Bericht zu den Simulationen der Variationen der Radgeometrie des 343-er Antriebsrades zur Bestimmung der Zonen hoher Beanspruchung

Dieser Bericht behandelt durchgeführte numerische Berechnungen, in denen die Bandagendicke, Felgendicke und die Radbreite eines Antriebsrades der Geometrie 343x114 variiert worden sind. Zum besseren Verständnis der später folgenden Darstellungen der Rechenergebnisse wird zunächst das Ablaufschema der Berechnungen erläutert und die Nomenklatur festgelegt. Wie vereinbart, wurden die Berechnungen bei einer Achslast von 35kN und einer Fahrgeschwindigkeit von 16km/h (stationäre Fahrt). Neben den Geometrievariationen wurden und werden Vergleichsrechnungen mit feinerer Vernetzung durchgeführt, um den Einfluss der Netzfeinheit abschätzen zu können. Die Rechnungen wurden unter Konstanthaltung des Außenradius (d_a/2 in Abb.1, Wert von d_a ist immer 343mm) durchgeführt. Variiert wurden die Bandagendicke (**BD**= $[d_a - d_i]/2$ in Abb.1) und zu jeder Bandagendicke jeweils die Felgendicke ($FD=[d_i - d_c]/2$ in Abb.1), sowie die Breite des Rades (B=b in Abb.1). Im weiteren Verlauf des Berichtes werden nur die auf die Durchmesser bezogenen Werte (Di [Innendurchmesser der Bandage] für die Bandagendicke, und DC für die Felgendicke [Innendurchmesser der Felge]) angegeben. Kleinere Zahlenwerte von DI bzw. DC bedeuten gemäß Abb. 1 größere Dicken der Bandage respektive der Felge. Folgende Geometrievariationen wurden durchgerechnet und ausgewertet. Es wurden zusätzlich zu den BD- und FD-Variationen, Variationen der Radbreite gerechnet.

Bandagendicken	DI	[mm]	243, 273, 283, 293, 303, 313, 323
	2*BD	[mm]	100, 70, 60, 50, 40, 30, 20
Felgendicken	2* FD	[mm]	19 / 49 / 119
Radbreite bei Felge	В	[mm]	86 / 114 /136



Abb 1 Prinzipskizze der Radgeometrie.

Ablaufskizze der Rechnungen:

- 1. Generierung der Geometrie und der Vernetzung, Lasten und sonstiger Randbedingungen (RB)
- **2.** Teilrechnung: Mechanik:
 - a. Festlegung der Fahrzeit durch Vorgabe eines Drehwinkels
 - b. Festlegung des Bereiches, der zur Berechnung der Wärmequellen verwendet wird
 - c. Initialisierung der RB und Lasten
 - d. Start Mechanische Rechnung und damit Erzeugung der Wärmequellen (Abb. 3).
- 3. Teilrechnung: Thermische Rechnung unter Nutzung der in (2.d) erzeugten Wärmequellen
- 4. Start nächster Rechenzyklus mit Aufprägung der aus Teil 3. Gewonnenen Temperaturen als neue Temperaturlastwerte und Berichtigung der temperaturabhängigen Materialkennwerte.

Anmerkung:

Die Wärmequellen werden in der mechanischen Teilrechnung innerhalb eines vorher festgelegten Bereiches bestimmt (roter Bereich in den Rädern (hier Scheibe) wie in den Abb.2-4). Die Lastdaten in diesem Bereich werden zeitlich integriert und dann in der zweiten Teilrechnung - einer Wärmeleitungsrechnung - zur Temperaturfindung verwendet. Der Bereich, in dem die Wärmequellen berechnet werden, kann variiert werden. Beide Teilrechnungen zusammen bilden einen Rechenzyklus. Beim Start von dem nächsten Zyklus wird das Rad in die Ausgangsposition der ersten





Abb. 2 Ablaufschema der numerischen Rechnungen

In den später folgenden Darstellungen der Belastungsverteilungen wird eine Winkelskala verwendet. Der Nullwinkel entspricht dabei demjenigen Zeitpunkt, an dem der Anfang des Bereiches, der zur Berechnung der Wärmequellen genommen wird (**Auswertungsbereich AWB**), sich lotrecht unter dem Radmittelpunkt befindet. Dies wird auch als Kontakt bezeichnet (Abb.2 4, jeweils mittleres Rad). Zeitpunkte vor dem Kontakt, werden alle mit einem negativen Winkel, Zeitpunkte nach dem Kontakt, werden mit einem positiven Winkel bezeichnet. Es besteht ein (linearer) Zusammenhang zwischen der (Rechen-)Zeit- und dem Winkel. Die Fahrtrichtung ist immer die positive x-Richtung. Betrachtet werden die Beanspruchungen der Bandage einer stationären Fahrt.



Abb.3 Prinzipskizze der Generierung der Wärmequellen.



Abb.4 Kontaktdefinition und Winkelskaladefinition.

Einfluss der Radbreite (B), der Felgendicke (DC) und der Bandagendicke (DI)

Dieser Abschnitt ist so organisiert, dass der Einfluss der Radbreite, der Variation der Felgendicke und der Bandagendicke auf mechanische und thermische Beanspruchungen diskutiert werden. Zunächst wird jeweils eine kurze Beschreibung der Einflüsse gegeben, gefolgt jeweils von Übersichtsgraphiken der berechneten Spannungen der B86-er, B114-er und der B136-er Reifen. Ein Vergleich der Peakvalues dieser Spannungen über alle Felgen- und Bandagendickenvariationen in Balkendiagrammform, sowie die thermische Beanspruchung nach einer kurzen (**thermische Kurzzeitanalyse**) und einer sehr langen stationären Fahrt (**thermische Langzeitanalyse**) befinden sich am Ende der Diskussion der Geometrieeinflüsse.

Es werden in den Zeit-, respektive Winkeldarstellungen jeweils die zeitlichen Verläufe der maximalen Werte der Beanspruchungen dargestellt und nicht deren örtliche Variation. Ein Zusammenhang zwischen dem örtlichen und dem zeitlichen Verlauf wird exemplarisch in Abschnitt Anhang A Abb. 45-50 gegeben. Im Anhang A werden ausgewählte örtliche Verteilungen der Beanspruchungen gezeigt. Da alle Durchmesservariationen bei der Radbreite 86mm deutlich schlechtere Beanspruchungswerte aufweisen, werden diese nur exemplarisch als Vergleich im Hauptteil angeführt. Daran schließt sich die Darstellung des Netzeinflusses, sowie die Ergebniszusammenfassung und ein Ausblick an.

Mittels der Rechnungen können Tendenzen aufgezeigt werden, welche Radgeometrien günstig sind. Es hat sich herausgestellt, dass sich die durchgeführten Geometrievariationen auf verschiedene Spannungsbeanspruchungsarten sowohl unterschiedlich als auch unterschiedlich stark auswirken. Die folgenden Aussagen beziehen sich auf die durchgeführten Rechnungen der stationären Fahrt. Die Graphen in den Abb. 5-25 zeigen den zeitlichen Verlauf der maximalen Schubspannungen, der kleinsten und größten Hauptnormalspannung (HNS) innerhalb des AWB. DI273 DC254 sind die Geometriewerte des eingesetzten 343-er Antriebsrades und werden als Vergleichswerte herangezogen. In jeder der Abb. 5-13 sind die Maximalwerte der jeweiligen Spannung in Abhängigkeit von der Winkellage für die drei gerechneten Felgendicken (DC-Werte) zu den Bandagendicken (DI243, DI273, und DI323) dargestellt. Die abgebildeten Bandagendicken sind die kleinste, die Standardgröße und die größte gerechnete Bandagendicke - für die drei gerechneten Breiten (86mm, 114mm, und 136mm). Wie aus den anschließenden Abb. 14–25 (jeweils eine Felgendicke unter Variation der Bandagendicke) ersichtlich, liegen die Spannungswerte der anderen Radgeometrien jeweils zwischen den Werten für die Bandagendicken DI243 und die DI323. Die Achsen der Graphen in den Abb. 5-25 sind alle gleich skaliert, so dass die Peakhöhen direkt miteinander verglichen werden können. Die Werte der Spannungen sind alle in der Einheit [mN/mm²] angegeben. Durch Streichung von drei Nullen gelangt man zu der Einheit [MPa]. In allen Graphen wird für die X-Achse die oben eingeführte Winkelskala verwendet. Am Ende dieses Abschnittes befindet sich eine vergleichende Darstellung der thermischen Beanspruchung für die thermische Kurzzeitanalyse und die thermische Langzeitanalyse (Abb.35). In der Abb.35 ist die Temperaturskala in der Einheit [°C] jeweils für die thermische Kurzzeitanalyse und die thermische Langzeitanalyse und für alle gezeigten Geometrien gleich.

Generelle Charakteristika der zeitlichen Spannungsverläufe des AWB

Mit generellen Charakteristika werden Eigenschaften bezeichnet, die sich bei allen Beanspruchungsarten (in unterschiedlich starker Ausprägung) und allen Geometrievariationen (ausgenommen die Radbreite) wiederfinden. Die HNS- und Schubspannungen des AWB weisen in der Nähe des Kontaktes ihre größten Werte auf. Der größte (Eigen-) Wert der HNS (HNS-Max oder S.Max.Prin) weist zeitlich deutlich vor und nach dem Kontakt ausgeprägte Zugspannungen, sowie Druckbeanspruchungen rund um den Kontakt auf. Die kleinste HNS (HNS-Min oder S.Min.Prin) zeigt im Wesentlichen Druckspannungen, die betraglich um ein Vielfaches (Faktor 9-18) größer sind als die größten auftretenden Zugspannungen von HNS-Max. Zug- und Schubspannungen reagieren in absoluten Werten gemessen am unempfindlichsten gegenüber Variationen der Veränderungen der Bandagen-, der Felgendicke und der Radbreite (bei stationärer Fahrt). Die größten auftretenden Schubspannungswerte liegen betraglich zwischen den Werten der größten Druck- und Zugspannungen. Schaut man sich die Variation der relativen Spannungswerte an, so ist die Variation der Peakvalues bei den Zugspannungen am größten, gefolgt von den HNS-Min-Werten und den Schubspannungen (siehe z.B. Abb. 26-34) Die Aussagen bzgl. der absoluten und relativen Variation der Spannungswerte beziehen sich dabei auf die gesamte Spannweite an untersuchten geometrischen Variationen.

Beschreibung der Einflüsse der unterschiedlichen geometrischen Variationen

Einfluss der Radbreite:

Die Verringerung der **Radbreite** hat erwartungsgemäß in allen Bereichen (mechanische und thermische Beanspruchungen) zu einer Erhöhung der Beanspruchung geführt (siehe Abb.5-25). Diese Aussage gilt sowohl bzgl. der jeweils korrespondieren Räder, d.h. bei gleicher Bandagendicke und gleicher Felgendicke (vergleiche z.B. Bilder 5, 8 und 11 oder 6, 9 und 12, oder 7, 10 und 13) aber unterschiedlicher Radbreite, als auch absolut gesehen über alle geometrischen Variationen. Dies ist der Grund, weshalb die Räder mit der B86-er Radbreite nur exemplarisch betrachtet werden. Bei gleichen von außen aufgeprägten Lasten, wurde bei den geringeren Radbreiten eine Symmetrisierung der Beanspruchungen erwirkt. Die Balkendiagramme (Abb. 26-34) zeigen die Peakvalues der Zug-, und Schubspannung und von HNS-Min. Betrachtet man sich diese Balkendiagramme so fällt auf, dass sich die Schubspannungen bzgl. der Radbreiten analog verhalten bzgl. des Einflusses der Variation der Felgendicke und der Bandagendicke.

Bei den Zugspannungen tritt bei der 86-er und der 114-er Radbreite ein Maximum bei einer Bandagendicke auf, das bei der B136-er Radbreite nicht in Erscheinung tritt. Bei den HNS-Min tritt ein Minimum bei der 86-er Radbreite bei einer Bandagendicke auf, während bei der B136-er Radbreite die Werte jeweils mit abnehmender Dicke der Bandagen und der Felge zunehmen. Auch wenn die Verringerung der Radbreite sich negativ ausgewirkt hat, ist damit gezeigt, dass sich ein Optimum bzgl. des Beanspruchungsverhaltens nur bei Variation der Felgendicke, der Bandagendicke **und** der Radbreite erreichen lässt.

Anmerkung:

Die Peakvalues bei den Beanspruchungen steigen mit abnehmender Radbreite an. Beim Drehen auf der Stelle könnten sich geringere Radbreiten als Vorteilhaft erweisen.

Die thermische Beanspruchung ist (gemäß Abb.35) bei der geringeren Radbreite deutlich höher, in Abhängigkeit von der Bandagendicke und Felgendicke um bis zu einen Faktor 3,5.

Sowohl der Einfluss der **Felgendicke** (Abb. 5-13) als auch der Einfluss der **Bandagendicke** (Abb. 14-25) ist auf verschiedene Beanspruchungsarten (Zug-, Druck- und Schubspannung, sowie thermische Beanspruchung) unterschiedlich groß.

Einfluss der Felgendicke:

Die Veränderung der höchsten Beanspruchungswerte (Balkendiagramme Abb. 26-34) für alle Spannungsbeanspruchungen variiert nur schwach bzgl. der beiden dickeren Felgenstärken bei den Rädern der B136-er und B114-er Radbreite. Schubspannungen und höchste Druckspannungen (betragsmäßig größte HNS-Min-Werte) werden durch größere Felgendicken abgeschwächt (siehe Peakvalues und Verlauf von HNS-MIN, HNS-Max und Schubspannungen in den Abb. 5-25). Gemäß den Abb. 5-13 ist auch die zeitliche Entwicklung der höchsten Beanspruchungswerte für alle drei dargestellten Beanspruchungsarten nahezu identisch. Leichte Abweichungen gibt es bei der dünnsten gerechneten Bandage (DI323, Abb. 7, 10 und 13), in der der Einfluss der Felgendicke merklich ist und auch hier die dickste Felge die besten Resultate erzielt. Bei den Zugspannungen lässt sich nur eine Aussage bzgl. des kombinierten Einflusses von Bandagendicke und Felgendicke (Abb. 29 - 31) und der Bandagendicke treffen, da bei geringen Felgendicken die höchsten Beanspruchungswerte bei großen Bandagendicken auftreten. Dieses Verhalten sich jedoch umkehrt. Dickere Felgen sorgen für eine Symmetrisierung der Beanspruchungsverteilungen (Abb. 36-43 und 45-50). Der Einfluss der Felgendicke auf die Verbesserung bzgl. der Beanspruchung scheint degressiv zu verlaufen, d.h. dass Ausmaß der Verbesserung nimmt mit steigender Felgendicke ab. Der Einfluss der Felgendicke auf das schmalste Rad (B86) ist deutlich geringer.

Je größer die Felgendicke (Abb.35), desto besser kann die Wärme abgeleitet werden, was sich positiv auf die Temperaturentwicklung in Form von niedrigeren Temperaturen führt.



Abb.5 Spannungsbeanspruchung für alle drei Felgendicken bei der dicksten gerechneten Bandagendicke (DI243, 50mm).



Abb. 6 Spannungsbeanspruchung für alle drei Felgendicken bei der Standardbandagendicke (DI273)



Abb. 7 Spannungsbeanspruchung für alle drei Felgendicken bei der dünnsten gerechneten Bandagendicke (DI323, 10mm).



Abb.8 Spannungsbeanspruchung für alle drei Felgendicken bei der dicksten gerechneten Bandagendicke (DI243, 50mm).



Abb. 9 Spannungsbeanspruchung für alle drei Felgendicken bei der Standardbandagendicke (DI273)



Abb. 10 Spannungsbeanspruchung für alle drei Felgendicken bei der dünnsten gerechneten Bandagendicke (DI323, 10mm).



Abb. 11 Spannungsbeanspruchung für alle drei Felgendicken bei der dicksten gerechneten Bandagendicke (DI243, 50mm).



Abb. 12 Spannungsbeanspruchung für alle drei Felgendicken bei der Standardbandagendicke (DI273)



Abb. 13 Spannungsbeanspruchung für alle drei Felgendicken bei der dünnsten gerechneten Bandagendicke (DI323, 10mm).

Einfluss der Bandagendicke:

Die Peakvalues der Schubspannung werden tendenziell am wenigsten durch die Bandagendicke beeinflusst (Abb. 14-25 und 26-34) Die Schubspannungen scheinen im Wesentlichen durch eine Veränderung der Felgendicke und der Radbreite beeinflusst zu werden. Die Beträge der HNS-MIN-Werte steigen mit abnehmender Bandagendicke bei der B136-er Radbreite an, während bei der B86er Radbreite sich eine minimale Beanspruchung bei der Bandagendicke von DI273 einstellt. Der belastete Bereich ist bei dickeren Bandagen größer. Die Beanspruchung bei allen Beanspruchungsarten steigt bei dickeren Bandagen (respektive liegt oberhalb) zunächst schneller (zeitlich und örtlich gesehen) und über dem Niveau der dünneren Bandagen an (Abb. 14-25). Die Peakvalues der HNS-Min-Werte (oder S.Min.Prin-Werte, Druckbeanspruchung) und der Schubbeanspruchung bei den dickeren Bandagen liegen für die B136-er Radbreite unterhalb von denen der dünneren Bandagen. Bei den dünneren Bandagen stellt sich das Maximum der Zugbeanspruchung tendenziell vor dem Kontakt, bei den dickeren tendenziell nach dem Kontakt ein. Es liegt generell ein symmetrischerer zeitlicher Verlauf der Spannungen bei den dünnsten und dicksten Bandagen vor. Die Zugbeanspruchung sinkt mit abnehmender Bandagendicke. Dies ist ein gegensätzliches Verhalten gegenüber den anderen Spannungsbeanspruchungen.

Bei dem Einfluss der Bandagendicke auf die thermische Beanspruchung muss man die Zeitdauer der Beanspruchung berücksichtigen Abb.35. Vulkollan[®] besitzt eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit. Bezogen auf alle Spannungsbeanspruchungen gilt, dass je dünner die Bandage ist, desto höher ist die Gesamtspannungsbeanspruchung (bei stationärer Fahrt) und damit auch die Energiedissipation, die in einer Temperaturerhöhung resultiert. Wegen der schlechten Wärmeleiteigenschaft von Vulkollan[®], respektive der im Vergleich dazu guten Wärmeleiteigenschaft des Felgenmaterials, wird, sobald sich die Erwärmungszone bis zur Felge hin ausgebreitet hat, die Wärme bei dünneren Bandagen schon bei kürzeren Betriebszeiten besser abtransportiert. Dies führt bei längeren Betriebszeiten zu einer geringeren Temperaturbeanspruchung bei den dünneren Bandagen im Vergleich zu den dickeren Bandagen.

Hypothese:

Dieser Effekt kann nur so lange anhalten wie kein Wärmerückfluss erfolgen kann, was eintreten wird, sobald sich ein Gleichgewicht bzgl. der Wärmeabstrahlung der Felge zur Umgebung einstellt. Dann sollte sich der Effekt wieder umkehren. Dies bedeutet, dass von der Felge ein Wärmerückfluss in Bereiche der Bandage erfolgen kann, die sich noch nicht die gleiche Temperatur wie die Felge und/oder umgebende Luft haben.



Abb.14 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dickste gerechnete Felgendicke (55mm)



Abb.15 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dünnste gerechnete Felgendicke (10mm)



Abb.16 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dickste gerechnete Felgendicke (55mm)



Abb.17 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dünnste gerechnete Felgendicke (10mm)



Abb. 18 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dickste gerechnete Felgendicke (55mm)



Abb.19 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dünnste gerechnete Felgendicke (10mm)



Abb.20 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dickste gerechnete Felgendicke (55mm)



Abb.21 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dünnste gerechnete Felgendicke (10mm)



Abb.22 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dickste gerechnete Felgendicke (55mm)



Abb.23 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dünnste gerechnete Felgendicke (10mm)



Abb.24 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dickste gerechnete Felgendicke (55mm)



Abb.25 Druck- und Schubspannungen für sechs Bandagendicken für die dünnste gerechnete Felgendicke (10mm)

Einfluss der Kombination aus Bandagendicke und Felgendicke:

Die Kombination aus Variation von Bandagendicke und Felgendicke wirkt sich bei den HNS-Min-Werten (höchste auftretende Druckspannungen) und den Schubspannungen bei allen Radbreiten gleichartig aus. Dies bedeutet, dass bei gleichbleibender Bandagendicke die Radgeometrien mit den dünnsten Felgendicken jeweils am stärksten beansprucht sind. Diese Aussagen beziehen sich auf die absolut höchsten auftretenden Beanspruchungswerte, d.h. den Werten, die in den Balkendiagrammen (Abb.26-34) dargestellt sind. Die Zugspannungen bei der B86-er Radbreite verhalten sich wie die anderen Spannungswerte. Die Zugspannungswerte bei den B114-er und B136er Rädern (Abb. 30 und 31) zeigen eine Umkehr des Verhaltens in dem Sinne, dass bis zu einer Bandagendicke von DI 293 respektive DI283 die kleinsten Beanspruchungen bei den anderen Felgendicken auftreten und erst danach das gleiche Verhalten wie bei den anderen Beanspruchungen auftritt, also erst bei den dickeren Bandagen der höchste Beanspruchungswert auch bzgl. der der dünnsten Felgendicken auftritt. Nicht für alle Beanspruchungsarten, wirkt sich die Kombination aus Bandagendicke und Felgendicke gleichartig aus.



Abb.26 Übersicht der Peakvalues der Druckbeanspruchung über alle Geometrien der B86-er Radbreite.



Abb.27 Übersicht der Peakvalues der Druckbeanspruchung über alle Geometrien der B114-er Radbreite.



Abb.28 Übersicht der Peakvalues der Druckbeanspruchung über alle Geometrien der B136-er Radbreite.



Abb.29 Übersicht der Peakvalues der Zugbeanspruchung über alle Geometrien der B86-er Radbreite.



Abb.30 Übersicht der Peakvalues der Zugbeanspruchung über alle Geometrien der B114-er Radbreite.



Abb.31 Übersicht der Peakvalues der Zugbeanspruchung über alle Geometrien der B136-er Radbreite.



Abb.32 Übersicht der Peakvalues der Schubbeanspruchung über alle Geometrien der B86-er Radbreite.



Abb.33 Übersicht der Peakvalues der Schubbeanspruchung über alle Geometrien der B114-er Radbreite.



Abb.34 Übersicht der Peakvalues der Schubbeanspruchung über alle Geometrien der B136-er Radbreite.



Übersicht über die Temperaturbeanspruchung. Alle Temperaturangaben in [°C].

Abb.35 Darstellung der **thermischen Kurzzeitanalyse** (links) und der **thermischen Langzeitanalyse** (rechts). Die Temperaturen sind jeweils gleichartig skaliert, d.h. gleiche Farben bedeuten jeweils im rechten und im linken Bild gleiche Temperaturen für alle dargestellten Geometrien. Graue Bereiche sind Temperaturen **oberhalb** der Temperaturskala (also wärmere Bereiche), mit rot sind hohe, mit blau niedrige Temperaturen dargestellt.

Übersicht über den Einfluss der Netzfeinheit:

Exemplarisch wird der Einfluss der Vernetzung auf die Simulationsergebnisse dargestellt. Zur Veranschaulichung werden Simulationsergebnisse der Radgeometrien DI273 DC154 und DC254 der B136-er Radbreite präsentiert. Die Vernetzungsfeinheit wirkt sich unterschiedlich stark auf verschiedene Beanspruchungsarten auf. Wie in den Abb. 36-43 gezeigt, lassen sich die Effekte gut von den Einflüssen der Radgeometrie trennen.

Gegenüber den Rechnungen mit gröberer Vernetzung wurden die Peakvalues bei den Druck- und Schubbeanspruchungen reduziert und die Zugspannungen wurden größer. Dieser Netzeffekt nimmt mit zunehmender Felgenstärke ab, d.h. bei den dicksten Felgenstärken sind die Abweichungen im Bereich von 2% bei den Druck- und Schubspannungen und 7% bei den Zugspannungen. Bei den dünnen Felgenstärken um die 10% bei den Druck- und Schubspannungen, sowie 22% bei den Zugspannungen.

Bezogen auf die Peakvalues, kann man sagen, dass tendenziell die Verbesserungseffekte der dickeren Felgendicken bzgl. den Druck- und Schubspannungen abgeschwächt (von 15% zu etwa 5%) und bzgl. der Zugspannungen verstärkt worden sind (von 7% auf über 20%). Analog wurde das asymmetrische Verhalten bei den dünnen Felgendicken abgeschwächt durch die feinere Vernetzung. Die Trennung von Netz- und Felgendickeneffekten bzgl. der verschiedenen Beanspruchungen und der Symmetrie der jeweiligen Beanspruchung kann man jeweils ablesen, wenn man die Bilder rechts oben (feines Netz und dünne Felgendicke) mit den Bildern links unten vergleicht (dicke Felgendicke und grobes Netz) und jeweils die Peakvalues betrachtet. Ganz wichtig ist, dass die Orte oder Lage der höchsten Beanspruchungen gleich geblieben sind und nur die Form leicht variiert (Abb. 37,38, 40 und 43). Die Bereiche der höchsten Beanspruchungen sind im Vergleich zu den groben Rechnungen jeweils durch die Netzverfeinerung symmetrischer geworden. Dickere Felgen bewirken aber weiterhin eine Symmetrisierung der Spannungsbeanspruchung.

Anmerkung:

Die Überprüfung des Netzeinflusses wird noch fortgeführt. Die Rechenzeit beträgt allerdings 1 - 6**Wochen** auf dem Hochleistungsrechner! Aus diesem Grunde können nur exemplarische und ausgewählte Geometrievarianten in der feinen Vernetzung durchgerechnet werden. Alle Abbildungen in diesem Abschnitt über den Netzeinfluss sind wie folgt organisiert:

In den linken Spalten befinden sich die Abbildungen der groben Vernetzungen, in den rechten Spalten jeweils die der feinen Vernetzung. In den oberen Zeilen befinden sich die Darstellungen für die dünneren Felgen (DC 254, FD 10mm) und in den unteren Spalten die Graphen von den dickeren Felgen (DC154, FD 55mm). Der Einfluss der Felgendicke lässt sich also immer durch Vergleich von Bildern, die übereinander liegen ablesen, den Netzeinfluss durch Vergleich von nebeneinander liegenden Bildern. Um zu einer Aussage zu gelangen, wie groß die Ungewissheit bei der groben Vernetzung ist, respektive welche Veränderungen durch die Vernetzung und welche durch die Felgenvariation herrührt, muss man jeweils die Bilder rechts oben und links unten miteinander vergleichen. Dargestellt sind die örtlichen Verteilungen zum Zeitpunkt, an dem der AWB sich gerade im Kontakt befindet. Die Schnittbilder zeigen genau den Kontaktbereich (also Winkel $\alpha=0^{\circ}$). Dargestellt ist bei den Schnittbildern nur die Bandage. Die Straße ist unten, die Bereiche oberhalb von den angegebenen Grenzwerten angezeigt. Die Skalierung für alle Darstellungen einer Beanspruchungsart ist gleich.

Schubbeanspruchung:

Der Bereich hoher Belastung wandert bei feinerer Vernetzung zur Radmitte, hin, so dass insgesamt eine Harmonisierung der Belastung eintritt. Einflussfaktoren hierzu sind die absolute Netzfeinheit und die relative (d.h. unterschiedliche) Netzfeinheit in der Kontaktzone Felge/Bandage, sowie die stark unterschiedlichen elastischen Eigenschaften der Kontaktpartner. Sowohl die Schnittbilder, als auch die Isosurfacebilder zeigen, dass die hochbelasteten Bereiche tendenziell an den gleichen Stellen liegen aber unterschiedliche Gebiete überdecken. Durch Vergleich des r.o. Bildes, mit dem l.u. wird, der Symmetrisierungseffekt, der durch die Felgenverdickung hervorgerufen wird, erkennbar. Insbesondere der hochbelastete Bereich ist bei dickerer Felge deutlich zentraler.



Schubspannung in [mN/mm²]



Abb.36 Schnittbilddarstellung der Schubbeanspruchung (l.o. DC254, grob, l.u. DC154, grob, r.o. DC254, fein, r.u. DC154 fein, jeweils DI273).

 -+4.4540+03
14.4046100
- +4.214e+U3
- +3.974e+03
12 724-102
- +3./34e+03
- +3.494e+O3
- +3.254e+03
10.015-100
- + 3.013e+03
- +2.775e+03
- +2 535a+O3
12.0000100
- +2.295e+U3
- +2.055e+03
+1 015++02
- +1.01Je+03
- +1.575e+O3

Schubspannung in [mN/mm²]



Abb.37 Isosurfacebilder der Schubspannung (I.o. DC254, grob, I.u. DC154, grob, r.o. DC254, fein, r.u. DC154 fein, jeweils DI273). Es werden nur Bereiche dargestellt, die oberhalb von 2500 mN/mm² liegen.

- +4.454e+O3
- +4.214e+03
- +3.974e+03
- +3.734e+03
- +3.494e+03
- +3.254e+03
- +3.015e+03
- +2.775e+03
- +2.535e+03
- +2.295e+03
- +2.055e+03
- +1.815e+03
+1.575e+03

Schubspannung in [mN/mm²]



Abb.38 Isosurfacebilder der Schubspannung (I.o. DC254, grob, I.u. DC154, grob, r.o. DC254, fein, r.u. DC154 fein, jeweils DI273). Es werden nur Bereiche dargestellt, die oberhalb von 2000 mN/mm² liegen.

HNS-Min (Druckbeanspruchung):

Wie bei der Schubspannung bewirkt auch bei der Druckspannung sowohl die Netzverfeinerung als auch die Felgenverdickung eine Symmetrisierung der Spannungsverteilung. Dieses ist jeweils durch ein Vergleich der Bilder links unten mit rechts oben z.B. im Richtungsplot (Abb.41) erkennbar.



HNS in [mN/mm²]





Abb.40 Isosurfacedarstellung der HNS-Min-Beanspruchung (I.o. DC254, grob, I.u. DC154, grob, r.o. DC254, fein, r.u. DC154 fein, jeweils DI273). Es werden nur Bereiche unterhalb von -6300 mN/mm² dargestellt.



HNS in [mN/mm²]



Zugbeanspruchung :

Wie bei der Schubspannung bewirkt auch bei der Druckspannung sowohl die Netzverfeinerung als auch die Felgenverdickung eine Symmetrisierung der Spannungsverteilung. Dieses ist jeweils durch ein Vergleich der Bilder links unten mit rechts oben erkennbar. Beachtet werden sollte die Erhöhung der Beanspruchung in den Außenbreichen der Bandage (Abb. 42). S, Max. Principal (Avo: 75%)

(~~	rg. / 0 /0)
	- +1.870e+03
	+1.714e+03
	- +1.558e+03
	+1.403e+03
	+1.247+03
	-+1.091a+03
	L 17 702+102
	- +6,233e+U2
	+4.6/5e+U2
	+3,117e+02
	- +1.558e+02
	++0.000e+00
	└─5.500e+03

Zugspannung in [mN/mm²]



DC254, fein, r.u. DC154 fein, jeweils DI273).



(A)	/g:75%)
	r +1.870e+03
	+1.714e+03
	+ +1.558e+03
	+1.403e+03
	+1.247e+03
	+1.091e+03
	+ +9.350e+02
	+7.792e+02
	++6.233e+02
	+4.675e+02
	+3.117e+02
	+1.558e+02
	++0.000e+00
	└─5.500e+03

Zugspannung in [mN/mm²]



Abb.43 Isosurfacedarstellung der Zugbeanspruchung (I.o. DC254, grob, I.u. DC154, grob, r.o. DC254, fein, r.u. DC154 fein, jeweils DI273). Es werden nur Bereiche oberhalb von 310 mN/mm² dargestellt.

Fazit aus den Übersichtsbetrachtungen der Zeitverläufe der maximalen Spannungswerte und des Vernetzungseinflusses

Aus allen durchgeführten Variationen und Spannungsbeanspruchungen zusammengenommen lässt sich ein Zielkonflikt bzgl. der gleichzeitigen Reduzierung von allen Beanspruchungsarten ableiten. Die Ergebnisse zeigen, dass dieser Zielkonflikt insbesondere bzgl. der Bandagendicke vorliegt. Die Thermische Belastung zeigt im Verlaufe der Betriebszeit eine Umkehrung des Verhaltens in dem Sinne, dass für hinreichend kurze Fahrzeiten bei dickeren Bandage zunächst weniger Wärme produziert wird, aufgrund der schlechten Wärmeleitungseigenschaften von Vulkollan® bei längeren Fahrzeiten eine größere thermische Beanspruchung resultiert (Abb.35). Die dargestellte und gerechnete thermische Kurzzeitanalyse dauerte nur eine Radumdrehung (0.245s), ist also im Wesentlichen brauchbar, um die Orte der Wärmeproduktion zu ermitteln. Für eine Aussage, bzgl. günstiger Radgeometrien ist die bisher gerechnete Variante der thermischen Kurzzeitanalyse zu kurz. Die durchgeführte thermische Langzeitanalyse (10000s) lässt sich problemlos für Aussagen bzgl. Variationen der Radgeometrie verwenden. Je dünner die Bandagen und je dicker die Felgen sind, desto mehr Wärme kann abtransportiert werden, solange die Abstrahlung an die Umgebung ungehindert und ungemindert ablaufen kann.

Bekommt man das Problem der schlechten Wärmeleitung von Vulkollan[®] in den Griff, so könnten sich dickere Bandagen als geeignet erweisen. Diese Aussage muss allerdings erst durch weitere Wärmeleitungsanalysen bestätigt werden. Gelingt dies nicht, so sind tendenziell dünnere Bandagen besser geeignet, um die thermische Belastung zu reduzieren (Abb.35).

Das Material ist gegenüber Druckbeanspruchungen am unempfindlichsten, so dass die wesentlich höhere Beanspruchung bzgl. dieser Spannungsart nicht gleichbedeutend damit ist, dass diese den Hauptbeitrag für ein Werkstoffversagen liefert. Schubspannungen ließen sich durch Variation der Bandagendicken nur geringfügig beeinflussen, während die Verstärkung der Felge und die Verbreiterung der Räder einen positiven Effekt hatten. Da der (positive) Effekt der Felgenverstärkung degressiv verläuft, sollte eine geringe Verstärkung der Felgendicke ausreichen. Diese Aussage ist tendenziell für Druck- und Schubbeanspruchungen zutreffend, ohne dass die Bandagendicke einen merklichen Einfluss bzgl. dieser Spannungsbeanspruchungen zu haben scheint. Eine Felgenverstärkung sorgt für eine Symmetrisierung der Beanspruchungsverteilung, für Einreißeffekte an der Oberfläche, die von Außen nach Innen verlaufen, kann dies sich positiv auswirken. Ob sich dies bzgl. des Wärmeabtransports negativ auswirkt ist noch ungeklärt. Für Zugspannungen ist der Einfluss Bandagendicke und Felgendicke tendenziell den der Schubspannungen und Druckspannungen entgegengesetzt. Mit zunehmender Felgendicke und/oder Bandagendicke erhöhen sich die Zugbeanspruchungen. Da sich bei dünneren Bandagendicken dickere Felgendicken tendenziell wieder positiv auswirken, müsste man, um die Zugbeanspruchungen zu reduzieren, dünnere Bandagen verwenden.

Grob gesagt gibt es also die beiden "Pole" des Zielkonfliktes der hohen Wärme- und Zugbeanspruchung bei dicken Bandagen und eine deutliche Verbesserung der Druckbeanspruchung bei dicken Bandagen und dicken Felgen, während die Schubbeanspruchung durch die Felgenvariation (dicke Felgen) und breitere Räder merklich (positiv) beeinflusst worden ist. Die oben angeführten Schlüsse und Bemerkungen bleiben unter Einbeziehung des Vernetzungseinflusses im Wesentlichen gültig. Es ergibt sich aber eine Verschiebung hin zu einer größeren Symmetrie und eine Abschwächung der positiven Effekte bzgl. der Schub und Druckspannungen. Der positive Effekt der Felgendicke bzgl. Zugspannungen scheint verstärkt zu werden. Breitere Bandagen haben als einzige geometrische Variation einen positiven Einfluss auf **alle** Beanspruchungsarten.

Anhang A

In diesem Anhang werden für die Bandagendicken DI243, DI273, und DI293, sowie die Felgendicken 19mm und 119mm die örtlichen Verteilungen der Spanungsbeanspruchungen in der Bandage (Schub, Zug und Druck) dargestellt. Es werden durchgehend Schnittbilder präsentiert. Die positive X-Richtung der Koordinatensysteme entspricht der Fahrtrichtung. Die Schnittbilder aller Darstellungen stammen alle von demselben Zeitpunkt. Der ausgewählte Zeitpunkt ist derjenige Zeitpunkt, an dem sich der AWB gerade im Kontakt befindet.

Im Verlaufe der Rechnung überstreicht der AWB einmal den gesamten Bereich, der durch die Fahrt beansprucht wird (Abb. 44). Die Äquivalenz zwischen zeitlichen und örtlichen Darstellungen der Beanspruchungen besteht darin, dass, wenn man zu **einem** Zeitpunkt insgesamt drei Schnittbilder erzeugt, die z.B. den direkten Bereich vor, den Kontakt und die Zone direkt nach dem Kontakt zeigen, so sind diese an einem Zeitpunkt gemachten Schnittbilder äquivalent dazu, als ob man den AWB zeitlich verfolgen würde und sich drei zeitlich rund um den Kontakt stattfindende, aufeinanderfolgende Beanspruchungsbilder des AWB betrachtet. In diesem Sinne sind die örtlichen Schnittbilder und die zeitlich aufeinanderfolgende Betrachtung des AWB äquivalent.



Abb.44 Durch den AWB überstrichene Zone im Bereich der feinen Vernetzung

Die Wesentlichen Aussagen bzgl. der Güte möglicher Geometrievariationen wurden bereits im Hauptteil getroffen. Dieser Anhang dient zur Komplettierung der Darstellung der Beanspruchungsbereiche. Da die Analyse der Berechnungen darauf hindeutet, dass sich sinnvolle Geometrievariationen im Bereich DI243-DI293, DC19mm-DC119mm und B136 bewegen, wird auf die Darstellung von anderen, ebenfalls durchgerechneten Varianten, verzichtet.

Alle Schnittbilder sind von unten nach oben betrachtet die Abfolge vor dem Kontakt, **Kontakt** (α =0°) und nach dem Kontakt. Alle Skalierungen der jeweils dargestellten Spannung zu Abbildungen mit gleicher **Felgendicke** sind jeweils gleich. Somit geben die Färbungen bei gleicher Felgendicke direkt Auskunft über die unterschiedlichen Spannungsniveaus. Die Anordnung bei den Schnittbildern ist jeweils von links nach rechts DI293 (entspricht 25mm Bandagendicke), DI273 und DI243 (entspricht 50mm Bandagendicke).



Abb. 45 Zugspannungen für Standardfelgendicke und Bandagendicken DI243, DI 273 und DI293. Dargestellt ist nur die Bandagenbeanspruchung. Die Beanspruchungen oben sind diejenigen zur Kontaktzone zur Felge hin.

Schwarze Bereiche sind Bereiche mit negativen Spannungen (Druckspannungen). Deutlich ist die Zunahme der Zugspannungen im Seitenbereich und in der Kontaktzone Belag/Straße zu erkennen. Die maximalen Werte nehmen von links nach rechts zu.



Abb. 46 Zugspannungen für dickste Felgendicke und Bandagendicken DI243, DI 273 und DI293. Dargestellt ist nur die Bandagenbeanspruchung. Die Beanspruchungen oben sind diejenigen zur Kontaktzone zur Felge hin.

Schwarze Bereiche sind Bereiche mit negativen Spannungen (Druckspannungen). Deutlich ist die Zunahme der Zugspannungen im Seitenbereich und in der Kontaktzone Belag/Straße zu erkennen. Die maximalen Werte nehmen von links nach rechts zu. Sowohl die Druck- als auch die Zugspannungen sind symmetrischer als bei der Variante mit den dünneren Felgen (Abb. 45).



Abb. 47 Druckspannungen für Standardfelgendicke und Bandagendicken DI243, DI 273 und DI293. Dargestellt ist nur die Bandagenbeanspruchung. Die Beanspruchungen oben sind diejenigen zur Kontaktzone zur Felge hin.

Je dünner die Bandage, desto höher die Druckbelastungen und die Asymmetrie bzgl. dieser Beanspruchung. Asymmetrie wird teilweise durch grobes Netz verursacht (siehe Abb. 36-43 Am Ende des Hauptteils). Hellgraue Bereiche sind Zonen mit geringerer Beanspruchung.



Abb. 48 Druckspannungen für dickste Felgendicke und Bandagendicken DI243, DI 273 und DI293. Dargestellt ist nur die Bandagenbeanspruchung. Die Beanspruchungen oben sind diejenigen zur Kontaktzone zu Felge hin.

Je dünner die Bandage, desto höher die Druckbelastungen. Asymmetrien lassen sich kaum noch feststellen. Die Beanspruchung ist insgesamt geringer als bei den dünnen Felgen (Abb.47). Hellgraue Bereiche sind Zonen mit geringerer Beanspruchung.



Abb.49 Schubspannungen für Standardfelgendicke und Bandagendicken DI243, DI 273 und DI293. Dargestellt ist nur die Bandagenbeanspruchung. Die Beanspruchungen oben sind diejenigen zur Kontaktzone zur Felge hin. Die Variation der Peakvalues über alle Geometrien ist im Vergleich zu den anderen Beanspruchungsarten gering.

Je dicker die Bandage, desto symmetrischer wird die Beanspruchung. Gleichzeitig nimmt die Zone, in der die höchsten Beanspruchungen auftreten ab.



Abb.50 Schubspannungen für Standardfelgendicke und Bandagendicken DI243, DI 273 und DI293. Dargestellt ist nur die Bandagenbeanspruchung. Die Beanspruchungen oben sind diejenigen zur Kontaktzone zur Felge hin. Die Variation der Peakvalues über alle Geometrien ist im Vergleich zu den anderen Beanspruchungsarten gering.

Je dicker die Bandage, desto symmetrischer wird die Beanspruchung. Gleichzeitig nimmt die Zone, in der die höchsten Beanspruchungen auftreten zu. Die Peakvalues sind weitgehend unabhängig von der Bandagendicke.