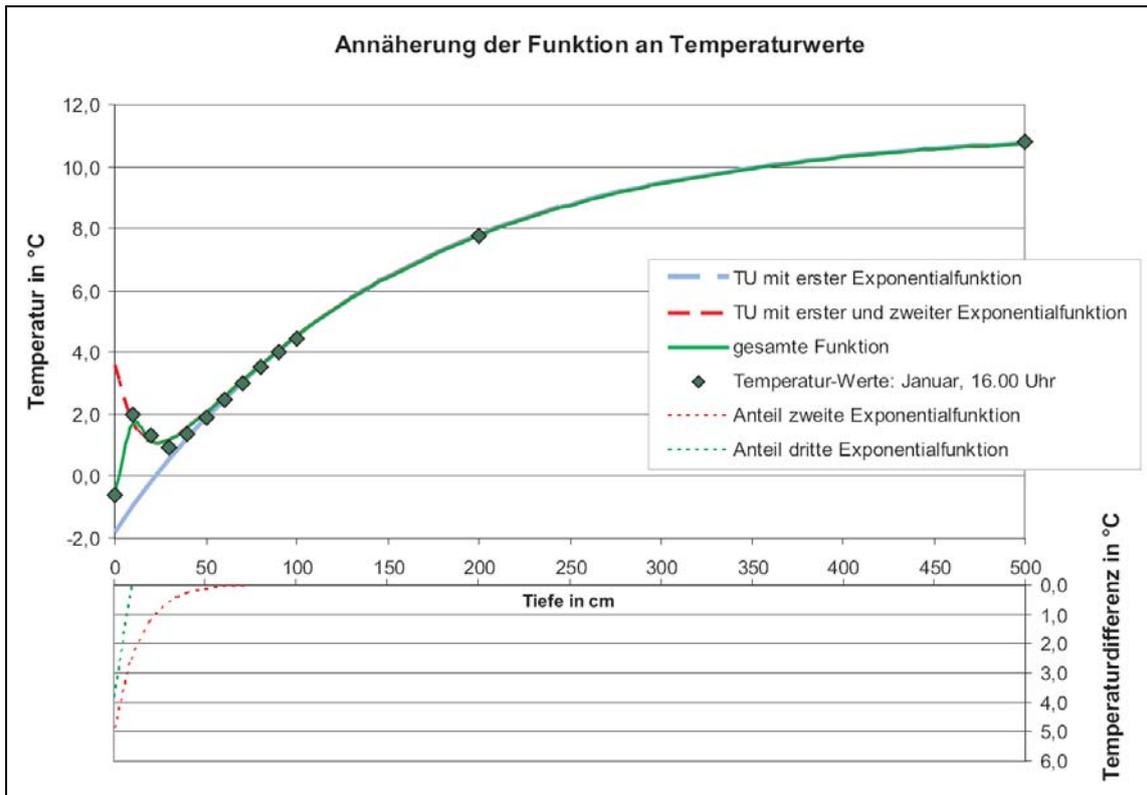


Abb. 3-15: exemplarischer Temperaturverlauf für einen Januar, 16.00 Uhr

Die Parameter A - E ergeben die ersten drei Glieder der Funktion (3.24) und werden mittels einer selbst entwickelten Routine in einem Mathematikprogramm an den für jeden Monat existierenden mittleren Temperaturverlauf aus den Jahren 2003 bis 2006 (siehe Abb. 3-11) über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestmöglich angepasst. Die Ergebnisse des Optimierungsprozesses sind für jeden Monat in Tab. 3-7 aufgelistet.

| | | Jan. | Feb. | Mrz. | Apr. | Mai | Jun. | Jul. | Aug. | Sep. | Okt. | Nov. | Dez. |
|----------|----|-----------------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| A | °C | 11 | 11 | 11 | 11 | 10 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 | 12 |
| B | °C | -5 | -11 | -15 | -20 | -9 | 23 | 28 | 37 | 30 | 33 | 27 | -3 |
| C | | 180 | 200 | 220 | 290 | 350 | 150 | 180 | 200 | 260 | 310 | 350 | 150 |
| D | °C | -2 | -1 | 5 | 11 | 16 | 21 | 23 | 20 | 16 | 9 | 3 | 0 |
| E | | 60 | 110 | 120 | 200 | 220 | 50 | 90 | 120 | 130 | 180 | 190 | 50 |
| F | °C | Oberflächentemperatur | | | | | | | | | | | |
| G | | 20 | | | | | | | | | | | |

Tab. 3-7: Formelparameter der Gleichung (3.24) für jeden Monat

An jedem Tag durchläuft die Temperatur den gemittelten Temperaturverlauf nach Tab. 3-7 zweimal. In den Morgenstunden, um ca. 09.00 Uhr und am Abend, um ca. 21.00 Uhr (siehe Abb. 3-13). Werden diese Uhrzeiten als Startwerte gewählt, braucht keine gesonderte Anpassung der Form der monatlichen Temperaturkurven nach Abb. 3-11 erfolgen. Aber wie Abb. 3-15 zeigt, kann durch das Anfügen weiterer Exponentialfunktionsglieder an die Funktion (3.24) (mit niedrigen Funktionsparametern von 1 bis ca. 50 im Exponenten) auch jede andere Tageszeit nachgebildet werden.

Eine Angleichung der in der Funktion enthaltenen Mittelwerte an die Momentanwerte der Temperaturen in der Fahrbahnbefestigung wird durch die Oberflächentemperatur F und den Funktionsparameter G erreicht. Eine weitere Anpassung des Temperaturverlaufs durch Messwerte im Untergrund (z.B. in 1,0 m-Tiefe) würde die Qualität der Temperaturverlaufs vor allem in den unteren Schichten steigern, zudem dort größere Schwankungen auftreten. Dies ist aber aufwendig und, wie sich im Weiteren herausstellt, zur hinreichend genauen Bestimmung der Asphalttemperaturen nicht unbedingt erforderlich.

Zur Überprüfung der Verwendungsfähigkeit der Funktion werden die im Differenzenverfahren nach Kapitel 3.5.1 errechneten Temperaturdaten des Jahres 2006 herangezogen. Gleichzeitig wird dabei die Größe des Funktionsparameters G , welcher die gemittelte Monatskurve an die reale Oberflächentemperatur F anpasst, iterativ mit $G = 20$ bestimmt.

An jedem Tag im Jahr 2006 wird jeweils um 09.00 Uhr und um 21.00 Uhr in 10 cm-Schritten die Gleichung (3.24) mit den für den jeweiligen Monat gültigen Parametern $A - E$ nach Tab. 3-7 und mit der Korrektur der Oberflächentemperatur (Parameter F und G) berechnet. Von diesen Startwerten ausgehend wird mit Hilfe des Differenzenverfahrens aus der stündlichen Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung der weitere Temperaturverlauf ermittelt. Wenn bei realen Messungen die Oberflächentemperatur zu jeder Stunde erfasst werden sollte, dann kann diese auch direkt anstatt der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung herangezogen werden. Die Abweichungen der dadurch simulierten Temperaturen von den Ergebnissen aus Kapitel 3.5.1, welche sich sofort, nach 24 und 48 Stunden ergeben, werden über die Asphaltbefestigung (0 - 0,3 m-Tiefe) und über einen Meter (0 - 1,0 m-Tiefe) betrachtet. In Tab. 3-8 sind die mittlere Standardabweichung, die maximale Standardabweichung und die maximale absolute Temperaturabweichung, welche einmal im ganzen Jahr auftritt, getrennt für morgens und abends dargestellt.

3.5 Temperaturbeanspruchung - Temperaturverteilung mit Differenzenverfahren

| nach Stunden | morgens (09.00 Uhr) | | | abends (21.00 Uhr) | | |
|------------------------------|---------------------|------|------|--------------------|------|------|
| | 0 | 24 | 48 | 0 | 24 | 48 |
| | °C | | | °C | | |
| Bereich 0 - 0,3 m | | | | | | |
| mittlere Standardabweichung | 1,32 | 0,44 | 0,29 | 1,44 | 0,56 | 0,35 |
| maximale Standardabweichung | 4,45 | 1,69 | 1,01 | 5,00 | 1,83 | 1,10 |
| maximale absolute Abweichung | 9,3 | 4,1 | 2,5 | 11,0 | 4,4 | 2,7 |
| Bereich 0 - 1,0 m | | | | | | |
| mittlere Standardabweichung | 2,07 | 1,25 | 1,01 | 2,19 | 1,42 | 1,11 |
| maximale Standardabweichung | 5,82 | 3,84 | 2,94 | 6,16 | 4,25 | 3,41 |
| maximale absolute Abweichung | 9,3 | 4,7 | 3,7 | 11,0 | 5,1 | 4,4 |

Tab. 3-8: Abweichung der Verfahrensergebnisse von der Temperatur, Jahr 2006

Während der sich sofort ergebende Temperaturverlauf noch stark von den vorherrschenden Temperaturen in der Fahrbahnbefestigung abweicht, liegt die mittlere Standardabweichung nach 24 Stunden bei 0,50 °C (für 0 - 0,3 m-Tiefe) bzw. 1,34 °C (für 0 – 1,0 m-Tiefe), nach 48 Stunden bei 0,32 bzw. 1,06 °C. Ebenso sinkt die absolute Abweichung der Temperatur nach 24 Stunden auf 4,4 bzw. 5,1 °C, nach 48 Stunden auf 2,7 bzw. 4,4 °C.

Im Vergleich der Morgenwerte mit den Abendwerten fällt auf, dass hinsichtlich mittlerer Standardabweichung, maximaler Standardabweichung und Maximaltemperatur leicht bessere Ergebnisse mit den 09.00 Uhr-Werten erreicht werden. Daher empfiehlt es sich, bei Möglichkeit den Startpunkt einer Messung morgens zu wählen.

Da keine Korrektur des Temperaturverlaufs im Untergrund vorgenommen wird, steigen die Abweichungen mit dem Einbezug zunehmender Tiefe an, damit fallen die Standardabweichungen des Bereichs 0 – 1,0 m gegenüber dem Bereich 0 - 0,3 m höher aus. Eine genaue Temperaturbestimmung ist aber nur für die Asphaltenschicht und damit für den Bereich 0 - 0,3 m wegen des dort vorherrschenden von der Temperatur abhängigen E-Moduls des Asphalts relevant. Hier differieren die Werte bereits nach 24 Stunden um weniger als 0,6 °C. Daher reicht ein Messzeitraum von 24 Stunden zur hinreichend genauen Bestimmung der Temperaturen in der Asphaltbefestigung aus.

Durch ein Anwendungsbeispiel wird nochmals die einfache Handhabbarkeit des Verfahrens herausgestellt, mit dem ohne eine Zerstörung der Fahrbahnbefestigung mit einer ausreichenden Genauigkeit der Temperaturverlauf ermittelt werden kann. Es sollen Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) auf einer Fahrbahnbefestigung am 30. Juni (2006) ab 09.00 Uhr durchgeführt werden. Um für das am Fachge-

biet Konstruktiver Straßenbau entwickelte Rückrechnungsprogramm als Eingangsparameter die Temperaturverteilung und daraus (wie im nächsten Kapitelabschnitt erläutert) die E-Moduln in den einzelnen Lagen zu erhalten, kann das hier entwickelte Verfahren zur Temperaturbestimmung angewendet werden.

Hierzu muss am Vortag (29.06.) in der Nähe des Messortes eine Messeinrichtung aufgestellt werden, welche stündlich die Lufttemperatur und die Sonneneinstrahlung erfasst. Bei Aufstellung um 09.00 Uhr besitzt die Fahrbahnbefestigung an der Oberfläche eine Temperatur von 27 °C. Damit und mit den Juni-Formelparametern nach Tab. 3-7 ergibt sich aus Gleichung (3.24) folgende Funktion:

$$T_z = 8 + (23 - 8) \cdot e^{-\frac{1}{150} \cdot z} + (21 - 23) \cdot e^{-\frac{1}{50} \cdot z} + (27 - 21) \cdot e^{-\frac{1}{20} \cdot z} \quad (3.25)$$

Diese Temperaturverteilung ist der Ausgangspunkt, von dem aus mit den stündlichen Lufttemperatur- und Strahlungswerten über das in ein Tabellenkalkulationsprogramm übertragene Temperatur-Differenzen-Verfahren nach Kapitel 3.5.1 die weiteren Temperaturverteilungen errechnet werden. Die dazugehörigen Startwerte sind in der ersten Spalte der Tab. 3-9 aufgelistet, zum Vergleich stehen die Werte der realen Temperaturen in der nächsten Spalte. Aus der Gegenüberstellung sind am 29.06. noch größere Temperaturdifferenzen bis zu 7,2 °C vorhanden. Zu Beginn der FWD-Messungen, am nächsten Tag um 09.00 Uhr, ergeben sich die in den mittleren Spalten der Tab. 3-9 aufgelisteten Temperaturwerte. Die Abweichungen von den Werten, welche aus dem Verfahren errechnet werden, zu den realen Temperaturen sind kleiner geworden ($\leq 1,6$ °C). Und auch nach drei Stunden, in der Mittagszeit (Tab. 3-9, rechts), stellen sich geringe Temperaturdifferenzen ein ($\leq 1,5$ °C). Die Stellen mit maximalen Abweichungen liegen jeweils in 1-Meter Tiefe. In den relevanten oberen Schichten ergeben sich kleinere Abweichungen.

Damit entsprechen die Temperaturdifferenzen den erwarteten Abweichungen nach Tab. 3-8. Die Genauigkeit, mit der die Temperatur durch das neue Verfahren bestimmt wird, ist mit einem Grad maximaler Abweichung im oberen (Asphalt-)Bereich für die Auswertung von Tragfähigkeitsmessungen ausreichend genau.

| Tiefe in cm | Temperatur in °C | | | | | |
|----------------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|
| | 29.06., 9.00 Uhr | | 30.06., 9.00 Uhr | | 30.06., 12.00 Uhr | |
| | nach Verfahren | real | nach Verfahren | real | nach Verfahren | real |
| 0 | 27 | 27,2 | 30,8 | 30,4 | 42,6 | 42,3 |
| 10 | 24,0 | 16,8 | 21,3 | 20,8 | 31,5 | 31,0 |
| 20 | 22,0 | 16,3 | 18,9 | 18,0 | 22,1 | 21,4 |
| 30 | 20,5 | 17,9 | 20,0 | 19,0 | 20,0 | 19,2 |
| 40 | 19,4 | 18,7 | 20,2 | 19,5 | 19,7 | 19,1 |
| 50 | 18,5 | 19,0 | 19,8 | 19,5 | 19,4 | 19,1 |
| 100 | 15,5 | 17,6 | 15,8 | 17,4 | 15,9 | 17,4 |

Tab. 3-9: Temperaturwerte für Anwendungsbeispiel der Temperaturbestimmung

Insgesamt ist ein Verfahren gefunden worden, welches mit Hilfe der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung oder wahlweise der Oberflächentemperatur auf den Temperaturverlauf in der Befestigung schließen lässt. Als Startwert wird die Gleichung (3.24) mit den monatsabhängigen Parametern $A - E$ nach Tab. 3-7, der momentanen Oberflächentemperatur F sowie $G = 20$ aufgestellt. Dies ergibt sofort die erste Annäherung des Temperaturverlaufs über die Fahrbahntiefe. Danach kann aus den stündlichen Lufttemperatur- und Sonneneinstrahlungsdaten bzw. aus der stündlichen Oberflächentemperatur unter Einbezug des Differenzenverfahrens der Temperaturverlauf zu einem späterem Zeitpunkt nach der in Tab. 3-8 angegebenen Genauigkeit bestimmt werden. So ergeben sich innerhalb von 24 Stunden für weitere Beanspruchungsberechnungen hinreichend genaue Temperaturdaten, die auch zur Tragfähigkeitsbestimmung verwendet werden können.

3.6 Temperaturbedingte mechanische Eigenschaften des Asphalts

Die mechanischen Eigenschaften des Asphalts hängen von der Menge und den Eigenschaften des Bindemittels und des Mineralstoffgemisches sowie dem Verdichtungsgrad ab, aber auch von Klima und Verkehr.

Aus theoretischen und experimentellen Untersuchungen ist bekannt, dass bei Fahrzeugüberfahrten ein absoluter Modul $|E^*|$ mit Frequenzen von 10 Hz verwendet werden kann. Dies wird im Folgenden erläutert.

3.6 Temperaturbeanspruchung - Temperaturbedingte mechanische Eigenschaften des Asphalts

Der Baustoff Asphalt verhält sich ausgeprägt viskoelastisch. Bei kurzzeitigen Belastungen, d.h. bei Fahrzeugüberfahrten mit Geschwindigkeiten über 30 km/h, kann dennoch ein quasielastischer E-Modul definiert werden. Dies ist der effektive E-Modul E_{eff} (englisch: resilient modulus) [32], welcher als E-Modul eines elastischen Vergleichskörpers bei gegebenem Spannungsverlauf (Sinus-Schwellimpuls) die gleiche maximale Dehnung erfährt wie der viskoelastische Körper (siehe Abb. 3-16).

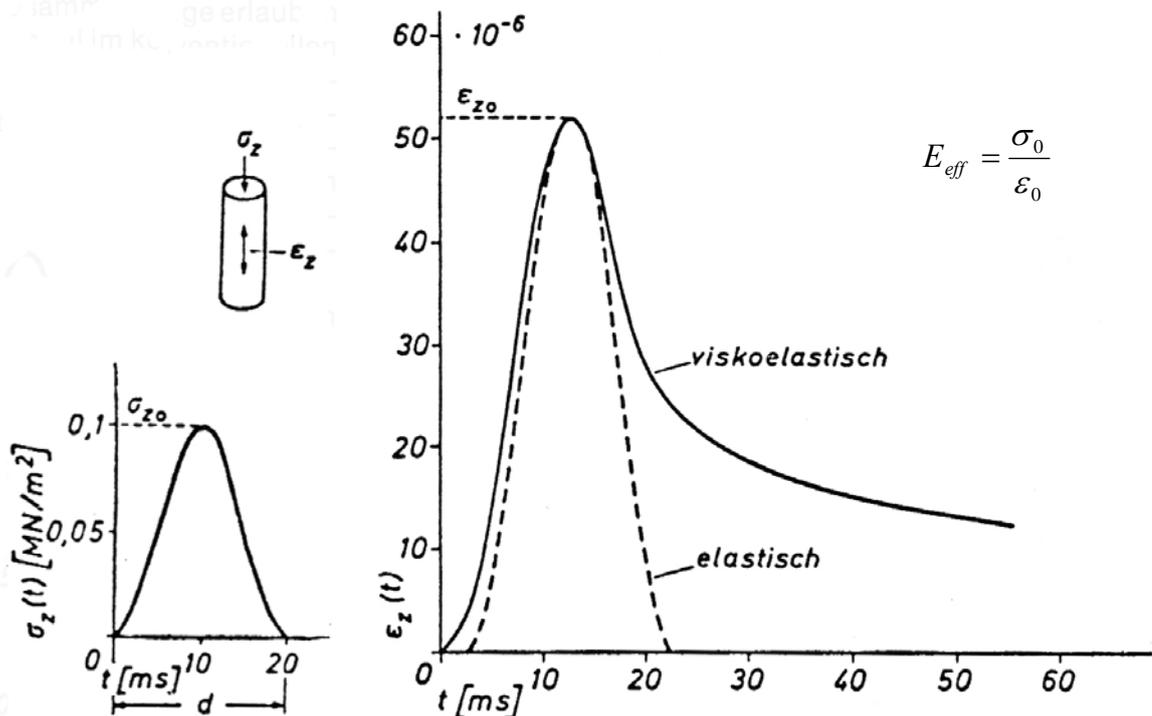


Abb. 3-16: Reaktion auf Sinus-Schwellimpuls zur Definition des effektiven E-Moduls [33]

In der Regel werden zur experimentellen Bestimmung des E-Moduls einaxiale dynamische Versuche mit harmonischen Sinusschwingungen durchgeführt. Bei diesen Standardversuchen ergibt sich der komplexe E-Modul [24], dessen Absolutwert, der absolute Modul (oder dynamische Modul) $|E|$, in folgender Weise definiert ist:

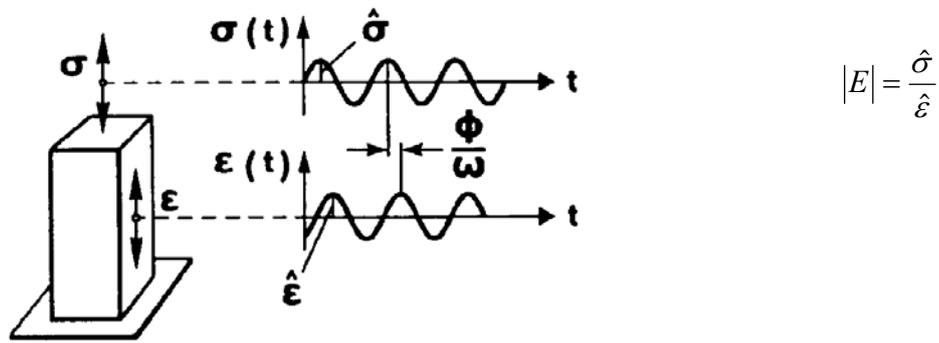


Abb. 3-17: Dynamischer Zug-Druck-Versuch zur Definition des absoluten E-Moduls [24]

FRANCKEN und VERSTRAETEN [68] haben auf Grundlage von dynamischen Biegeversuchen aus vielen Asphaltmischungen ein Rechenprogramm entwickelt, mit dem der absolute Modul $|E|$ aus Mischgut- und Bindemitteldaten berechnet werden kann. Grundlage ist folgende Funktion:

$$|E| = R \cdot E_{\infty} \quad 0 \leq R \leq 1 \quad (3.26)$$

mit E_{∞} Glasmodul
 R Funktionswert aus Pen, T_{RK}, T, f

Der Glasmodul ist der größtmögliche E-Modul, der nur theoretisch bei sehr hohen Frequenzen und tiefen Temperaturen erreicht wird. Er wird aus den Volumenanteilen der Hohlräume, des Bitumens und der Mineralstoffe berechnet und nimmt Werte zwischen 30.000 und 35.000 N/mm² an. Die Größe R ist abhängig von der Nadelpenetration Pen , dem Erweichungspunkt Ring und Kugel T_{RK} , der Versuchstemperatur T und der Belastungsfrequenz f . Dabei geht T_{RK} über den Penetrationsindex $P.I.$ ein, beide Werte sind über eine Formel miteinander verknüpft. Der Penetrationsindex beschreibt die Temperaturempfindlichkeit des Bitumens, negative Werte zeigen eine hohe, positive eine geringe Abhängigkeit an. Durch die höhere Temperaturabhängigkeit bedingt steigt der Wert von R bei negativem $P.I.$ mit abnehmender Temperatur stärker an [32].

Aus eigenen Messungen hat HÜRTGEN Nomogramme entwickelt, aus denen der Glasmodul, R oder direkt der absolute Modul $|E|$ entnommen werden kann [32] [34], siehe Abb. 3-18.

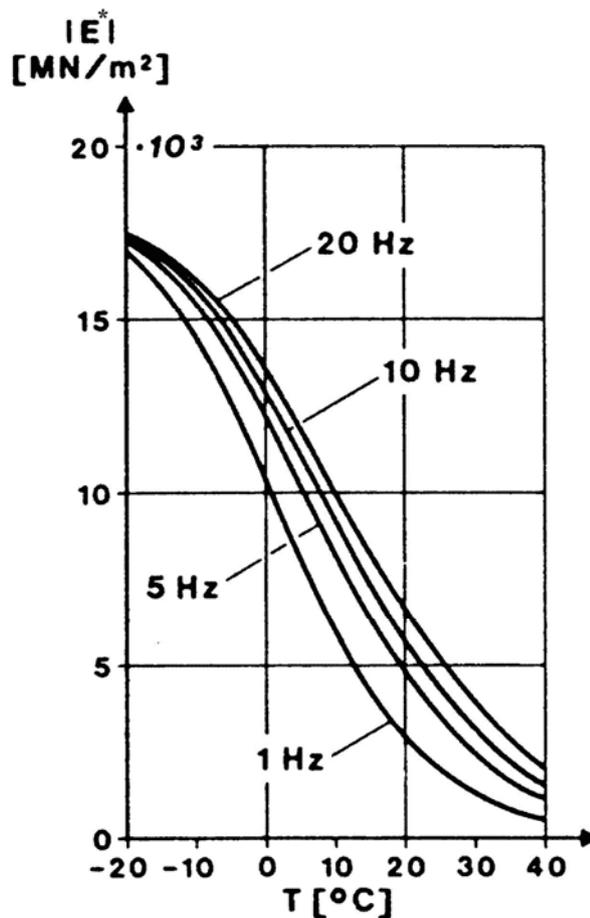


Abb. 3-18: Verlauf von $|E^*|$ in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Frequenzen für Asphalt-Prototyp [24]

In Abb. 3-19 sind die Vertikalspannungen σ_z bei der Überfahrt eines Reifens dargestellt; die Spannungen wirken bei der Geschwindigkeit v über die räumliche Breite λ . Wenn die zeitlichen Spannungsabläufe den Spannungsimpulsen d zur Bestimmung von E_{eff} entsprechen, ergibt sich eine gute Übereinstimmung zum elastischen Verhalten in Abb. 3-16. Aus Vergleichsrechnungen mit einem Asphaltprototyp ist folgende Beziehung ableitbar [33]:

$$E_{\text{eff}}(d) \approx \left| E \left(\frac{1}{3 \cdot d} \right)^* \right| = \left| E \left(\frac{v}{3 \cdot \lambda} \right)^* \right| \quad (3.27)$$

Damit ist der effektive E-Modul mit der Impulslänge d annähernd gleich dem zu verwendenden absoluten E-Modul $|E^*|$ der Frequenz $f = 1/(3 \cdot d)$. Zugleich kann die zeitliche Breite,

3.6 Temperaturbeanspruchung - Temperaturbedingte mechanische Eigenschaften des Asphalts

die Belastungsdauer d durch die räumliche Breite und die Geschwindigkeit ersetzt werden (siehe Gleichung (3.27)). Die räumliche Breite variiert in Abhängigkeit von der Schichttiefe von ca. 0,3 m (Durchmesser der BAF) bis ca. 4 m an der Unterseite des Asphalts. Bei einer mittleren Geschwindigkeit eines Lkw von 60 km/h ergeben sich daraus Frequenzen von 1,4 bis 18,5 Hz; bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h treten Frequenzen von 1,9 bis 24,7 Hz auf. Aus dem Unterschied der Modulwerte in Abb. 3-18 ist zu erkennen, dass der Einfluss der Belastungsfrequenz im Vergleich zum Temperatureinfluss wesentlich kleiner ist und daher in Übereinstimmung nach HÜRTGEN einheitlich eine Frequenz von 10 Hz angenommen werden kann.

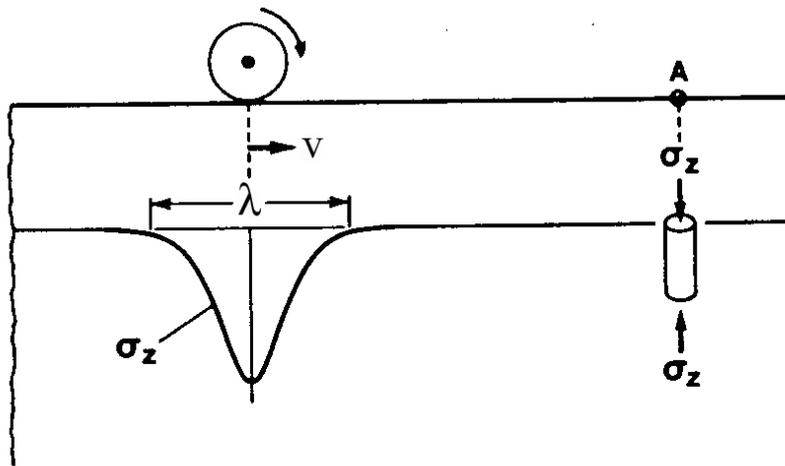


Abb. 3-19: Spannungsverlauf für Vertikalspannung σ_z unter einem rollenden Rad über räumliche Breite λ [24]

Ebenso hängt die Querkontraktionszahl ν von der Temperatur ab, mit zunehmender Temperatur nimmt Asphalt die Fließeigenschaften einer Flüssigkeit an, d. h. die Querkontraktion läuft gegen den Wert $\nu (= \mu) = 0,5$, was Abb. 3-20 zeigt.

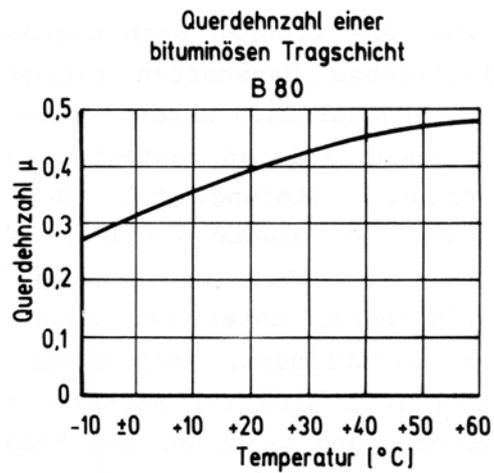


Abb. 3-20: Verlauf der Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Temperatur [65]

Die genauen Werte des E-Moduls und der Querkontraktion werden aus den Abbildungen Abb. 3-18 und Abb. 3-20 bestimmt. Nun können in einem Tabellenkalkulationsprogramm über eine Routine bei Eingabe einer Temperaturkurve die dazugehörigen E-Moduln und Querkontraktionswerte ausgegeben werden.

4 Verkehrsbeanspruchung

Während für die Bestimmung der Leistungsfähigkeit einer Straße alle Fahrzeuge durch die durchschnittlich tägliche Verkehrsstärke erfasst werden, sind zur Ermittlung der Fahrbahnbeanspruchung nur die Fahrzeuge des Schwerverkehrs relevant. Denn die höchsten Beanspruchungen in einer Fahrbahnbefestigung werden von Nutzfahrzeugen generiert. Da die verursachten Spannungen und Dehnungen potenziert in die Schädigung eingehen, sind diese für die Ermittlung einer bemessungsrelevanten Beanspruchungsgröße wesentlich. Aus diesem Grund werden, wie auch in den RStO 01 [23], ausschließlich die Belastungen des Schwerverkehrs betrachtet. Von besonderem Interesse sind dabei die Antriebsachsen, denn zum einen wirken dort – aus Gründen der Kraftschlussbeanspruchung – die höchsten Achslasten und zum anderen werden durch diese Antriebs- und Bremskräfte übertragen. Hierzu wird in diesem Kapitel die Beanspruchung in der Bodenaufstandsfläche (BAF), in welcher die Kräfte vom Reifen in die Fahrbahnbefestigung übertragen werden, in Größe und Form bestimmt.

4.1 Abschätzung der Beanspruchungsgröße

Die Belastung in der Bodenaufstandsfläche (BAF) bei einer Radüberrollung setzt sich aus vertikalen und horizontalen Anteilen zusammen.

Der **vertikale Anteil** kann direkt aus der Achslast ermittelt werden. Die Einzelachse darf generell eine Achslast von 10,0 t besitzen. Auf der Antriebsachse gilt für den Einzelantrieb eine maximal zulässige Achslast von 11,5 t. Bei Doppel- und Dreifachachsen ist hinsichtlich der maximalen Last des Achsaggregats der Abstand der Achsen entscheidend (§ 34 [Achslast und Gesamtgewicht], StVZO [62]). Auf der Doppelantriebsachse ergibt sich eine maximal zulässige Last von 18 t (oder unter bestimmten Auflagen von 19 t).

Zusätzlich zur statischen Last kann aus Radlastschwankungen ein dynamischer Anteil berücksichtigt werden, der in starkem Maße von der Ebenheit der Fahrbahn abhängt. Ferner spielt die Geschwindigkeit und das Fahrzeugfederungssystem eine Rolle [60].

Der **horizontale Anteil** unterteilt sich in lateral (quer zur Fahrriichtung) und longitudinal (längs zur Fahrriichtung). Hier entstehen Schubspannungen einerseits durch das Deformationsverhalten von Reifen und Fahrbahn, welche unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen, und andererseits durch die Längsbeschleunigung bei Antrieb und Bremsen bzw. durch die Seitenbeschleunigung aus der Kurvenfahrt.

In besonderem Maße sind die longitudinalen Schubspannungen von Interesse, welche in extremer Weise bei den Antriebsachsen bzw. den gebremsten Achsen auftreten, da durch diese hohe Antriebs- und Bremskräfte übertragen werden. Die Größe der dabei in die Fahrbahnbefestigung eingeleiteten Kräfte kann aus der benötigten Motorleistung zur Überwindung eines Gesamtwiderstandes oder aus der vorhandenen Motorleistung abgeschätzt werden. Im Folgenden werden die hierzu benötigten Formeln behandelt.

Die vorhandene Zugkraft Z entspricht immer dem Gesamtwiderstand, der sich aus dem Rollwiderstand W_R , dem Luftwiderstand W_L , dem Steigungswiderstand W_{St} und dem Trägheitswiderstand F_a zusammensetzt.

$$Z = W_R + W_L + W_{St} + F_a \quad (4.1)$$

Die **Zugkraft Z** ist von der Geschwindigkeit v abhängig. Denn die Leistung P ist proportional zum Produkt aus Z und v , so dass bei gleich bleibender Leistung die verfügbare Kraft $Z(v)$ sinkt, sobald die Geschwindigkeit v ansteigt.

$$P \sim Z \cdot v \quad (4.2)$$

Hier ist zwischen der Motorzugkraft Z_M und der Zugkraft am Radumfang Z_U zu unterscheiden. Von Z_M muss noch der Getriebewiderstand subtrahiert werden, um die auf die Straße übertragbare Zugkraft Z_U zu erhalten.

Neben der Motorleistung kann außerdem die vom Reifen auf die Straße maximal übertragbare Reibungskraft die Zugkraft begrenzen. Diese ist über die Kraftschlussbeanspruchung μ geregelt, welche die übertragene Horizontalkraft zur Vertikalkraft in Beziehung setzt.

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (4.3)$$

Die Kraftschlussbeanspruchung μ ist vom Haftbeiwert bzw. der Haftreibungszahl μ_H , welche die maximal übertragbare Kraftschlussbeanspruchung bei Haftkontakt beschreibt, und vom Gleitbeiwert bzw. der Gleitreibungszahl μ_G , welche die maximal übertragbare Kraft-

4.1 Verkehrsbeanspruchung - Abschätzung der Beanspruchungsgröße

schlussbeanspruchung bei Gleitkontakt beschreibt, zu unterscheiden. Im Fall des auf einer Fahrbahn rollenden Reifens setzt sich die maximale Kraftschlussbeanspruchung aus beiden Anteilen zusammen, da in der BAF sowohl Haftzonen als auch Gleitzonen auftreten. Die Höhe dieser Anteile hängt vom vorhandenen Schlupf ab, daher wird die Kraftschlussbeanspruchung μ oft über den Schlupf aufgetragen. Zur Herleitung des Schlupfes müssen die Kräfte und Bewegungen in der BAF betrachtet werden. In der Regel entsteht bei der Übertragung der Umfangskraft zwischen der Fahrbahn und dem Reifen eine Relativbewegung. Dies ist in Abb. 4-1 durch die auf die translatorische Geschwindigkeit \dot{x} ($= v$) bezogene Drehwinkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ des Rades veranschaulicht. Besteht keine Horizontalkraft, wird eine Drehgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_0$ erreicht. Im Rollzustand muss die Rollreibung F_R überwunden werden (Definition siehe S. 68), die Drehwinkelgeschwindigkeit ist dann kleiner als $\dot{\varphi}_0$. Je nach Betriebszustand (Bremsen, Treiben) wird das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten kleiner oder größer. Bei zu stark angetriebenem Rad bleibt die translatorische Geschwindigkeit bei Null, das Verhältnis $\dot{\varphi}/\dot{x}$ läuft gegen unendlich und das Rad dreht durch, bei zu starker Bremsung blockiert das Rad, die Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ wird Null.

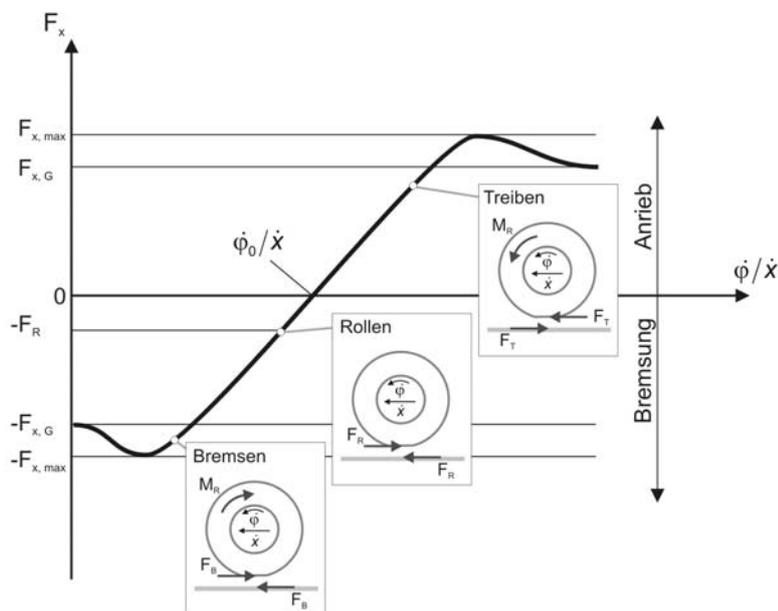


Abb. 4-1: Umfangskraft am Rad als Funktion der auf die translatorische Geschwindigkeit bezogenen Winkelgeschwindigkeit des Rades, nach [45]

Zur Beschreibung des Kontaktverhaltens wird nun der Schlupf S eingeführt, der als Differenz der beiden auf die BAF bezogenen Geschwindigkeiten dividiert durch die jeweils

größere definiert ist [45], [54]. Dadurch ergeben sich für Bremsen und Treiben unterschiedliche Funktionen:

$$\begin{aligned} \text{Bremschlupf:} \quad S &= 1 - \frac{R \cdot \dot{\varphi}}{\dot{x}} \\ \text{Treibschlupf:} \quad S &= 1 - \frac{\dot{x}}{R \cdot \dot{\varphi}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

So bleibt S immer positiv und vollständiges Gleiten tritt jeweils bei $S = 1$ auf. Es ergibt sich eine dimensionslose Darstellung nach Abb. 4-2 mit μ in Abhängigkeit von S . Bei kleinen Kraftbeanspruchungen μ ist das Schlupfverhältnis klein, und wächst linear mit der Umfangskraft. Die höchste Kraftschlussbeanspruchung ist durch μ_{\max} bei S zwischen 10% und 20% gegeben, bei stärkerem Schlupf fällt μ bis auf μ_G ab.

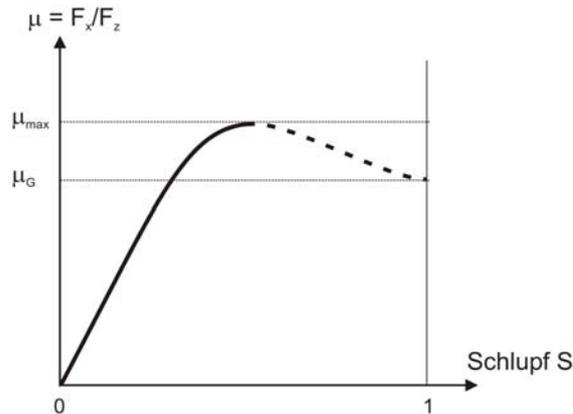


Abb. 4-2: schematische Kraftschlussbeanspruchungs-Schlupf-Kurve, nach [45]

Nach Einführung des Schlupfes kann nun die Kraftschlussbeanspruchung für verschiedene Fahrbahnzustände und Fahrbahnbeläge in Abb. 4-3 sowie für verschiedene Geschwindigkeiten in Abb. 4-4 betrachtet werden. Die Kraftschlussbeanspruchung μ für Asphalt nimmt nahezu die gleichen Werte wie für Beton an, und wird bei nasser Fahrbahn im Verhältnis zum trockenen Zustand kleiner. Bei Schnee und Eis können wesentlich geringere Kräfte übertragen werden. Der Gleitreibungswert, gegen den die Kraftschlussbeanspruchung läuft, liegt bei trockener Fahrbahn bei ca. $\mu_G = 0,9$ und bei nasser Fahrbahn bei ca. $\mu_G = 0,4$.

4.1 Verkehrsbeanspruchung - Abschätzung der Beanspruchungsgröße

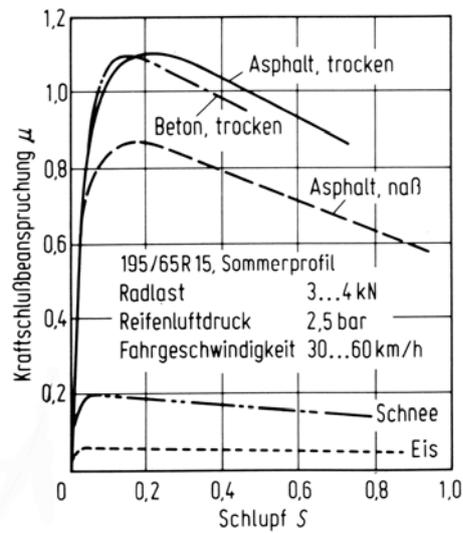


Abb. 4-3: Kraftschlussbeanspruchungs-Schlupf-Kurven für verschiedene Fahrbahnzustände [45]

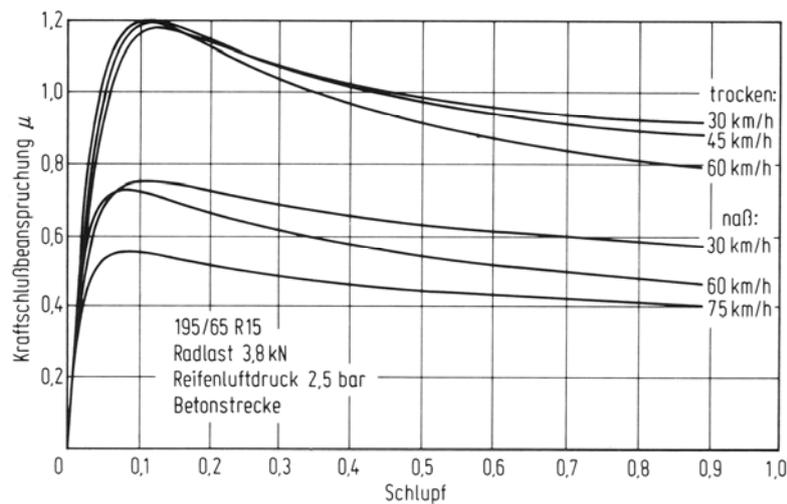


Abb. 4-4: Kraftschlussbeanspruchungs-Schlupf-Kurven für verschiedene Geschwindigkeiten [45]

Der **Rollwiderstand** oder **Radwiderstand** W_R ist auf zwei verschiedene Ursachen zurückzuführen. Dies sind die Verformung von Rad und Straße und der Schlupf in der Kontaktfläche; die Lagerreibung im Rad ist hierbei vernachlässigbar. Hauptsächlich stammt der Rollwiderstand aus der Eindrückung des Reifens und der Verformung der Fahrbahn. Allgemein kann W_R nach dem Coulomb'schen Reibungsgesetz durch das Produkt aus dem konstanten Rollreibungsfaktor f_R und dem Fahrzeuggewicht Q ausgedrückt werden:

$$W_R = f_R \cdot Q \quad (4.5)$$

- mit f_R Rollwiderstandsbeiwert (-),
 für Nutzfahrzeuge 0,005 - 0,015, im Mittel: 0,0075 [45]
 Q Fahrzeuggewicht in N

Durch die auf die Radachse wirkende Gewichtskraft F_Z wird sowohl das Rad als auch die Straße verformt. Die Deformationen sind plastischer und elastischer Art. Um ein Rad mit der Belastung F_Z und dem Radius r in Bewegung zu halten, muss durch eine Längskraft, die mindestens so groß ist wie der Rollwiderstand W_R , das Moment aus F_Z und dem Hebelarm h der sich bildenden elliptischen Kontaktfläche überwunden werden (siehe Abb. 4-5):

$$W_R \cdot r = F_Z \cdot h \quad (4.6)$$

- mit r Radius des Reifens in m
 h Hebelarm der rollenden Reibung in m

Nach Umformulierung der Gleichgewichtsbedingung in (4.6) erhält man den ersten Summanden des Rollwiderstandes W_R von Gleichung (4.7).

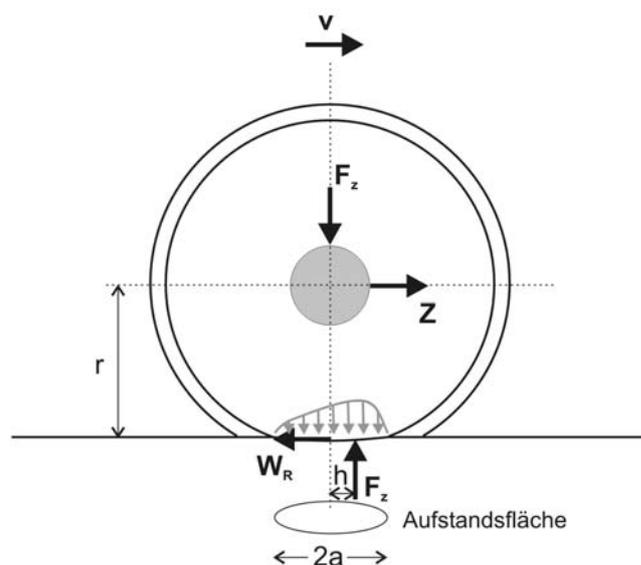


Abb. 4-5: Kräfte am rollenden Rad, nach [44]

Zusätzlich erzeugt der vorhandene Schlupf des rollenden Reifens durch die Gleitreibung in der Radaufstandsfläche Wärme; der entstehende Energieverlust wird im zweiten Term der Rollwiderstandsgleichung (4.7) berücksichtigt. Der Ausdruck $S \cdot \mu_G \cdot F_Z$ wird durch den Radschlupf S , den Kraftschlussbeiwert für Gleiten μ_G und die Gewichtskraft F_Z ausgedrückt. Während der Schlupf beim frei rollenden Rad vernachlässigbar klein ist, steigt er durch die Ausübung eines Drehmomentes auf die Achse erheblich an. Dies ist beim Bremsen und bei der Beschleunigung der angetriebenen Achsen der Fall [63].

So ergibt sich am Reifen der Rollwiderstand W_R folgendermaßen:

$$W_R = f_R \cdot F_Z = \left(\frac{h}{r} + S \cdot \mu_G \right) \cdot F_Z \quad (4.7)$$

Der **Luftwiderstand** W_L setzt sich aus dem Staudruck an der Stirnfläche des Fahrzeuges, dem Reibungswiderstand zwischen der Luft und den Mantelflächen, Übergangs- und Unstetigkeitswiderständen sowie dem Sog am Fahrzeugende zusammen.

Die allgemeine Formel für den Luftwiderstand W_L fasst die genannten Ursachen zusammen und ergibt sich aus der Strömungsmechanik. Sie besteht aus dem Staudruck q , der angeströmten Fläche A und dem Luftwiderstandsbeiwert c_L . Der Staudruck $q = 1/2 \cdot \rho \cdot v^2$ wird durch die Luftdichte ρ und das Quadrat der Geschwindigkeit v bestimmt. Der Luftwiderstand W_L ist unabhängig vom Fahrzeuggewicht.

$$W_L = q \cdot A \cdot c_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot c_L \cdot v^2 \quad (4.8)$$

Die angeströmte Querschnittsfläche A und der Luftwiderstandsbeiwert c_L sind von den Fahrzeugeigenschaften, aber auch voneinander abhängig. Ein c_L ohne die Kenntnis der dazugehörigen Querschnittsfläche ist nicht brauchbar.

Der **Steigungswiderstand** oder **Neigungswiderstand** W_{St} nimmt eine Sonderstellung ein, denn er ist der einzige Widerstand, durch den die Gesamtenergie nicht abnimmt, da die aufgewandte Arbeit komplett in potentielle Energie umgewandelt wird. Im Gefälle wirkt der Steigungswiderstand negativ, so dass die gespeicherte Energie wieder frei wird und zum Überwinden der anderen Widerstände oder zur Beschleunigung verwendet werden kann.

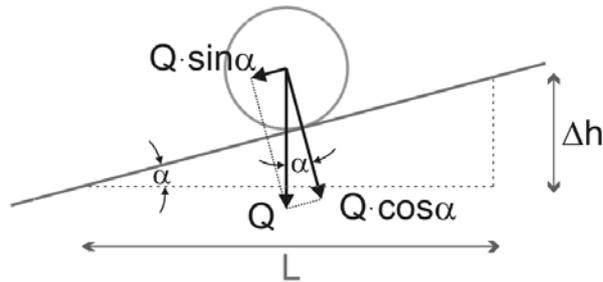


Abb. 4-6: Kräfte an der schiefen Ebene

Wie aus der Abb. 4-6 ersichtlich ist, muss der Steigungswiderstand W_{St} der Hangabtriebskraft $Q \cdot \sin \alpha$ entgegenwirken. Daher ist er vom Fahrzeuggewicht Q und der Streckenneigung α abhängig.

$$W_{St} = Q \cdot \sin \alpha \quad (4.9)$$

Bei kleinen, in der Trassierung üblichen Neigungswinkeln α entspricht der Sinuswert nahezu dem Tangens. Daher lässt sich der spezifische Steigungswiderstand durch die Steigung i ausdrücken, welche das Verhältnis von Höhenunterschied Δh zur Streckenlänge L ist.

Schon bei relativ geringen Neigungen ergibt sich ein erheblicher Steigungswiderstand. In der RAS-L [25] sind daher Höchstneigungen in Abhängigkeit von der Entwurfsgeschwindigkeit V_e geregelt, bei Bundesfernstraßen sollten Längsneigungen von über 4 % vermieden werden:

| Bedingung | Höchstlängsneigung i |
|--------------------------|------------------------|
| $V_e = 50 \text{ km/h}$ | 12,0 % |
| - | - |
| $V_e = 120 \text{ km/h}$ | 4,0 % |

Tab. 4-1: Höchstneigungen im Straßenverkehr, nach RAS-L [25]

Nach Umstellung der Gleichung (4.1) ergibt sich der **Beschleunigungs- oder Trägheitswiderstand** F_a . Dieser beschreibt den Zugkraftüberschuss, der nach Abzug des Fahrzeug- und Streckenwiderstandes zur Verfügung steht.

$$F_a = Z - W_R + W_L + W_{St} \quad (4.10)$$

4.1 Verkehrsbeanspruchung - Abschätzung der Beanspruchungsgröße

Ist F_a positiv, so wird die Fahrzeugmasse beschleunigt, bei einem negativen Wert wird das Fahrzeug langsamer. Im 2. Newtonschen Gesetz wird die benötigte Kraft beschrieben, um einen Körper zu beschleunigen oder zu verzögern ($F = m \cdot a$). Dabei muss nicht nur die Masse auf die Längsgeschwindigkeit beschleunigt werden (translatorische Beschleunigung), sondern auch für die sich drehenden Teile (Räder, Motor und Getriebe) Energie aufgewandt werden (rotatorische Beschleunigung). Dies wird durch eine Vergrößerung der Masse (Massenzuschlag ca. 20%) berücksichtigt.

Einen allgemeinen Überblick über die Größe der verschiedenen Widerstandsanteile und der Zugkraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit gibt Abb. 4-7. Hier wird deutlich, dass bei extremen Steigungen der Neigungswiderstand gegenüber den anderen Widerständen die mit Abstand höchsten Anteile besitzt. Der Luftwiderstand spielt nur bei höheren Geschwindigkeiten und dann vor allem im Pkw-Bereich eine Rolle.

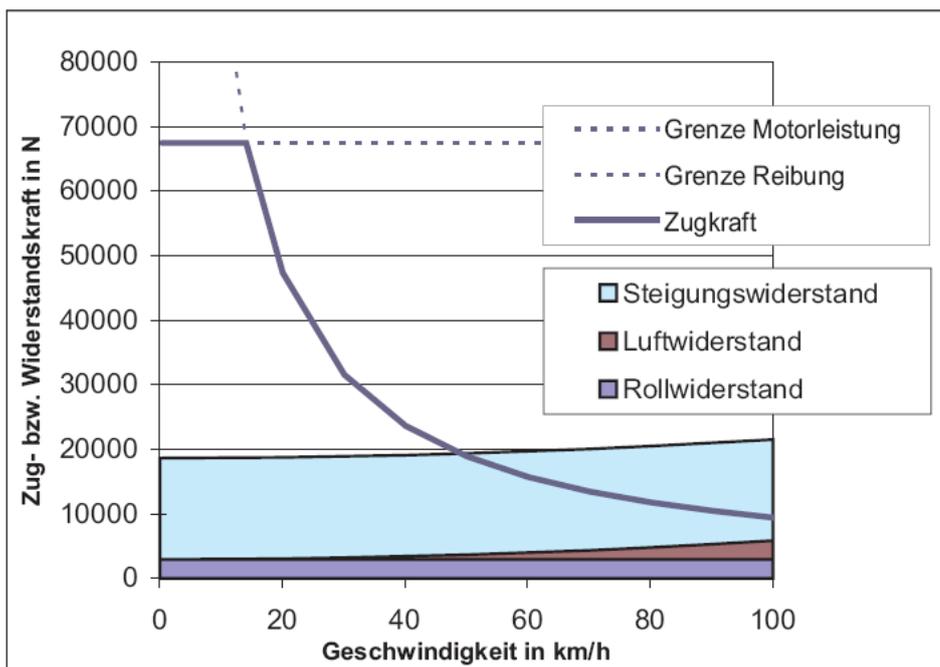


Abb. 4-7: Zug- und Widerstandskraft von 40t-Lkw bei 4%-Steigung

Die Abschätzung der Beanspruchungsgröße aus Längskräften erfolgt nach allgemein üblichen Vorgehen und Parametern, wie z. B. [45], [53].

Für den Lkw wird ein maximal zulässiges Gesamtgewicht von 40 t angenommen. Die spezifische, je Tonne erforderliche Motorleistung muss nach § 35 [Motorleistung], StVZO

[62] 5 kW/t betragen. Allerdings sollte eine 40 t-Kombination nach der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast - [11]) über eine Motorleistung von mindestens 6,6 kW/t (entsprechend 264 kW) verfügen. „Sie stellt [...] den Stand der Technik dar und stellt sicher, dass beim Bergauffahren der überschwere Lastzug nicht zum (Überhol-)Hindernis für andere Lastkraftwagen wird. Außerdem ist diese Motorleistung nötig, um z.B. an Knoten die Räumzeit nicht übermäßig zu verlängern“ [11]. Auch ist in § 34 [Achslast und Gesamtgewicht], StVZO [62] geregelt, dass im grenzüberschreitenden Verkehr das Gewicht auf der Antriebsachse mindestens 25 % des Gesamtgewichts betragen muss. Daher wird diese Vorgabe mit 29 % des Gewichts auf der Antriebsachse (11,5 t zu 40 t) ebenfalls eingehalten.

Der Reibungskoeffizient wird auf $\mu = 0,6$ gesetzt. In dieser Berechnung dient er lediglich zur Begrenzung der maximal übertragbaren Kraft. Zur Berechnung der Widerstandskräfte werden für die verwendeten Fahrzeuge gebräuchliche Parameter gewählt.

Zunächst wird für einen Lkw die sich bei einer Steigung von 4 % einstellende horizontale Kraft auf der Antriebsachse in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit ermittelt (graphische Darstellung siehe Abb. 4-7). Dies ist die Längsneigung, welche nach RAS-L [25] für neu zu planende Bundesfernstraßen noch zulässig ist, allerdings sind im bestehenden Straßennetz durchaus größere Steigungen vorhanden, beispielsweise gibt es auf der Bundesautobahn A7 im Bereich von Kassel Steigungen von 8 %. Die übertragbare Horizontalkraft entspricht dem Minimum aus dem resultierenden Traktionsvermögen F_{res} und der Summe der Widerstände R_{ges} (ca. 19 kN). Die Differenz dieser beiden Größen ist die zur Verfügung stehende Beschleunigungskraft F_a . Bei einer Geschwindigkeit von 49 km/h entspricht die durch die Widerstände bedingte benötigte Kraft der durch die Motorleistung verfügbaren Längskraft, d.h. bei konstanter Steigung von 4 % kann der Lkw nur auf 49 km/h, die sogenannte Beharrungsgeschwindigkeit, beschleunigen ($F_a > 0$) oder er fällt im Falle einer höheren Ausgangsgeschwindigkeit langfristig auf diese ab ($F_a < 0$). In dieser Konstellation beträgt das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Last auf der Antriebsachse ca. 17 %.

Nun wird die in der Ebene bei einem Lkw vorhandene horizontale Kraft getrennt für Antrieb und Bremsen bestimmt.

Aus der überschüssigen Antriebskraft ist bei niedriger Geschwindigkeit eine Beschleunigung von 1,6 m/s² möglich, zur höheren Geschwindigkeit hin fällt diese hyperbelförmig ab, bei 80 km/h beträgt sie $a = 0,18$ m/s². Somit liegt bei Ausnutzung der maximal möglichen

Beschleunigung und den daraus resultierenden Kräften F_{res} von 12 bis 68 kN der prozentuale Anteil von Horizontal- zu Vertikallast auf der Antriebsachse zwischen 11 und 60 %.

Im Gegensatz zum Antrieb wird beim Bremsen jede Achse herangezogen. Indem dadurch die Gesamtlast beim Kraftschluss berücksichtigt wird, steigt die auf die Straße maximal übertragbare Horizontalkraft F_{res} an (angegeben durch mögliche Traktion). Nach § 41 [Bremsen und Unterlegkeile], StVZO [62] muss für alle Kraftfahrzeuge eine mittlere Vollverzögerung von mindestens $5,0 \text{ m/s}^2$ erreicht werden (umgerechnet in geforderte Traktion). Die Bremskraft F_a entspricht dadurch -200 kN , das Verhältnis von Horizontal- zu Vertikallast bei allen Achsen 50 % (möglich: -235 kN , 60 %).

Für einen Bus ergeben sich andere Bedingungen. So ist mit einem Gesamtgewicht von 18 t und einer Leistung von 206 kW [43] die spezifische Motorleistung höher als beim Lkw, um auch bei höheren Geschwindigkeiten ein ausreichendes Beschleunigungsvermögen aufzuweisen. Außerdem wird in der Regel der Bus nicht mit der maximal möglichen Beschleunigung betrieben, sondern mit einer für den Fahrgast maximal zumutbaren: der Komfortantrieb bzw. die -bremsung liegt bei $1,0 \text{ m/s}^2$.

Folglich ergibt sich beim Antrieb eine Horizontallast F_{res} von bis zu 19 kN, welche 17 % der Vertikallast auf der Antriebsachse entspricht (möglich: 68 kN, 60 %). Ist der Bus mit einer leichteren Antriebsachse ausgestattet, wächst das Verhältnis von Horizontal- zu Vertikallast (20 % bei 10 t).

Die Bremskraft F_a beträgt in der Komfortvariante -18 kN ; durch die Verteilung auf alle Achsen ergibt sich ein Verhältnis von 9 % für Horizontal- zu Vertikallast (möglich: -106 kN , 60 %). Um im Notfall stärker abbremsen zu können, ist ausreichend Reserve vorhanden. Hierdurch wird die Forderung nach ausreichender Bremskraft in § 41 [Bremsen und Unterlegkeile], StVZO [62] erfüllt.

Die obigen Berechnungen zeigen, dass auf allen Achsen, insbesondere auf der Antriebsachse ein prozentualer Anteil der Horizontal- zur Vertikallast von 20 % realistisch ist. Zur Bemessung von Straßenbrücken werden im Sinne einer ausreichenden Sicherheit wesentlich höhere Horizontallasten angesetzt. Im DIN-Fachbericht 101 wird für das Bemessungsfahrzeug mit zwei 240 kN-Achsen von einer Brems- bzw. Antriebslast von 60 % der Vertikallasten ausgegangen [55].

4.2 Ermittlung der Beanspruchungsform

Zur Bestimmung der Beanspruchung durch eine Reifenüberfahrt werden häufig Vereinfachungen vorgenommen. Oft werden Kreislasten (Mehrschichtenprogramme) oder rechteckige Lasten (FEM) mit konstanter Pressung verwendet, die vorwiegend dem Reifennendruck entspricht. Bei der Reifenmodellierung - hier liegt das Augenmerk auf dem Verhalten des Reifens - wird meist als Kontakt (entspricht der Straße) eine starre Oberfläche gewählt [21], was ebenfalls nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmt.

Real ist die Bodenaufstandsfläche (BAF) weder kreisförmig oder starr, noch die Lastverteilung darin gleichmäßig. Im Vergleich zwischen einheitlicher und ungleichmäßiger Pressung bestehen hinsichtlich der Reaktionen in der Fahrbahnbefestigung große Unterschiede (bis zu 30%) [59]. Normalerweise ist die Verwendung einer kreisförmigen, mit einer einheitlichen Pressung in Höhe des Innendrucks belasteten BAF nur zulässig, wenn eine Schädigungsform in größerem Abstand von der Oberfläche betrachtet wird (St. Venant's Prinzip), wie z.B. das Ermüdungsreißen an der Unterseite des Asphalts [6].

Um die wahre Interaktion zwischen statischem oder rollendem Rad und der Fahrbahnbefestigung zu bestimmen, gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder wird der Kontakt zweier Körper modelliert - dies ist der theoretische Weg - oder ein Körper wird mit bekannten Kontaktdruck- und Kontaktschubspannungen belastet - hier hängt die Lösung von der Güte der empirisch ermittelten Eingabeparameter zur Spannungsverteilung und -größe ab [61].

Nach einer Zusammenstellung empirischer Ergebnisse aus einer Literaturrecherche wird die Kontaktdruck- und Kontaktschubverteilung in der BAF theoretisch hergeleitet.

4.2.1 Ergebnisse aus empirischen Untersuchungen

Es gibt viele Versuchsanordnungen zur Bestimmung der Kontaktdruck- und Kontaktschubverteilung eines Reifens [49], [59], die „Contact Stress Cell“ (CSC) aus Dänemark, die „Tire-Road Contact Pressure Sensors“ der Precision Measurement Company, ein Messsystem mit piezoelektrischen keramischen Sensoren der Komatsu Corporation, der „Kistler MODULAS Quartz Sensor Array“ vom Nevada Automotive Test Center (NATC) und eine Vorrichtung im Texas Transportation Institute. Außerdem gibt es von der Firma Continental AG einen Trommelprüfstand, der mit mehreren Kraftaufnehmern für alle drei Richtungen (vertikal, horizontal längs und quer) ausgestattet ist [38]. Am bekanntesten ist

der „South-African Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array“ (VRSPATA) [6], [7], [14], mit dem eine genaue Messung aller drei Kontaktspannungen möglich ist. Hierzu wird über 20 Metallstifte eine Breite von 356 mm erfasst, wobei der Reifen mit Kriechgeschwindigkeit von 0,3 m/s über das Messsystem rollt. Insgesamt gelten für jede Versuchsanordnung andere Voraussetzungen und Randbedingungen, die zu unterschiedlichen Genauigkeiten führen.

Die Ausdehnung der BAF, die Maximalspannungen und die Spannungsverteilung in der BAF sind für Pkw und Lkw unterschiedlich, dies hängt von der Belastung, dem Reifeninnendruck und dem Reifentyp ab. Es gibt zwei Arten von Reifentypen: den Diagonalreifen (bias ply tire) und den Radialreifen oder Stahlgürtelreifen (radial ply tire). Der Diagonalreifen wird in Deutschland kaum noch verwendet [54], besitzt aber gegenüber dem Radialreifen robustere Flanken, so dass er in Ländern mit vielen Schotterstraßen oder schlecht unterhaltenem Straßennetz noch zum Einsatz kommt. Daher gibt es Untersuchungen zu Diagonalreifen auch in aktuellen Veröffentlichungen, z.B. de Beer [14].

Folglich ergeben sich je nach gewählter Versuchsanordnung und untersuchtem Reifen unterschiedliche Ergebnisse, welche sogar widersprüchliche Aussagen beinhalten können, wie im Weiteren erläutert wird.

Vertikalkräfte

Die Verteilung der Vertikaldruckspannungen ist abhängig von den Reifenstruktureigenschaften bzw. dem Reifendesign (Last, Reifentyp, Reifendruck) und dem aktuellem Betriebszustand (Rollen, Beschleunigung, Seitenkraft) [13], [49]. Mit zunehmendem Reifeninnendruck steigt die Beanspruchung, dies hat aber einen geringen Einfluss zur Folge. Eine Variation der Last wirkt sich wesentlich stärker aus [49].

Die Höhe der Vertikalpressung kann bis zu dreimal höher sein als der Reifeninnendruck [14], [28], [37]. In der Regel liegt das Verhältnis von maximaler Vertikalspannung zum Innendruck zwischen 1,7 und 1,9 [6].

In Längsrichtung (longitudinal) nimmt die Vertikaldruckspannung annähernd einen halbkreis- oder sinusförmigen Verlauf ein. Beim Rollen ist die vertikale Belastung im vorderen Bereich der BAF größer als im hinteren Bereich der BAF. Diese Asymmetrie beruht auf dem Rollwiderstandsmoment [51] (vergleiche Abb. 4-5). Mit zunehmender Geschwindigkeit steigen die Vertikalspannungen im vorderen Bereich der BAF weiter an [8], [13]. Die Auswirkungen sind aber so gering, dass in vielen Veröffentlichungen davon ausgegangen

wird, dass der Rollwiderstand und die Geschwindigkeit nicht die Vertikalspannungsverteilung beeinflusst [49].

In Querrichtung (lateral, transversal) ist die Verteilung des Vertikaldrucks komplizierter. Bei niedrigem Reifeninnendruck oder Überladung (underinflation/overloading) wird über die Reifenflanke mehr Last abgetragen, die Beanspruchung steigt am Rand. Bei überhöhtem Innendruck oder zu geringer Auflast (overinflation/underloading) nimmt die Pressung in der Mitte der BAF zu hohe Werte an.

Wenn der Reifen mit ausreichendem Innendruck befüllt ist, nimmt die Vertikalpressung eine Verteilung nach Abb. 4-8 an [40], [42]. Allerdings können bei Überladung im Schulterbereich höhere Spannungen als in der Mitte auftreten, wie in Abb. 4-9 dargestellt wird.

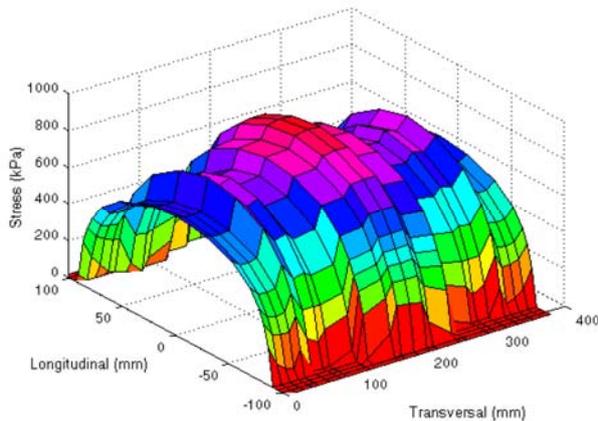


Abb. 4-8: Vertikaldruckspannungen in BAF (normal) [1]

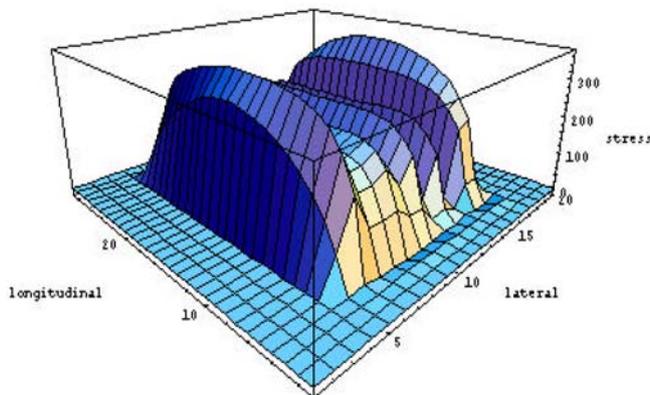


Abb. 4-9: Vertikaldruckspannungen in BAF (Überladung) [6]

Horizontalkräfte

Horizontalkräfte, deren Spannungsverteilung ähnlich komplex wie bei den Vertikalkräften von vielen Parametern abhängt, entstehen durch äußere Krafteinwirkung, wie durch Längskräfte aus Antrieb und Bremsen oder Seitenführungskräfte. Aber auch bei statischer Beanspruchung oder freiem Rollen entwickeln sich tangentielle Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahn. Die Richtung dieser horizontalen Spannungen hängt vom Material des Reifens ab. Beim Vollgummireifen sind die auf die Straßenoberfläche wirkenden Schubspannungen nach außen und beim Luftreifen nach innen gerichtet [51]. Die Horizontalkräfte entstehen zum einen durch Zwangskräfte aus dem Gewebeaufbau, welche vom Rand der BAF zur Mitte gerichtet sind [13], [49], [52], [57], und zum anderen lokal begrenzt durch Kompressionsschübe aus der Zusammendrückung der Gummilamellen, welche von der Mitte nach außen verlaufen [28], [57], [61].

Die Größe der maximalen Horizontalspannungen bei freiem Rollen entspricht ca. 20 % der maximalen Vertikaldruckspannung [28], sie hängt stark von der Reifenart ab. Bei Diagonalreifen betragen die Maxima der Schubspannungen in Querrichtung 29 % bzw. in Längsrichtung 13 % [6], bei Radialreifen 23 % bzw. 18 % [6], bei Breitreifen 12 % bzw. 16 % [59] oder jeweils 19 % [6] der maximalen Vertikaldruckspannung. Ältere Veröffentlichungen gehen häufig davon aus, dass (bei freiem Rollen) eine Berücksichtigung der Horizontalkräfte vernachlässigbar sei, da diese sich kaum auf die Befestigungsreaktionen auswirken würden. Inzwischen aber beziehen alle kürzlich erschienenen Untersuchungen die Horizontalspannungen in die Lastannahme mit ein [61]. Auch hier gilt ebenso wie bei den Vereinfachungen bei der Form der BAF, dass der Einbezug der Schubspannungen sich nur nahe der Oberfläche auswirkt. So ruft deren Hinzunahme bei den Zugspannungen an der Unterseite des Asphalts und bei den Druckspannungen auf den Untergrund keinen Unterschied gegenüber der reinen Vertikalbelastung hervor, verursacht dafür aber geringe Auswirkungen bei den Schubspannungen in ca. 5 cm Tiefe am Rand des Reifens [59].

Die **Längsschubspannungen** (ohne äußere Kräfte) sind bei statischer Beanspruchung symmetrisch, beim Rollen asymmetrisch, die Resultierende ist eine negative Kraft entgegen der Fahrtrichtung und entspricht dem Rollwiderstand (siehe S. 68 in Kapitel 4.1) [8], [51], [57]. Der Schub in Längsrichtung wirkt in Form einer Sinuskurve vom Reifeneinlauf ausgehend erst gegen, dann in Fahrtrichtung [13], [28]. Diese Form ist in Messungen, z.B. nach Abb. 4-10 erkennbar.

Der Verlauf der Längskraft über die Breite ist abhängig von der Radlast und dem Innendruck [8]. Je nach vertikaler Druckspannungsverteilung sind die Spannungen demnach in der Mitte [49] oder am Rand [28] am höchsten.

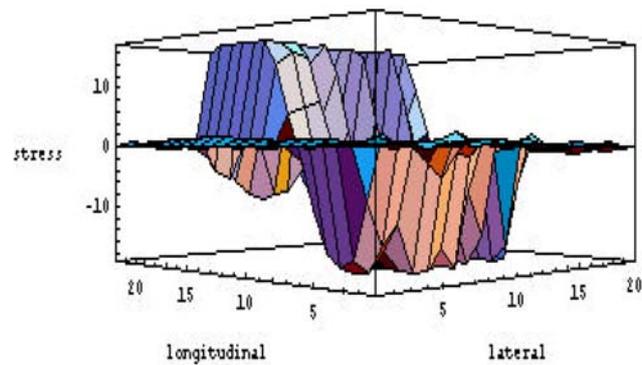


Abb. 4-10: Längsschubspannungen in BAF [6]

Die durch äußere Kräfte - bei Antrieb und Bremsen - entstehenden Längsspannungen steigen vom Reifeneinlauf bis zum –auslauf kontinuierlich an. Dabei entwickeln sich die Schubkräfte bei Antrieb entgegen der Fahrtrichtung und beim Bremsen in Fahrtrichtung [8], [13]. Die Abb. 4-11 zeigt die Längskräfte unter Antriebsmoment und die Abb. 4-12 die Längskräfte unter Bremsmoment mit unterschiedlichen Beschleunigungswerten und Geschwindigkeiten. Die Kurve a in Abb. 4-12 stellt die Verteilung der Längskraft beim Rollen dar. Aus experimentellen Beobachtungen hat Bode [8] am Reifenauslauf eine Umkehr der Schubspannungen festgestellt.

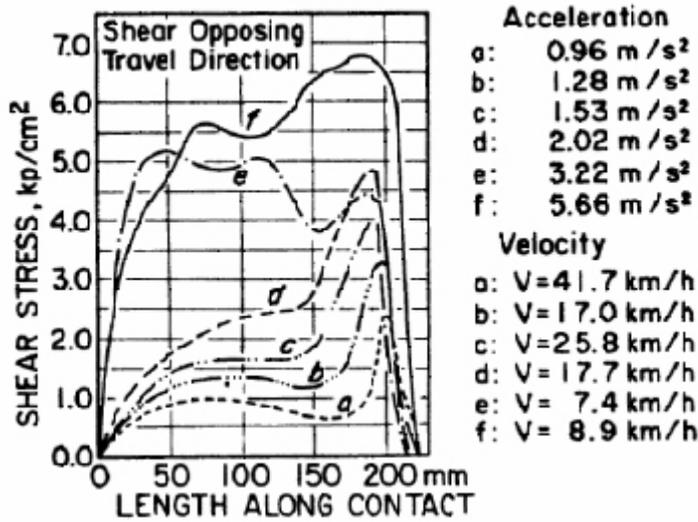


Abb. 4-11: Längskräfte in BAF unter Antrieb [13]

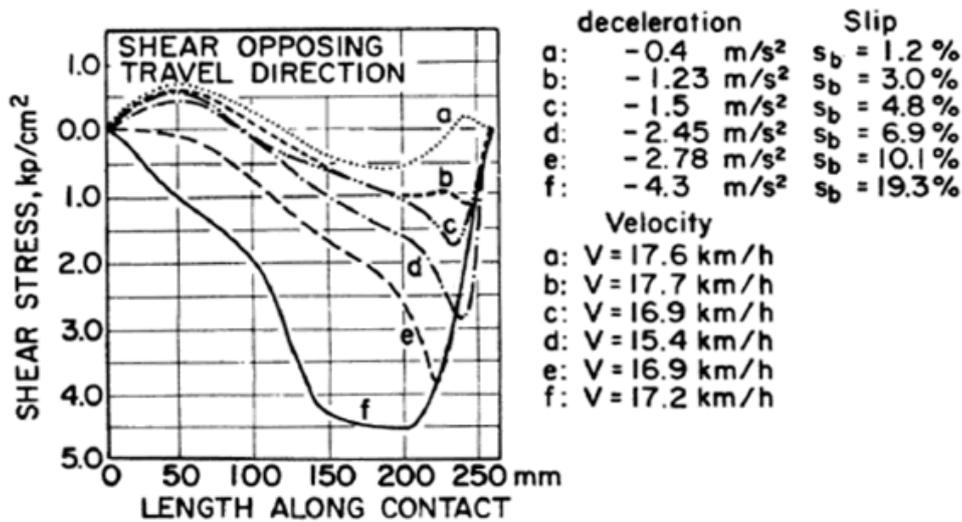


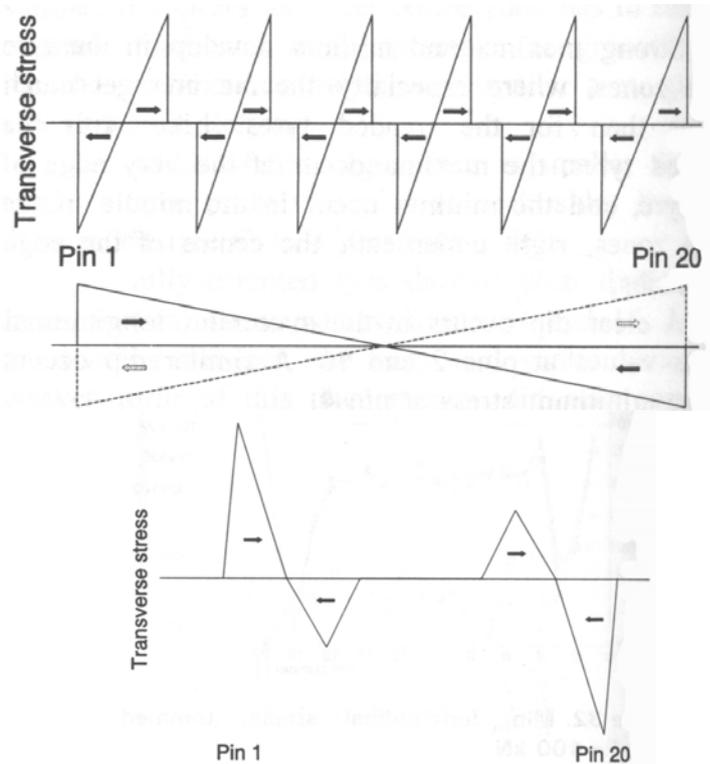
Abb. 4-12: Längskräfte in BAF unter Bremsung [13]

Es ist möglich, bei den experimentell bestimmten Schubspannungen die Effekte aus Antrieb oder Bremsen von der Wirkung aus Reifenverformung zu trennen [8], [13]. Damit ist es umgekehrt vorstellbar, aus der Überlagerung der beiden Arten eine neue Schubspannung zu konstruieren (wie später in Kapitel 4.2.3 erfolgt).

Auch bei den **Querschubspannungen** liegt eine Überlagerung zweier Effekte vor, wie Abb. 4-13 im Zweidimensionalen und Abb. 4-14 im Dreidimensionalen zeigt: Erstens will

sich das komprimierte Gummi ausdehnen, daher entstehen unter jeder Lamelle Kräfte von der Mitte zum Rand [6], [28]. Zweitens sind über die ganze Reifenbreite Querschübe bei zu geringem Reifendruck oder Überladung nach innen, und bei überhöhtem Reifendruck oder zu geringer Auflast nach außen gerichtet [28].

Der Verlauf der Querkraft über die Länge orientiert sich an der vertikalen Druckspannungsverteilung. Die Querspannungen sind bei statischer Beanspruchung größer als beim Rollen [51], da die BAF in ihrer räumlichen Ausbreitung beim Rollen wesentlich geringer behindert wird.



- Oben: Effekt aus Zusammendrückung der Reifenlamelle
- Mitte: Effekt aus zu niedrigem Reifeninnendruck / Überladung (durchgezogen),
aus überhöhtem Reifeninnendruck / zu geringer Auflast (gepunktet)
- Unten: Gesamtschub als Messung bei Überladung
(mit feststellbarer Überlagerung beider Effekte)

Abb. 4-13: Querverteilung des Querschubes unter BAF [28]

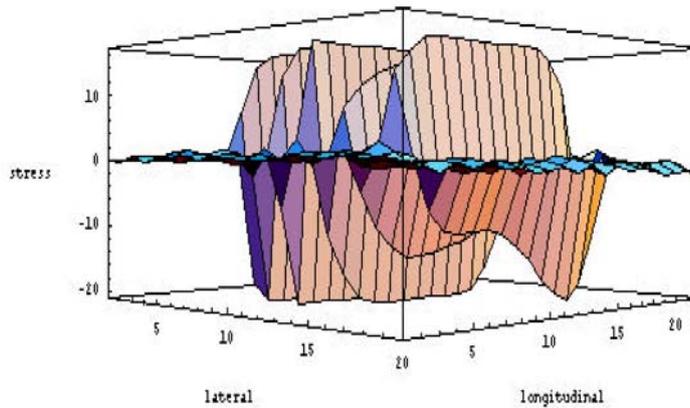


Abb. 4-14: Querschubspannungen in BAF [6]

Die durch Seitenführungskräfte aus Kurvenfahrten verursachten Querspannungen bauen sich vom Reifeneinlauf stetig bis über die Mitte der BAF auf und laufen bis zum Reifen- auslauf gegen Null [13], [52], was in Abb. 4-15 dargestellt wird.

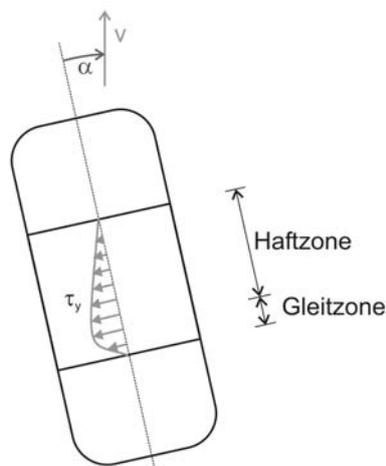


Abb. 4-15: Seitenführungskräfte in BAF

4.2.2 Kontaktdruckverteilung

Zur Bestimmung der Verteilung der Vertikalspannungen in der BAF werden zwei Modelle behandelt. Zum einen das Reifenmodell der Continental AG, welches der Reifenpressung bei optimalem Reifendruck entspricht, zum anderen ein von GROENENDIJK [28] und BLAB [6] entwickeltes und hier modifiziertes Modell, um zu geringen Reifendruck oder eine Überladung zu simulieren. Bei beiden Modellen wird die Verschiebung der Kraftresul-

tierenden aus dem Rollwiderstand nicht berücksichtigt, da diese maximal $h = 0,5$ cm betragen würde und damit keine großen Auswirkungen verursachen wird. Der Rollwiderstand selbst geht über den Anteil der Horizontalspannungen in die Berechnung ein.

Gemäß dem von der **Continental** AG zur Verfügung gestellten Modell bleibt die BAF bei einer Änderung der Radlast konstant, was in der Realität durch eine Anpassung des Luftdruckes erreichbar ist. Als Variablen gehen die Breite LB und die Länge LL der BAF, ein Kreisradius r_k und eine Höhendifferenz h_{diff} ein, welche alle vom Reifentyp abhängen, sowie die vom Reifentyp und von der Achslast abhängige maximale Höhe h_{max} . Die berechneten Werte der Vertikalpressung besitzen die Einheit ‚bar‘. Das Flächenintegral über die BAF ergibt die Radlast.

Aus dem Modell kann eine Funktion gebildet werden, welche in Abhängigkeit von den Flächenkoordinaten die Höhe der Vertikalpressung angibt. Der Ursprung der doppelt-symmetrischen Funktion befindet sich im Mittelpunkt der BAF, x steht für den Abstand vom Mittelpunkt in Längsrichtung (in mm), y für den Abstand in Querrichtung (in mm) und z für die vertikale Flächenpressung (in bar).

Im Längsschnitt (siehe Abb. 4-16) wird die Reifenpressung durch zwei Kreissegmente dargestellt, welche im Übergangspunkt θ tangential ineinander übergehen.

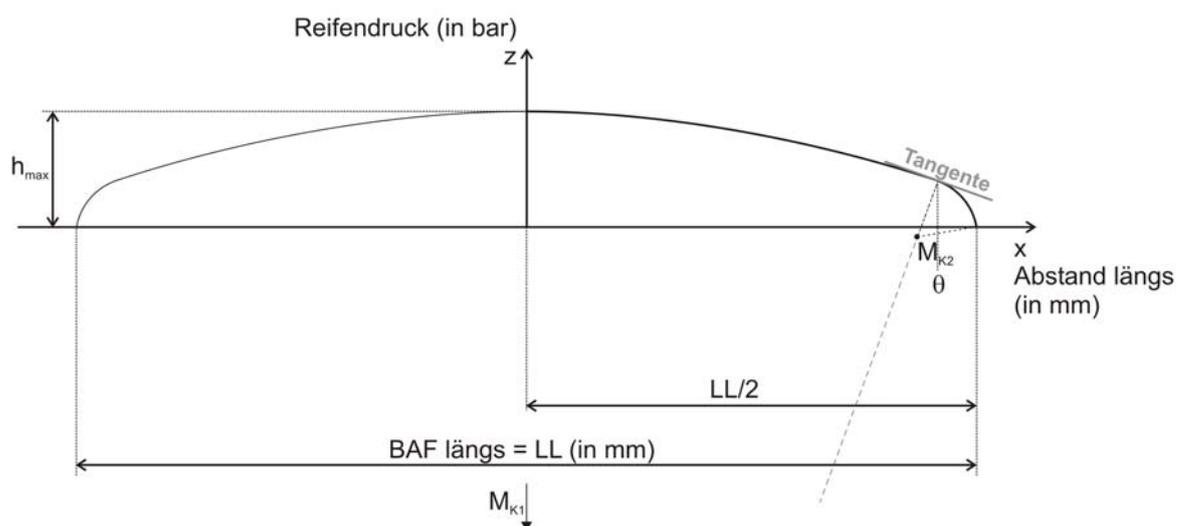


Abb. 4-16: Reifendruckmodell - Aufbau längs

Hierbei bestimmen in den beiden Kreisgleichungen die Variablen a und b die Lage des Kreismittelpunkts M_K mit dem Radius r :

$$(x - a)^2 + (z - b)^2 = r^2 \quad (4.11)$$

Daraus ergeben sich für die beiden Kreise K_1 und K_2 die Unbekannten a_1, b_1, r_1 sowie a_2, b_2, r_2 . Die Radien der Kreise sind mit $r_1 = 4000$ und $r_2 = r_1/20 = 200$ für alle Reifen fest vorgegeben.

Aus Symmetriegründen zur x -Achse wird a_1 zu Null. Dadurch lässt sich b_1 aus der ersten Randbedingung bestimmen, denn bei $x = 0$ tritt die maximale Belastung h_{max} auf:

$$z_1(x_1 = 0) = h_{max} \Rightarrow b_1 = h_{max} - r_1 \quad (4.12)$$

Für die restlichen drei verbleibenden Variablen a_2, b_2, Θ stehen drei weitere Randbedingungen zur Verfügung: Am Rand der Aufstandsfläche muss die Belastung zu Null werden und am Übergangspunkt Θ wird ein stetiger Übergang gefordert.

$$\begin{aligned} z_2(x_2 = LL/2) &= 0 \\ z_1(x_1 = \Theta) &= z_2(x_2 = \Theta) \\ z_1'(x_1 = \Theta) &= z_2'(x_2 = \Theta) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Nach Lösung des Gleichungssystems ergibt sich die Belastungsfunktion für den Längsschnitt folgendermaßen:

$$z = \begin{cases} h_{max} - r_1 + \sqrt{-x^2 + r_1^2} & \text{für } 0 \leq x \leq \Theta \\ b_2 + \sqrt{-x^2 + 2 \cdot x \cdot a_2 - a_2^2 + r_2^2} & \text{für } x > \Theta \end{cases} \quad (4.14)$$

Die Flächenpressung des in Abb. 4-17 dargestellten Querschnitts kann mit einer dreiteiligen Funktion beschrieben werden (siehe Gleichung (4.15)).

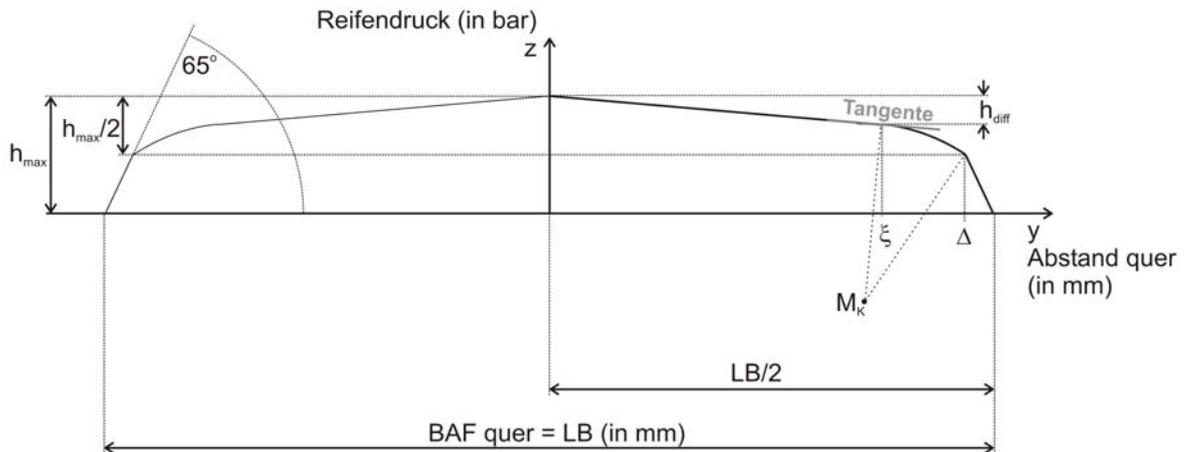


Abb. 4-17: Reifendruckmodell - Aufbau quer

Vom maximalen Hochpunkt im Ursprung h_{\max} sinkt die Flächenpressung um einen bestimmten Wert h_{diff} linear ab. Dort schließt sich in einem tangentialen Übergang an der Stelle ξ eine Kreisgleichung an. Am Rand des Querschnittes existiert eine Gerade, welche in einem vorgegebenen Winkel von einem Abszissenwert Δ mit der Ordinate $z = h_{\max}/2$, der gleichzeitig den Schnittpunkt mit der Kreisfunktion darstellt, bis auf Null bei $LB/2$ verläuft.

$$z = \left\{ \begin{array}{ll} h_{\max} - s \cdot y & \text{für } 0 \leq y \leq \xi \\ b_k + \sqrt{-y^2 + 2 \cdot y \cdot a_k - a_k^2 + r_k^2} & \text{für } \xi < y \leq \Delta \\ h_{\max} / 2 - m \cdot (y - \Delta) & \text{für } y > \Delta \end{array} \right\} \quad (4.15)$$

Aus dem Winkel von 65° am Außenrand des Reifens leitet sich die Steigung m und der Schnittpunkt Δ ab. Zudem ist der Radius des Kreises r_k festgelegt. Den verbleibenden vier Unbekannten a_k , b_k , s und ξ stehen vier Randbedingungen gegenüber: Beim Abszissenwert Δ muss die Kreisgleichung einen Ordinatenwert von $h_{\max}/2$ ergeben, der Übergang bei ξ muss stetig und differenzierbar sein, sowie einen Wert von $h_{\max} - h_{\text{diff}}$ aufweisen.

$$\begin{aligned} z_2(y_2 = \Delta) &= h_{\max} / 2 \\ z_1(y_1 = \xi) &= z_2(y_2 = \xi) = h_{\max} - h_{\text{diff}} \\ z_1'(y_1 = \xi) &= z_2'(y_2 = \xi) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Dadurch lässt sich die oben angegebene Querschnittsfunktion (4.15) bestimmen.

Durch Multiplikation der Längs- und Querschnittsgleichungen (4.14) und (4.15) entsteht eine Flächenfunktion, welche ein Viertel der Reifenpressung in sechs Segmenten I – VI

4.2 Verkehrsbeanspruchung - Ermittlung der Beanspruchungsform

beschreibt (siehe Abb. 4-18). Aus dieser zusammengesetzten Funktion lässt sich bei gegebener Achslast die maximale Flächenpressung h_{\max} iterativ berechnen.

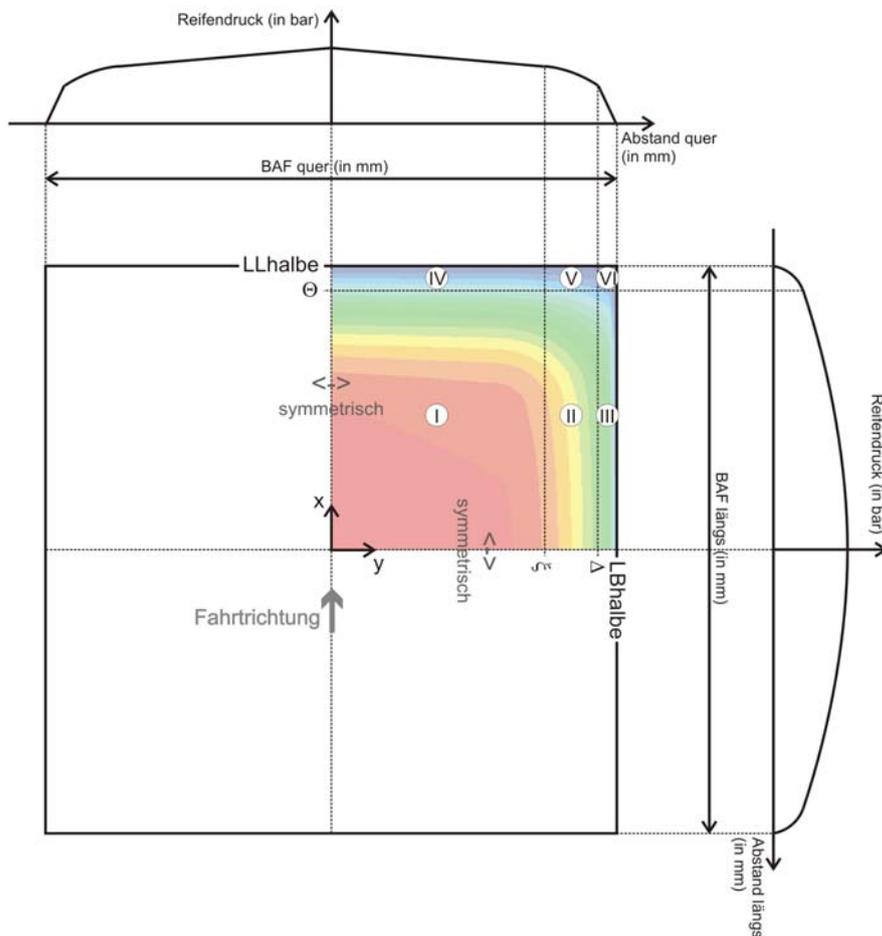


Abb. 4-18: Reifendruckmodell in Draufsicht

Ein Reifentyp wird folglich durch die vier Parameter, die Breite LB , die Länge LL , den Kreisradius r_k und die Höhendifferenz h_{diff} , bestimmt, durch die sich in Kombination mit der Achslast die maximale Druckhöhe h_{\max} ergibt.

Da das Volumenintegral der Reifenpressung in gleicher Weise wie die Radlast wächst, aber am Rand der BAF die zuvor beschriebenen Zwangsbedingungen vorliegen, steigt die maximale Druckhöhe h_{\max} bei einer Erhöhung der Achslast leicht überproportional an. Obwohl im Berechnungsprogramm ein linear-elastisches Spannungs-Dehnungsverhalten angenommen wird, muss durch diesen Effekt eine Achslaständerung sich nichtlinear auf die berechneten Spannungen übertragen, vor allem im oberflächennahen Bereich.

Auch wenn die Reifenbreite und die Reifenlänge bei wechselnden Radlasten modellbedingt konstant bleiben, verändern sich dennoch die Anteile der zusammengesetzten Gleichungen (4.14) und (4.15). In die beiden Gleichungen (4.14) über die Reifenlänge gehen keine zusätzlichen, von den Reifentypen abhängige Parameter ein. Mit einer Erhöhung der Radlast steigt die Horizontallänge des äußeren Kreissegments an, während das innere Kreissegment um den gleichen Betrag schrumpft. Bei der Reifenbreite (Gleichungen (4.15)) nimmt die horizontale Länge der äußeren Geraden ($y > \Delta$) proportional zur maximalen Flächenpressung h_{\max} zu, da diese bei unveränderlichem Winkel immer bis zu einer Höhe von $h_{\max}/2$ ansteigt. Die mittlere Gleichung zur Bestimmung der Reifenbreite ($\xi \leq y \leq \Delta$) entspricht einem Kreissegment mit dem Radius r_k . Daher sind die Längen der Kreissegmente bei den Reifentypen, welche einen größeren Radius r_k besitzen, deutlich größer; insgesamt steigen sie ebenso wie die äußere Gerade mit der Reifenlast. Die horizontale Länge der inneren Geraden ($0 \leq y \leq \xi$) nimmt dagegen mit steigender Achslast ab, höhere Werte ergeben sich bei Reifentypen, zu denen eine größere Höhendifferenz h_{diff} gehört.

In einem zweiten Modell soll die Möglichkeit der **Simulation einer Überladung oder eines zu niedrigen Reifendrucks** gegeben sein. Für die Modellierung einer solchen Situation wird von GROENENDIJK [28] und BLAB [6] in Querrichtung eine Dreiteilung der BAF vorgenommen. So ergeben sich zwei Randzonen zu je 20 % und eine Mittenzone zu 60 % mit unterschiedlichen Längen nach Abb. 4-19. Dabei wird die Mittenzone hauptsächlich durch den Reifeninnendruck beeinflusst, die Randzonen nur durch die Reifenlast [6], [28].

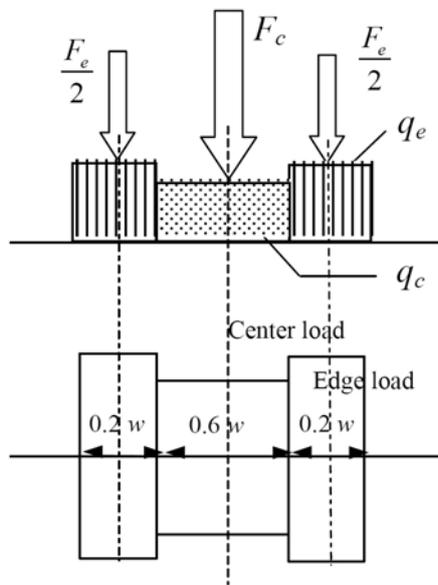


Abb. 4-19: Lastmodell des Vertikaldrucks bei Überladung [6]

Zur Aufteilung der Gesamtlast auf die beiden Bereiche, werden die Lastverteilungsfaktoren α_C für den mittleren Bereich (center) und α_E für die Randzone (edge) eingeführt. Da die Summe von α_C und α_E den Wert 1 ergeben muss, reicht der Lastverteilungskoeffizient α zu deren Bestimmung aus [6].

$$\alpha_C = \frac{F_C}{F_z} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} = 1 - \frac{1}{1 + \alpha}$$

$$\alpha_E = \frac{F_E}{F_z} = \frac{1}{1 + \alpha} \quad (4.17)$$

mit F_z vertikale Gesamtlast in kN

F_C vertikale Last im Zentralbereich (center) in kN

F_E vertikale Last im Randbereich (edge) in kN

Durch eine Regressionsanalyse mit Realdaten des VRSPTA wird der Einfluss auf die Lastverteilung α durch Reifeninnendruck und Reifenauflast bestimmt; es ergibt sich aus den Untersuchungen von BLAB [6] eine zweifach lineare Regressionsfunktion:

$$\alpha = k_1 + k_2 \cdot p_i + k_3 \cdot F_z \quad (4.18)$$

mit F_z vertikale Gesamtlast in kN

p_i Reifeninnendruck in kPa (= 10^{-3} N/mm²)

k_i Regressionsparameter

In gleicher Weise werden die mittleren Pressungen in der Mittenzone q_c und der Randzone q_E ermittelt (in kPa). Der Mittenbereich der BAF wird durch den Reifeninnendruck und in geringem Maße auch durch Reifenlast beeinflusst. Dagegen wird die Randpressung nur durch die Reifenauflast bestimmt. Hier ist die Beziehung zu F_z am Besten durch eine quadratische Regressionsfunktion abbildbar [6]:

$$q_c = k_1 + k_2 \cdot p_i + k_3 \cdot F_z$$

$$q_E = k_1 + k_2 \cdot F_z + k_3 \cdot F_z^2 \quad (4.19)$$

Die Regressionskoeffizienten der Gleichungen (4.18) und (4.19) sind für den Reifentyp 11 R 22.5 (ca. entsprechend dem 295/80 R 22.5 [27]) als Repräsentant eines Radialreifens und für den Reifentyp 425/65 R 22.5 als Beispiel eines Breitreifens (wide base) in Tab. 4-2 angegeben.

| Gültigkeitsbereich | | radial tire | wide base tire |
|----------------------|-----|----------------------|-----------------------|
| | | 400 - 900 26 - 56 | 500 - 760 26 - 106 |
| Druck | kPa | | |
| Last | kN | | |
| Regressionsparameter | | α | |
| k1 | | 0,840 | 2,292 |
| k2 | | 9,49E-04 | 1,32E-03 |
| k3 | | -1,34E-02 | -2,42E-02 |
| | | q_c | |
| k1 | | 190,230 | 119,380 |
| k2 | | 0,438 | 0,450 |
| k3 | | 0,864 | 2,318 |
| | | q_E | |
| k1 | | 17,615 | 109,646 |
| k2 | | 19,189 | 8,657 |
| k3 | | -0,087 | -0,015 |

Tab. 4-2: Regressionskoeffizienten des Lastmodells nach BLAB [6]

In der vorliegenden Untersuchung, im Gegensatz zum Modell nach BLAB [6] aus Abb. 4-19, wird für Rand und Mitte keine konstante mittlere Pressung aufgebracht, sondern

eine Verteilung entsprechend dem Längsprofil des Modells von Continental. Das Verhältnis der maximalen Randspannung zur maximalen Mittenspannung ergibt sich aus q_E/q_C . Desgleichen gelten für die Rand- und Mittenzone keine unterschiedlichen Längen, sondern es wird für die BAF eine gleiche Länge vorausgesetzt, die auch aus den experimentellen Druckverteilungen nach Abb. 4-8 und Abb. 4-9 visuell nachweisbar ist. Um dennoch die Lastaufteilung nach α_C und α_E einzubeziehen, wird mit diesen Größen die Aufteilung von Rand- und Mittenzone in der Breite variabel gestaltet.

4.2.3 Kontaktschubverteilung

Hier werden die horizontalen Schubspannungen innerhalb der BAF in Längsrichtung und Querrichtung ermittelt.

Theoretisch kann die Verteilung der Schubspannungen in **Umfangsrichtung (längs)** durch ein Modell zweier aufeinander rollender homogener und linear elastischer Walzen hergeleitet werden (siehe Abb. 4-20 mit Walze 1 gebremst und Walze 2 angetrieben). Hiermit ist es möglich, traktionsfreies oder traktives Rollen abzubilden und die Kontaktdruckverteilung $p(x)$ und Kontaktschubspannungsverteilung $t(x)$ zu bestimmen [16], [46].

Allgemein dienen als Eingangsgrößen:

| | |
|----------------|--|
| E_1, E_2 | Elastizitätsmodul der Walzen |
| ν_1, ν_2 | Querkontraktion der Walzen |
| R_1, R_2 | Radius der Walzen |
| κ | Kraftschlusswert/Kraftschlussausnutzung |
| μ | Reibwert (hier: im Sinne der Gleitreibungszahl μ_G) |
| P | Gesamtlast, Kontaktnormalkraft |

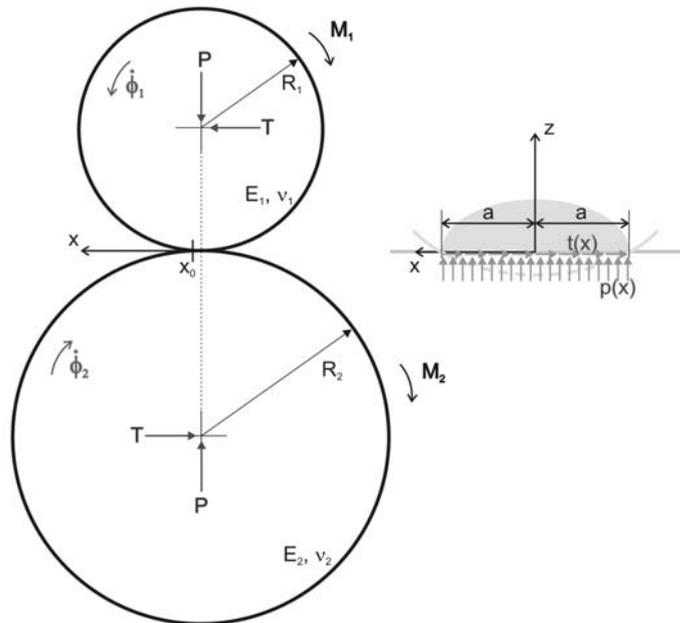


Abb. 4-20: Rollkontaktmodell zweier elastischer Walzen, nach [46]

Der Ursprung des x,z -Koordinatensystems liegt in der Mitte des Kontaktgebietes, und der Wert x_0 bezieht sich auf den Kontaktflächenschwerpunkt. Eine rechnerische Vereinfachung erfolgt mit der Einführung von auf die Kontaktlänge $2 \cdot a$ normierten Koordinaten ξ und η , welche mit den alten x,z -Koordinaten in folgender Weise gekoppelt sind:

$$\xi = \frac{x}{a}, \quad \eta = \frac{z}{a}, \quad \xi_0 = \frac{x_0}{a} \quad (4.20)$$

Aus den beiden Radien der Walzen kann ein Vergleichsradius errechnet werden, der geometrisch äquivalente Radius R :

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.21)$$

Um die Traktion eines Rades auf ebener Fahrbahn zu bestimmen, muss der Radius R_2 der zweiten Walze gegen unendlich laufen, der äquivalente Radius wird dann zu R_1 .

Mit der halben Kontaktlänge a und R wird die relative Abplattung λ definiert:

$$\lambda = \frac{a}{R} \quad (4.22)$$

Die Definition des globalen Schlupfes S ergibt sich aus den lokalen Geschwindigkeiten in der Kontaktfläche:

$$S = \frac{R_2 \cdot \dot{\varphi}_2 - R_1 \cdot \dot{\varphi}_1}{R_2 \cdot \dot{\varphi}_2} \quad (4.23)$$

Die resultierende Kontaktnormalkraft P (als Linienlast mit der Dimension Kraft/Länge) entspricht der Integration der Kontaktdruckverteilung $p(x)$ bzw. $p(\xi)$ über die Kontaktlänge $2 \cdot a$. In gleicher Weise errechnet sich die resultierende Kontaktschubkraft T aus der Kontaktschubspannungsverteilung $t(x)$ bzw. $t(\xi)$.

$$P = a \cdot \int_{-1}^1 p(\xi) d\xi$$
$$T = a \cdot \int_{-1}^1 t(\xi) d\xi \quad (4.24)$$

Durch die Kraftschlussausnutzung κ ist die übertragbare Umfangskraft T feststellbar:

$$\kappa = \frac{T}{\mu \cdot P} \quad (4.25)$$

Bei $\kappa = 0$ gibt es keine Umfangskraft, der Kontakt kommt dem freien Rollen gleich. Maximale Antriebskräfte werden bei $\kappa = 1$ übertragen, in diesem Fall tritt vollständiges Gleiten auf.

Die beiden Integralgleichungen des Rollkontaktproblems können nur in Sonderfällen analytisch gelöst werden. Dies trifft zu für den Rollkontakt zweier Walzen aus gleichem Material (nach CARTER) oder zweier Walzen verschiedenen Materials, aber ohne Traktion (nach BUFLER).

Für den **traktionsbehafteten Rollkontakt** zweier Walzen aus gleichem Material existiert die analytische Lösung durch Entkopplung der Integralgleichungen nach CARTER [67].

Hier werden E und ν , die für beide Walzen gleich sein müssen, R_1 , R_2 , κ , μ und P benötigt. Aus diesen Eingangsgrößen folgen der Vergleichsradius R nach Gleichung (4.21), der Parameter B , die relative Abplattung λ und der maximale Kontaktdruck p_0 :

$$B = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{E}{(1-\nu^2)}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{B \cdot R}} \quad (4.26)$$

$$p_0 = \frac{B}{\pi} \cdot \lambda$$

Damit ist die relative Abplattung λ entsprechend der Hertzschen Lösung proportional zur Quadratwurzel der Normallast.

Mit der Kraftschlussausnutzung κ wird die halbe Haftgebietslänge α_H , damit wiederum die Lage der Mitte des Haftgebietes ξ_{0H} vom Ursprung ξ bestimmt.

$$\alpha_H = \sqrt{1 - \kappa}$$

$$\xi_{0H} = 1 - \alpha_H \quad (4.27)$$

Hierdurch wird die Kontaktfläche in ein auf der Einlaufseite liegendes Haftgebiet und eine auf der Auslaufseite liegende Gleitzone unterteilt.

Schließlich lassen sich die Kontaktdruckverteilung und die Kontaktschubverteilung bei einem unter Traktion beanspruchten Rad ermitteln:

$$p(\xi) = p_0 \cdot \sqrt{1 - \xi^2}$$

$$t(\xi) = \mu \cdot p_0 \cdot \begin{cases} \sqrt{1 - \xi^2} - \sqrt{\alpha_H^2 - (\xi - \xi_{0H})^2} & (1 - 2 \cdot \alpha_H^2) \leq \xi \leq 1 \\ \sqrt{1 - \xi^2} & -1 \leq \xi \leq (1 - 2 \cdot \alpha_H^2) \end{cases} \quad (4.28)$$

Der obere Ast der Kontaktschubverteilung beschreibt das Haftgebiet, der untere Ast die Gleitregion.

In Abb. 4-21 sind die Kontaktschubspannungen für verschiedene Kraftschlussausnutzungen dargestellt. Die Gleitzone wird mit zunehmender Kraftschlussausnutzung immer größer, bis sie beim vollständigen Gleiten die gesamte Kontaktfläche umfasst. Dabei nimmt die übertragbare Schubkraft vom Reifeneinlauf (rechts) bis zum –auslauf (links) stetig zu, was mit den experimentellen Beobachtungen (siehe Abb. 4-11 und Abb. 4-12) übereinstimmt.

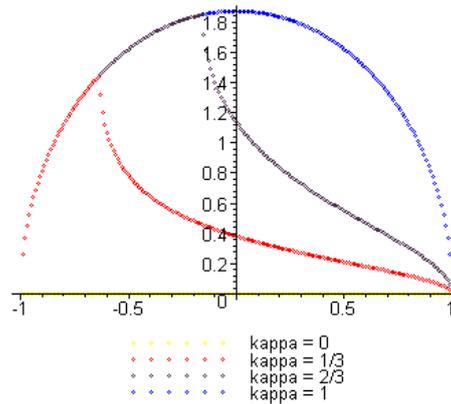


Abb. 4-21: Kontaktschubspannungen bei traktionsbehaftetem Rollkontakt

Der Globale Schlupf S nach Gleichung (4.23) ist damit bestimmbar:

$$S = \mu \cdot \lambda \cdot (1 - \sqrt{1 - \kappa}) \quad (4.29)$$

Der **traktionsfreie Rollkontakt** zweier Walzen unterschiedlichen Materials wird mit der analytischen Lösung über eine komplexe Funktion nach BUFLER [66] gerechnet. Bei unterschiedlichen Steifigkeiten der Kontaktpartner tritt bei der Abplattung eine gegenseitige Behinderung der tangentialen Ausdehnung auf, welche Kontaktschubspannungen erzeugt. Dabei hindert der steifere Kontaktpartner den weicheren an der unbehinderten Ausdehnung und komprimiert diesen, und umgekehrt [46].

Aus den Eingangsgrößen $E_2, E_1, \nu_1, \nu_2, R_1, R_2, P$ und R (Gleichung (4.21)) erfolgt die Berechnung unterschiedlicher Parameter:

$$B = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1(1 - \nu_2^2) + E_2(1 - \nu_1^2)}$$

$$C = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{(1 + \nu_2)(1 - 2 \cdot \nu_2) \cdot E_1 - (1 + \nu_1)(1 - 2 \cdot \nu_1) \cdot E_2}{E_1(1 - \nu_2^2) + E_2(1 - \nu_1^2)}$$

$$\beta = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{\pi + C}{\pi - C} \right) \quad (4.30)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{(1 + 4 \cdot \beta^2) \cdot B \cdot R}}$$

$$p_0 = \frac{B \cdot \lambda}{\sqrt{\pi^2 - C^2}}$$

Danach ergeben sich die Kontaktdruckverteilung und die Kontaktschubverteilung des traktionsfreien Rollens zu:

$$p(\xi) = p_0 \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \cdot \cos\left(\beta \cdot \ln\left(\frac{1 + \xi}{1 - \xi}\right)\right)$$

$$t(\xi) = p_0 \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \cdot \sin\left(\beta \cdot \ln\left(\frac{1 + \xi}{1 - \xi}\right)\right) \quad (4.31)$$

Abb. 4-22 zeigt für verschiedene E-Modul-Verhältnisse die aus der Abplattung und dem unterschiedlichen Material hervorgerufenen Kontaktschubverteilungen. Ist die obere Walze steifer als die untere ($E_2/E_1 = 0,5$), dann wirkt die Kontaktschubspannung in Form einer Sinuskurve im vorderen Kontaktbereich gegen Fahrtrichtung (hier: positiv) und im hinteren Kontaktbereich in Fahrtrichtung (hier: negativ). Diese Schubspannungen decken sich mit den experimentellen Ergebnissen nach Abb. 4-10.

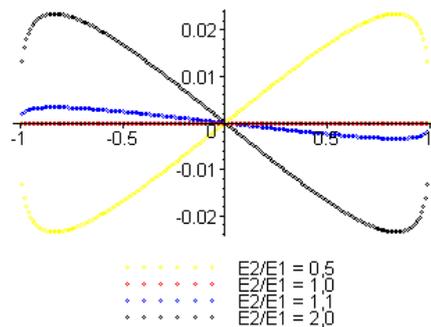


Abb. 4-22: Kontaktschubspannungen bei traktionsfreiem Rollkontakt

Schließlich ergibt die Zusammenführung der beiden Modelle – dem traktionsbehafteten Rollkontakt nach CARTER und dem traktionsfreien Rollkontakt nach BUFLER – die Längsschubspannungen in Umfangsrichtung. Beginnend vom Reifeneinlauf steigen die Schubspannungen bis zur Haftgrenze an – beim Antriebsvorgang gegen die Fahrtrichtung und beim Bremsvorgang in Fahrtrichtung. Innerhalb des Haftgebietes bewirken die Kräfte aus der Abplattung die Überlagerung einer Sinuskurve, welche vom Reifeneinlauf ausgehend erst gegen und dann in Fahrtrichtung gerichtet ist (vergleiche Abb. 4-11, Abb. 4-12 und Abb. 5-1). Bei freiem Rollen mit resultierender Kontaktschubkraft $T = 0$ erstreckt sich die Sinuskurve über die gesamte Länge der BAF. Über die Breite werden die Längsschubspannungen proportional zu den Vertikalspannungen verteilt.

Die Schubspannungen in **Querrichtung** sind, wie in Kapitel 4.2.1 auf S. 80 beschrieben, stark von der Zusammendrückung der einzelnen Reifenlamellen geprägt, da dort Schubspannungen hervorgerufen werden, die von der Mitte an den Rand führen. Weil aber in dieser Untersuchung nicht nur die Reaktion an der Oberfläche (≤ 1 cm) betrachtet werden soll und dementsprechend das Modellnetz gröber aufgeteilt ist und außerdem modellbedingt die Reifenpressung vollflächig wirkt, wird dieser Effekt nicht berücksichtigt.

Bei optimalem Reifeninnendruck, von dem das Modell von CONTINENTAL ausgeht [40], existiert keine übergeordnete Schubspannung über die Reifenbreite in Querrichtung. Im zweiten Kontaktdruckmodell, welches zu niedrigem Reifeninnendruck simulieren kann, muss diese Art der Querschubspannung einbezogen werden. Dann verläuft die Schubspannung über die Breite entsprechend Abb. 4-13, Mitte, d.h. maximale Spannungen am Rand nehmen linear bis zur Mitte der BAF ab, gerichtet jeweils von außen nach innen. Ein überhöhter Reifeninnendruck führt umgekehrt zu von innen nach außen gerichteten Horizontalspannungen. Die Querschubspannungen über die Länge der BAF verhalten sich proportional zu den Vertikalspannungen.

Bei der Seitenführungskraft orientiert sich die Spannungsaufteilung über die Länge der BAF am Modell des traktionsbehafteten Rollkontakts nach CARTER, siehe Abb. 4-21. Bis zur Haftgrenze steigt die Spannung an und fällt bis zum Reifenauslauf auf Null ab. Aber in dieser Arbeit, welche primär die Kräfte aus Antrieb und Bremsen behandelt, wird die Seitenführungskraft nicht berücksichtigt.

5 Spannungsverteilung in der Fahrbahn- befestigung

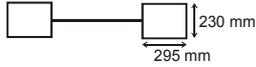
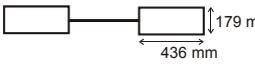
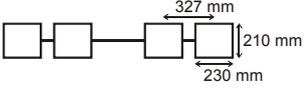
Hier werden die Vorgehensweise und die Resultate zur Berechnung der Spannungen innerhalb der Fahrbahnbefestigung mittels FEM-Programm vorgestellt. Zuerst werden die verschiedenen Fälle der betrachteten Lastkonstellationen erläutert und anschließend die Ergebnisse aus der Spannungsberechnung dargestellt.

5.1 Lastfälle

Die Strukturierung der Lastfälle ist dreistufig aufgebaut. Im ersten Schritt werden bei frei rollenden oder stehenden Reifen die neben der Beschleunigung bestehenden Einflussgrößen auf die Asphaltbeanspruchung untersucht: „Reifentypen“, „Lastmodell“ in Kombination mit entsprechenden Reifenluftdruckfüllungen und „Fahrbahnaufbau und -zustand“ aus den zwei Bauklassen und aus der Temperaturverteilung in der Asphaltbefestigung (Vergleich 1 bis 3). In einem zweiten Schritt wird der Einfluss der Beschleunigungsvorgänge analysiert. Hierbei wird auf den Kraftschluss, die Kontaktschubverteilung und die Stärke des Antriebs eingegangen (Vergleich 4 und 5). Drittens werden Achskombinationen auf der Antriebsachse bei verschiedenen Reifentypen, Temperaturverteilungen und Beschleunigungsvorgängen einander gegenüber gestellt (Vergleich 6).

Im **Vergleich 1 „Reifentypen“** werden die für eine Antriebsachse gebräuchlichen Reifentypen bei freiem Rollen untersucht. Daher werden eine Zwillingsbereifung 295/80 R 22.5 Zw sowie die Breitreifen 425/65 R 22.5 und 495/45 R 22.5 bei einer Belastung von 10 t und optimalem Reifendruck gewählt. Die Abmessungen und Maximalpressungen der drei Reifentypen sind in Tab. 5-1 zusammengestellt.

5.1 Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung - Lastfälle

| Reifentyp | 425/65 R 22.5 | 495/45 R 22.5 | 295/80 R 22.5 Zw |
|-------------------------------|---|--|---|
| Abmessungen |  |  |  |
| Boden- aufstandsfläche | 67850 mm ² | 78044 mm ² | 96600 mm ² |
| maximale Flä- chenpressung | 0,98 N/mm ² | 0,90 N/mm ² | 0,69 N/mm ² |

Tab. 5-1: Geometrie der Reifentypen

Vergleich 2 „Lastmodell“ beinhaltet die Variation der vertikalen Kontaktdruckverteilung in der BAF (siehe Kapitel 4.2.2). Für den Breitreifen 425/65 R 22.5 und den Zwillingsreifen 295/80 R 22.5 Zw werden die Fälle „optimaler Luftdruck“ durch das Modell von CONTINENTAL (siehe S. 83) und „zu niedriger (oder zu hoher) Luftdruck“ durch das modifizierte Modell von GROENENDIJK und BLAB (siehe S. 87) bei einer Belastung von 10 t behandelt. Im Anhang 3 ist die Reifendruckverteilung innerhalb der halben BAF eines Zwillingsreifens für die drei Varianten dargestellt. Zusätzlich werden alternativ der aus nicht angepasstem Reifenluftdruck resultierende Querschub sowie der aus der Reifenpressung resultierende Längsschub aufgebracht.

Im **Vergleich 3 „Fahrbahnaufbau und –zustand“** wird der Einfluss der Temperaturverteilung erforscht; die zu untersuchenden Lastfälle sind im Anhang 2 grafisch dargestellt und mit E-Moduln und Querdehnzahlen aufgelistet. Dabei werden die Fahrbahnzustände „5000“, „warm“, „mittel“, „heiß“, „Diff' Gewitter“ und „Diff' Sonne“ betrachtet. Gleichzeitig wird auf den Einfluss der Bauklasse eingegangen (BK SV und BK III, siehe Abb. 2-1 und Abb. 2-2).

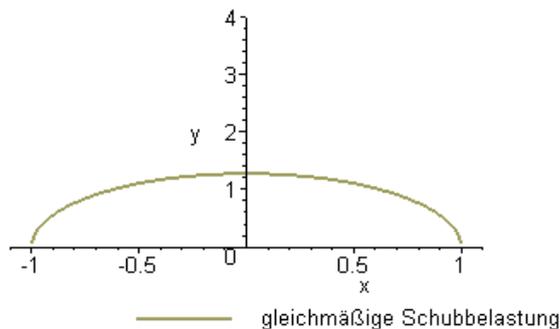
Der Fahrbahnzustand „5000“ geht von einem über die gesamte Asphaltdecke konstanten E-Modul von $E = 5000 \text{ N/mm}^2$ und einer Querkontraktion von $\nu = 0,4$ aus. Dies entspricht einer über das komplette Asphaltpaket gleichmäßigen Temperatur von 23 °C . Ähnlich konstant ist die Temperaturverteilung des Zustands „mittel“, welcher die Fahrbahntemperaturen des gesamten Jahres 2006 mittelt. So liegt in allen Asphaltdecken eine Temperatur von 11 °C vor (siehe Tab. 3-6). Der Zustand „warm“ stellt die Temperaturverteilung eines sommerlichen Nachmittages zum Zeitpunkt der wärmsten Fahrbahntemperaturen dar, indem hier die höchsten drei Stundentemperaturwerte eines Durchschnittstages im Juli 2006 gemittelt sind (vergleiche S. 45). Demgegenüber steht der Zustand „heiß“, wel-

cher den Temperaturverhältnissen in der Fahrbahnbefestigung zur Stunde mit der heißesten Oberflächentemperatur im Jahr 2006 entspricht. Die Temperaturzustände „Diff’ Gewitter“ und „Diff’ Sonne“ repräsentieren die Temperaturverteilung mit der größten positiven und der größten negativen Temperaturdifferenz in der Asphaltsschicht. „Diff’ Gewitter“ weist den höchsten negativen Temperaturgradienten auf und kann durch eine plötzliche Abkühlung der Oberfläche, beispielsweise durch einen Starkregen bei Gewitter auftreten. „Diff’ Sonne“ besitzt den höchsten positiven Temperaturgradienten und tritt ein, wenn starke Sonneneinstrahlung die Fahrbahnoberfläche bei insgesamt noch kälterer Fahrbahnbefestigung erwärmt, was im Frühjahr der Fall ist.

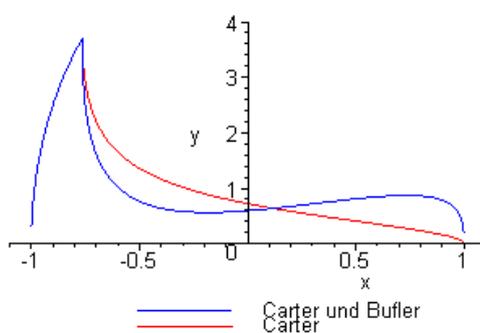
Die Belastung durch Beschleunigungsvorgänge ergibt sich, indem zusätzliche horizontale Schubspannungen in Längsrichtung aufgebracht werden. Dadurch können im **Vergleich 4 „Art der Beschleunigung“** die Auswirkungen durch Antrieb und Bremsen gegenüber dem freien Rollen untersucht werden. Auch wird hier die Form der Kontaktschubverteilung variiert. Zur Wahl stehen ein vereinfachtes Modell, in dem an jeder Stelle der BAF die Höhe der Schubbelastung proportional zur Vertikalbelastung aufgebracht wird, und das Schubbelastungsmodell, welches die Modelle von CARTER und BUFLER aus Kapitel 4.2.3 kombiniert. Die neu entwickelte Kontaktschubverteilung hängt vom Kraftschluss zwischen Fahrbahn und Reifen und von der Längsschubkraft ab. Die niedrige Kraftschlussbeanspruchung ($\mu = 0,4$) gilt für nasse Fahrbahnen, die hohe Kraftschlussbeanspruchung ($\mu = 0,9$) für trockene Fahrbahnen (vergleiche Kapitel 4.1, S. 67). Die Längsschubkraft beträgt 20 % der Vertikalkraft, wodurch übliche Beschleunigungsvorgänge simuliert werden (vergleiche Kapitel 4.1, S. 74). Beispielhaft zeigt Abb. 5-1 die Kontaktschubverteilungen für Antrieb und Bremsen im Längsschnitt bei einer Längskraft von 20 % der Vertikallast und einem Kraftschluss von jeweils $\mu = 0,9$. In den Graphiken sind die gleichmäßige Schubbelastung des vereinfachten Modells, die Belastung nach CARTER und die kombinierte Belastung nach CARTER und BUFLER, welche im Folgenden verwendet wird, dargestellt. Die weiteren Kontaktschubverteilungen (für Längskräfte von 10 % oder 20 % der Vertikalkräfte und Kraftschlusswerte von $\mu = 0,4$ oder $0,9$) sind im Anhang 4 zusammengestellt.

Die Unterschiede bei geringer und hoher Kraftschlussbeanspruchung sowie bei unterschiedlichen Beschleunigungskräften (vereinfachtes Modell – Antrieb – Bremsen) sollen herausgestellt werden. Die horizontale Belastung beträgt jeweils 20 % der vertikalen Belastung, in dem Fall einer 5 t-Radlast (10 t-Achse) entspricht dies der Zugkraft von einer Tonne je Reifen.

Gleichmäßige Schubbelastung:



Antrieb:



Bremsen:

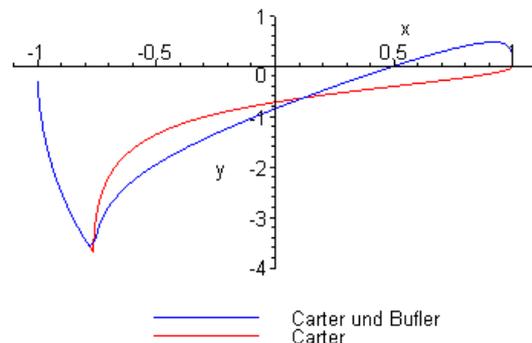
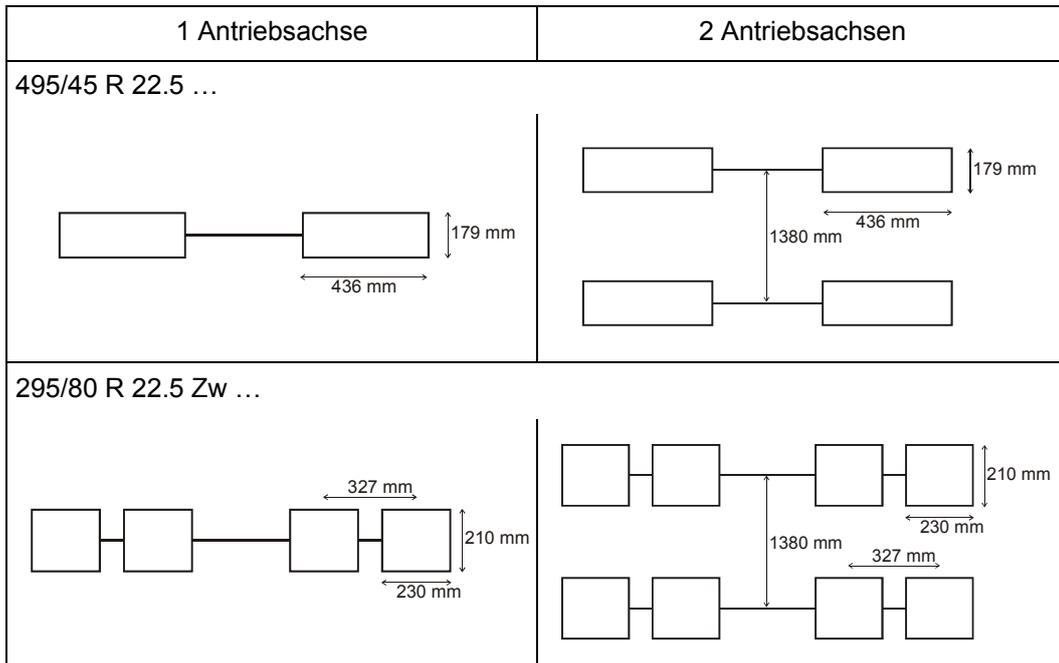


Abb. 5-1: Kontaktschubspannungen bei Beschleunigungsvorgängen

Im Weiteren werden in **Vergleich 5 „Höhe der Beschleunigung“** die Effekte der Stärke der aufgebracht Längskraft bestimmt. Zu diesem Zweck wird gemäß dem vereinfachten Modell bei gleichmäßiger (zur Vertikalbelastung proportionaler) Schubbelastung eine Längskraft von 0 %, 10 %, 20 %, 30 % und 50 % der Vertikalkraft aufgebracht.

In **Vergleich 6 „Achskombinationen“** wird eine Gegenüberstellung zwischen einer Antriebsachse und zwei Antriebsachsen vorgenommen. Hierzu werden der Einzelreifen 495/45 R 22.5 und der Zwillingsreifen 295/80 R 22.5 Zw verwendet. Der Abstand zwischen den beiden Antriebsachsen beträgt 1380 mm (siehe Tab. 5-2). Die Doppelachse mit einer Achslast von zweimal 9,0 t wird sowohl mit einer 9,0 t-Einzelachse als auch mit einer 11,5 t-Einzelachse verglichen. Bei den Beschleunigungsvorgängen beträgt die horizontale Schubbelastung 20 % der jeweiligen Vertikalbelastung. Folglich kann bei gleichem Prozentanteil durch die Doppelantriebsachse (18 t) gegenüber der Einzelachse die zweifache (bei 9 t) bzw. die eineinhalbfache (bei 11,5 t) Beschleunigungskraft auf die Straße übertragen werden.



Tab. 5-2: Geometrie der Achskombinationen

5.2 Ergebnisse der Spannungsberechnung

Im relevanten Betrachtungsbereich (siehe Abb. 2-4) werden die drei Hauptspannungen SP1, SP2, SP3 und die Vergleichsspannungen TRESCA und MISES ausgegeben. Hiermit können direkt über die Spannungen relative Vergleiche zwischen mehreren Lastfällen vorgenommen werden und indirekt kann über Festigkeitshypothesen das Schädigungspotential der Lastfälle abgeschätzt werden. In einfachen Schädigungsmodellen, welche alle zusammen im Kapitel 2.4 beschrieben sind, werden zur Ermittlung des Spurrinnenbildungspotentials unmittelbar die TRESCA- und MISES-Spannungen verwendet, zur Bestimmung des Ermüdungsrissbildungspotentials unmittelbar die maximalen Hauptspannungen (MAX. PRINCIPAL = SP1). Unterteilt nach diesen beiden Kategorien, Spurrinnenbildung und Ermüdung, werden die im vorherigen Kapitelabschnitt aufgestellten Vergleiche durch Betrachtung der Spannungen vorgenommen.

Innerhalb der Asphaltbefestigung treten mehrere Maxima der Schubbeanspruchung auf. Zum einen am Rand und unterhalb der BAF in einer Tiefe bis ca. 10 cm und zum anderen an der Unterseite der Asphaltdecke. Um lokale Spannungsmaxima in der Ausgabedatei gesondert behandeln zu können, wird der Betrachtungsbereich in einen oberen Bereich,

5.2 Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung - Ergebnisse der Spannungsberechnung

die obersten 100 mm, und einen unteren Bereich geteilt (siehe Abb. 2-4). So ergeben sich die maximalen Spannungswerte im oberflächennahem Querschnitt oder Längsschnitt sowie im unterem Bereich der Asphalttschicht: TRESCAmaxOBEN, TRESCAmaxUNTEN, MISESmaxOBEN, und MISESmaxUNTEN.

Als zusätzliche Spurrinnenindikatoren werden die Integrale der Gestaltänderungsarbeit sowohl im oberen als auch gesamten Bereich gebildet (MISESintOBEN, MISESintGES). Durch das Integral der Vergleichsspannung σ_v (MISES) über ein Volumen ergibt sich die Arbeit in Joule, die innerhalb des Volumens geleistet wird. Zum besseren Vergleich der Bauklassen (mit unterschiedlichen Asphalttschichtdicken) wird das Gesamtintegral in Joule je Tiefenmeter angegeben. Um nicht nur den absoluten Maximalwert, sondern einen definierten Bereich der höchsten Schubbeanspruchungen für die Bewertung der Spurrinnenanfälligkeit zu erfassen, bestimmen zwei weitere Größen im oberen und im gesamten Bereich das Integral um die Elemente mit den höchsten MISES-Werten über ein definiertes Volumen, welches zehn Prozent der Elemente des oberen Bereichs entspricht (MISES10intOBEN, MISES10intGES). Auf diese Weise können gleichzeitig mehrere, an den verschiedenen Stellen vorkommende Maximalfelder unter Einbeziehung ihrer Größe zur Beurteilung der Spurringefährdung berücksichtigt werden. Da auch beim MISES10intGES durch den Bezug auf den oberen Bereich über die verschiedenen Bauklassen immer ein konstanter Volumenanteil betrachtet wird, ist hiermit ein Vergleich zwischen den Bauklassen möglich. Das Integral und der 10%-Volumenanteil lassen sich über die Summenlinie nach Abb. 5-2 oder im Spannungsbild aus Abb. 5-3 veranschaulichen.

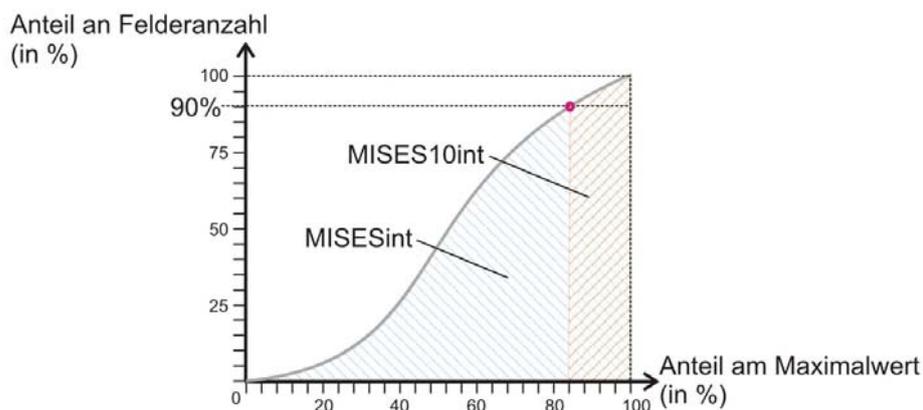


Abb. 5-2: Summenlinie der MISES-Spannung mit Integralen

5.2 Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung - Ergebnisse der Spannungsberechnung

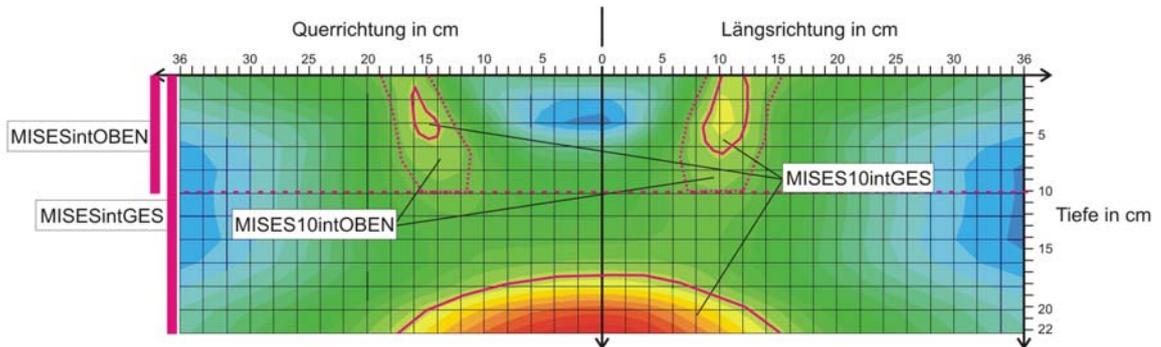


Abb. 5-3: Spannungsbild mit Darstellung der MISES-Integralwerte

Anhand der programmeigenen graphischen Oberfläche lassen sich die Verläufe und Extremwerte der Haupt- und Schubspannungen im gesamten Modell anzeigen. Das Gebiet, in dem die maximalen Werte vorkommen, wird durch den Betrachtungsbereich eingeschlossen. Die Felder, in denen in der Regel die maximalen Werte auftreten, liegen in den Symmetrieebenen des Modells innerhalb des Betrachtungsbereichs (Quer- und Längsschnitt in xz- und yz-Ebene), da dort die Druckgradienten der eingeleiteten Belastung am höchsten sind (vergleiche Abb. 5-3). Ausnahme sind die Zwillingsreifen, dort liegen die Maxima des Längsschnitts in der Spiegelsymmetrieebene des Einzelreifens. Beispiele von Spannungsbildern aus den folgenden Vergleichen werden in Anhang 5 gezeigt.

5.2.1 Vergleich 1: Reifentypen

Hier werden die für eine Antriebsachse gebräuchlichen Reifentypen 425/65R 22.5, 495/45 R 22.5 und 295/80 R 22.5 Zw einander gegenübergestellt (Abmessungen und Maximalpressungen vergleiche Tab. 5-1) (Bauklasse SV und III, Fahrbahnzustand „5000“ und „warm“).

Spurrinnenbildung:

Bauklasse SV

„5000“: Bei allen Reifen liegen lokale Maxima der erzeugten TRESKA- und MISES-Spannungen in Längsrichtung und Querrichtung am Rand der BAF in einer Tiefe von circa 2 cm bis 4 cm sowie in der Hochachse mittig an der Unterseite der Asphalttschicht. Die höchsten Werte der TRESKA-Spannung von den beiden Einzelreifen treten am Rand in Längsrichtung auf, wobei die Werte des 425/65 R 22.5 höher liegen. Ferner hat das lokale

Maximum in Querrichtung beim 495/45 R 22.5 einen deutlich niedrigeren Wert. Bei den MISES-Spannungen befinden sich die Maxima der beiden Einzelreifen an der Unterseite der Asphaltsschicht, den höchsten Wert weist wieder der Reifen 425/65 R 22.5 auf. Das Maximum von TRESCA und MISES des Zwillingssreifens 295/80 R 22.5 Zw liegt oberflächennah zwischen den beiden Reifen, es ist kleiner als die Maxima der beiden anderen Einzelreifen. Bei Integralen und 10%-Volumenanteilen besitzt ebenso der Zwillingssreifen 295/80 R 22.5 Zw die niedrigsten und der Reifentyp 425/65 R 22.5 die höchsten Werte.

„**warm**“: Lokale Maxima der TRESCA- und MISES-Werte liegen am Rand der BAF in einer Tiefe von circa 2 cm bis 8 cm. Aber die an der Unterseite der Asphaltsschicht liegenden Maxima besitzen deutlich höhere Werte. Größte Spannungen verursacht der Reifentyp 425/65 R 22.5, die kleinsten der Zwillingssreifen 295/80 R 22.5 Zw. In gleicher Weise verhalten sich Integrale und 10%-Volumenanteile.

Bauklasse III

„**5000**“: Bei allen betrachteten Reifen liegen die absoluten Maxima der TRESCA- und MISES-Spannungen an der Unterseite der Asphaltsschicht. Im Gegensatz zum Einzelreifen, bei dem ein Maximum mittig unterhalb der BAF zu finden ist, existieren beim Zwillingssreifen dort – bedingt durch die dünnere Asphaltsschicht – zwei Maxima, die unter jedem der beiden Reifen platziert sind. Weitere lokale Maxima befinden sich im oberen Asphaltbereich am Rand der BAF in einer Tiefe von etwa 0 cm bis 4 cm. Insgesamt wird der höchste Wert bei den Spannungen, Integralen und 10%-Volumenanteilen durch den Reifen 425/65 R 22.5 erreicht; die Werte des Zwillingssreifens sind deutlich niedriger.

„**warm**“: Auch in diesem Fall liegen die Maxima immer an der Unterseite der Asphaltsschicht. Die am Rand der BAF in einer Tiefe von 2 cm bis 4 cm liegenden Spannungsspitzen weisen kleinere Werte auf. Der Reifentyp 425/65 R 22.5 verursacht bei Spannungen, Integralen und 10%-Volumenanteilen die höchsten Werte, der Reifentyp 295/80 R 22.5 Zw die kleinsten Werte.

In den Diagrammen der Abb. 5-4 sind die Ergebnisse des vorstehenden Vergleichs zusammengefasst (oben: Bauklasse SV, unten: Bauklasse III, links: „5000“ rechts: „warm“). Folglich hängen die Lage und die Höhe des absoluten Maximums von der Form und Größe der BAF des jeweiligen Reifentyps ab. Mit zunehmender Breite eines Reifens wird das Maximum der Querrichtung kleiner, mit zunehmender Länge das Maximum der Längsrich-

5.2 Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung - Ergebnisse der Spannungsberechnung

tung. Je großflächiger die BAF ausgebildet ist, desto kleinere Spannungen treten auf. Die Spannungsmaxima der verschiedenen Reifentypen variieren um bis zu 13 % im oberen Bereich und 32 % im unteren Bereich.

So werden stets die geringsten MISES- und TRESKA-Spannungen durch den Zwillingstreifen, welcher die größte BAF besitzt, und die größten Spannungen durch den Breitreifen 425/65 R 22.5 mit der kleinsten BAF hervorgerufen.

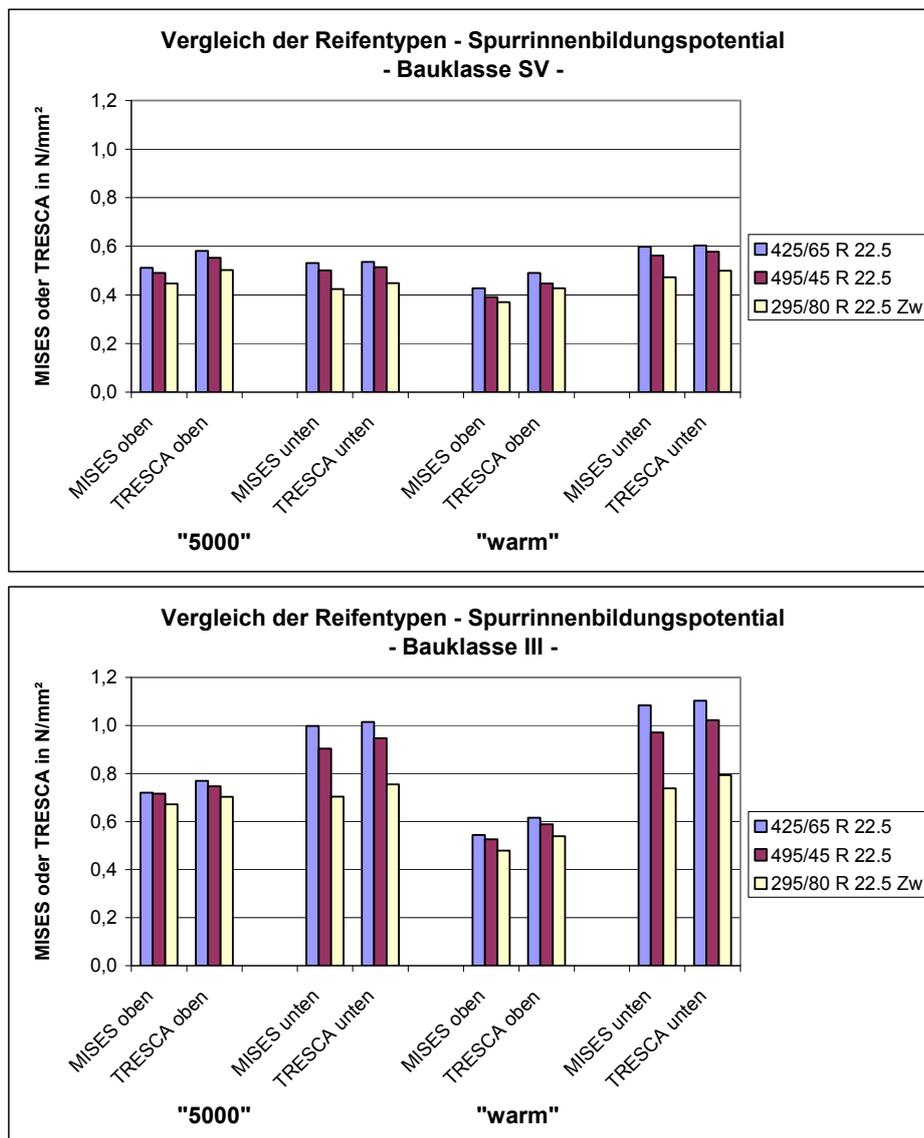


Abb. 5-4: Spurrinnenbildungspotential der untersuchten Reifentypen

5.2 Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung - Ergebnisse der Spannungsberechnung

Im Weiteren reicht es aus, nur die MISES-Spannungen zu betrachten, da diese trotz kleinerer Abweichungen qualitativ mit den Aussagen der TRESCA-Spannungen übereinstimmen. Dies belegen ebenso weitere Untersuchungen an der Universität Hannover.

Ermüdung:

Die maximalen Hauptspannungen treten in der Bauklasse SV bei allen Reifentypen unterhalb des Mittelpunktes der BAF an der Unterseite der Asphaltsschicht auf.

In der Bauklasse III liegen die Maxima der Hauptspannungen bei den Einzelreifen auch im Mittelpunkt der BAF, beim Zwillingssreifen aber unter jedem der einzelnen Reifen an der Unterseite der Asphaltsschicht.

Durch den Reifentyp 425/65 R 22.5 entstehen die größten, durch den Reifentyp 295/80 R 22.5 Zw die kleinsten maximalen Hauptspannungswerte (siehe Abb. 5-5). So verringern sich die maximalen Hauptspannungen mit größeren Aufstandsflächen, wobei bei den Zwillingssreifen der Raum zwischen den Reifen zusätzlich hinzuaddiert werden müsste, um eine höhere Korrelation zwischen Aufstandsfläche und Hauptspannung zu erhalten.

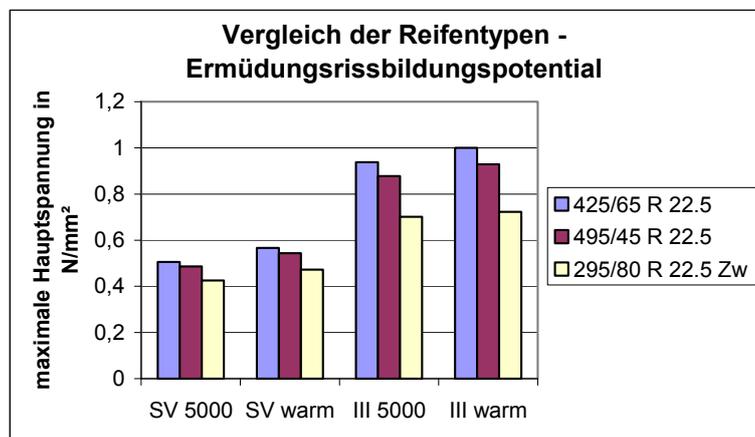


Abb. 5-5: Ermüdungsrissbildungspotential der untersuchten Reifentypen

5.2.2 Vergleich 2: Lastmodell

In diesem Vergleich werden die unterschiedlichen Lastmodelle anhand der Reifentypen 425/65 R 22.5 und 295/80 R 22.5 Zw einander gegenübergestellt. Es werden das Modell von CONTINENTAL mit optimalem Reifenluftdruck und die modifizierten Modelle von

GROENENDIJK und BLAB mit niedrigem und hohem Reifenluftdruck, ohne Querschub und mit Querschub sowie mit Längsschub untersucht (Bauklasse SV und III, Fahrbahnzustand „5000“ und „warm“).

Spurrinnenbildung:

Für den Reifentyp 425/65 R 22.5 werden beim Modell für optimalen Reifeninnendruck von CONTINENTAL bauweiseunabhängig an der Unterseite der Asphaltsschicht die maximalen Spannungen erzeugt. Dagegen treten beim modifizierten Modell in Abhängigkeit von der Bauklasse die Maxima im oberen Bereich an den Reifenflanken oder an der Unterseite der Asphaltsschicht auf.

Auswirkungen der Lastmodellwahl bezüglich der Höhe der Maximalspannungen sind vor allem im oberflächennahen Bereich zu erkennen (siehe Abb. 5-6, oberer Bereich), im unteren Bereich ist ein Einfluss kaum bemerkbar (siehe Abb. 5-6, unterer Bereich). Die bei den Modellen für Über- und Unterdruck existierenden Spannungssprünge der Vertikalpressung am Querrand der BAF (vergleiche Anhang 3) erzeugen höhere Maxima an der Reifenflanke als beim Continental-Modell. Sobald bei niedrigem Reifendruck zusätzlich in Reifenmitte gerichteter Querschub aufgebracht wird, verringern sich die oberflächennahen Maxima und steigen die Maxima an der Unterseite. Der bei hohem Reifenluftdruck zusätzliche Querschub, der von der Mitte zu den Rändern verläuft, erhöht die Maximalspannungen an den Rändern in Querrichtung. Dafür sind dann die Maxima an der Unterseite geringer. Da in diesen beiden Lastmodellen Über- und Unterdruck im Reifen simuliert werden sollen und Querschubanteile durch nicht angepassten Reifenluftdruck real existieren, werden diese im Folgenden ausschließlich in dieser Form verwendet.

Ein in Längsrichtung zur Mitte gerichteter Schub, welcher aus der Reifenzusammendrückung in der BAF entsteht und dessen Resultierende gleich Null ist, erhöht bei allen drei vertikalen Lastmodellen die Maxima (siehe Abb. 5-6, letzte drei Varianten).

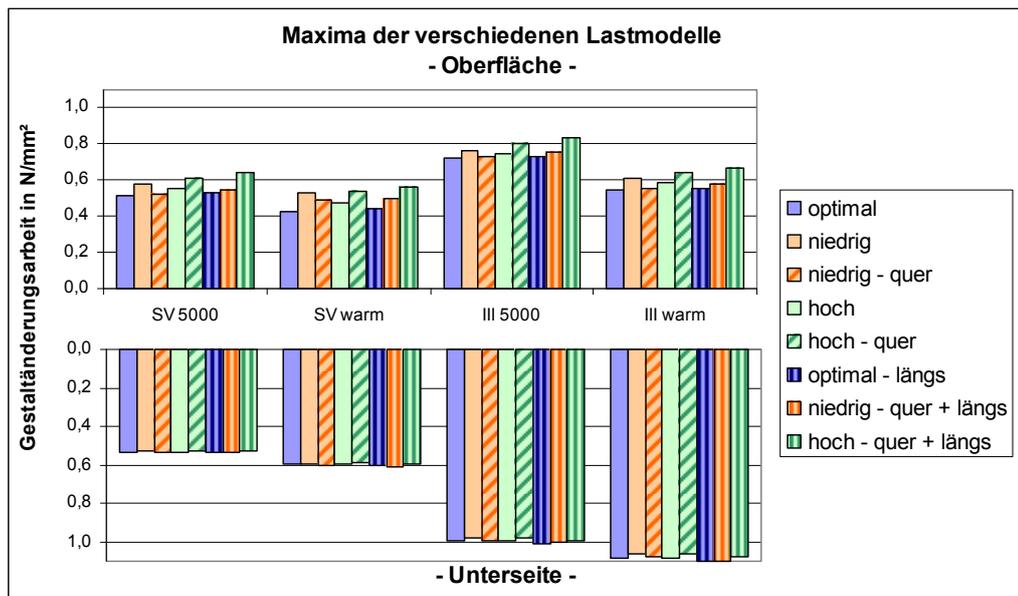


Abb. 5-6: Spurrinnenbildungspotential verschiedener Lastmodelle des Reifentyps 425/65 R 22.5

Die oberflächennahen Spannungen fallen bei nicht optimal angepasstem Reifeninnendruck - sowohl bei zu niedrigem als auch zu hohem - größer aus. Daher ist zur Schonung der Fahrbahnbefestigung ein der Ladung angepasster Reifenfülldruck wichtig. Wie das Diagramm für den Reifentyp 425/65 R 22.5 über die vier verschiedenen Kombinationen aus Bauklasse und Fahrbahnzustand zeigt, sind die durch das Modell von GROENEN-DIJK und BLAB erzeugten Maxima in der Nähe der Oberfläche größer als beim Continental-Modell (um bis zu 14 % bei zu niedrigem Reifeninnendruck und 26 % bei zu hohem Reifeninnendruck). Ein überhöhter Reifendruck ist für die Fahrbahnbefestigung schlechter als ein zu geringer. Die Volumenintegrale und 10 %-Volumenanteile weichen kaum voneinander ab (um maximal 3,7 %).

Für den Reifentyp 295/80 R 22.5 Zw sind ebenfalls die oberflächennahen Spannungen bei niedrigem Reifeninnendruck größer gegenüber dem optimalen Reifeninnendruck. Durch Hinzunehmen von Quer- und Längsspannungen ergeben sich niedrigere oberflächennahe Maxima und höhere Maxima an der Unterseite. Insgesamt sind für den Zwillingreifen die Unterschiede bezüglich der Variation des Lastmodells sehr gering (maximal 2,7 %).

Ermüdung:

Da die verschiedenen Lastmodelle sich hauptsächlich auf die oberflächennahen Spannungen auswirken, wie bereits im vorherigen Abschnitt anhand Abb. 5-6 (unterer Bereich) festgestellt worden ist, existiert kaum ein Einfluss auf die maximalen Hauptspannungen an der Unterseite der Asphalttschicht. Die in Abb. 5-7 dargestellten Maxima beim Reifentyp 425/65 R 22.5 weichen um maximal 2,0 % voneinander ab. Bei zu niedrigem Reifennendruck werden die höchsten Hauptspannungswerte erzeugt. Gleiches gilt für den Reifentyp 295/80 R 22.5 Zw (maximal 2,7 % Abweichung).

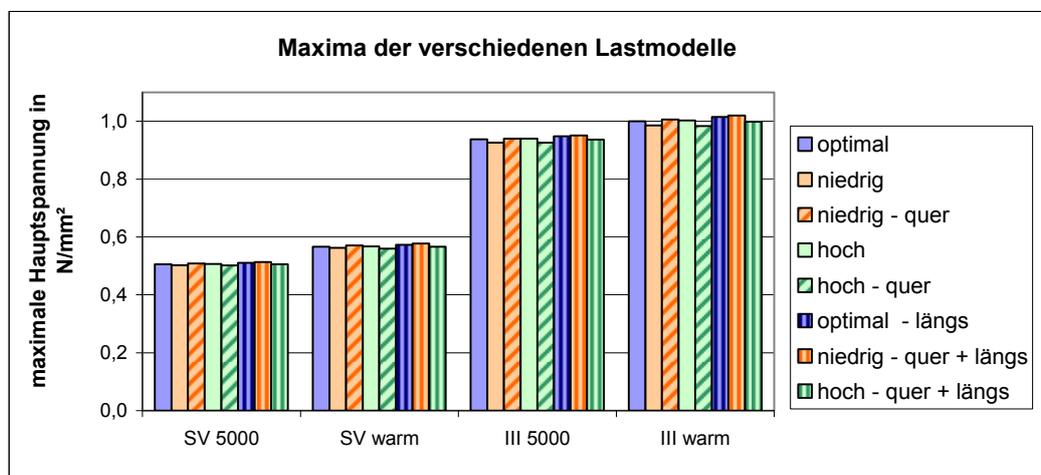


Abb. 5-7: Ermüdungspotential verschiedener Lastmodelle des Reifentyps 425/65 R 22.5

5.2.3 Vergleich 3: Fahrbahnaufbau und -zustand

In diesem Vergleich werden die unterschiedlichen Fahrbahnaufbauten (Bauweise 1 der Bauklassen SV und III) und Fahrbahnzustände, die aus den Temperaturverhältnissen in der Fahrbahnbefestigung entstehen, einander gegenübergestellt.

Spurrinnenbildung:

Insgesamt treten in der Bauklasse III gegenüber der Bauklasse SV höhere Spannungen, Integrale und 10 %-Volumenanteile auf, wie das Diagramm von Abb. 5-8 für alle drei Reifentypen zeigt. Damit hat die Dicke der Asphalttschicht einen großen Einfluss auf die Höhe des absoluten Spannungsmaximums: Vor allem die Maximalspannungen an der Unterseite der Asphalttschicht liegen in der Bauklasse III erheblich über den Spannungswerten der

5.2 Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung - Ergebnisse der Spannungsberechnung

Bauklasse SV. Dies ist bedingt durch die geringe Asphalt-schichtdicke und die damit verbundene geringe Lastverteilung. Hier fällt der Spannungsunterschied zwischen den Bauklassen bei den Einzelreifen höher aus als beim Zwillingsreifen. Mit steigender Temperatur in den oberen Schichten sinken die Spannungsunterschiede zwischen den Bauklassen. Auch die Größe „Integral gesamt“, welche als Gesamtintegral der MISES-Spannungen bereits auf die Asphalt-schichtdicke bezogen ist (Einheit J/m), weist dennoch in der Bauklasse III höhere Werte auf.

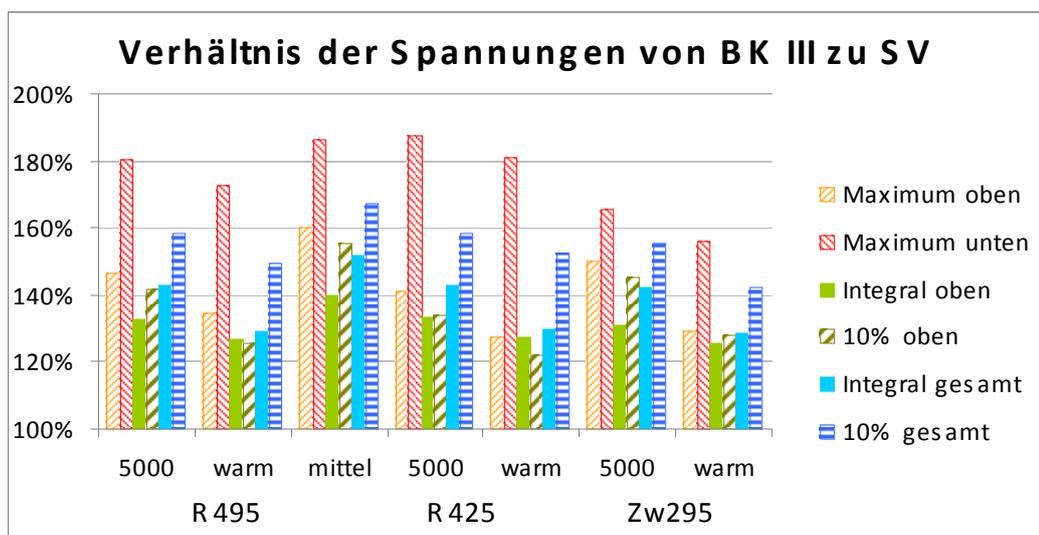


Abb. 5-8: Vergleich der Bauklassen SV und III hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential

Im Vergleich der Fahrbahnzustände wird zuerst in Abb. 5-9 der Zustand „5000“, der über die gesamte Asphalt-schicht einen konstanten E-Modul von 5000 N/mm² aufweist, dem Zustand „warm“ gegenübergestellt, der durch einen Temperaturgradienten bei sommerlichen Verhältnissen entsteht (siehe Definitionen S. 98 und Anhang 2). Die Spannungen im oberen Asphaltbereich sind im Zustand „warm“ – bedingt durch den dort vorherrschenden niedrigen E-Modul – stark zurückgegangen. Dafür liegen die Maxima der Spannungen an der Unterseite der Asphalt-schicht über den Maxima im Zustand „5000“, obwohl auch hier durch die höhere Temperatur ein niedriger E-Modul vorliegt. Dementsprechend sind die Integrale und der 10 %-Volumenanteil im oberen Bereich der Asphalt-schicht im Zustand „warm“ kleiner, der 10 %-Volumenanteil über die gesamte Asphalt-schichtdicke liegt etwa genauso hoch. Die Spannungen gehen mit höheren Oberflächentemperaturen in der BK III stärker zurück als in der BK SV; Ausnahme ist der größer werdende Spannungswert an der Unterseite der Asphalt-schicht.

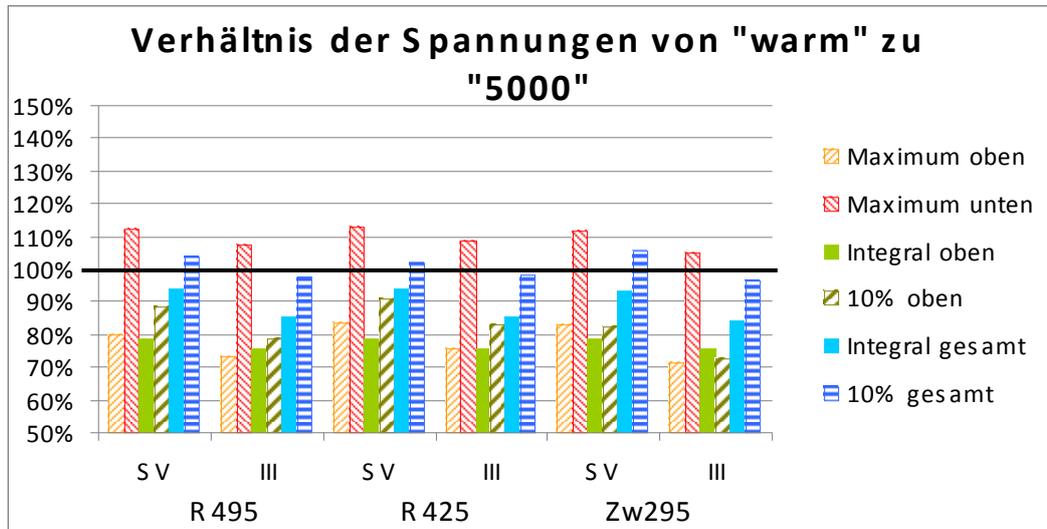


Abb. 5-9: Vergleich der Fahrbahnzustände „5000“ und „warm“ hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential

Der Zustand „mittel“, der aus einem über das Jahr gemittelten Temperaturzustand entstanden ist und konstant in der gesamten Asphaltsschicht einen E-Modul von 9100 N/mm² besitzt, ergibt entsprechend höhere Spannungen als der Zustand „5000“, aber relativ gesehen das gleiche Spannungsbild. Der Spannungsunterschied zwischen den Bauklassen steigt gegenüber dem Zustand „5000“ nochmals an (vergleiche Abb. 5-8).

In Abb. 5-10 werden für den Reifentyp 495/45 R 22.5 weitere Fahrbahnzustände mit dem Zustand „5000“ verglichen (siehe Definitionen S. 98 und Anhang 2). Im Fahrbahnzustand „Diff Gewitter“, bei bzw. nach Gewitter, liegen niedrige Temperaturen und damit hohe E-Moduln an der Oberfläche vor. Daher sind die oberflächennahen Spannungswerte relativ hoch und die Spannungen an der Unterseite der Asphaltsschicht im Verhältnis niedrig. Die anderen beiden Zustände „Diff Sonne“ und „heiß“ kommen beide bei starker Sonneneinstrahlung vor und verhalten sich ähnlich dem Zustand „warm“, allerdings stellen sie extremere Sachverhalte dar, da in dem Fall „Diff Sonne“ der Temperaturgradient über die Asphaltsschicht und in dem Fall „heiß“ die Temperaturen höher sind. So existieren gegenüber dem Zustand „warm“ bei „Diff Sonne“ höhere E-Moduln und Spannungen im unteren Bereich der Asphaltsschicht und bei „heiß“ niedrige E-Moduln und Spannungen im oberen Bereich.

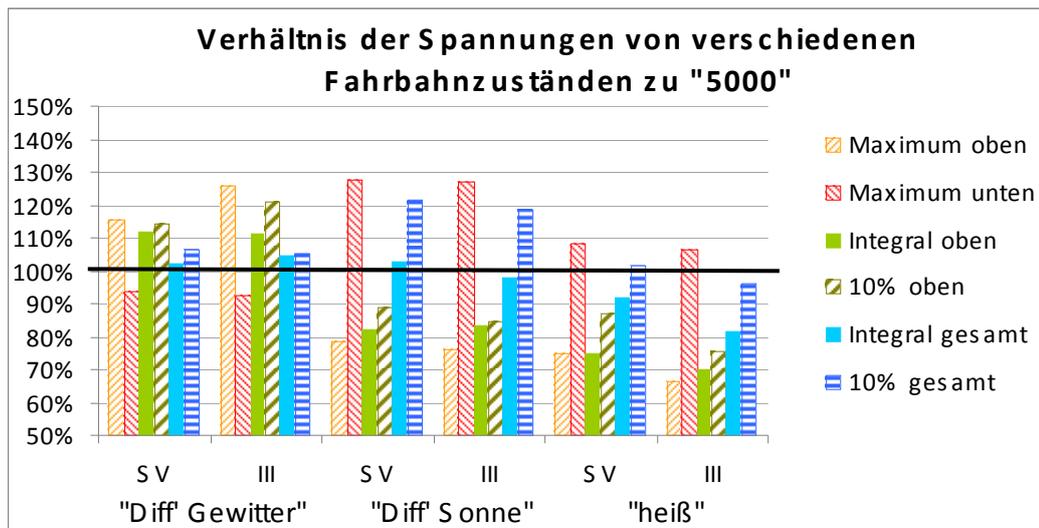


Abb. 5-10: Vergleich weiterer Fahrbahnzustände mit „5000“ hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential des Reifentyps 495/45 R 22.5

Ermüdung:

Die Abb. 5-5 aus Vergleich 1 kann herangezogen werden, um bei den Hauptspannungen den Unterschied zwischen den beiden Bauklassen und Fahrbahnzuständen aufzuzeigen. Demnach verhalten sich die Hauptspannungen in den Proportionen ähnlich den MISES-Spannungen an der Unterseite der Asphalttschicht. Je dicker das Asphaltpaket einer Fahrbahnbefestigung ist, desto kleiner sind die maximalen Hauptspannungen.

Auch fallen die Hauptspannungen an der Unterseite der Asphalttschicht wie die MISES-Spannungen im Zustand „warm“ trotz dort vorherrschender höherer Temperaturen größer aus als im Zustand „5000“.

5.2.4 Vergleich 4: Art der Beschleunigung

Hier kommen zusätzlich zur vertikalen Belastung Schubbelastungen in Längsrichtung in Höhe von 20 % der vertikalen Belastung hinzu. Es wird unterschieden nach dem vereinfachten Modell (Schubbelastung proportional zur Vertikalbelastung) und nach dem in Kapitel 4.2.3 entworfenen Schubbelastungsmodellen für Antrieb und Bremsen, welche in Abb. 5-1 und Anhang 4 dargestellt sind. Beim Modell für Antrieb und Bremsen wird die Griffigkeit berücksichtigt; in den Berechnungen wird sowohl ein niedriger ($\mu = 0,4$) als auch ein hoher Kraftschlusswert ($\mu = 0,9$) betrachtet. Es wird der Reifentyp 425/65 R 22.5 für die Bauklassen SV und III kombiniert mit den Fahrbahnzuständen „5000“ und „warm“

untersucht. Darin wird gleichzeitig die Auswirkung von zu niedrigem oder hohem Reifendruck bei Beschleunigungsvorgängen behandelt. Ebenso werden die Reifentypen 495/45 R 22.5 und 295/80 R 22.5 Zw für die Bauklassen SV und III, kombiniert mit den Fahrbahnzuständen „5000“, „warm“, „Diff Gewitter“, „Diff Sonne“ und „heiß“ untersucht.

Spurrinnenbildung:

Gegenüber dem freien Rollen verursacht die horizontale Zusatzbelastung im oberen Bereich der Asphalttschicht höhere Maxima. Wenn der Reifen angetrieben wird und damit eine Längskraft entgegen der Fahrtrichtung entsteht, dann werden die oberflächennahen Maximalspannungen im Bereich des Reifenauslaufs erzeugt. Wenn der Reifen gebremst wird, dann befinden sich die oberflächennahen Maxima im Bereich des Reifeneinlaufs oder der Reifenflanke.

Unter Antrieb verlagern sich die Maxima des Reifentyps 425/65 R 22.5 im Bereich der Oberfläche, gegenüber dem freien Rollen und der gleichmäßigen Schubbelastung, meist in höhere Lagen (von 0 cm bis 2 cm). Beim Bremsvorgang ist dies nicht der Fall, vereinzelt liegen die oberflächennahen Maxima in tieferen Schichten. Im unteren Bereich der Asphalttschicht ändern sich die Spannungen kaum. Auch hier wandert die an der Unterseite der Asphalttschicht befindliche Stelle der Maximalspannung bei Antrieb gegen die Fahrtrichtung und bei Bremsbelastung in Fahrtrichtung.

Mit Zunahme der Griffigkeit unter Antrieb vergrößern sich die Maxima an der Oberfläche und verkleinern sich die Maxima an der Unterseite. Mit Zunahme der Griffigkeit unter Bremsbelastung werden die Maxima an der Oberfläche kleiner und die Maxima an der Unterseite größer.

In Abb. 5-11 sind für den Reifentyp 425/65 R 22.5 mit optimalem Reifenluftdruck und die fünf verschiedenen Schubbelastungsvarianten, bei einem Verhältnis der Längskraft zur Vertikalkraft von 20 %, sowohl die oberflächennahen Maxima (im oberen Bereich) als auch die Maxima an der Unterseite der Asphalttschicht (im unteren Bereich) zusammengefasst. Im Vergleich zur gleichmäßig verteilten Schubbelastung treten oberflächennah bei Antrieb höhere Maxima (7 % bis 31 %) und beim Bremsen niedrigere Maxima auf (- 12 % bis - 5 %). Im unteren Bereich sind im Vergleich zur gleichmäßig verteilten Schubbelastung die Maxima unter Antrieb niedriger (- 1,2 % bis - 0,5 %), bei Bremsbelastung höher (1,5 % bis 3,7 %); dort sind die Auswirkungen wesentlich geringer als im oberen Bereich. Damit ergeben sich allein aus den unterschiedlichen Beschleunigungsarten bei gleicher Beschleunigungshöhe Spannungsdifferenzen, die eine größere Spanne aufweisen als die

5.2 Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung - Ergebnisse der Spannungsberechnung

durch unterschiedliche Reifentypen und vertikale Kontaktdruckverteilungen (siehe Vergleich 1 und 2). Demzufolge treten unabhängig von dem Fahrbahnzustand und der Bauklasse die höchsten Spannungen im oberflächennahen Bereich durch den Antriebsvorgang auf, insbesondere bei hoher Griffigkeit. Dies trifft auch für die Lastmodelle mit niedrigem bzw. hohem Reifeninnendruck zu.

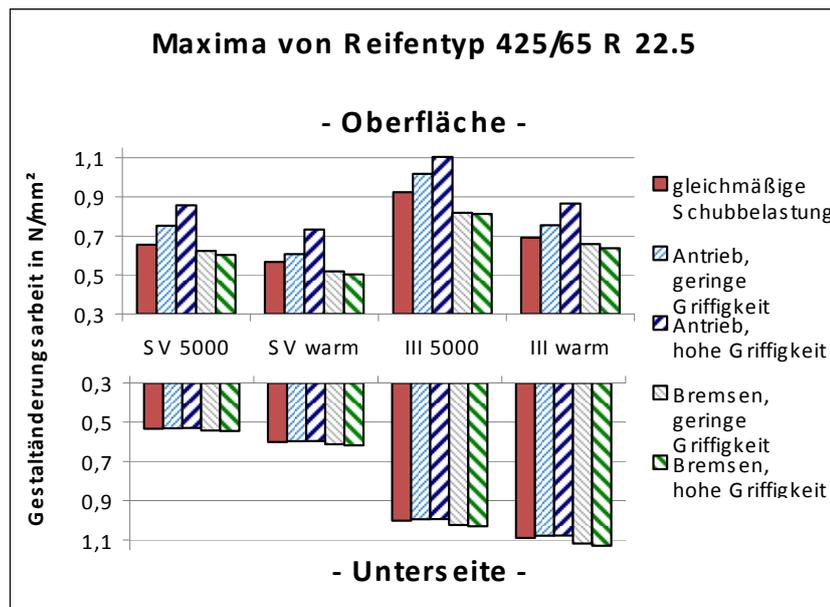


Abb. 5-11: Vergleich der Beschleunigungsarten hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential des Reifentyps 425/65 R 22.5

Ähnlich verhalten sich die beiden anderen Reifentypen unter Schubbelastung, deren Maxima für 5 t Vertikalbelastung je Reifen in den Diagrammen Abb. 5-12 und Abb. 5-13 dargestellt sind. Allerdings sind die Unterschiede der verschiedenen Beschleunigungsvarianten, vor allem beim Zwillingstreifen nicht so hoch. Und beim Zwillingstreifen steigen die Maximalspannungen durch eine Antriebsbelastung zwar bei hoher Griffigkeit an, verringern sich aber nicht durch eine Bremsbelastung wie bei den Einzelreifen. Denn unter Bremslast liegt das oberflächennahe Maximum nicht im Reifenauslauf, sondern weiterhin in der Mitte zwischen den Reifen.

Zusätzlich sind die Reifentypen 495/45 R 22.5 und 295/80 R 22.5 Zw bei 9 t Achslast und den Fahrbahnzuständen „5000“, „warm“, „heiß“, „Diff Gewitter“ und „Diff Sonne“ behandelt worden. Auch unter den weiteren extremen Temperaturverhältnissen bleibt der Antriebsvorgang unter hoher Griffigkeit die kritische Beanspruchung des oberflächennahen Bereichs.

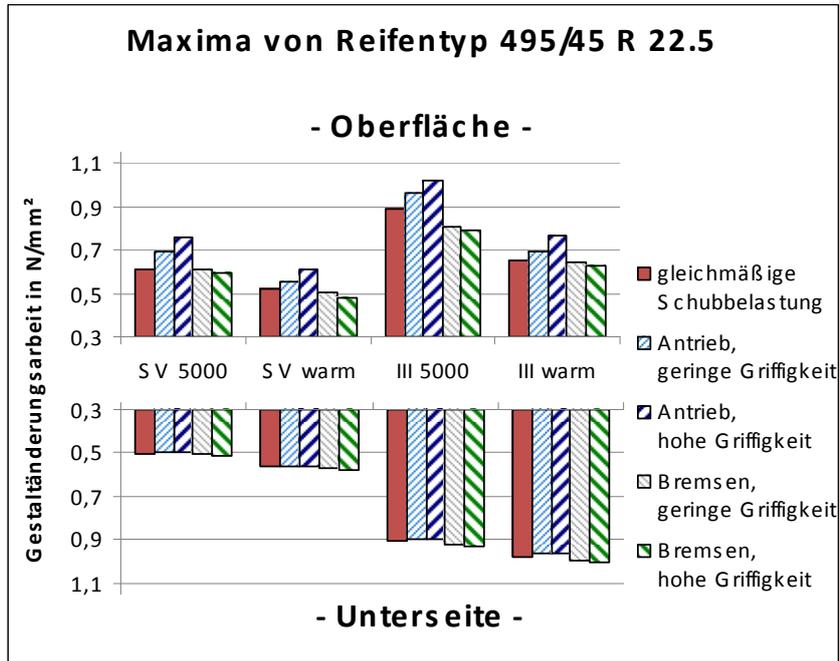


Abb. 5-12: Vergleich der Beschleunigungsarten hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential des Reifentyps 495/45 R 22.5

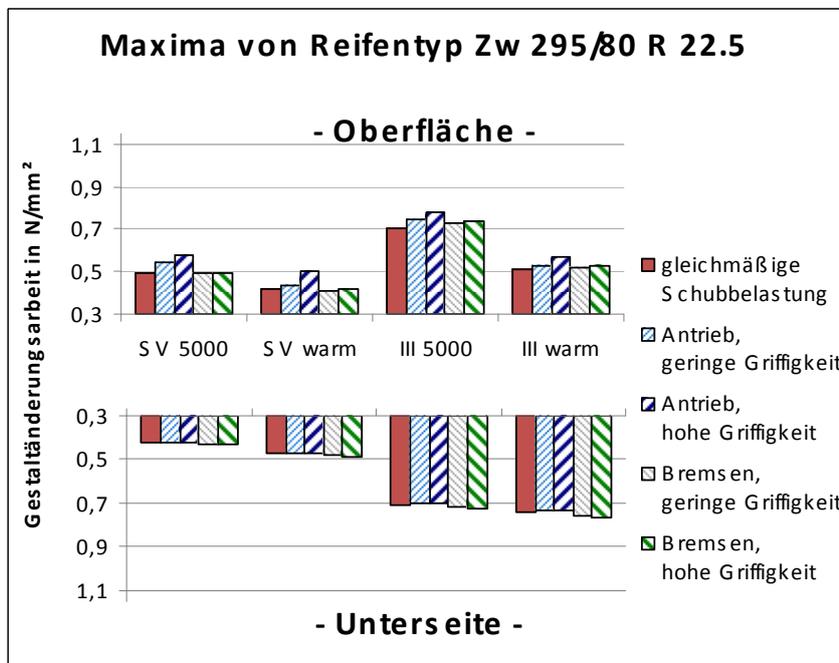


Abb. 5-13: Vergleich der Beschleunigungsarten hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential des Reifentyps 295/80 R 22.5 Zw

Ermüdung:

Die maximalen Hauptspannungen verhalten sich analog der MISES-Spannungen an der Unterseite der Asphalttschicht, sie zeigen beispielsweise für den Reifentyp 425/65 R 22.5 mit maximal 4,0 % Zuwachs kaum Auswirkungen der zusätzlichen Horizontalbelastung. Unter Antrieb liegen diese im Vergleich zur gleichmäßig verteilten Schubbelastung niedriger, unter Bremsbelastung höher.

Hinsichtlich der Ermüdungsbetrachtung ist damit eine ausführliche Analyse von Beschleunigungsvorgängen nicht notwendig.

5.2.5 Vergleich 5: Höhe der Beschleunigung

In diesem Vergleich soll anhand des Reifentyps 425/65 R 22.5 und einer Schubkraft von 0 %, 10 %, 20 %, 30 % und 50 % der Vertikallast, bei einer Achslast von 10 t, den Bauklassen SV und III und den Fahrbahnzuständen „5000“ und „warm“, der Einfluss der Höhe der Beschleunigung näher untersucht werden.

Spurrinnenbildung:

Mit wachsender horizontaler Schubbelastung ist ein überproportionaler Anstieg bei den oberflächennahen Maximalspannungen zu erkennen. Bei sehr hoher Horizontalbeanspruchung liegt das Maximum direkt unterhalb der Oberfläche. Die Spannungen an der Unterseite der Asphalttschicht ändern sich geringfügig, deren Verlauf ist ebenso progressiv. Hier wandert das Maximum mit steigender Längskraft weiter von der Mitte der BAF in Richtung der Seite des oberflächennahen Maximums. Der Anstieg der Spannungen mit zunehmender gleichmäßiger Schubbelastung ist in den Diagrammen der Abb. 5-14 für den Fahrbahnzustand „5000“ und „warm“ dargestellt.

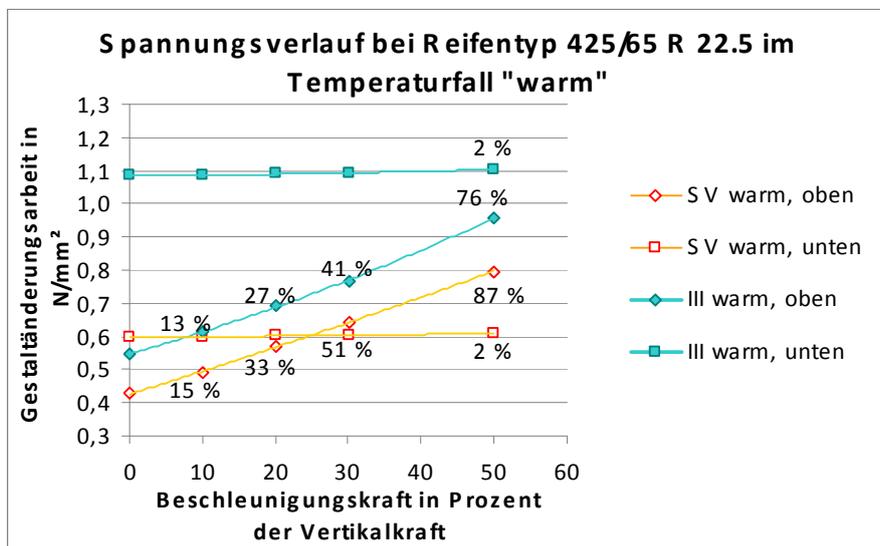
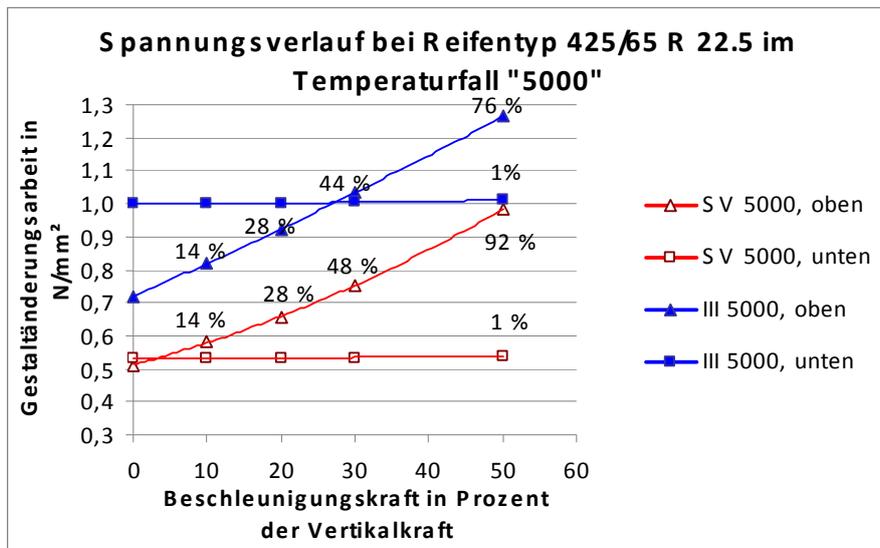


Abb. 5-14: Einfluss der Beschleunigungshöhe hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential des Reifentyps 425/65 R 22.5

Bei einer Erhöhung der Beschleunigungskraft wachsen die Integrale und 10 %-Volumenanteile auch überproportional, aber nicht so stark wie die Maxima der Gestaltänderungsarbeit. Beispielhaft zeigt Abb. 5-15 diesen Zuwachs bei einer horizontalen Schubbelastung von 50 % der Vertikalbelastung gegenüber dem freien Rollen. Am stärksten betroffen sind die 10 %-Volumenanteile im oberen Bereich der Asphaltsschicht, geringe Auswirkungen zeigt das Gesamtintegral über die Asphaltsschicht. Im Zustand „warm“ ist der obere Bereich gegenüber zusätzlichen Schubbeanspruchungen besonders anfällig, da dort ein höherer Zuwachs vorhanden ist als im Zustand „5000“.

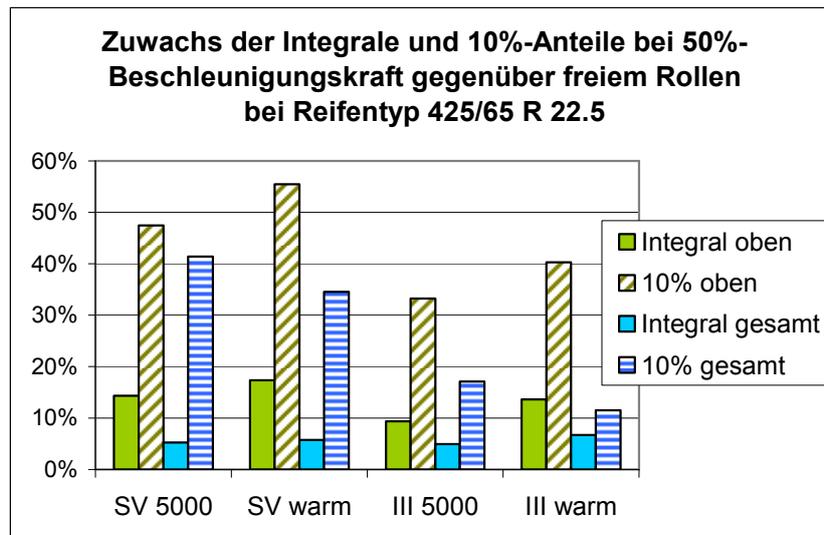


Abb. 5-15: Einfluss der Beschleunigungshöhe durch Integrale und 10 %-Volumenanteile des Reifentyps 425/65 R 22.5

In gleicher Weise verhalten sich die MISES-Spannungen des Reifentyps 425/65 R 22.5 bei den Modellen für Antrieb und Bremsen sowie bei geringer und hoher Griffigkeit. Die Maxima steigen mit zunehmender Horizontalbelastung überproportional an. Eine Ausnahme bilden bei den Antriebsvarianten die Spannungen an der Unterseite der Asphalt-schicht, diese gehen mit stärkerem Antrieb zurück.

Der überproportionale Spannungsanstieg im oberflächennahem Bereich mit zunehmender gleichmäßiger Schubbelastung ergibt sich auch bei den anderen beiden Reifentypen (siehe Abb. 5-16). Vor allem der Zwillingstreifen weist einen ausgeprägten parabelförmigen Verlauf auf. Allerdings sind die prozentualen Auswirkungen aus der zusätzlichen Schubbelastung nicht so groß wie bei den Einzelreifen. Sehr hohe Schubspannungen führen dazu, dass für alle drei Reifentypen die in der Fahrbahnbefestigung auftretenden Spannungen bei der Konstellation „SV 5000“ größer werden als bei „III warm“.

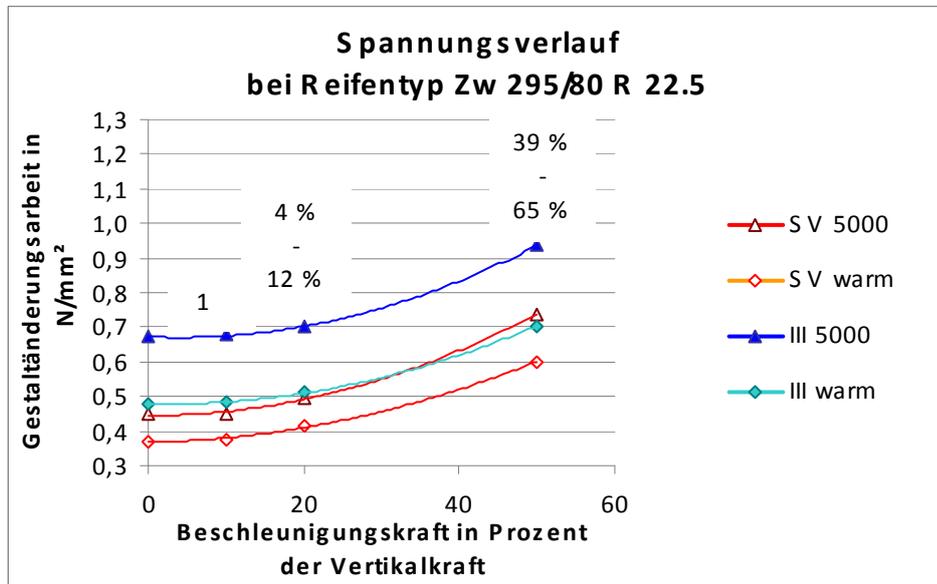
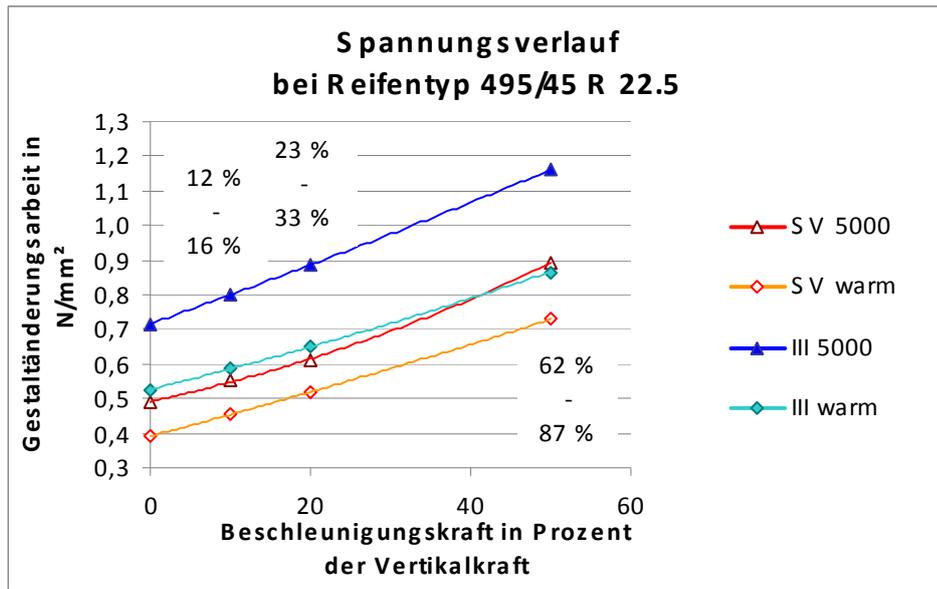


Abb. 5-16: Einfluss der Beschleunigungshöhe bei den Reifentypen 495/45 R 22.5 und Zw 295/80 R 22.5

Ermüdung:

Die maximalen Hauptspannungen zeigen erneut analoges Verhalten zu den MISES-Spannungen an der Unterseite der Asphalttschicht (vergleiche Abb. 5-14); sie steigen in der Regel mit zunehmender Beschleunigungskraft geringfügig an, eine Ausnahme stellt wiederum das Antriebsmodell durch eine geringe Verringerung des Maximalwertes dar.

5.2.6 Vergleich 6: Achskombinationen

Hier wird eine Doppelantriebsachse mit einer Achslast von zweimal 9,0 t zuerst einer Einzelachse mit 9,0 t und dann einer Einzelachse mit 11,5 t gegenübergestellt (vergleiche Tab. 5-2). Die 11,5 t-Einzelachse und die zweimal mit 9 t belastete Doppelachse wird bei verschiedenen Fahrbahnzuständen und für die Reifentypen 495/45 R 22.5 und 295/80 R 22.5 Zw untersucht.

Spurrinnenbildung:

In der Bauklasse SV führt die mit insgesamt 18 t belastete Doppelachse gegenüber der 9 t-Einzelachse sowohl im oberflächennahen Bereich als auch an der Unterseite der Asphaltenschicht beim Reifentypen 495/45 R 22.5 zu um bis zu 3 % höheren Maximalspannungen an jeder Achse. Nur unter Antrieb fallen im Bereich des vorderen Reifens in den oberen Schichten die Maxima niedriger aus. In der Bauklasse III dagegen sind die maximalen Spannungen der Doppelachse im oberflächennahem Bereich bei freiem Rollen höher, sonst ergeben sich um bis zu 2 % niedrigere Spannungsmaxima an der Unterseite der Asphaltenschicht und insgesamt bei den Beschleunigungsvorgängen. Während des freien Rollens sind die oberflächennahen Maxima jeweils auf der Reifenseite zur zweiten Achse größer. Bei Antrieb liegt das größere oberflächennahe Maximum an der hinteren Achse (im Reifenauslauf) und das größere Maximum der Asphaltunterseite an der vorderen Achse. Beim Bremsvorgang besitzt der vordere Reifen der Doppelachse in der Regel das größere Maximum in den oberen Schichten (im Reifeneinlauf) und der hintere Reifen das größere Maximum an der Unterseite der Asphaltenschicht. Die Lagepunkte beider lokalen Maxima weichen bei der Einzelachse, der vorderen oder der hinteren Achse kaum voneinander ab. In Abb. 5-17 sind die Maxima der Gestaltänderungsarbeit für die Bauklassen SV und III (oben und unten) sowie für die Fahrbahnzustände „5000“ und „warm“ (links und rechts) dargestellt.

Folglich wirkt sich eine zweite Achse kaum auf die Werte der MISES-Spannungen aus, auch nicht bei Antriebs- oder Bremsbelastung.

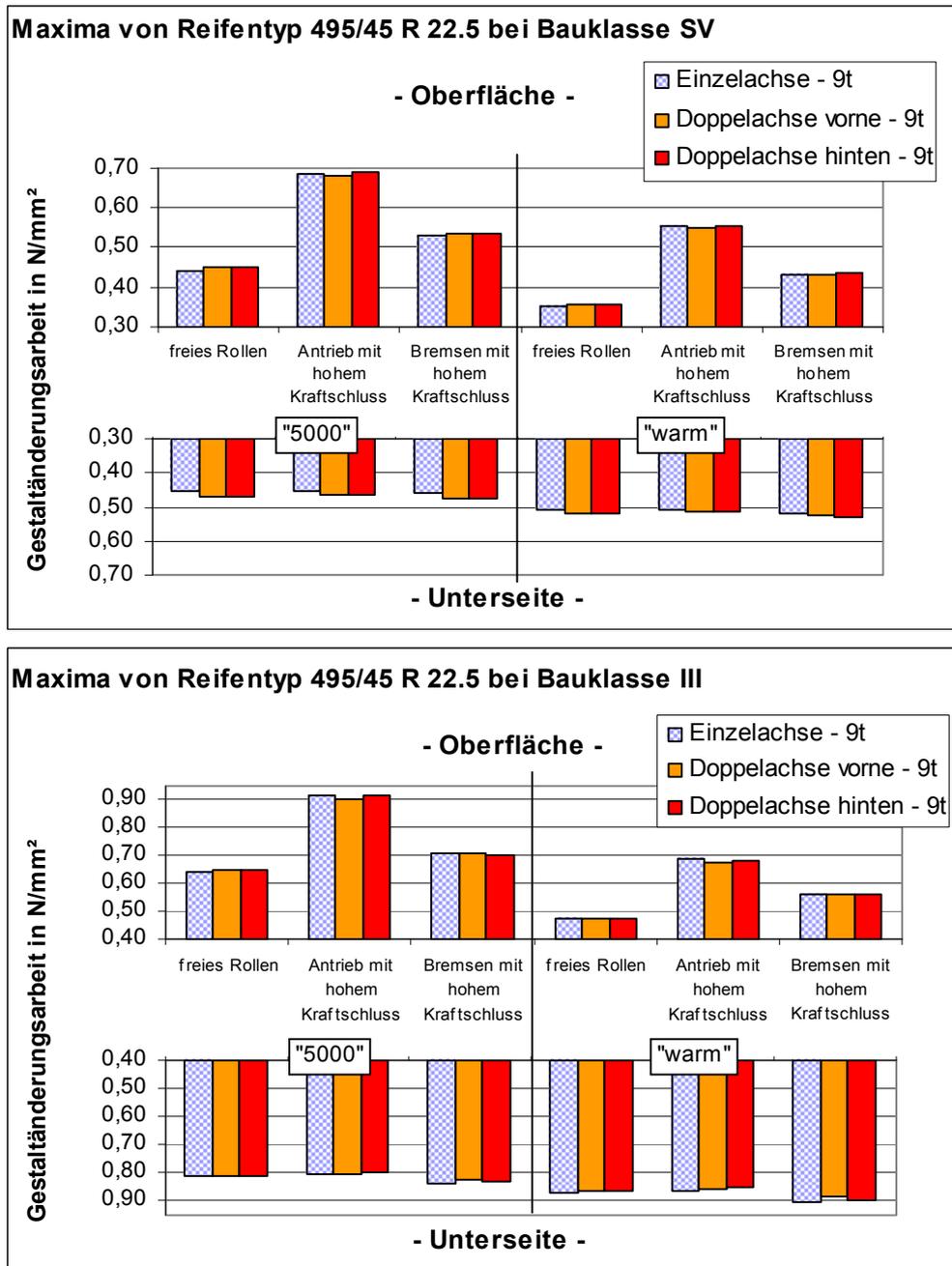


Abb. 5-17: Vergleich von Achskombinationen (je 9 t) hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential durch Reifentyp 495/45 R 22.5

Die Gegenüberstellung bei gleicher Achsanordnung zwischen einer Einzelachse von 11,5 t und einer mit 18 t belasteten Doppelachse für den Reifentypen 495/45 R 22.5 zeigt Abb. 5-18. Die 11,5 t-Achse verursacht gegenüber einer 9 t-Einzelachse um ca. 28 % höhere Maximalspannungen entsprechend der um den gleichen Prozentwert steigenden Vertikallast – nahezu unabhängig von Bauklasse, Temperatur- und Fahrzustand. In der Bauklasse III ist der Unterschied etwas stärker ausgeprägt als in Bauklasse SV

5.2 Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung - Ergebnisse der Spannungsberechnung

(29 % : 26 %), beim Antriebs- und Bremsvorgang etwas stärker als beim freien Rollen (28 % : 27 %). Damit erzeugt die 11,5 t-Einzelachse ebenso deutlich höhere Spannungen als die 18 t-Doppelachse. Dies gilt für freies Rollen, Antrieb und Bremsen. Würde für beide Achsaggregate nicht die relativ zur Vertikalbelastung gleiche, sondern eine vom Absolutwert gleiche Beschleunigungskraft gelten (siehe S. 100), dann wäre die Differenz zwischen diesen bei Antrieb und Bremsen größer. So kann durch den Doppelachsantrieb bei kleinerer Schädigung eine höhere Beschleunigungskraft auf die Straße gebracht werden.

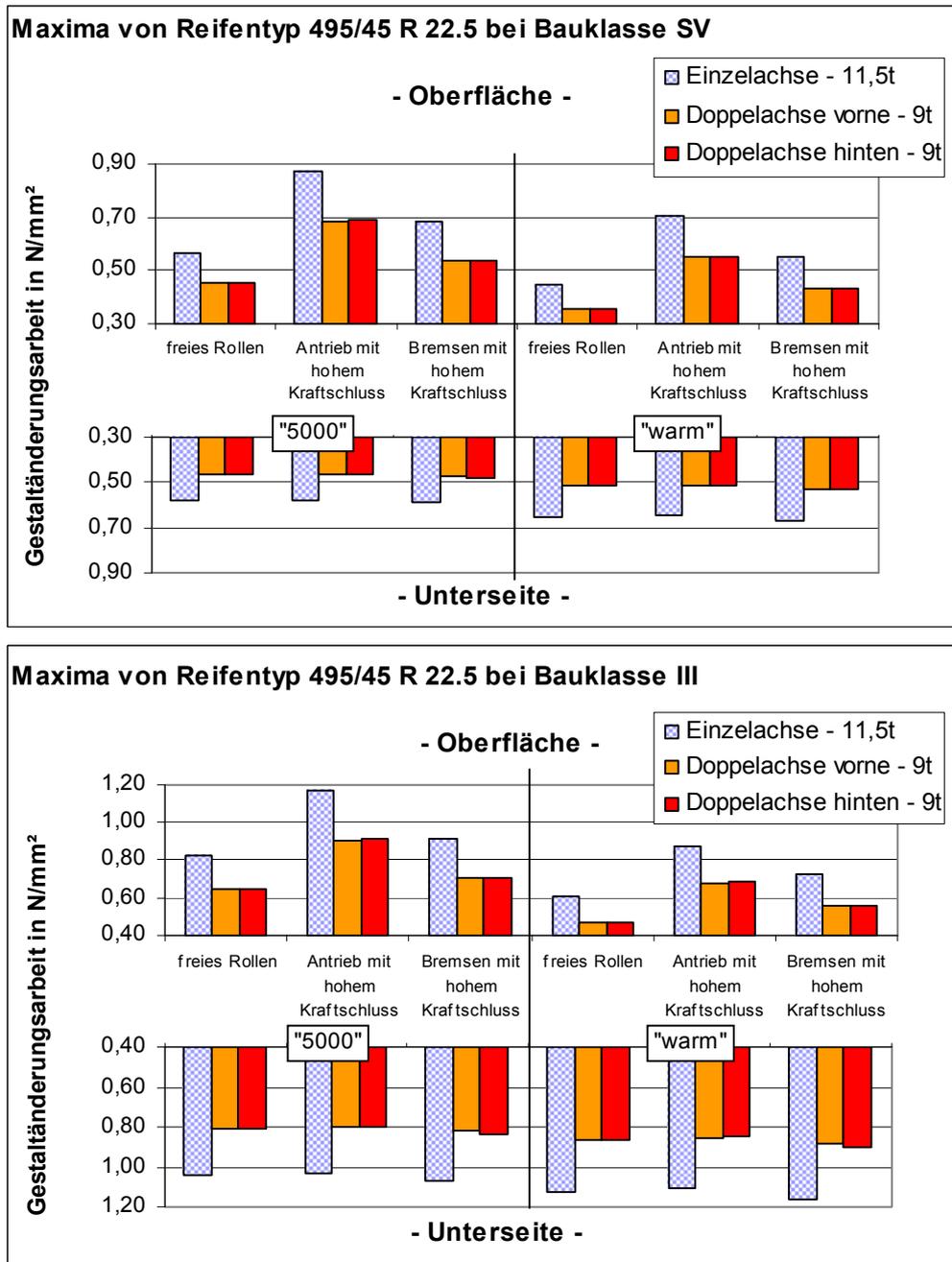


Abb. 5-18: Vergleich von Achskombinationen (11,5 t – 9 t) hinsichtlich Spurrinnenbildungspotential durch Reifentyp 495/45 R 22.5

Gleiche Aussagen lassen sich für den Zwillingstreifen 295/80 R 22.5 treffen. Da der Spannungszuwachs bei einer Steigerung der Achslast nicht vom Reifentyp abhängt, wachsen auch hier bei einer Steigerung der Achslast von 9 t auf 11,5 t die insgesamt gegenüber den Einzelreifen niedrigeren Spannungen um ca. 28 %.

Ermüdung:

Die maximalen Hauptspannungen an der Unterseite der Asphalttschicht beim Reifentypen 495/45 R 22.5 sind für die mit 9 t belastete Einzelachse gegenüber dem Doppelachsaggregat in der Bauklasse SV geringer und in der Bauklasse III höher, siehe Abb. 5-19. Die Differenzen von bis zu 3 % in der Bauklasse SV und bis zu 5 % in der Bauklasse III fallen hier größer aus als bei der Gestaltänderungsarbeit (vergleiche Abb. 5-17). Aus diesem Grund und weil das Ermüdungsrissbildungspotential durch die vierte Potenz der maximalen Hauptspannungen gebildet wird, ist der Einbezug der zweiten Achse hier relevant.

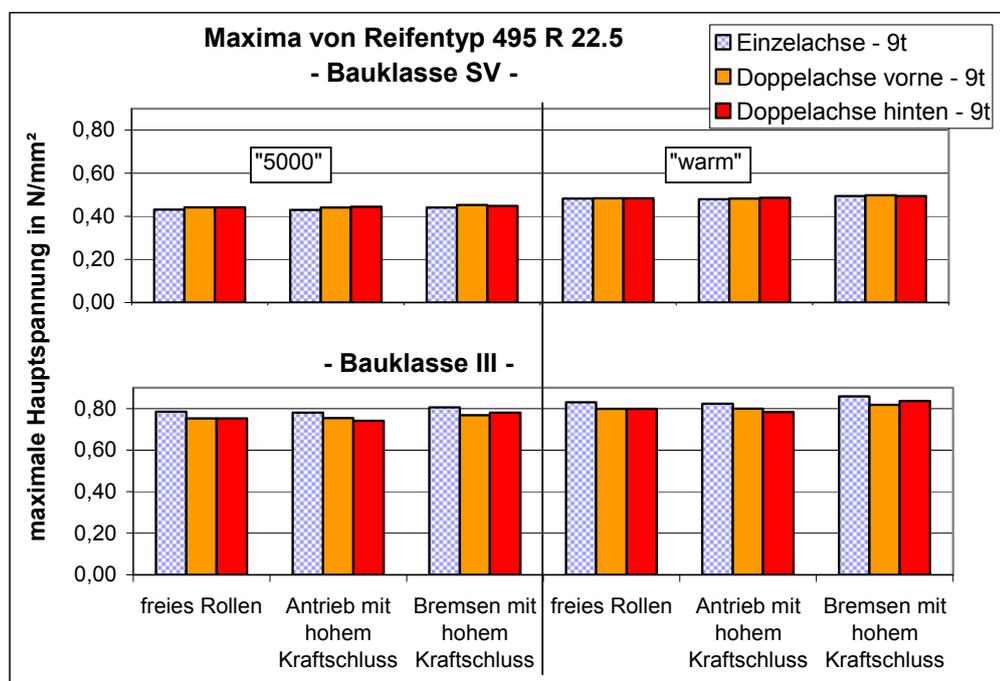


Abb. 5-19: Vergleich von Achskombinationen (je 9 t) hinsichtlich Ermüdungspotential durch Reifentyp 495/45 R 22.5

Bei der mit 11,5 t belasteten Einzelachse sind die Zugspannungen durch die Lastzunahme dementsprechend höher als bei der 9 t-Achse. Die Spannungen der 11,5 t-Achse liegen für den Reifentyp 495/45 R 22.5 ca. 25 % bis 30 % über den Werten der Doppelachse.

6 Schädigungsverhalten

Die in Kapitel 5 berechneten Spannungen führen bei Überschreitung materialspezifischer Grenzwerte zu einer Schädigung. Aus den maximalen Spannungen bzw. aus der Spannungsverteilung in der Fahrbahnbefestigung allein lassen sich keine Aussagen über das aktuelle Schädigungspotential einer Fahrbahnüberfahrt ableiten. Erst in Kombination mit der Temperaturverteilung können Aussagen über das Schädigungspotential getroffen werden.

Daher wird in diesem Kapitel das Schädigungsverhalten der Reifentypen bei ausgewählten, unterschiedlichen Fahr- und Fahrbahnzuständen analysiert. Hierzu werden die Ergebnisse der Schädigungsberechnungen nach der in Kapitel 2.4 entwickelten Methode vorgestellt. Im Kapitelabschnitt 6.2 wird die neue Methode mit dem Tyre Configuration Factor verglichen.

6.1 Ergebnisse der Schädigungsuntersuchung

Bei der Schädigungsuntersuchung werden die Vergleiche aus Kapitel 5 (1: Reifentypen, 3: Fahrbahnaufbau und -zustand, 4: Art der Beschleunigung, 5: Höhe der Beschleunigung, 6: Achskombinationen) behandelt. Auf Vergleich 2, welcher die unterschiedlichen Lastmodelle einander gegenüberstellt, wird hier nicht explizit eingegangen. Hier ist bei zu hohem oder zu niedrigem Reifeninnendruck gegenüber dem optimalen Reifendruck durch die höheren Spannungen im oberflächennahen Bereich eine höhere Schädigung zu erwarten.

Um die Schädigung durch eine Reifenfahrt darzustellen, werden in MOHR'schen Diagrammen an den Stellen innerhalb des oberen und unteren Betrachtungsbereichs (siehe Abb. 2-4) mit der höchsten Zugspannung (erste Hauptspannung), der höchsten Spannungsdifferenz (TRESKA) und der höchsten Gestaltänderungsarbeit (MISES) die Spannungskreise mit den zugehörigen Schädigungskurven gezeichnet. Die Schädigungskurven können für die jeweiligen Spannungswerte unterschiedlich sein, da diese in unterschiedlichen Tiefen auftreten und damit unterschiedliche Temperaturen und Schädigungsparameter vorliegen. Zusätzlich kann ein dreidimensionales Diagramm über den Betrachtungsbereich erstellt werden, in dem an jedem Punkt die für den Lastfall errechnete Reserve farbig dargestellt ist (Beispiele siehe Anhang 6). Die jeweils minimalen Reserven

werden - wie bei der Spannungsberechnung - getrennt für den oberen Bereich (0 mm - 100 mm) und unteren Bereich (100 mm – 220 bzw. 340 mm) zur weiteren Auswertung erfasst.

Die Schädigungsdiagramme dieses Kapitels sind zur Abgrenzung gegenüber den Spannungsdiagrammen in Kapitel 5 grau hinterlegt. Zusätzlich wird in Analogie zur Spannungsbetrachtung im kompletten Betrachtungsbereich ein Integral über die niedrigsten Reservewerte mit einem Volumen von zehn Prozent der Elemente des oberen Bereichs gebildet. So muss zur Schädigungsbewertung nicht nur das absolute Minimum der Reserve herangezogen werden, und zudem ist durch den konstanten Volumenanteil ein direkter Vergleich zwischen den Bauweisen möglich.

6.1.1 Vergleich 1: Reifentypen

Der Reifentyp 495/45 R 22.5 repräsentiert die Einzelbereifung mit einem Breitreifen, der Reifentyp 295/80 R 22.5 Zw die Zwillingsbereifung. Die über den Betrachtungsbereich resultierenden minimalen Reserven und 10 %-Volumenanteile der Reserve sind in Abb. 6-1 zusammengefasst (oben: Bauklasse SV, unten: Bauklasse III, links: Zustand „5000“, rechts: Zustand „warm“).

Im oberen Bereich des Betrachtungsraums fallen die Punkte und Funktionen der höchsten Spannungsdifferenz (TRESKA) und der höchsten Gestaltänderungsarbeit (MISES) oft zusammen oder liegen dicht beieinander. Deshalb hat es bei den Spannungsbetrachtungen in Kapitel 5 ausgereicht, nur die MISES-Spannungen zu betrachten. Da im oberflächennahen Bereich bei den TRESKA- und MISES-Spannungskreisen der Abstand zu den Schädigungskurven geringer ist als bei der maximalen Hauptspannung, sind diese maßgebend. Im unteren Bereich überdecken sich die Punkte und Funktionen aller drei Schädigungskriterien, die Maxima liegen alle unterhalb der Reifen an der Unterseite der Asphalttschicht. Vor allem bei tiefen Temperaturen wäre dann die maximale Zugspannung maßgebend. In den Bereichen, an denen lokale Spannungsmaxima festgestellt worden sind (siehe Kapitel 5), finden sich auch die niedrigsten Reserven. Die Wahl des Reifentyps wirkt sich auf das gesamte Asphaltpaket aus. So entsteht unterhalb der BAF bei freiem Rollen ein symmetrisches Bild; bei Antrieb liegen die kleineren Reserveanteile im Reifenauslauf, bei Bremsen im Reifeneinlauf.

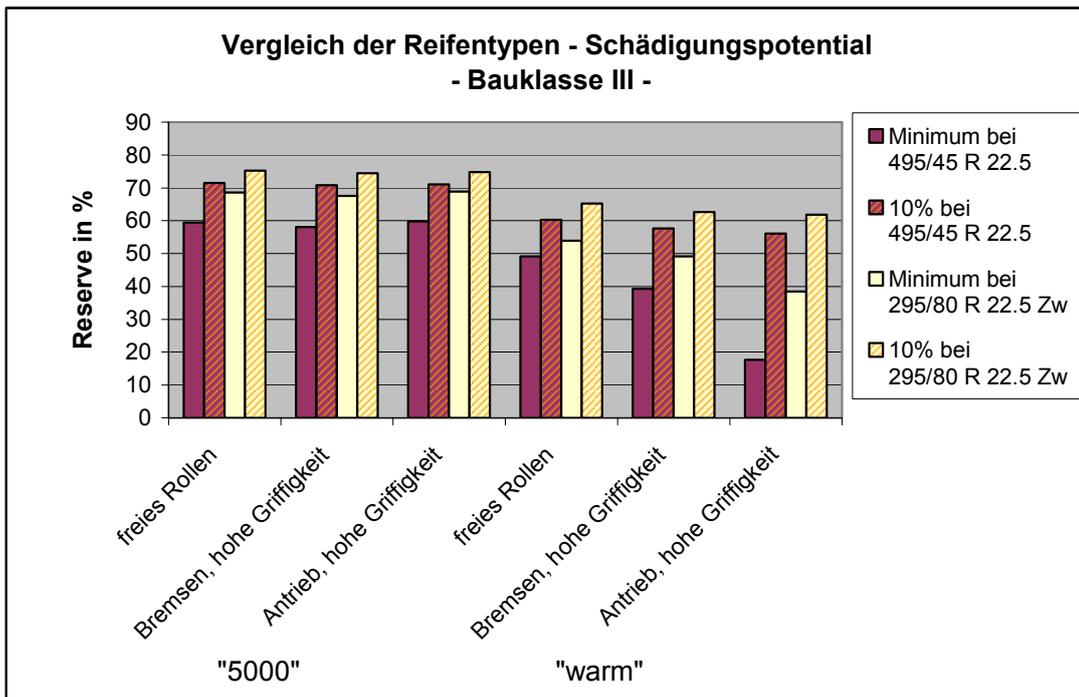
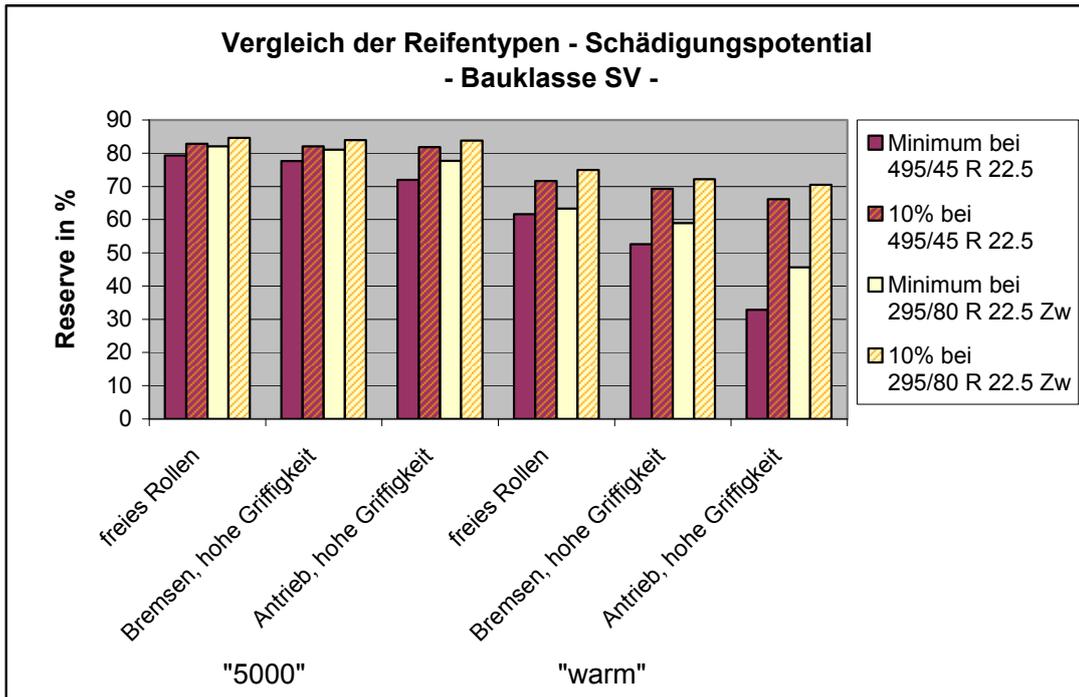


Abb. 6-1: Schädigungspotential der Reifentypen bei 9 t Belastung

Im Vergleich der Reifentypen schädigt der Zwillingsreifen (295/80 R22.5 Zw) gegenüber dem einzelnen Breitreifen (495/45 R 22.5) immer weniger die Fahrbahnbefestigung, da dieser immer eine höhere minimale Reserve und auch eine höhere Reserve des 10 %-Volumenanteils besitzt. Die Differenz der minimalen Reserven beider Reifentypen vergrößert

sich im Zustand „warm“ und bei Beschleunigungsvorgängen, insbesondere Antrieb. Am höchsten sind die Unterschiede in der Bauklasse III.

6.1.2 Vergleich 3: Fahrbahnaufbau und –zustand

Zur Gegenüberstellung der unterschiedlichen Bauklassen (SV und III) und Temperaturzustände („5000“, „warm“, „Diff Gewitter“, „Diff Sonne“ und „heiß“) werden MOHR'sche Spannungsdiagramme des Reifentyps 495/45 R 22.5 mit einer Belastung von 9 t erzeugt. Die minimalen Reserven für den oberen (oben) sowie den unteren Betrachtungsbereich (unten) zeigt Abb. 6-2. Darin ist deutlich zu erkennen, dass sich der Einfluss unterschiedlicher Fahrzustände auf die oberen 10 cm der Fahrbahnkonstruktion wesentlich stärker auswirkt als auf den unteren Asphaltbereich.

Auch beim Schädigungspotential verhalten sich die Bauklasse SV und III ähnlich zueinander, wie bei den maximalen Spannungen in Kapitel 5 festgestellt worden ist. Demnach liegen die minimalen Reserven der Bauklasse III gegenüber der Bauklasse SV in allen Fällen der Abb. 6-2 um mindestens 13 % niedriger. So verursacht das dickere Asphaltpaket aus der höheren Bauklasse immer eine niedrigere Schädigung hinsichtlich Spurrinnenbildung und Ermüdung.

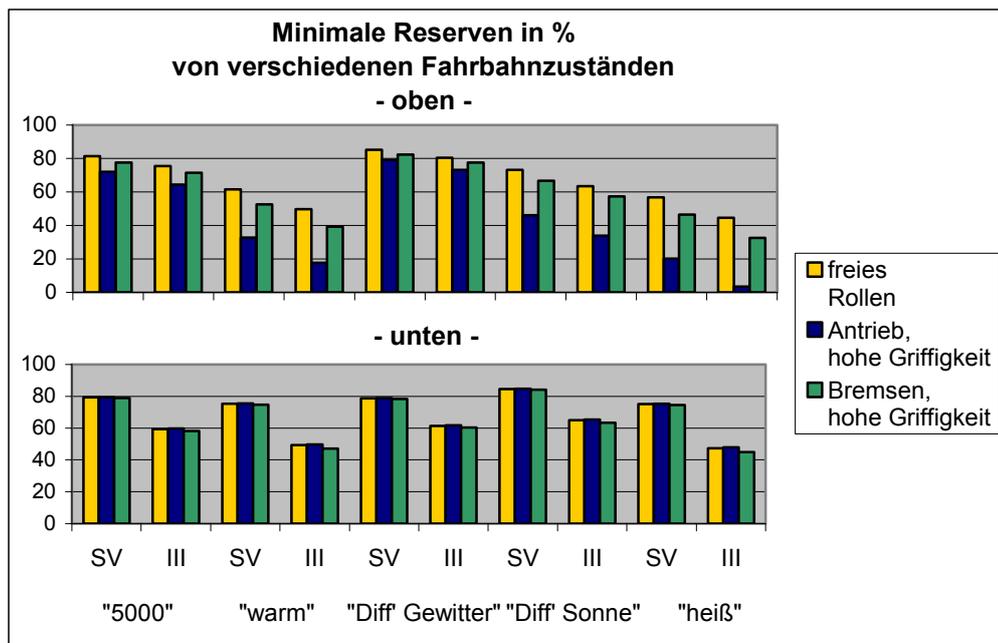


Abb. 6-2: Schädigungspotential unterschiedlicher Fahrbahnzustände des Reifentyps 495/45 R 22.5 bei 9 t Belastung

Der Vergleich der behandelten Fahrbahnzustände anhand des Schädigungspotentials zeigt, dass die Fahrbahnaufbauten bei höheren Temperaturen kleinere Reserven besitzen, was aus den Spannungsbetrachtungen in Kapitel 5 nicht hervorgegangen ist. Obwohl im oberen Bereich der Asphaltenschicht durch den Zustand „warm“ nach Abb. 5-9 geringere Spannungen als durch den Zustand „5000“ auftreten, verringern sich bedingt durch die temperaturabhängigen Schädigungsfunktionen nach Abb. 6-2 dort die Reserveanteile. Sind im Gegenzug im oberen Bereich die Temperaturen relativ niedrig, wie im Zustand „Diff' Gewitter“, steigt die Reserve gegenüber dem gleichförmigen Zustand „5000“ trotz größerer Spannungen (vergleiche Abb. 5-10). Ebenso verursachen im unteren Bereich hohe Temperaturen wie im Zustand „warm“ oder „heiß“ stärkere Schädigungen in der Asphaltenschicht. Treten dagegen im unteren Bereich niedrige Temperaturen auf (z.B. bei „Diff' Sonne“), so ergibt sich trotz größerer Spannungen eine höhere Reserve. Im Zustand „warm“ fallen die Reserven im oberen Bereich der Asphaltenschicht wesentlich niedriger aus als im Zustand „5000“. Dann tritt eine Schädigung durch Ermüdung gegenüber der Schädigung durch Spurrinnenbildung in den Hintergrund.

Gemäß Abb. 6-3 sinkt die minimale Reserve in beiden Bauklassen mit höherer Oberflächentemperatur näherungsweise linear. Ist der Reifen zusätzlich durch Beschleunigungskräfte belastet, verstärkt sich diese Abnahme. Dabei bleibt die Differenz der minimalen Reserven zwischen den Bauklassen ungefähr gleich.

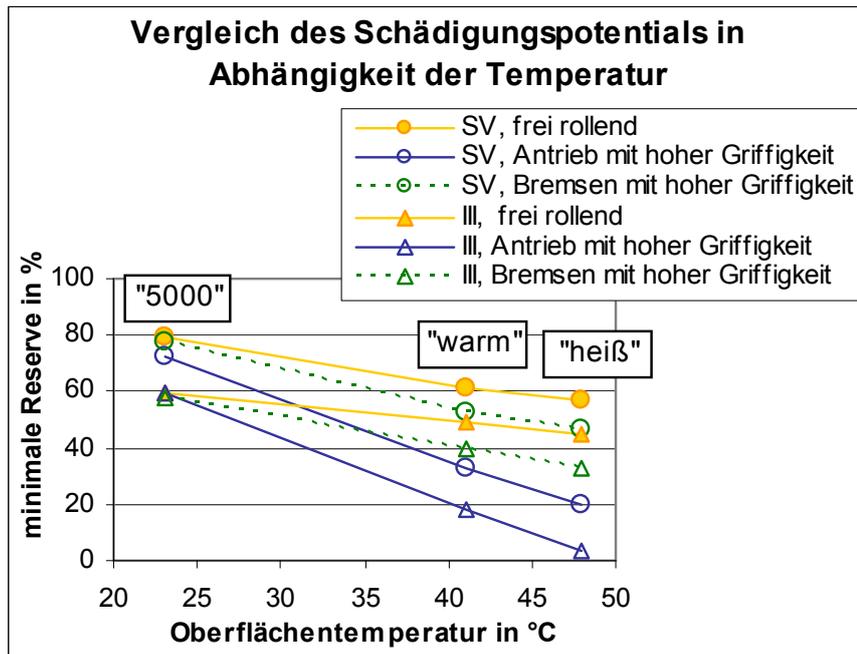


Abb. 6-3: Schädigungspotential des Reifentyps 495/45 R 22.5 bei 9 t Belastung in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur

Aus den Berechnungen dieses Abschnittes ist festzuhalten, dass in jedem Fahrbahnzustand, auch unter extremen sommerlichen Bedingungen, die Wahl einer höheren Bauklasse und damit einer dickeren Asphaltschicht zu kleineren Schädigungen führt. Außerdem steigt unabhängig von Aufbau und Belastung mit zunehmender Temperatur die (aus Fließvorgängen resultierende) Schädigung in den Asphaltschichten an.

6.1.3 Vergleich 4: Art der Beschleunigung

Mittels Reifentyp 495/45 R 22.5 wird der Einfluss der unterschiedlichen Längsschubkräfte auf das Schädigungspotential untersucht. Die Summe der Schubbelastungen in Längsrichtung betragen 20 % der Summe der Vertikalbelastungen in der BAF. Für die Zustände „5000“ und „warm“ und Bauklassen SV und III werden freies Rollen, gleichmäßige Schubbelastung sowie Antrieb und Bremsen mit jeweils geringer und hoher Griffigkeit behandelt (vergleiche S. 99). Unterschiedliche Fahrzustände wirken sich hauptsächlich in den oberen Schichten aus (siehe Abb. 6-2). Im Gegensatz zur Spurrinnenbildung ist daher das Ermüdungsreißen, welches an der Unterseite der Asphaltschicht initiiert wird, von den unterschiedlichen Fahrzuständen kaum betroffen. Die minimalen Reserven und 10 %-Volumenanteile der Reserve fasst Abb. 6-4 zusammen.

Im Zustand „5000“ und vor allem in der höheren Bauklasse SV werden durch die vorgegebenen Zusatzbelastungen keine wesentlichen Schädigungen im oberen Bereich verursacht. Im Zustand „warm“ dagegen ergeben sich dort aus den zusätzlichen Schubbelastungen wesentliche Reserverückgänge. In beiden Bauklassen liegen die Stellen der minimalen Reserven bei Antrieb im Bereich von 0 cm bis 2 cm, bei Bremsen im Bereich von 2 cm bis 4 cm.

Auffallend ist in Abb. 6-4, welche die minimalen Reserven der gesamten Asphaltsschicht wiedergibt, dass in der Bauklasse III im Zustand „5000“ kaum eine Änderung durch die Längsschubkräfte bewirkt wird. Denn in diesem Fall werden die minimalen Reserven an der Unterseite der Asphaltsschicht hervorgerufen, welche wenig von den zusätzlichen Schubbelastungen beeinflusst werden. Am deutlichsten zeigt sich der Einfluss der Beschleunigungskräfte in beiden Bauklassen im Zustand „warm“. Wie auch aus Abb. 6-3 hervorgegangen ist, vergrößert sich mit steigender Oberflächentemperatur die durch die Schubkräfte in Längsrichtung hervorgerufene zusätzliche Schädigung. Diese Zunahme der Reserveunterschiede zwischen freiem Rollen und beschleunigten Bewegungsvorgängen vom Zustand „5000“ auf den Zustand „warm“ ist durch eine reine Spannungsbetrachtung des Kapitels 5 nicht sichtbar (vergleiche Abb. 5-11).

Die Reserve verringert sich vor allem bei Antriebsbelastung, bei Bremsbelastung liegen die minimalen Reserven über den Werten durch gleichmäßige Schubbelastung. Wie aus den Spannungsbetrachtungen in Kapitel 5 ableitbar ist, erhöht sich durch eine höhere Griffigkeit die Schädigungswirkung bei Antrieb (niedrigere Reserve), und verringert sich bei Bremsen. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Antriebskräfte nur von einer oder zwei Achsen, die Bremskräfte dagegen von allen Achsen auf die Straße übertragen werden (vergleiche Kapitel 4.1). Auch deshalb ist bei gleicher Längskraft des Gesamtfahrzeugs durch die ungünstigere Längskraftverteilung der Antrieb die kritische Größe.

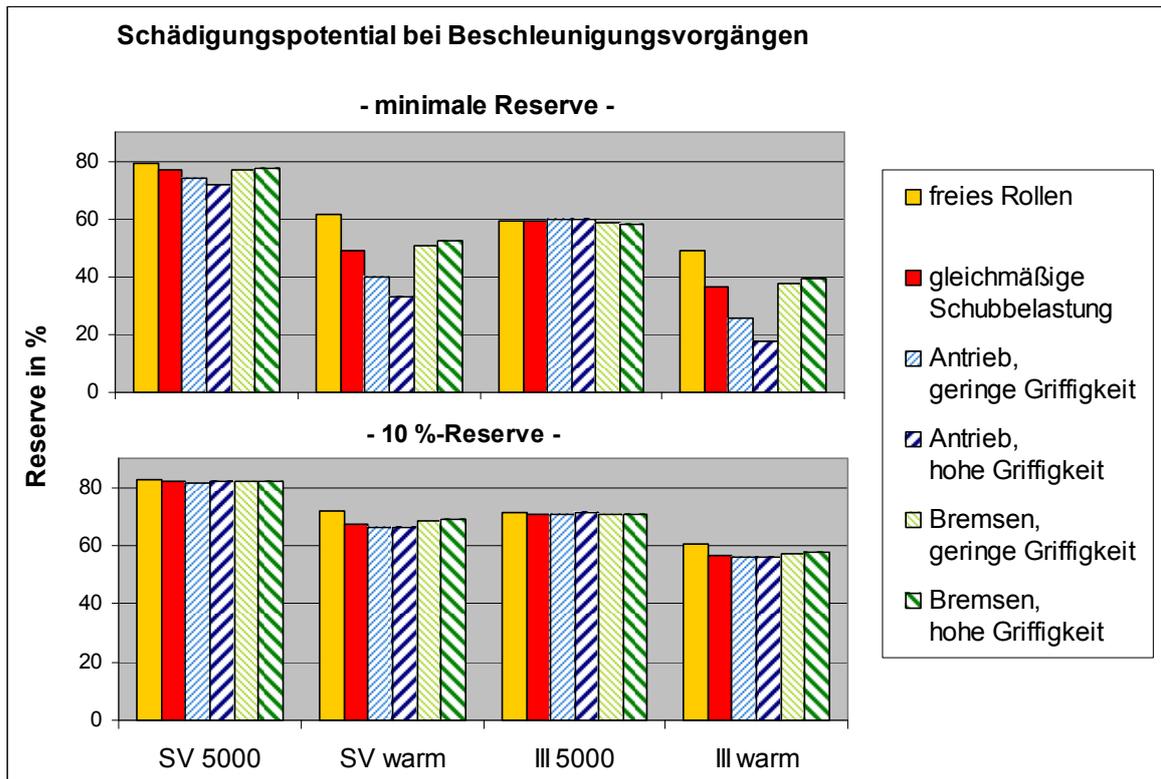


Abb. 6-4: Vergleich der Beschleunigungsarten hinsichtlich des Schädigungspotentials des Reifentyps 495/45 R 22.5 bei 9 t Belastung

6.1.4 Vergleich 5: Höhe der Beschleunigung

Durch den Reifentypen 495/45 R 22.5 wird der Einfluss der Beschleunigungshöhe auf das Schädigungspotential bestimmt. Mit den Bauklassen SV und III, den Fahrbahnzuständen „5000“ und „warm“, sowie freiem Rollen und den gleichmäßigen Schubbelastungen von 10 %, 20 % und 50 % der Vertikalkraft ergibt sich Abb. 6-5, welche die minimalen Reserven und 10 %-Volumenanteile der Reserve zeigt.

Die Stelle der minimalen Reserven bei gleichmäßiger Schubbelastung liegt für freies Rollen im Bereich von 2 cm bis 4 cm und wandert mit zunehmender Beschleunigungskraft in Richtung der Fahrbahnoberfläche. Wie im Vergleich 4 entstehen durch die Variation der Beschleunigungshöhe beim Zustand „5000“ keine großen Veränderungen in der Reserve. Selbst bei einer starken Beschleunigungskraft von 50 % der Vertikalkraft bleiben hohe Reserveanteile erhalten. Bei sommerlichen Temperaturverhältnissen (Zustand „warm“) dagegen verringern sich die Reserveanteile mit wachsender horizontaler Schubbelastung überproportional stark, bedingt durch den überproportionalen Spannungsanstieg (siehe

Kapitel 5). Dann kann bei zu hoher Beschleunigung in beiden Bauklassen eine sofortige lokale Schädigung in Form von Fließvorgängen eintreten.

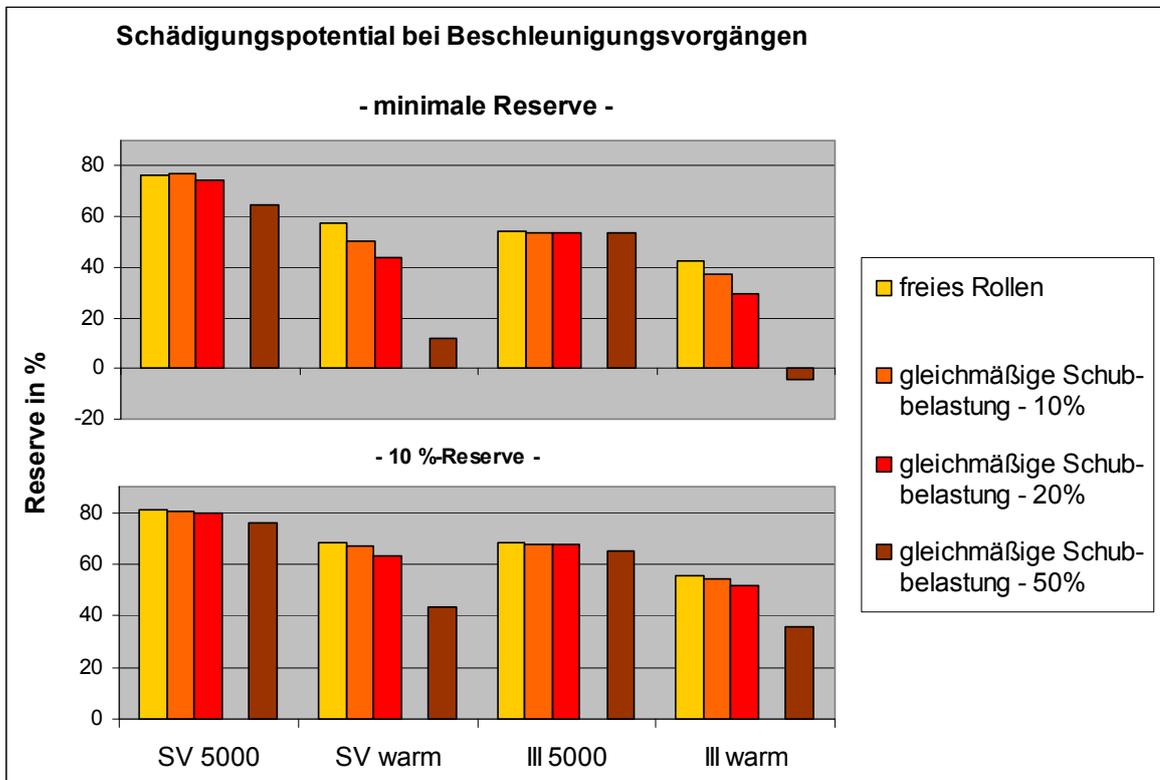


Abb. 6-5: Einfluss der Beschleunigungshöhe hinsichtlich des Schädigungspotentials des Reifentyps 495/45 R 22.5 bei 10 t Belastung

Insgesamt steigt mit zunehmender Längskraft – verstärkt durch eine niedrige Bauklasse und hohe Temperaturen – die Schädigung im Asphalt. Allerdings kann keine allgemeingültige pauschale Formel einer Reserveverringerung durch die Beschleunigungskraft gefunden werden, da sich die lokalen Maxima im oberen Bereich und im unteren Bereich unterschiedlich entwickeln. Denn während die Reserve über die gesamte Fahrbahnbefestigung in der Bauklasse III im Zustand „5000“ keine Auswirkungen zeigt, sind diese in der gleichen Bauklasse im Zustand „warm“ am höchsten.

6.1.5 Vergleich 6: Achskombinationen

Hier werden die Schädigungspotentiale aus einer Überfahrt der 11,5 t-Antriebsachse sowie der mit je 9 t belasteten vorderen oder hinteren Achse des Doppelantriebsachsaggre-

gats bestimmt. In Abb. 6-6 sind die kleinsten minimalen Reserven der Achskombinationen für den Reifentyp 495/45 R 22.5, die Bauklasse SV (oben) und III (unten) sowie die Fahrbahnzustände „5000“ (links) und „warm“ (rechts) dargestellt (vergleiche Abb. 5-18). Die Längskräfte betragen bei Antrieb und Bremsen jeweils 20 % der Vertikallast.

Im Vergleich zwischen einer Einzelachse von 11,5 t und einer Doppelantriebsachse mit zwei 9 t-Achsen ergibt sich entsprechend den Spannungsberechnungen aus Kapitel 5 das höchste Schädigungspotential bei der Einzelachse. Während die Spannungsdifferenz bei jeder Bauklasse, jeder Temperatur- oder jedem Fahrzustand nahezu konstant dem Lastzuwachs entsprochen hat, schwanken hier die minimalen Reservedifferenzen von 8 % bis über 100 %. Der Unterschied zwischen den Achskombinationen erhöht sich bei einer geringeren Bauklasse, mit zunehmender Fahrbahn temperatur und durch Beschleunigungsvorgänge, insbesondere unter Antrieb. Im Fall einer Antriebsbelastung unter sommerlichen Bedingungen („warm“) ist die Reserve bei der 11,5 t-Einzelachse an einigen Stellen in der Fahrbahnbefestigung unterhalb der BAF aufgebraucht, und somit verursacht dort der Reifen eine sofortige Schädigung in Form von Fließvorgängen. Verstärkt wird die Schädigung durch höhere Vertikallasten, die zwar unzulässig, aber bei einem Anteil der überladenen Fahrzeuge am Gesamtverkehr von 25 % häufig anzutreffen sind [48], und durch eine höhere Antriebsbelastung, was in einzelnen Konstellationen - belegt durch Kapitel 4.1 - als realistisch angesehen werden muss.

Außerdem wird bei gleicher prozentualer Längskraft, wie bereits in Kapitel 5 für den vorliegenden Vergleich festgestellt (siehe S. 100), mit der Doppelachse eine größere Längskraft als mit der Einzelachse übertragen. Daher wird eine Asphaltbefestigung bei gleicher Antriebslast durch eine Achse des 18 t-Doppelantriebsachsaggregats zusätzlich noch geringer geschädigt als durch eine 11,5 t-Einzelachse.

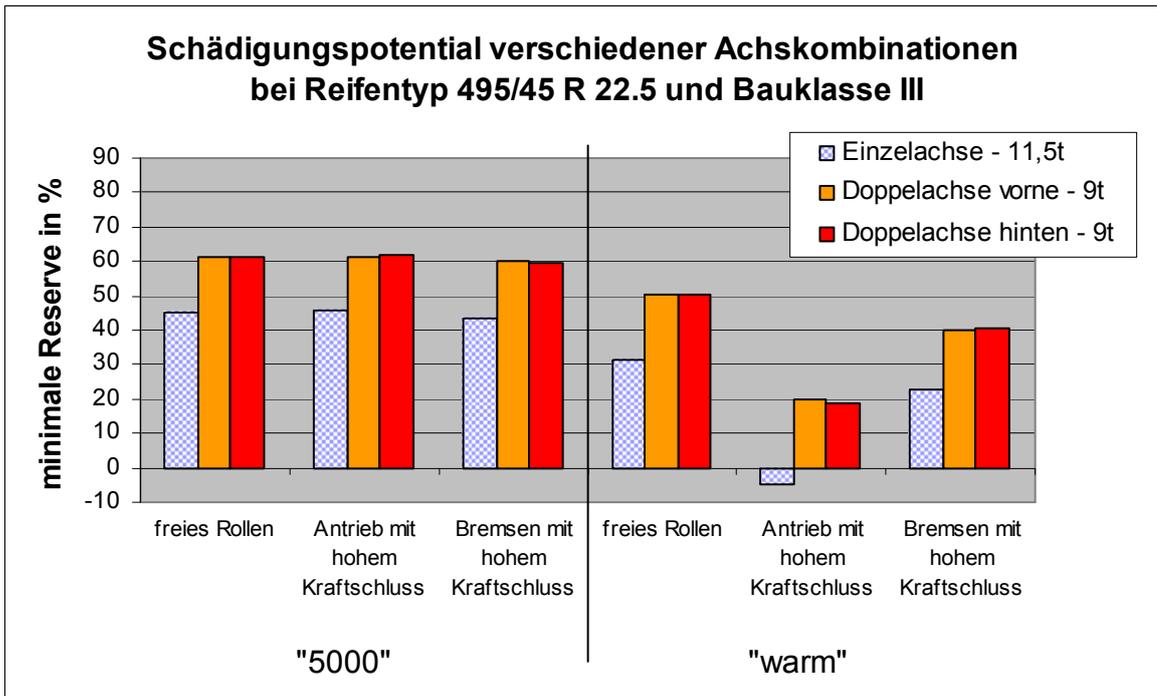
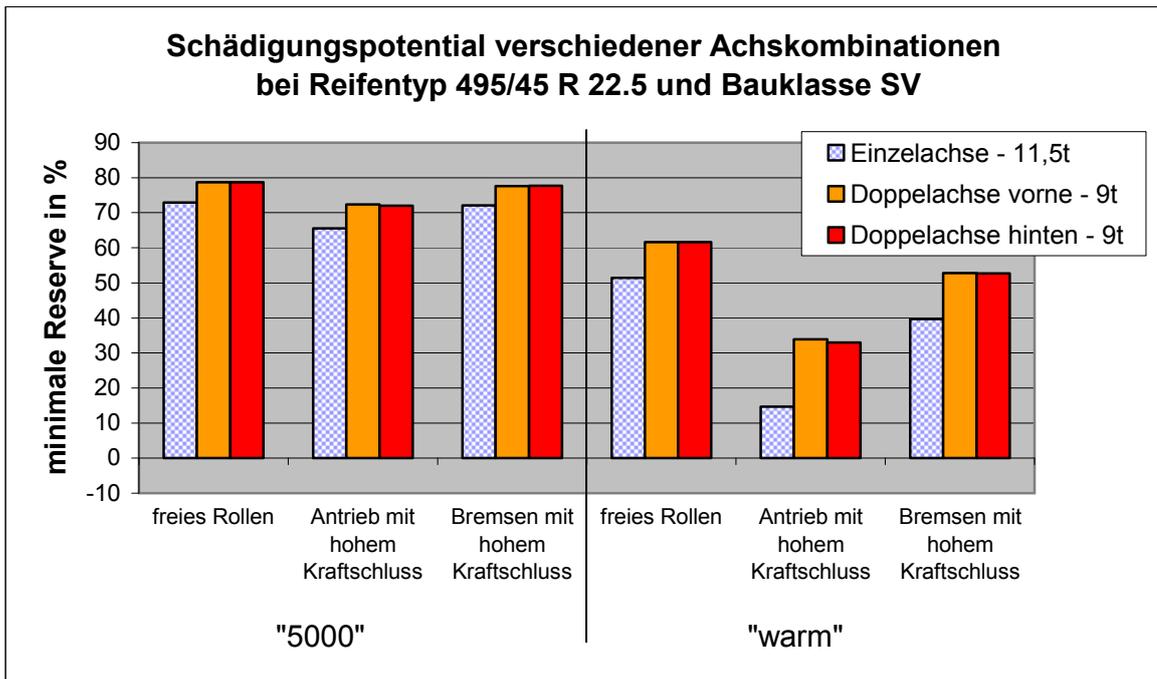


Abb. 6-6: Vergleich von Achskombinationen hinsichtlich des Schädigungspotentials des Reifentyps 495/45 R 22.5

Gleiches gilt beim Achsvergleich für den Zwillingsreifen 295/80 R22.5 Zw. Die gesamten Schädigungen sind allerdings gegenüber den Einzelreifen geringer, wie bereits die Spannungsvergleiche in Kapitel 5 belegen.

Die Achskonfigurationen werden für beide Reifentypen im folgenden Kapitelabschnitt durch Gleichung (2.11) direkt einander gegenübergestellt.

6.2 Vergleich zu Tyre Configuration Factor

Im Bericht COST 334 "Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres" [22] werden die Auswirkungen von Breitreifen gegenüber Zwillingsreifen auf Asphaltbefestigungen untersucht. Neben den zwei in dieser Arbeit berücksichtigten Arten des Fahrbahnverschleißes (pavement wear), Spurrinnen durch Schubbeanspruchung in der Asphaltenschicht (primary rutting) und Ermüdungsrissen (fatigue cracking), wird zusätzlich die Spurrinnenbildung durch Verformung des Untergrundes (secondary rutting – siehe Abb. 2-5 (b)) in die Schädigungsberechnung einbezogen.

Für jedes Schadenskriterium und für drei verschiedene Asphaltenschichtdicken wird aus Regressionsanalysen eine PWR(pavement wear ratio)-Funktion gebildet, die in einem relativen Vergleich das Schädigungspotential eines Reifentyps dem Schädigungspotential des Referenzreifens, dem Zw 295/80 R 22.5, gegenüberstellt. Zur Berechnung der PWR-Werte werden ausschließlich reifenabhängige Einflussfaktoren benötigt: Es gehen die Breite (width), die Ganze Breite (total width), die Abweichung vom optimalen Reifendruck (rel. pressure ratio) und zur Bestimmung der Reifenaufstandsfläche der Reifendurchmesser (diameter) ein. Beim Zwillingsreifen entspricht die Breite der zweifachen Breite des Einzelreifens, während die Ganze Breite zusätzlich noch den Raum zwischen den Reifen beinhaltet.

Die Ergebnisse von COST 334 werden im **Tyre Configuration Factor (TCF)** zusammengefasst, welcher zur Relativbewertung von unterschiedlichen Reifen- bzw. Achskombinationen herangezogen werden kann. Der TCF wird für primary roads (300 mm Asphaltstärke oder mehr) und secondary roads (ca. 200 mm Asphaltstärke) unterschiedlich berechnet. Damit entspricht die Bauklasse SV etwa den primary roads (Bundesfernstraßen) und die Bauklasse III den secondary roads (sekundäres Netz). Sie werden im Folgenden gleichbedeutend verwendet.

Bei **primary roads (Bauklasse SV)** wird aufgrund der dicken Asphaltsschicht nur die Spurrinnenbildung aus Schubbeanspruchung in der Asphaltsschicht („primary rutting“) berücksichtigt.

$$\begin{aligned} \text{TCF}_{\text{primary roads}} &= \text{PWR}_{\text{primary rutting}} \\ &= \left(\frac{\text{width}_{\text{Reifen}}}{\text{width}_{\text{Referenzreifen}}} \right)^{-1,65} \cdot \left(\frac{\text{pressure ratio}_{\text{Reifen}}}{\text{pressure ratio}_{\text{Referenzreifen}}} \right)^{1,42} \cdot \left(\frac{\text{diameter}_{\text{Reifen}}}{\text{diameter}_{\text{Referenzreifen}}} \right)^{-1,12} \quad (6.1) \end{aligned}$$

Bei **secondary roads (Bauklasse III)** setzt sich der TCF aus allen drei, unterschiedlich gewichteten Schadensmechanismen zusammen.

$$\begin{aligned} \text{TCF}_{\text{secondary roads}} &= \frac{1}{5} \cdot \text{PWR}_{\text{primary rutting}} + \frac{2}{5} \cdot \text{PWR}_{\text{secondary rutting}} + \frac{2}{5} \cdot \text{PWR}_{\text{fatigue cracking}} \\ &= 0,2 \cdot \left(\frac{\text{width}_{\text{Reifen}}}{\text{width}_{\text{Referenzreifen}}} \right)^{-1,65} \cdot \left(\frac{\text{pressure ratio}_{\text{Reifen}}}{\text{pressure ratio}_{\text{Referenzreifen}}} \right)^{1,42} \cdot \left(\frac{\text{diameter}_{\text{Reifen}}}{\text{diameter}_{\text{Referenzreifen}}} \right)^{-1,12} \\ &+ 0,4 \cdot \left(\frac{\text{total width}_{\text{Reifen}}}{\text{total width}_{\text{Referenzreifen}}} \right)^{-2,57} \cdot \left(\frac{\text{pressure ratio}_{\text{Reifen}}}{\text{pressure ratio}_{\text{Referenzreifen}}} \right)^{1,58} \\ &+ 0,4 \cdot \left(\frac{\text{total width}_{\text{Reifen}}}{\text{total width}_{\text{Referenzreifen}}} \right)^{-1,23} \cdot \left(\frac{\text{diameter}_{\text{Reifen}}}{\text{diameter}_{\text{Referenzreifen}}} \right)^{-1,14} \quad (6.2) \end{aligned}$$

Die Nachverdichtung des Untergrundes ($\text{PWR}_{\text{secondary rutting}}$) ist aufgrund der dicken Frostschutzschicht, welche in den RStO vorgeschrieben ist, jedoch nur in einem sehr geringem Maße relevant.

Außerdem kann mit dem **Axle Wear Factor (AWF)** die Achslast miteinbezogen werden, so dass die Schädigung der einzelnen, unterschiedlich belasteten Achsen erkennbar wird. Dabei wird die Veränderung der Last gegenüber einer 10 t-Achse in Abhängigkeit vom jeweiligen Schädigungsmechanismus berücksichtigt. So geht die Last im „primary rutting“-Anteil quadratisch und im „fatigue cracking“-Anteil mit der vierten Potenz ein. Der „secondary rutting“-Anteil wird in Einpassung an die anderen Schadensmechanismen mit einem kubischen Lastfaktor angenommen.

Schließlich lässt sich die Schädigung eines ganzen Nutzfahrzeuges bestimmen, indem die aus dem Tyre Configuration Factor und der Achslast abgeleiteten Axle Wear Faktoren der jeweiligen Achsen zum **Vehicle Wear Factor (VWF)** aufaddiert werden.

6.2 Schädigungsverhalten - Vergleich zu Tyre Configuration Factor

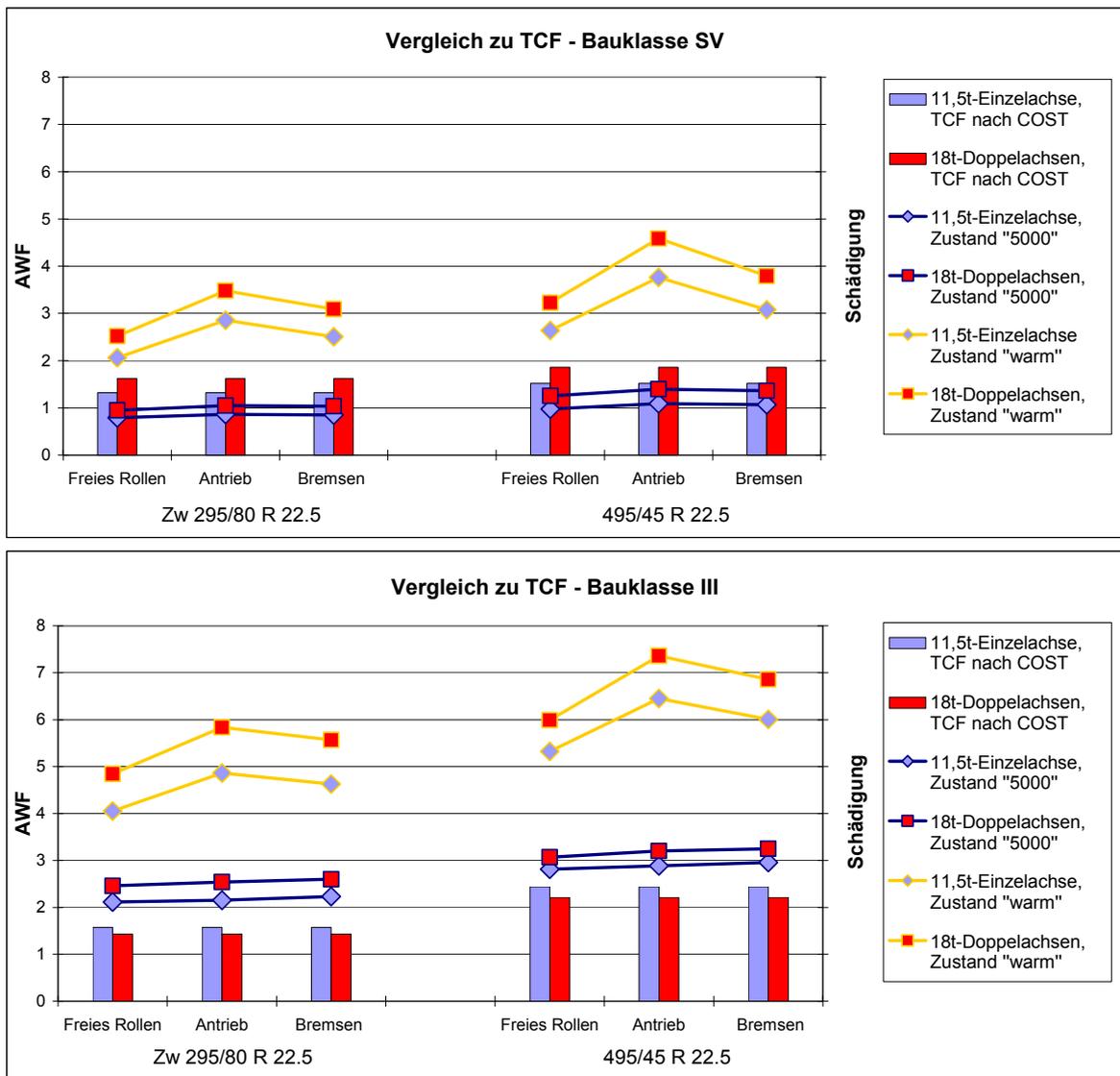


Abb. 6-7: Vergleich zwischen TCF und Reserven-Schädigungspotential

In Abb. 6-7 werden nun der TCF und die aus dem 10 %-Volumenanteil der Reserve ermittelte Schädigung nach Gleichung (2.11) einander gegenübergestellt. Darin werden die Auswirkungen der Überfahrt einer 11,5 t-Einzelachse mit den Auswirkungen der Überfahrt eines kompletten 18,0 t-Doppelantriebsachsaggregats bei den zwei Fahrbahnzuständen „5000“ und „warm“ und bei freiem Rollen sowie Antrieb und Bremsen mit 20 % der Vertikalkraft miteinander verglichen. Die Skalierung der Achsen ist für beide Diagramme gleich (oben: BK SV, unten: BK III, links: Zw 295/80 R 22.5, rechts: 495/45 R 22.5).

Der aus dem TCF abgeleitete AWF kann nur zwischen den Reifentypen und Lasten unterscheiden. Es gibt keine Unterscheidung verschiedener Temperaturzustände in der Fahrbahnbefestigung, der Fahrzustände (freies Rollen – Antrieb – Bremsen) oder der

Höhe der Längsschubkräfte. Zudem wird zwar der TCF bzw. der AWF für eine hohe und niedrige Bauklasse unterschiedlich errechnet, aber da unabhängig voneinander in beiden Gleichungen (6.1) und (6.2) alle Werte relativ auf den Zwillingsreifen bei 10 t bezogen sind, ist damit ein Vergleich zwischen den Bauklassen – im Unterschied zum hier angewendeten Verfahren - nicht möglich. Deshalb bietet sich das TCF-Verfahren nach COST 334 nur zum überschlägigen Vergleich von Reifentypen oder von Achskombinationen an.

Es ergibt sich durch die Rechenwerte aus dem TCF und der Reserve die gleiche Rangfolge der Schädigung sowohl zwischen den beiden Reifentypen als auch zwischen den beiden Achskonfigurationen. Der Zwillingsreifen beansprucht die Fahrbahnbefestigung weniger als der Einzelreifen. Die 11,5 t-Einzelachse weniger als die 18 t-Doppelachse, allerdings kommt es bei der Einzelachse bereits lokal zu Fließvorgängen (vergleiche Kapitel 6.1.5). Nur in der Bauklasse III erzeugt die Einzelachse durch den AWF nach COST 334 die größere Schädigung, während die über die Reserve berechnete Schädigung weiterhin die Doppelachse kritischer einstuft als die Einzelachse. Im Gegensatz zum AWF nach COST 334, bei dem die Last mit der zweiten, dritten und vierten Potenz eingeht, wird in der hier verwendeten Methode nach Gleichung (2.11) – es ist von einem Versagen durch Fließen auszugehen –ausschließlich nur die zweite Potenz angewendet. Daher kehrt sich in diesem Fall das Verhältnis zwischen den Achskonfigurationen nicht um. Bereits bei der Verwendung der dritten Potenz wäre dies der Fall. Auf jeden Fall aber geht von der 18 t-Doppelachse eine kleinere Schädigung aus, als das zusätzliche Gewicht von über 50 % gegenüber der 11,5 t-Einzelachse erwarten lässt (maximal 30 % mehr). Damit ist ihre auf das Achsgewicht bezogene Schädigung geringer.

Allgemein zeigt Abb. 6-7 den hohen Einfluss der Fahrbahntemperatur auf die Schädigung, welche neben der Höhe der Vertikallasten, eventuellen Horizontalschubkräften und der Bauklasse ein wesentlicher Schadensfaktor ist. Bei sommerlichen Temperaturverhältnissen (Lastfall „warm“) ergeben sich größere Unterschiede zwischen den Fahrzuständen (freies Rollen – Antrieb – Bremsen), den Achskonfigurationen und den Reifentypen. Dabei wirkt sich der Einbezug möglicher Horizontalkräfte, bzw. die Modellierung des Fahrzustands, in Bauklasse SV stärker aus als Achskonfiguration oder Reifentyp, in Bauklasse III in gleichem Maße wie Achskonfiguration oder Reifentyp. Die Schädigungsunterschiede zwischen den beiden Achskombinationen resultieren hauptsächlich aus den unterschiedlichen Vertikallasten.

Somit ergibt sich die gleiche Grundaussage für beide Schädigungsberechnungen. Allerdings ist eine umfassendere und detailliertere Aussage zur Schädigung mit Hilfe der hier

entwickelten Methode der Reservenermittlung möglich als durch das TCF-Verfahren nach COST 334.

6.3 Anwendungsbeispiele

Die theoretischen Ergebnisse dieser Untersuchung sollen anhand von drei Fällen praktisch angewendet werden. Hierzu wird zunächst der in den RStO gebräuchliche Steigungsfaktor mit der errechneten Schädigung verglichen, dann die Spurrinnenentwicklung zweier Antriebsachsaggregate über die Zeit prognostiziert und zuletzt das Schädigungspotential eines 40 t-Fahrzeugs dem eines 60 t-Fahrzeugs gegenübergestellt.

6.3.1 Steigungs- und Gefällestrecken

In diesem Kapitel soll die in den RStO festgelegte Bemessungspraxis (siehe Kapitel 2.1) hinsichtlich Steigungsstrecken überprüft werden. Hierzu wird ein Vergleich des Steigungsfaktors f_3 mit den Ergebnissen der Schädigungsberechnung zum Reifentyp 495/45 R 22.5 bei 10 t Vertikallast und proportionalen Schubbelastungen (siehe Kapitel 6.1.4) durchgeführt. Gleichzeitig werden die Zusatzbelastungen von Gefällestrecken ermittelt und ebenfalls mit dem Steigungsfaktor verglichen.

Zuerst wird errechnet, bei welchen Steigungen ein Lkw mit einem Gesamtgewicht von 40 t und einer Antriebsachslast von 10 t unter Beharrungsgeschwindigkeit die in der Untersuchung verwendeten Verhältnismerte (0 %, 10 %, 20 % und 50 %) von Horizontal- zu Vertikalkraft auf der Antriebsachse erreicht. So wird beispielsweise ein Verhältnis der Längs- zur Vertikalkraft von 50 % einer Längsneigung von 13 % gleichgesetzt. Alle nach Gleichung (2.11) errechneten Werte der 10 %-Reserve werden dann für den jeweiligen Fahrbahnaufbau und –zustand auf die Schädigung bei freiem Rollen (0 % Längsneigung) bezogen. Damit liegt der Startwert immer bei 100 %.

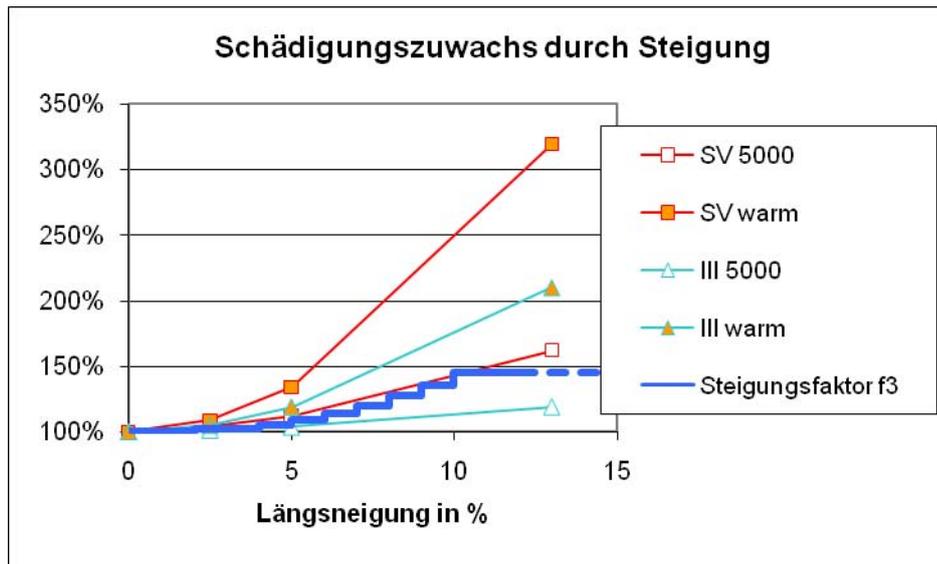


Abb. 6-8: Vergleich zwischen Steigungsfaktor und Reserven-Schädigungspotential bei Steigung

In Abb. 6-8 ist der Schädigungszuwachs auf der Antriebsachse durch Steigungsstrecken in Abhängigkeit von der Längsneigung dargestellt. Der Zuwachs des Steigungsfaktors f_3 entspricht den Tabellenwerten von Tab. 2-1, der Faktor nimmt bis zu einer Längsneigung von 10 % stufenförmig zu. Der Anstieg der Schädigung mit zunehmender Längsneigung ist in der höheren Bauklasse (BK SV gegenüber BK III) und bei höheren Fahrbahntemperaturen (Zustand „warm“ gegenüber Zustand „5000“) größer. Vor allem in der Bauklasse SV, welche im hochbelasteten Bundesfernstraßennetz in der Regel zum Einsatz kommt, wächst bei sommerlichen Verhältnissen die Schädigung mit zunehmender Längsneigung wesentlich stärker als der Steigungsfaktor. Zwar ist der Schädigungszuwachs gegenüber dem freien Rollen in der Bauklasse III niedriger als in Bauklasse SV, aber dabei ist zu berücksichtigen, dass in der niedrigeren Bauklasse insgesamt höhere Schädigungen erzeugt werden. Speziell im Zustand „III 5000“ liegt der Absolutwert der Schädigung, welche bei ebener Strecke verursacht wird, sogar über den Werten des Zustands „SV 5000“ bei 14 % Steigung.

Folglich wird die Fahrbahnkonstruktion an Steigungsstrecken stärker geschädigt, als bisher angenommen und in der Bemessung berücksichtigt worden ist. Außerdem reicht ein pauschaler Faktor für alle Bauklassen nicht aus, um den Schädigungszuwachs durch Steigungen einzubeziehen, sondern es sollte nach Bauklassen differenziert werden.

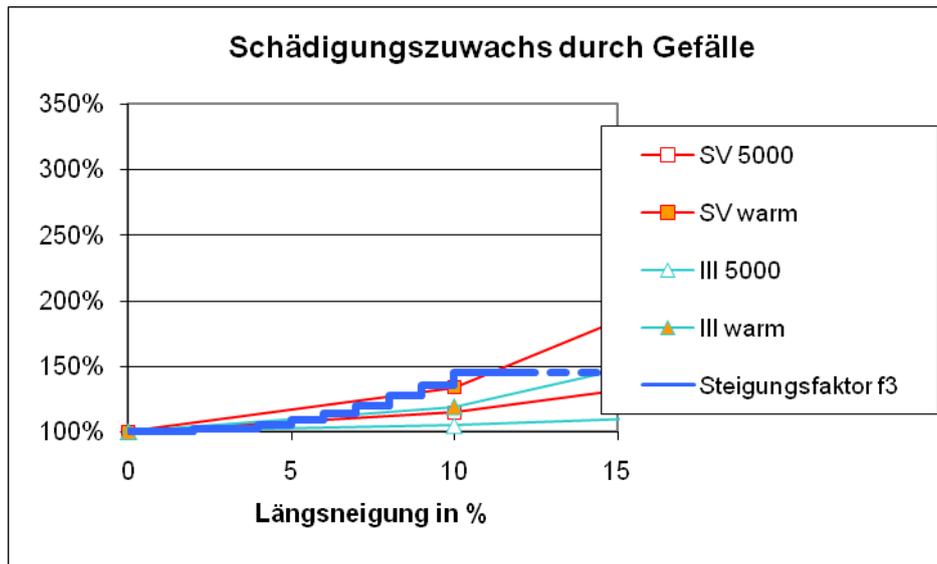


Abb. 6-9: Vergleich zwischen Steigungsfaktor und Reserven-Schädigungspotential bei Gefälle

Bei Gefälle muss berücksichtigt werden, dass auf allen Achsen gebremst werden kann. So muss jede Achse nur die Hangabtriebskraft des auf ihr lastenden Gewichts abbremsen. Der Schädigungszuwachs ergibt sich aus der Summe der zusätzlichen Beanspruchung auf jeder Achse. Nun wird bestimmt, bei welchem Gefälle ein Lkw mit einem Gesamtgewicht von 40 t die Verhältnismerte (0 %, 10 % und 20 %) von Horizontal- zu Vertikalkraft zum Halten der Geschwindigkeit benötigt. Beispielsweise muss ein Lkw eine Bremskraft von 10 % seiner Vertikallast aufwenden, um bei einer Längsneigung von 10 % nicht zu beschleunigen. Zu einer weiteren Drosselung der Geschwindigkeit wäre eine höhere Bremskraft notwendig.

Wie in Abb. 6-9 zu sehen ist, liegt der Schädigungszuwachs bei Gefällestrrecken für übliche Längsneigungen ($\leq 10\%$) unterhalb des Steigungsfaktors. Die Auswirkungen sind damit nicht so stark wie bei Steigungen (vergleiche Abb. 6-8). Da aber auch bei Gefällestrrecken, vor allem in Bereichen mit extremem Gefälle, erhöhte Beanspruchungen gegenüber der ebenen Strecke vorliegen, sollten an solchen Strecken ebenfalls Verstärkungen der Fahrbahnbefestigung gewählt werden.

Trotz der Verteilung der Bremskraft auf alle Achsen ergibt sich nicht ein solches Verhältnis der Schädigung von Steigungs- zu Gefällestrrecken, welches in einer Studie der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast) [11] mit dem 125fachen Wert für einen 40 t-Lkw durch

eine grobe Schätzung befürchtet worden ist, sondern in Abhängigkeit von Steigung, Fahrbahnaufbau und –zustand das 1,1- bis 2fache.

6.3.2 Spurrinnenentwicklung von Antriebsachsaggregaten

Die Entwicklung von Spurrinnen über die Zeit beschreibt BECKEDAHL [5]. Dabei wird von der These ausgegangen, dass die bleibende Verformung w_b zur quasielastischen Verformung proportional ist und mit wachsender Lastwiederholungszahl konsolidiert, d. h. einen degressiven Verlauf aufweist.

$$w_b = w_0 \cdot \nu \cdot N^\alpha \quad (6.3)$$

| | | |
|-----|---------------|---|
| mit | w_b | bleibende Oberflächendeformation |
| | w_0 | quasi-elastische, vertikale Deformation |
| | α, ν | Funktionsparameter ($\alpha \approx 0,5$ nach [5], [24]) |
| | N | Anzahl der Lastübergänge |

Bei erstmaliger Belastung ($N = 1$) ergibt sich eine bleibende Verformung von $w_0 \cdot \nu$. Der Kennwert α bestimmt die Konsolidierungsgeschwindigkeit. Mit $\alpha = 0,5$ steht dieser im direkten Zusammenhang mit der 2. Potenz der Spannungsverhältnisse bei der Spurrinnenbildung nach Gleichung (2.11), denn aus der Gegenüberstellung zweier bleibender Oberflächenverformungen gilt:

$$\frac{w_{0,1}}{w_{0,2}} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^\alpha \Leftrightarrow \left(\frac{w_{0,1}}{w_{0,2}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (6.4)$$

Auch wenn nach dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand statt der vertikalen Deformation w_0 die Gestaltänderungsarbeit zur Bestimmung des Spurrinnenbildungspotentials in der Untersuchung verwendet worden ist, so kann dennoch die Funktion (6.3) angewendet werden, um die Spurrinnenentwicklung über die Zeit darzustellen. Anstelle w_0 tritt die Schädigung aus der MISES-Spannung. Um nicht nur den Verlauf der Spurrinne über die Zeit und relative Vergleiche verschiedener Spurrinnenentwicklungen, sondern auch die absolute Höhe der Spurrinne bestimmen zu können, müsste zusätzlich in Versuchen der Anpassungsfaktor ν ermittelt werden. Auf diese Weise ist es möglich, die vielen

über den Tag verschiedenen Temperaturzustände in der Fahrbahnbefestigung miteinander zu kombinieren.

In Abb. 6-10 soll die Spurrinnenentwicklung von zwei verschiedenen Antriebsaggregaten in der Ebene (Rollen) und auf einer Steigungsstrecke (Antrieb) bei der Bauklasse SV im Juli veranschaulicht werden. Es werden eine Doppelantriebsachse mit zweimal 9 t und eine 11,5 t-Einzelantriebsachse in Kombination mit einer nicht angetriebenen 6,5 t-Nachlaufachse miteinander verglichen. Um auch im Antriebsfall gleiche Voraussetzungen zu haben, wird die Schädigung der Doppelantriebsachse so abgeändert, dass durch beide Achskombinationen die gleiche Horizontalschubkraft für eine Steigung von 5 % übertragen wird. Auf allen Achsen kommt vereinfachend der Reifentyp 495/45 R 22.5 zum Einsatz. Dabei wird weiterhin angenommen, dass die Fahrbahnbefestigung täglich durch jeweils 5000 Lastwechsel beansprucht wird. Da sich der Temperaturverlauf in der Fahrbahnbefestigung über den Tag ändert, kann kein Temperaturzustand konstant über die ganze Zeit angenommen werden. Daher werden für einen Juli-Tag exemplarisch die Zustände „5000“ und „warm“ kombiniert. Über einen Zeitraum von drei Stunden am Nachmittag gilt der Zustand „warm“ (vergleiche S. 45), was ca. 1000 Lastwechseln entspricht; sonst herrscht der Zustand „5000“ vor.

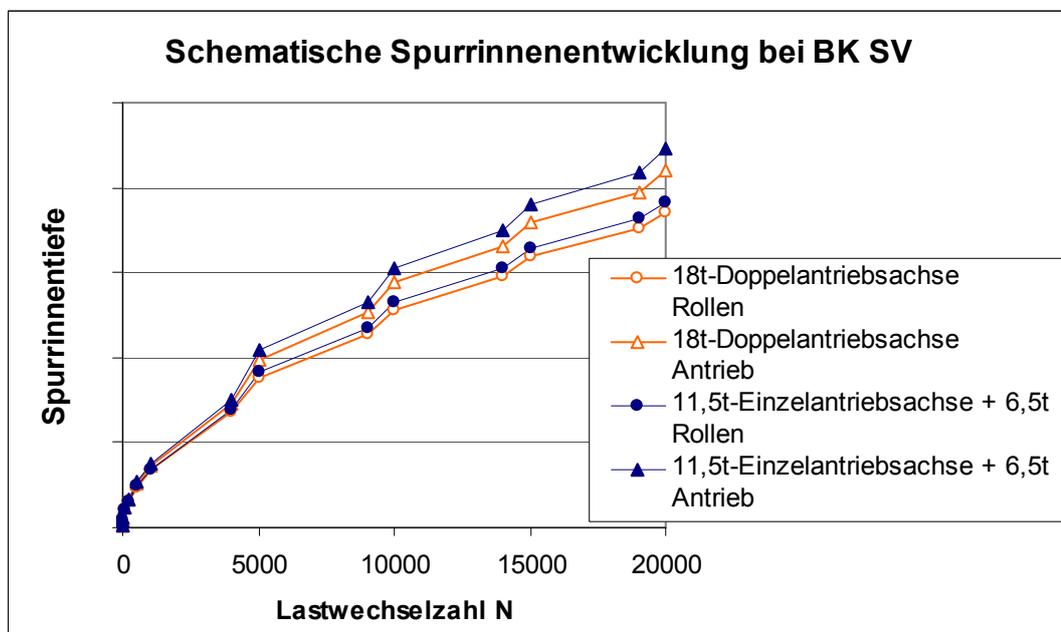


Abb. 6-10: Vergleich zweier Antriebsachsaggregate mittels Spurrinnenentwicklung im Juli

Die Kurven der Spurrinnen in Abb. 6-10 entwickeln sich mit zunehmender Lastwechselzahl immer flacher, die Schädigungsrate nimmt gemäß Gleichung (6.3) kontinuierlich ab. In den Bereichen, in denen der Zustand „warm“ angenommen wird ($N = 4.000 - 5.000, 9.000 - 10.000, \text{etc.}$), ist allgemein die Schädigungsrate größer und damit der Funktionsverlauf steiler. Dort sind auch die Unterschiede der Schädigungsraten von beiden Achskombinationen größer.

Durch die gleichmäßigere Lastverteilung verursacht die Doppelantriebsachse eine geringere Schädigung gegenüber der Einzelantriebsachse mit Nachlaufachse bei freiem Rollen. Deshalb reicht die Angabe des Gesamtgewichts allein nicht aus, um Rückschlüsse auf die Schädigung ziehen zu können. Erst die Kenntnis über die Achszahl und Achsbelastung ermöglicht eine Abschätzung des Schädigungsvermögens einer Achskombination oder eines Fahrzeuges. In der Steigung (unter Antrieb) hat die Doppelantriebsachse einen weiteren Vorteil durch die auf beide Achsen gleichmäßig wirkende, und damit im Verhältnis zur Vertikalkraft prozentual kleinere Horizontalkraft. Dadurch ergibt sich die größere Schädigungsdifferenz der beiden Achskombinationen bei Antriebsbelastung gegenüber freiem Rollen.

Die zusätzlichen Schädigungen, welche durch die Antriebsbelastung für eine Steigung von 5 % hervorgerufen werden, sind größer als die Unterschiede, welche sich aus den unterschiedlichen Achskonfigurationen ergeben.

6.3.3 Vergleich zwischen 40 t- und 60 t-Fahrzeug

Momentan werden zahlreiche Studien über den Einsatz von Fahrzeugkombinationen mit einem Gesamtgewicht von 60 t durchgeführt, beispielsweise in einer Studie der Bundesanstalt für Straßenwesen [11]. In einigen Bundesländern laufen parallel Modellversuche. Neben den Aspekten der Wirtschaftlichkeit, der Sicherheit, der Fahrgeometrie und der Brückenbelastung muss die Fahrbahnbeanspruchung beachtet werden. Daher soll in diesem Abschnitt untersucht werden, wie sich dieses neue 60 t-Fahrzeug mit einer 18 t-Doppelantriebsachse gegenüber einer herkömmlichen Fahrzeugkombination bei freiem Rollen und unter Antrieb in der Bauklasse SV verhält.

Der gängige Lastzug besitzt bei Vollaustattung eine Vorderachse mit 6,5 t, eine 11,5 t-Einzelantriebsachse und drei Anhängerachsen mit 7,33 t (= 5 Achsen und 40 t maximales Gesamtgewicht). Das neue Fahrzeugkonzept hat bei Vollaustattung zusätzlich zu den beiden Antriebsachsen mit je 9 t noch sechs Achsen mit je 7 t (= 8 Achsen und 60 t Ge-

6.3 Schädigungsverhalten - Anwendungsbeispiele

samtgewicht). Damit ergibt das Antriebsgewicht beim herkömmlichen Lastzug $11,5 / 40 = 28,75\%$ und beim neuen Fahrzeug $18 / 60 = 30\%$ des Gesamtgewichts, so dass beide bei einem konstanten Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalkraft mit 20% das ungefähr gleiche Beschleunigungsvermögen besitzen und damit eine 5% -Steigung überwinden können. Zur Vereinfachung wird auf allen Achsen wieder der Reifentyp 495/45 R 22.5 verwendet.

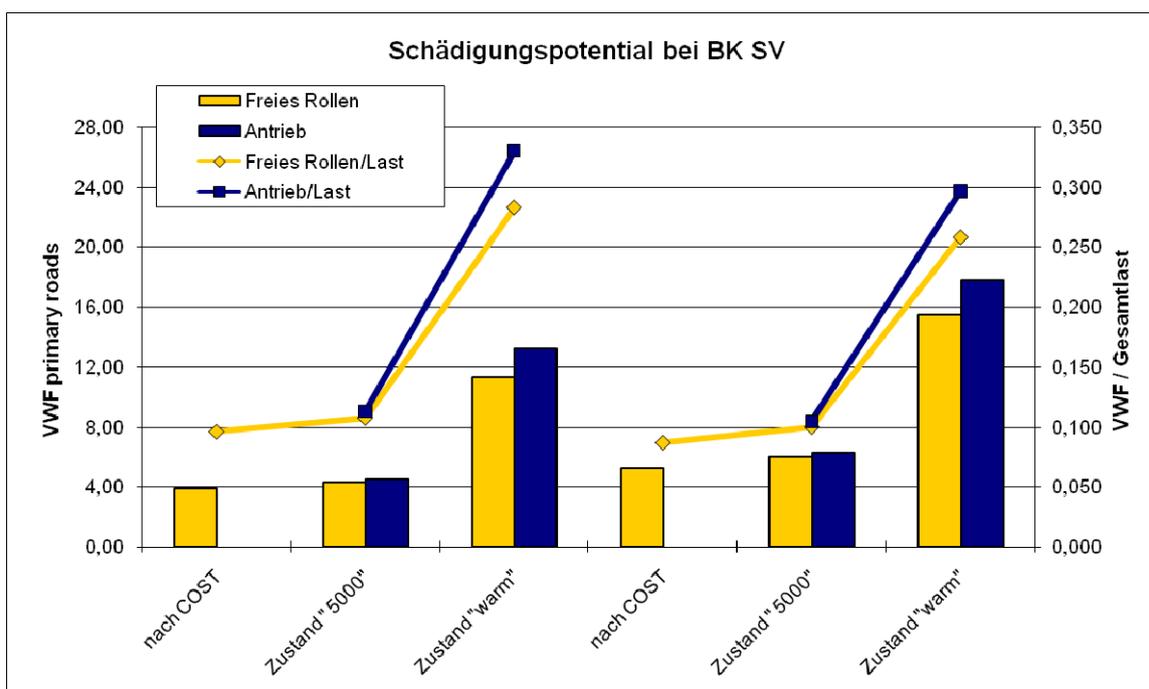


Abb. 6-11: Vergleich zwischen 40 t- und 60 t- Fahrzeug (absolut und lastspezifisch)

Abb. 6-11 zeigt den Vehicle Wear Factor (VWF) für beide Lastzüge, berechnet über den TCF nach COST 334 [22] und aus der Schädigung nach der 10% -Reserve im Zustand „5000“ und „warm“ bei freiem Rollen und unter Antrieb. Erwartungsgemäß werden in diesem absoluten Vergleich durch das 60 t-Fahrzeug höhere Schädigungen verursacht. Sinnvoller zum Vergleichen unterschiedlich schwerer Fahrzeuge ist ein gewichtsbezogenes Schädigungspotential (VWF / Gesamtlast), welches auf der zweiten Ordinate von Abb. 6-11 aufgetragen ist. Dann ist der etwas geringere lastspezifische Verschleiß des 60 t-Lastzugs zu erkennen; am größten sind die Unterschiede im Zustand „warm“.

Auch hier wird der große Einfluss der Temperatur deutlich, denn die absolute Schädigung eines 40 t-Fahrzeugs im Zustand „warm“ ist größer als die eines 60 t-Fahrzeugs im Zustand „5000“. Der Einfluss unterschiedlicher Fahrzustände wirkt sich erst bei wärmeren

Oberflächentemperaturen stärker aus. Für die kompletten Fahrzeuge liegen die Zuwächse, die aus dem Antrieb gegenüber dem freien Rollen resultieren, bei 4 % im Zustand „5000“ und bei über 15 % im Zustand „warm“.

Für die Fahrbahnbefestigung macht es demzufolge kaum einen Unterschied, ob drei 40 t-Fahrzeuge oder zwei 60 t-Fahrzeuge darüber fahren. Damit ist nichts gegen eine Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes von der Seite des Straßenbaus einzuwenden.

7 Schlussfolgerungen

Nach einer Zusammenfassung der wichtigsten Kernaussagen aus den einzelnen Kapiteln werden Handlungsempfehlungen zur Verminderung der Beanspruchung von Asphaltbefestigungen und ein Ausblick über weiteren Forschungsbedarf gegeben.

7.1 Kernaussagen

Zu einer genauen Ermittlung der Asphaltbeanspruchung muss die Temperaturverteilung in der Fahrbahnbefestigung bekannt sein, so dass die temperaturabhängigen Schädigungsfunktionen und über den temperaturabhängigen Elastizitätsmodul des Asphalts die Spannungsverteilung in der Fahrbahnkonstruktion bestimmt werden können. Mit den monatlichen und stündlichen Temperaturverteilungen, die aus den Lufttemperatur- und Strahlungsdaten der Jahre 2003 bis 2006 abgeleitet worden sind, ist eine Voraussage der Temperaturen in der Fahrbahnbefestigung für die Schädigungsberechnung möglich.

Außerdem ist in Kapitel 3.5.3 ein Verfahren entwickelt worden, mit dem aus den stündlichen Messdaten der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung innerhalb eines Tages die Temperaturverteilung in der Fahrbahnbefestigung errechnet werden kann. Hierzu wird die Gleichung (3.24) mit der Oberflächentemperatur F und den Parametern $A - G$ nach Tab. 3-7 sowie das Temperatur-Differenzen-Verfahren benötigt. Das Vorgehen ist dort zusammen mit einem Beispiel beschrieben.

Die Höhe und Verteilung der Kräfte in der Bodenaufstandsfläche werden ausführlich aus empirischen und theoretischen Quellen hergeleitet. Ein Lastmodell der Vertikalkräfte für optimalen, zu hohen und zu niedrigen Reifeninnendruck und ein Lastmodell der Horizontalkräfte für freies Rollen, Antrieb und Bremsen werden entwickelt und miteinander kombiniert. Die Kräfte in der Bodenaufstandsfläche bilden die Basis der Untersuchung, mit der auch weiterführende Berechnungen durchgeführt werden können.

Die Asphaltbeanspruchung einer Reifenüberfahrt unter den verschiedenen Arten der Beschleunigung und unter anderen Einflussgrößen lässt sich über die Spannungen in der Fahrbahnbefestigung und über die Reserve aus dem Abstand der Spannungskreise zu

den Schädigungskurven bestimmen. Dabei werden in dieser Untersuchung nicht nur die maximalen Werte einbezogen, sondern durch die 10 %-Volumenanteile alle Bereiche im Asphalt mit hohen Beanspruchungen. Durch die Betrachtung von MISES- oder TRESCA-Spannungen ergeben sich Rückschlüsse auf das Spurrinnenbildungspotential, durch die Betrachtung der maximalen Hauptspannung an der Unterseite der Asphaltsschicht auf das Ermüdungsrisssbildungspotential. Mit den Spannungen ist zwar ein Vergleich unterschiedlicher Einflussgrößen bei gleichem Temperaturzustand in der Fahrbahnbefestigung möglich, aber eine Aussage über das Schädigungspotential ergibt sich erst durch das in Kapitel 2.4 entwickelte Verfahren zur Reservenbestimmung, mit dem der minimale Abstand zwischen MOHR'schem Hauptspannungskreis und Schädigungsfunktion berechnet wird. Die Reserve ermöglicht es, das Schädigungspotential von Reifenüberfahrten bei verschiedenen Temperaturzuständen in der Fahrbahnkonstruktion direkt miteinander zu vergleichen. Erst so kann die erhöhte Spurrinnenbildungsgefahr bei sommerlichen Bedingungen nachgewiesen werden. Zudem wird aus der Reserve der Schädigungsanteil bestimmt, der zur Überprüfung des Steigungsfaktors gemäß den RStO 01 und zum Vergleich unterschiedlicher Achs- und Fahrzeugkombinationen herangezogen wird. Gegenüber dem einfachen TCF-Verfahren nach COST 334 [22] besitzt die hier entwickelte Methode den Vorteil, dass zwischen verschiedenen Temperatur- und Fahrzuständen differenziert werden kann und ein unmittelbarer Vergleich der Bauklassen untereinander möglich ist.

Durch die Vergleiche ergeben sich folgende Aussagen:

- Bei den untersuchten Reifentypen gilt: Je größer die Bodenaufstandsfläche, desto kleiner die Schädigung. Daher verursacht der Zwillingsreifen 295/80 R 22.5 Zw kleinere Schädigungen als die Breitreifen, und im Vergleich der Breitreifen ist der großflächigere Reifentyp 495/45 R 22.5 für die Lebensdauer der Fahrbahnkonstruktion günstiger als der Reifentyp 425/65 R 22.5. Der Einbezug der vertikalen Lastverteilung innerhalb der Bodenaufstandsfläche wirkt sich nur oberflächennah in begrenztem Umfang aus. Dort schädigt ein Reifen mit überhöhtem Innendruck die Fahrbahnbefestigung stärker als ein Reifen mit zu niedrigem Innendruck. Am besten für die Fahrbahnkonstruktion ist ein dem Achsgewicht angepasster, optimaler Reifeninnendruck.
- Eine höhere Bauklasse und dementsprechend eine dickere Asphaltsschicht ist immer weniger schadensanfällig, auch unter sommerlichen Bedingungen. Bei hohen Temperaturen sinkt die Reserve zwischen Spannungskreis und Schädigungskurve, und so wächst mit steigender Oberflächentemperatur die Spurrinnenbildungsgefahr.

- Die zusätzliche Beanspruchung aus Beschleunigungsvorgängen wirkt sich hauptsächlich im oberflächennahen Bereich aus, an der Unterseite der Asphaltsschicht kaum. Daher wird durch diese die Spurrinnenbildung beeinflusst, die Ermüdungsrisssbildung kaum. Generell ist der Antriebsvorgang kritischer als der Bremsvorgang, da die Antriebskraft nur über die Antriebsachse in die Fahrbahnbefestigung eingeleitet wird, während die Bremskraft auf allen Achsen gleichmäßig wirkt. Aber auch durch die Verteilung der Horizontalkräfte in der Bodenaufstandsfläche ergibt sich bei gleichen Lasten eine größere Fahrbahnbeanspruchung unter Antriebsbelastung gegenüber der Bremsbelastung. Die Schädigung einer fiktiven, zu den Vertikalkräften proportionalen Verteilung der Horizontalkräfte liegt dazwischen. Eine höhere Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche erhöht die Beanspruchung beim Antrieb und verringert die Beanspruchung beim Bremsen. Somit wird die höchste Schädigung bei einer Antriebsbelastung und hoher Griffigkeit erreicht. Mit zunehmenden Horizontallasten steigen die Spannungen und Schädigungen überproportional an. Im Sommer, bei wärmeren Fahrbahntemperaturen, erhöhen sich die aus Beschleunigungsvorgängen resultierenden zusätzlichen Beanspruchungen.
- Die Existenz einer zweiten Achse im Berechnungsmodell wirkt sich kaum auf die Spurrinnenbildung aus. Bei der Ermüdung ergibt sich eine Überlagerungswirkung von Mehrfachachsen. Auf jeden Fall ist aber die Doppelantriebsachse gegenüber der Einzelantriebsachse für die Fahrbahnbefestigung günstiger: Damit wird eine Vergleichmäßigung der vertikalen und auch horizontalen Achslasten erreicht, denn bei Antrieb können die horizontalen Kräfte über beide Achsen in die Fahrbahnkonstruktion eingeleitet werden. Somit ist die lastspezifische Schädigung geringer.
- Insgesamt besitzen die Vertikallast, die Bauklasse und die Fahrbahntemperatur einen sehr hohen Einfluss auf die innere Beanspruchung der Fahrbahnbefestigung. Weitere wesentliche Einflussgrößen sind die Achskonfiguration, der Reifentyp und die Horizontal-schubkräfte aus Antrieb und Bremsen. Einen geringen Einfluss hat die vertikale Lastverteilung. Mindestens ebenso relevant wie die Wahl der Achskonfiguration oder des Reifentyps ist die Berücksichtigung von Antriebs- oder Bremsvorgängen, bzw. von Steigungs- und Gefällestrecken. Konkrete Aussagen über die Höhe der Auswirkung sind schwer zu treffen, da diese immer von der Konstellation der anderen Einflussgrößen abhängig ist. Vor allem bei sommerlichen Temperaturen ergeben sich im Antriebsfall dann Konstellationen, bei denen bereits eine einzelne Überfahrt Fließvorgänge im Asphalt verursacht.

Außerdem folgt aus den Anwendungsbeispielen:

- Der Steigungsfaktor sollte bei einer Neuauflage der RStO in Abhängigkeit von der Bauklasse erhöht werden. Für extreme Gefällestrrecken sollte analog ein Gefällefaktor eingeführt werden.
- Durch die Spurrinnenentwicklung über die Zeit können die verschiedenen Temperaturverläufe in der Fahrbahnbefestigung zusammengefasst einbezogen werden, um so die kumulierte Schädigung eines Zeitabschnitts zu bestimmen und darzustellen.
- Zum Vergleich von verschiedenen schweren Fahrzeugen oder Achskombinationen ist eine lastspezifische Betrachtung der Schädigung zweckmäßig. Ein höheres Gesamtgewicht muss nicht eine größere lastspezifische Schädigung verursachen.

7.2 Handlungsempfehlungen

Das Verfahren zur Bestimmung der Temperaturen in der Fahrbahnkonstruktion aus Kapitel 3.5.3 ist geeignet, innerhalb eines Tages den Temperaturverlauf in der Fahrbahnbefestigung abschätzen zu können, ohne die Fahrbahnbefestigung lokal zu zerstören. Das dort dargestellte Beispiel verdeutlicht die einfache Anwendbarkeit des Verfahrens. Aus diesem Grund sollte die hier entwickelte Methode ergänzend bei Tragfähigkeitsmessungen genutzt werden.

Aus den vorangegangenen Kapiteln geht hervor, dass in Asphaltbefestigungen, besonders bei hochsommerlichen Temperaturen, Schädigungen in Form von Fließvorgängen auftreten. Durch Beschleunigungsvorgänge verstärken sich derartige Schädigungen. Besonders sind der Antriebsfall und damit die Steigungsstrecken relevant, da gegenüber dem Bremsvorgang zum einen nur auf einer oder zwei Achsen die Antriebskräfte eingeleitet werden und zum anderen die maximalen Spannungen und Schädigungen höher ausfallen. Abschließend lassen sich einige Handlungsvorschläge ableiten, mit deren Hilfe die Schädigung von Fahrbahnkonstruktionen in Asphaltbauweise im Allgemeinen und speziell aus Beschleunigungsvorgängen vermindert werden kann.

Hinsichtlich der Fahrbahnkonstruktion ergeben sich folgende Verbesserungsvorschläge:

- Da bei hochsommerlichen Fahrbahnzuständen in Deck- und Binderschicht (entsprechend den obersten 10 cm) die Schädigungsreserven am geringsten sind, sollten diese Schichten besonders verformungsresistent ausgebildet sein.
- Zudem hat sich gezeigt, dass in jedem betrachteten Lastfall eine höhere Bauklasse und damit dickere Asphaltsschichten die Schub- und Hauptspannungen vermindern. Daher kann durch die Wahl einer höheren Bauklasse das Schädigungspotential reduziert werden. Auch wenn dies schon aus Kostengründen nicht bei allen Neubaustrecken zu realisieren sein wird, so sollte eine derartige Oberbauverstärkung wenigstens an extremen Steigungsstrecken eingebaut werden. Denn der in den RStO 01 gebräuchliche Steigungsfaktor reicht allein nicht aus. Bei einer neuen Version der RStO sollte daher der Steigungsfaktor erhöht und nach Bauklassen differenziert angegeben werden.
- Eine Absenkung der Fahrbahntemperatur verringert die Gefahr der Spurrinnenbildung. Diese kann durch eine Abschwächung der von der Fahrbahn aufgenommenen Globalstrahlung erfolgen. Da eine Verschattung der Oberfläche theoretisch möglich, aber schwer realisierbar ist, sollte, durch hellere Asphaltdecken die Albedo erhöht werden, wodurch die Temperatur in der Fahrbahnbefestigung, wie in Kapitel 3.5.2 beschrieben, um bis zu 5°C abgesenkt werden kann.

Folgende Maßnahmen könnten auf Seite der Fahrzeuge zu einer Verminderung von Fahrbahnschäden beitragen:

- Da ein wesentlich höheres Spurrinnenbildungspotential bei Schwerverkehrsbelastung oder extremer Hitze existiert, sollten diese beiden Einflussgrößen nicht kombiniert auftreten, sondern zeitlich entzerrt werden. Ein generelles Fahrverbot für den Schwerlastverkehr ist aber aufgrund des hohen Anteils an Just-In-Time-Verkehren nicht durchsetzbar. Deshalb sollte die Mautgebühr für die Fahrzeuge, welche in Zeiten extrem hoher Oberflächentemperaturen fahren, deutlich erhöht werden. Dadurch wäre gewährleistet, dass ein Teil des Schwerverkehrs in andere Zeiten verlagert wird und die Verursacher, durch die über die normalen Beanspruchungen hinausgehende und sonst vermeidbare Schädigungen entstehen, auch stärker in die Finanzierung der Straßenerhaltung eingebunden werden. An Tagen, an welchen eine festgelegte Grenze der Oberflächentemperatur, beispielsweise 40 °C, überstiegen wird, sollte eine aufgestockte Maut von den Mittagsstunden bis zum Nachmittag gelten. Durch die Zeitspanne von 11.00 Uhr bis 18.00 Uhr werden nach Abb. 3-13 die auftretenden Spitzentemperaturen erfasst. Außer-

halb dieser Zeitspanne sind dann die Temperaturen der obersten zehn Zentimeter um über 5° C abgesenkt, was etwa dem Unterschied zwischen den Zuständen „warm“ und „heiß“ entspricht und somit die gleiche Wirksamkeit besitzt wie eine Aufhellung der Oberfläche.

- Bei einer Erhöhung der Antriebskraft steigen die oberflächennahen Spannungsmaxima überproportional an, siehe Abb. 5-14. Daher scheint es sinnvoll, eine Beschränkung der maximalen Antriebskraft einzuführen. Allerdings sind dieser Beschränkung Grenzen gesetzt, da das Fahrzeug in der Lage sein muss, durch eine ausreichende Zugkraft die bestehenden Steigungen zu bewältigen, ohne den Verkehrsfluss zu beeinträchtigen.

- Mit einer gesetzlichen Regelung, welche ab einem bestimmten zulässigen Gesamtgewicht eine Doppelantriebsachse vorschreibt, ergäben sich für die Fahrbahnbefestigung mehrere positive Effekte: Durch die Senkung des Gewichts von 11,5 t (maximal zulässige Achslast) auf 9 t, entsteht eine Vergleichmäßigung der Achslasten. Damit werden in gleicher Weise Schub- und Hauptspannungen verringert. Mit dem gegenüber der Einzelachse höheren verfügbaren Antriebsgewicht kann eine größere Beschleunigungskraft erreicht werden, ohne das prozentuale Verhältnis zwischen Horizontalkraft und Vertikalkraft zu erhöhen. Damit verbessert sich – als Nebeneffekt - zusätzlich das Antriebsverhalten bei Glätte. Da nun weniger Gewicht auf einer Antriebsachse lastet und außerdem die benötigte Beschleunigungskraft auf zwei Achsen verteilt ist, ergeben sich geringere Schädigungen in der Fahrbahnkonstruktion. Statt einer festen Vorgabe, in der ab einem bestimmten Gewicht immer die Doppelachse erforderlich ist, könnte auch ein Anreiz geschaffen werden, die Doppelantriebsachse zu verwenden, wenn die Mautgebühren für derartige, mit einem die Fahrbahnbefestigung schonenden Doppelachs Antrieb ausgestattete Fahrzeuge gesenkt werden würden.

7.3 Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich vorrangig mit den Beanspruchungen, welche aus Antriebs- und Bremsvorgängen resultieren, auch wenn ebenso weitere Einflüsse auf die Schädigung der Asphaltbefestigung beleuchtet werden. Daher werden Randbereiche des Themengebietes hier nicht umfassend behandelt, von denen einige im Anschluss aufgezählt sind.

Ein Schwerpunkt der Untersuchung ist die Konzentration auf eine detailgenaue Abbildung der Kräfte in der Bodenaufstandsfläche. Diese gehen in ein linear-elastisches FE-Modell

ein. Dagegen zeigt Asphalt starkes viskoelastisches Materialverhalten. Auch wenn bei kurzzeitiger Belastung quasielastisches Verhalten des Asphalts angenommen werden kann (siehe Kapitel 3.6), sollte für die spezielle Simulation der Deformationsentwicklung aus Langsamfahrten und Stop-and-Go-Verkehr ein viskoelastisches Materialmodell verwendet werden.

Wird der Kontakt mit der Bodenaufstandsfläche noch feiner modelliert, dann können zwar nicht mehr mit vertretbarem Rechenaufwand die weiträumigen Auswirkungen einer Reifenüberfahrt oder der Einfluss der zweiten Achse untersucht werden, dafür aber die Effekte von Reifenlamellen oder sogar von einzelnen Reifenprofilen. Damit ergeben sich weitergehende Erkenntnisse über die Beanspruchung aus vertikalen und horizontalen Lasten in den obersten Zentimetern der Befestigung.

Da die Untersuchung sich auf Beschleunigungsvorgänge in Längsrichtung beschränkt, werden die horizontalen Querkräfte aus der Seitenführung in Kurvenfahrten oder aus der Drehbewegung durch Lenkvorgänge nicht behandelt. Erhöhte derartige Beanspruchungen treten in Kombination bei Kreisverkehren auf, da hier alle Fahrzeuge zu Richtungsänderungen gezwungen sind. An Parkplätzen stehen die Drehbewegungen aus dem Stand im Vordergrund, dort kommt es zu Kornausbrüchen an der Oberfläche.

Die Folgerung, dass mit einer höheren Bauklasse die Schädigung stets kleiner wird, ist auf Grundlage zweier Bauklassen der gleichen Bauweise aufgestellt worden. Zum Entwurf einer hinsichtlich Schädigungsminimierung optimalen Fahrbahnkonstruktion sind Ergebnisse aus weiteren Bauklassen und Bauweisen notwendig. Es könnte der genaue Zusammenhang zwischen der Dicke der Asphaltsschicht und der Beanspruchung aus unterschiedlichen Fahr- und Temperaturzuständen untersucht werden. Dann kann beantwortet werden, wo die Obergrenze der Asphaltsschichtdicke liegt, bei der mit weiterer Dickenzunahme die Schädigung gleich bleibt oder wieder anwächst.

Das beliebige Kombinieren verschiedener Achslasten und Temperaturzustände verursacht Spurrinnenentwicklungen, die sich in einem Diagramm (siehe Abb. 6-10) sichtbar machen lassen. Durch die Aneinanderreihung der stündlichen Temperaturverläufe kann ein kompletter Tag simuliert werden. In gleicher Weise können unterschiedliche Achslasten und Achskonfigurationen einbezogen werden. Auf diese Weise ließe sich die Spurrinnenentwicklung bei realen Verkehrs- und Temperaturverhältnissen nachbilden, wodurch das Schädigungsverhalten von bestehenden Fahrbahnbefestigungen besser als bisher prognostiziert werden kann.

Die Punkte verdeutlichen, dass zwar durch diese Untersuchung neue Erkenntnisse zur Asphaltbeanspruchung aus Beschleunigungsvorgängen gewonnen worden sind, aber zum erweiterten Themengebiet weiterhin Forschungsbedarf besteht.

8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Beanspruchungen in Asphaltbefestigungen, welche aus Antriebs- und Bremsvorgängen von Nutzfahrzeugen resultieren, untersucht. Normalerweise werden in der Oberbaubemessung als Eingabeparameter nur Lasten, Achskonfigurationen, Reifentypen und Bauklassen berücksichtigt. Hier werden zusätzlich noch der Temperaturgradient in der Befestigung sowie ein potentieller Beschleunigungsvorgang – differenziert nach Art und Höhe - in die Berechnungen miteinbezogen, so dass sich neue Ergebnisse zur Schädigung in der Asphaltbefestigung ableiten lassen.

In Kapitel 2 werden die grundlegenden Sachverhalte über das System der Fahrbahnbefestigung erläutert: Es wird auf die Bemessung nach den RStO 01, die verwendeten Fahrbahnaufbauten, das dreidimensionale Fahrbahnmodell und die Theorie der gängigen Schädigungsmodelle eingegangen. Danach wird eine neue Methode entwickelt, welche eine Reserve aus dem Abstand der Spannungskreise zu den temperaturabhängigen Schädigungskurven ermittelt.

Um die Asphaltbeanspruchung berechnen zu können, ist es notwendig, zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Asphalts und der Schädigungskurven die Temperaturverteilung in der Fahrbahnkonstruktion zu kennen. Aus diesem Grund wird in Kapitel 3 auf die Temperaturverteilung in der Fahrbahnbefestigung eingegangen, indem diese nach einer Analyse der relevanten Stoffparameter und Einflussgrößen über die FE-Methode und das Differenzenverfahren berechnet wird. Darauf aufbauend ist in der vorliegenden Untersuchung ein Verfahren entwickelt worden, mit dem ohne eine lokale Zerstörung der Befestigung und auf einfache Weise auf den Temperaturgradient in der Fahrbahnkonstruktion geschlossen werden kann.

Zur Modellierung von Beschleunigungsvorgängen müssen Größe und Form der in die Fahrbahnbefestigung eingetragenen vertikalen und horizontalen Kräfte bekannt sein. Hierzu werden in Kapitel 4 die in einer Literaturrecherche aufgefundenen gesetzlichen Bestimmungen, empirischen Messungen und theoretischen Modelle erläutert, aus denen anschließend die Beanspruchungsgrößen für die weiteren Rechnungen entwickelt werden.

Die von der Temperatur abhängigen Eigenschaften gehen in das Fahrbahnmodell ein, mit dem in Kombination mit den in der Bodenaufstandsfläche eingeleiteten Kräften die durch Beschleunigungsvorgänge hervorgerufenen Spannungen mittels eines FE-Programms

berechnet werden. Im Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Spannungsberechnungen aus den verschiedenen, zuvor nach Einflussgrößen gegliederten Lastfällen erläutert.

Mit den berechneten Spannungen lässt sich die Schädigung der Fahrbahnbefestigung nach Kapitel 6 bestimmen. Das Schädigungsverhalten wird für die im vorherigen Kapitel aufgestellten Lastfälle berechnet. Als eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Schädigungspotentials von Reifentypen, Achsen und Fahrzeugen wird der Tyre Configuration Factor beschrieben und mit dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren verglichen. Zusätzlich werden als praktische Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse der Steigungsfaktor aus den RStO 01 überprüft, für zwei Achskonfigurationen die Spurrinnenentwicklung über die Zeit bestimmt und das Schädigungspotential eines 60 t-Fahrzeugs mit dem eines 40 t-Fahrzeugs verglichen.

Als Schlussfolgerung werden in Kapitel 7 die Kernaussagen der Untersuchung zusammenfassend wiederholt und Verbesserungsschläge aufgestellt, um das Schädigungspotential zu vermindern. Fahrbahnseitig sollten Deck- und Binderschicht verstärkt, höhere Bauklassen und helle Decken gebaut werden. Fahrzeugseitig können für den Schwerverkehr eine temperaturabhängige Mautanhebung, die Beschränkung der maximalen Antriebskraft und der Doppelachsantrieb eingeführt werden. Ein Ausblick weist auf weiteren Forschungsbedarf hin.

Durch die Vielzahl der in der Arbeit berücksichtigten Parameter ergeben sich umfassende Aussagen zum Spannungsbild in der Befestigung und zum Schädigungspotential, nicht nur bei Antriebs- und Bremsvorgängen. Das hier entwickelte Verfahren zur Bestimmung des Temperaturverlaufs in der Fahrbahnkonstruktion und die hier entwickelte Methode der Reservenermittlung helfen, auf den Einzelfall bezogene Bemessungen des Oberbaus durchführen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., Yoo, P. J.
Pavement Damage due to Different Tires and Vehicle Configurations
Michelin Americas Research and Development Corporation
Greenville, 2004
- [2] Arbeitsausschuss „Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen“
Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen,
Abschnitt B2.1: Repräsentative Temperaturverteilungen in Asphaltbefestigungen
Arbeitspapier der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Nr. 25/B2.1
Köln, 1990
- [3] Arbeitsausschuss „Frost“
Entstehung und Verhütung von Frostschäden an Straßen
Schriftenreihe der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Heft 105
Kirschbaum Verlag, Bonn 1994
- [4] Baehr, H. D., Stephan, K.
Wärme- und Stoffübertragung, 5. Auflage
Springer Verlag, Berlin 2006
- [5] Beckedahl, H.
Zur Querunebenheitsentwicklung von Asphaltstraßen
Mitteilungen des Fachgebiets Konstruktiver Straßenbau der Universität Hannover, Heft 7
Hannover, 1987
- [6] Blab, R.
Introducing Improved Loading Assumptions into Analytical Pavement Models Based on Measured Contact Stresses of Tires
Conference on Accelerated Pavement Testing
Reno, 1999
- [7] Blab, R., Harvey, J.
Modeling Measured 3D Tire Contact Stresses in a Viscoelastic FE Pavement Model
The International Journal of Geomechanics, Volume 2, Number 3
2002
- [8] Bode, G.
Kräfte und Bewegungen in der Bodenberührungsfläche rollender Reifen von Lastkraftwagen
Deutsche Krafftahrtforschung und Straßenverkehrstechnik Heft 146
Düsseldorf, 1961

- [9] Böllinger, G.
Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper
Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- u. Vermessungswesen der TH Karlsruhe
Karlsruhe, 1980
- [10] Brüggemann, M.
Untersuchungen zur Frosteinwirkung in Innerortsstraßen anhand numerischer Simulationen
Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 20
Bochum, 2007
- [11] Bundesanstalt für Straßenwesen (bast)
Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten auf die Infrastruktur des Bundesfernstraßennetzes
(www.bmvbs.de/Anlage/original_987986/BASSt-Studie-Gigaliner.pdf (Stand 30.Juli 2007))
Bergisch Gladbach, 2006
- [12] Busche, P., Holthaus, A.
Bewertung von Achskombinationen und Reifentypen auf den Beanspruchungszustand von Fahrbahn-
befestigungen
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau
Hannover, 2003 – unveröffentlicht
- [13] Clark, S. K.
Mechanics of pneumatic tires
U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration
Washington, 1981
- [14] De Beer, M., Kannemeyer, L., Fisher, C.
Towards Improved Mechanistic Design Of Thin Asphalt Layer Surfacing Based On Actual
Tyre/Pavement Contact Stress-In-Motion(SIM) Data in South Africa
7th Conference on Asphalt Pavements for South Africa
Pretoria, 1999
- [15] Der Elsner
Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen – Planung Bau Erhaltung Verkehr Betrieb – 2007
Otto Elsner Verlagsgesellschaft, 2007
- [16] Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Hochfrequenter Rollkontakt der Fahrzeuigräder
Ergebnisse aus dem gleichnamigen Sonderforschungsbereich der TU Berlin
WILEY-VCH Verlag, Weinheim 1998
- [17] Deutscher Wetterdienst
Klimainformationssystem des DWD (KLIS)
www.dwd.de/de/FundE/klima/KLIS/index.htm (Stand 30.Juli 2007)

- [18] Deutsches Institut für Normung
DIN 4710: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raum-
lufttechnischen Anlagen in Deutschland
Januar 2003
- [19] Deutsches Institut für Normung
DIN EN 12524: Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte
Juli 2000
- [20] Deutsches Institut für Normung
DIN EN ISO 13370: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Er-
dreich - Berechnungsverfahren
Juni 2005
- [21] Dorsch, V., Becker, A., Vossen, L. C.
Enhanced rubber friction model for finite element simulations of rolling tyres
Plastics, Rubber and Composites 2002, Vol. 31, No. 10
- [22] European Co-Operation in the Field of Scientific and Technical Research
COST 334 – Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres
Final Report of the Action
European Communities 1999
- [23] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn
Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO 01)
Köln, 2001
- [24] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Arbeitspapier über die mechanischen Eigenschaften von Asphalt
Stand: 25. Juli 2003
- [25] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Linienführung (RAS – L)
Köln, 1995
- [26] Förster, M.-O.
Temperaturbedingte Beanspruchung von Betonfahrbahnen
Mitteilungen des Fachgebiets Konstruktiver Straßenbau der Universität Hannover, Heft 22
Hannover, 2005
- [27] Goodyear Dunlop Tires
Lkw – Nahverkehr – Lenkachse
eu.goodyear.com/ch_de/tires/repository/regional_rhs_225/index.jsp (Stand 30. Juli 2007)

- [28] Groenendijk, J. et al.
Pavement Performance Modelling using Lintrack
Eighth International Conference on Asphalt Pavements
Seattle, 1997
- [29] Häckel, H.
Meteorologie, 5. Auflage
Stuttgart, 2005
- [30] Hagemann, R.
Ein Verfahren zur Beurteilung flexibler Fahrbahnbefestigungen unter Berücksichtigung von Festigkeits-
hypothesen für Asphalte
Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, Heft 44
Hannover, 1980
- [31] Hothan, J.
Untersuchungen zur Weiterentwicklung von Fahrbahnbefestigungen
Mitteilungen des Fachgebiets Konstruktiver Straßenbau der Universität Hannover, Heft 17
Hannover, 1995
- [32] Hürtgen, H.
Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Asphalt aus konventionellen Mischgut- und Bindemitteldaten
Bitumen Jahrgang 44, Heft 2
Köln, 1982
- [33] Hürtgen, H.
Über das viskoelastische Verhalten von Asphalt im Hinblick auf Modul-Bestimmungen
Bitumen Jahrgang 41, Heft 3
Köln, 1979
- [34] Hürtgen, H.
Zum viskoelastischen und viskoplastischen Verhalten von Asphalt
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 361
Bonn-Bad Godesberg, 1982
- [35] Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal GmbH
Stundenwerte der Lufttemperatur und Globalstrahlung 2003-2006
- [36] Kersten, M.
Thermal Properties of Soils
Bulletin No. 28 of the University of Minnesota Institute of Technologie
Minnesota, 1949

- [37] Kim, D., Salgado, R., Altschaeff, A.
Effects of Supersingle Tire Loadings on Pavements
Journal of Transportation Engineering 131, Nr. 10
2005
- [38] Koehne, S. H., Matute, B., Mundi, R.
Evaluation of Tire Tread and Body Interactions in the Contact Patch
21st Annual Conference of the Tire Society
Ohio, 2002
- [39] Krebs, H. G., Böllinger, G.
Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 347
Bonn, 1981
- [40] Lange, B.
Gespräche und Telefonate 2003 - 2007
Continental AG
- [41] Loiskandl, W.
Bodenphysik, Teil B der Universität für Bodenkultur, Wien
www.wau.boku.ac.at/fileadmin/_/H81/H815/Skripten/Bodenphysik/BodenphysikB.pdf
(Stand 30. Juli 2007)
- [42] Luo, R., Prozzi, J.
Effect of measured 3-D Tire-Pavement Contact Stress on Pavement Response at Asphalt Surface
Transportation Research Board TRB 2007
- [43] MAN Nutzfahrzeuge
MAN Bus Produkte und Lösungen
www.man-mn.com/de/Produkte_und_Loesungen/MAN_Bus/MAN_Bus.jsp (Stand 30. Juli 2007)
- [44] Mehlhorn, G.
Der Ingenieurbau,
- Einwirkungen auf Bauwerke und
- Fahrdynamik, Verkehrsfluss
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1997
- [45] Mitschke, M.
Dynamik der Kraftfahrzeuge
Springer Verlag, 3. Auflage, Berlin 1995

- [46] Nackenhorst, U.
Contact Mechanics
Vorlesung des IBNM, Hannover 2005/2006
- [47] Nefzger, H., Kapriot, A.
Einfluss von Strahlung und Mikroklima auf Straßenwetterprognosen,
Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 466
Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten
Wien, 1997
- [48] Pfisterer, H.
Seminar für Ingenieurbau
Oberste Bayerische Baubehörde
München, 2008
- [49] Pierre, P., Doré, G., Vagile, L.
Characterization and Evaluation of Tire-Roadway Interface Stresses
Ministère des Transports du Québec, Report GCT-03-03
University of Laval, 2003
- [50] Pohlmann, P.
Simulation von Temperaturverteilungen und thermisch induzierten Zugspannungen in Asphaltstraßen
Institut für Straßenwesen, TU Braunschweig, Heft 9
Braunschweig, 1989
- [51] Pottinger, M.G.
The Three-Dimensional Contact Patch Stress Field of Solid and Pneumatic Tires
Tire Science and Technology, Vol. 20, No. 1
Akron, 1992
- [52] Qi, J., Herron, J., Sansalone, K., Mars, W., Du, Z., Snyman, M., Surendranath, H.
Verification of a Steady State Transport Analysis for Rolling Treaded Tires
7th World Congress on Computational Mechanics
Los Angeles, 2006
- [53] Rakha, H., Lucic, I., Demarchi, S. H., Setti, J. R., van Aerde, M.
Vehicle Dynamics Model For Predicting Maximum Truck Acceleration Levels
Journal of Transportation Engineering 127, Nr. 5
2001
- [54] Reimpell, J., Betzler, W.
Fahrwerktechnik: Grundlagen
Vogel Buchverlag, 5. Auflage, Würzburg 2005

- [55] Schneider, K.-J.
Bautabellen für Ingenieure
Werner-Verlag, 17. Auflage, Minden 2006
- [56] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten- Verein
Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme
Bundesamt für Energiewirtschaft, SIA-Dokumentation
Zürich, 1996
- [57] Seitz, N.
Experimentelle und theoretische Untersuchungen der in der Aufstandsfläche frei rollender Reifen wirkenden Kräfte und Bewegungen
Dissertation an der TH München
München, 1969
- [58] Seitz, N. Hell, A.
Der Einfluss der Profilgestaltung eines Kraftfahrzeugreifens auf die Kräfte in seiner Aufstandsfläche
Fortschritt-Bericht der VDI-Zeitschriften: Reihe 12, Nr. 22
Düsseldorf, 1970
- [59] Siddharthan, R., Krishnamenon, N., El-Mously, M., Sebaaly, P.
Investigation of Tire Contact Stress Distributions on Pavement Response
Journal of Transportation Engineering, 128, Nr. 2
2002
- [60] Siddharthan, R., Yao, J., Sebaaly, P.
Pavement Strain from Moving Dynamic 3D Load Distribution
Journal of Transportation Engineering 124, Nr. 6
1998
- [61] Soon, S.-C., Drescher, A., Stolarski, H.
Tire-Induced Surface Stresses in Flexible Pavements
Transportation Research Board TRB 2003
- [62] Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO)
Fassung der Bekanntmachung vom 28. September 1988 (BGBl. I. 1793)
zuletzt geändert durch Verordnung vom 24. Mai 2007 (BGBl. I. 893)
2007
- [63] Wende, D.
Fahrodynamik
Transpress Verlag, Berlin 1990

- [64] Wistuba, M.
Klimaeinflüsse auf Asphaltstraßen
Maßgebende Temperatur für die analytische Oberbaubemessung in Österreich
Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU Wien, Heft 15
Wien, 2003
- [65] Wüst, W.
Langzeitverhalten von Asphaltstraßen – Eine Untersuchung mit statistischen und wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden
Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der TU München, Heft 61
München, 1991

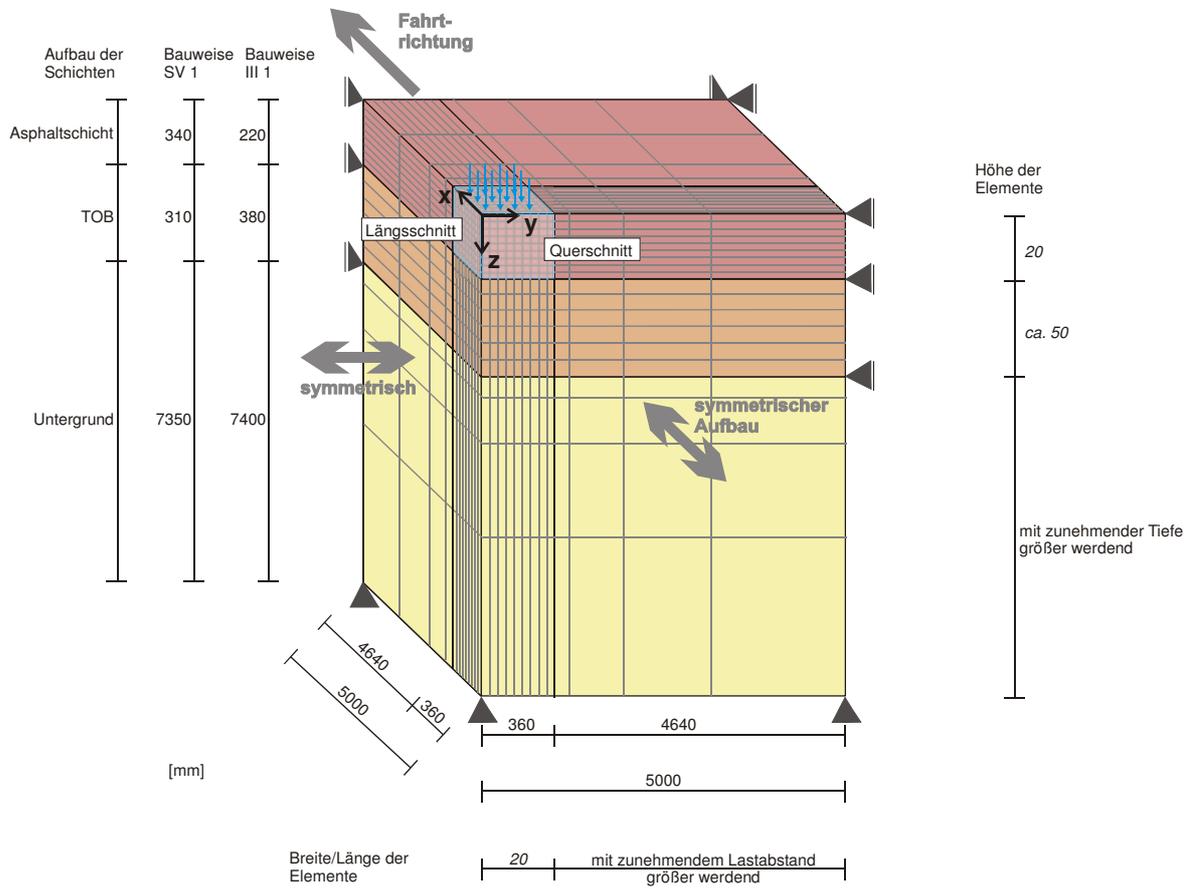
Weiterführende Literatur

- [66] Bufler, H.
Zur Theorie der rollenden Reibung
Ingenieur-Archiv 27 Nr. 3, 1959
- [67] Carter, F. W.
On the action of a locomotive driving wheel
Proceedings of the Royal Society of London, 1926
- [68] Francken, L., Verstraeten, J.
Methods for predicting moduli and fatigue laws of bituminous road mixtures under repeated bending
Transportation Research Record, TRB 515, pp 114-123
Washington, 1974

Anlagen

Anlagenverzeichnis

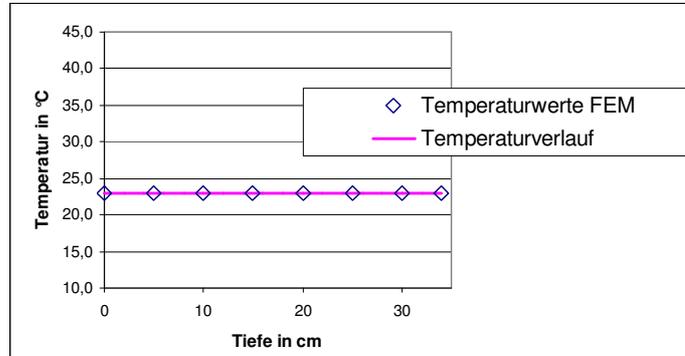
| | |
|---|-----|
| Anhang 1: Fahrbahn-„Viertelmodell“ | 168 |
| Anhang 2: Temperaturverläufe mit E-Modul und Querkontraktion | 169 |
| Anhang 3: Flächendruckverteilung für halben Reifen (295/80 R 22.5) bei Zwillingsbereifung und 10t-Achslast | 171 |
| Anhang 4: Kontaktschubspannungen bei Beschleunigungsvorgängen..... | 172 |
| Anhang 5: Darstellung der Spannungsverteilung..... | 173 |
| Anhang 6: MOHR`sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile..... | 177 |



Anhang 1: *Fahrbahn-„Viertelmodell“*

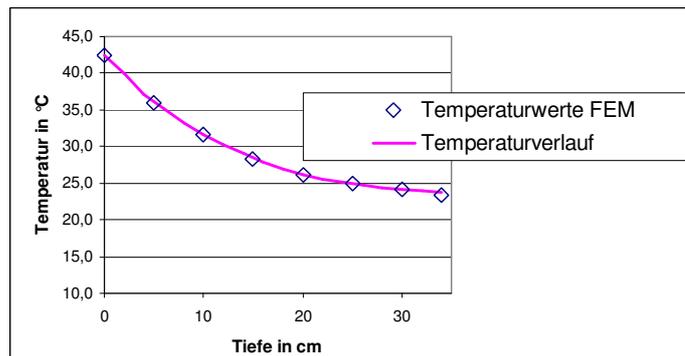
Szenario "5000"

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Layer | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Tiefe von | in cm | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 |
| bis | in cm | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 |
| mittlere Temperatur | in °C | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| E-Modul | in N/mm ² | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 |
| Querdehnzahl | | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |



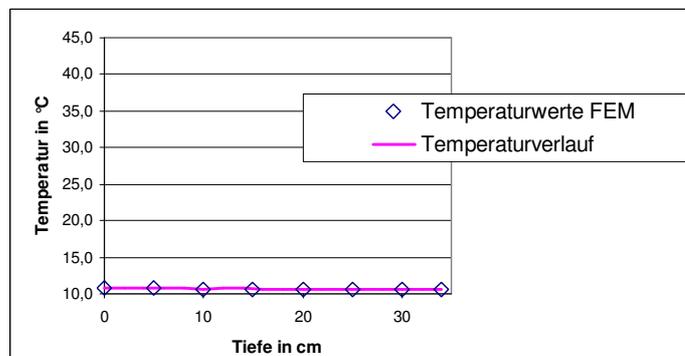
Szenario "warm"

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Layer | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Tiefe von | in cm | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 |
| bis | in cm | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 |
| mittlere Temperatur | in °C | 41 | 39 | 36 | 34 | 32 | 31 | 30 | 28 | 27 | 27 | 26 | 25 | 25 | 25 | 24 | 24 | 24 |
| E-Modul | in N/mm ² | 1600 | 1900 | 2150 | 2450 | 2800 | 3200 | 3400 | 3650 | 3850 | 4100 | 4350 | 4350 | 4650 | 4650 | 4650 | 4650 | 4900 |
| Querdehnzahl | | 0,46 | 0,45 | 0,44 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,40 |



Szenario "mittel"

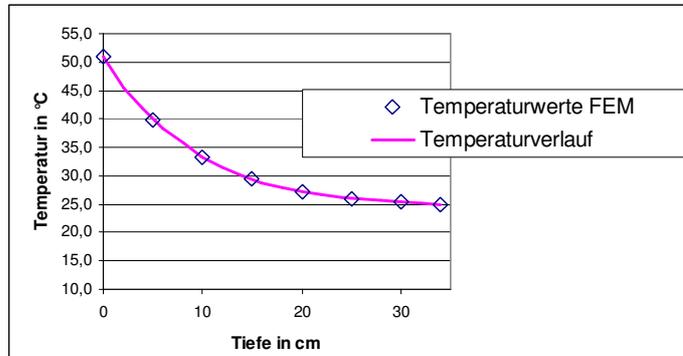
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Layer | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Tiefe von | in cm | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 |
| bis | in cm | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 |
| mittlere Temperatur | in °C | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| E-Modul | in N/mm ² | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 | 9100 |
| Querdehnzahl | | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 |



Anhang 2: Temperaturverläufe mit E-Modul und Querkontraktion

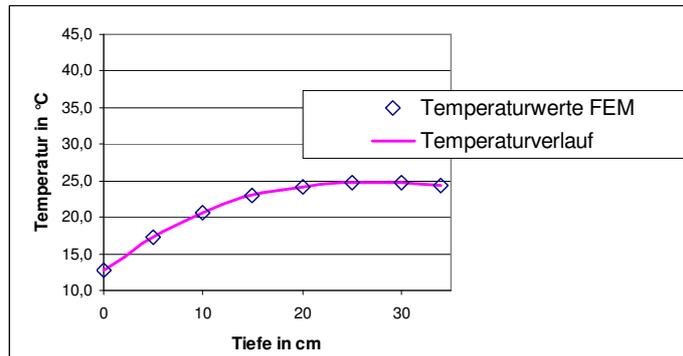
Szenario "heiß"

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Layer | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Tiefe von | in cm | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 |
| bis | in cm | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 |
| mittlere Temperatur | in °C | 48 | 44 | 40 | 37 | 35 | 32 | 31 | 29 | 28 | 28 | 27 | 26 | 26 | 26 | 25 | 25 | 25 |
| E-Modul | in N/mm ² | 1300 | 1400 | 1700 | 2000 | 2450 | 2800 | 3200 | 3400 | 3650 | 3850 | 4100 | 4100 | 4100 | 4350 | 4350 | 4350 | 4350 |
| Querdehnzahl | | 0,46 | 0,46 | 0,45 | 0,45 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 |



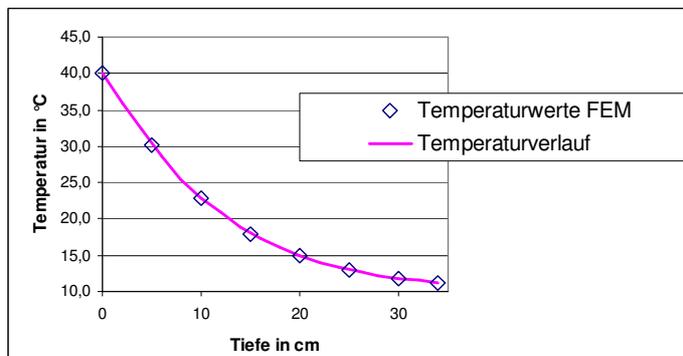
Szenario "Diff' Gewitter"

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Layer | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Tiefe von | in cm | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 |
| bis | in cm | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 |
| mittlere Temperatur | in °C | 14 | 16 | 17 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 24 | 24 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| E-Modul | in N/mm ² | 8050 | 7400 | 6700 | 6400 | 5800 | 5500 | 5200 | 4900 | 4900 | 4650 | 4650 | 4650 | 4650 | 4650 | 4650 | 4650 | 4650 |
| Querdehnzahl | | 0,37 | 0,37 | 0,38 | 0,39 | 0,39 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 |



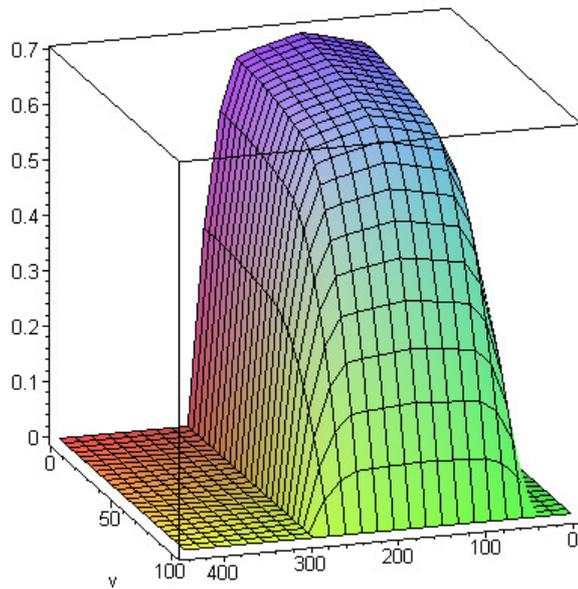
Szenario "Diff' Sonne"

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Layer | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Tiefe von | in cm | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 |
| bis | in cm | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 |
| mittlere Temperatur | in °C | 38 | 34 | 30 | 27 | 24 | 22 | 20 | 18 | 17 | 15 | 14 | 14 | 13 | 12 | 12 | 12 | 11 |
| E-Modul | in N/mm ² | 1900 | 2450 | 3200 | 3850 | 4650 | 5500 | 6100 | 6400 | 7050 | 7400 | 7700 | 8050 | 8050 | 8400 | 8400 | 8750 | 8750 |
| Querdehnzahl | | 0,45 | 0,44 | 0,43 | 0,42 | 0,41 | 0,40 | 0,39 | 0,39 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,36 |

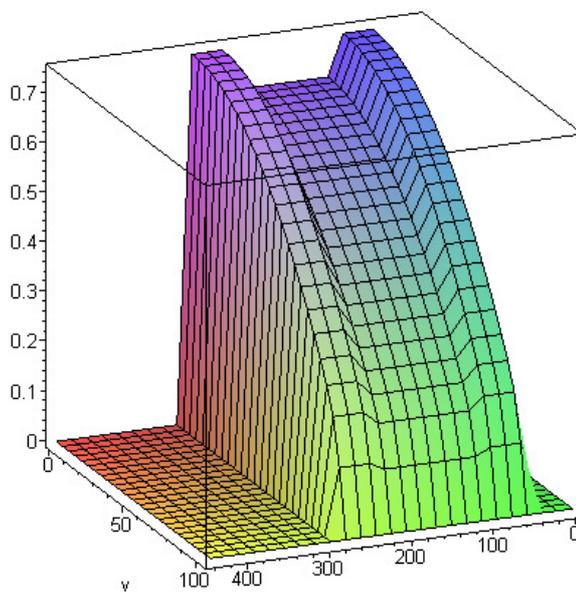


Anhang 2: Temperaturverläufe mit E-Modul und Querkontraktion

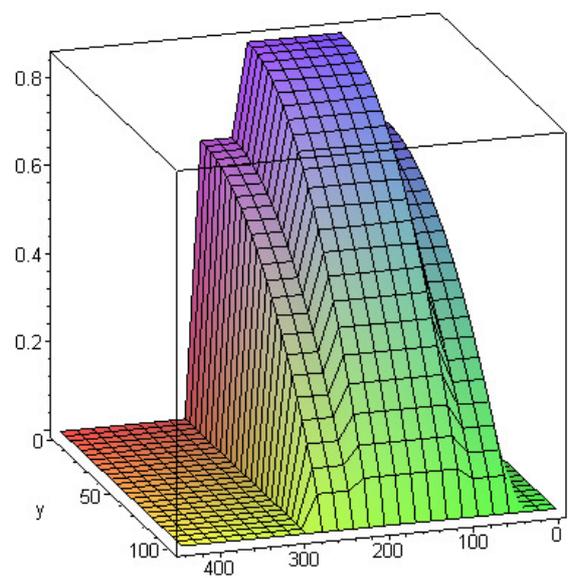
optimaler Reifendruck



(zu) niedriger Reifendruck



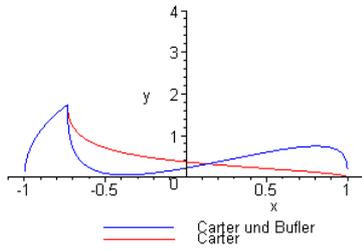
(zu) hoher Reifendruck



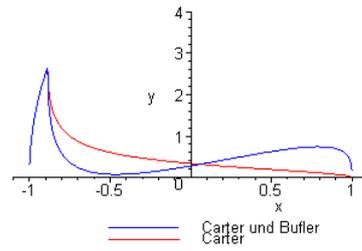
Anhang 3: *Flächendruckverteilung für halben Reifen (295/80 R 22.5) bei Zwillingsbereifung und 10t-Achslast*

Antrieb...

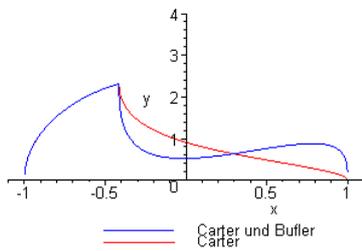
Last: 10 t geringe Griffigkeit:



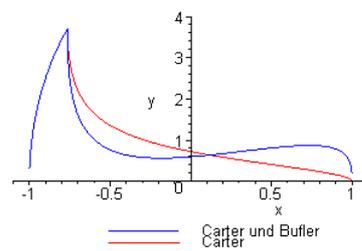
Last: 10 t hohe Griffigkeit:



Last: 20 t geringe Griffigkeit:

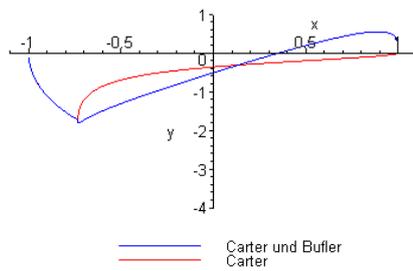


Last: 20 t hohe Griffigkeit:

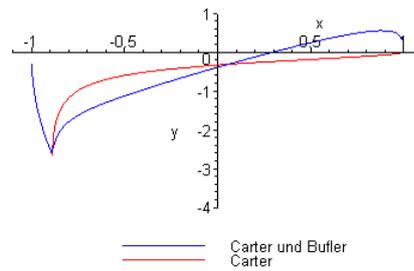


Bremsen...

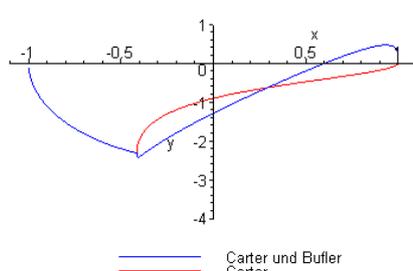
Last: 10 t geringe Griffigkeit:



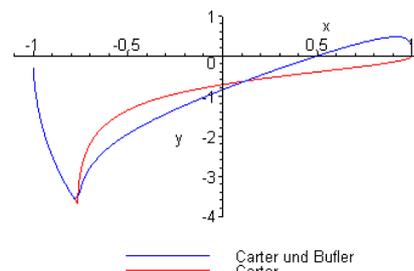
Last: 10 t hohe Griffigkeit:



Last: 20 t geringe Griffigkeit:

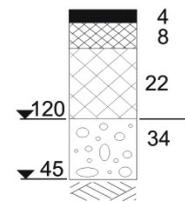


Last: 20 t hohe Griffigkeit:

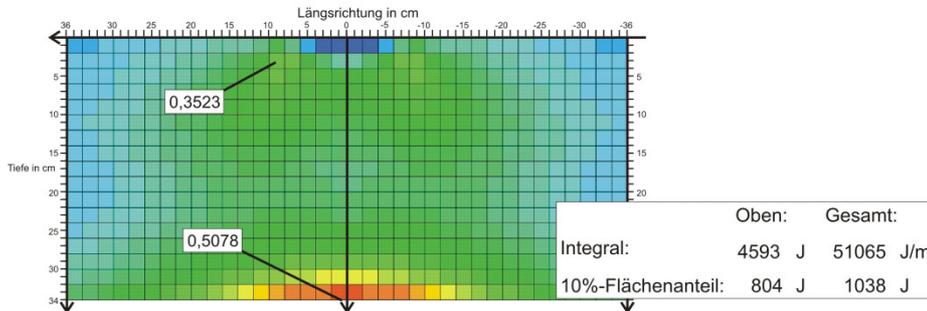


Anhang 4: Kontaktschubspannungen bei Beschleunigungsvorgängen

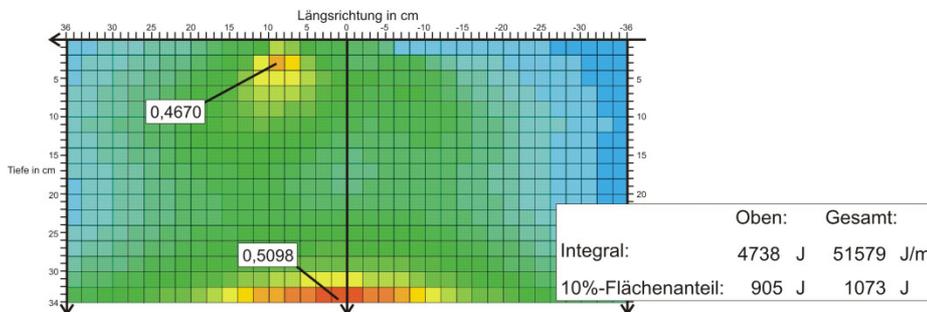
Gestaltänderungsarbeit MISES von Einzelreifen 495/45 R 22.5
bei Bauklasse SV, Zustand "warm" und 9 t-Achse



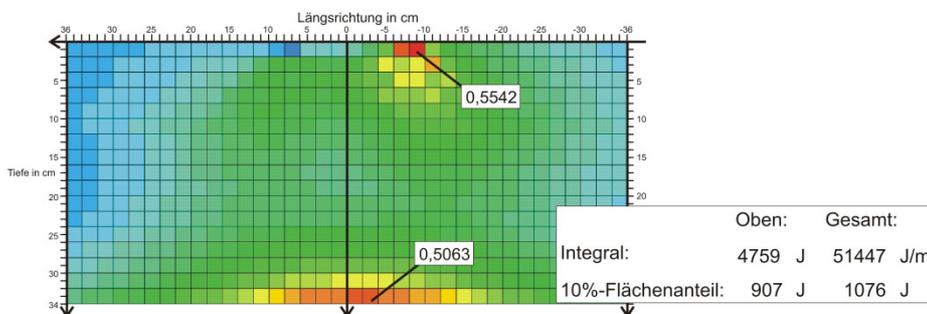
optimaler Reifenluftdruck und freies Rollen



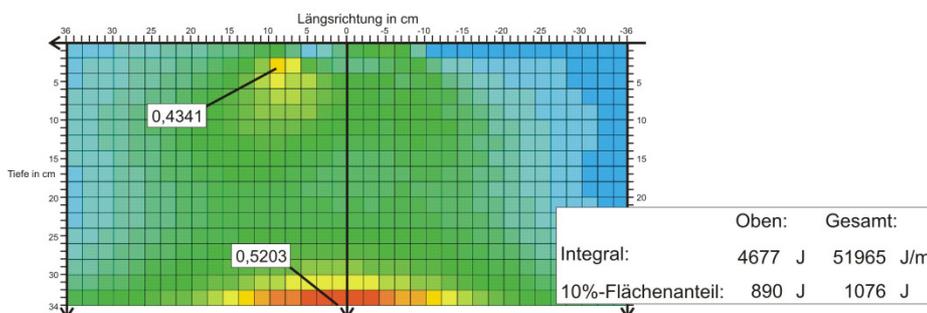
optimaler Reifenluftdruck und gleichmäßige Schubbelastung von 20% der Vertikalkraft



optimaler Reifenluftdruck und Antrieb von 20% der Vertikalkraft bei hoher Griffigkeit



optimaler Reifenluftdruck und Bremsen von 20% der Vertikalkraft bei hoher Griffigkeit

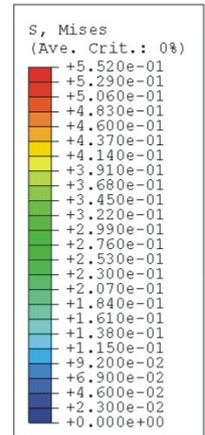
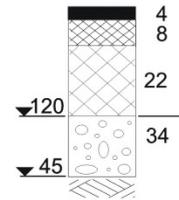
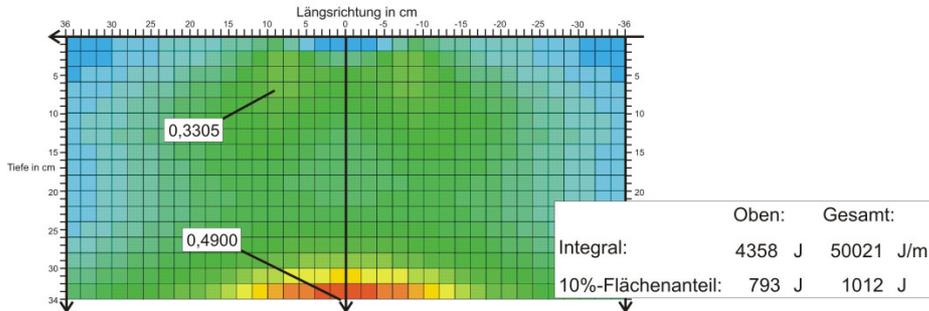


Anhang 5: Darstellung der Spannungsverteilung

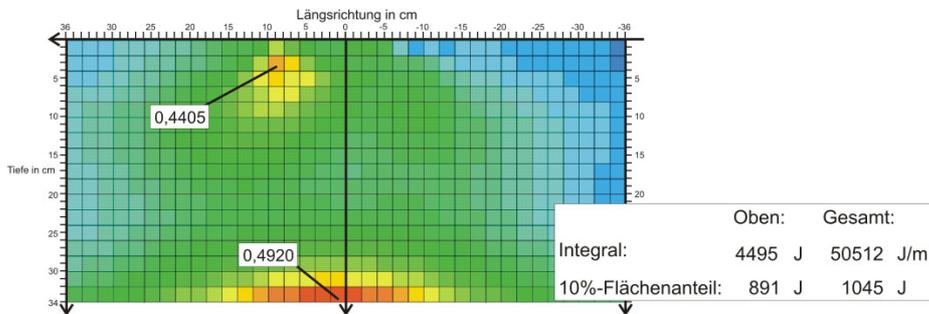
Anlagen

Gestaltänderungsarbeit MISES von Einzelreifen 495/45 R 22.5
bei Bauklasse SV, Zustand "heiß" und 9 t-Achse

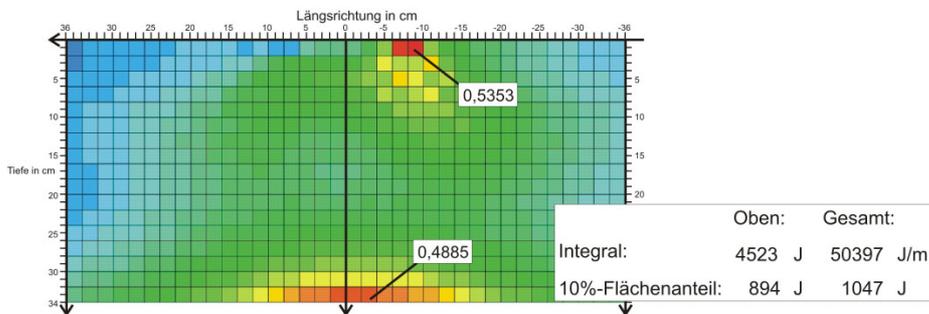
optimaler Reifenluftdruck und freies Rollen



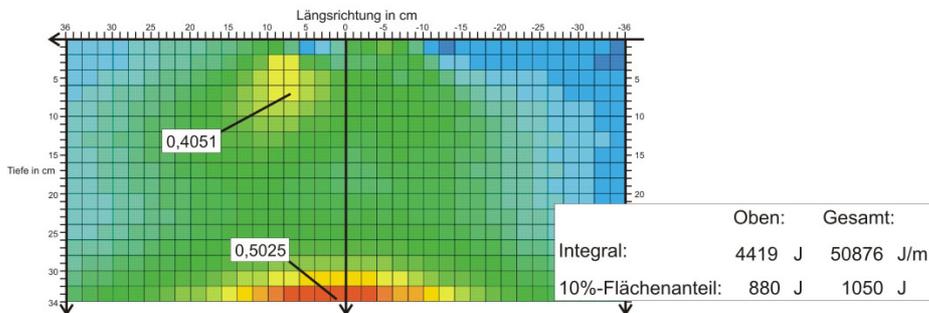
optimaler Reifenluftdruck und gleichmäßige Schubbelastung von 20% der Vertikalkraft



optimaler Reifenluftdruck und Antrieb von 20% der Vertikalkraft bei hoher Griffigkeit

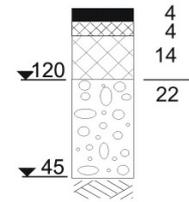


optimaler Reifenluftdruck und Bremsen von 20% der Vertikalkraft bei hoher Griffigkeit

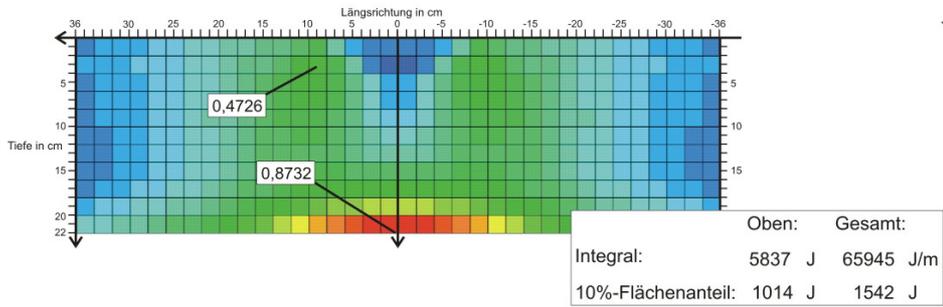


Anhang 5: Darstellung der Spannungsverteilung

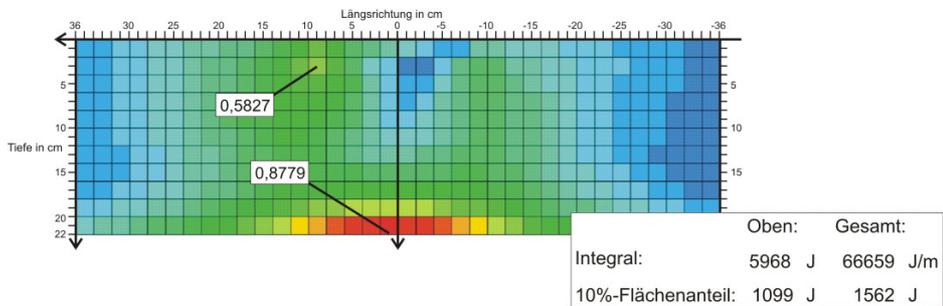
Gestaltänderungsarbeit MISES von Einzelreifen 495/45 R 22.5
bei Bauklasse III, Zustand "warm" und 9 t-Achse



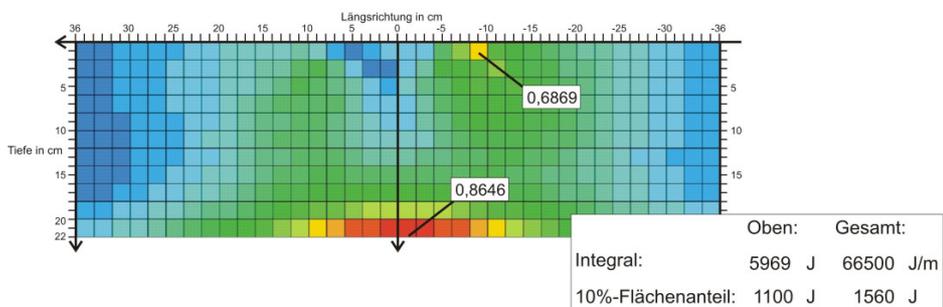
optimaler Reifenluftdruck und freies Rollen



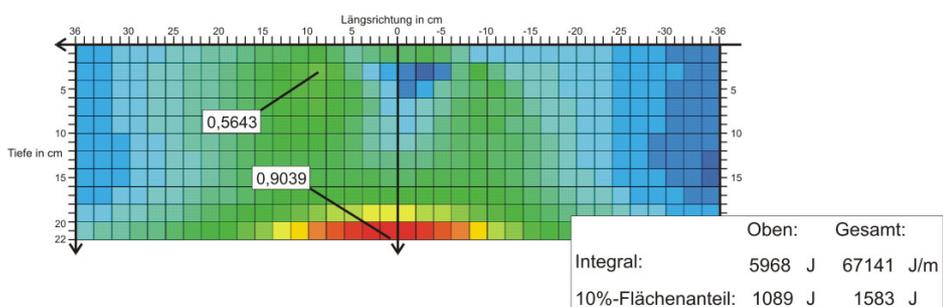
optimaler Reifenluftdruck und gleichmäßige Schubbelastung von 20% der Vertikalkraft



optimaler Reifenluftdruck und Antrieb von 20% der Vertikalkraft bei hoher Griffigkeit

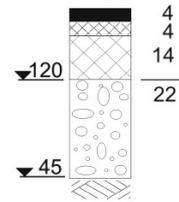


optimaler Reifenluftdruck und Bremsen von 20% der Vertikalkraft bei hoher Griffigkeit

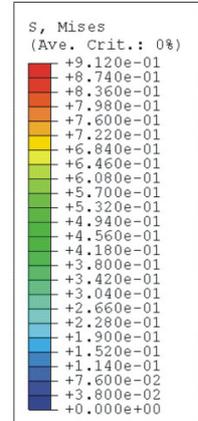
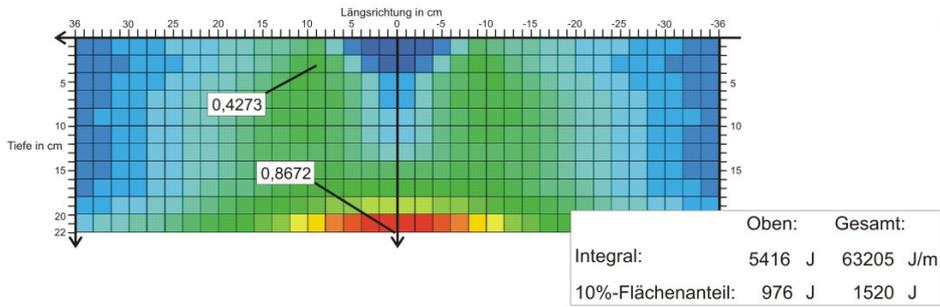


Anhang 5: Darstellung der Spannungsverteilung

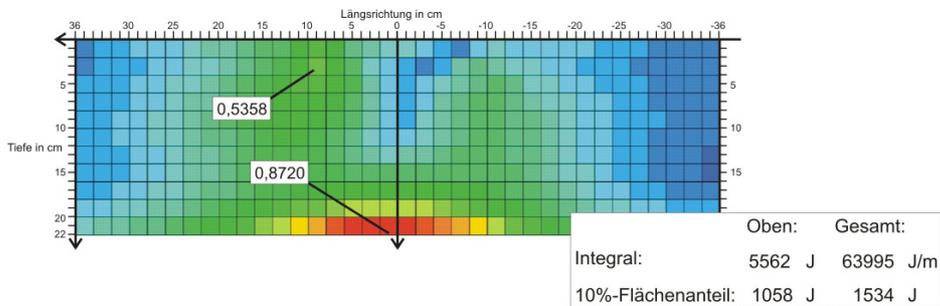
Gestaltänderungsarbeit MISES von Einzelreifen 495/45 R 22.5
bei Bauklasse III, Zustand "heiß" und 9 t-Achse



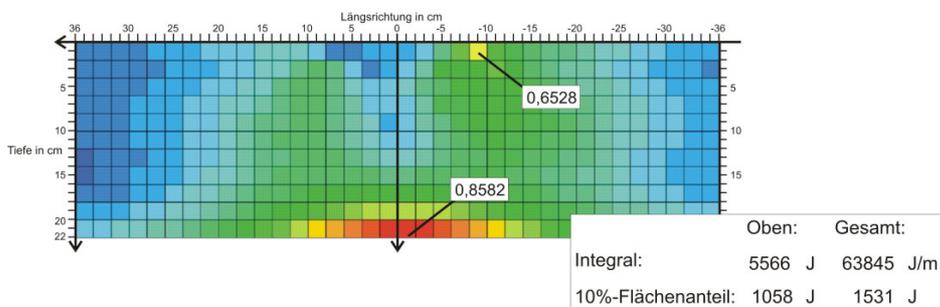
optimaler Reifenluftdruck und freies Rollen



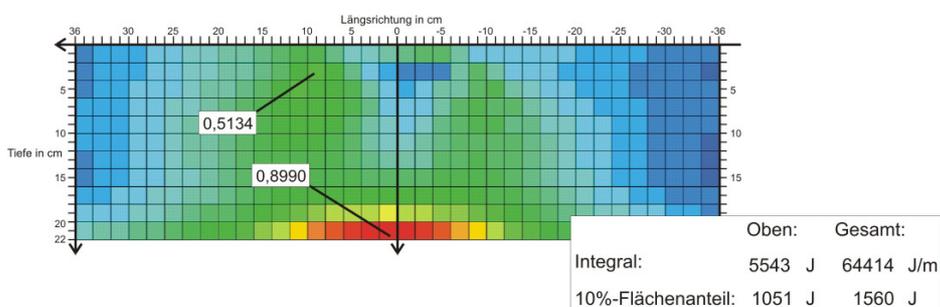
optimaler Reifenluftdruck und gleichmäßige Schubbelastung von 20% der Vertikalkraft



optimaler Reifenluftdruck und Antrieb von 20% der Vertikalkraft bei hoher Griffigkeit



optimaler Reifenluftdruck und Bremsen von 20% der Vertikalkraft bei hoher Griffigkeit

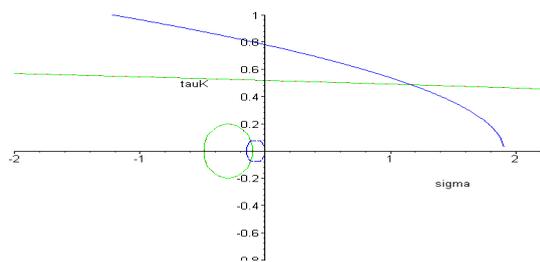


Anhang 5: Darstellung der Spannungsverteilung

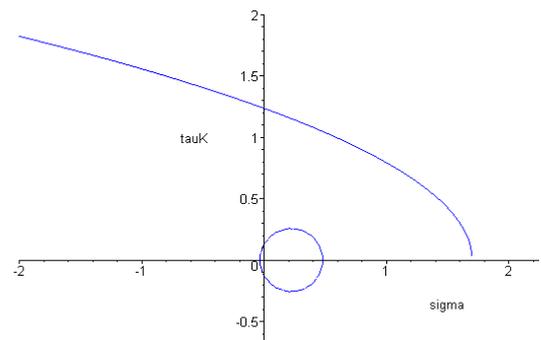
Bauklasse SV Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ warm“ **Freies Rollen**

Oben:

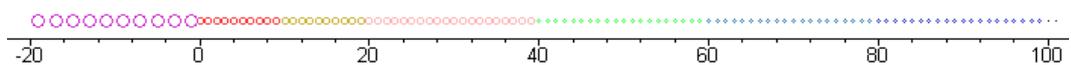
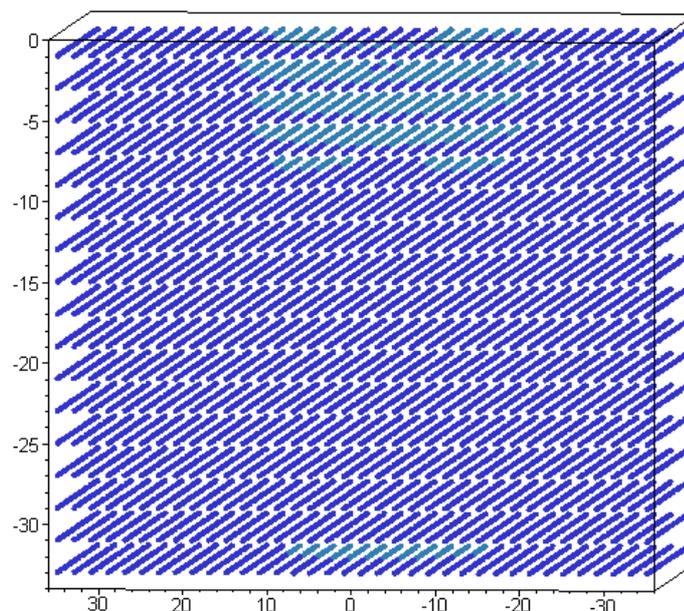


Unten:



— maximale Hauptspannung
- - - maximale TRESCA-Spannung
— maximale MISES-Spannung

Gesamt:

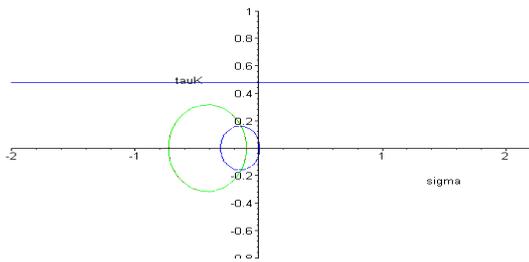


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

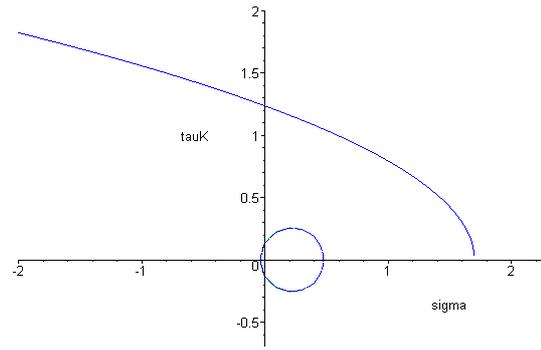
Bauklasse SV Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ warm“ Antrieb mit hoher Griffigkeit (20 % der Vertikalkraft)

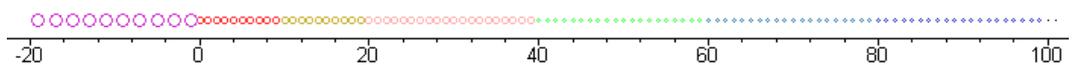
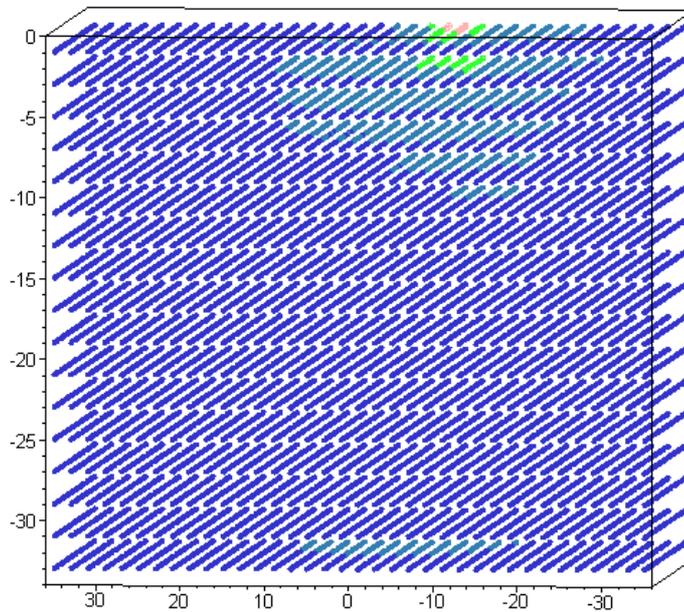
Oben:



Unten:



Gesamt:

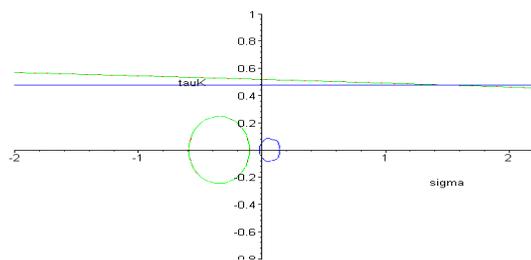


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

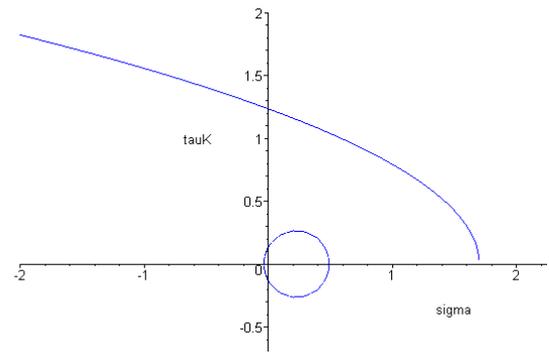
Bauklasse SV Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ warm“ Bremsen mit hoher Griffigkeit (20 % der Vertikalkraft)

Oben:

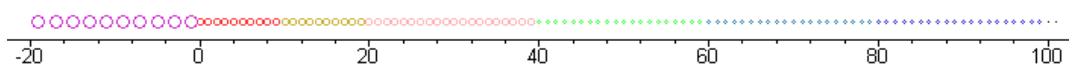
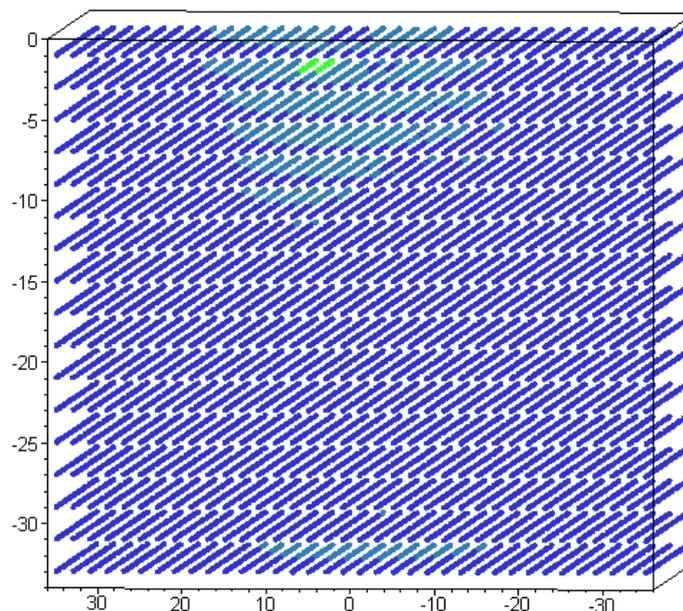


Unten:



— (blue) maximale Hauptspannung
 - - - (green) maximale TRESKA-Spannung
 — (red) maximale MISES-Spannung

Gesamt:

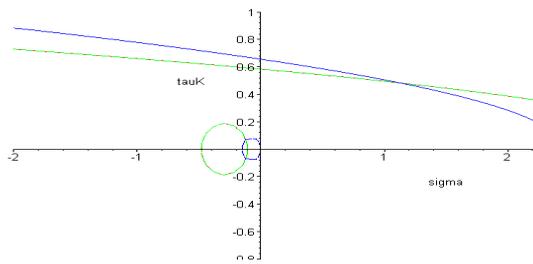


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

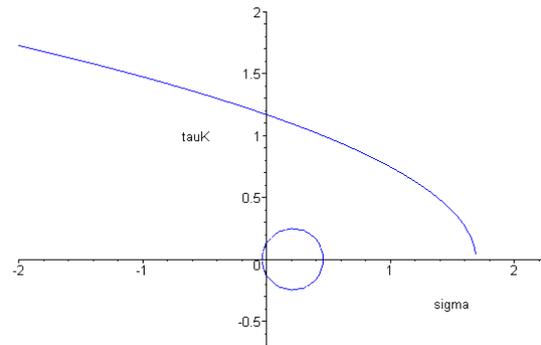
Bauklasse SV Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ heiß“ **Freies Rollen**

Oben:

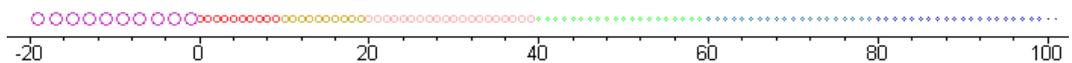
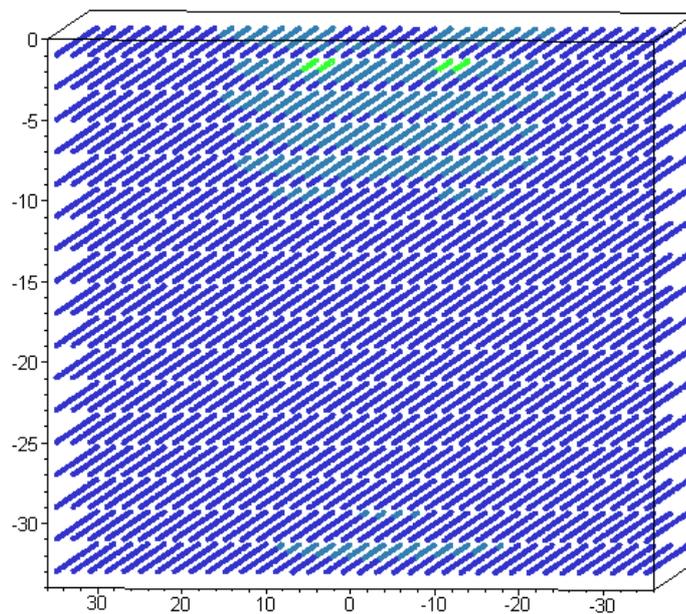


Unten:



— maximale Hauptspannung
- - - maximale TRESCA-Spannung
— maximale MISES-Spannung

Gesamt:

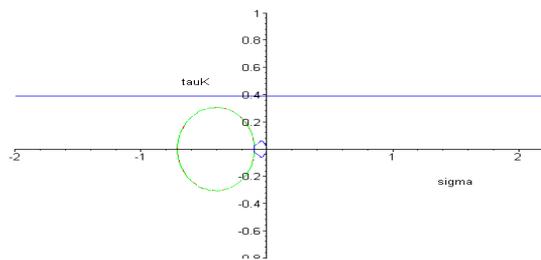


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

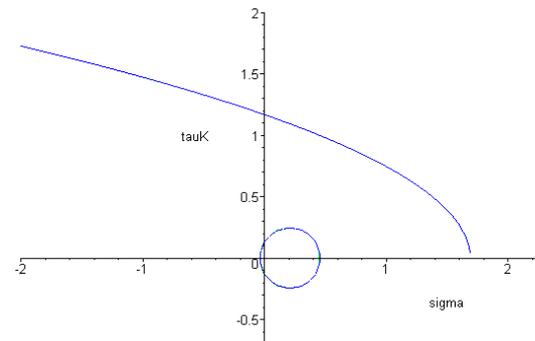
Bauklasse SV Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ heiß“ **Antrieb mit hoher Griffigkeit (20 % der Vertikalkraft)**

Oben:

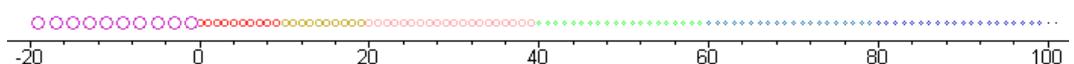
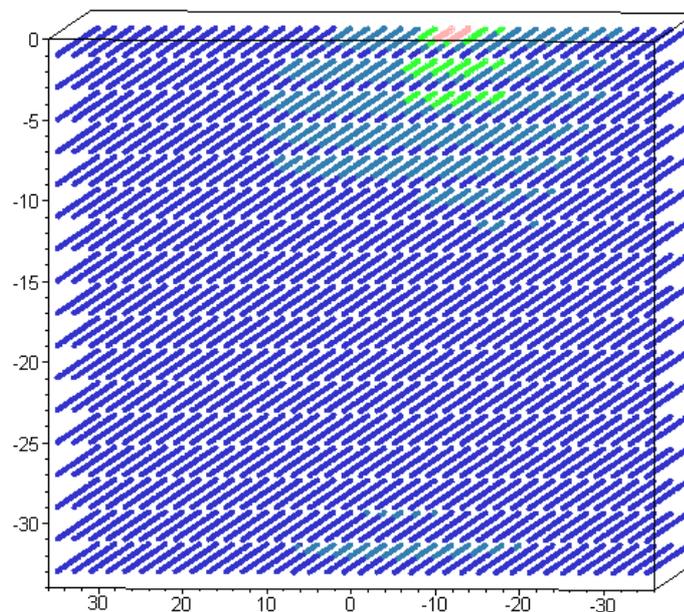


Unten:



— maximale Hauptspannung
- - - maximale TRESCA-Spannung
— maximale MISES-Spannung

Gesamt:

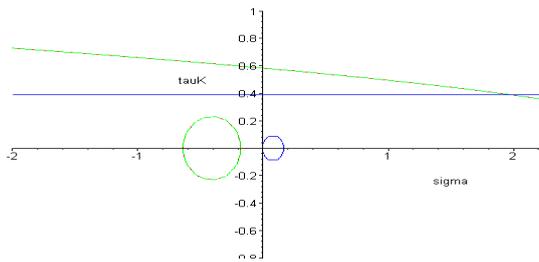


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

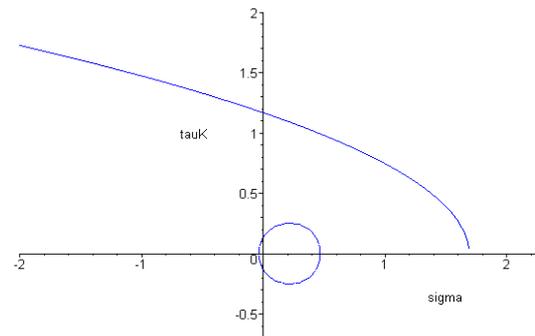
Bauklasse SV Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ heiß“ Bremsen mit hoher Griffigkeit (20 % der Vertikalkraft)

Oben:

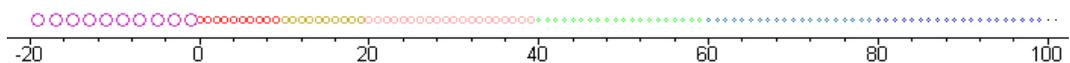
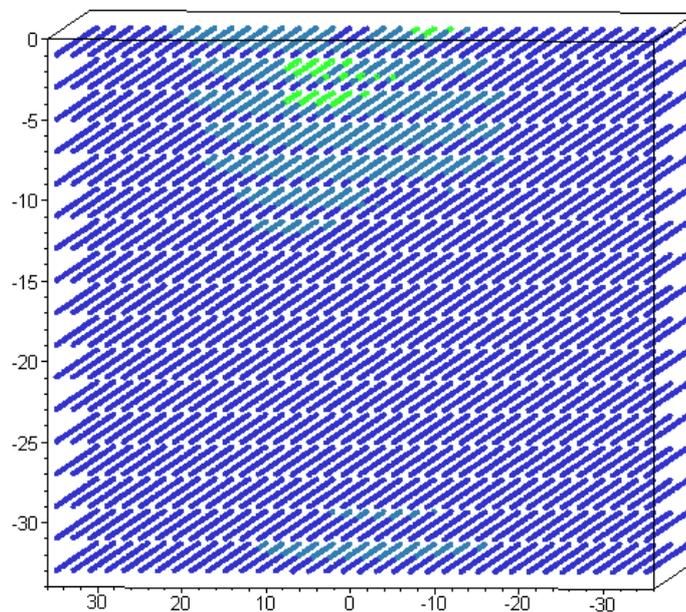


Unten:



— maximale Hauptspannung
- - - maximale TRESCA-Spannung
— maximale MISES-Spannung

Gesamt:

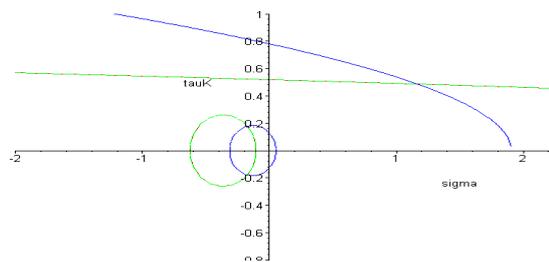


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

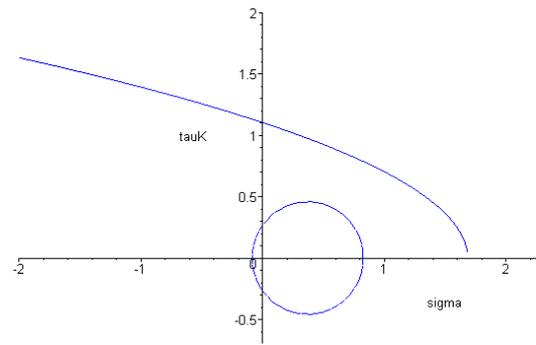
Bauklasse III Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ warm“ **Freies Rollen**

Oben:

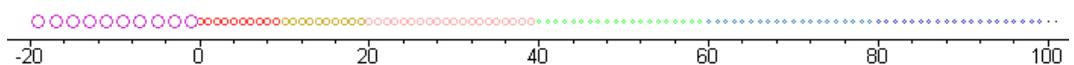
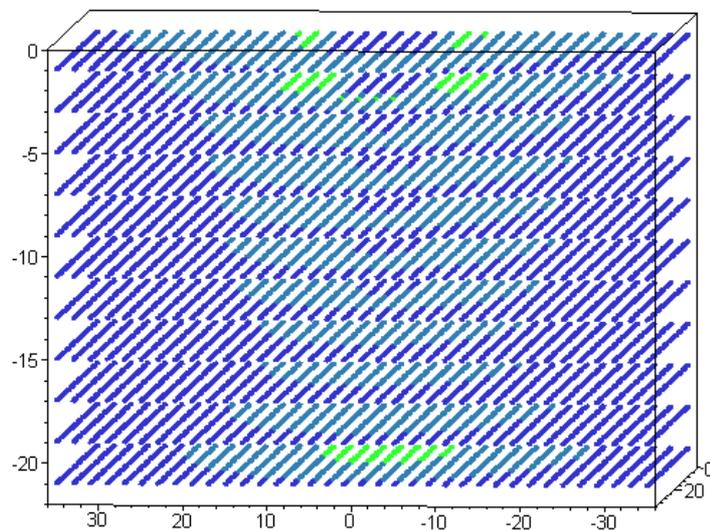


Unten:



— maximale Hauptspannung
- - - maximale TRESCA-Spannung
— maximale MISES-Spannung

Gesamt:

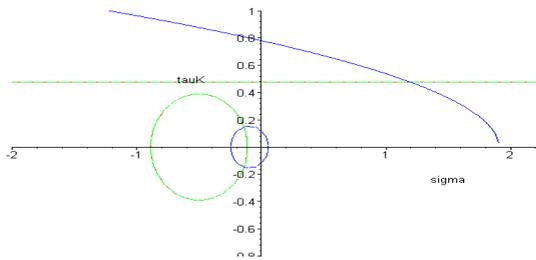


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

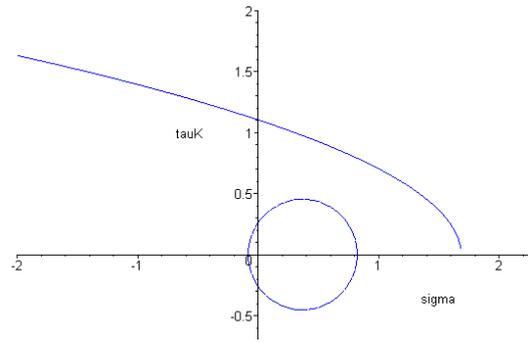
Bauklasse III Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ warm“ Antrieb mit hoher Griffigkeit (20 % der Vertikalkraft)

Oben:

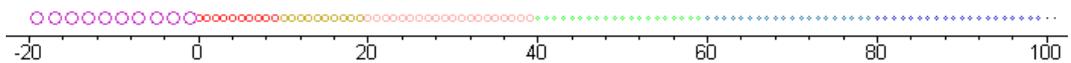
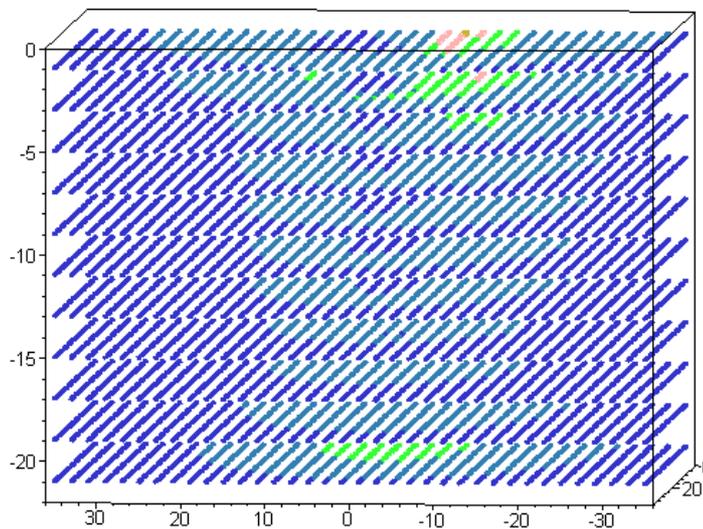


Unten:



— maximale Hauptspannung
- - - maximale TRESCA-Spannung
— maximale MISES-Spannung

Gesamt:

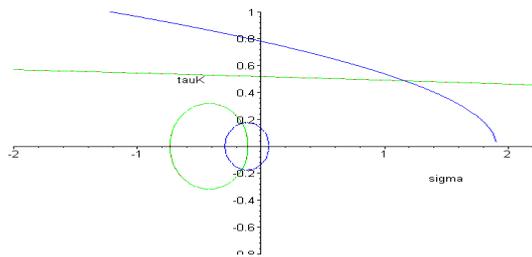


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

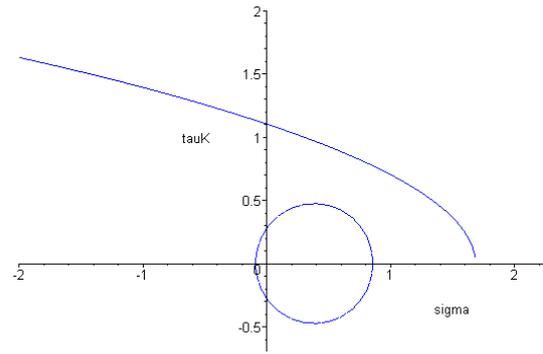
Bauklasse III Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ warm“ Bremsen mit hoher Griffigkeit (20 % der Vertikalkraft)

Oben:

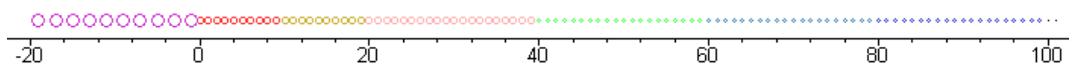
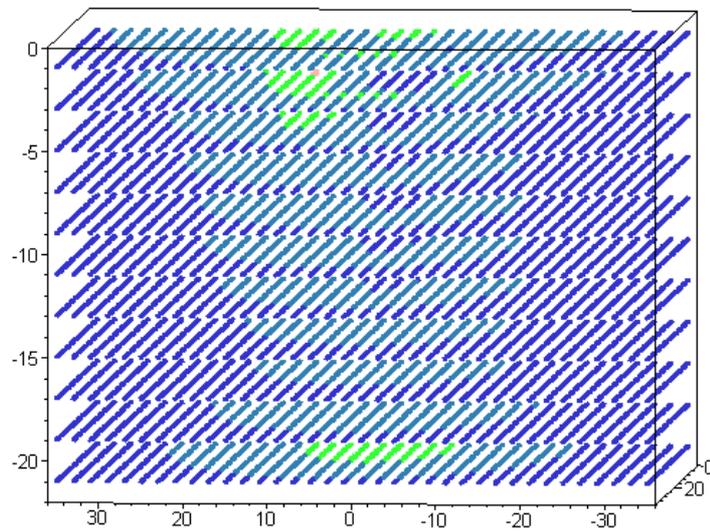


Unten:



— maximale Hauptspannung
- - - maximale TRESCA-Spannung
— maximale MISES-Spannung

Gesamt:

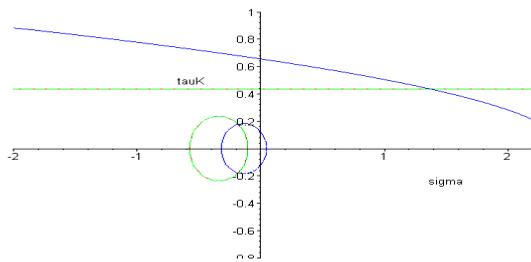


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

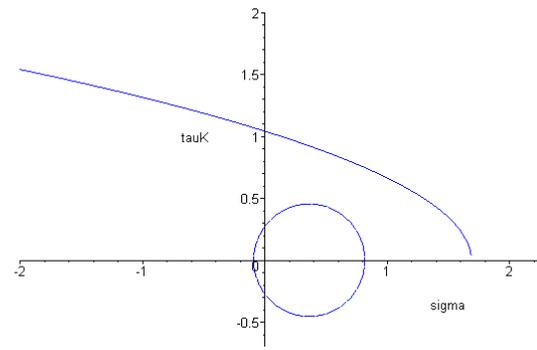
Bauklasse III Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ heiß“ **Freies Rollen**

Oben:

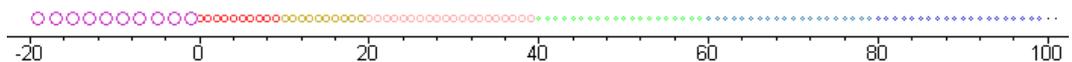
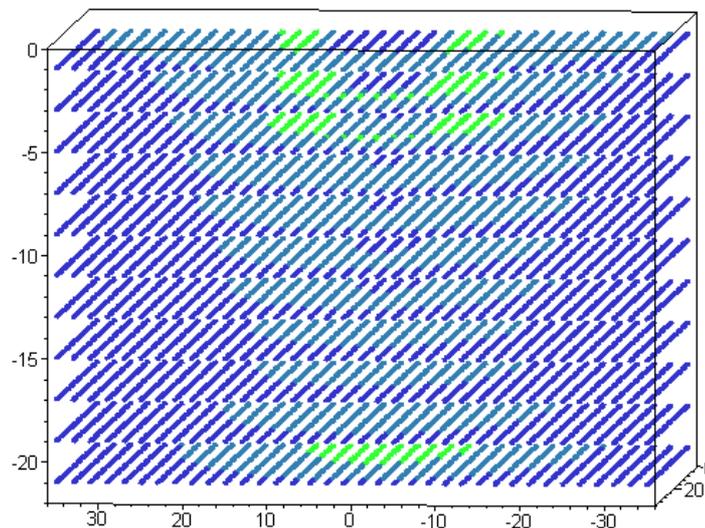


Unten:



— maximale Hauptspannung
- - - maximale TRESCA-Spannung
— maximale MISES-Spannung

Gesamt:

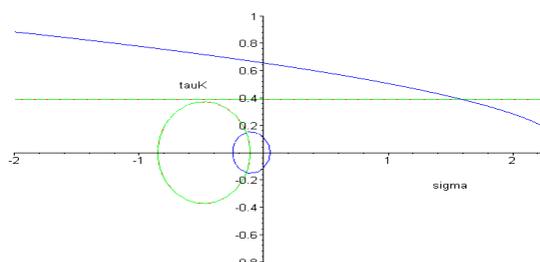


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

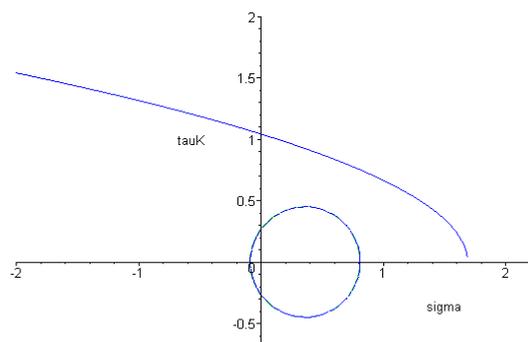
Bauklasse III Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ heiß“ **Antrieb mit hoher Griffigkeit (20 % der Vertikalkraft)**

Oben:

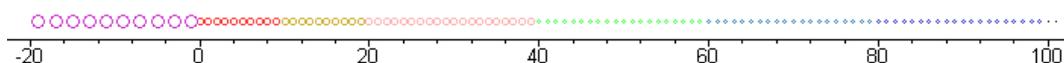
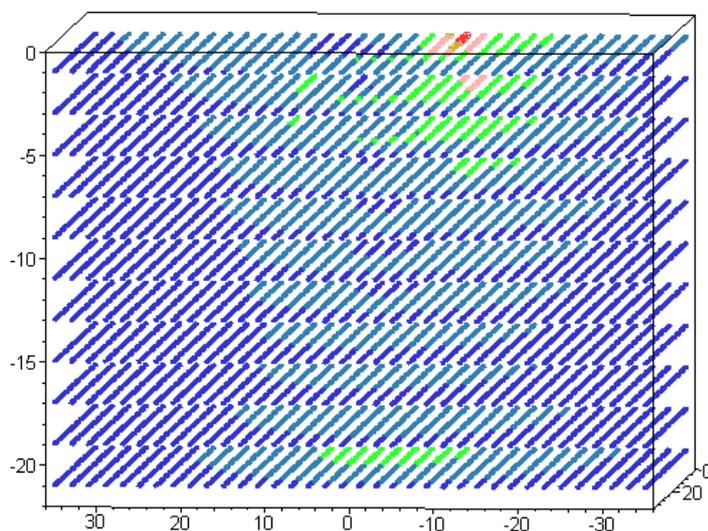


Unten:



— maximale Hauptspannung
- - - maximale TRESCA-Spannung
— maximale MISES-Spannung

Gesamt:

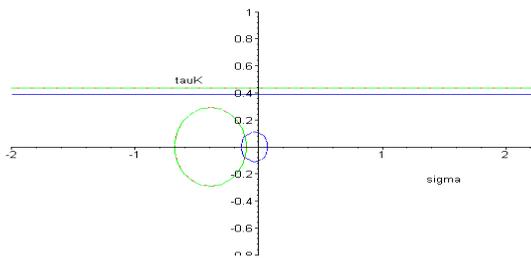


Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile

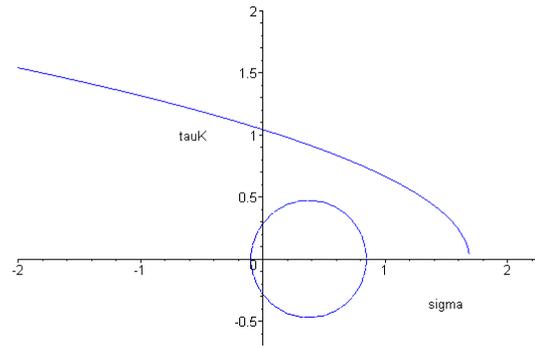
Bauklasse III Reifentyp 495/45 R 22.5 - 9 t-Achse

Zustand: „ heiß“ Bremsen mit hoher Griffigkeit (20 % der Vertikalkraft)

Oben:

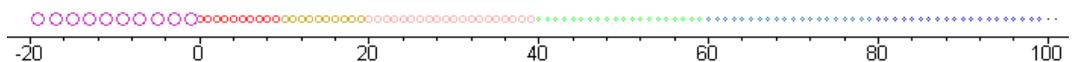
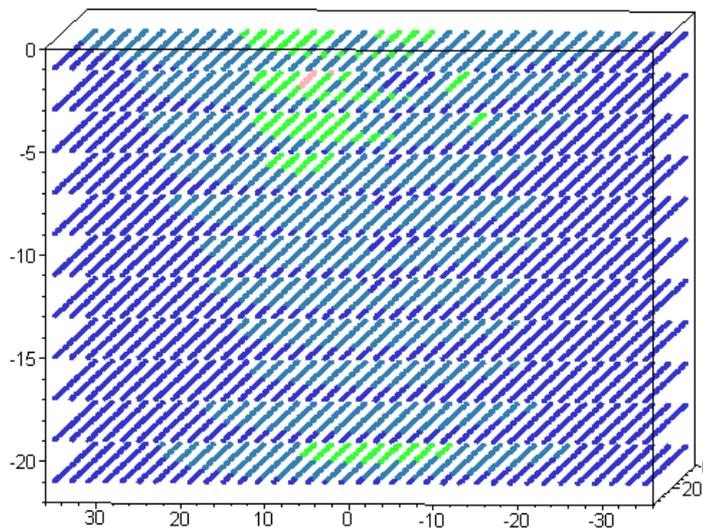


Unten:



— maximale Hauptspannung
- - - maximale TRESCA-Spannung
— maximale MISES-Spannung

Gesamt:



Anhang 6: MOHR'sche Diagramme und Darstellung der Reserveanteile