

Dipl.-Ing. Christof Bernsteiner

Untersuchung von Mechanismen zur Entstehung des Schienenfehlers Squat

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Dietmaier

Institut für Baumechanik

Zweitgutachter

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Stichel

KTH Royal Institute of Technology in Stockholm

Graz, Juli 2018

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Danksagung

Große Projekte und Schritte im Leben bedürfen der Unterstützung und des Verständnisses Vieler. Daher möchte ich mich an dieser Stelle bei jenen Menschen bedanken, ohne die die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Zu Beginn möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Dietmaier bedanken, der es versteht Gedanken zu ordnen, Ideen fertig zu denken, Wesentliches von Unwesentlichem zu trennen und der mit seiner großen Erfahrung in der Modellierung zum Gelingen dieser Arbeit wesentlich beitrug. Bedanken möchte ich mich auch für die Zeit, welche er sich bei unseren Terminen nahm. Gespräche und Diskussionen wurden nicht abgebrochen, sondern zu Ende geführt, auch wenn ein ganzer Tag dafür notwendig war.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Sebastian Stichel, der die Mühe auf sich nahm, die Arbeit zu begutachten.

Ein großer Dank gilt Klaus Six, der durch seine Visionen, sein Wissen, seine mitreißende Freude an der Arbeit, seine positive Einstellung und sein Verständnis für Menschen eine große Stütze für mich war.

Bedanken möchte ich mich bei Alexander Meierhofer für die intensiven und wertvollen Diskussionen, die wir in den letzten Jahren führten.

Ein großer Dank gilt Christof Marte, der immer ein offenes Ohr für meine Probleme hatte und mir auch bei meinem Arbeitszeitmodell entgegenkam.

Ich möchte mich bei all meinen weiteren Arbeitskollegen dafür bedanken, dass sie mir nicht nur fachlich jederzeit zur Seite standen, sondern dass der Spaß innerhalb der Gruppe sowie die Freude an der Tätigkeit ein wichtiger Bestandteil des Arbeitsalltages war/ist.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Franz und Renate sowie meinem Bruder Stefan, die nicht nur während der Erstellung dieser Arbeit sondern auch im Leben eine große Stütze sind und eine wichtige Rolle für mich spielen. Ohne die Unterstützung meiner Eltern wäre ich nie zu dem Punkt gekommen, eine Dissertation beginnen zu können.

Ein großer Dank gilt auch meiner Freundin Angelika. Sie ist immer für mich da und war/ist für mich insbesondere während meiner persönlichen Tiefpunkte eine große Stütze. Sie zeigte gerade während der Niederschrift der Arbeit besonders viel Verständnis für den zeitlichen Aufwand.

Ebenfalls möchte ich mich für die Förderung im Rahmen des COMET K2 - Competence Centers for Excellent Technologies Programms des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), des Österreichischen Bundesministeriums für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (bmdw), der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), des Landes Steiermark sowie der Steirischen Wirtschaftsförderung (SFG) bedanken.

Danksagung

Mein Dank gilt auch den unterstützenden Firmen und Projektpartnern LB Foster Rail Technologies, ÖBB Infrastruktur AG, SBB AG, Siemens AG Deutschland, Siemens AG Österreich, voestalpine Schienen GmbH sowie der Technischen Universität Graz. Insbesondere möchte ich mich an dieser Stelle bei Stephan Scheriau und David Künstner für die Organisation und Durchführung der Prüfstandversuche bei der voestalpine Schienen GmbH sowie bei Ingolf Nerlich und Alexander Strauch für das Ermöglichen von Vermessungen von Schienen im Netz der SBB sowie der Bereitstellung von Schienen für Laboruntersuchungen bedanken.

Christof Bernsteiner

Graz, 17. Juni 2018

Kurzfassung

Für den Eisenbahnbetrieb besteht an der Untersuchung von Schienenfehlern sowohl aus wirtschaftlichen als auch sicherheitstechnischen Überlegungen großes Interesse. Einer dieser Schienenfehler, der seit Jahrzehnten auf Schienen verschiedener Bahnnetze in aller Welt gefunden wird, heißt Squat. Dieser Schienenfehler zeichnet sich durch sein charakteristisches äußeres Erscheinungsbild aus, welches an zwei Lungenflügel erinnert und durch eine Einsenkung der Schienenoberfläche und einen v-förmigen Oberflächenriss verursacht wird.

In der Literatur werden als mögliche Initiierungsmechanismen von Squats z.B. erste geometrische Abweichungen (z.B. Eindrückungen), Materialinhomogenitäten (durch Materialumwandlungsprozesse während des Betriebes) sowie erste Risse in der Schiene genannt.

In dieser Arbeit wurde die grundsätzliche Entstehung von Materialinhomogenitäten auf der Schienenoberfläche und deren Verhalten unter weiteren zyklischen Belastungen untersucht. Versuche an einem 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand in Kombination mit Simulationen ergaben, dass erhöhte Temperaturen im Rad-Schiene-Kontakt, verursacht durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Rad und Schiene, die Entstehung von Materialinhomogenitäten verursachen können. Eine mehrmalige Belastung der Schiene durch erhöhte Temperaturen, gefolgt von weiteren zyklischen Belastung durch Überrollungen, führte zu Ausbrüchen und Rissen im Bereich der Materialinhomogenitäten.

Mit Hilfe eines Rechenmodells wurden sowohl die geometrische Entwicklung als auch das Rissinitiierungspotential von solchen ersten geometrischen Abweichungen in Form von Ausbrüchen aus der Schienenoberfläche oder den in der Literatur genannten Eindrückungen untersucht. Simulationen mit dem Rechenmodell ergaben, dass geometrische Abweichungen mit einer Mindestgröße auf der Schienenoberfläche bleiben und sich sowohl in die Länge als auch in die Breite ausdehnen. Die Tiefe nimmt bis zu jenem Zeitpunkt ab, an dem das Rad auch die tiefsten Bereiche der geometrischen Abweichung kontaktieren kann. Bei einer entsprechend großen initialen geometrischen Abweichung ist die Dimension der auf der Schienenoberfläche verbleibenden Abweichung mit jenen für diese Arbeit vermessenen Squats aus dem Betrieb vergleichbar. Hingegen werden initial kleine geometrische Abweichungen auf der Oberfläche durch Verschleiß entfernt. Des Weiteren weisen kleine geometrische Abweichungen im Gegensatz zu den auf der Schienenoberfläche verbleibenden Abweichungen kein erhöhtes Rissinitiierungspotential auf.

Eine weitere Untersuchung mit diesem Rechenmodell zeigte, dass Variationen in der Verschleißresistenz der Schienenoberfläche zu geometrischen Abweichungen der Oberfläche führen können. Variationen der Verschleißresistenz können durch Materialumwandlungsprozesse während des Betriebes verursacht werden.

Abstract

It is of great interest to investigate rail defects for both economic and safety reasons. One of these rail defects has been found on rails of different rail networks all over the world for decades and is called squat. Squats are characterised by its distinctive external appearance, which is reminiscent of two lung wings. The appearance of squats is caused by a depression of the rail surface and a V-shaped surface crack.

In literature, initial geometrical deviations of the rail surface (e. g. indentations by hard objects), material inhomogeneities (through material transformation processes during operation) and initial cracks in the rail are mentioned as possible initiation mechanisms of squats.

This work investigates the development of material inhomogeneities on the rail surface and its behaviour under further cyclic loads. Tests on a full scale test rig in combination with simulations showed that increased temperatures in wheel-rail contact, caused by the relative speed between wheel and rail, can cause material inhomogeneities. Cyclic loadings causing increased temperatures, followed by normal cyclic loadings induce breakouts of the rail surface and cracks in the area of material inhomogeneities.

To investigate both the geometric development and the crack initiation potential of initial geometric deviations of the rail surface several simulations were carried out. Initial geometrical deviations can be breakouts from the rail surface or indentations by hard objects as mentioned in literature. The simulation results showed that geometric deviations with a minimum size remain on the rail surface and grow in both directions, in length and in width. The depth decreases until the wheel is able to contact the deepest areas of the geometric deviations. The dimensions of the remaining deviation of an initially large deviation are comparable to those of squats. In contrast, initially small geometric deviations of the rail surface are worn out. Geometric deviations remaining on the rail surface have an increased crack initiation potential whereas the crack initiation potential of initially small geometric deviations is not increased.

A further investigation done with the simulation model showed that variations in the wear resistance of the rail surface can lead to geometric deviations of the surface. Variations in wear resistance can be caused by material transformation processes during operation.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Danksagung	II
Kurzfassung	IV
Abstract	V
1 Einleitung	1
1.1 Grundbegriffe	1
1.2 Motivation	3
1.3 Zielsetzung der Arbeit	3
2 Erkenntnisse aus der Literatur über den WEL und den Schienenfehler Squat	4
3 Charakterisierung von Squats anhand von Untersuchungen einer Schiene aus dem Betrieb.....	8
3.1 Messergebnisse	8
4 Hypothesen zur Entstehung der Squats	11
5 Rechenmodell	14
5.1 Erstellung der Ausgangsgeometrien	19
5.2 Lösung des Normalkontaktproblems von nicht elliptischen Kontakten	20
5.2.1 Ermittlung der potentiellen Kontaktfläche und der Abstandsfunktion	20
5.3 Berechnung der Relativgeschwindigkeiten im Kontakt.....	23
5.4 Lösung des Tangentialkontaktproblems	27
5.4.1 Temperatur-Submodell: Berechnung der Temperatur auf und unter der Oberfläche .	29
5.5 Berechnung des Verschleißes.....	31
5.6 Ermittlung des Rissinitiierungspotentials.....	32
5.6.1 Abschätzung der plastischen Scherverformung der oberflächennahen Schicht	35
5.7 Vertikaldynamikmodell	38
6 Untersuchungen des White Etching Layer	40
6.1 Entstehung von WEL: Simulationen und Versuche	41
6.2 Verhalten von WEL unter zyklischer Belastung.....	50
6.2.1 Zyklische Beanspruchung von WEL: Versuch 1	51
6.2.2 Zyklische Beanspruchung von WEL: Versuch 2	53

7	Geometrische und schädigungstechnische Entwicklung von Squats	58
7.1	Entwicklung initialer geometrischer Abweichungen der Schienenoberfläche	60
7.1.1	Effekte im Rad-Schiene-Kontakt sowie die Entwicklung einer geometrischen Abweichung (<i>Standardfall</i>)	61
7.1.2	Einfluss der initialen Größe der geometrischen Abweichung	77
7.1.3	Einfluss verschiedener Schlupfzustände	97
7.1.4	Schädigungstechnische Betrachtung geometrischer Abweichungen	105
7.1.5	Einfluss der Vertikaldynamik	115
7.1.6	Variationen der Radprofile und der lateralen Radsatzposition.....	122
	Schlusswort zur Parameterstudie aus Kapitel 7.1.....	133
7.2	Entwicklung der Schienenoberfläche aufgrund lokal veränderter Materialeigenschaften	134
7.2.1	Einfluss von lokalem WEL auf die Entwicklung der Schienenoberfläche	135
8	Zusammenfassung.....	138
	Literaturverzeichnis.....	141
	Abbildungsnachweis.....	145
	Anhang A: Tabellen	146

Einleitung

1.1 Grundbegriffe

Squats werden Schienenfehler auf Schienenoberflächen mit einem charakteristischen äußeren „lungenförmigen“ Erscheinungsbild genannt. Dieser in Abbildung 1 dargestellte Fehler weist neben seiner geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche auch ein Rissystem auf und unter der Oberfläche auf. Die Bezeichnung Squat basiert vermutlich auf seinem äußeren Erscheinungsbild. Dieses wirkt, als wäre ein extrem schwerer Zwerg auf der Schiene gehockt (im Englischen: *to squat*) (vgl. [1]).



Abbildung 1: Schienenfehler Squat.

In der Literatur (vgl. Kapitel 2) erfolgt teilweise eine Differenzierung zwischen einem Squat und einem Squat-ähnlichen Schienenfehler (Stud). Aufgrund ihres äußerlich kaum zu unterscheidenden Erscheinungsbildes werden der Squat und der Squat-ähnliche Schienenfehler Stud sowie andere bleibende geometrische Abweichungen der Schienenoberfläche sowohl mit als auch ohne Risse, deren geometrische Dimensionen vergleichbar mit jenen von Squats oder Studs sind, in dieser Arbeit als ein Typ Schienenfehler, Squat genannt, betrachtet.

White Etching Layer (WEL) werden im Eisenbahnwesen und teilweise auch in anderen Ingenieurbereichen Materialschichten genannt, welche im mit Nital geätzten Zustand weiß erscheinen. Abbildung 2 zeigt einen WEL auf einer mit Nital geätzten Schienenoberfläche.

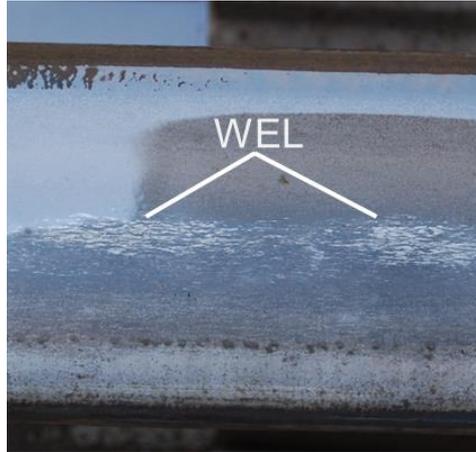


Abbildung 2: White Etching Layer (WEL) auf einer Schienenoberfläche.

Welche Mikrostruktur ein Schienen-WEL aufweist, scheint laut Literatur nicht eindeutig zu sein. Dieser Zustand ist auch nicht verwunderlich, da Rad-Schiene-Kontakteffekte „unkontrolliert“ im Vergleich zu Metallbehandlungsprozessen (z.B. Wärmebehandlungen) ablaufen und somit nicht mit einer durchgehend homogenen Gitterstruktur zu rechnen ist. Teilweise wird der Schienen-WEL mit Martensit bzw. Martensit-ähnlichen Strukturen in Verbindung gebracht, was ein Hinweis auf eine Temperatureinwirkung bei dessen Entstehung sein kann. Dem WEL werden Eigenschaften wie eine erhöhte Härte im Vergleich zum restlichen Schienenmaterial und ein sprödes Verhalten zugesprochen. (vgl. Kapitel 2 und Kapitel 3)

1.2 Motivation

Bei der Eisenbahn sowie bei anderen spurgeführten Verkehrssystemen laufen Räder auf Schienen. Schienen sind in diesem System hochbelastete Bauteile und weisen daher verschiedene Formen von Verschleißerscheinungen und Schädigungen auf. Diese Schienenfehler können in gravierenden Fällen zu Schienenbrüchen führen. Um Unfälle zu vermeiden und die Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit des Systems zu gewährleisten, entstehen hohe Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen. Erkenntnisse über die Entstehung und Entwicklung von Schienenfehlern sollen helfen, deren Auftreten grundsätzlich zu vermeiden und die Instandhaltungsmaßnahmen zu minimieren.

Schon in den 1950er Jahren wurde in Japan das erste Mal vom Schienenfehler *Squat*, damals noch *Black Spot* (schwarzer Fleck) genannt, berichtet [2]. Trotz der jahrzehntelangen Bekanntheit dieses Schienenfehlers gibt es keine einheitliche Theorie zu dessen Bildung. Die verschiedenen Erklärungsansätze reichen von der Initiierung aufgrund erster Risse in stark deformierten Oberflächenschichten der Schiene, Entstehung infolge von Materialinhomogenitäten bis zu einer ersten geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche. Die Forschungen konzentrierten sich dabei auf die Bildung und das Wachstum des Rissystems von Squats und auf metallurgische Untersuchungen. Im Vergleich dazu war das charakteristische Erscheinungsbild des Squats kaum Gegenstand der Forschung. Bisher hat nur eine Arbeitsgruppe um Zili Li [3]-[6] versucht, die Entstehung der geometrischen Form von Squats mit Hilfe einer Finite Elemente Simulation abzubilden. Der hohe Rechenzeitbedarf eines solchen Modells beschränkt eine Simulation auf wenige Überrollungen. Für die Entstehung von Squats sind jedoch mehrere Millionen Tonnen örtliche Belastungen (MGT – Million Gross Tons) notwendig [7]. Aussagen aus einer Simulation von wenigen Überrollungen können daher nur hypothetisch gesehen werden.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, Erkenntnisse über die Initiierungs- und Wachstumsmechanismen von Squats zu gewinnen. Dabei soll die Rolle von Materialinhomogenitäten in Form von White Etching Layer bei der Entstehung von Squats untersucht werden. Mechanismen, die zum charakteristischen äußeren Erscheinungsbild führen können, sollen gefunden und mit Hilfe von Simulationen nachgebildet werden.

Erkenntnisse aus der Literatur über den WEL und den Schienenfehler Squat

Schon im Jahr 1982 beschrieben Clayton und Allery [9] die Entstehung von Squats, welche damals aufgrund ihrer Verfärbung noch „Black Spots“ genannt wurden. Ihre Arbeit basiert dabei auf Streckenbesuchen mit photographischen Dokumentationen sowie auf metallurgischen Laboruntersuchungen von 50 defekten Schienenteilen.

In ihrer Arbeit [9] unterscheiden sie zwischen zwei Entstehungsmechanismen. Einerseits erklären sie die Entstehung von Squats als Folge von kreisförmigen Vertiefungen der Schienenoberfläche. Sie wurden auf den untersuchten Streckenabschnitten periodisch im Abstand von 3 m gefunden. Dieser Abstand entspricht ungefähr dem Umfang eines Schienenfahrzeugrades. Nach Clayton und Allery könnten die Vertiefungen durch Eindrücken der Schienenoberfläche aufgrund eines fremden extrem harten Objektes auf einem Rad verursacht worden sein. Die Vertiefungen hatten einen Durchmesser von zirka 5 mm und eine Tiefe von 2 mm. Aufgrund der Belastungen durch den Verkehr sollen sich diese Vertiefungen teilweise verflachen. Dabei entsteht ein Materialfluss vom Rand der Vertiefung zu dessen Mitte. An den Orten mit der höchsten Scherung des Materials entwickeln sich Risse, welche in die Tiefe der Schiene wachsen. Durch das Rissystem unter der Oberfläche erfährt die Schienenoberfläche weniger Stützwirkung während der Überrollung durch weitere Fahrzeuge. Aufgrund weiterer Belastungen kommt es in diesem Bereich zu einem zur Schienenlängsrichtung lateralen Materialfluss. Die Schienenoberfläche senkt sich bis zu einem Millimeter. In diesem Bereich kommt es nur mehr zu wenigen Rad-Schiene-Kontakten. Korrodiertes Material, welches zu einer lokalen Verfärbung führt, wird aus diesem Grund nicht mehr weg verschlissen.

Die zweite Squat-Initiierungsmöglichkeit, die Clayton und Allery [9] in ihrer Arbeit beschreiben, ist jene durch Schienenfahrkanten-Risse, die zu einer Schwächung des Schienenmaterials führen können. Die weitere Entwicklung der Absenkung der Schienenoberfläche ist mit jener, verursacht durch initiale Vertiefungen, äquivalent.

Erste geometrische Abweichungen der Schiene als Grund für die Entstehung von Squats führten später auch andere Autoren, wie zum Beispiel Kondo et al [7] oder die Arbeitsgruppe um Li und Zhao [3] [4] [5] [6] [8], an. Die Arbeitsgruppe um Li und Zhao konnte bei einer mehrjährigen Feldüberwachung von Schienen in den Niederlanden die Beobachtungen von Clayton bestätigen, dass aus ersten geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche Squats entstehen können. Bei einigen dieser geometrischen Defekte wurden mit Hilfe von Wirbelstrom- und Ultraschalluntersuchungen keine Risse festgestellt. Mit Hilfe von Ergebnissen eines dreidimensionalen Finite Elemente Modells und der Feldbeobachtungen wurde die Entstehung von Squats aufgrund von hochfrequenten Rad-Schiene-Interaktionen, ausgelöst durch die initialen geometrischen Abweichungen, beschrieben. Die Entstehung des für Li et al „lungenförmigen“ äußeren Erscheinungsbildes von Squats wird dabei folgendermaßen beschrieben: Die beobachtete

initiale geometrische Abweichung wächst durch die Belastungen der Überrollungen und bildet einen „Lungenflügel“ des Squats. Diese geometrische Abweichung führt bei den weiteren Überrollungen zu dynamischen Rad-Schiene-Kontaktkräften, welche eine weitere geometrische Abweichung der Schienenoberfläche (zweiter „Lungenflügel“ des Squats) verursachen. Dabei treten sowohl plastische Verformungen als auch Verschleiß auf. Diese hochfrequenten Rad-Schiene-Interaktionen sind von der Größe der initialen geometrischen Abweichung abhängig. Feldbeobachtungen zeigten, dass relativ kleine Defekte mit einem Durchmesser von zirka 6-8 mm in den meisten Fällen von der Oberfläche weg verschliffen wurden. Die von der Arbeitsgruppe um Li und Zhao aufgestellte Finite Elemente Simulation konnte aufgrund des Rechenzeitaufwandes nicht den gesamten Entstehungszeitraum von Squats abbilden. Vielmehr konnte sie nur auf Basis von wenigen simulierten Überrollungen auf die weitere Entwicklung der Squats schließen.

An dieser Stelle soll eine Statistik in einer Arbeit von Li et al [3] erwähnt werden, die zeigt, dass in einem untersuchten Netzabschnitt rund 74 % der gefundenen Squats im Schienenbereich über Schwellen auftreten. Daraus schlossen Li et al [3], dass verschiedene Steifigkeiten und Dämpfungseigenschaften des Fahrweges die Entstehung von Squats begünstigen. 17 % der Squats wurden im Bereich von Schienenschweißungen gefunden, was Li et al [3] auf Materialhärtevariationen im Bereich der Schweißungen zurückführten. Eine Messung des Schienenprofils im Bereich einer Schweißung zeigte auch eine geometrisch abweichende Schienenoberfläche.

Neben den Veröffentlichungen von Clayton et al sowie Li und Zhao et al, die sich unter anderem mit der Entstehung des äußeren geometrischen Erscheinungsbildes von Squats beschäftigten, gibt es viele metallurgische und tribologische Untersuchungen von Squats. Viele Veröffentlichungen konzentrieren sich dabei auf die Entstehung und Entwicklung der Squat-Risse.

Die Veröffentlichungen der Arbeitsgruppen um Kerr und Marich [10] [11] basieren auf Untersuchungen von Squats des Australischen Schienennetzes. Sie unterscheiden zwischen Schienenlaufflächen- und Schienenfahrkanten-Squats. Die erste Gruppe der Squats wurde vermehrt auf gerader Strecke oder auf der inneren Schiene in Bögen gefunden. Laut den Untersuchungen könnten diese Schienenlaufflächen-Squats durch einen White Etching Layer (WEL) initiiert werden. Der WEL weist laut Kerr und Marich deutlich erhöhte Härtewerte (bis ≈ 750 HB) im Vergleich zum restlichen Schienenmaterial auf. In dieser spröden Schicht können vertikale Risse entstehen, die weiter in das Basismaterial der Schiene wachsen und sich unter Umständen dort auch verzweigen können. Im Gegensatz dazu fanden Kerr und Marich bei ihren Untersuchungen nicht bei allen Schienenfahrkanten-Squats WEL. Jene Squats, die keinen WEL aufwiesen, wurden laut Kerr und Marich durch sogenannte Gauge Corner Checking, Risse im Bereich der Fahrkante, ausgelöst. Andere Initiierungsmöglichkeiten von Squats, wie zum Beispiel Schleuderstellen, werden in dieser Arbeit nicht ausgeschlossen. Ein Simulationsmodell zur Stützung ihrer Hypothesen veröffentlichten Kerr und Marich nicht.

Grassie [1] [12] [13] unterscheidet in seinen Veröffentlichungen zwischen Squats und Squat-ähnlichen Defekten, die er „Studs“ nennt. Beide Fehler ähneln einander insbesondere in ihrem äußeren „lungenähnlichen“ Erscheinungsbild. Beide Defekte weisen nach Grassie scheinbar zwei Vertiefungen der Schienenoberfläche auf. Squats scheinen nach Grassie jene Defekte zu sein, die Kerr und Marich [10] [11] als Schienenfahrkanten-Squats bezeichneten. Als Studs ordnet Grassie die von Marich und Kerr beschriebenen Laufflächen-Squats ein. Grundsätzlich scheinen Studs im Gegensatz

zu Squats nicht durch hohe plastische Scherverformungen von oberflächennahen Schichten initiiert zu werden. Vielmehr fand Grassie bei seinen untersuchten Studs WEL. Studs als Folge von thermischer Schädigung der Schiene scheinen somit nicht ausgeschlossen zu sein. Grassie fand bei seinen Untersuchungen keine Anzeichen, dass das Risswachstum bei Studs durch Flüssigkeitseinschluss, wie es bei Squats teilweise vermutet wird, verursacht wird.

Fletcher [14] untersuchte mit Hilfe eines zweidimensionalen Randelementmodells den Einfluss von thermischer Belastung auf das Risswachstum von kleinen, knapp unter der Oberfläche liegenden, initialen Rissen. Dabei stellte sich heraus, dass sich deutlich erhöhte Temperaturen von über 500°C bis 1000°C positiv auf das Risswachstum auswirken könnten.

Den Einfluss eines Flüssigkeitseinschlusses in einem Riss untersuchte die Arbeitsgruppe um Bogdński [15] [16] [17]. Mit Experimenten konnten nur geringe Unterschiede im Risswachstum zwischen trockenen und feuchten Testbedingungen nachgewiesen werden. Mit sowohl zwei- als auch dreidimensionalen Finite Elemente Modellen führten Bogdński et al weitere Untersuchungen bezüglich des Einflusses von Rissen in feuchten Umgebungen durch. Die Simulationen bestätigten zum Teil die experimentellen Ergebnisse, dass das Eindringen von Flüssigkeit in Rissen während der Rissöffnungsphase nur bis zu einer gewissen Zuggeschwindigkeit und damit Rissöffnungsgeschwindigkeit möglich scheint. Wie solche Risse an der Oberfläche entstehen und warum Squats ihr charakteristisches äußeres Erscheinungsbild erhalten, wurde von Bogdński et al mit ihren Simulationsmodellen nicht beschrieben.

Mechanische und metallurgische Untersuchungen von Schienen mit Squats führte die Arbeitsgruppe um Pal [18] [19] [20] [21] durch. Die Schienen wurden optisch, mit einem Elektronenmikroskop, mit Ultraschall und mit einem Härteprüfgerät untersucht. Auf Basis dieser Untersuchungen schlossen Pal et al, dass Risse sowohl durch WEL als auch durch plastische Verformungsprozesse entstehen können. Den Wachstumsprozess solcher Risse, sowohl in als auch gegen die Fahrtrichtung, führten Pal et al auf die verschiedenen Beanspruchungen, denen ein solcher initiiertes Riss während der Überfahrt eines Rades ausgesetzt ist, zurück. In derselben Arbeitsgruppe um Pal wurde auch ein dreidimensionales Finite Elemente Modell eines Schienenkopfes mit einem initialen Riss im Bereich des Fahrspiegels entwickelt. Mit diesem Modell wurde unter anderem der Einfluss von Wasser auf das Wachstum eines Risses untersucht. Die Entstehung des äußeren Erscheinungsbildes von Squats war nicht Gegenstand der Untersuchungen mit dem entwickelten Modell.

Auf Basis von umfangreichen metallurgischen Untersuchungen erstellten Steenbergen und Dollevoet je einen Fachartikel über die Initiierung [22] und über den Wachstumsprozess [23] von Squats. Ihre Arbeit wurde durch kein Simulationsmodell gestützt. Sie beschreiben die Entstehung von Squats aufgrund eines WEL auf der Schienenoberfläche. Mikroskopisch kleine Schädigungen dieser Schicht führen bei passender Anordnung zu einem ersten Anriss. Dieser Riss kann einige Zentimeter in die Länge wachsen und erreicht dabei einige Millimeter an Tiefe, bevor er sich nur mehr in die Tiefe ausbreitet. Ein weiterer Riss entwickelt sich langsam und entgegengesetzt nahe der Oberfläche. Es kommt zu einer Bildung einer Rissterrasse in wenigen Millimetern Tiefe. Oxidationsprozesse scheinen beim Risswachstum insbesondere ab jener Tiefe, in der die Perlitstruktur keine Verformungen mehr aufweist, eine Rolle zu spielen. Die Risse beeinflussen auch die Spannungsverteilung im Rad-Schiene-Kontakt, welche zu einem „Setzen“ des Schienenmaterials über den Rissen führen kann. Durch das Setzen des Schienenmaterials können die Räder in diesem Bereich die Schiene teilweise nicht mehr berühren. Ähnlich wie schon Clayton und Allery [9] erklären Steenbergen und Dollevoet [22] [23] die

Verfärbung im Bereich des Squats aufgrund von korrosiven Produkten, die wegen der geringen Anzahl an Rad-Schiene-Kontakten aufgrund der Vertiefung nicht verschlissen werden. Das korrosive Material könnte dabei teilweise aus den Rissen stammen.

Grundsätzlich ist sowohl die Entstehung von WEL als auch deren Kristallstruktur, obwohl teilweise mit Martensit oder Martensit-ähnlichen Strukturen in Verbindung gebracht, in der Literatur nicht eindeutig geklärt.

Unter anderem wird bei der Entstehung von zwei verschiedenen Theorien (vgl. [22] [45] [46] [58] [59]) ausgegangen, wobei insbesondere die erste Theorie der WEL-Entstehung auf das Vorkommen von Martensit oder Martensit-ähnlichen Kristallstrukturen des WEL basiert. Die erste Theorie geht dabei von einem thermisch getriebenen Prozess aus, bei dem eine entsprechende einzelne Belastung, zum Beispiel hoher Schlupf, für die Entstehung eines WEL ausreichend ist. Die zweite Theorie geht von massiven Umformprozessen aus, die akkumuliert zu Phasenänderungen des Materials führen und so einen WEL erzeugen könnten.

Carroll und Beynon [24] [25] untersuchten das allgemeine Rollkontakt-Ermüdungsverhalten eines WEL mit Hilfe von Twin Disc Tests im Labor. Der WEL wurde dazu auf den Scheiben auf zwei Arten hergestellt: mit Hilfe eines Punktschweißgerätes, dessen Wärmeeintrag ausreichte, um lokal Martensit herzustellen, und durch hohe Relativgeschwindigkeiten zwischen zwei rotierenden Scheiben. Es folgten zyklische Belastungen der Scheiben im Twin Disc Testverfahren. Die Untersuchungen der Scheiben nach diesem Verfahren brachten Risse sowohl im WEL als auch im Übergangsbereich zwischen Perlit und WEL zum Vorschein.

Simon et al [26] gehen von verschiedenen Mechanismen und deren Kombinationen aus, die zu einer Squat-Initiierung führen können. Insbesondere die Kontaktbedingungen müssen im Bereich der Squats sehr unüblich und speziell sein. Es wurden Laboruntersuchungen an Schienenteilen aus dem Bahnbetrieb durchgeführt. Diese Schienenstücke stammten von vier verschiedenen Standorten und waren jeweils von mehreren Squats befallen. Die Untersuchungen ergaben, dass die Schienen im Bereich der Squats in Längsrichtung in mehrere Streifen eingeteilt werden können. Dabei unterscheiden sich diese jeweils in der Morphologie sowohl an der Oberfläche als auch im Material darunter. Teilweise weisen die Streifen auch einen WEL auf. Die Übergangsbereiche der einzelnen Streifen scheinen gute Bedingungen für die Rissinitiierung zu bieten. Den gesamten Entstehungsprozess, insbesondere dessen charakteristisches äußeres Erscheinungsbild, versuchen Simon et al weder mit einer Hypothese noch mit einem Simulationsmodell zu beschreiben.

Die Ergebnisse [66] [67] der Arbeitsgruppe um Albert und Scheriau zur Entstehung von Squats basieren sowohl auf Beobachtungen von Schienen im Betrieb, auf Untersuchungen im Labor als auch auf Simulationen mit einem 3D Finite Elemente Modell. Mit Hilfe einer sogenannten Schädigungstreppe fassen sie die bei ihren Untersuchungen gefundenen Einflussparameter der Squat-Bildung zusammen. Zu diesen Einflussparametern gehören die Systemsteifigkeit, die Traktion, der Verschleiß, die Kontaktbedingungen und der Initiierungspunkt eines Squats. Eine Squat-Initiierung scheint nur unter gewissen Wechselwirkungen mehrerer Parameter der Schädigungstreppe möglich zu sein. Laut den Untersuchungen können Squats grundsätzlich auf allen Schienenstählen in An- und Abwesenheit eines WEL auf der Schienenoberfläche entstehen. Eine Voraussetzung scheint dafür jedoch eine konstante und dauerhafte Überbelastung des Fahrspiegels zu sein. Die Belastungen sind insbesondere von den Rad-Schiene-Kontaktinteraktionen abhängig.

Charakterisierung von Squats anhand von Untersuchungen einer Schiene aus dem Betrieb

Die für dieses Projekt untersuchten Squats befanden sich auf einer Schiene auf einem Ausweichgleis direkt im Bahnhofsbereich in Marthalen (Schweiz). Marthalen liegt an der eingleisigen Strecke, die von Zürich nach Winterthur führt und neben wenigen Güterzügen regelmäßig von einem Regionalpersonenzug befahren wird. Die tägliche Last beträgt dabei zirka 5000 t. Durch die Eingleisigkeit der Strecke wird das Ausweichgleis bis auf wenige Ausnahmen nur in eine Richtung befahren.

Obwohl Squats seit Jahren entdeckt werden und äußerlich immer ein ähnliches Erscheinungsbild aufweisen, ist in der Literatur keine genaue Beschreibung der geometrischen Abmessungen verfügbar. Vielmehr wird das äußere Erscheinungsbild von Squats als „lungenförmig“ beschrieben (vgl. Kapitel 2), was den Leser vermuten lässt, dass es sich bei Squats um zwei aneinandergereihte Vertiefungen (zwei Lungenflügel) handelt.

Die geometrische Form des Schienenprofils im Bereich von Squats gibt auch Aufschluss über den möglichen Wachstumsmechanismus. Plastische Verformung würde zu hügelartigen Strukturen nahe der Squats führen. Diese müssten ähnlich große Volumina wie das aus den Vertiefungen der Schienenoberfläche verschobene Material aufweisen. Ein Wachstumsmechanismus der Geometrie, der großteils durch Verschleiß getrieben ist, würde hingegen zu einem reinen lokalen Verlust des Materials führen. Plastische Verformungen im Sinne von lokalen Materialverschiebungen, gefolgt von Verschleiß, können dennoch nicht ausgeschlossen werden.

3.1 Messergebnisse

Die 14 vorgefundenen Squats befanden sich auf einer Schiene in einem Bereich von zirka zehn Metern. Auf der gegenüberliegenden Schiene wurden keine Squats gefunden.

Abbildung 3 zeigt einen Squat stellvertretend für alle vorgefundenen. Auf diesem Bild sind die typische Längs- und Querabmessung der Squats aus Marthalen sichtbar. Im Durchschnitt hatten die Squats eine Länge von 60 – 80 mm und eine Breite von 50 – 60 mm. Auch der für Squats charakteristische Oberflächenriss in Form eines „V“ ist auf dem Bild erkennbar.

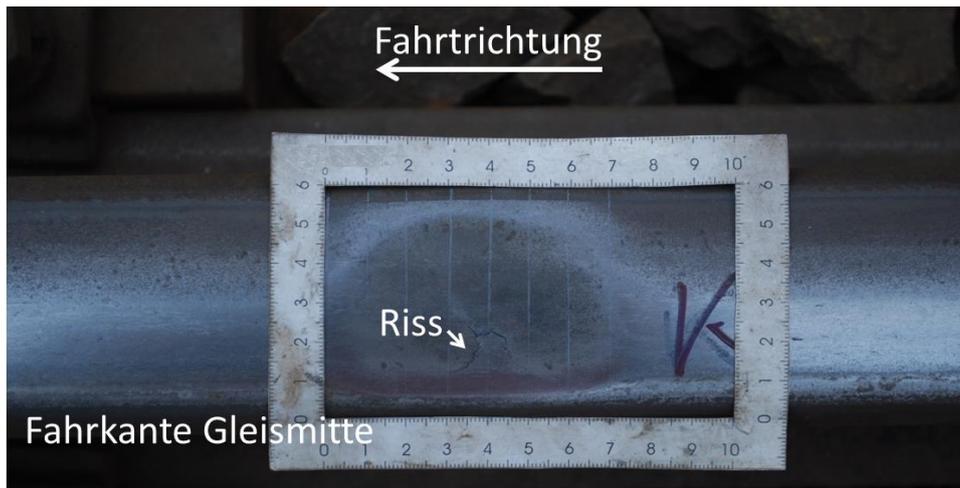


Abbildung 3: Vermessener Squat aus Marthalen. Der Riss an der Fahrkante in Richtung Gleismitte ist deutlich sichtbar.

Für die Untersuchung des Fahrspiegels wurde vor einer Zugüberfahrt der Schienenkopf mit weißer Farbe komplett besprüht. Die Farbe wurde durch die Räder bei der Überfahrt teilweise entfernt und der Fahrspiegel wurde sichtbar.

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung. Durch die lokale geometrische Abweichung der Schiene im Bereich der Squats kommt es zu einer veränderten Rad-Schiene-Kontaktsituation. Der Fahrspiegel wird beidseitig nach außen in Richtung Schienenkanten gedrängt.



Abbildung 4: Variation des Fahrspiegels, verursacht durch einen Squat. Der Fahrspiegel wurde mit Hilfe von weißer Sprühfarbe, welche durch die Räder eines Zuges teilweise entfernt wurde, sichtbar gemacht.

Abbildung 5 zeigt einen Schienenabschnitt zwischen zwei Squats, welcher mit Nital geätzt wurde. Dadurch kann der sogenannte White Etching Layer (WEL), der sich im Bereich des Fahrspiegels befindet, sichtbar gemacht werden. Man erkennt, dass dieser nicht durchgehend auf der Schienenoberfläche vorhanden ist. Aus diesem Grund wird dieser WEL als „lokal“ kategorisiert. Oberflächen-Härtemessungen der Schiene ergaben, dass die Bereiche mit WEL erhöhte Härtewerte (bis ≈ 900 HV 0,2) gegenüber der restlichen Schienenoberfläche aufwiesen.

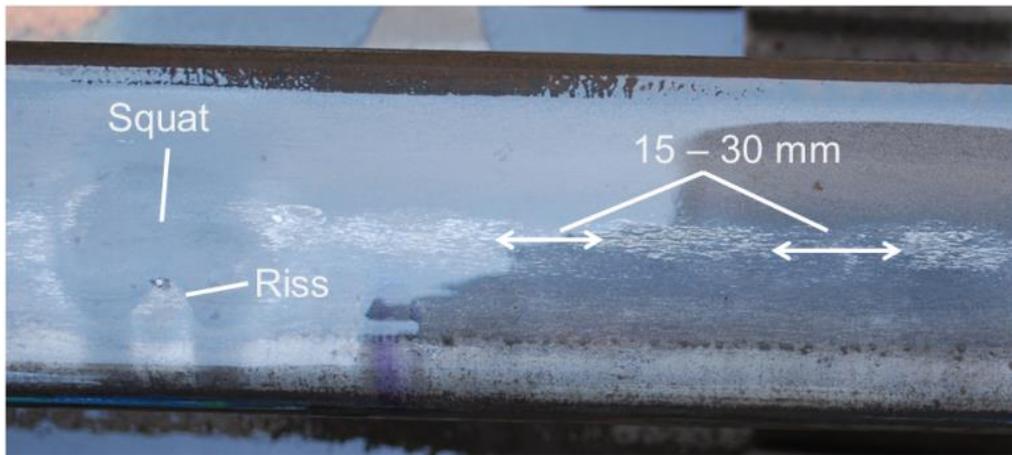


Abbildung 5: White Etching Layer (WEL) auf der Schiene im Bereich des Fahrspiegels, sichtbar gemacht durch Ätzen mit Nital. Es sind kurze Abschnitte von 15-30 mm Länge ohne WEL erkennbar.

Einige Monate nach den Untersuchungen der Schienen vor Ort wurden diese im Zuge von Instandhaltungsmaßnahmen ausgebaut.

Es konnte eine dreidimensionale optische Schienengeometrievermessung der Squats mit Hilfe eines Systems von Alicona am Österreichischen Exzellenzzentrum für Tribologie AC2T in Wiener Neustadt durchgeführt werden. Insgesamt wurden die Oberflächen von neun Squats vermessen.

Abbildung 6 zeigt ein Ergebnis dieser Vermessung. Die Farben stellen dabei die vertikale Höhe der Oberfläche dar. Eine wie in der Literatur (vgl. Kapitel 2) beschriebene lungenflügelähnliche Geometrie in Form von zwei Senken ist nicht erkennbar. Die vermessenen Squats aus Marthalen weisen eine Senke mit einer Tiefe von 0,25 mm bis 0,3 mm auf. Deutliche Erhebungen der Geometrie seitlich, vor oder nach dem Squat sind bei den Vermessungen nicht aufgefallen. Massive plastische Verformungen aus dem Squat-Bereich hinaus in dessen Umgebung können daher ausgeschlossen werden.

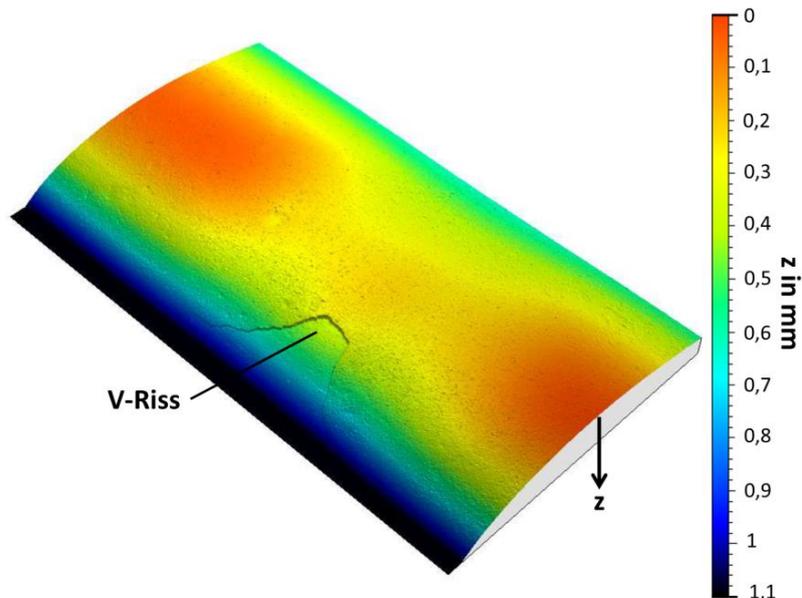


Abbildung 6: Dreidimensionale Alicona Vermessung eines Squats. Alle neun vermessenen Squats zeigten ein ähnliches Erscheinungsbild bei der Vermessung.

Hypothesen zur Entstehung der Squats

Auf Basis der Literatur aus Kapitel 2 und der Untersuchungsergebnisse aus Kapitel 3 wurden Hypothesen zur Initiierung und zur Entwicklung von Squats erarbeitet. Die grundsätzliche schematische Darstellung dieser Hypothesen in Abbildung 7 dient als Basis der weiteren Arbeit.

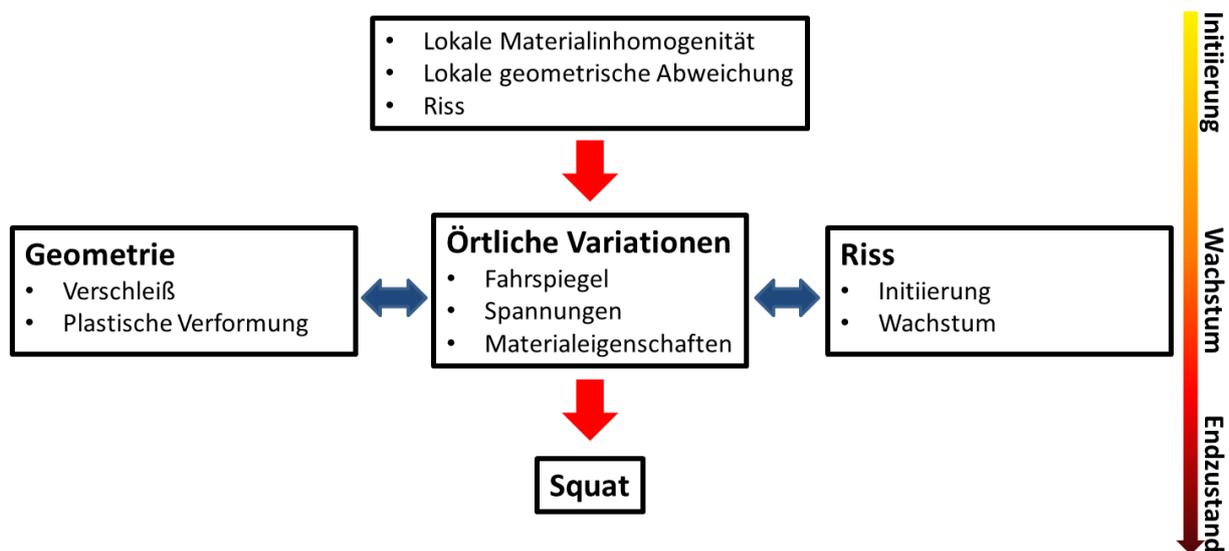


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Zusammenhänge und Mechanismen zur Initiierung und zur Entwicklung des Schienenfehlers Squat. Eine Untersuchung von Squats auf Schienenoberflächen aus dem Betrieb zeigte, dass massive plastische Verformungen des Materials aus dem Squat-Bereich hinaus in dessen Umgebung ausgeschlossen werden können (vgl. Kapitel 3.1). Plastische Verformungen im Sinne von lokalen Materialverschiebungen, gefolgt von Verschleiß, könnten dennoch auftreten.

Squats sind im Gegensatz zu anderen Schienenfehlern, wie Schienenfahrkanten-Risse (Head Checks), die im Bogen über einen großen Bereich an der Schienenkante vorkommen können, lokale Fehler¹ der Schienenoberfläche. Grundsätzlich müssen daher die diversen Initiierungsmechanismen zu einer örtlichen Variation der Effekte im Rad-Schiene-Kontakt führen. Lokale Variationen der (Kontakt-) Spannungen, des Fahrspiegels und der Materialeigenschaften, verursacht durch Risse, geometrische Abweichungen der Schienenoberfläche (z.B. Eindrückungen) oder Materialinhomogenitäten (z.B. WEL oder Schienenschweißungen), sind Effekte, die möglicherweise zu einer lokal veränderten Entwicklung der Geometrie und/oder zu einem veränderten Rissinitiierungs- und Risswachstumspotential der Schiene führen können. Eine örtlich begrenzte bleibende geometrische Abweichung der Schienenoberfläche sowie Risse in diesem Bereich können daraus entstehen. Beide Folgen sind Merkmale von Squats (vgl. Kapitel 1.1). Sind diese Effekte zu schwach ausgeprägt, so

¹ Vgl. Kapitel 3: Die geometrischen Dimensionen von Squats sind kleiner als $\approx 0,1$ m.

können Interaktionen im Laufe der Zeit abklingen und die betroffene Stelle der Schiene entwickelt sich vergleichbar mit ihrer Umgebung.

Da bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Squats (vgl. Kapitel 3) Materialinhomogenitäten in Form von WEL festgestellt wurden, konzentrieren sich die Untersuchungen dieser Arbeit insbesondere auf deren Bildung und deren weitere Rolle bei der Entstehung von Squats. Des Weiteren wurden bei den Alicona Vermessungen der Schienenoberfläche keine hügelartigen Strukturen nahe der Squat-Senke gefunden (vgl. Kapitel 3). Basierend auf diesem Messergebnis wird davon ausgegangen, dass der treibende Mechanismus der geometrischen Entwicklung der Schienenoberfläche der Verschleiß ist. Lokal begrenzte plastische Verformungen werden in den folgenden dargestellten Squat-Entstehungshypothesen dennoch nicht ausgeschlossen.

Bei der Bildung von WEL geht diese Arbeit von der in der Literatur (vgl. Kapitel 2) genannten Hypothese aus, dass ein WEL aufgrund einer einmaligen Einwirkung hoher Temperaturen auf der Schienenoberfläche entstehen kann. Solche Temperaturen könnten durch hohe Relativgeschwindigkeiten zwischen Rad und Schiene verursacht werden.

Auf Basis eines vorhandenen WEL ergeben sich Squat-Initiierungsmöglichkeiten durch

- erste geometrische Abweichungen der Schienenoberfläche in Form von Ausbrüchen aus dem WEL,
- Rissbildung im WEL oder
- lokale Materialinhomogenitäten in Form von einzelnen WEL-Bereichen mit einem gewissen Abstand zueinander (vgl. WEL-Bereiche auf der Schienenoberfläche in Marthalen, Abbildung 5).

Natürlich könnten die Squat-Initiierungsmöglichkeiten auch kombiniert auftreten.

Die genannten Squat-Initiierungsmöglichkeiten könnten das folgende Squat-Wachstumsverhalten verursachen (vgl. mit Abbildung 7):

- a. Erste geometrische Abweichungen z.B. in Form von Ausbrüchen könnten die bei den Squats in Marthalen beobachteten Variationen des Fahrspiegels (vgl. Abbildung 4) verursachen. Diese Variationen des Fahrspiegels würden auch zu lokal veränderten (Kontakt-) Spannungen und damit einerseits zu einer örtlich unterschiedlichen geometrischen Entwicklung der Schienenoberfläche und andererseits zu einem lokal unterschiedlichen Rissinitiierungs- und/oder Risswachstumspotential führen. Ein so entstandener Riss würde zusätzlich auch die unter b beschriebenen Interaktionen hervorrufen.
- b. Grundsätzlich kann ein im Schienenmaterial entstandener Riss zu verschiedenen lokalen Variationen der Effekte im Rad-Schiene-Kontakt (z.B. Variationen des Fahrspiegels beziehungsweise der (Kontakt-) Spannungen (vgl. [55])) führen. Solche Variationen könnten z.B. durch örtliche Schwächung des Materials aufgrund eines teilweisen Verlustes der Stützwirkung im Bereich des Risses verursacht werden (vgl. Kapitel 2 bzw [9]). Wiederum würden die lokalen Variationen im Rad-Schiene-Kontakt einerseits zu einer örtlich unterschiedlichen geometrischen Entwicklung der Schiene und andererseits zu einem lokal unterschiedlichen Rissinitiierungs- und/oder Risswachstumspotential führen.
- c. Lokale Materialinhomogenitäten in Form von einzelnen WEL-Bereichen könnten zu einer Entstehung einer geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche aufgrund eines

unterschiedlichen Materialabtrags der Schiene, verursacht durch die unterschiedlichen Verschleißresistenzen der Bereiche mit und ohne WEL, führen. Eine so entstandene geometrische Abweichung würde wiederum das im Punkt a beschriebene Verhalten verursachen.

Im Gegensatz zur WEL-Entstehung, bei der auf Basis der genannten Hypothese ein einmaliges Ereignis (einmalige Temperatureinwirkung) ausreicht, ist das Squat-Wachstum ein Prozess, der sich über mehrere Millionen Tonnen an Belastungszyklen erstreckt (vgl. Kapitel 2).

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass auch jede andere äußere mechanische Einwirkung auf die Schiene (z.B. während des Einbaus, des Transportes oder auch während des Betriebes) zu initialen geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche und/oder zu Rissen in der Schiene führen kann. In dieser Arbeit werden solche Ereignisse, die möglicherweise zu einer Squat-Entstehung führen, aufgrund ihrer Zufälligkeit nicht näher betrachtet. Das Verhalten von derartigen geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche oder von Rissen sollte grundsätzlich unabhängig vom Grund ihrer Entstehung sein.

Rechenmodell

Die vollständige Überprüfung der in Kapitel 4 dargestellten Hypothesen zur Entstehung von WEL und von Squats mit Hilfe eines Rechenmodells stellt an dieses die folgenden Anforderungen:

- die dreidimensionale Abbildung der Schiene und des Rades sowie die Abbildung der Kontaktmechanik zwischen diesen beiden Körpern
- die Berechnung von mehreren hunderttausend Belastungszyklen eines Schienenabschnittes
- die Berechnung der Temperatur, sowohl auf als auch unter der Oberfläche der Schiene, in Abhängigkeit der Belastungen im Rad-Schiene-Kontakt
- die Abbildung der Materialumwandlungsprozesse, die zu einem WEL führen können
- die Abbildung der Rissinitiierung sowie des Risswachstums
- die Abbildung aller durch einen Riss oder ein Rissystem verursachten Interaktionen und Effekte (z.B. Schwächung des Materials)
- die Abbildung der Prozesse bei der Entstehung von Ausbrüchen aus dem WEL
- die Berechnung der durch die geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche verursachten Variationen der Effekte im Rad-Schiene-Kontakt (Fahrspiegel, Spannungen)
- die Berechnung der geometrischen Entwicklung der Schienenoberfläche aufgrund der Verschleißprozesse und der geringen Materialverschiebungen durch die plastischen Verformungen

Die Wahl des passenden Simulationswerkzeuges fiel, insbesondere aufgrund der Anforderung mehrere hunderttausend Belastungszyklen eines Schienenabschnittes zu berechnen, gegen eine rechenzeitaufwändige Abbildung der Problemstellungen mit Hilfe der Finite Elemente Methoden. Zudem war nicht klar, ob diese Methoden zu aufschlussreicheren Ergebnissen führen würden.

Als Simulationsumgebung wurde ein neues, modular aufgebautes Rechenmodell entwickelt. Jedes Modul entspricht dabei einem Modell, welches für die Lösung einer oder mehrerer der genannten Anforderungen bestimmt ist. Abbildung 8 zeigt eine schematische Darstellung des Modell-Algorithmus. Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Module des Rechenmodells kann in den Kapiteln 5.1 bis 5.7 bzw. in den angeführten Literaturstellen gefunden werden.

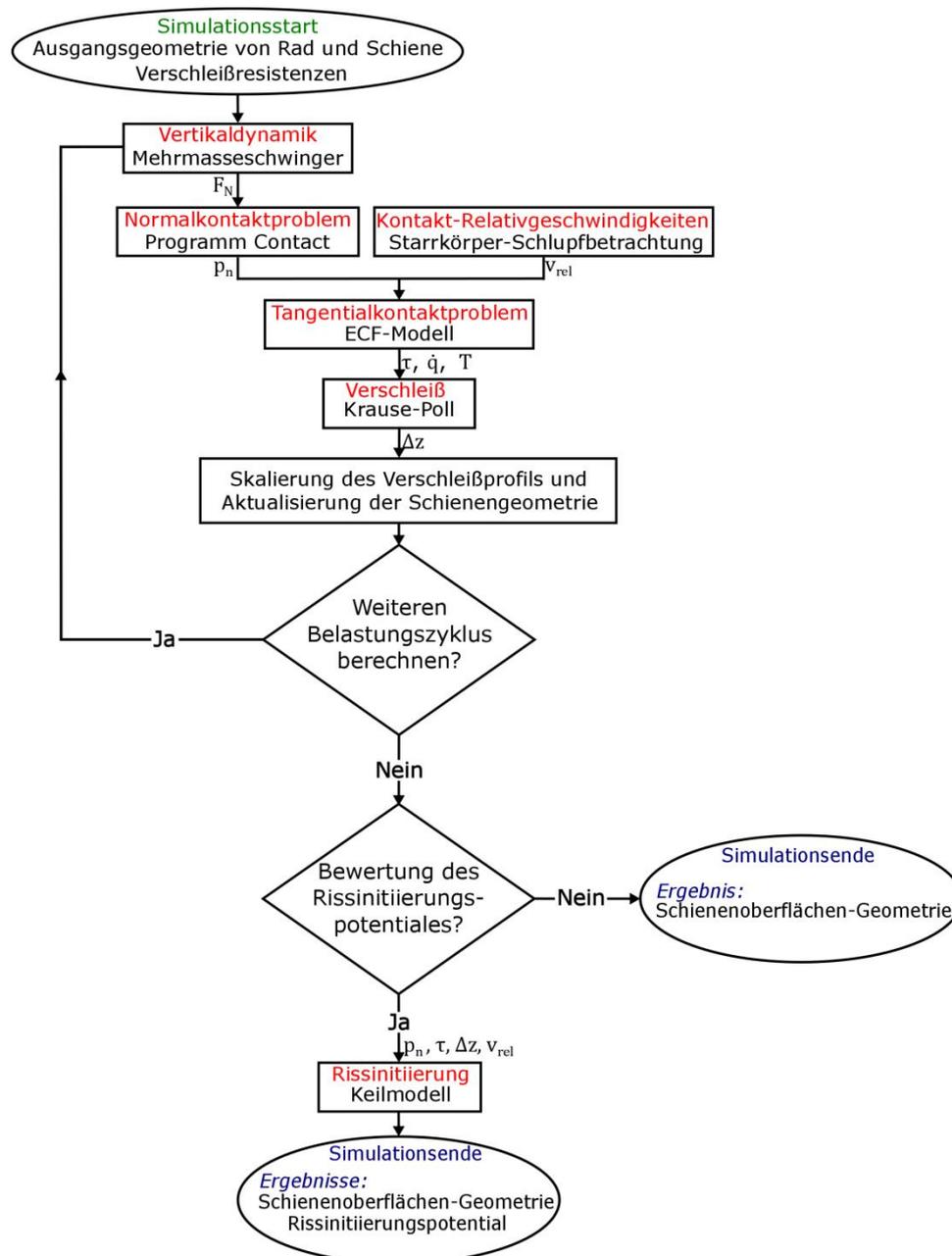


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Rechenmodell-Algorithmus.

Das Rad und der betrachtete Schienenabschnitt werden diskretisiert. Die einzelnen Punkte (*Knotenpunkte*) bilden miteinander verbunden Netze, welche die Oberfläche von Rad und Schiene beschreiben (vgl. Kapitel 5.1). An den Knotenpunkten werden die Berechnungen durchgeführt. Die Ausgangsgeometrie der Schienenoberfläche wird zu Beginn festgelegt. Hingegen kann für jeden berechneten Belastungszyklus ein beliebiges Radprofil gewählt werden.

Der Einfluss der Vertikaldynamik auf die Normalkraft F_N zwischen Rad und Schiene wurde durch ein Mehrmasseschwinger-Modell abgebildet (vgl. Kapitel 5.7). Das Normalkontaktproblem wurde mit der auf *Kalker's* Theorien [39] [40] [42] basierenden Software *CONTACT* [41] gelöst (vgl. Kapitel 5.2). Diese Software kann die Normalspannungen p_n in Abhängigkeit einer Normalkraft F_N auch für nicht elliptische Kontakte berechnen. Dieser Fall trifft in der vorliegenden Anwendung insbesondere bei

den auftretenden Rad-Schiene-Kontakten im Bereich der geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche zu.

Die Berechnung der Relativgeschwindigkeiten v_{rel} (Starrkörperschlupf s) im Kontakt erfolgte im Rechenmodell nach der in der Literatur [28] [40] [42] [43] [44] [60] angeführten Vorgehensweise der Starrkörper-Schlupfbetrachtung (vgl. Kapitel 5.3).

Die Berechnungen der Tangentialspannungen τ , der Reibleistungsdichte \dot{q} und der Temperaturen T im Rad-Schiene-Kontakt erfolgte mit dem *ECF-Modell* [28] [61] (vgl. Kapitel 5.4). Dieses Modell berücksichtigt bei der Ermittlung des Kraftschlusses eine nachgewiesene Schicht zwischen Rad und Schiene, bestehend aus verschiedenen Partikeln (Verunreinigungen) und den Oberflächenrauigkeiten, deren Eigenschaften sowohl von der Temperatur T als auch von den Normalspannungen p_n abhängen. Durch diese Ermittlung kann von einem akkurateren Wert des Kraftschlusses ausgegangen werden als bei anderen Tangentialkontaktmodellen, bei denen der Kraftschluss einen Eingabewert darstellt. Ein weiterer Vorteil dieses Modells ist dessen implementiertes Temperaturmodell, welches die Verteilung der Temperatur T sowohl auf als auch unter der Oberfläche in Abhängigkeit der jeweils wirkenden Belastungen im Kontakt ermittelt.

Die Berechnung des Materialabtrags Δz durch Verschleiß erfolgte mit dem *Modell nach Krause und Poll* [27] (vgl. Kapitel 5.5). Bei diesem Modell ist der Materialabtrag Δz durch Verschleiß proportional zur verrichteten Reibarbeit W_f , welche sich aus der Reibleistungsdichte \dot{q} bestimmt. Um Rechenzeit einzusparen, wurde der berechnete Verschleiß einer Überrollung skaliert. Nach der Aktualisierung des Schienenprofils kann die Berechnung eines weiteren Belastungszyklus erneut gestartet werden (vgl. Abbildung 8). Da die geometrische Vermessung der Squats aus Marthalen einen Hinweis darauf gab, dass der treibende Mechanismus ihrer geometrischen Entwicklung Verschleiß und weniger plastische Verformung ist, wurde die plastische Verformung bei der Berechnung der geometrischen Entwicklung nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 3).

Das Rissinitiierungspotential wurde mit dem *Rollkontakt-Ermüdungsmodell* nach Trummer [32] [33] ermittelt (vgl. Kapitel 5.6). Da das Rissinitiierungspotential auf die Berechnungen der geometrischen Entwicklung der Schienenoberfläche im Rechenmodell keinen Einfluss hat, erfolgte dieser Schritt im Postprocessing (vgl. Abbildung 8). Untersuchungen zeigten, dass bestimmte Ausrichtungen der Materialstruktur einer dünnen Schicht nahe der Schienenoberfläche zu einer höheren Tendenz der Rissinitiierung bei Schienen führen. Bei der Beurteilung des Rissinitiierungspotentials ist dieses *Rollkontakt-Ermüdungsmodell* in der Lage, neben den auftretenden Spannungen (p_n , τ) und dem Verschleiß Δz der Oberfläche die plastische Scherverformung der dünnen oberflächennahen Schicht zu berücksichtigen.

In dieser Simulationsumgebung sind zusätzlich zur plastischen Verformung bei der geometrischen Entwicklung der Schienenoberfläche Materialumwandlungsprozesse, die Entstehung von Ausbrüchen aus WEL-Schichten, das Rissinitiierungspotential in den inneren Bereichen der Schiene mit deutlichem Abstand zur Oberfläche, das Risswachstum sowie die durch einen Riss oder ein Rissystem verursachten Interaktionen und Effekte nicht abgebildet.

In Anbetracht der Möglichkeiten des Rechenmodells wurde das folgende dargestellte Vorgehen bei den Untersuchungen gewählt:

1. In einem ersten Schritt wurde die Temperaturverteilung im Rad-Schiene-Kontakt sowohl auf als auch unter der Schienenoberfläche berechnet. Dabei sollten Zustände gefunden werden, die zu deutlich erhöhten Temperaturen im Rad-Schiene-Kontakt führen können. Da das Rechenmodell Materialumwandlungsprozesse nicht darstellen kann, wurden Versuche an einem 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand durchgeführt (vgl. Kapitel 6.1), welche zeigen sollen, ob einmalige Ereignisse unter solchen Bedingungen zu einer Entstehung eines WEL auf einer Schienenoberfläche führen können.
2. Weitere Versuche am 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand wurden durchgeführt, um zu überprüfen, ob ein WEL zu Rissen oder geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche in Form von Ausbrüchen führen kann (vgl. Kapitel 6.2). Geometrische Abweichungen und Risse stellen Möglichkeiten der Squat-Initiierung dar (vgl. Kapitel 4).
3. Mit dem Rechenmodell wurden in weiterer Folge die in Kapitel 7.1 dargestellten Parameterstudien durchgeführt. Diese sollten die in Kapitel 4 Punkt a beschriebene Möglichkeit des Squat-Wachstums überprüfen. Bei diesen Simulationen wurden erste geometrische Abweichungen der Schienenoberfläche angenommen. Das Rechenmodell ist dabei in der Lage, das lokale Rissinitiierungspotential zu ermitteln sowie die weitere geometrische Entwicklung der Schienenoberfläche aufgrund von Verschleiß zu berechnen. Der Entstehungsgrund dieser geometrischen Abweichungen wurde dabei nicht untersucht.
4. Eine weitere Simulation, dargestellt in Kapitel 7.2, sollte zeigen, inwieweit Materialinhomogenitäten in Form von einzelnen hintereinander auftretenden WEL-Bereichen mit erhöhten Verschleißresistenzen zu geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche führen können (vgl. Kapitel 4, Squat-Wachstumsverhalten c). Das weitere Verhalten einer solchen geometrischen Abweichung sollte sich von jenem, dargestellt in Kapitel 7.1, nicht unterscheiden.

Da das Rechenmodell nicht in der Lage ist Interaktionen, verursacht durch einen Riss oder ein Rissystem, zu erfassen, wird auf die Squat-Wachstumshypothese b aus Kapitel 4 in den Untersuchungen mit dem Rechenmodell nicht eingegangen. In weiterer Folge wird bei der Berechnung der geometrischen Entwicklung der Schienenoberfläche aufgrund einer ersten geometrischen Abweichung der Oberfläche bzw. aufgrund von hintereinander auftretenden WEL-Bereichen angenommen, dass kein Riss oder Rissystem auf bzw. unter der Schienenoberfläche vorhanden ist oder dessen Einfluss auf die geometrische Entwicklung vernachlässigbar ist.

Insgesamt können damit die Simulationsergebnisse Auskunft über die örtliche Entwicklung der Schienenoberfläche in Abwesenheit von Rissen sowie über das lokal mögliche Rissinitiierungspotential geben. Eine binäre Aussage, bezogen auf einen möglicherweise entstandenen Squat, ist auf Basis dieser Ergebnisse nicht möglich. Vielmehr müssen die Ergebnisse als Indiz einer möglichen Squat-Entstehung interpretiert werden (vgl. Abbildung 9).

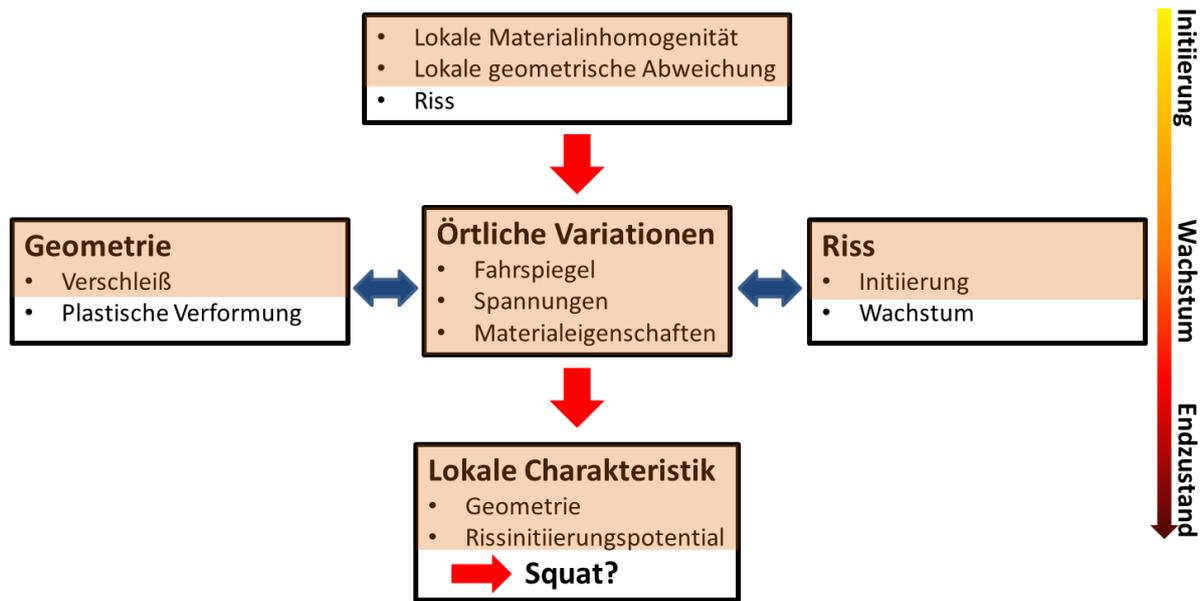


Abbildung 9: Schematische Darstellung der in dieser Arbeit untersuchten Mechanismen (farbig hinterlegt), die zu einer Squat-Entstehung führen können. Bei der Entwicklung der charakteristischen Oberflächengeometrie eines Squats werden plastische Verformungen durch das Rechenmodell nicht berücksichtigt. Untersuchungen zeigten, dass massive plastische Verformungen des Materials aus dem Squat-Bereich hinaus in dessen Umgebung ausgeschlossen werden können (vgl. Kapitel 3.1).

5.1 Erstellung der Ausgangsgeometrien

In der Simulation werden die Geometrien der Oberfläche von Rad und Schiene diskretisiert. Die einzelnen Punkte werden *Knotenpunkte* genannt. Das initiale Querprofil der Schiene kann zu Beginn der Simulation beliebig gewählt werden. Das Radprofil kann für jede der zu berechnenden Überrollungen neu gewählt werden. Die Knotenpunkte nehmen einen Abstand dsx in Richtung x (Schiene längsrichtung) und dsy in Richtung y zueinander ein (kartesisches Koordinatensystem). Grundsätzlich liegen die Knotenpunkte von Rad und Schiene an denselben Koordinaten x und y . Den Knotenpunkten der Schiene werden Profilhöhen $z(x, y)$ und jenen des Rades Profilhöhen $z_R(x, y)$ zugeordnet. Die Berechnungen im Modell erfolgen an den Knotenpunkten. Es wird angenommen, dass die berechneten Werte konstant innerhalb der Elemente sind, in deren Mitte sich die Knotenpunkte befinden. Die Elemente weisen in Richtung x eine Länge dsx und in Richtung y eine Breite dsy auf.

Eine initiale geometrische Abweichung der Schienenoberfläche kann durch Modifizierung der Profilhöhe z beliebiger Knotenpunkte erzeugt werden. Falls nicht anders angegeben, wird die geometrische Abweichung mit Hilfe der algebraischen Fläche nach Gleichung (1) beschrieben. Diese ergibt sich aus der Annahme eines rechteckigen Ausbruchs der Schienenoberfläche und eines ruckfreien Überganges zu dieser geometrischen Abweichung. A_0 ist die Amplitude, L_x die Länge und L_y die Breite der geometrischen Abweichung.

$$z_D(x_D, y_D) = A_0 \cdot 2^{16} \cdot \left(\frac{x_D}{L_x}\right)^4 \cdot \left(\frac{x_D}{L_x} - 1\right)^4 \cdot \left(\frac{y_D}{L_y}\right)^4 \cdot \left(\frac{y_D}{L_y} - 1\right)^4 \quad \text{Gl. (1)}$$

für $0 \leq x_D \leq L_x$ und $0 \leq y_D \leq L_y$

Die Einbauneigung der Schiene kann durch die Drehung um ihre Schienenlängsachse berücksichtigt werden. Das Rad überrollt die Schiene ohne Anlaufwinkel. Die Radachse liegt zu jedem Zeitpunkt parallel zur y -Koordinatenrichtung. Die Querverschiebung des Rades zur Schiene wird über dwy angegeben (in lateraler Richtung y). Der Zustand $dwy = 0$ entspricht der neutralen Position eines Radsatzes am Gleis ohne Querverschiebung zu diesem. Eine Neigung des Radsatzes aufgrund einer Querverschiebung aus seiner neutralen Position wird im Modell nicht berücksichtigt.

Für die Berechnung der Normalspannungen p_n muss die Abstandsfunktion h_N zwischen Rad und Schiene ermittelt werden. Diese ergibt sich aus der Differenz zwischen der Schienenprofilhöhe $z(x, y)$ und der Radprofilhöhe $z_R(x, y)$.

5.2 Lösung des Normalkontaktproblems von nicht elliptischen Kontakten

Für die Berechnung der Normalspannungen im Kontakt wurde das Programm *CONTACT* [41] herangezogen. Dieses Programm beruht auf den Theorien nach *Kalker* [39] [40] [42], dessen Algorithmus für nicht-elliptische Kontaktprobleme implementiert ist.

Kalkers Ansatz basiert auf der Annahme eines linear elastischen Verformungsverhaltens der beiden kontaktierenden Körper, wobei deren gemeinsamer Kontakt eben und die Kontaktgröße vergleichsweise klein gegenüber den Dimensionen der beiden Körper ist. Die Körper werden quasistatisch betrachtet (Vernachlässigung der Strukturschwingungen).

Das Programm *CONTACT* [41] stellt für jedes Element einer potentiellen Kontaktfläche C_{pot} einen Zusammenhang zwischen den durch die Kontaktierung auftretenden elastischen Verformungen und den Normalspannungen her. Dabei wird über eine Einflussfunktion berücksichtigt, dass die Spannungen in einem Element auch zu elastischen Verformungen in den anderen Elementen der potentiellen Kontaktfläche führen. Durch Superposition und Lösung dieser Zusammenhänge für alle Elemente können bei einer vorgegebenen Annäherung *PEN* der beiden Körper zueinander die Normalspannungen p_n berechnet werden.

Für die Lösung des Normalkontaktproblems benötigt *CONTACT* die Vorgabe einer diskretisierten rechteckigen potentiellen Kontaktfläche C_{pot} , innerhalb der sich der wahre Kontakt befindet. Für jedes Element dieser potentiellen Kontaktfläche muss der Abstand h_N der nicht verformten und sich in einem Punkt berührenden Körper vorgegeben werden. Durch die Vorgabe der Annäherung *PEN* der beiden Körper kann *CONTACT* die Normalspannungen p_n berechnen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Rand der potentiellen Kontaktfläche C_{pot} spannungsfrei ist.

5.2.1 Ermittlung der potentiellen Kontaktfläche und der Abstandsfunktion

Die diskretisierte potentielle Kontaktfläche C_{pot} kann für eine beliebige Radposition gefunden werden, indem der Rad- mit dem Schienenkörper geschnitten wird. Die maximale Eindringtiefe der beiden Körper ineinander ist mit dem gegebenen Wert z_{durch} bestimmt. Daraus ergeben sich ein oder mehrere gemeinsame Durchdringungsbereiche (vgl. Abbildung 10 und Abbildung 11). Die jeweils kleinsten und größten Werte der Schienenlängs- (x_{min} und x_{max}) und Schienenquerkoordinate (y_{min} und y_{max}) des jeweiligen Durchdringungsbereiches beschreiben die Grenzen des Netzes der rechteckigen potentiellen Kontaktfläche C_{pot} .

Der Algorithmus kann mehrere potentielle Kontaktflächen zu einem Zeitpunkt t_n im Modell finden, wenn diese in Schienenlängs- und Schienenquerrichtung durch zwei Diskretisierungslängen dsx bzw. dsy voneinander getrennt sind.

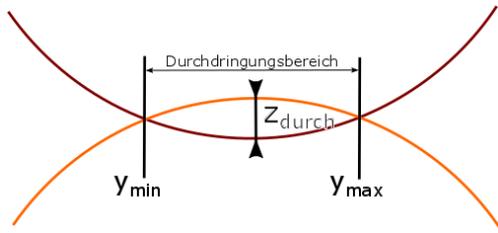


Abbildung 10: Veranschaulichung der Durchdringung zweier Körper (Schnittdarstellung) mit einer maximalen Eindringtiefe z_{durch} . In diesem Beispiel ergibt sich ein gemeinsamer Durchdringungsbereich.

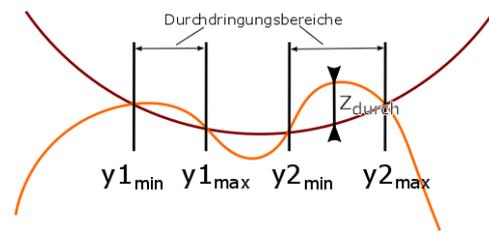


Abbildung 11: Veranschaulichung der Durchdringung zweier Körper (Schnittdarstellung) mit einer maximalen Eindringtiefe z_{durch} . In diesem Beispiel ergeben sich zwei Durchdringungsbereiche. Diese ergeben die potentiellen Kontaktflächen C_{pot} .

In einem weiteren Schritt werden für die potentiellen Kontaktflächen die Abstandsfunktionen gebildet. Dazu wird das Rad der Schiene angenähert, bis sich diese in einem Punkt berühren (vgl. Abbildung 12). Für die Elemente der potentiellen Kontaktflächen werden die Abstände h_N zwischen den beiden nicht deformierten Körpern Rad und Schiene in z-Koordinatenrichtung ermittelt (vgl. Kapitel 5.1).

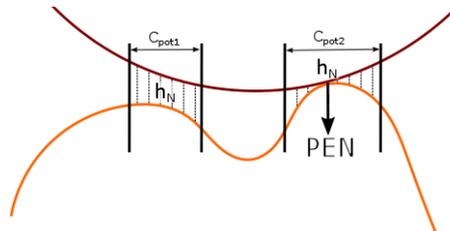


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Abstände (strichliert) zwischen den beiden sich in einem Punkt berührenden Körpern (Schnittdarstellung) mit zwei potentiellen Kontaktflächen C_{pot} (vgl. Abbildung 47). Die Annäherung PEN vom Rad an die Schiene ist dargestellt.

CONTACT kann mit der Angabe der Abstände h_N für eine potentielle Kontaktfläche und mit der Angabe einer Annäherung PEN zwischen Rad und Schiene eine Normalspannung p_{jn} für jedes Element j dieser Fläche bestimmen [41].

Bei mehreren potentiellen Kontaktflächen zu einem Zeitpunkt ist die angegebene Annäherung PEN für die Berechnung der Normalspannungen für jede potentielle Kontaktfläche gleich, da sich diese auf die „globale“ Eindringung des Rades in die Schiene bezieht (vgl. Abbildung 12). PEN wird nun solange variiert, bis Gleichung (2) erfüllt ist, wobei die Normalspannungen p_{jn} aller Elemente j aller potentiellen Kontaktflächen von der Software *CONTACT* berechnet werden. A_j ist die Fläche des jeweiligen Elements j , in der die Normalspannung p_{jn} wirkt. Die Normalkraft F_N ist für jeden Zeitpunkt t_n gegeben.

$$F_N(t_i) = \sum_j p_{jn} \cdot A_j \quad \text{Gl. (2)}$$

Im Falle, dass PEN am Ende der Variation größer als z_{Durch} ist, wird z_{Durch} entsprechend erhöht und der Algorithmus erneut gestartet.

Ist der Rand einer potentiellen Kontaktfläche zum Zeitpunkt t_n nicht normalspannungsfrei, so wird im Modell im Falle einer potentiellen Kontaktfläche diese um eine Elementenreihe oder -spalte an

der betroffenen Rechteckseite vergrößert und mit der entsprechenden neuen Abstandsfunktion *CONTACT* ein weiteres Mal aufgerufen. Im Falle von mehreren potentiellen Kontaktflächen zu diesem Zeitpunkt t_n wird z_{Durch} wiederum vergrößert und der Algorithmus erneut gestartet. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um ein Zusammenwachsen von zwei oder mehreren potentiellen Kontaktflächen zu einer nicht rechteckigen Fläche zu verhindern.

Bei der Betrachtung wird von einer ebenen Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene ausgegangen. Der Punkt O markiert dabei den Berührungspunkt innerhalb der Kontaktfläche, der sich bei der Kontaktierung der beiden Körper, betrachtet als Starrkörper, einstellen würde.

Das Rad bewegt sich mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{FZ} = |\vec{v}_{FZ}|$ und dreht sich dabei mit einer Winkelgeschwindigkeit $\omega = |\vec{\omega}|$, wobei der Winkelgeschwindigkeitsvektor $\vec{\omega}$ in Richtung der Radachse liegt. $v_{O,x}$ und $v_{O,y}$ sind die Relativgeschwindigkeiten in Schienenlängs- und Schienenquerrichtung im Punkt O . Für den Punkt O ergibt sich der Radradius $r(y_O)$.

Für die Relativgeschwindigkeit \vec{v}_{rel} innerhalb dieser Kontaktfläche ergeben sich die Zusammenhänge nach Gleichung (3) (vgl. Abbildung 13).

$$\vec{v}_{rel}(x, y) = \begin{pmatrix} v_{rel,x} \\ v_{rel,y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{O,x} - \omega \cdot (r(y) - r(y_O)) \\ v_{O,y} + \omega_n \cdot x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{FZ,x} - \omega \cdot r(y) \\ v_{O,y} + \omega_n \cdot x' \end{pmatrix} \quad \text{Gl. (3)}$$

Ausgehend von der Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{FZ,x}$ kann mit der Winkelgeschwindigkeit ω und dem Radradius $r(y)$ die Relativgeschwindigkeit $v_{rel,x}(y)$ in Schienenlängsrichtung für einen beliebigen Ort innerhalb der Kontaktfläche ermittelt werden.

Die laterale Relativgeschwindigkeit $v_{rel,y}(x)$ an einem beliebigen Ort des Kontaktes wird aus der lateralen Relativgeschwindigkeit $v_{O,y}$ im Punkt O ($v_{O,y}$ z.B. aufgrund eines Anlaufwinkels bei einer Bogenfahrt), dem Längsabstand x' (x' ausgehend von Punkt O zum betrachteten Ort des Kontaktes, vgl. Abbildung 13) und der Winkelgeschwindigkeit ω_n bestimmt. Die Winkelgeschwindigkeit $\omega_n = |\vec{\omega}_n|$ ergibt sich nach Gleichung (4) aufgrund der Neigung der ebenen Kontaktfläche (vgl. Abbildung 13, Neigungswinkel ϕ).

$$\omega_n = |\vec{\omega}_n| = |\vec{\omega}| \cdot \sin(\phi) \quad \text{Gl. (4)}$$

Implementierung im Rechenmodell

Das *Tangentialektmodell ECF* (vgl. Kapitel 5.4) sowie das *Rissinitiierungsmodell* (vgl. Kapitel 5.6) verlangen die Beschreibung der Relativgeschwindigkeit \vec{v}_{rel} in der Form des Starrkörperschlupfes \vec{s} nach Gleichung (5). [28] [40] [42] [43] [44] [60]

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_x - c_n \cdot y' \\ c_y + c_n \cdot x' \end{pmatrix} = \frac{\vec{v}_{rel}}{v_{FZ}} \quad \text{Gl. (5)}$$

Die Starrkörper-Schlupfkomponenten c_x und c_y sind dabei für den Punkt O definiert. Der globale Längsschlupf c_x ist das Verhältnis zwischen der Relativgeschwindigkeit $v_{rel,x}$ im Berührungspunkt O und der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} . Der globale Querschlupf c_y ist als das Verhältnis der lateralen Relativgeschwindigkeit $v_{O,y}$ im Berührungspunkt O und der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} definiert. Die Starrkörper-Schlupfkomponente c_n stellt dabei das Verhältnis der Winkelgeschwindigkeit ω_n zur Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} dar. Analog zum Längsabstand x' entspricht y' dem Querabstand vom Berührungspunkt O zu einem betrachteten Punkt innerhalb der ebenen Kontaktfläche (vgl. Abbildung 13). [28] [40] [42] [43] [44] [60]

Bei den durchgeführten Simulationen wurde davon ausgegangen, dass das Rad weder einen Anstellwinkel zur Schiene hat noch während der Überrollung in lateraler Richtung zur Schiene verschoben wird. Daraus ergibt sich für die laterale Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{FZ,y} = 0$ bzw. $v_{O,y} = 0$ und $c_y = 0$. Die Fahrzeuggeschwindigkeit entspricht damit $v_{FZ} = v_{FZ,x}$.

Die Starrkörper-Schlupfbetrachtung geht von einer ebenen Kontaktfläche aus. Bei der Implementierung im Rechenmodell wird die laterale Krümmung der Kontaktfläche aufgrund des Schienenquerprofils mitberücksichtigt. Der Kontaktbereich wird dazu in Querrichtung der Schiene segmentiert betrachtet (vgl. Abbildung 14). Jedes Segment entspricht einer Elementreihe (Knotenpunktreihe, vgl. Kapitel 5.1) der Schienenoberfläche in Schienenlängsrichtung. Innerhalb eines jeden Segments wird angenommen, dass sich ein ebener Kontakt ausbildet, der in der Mitte des Segments tangential am Schienenquerprofil anliegt und zu dem die Schienenlängsachse x parallel ist.

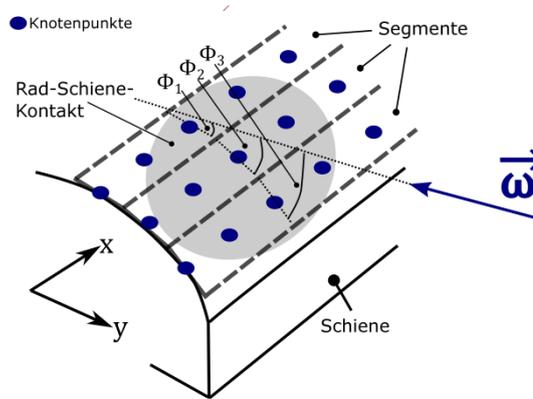


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Aufteilung des Kontaktes in ebene Segmente (Flächen).

Für die Ebenen ergeben sich unterschiedliche Neigungswinkel $\phi = f(y)$ (vgl. Abbildung 14), welche im Modell berücksichtigt werden und für jedes Segment unterschiedliche Winkelgeschwindigkeiten $\omega_n = f(y)$ nach Gleichung (6) zur Folge haben.

$$\omega_n(y) = |\vec{\omega}_n(y)| = |\vec{\omega}| \cdot \sin(\phi(y)). \quad \text{Gl. (6)}$$

Aus Gleichung (5) und Gleichung (3) unter Berücksichtigung des Zusammenhangs nach Gleichung (6) ergibt sich Gleichung (7).

$$\vec{s}(x, y) = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_x - c_n \cdot y' \\ c_n \cdot x' \end{pmatrix} = \frac{1}{v_{FZ}} \cdot \begin{pmatrix} v_{rel,x} \\ v_{rel,y} \end{pmatrix} = \frac{1}{v_{FZ}} \cdot \begin{pmatrix} v_{FZ} - \omega \cdot r(y) \\ \omega \cdot \sin(\phi(y)) \cdot x' \end{pmatrix} \quad \text{Gl. (7)}$$

Bei den Simulationen wurden eine Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} und ein globaler Längsschlupf c_x vorgegeben. Für ein angetriebenes Rad wird $c_x < 0$, für ein gebremstes Rad $c_x > 0$ sowie für ein rein rollendes Rad $c_x = 0$ gesetzt. Durch die Angabe des Radprofils sind die Radradien $r(y)$ bestimmt.

Die Ermittlung des Längsabstandes x' zu den betrachteten Orten im Kontakt erfolgt ausgehend vom Berührungspunkt O . Für die Bestimmung der Koordinaten x_O und y_O des Berührungspunktes O wird das Rad an die Schiene im ersten Zeitschritt einer Überrollung solange angenähert, bis sie sich in einem Punkt (= Berührungspunkt O – unter Annahme eines starren Rades und einer starren Schiene)

berühren. Gemäß der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} bewegt sich der Berührungspunkt O während der Überrollung in die Schienenlängsrichtung.²

Die Berechnung der Winkelgeschwindigkeit ω des Rades erfolgt beim ersten Zeitschritt einer Überrollung auf Basis der angegebenen Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} und des globalen Längsschlupfes c_x . Der globale Längsschlupf c_x ist definiert als das Verhältnis zwischen der Relativgeschwindigkeit $v_{rel,x}$ im Berührungspunkt O ($= v_{O,x}$) und der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} . Aus Gleichung (7) ergibt sich der Zusammenhang nach Gleichung (8) für die Winkelgeschwindigkeit ω .

$$\omega = \frac{v_{FZ} - v_{FZ} \cdot c_x}{r(y_O)} = \frac{v_{FZ} \cdot (1 - c_x)}{r(y_O)} \quad \text{Gl. (8)}$$

² Die Längskoordinate x des Berührungspunktes O entspricht bei dieser Vorgehensweise der Längskoordinate x der Radachse zu jedem Zeitpunkt der Überrollung.

5.4 Lösung des Tangentialkontaktproblems

Als Tangentialkontaktmodell wurde das *Extended Creep Force Modell (ECF-Modell)* gewählt. Eine ausführliche Beschreibung des Modells kann in der Dissertation von Meierhofer [28] bzw. in [61] gefunden werden.

Das *ECF-Modell* [28] [61] berücksichtigt eine Schicht zwischen Rad und Schiene, welche aus verschiedenen Partikeln (z.B. Verschleißpartikel) und den Oberflächenrauigkeiten von Rad und Schiene besteht. Die Modellvorstellung des *ECF-Modells* basiert auf der Annahme, dass diese Zwischenschicht sowohl am Rad als auch an der Schiene haftet und ein elasto-plastisches Materialverhalten aufweist.

Diese Eigenschaften wurden im *ECF-Modell* [28] [61] als Bürstenmodell umgesetzt. Im Gegensatz zu den Modellvorstellungen anderer Tangentialkontaktmodelle (z.B. Kalkers *Fastsim*, vgl. [40] [41]) führen Relativbewegungen zwischen Rad und Schiene somit nicht zu einer Ausbildung eines Haft- und Gleitbereiches im Kontakt, sondern zu einer elasto-plastischen Verformung der an den Grundkörpern Rad und Schiene haftenden Borsten (vgl. Abbildung 15). Die Borsten werden unabhängig voneinander betrachtet.

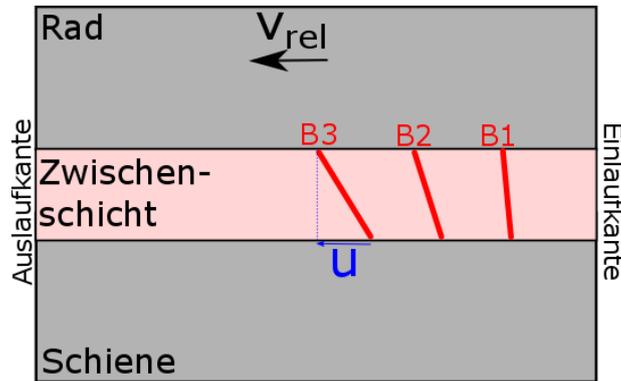


Abbildung 15: Schematische Darstellung von Rad, Schiene und der Zwischenschicht mit drei Borsten B1-B3. Die Relativbewegung (Relativgeschwindigkeit v_{rel}) zwischen Rad und Schiene führt zu einer elasto-plastischen Verformung u der Borsten während des Kontaktdurchlaufs, dargestellt durch die unterschiedlichen Neigungen der Borsten. Originalbild aus [28], modifiziert.

Das *ECF-Modell* [28] [61] berechnet nach Gleichung (9) aus den Starrkörper-Schlupfkomponenten c_x , c_y und c_n und der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} die Verformung u .

$$\vec{u}(t) = \vec{u}(t_0) + \int_{t_0}^t v_{FZ}(t') \cdot \begin{bmatrix} c_x(t') - c_n(t') & (y' - v_{FZ-y}(t') \cdot t') \\ c_y(t') + c_n(t') & (x' - v_{FZ-x}(t') \cdot t') \end{bmatrix} dt' \quad \text{Gl. (9)}$$

Aus der Verformung u werden mit Hilfe der Steifigkeiten L_e , L_p , L_x , L_y , L_s sowie den beiden Grenzspannungen τ_{c1} und τ_{c2} die Tangentialspannungen τ ermittelt. Für die Tangentialspannungen τ , deren Betrag kleiner oder gleich der ersten kritischen Grenzspannung τ_{c1} ist, verhält sich die Zwischenschicht nach der Modellvorstellung linear elastisch (vgl. Abbildung 16). Die Tangentialspannungen τ werden für diesen Fall nach Gleichung (10) bestimmt.

$$\vec{\tau} = \vec{\tau}(t_0) + \int_{t_0}^t v_{FZ}(t') \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{c_x(t')}{L_x + L_e(t')} - \frac{c_n(t')}{L_s + L_e(t')} \cdot (y' + v_{FZ-y}(t') \cdot t') \\ \frac{c_y(t')}{L_y + L_e(t')} + \frac{c_n(t')}{L_s + L_e(t')} \cdot (x' + v_{FZ-x}(t') \cdot t') \end{array} \right] dt' \quad \text{Gl. (10)}$$

$$\text{für } |\tau| \leq \tau_{c1}$$

Ergeben sich Tangentialspannungen τ , deren Betrag die erste kritische Grenzspannung τ_{c1} übertrifft, so verhält sich die Zwischenschicht nach der Modellvorstellung nicht-linear plastisch (vgl. Abbildung 16). Das *ECF-Modell* [28] [61] bestimmt die resultierende Tangentialspannung mit Hilfe von Gleichung (11). Die zweite kritische Grenzspannung τ_{c2} kann von der Tangentialspannung nicht übertroffen werden.

$$|\vec{\tau}(t)| = \tau_{c1}(t) + (\tau_{c2}(t) - \tau_{c1}(t)) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-|\vec{u}(t)| + |\vec{u}(t_0)|}{L_p(t)}\right) \right] \quad \text{Gl. (11)}$$

$$\text{für } \tau_{c1} < |\tau| \leq \tau_{c2}$$

In den Gleichungen (9), (10) und (11) müssen für die Berechnungen die Ausgangszustände der Borsten (Verformung $\vec{u}(t_0)$ und Tangentialspannung $\vec{\tau}(t_0)$) bekannt sein. Es wird angenommen, dass an der Einlaufkante sowohl die Verformungen $\vec{u} = 0$ als auch die Tangentialspannungen $\vec{\tau} = 0$ sind. Im Rechenmodell werden die Ergebnisse aller Zeitschritte gespeichert, um diese für den jeweils darauf folgenden Zeitschritt berücksichtigen zu können.

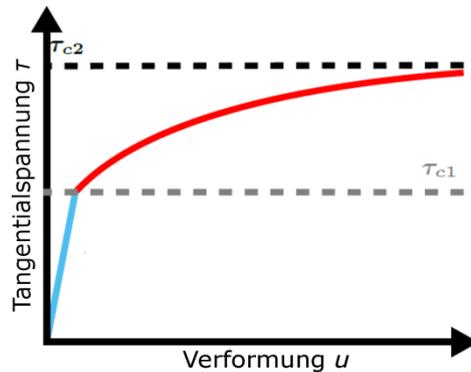


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Verformung der Zwischenschicht und den Tangentialspannungen. Originalbild aus [28], modifiziert.

Die Normalspannungs- und die Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften der Zwischenschicht werden über die Steifigkeiten $L_e = f(p_n, T)$ und $L_p = (p_n, T)$ sowie die Grenzspannungen $\tau_{c1} = (p_n, T)$ und $\tau_{c2} = (p_n, T)$ abgebildet. Die Modellvorstellung basiert auf der Annahme, dass erhöhte Normalspannungen zu einem erhöhten Verformungswiderstand der Zwischenschicht führen. Hingegen führen erhöhte Temperaturen zu einem „weicheren“ Material mit einem geringeren Verformungswiderstand (vgl. Abbildung 17).

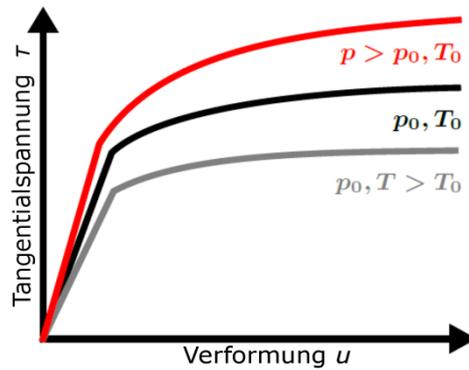


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Einflusses der Temperatur und der Normalspannung auf das Verformungs- und Tangentialspannungsverhalten. Originalbild aus [28], modifiziert.

Die Rad-Schiene-Steifigkeiten L_x , L_y und L_s nach *Kalkers* vereinfachter Theorie [39] sind grundsätzlich für elliptische Kontakte mit den Halbachsen a und b bestimmt. Für nicht-elliptische Kontakte werden im *ECF-Modell* [28] [61] die Halbachsen a und b mit jeweils der Hälfte der längsten und breitesten Kontaktausdehnung gleichgesetzt.

Die Berechnung der Temperatur erfolgt in einem Submodell des *ECF-Modells*.

5.4.1 Temperatur-Submodell: Berechnung der Temperatur auf und unter der Oberfläche

Das *ECF-Modell* [28] [61] basiert auf der Annahme, dass bei plastischer Verformung der Zwischenschicht Dissipationsenergie freigesetzt wird. Die Reibleistungsdichte \dot{q} errechnet sich aus den Tangentialspannungen τ , aus der zeitlichen Änderung des plastischen Anteils u_p der Gesamtverformung u und dem Proportionalitätsfaktor k_q . Über den Proportionalitätsfaktor k_q wird der Anteil der Energie angegeben, der in Wärme gewandelt wird und nicht in die Materialstruktur zur Bildung von Versetzungen und Rissen fließt. Grundsätzlich kann der Faktor k_q Werte zwischen einschließlich 0 und 1 annehmen. Im *ECF-Modell* ist dieser mit $k_q = 1$ festgelegt, da in der Literatur [31] davon ausgegangen wird, dass jene Energie, die während des Reibungsvorganges für die Bildung von Versetzungen und Rissen benötigt wird, vernachlässigbar klein gegenüber dem Anteil der Energie ist, der in Wärme gewandelt wird.

$$\dot{q}(t) = k_q \cdot \vec{\tau}(t') \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}_p(t)}{\partial t} \right) \quad \text{Gl. (12)}$$

Die Berechnung der Temperatur sowohl auf als auch unter der Oberfläche erfolgt im *ECF-Modell* [28] [61] nach dem Ansatz von *Ertz und Knothe* [30]. Aufgrund der geringen Dicke der Zwischenschicht (bis zu 50 μm nach [28]) wird angenommen, dass die Temperatur der Zwischenschicht sowohl mit der Rad- als auch mit der Schienen-Oberflächentemperatur gleichzusetzen ist. *Ertz und Knothe* [30] vernachlässigen bei ihrem Ansatz für die Berechnung der Temperatur einen Wärmefluss in Schienenlängs- und Schienenquerrichtung aufgrund der Bewegung des Kontaktes über die Schiene (vgl. [30] [62]).

Die Aufteilung der Reibleistungsdichte \dot{q} in das Rad \dot{q}_R und in die Schiene \dot{q}_S erfolgt im Ansatz nach *Ertz und Knothe* in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Relativgeschwindigkeit im

Kontakt [30]. Es ergibt sich für die Temperatur der Schiene $T_S(t, z)$ auf und unter der Oberfläche Gleichung (13). In dieser Gleichung ist β_S der Wärmedurchgangskoeffizient und k die Wärmeleitfähigkeit. Im *ECF-Modell* wird angenommen, dass die Temperatur der Schiene $T_S(t, z)$ an der Einlaufkante der Umgebungstemperatur (20 °C) entspricht. [28] [30] [61]

$$T_S(t, z) = T_S(t_0, z) + \frac{1}{\beta_S \cdot \pi} \int_{t_0}^t \dot{q}_S(t - t') e^{-\frac{z^2}{4kt'}} \cdot \frac{dt'}{\sqrt{t'}} \quad \text{Gl. (13)}$$

5.5 Berechnung des Verschleißes

Die Berechnung des Verschleißes erfolgt mit dem *Modell nach Krause und Poll* [27]. Dieses Modell basiert auf der Analyse von Experimentaldaten. Dabei ist der durch den Verschleiß verursachte Masseverlust $\Delta M(t)$ der Schiene nach Gleichung (14) proportional zur geleisteten Reibarbeit $\Delta W_f(t)$.

$$\Delta M(t) = k_{KP}(\dot{q}(t)) \cdot \Delta W_f(t) \quad \text{Gl. (14)}$$

Der Proportionalitätsfaktor k_{KP} ist nach *Krause und Poll* [27] nicht konstant, sondern abhängig von der Materialpaarung, der Umgebung der Reibkörper sowie von den Temperaturen der kontaktierenden Oberflächen. Unter anderem führt die Zuführung von Energie in Form von Wärme zu einem Lösen der metallischen Bindungen. Im Rechenmodell wird abhängig von der Reibleistungsdichte $\dot{q}(t)$ zwischen einem Proportionalitätsfaktor für milden Verschleiß $k_{KP-mild}$ und heftigen Verschleiß $k_{KP-heftig}$ unterschieden (vgl. Anhang A: Tabellen, Tabelle 12). Grundsätzlich können im Rechenmodell den Knotenpunkten der Schienenoberfläche unterschiedliche Verschleißresistenzen in Form von verschiedenen Proportionalitätsfaktoren zugeordnet werden.

Für die Berechnung des Verschleißes der Schienenoberfläche wird im Rechenmodell $\dot{q} = \dot{q}_S$ gesetzt und für die Dauer eines Zeitschrittes $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ als konstant angenommen.

Die Reibarbeit $\Delta W_f(t)$ aus Gleichung (14) errechnet sich nach Gleichung (15) aus der Reibleistungsdichte $\dot{q}(t)$, der Fläche A eines Diskretisierungselements und der Dauer eines Zeitschrittes Δt .

$$\Delta W_f(t) = \dot{q}(t) \cdot A \cdot \Delta t \quad \text{Gl. (15)}$$

Der Höhenverlust an Oberfläche durch Verschleiß $\Delta z(t)$ ergibt sich schlussendlich aus dem Masseverlust $\Delta M(t)$ mit Gleichung (16). Dabei steht ρ für die Dichte des Stahls.

$$\Delta z(t) = \frac{\Delta M(t)}{\rho \cdot A} \quad \text{Gl. (16)}$$

Der mit Gleichung (16) errechnete Verschleiß Δz einer Überrollung wird zur Einsparung von Rechenzeit in einem weiteren Schritt auf mehrere Überrollungen skaliert. Dabei wird der Skalierungsfaktor so gewählt, dass jener Knotenpunkt der Schiene mit dem größten berechneten Verschleißwert Δz nach der Skalierung einen Verschleiß von $2 \mu m$ nicht übersteigt. Der Maximalwert an Verschleiß wurde auf $2 \mu m$ festgelegt, da ein geringerer Skalierungsfaktor durch einen kleineren festgelegten Maximalwert an Verschleiß zu keinen Veränderungen in den Ergebnissen, jedoch zu einem höheren Rechenaufwand führt.

5.6 Ermittlung des Rissinitiierungspotentials

Für die Ermittlung des Rissinitiierungspotentials wurde das *Rollkontakt-Ermüdungsmodell nach Trummer* [32] [33] herangezogen. Dieses sogenannte *Keilmodell* berücksichtigt neben den Spannungen und dem Verschleiß auch die plastischen Scherverformungen in der dünnen oberflächennahen Schicht von Rad und Schiene bei der Bestimmung des Rissinitiierungspotentials. Es wird davon ausgegangen, dass Risse durch Ermüdung an der Werkstoffoberfläche in dieser sogenannten Rissinitiierungsschicht entstehen. Dabei bevorzugen Ermüdungsrisse aufgrund des geringeren Risswachstumswiderstandes jene Richtung, die parallel zur lamellaren Mikrostruktur des Materialgefüges ist [32] [51] [52]. Die lamellare Mikrostruktur an der Schienenoberfläche entsteht durch Ausrichtung des ursprünglichen isotropen Gefüges der plastischen Scherverformung, verursacht durch die wirkenden Belastungen bei Überrollungen.

Im Extremfall kann sich eine hoch plastisch verformte Oberflächenschicht ausbilden, deren parallel zur Oberfläche ausgerichtete Materialstruktur bis in eine Tiefe ausgeprägt ist, die die Dicke der Rissinitiierungsschicht übersteigt. Die an der Oberfläche entstehenden Mikrorisse³, welche durch die Materialstruktur ebenfalls bevorzugt parallel zur Oberfläche wachsen, führen in diesem Fall zu einer stark ausgeprägten Delamination⁴ der Oberfläche. Durch das Abblättern der Oberfläche (Verschleiß der Oberfläche) werden die initiierten Mikrorisse wiederum entfernt. Eine Rissinitiierung aufgrund von Materialermüdung benötigt daher eine Materialstruktur, die zwar in sich parallel ausgerichtet ist, jedoch in einem eher flachen Winkel zur Oberfläche steht. Mikrorisse, die in einem Material mit dieser Ausrichtung entstehen, können sich in das Innere des Materials ausbreiten und sich zu Rissen entwickeln. [32] [48]

Abbildung 18 zeigt schematisch verschiedene Orientierungen der Materialstruktur.

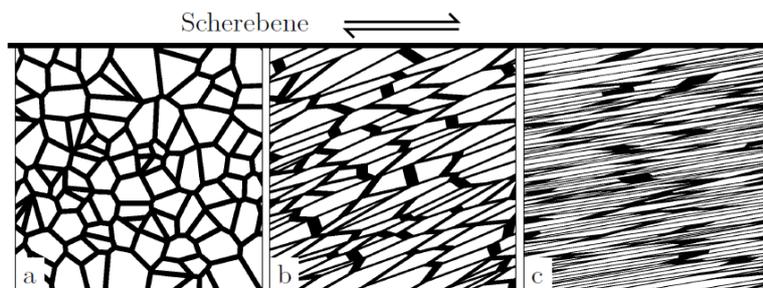


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Orientierung der Materialstruktur. Durch Ätzen kann diese bei metallographischen Schliffen sichtbar gemacht werden. Verformungszustand, beschrieben durch den Scherwinkel α (vgl. Abbildung 19): (a) nicht verformt ($\alpha = 0^\circ$), (b) verformt ($\alpha \approx 60^\circ$), (c) stark verformt ($\alpha \approx 80^\circ$). Originalbild aus [32].

Im *Modell nach Trummer* [32] wird die plastische Verformung der oberflächennahen Schicht mit dem Scherwinkel nach Abbildung 19 beschrieben.

³ Mikrorisse werden in dieser Arbeit Risse genannt, welche nur unter Zuhilfenahme eines Mikroskops visuell wahrnehmbar sind. Risse hingegen können auch ohne optische Hilfsmittel erkannt werden.

⁴ „...Ablösung von plättchenförmigen Verschleißpartikeln von der Oberfläche durch Ausbildung von mikroskopischen Rissen parallel zur Oberfläche.“ aus [32] Seite 31.

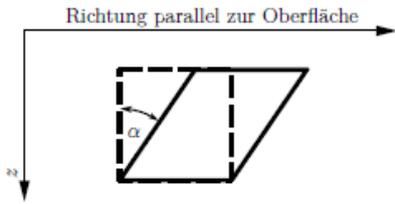


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Scherwinkels α . Das ursprünglich nicht verformte Element (strichlierte Linie) wird parallel zur Oberfläche geschert (Volllinie). Eine vollständig parallele Ausrichtung des Gefüges zur Oberfläche entspricht $\alpha = 90^\circ$ (unverformter Zustand: $\alpha = 0^\circ$). Originalbild aus [32].

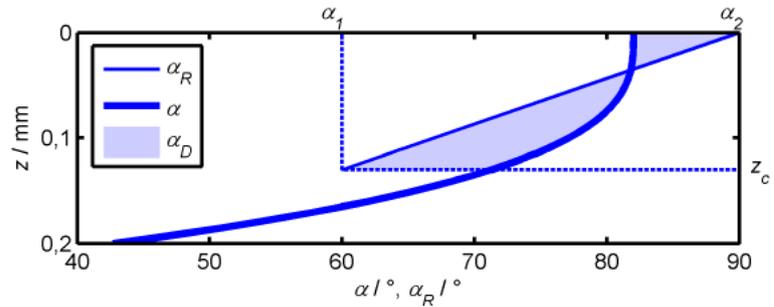


Abbildung 20: Darstellung der Fläche zwischen $\alpha_R(z)$ und $\alpha(z)$. Originalbild aus [32].

Der Scherwinkel $\alpha(z)$ wird mit einer Referenzverformung $\alpha_R(z)$, die mit Hilfe von Schienenanalysen aus Prüfstandversuchen und aus dem realen Betrieb bestimmt wurde, verglichen. Dazu wird die Fläche α_D zwischen $\alpha_R(z)$ und $\alpha(z)$ (vgl. Abbildung 20) bis zu einer Tiefe z_c nach Gleichung (17) berechnet. Die Neigung zur Rissinitiierung ist umso größer, je kleiner die Fläche α_D zwischen der Referenzverformung und der vorliegenden Verformung ist. [32]

$$\alpha_D = \int_{z=0}^{z_c} |\alpha(z) - \alpha_{R(z)}| dz \quad \text{Gl. (17)}$$

Kleine Werte für α_D und damit eine hohe Neigung zur Rissinitiierung spiegeln sich auch in dem nach Gleichung (18) bestimmten Ähnlichkeitsparameter A_α wider. A_α wird bei kleiner werdendem α_D größer, kann jedoch im Grenzfall nur den Maximalwert $A_\alpha = 1$ annehmen. [32]

$$A_\alpha = 1 - 2 \cdot \frac{\alpha_D}{(\alpha_2 - \alpha_1) \cdot z_c} \quad \text{Gl. (18)}$$

Die Berechnung der sogenannten effektiven Spannung σ_A erfolgt mit der maximalen Hauptnormalspannung σ^* nach Gleichung (19). Dabei fließt der Ähnlichkeitsparameter A_α in den Faktor f_A ein, der mit größer werdendem A_α linear mitansteigt. [32]

Der Einfluss der Richtung der Tangentialspannungen bezogen auf die Bewegungsrichtung des Kontaktes wird mit der Funktion f_t in Gleichung (19) berücksichtigt. Das Modell erfasst damit Unterschiede im Rissinitiationsverhalten durch bremsende oder angetriebene Räder [32]. Durch die Wirkungsrichtung der auftretenden Tangentialspannungen wird abhängig von der relativen Position der Räder zum betroffenen Rissinitiationsort ein Öffnen oder ein Schließen eines ersten Anrisses gefördert. Damit ist es möglich, Unterschiede im Rissinitiationsverhalten von verschiedenen lateralen Positionen eines Schienenquerschnittes zu ermitteln. Aufgrund der Rollradiendifferenzen kommt es auch bei einem rein rollenden Rad zur Ausbildung von entweder antreibend oder bremsend wirkenden Tangentialspannungen jeweils auf einer Seite der Rolllinie.

$$\sigma_A = \sigma^* \cdot f_A \cdot f_t \quad \text{Gl. (19)}$$

Mit Hilfe von σ_A kann mit Gleichung (20) die Ermüdungslebensdauer N_A bestimmt werden. Die Werte für die Faktoren b_f und σ_f wurden auf einem Rad-Schiene-Prüfstand experimentell bestimmt. [32]

$$N_A = \left(\frac{\sigma_A}{\sigma_f}\right)^{\frac{1}{b_f}} \quad \text{Gl. (20)}$$

Die Schädigung D_A berechnet sich nach Gleichung (21). N_i ist die tatsächliche Anzahl der Zyklen auf dem Lastniveau i der Ermüdungslebensdauer $N_{A,i}$. Eine Rissinitiierung erfolgt bei $D_A = 1$.

$$D_A = \frac{N_i}{N_{A,i}} \quad \text{Gl. (21)}$$

Wegen des Verschleißes kommt es zu einer Abtragung der Oberfläche und damit auch der Rissinitiierungsschicht. Weiters rückt durch die Abtragung der Oberfläche Material aus dem angrenzenden, nicht verformten Grundwerkstoff in die Rissinitiierungsschicht nach. Beide durch den Verschleiß Δz verursachten Mechanismen interagieren mit der lokalen Schädigung D_A und werden im Modell [32] durch einen empirischen Ansatz berücksichtigt.

Das *Modell nach Trummer* [32] geht von einer Ermüdungsrissinitiierung aus, wenn die Schädigung $D_A = 1$ ist. Da die Parametrisierung dieses Modells nicht für Squat-Risse erfolgte, wird in dieser Arbeit nicht der Absolutwert der Schädigung D_A angegeben, sondern ein Schädigungspotential. Dieses Schädigungspotential (relatives Rissinitiierungspotential) ergibt sich aus dem Verhältnis $\frac{D_A}{D_{A-ver}}$ der örtlichen Schädigung D_A zu der maximalen Schädigung D_{A-ver} eines Vergleichsschienenquerschnittes, der keine Anormalitäten aufweist. Es wird davon ausgegangen, dass ein derartiger Schienenquerschnitt ein sehr kleines Rissinitiierungspotential hat. Dieser Referenzquerschnitt befindet sich, falls nicht anders angegeben, bei den Simulationen an der Längskoordinate $x = -100$ mm. Ein Verhältnis von $\frac{D_A}{D_{A-ver}} \leq 1$ bedeutet ein geringes Schädigungspotential. Drei weitere Schädigungspotentialbereiche wurden festgelegt, wobei Verhältnisse mit den Wertebereichen $1 < \frac{D_A}{D_{A-ver}} \leq 100$ auf ein leicht erhöhtes, $100 < \frac{D_A}{D_{A-ver}} \leq 10000$ auf ein mittleres und $\frac{D_A}{D_{A-ver}} > 10000$ auf ein hohes Schädigungspotential hinweisen. Aufgrund der fehlenden Parametrisierung wurde diese Festlegung beliebig gewählt. Die Angabe des Schädigungspotentials ist nur als Indiz zu sehen, ob eine lokale Schädigung gegenüber einem Referenzschienenquerschnitt erhöht ist.

Das *Schädigungsmodell nach Trummer* [32] benötigt für die dargestellte Berechnung des Rissinitiierungspotentials die Hauptnormalspannungen σ^* und *Von Mises* Vergleichsspannungen σ_m auf und unter der Oberfläche (vgl. Kapitel *Abschätzung der plastischen Scherverformung der oberflächennahen Schicht*). Für die Berechnung dieser Vergleichsspannungen werden die Normal- und Tangentialspannungsverteilungen an der Oberfläche für jeden Zeitpunkt t der Überrollungen an das Modell übergeben. Die Spannungsverteilungen werden im Modell jeweils durch drei Parabeln approximiert. Damit ist es möglich, die linear elastischen Spannungszustände nach den Gleichungen von *Boussinesq-Cerruti* [35] zu berechnen. Daraus werden in einem weiteren Schritt die *Von Mises* Vergleichsspannung σ_m und die Hauptnormalspannung σ^* im Modell ermittelt. [32]

5.6.1 Abschätzung der plastischen Scherverformung der oberflächennahen Schicht

Nach [50] ist eine Abschätzung der in schon wenigen Belastungszyklen passierenden plastischen Scherverformungen der dünnen oberflächennahen Schicht mit den auf der Annahme von elastischen Materialverhalten basierenden Kontaktmodellen ausreichend genau möglich, wenn der Hauptmechanismus, der zu dieser Verformung führt, durch Tangentialspannungen dominiert wird und die Streckgrenze des Materials nur leicht überschritten wird.

Auf Basis dieser Annahmen schätzt *Trummer* [32] die plastischen Scherverformungen (Scherungen des Materials parallel zur Oberfläche) γ_{zx} und γ_{zy} mit Hilfe des linear elastischen Spannungszustandes. Es gelten die Zusammenhänge nach Gleichung (22).

$$\begin{aligned}\gamma_{zx} &= -\frac{du_x}{dz} \\ \gamma_{zy} &= -\frac{du_y}{dz}\end{aligned}\quad \text{Gl. (22)}$$

Bei metallographischen Untersuchungen von Schienen aus dem Betrieb wurde beobachtet, dass die plastischen Verformungen der oberflächennahen Schichten ausgeprägter sind als bei Eisenbahntypischen Kontaktspannungen unter Annahme glatter Oberflächen zu vermuten gewesen wäre. Dafür werden verschiedene Oberflächeneffekte (z.B. Oberflächenrauigkeiten) verantwortlich gemacht. Diese Oberflächeneffekte werden durch eine empirische Spannungserhöhungsfunktion f_s im Modell berücksichtigt. [32]

Unterschiede in der Verformung, verursacht durch Antreiben oder Bremsen, werden durch den empirischen Faktor f_b abgebildet. Die Parametrisierung erfolgte mit Hilfe von Twin Disc Versuchen. [32]

Für die Vergleichsspannung σ_p ergibt sich mit f_s , f_b und der *Von Mises* Vergleichsspannung σ_m Gleichung (23). [32]

$$\sigma_p = (\sigma_m + f_b) \cdot f_s \quad \text{Gl. (23)}$$

Nach *Trummer* [32] tritt plastische Verformung auf, wenn die Vergleichsspannung σ_p die lokale Streckgrenze σ_y des Materials übersteigt (vgl. Abbildung 21). [32]

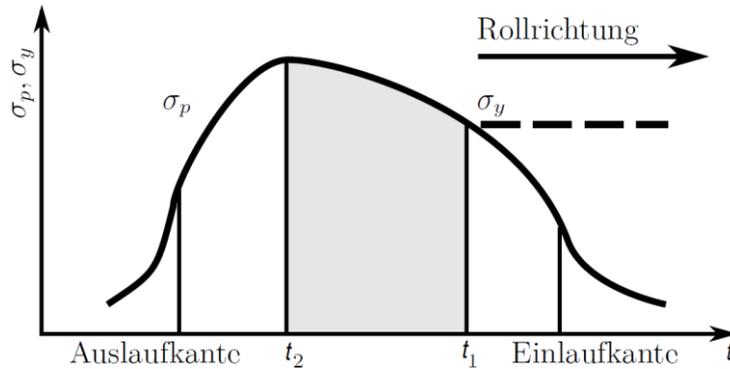


Abbildung 21 zeigt den schematischen zeitlichen Verlauf der Vergleichsspannung σ_p an einem lokalen Punkt der Schiene während der Überrollung mit einem Rad. Die Vergleichsspannung σ_p steigt dabei schon vor dem Erreichen der Einlaufkante des Rad-Schiene-Kontaktes an. Sie erreicht ihren Höhepunkt zum Zeitpunkt t_2 , der auch den Übergang des Haftbereiches in den Gleitbereich des Kontaktes darstellt. Die lokale Streckgrenze σ_y wird zum Zeitpunkt t_1 überschritten. Zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 wird im Modell nach Trummer [32] plastische Verformung angenommen. Originalbild aus [32], modifiziert.

Die plastischen Verschiebungen $\frac{du_x}{dx}$ und $\frac{du_y}{dx}$ werden mit Hilfe der Annahme eines Bürstenmodells⁵ als Funktion des Schlupfzustandes bestimmt. Für $\frac{du_x}{dx}$ und $\frac{du_y}{dx}$ einer Borste können die Zusammenhänge nach den Gleichungen (24) und (25) geschrieben werden [32] [34]. Dabei gilt die Vereinfachung, dass der Betrag der elastischen Verschiebung klein gegenüber der plastischen Verschiebung ist [32].

$$\frac{du_x}{dx} + f_u \cdot s_x = 0 \quad \text{Gl. (24)}$$

$$\frac{du_y}{dx} + f_u \cdot s_y = 0 \quad \text{Gl. (25)}$$

Der Faktor f_u steht für die Aufteilung der Verformung zwischen Rad und Schiene und wird im Modell nach Trummer [32] mit $f_u = 0,5$ angenommen. Bei den Faktoren s_x und s_y handelt es sich um Komponenten des Starrkörperschlupfes s (vgl. Kapitel 5.3).

Aus den beiden Gleichungen (24) und (25) lassen sich durch Integration die Verschiebungsinkremente Δu_x und Δu_y der plastischen Verformungen an der Oberfläche bestimmen (vgl. [32]).

Auch in Tiefenrichtung z kann plastische Verformung nur auftreten, wenn die Vergleichsspannung σ_p die lokale Streckgrenze σ_y übersteigt. Dazu wird, wie in Abbildung 22 dargestellt, aus der maximalen Vergleichsspannung σ_p und der lokalen Streckgrenze σ_y für jede Tiefenposition $z_i < z_p$ die Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ nach Gleichung (26) gebildet.

$$\Delta\sigma(z_i) = \max_x(\sigma_p(z_i)) - \sigma_y(z_i) \quad \text{Gl. (26)}$$

⁵ Beim Bürstenmodell besteht die Oberfläche eines Starrkörpers aus einzelnen Borsten. Im Fall des Rad-Schiene-Kontaktes stellen sowohl das Rad als auch die Schiene den Starrkörper dar. Die Borsten werden beim Durchlauf durch den Kontakt durch die tangentielle Relativbewegung zwischen den beiden Körpern verformt. [34]

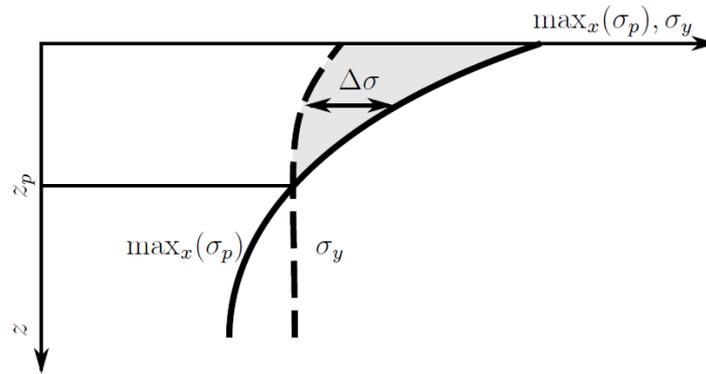


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Bestimmung der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ bis zu einer Tiefe $z < z_p$. Originalbild aus [32].

Die plastischen Verschiebungsinkremente Δu_x und Δu_y in einer Tiefe z_j errechnen sich nach den Gleichungen (27) und (28).

$$\Delta u_x(z_j) = \sum_{i=n}^j \Delta \gamma_{zx}(\bar{z}_i) \cdot (z_{i-1} - z_i) \quad \text{Gl. (27)}$$

$$\Delta u_y(z_j) = \sum_{i=n}^j \Delta \gamma_{zy}(\bar{z}_i) \cdot (z_{i-1} - z_i) \quad \text{Gl. (28)}$$

Die Inkremente der plastischen Scherung $\Delta \gamma_{zx}$ und $\Delta \gamma_{zy}$ werden mit Hilfe der Proportionalitätsfaktoren f_{gx} und f_{gy} und mit den Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma$ nach den Gleichungen (29) und (30) bestimmt.

$$\Delta \gamma_{zx}(\bar{z}_i) = f_{gx} \cdot \Delta\sigma(\bar{z}_i) \quad \text{Gl. (29)}$$

$$\Delta \gamma_{zy}(\bar{z}_i) = f_{gy} \cdot \Delta\sigma(\bar{z}_i) \quad \text{Gl. (30)}$$

Die Proportionalitätsfaktoren f_{gx} und f_{gy} bestimmt *Trummer* aus der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ und den Verschiebungsinkrementen Δu_x und Δu_y der Oberfläche. [32]

Die Inkremente der plastischen Scherung $\Delta \gamma_{zx}$ und $\Delta \gamma_{zy}$ können für alle Tiefen z_j zu den Scherungen γ_{zx} und γ_{zy} addiert werden. Daraus lässt sich die äquivalente plastische Dehnung ε_{eq} ermitteln, mit der *Trummer* nach Gleichung (31) die Streckgrenze σ_y berechnet. [32]

$$\sigma_y = \sigma_0 + K \cdot \varepsilon_{eq}^n \quad \text{Gl. (31)}$$

Die Anfangsstreckgrenze σ_0 , der Verfestigungskoeffizient K und der Verfestigungsexponent n wurden durch Twin Disc Versuche parametrisiert. [32]

5.7 Vertikaldynamikmodell

Die Abbildung der Vertikaldynamik des Systems Fahrzeug-Fahrweg erfolgt als *Achtelfahrzeugmodell* (vgl. dazu *Viertelfahrzeugmodell* in [57]) mit Hilfe eines Mehrmasseschwingers nach Abbildung 23. Die Koordinaten z_1 , z_2 , z_3 und z_4 werden aus der Ruhelage des Systems gemessen. Die Schiene wird mit dem Rad mitgeführt und ist auf einem Feder-Dämpfer-Element gelagert. Die Elastizität des Rad-Schiene-Kontaktes wird durch eine Feder und einen Dämpfer abgebildet. Zwischen Rad und Drehgestell wirkt die erste sowie zwischen Drehgestell und Wagenkasten die zweite Feder-Dämpfer-Stufe.

Die im Rechenmodell angenommenen Werte für die Steifigkeiten, Dämpfungskonstanten und Massen können in Tabelle 13 (Anhang A: Tabellen) gefunden werden.

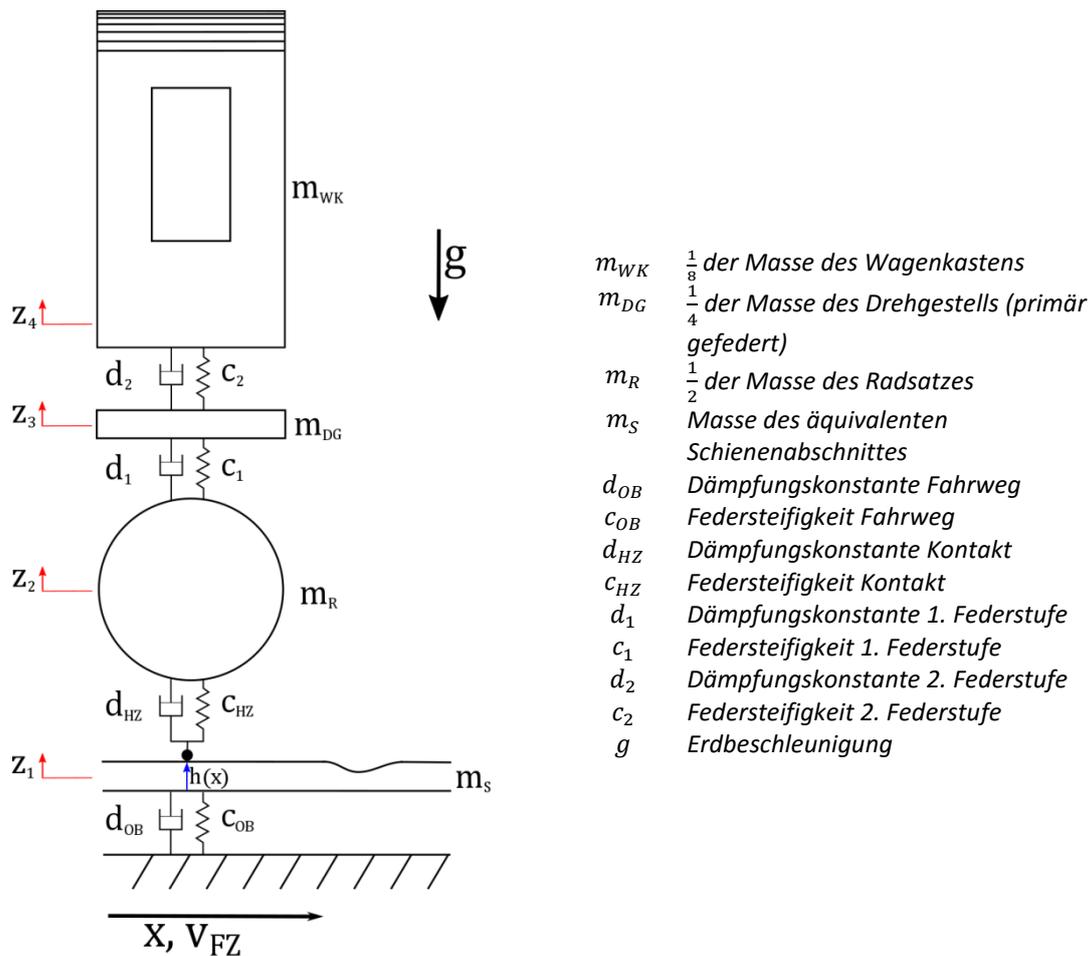


Abbildung 23: Schematische Darstellung des *Vertikaldynamikmodells*. Die Koordinaten z_1 , z_2 , z_3 und z_4 werden aus der Ruhelage des Systems gemessen. Die Anregung des Systems erfolgt über die geometrische Abweichung der Schienenoberfläche $h(x)$.

Basierend auf Abbildung 23 können die Bewegungsgleichungen für den Wagenkasten (vgl. Gleichung (32)), für das Drehgestell (vgl. Gleichung (33)), für das Rad (vgl. Gleichung (34)) und für die Schiene (vgl. Gleichung (35)) geschrieben werden. Die Gleichungen wurden numerisch gelöst.

$$m_{WK} \cdot \ddot{z}_4 = -d_2 \cdot (\dot{z}_4 - \dot{z}_3) - c_2 \cdot (z_4 - z_3) \quad \text{Gl. (32)}$$

$$m_{DG} \cdot \ddot{z}_3 = d_2 \cdot (\dot{z}_4 - \dot{z}_3) + c_2 \cdot (z_4 - z_3) - d_1 \cdot (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) - c_1 \cdot (z_3 - z_2) \quad \text{Gl. (33)}$$

$$m_R \cdot \ddot{z}_2 = d_1 \cdot (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + c_1 \cdot (z_3 - z_2) - d_{HZ} \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1 - \dot{h}(x)) - c_{HZ} \cdot (z_2 - z_1 - h(x)) \quad \text{Gl. (34)}$$

$$m_S \cdot \ddot{z}_1 = d_{HZ} \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1 - \dot{h}(x)) + c_{HZ} \cdot (z_2 - z_1 - h(x)) - d_{OB} \cdot \dot{z}_1 - c_{OB} \cdot z_1 \quad \text{Gl. (35)}$$

Die Anregung des Systems erfolgt durch die geometrische Abweichung $h(x)$ der Schienenoberfläche. Es gilt für $\dot{h}_x(x)$ der Zusammenhang nach Gleichung (36).

$$\dot{h}(x) = \frac{dh}{dt} = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \cdot v_{FZ} \quad \text{Gl. (36)}$$

Die im Rad-Schiene-Kontakt wirkende Normallast F_N ergibt sich nach Gleichung (37) aufgrund der Vertikaldynamik und des statischen Anteils der Gewichtskraft $F_{N,0} = g \cdot (m_{WK} + m_{DG} + m_R)$.

$$F_N(t) = -d_{HZ} \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1 - \dot{h}(x)) - c_{HZ} \cdot (z_2 - z_1 - h(x)) + F_{N,0} \quad \text{Gl. (37)}$$

für $F_N(t) \geq 0$

Untersuchungen des White Etching Layer

Im Rahmen dieser Arbeit wurde sowohl die Entstehung der WEL als auch deren Rolle bei der Initiierung von Squats untersucht.

Derzeit wird in der Literatur zwischen zwei unterschiedlichen Ursachen bei der Entstehung der WEL auf Schienenoberflächen während der Nutzungsphase der Schiene unterschieden: eine thermische und eine aufgrund von akkumulierenden Umformprozessen getriebene Phasenänderung des Stahls (vgl. Kapitel 2). Erstere geht davon aus, dass erhöhte Temperaturen im Rad-Schiene-Kontakt zu einer Austenitisierung des Stahls führen könnten. In weiterer Folge wäre eine Bildung von Martensit oder Martensit-ähnlichen Strukturen möglich.

Es wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass für die Bildung von Austenit eine Temperatur von ungefähr 720°C erreicht oder überschritten werden muss (vgl. [56] [57]). Simulationen sollen zeigen, welche Temperaturen im Rad-Schiene-Kontakt sowohl auf als auch unter der Oberfläche erreicht werden können. Mit diesen Betriebsbedingungen wurden am 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand der voestalpine Schienen GmbH in Leoben Donawitz/Österreich Versuche durchgeführt. Dabei sollte erstmals unter realen Rad-Schiene-Kontaktbedingungen ein WEL erzeugt werden (vgl. Kapitel 6.1).⁶

Weitere Versuche am voestalpine Schienen GmbH Prüfstand in Leoben Donawitz veranschaulichten das Verhalten der WEL unter zyklischen Belastungen, welches bisher nur mit Twin Disc Tests erforscht wurde (vgl. [24] [25]). Damit sollten Bedingungen gefunden werden, die bei WEL zu Ausbrüchen aus der Schienenoberfläche und/oder zur Rissbildung führen können (vgl. Kapitel 6.2). Sowohl Ausbrüche aus der Oberfläche als auch Risse könnten in weiterer Folge zur Entstehung von Squats führen (vgl. Kapitel 4).⁷

⁶ Teile des Unterkapitels 6.1 und der dazugehörigen Diskussion der Ergebnisse wurden in [36] veröffentlicht.

⁷ Teile des Unterkapitels 6.2 und der dazugehörigen Diskussion der Ergebnisse wurden in [63] und [64] veröffentlicht.

6.1 Entstehung von WEL: Simulationen und Versuche

Die folgenden Temperatursimulationen wurden mit Hilfe des *ECF-Modells* [28] [61] (vgl. Kapitel 5.4) durchgeführt. Die Normalspannungen wurden in diesem Fall auf Basis der Hertzschen Theorie [54] berechnet. Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Hertzschen Theorie ist ein linear elastisches Werkstoffverhalten der beiden berührenden Festkörper. Die beiden Festkörper stellen Halbräume dar, sind homogen und isotrop, weisen glatte Oberflächen auf und ihre Geometrie kann durch Flächen 2. Ordnung beschrieben werden. Das Kontaktproblem wird quasistatisch behandelt (Vernachlässigung der Strukturschwingungen). Die Hertzsche Theorie beschreibt einen elliptischen Kontakt mit einer Halbachse a in Schienenlängs- und einer Halbachse b in Schienenquerrichtung. Innerhalb dieses Kontaktes sind die Normalspannungen semi-ellipsoid⁸ verteilt. [28] [34] [35] [54]

Abbildung 24 stellt den Zusammenhang zwischen Schlupf, Geschwindigkeit und der maximalen Kontakttemperatur an der Oberfläche unter der Annahme eines Kontaktes mit den Halbachsen $a = 8$ mm längs und $b = 4$ mm quer zur Schiene und einer Normallast von $F_N = 110$ kN dar. Diese Werte repräsentieren in diesem Kapitel den *Standardzustand*. Die Austenitisierungsgrenztemperatur von Stahl ist mit $\sim 720^\circ\text{C}$ gekennzeichnet. In dieser Abbildung erkennt man, dass Temperaturen im Kontakt auch über der Austenitisierungsgrenztemperatur unter gewissen Bedingungen möglich sind.

Abbildung 25 zeigt den Einfluss der Normallast (*Fall 1*) sowie der Kontaktflächengröße (*Fall 2*) auf die Temperatur. Bei dieser Parameterstudie wird von einer maximalen Kontaktoberflächentemperatur von 720°C ausgegangen. Im *Fall 1* wird ausgehend vom Standardzustand ($a = 8$ mm, $b = 4$ mm, $F_N = 110$ kN) die Normallast auf $F_N = 200$ kN erhöht. Unter der Annahme einer unveränderten Schienen- und Radgeometrie kommt es zu einer Längenzunahme der Kontakthalbachsen auf $a = 9,8$ mm und $b = 4,9$ mm. Eine weitere Simulation (*Fall 2*) zeigt den Einfluss eines verkleinerten Kontaktes mit $a = 4$ mm und $b = 1$ mm bei einer unveränderten Normallast von $F_N = 110$ kN. Sowohl im Fall 1 als auch im Fall 2 ist im Vergleich zu den Kontaktbedingungen des Standardzustandes weniger Schlupf und/oder weniger Fahrzeuggeschwindigkeit notwendig, um im Kontakt eine maximale Oberflächentemperatur von $T_{O-max} = 720^\circ\text{C}$ zu erreichen.

⁸ Die Normalspannungen p_n errechnen sich aus der Normalkraft F_N nach $p_n(x, y) = \frac{3F_N}{2\pi ab} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$. [28] [54]

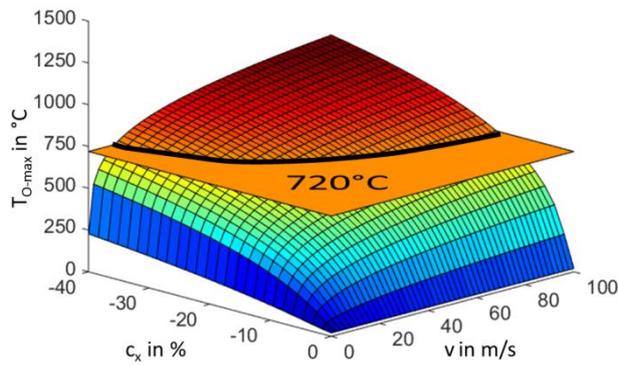


Abbildung 24: Maximale Oberflächentemperatur im Rad-Schiene-Kontakt in Abhängigkeit von Schlupf und Geschwindigkeit. Annahme Standardzustand: $a = 8 \text{ mm}$, $b = 4 \text{ mm}$, $F_N = 110 \text{ kN}$. Originalbild aus [36], modifiziert.

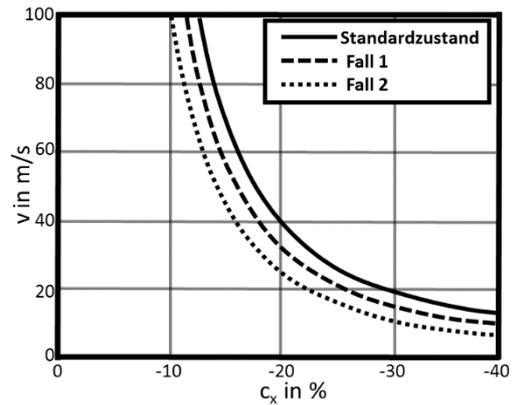


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Schlupf unter Annahme einer maximalen Oberflächentemperatur im Kontakt von $T_{O-max} = 720^\circ\text{C}$. Originalbild aus [36], modifiziert.

Eine weitere Parameterstudie zeigt den Einfluss der Geschwindigkeit auf die Temperaturverteilung auf und unter der Oberfläche. Dazu werden bei zwei verschiedenen Geschwindigkeiten die Schlüpf so gewählt, dass die maximale Oberflächentemperatur im Kontakt wieder die Austenitisierungsgrenztemperatur von 720°C erreicht. Beide Simulationen unterliegen der Annahme der Standardkontaktbedingungen.

Abbildung 26 zeigt das Ergebnis der Simulationen für $v = 1 \text{ m/s}$ bei $c_x = -160 \%$, Abbildung 27 für eine Geschwindigkeit von $v = 100 \text{ m/s}$ und $c_x = -13 \%$. Das entspricht einer Kontaktrelativgeschwindigkeit zwischen Rad und Schiene von $v_{rel} = 1,6 \text{ m/s}$ im ersten und $v_{rel} = 13 \text{ m/s}$ im zweiten Fall. Beide Abbildungen zeigen den zeitlichen Verlauf der Temperatur eines vertikalen Schienenquerschnittes, welcher mit dem Rad bei $t = 0 \text{ ms}$ zum ersten Mal in Kontakt kommt. Es wird der zeitliche Verlauf der Temperatur jenes Punktes des Schienenquerschnittes betrachtet, welcher die Symmetrielängsachse des Hertz-Kontaktes berührt. Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten von $v = 1 \text{ m/s}$ und $v = 100 \text{ m/s}$ werden die betrachteten Schienenquerschnitte beider Fälle verschieden lange kontaktiert (vgl. Abbildung 26 und Abbildung 27).

Trotz gleicher maximaler Oberflächentemperatur von $T_{max} = 720^\circ\text{C}$ sind die Temperaturverteilungen unter der Oberfläche unterschiedlich.

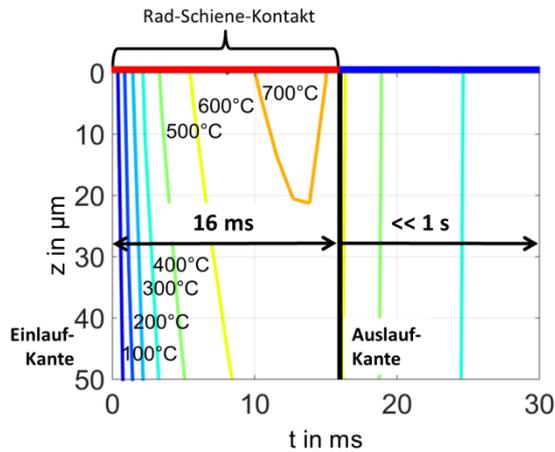


Abbildung 26: Zeitlicher Temperaturverlauf in einem Schienenpunkt. Der betrachtete Schienenpunkt kommt bei $t = 0$ ms mit dem Rad zum ersten Mal in Kontakt, durchläuft den Kontakt in dessen Mitte und verlässt diesen bei $t = 16$ ms wieder. Parameter: $v = 1$ m/s, $c_x = -160\%$, $F_N = 110$ kN, $a = 8$ mm, $b = 4$ mm. Originalbild aus [36], modifiziert.

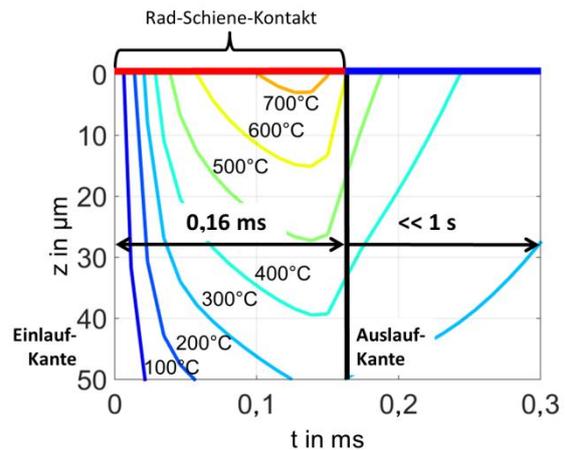


Abbildung 27: Zeitlicher Temperaturverlauf in einem Schienenpunkt. Der betrachtete Schienenpunkt kommt bei $t = 0$ ms mit dem Rad zum ersten Mal in Kontakt, durchläuft den Kontakt in dessen Mitte und verlässt diesen bei $t = 0,16$ ms wieder. Parameter: $v = 100$ m/s, $c_x = -13\%$, $F_N = 110$ kN, $a = 8$ mm, $b = 4$ mm. Originalbild aus [36], modifiziert.

Im Fall einer Geschwindigkeit von $v = 1$ m/s kann laut Simulation von einer Temperatur von bis zu 700°C in einer Tiefe von rund $20\ \mu\text{m}$ ausgegangen werden. Hingegen ist die maximale Tiefe, in der diese Temperatur bei einer Geschwindigkeit von 100 m/s herrscht, zirka $4\ \mu\text{m}$. In beiden Fällen kühlt der Schienenquerschnitt nach dem Verlassen des Kontaktes sehr schnell ab. Die Temperaturen fallen um mehrere 100°C in einer Zeit unter 1 Sekunde.

Am 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand der voestalpine Schienen GmbH in Leoben Donawitz wurden drei Versuche bei unterschiedlichen Schlüpfen ($c_x = -20\%$, $c_x = -300\%$ und $c_x = -3000\%$), jedoch derselben Geschwindigkeit $v = 0,1$ m/s durchgeführt. Daraus ergeben sich Relativgeschwindigkeiten von $v_{rel} = 0,02$ m/s für $c_x = -20\%$, $v_{rel} = 0,3$ m/s für $c_x = -300\%$ und $v_{rel} = 3$ m/s für $c_x = -3000\%$ im Kontakt. Die Normallast beträgt bei jedem Versuch $F_N = 110$ kN.

Abbildung 28 zeigt die berechneten maximalen Oberflächentemperaturen für die Versuchsbedingungen. Laut den Simulationen erreicht nur der Versuch mit einem Schlupf $c_x = -3000\%$ die Austenitisierungs-Grenztemperatur.

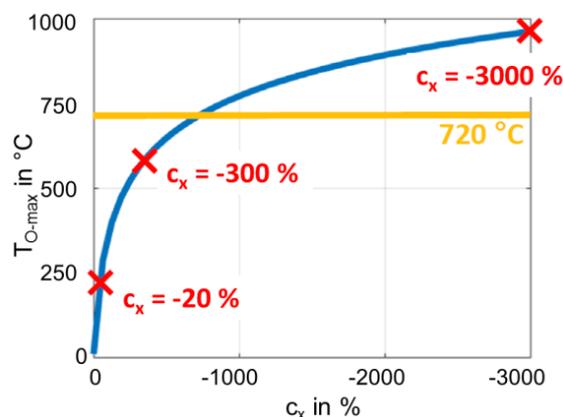


Abbildung 28: Maximale Oberflächentemperatur T_{O-max} in Abhängigkeit vom Schlupf bei einer Geschwindigkeit von $v = 0,1$ m/s und einer Normallast $F_N = 110$ kN. Weitere Parameter: $a = 8$ mm und $b = 4$ mm. Originalbild aus [36], modifiziert.

Für jeden Versuch wurde eine neue Schiene mit einem UIC60 Profil verwendet. Alle Schienen wurden am Beginn der Versuche eintausend Mal mit einem Schlupf von $c_x = -0,1\%$ bei einer Geschwindigkeit von $v = 2\text{ m/s}$ ($v_{rel} = 0,002\text{ m/s}$) überrollt. Dadurch sollen die oberflächennahen Schichten der Schienen im Bereich des Fahrspiegels verformt werden. Massive Plastifizierungseffekte während der WEL-Entstehung sollen damit ausgeschlossen werden. Das zylindrische Rad war schon vor den Versuchen in einem gebrauchten Zustand.

Abbildung 29 zeigt das Rad vor und Abbildung 30 nach den drei durchgeführten Versuchen. Gebrauchsspuren in Form von Rauigkeiten und Flecken mit einer bläulichen Verfärbung sind nach der Versuchsserie am Rad erkennbar.

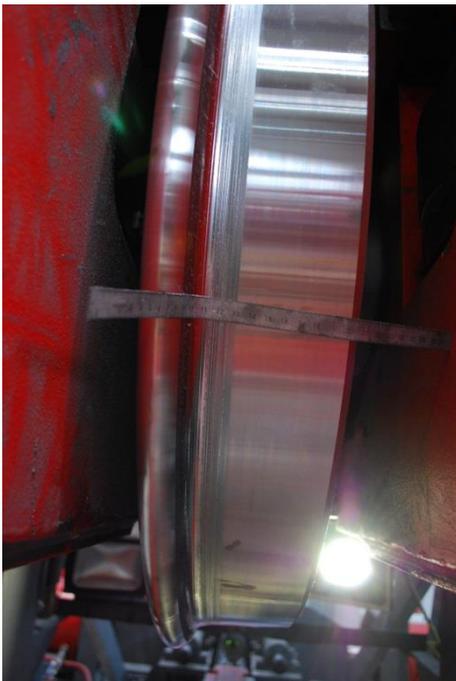


Abbildung 29: Das zylindrische Rad vor den Versuchen.

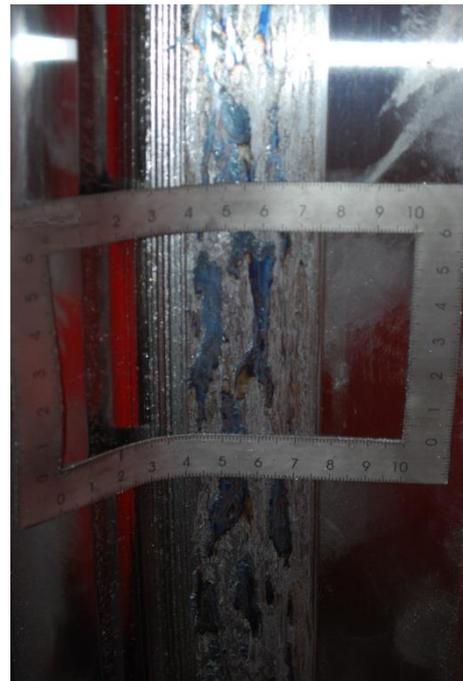


Abbildung 30: Das zylindrische Rad nach der Versuchsserie. Es sind Verfärbungen der Oberfläche erkennbar.

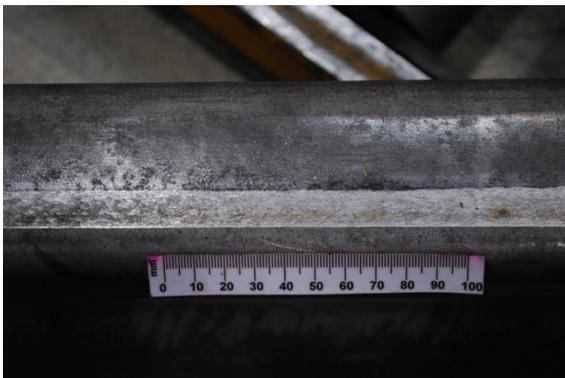


Abbildung 31: Oberfläche der Schiene, überrollt mit einem Schlupf von $c_x = -300\%$. Der Fahrspiegel und dessen teilweise gelbliche Verfärbung sind sichtbar. Die Schiene ist auf diesem Bild unbehandelt.

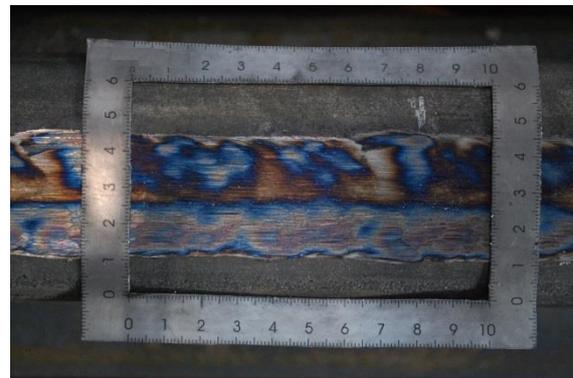


Abbildung 32: Oberfläche der Schiene, überrollt mit einem Schlupf von $c_x = -3000\%$. Der Fahrspiegel und dessen teilweise bläuliche Verfärbung sind sichtbar. Die Schiene ist auf diesem Bild unbehandelt.

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die Oberflächen der beiden Schienen, überrollt mit $c_x = -300\%$ und $c_x = -3000\%$. Der Versuch mit $c_x = -3000\%$ führt zu einem breiteren Fahrspiegel. Auf beiden Bildern ist eine Verfärbung, welche im Fall $c_x = -300\%$ gelblich und im Fall $c_x = -3000\%$ bläulich ausfällt, erkennbar. Die Fahrspiegel haben ein schuppiges Erscheinungsbild.

Abbildung 33, Abbildung 35 und Abbildung 37 zeigen die mit Nital geätzten Querschnitte der Schienen. Weiße Schichten im Bereich des Fahrspiegels, überrollt mit $c_x = -300\%$ und $c_x = -3000\%$, sind erkennbar. Diese Abbildungen verdeutlichen die Verbreiterung des Fahrspiegels mit zunehmendem Schlupf. Weder die WEL noch das darunter liegende Grundmaterial weisen Risse auf.

Es wurde für alle drei Fälle die Temperaturverteilung unter der Oberfläche berechnet. Dabei wurde die Halbachse a mit 8 mm angenommen sowie die Halbachse b an die Fahrspiegelbreite der Querschnitte angepasst. Das *ECF-Modell* wurde anhand der bei den Versuchen gemessenen Kraftschlüsse kalibriert.

Abbildung 34 zeigt die Temperaturverteilung unter der Oberfläche für den Versuch mit dem Schlupf $c_x = -20\%$. Die Austenitisierungs-Grenztemperatur wird laut dieser Simulation nicht erreicht.

Abbildung 36 und Abbildung 38 zeigen die Ergebnisse der Simulationen für die Versuche mit $c_x = -300\%$ und $c_x = -3000\%$. In beiden Diagrammen ist die Dicke des WEL für den entsprechenden Versuch eingezeichnet. Man erkennt, dass Temperaturen um und auch über 700°C bis zu der Tiefe entsprechend der WEL-Dicke in beiden Versuchen erreicht werden.



Abbildung 33: Schienenquerschnitt, geätzt mit Nital, um möglichen WEL sichtbar zu machen. Die Schiene wurde am Prüfstand mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,1$ m/s und einem Schlupf von $c_x = -20\%$ überrollt. Originalbild aus [36], modifiziert.

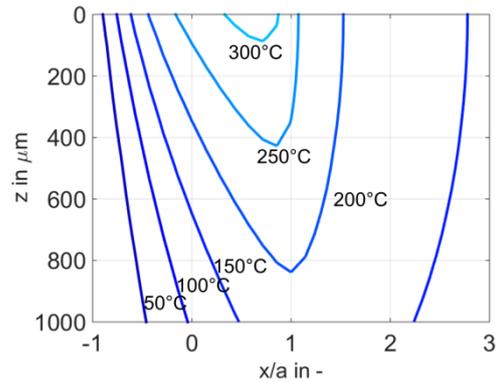


Abbildung 34: Temperaturverteilung unter der Oberfläche in der Mitte des Kontaktes. Parameter: $v = 0,1$ m/s, $c_x = -20\%$, $F_N = 110$ kN, $a = 8$ mm, $b = 4$ mm. Originalbild aus [36], modifiziert.

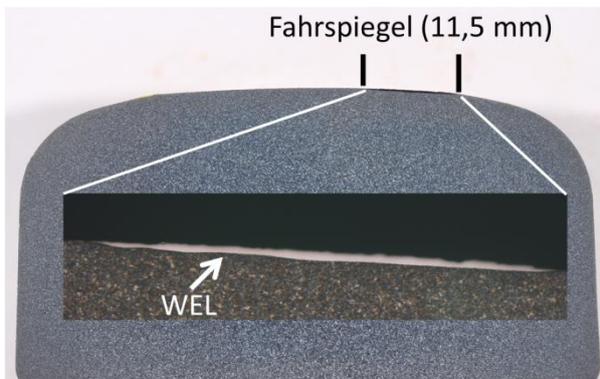


Abbildung 35: Schienenquerschnitt, geätzt mit Nital, welcher einen WEL mit einer maximalen Dicke von zirka 0,34 mm sichtbar macht. Die Schiene wurde am Prüfstand bei einer Geschwindigkeit mit $v = 0,1$ m/s und einem Schlupf von $c_x = -300\%$ überrollt. Originalbild aus [36], modifiziert.

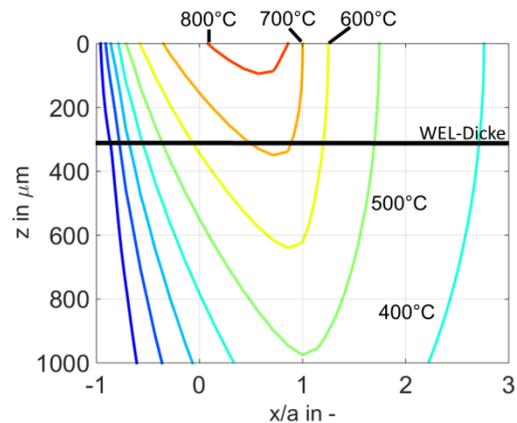


Abbildung 36: Temperaturverteilung unter der Oberfläche in der Mitte des Kontaktes. Parameter: $v = 0,1$ m/s, $c_x = -300\%$, $F_N = 110$ kN, $a = 8$ mm, $b = 5,75$ mm. Originalbild aus [36], modifiziert.

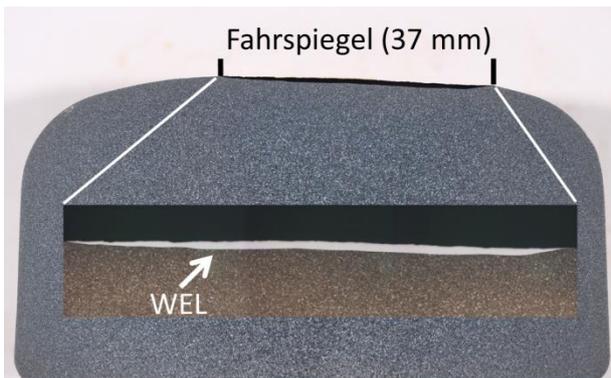


Abbildung 37: Schienenquerschnitt, geätzt mit Nital, welcher einen WEL mit einer maximalen Dicke von zirka 0,73 mm sichtbar macht. Die Schiene wurde am Prüfstand mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,1$ m/s und einem Schlupf von $c_x = -3000\%$ überrollt. Originalbild aus [36], modifiziert.

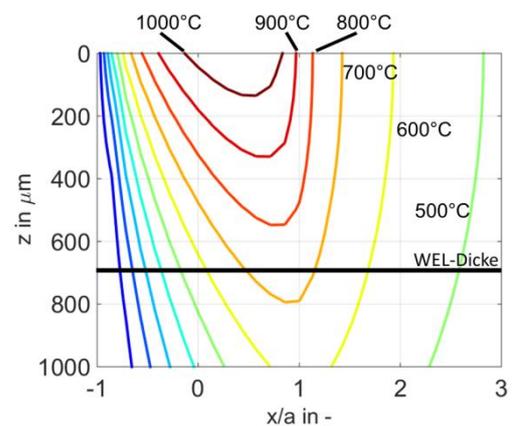


Abbildung 38: Temperaturverteilung unter der Oberfläche in der Mitte des Kontaktes. Parameter: $v = 0,1$ m/s, $c_x = -3000\%$, $F_N = 110$ kN, $a = 8$ mm, $b = 18,5$ mm. Originalbild aus [36], modifiziert.

Jeweils einen Längsschnitt der beiden Schienen, überrollt mit den Schlüpfen $c_x = -300\%$ und $c_x = -3000\%$, zeigen Abbildung 39 und Abbildung 40. Der WEL in Abbildung 39 weist Strukturen parallel zur Oberfläche auf. Bei diesen Strukturen könnte es sich um Risse oder um die Strukturorientierung des Materials, verursacht durch die plastische Scherverformung der oberflächennahen Schichten der Schiene, handeln. In Abbildung 40 können hingegen keine Hinweise auf Risse gefunden werden.

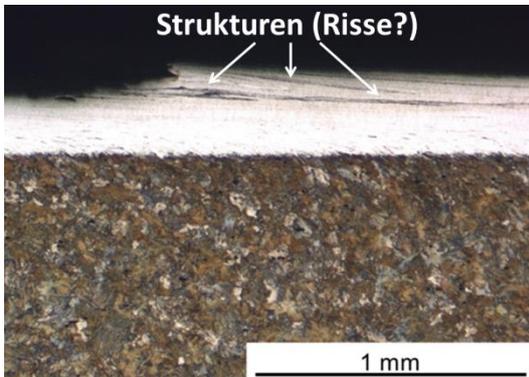


Abbildung 39: Längsschnitt der Schiene (Versuch mit $c_x = -300\%$). Foto: voestalpine Schienen GmbH, Leoben Donawitz/Österreich.

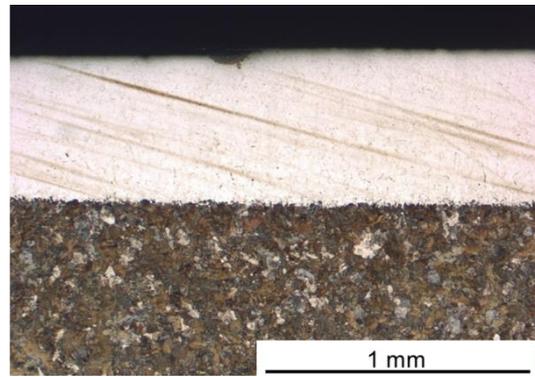


Abbildung 40: Längsschnitt der Schiene (Versuch mit $c_x = -3000\%$). Foto: voestalpine Schienen GmbH, Leoben Donawitz/Österreich.

Diskussion der Ergebnisse

Die Abbildungen 24 und 25 zeigen die Abhängigkeit der Kontakttemperatur an der Oberfläche von Geschwindigkeit und Schlupf sowie von der Normallast und der Kontaktflächengröße. In Abbildung 24 wird ersichtlich, dass zwischen der Oberflächentemperatur im Kontakt, der Geschwindigkeit und dem Schlupf kein linearer Zusammenhang besteht. Ob die für die Erreichung bzw. Überschreitung der Austenitisierungs-Grenztemperatur von zirka 720°C notwendigen Schlüpfen im Betrieb möglich sind, war nicht Gegenstand der Untersuchungen dieser Arbeit.

Einen Einfluss auf die Kontakttemperatur haben auch die Normallast und die Kontaktflächengröße (vgl. Abbildung 25). Ausgehend vom Standardzustand sind bei einer Erhöhung der Normallast, welche mit einer Vergrößerung der Kontaktfläche einhergeht, sowie bei einer Verkleinerung der Kontaktflächengröße bei gleichbleibender Normallast weniger Schlupf und/oder Fahrzeuggeschwindigkeit für die Erreichung derselben maximalen Oberflächentemperatur (in Abbildung 25 am Beispiel von 720°C Oberflächentemperatur gezeigt) notwendig.

Dass dieselben maximalen Oberflächentemperaturen nicht zur gleichen Temperaturverteilung unter der Oberfläche führen, veranschaulichen die Abbildungen 26 und 27. In den Bildern wird die maximale Oberflächentemperatur von 720°C mit den Fahrzeuggeschwindigkeiten $v = 1$ m/s und $v = 100$ m/s erreicht. Wie in Abbildung 24 ersichtlich, sind für die Erreichung derselben maximalen Oberflächentemperaturen mit den unterschiedlichen Geschwindigkeiten unterschiedliche Schlüpfen notwendig. Bei der langsameren Geschwindigkeit scheint durch die längere Kontaktzeit die Eindringtiefe für eine bestimmte Temperatur größer zu sein. So reichen die 720°C im Falle von $v = 1$ m/s bis zu einer Tiefe von zirka 20 μm , bei der höheren Fahrzeuggeschwindigkeit von $v = 100$ m/s jedoch nur bis zu einer Tiefe von zirka 4 μm . Nachdem das Rad den betrachteten Schienenquerschnitt nicht mehr berührt, sinkt die Temperatur in beiden Fällen um mehrere 100°C in weniger als einer Sekunde. Geht man von einer durch die Temperatur verursachten teilweisen Austenitisierung des Stahls aus, ist durch diesen schnellen Temperaturabfall eine Martensitbildung auf jeden Fall möglich (vgl. [36] [56]).

Mit den Versuchen am 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand der voestalpine Schienen GmbH in Leoben Donawitz wird gezeigt, dass ein einmaliges Einwirken von deutlich erhöhten Temperaturen zur Bildung eines WEL auf der Schienenoberfläche führen kann. Als Fahrzeuggeschwindigkeit wurde für alle drei Versuche $v = 0,1$ m/s gewählt. Die gewählten Schlüpfen betragen $c_x = -20\%$, $c_x = -300\%$ und $c_x = -3000\%$. Daraus ergaben sich Relativgeschwindigkeiten von $v_{rel} = 0,02$ m/s ($c_x = -20\%$), $v_{rel} = 0,3$ m/s ($c_x = -300\%$) und $v_{rel} = 3$ m/s ($c_x = -3000\%$).

Laut einer Simulation (Abbildung 28), durchgeführt vor den Versuchen, wird nur beim Versuch mit $c_x = -3000\%$ eine maximale Oberflächentemperatur deutlich über der Austenitisierungs-Grenztemperatur erreicht. Bei den beiden Versuchen mit erhöhtem Schlupf ($c_x = -300\%$ und $c_x = -3000\%$) wurden dennoch weiße Schichten gefunden. Nur beim Versuch mit $c_x = -20\%$ bildete sich kein WEL auf der Schienenoberfläche aus (vgl. Abbildung 33, Abbildung 35 und Abbildung 37).

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die Fahrspiegel der beiden Schienen, auf denen nach den Versuchen WEL gefunden wurden. Die Fahrspiegel haben zwar ein schuppiges Erscheinungsbild, jedoch keine Ausbrüche aus der Schienenoberfläche. Weder auf den Querschnitten (vgl. Abbildung 35 und Abbildung 37) noch auf den Längsschnitten (vgl. Abbildung 39 und Abbildung 40) können eindeutige Hinweise auf Risse im WEL oder im Basismaterial der Schiene gefunden werden. In

Abbildung 39 sind im WEL zur Oberfläche parallele Strukturen erkennbar. Bei diesen Strukturen könnte es sich um Risse handeln. Eine weitere Interpretationsmöglichkeit dieser Strukturen wäre, dass es sich dabei um die Strukturorientierung des Materials (plastische Scherverformung der oberflächennahen Schicht der Schiene) handelt.

Aufgrund der hohen Schlüpfen von $c_x = -300\%$ und $c_x = -3000\%$ kam es zu einem sogenannten „Fräser“-Effekt im Rad-Schiene-Kontakt. Der Kontakt bildete sich deutlich breiter aus, als bei der Annahme einer Kontaktellipse nach Hertz bei den vorliegenden Krümmungsradien von Rad und Schiene und der gegebenen Normallast zu erwarten war. Nur beim Versuch von $c_x = -20\%$ stellte sich ein Fahrspiegel mit der angenommenen Breite von 8 mm (Hertz-Kontakt Halbachsenbreite $b = 4$ mm) (vgl. Abbildung 33) ein. Bei den beiden anderen Versuchen wurden hingegen Fahrspiegelbreiten von 11,5 mm und 37 mm gemessen (vgl. Abbildung 35 und Abbildung 37). Aus diesem Grund wird für die weiteren Berechnungen der Temperaturverteilungen unter der Oberfläche (vgl. Abbildung 34, Abbildung 36 und Abbildung 38) die Halbachse b den Messungen der Fahrspiegelbreiten jeweils angepasst. Die Halbachse a wurde unverändert aus der ursprünglichen Temperaturberechnung nach Abbildung 28 übernommen. Des Weiteren wurde eine Kalibrierung des *ECF-Modells* durchgeführt.

Die mit diesen Korrekturen durchgeführten Simulationen ergeben eine gute Korrelation zwischen der maximalen Tiefe des WEL und der Austenitisierungs-Grenztemperatur von 720°C (vgl. Abbildung 33 bis Abbildung 38).

Abschließend werden jene Punkte angeführt, die bei den Simulationen und Versuchen nicht berücksichtigt wurden, jedoch auf deren Ergebnisse möglicherweise einen Einfluss haben:

- Die Normalspannungsberechnung nach Hertz [54] verlangt ein linear elastisches Werkstoffverhalten der beiden kontaktierenden Körper. Ein solches Werkstoffverhalten ist beim beschriebenen „Fräser“-Effekt ausgeschlossen, vielmehr muss mit plastischen Verformungen gerechnet werden.
- Die Temperaturabhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten β wurde bei den Gleichungen nach *Ertz und Knothe* [30] im *ECF-Modell* [28] [61] nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 5.4.1).
- Das Rad wurde während der Versuche nicht gewechselt und wies nach den Versuchen eine erhöhte Rauigkeit auf. Die Rauigkeit sowie die von dieser möglicherweise verursachten lateralen Kontaktsprünge werden in der Temperatursimulation nicht berücksichtigt.
- Die Austenitisierungs-Grenztemperatur kann durch die Spannungszustände, verursacht durch den Rad-Schiene-Kontakt, vermindert sein. Eine Austenitisierung des Stahls könnte schon bei niedrigeren Temperaturen als bei den angegebenen 720°C stattfinden.

6.2 Verhalten von WEL unter zyklischer Belastung

Zwei weitere Versuche am 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand der voestalpine Schienen GmbH in Leoben Donawitz/Österreich sollen zeigen, wie sich ein WEL unter zyklischer Belastung verhält. Für beide Versuche wurde eine neue Schiene mit einem UIC60 Profil verwendet und gleich wie bei der ersten Versuchsreihe jeweils eintausend Mal bei einem Schlupf von $c_x = -0,1\%$ mit einer Geschwindigkeit von $v = 2\text{ m/s}$ überrollt. Die oberflächennahe Schicht der beiden Schienen im Bereich des Fahrspiegels soll damit verformt werden, um massive Plastifizierungseffekte während der Versuche auszuschließen. Die Normallast ist für die gesamte Versuchsdauer auf $F_N = 110\text{ kN}$ festgelegt.

6.2.1 Zyklische Beanspruchung von WEL: Versuch 1

Bei Versuch 1 wurde der WEL durch eine Überrollung mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,1$ m/s und einem Schlupf von $c_x = -300$ % über die gesamte Länge der Schiene erzeugt. Die Schiene wurde daraufhin in Längsrichtung in drei Bereiche unterschiedlicher Beanspruchungen geteilt.

Der erste Bereich, in dieser Arbeit *B1* genannt, wurde nicht weiter belastet.

Der zweite Bereich *B2* wurde schlupffrei ($c_x = 0$ %) 114 tausend Mal mit $v = 2$ m/s überrollt.

Auch der dritte Bereich *B3* wurde zuerst mit 114 tausend schlupffreien Überrollungen bei einer Geschwindigkeit von $v = 2$ m/s zyklisch belastet. Darauf folgend wurde der Bereich *B3* weitere 29 tausend Mal mit einem Schlupf von $c_x = -0,25$ % bei einer Geschwindigkeit von $v = 1$ m/s überfahren.

Für den gesamten Versuch wurde ein zylindrisches Rad verwendet.

Abbildung 41 zeigt die Schienenoberfläche nach der Erzeugung des WEL. Der Bereich des Fahrspiegels ist deutlich sichtbar. Auf der Detailaufnahme (Abbildung 42) ist das schuppige Aussehen des Fahrspiegels noch deutlicher erkennbar.

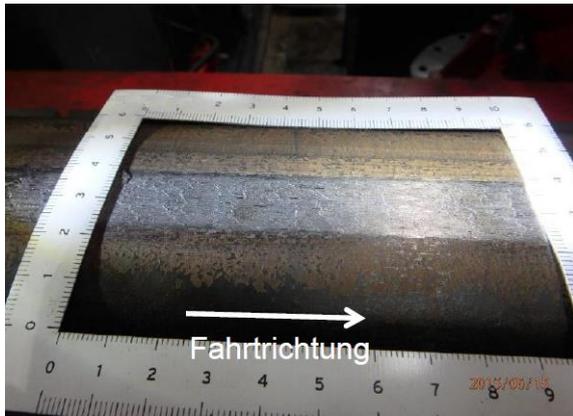


Abbildung 41: Oberfläche der Schiene nach der Erzeugung des WEL. Foto: voestalpine Schienen GmbH, Leoben Donawitz/Österreich.

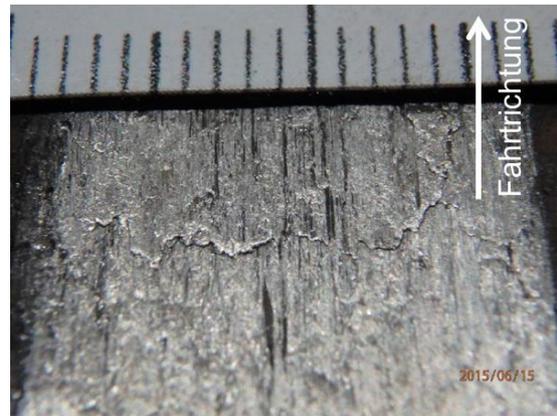


Abbildung 42: Detailaufnahme des Fahrspiegelbereiches direkt nach der Erzeugung des WEL. Dieser wirkt schuppig. Foto: voestalpine Schienen GmbH, Leoben Donawitz/Österreich.

Abbildung 43 zeigt den Fahrspiegel von *B2* nach 101 tausend Überrollungen. Der rechte Fahrspiegelrand wirkt ausgefranst.

In Abbildung 44 ist der Fahrspiegel von *B3* nach 144 tausend Überrollungen ersichtlich.

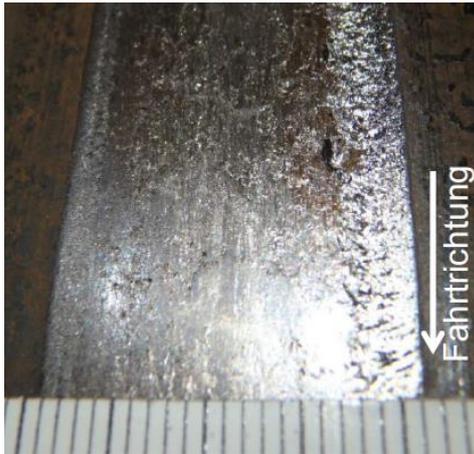


Abbildung 43: Oberfläche der Schiene im Abschnitt B2 nach 101 tausend Überrollungen. Foto: voestalpine Schienen GmbH, Leoben Donawitz/Österreich.

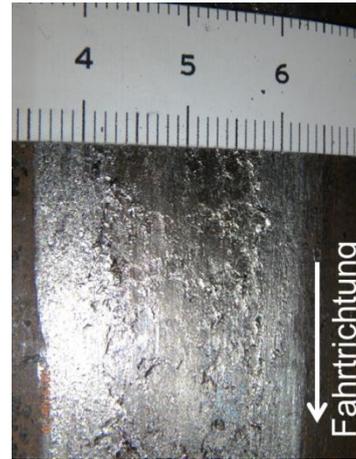


Abbildung 44: Oberfläche der Schiene im Abschnitt B3 nach 144 tausend Überrollungen. Foto: voestalpine Schienen GmbH, Leoben Donawitz/Österreich.

An beiden Positionen wurden auch Längsschnitte der Schiene durchgeführt. Abbildung 45 zeigt einen Längsschnitt in B2. Die Orientierung der Struktur des WEL ist deutlich erkennbar. Eine schuppige Öffnung sowie ein horizontaler Riss an deren Ende sind erkennbar. Dasselbe Erscheinungsbild wurde auch bei den Längsschnitten im Bereich B3 gefunden: Der WEL weist eine Orientierung auf. Auch dort sind die Öffnung einer Schuppe und ein horizontaler Riss an deren Ende sichtbar.

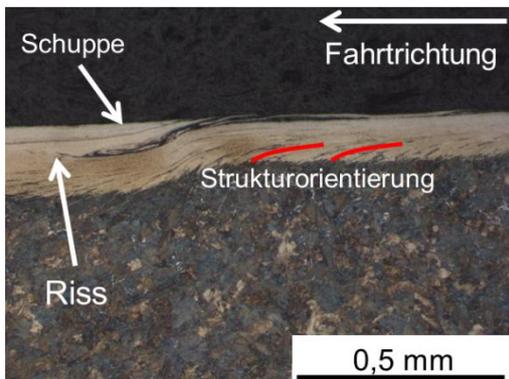


Abbildung 45: Längsschnitt der Schiene in B2 durch eine Schuppe. Man erkennt die Orientierung des Materials sowie einen Riss am Ende der Schuppenöffnung. Foto: voestalpine Schienen GmbH, Leoben Donawitz/Österreich.

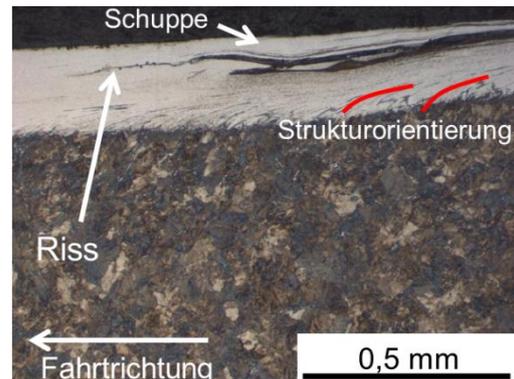


Abbildung 46: Längsschnitt der Schiene in B3 durch eine Schuppe. Auch hier ist die Strukturorientierung des Materials erkennbar. Auch diese Schuppe weist am Ende ihrer Öffnung einen Riss auf. Originalbild aus [64], modifiziert.

6.2.2 Zyklische Beanspruchung von WEL: Versuch 2

Auch diese Schiene wurde für den weiteren Versuchsverlauf in drei Abschnitte geteilt, wobei jeder Abschnitt fünf Mal mit demselben erhöhten Schlupf überrollt wurde.

Der erste Abschnitt A1 wurde mit $c_x = -100\%$, der zweite Abschnitt A2 mit $c_x = -200\%$ und der dritte Abschnitt A3 mit $c_x = -300\%$ bei einer Geschwindigkeit von $v = 0,1$ m/s überfahren.

Bis zu diesem Zeitpunkt war das verwendete Rad zylindrisch. Für die folgende zyklische Belastung wurde das Rad bearbeitet und erhielt eine Krümmung des Profils von 200 mm in lateraler Richtung.

Die zyklische Belastung startete mit 200 tausend Überrollungen ohne Schlupf. Darauf folgten weitere 200 tausend Überrollungen mit Schlupf durch Aufbringung eines Antriebmomentes, welches 35 % des übertragbaren Maximalmomentes M_{max} entsprach. Weitere 200 tausend Mal wurde die Schiene mit $M_{max} = 70\%$ überrollt. Insgesamt wurden somit 600 tausend zyklische Belastungen realisiert.

Abbildung 47 zeigt die schuppige Oberfläche im Bereich des Abschnittes A1 vor Beginn der zyklischen Belastung. Bei diesem Versuch entstand auch im Bereich von $c_x = -100\%$ ein WEL.

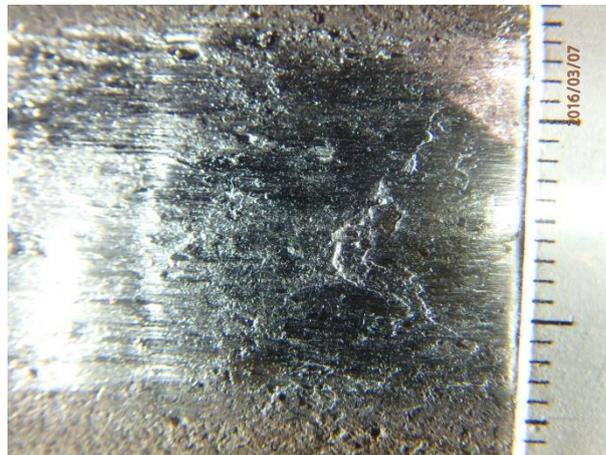


Abbildung 47: Oberfläche im Bereich A1 vor der zyklischen Belastung des mehrfach erhitzten WEL. Foto: voestalpine Schienen GmbH, Leoben Donawitz/Österreich.

Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen die Oberfläche nach der zyklischen Belastung am Ende des Versuchs. Auf beiden Bildern sind Ausbrüche der Schienenoberfläche sichtbar.

Abbildung 50 bis Abbildung 53 zeigen laterale und longitudinale Querschnitte der Schiene, die nach dem Versuch erstellt wurden. Auf diesen Bildern erkennt man Rissysteme, die vom WEL bis in das Basismaterial reichen. Der WEL weist mehrere Farbschichten auf.

Abbildung 52 zeigt einen Schnitt im Bereich eines WEL-Ausbruches. Eine Eindrückung des WEL ist in Abbildung 53 sichtbar.



Abbildung 48: Beispielhafter Ausbruch der Schienenoberfläche im Bereich A2. Foto: voestalpine Schienen GmbH, Leoben Donawitz/Österreich.

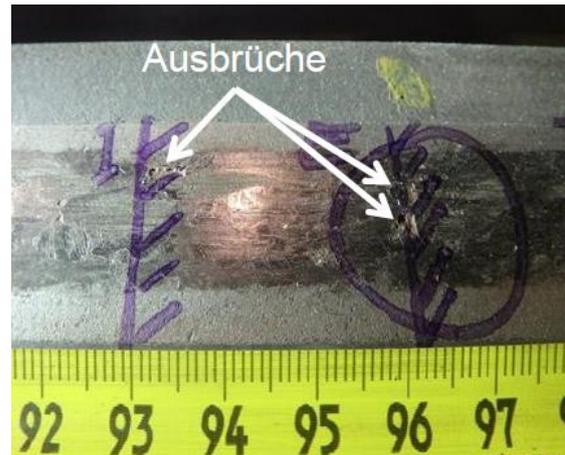


Abbildung 49: Mehrere Millimeter große Ausbrüche der Schienenoberfläche im Bereich A3. Originalbild aus [64], modifiziert.

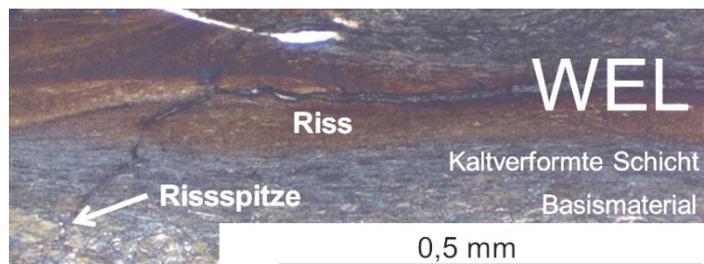


Abbildung 50: Lateraler Querschnitt durch den Ausbruch von Abbildung 48, Bereich A2. Schiene ist mit Nital geätzt. Man erkennt ein Rissystem welches sich vom WEL bis in das Material erstreckt. Der WEL weist mehrere Schichten mit unterschiedlichen Farben auf. Originalbild aus [64], modifiziert.

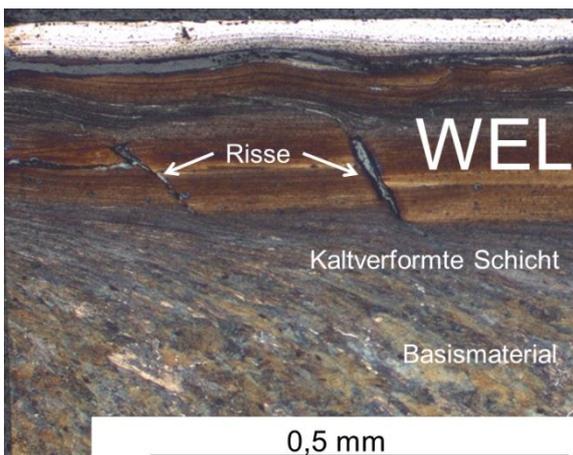


Abbildung 51: Längsschnitt im Bereich des Ausbruches von Abbildung 48, Bereich A2. Schiene ist mit Nital geätzt. Auch hier sind das Rissystem sowie die unterschiedlichen Farbschichten des WEL sichtbar. Originalbild aus [64], modifiziert.

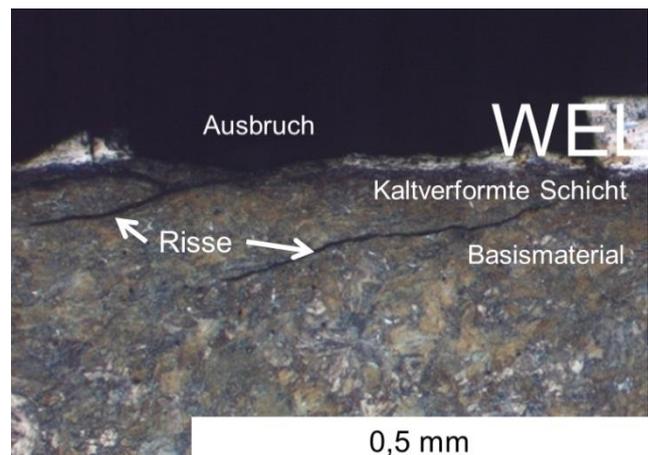


Abbildung 52: Ausgebrochener WEL sowie Risse vom WEL bis in das Basismaterial im Abschnitt A3 der Schiene. Schiene ist mit Nital geätzt. Originalbild aus [64], modifiziert.

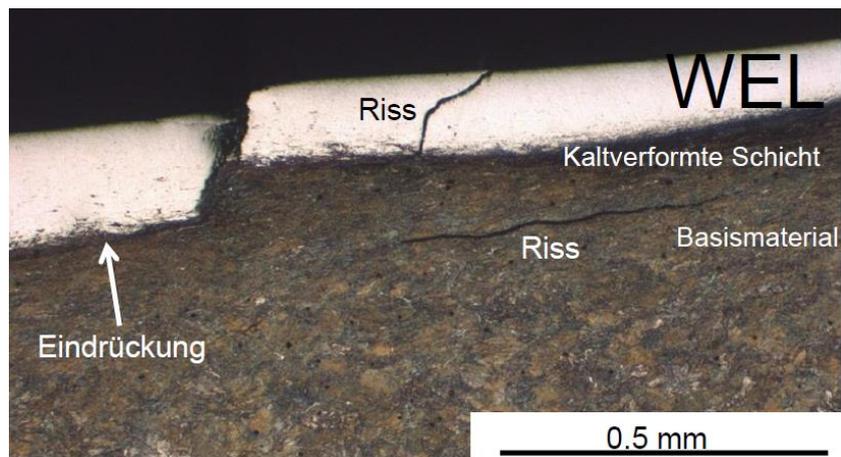


Abbildung 53: Lateraler Querschnitt im Bereich A3. Schiene ist mit Nital geätzt. Auf diesem Bild erkennt man einen in das Basismaterial gedrückten WEL-Abschnitt sowie je einen Riss im WEL und im Basismaterial. Originalbild aus [64], modifiziert.

Diskussion der Ergebnisse

Basierend auf den Ergebnissen des ersten Versuchs, bei dem gezeigt werden konnte, dass hohe Temperaturen aufgrund von hohen Schlüpfen im Kontakt zu einem WEL führen können, wurden zwei weitere Versuche durchgeführt, die das Verhalten des WEL unter zyklischer Belastung zeigten. Die Versuche unterschieden sich dahingehend, dass bei Versuch 1 die Schiene nur einmal mit einem erhöhten Schlupf von $c_x = -300\%$ überrollt wurde. Bei Versuch 2 wurde die Schiene in drei Abschnitte eingeteilt und jeder Abschnitt fünf Mal mit einem der Schlüpf $c_x = -100\%$, $c_x = -200\%$ oder $c_x = -300\%$ bei einer Geschwindigkeit $v = 0,1$ m/s überrollt. Dadurch wurde die Schiene bei Versuch 1 nur einmal, bei Versuch 2 jedoch fünf Mal hintereinander mit erhöhten Temperaturen belastet. Diese mehrfache Temperatureinwirkung bei Versuch 2 führte zu farblich unterschiedlichen WEL-Schichten (vgl. Abbildung 48 bis Abbildung 50). In beiden Versuchen war der Bereich des Fahrspiegels nach diesen Belastungen schuppig (vgl. Abbildung 42 und Abbildung 47).

Nach der zyklischen Belastung kam es zu keinen auffälligen Oberflächenausbrüchen bei Versuch 1. Der WEL schien trotz dieser Belastung nicht zu Ausbrüchen zu tendieren. Querschnitte zeigen, dass es zu einer Ausbildung von zur Oberfläche parallelen Rissen am Ende der Schuppenöffnungen kam. Ob diese Risse bei weiterer Belastung zu Ausbrüchen führen, konnte nicht gezeigt werden.

Bei Versuch 2 wurde nach den Überrollungen mit hohem Schlupf das zylindrische Radprofil modifiziert und ein Radprofil mit einem Krümmungsradius von 200 mm eingefräst. Dadurch wurden bei den weiteren zyklischen Belastungen die Entstehung eines konformen Kontaktes und damit ein Spannungsabfall aufgrund des größer werdenden Kontaktes zeitlich verzögert. Nach den zyklischen Belastungen wies die Schienenoberfläche bei Versuch 2 im Gegensatz zu Versuch 1 Schäden auf. Es wurden an mehreren Stellen Ausbrüche gefunden, welche erste kleine geometrische Abweichungen des Schienenprofils darstellten. Querschnitte zeigten Risse sowohl im als auch in den Schichten unter dem WEL. Im Gegensatz zu Versuch 1 zeigten die Risse bei Versuch 2 in alle Richtungen. Für die unterschiedliche Ausrichtung (horizontal und vertikal) der Rissysteme gibt es zwei Erklärungsansätze:

1. Die Belastungen im Versuch 1 und Versuch 2 waren unterschiedlich. Höhere Spannungen und diese über mehrere Zyklen im Versuch 2 führten zu einem „Zerbrechen“ des WEL. Die dadurch verursachten Risse wuchsen in das Grundmaterial weiter.
2. Nach Ahlström [37] führt das wiederholte Erhitzen und Abkühlen zu einer Änderung der Eigenspannungen im WEL. Unter der Annahme, dass der WEL zumindest teilweise aus Martensit besteht, würde dieser bei erneuter Erwärmung über die Austenitisierungsgrenze, verglichen mit Perlit/Ferrit, unterschiedlich expandieren. Die Kontraktion während der Abkühlung auf die Umgebungstemperatur ist jedoch vergleichbar groß. Es entstehen Zugspannungen im WEL, welche die vertikalen Risse in dieser Schicht verursachen. Zyklische Belastungen könnten das Wachstum dieser Risse in das Grundmaterial verursachen.

Mit den Versuchen der zyklischen Belastungen der WEL wurde gezeigt, dass für die Entstehung von Rissen und geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche in Form von Ausbrüchen weitere Belastungen mit erhöhten Schlüpfen und damit erhöhten Temperaturen auf einen bestehenden WEL, verbunden mit zyklischen Belastungen bei geringen Schlüpfen, notwendig sind.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die bei Versuch 2 entstandenen Risse und Ausbrüche noch keinen Squat darstellen. Risse sind neben dem charakteristischen äußeren Erscheinungsbild nur eine Eigenschaft, die diesen Schienenfehler kennzeichnet (vgl. Kapitel 1.1).

Im folgenden Kapitel 7 wird mit Hilfe von Simulationen untersucht, inwieweit geometrische Abweichungen der Oberfläche auf der Schiene verbleiben und wie sich diese unter weiteren zyklischen Belastungen entwickeln können. Eine Simulation sollte außerdem zeigen, ob einzelne hintereinander auftretende WEL-Bereiche zu bleibenden geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche führen können.

Geometrische und schädigungstechnische Entwicklung von Squats

In diesem Kapitel werden die mit Hilfe des Rechenmodells (vgl. Kapitel 5) realisierten Studien über mögliche Wachstumsprozesse von Squats vorgestellt.

Versuche, durchgeführt an einem 1:1 Rad-Schiene Prüfstand, konnten zeigen, wie ein WEL aufgrund von Rad-Schiene-Kontaktbelastungen auf einer Schienenoberfläche entstehen kann. Außerdem konnte mit weiteren Versuchen gezeigt werden, dass unter gewissen Belastungen in diesem WEL Risse entstehen können und dass dieser WEL zu Ausbrüchen aus der Schienenoberfläche führen kann. Solche Ausbrüche stellen erste geometrische Abweichungen dar, die in weiterer Folge zu Squats führen könnten (vgl. Kapitel 4). Die Simulationsergebnisse des Kapitels 7.1 zeigen das Verhalten solcher initialer geometrischer Abweichungen der Schienenoberfläche unabhängig vom Grund ihrer Entstehung.

Bei Untersuchungen von Squats auf einer Schiene eines Eisenbahnnetzes wurden auch WEL in Form von einzelnen WEL-Bereichen mit einem Abstand von rund 15 bis 30 mm zueinander gefunden (vgl. Kapitel 3). Im Kapitel 7.2 werden die Ergebnisse einer Simulation vorgestellt, die zeigen sollen, inwieweit unterschiedliche Verschleißraten der Schiene aufgrund von Materialinhomogenitäten in Form von WEL-Bereichen zu geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche bzw. zu Squats führen können (vgl. Kapitel 4).

Anmerkungen zur Simulations- und Ergebnisdarstellung

Abbildung 54 zeigt ein Beispiel für eine dreidimensionale Ergebnisdarstellung, Abbildung 55 für eine zweidimensionale Ergebnisdarstellung in der Draufsicht. Die Lage und Ausrichtung des Koordinatensystems sowie der Überrollrichtung in diesen beiden Abbildungen ist allgemein für die gesamte Arbeit gültig. Farbskalen geben quantitative Auskunft über dargestellte errechnete Simulationswerte.

Die Angabe der Breite des Fahrspiegels oder eines Kontaktes bezieht sich dabei auf den Absolutabstand der äußersten Konturen, gemessen in Querrichtung zur Schiene (y – Koordinatenrichtung).

Hingegen entspricht die Angabe der Dicke eines Kontakttringes der in Abbildung 55 dargestellten Abmessung.

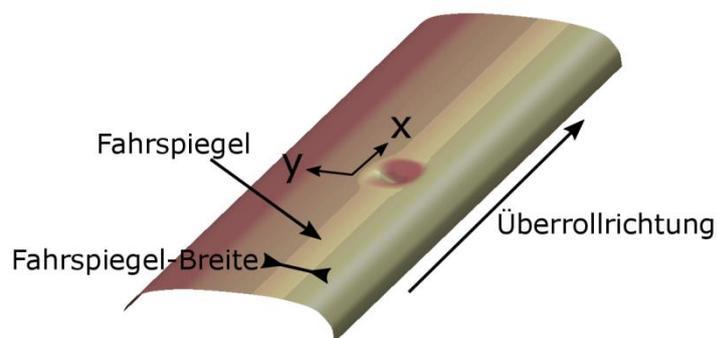


Abbildung 54: Beispiel einer dreidimensionalen Ergebnisdarstellung.

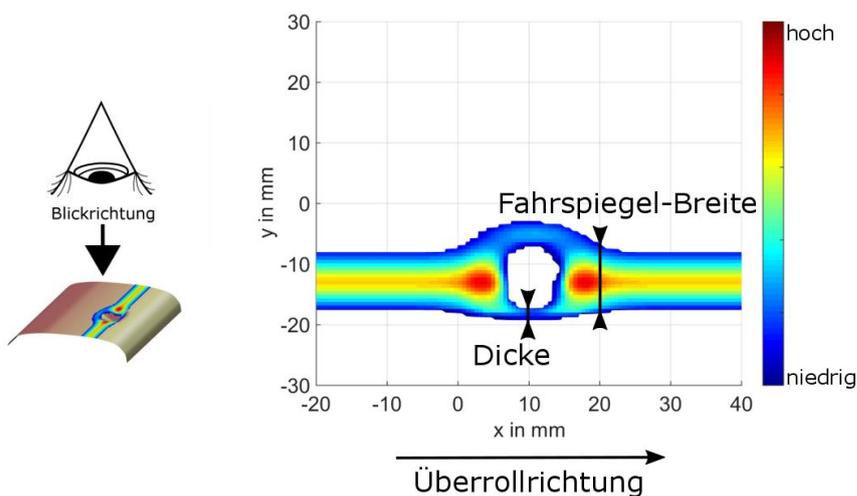


Abbildung 55: Beispiel einer zweidimensionalen Ergebnisdarstellung.

Es wird darauf hingewiesen, dass die geometrische Abweichung der Schienenoberfläche in den dreidimensionalen Darstellungen um den Faktor 20 übertrieben wird.

7.1 Entwicklung initialer geometrischer Abweichungen der Schienenoberfläche

In diesem Kapitel wird untersucht, inwieweit initiale geometrische Abweichungen der Schienenoberfläche unabhängig von ihrer Herkunft sowohl die geometrische als auch die schädigungstechnische Entwicklung der Schienen beeinflussen (vgl. Abbildung 56).

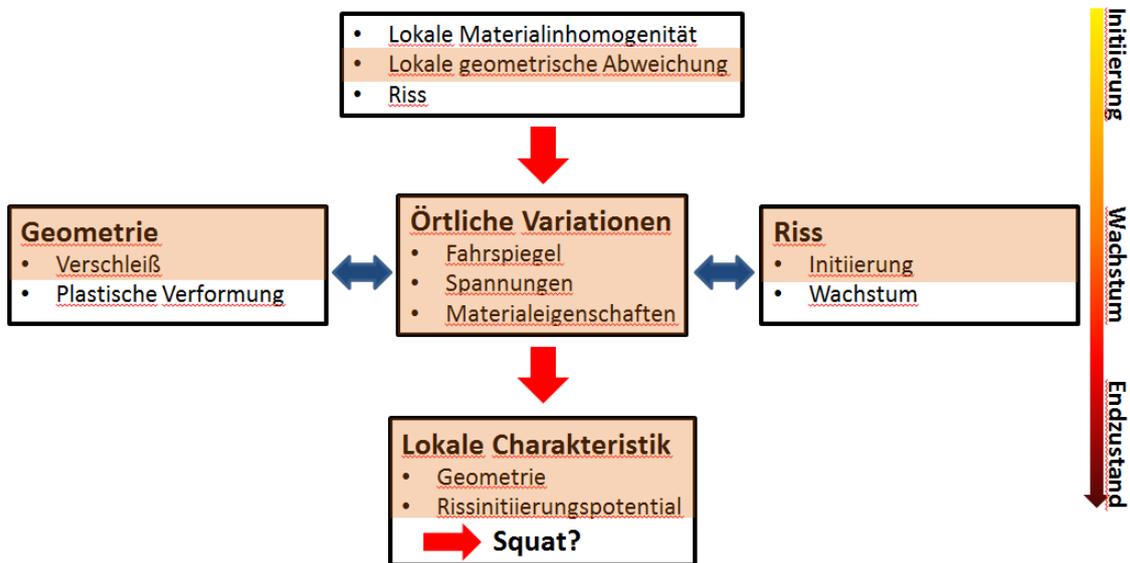


Abbildung 56: Schematische Darstellung der Simulationsidee bezüglich des Verhaltens von lokalen geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche. Die berücksichtigten Phänomene bzw. Mechanismen sind farbig hinterlegt.

Im Kapitel 7.1.1 wird auf die grundsätzlichen Effekte im Rad-Schiene-Kontakt während der Überrollung einer Schiene mit einer geometrischen Oberflächenabweichung eingegangen. Außerdem wird der für Ergebnisvergleiche herangezogene *Standardfall* vorgestellt.

Kapitel 7.1.2 befasst sich mit dem Einfluss der Größe einer initialen geometrischen Oberflächenabweichung auf deren geometrische Entwicklung.

Bei Bogenfahrten sowie bei Beschleunigungs- und Bremsvorgängen kommt es zu einem zusätzlichen Schlupf im Rad-Schiene-Kontakt. Die geometrische Entwicklung von Abweichungen der Schienenoberfläche unter den genannten Bedingungen wird im Kapitel 7.1.3 untersucht.

Kapitel 7.1.4 beschäftigt sich mit dem relativen Schädigungspotential in Form von einer möglichen Rissinitiierung aufgrund geometrischer Abweichungen der Schienenoberfläche.

Der Einfluss der Normallastvariation, hervorgerufen durch die Vertikaldynamik des Systems, auf die Entwicklung von geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche und auf das Rissinitiierungspotential werden im Kapitel 7.1.5 dargestellt.

Nicht jedes Rad überfährt einen Schienenabschnitt mit derselben lateralen Auslenkung des Radsatzes (vgl. [34]). Außerdem variieren Räder in ihren Profilen aufgrund ihrer unterschiedlichen Verschleißhistorien. Die Ergebnisse von Simulationen mit abwechselnden lateralen Radsatzpositionen und Radprofilen bezüglich der geometrischen und schädigungstechnischen Entwicklung einer geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche werden im letzten Unterkapitel 7.1.6 vorgestellt und diskutiert.

7.1.1 Effekte im Rad-Schiene-Kontakt sowie die Entwicklung einer geometrischen Abweichung (*Standardfall*)

Die folgende Analyse wird anhand der Simulationsergebnisse der Überrollung ($v_{FZ} = 10$ m/s) einer geometrischen Abweichung in der Form einer algebraischen Fläche (vgl. Kapitel 5.1) mit der Länge und der Breite von 20 mm und der Tiefe von 0,15 mm durchgeführt. Der Radsatz ist um $dwy = 3$ mm aus der neutralen Position querverschoben (vgl. Kapitel 5.1). Daraus ergibt sich eine laterale Position von $y = -12,76$ mm des ersten Kontaktpunktes zwischen Rad und Schiene bei einer vertikalen Annäherung des Rades an die Schiene. Der Mittelpunkt der geometrischen Abweichung befindet sich an der Position $x = 10$ mm und $y = -12,76$ mm. Die Normallast $F_N = 110$ kN ist während der gesamten Überrollung konstant. Als Profile dienen ein S1002 für das Rad und ein UIC60 für die Schiene. Die Schienen-Einbauneigung wird mit 1:40 berücksichtigt. Es wird angenommen, dass das Rad weder einen Anlaufwinkel noch eine Geschwindigkeitskomponente v_y zur Schiene aufweist. Das Rad rollt über den betrachteten Schienenquerschnitt, daher tritt kein Schlupf durch Antreiben oder Bremsen auf.

Allgemein werden die Ergebnisse der Simulationen dieser geometrischen Abweichung für Vergleiche herangezogen. Daher werden im weiteren Verlauf der Arbeit diese geometrische Abweichung, die Eingangsparameter und die dazugehörigen Simulationsergebnisse *Standardfall* genannt. Die zu dieser Simulation des *Standardfalls* abweichenden Simulationsparameter werden im jeweiligen Kapitel explizit angeführt.

Abbildung 57 zeigt den *Standardfall* im Ausgangszustand mit dem Fahrspiegel der ersten Überrollung.

1. Überrollung

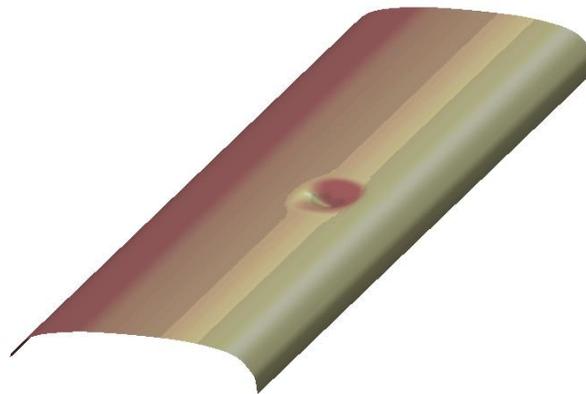
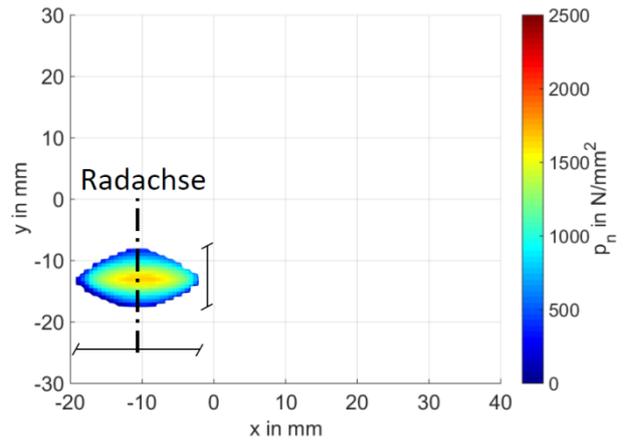
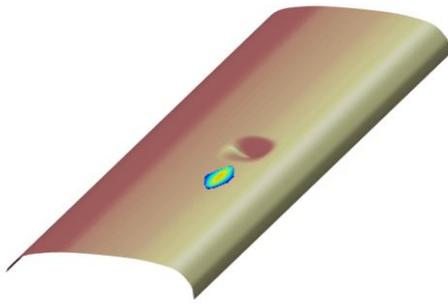
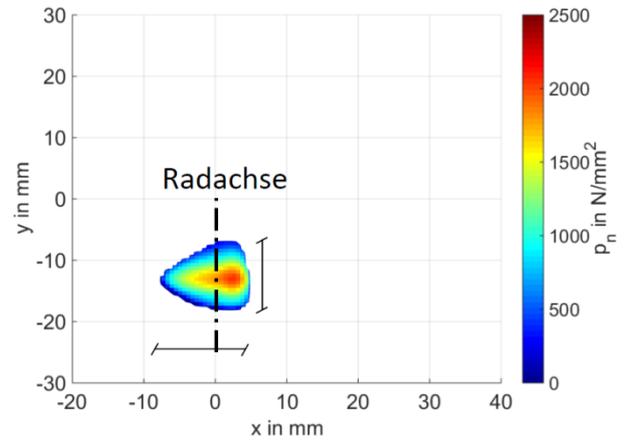
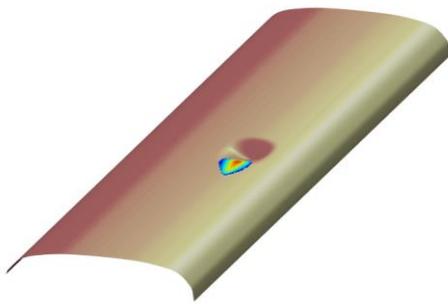


Abbildung 57: Schienenoberfläche mit der initialen geometrischen Abweichung des *Standardfalls* (Länge/Breite/Tiefe = 20/20/0,15 mm). Der Fahrspiegel variiert im Bereich der geometrischen Abweichung.

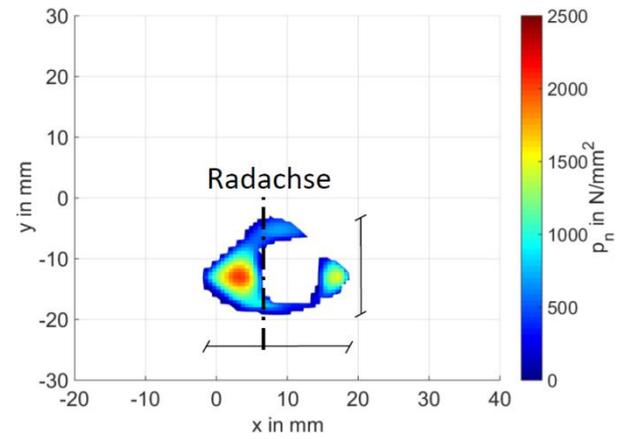
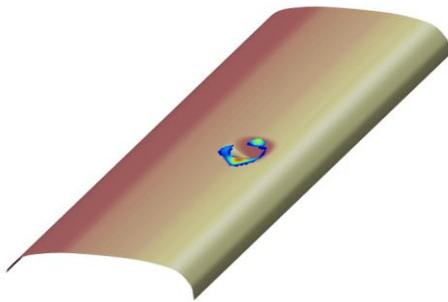
Abbildung 58 zeigt die Normalspannungen p_n im Rad-Schiene-Kontakt zu verschiedenen Zeitpunkten der ersten Überrollung. In den Detailansichten (jeweils rechte Abbildung, Draufsicht) sind die Radachsenposition sowie die maximale Länge und Breite des Kontaktes zum jeweiligen Zeitpunkt eingezeichnet. Neben den unterschiedlichen Ausprägungen der Kontaktfläche, welche die Variation des Fahrspiegels verursachen, sind auch deutliche Unterschiede in den Normalspannungsverteilungen zu den verschiedenen Zeitpunkten erkennbar.



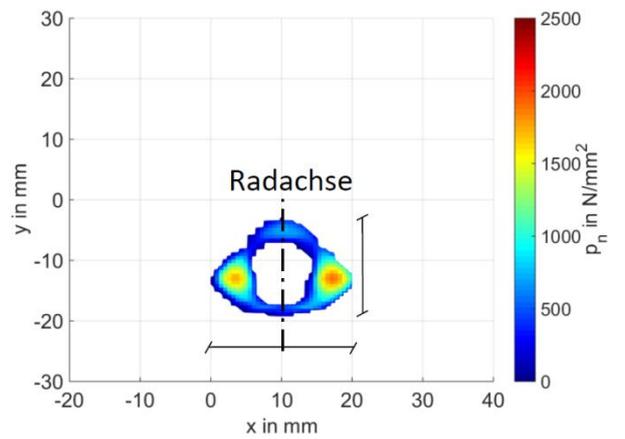
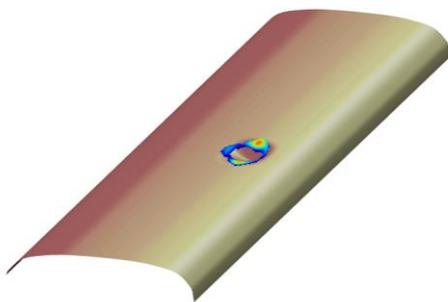
(a) Zeitpunkt 1



(b) Zeitpunkt 2



(c) Zeitpunkt 3



(d) Zeitpunkt 4

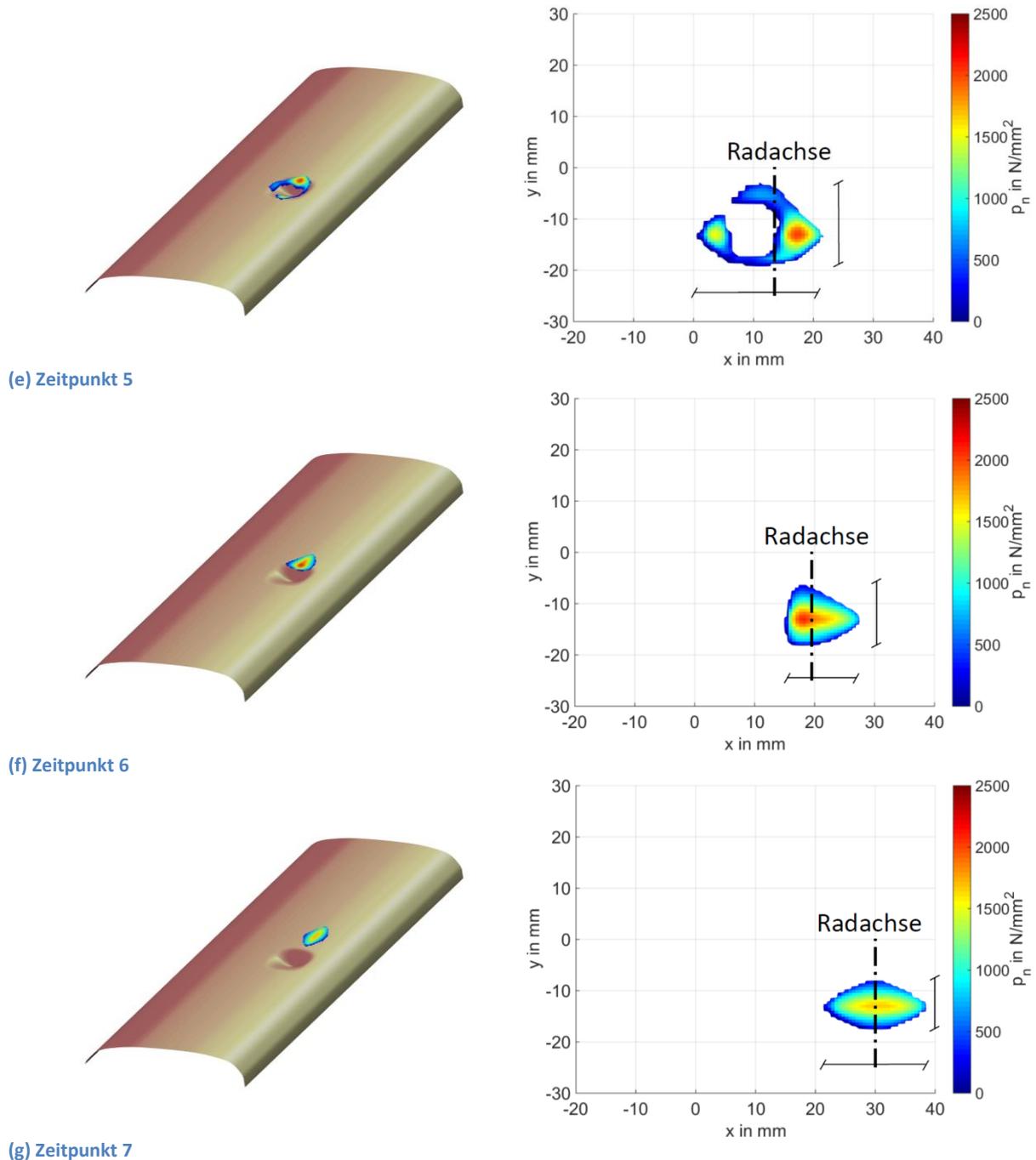


Abbildung 58: Die Bilderfolge a-g zeigt die Normalspannungen p_n im Kontakt zu verschiedenen Zeitpunkten der Überrollung.

Abbildung 59 bis Abbildung 63 geben Auskunft über die maximalen Normalspannungen p_{n-max} und Tangentialspannungen τ_{max} , die maximalen Schlüpfе s_{max} und Reibleistungsdichten \dot{q}_{max} sowie über den Materialabtrag Δz der ersten Überrollung. Die maximalen Normalspannungen und Schlüpfе weisen eine Symmetrie um den lateralen Schienenquerschnitt durch die Mitte der geometrischen Abweichung ($x = 10$ mm) auf. Die maximalen Tangentialspannungen und Reibleistungsdichten sowie der Materialabtrag durch Verschleiß sind asymmetrisch.

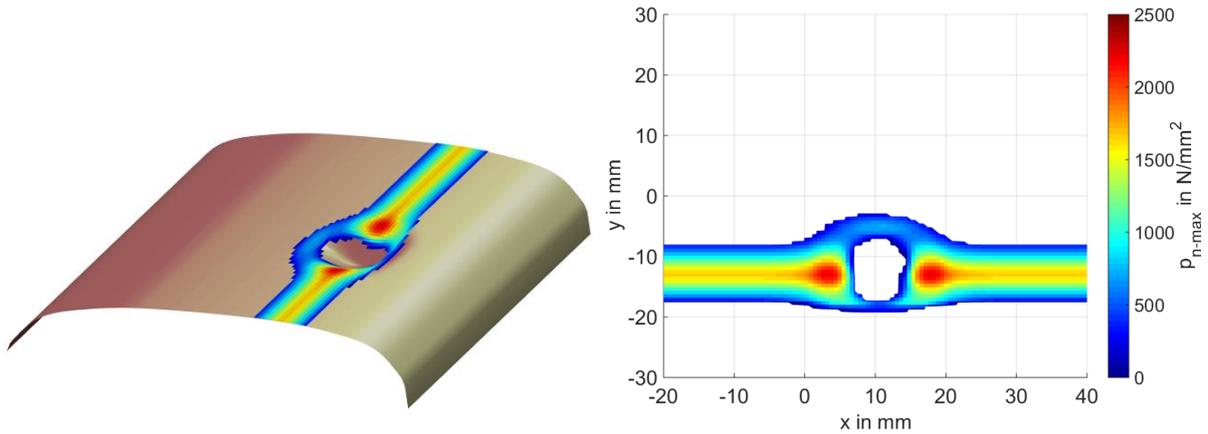


Abbildung 59: Maximale Normalspannungen p_{n-max} bei der ersten Überrollung der Schiene. Das rechte Bild zeigt den Bereich der Schiene mit der geometrischen Abweichung im Detail (Draufsicht).

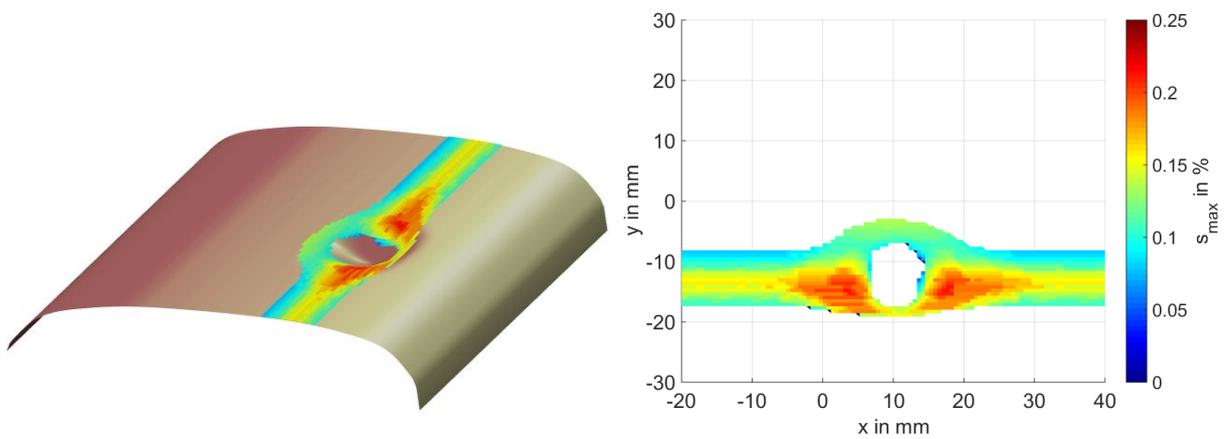


Abbildung 60: Maximale Schlüpfe s_{max} ($s_{max} = \max(\sqrt{s_x^2 + s_y^2})$) bei der ersten Überrollung der Schiene. Das rechte Bild zeigt den Bereich der Schiene mit der geometrischen Abweichung im Detail (Draufsicht).

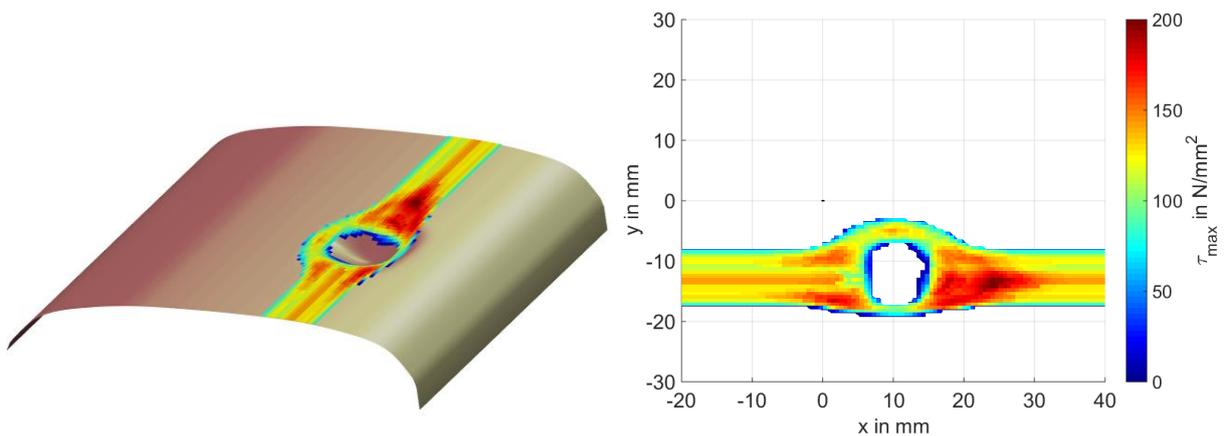


Abbildung 61: Maximale Tangentialspannungen τ_{max} ($\tau_{max} = \max(\sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2})$) bei der ersten Überrollung der Schiene. Das rechte Bild zeigt den Bereich der Schiene mit der geometrischen Abweichung im Detail (Draufsicht).

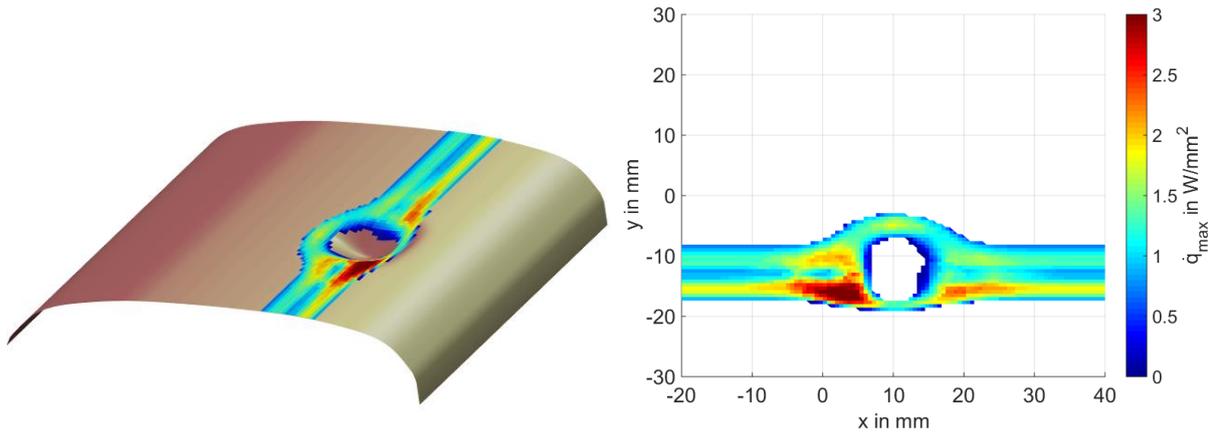


Abbildung 62: Maximale Reibleistungen \dot{q}_{max} bei der ersten Überrollung der Schiene. Das rechte Bild zeigt den Bereich der Schiene mit der geometrischen Abweichung im Detail (Draufsicht).

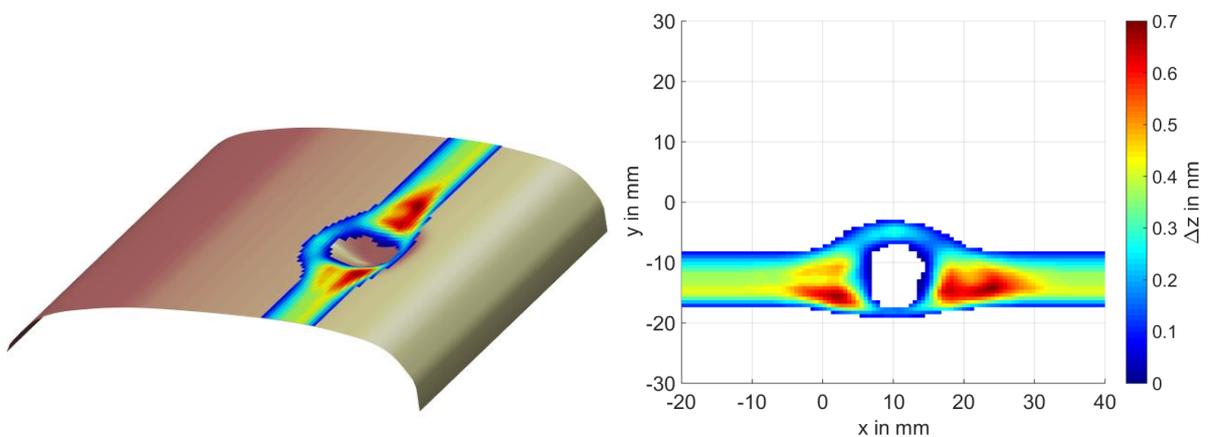


Abbildung 63: Materialabtrag Δz durch Verschleiß bei der ersten Überrollung. Das rechte Bild zeigt den Bereich der Schiene mit der geometrischen Abweichung im Detail (Draufsicht).

Für die beiden in Abbildung 64 dargestellten *Knotenpunkte* 1 und 2 des Schienennetzes werden in den Abbildungen 65 bis Abbildung 72 die zeitlichen Verläufe der Spannungen, der Schlüpfе und der Reibleistungen der ersten Überrollung dargestellt. Punkt 1 befindet sich längs der Schiene an der Position $x = 1,16$ mm, Punkt 2 an der Position $x = 19,14$ mm. Somit hat Punkt 1 einen Längsabstand $\Delta x = 8,84$ mm und Punkt 2 $\Delta x = 9,14$ mm zur Mitte der geometrischen Abweichung ($x = 10$ mm, $y = -12,76$ mm). Beide Punkte weisen dieselbe laterale Position $y = -12,76$ mm auf.

Punkt 1 und Punkt 2 kommen zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit dem Rad in Kontakt. Um einen einfacheren Vergleich zwischen den zeitlichen Kurvenverläufen der folgenden Abbildungen zu ermöglichen, wird die zeitliche Differenz des Kontaktbeginns der beiden Punkte kompensiert. Der Zeitpunkt 0 markiert den Erstkontakt des jeweiligen Schienepunktes mit dem Rad.

Abbildung 65 zeigt den zeitlichen Verlauf der Normalspannungen p_n für beide Schienen-Oberflächenpunkte. Sowohl Punkt 1 als auch Punkt 2 sind rund 2,1 ms mit dem Rad in Kontakt. Die maximalen Normalspannungen p_{n-max} , welche bei beiden Punkten bei zirka 1950 N/mm² liegen, werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht.

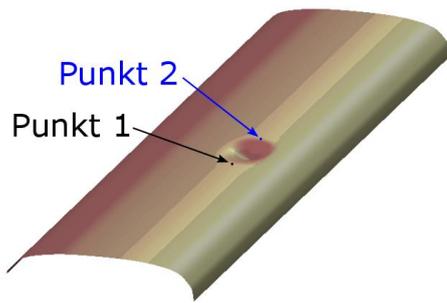


Abbildung 64: Position von Punkt 1 und Punkt 2 auf der Schienenoberfläche.

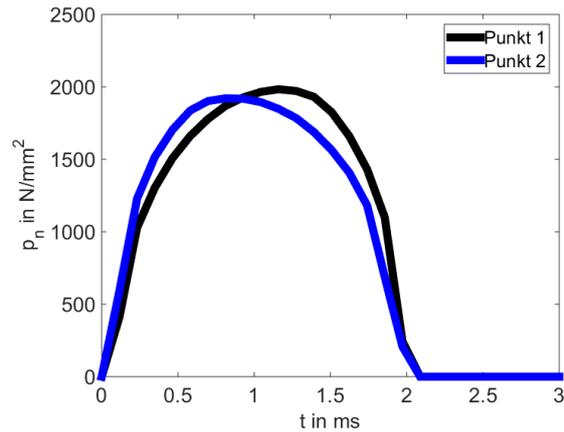


Abbildung 65: Zeitlicher Verlauf der Normalspannungen.

Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigen die zeitlichen Verläufe der Komponenten des Starrkörperschlupfes s_x und s_y . Beide Punkte weisen dieselbe Längsschlupfkomponente $s_x = -0,01\%$ auf, unterscheiden sich jedoch im Verlauf der Querschlupfkomponente s_y . Der maximale Absolutbetrag $\max|s_y|$ beider Punkte liegt bei $0,19\%$, jedoch tritt dieser für Punkt 1 am Ende und für Punkt 2 am Beginn des Kontaktes mit dem Rad auf.

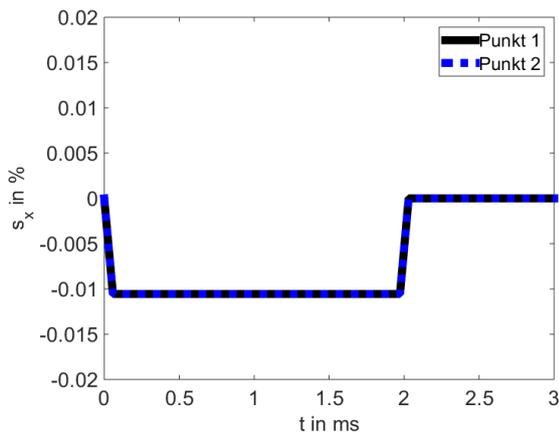


Abbildung 66: Zeitliche Verläufe der Komponente s_x des Starrkörperschlupfes.

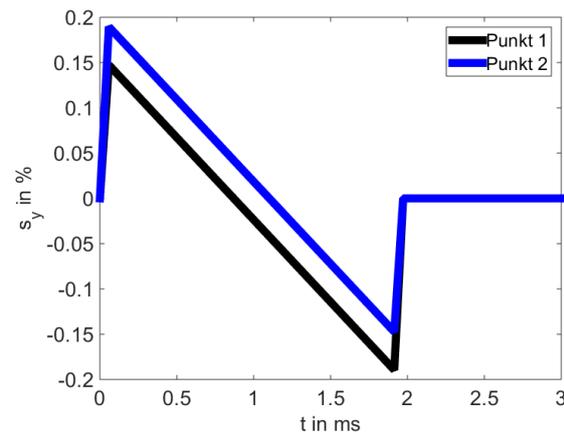


Abbildung 67: Zeitliche Verläufe der Komponente s_y des Starrkörperschlupfes.

In den nächsten beiden Abbildungen sind die zeitlichen Verläufe der Tangentialspannungskomponenten τ_x und τ_y dargestellt.

Der Verlauf der Tangentialspannungskomponente τ_x (Abbildung 68) ist für beide Punkte unterschiedlich, führt jedoch gegen Ende des Kontaktes mit dem Rad zum gleichen maximalen Absolutbetrag $\max|\tau_x| = 44\text{ N/mm}^2$.

Deutlichere Unterschiede weisen die zeitlichen Verläufe der Tangentialspannungskomponente τ_y auf (Abbildung 69). Für Punkt 1 beträgt der maximale Absolutbetrag $\max|\tau_y| = 138\text{ N/mm}^2$, für Punkt 2 $\max|\tau_y| = 160\text{ N/mm}^2$.

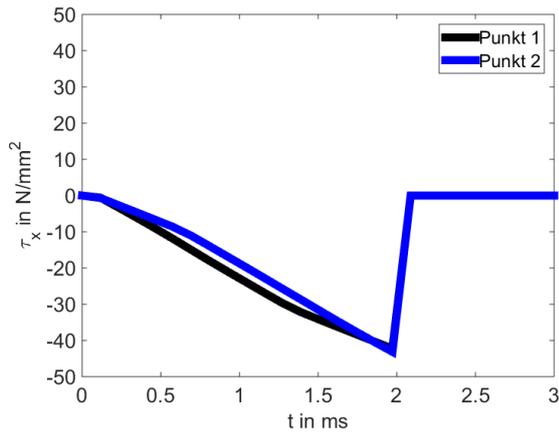


Abbildung 68: Zeitliche Verläufe der Tangentialspannungskomponente τ_x .

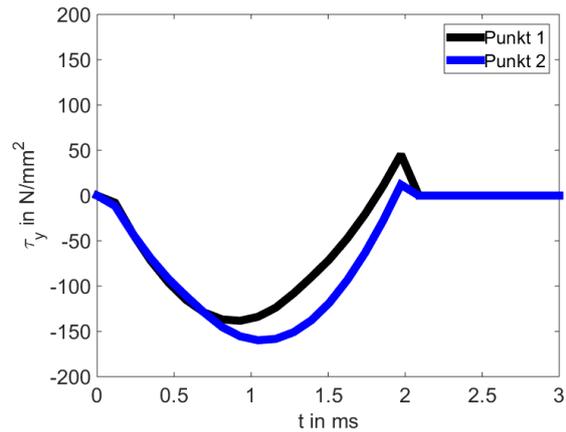


Abbildung 69: Zeitliche Verläufe der Tangentialspannungskomponente τ_y .

Der Starrkörper-Schlupfverlauf s ($s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$) für beide Punkte ist in Abbildung 70 dargestellt. Die Starrkörperschlüpfverläufe verlaufen gegeneinander zueinander.

Die Tangentialspannungsverläufe τ ($\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}$), dargestellt in Abbildung 71, weisen hingegen keine Symmetrien zueinander auf.

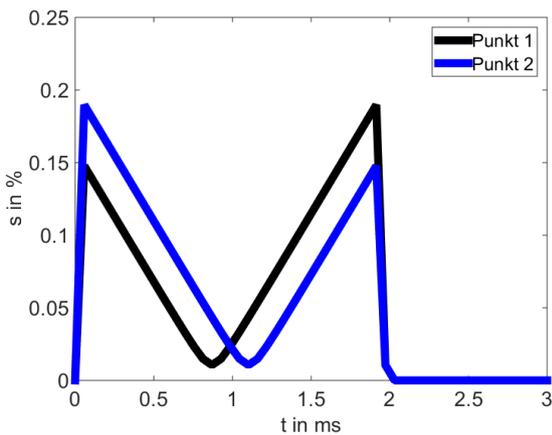


Abbildung 70: Zeitliche Verläufe der Starrkörperschlüpfverläufe $s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$.

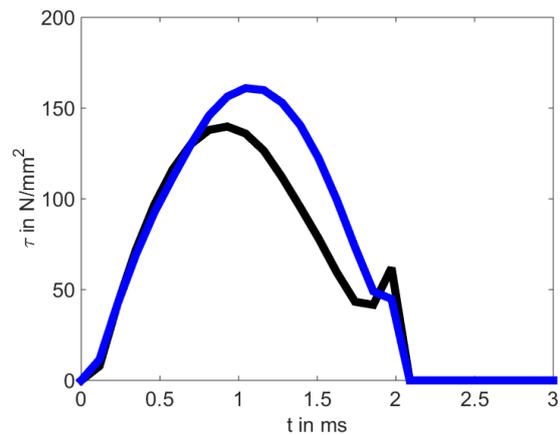


Abbildung 71: Zeitliche Verläufe der Tangentialspannungen $\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}$.

In Abbildung 72 ist der zeitliche Verlauf der Reibleistungsdichte beider Punkte dargestellt.

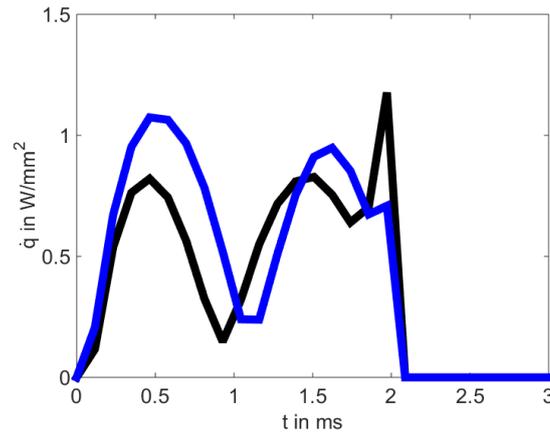


Abbildung 72: Zeitliche Verläufe der Reibleistungsdichte \dot{q} .

Abbildung 73 zeigt den weiteren Verlauf der geometrischen Entwicklung der Schienenoberfläche. Es wurden 886 tausend Überrollungen simuliert. Die Tiefe der initialen geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche nimmt bis zur ungefähr 600 tausendsten Überrollung der Simulation ab, um in den darauf folgenden Überrollungen konstant zu bleiben. Sowohl die Breite als auch die Länge nehmen hingegen zu. Am Simulationsende weist die geometrische Abweichung eine Länge von 70 mm, eine Breite von 40 mm und eine Tiefe von 0,025 mm auf. Auf dieser Abbildungsserie ist auch ein mit der Anzahl der Überrollungen breiter werdender Fahrspiegel erkennbar.

Abbildung 74 zeigt die Kontur der Schienenoberfläche an der Stelle $y = -12,76$ mm (Schnitt durch die Mitte der initialen geometrischen Abweichung). Die asymmetrische Entwicklung der geometrischen Abweichung in Schienenlängsrichtung ist erkennbar. Auf dieser Abbildung ist auch zu erkennen, dass der Gesamtbetrag an Verschleiß Δz aller simulierten Überrollungen im ungestörten Bereich der Schiene (z.B. $x = -80$ mm) rund 0,2 mm beträgt und somit die initiale Tiefe der geometrischen Abweichung von 0,15 mm übertrifft.

Abbildung 75 vergleicht das Verschleißprofil der ersten und der letzten Überrollung. Die deutlichen Variationen des Verschleißabtrags der ersten Überrollung im Bereich der initialen geometrischen Abweichungen treten bei der letzten Überrollung nicht mehr auf.

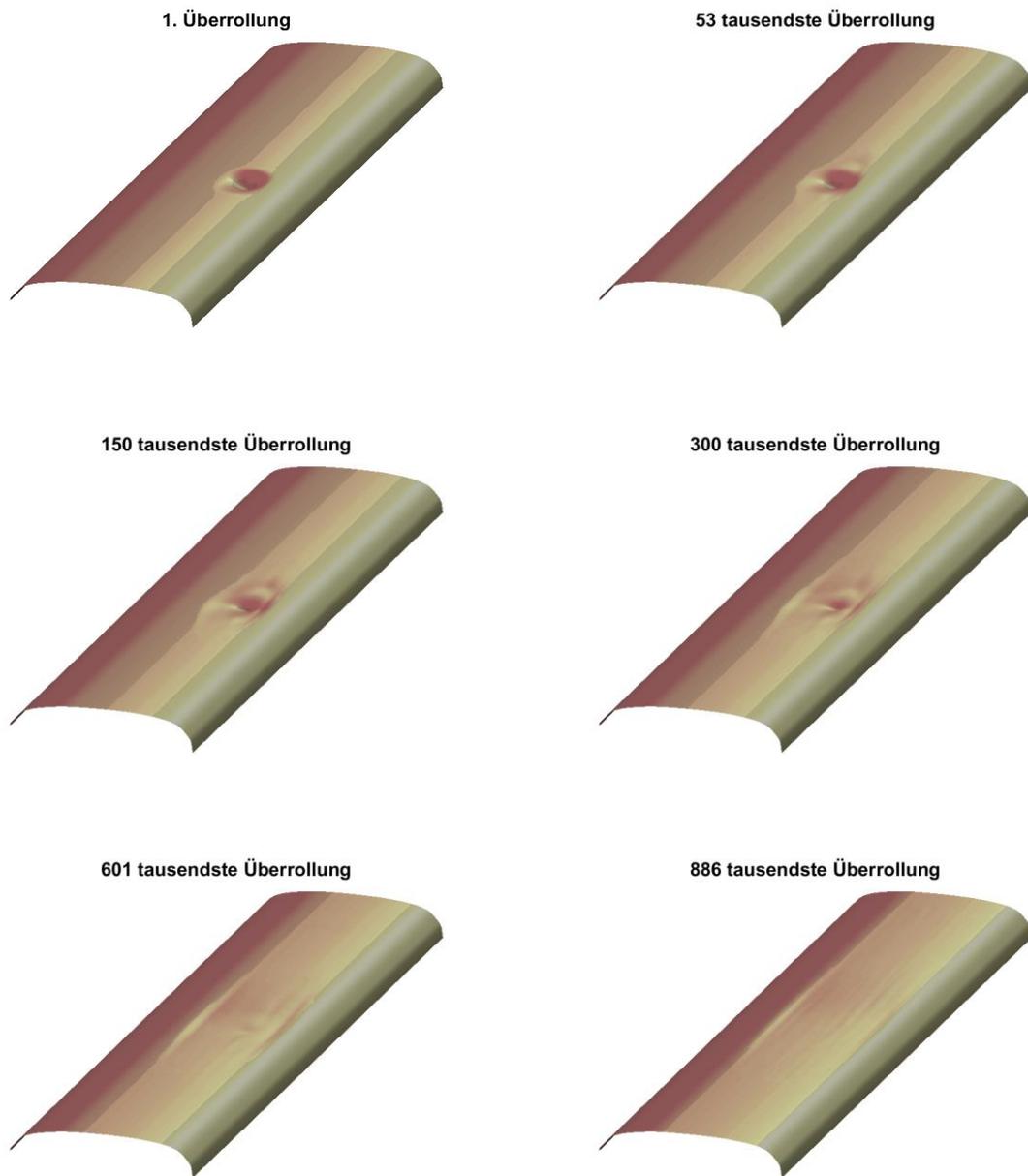


Abbildung 73: Geometrische Entwicklung der Schienenoberfläche.

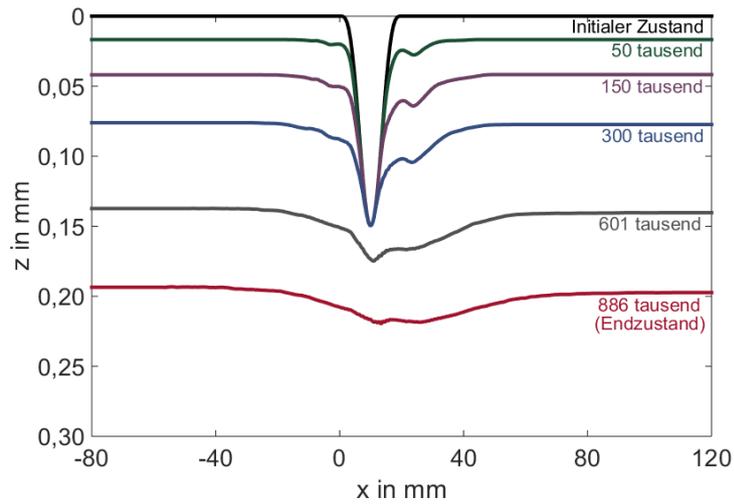


Abbildung 74: Kontur der Schienenoberfläche an der Position $y = -12,76$ mm zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulation. Zur jeweiligen Kontur wird die bis dahin simulierte Anzahl der Überrollungen angegeben.

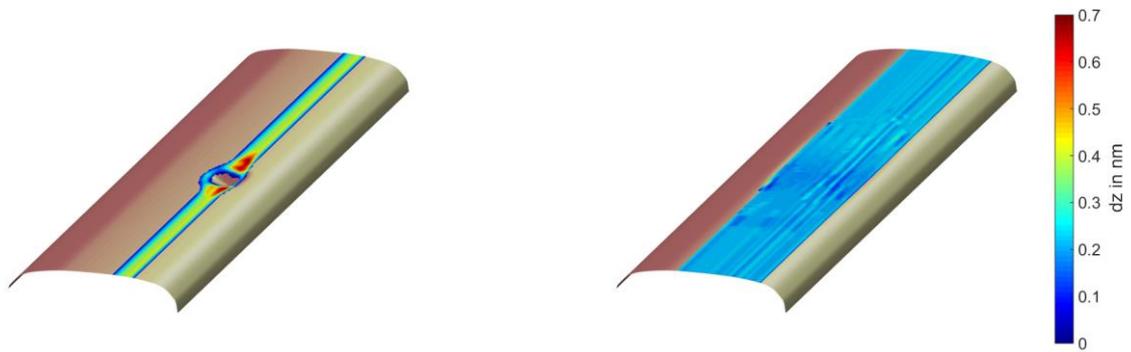


Abbildung 75: Vergleich des Verschleißprofils der ersten (links) und der letzten Überrollung (rechts) der Simulation.

Diskussion der Ergebnisse

Neben der geometrischen Entwicklung der Schienenoberfläche mit einer initialen geometrischen Abweichung mit einer Seitenlänge von 20 mm und einer Tiefe von 0,15 mm (*Standardfall*) sollen in diesem Kapitel die verschiedenen Mechanismen für die geometrische Entwicklung der Schienenoberfläche analysiert werden.

In Abbildung 57 ist die Schienenoberfläche im Ausgangszustand mit dem Fahrspiegel der ersten Überrollung dargestellt. Der Fahrspiegel verbreitert sich im Bereich der geometrischen Abweichung. In den tieferen Bereichen der geometrischen Abweichung tritt kein Kontakt auf (erkennbar am Fahrspiegelverlauf). Das Rad hat an diesen Stellen keinen Kontakt mit der Schiene. Insgesamt lassen diese Variationen des Fahrspiegels vermuten, dass sich die im Bereich der geometrischen Abweichung ausgebildete Kontur der Rad-Schiene-Kontakte von den Konturen in den ungestörten Kontaktbereichen (ohne Einfluss einer geometrischen Abweichung) unterscheidet. Die Folge wären variierende Kontaktspannungen, die einen veränderten Materialabtrag durch Verschleiß nach sich ziehen und so zu einer lokal unterschiedlichen geometrischen Entwicklung der Schiene führen.

Die Bilderfolge von Abbildung 58 zeigt den Rad-Schiene-Kontakt mit der wirkenden Normalspannungsverteilung auf der Schienenoberfläche und im Detail (Draufsicht) zu verschiedenen Zeitpunkten der Überrollung. Die Längsposition der Radachse sowie die maximale Länge und Breite des Kontaktes sind auf den Bildern markiert. Es zeigt sich, dass der Rad-Schiene-Kontakt in Bereichen ohne Einfluss der geometrischen Abweichung (ungestörte Kontaktbereiche) eine elliptische Kontur besitzt (vgl. Abbildung 58 (a) und (h)). Während der Überrollung der geometrischen Abweichung weist der Rad-Schiene-Kontakt keine elliptische Form auf. Beim Erreichen der geometrischen Abweichung verliert der Rad-Schiene-Kontakt in Schienenlängsrichtung an Länge und ist zur Radachse nicht mehr symmetrisch (vgl. Abbildung 58 (b)). Im weiteren Verlauf der Überrollung wird der Kontakt durch die geometrische Abweichung der Schienenoberfläche an deren Randbereiche gedrängt (vgl. Abbildung 58 (c)-(e)), die tieferen Bereiche der geometrischen Abweichung kann das Rad nicht kontaktieren. Der Kontakt ist zu diesen Zeitpunkten verglichen mit dem Ausgangszustand in den ungestörten Kontaktbereichen gestreckt. Die Normalspannungsverteilungen variieren mit den unterschiedlichen Formen der Kontaktfläche. Insbesondere in Rollrichtung vor und nach der geometrischen Abweichung treten während der Überrollung deutlich erhöhte Normalspannungen auf.

Die Normalkraft F_N wird während der Überrollung als konstant angenommen. Sowohl die Kontur der Kontaktfläche als auch die Verteilung der Normalspannungen innerhalb dieser hängen von der geometrischen Form der kontaktierenden Körper sowie von der Normalkraft zwischen diesen beiden Körpern ab. Die Geometrie der Schienenoberfläche ist zum Zeitpunkt der ersten Überrollung zum Schienenquerschnitt durch die Mitte der initialen geometrischen Abweichung ($x = 10$ mm) symmetrisch. Durch diese Symmetrie und die konstante Normalkraft bilden jene Zeitpunkte, bei denen die Radachse denselben Längsabstand zur Mitte der geometrischen Abweichung zu beiden Seiten dieses Schienenquerschnittes einnimmt, spiegelgleiche Kontaktkonturen und Normalspannungsverteilungen aus.

Diese Symmetrie der Normalspannungen spiegelt sich auch an der Verteilung der maximalen Normalspannungen p_{n-max} während der ersten Überrollung in Abbildung 59 wider. Trotz der ebenso symmetrischen Verteilung der maximal auftretenden Starrkörperschlüpfte s_{max} (vgl. Abbildung 60) kommt es zu keiner symmetrischen Verteilung der maximalen

Tangentialspannungen τ_{max} (vgl. Abbildung 61) und der maximalen Reibleistungsdichten \dot{q}_{max} (vgl. Abbildung 62). Die höchsten Werte der maximalen Tangentialspannungen τ_{max} treten in Rollrichtung nach und jene der maximalen Reibleistungsdichten \dot{q}_{max} vor der geometrischen Abweichung auf. Auch der durch den Verschleiß verursachte Materialabtrag Δz in Abbildung 63 ist trotz der Symmetrie der Normalspannungen nicht spiegelgleich, weist jedoch in Rollrichtung sowohl vor als auch nach der geometrischen Abweichung deutlich erhöhte Werte auf.

Die Analyse der zeitlichen Verläufe der Spannungen sowie der Reibleistungsdichten zweier unterschiedlicher Oberflächenpunkte der Schiene soll Aufschluss darüber geben, wie die uneinheitlichen Verteilungen der maximalen Spannungen, der maximalen Reibleistungsdichten und des Materialabtrags durch Verschleiß zustande kommen.

Für die Analyse werden zwei zur Mitte der geometrischen Abweichung ($x = 10 \text{ mm}$, $y = -12,76 \text{ mm}$) möglichst symmetrisch liegende *Knotenpunkte* gewählt. Punkt 1 nimmt in Längsrichtung der Schiene die Position $x = 1,16 \text{ mm}$ und Punkt 2 die Position $x = 19,14 \text{ mm}$ ein. Beide Punkte haben dieselbe laterale Koordinate $y = -12,76 \text{ mm}$.

Abbildung 65 zeigt die unterschiedlichen zeitlichen Verläufe der Normalspannungen p_n beider Punkte. Sie erreichen ungefähr gleich hohe Maximalwerte der Normalspannungen p_{n-max} , jedoch zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb des Kontaktdurchlaufs.

Abbildung 66 stellt den für beide Punkte gleich großen Starrkörperschlupf s_x dar. Die Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} ist konstant während der Überrollung, die Starrkörper-Schlupfkomponente entspricht $c_x = 0$, da weder angetrieben noch gebremst wird. Die Winkelgeschwindigkeit des Rades ω ist über den gesamten Schienenabschnitt konstant. Aufgrund der gleichen lateralen Schienenposition beider Oberflächenpunkte sowie der Annahme, dass das Rad keinen Anlaufwinkel zur Schiene aufweist, kommen beide Punkte mit demselben Radlängsschnitt in Berührung. Dadurch ist der Radradius $r(y)$ an beiden Punkten gleich. Nach Gleichung (7) $s_x = 1 - \frac{\omega \cdot r(y)}{v_{FZ}}$ ergibt sich daher für beide Punkte die gleiche Starrkörper-Schlupfkomponente s_x in Längsrichtung der Schiene.

Durch die Verbreiterung des Rad-Schiene-Kontaktbereiches während der Überrollung der geometrischen Abweichung entstehen immer größere Differenzen zwischen den unterschiedlichen Radradien $r(y)$ im Kontakt. Mit zunehmendem Abstand von der Rolllinie des Kontaktes steigt der Betrag der Starrkörper-Schlupfkomponente $|s_x|$ (vgl. Gleichung (7)).

Im Gegensatz zur Starrkörper-Schlupfkomponente s_x ist der zeitliche Verlauf der Starrkörper-Schlupfkomponente s_y für beide Punkte verschieden (vgl. Abbildung 67). Punkt 1 hat gegenüber Punkt 2 zu Kontaktbeginn den kleineren, jedoch gegen Kontaktende den größeren Betrag an $|s_y|$. Die Starrkörper-Schlupfkomponente s_y errechnet sich nach Gleichung (7) $s_y = \frac{\omega \cdot \sin(\phi(y)) \cdot x'}{v_{FZ}}$. Beide Punkte weisen die gleiche laterale Position y auf der Schienenoberfläche und damit auch den gleichen Neigungswinkel $\phi = f(y)$ des Schienenquerprofils auf.

Die Diskrepanz in beiden Punkten der Starrkörper-Schlupfkomponente s_y ergibt sich aus ihren unterschiedlichen Längsabständen x' zu verschiedenen Zeitpunkten des Kontaktdurchlaufs. Vergleicht man die einzelnen Zeitpunkte der Bilderfolge von Abbildung 58, so erkennt man, dass der Rad-Schiene-Kontakt seine Form während der Überfahrt der geometrischen Abweichung verändert.

Die Rad-Schiene-Kontaktform zu Kontaktbeginn ist für Punkt 1 ($x = 1,16$ mm) vergleichbar mit jener aus Abbildung 58 (a) bzw. (b) und für Punkt 2 ($x = 19,14$ mm) mit jener aus Abbildung 58 (c).

Auf diesen Abbildungen ist zu erkennen, dass Punkt 2 im Gegensatz zu Punkt 1 mit einem in die Längsrichtung gezerrten Rad-Schiene-Kontakt beginnt. Der Betrag des Abstandes $|x'|$ von der Radachse zu den Schienen-Oberflächenpunkten ist dadurch zum jeweiligen Kontaktbeginn für Punkt 2 größer als für Punkt 1, was in einem höheren Betrag $|s_y|$ für Punkt 2 zu diesem Zeitpunkt resultiert. Gegen Ende des jeweiligen Kontaktdurchlaufs stellt sich hingegen die umgekehrte Situation ein. Der Betrag des Abstandes $|x'|$ ist nun für Punkt 2 (vgl. Abbildung 58 (f) bzw. (g)) geringer als für Punkt 1 (vgl. Abbildung 58 (e)).

Das *Tangentialkontaktmodell ECF* bestimmt die Verschiebung $u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$ eines Punktes (einer Borste) im Kontakt aufgrund aller Relativbewegungen (Schlüpfe), die dieser Punkt während seines Kontaktdurchganges erfährt. Die Richtung und die Größe des Verschiebungsinkrements Δu zu einem Zeitpunkt hängen dabei von der Richtung und Größe der Starrkörper-Schlupfkomponenten s_x und s_y zum selben Zeitpunkt ab. In Abhängigkeit von normalspannungs- und temperaturabhängigen Materialparametern der berücksichtigten Zwischenschicht sowie den kontaktgeometrieabhängigen Steifigkeiten nach *Kalker* für das elastische Verhalten von Rad und Schiene ergibt sich aus der Verschiebung u zu einem bestimmten Zeitpunkt die Tangentialspannung, die in diesem Punkt zum selben Zeitpunkt wirkt. Auch die Wirkungsrichtung der Tangentialspannung ist durch die Richtung der Verschiebung zu diesem Zeitpunkt bestimmt.⁹

Diese Abhängigkeiten erklären auch die Diskrepanz in den zeitlichen Verläufen der Tangentialspannungskomponente τ_x (vgl. Abbildung 68) beider betrachteten Schienen-Oberflächenpunkte. Beide Punkte weisen zwar denselben zeitlichen Verlauf von s_x auf (vgl. Abbildung 66), jedoch Unterschiede in den Verläufen der Normalspannungen und in den temperaturbestimmenden Reibleistungsdichten, ersichtlich in Abbildung 65 und Abbildung 72.

In Schienenquerrichtung erfahren beide Punkte einen zusätzlich unterschiedlichen Verlauf der Starrkörper-Schlupfkomponente s_y (vgl. Abbildung 67), was zu einer noch deutlicheren Diskrepanz zwischen den zeitlichen Verläufen der Tangentialspannungskomponente τ_y der beiden Punkte führt (vgl. Abbildung 69). Punkt 2 hat gegenüber Punkt 1 zu einem späteren Kontaktzeitpunkt den Nulldurchgang der Starrkörper-Schlupfkomponente s_y und weist in diesem Zeitraum auch durchgehend höhere Schlüpfen s_y auf (vgl. Zeitraum $t = 0$ bis 1,1 ms in Abbildung 75). Dadurch findet die Verschiebung u des Punktes länger und mit höheren Beträgen der Verschiebungsinkremente Δu in dieselbe Richtung statt. Die Folge ist ein für Punkt 2 höherer Maximalbetrag der Tangentialspannung τ_y .

Abbildung 70 zeigt den zeitlichen Verlauf des Starrkörperschlupfes $s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$, Abbildung 71 den zeitlichen Verlauf der Tangentialspannung $\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}$, jeweils für beide Punkte. Der Starrkörperschlupf s beider Punkte weist trotz des gleichen Maximalwertes Unterschiede in den zeitlichen Verläufen auf. Die an den beiden Schienen-Oberflächenpunkten wirkenden Tangentialspannungen τ unterscheiden sich in ihrem Verlauf und in ihren maximalen Werten.

⁹ Vgl. in Kapitel 5.4 Gleichungen (9) bis (11) bzw. [28].

Aus der zeitlichen Änderung der Verschiebung u und den Tangentialspannungen τ berechnet das *Tangentialkontaktmodell ECF* die Reibleistungsdichte \dot{q}^{10} . Die unterschiedlichen zeitlichen Verläufe des Starrkörperschlupfes s (vgl. Abbildung 70) verursachen, wie schon beschrieben, unterschiedliche Verschiebungen u und Tangentialspannungen τ (vgl. Abbildung 71) in beiden Punkten. Daraus ergeben sich die Diskrepanzen in den zeitlichen Verläufen der Reibleistungsdichte \dot{q} für beide Punkte, ersichtlich in Abbildung 62.

Laut dem *Modell nach Krause und Poll* ergibt sich der Masseverlust durch Verschleiß nach Gleichung (14) $\Delta M(t) = k_{KP}(\dot{q}(t)) \cdot W_f(t)$ an einem Ort der Schiene proportional zur Reibarbeit W_f , die dieser Ort erfährt. Dieser Masseverlust ΔM kann mit Hilfe von Gleichung (16), der Fläche A des betrachteten Ortes und der Dichte ρ in einen Höhenverlust $\Delta z(t) = \frac{\Delta M(t)}{\rho \cdot A}$ an diesem Ort überführt werden. Die Reibarbeit W_f und damit der Höhenverlust Δz zu einem Zeitpunkt t während des Kontaktes sind umso größer, je höher die Reibleistungsdichte \dot{q} zu diesem Zeitpunkt t ist.¹¹ Auch der Proportionalitätsfaktor k_{KP} hängt von der Reibleistungsdichte \dot{q} an diesem Ort zum Zeitpunkt t ab. Aus dem unterschiedlichen zeitlichen Verlauf der Reibleistungsdichte \dot{q} beider Punkte ergibt sich demnach für die betrachtete Überrollung der unterschiedliche Materialabtrag Δz durch Verschleiß der beiden Schienen-Oberflächenpunkte, der für Punkt 1 $\Delta z = 0,4495$ nm und für Punkt 2 $\Delta z = 0,5246$ nm beträgt (vgl. Abbildung 63). Die zur Mitte der geometrischen Abweichung symmetrisch liegenden Punkte entwickeln sich damit unterschiedlich.

Die Fahrzeuggeschwindigkeit wurde in der gesamten Simulation mit $v_{FZ} = 10$ m/s festgelegt. Die Winkelgeschwindigkeit ω ergibt sich aus der Fahrzeuggeschwindigkeit mit Hilfe von Gleichung (8) $\omega = \frac{v_{FZ} \cdot (1 - c_x)}{r(y_0)}$. Das Verhältnis zwischen der Winkelgeschwindigkeit und der Fahrzeuggeschwindigkeit $\frac{\omega}{v_{FZ}} = \frac{(1 - c_x)}{r(y_0)}$ ist unter der Annahme eines gleichen Rollradius $r(y_0)$ nur eine Funktion des Schlupfes c_x . Auch der Starrkörperschlupf s^{12} , der sich unter anderem aus diesem Verhältnis $\frac{\omega}{v_{FZ}}$ ergibt, bleibt von der gewählten Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} unbeeinflusst. Zwischen der Kontaktzeit t eines Schienenpunktes mit dem Rad und der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} besteht ein linearer Zusammenhang. Die Kontaktzeit t verhält sich gegengleich zur Geschwindigkeit v_{FZ} .

Aufgrund der unveränderten Verteilung des Starrkörperschlupfes s bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten v_{FZ} und des dargestellten Zusammenhangs zwischen der Kontaktzeit t und der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} bleiben der Betrag der Verschiebungen $|u|$ einer Borste¹³ und damit auch die Tangentialspannungen τ durch die Wahl der Geschwindigkeit unbeeinflusst.

Passiert bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten v_{FZ} der gleich große Betrag an Verschiebungen $|u|$, so muss die zeitliche Änderung der Verschiebung u abhängig von der gewählten Geschwindigkeit sein. Die Reibleistungsdichte \dot{q} , welche sich unter anderem aus der zeitlichen Änderung der Verschiebung u ergibt¹⁰, ändert sich dadurch im selben Verhältnis wie die

¹⁰Vgl. im Kapitel 5.4 u. a. Gleichung (12) $\dot{q}(t) = k_q \cdot \dot{\vec{r}}(t') \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}_p(t)}{\partial t} \right)$ bzw. [28]. Der Proportionalitätsfaktor k_q ist im *ECF-Modell* gleich 1 gesetzt.

¹¹ Vgl. Kapitel 5.5 Gleichung (15) $\Delta W_f(t) = \dot{q}(t) \cdot A \cdot \Delta t$ bzw. [27].

¹² Vgl. Kapitel 5.3 Gleichung (7) $\vec{s} = \frac{1}{v_{FZ}} \cdot \left(\begin{matrix} v_{FZ} - \omega \cdot r(y) \\ \omega \cdot \sin(\phi(y)) \cdot x' \end{matrix} \right)$.

¹³ Vgl. Kapitel 5.4 Gleichung (9) $\vec{u}(t) = \vec{u}(t_0) + \int_{t_0}^t v_{FZ}(t') \cdot \left[\begin{matrix} c_x(t') - c_n(t') & (y' - v_{FZ-y}(t') \cdot t') \\ c_y(t') + c_n(t') & (x' - v_{FZ-x}(t') \cdot t') \end{matrix} \right] dt'$ bzw. [28].

Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} . Gegengleich zur Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} verhält sich der Zeitraum Δt , in dem diese Reibleistung \dot{q} wirkt. Die Reibarbeit W_f , die sich aus der Reibleistungsdichte \dot{q} und dem Zeitraum Δt ergibt, in dem diese Reibleistungsdichte wirkt¹¹, bleibt damit von der Fahrzeuggeschwindigkeit unbeeinflusst. Einzig der Proportionalitätsfaktor k_{KP} in Gleichung (14) $\Delta M(t) = k_{KP}(\dot{q}(t)) \cdot W_f(t)$ ist von der jeweiligen Reibleistungsdichte $\dot{q}(t)$ abhängig und nimmt nach *Krause und Poll* [27] bei Überschreiten eines Grenzwertes von \dot{q} einen höheren Wert an (vgl. Kapitel 5.5).

Durch diese Zusammenhänge kann davon ausgegangen werden, dass unter der Annahme einer konstanten Normalkraft F_N das grundsätzliche Verschleißprofil Δz während einer Überrollung und damit die weitere geometrische Entwicklung der Schienenoberfläche unabhängig von der gewählten Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZ} sind.

Die geometrische Entwicklung der Schienenoberfläche ist in der Bilderfolge von Abbildung 73 dargestellt. Diese zeigt die Schienenoberfläche nach jeweils einer gewissen Anzahl an Überrollungen sowie die dazugehörigen Fahrspiegel der jeweils entsprechenden letzten Überrollung zu den dargestellten Zeitpunkten. Insgesamt wurden 886 tausend Überrollungen gerechnet. Insbesondere an den Schienenoberflächen nach 150 tausend und 300 tausend Überrollungen ist erkennbar, dass sich die Oberfläche um die geometrische Abweichung nicht symmetrisch entwickelt.

Die laterale Position des Radsatzes sowie das Radprofil wurden während der Simulation nicht variiert. Das Schienenprofil passt sich dadurch mit jedem Überrollungszyklus dem Radprofil an, erkennbar am breiter werdenden Fahrspiegel vom Beginn bis zum Ende der Simulation.

Auch die relative Tiefe der geometrischen Abweichung nimmt im Laufe der Simulation ab, bleibt aber nach einer gewissen Zeit konstant. Anhand des Fahrspiegels ist erkennbar, dass ab der 300 tausendsten Überrollung auch die tiefen Bereiche der geometrischen Abweichung mit dem Rad in Kontakt kommen, der zu Beginn der Simulation nicht stattfindet. Durch die breiter werdenden Kontakte wird der Einfluss der geometrischen Abweichung auf die Rad-Schiene-Kontaktkontur geringer. Dieser Effekt ist auch am Fahrspiegel erkennbar, der in Längsrichtung keine Änderungen in seiner Breite sowie keine Variationen in seinen lateralen Querpositionen auf der Schiene mehr aufweist.

Dadurch nehmen auch die Variationen der Spannungen und der Reibleistungen im Kontakt ab. Die zu Beginn der Simulation deutlich erkennbaren Variationen im Verschleißprofil treten am Ende der Simulation nicht mehr auf (vgl. Abbildung 75), der Materialabtrag Δz ist auf jedem Schienenquerprofil im betrachteten Schienenabschnitt gleich. Die vorhandene geometrische Abweichung verbleibt damit auf der Schienenoberfläche.

Einen Schienenlängsschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulation zeigt Abbildung 74. Wiederum ist die asymmetrische Entwicklung der Schienenoberfläche um die geometrische Abweichung herum erkennbar. In Fahrtrichtung (in positiver x-Koordinatenrichtung) ist insbesondere der Bereich nach der geometrischen Abweichung mehr vom Verschleiß betroffen. Die geometrische Abweichung weist am Ende eine maximale Länge von ~ 70 mm, eine maximale Breite von ~ 40 mm und eine maximale Tiefe von $0,025$ mm auf.

Es wird darauf hingewiesen, dass die in diesem Kapitel und in den folgenden Kapiteln vorgestellten Ergebnisse bezüglich der geometrischen Entwicklung von Schienen auf der Annahme basieren, dass

kein Riss oder Rissystem auf bzw. unter der Schienenoberfläche vorhanden ist. Ein Riss oder ein Rissystem würde das Schienenmaterial lokal beeinflussen und könnte zu anderen Ergebnissen in der Simulation führen.

7.1.2 Einfluss der initialen Größe der geometrischen Abweichung

In diesem Kapitel soll der Einfluss der Größe der initialen geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche auf deren Entwicklung untersucht werden.

Ausgehend vom *Standardfall* aus Kapitel 7.1.1 wurden drei weitere Fälle untersucht, die sich jeweils in der Länge, Breite oder Tiefe der initialen geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche unterscheiden.

Zwei weitere Simulationen zeigen die Entwicklung von einer „kleinen“ und einer „großen“ geometrischen Abweichung (Fall *Klein* und Fall *Groß*).

In Tabelle 1 sind die Maße der geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche aufgelistet. Die Mittelpunktkoordinaten der initialen Abweichungen unterscheiden sich nur in der Längskoordinate x , jedoch nicht in der Querkoordinate y .

	Länge in mm	Breite in mm	Tiefe in mm	Mittelpunktkoordinaten x/y in mm
Standardfall	20	20	0,15	10/-12,76
Fall 2	20	20	0,3	10/-12,76
Fall 3	30	20	0,15	15/-12,76
Fall 4	20	30	0,15	10/-12,76
Klein	6	6	0,15	3/-12,76
Groß	30	40	0,3	15/-12,76

Tabelle 1: Initiale Maße der geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche in Form einer algebraischen Fläche (vgl. Kapitel 5.1).

Alle anderen Parameter der in diesem Kapitel vorgestellten Simulationen sind mit jenen der Simulation aus Kapitel 7.1.1 identisch.

Abbildung 76 zeigt die Längs-, Abbildung 77 die Querkonturen der Schienenoberfläche durch die jeweilige Mitte der geometrischen Abweichungen für die Simulationen *Standardfall* sowie *Fall 2* bis *Fall 4*.

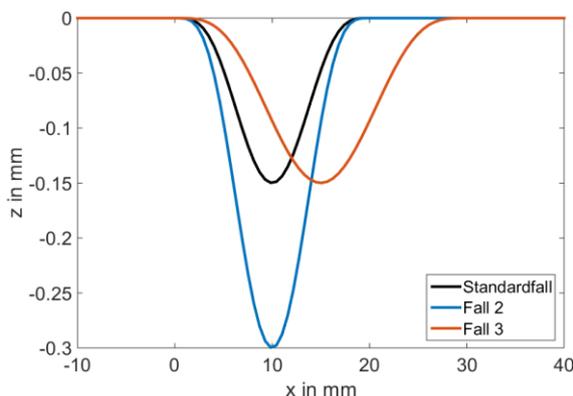


Abbildung 76: Längskontur der Schienenoberfläche durch die Mitte der geometrischen Abweichungen.

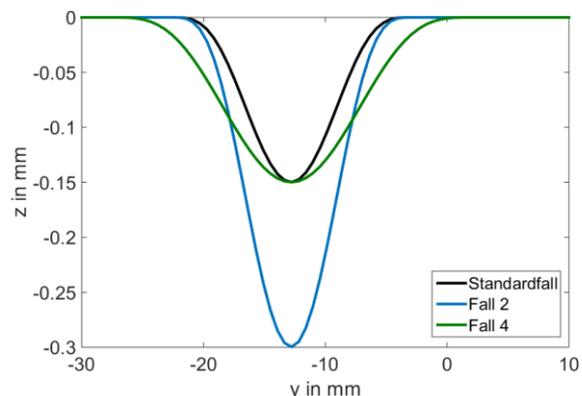


Abbildung 77: Querkontur der Schienenoberfläche durch die Mitte der geometrischen Abweichungen.

In Abbildung 78 bis Abbildung 82 werden die entstehenden Kontaktflächen zwischen Rad und Schiene für die genannten vier Fälle für fünf verschiedene Zeitpunkte der jeweils ersten Überrollung sowohl auf der Schienenoberfläche (linke Bilder) als auch im Detail (Draufsicht, jeweils rechte Bilder)

gezeigt. Die Längspositionen des Rades zur Schiene sind durch die in den Detailansichten eingezeichneten Radachsenpositionen für alle Zeitpunkte gegeben.

Für einen bestimmten Zeitpunkt wurde die Längsposition des Rades so gewählt, dass das Verhältnis der zurückgelegten Wegstrecke des Rades ab dem Beginn der geometrischen Abweichung ($x = 0$ mm) zur Gesamtlänge der jeweiligen geometrischen Abweichung zu diesem Zeitpunkt für alle vier Fälle gleich ist (relative Längsposition, bezogen auf die geometrische Abweichung).

Dadurch ist die Längsposition der Radachse nur für den *Standardfall*, Fall 2 und Fall 4 zu den dargestellten Zeitpunkten identisch, da diese Fälle jeweils eine geometrische Abweichung mit einer initialen Länge von 20 mm aufweisen. Durch die initiale Länge von 30 mm der geometrischen Abweichung von Fall 3 weichen die Längspositionen des Rades dieser Simulation von *Standardfall*, Fall 2 und Fall 4 ab. Die relative Längsposition, bezogen auf die geometrische Abweichung, ist hingegen für alle vier Fälle zu den dargestellten Zeitpunkten identisch.

Die ausgebildeten Kontaktflächen aller vier Fälle weisen zu allen Zeitpunkten Unterschiede in ihrer Form sowie in ihrer maximalen Breite und Länge des Kontaktbereiches auf.

Die, verglichen mit dem *Standardfall*, initial tiefere geometrische Abweichung (Fall 2) drängt den Rad-Schiene-Kontakt während der Überrollung gegenüber dem *Standardfall* mehr von der geometrischen Abweichung weg, als würde der Rad-Schiene-Kontakt im Fall 2 zu jedem Zeitpunkt versuchen, mehr Abstand zu den tieferen Bereichen der geometrischen Abweichung zu haben als im *Standardfall*. Der entstehende Kontaktring (Zeitpunkt 3) von Fall 2 ist, verglichen mit jenem des *Standardfalls*, deutlich schmaler.

Im Gegensatz dazu scheint der Rad-Schiene-Kontakt bei der Simulation mit der initial längsten geometrischen Abweichung dieser vier Fälle (Fall 3) der geometrischen Abweichung bei der Überrollung am wenigsten ausweichen zu wollen. Als Vergleich soll in diesem Fall der nicht kontaktierte Bereich der tieferen Regionen der geometrischen Abweichungen aller Fälle dienen. In den Detailansichten zum Zeitpunkt 3 erkennt man, dass dieser „weiße“ Bereich innerhalb des Kontaktringes im Fall 3 der Simulationen am kleinsten ist. Auch der Kontaktring an sich scheint während der gesamten Überrollung bei Fall 3 die größte Dicke zu haben.

Die Schienenoberfläche von Fall 4 hat die initial breiteste Abweichung aller vier betrachteten Oberflächen. Im Gegensatz zu den anderen Fällen entsteht bei der Überrollung dieser geometrischen Abweichung schon zum Zeitpunkt 1 ein zweiter kleiner Kontaktbereich in der zweiten Hälfte der geometrischen Abweichung. Insbesondere dieser Bereich hat dadurch einen großen Längsabstand x' zur Radachse. Ein durchgehender Kontaktring um die geometrische Abweichung bildet sich zu keinem Zeitpunkt aus.

In Abbildung 83 sind die maximal auftretenden Normalspannungen, in Abbildung 84 ist das Verschleißprofil der jeweils ersten Überrollung des *Standardfalls* sowie der Fälle 2 bis 4 dargestellt. Die Konturen der Spannungs- und Verschleißprofile entsprechen dem Fahrspiegel. Die Variationen des Fahrspiegels sind hier deutlich erkennbar. Außerdem erkennt man unterschiedlich hohe Maximalwerte der Normalspannungen p_{n-max} sowie des Materialabtrags Δz durch Verschleiß. Die höchsten Normalspannungen weist Fall 2 auf. Der maximale Materialabtrag Δz durch Verschleiß ist beim *Standardfall* deutlich geringer als bei den anderen drei Fällen. Bei Fall 2 und Fall 4 ist der

Materialabtrag Δz am größten. Im Gegensatz zu den auftretenden Maximalwerten der Normalspannungen p_{n-max} ist das Verschleißprofil Δz in allen vier Fällen asymmetrisch.

Abbildung 85 bis Abbildung 90 zeigen die geometrische Entwicklung der Schienenoberfläche aller vier Fälle. Auf den Abbildungen ist auch der zu diesem Zeitpunkt sich einstellende Fahrspiegel eingezeichnet. An den Variationen der Fahrspiegel sind auch die abwechselnden Ausbildungen der Rad-Schiene-Kontaktformen noch einmal erkennbar. Man sieht, dass diese Variationen der Fahrspiegel bei allen vier Fällen im Laufe der Simulation abklingen.

Bei allen vier Fällen entwickelt sich die Schienenoberfläche asymmetrisch. Sowohl in Längs- als auch in Querrichtung ist die Entwicklung unterschiedlich. Fall 2 sowie Fall 4 entwickeln sich insbesondere innerhalb der ersten 300 tausend Überrollungen in Schienenlängsrichtung schneller als die beiden anderen Fälle, erkennbar durch den größeren Materialabtrag nach den initialen geometrischen Abweichungen. Fall 2, Fall 3 und Fall 4 weisen zum Zeitpunkt der 300 tausendsten Überrollung eine insgesamt breitere geometrische Abweichung auf.

Verglichen mit dem *Standardfall* bleiben die geometrischen Abweichungen der Fälle 2 bis 4 sowohl tiefer als auch in Längsrichtung gestreckter auf der Schienenoberfläche (Abbildung 90).

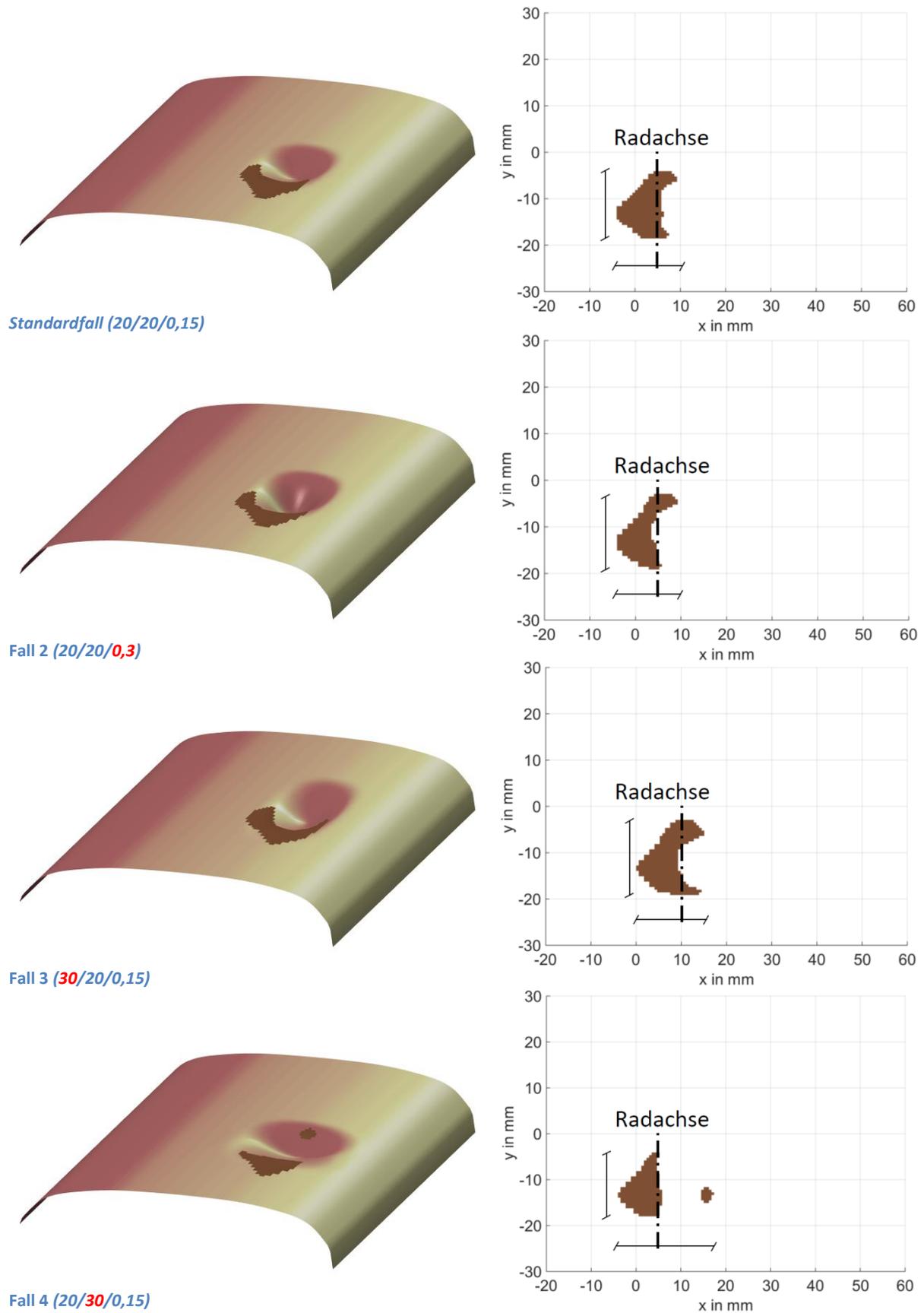
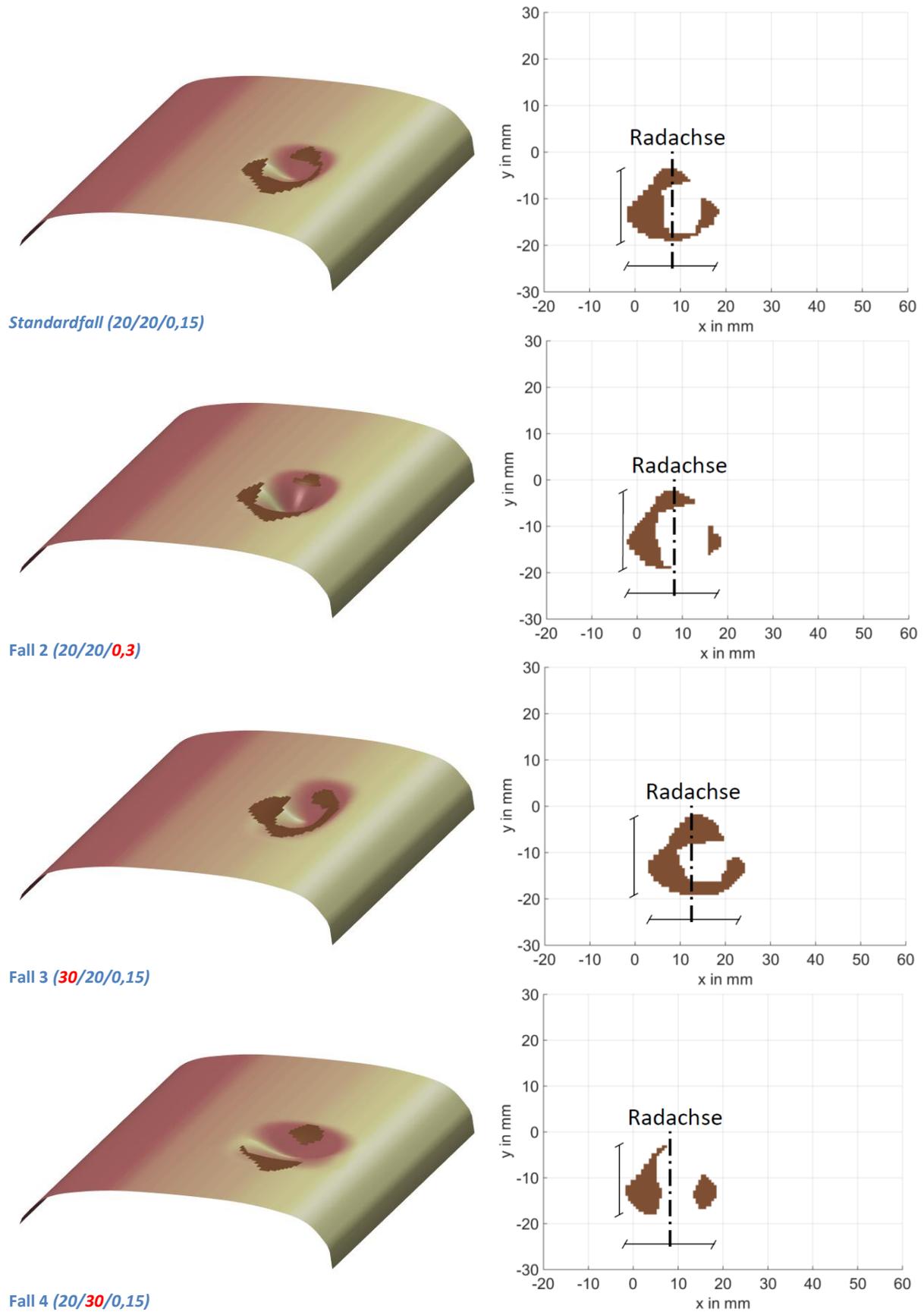
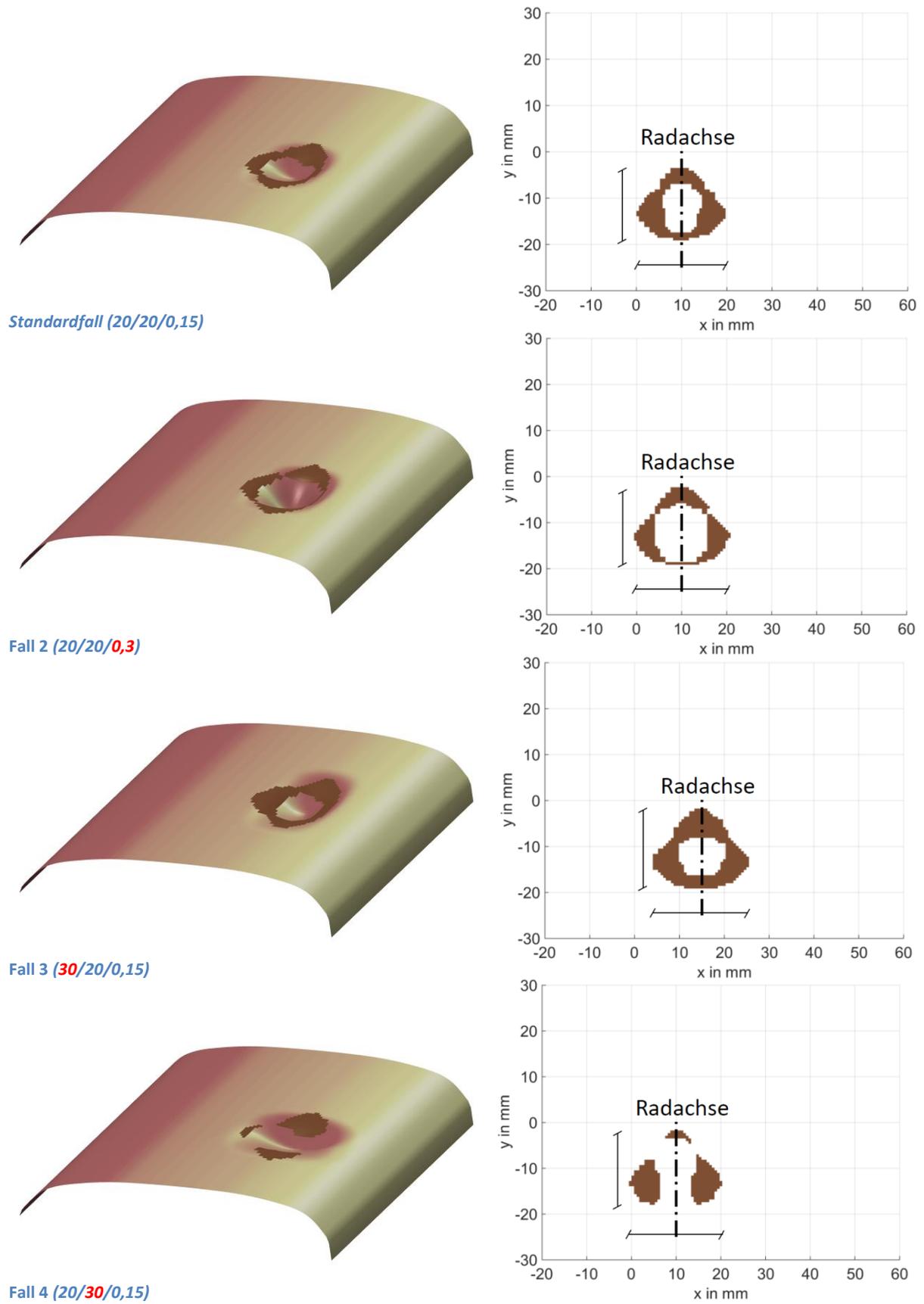
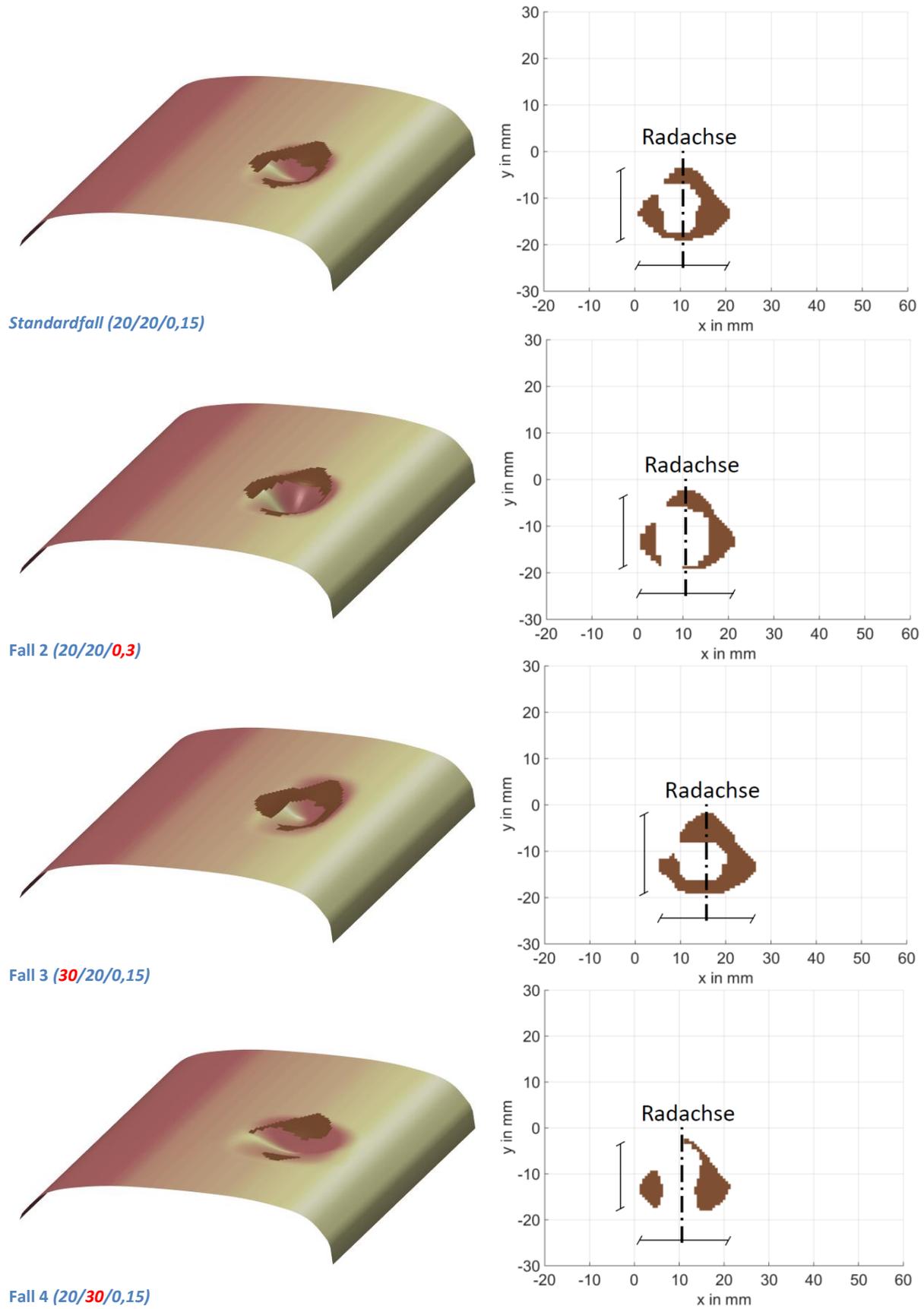


Abbildung 78: Ausbildung der Kontaktflächen zum Zeitpunkt 1.







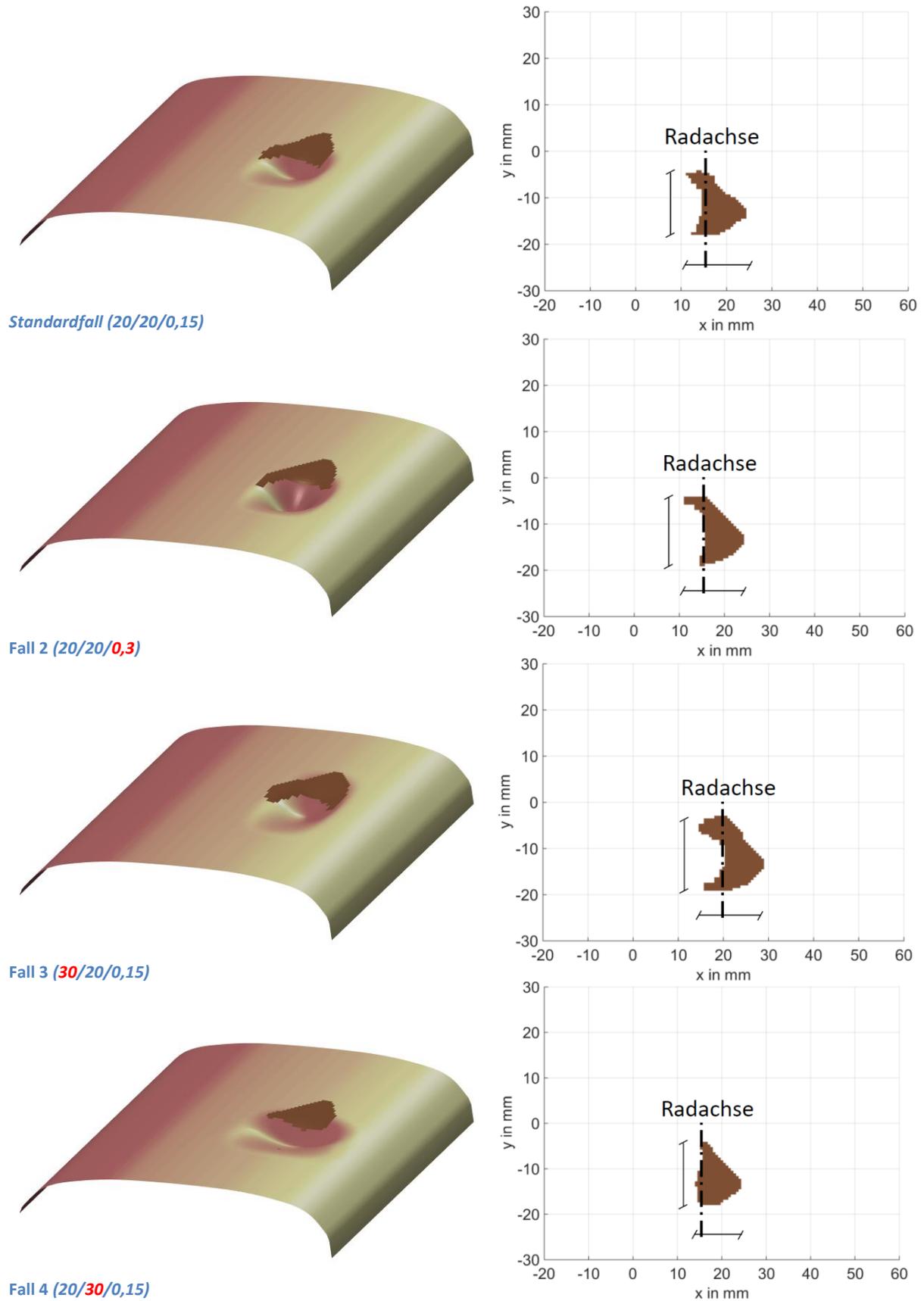


Abbildung 82: Ausbildung der Kontaktflächen zum Zeitpunkt 5.

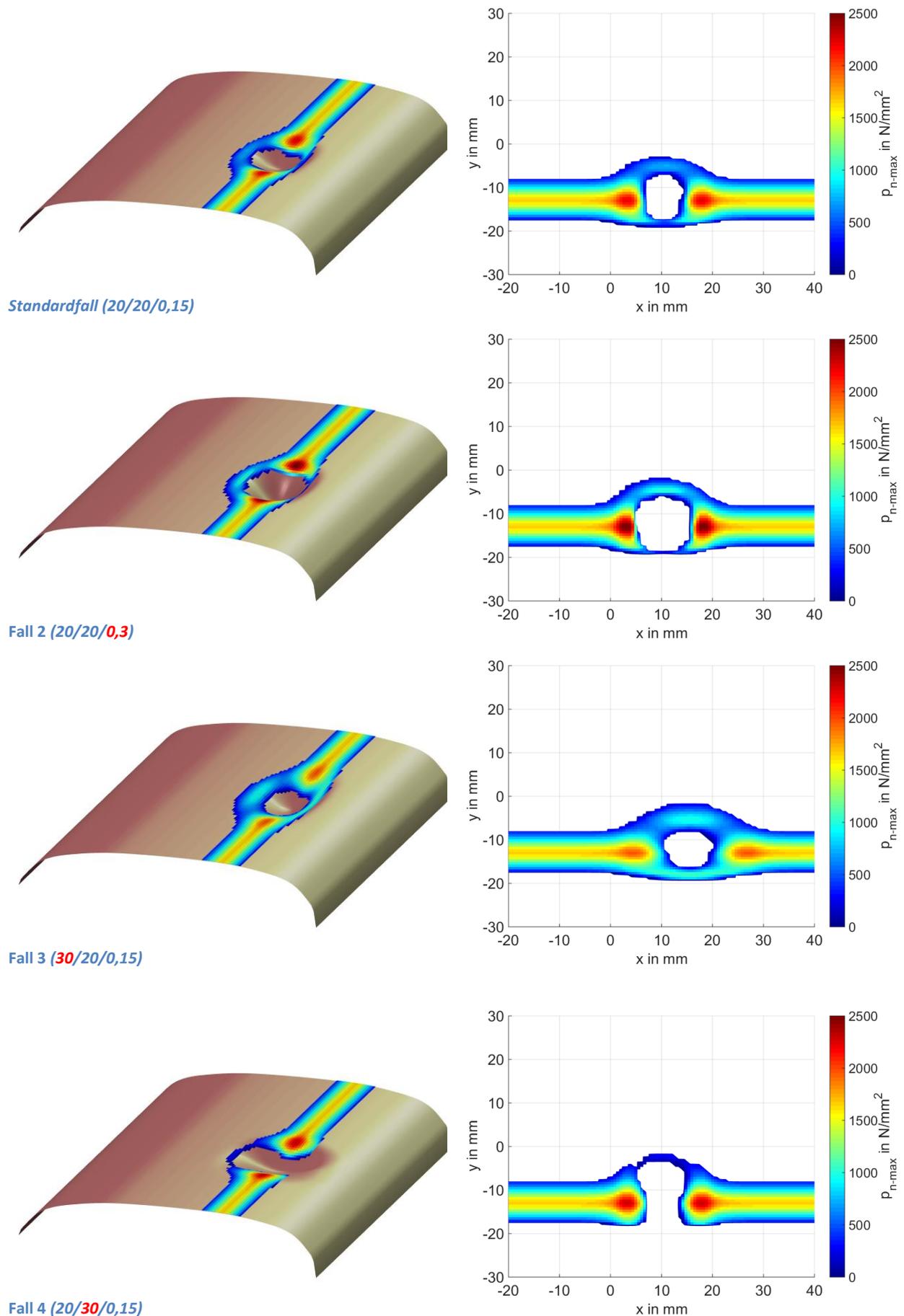


Abbildung 83: Maximal auftretende Normalspannungen der jeweils ersten Überrollung.

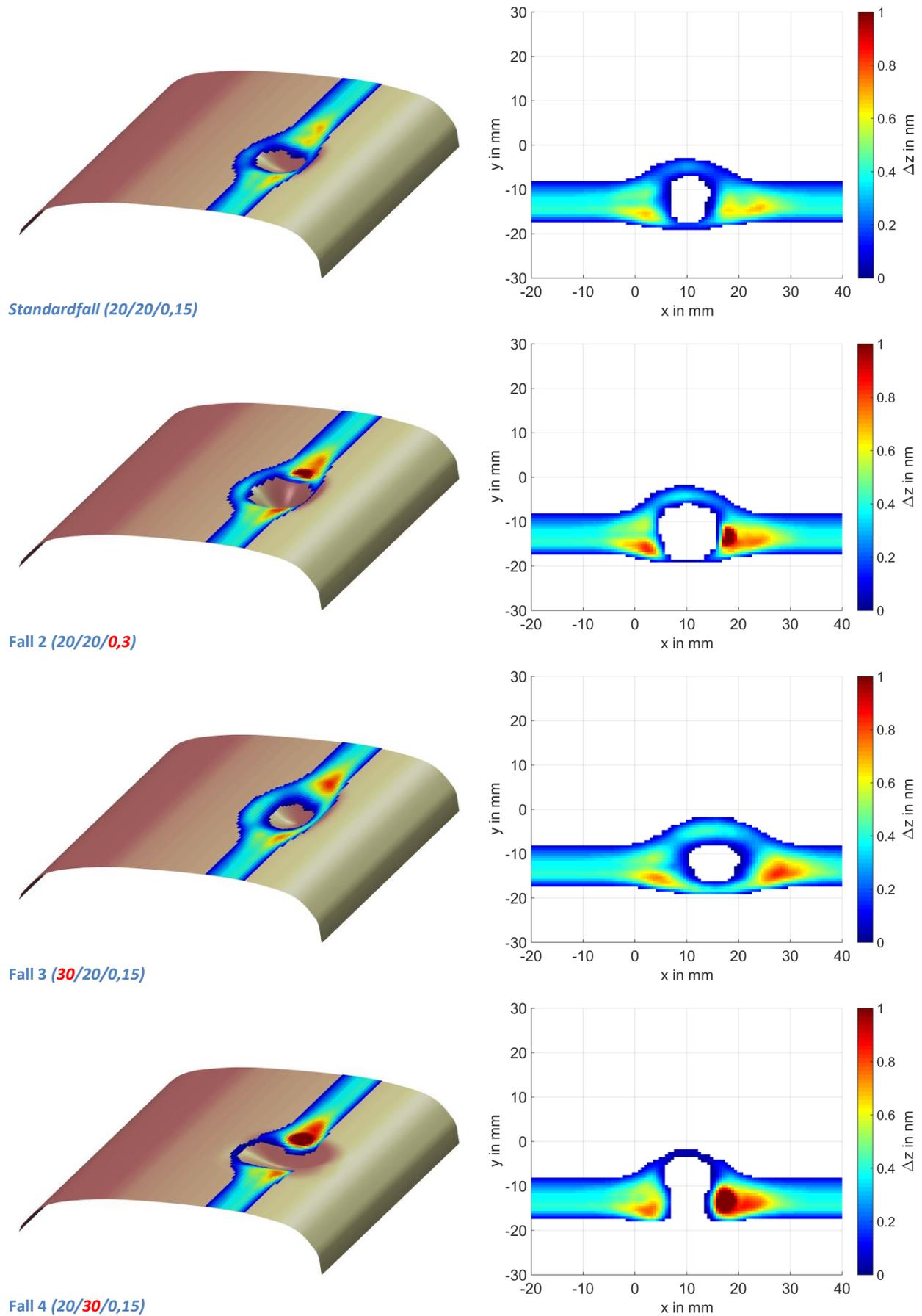
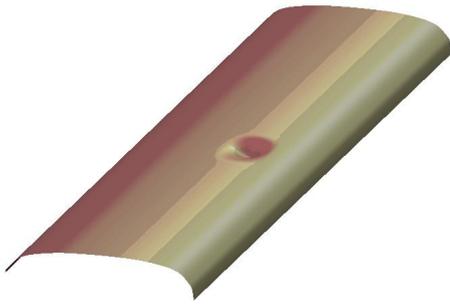
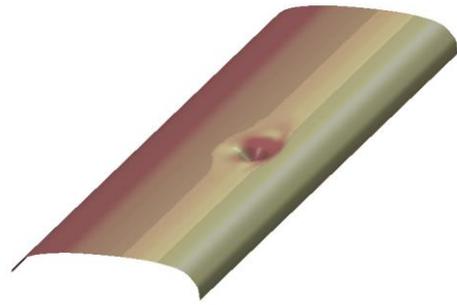


Abbildung 84: Verschleißprofil der jeweils ersten Überrollung.

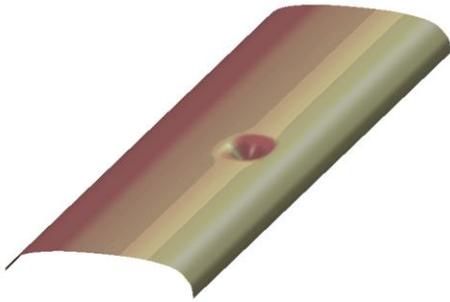
1. Überrollung



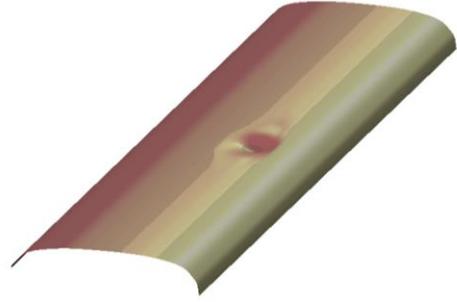
53 tausendste Überrollung



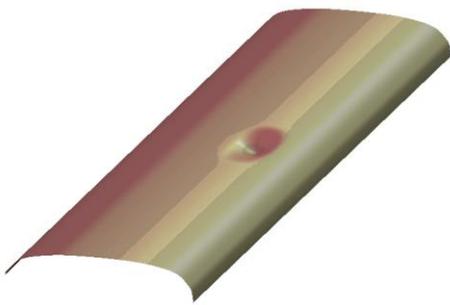
Standardfall (20/20/0,15)



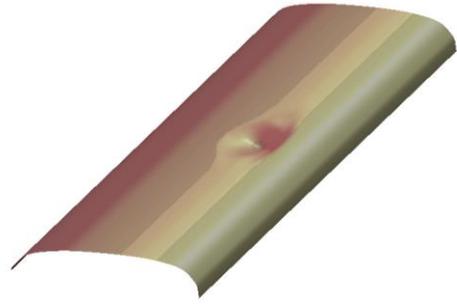
Standardfall (20/20/0,15)



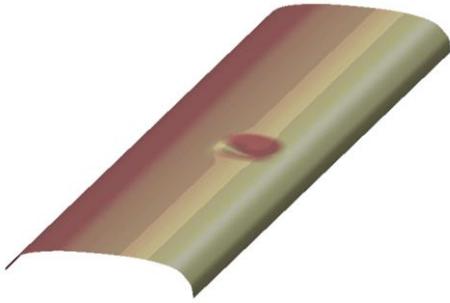
Fall 2 (20/20/0,3)



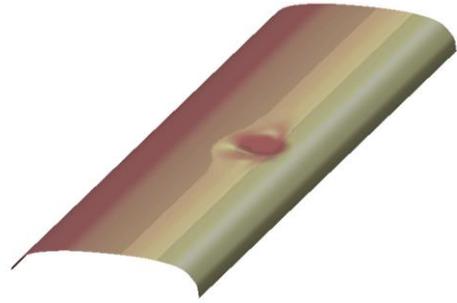
Fall 2 (20/20/0,3)



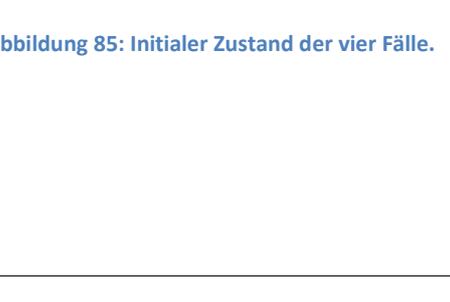
Fall 3 (30/20/0,15)



Fall 3 (30/20/0,15)



Fall 4 (20/30/0,15)



Fall 4 (20/30/0,15)

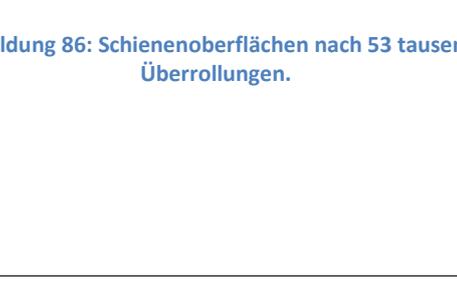
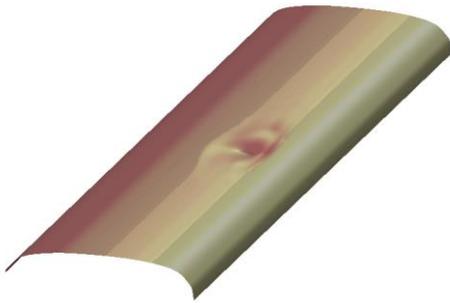


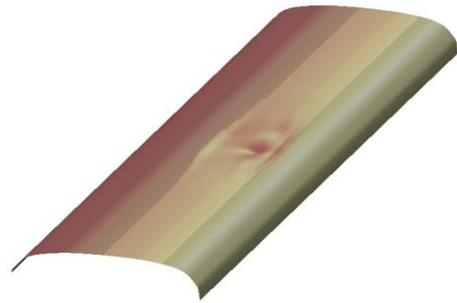
Abbildung 85: Initialer Zustand der vier Fälle.

Abbildung 86: Schienenoberflächen nach 53 tausend Überrollungen.

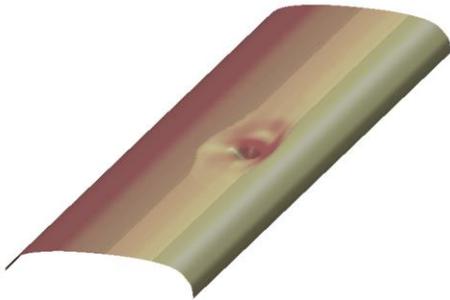
150 tausendste Überrollung



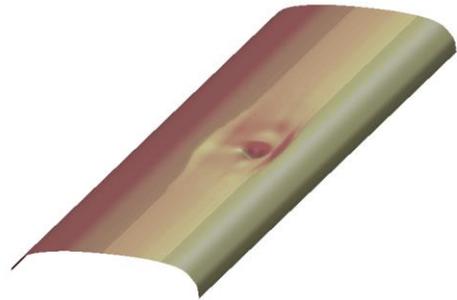
300 tausendste Überrollung



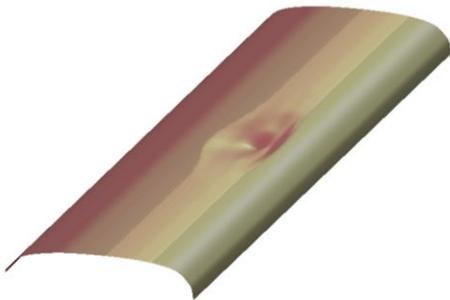
Standardfall (20/20/0,15)



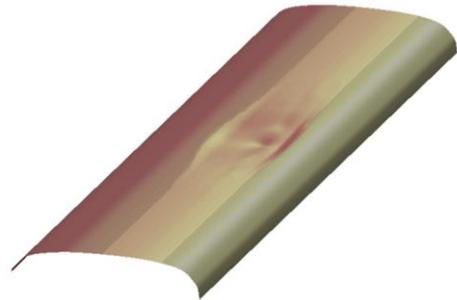
Standardfall (20/20/0,15)



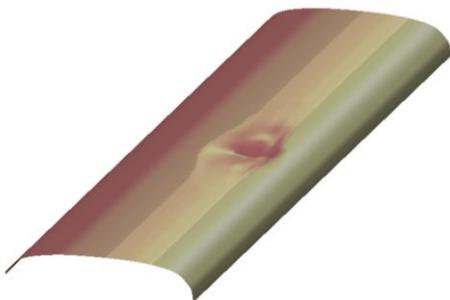
Fall 2 (20/20/0,3)



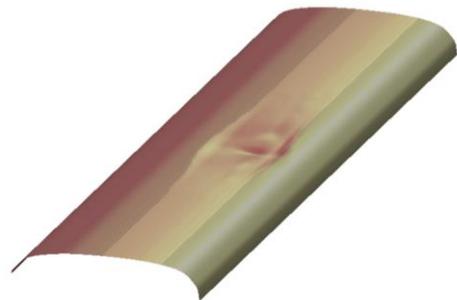
Fall 2 (20/20/0,3)



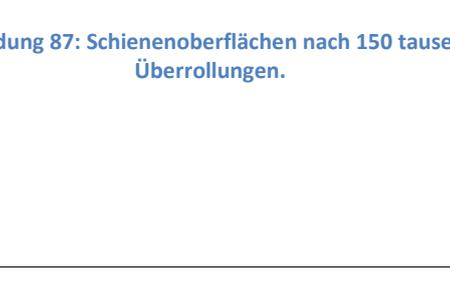
Fall 3 (30/20/0,15)



Fall 3 (30/20/0,15)



Fall 4 (20/30/0,15)



Fall 4 (20/30/0,15)

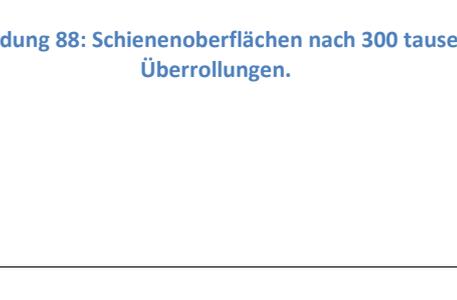
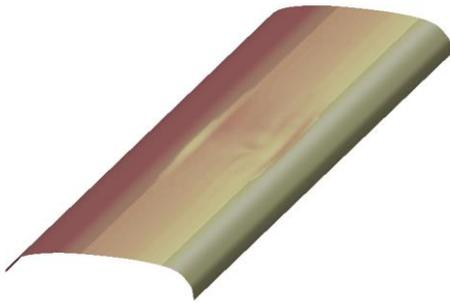


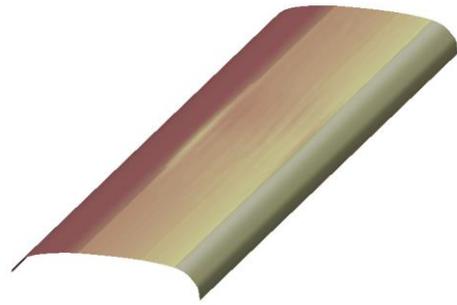
Abbildung 87: Schienenoberflächen nach 150 tausend Überrollungen.

Abbildung 88: Schienenoberflächen nach 300 tausend Überrollungen.

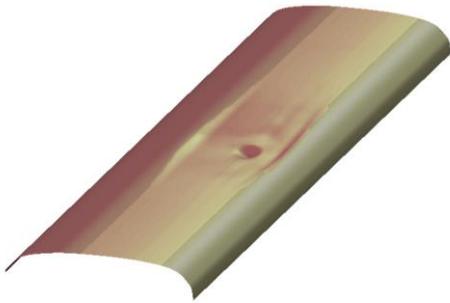
601 tausendste Überrollung



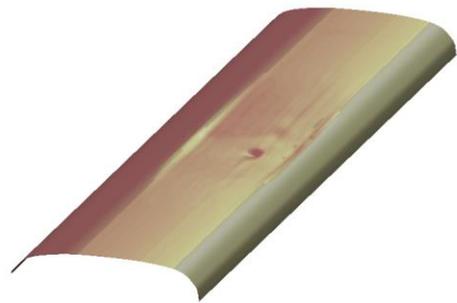
886 tausendste Überrollung



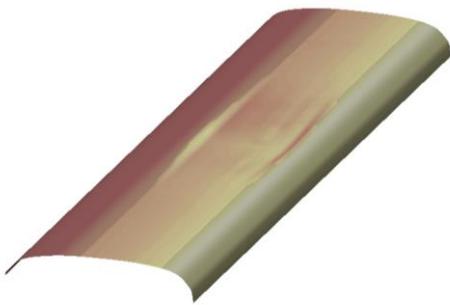
Standardfall (20/20/0,15)



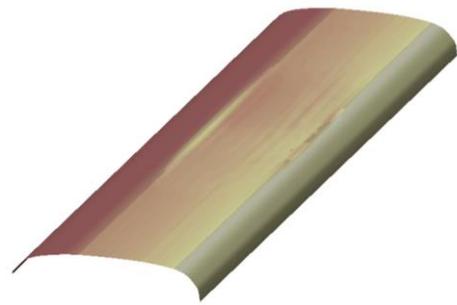
Standardfall (20/20/0,15)



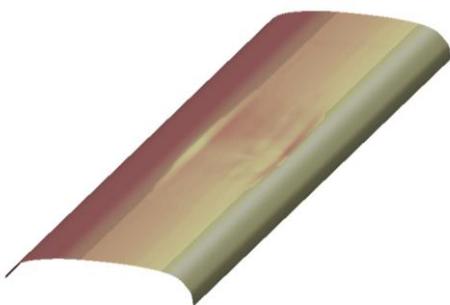
Fall 2 (20/20/0,3)



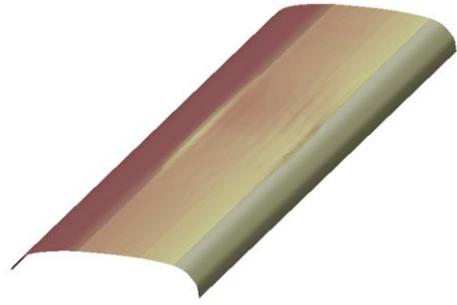
Fall 2 (20/20/0,3)



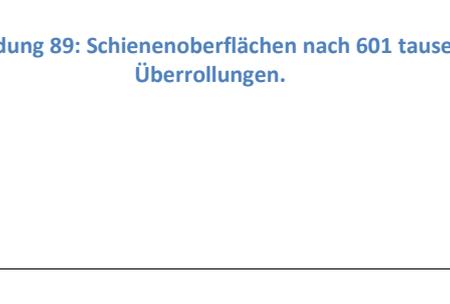
Fall 3 (30/20/0,15)



Fall 3 (30/20/0,15)



Fall 4 (20/30/0,15)



Fall 4 (20/30/0,15)

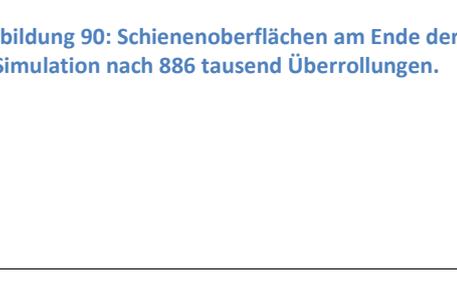


Abbildung 89: Schienenoberflächen nach 601 tausend Überrollungen.

Abbildung 90: Schienenoberflächen am Ende der Simulation nach 886 tausend Überrollungen.

Die Längs- und Querkonturen der Schienenoberflächen zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulationen werden in Abbildung 91 bis Abbildung 95 miteinander verglichen. Die Längs- und Querkoordinaten der Konturen wurden dabei so gelegt, dass sie durch die jeweilige Mitte der initialen geometrischen Abweichungen führen.

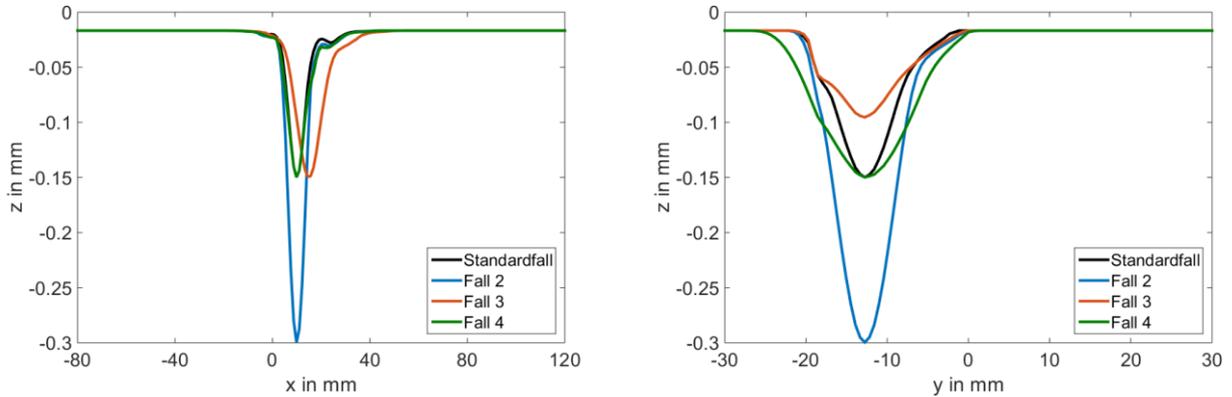


Abbildung 91: Das linke Bild zeigt die Längs-, das rechte Bild die Querkontur der Schienenoberflächen aller vier Fälle durch die jeweilige initiale Mitte der geometrischen Abweichungen zum Zeitpunkt der 53 tausendsten Überrollung.

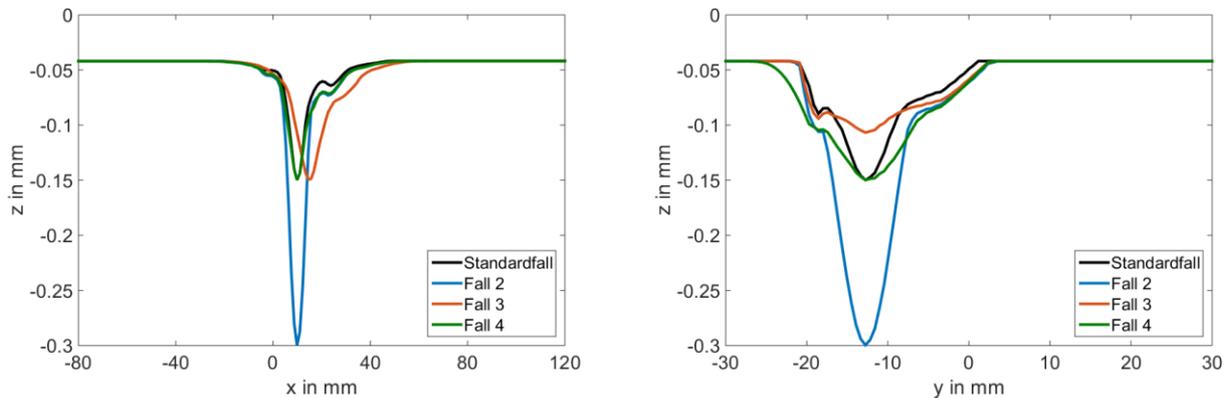


Abbildung 92: Das linke Bild zeigt die Längs-, das rechte Bild die Querkontur der Schienenoberflächen aller vier Fälle durch die jeweilige initiale Mitte der geometrischen Abweichungen zum Zeitpunkt der 150 tausendsten Überrollung.

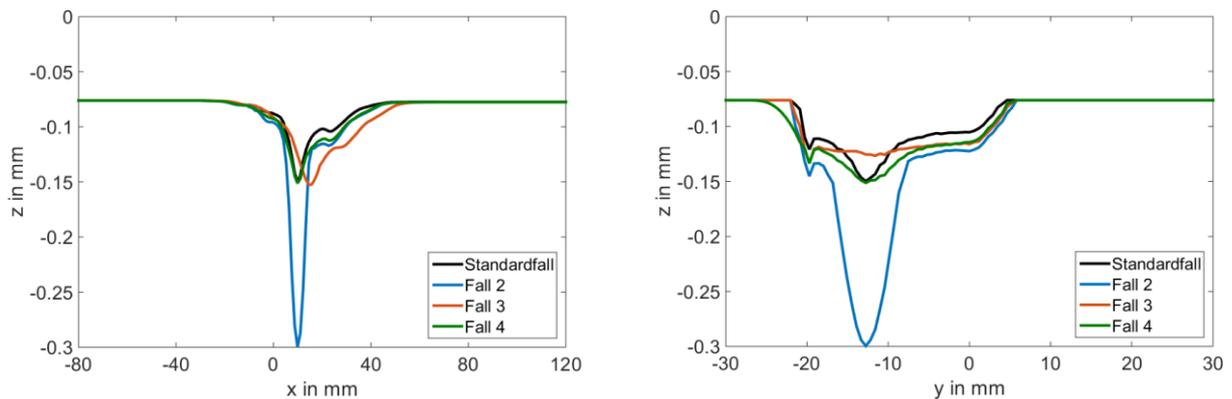


Abbildung 93: Das linke Bild zeigt die Längs-, das rechte Bild die Querkontur der Schienenoberflächen aller vier Fälle durch die jeweilige initiale Mitte der geometrischen Abweichungen zum Zeitpunkt der 300 tausendsten Überrollung.

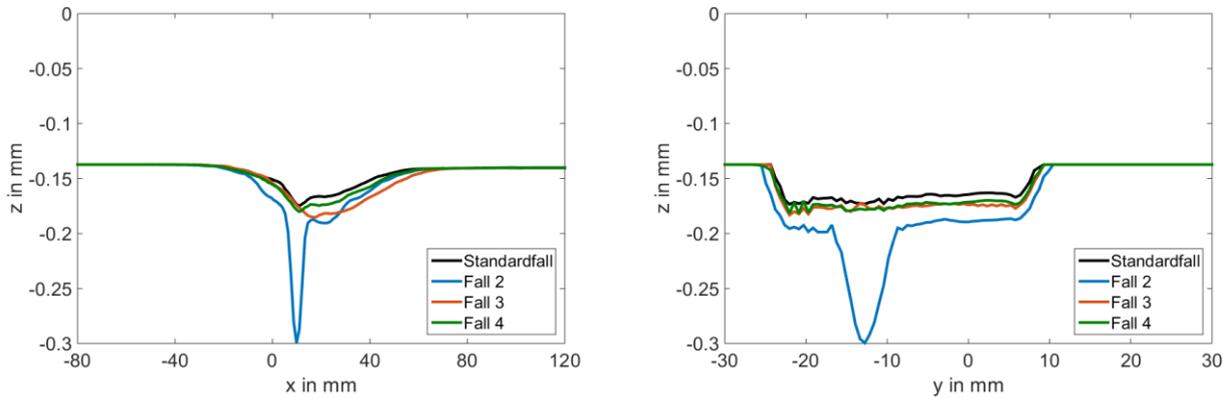


Abbildung 94: Das linke Bild zeigt die Längs-, das rechte Bild die Querkontur der Schienenoberflächen aller vier Fälle durch die jeweilige initiale Mitte der geometrischen Abweichungen zum Zeitpunkt der 601 tausendsten Überrollung.

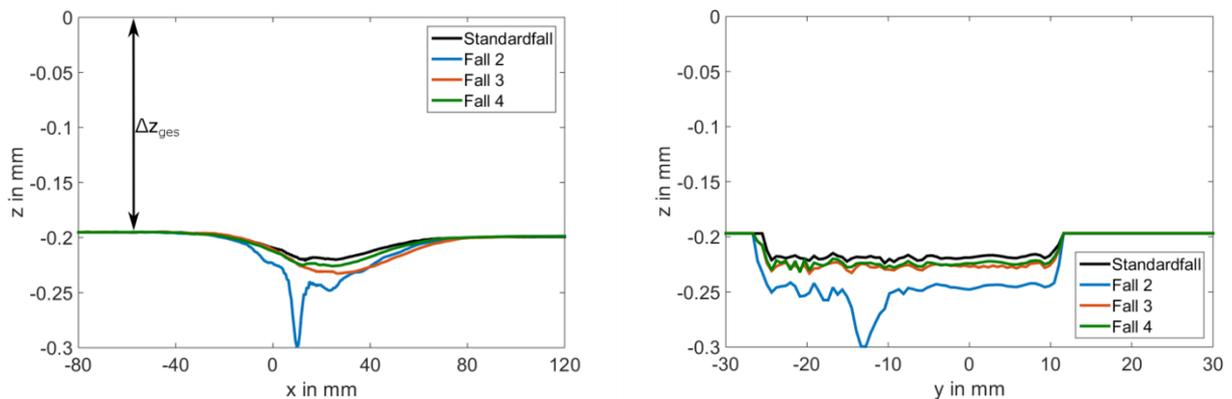


Abbildung 95: Das linke Bild zeigt die Längs-, das rechte Bild die Querkontur der Schienenoberflächen aller vier Fälle durch die jeweilige initiale Mitte der geometrischen Abweichungen zum Zeitpunkt der 886 tausendsten Überrollung. Δz_{ges} ist der Gesamtverschleiß aller Überrollungen.

Die geometrische Entwicklung vor und nach den initialen Oberflächenabweichungen kann anhand der Längskonturen genauer betrachtet werden. Auf diesen Abbildungen ist noch einmal deutlich erkennbar, dass insbesondere Fall 2 mit der tiefsten geometrischen Abweichung in Schienenlängsrichtung im Bereich nach der initialen geometrischen Abweichung ($x \sim 30$ mm) den stärksten Materialabtrag durch Verschleiß und ab der 600 tausendsten Überrollung in diesem Bereich auch die tiefste geometrische Abweichung aufweist.

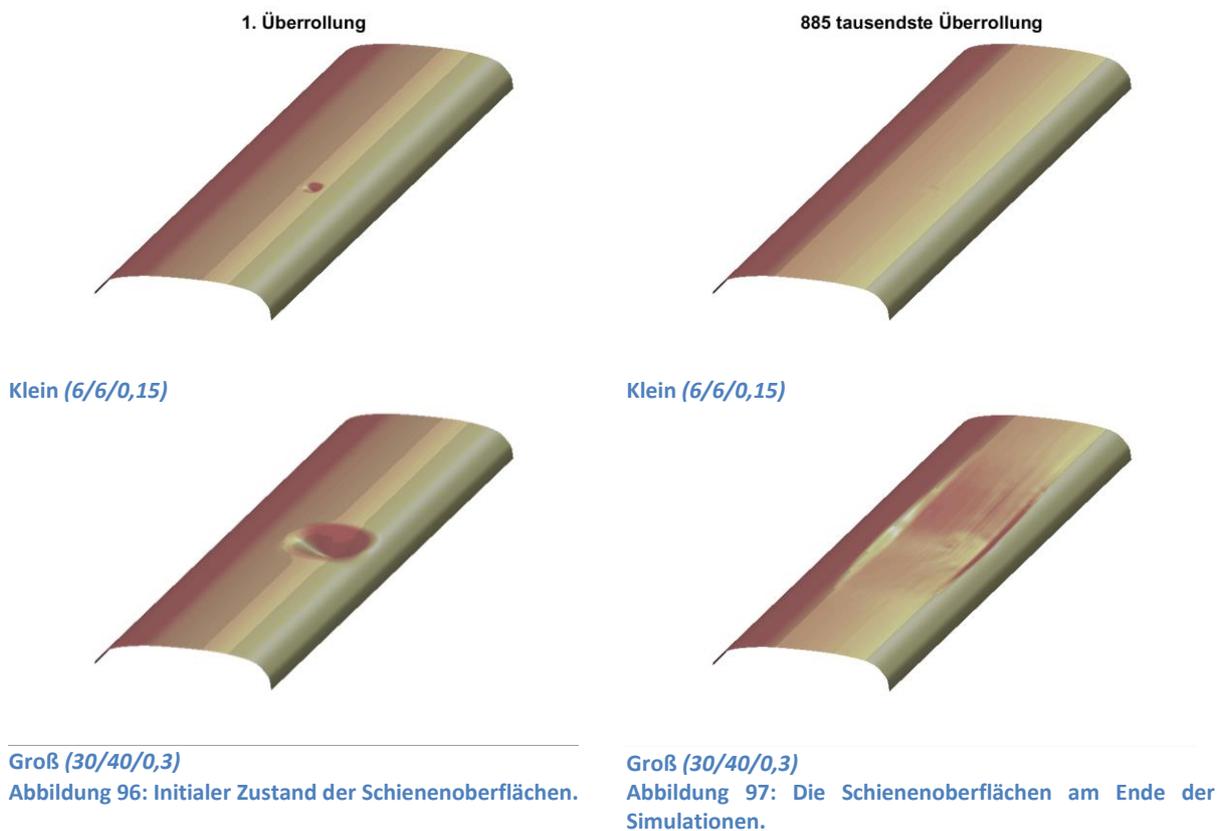
Anhand der Querkonturen der Oberflächen kann auch die seitliche Entwicklung aller vier Fälle miteinander verglichen werden. Die ursprünglich breiteste geometrische Abweichung (Fall 4) scheint an den Rändern die geringste Verschleißrate aufzuweisen. Besonders Fall 2 und Fall 3 übertreffen ab der 300 tausendsten Überrollung an den äußeren Bereichen die ursprünglich dort tiefere geometrische Abweichung des Falls 4.

Am Ende der Simulation (vgl. Abbildung 95) beträgt der Gesamtverschleiß Δz_{ges} an Material in den ungestörten Bereichen der Schiene (z.B. $x = -50$ mm) rund 0,2 mm. Damit übertrifft der Gesamtbetrag des Verschleißes bei jedem Simulationsbeispiel, ausgenommen Fall 2 (initial tiefste geometrische Abweichung), die maximalen initialen Tiefen der geometrischen Abweichungen (vgl. Tabelle 1). Die maximalen Längen, Breiten und Tiefen aller vier Fälle am Ende der Simulation sind in Tabelle 2 zusammengefasst und können nicht von der Querkontur abgelesen werden. So wie die Längs- führt auch die Querkontur durch die initiale Mitte der geometrischen Abweichungen. Die geometrische

Entwicklung ist asymmetrisch und die tiefste Stelle stimmt am Ende der Simulation nicht mit der initial tiefsten Stelle (Mitte der jeweiligen geometrischen Abweichung) überein.

Abbildung 96 zeigt den initialen Zustand zweier Schienenoberflächen mit jeweils einer extrem kleinen und einer extrem großen geometrischen Abweichung (vgl. Tabelle 1). Man erkennt, dass im Gegensatz zur großen die kleine geometrische Abweichung zu keiner erkennbaren Variation des Fahrspiegels führt.

Der Zustand der beiden Schienenoberflächen am Ende der Simulationen ist in Abbildung 97 dargestellt. Die initial kleine geometrische Abweichung kann zu diesem Zeitpunkt auf der Schienenoberfläche nicht mehr gefunden werden. Die initial große geometrische Abweichung ist mit einer Länge von zirka 115 mm und einer Tiefe von rund 0,11 mm deutlich auf der Schienenoberfläche erkennbar.



Die Längskonturen der Schienenoberflächen der beiden Extremfälle zeigen Abbildung 98 (Fall Klein) und Abbildung 99 (Fall Groß). Um falschen Interpretationen vorzubeugen, wird an dieser Stelle auf die unterschiedliche Skalierung der Ordinatenachsen der beiden Abbildungen hingewiesen. Diese wurde entsprechend den Maßen der geometrischen Abweichungen gewählt.

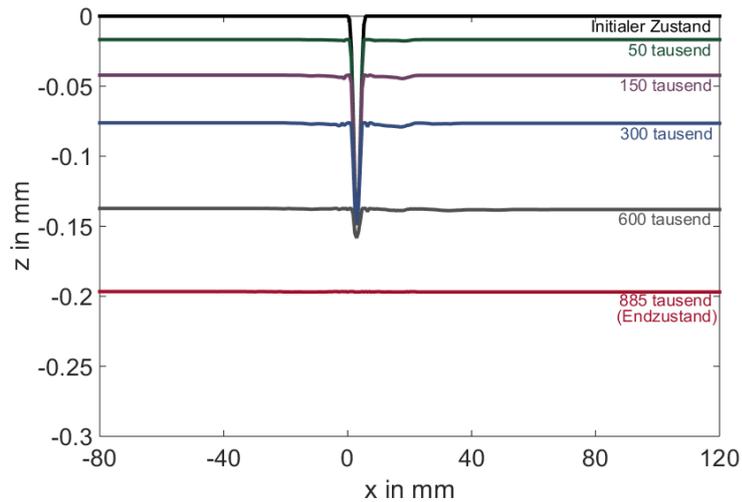


Abbildung 98: Kontur der Schienenoberfläche an der Querkoordinate $y = -12,76$ mm (Mitte der initialen geometrischen Abweichung *Klein*) zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulation.

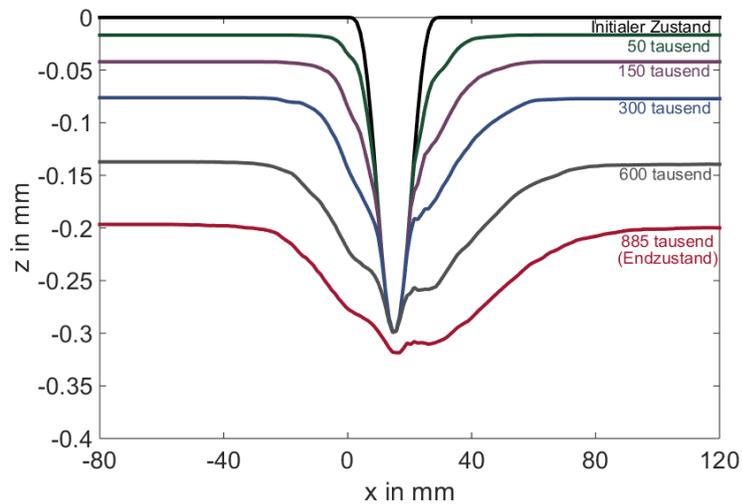


Abbildung 99: Kontur der Schienenoberfläche an der Querkoordinate $y = -12,76$ mm (Mitte der initialen geometrischen Abweichung *Groß*) zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulation.

Abschließend sind in Tabelle 2 die ungefähren Maße der geometrischen Abweichungen am Ende der jeweiligen Simulation gelistet.

	Länge in mm	Breite in mm	Tiefe in mm
Standardfall	≈70	≈40	≈0,025
Fall 2	≈90	≈40	≈0,06
Fall 3	≈75	≈40	≈0,04
Fall 4	≈75	≈40	≈0,034
Klein	-	-	-
Groß	≈115	≈40	≈0,11

Tabelle 2: Maximale Länge, Breite und Tiefe¹⁴ der geometrischen Abweichungen der im Kapitel 7.1.2 untersuchten Fälle.

¹⁴ Als Ausnahme gilt die Angabe der Tiefe von Fall 2: Tiefe gemessen an Längsposition $x = 22$ mm (vgl. Abbildung 95).

Diskussion der Ergebnisse

Um den Einfluss von Länge, Breite und Tiefe auf die weitere geometrische Entwicklung einer Abweichung der Schienenoberfläche zu untersuchen, wurden zusätzlich zum *Standardfall* drei weitere Simulationen durchgeführt und mit dem *Standardfall* verglichen. Bei diesen drei Simulationen wurden, verglichen mit dem *Standardfall*, eine tiefere (Fall 2), eine längere (Fall 3) und eine breitere (Fall 4) initiale geometrische Abweichung angenommen (vgl. Tabelle 1). Die Veränderung der Maße der geometrischen Abweichung beeinflusste auch die Neigungen der Schienenoberflächen (Steigungen der Flanken) im Bereich der geometrischen Abweichung. Diese Unterschiede sind in Abbildung 76 und Abbildung 77 an den Längs- und Querkonturen der Schienenoberfläche durch die Mitte der jeweiligen geometrischen Abweichungen ersichtlich.

Neben den geometrischen Maßen haben die Neigungen der Oberflächen der geometrischen Abweichungen einen Einfluss auf die Variationen der Rad-Schiene-Kontakte während einer Überrollung, erkennbar insbesondere an den Formen der Rad-Schiene-Kontakte des *Standardfalls* und des Falls 2 zu den verschiedenen Zeitpunkten der jeweils ersten Überrollung (Abbildung 78 bis Abbildung 82). Diese beiden geometrischen Abweichungen haben die gleiche Länge und Breite, jedoch ist die Abweichung von Fall 2 doppelt so tief wie jene des *Standardfalls* (vgl. Tabelle 1). Dadurch weist die geometrische Abweichung von Fall 2 stärker geneigte Oberflächen auf (vgl. Abbildung 76 und Abbildung 77). Die stärker geneigten Oberflächen führen während der Überrollung, verglichen mit dem *Standardfall*, zu größeren Abständen zwischen Rad und Schiene. Bereiche innerhalb der geometrischen Abweichung, die beim *Standardfall* vom Rad noch kontaktiert werden, kommen im Fall 2 mit dem Rad nicht mehr in Berührung. Aus diesem Grund wird der Rad-Schiene-Kontakt im Fall 2, verglichen mit jenem vom *Standardfall*, während der Überrollung weiter von der Mitte der geometrischen Abweichung nach außen gedrängt. Insbesondere zum Zeitpunkt 3 der Überrollung, dargestellt in Abbildung 80, erkennt man dieses Phänomen anhand der unterschiedlich großen nicht kontaktierten Bereiche innerhalb der sich ausbildenden Kontaktringe der beiden verglichenen Fälle. Zudem ist der Kontakttring von Fall 2 schmaler als jener des *Standardfalls*.

Der gegenteilige Effekt ist bei der Überrollung der geometrischen Abweichung von Fall 3 erkennbar. Fall 3 unterscheidet sich vom *Standardfall* durch eine längere geometrische Abweichung (vgl. Tabelle 1) und hat dadurch in Längsrichtung einen sanfteren Übergang zur geometrischen Abweichung sowie eine weniger steil geneigte Oberflächen innerhalb der geometrischen Abweichung in Längsrichtung (vgl. Abbildung 76). Der Rad-Schiene-Kontakt kann dadurch relativ weit in die geometrische Abweichung vordringen, es bildet sich ein vergleichsweise dicker Kontakttring aus (vgl. Zeitpunkt 3 der Überrollung, Abbildung 80).

Fall 4 stellt die breiteste geometrische Abweichung der vier Fälle dar. Dadurch wird der Rad-Schiene-Kontakt während der Überrollung der Abweichung weniger in Querrichtung zur Schiene verschoben. Es bildet sich schon zum Zeitpunkt 1 der Überrollung ein zweiter Kontaktbereich mit deutlichem Längsabstand x' zur Radachse. Zu keinem Zeitpunkt entsteht ein vollständiger Kontakttring um die geometrische Abweichung.

Deutliche Unterschiede sind auch in der maximalen Breite der Kontaktflächen erkennbar. Gegenüber dem *Standardfall* bildet sich sowohl bei der initial tieferen (Fall 2) als auch bei der breiteren (Fall 3) und längeren geometrischen Abweichung (Fall 4) eine größere maximale Breite der Kontaktfläche während der Überrollung aus, erkennbar insbesondere zum Zeitpunkt 3 der Überrollung.

Die verschiedenen Formen und Größen der Kontaktflächen beeinflussen die Spannungen im Rad-Schiene-Kontakt und damit auch den Verschleiß während der Überrollungen.

In Abbildung 83 sind die maximalen Normalspannungen p_{n-max} während der ersten Überrollung dargestellt. In allen vier Fällen sind die höchsten Werte der maximalen Normalspannungen in Fahrtrichtung im Bereich vor und nach der geometrischen Abweichung zu finden. Die Abweichung mit der größten initialen Tiefe (Fall 2) weist die höchsten maximalen Normalspannungen auf, der Fall 3 mit der initial längsten geometrischen Abweichung zeigt die geringsten maximalen Normalspannungen.

Fall 2 hat während der Überrollung einen durch die steilen Flanken der geometrischen Abweichung verursachten schmalen Kontaktring, im Fall 3 ist der Kontaktring durch die geringere Neigung der Flanken dicker ausgebildet (vgl. Zeitpunkt 3 der Überrollung, Abbildung 80). Eine geringere Kontaktfläche (schmälerer Kontaktring) führt zu höheren bzw. eine insgesamt größere Kontaktfläche (dicker Kontaktring) zu geringeren Normalspannungen.

Betrachtet man in Abbildung 83 den durch die geometrische Abweichung nach außen gedrängten Fahrspiegelbereich, z.B. am lateralen Schienenquerschnitt $x \sim 10$ mm bei Fall 2 sowie $x \sim 15$ mm bei Fall 3, so erkennt man, dass in diesen nach außen gedrängten Bereichen die maximalen Normalspannungen etwas höher sind als in den beiden anderen dargestellten Fällen.

Bei Fall 2 können diese erhöhten maximalen Normalspannungen durch die geringere Kontaktfläche (schmälerer Kontaktring) erklärt werden.

Fall 3 weist durch seine geringeren Neigungen der Oberflächen der geometrischen Abweichung einen besonders dicken Kontaktring auf. Die höchsten maximalen Normalspannungen vor und nach der geometrischen Abweichung sind deutlich geringer als in den anderen dargestellten Fällen.

Auch die Verschleißprofile der jeweils ersten Überrollung, dargestellt in Abbildung 84, sind in allen vier Fällen unterschiedlich. Den höchsten Materialabtrag Δz durch Verschleiß verzeichnen Fall 2 und Fall 4 vor und nach den geometrischen Abweichungen.

Bei Fall 2 sind diese hohen Verschleißwerte eine Folge der deutlich erhöhten Normalspannungen. Fall 4 weist hingegen schon zu einem frühen Zeitpunkt der Überrollung einen zweiten Kontaktbereich in der zweiten Hälfte der geometrischen Abweichung auf, der dadurch einen großen Längsabstand x' zur Radachse hat (vgl. Zeitpunkt 1 der Überrollung, Abbildung 78). Außerdem bleibt dieser Bereich der Schiene durch den frühen Kontaktzeitpunkt länger mit dem Rad in Kontakt. Verglichen mit den anderen Fällen kann durch die längere Kontaktdauer, kombiniert mit dem zu Beginn großen Längsabstand an dieser Stelle der Schienenoberfläche, mit erhöhten Verschleißwerten gerechnet werden (vgl. dazu den Einfluss des Längsabstandes x' auf den Gesamtverschleiß in Kapitel 7.1.1).

Fall 2 mit der tieferen sowie Fall 3 mit der längeren geometrischen Abweichung weisen, verglichen mit den anderen beiden Fällen, einen höheren Materialabtrag Δz durch Verschleiß in den Bereichen der nach außen gedrängten Fahrspiegel auf (vgl. Abbildung 84, laterale Schienenquerschnitte $x \sim 10$ mm bei Fall 2 sowie $x \sim 15$ mm bei Fall 3). In diesen Bereichen sind die Werte der maximalen Normalspannungen höher als in den beiden anderen Fällen. Insgesamt höhere Normalspannungen begünstigen den Materialabtrag Δz durch Verschleiß.

Die weiteren geometrischen Entwicklungen der Schienenoberflächen werden in Abbildung 85 bis Abbildung 95 dargestellt. Alle vier Fälle entwickeln sich entsprechend der Verschleißprofile der jeweils ersten Überrollung asymmetrisch.

Die, verglichen mit den anderen Fällen, erhöhten Verschleißraten seitlich der geometrischen Abweichungen von Fall 2 (tiefste Abweichung) und Fall 3 (längste Abweichung) führen zu einer schnelleren Verbreiterung der Abweichungen. In Längsrichtung weisen Fall 2 und Fall 4 (breiteste Abweichung) eine deutlich schnellere Entwicklung insbesondere im Bereich nach der Mitte der geometrischen Abweichung auf. Die ursprünglich längste geometrische Abweichung entwickelt sich in diesem Bereich nur minimal schneller als der *Standardfall*.

Durch den insgesamt deutlich erhöhten Materialabtrag der Fälle 2 bis 4 kontaktiert das Rad tiefere Bereiche der geometrischen Abweichungen früher, was wiederum zu einem früheren Materialabtrag durch Verschleiß in diesen Bereichen als beim *Standardfall* führt. Dadurch verbleiben diese geometrischen Abweichungen allesamt tiefer auf der Schienenoberfläche als beim *Standardfall*.

Aus diesen Simulationsergebnissen kann geschlossen werden, dass je deutlicher die Variationen des Rad-Schiene-Kontaktes während der Überrollungen einer initialen geometrischen Abweichung sind, desto ausgeprägter verbleibt diese geometrische Abweichung auf der Schienenoberfläche. Die Variationen steigen mit zunehmender Größe der initialen geometrischen Abweichung an. Dieser Effekt gilt bis zu einer gewissen Größe der geometrischen Abweichung. Geometrische Abweichungen, deren Abmessungen jene des Rad-Schiene-Kontaktes um mehrere Größenordnungen¹⁵ übersteigen, haben auf diesen keinen Einfluss mehr und werden vom Rad ohne erkennbare Veränderungen des Rad-Schiene-Kontaktes durchrollt.

Zwei weitere durchgeführte Simulationen bestätigen diese Erkenntnis. In Abbildung 96 und Abbildung 97 ist der initiale Zustand einer kleinen und einer relativ großen geometrischen Abweichung dargestellt. Die kleine geometrische Abweichung mit einer Länge und einer Breite von 6 mm sowie einer Tiefe von 0,15 mm führt schon zu Beginn (vgl. Abbildung 96) zu keiner ersichtlichen Variation des Fahrspiegels. Der Rad-Schiene-Kontakt scheint während der Überrollung von der geometrischen Abweichung relativ unbeeinflusst zu bleiben. Hingegen sind am Fahrspiegel der initial großen geometrischen Abweichung mit einer Länge von 30 mm, einer Breite von 40 mm und einer Tiefe von 0,3 mm deutliche Variationen erkennbar. Die initial kleine geometrische Abweichung verschwindet bis zum Ende der Simulation von der Oberfläche (vgl. Abbildung 98). Die zu Beginn große geometrische Abweichung verbleibt hingegen mit einer maximalen Länge von ~115 mm, einer maximalen Breite von ~40 mm und einer maximalen Tiefe von ~0,11 mm am Ende der Simulation auf der Schienenoberfläche (vgl. Abbildung 97 und Abbildung 99).

Auch in der Literatur [4] [6] wird berichtet, dass geometrische Abweichungen mit einem Durchmesser kleiner als 8 mm bzw. 6 mm und 5 mm im Laufe der Zeit von der Schienenoberfläche verschwanden. Größere geometrische Abweichungen bildeten mitunter Squats.

¹⁵ Die Größe des Rad-Schiene-Kontaktes ist von der Rad- und Schienengeometrie abhängig. Im Allgemeinen kann jedoch angenommen werden, dass die Größe des Kontaktes vergleichbar mit der Größe einer 1 Euro Münze ist (vgl. Abbildung 58 (a)).

7.1.3 Einfluss verschiedener Schlupfzustände

In den bisherigen Simulationen wurde angenommen, dass die Schiene schlupffrei überrollt wird ($c_x = 0\%$). In diesem Kapitel soll der Einfluss von zusätzlichem Schlupf c_x aufgrund von Antreiben ($c_x = \text{negativ}$) oder Bremsen ($c_x = \text{positiv}$) auf die geometrische Entwicklung von Schienenoberflächen mit initialen Abweichungen untersucht werden.

Dazu werden die geometrischen Abweichungen des *Standardfalls* sowie des Falls *Groß* aus den Kapiteln 7.1.1 bzw. 7.1.2 herangezogen und teilweise unter verschiedenen Schlupfzuständen überfahren¹⁶. Die Schienen der beiden Fälle *Groß 9* und *Groß 10* werden vollständig schlupfbehaftet überfahren (vgl. Tabelle 3). Die Endzustände der Schienenoberflächen werden mit den Ergebnissen des *Standardfalls* und des Falls *Groß* aus den Kapiteln 7.1.1 bzw. 7.1.2 (Überrollung ohne zusätzlichen Schlupf) verglichen.

Tabelle 3 listet die in diesem Kapitel untersuchten Fälle sowie die für Vergleiche herangezogenen Fälle *Standardfall* und Fall *Groß* auf. Alle in diesem Kapitel nicht angegebenen Simulationsparameter entsprechen jenen des Kapitels 7.1.1.

	% -Anteil der Überfahrten mit Schlupf c_x ¹⁷	c_x in %	Länge in mm	Breite in mm	Tiefe in mm	Mittelpunktkoordinaten x/y in mm
Standardfall	0	-	20	20	0,15	10/-12,76
Fall 5	20	-0,1	20	20	0,15	10/-12,76
Fall 6	20	+0,1	20	20	0,15	10/-12,76
Fall 7	40	-0,1	20	20	0,15	10/-12,76
Fall 8	40	+0,1	20	20	0,15	10/-12,76
Groß	0	-	30	40	0,3	15/-12,76
Groß 9	100	-0,1	30	40	0,3	15/-12,76
Groß 10	100	+0,1	30	40	0,3	15/-12,76

Tabelle 3: Initiale Maße der untersuchten Fälle sowie Angabe des Anteils der Überfahrten mit antreibend oder bremsend wirkendem Schlupf.

Abbildung 100 zeigt den Ausgangszustand der geometrischen Abweichung mit der Länge und Breite von 20 mm sowie der Tiefe von 0,15 mm. Diese geometrische Abweichung wird in den Simulationen der Fälle 5 bis 8 teilweise schlupfbehaftet überfahren (vgl. Tabelle 3). In der Simulation des *Standardfalls* (vgl. Kapitel 7.1.2) wird bei der Überrollung kein zusätzlicher Schlupf durch Antreiben oder Bremsen angenommen.

¹⁶ In dieser Arbeit werden Überrollungen mit zusätzlichem Schlupf ($c_x \neq 0\%$) aufgrund von Antreiben oder Bremsen „Überfahrten“ („überfahren“) genannt.

¹⁷ Die restlichen Überfahrten fanden ohne zusätzlichen Schlupf $c_x = 0\%$ statt.

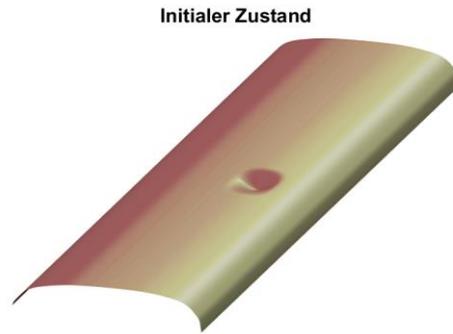


Abbildung 100: Ausgangszustand der Schienenoberfläche des *Standardfalls* und der Fälle 5 bis 8. Die geometrische Abweichung weist eine Länge und Breite von 20 mm sowie eine Tiefe von 0,15 mm auf.

Die Abbildungen 101 bis 103 zeigen die Verschleißprofile einer Überrollung ohne zusätzlichen Schlupf (Abbildung 101), einer gebremsten Überfahrt mit $c_x = +0,1\%$ (Abbildung 102) und einer angetriebenen Überfahrt mit $c_x = -0,1\%$ (Abbildung 103). Der Materialabtrag Δz der Überfahrten ist grundsätzlich höher als bei der schlupffreien Überrollung. Bei den Überfahrten mit Schlupf ist insbesondere im Bereich vor der geometrischen Abweichung ($x \sim -2$ mm bis $x \sim +5$ mm) ein erhöhter Verschleiß erkennbar.

Der Materialabtrag Δz der beiden schlupfbehafteten Überfahrten ist lokal unterschiedlich. Im Falle der Überfahrt mit einem zusätzlichen Schlupf von $c_x = +0,1\%$ ist der Materialabtrag, verglichen zur Überfahrt mit $c_x = -0,1\%$, im Bereich des aufgeteilten Fahrspiegels nahe der Schienenkopfmitte etwas höher (vgl. Abbildung 102 mit Abbildung 103, Bereich $x \sim 7$ mm bis $x \sim 12$ mm, $y \sim -3$ mm bis $y \sim -7$ mm).

Abbildung 104 zeigt den Zustand der geometrischen Abweichung des *Standardfalls* am Ende der Simulation, Abbildung 105 und Abbildung 106 verdeutlichen den Endzustand der Schienenoberfläche der Simulationen der Fälle 5 bis 8 (vgl. Tabelle 3). Bei einem Anteil von 20 % schlupfbehafteter Überfahrten mit einem $c_x = \pm 0,1\%$ bleibt die geometrische Abweichung der Schienenoberfläche am Ende der Simulation noch deutlich erhalten (vgl. Abbildung 105). Eine Erhöhung des Anteils der schlupfbehafteten Überfahrten auf 40 % (vgl. Abbildung 106) lässt die geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche am Ende der Simulation, verglichen mit der Abweichung des *Standardfalls* (vgl. Abbildung 104), etwas geringer ausfallen. Insgesamt ist jedoch die verbleibende geometrische Abweichung in der Simulation des Falls 8 deutlicher zu erkennen als jene des Falls 7.

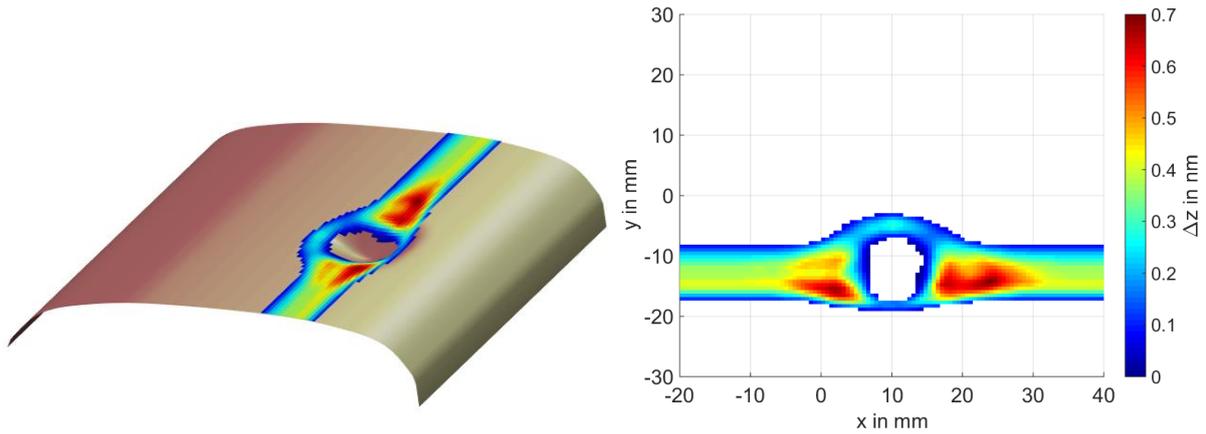


Abbildung 101: Materialabtrag Δz durch Verschleiß bei einer Überrollung der initialen geometrischen Abweichung des Standardfalls ohne zusätzlichen aufgetragenen Schlupf durch Antreiben oder Bremsen.

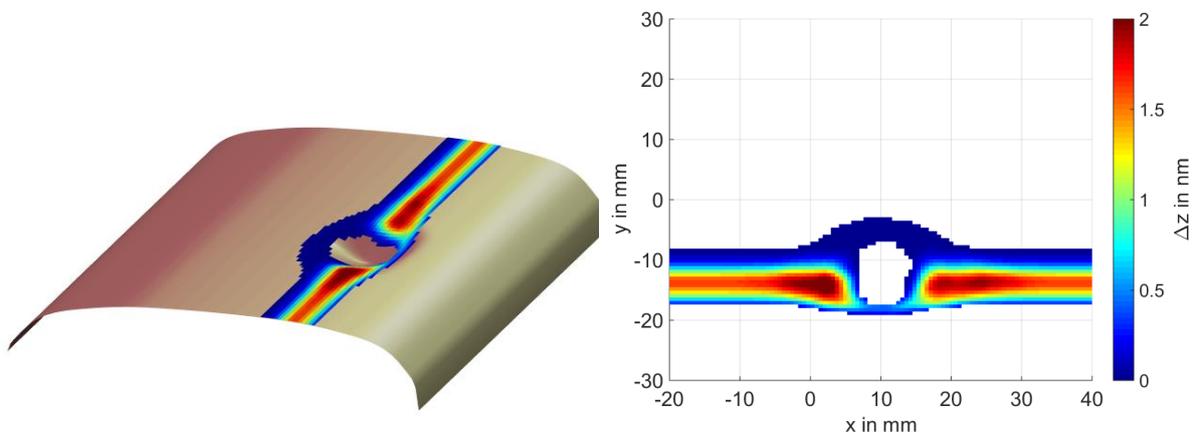


Abbildung 102: Materialabtrag Δz bei einer gebremsten Überfahrt mit $c_x = -0,1\%$ der initialen geometrischen Abweichung des Standardfalls.

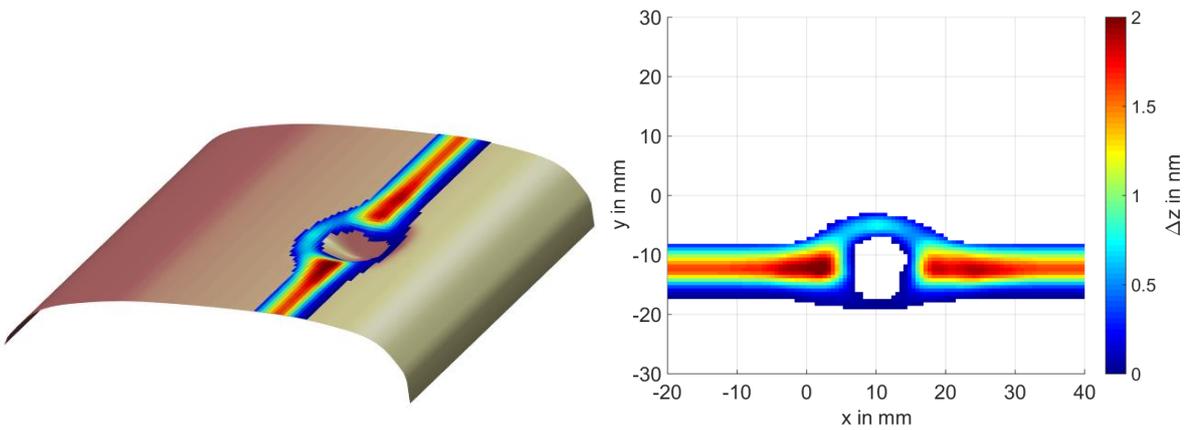


Abbildung 103: Materialabtrag Δz bei einer angetriebenen Überfahrt mit $c_x = +0,1\%$ der initialen geometrischen Abweichung des Standardfalls.

886 tausend Überrollungen

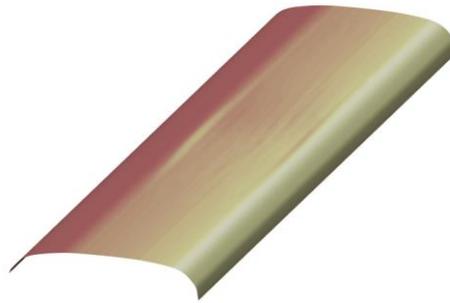
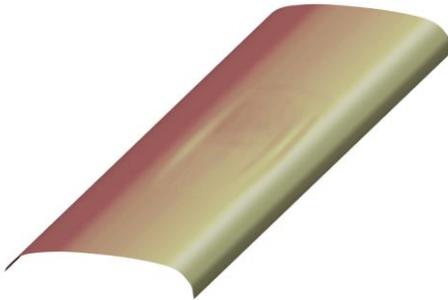


Abbildung 104: Zustand der Schienenoberfläche des *Standardfalls* am Ende der Simulation. Beim *Standardfall* wurde kein zusätzlicher Schlupf durch Bremsen oder Antreiben aufgetragen (vgl. Kapitel 7.1.1).

621 tausend Überrollungen



495 tausend Überrollungen

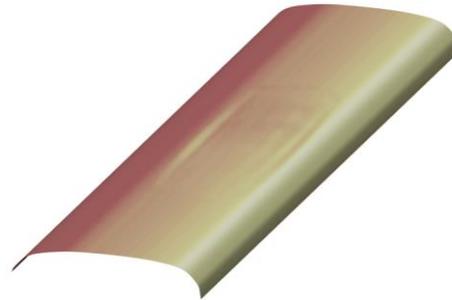
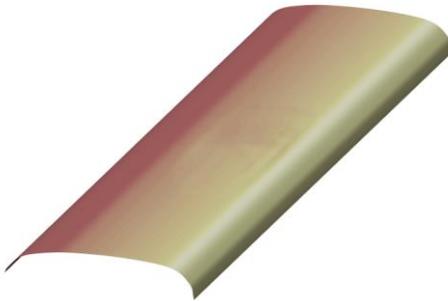


Abbildung 105: Zustand der Schienenoberfläche der Simulationsfälle 5 und 6 am Ende der Simulation. Insgesamt fanden 20 % der Überrollungen mit $c_x = -0,1\%$ (linkes Bild, Fall 5) sowie mit $c_x = +0,1\%$ (rechtes Bild, Fall 6) statt.

453 tausend Überrollungen



372 tausend Überrollungen

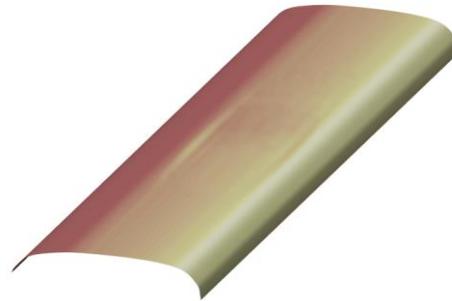


Abbildung 106: Zustand der Schienenoberfläche der Simulationsfälle 7 und 8 am Ende der Simulation. Insgesamt wurden 40 % der Überrollungen mit $c_x = -0,1\%$ (linkes Bild, Fall 7) sowie mit $c_x = +0,1\%$ (rechtes Bild, Fall 8) angenommen.

In Abbildung 107 werden die Längskonturen der Schienenoberfläche des *Standardfalls* sowie der Fälle 5 bis 8 miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass mit Erhöhung des Anteils der Überfahrten mit zusätzlichem Schlupf ($c_x = +/- 0,1\%$) sowohl die Länge als auch die Tiefe der verbleibenden geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche abnehmen. Bei den Simulationen mit Überfahrten mit zusätzlich positivem Schlupf (Fall 6 und Fall 8) ist die Tiefe dennoch mit jener des Standardfalls vergleichbar.

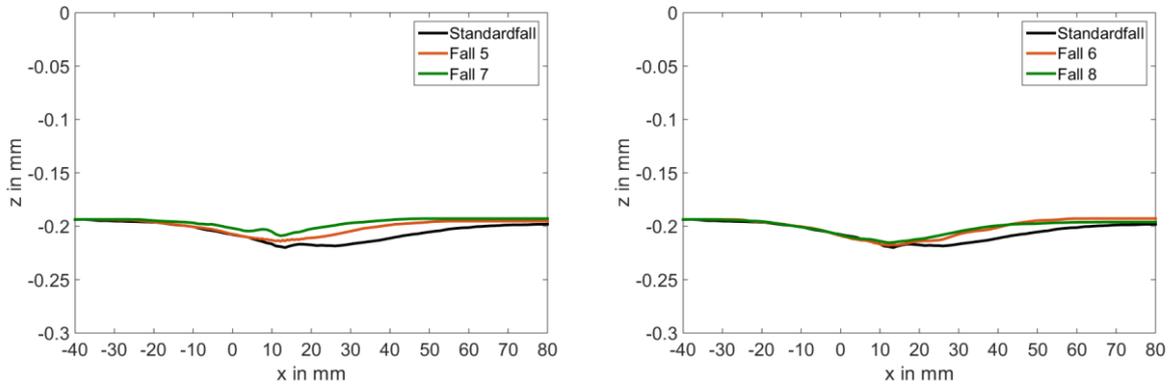


Abbildung 107: Längskonturen der Schienenoberfläche der angegebenen Fälle an der Position $y = -12,76$ mm.

Abbildung 108 zeigt den Ausgangszustand der Schienenoberfläche für die Simulationen der Fälle *Groß*, *Groß 9* sowie *Groß 10*. Diese geometrische Abweichung wird in den Simulationen der Fälle *Groß 9* und *Groß 10* vollständig schlupfbehaftet überfahren. In der Simulation des Falls *Groß* wird bei der Überrollung kein zusätzlicher Schlupf durch Antreiben oder Bremsen angenommen (vgl. Tabelle 3).

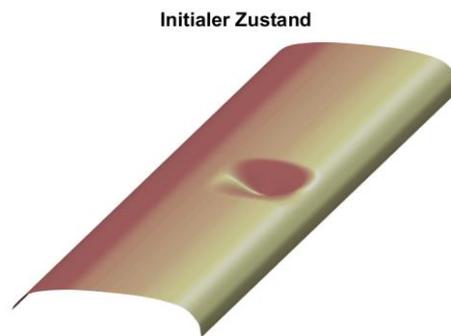


Abbildung 108: Ausgangszustand der Schienenoberfläche der Fälle *Groß*, *Groß 9* und *Groß 10*. Die geometrische Abweichung weist eine Länge vom 30 mm, eine Breite von 40 mm sowie eine Tiefe von 0,3 mm auf.

Mit Hilfe der Abbildung 109 und Abbildung 110 können die Endzustände der Schienenoberfläche der Fälle *Groß*, *Groß 9* und *Groß 10* miteinander verglichen werden. Trotz 100 % schlupfbehafteter Überfahrten der Fälle *Groß 9* und *Groß 10* bleibt insbesondere im Fall *Groß 10* eine deutliche geometrische Abweichung der Schienenoberfläche erhalten.

Die Längskonturen der Schienenoberflächen der drei Fälle werden in Abbildung 111 miteinander verglichen.

885 tausend Überrollungen

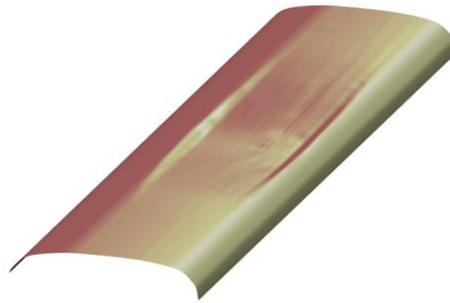
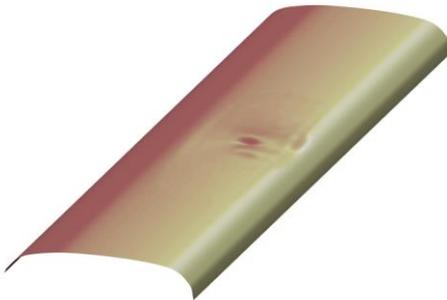


Abbildung 109: Zustand der Schienenoberfläche des Falls Groß am Ende der Simulation. Es wurde kein zusätzlicher Schlupf durch Bremsen oder Antreiben aufgetragen (vgl. Kapitel 7.1.2).

205 tausend Überfahrten



231 tausend Überfahrten

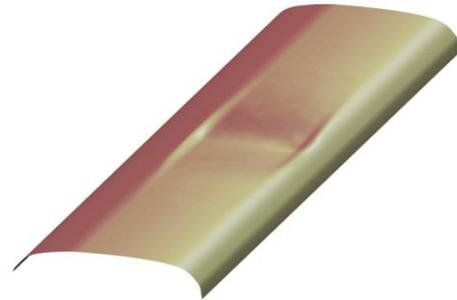


Abbildung 110: Das linke Bild zeigt den Zustand des Falls Groß 9, das rechte Bild des Falls Groß 10 am Ende der jeweiligen Simulation. Die geometrischen Abweichungen wurden ausschließlich mit zusätzlichem Schlupf von $c_x = -0,1\%$ im Fall Groß 9 sowie $c_x = +0,1\%$ im Fall Groß 10 überfahren.

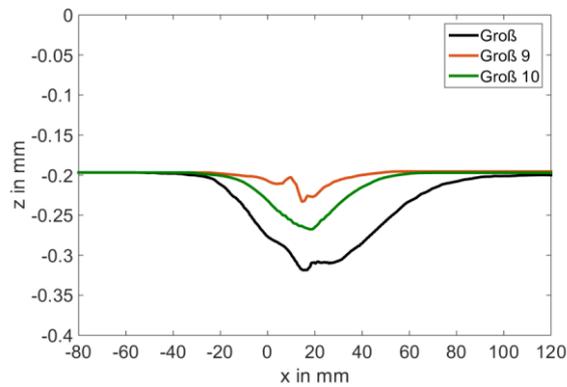


Abbildung 111: Die Längskonturen der Fälle *Groß*, *Groß 9* und *Groß 10* an der Position $y = -12,76$ mm am Ende der Simulationen.

In der folgenden Tabelle 4 sind die maximalen Längen, Breiten und Tiefen der geometrischen Abweichungen der Schienenoberflächen der in diesem Kapitel untersuchten Fälle gelistet.

	Länge in mm	Breite in mm	Tiefe in mm
Standardfall	≈70	≈40	≈0,025
Fall 5	≈50	≈40	≈0,021
Fall 6	≈60	≈40	≈0,023
Fall 7	≈50	≈40	≈0,018
Fall 8	≈55	≈40	≈0,021
Groß	≈115	≈40	≈0,11
Groß 9	≈55	≈40	≈0,04
Groß 10	≈60	≈40	≈0,08

Tabelle 4: Maximale Länge, Breite und Tiefe der geometrischen Abweichungen der untersuchten Fälle am Ende der Simulationen.

Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurde der Einfluss von Überfahrten mit einem zusätzlichen Schlupf untersucht. Dazu wurde im ersten Schritt die geometrische Abweichung des *Standardfalls* in den Simulationen der Fälle 5 bis 8 teilweise mit einem Schlupf von $c_x = +/- 0,1 \%$ überfahren, wobei die restlichen Überrollungen schlupffrei ($c_x = 0 \%$) stattfanden. Die Ergebnisse wurden mit jenen aus Kapitel 7.1.1 verglichen, in dem eine gleich große initiale geometrische Abweichung schlupffrei ($c_x = 0 \%$) überrollt wurde (*Standardfall*). Sowohl die Darstellung der Schienenoberfläche am Ende der Simulationen (Abbildung 105 und Abbildung 106) als auch die Konturen der Schienenoberfläche zu diesem Zeitpunkt (vgl. Abbildung 107) zeigen, dass mit höher werdendem Anteil der schlupfbehafteten Überfahrten die Maße der bleibenden geometrischen Abweichungen geringer werden.

Abbildung 101 zeigt den Materialabtrag Δz einer Überrollung ohne zusätzlichen Schlupf $c_x = 0 \%$, Abbildung 102 für den Fall einer Überfahrt mit $c_x = -0,1 \%$ und Abbildung 103 eine Überfahrt mit $c_x = +0,1 \%$ der initialen geometrischen Abweichung des *Standardfalls*. Die Verschleißprofile der beiden schlupfbehafteten Überfahrten unterscheiden sich voneinander. Die schlupfbehafteten Überfahrten weisen grundsätzlich auch in den ungestörten Kontaktbereichen einen höheren Materialabtrag Δz als bei einer Überrollung mit $c_x = 0 \%$ auf. Die Schlupfverteilung ist gleichmäßiger. Der grundsätzlich im Vergleich zu den anderen Schienenbereichen erhöhte Materialabtrag im Bereich der geometrischen Abweichung fällt dadurch verhältnismäßig geringer aus. Die durch diese Variationen im Materialabtrag Δz verursachte Ausbreitung der geometrischen Abweichung ist daher mit steigendem Anteil der Überfahrten mit zusätzlichem Schlupf geringer. Die verbleibende geometrische Abweichung der Schienenoberfläche ist kleiner als jene bei Überrollungen mit $c_x = 0 \%$.

Es ist zu erkennen, dass sich bei gleichem Anteil an schlupfbehafteten Überfahrten die Geometrien der verbleibenden Oberflächenabweichungen des angetriebenen ($c_x = -0,1 \%$) und des gebremsten ($c_x = +0,1 \%$) Falls voneinander unterscheiden (vgl. Fall 5 mit Fall 6 sowie Fall 7 mit Fall 8 in Abbildung 107). Rückzuführen ist dieser Effekt auf den unterschiedlichen Einfluss des zusätzlichen positiven und negativen Schlupfes c_x auf die Verschleißprofile. Der Vergleich der Verschleißprofile der beiden Überfahrten mit $c_x = +/- 0,1 \%$ zeigt (vgl. Abbildung 102 mit Abbildung 103), dass die beiden Schlüpfte zu einem lokal unterschiedlich hohen Materialabtrag Δz führen.

Weitere Simulationsergebnisse zeigen, dass initial große geometrische Abweichungen der Schienenoberfläche auch bei vollständigen Überfahrten mit einem Schlupf von $c_x = +/- 0,1 \%$ relativ groß auf der Schienenoberfläche verbleiben (vgl. Abbildung 109 bis Abbildung 111).

7.1.4 Schädigungstechnische Betrachtung geometrischer Abweichungen

In diesem Kapitel wird das Schädigungspotential geometrischer Abweichungen dargestellt. Dazu werden vier initial unterschiedlich große geometrische Abweichungen untersucht, deren Maße in Tabelle 5 zu finden sind.

	Länge in mm	Breite in mm	Tiefe in mm	Mittelpunktkoordinaten x/y in mm
Standardfall	20	20	0,15	10/-12,76
Klein	6	6	0,15	3/-12,76
Groß	40	40	0,15	20/-12,76
Tiefe vermindert	20	20	0,075	10/-12,76

Tabelle 5: Initiale Maße der geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche der auf ihr Schädigungspotential untersuchten Fälle.

Die Simulationsparameter entsprechen jenen des Kapitels 7.1.1. Die geometrischen Abweichungen werden schlupffrei ($c_x = 0\%$) überrollt.

Abbildung 112 bis Abbildung 115 zeigen die Schienenoberflächen mit den vier verschiedenen geometrischen Abweichungen. Zusätzlich ist der Fahrspiegel der ersten Überrollung erkennbar.

Man erkennt in Abbildung 112, dass der Fahrspiegel der kleinen geometrischen Abweichung kaum Variationen aufweist. Bei der geometrischen Abweichung des *Standardfalls* (vgl. Abbildung 113) ist am Fahrspiegel erkennbar, dass das Rad während der ersten Überrollung mit den tiefen Bereichen der geometrischen Abweichung keinen Kontakt hat. Hingegen scheint das Rad die große geometrische Abweichung sowie die geometrische Abweichung des Falls *Tiefe vermindert* komplett zu durchrollen. Auch die tiefen Bereiche dieser beiden Abweichungen haben Kontakt mit dem Rad, erkennbar in den Abbildungen 114 und 115. Anhand des zweigeteilten Fahrspiegels im Bereich der großen geometrischen Abweichung (vgl. Abbildung 114) ist erkennbar, dass ein zweiter Kontaktbereich während der Überrollung entsteht.

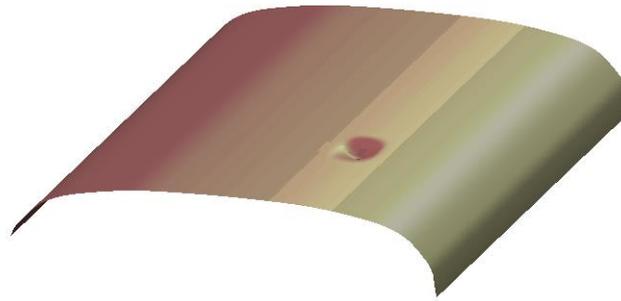


Abbildung 112: Schienenoberfläche mit der geometrischen Abweichung *Klein* sowie dem Fahrspiegel der ersten Überrollung.

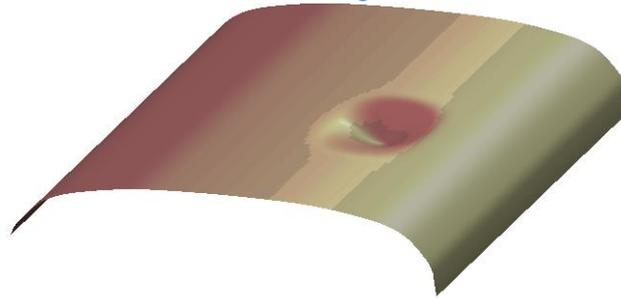


Abbildung 113: Schienenoberfläche mit der geometrischen Abweichung des *Standardfalls* sowie dem Fahrspiegel der ersten Überrollung.

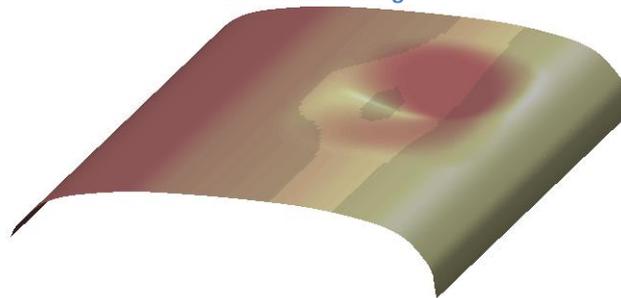


Abbildung 114: Schienenoberfläche mit der geometrischen Abweichung *Groß* sowie dem Fahrspiegel der ersten Überrollung.

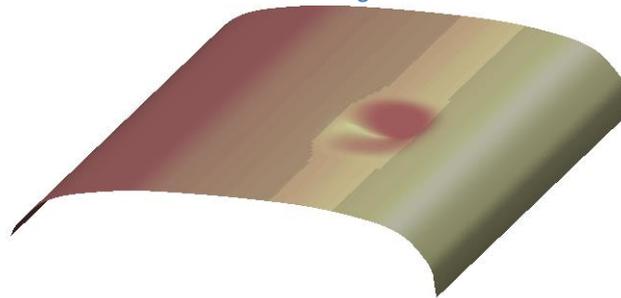


Abbildung 115: Schienenoberfläche mit der geometrischen Abweichung *Tiefe vermindert* sowie dem Fahrspiegel der ersten Überrollung.

Die folgenden Abbildungen 116 bis 119 zeigen die vier verschiedenen geometrischen Abweichungen der Schienenoberflächen nach 300 tausend Überrollungen. Die Grauabstufungen stellen die jeweilige Abweichung der Schienenoberfläche dar. Die Skala der Längskoordinate x wurde der jeweiligen Größe der geometrischen Abweichung angepasst.

Die Farben der Punkte geben Auskunft über das lokale Schädigungspotential, welches sich aus dem Verhältnis der lokalen Schädigung D_A und der maximalen Schädigung D_{A-Ver} eines ungestörten Schienenquerschnittes ergibt (vgl. Kapitel 5.6). Gelb bedeutet ein geringes, Grün ein leicht erhöhtes, Schwarz ein mittleres und Rot ein hohes Schädigungspotential. Der ungestörte Schienenquerschnitt

befindet sich bei jeder Simulation an der Längskoordinate $x = -100$ mm. Da dieser Querschnitt bei den drei Simulationen dieselben Belastungen erfährt, sind die Schädigungspotential-Farbangaben untereinander vergleichbar.

Die kleinste geometrische Abweichung (vgl. Abbildung 116) weist leicht erhöhte Schädigungspotentiale (grüne Punkte) auf.

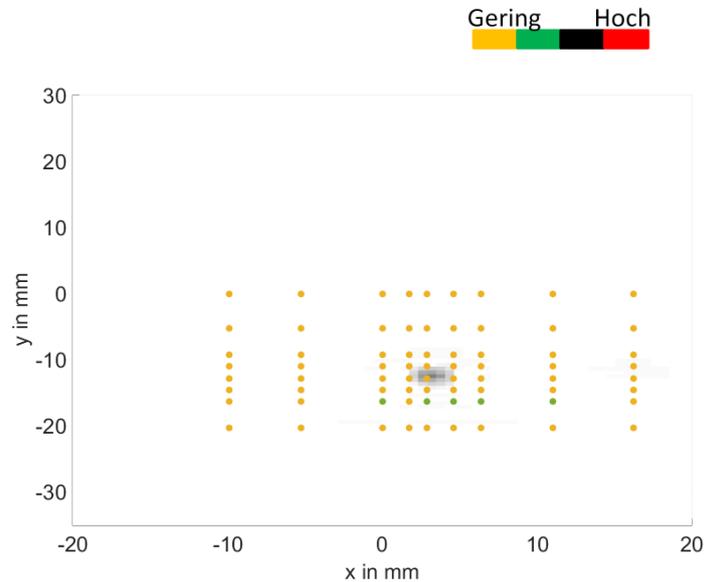


Abbildung 116: Schädigungspotential des Falls *Klein* nach 300 tausend Überrollungen.

Das Schädigungspotential der mittelgroßen geometrischen Abweichung des *Standardfalls* (vgl. Abbildung 117) ist über einen großen Bereich hoch (rote Punkte). Hingegen ist das Schädigungspotential der großen geometrischen Abweichung (vgl. Abbildung 118) nicht im selben Ausmaß erhöht.

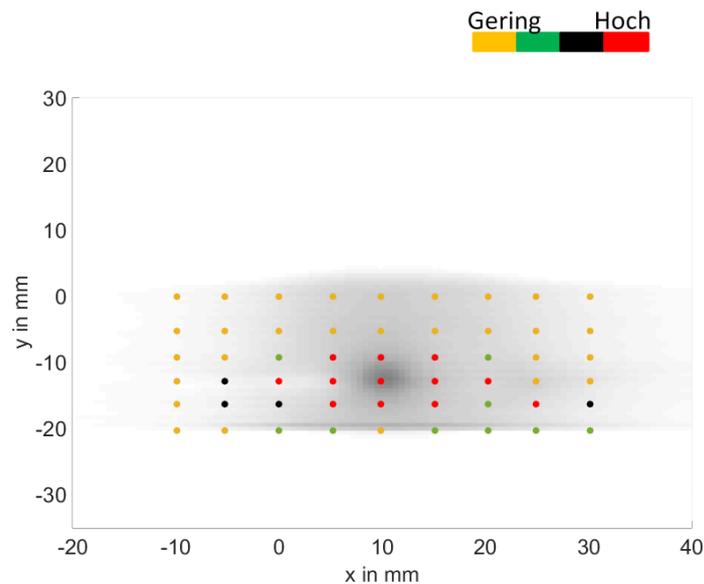


Abbildung 117: Schädigungspotential des *Standardfalls* nach 300 tausend Überrollungen.

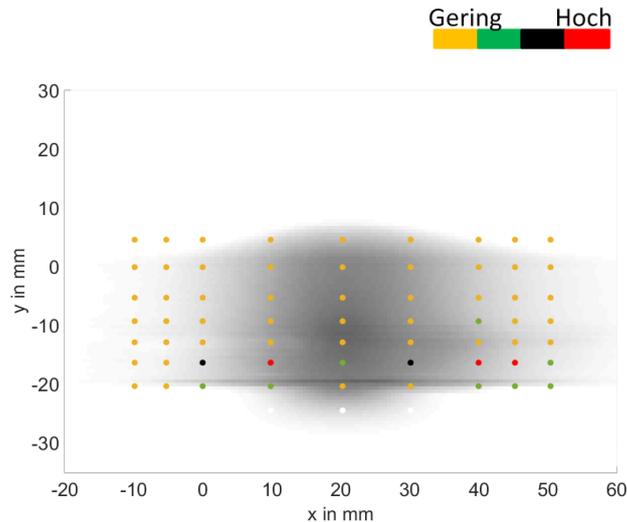


Abbildung 118: Schädigungspotential des Falls *Groß* nach 300 tausend Überrollungen.

Auch die geometrische Abweichung mit der verminderten Tiefe weist nach 300 tausend Überrollungen ein geringeres Schädigungspotential als der *Standardfall* auf (vgl. Abbildung 117 und Abbildung 119).

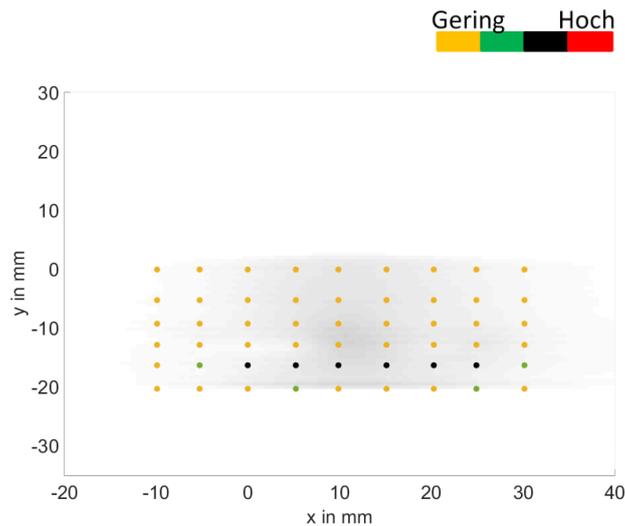


Abbildung 119: Schädigungspotential des Falls *Tiefe vermindert* nach 300 tausend Überrollungen.

Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils die wirkenden Hauptnormalspannungen σ^* sowie den Vergleich des Scherwinkels α mit dem Referenzwinkel α_R nach 300 tausend Überrollungen an verschiedenen Schienenorten. Die betrachteten Schienenorte weisen das für den jeweiligen Fall höchste Schädigungspotential auf. Abbildung 120 zeigt diese Darstellungen für den Ort mit der maximalen Schädigung des gewählten Referenzquerschnittes an der Schienenkoordinate $x = -100$ mm (Vergleichsort am Referenzquerschnitt). In Abbildung 121 bis Abbildung 124 sind Orte der Schiene mit dem jeweils höchsten Schädigungspotential der vier untersuchten Fälle dargestellt.

Es wird darauf hingewiesen, dass sich die Skalierung der Ordinatenachse der Abbildung 122 aufgrund der dort deutlich erhöhten maximalen Hauptnormalspannung σ_{max}^* von allen anderen Fällen unterscheidet.

Die maximale Hauptnormalspannung σ_{max}^* des dargestellten Ortes der Schiene des *Standardfalls* übertrifft mit $\sim 1440 \text{ N/mm}^2$ deutlich jene aller anderen Fällen. Beim Vergleichsort am Referenzquerschnitt entspricht die maximale Hauptnormalspannung $\sigma_{max}^* \sim 90 \text{ N/mm}^2$. Bei der kleinen geometrischen Abweichung ist σ_{max}^* mit rund 125 N/mm^2 nur um zirka ein Drittel höher als beim Vergleichsort. Die große geometrische Abweichung sowie die geometrische Abweichung mit der verminderten Tiefe haben maximale Hauptnormalspannungen, die mit rund 185 N/mm^2 bzw. 195 N/mm^2 ungefähr doppelt so hoch sind wie jene des Vergleichsortes ($\sigma_{max}^* \sim 90 \text{ N/mm}^2$).

Die Scherverformungen α weichen in allen vier Fällen von der Referenzverformung α_R ab. Im Gegensatz zur kleinen geometrischen Abweichung scheint die Oberfläche am dargestellten Ort der Schiene des *Standardfalls* sowie der großen geometrischen Abweichung eine relativ dicke oberflächennahe scherverformte Schicht aufzuweisen.

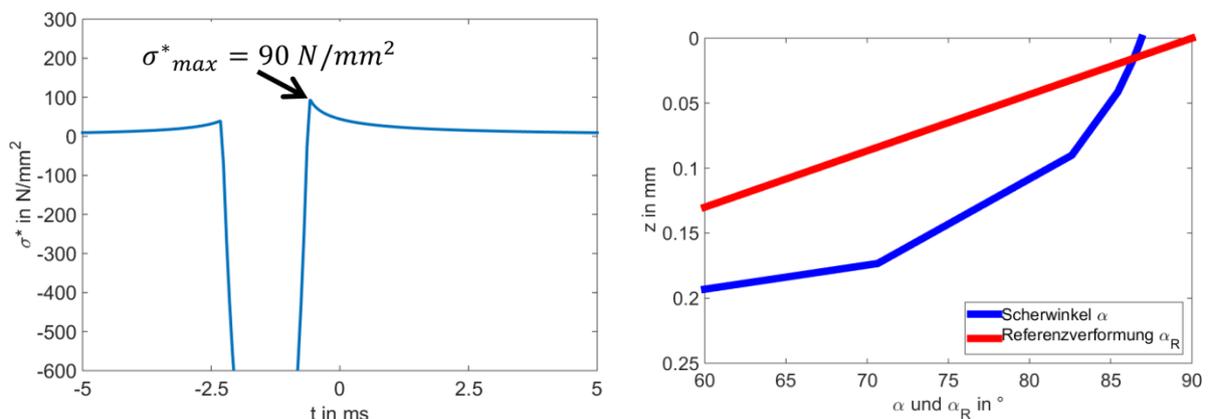


Abbildung 120: Darstellung der Hauptnormalspannungen (linkes Bild) mit einem Maximum von ungefähr 90 N/mm^2 und des Scherwinkels (rechtes Bild) nach 300 tausend Überrollungen des Referenzquerschnittes.

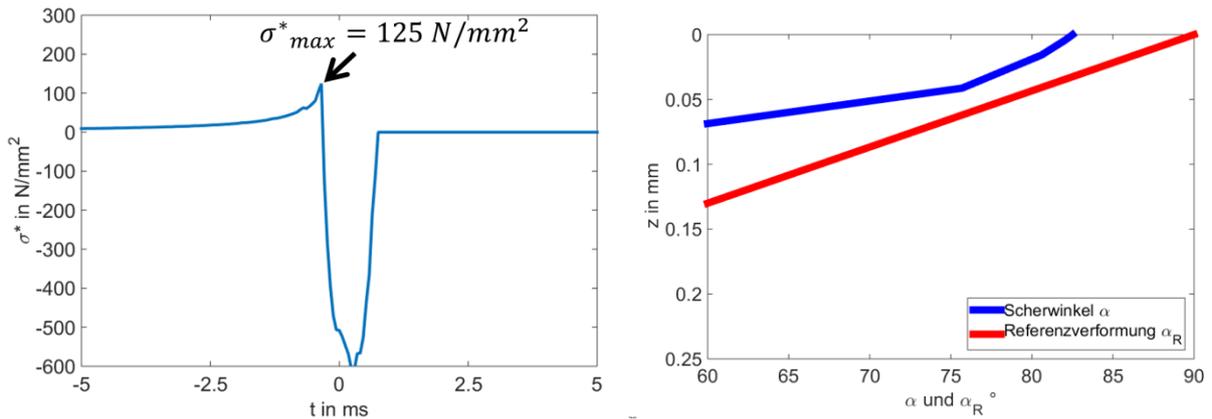


Abbildung 121: Darstellung der Hauptnormalspannungen (linkes Bild) mit einem Maximum von ungefähr $125 N/mm^2$ und des Scherwinkels nach 300 tausend Überrollungen (rechtes Bild) für den Ort der Schiene mit den Koordinaten $x = 1,74$ mm und $y = -16,24$ mm. (Fall: Kleine geometrische Abweichung)

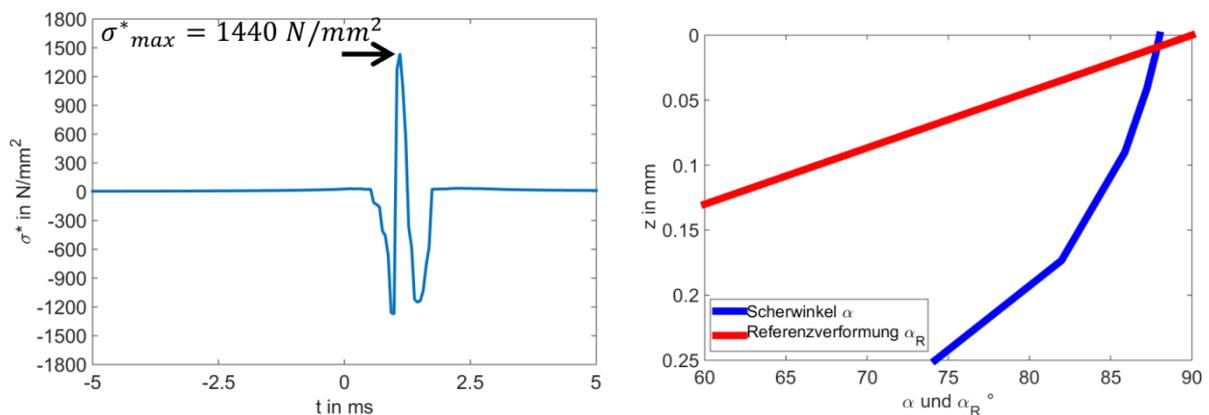


Abbildung 122: Darstellung der Hauptnormalspannungen (linkes Bild) mit einem Maximum von ungefähr $1450 N/mm^2$ und des Scherwinkels nach 300 tausend Überrollungen (rechtes Bild) für den Ort der Schiene mit den Koordinaten $x = 5,22$ mm und $y = -12,76$ mm. (Standardfall)

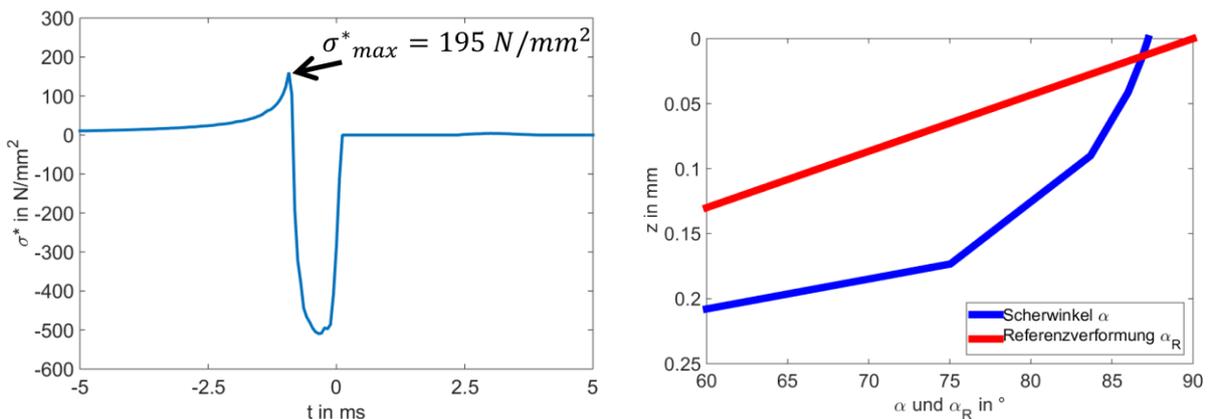


Abbildung 123: Darstellung der Hauptnormalspannungen (linkes Bild) mit einem Maximum von ungefähr $195 N/mm^2$ und des Scherwinkels nach 300 tausend Überrollungen (rechtes Bild) für den Ort der Schiene mit den Koordinaten $x = 9,86$ mm und $y = -16,24$ mm. (Fall: Große geometrische Abweichung)

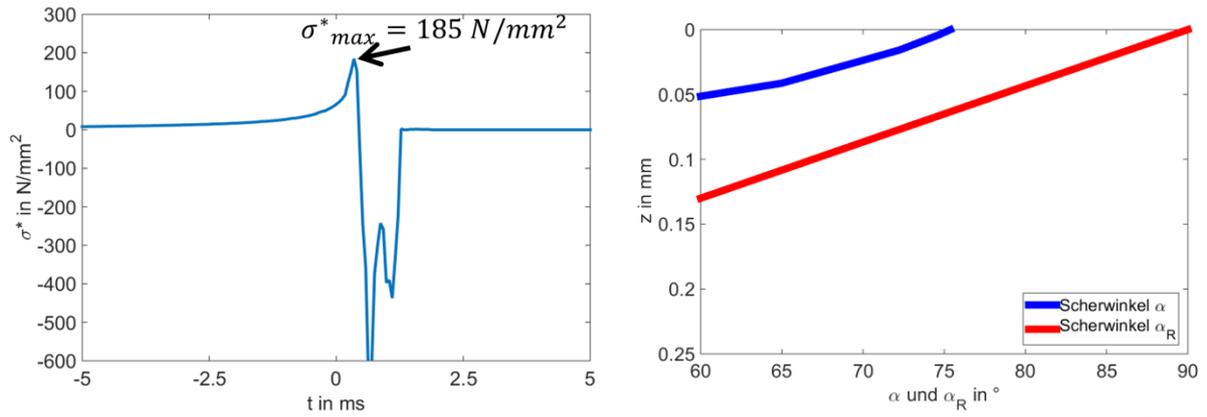


Abbildung 124: Darstellung der Hauptnormalspannungen (linkes Bild) mit einem Maximum von ungefähr $185 N/mm^2$ und des Scherwinkels nach 300 tausend Überrollungen (rechtes Bild) für den Ort der Schiene mit den Koordinaten $x = 5,22$ mm und $y = -16,24$ mm. (Fall: Geometrische Abweichung Tiefe vermindert)

Diskussion der Ergebnisse

Anhand von vier Simulationen soll das schädigungstechnische Verhalten von vier verschiedenen großen geometrischen Abweichungen (vgl. Tabelle 5) untersucht werden. Die Bewertung erfolgt durch die Angabe eines lokalen Schädigungspotentials, welches das Verhältnis zwischen der örtlichen Schädigung D_A mit der maximalen Schädigung D_{A-max} eines Vergleichsortes darstellt. Als Vergleichsort dient der Ort mit der höchsten Schädigung des Referenzquerschnittes der Schiene an der Koordinate $x = -100$ mm. Dieser Ort erfährt in allen vier Fällen dieselben Belastungen, die von den geometrischen Abweichungen unbeeinflusst bleiben. Alle vier Simulationen unterscheiden sich nur in der Größe der jeweiligen geometrischen Abweichung. Das Schädigungspotential der unterschiedlichen Fälle ist damit untereinander vergleichbar.

Die Abbildungen 112 bis 115 zeigen den Fahrspiegel der jeweils ersten Überrollung der vier geometrischen Abweichungen. Anhand des Fahrspiegelverlaufs ist erkennbar, ob die geometrischen Abweichungen während der Überrollung Variationen des Rad-Schiene-Kontaktes verursachen. Im Fall der kleinen geometrischen Abweichung weist der Fahrspiegel im Bereich der Abweichung keine erkennbaren Variationen auf. Auch das lokale Schädigungspotential dieser geometrischen Abweichung ist sehr gering (vgl. Abbildung 116).

Beim *Standardfall* sind deutliche Variationen des Fahrspiegels erkennbar (vgl. Abbildung 113). Der Rad-Schiene-Kontakt scheint der geometrischen Abweichung komplett auszuweichen. Es bildet sich ein Fahrspiegel, der die geometrische Abweichung scheinbar umschließt.

Im Fall der großen geometrischen Abweichung (vgl. Abbildung 114) fallen die Fahrspiegelvariationen geringer aus. Der Fahrspiegel teilt sich im Bereich der geometrischen Abweichung auf, wobei eine Hälfte des Fahrspiegels mittig durch die geometrische Abweichung führt. Das Rad scheint die geometrische Abweichung zu durchrollen. Dasselbe gilt auch für den Fall mit der im Vergleich zum *Standardfall* verminderten Tiefe der geometrischen Abweichung (vgl. Abbildung 115). Das Rad durchrollt die geometrische Abweichung vollständig. Es kommt zu keiner Aufteilung, sondern zu einer Verbreiterung des Fahrspiegels im Bereich der Abweichung.

Insgesamt weist der *Standardfall* das höchste Schädigungspotential aller vier Fälle auf. Im Fall der großen geometrischen Abweichung und jenem mit der verminderten Tiefe ist das Schädigungspotential teilweise erhöht (vgl. Abbildung 116 bis Abbildung 119), erreicht die Höhe des *Standardfalls* jedoch nicht.

Grundsätzlich sind die Ergebnisse der schädigungstechnischen Untersuchung nur qualitativ zu sehen. Das *Schädigungsmodell nach Trummer* [32] wurde für Rollkontakt-Ermüdungsriss an Fahrkanten entwickelt und für diesen Zweck mit verschiedenen Versuchen parametrisiert. Eine quantitative Allgemeingültigkeit kann daraus ohne entsprechende Versuche nicht abgeleitet werden.

Im *Modell nach Trummer* [32] hängt die Schädigung D_A von der effektiven Spannung σ_α ab (vgl. Gleichungen (19) bis (21)). Die Spannung σ_α ergibt sich nach Gleichung (19) $\sigma_\alpha = \sigma^* \cdot f_A \cdot f_t$ aus der maximalen Hauptnormalspannung σ^* , dem vom Ähnlichkeitsparameter A_α linear abhängigen Faktor f_A und einem von der Richtung der Tangentialspannungen abhängigen Faktor f_t . Ein für die Rissinitiierung vorteilhafter Ähnlichkeitsparameter A_α und damit Faktor f_A ergibt sich bei einer

Scherverformung der Oberfläche, die möglichst einer bei Prüfstandsversuchen ermittelten rissinitiierungsbegünstigten Scherverformung entspricht¹⁸.

Im *Modell nach Trummer* [32] finden Verformungen statt, wenn eine Spannung σ_p die lokale Streckgrenze σ_y übersteigt. Die Spannung σ_p hängt unter anderem von den wirkenden *Von Mises*-Spannungen σ_m ab¹⁹, wobei sich die Scherverformung aus dem Starrkörperschlupf s ergibt²⁰.

Die Ermittlung der an einem Ort wirkenden maximalen Hauptnormalspannung σ_{max}^* ergibt sich aus den unterschiedlichsten Kombinationen der Normal- p_n und Tangentialspannungen τ_x und τ_y des Rad-Schiene-Kontaktes und dem Abstand zwischen dem Ort, wo diese Spannungen wirken und dem betrachteten Ort auf der Schienenoberfläche (vgl. [32]). Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass insgesamt geringere Kontaktspannungen auch ein Anzeichen für eine geringere maximale Hauptnormalspannung σ_{max}^* während der Überrollung sind. Der Einfluss von geometrischen Abweichungen auf den Rad-Schiene-Kontakt und auf die im Kontakt wirkenden Spannungen wurde in den vorangegangenen Kapiteln 7.1.1 und 7.1.2 untersucht.

Abbildung 120 zeigt für den Vergleichsort des Referenzquerschnittes die Hauptnormalspannungen σ^* der ersten Überrollung und den Scherwinkel der Oberfläche nach 300 tausend Überrollungen. Die Oberflächenschерung weicht deutlich von der idealen Verformung der Oberfläche ab. Insgesamt zeigen die hohen Scherwinkelwerte, dass ein relativ dicker oberflächennaher Bereich nahezu parallel zur Oberfläche ausgerichtet ist²¹. Die maximalen Hauptnormalspannungen dieses Referenzortes liegen bei $\sigma^* \sim 90 \text{ N/mm}^2$.

Abbildung 121 bis Abbildung 124 zeigen die während der ersten Überrollung wirkenden Hauptnormalspannungen σ^* und die Scherverformung der Oberfläche α nach 300 tausend Überrollungen für die Orte mit dem höchsten Schädigungspotential stellvertretend für alle Auswertungsorte der jeweiligen Schienenoberfläche.

Im Falle der kleinsten geometrischen Abweichung (vgl. Abbildung 121) ist die Abweichung zwischen der Scherverformung α und der Referenzverformung α_R am geringsten. Die maximale Hauptnormalspannung σ_{max}^* von ungefähr 125 N/mm^2 übersteigt dabei, verglichen mit den anderen drei dargestellten Fällen, jene des Vergleichsortes nur gering.

Abbildung 122 zeigt die Ergebnisse für den *Standardfall*. Die Scherverformung weicht deutlich von der Referenzverformung ab. Die Materialstruktur ist, verglichen mit der Referenzverformung, bis in eine relativ große Tiefe mit einem flachen Winkel zur Oberfläche ausgerichtet. Entstehende Risse, die bei ihrem Wachstum der Richtung der Materialstruktur folgen, bleiben daher über einen längeren Zeitraum an der Oberfläche. Die dadurch begünstigten Delaminationsprozesse können infolgedessen auch das weitere Wachstum der Risse in die Tiefe verhindern (vgl. Kapitel 5.2.9). Das hohe Schädigungspotential des *Standardfalls* ergibt sich aus den deutlich höheren Wert der maximalen Hauptnormalspannung $\sigma_{max}^* \sim 1440 \text{ N/mm}^2$ des betrachteten Ortes der Schienenoberfläche. Diese hohe Hauptnormalspannung σ_{max}^* scheint durch die Variationen im Rad-Schiene-Kontakt (vgl.

¹⁸ Vgl. Kapitel 5.6 bzw. [32].

¹⁹ Vgl. Kapitel 5.6 Gleichung (23) bzw. [32].

²⁰ Vgl. Kapitel 5.6 Gleichungen (24) und (25) bzw. [32].

²¹ Eine Scherung $\alpha = 90^\circ$ entspricht einer zur Oberfläche parallel ausgerichteten Materialstruktur. Vgl. Kapitel 5.6 bzw. [32].

Abbildung 113) und die damit einhergehenden Spannungsvariationen (vgl. Kapitel 7.1.1 und 7.1.2) verursacht zu werden.

In Abbildung 123 sind die stellvertretenden Ergebnisse für die Schienenoberfläche mit der größten geometrischen Abweichung dargestellt. Die maximale Hauptnormalspannung σ_{max}^* beträgt ungefähr 195 N/mm^2 . Die Scherverformung weicht, verglichen mit jener des *Standardfalls*, etwas geringer von der Referenzverformung ab. Das Rad kann im Gegensatz zum *Standardfall* die Abweichung vollständig durchrollen, der Fahrspiegel teilt sich im Bereich der Abweichung auf. Diese „sanftere“ Geometrie der Schienenoberfläche führt während der Überrollung zu einer geringeren maximalen Hauptnormalspannung σ_{max}^* als im *Standardfall*. Sie ist jedoch noch immer größer als im Fall der kleinen geometrischen Abweichung. Auch die Verformung der oberflächennahen Schicht ist bei der großen geometrischen Abweichung günstiger für eine Rissinitiierung als im *Standardfall*. Die Kombination dieser beiden Faktoren führt zu einem erhöhten Schädigungspotential, das jedoch noch immer über den gesamten Bereich der Schienenoberfläche gesehen geringer ausfällt als jenes des *Standardfalls*.

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei der geometrischen Abweichung mit der verminderten Tiefe. Das Rad kann den gesamten Bereich der geometrischen Abweichung kontaktieren (vgl. Abbildung 115). Dadurch fallen die Variationen im Fahrspiegel geringer aus als im *Standardfall* (vgl. Abbildung 115 mit Abbildung 113) und führen zu einem insgesamt geringeren Schädigungspotential (vgl. Abbildung 119). Die maximale Hauptnormalspannung σ_{max}^* übersteigt mit rund 185 N/mm^2 zwar noch jene des Vergleichsortes am Referenzquerschnitt, fällt jedoch deutlich geringer aus als die maximale Hauptnormalspannung σ_{max}^* am dargestellten Ort des *Standardfalls* (vgl. Abbildung 124 mit Abbildung 122).

Variationen des Rad-Schiene-Kontaktes während der Überrollung einer geometrischen Abweichung und daraus folgende Änderungen der Kontaktspannungen scheinen eine mögliche Voraussetzung für erhöhte Hauptnormalspannungen σ_{max}^* zu sein, die wiederum zu einem erhöhten Schädigungspotential im Bereich einer geometrischen Abweichung, verglichen mit einem ungestörten Schienenquerschnitt, führen können.

Auftretende Variationen des Rad-Schiene-Kontaktes könnten auch zu Veränderungen in den Kontaktspannungen führen, die keine erhöhten Hauptnormalspannungen σ_{max}^* zur Folge haben. Das Schädigungspotential muss daher nicht zwingend im Bereich derartiger Kontaktvariationen erhöht sein.

7.1.5 Einfluss der Vertikaldynamik

Die bisherigen Simulationsergebnisse beruhen auf der Annahme einer konstanten Normalkraft F_N während der Überrollungen der geometrischen Abweichungen. Geometrische Abweichungen des Schienenprofils können zu einer vertikalen Bewegung des Systems Fahrzeug-Fahrweg führen. Die Normalkraft F_N im Rad-Schiene-Kontakt ist in diesem Fall nicht konstant. Der Einfluss einer variierenden Normalkraft F_N auf die geometrische und schädigungstechnische Entwicklung einer Schiene wird in diesem Kapitel anhand der Überrollung einer Schiene mit einer geometrischen Abweichung der Länge und Breite von 20 mm und einer Tiefe von 0,15 mm untersucht. Diese Daten entsprechen der geometrischen Abweichung des *Standardfalls*.

In Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die gewählten Parameter für das *Vertikaldynamikmodell* gelistet. Durch die Masse des Wagenkastens, des Drehgestells sowie des Rades ergibt sich eine statische Normalkraft $F_N = 90,96$ kN im Rad-Schiene-Kontakt. Alle in diesem Kapitel nicht angegebenen Simulationsparameter entsprechen jenen des Kapitels 7.1.1.

	Steifigkeit c in N/m		Dämpfungskonstante d in Ns/m	
Zweite Federstufe	$c_2 =$	$7,35 \cdot 10^5$	$d_2 =$	$1,245/2 \cdot 10^5$
Erste Federstufe	$c_1 =$	$19,2 \cdot 10^5$	$d_1 =$	$5,32 \cdot 10^4$
Steifigkeit Rad-Schiene-Kontakt	$c_{HZ} =$	$5 \cdot 10^8$	$d_{HZ} =$	$1,5 \cdot 10^4$
Steifigkeit des Fahrweges	$c_{OB} =$	$7,5 \cdot 10^7$	$d_{OB} =$	$9,4 \cdot 10^4$

Tabelle 6: Ausgewählte Steifigkeiten und Dämpfungskonstanten für die Untersuchung mit dem Vertikaldynamikmodell.

	Gesamt-Bauteilmasse in kg	Pro Rad wirkende Masse in kg	
Wagenkasten	55500	$m_{WK} =$	6937,5
Drehgestell	4637	$m_{DG} =$	1159,25
Rad	2350	$m_R =$	1175
Äquivalenter Schienenabschnitt	160	$m_S =$	160

Tabelle 7: Für das Vertikaldynamikmodell angenommene Massen der verschiedenen Bauteile.

Abbildung 125 zeigt die Variation der Normalkraft bei der ersten Überrollung der geometrischen Abweichung mit verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten v_{FZ} . Eine Geschwindigkeit von $v_{FZ} = 0,1$ m/s führt zu keiner erkennbaren Variation und ist vergleichbar mit dem Fall einer konstanten Normalkraft F_N während der Überrollung. Alle anderen dargestellten Geschwindigkeiten v_{FZ} führen zu Variationen der Normalkraft F_N .

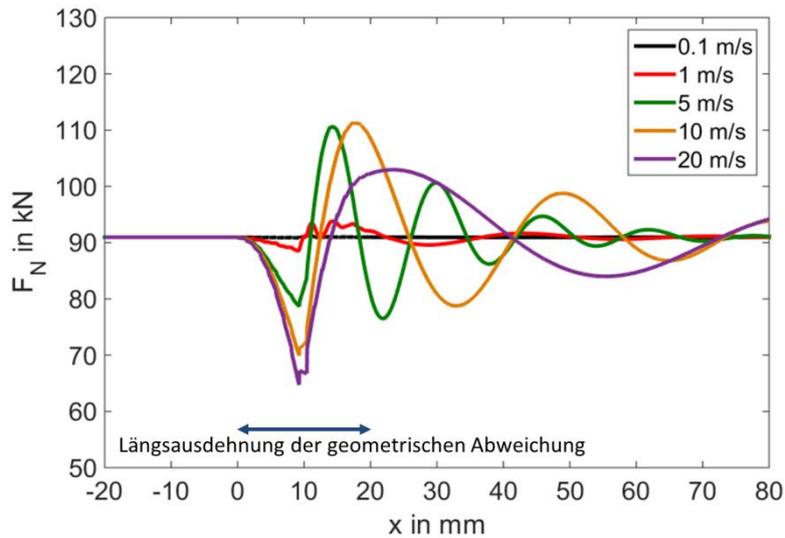
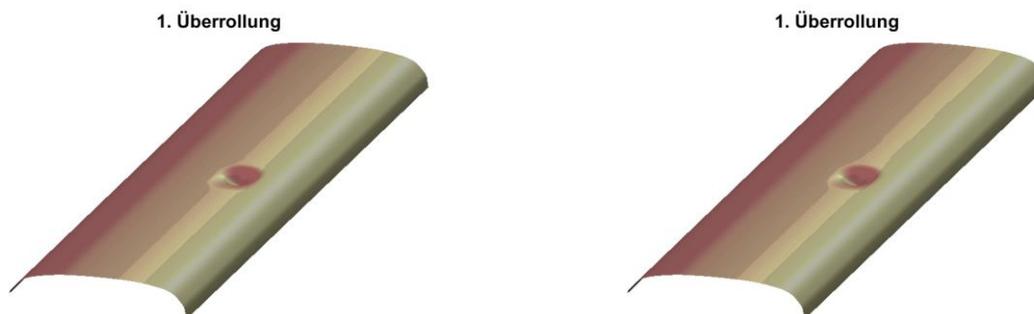


Abbildung 125: Variation der Normalkraft bei der ersten Überrollung der geometrischen Abweichung des Standardfalls mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

Für die weitere Untersuchung werden die Ergebnisse bei konstanter Normalkraft $F_N = 90,96$ kN mit den Ergebnissen der variablen Normalkraft bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{FZ} = 10$ m/s, berechnet mit dem Vertikaldynamikmodell, verglichen.

Abbildung 126 und Abbildung 127 zeigen die Entwicklung der Schienenoberflächen der beiden Fälle. Insbesondere nach 150 tausend bzw. nach 300 tausend Überrollungen kann ein Unterschied in der entwickelten Geometrie der Abweichung erkannt werden. Beide Fälle führen am Ende der Simulation nach rund 900 tausend Überrollungen zu einer dauerhaften geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche. Die Längskontur der Schienenoberfläche an der Stelle $y = -12,76$ mm weist am Ende der Simulation keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Fällen auf (vgl. Abbildung 128).

Für die jeweilige Überrollung zu den unterschiedlichen Zeitpunkten von Abbildung 127 sind in Abbildung 129 die mit dem Vertikaldynamikmodell berechneten Normalkräfte aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Variationen der Normalkraft im Laufe der Simulation abnehmen und am Ende der Simulation (900 tausendste Überrollung) nur mehr gering sind. Bei der Simulation mit der konstanten Normalkraft F_N beträgt diese 90,96 kN.



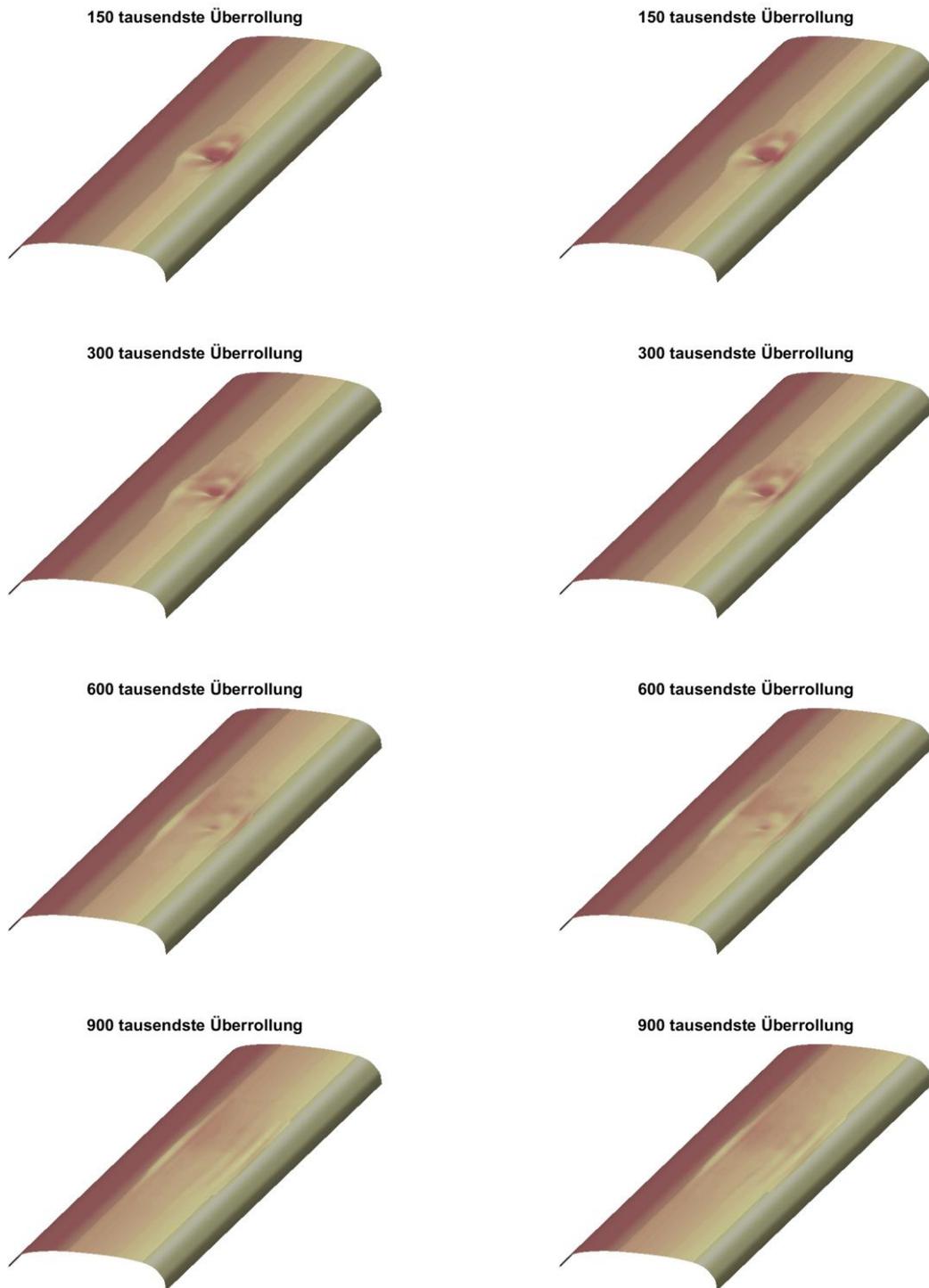


Abbildung 126: Entwicklung der Schienenoberfläche bei einer konstanten Normalkraft $F_N = 90,96$ kN und $v_{FZ} = 10$ m/s.

Abbildung 127: Entwicklung der Schienenoberfläche bei variabler Normalkraft, berechnet mit dem Vertikaldynamikmodell für die Geschwindigkeit $v_{FZ} = 10$ m/s.

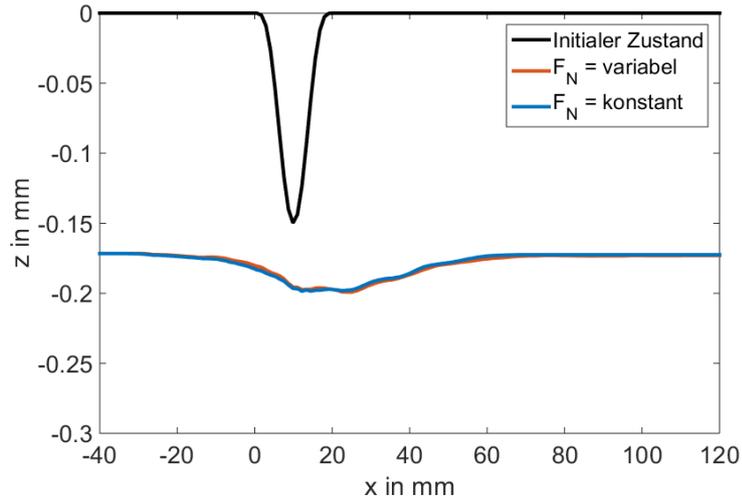


Abbildung 128: Längskonturen an der Stelle $y = -12,76$ mm der Schienenoberflächen.

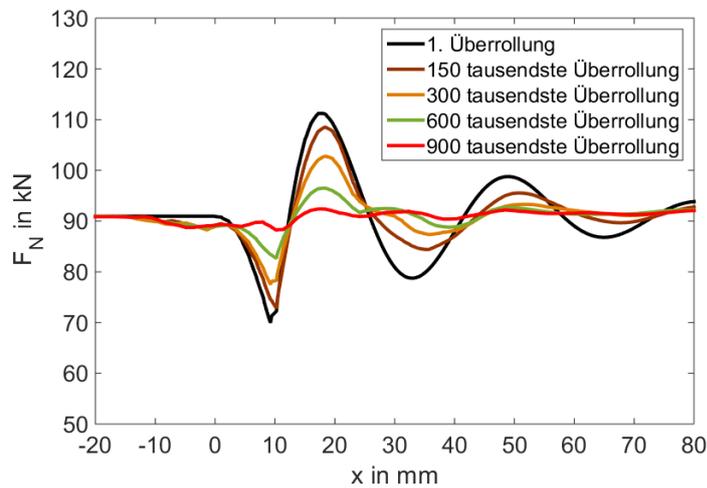


Abbildung 129: Variation der Normalkraft F_N zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Simulation ($v_{FZ} = 10$ m/s).

Abbildung 130 zeigt für die jeweils erste Überrollung die prozentualen Änderungen der maximalen Normalspannungen aufgrund der variablen Normalkraft, bezogen auf das Ergebnis bei einer konstanten Normalkraft ($F_N = 90,96$ kN).

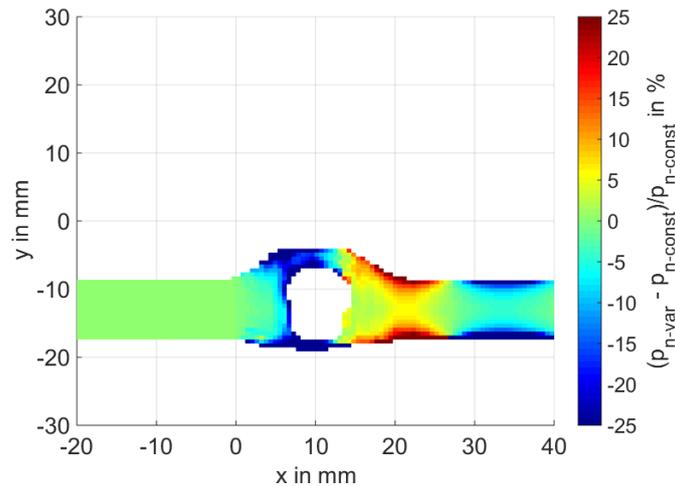


Abbildung 130: Prozentuale Änderungen der Normalspannungen aufgrund der variablen Normalkraft F_N ($v_{FZ} = 10$ m/s), bezogen auf das Ergebnis bei konstanter Normalkraft F_N . In beiden Fällen beträgt die Normalkraft F_N im Ruhezustand 90,96 kN. p_{n-var} sind die maximalen Normalspannungen bei Berücksichtigung der Vertikaldynamik, $p_{n-const}$ sind die maximalen Normalspannungen bei konstanter Normalkraft.

Auch die Verschleißprofile Δz der jeweils ersten Überrollung der beiden untersuchten Fälle, dargestellt in Abbildung 131, unterscheiden sich. Im Falle der variablen Normalkraft F_N tritt in der zweiten Hälfte der geometrischen Abweichung ($x \sim 17$ mm) verstärkter Verschleiß auf.

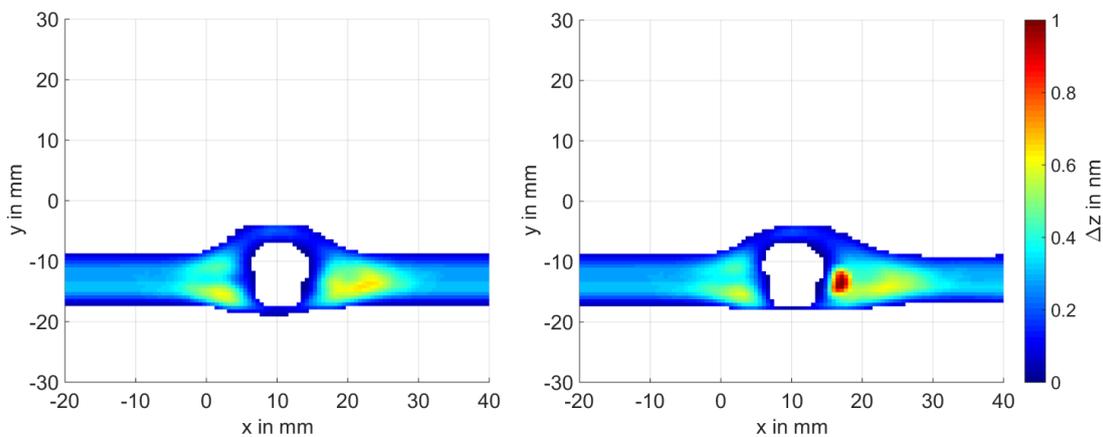


Abbildung 131: Verschleißprofil der jeweils ersten Überrollung bei konstanter Normalkraft (linkes Bild) sowie variabler Normalkraft F_N (rechtes Bild) bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{FZ} = 10$ m/s.

Der Vergleich des Schädigungspotentials bei variabler Normalkraft mit jenem des *Standardfalls* aus Kapitel 7.1.3 zeigt keine großen Unterschiede. Als Vergleichsschienenquerschnitt wurde für die Ermittlung des Schädigungspotentials in beiden Fällen ein Schienenquerschnitt an der Längskoordinate $x = -100$ mm der jeweiligen Simulation herangezogen. Die Maße der initialen geometrischen Abweichungen sind in beiden Fällen äquivalent. In beiden Fällen ergibt die Auswertung über einen großen Bereich ein hohes Schädigungspotential²².

²² Ein gelber Punkt bedeutet ein geringes, ein grüner Punkt ein leicht erhöhtes, ein schwarzer Punkt ein mittleres sowie ein roter Punkt ein hohes Schädigungspotential am angegebenen Ort auf der Schienenoberfläche.

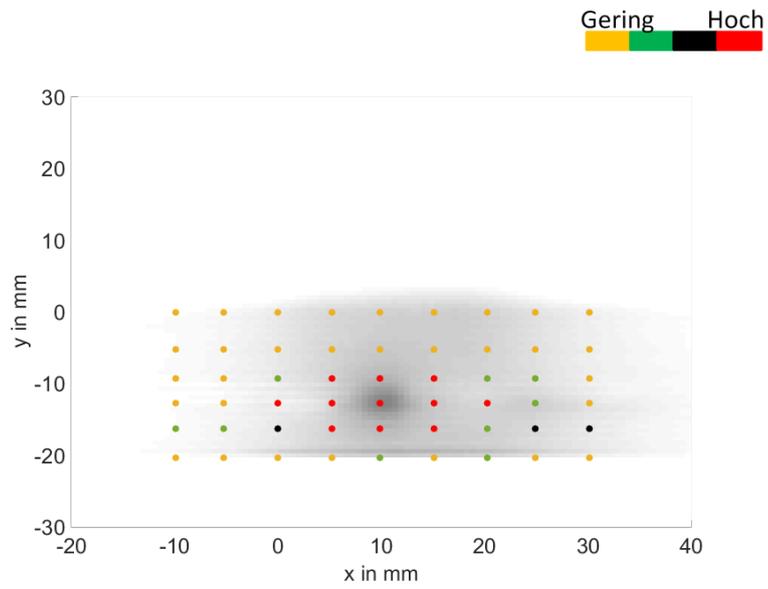


Abbildung 132: Schädigungspotential im Fall der variablen Normalkraft F_N nach 300 tausend Überrollungen.

Diskussion der Ergebnisse

Anhand der Überrollung einer geometrischen Abweichung mit der Länge und Breite von 20 mm sowie der Tiefe von 0,15 mm soll der Einfluss einer variablen Normalkraft, verursacht durch die Vertikaldynamik des Rad-Schiene-Systems, auf die geometrische und schädigungstechnische Entwicklung der Schiene untersucht werden.

Die Ergebnisse einer Parameterstudie, die den Einfluss unterschiedlicher Fahrzeuggeschwindigkeiten v_{FZ} auf die Normalkraft F_N während der Überrollung der geometrischen Abweichung zeigen soll, sind in Abbildung 125 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Geschwindigkeit $v_{FZ} = 0,1$ m/s zu keiner nennenswerten Variation der Normalkraft F_N führt. Bei allen anderen Geschwindigkeiten kommt es während der Überrollung am Beginn der geometrischen Abweichung zu einer Abnahme der Normalkraft F_N . In der zweiten Hälfte der Abweichung nimmt die Normalkraft F_N wieder zu. Das Rad „prallt“ gegen die Oberfläche der Schiene. Weitere Normalkraftschwankungen folgen nach der geometrischen Abweichung.

Für die weiteren Untersuchungen wurde der Fall mit der Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{FZ} = 10$ m/s herangezogen. Bei dieser Fahrzeuggeschwindigkeit wird bei der ersten Überrollung der geometrischen Abweichung eine maximale Normalkraft $F_N \approx 112$ kN erreicht, welche um rund 20 % höher als die Normalkraft $F_N = 90,96$ kN in der Ruhelage des Systems ist. Aufgrund der Normalkraftschwankungen kommt es, verglichen mit der Simulation mit einer konstanten Normalkraft $F_N = 90,96$ kN, zu unterschiedlichen Normalspannungen p_n während der Überrollungen. In den Bereichen der erhöhten bzw. geringeren Normalkräfte F_N ist auch mit erhöhten bzw. geringeren Normalspannungen p_{n-var} zu rechnen. Abbildung 130 zeigt die prozentualen Änderungen der maximalen Normalspannungen aufgrund der variablen Normalkraft F_N , bezogen auf das Ergebnis bei einer konstanten Normalkraft F_N .

Auch das Verschleißprofil Δz dieser beiden Fälle unterscheidet sich (vgl. Abbildung 131). Der Fall der variablen Normalkraft F_N weist insbesondere in der zweiten Hälfte der geometrischen Abweichung einen Bereich mit höherem Verschleiß als bei der Simulation mit der konstanten Normalkraft F_N auf. Im selben Bereich sind auch die Normalspannungen höher als im Fall der konstant gehaltenen Normalkraft F_N (vgl. Abbildung 130 mit Abbildung 131). Dieses unterschiedliche Verschleißprofil führt zu geringen Unterschieden der Schienenoberflächen der beiden Fälle während der geometrischen Entwicklung (vgl. Abbildung 126 und Abbildung 127, Zustand der Schienenoberflächen zum Zeitpunkt der 150 tausendsten bzw. 300 tausendsten Überrollung). Im Laufe der Simulation nehmen die Variationen der Normalkraft F_N durch die Anpassung der Schienen-Oberflächen-Geometrie an die wirkenden Kräfte ab (vgl. Abbildung 129).

Am Ende der Simulation sind die Unterschiede in den Schienen-Oberflächen-Geometrien vernachlässigbar und beide geometrischen Abweichungen weisen eine ungefähr gleiche Tiefe von 0,024 mm auf (vgl. Abbildung 128).

Auch das Schädigungspotential scheint durch die Variation der Normalkraft F_N unbeeinflusst zu sein. Sowohl im Fall der konstanten Normalkraft F_N als auch im Fall der variablen Normalkraft F_N führt die geometrische Abweichung des *Standardfalls* zu einem über einen großen Bereich hohen Schädigungspotential (vgl. Abbildung 132 mit Abbildung 117).

7.1.6 Variationen der Radprofile und der lateralen Radsatzposition

Bei den bisherigen Parameterstudien wurden ein S1002 Radprofil bei gleichbleibender lateraler Radsatzposition relativ zur Schiene angenommen. In diesem Kapitel wird der Einfluss von unterschiedlichen Radprofilen sowie variierenden lateralen Radsatzpositionen auf die geometrische und schädigungstechnische Entwicklung einer initialen geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche untersucht.

Als initiale geometrische Abweichung der Oberfläche wird jene des *Standardfalls* (vgl. Kapitel 7.1.1) herangezogen. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Parameter der in diesem Kapitel durchgeführten Simulationen.

	Länge in mm	Breite in mm	Tiefe in mm	Mittelpunkt koordinaten x/y in mm	Radprofil	Laterale Radsatzposition <i>dwy</i> in mm
Standardfall	20	20	0,15	10/-12,76	S1002	3
Fall 9	20	20	0,15	10/-12,76	Profil 1	3
Fall 10	20	20	0,15	10/-12,76	Profil 2	3
Variation	20	20	0,15	10/-12,76	S1002, Profil 1, Profil 2	2,7 und 3,3

Tabelle 8: Die wichtigsten Parameter der in diesem Kapitel durchgeführten Simulationen sowie des zu Vergleichszwecken herangezogenen *Standardfalls*.

Wiederum entsprechen alle in diesem Kapitel nicht angeführten Simulationsparameter jenen des *Standardfalls* und können in Kapitel 7.1.1 gefunden werden.

Abbildung 133 zeigt die Unterschiede der drei Radprofile *S1002*, *Profil 1* und *Profil 2* global sowie zweimal detailliert. Im Gegensatz zum Radprofil *S1002* (DIN 5573) entsprechen *Profil 1* und *Profil 2* keiner Norm. Profil 1 und Profil 2 sind frei gewählte Radprofile.

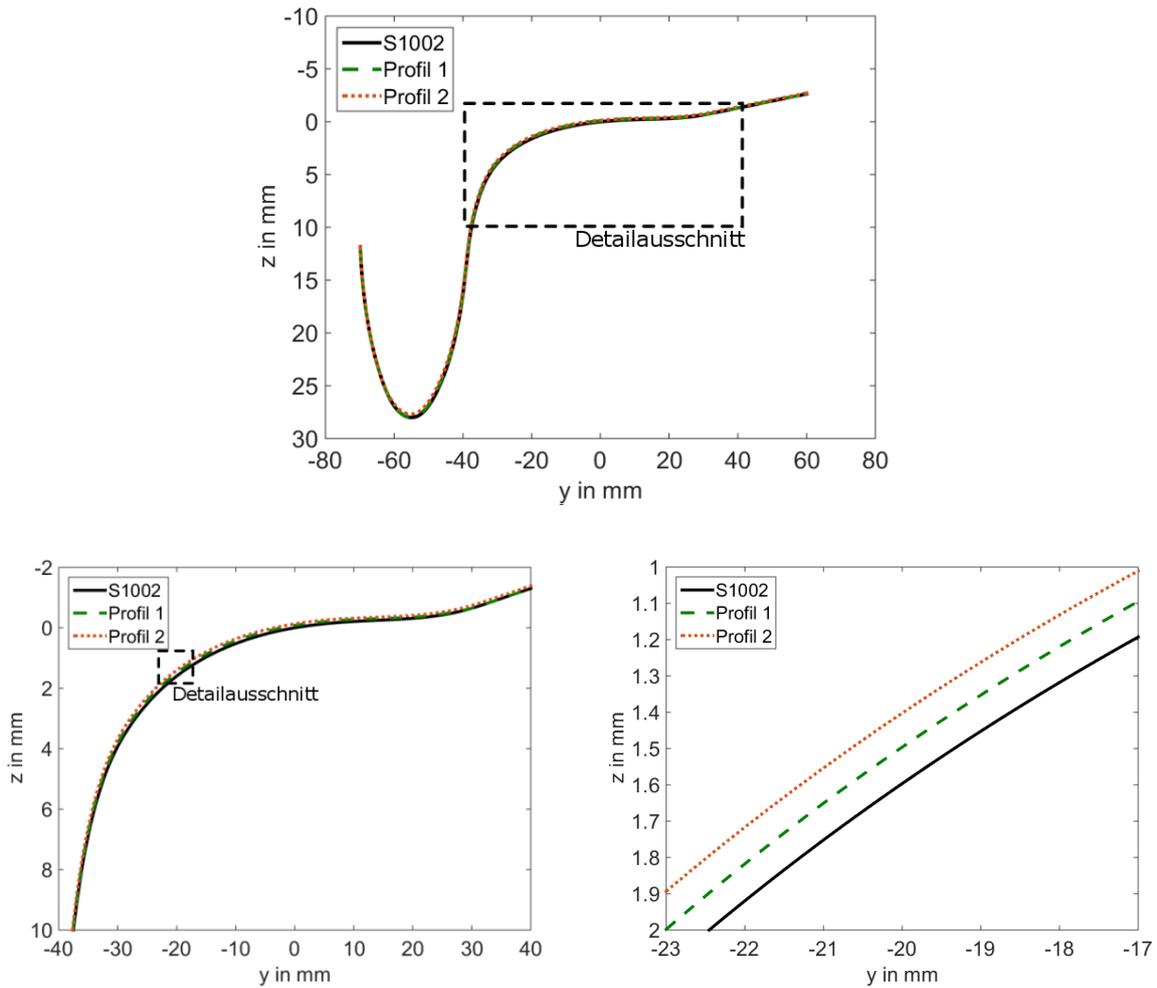
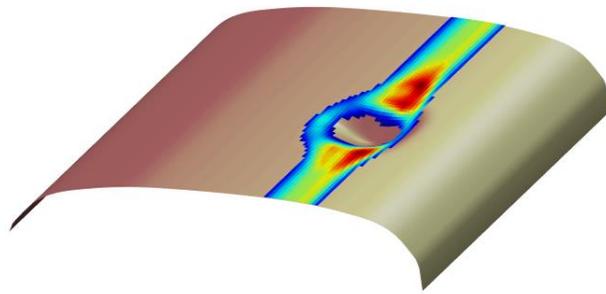
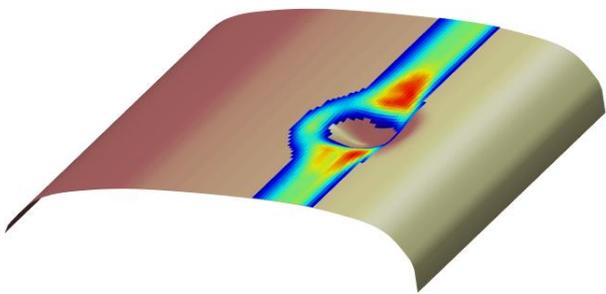
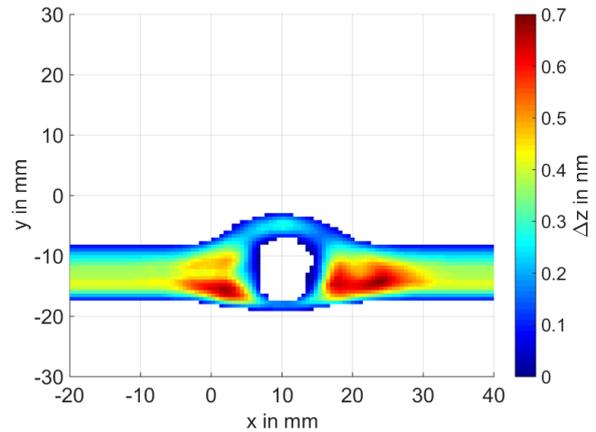


Abbildung 133: S1002 Radprofil sowie zwei weitere Profile im Querschnitt. Der eingezeichnete Detailausschnitt des obersten Bildes ist im linken unteren Bild dargestellt. Der eingezeichnete Detailausschnitt des linken unteren Bildes ist im rechten unteren Bild dargestellt.

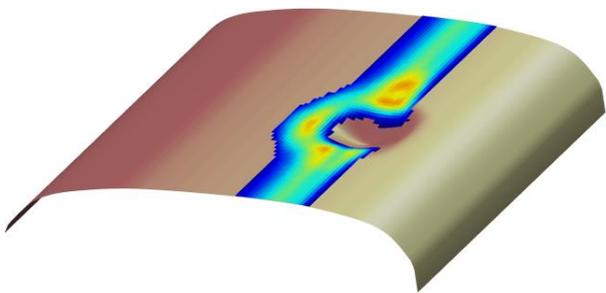
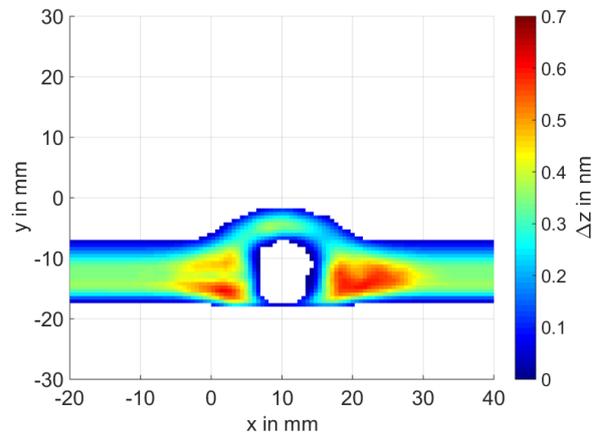
Unterschiedliche Radprofile führen bei gleicher lateraler Radsatzposition und gleichem Schienenprofil zu Unterschieden in den Rad-Schiene-Kontaktformen. Infolgedessen ist auch mit einem unterschiedlichen Materialabtrag Δz während einer Überrollung zu rechnen (vgl. Abbildung 134).



Materialabtrag Δz durch Verschleiß, Radprofil S1002



Materialabtrag Δz durch Verschleiß, Radprofil Profil 1



Materialabtrag Δz durch Verschleiß, Radprofil Profil 2

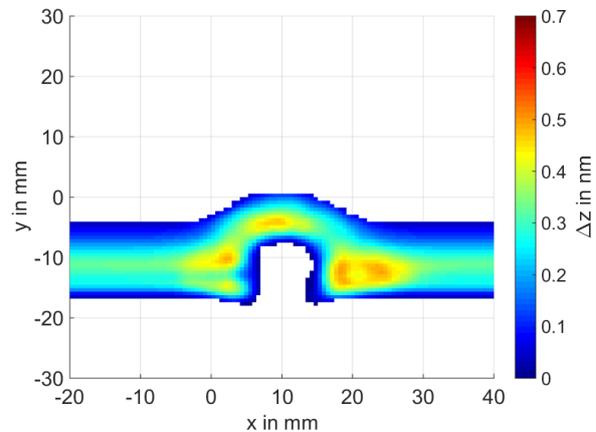


Abbildung 134: Verschleißprofil der jeweils ersten Überrollung der initialen geometrischen Abweichung des *Standardfalls* mit den Radprofilen S1002, Profil 1 und Profil 2. Der Radsatz ist jeweils um $dwy = 3$ mm aus der neutralen Position verschoben.

Abbildung 135 und Abbildung 136 zeigen die geometrische Entwicklung der Schienen-Oberflächenabweichung des *Standardfalls* bei der Überrollung mit den Radprofilen *Profil 1* und *Profil 2* bei einer Querverschiebung der Räder $dwy = 3$ mm. In beiden Fällen bleibt eine geometrische Abweichung des Schienenprofils am Ende der Simulation erhalten. Für das Radprofil S1002 kann die geometrische Entwicklung der Schienenoberfläche für dieselben Simulationseingangsparameter in Kapitel 7.1.1 gefunden werden.

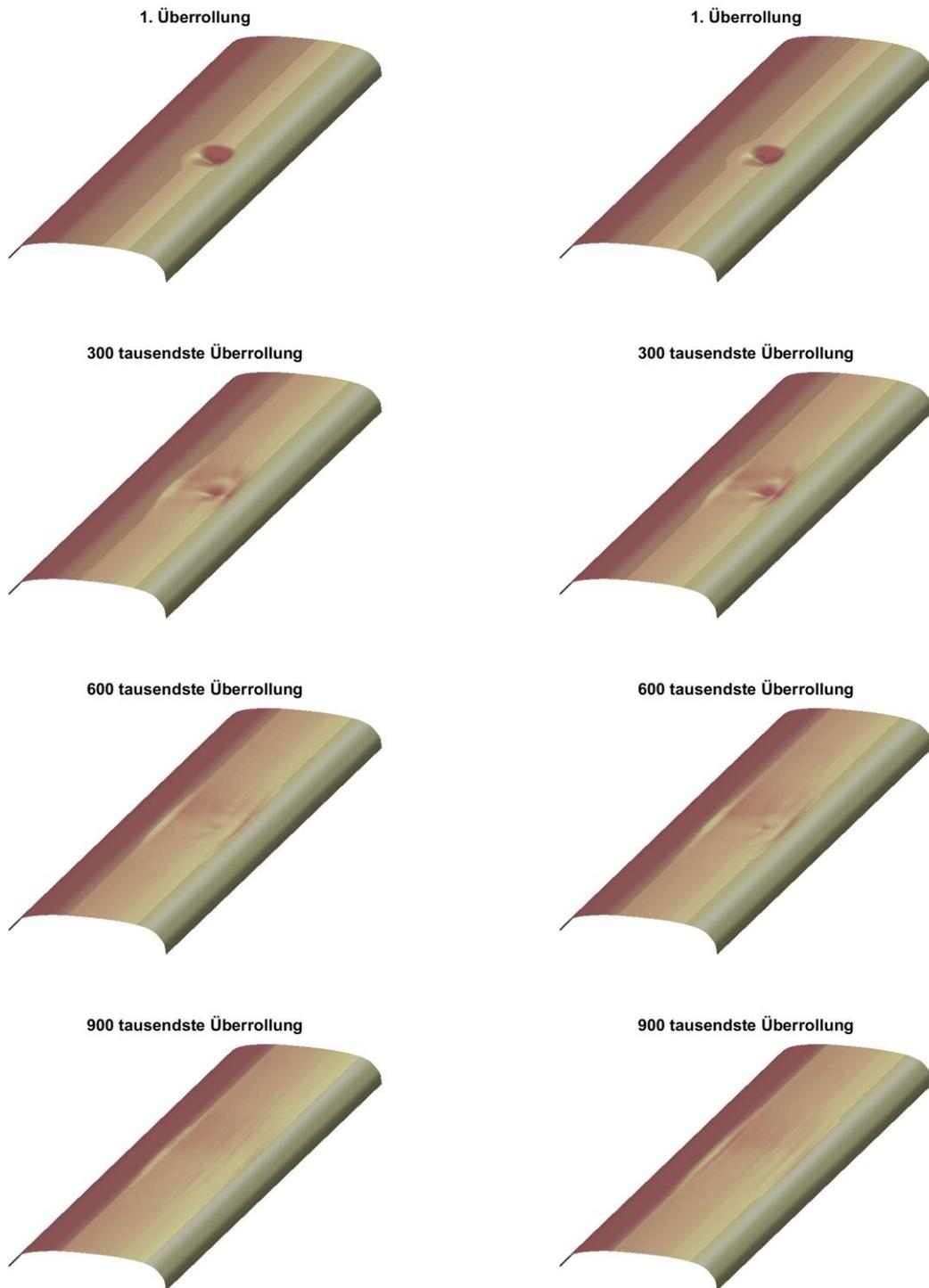


Abbildung 135: Entwicklung der geometrischen Abweichung des *Standardfalls* bei einer Überrollung mit dem Radprofil *Profil 1* bei gleichbleibender lateraler Radsatzposition $dwy = 3$ mm. (Simulation *Fall 9*)

Abbildung 136: Entwicklung der geometrischen Abweichung des *Standardfalls* bei einer Überrollung mit dem Radprofil *Profil 2* bei gleichbleibender lateraler Radsatzposition $dwy = 3$ mm. (Simulation *Fall 10*)

Die Schienenlängskontur am Ende der drei Simulationen mit den unterschiedlichen Radprofilen *S1002* (*Standardfall*), *Profil 1* (Fall 9) und *Profil 2* (Fall 10) zeigt Abbildung 137. Trotz der Ungleichheit in den sich während der jeweils ersten Überrollung einstellenden Verschleißprofilen der drei Radprofile (vgl. Abbildung 134) weisen die Längskonturen nur minimale Unterschiede auf.

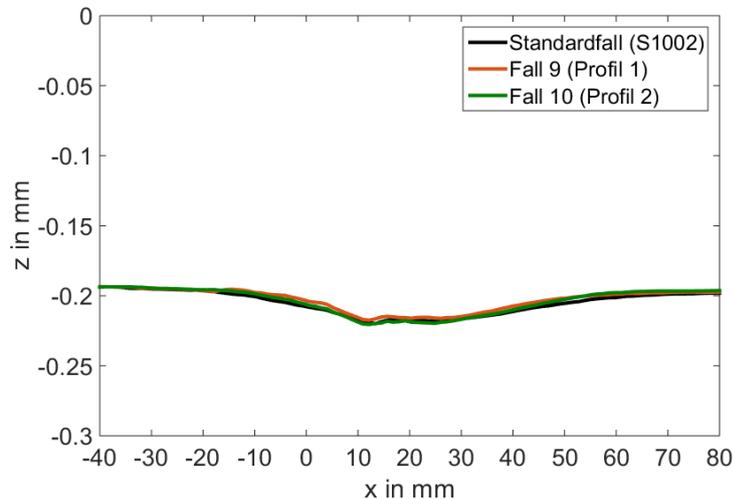


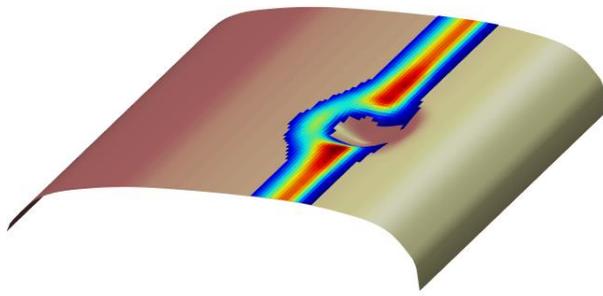
Abbildung 137: Längskonturen der Schienenoberfläche an der Position $y = -12,76$ mm am Ende der Simulationen *Standardfall*, *Fall 9* und *Fall 10*. Die Schiene mit der initialen geometrischen Abweichung des *Standardfalls* wurde je Simulation vollständig mit einem der angegebenen Profile bei einer Radsatzposition $dwy = 3$ mm überrollt.

Mit Hilfe der weiteren Simulation *Variation* sollen das relative Schädigungspotential sowie die geometrische Entwicklung der Schienenoberfläche mit der initialen Abweichung des *Standardfalls* bei variierender lateraler Position der Radachse sowie variierenden Radprofilen untersucht werden. Der Radsatz nahm für die Überrollungen abwechselnd die lateralen Positionen $dwy = 2,7$ mm und $dwy = 3,3$ mm ein. Die Radprofile *S1002*, *Profil 1* und *Profil 2* wurden zufällig, jedoch unter der Bedingung gewählt, dass dasselbe Radprofil nicht zweimal hintereinander verwendet wurde. Insgesamt fanden 36 % der Überrollungen mit dem *Profil 1*, 33 % mit dem *Profil 2* und 31 % mit dem Radprofil *S1002* statt.

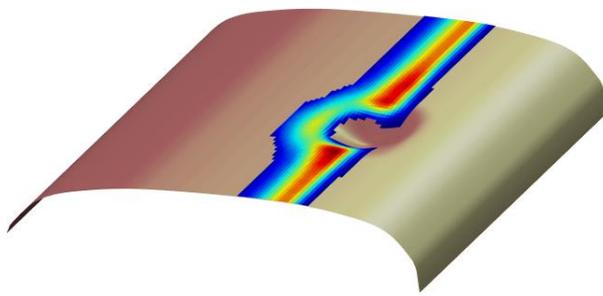
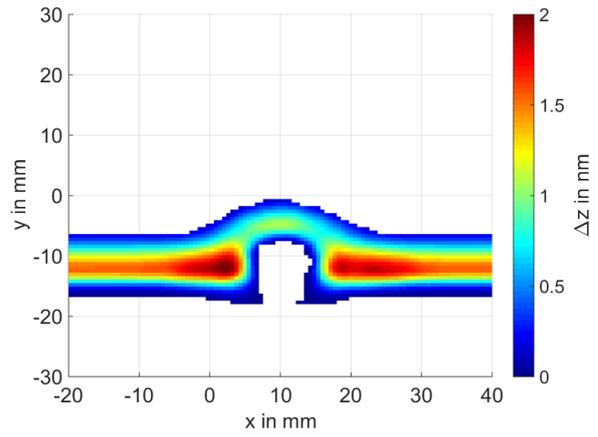
Abbildung 138 und Abbildung 139 zeigen die Verschleißprofile der ersten Überrollung der initialen geometrischen Abweichung des *Standardfalls* für die drei Radprofile *S1002*, *Profil 1* und *Profil 2*. Die Querverschiebung des Radsatzes beträgt $dwy = 2,7$ mm (Abbildung 138) und $dwy = 3,3$ mm (Abbildung 139). Der Materialabtrag Δz unterscheidet sich sowohl zwischen den verschiedenen Radprofilen als auch für jedes Radprofil an den beiden lateralen Radsatzpositionen.

Abbildung 140 zeigt die geometrische Entwicklung der Schienenoberfläche der Simulation *Variation*. Auch am Ende der Simulation erkennt man eine geometrische Abweichung der Schienenoberfläche.

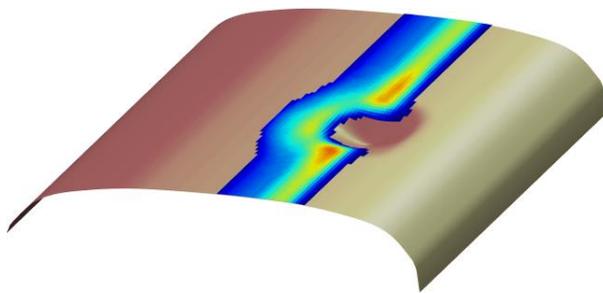
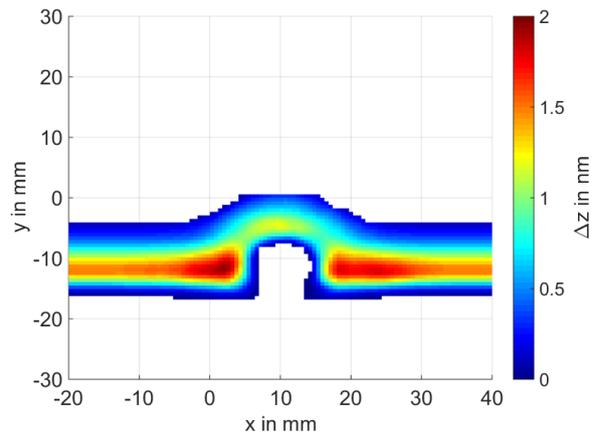
Abbildung 141 vergleicht die Längskonturen der Schienenoberflächen der Simulationen *Standardfall* und *Variation*. Die beiden geometrischen Abweichungen weisen eine ähnliche Tiefe auf, wobei die geometrische Abweichung der Simulation *Variation* in Längsrichtung etwas kürzer ausfällt.



Materialabtrag Δz durch Verschleiß, Radprofil *S1002*



Materialabtrag Δz durch Verschleiß, Radprofil *Profil 1*



Materialabtrag Δz durch Verschleiß, Radprofil *Profil 2*

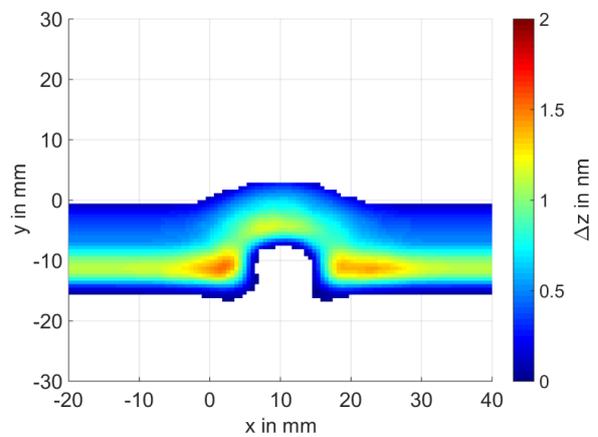
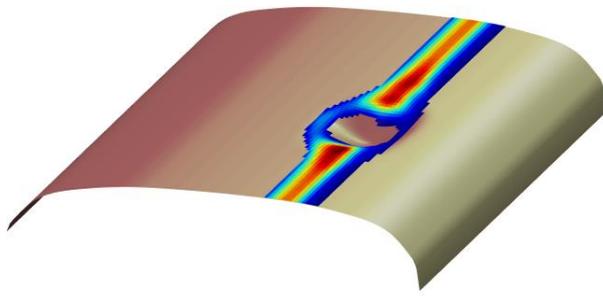
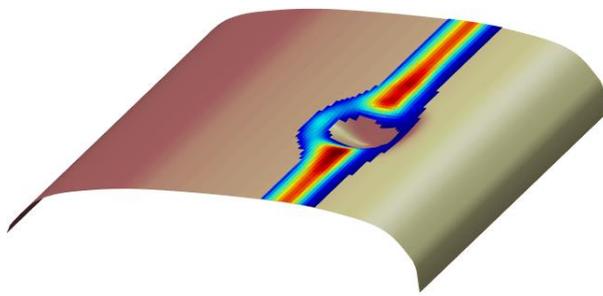
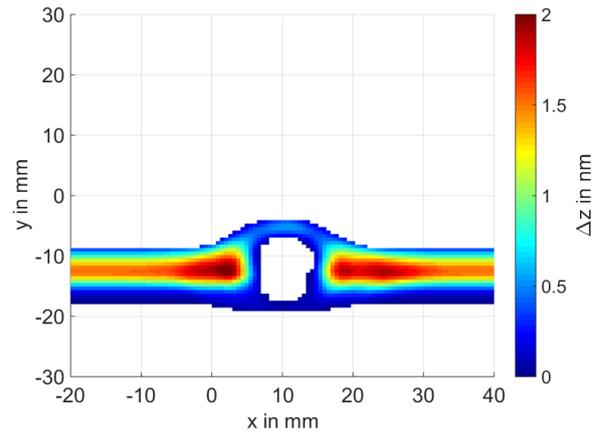


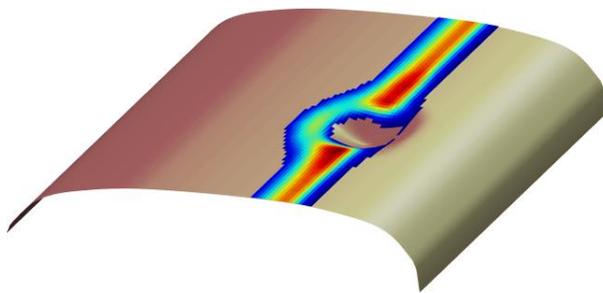
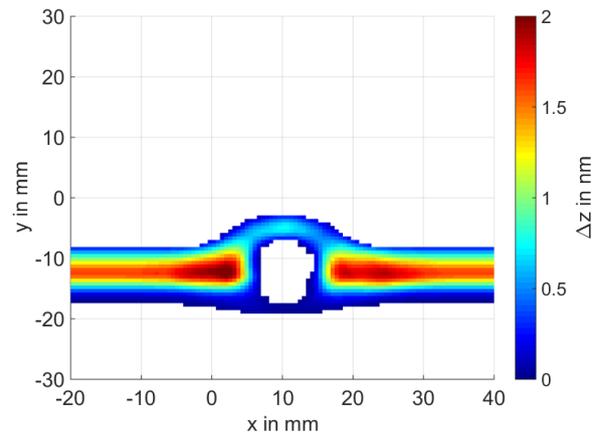
Abbildung 138: Verschleißprofil der jeweils ersten Überrollung der initialen geometrischen Abweichung des *Standardfalls* mit den Radprofilen *S1002*, *Profil 1* und *Profil 2*. Der Radsatz ist jeweils um $dwy = 2.7$ mm aus der neutralen Position verschoben.



Materialabtrag Δz durch Verschleiß, Radprofil S1002



Materialabtrag Δz durch Verschleiß, Radprofil Profil 1



Materialabtrag Δz durch Verschleiß, Radprofil Profil 2

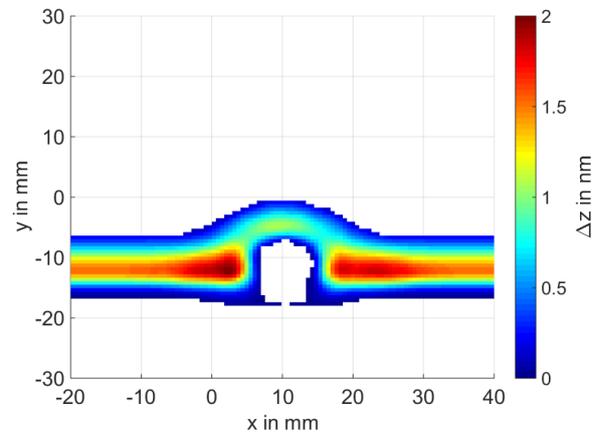


Abbildung 139: Verschleißprofil der jeweils ersten Überrollung der initialen geometrischen Abweichung des *Standardfalls* mit den Radprofilen S1002, Profil 1 und Profil 2. Der Radsatz ist jeweils um $dwy = 3.3$ mm aus der neutralen Position verschoben.

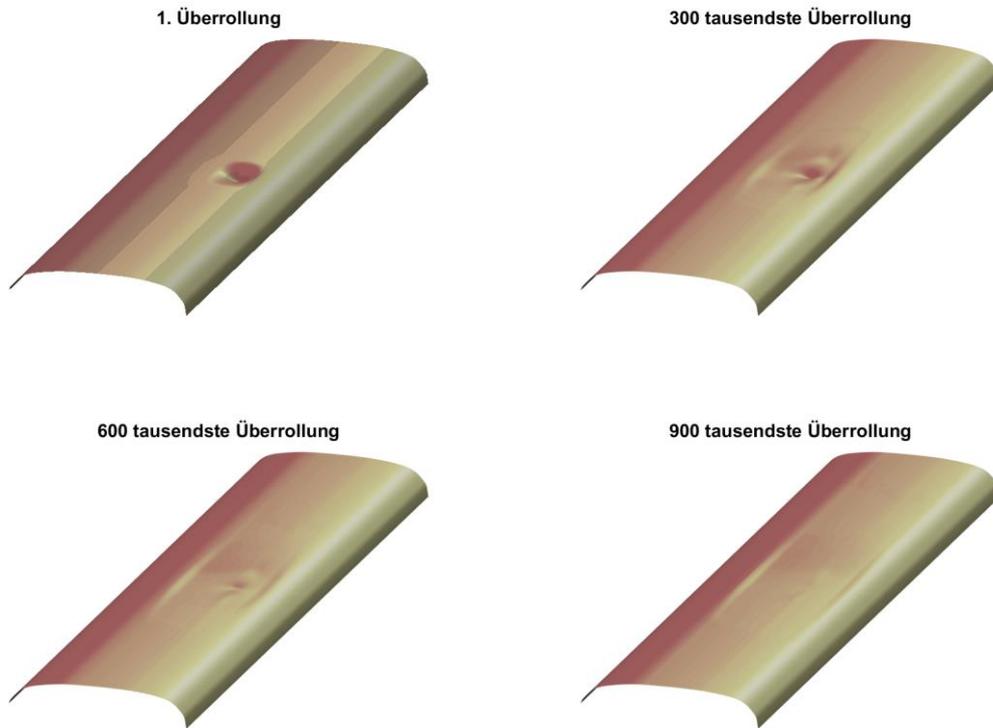


Abbildung 140: Entwicklung der Schienenoberfläche mit der initialen geometrischen Abweichung des *Standardfalls*. Die Schiene wurde abwechselnd an den lateralen Radsatzpositionen $dwy = 2,7$ mm und $dwy = 3,3$ mm überrollt. Für jede Überrollung wurde zufällig aus den Radprofilen *S1002*, *Profil 1* und *Profil 2* gewählt, wobei dasselbe Radprofil nicht zweimal hintereinander verwendet wurde. (Simulation *Variation*)

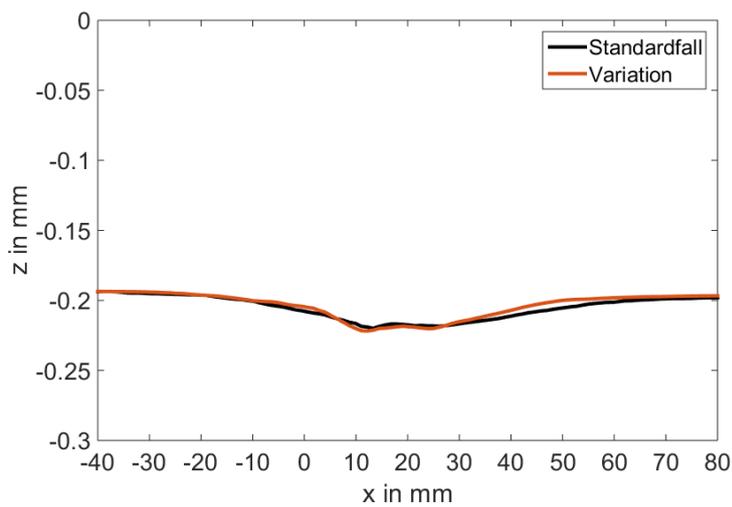


Abbildung 141: Längskonturen der Schienenoberfläche an der Position $y = -12,76$ mm am Ende der Simulationen *Standardfall* sowie *Variation*.

Abbildung 142 zeigt das Schädigungspotential²³ nach 300 tausend Überrollungen für die Simulation *Variation*. Im Bereich der geometrischen Abweichung wird das Schädigungspotential teilweise als hoch eingestuft.

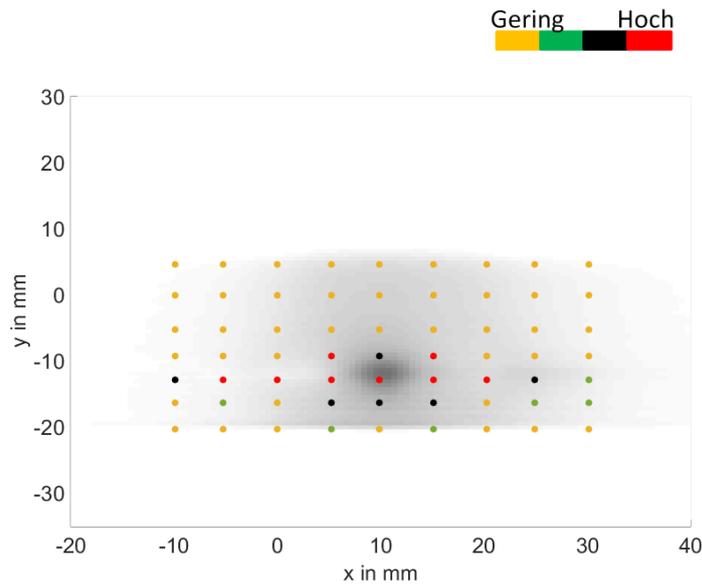


Abbildung 142: Schädigungspotential nach 300 tausend Überrollungen der Simulation *Variation*.

In Tabelle 9 sind die ungefähren Maße der geometrischen Abweichungen am Ende der jeweiligen Simulation gelistet.

	Länge in mm	Breite in mm	Tiefe in mm
Standardfall	≈70	≈40	≈0,025
Fall 9	≈70	≈40	≈0,024
Fall 10	≈70	≈40	≈0,025
Variation	≈60	≈40	≈0,027

Tabelle 9: Maximale Länge, Breite und Tiefe der geometrischen Abweichungen der in diesem Kapitel untersuchten Simulationsfälle sowie des für Vergleichszwecke herangezogenen *Standardfalls*.

²³ Ein gelber Punkt bedeutet ein geringes, ein grüner Punkt ein leicht erhöhtes, ein schwarzer Punkt ein mittleres sowie ein roter Punkt ein hohes Schädigungspotential am angegebenen Ort auf der Schienenoberfläche.

Diskussion der Ergebnisse

Im realen Schienenverkehr sind aufgrund von Abnützungserscheinungen Abweichungen der Radprofile von deren Ursprungsprofil die Regel. Außerdem überrollen/überfahren die Räder die Schienen bei unterschiedlichen lateralen Radsatzpositionen. Sowohl die Radprofile als auch die laterale Radposition auf der Schiene haben großen Einfluss auf den ausgebildeten Rad-Schiene-Kontakt und damit auf den Materialabtrag Δz durch Verschleiß, wiederum sowohl am Rad als auch auf der Schiene.

Der Einfluss variierender Radprofile sowie unterschiedlicher lateraler Auslenkungen des Radsatzes auf die Entwicklung initialer geometrischer Abweichungen von Schienen und auch auf das Schädigungspotential werden in diesem Kapitel anhand einer Schiene mit einer initialen geometrischen Abweichung der Größe des *Standardfalls* untersucht (vgl. Tabelle 8).

Das Radnormprofil *S1002* sowie zwei weitere Radprofile *Profil 1* und *Profil 2* sind in Abbildung 133 dargestellt. *Profil 1* und *Profil 2* sind frei gewählte Radprofile. Die Verschleißprofile der jeweils ersten Überrollung der Schiene mit diesen drei Radprofilen zeigen bei gleicher lateraler Radsatzposition deutliche Unterschiede im Materialabtrag Δz (vgl. Abbildung 134). Insbesondere *Profil 2* weist bei dieser Überrollung geringere Maximalwerte des Materialabtrags Δz im Bereich der geometrischen Abweichung auf. Trotz dieser Unterschiede in den Verschleißprofilen bleibt bei den zwei durchgeführten Simulationen *Fall 9* und *Fall 10* eine dauerhafte geometrische Abweichung auf der Schienenoberfläche. Bei der Simulation *Fall 9* wurde das Radprofil *Profil 1* sowie bei der Simulation *Fall 10* das Radprofil *Profil 2* verwendet. Bis auf das Radprofil entsprachen die Parameter dieser Simulationen jenen des *Standardfalls* (vgl. Tabelle 8 bzw. Kapitel 7.1.1). Bei beiden Simulationen *Fall 9* und *Fall 10* bleibt eine geometrische Abweichung auf der Schienenoberfläche. Die Längskonturen der Schienenoberfläche der drei Simulationen *Standardfall*, *Fall 9* und *Fall 10* zeigen keine prägnanten Unterschiede (vgl. Abbildung 137).

Damit scheinen auch die Variationen im Rad-Schiene-Kontakt während der Überrollung von geometrischen Abweichungen mit Radprofilen, die vom Normprofil *S1002* abweichen, ausreichend für eine initiale geometrische Abweichung auf der Schienenoberfläche zu sein.

Die letzte in diesem Kapitel dargestellte Simulation *Variation* soll dem realen Fall der Überrollung mit variierenden Radprofilen sowie unterschiedlichen lateralen Radsatzpositionen möglichst nahe kommen. Dazu wurde ein Schienenabschnitt mit einer initialen geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche in der Größe des *Standardfalls* angenommen. Dieser Schienenabschnitt wurde abwechselnd mit zwei verschiedenen lateralen Radsatzpositionen überrollt. Die Radprofile *S1002*, *Profil 1* und *Profil 2* wurden für jede Überrollung zufällig gewählt (vgl. Tabelle 8). Insgesamt fanden 36 % der Überrollungen mit dem *Profil 1*, 33 % mit dem *Profil 2* und 31 % mit dem Normprofil *S1002* statt.

Sowohl bei gleichen als auch bei unterschiedlichen lateralen Radsatzpositionen weisen die drei Radprofile untereinander Unterschiede im Materialabtrag Δz durch Verschleiß auf (vgl. Abbildung 138 und Abbildung 139). In allen Fällen führen die Variationen aufgrund der geometrischen Abweichung zu einem teilweise erhöhten Materialabtrag.

Auch bei dieser Simulation blieb eine geometrische Abweichung auf der Schienenoberfläche (vgl. Abbildung 140). Der Vergleich der Oberflächen-Längskonturen am Ende der Simulationen *Variation* mit dem *Standardfall* zeigt zwei ungefähr gleich tiefe geometrische Abweichungen (vgl. Abbildung

141). Im Fall der Simulation *Variation* fällt die Längsausdehnung etwas geringer aus als jene des *Standardfalls*. Auch das Schädigungspotential dieser beiden Simulationsfälle (vgl. Abbildung 142 mit Abbildung 117) scheint nur gering durch die Variationen der Radprofile und der lateralen Radsatzposition beeinflusst zu werden. In beiden Fällen ergibt sich, verglichen mit den Referenzquerschnitten, ein hohes Schädigungspotential.

Von der Norm abweichende Radprofile und variierende laterale Radsatzpositionen, wie sie im realen Schienenverkehr vorkommen, scheinen sowohl auf die geometrische als auch auf die schädigungstechnische Entwicklung von Schienenoberflächen mit initialen Abweichungen nur geringen Einfluss zu haben. Grundvoraussetzung für ein Verbleiben einer geometrischen Abweichung auf der Schienenoberfläche sind Variationen im Rad-Schiene-Kontakt, die zu lokal unterschiedlichen Kontaktspannungen und einem Materialabtrag Δz im Bereich einer solchen Abweichung führen.

Schlusswort zur Parameterstudie aus Kapitel 7.1

In der Literatur wurden Eindrückungen von harten Objekten in die Schienenoberfläche als Ursache für eine erste geometrische Abweichung der Oberfläche genannt (vgl. Kapitel 2 bzw. [9]). Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen an einem 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand durchgeführt, mit denen gezeigt werden konnte, dass auch ein WEL auf der Schienenoberfläche zu ersten geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche führen kann. Mit Hilfe der Versuche konnte nachgewiesen werden, dass ein WEL unter gewissen Belastungen zu Ausbrüchen aus der Oberfläche führt (vgl. Kapitel 6.2.2).

Insgesamt konnten die Parameterstudien des Kapitels 7.1 zeigen, dass erste geometrische Abweichungen auf der Schienenoberfläche verbleiben und dabei Dimensionen vergleichbar mit jenen von Squats annehmen können (vgl. Kapitel 7.1.2 mit Kapitel 3.1). Außerdem können diese auf der Schienenoberfläche verbleibenden geometrischen Abweichungen zu einem erhöhten Rissinitiierungspotential gegenüber anderen ungestörten Bereichen der Schienenoberfläche führen. Eine binäre Aussage bezogen auf einen möglicherweise entstandenen Squat ist auf Basis dieser Ergebnisse nicht möglich, jedoch sind sowohl eine geometrische Abweichung der Schienenoberfläche als auch ein Rissystem im Bereich der geometrischen Abweichung charakteristische Kennzeichen eines Squats (vgl. Kapitel 1.1). Die Simulationen zeigen verbleibende geometrische Abweichungen der Schienenoberfläche. Das erhöhte Rissinitiierungspotential geometrischer Abweichungen kann bei den Simulationen als Ausgangspunkt für einen Riss bzw. für ein Rissystem interpretiert werden.

7.2 Entwicklung der Schienenoberfläche aufgrund lokal veränderter Materialeigenschaften

Versuche an einem 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand konnten zeigen, unter welchen Rad-Schiene-Kontaktbelastungen White Etching Layer (WEL) entstehen können sowie unter welchen Belastungen WEL zu Ausbrüchen aus der Schienenoberfläche und damit zu initialen geometrischen Abweichungen führen können (vgl. Kapitel 6). Neben diesem Phänomen und der Möglichkeit, dass geometrische Abweichungen durch Eindrückungen von harten Objekten in die Schienenoberfläche (vgl. Kapitel 2) verursacht werden, soll eine Simulation zeigen, inwieweit Materialinhomogenitäten in Form von einem WEL zur Bildung einer geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche führen können (vgl. Abbildung 143).

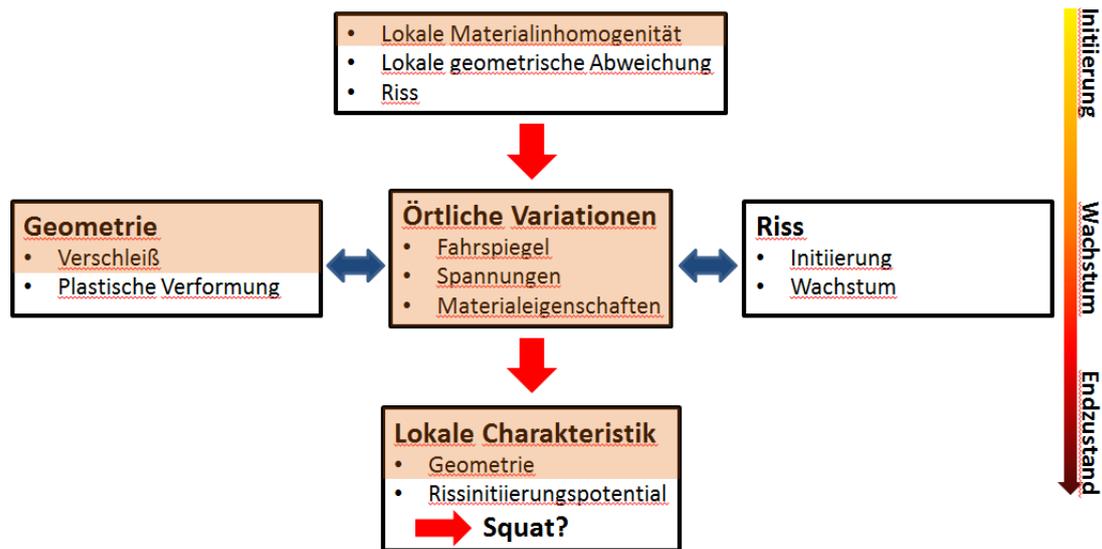


Abbildung 143: Schematische Darstellung der Simulationsidee bezüglich der Entstehung einer lokalen geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche aufgrund von lokalen Materialinhomogenitäten. Die berücksichtigten Phänomene bzw. Mechanismen sind farbig hinterlegt.

7.2.1 Einfluss von lokalem WEL auf die Entwicklung der Schienenoberfläche

Untersuchungen am Gleis im Bereich des Bahnhofes von Marthalen in der Schweiz zeigten, dass ein WEL in Form von hintereinander auftretenden WEL-Bereichen auf der Schiene vorkommen kann. Diese Bereiche hatten in Schienenlängsrichtung einen Abstand von zirka 15-30 mm. (vgl. Kapitel 3, Abbildung 5).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine Untersuchungen bezüglich der Verschleißrate von Schienenoberflächen mit WEL durchgeführt. Eine Studie [65], in der ein Schienensegment mit WEL-Bereichen an der Oberfläche untersucht wurde, zeigte Hinweise, dass jene Bereiche mit WEL unter gewissen Umständen ein verändertes Verschleißverhalten in Form von einem geringeren Materialabtrag aufweisen als die Oberflächenbereiche der Schiene ohne WEL. Risse im oder winzige Ausbrüche aus dem WEL können nach dieser Studie [65] jedoch die Verschleißrate eines WEL erhöhen. Die vorliegende Simulation basiert daher auf den Annahmen, dass die Bereiche mit WEL keine Risse oder Ausbrüche aufweisen und diese ein verändertes Verschleißverhalten in Form von einem geringeren Materialabtrag haben als das Ausgangsmaterial der Schiene. Der im Anhang A Tabelle 12 angegebene Proportionalitätsfaktor k_{KP} nimmt daher für Bereiche mit WEL einen halb so hohen Wert an.

Abbildung 144 zeigt den Ausgangszustand der Schiene. Die beiden WEL-Bereiche sind zu Beginn an der Oberfläche 10 mm breit und 0,1 mm tief. Die Breiten der WEL-Bereiche nehmen dabei bis zu einer Tiefe von 0,1 mm linear ab. Der Abstand zwischen den beiden WEL-Bereichen beträgt 30 mm und ist damit an den Zustand der Schiene in Marthalen angelehnt (vgl. Abbildung 5). Die Schiene weist keine initiale geometrische Abweichung der Oberfläche auf. Alle anderen Simulationsparameter entsprechen jenen des *Standardfalls* aus Kapitel 7.1.1.

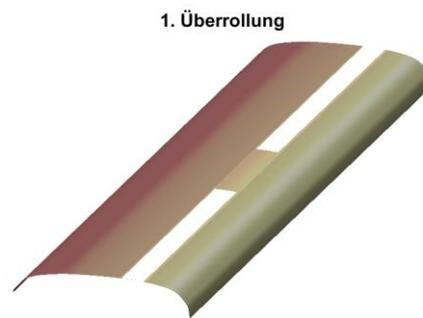


Abbildung 144: Ausgangssituation der Schiene mit lokalem WEL. Die Schiene weist zu Beginn keine geometrische Abweichung der Oberfläche auf.

Abbildung 145 zeigt die weitere Entwicklung der Schienenoberfläche unter der Belastung von Überrollungen. Durch den Materialabtrag Δz werden im Laufe der Simulation die WEL schmaler und verschwinden schließlich komplett, jedoch bildet sich bis zum Ende der Simulation eine geometrische Abweichung der Schienenoberfläche.

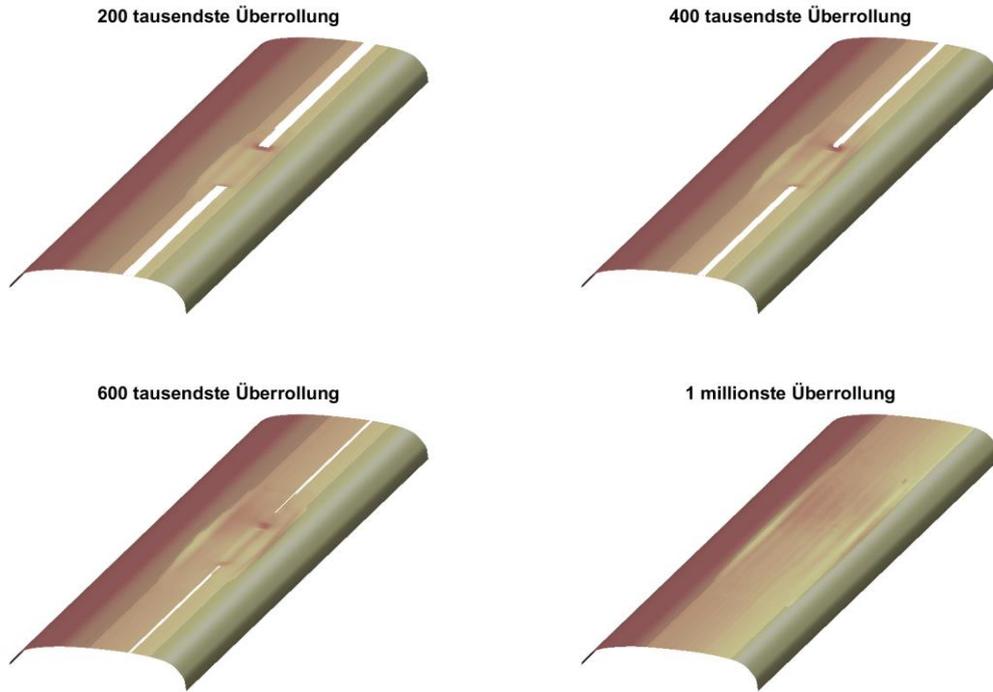


Abbildung 145: Geometrische Entwicklung der Schienenoberfläche mit lokalem WEL.

Abbildung 146 zeigt die Schienenlängskontur zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulation. Auch in dieser Abbildung erkennt man eine deutliche geometrische Abweichung der Schienenoberfläche.

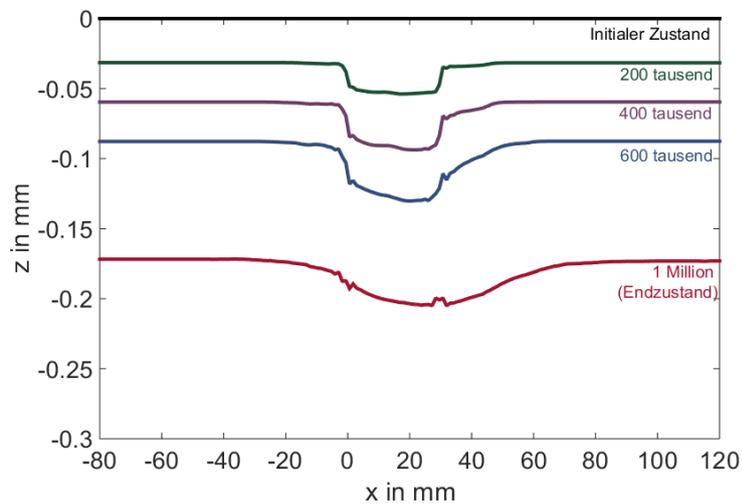


Abbildung 146: Kontur der Schienenoberfläche an der Position $y = -12,76$ mm zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulation. Zur jeweiligen Kontur wird die bis dahin simulierte Anzahl der Überrollungen angegeben.

Tabelle 10 listet die maximalen Maße der gebildeten geometrischen Abweichung am Ende der Simulation.

	Länge in mm	Breite in mm	Tiefe in mm
WEL-Flecken	≈80	≈40	≈0,03

Tabelle 10: Maximale Länge, Breite und Tiefe der geometrischen Abweichung zum Endzeitpunkt der Simulation.

Diskussion der Ergebnisse

Bei Untersuchungen einer Schiene mit Squats im Bahnhofsbereich in Marthalen/Schweiz (vgl. Kapitel 3) wurden WEL-Bereiche auf der Schienenoberfläche gefunden. Die WEL-Bereiche hatten einen Abstand von rund 15-30 mm zueinander. Eine Untersuchung (vgl. [65]) eines Schienensegments mit WEL-Bereichen an der Oberfläche zeigte, dass die Bereiche der Oberfläche mit WEL unter gewissen Umständen ein verändertes Verschleißverhalten in Form von einem geringeren Materialabtrag aufweisen als die Bereiche ohne WEL. Mit Hilfe der durchgeführten Simulation soll gezeigt werden, inwieweit ein solches verändertes Verschleißverhalten von Bereichen mit WEL zu einer geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche ähnlich jener von Squats führen kann.

Aufgrund der angenommenen unterschiedlichen Verschleißresistenzen der Bereiche mit und ohne WEL bildete sich mit zunehmender Anzahl der Überrollungen eine geometrische Abweichung der Schienenoberfläche im Bereich zwischen den beiden WEL (vgl. Abbildung 145). Die Tiefe dieser geometrischen Abweichung nahm dabei zu, solange die Bereiche mit WEL auf der Schienenoberfläche vorhanden waren. Es wird davon ausgegangen, dass ein ursprünglich tieferer WEL auch zu einer tieferen geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche führen kann.

Eine Untersuchung des Rissinitiierungspotentials der aufgrund der WEL-Bereiche gebildeten geometrischen Abweichung wurde bei dieser Simulation nicht durchgeführt, da für WEL auf Schienenoberflächen das Schädigungsmodell (vgl. Kapitel 5.6 bzw. [32] [33]) nicht parametrisiert wurde. Grundsätzlich sollen sich jedoch geometrische Abweichungen der Schienenoberfläche unabhängig ihres Ursprungs (Ausbrüche aus der Schienenoberfläche, Eindrückungen der Schienenoberfläche...) ähnlich verhalten.

Insgesamt konnte mit Hilfe dieser Simulation gezeigt werden, dass Materialinhomogenitäten in Form von WEL zu einer geometrischen Abweichung der Schienenoberflächen führen können, wenn die Bereiche mit WEL einen geringeren Materialabtrag aufweisen als jene Bereiche der Schienenoberfläche ohne WEL. Laut einer Studie (vgl. [65]) kann ein solches verändertes Verschleißverhalten eines WEL gegeben sein, wenn dieser keine Risse oder Ausbrüche aufweist. Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 6.2), zeigten jedoch, dass es im Bereich eines WEL unter Rad-Schiene-Kontaktbelastungen sowohl zu Rissbildungen als auch zu Ausbrüchen aus der Schienenoberfläche kommen kann. Ein wie in der Studie [65] teilweise festgestellter geringerer Materialabtrag der Schienenoberfläche im Bereich eines WEL scheint daher im Eisenbahnbetrieb nicht unbedingt gegeben zu sein.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Schienenfehler *Squat* untersucht. Verschiedene Initiierungsmechanismen werden für diesen Schienenfehler in der Literatur verantwortlich gemacht. Schon in den 1980er Jahren zeigten Feldbeobachtungen, dass erste geometrische Abweichungen der Schiene in Form von Eindrückungen zu Squats, damals noch *Black Spots* genannt, führen können [9]. Diese Beobachtung wurde in den späteren Jahren von weiteren Autoren bestätigt [3] [4] [5] [6] [8]. Auch Risse aufgrund von Rollkontaktermüdung und Materialinhomogenitäten durch *White Etching Layer* (WEL) [10] [11] [12] [13] [22] [23] [24] [25] oder Schienenschweißungen [3] wurden in der Literatur als Ausgangspunkt für die Entstehung von Squats genannt (vgl. Kapitel 2). Grundsätzlich wird in der Literatur [22] [45] [46] [58] [59] davon ausgegangen, dass ein WEL durch einen thermisch getriebenen Prozess oder durch schwere Umformprozesse auf der Schienenoberfläche im Betrieb entsteht.

Ziel dieser Arbeit war es sowohl Initiierungs- als auch Wachstumsmechanismen von Squats zu finden und sowohl die Entstehung des WEL als auch dessen Rolle im Entstehungsprozess von Squats zu untersuchen.

In einem ersten Schritt wurde eine Schiene eines Bahnnetzes mit Squats auf der Oberfläche untersucht. Bei den Untersuchungen wurde ein WEL in Form von einzelnen WEL-Bereichen mit einem Abstand von rund 15-30 mm zwischen den einzelnen Bereichen auf der Oberfläche gefunden. Dieser WEL wies gegenüber der restlichen Schienenoberfläche erhöhte Härtewerte auf. Nach dem Ausbau der Schiene wurde eine dreidimensionale Vermessung der Oberfläche durchgeführt. Bei den Vermessungen der Squats fand sich kein Nachweis, dass es im Bereich der Squats zu großräumigen plastischen Verformungen der Schiene kommt.

Auf Basis dieser Erkenntnis wurde ein Rechenmodell erstellt, in dem die Rad- und die Schienenoberfläche dreidimensional abgebildet sind. Das Modell berechnet die Normalspannungen im Kontakt mit der Software *CONTACT* [41] sowie die Tangentialspannungen und Temperatur mit dem *ECF-Modell* [28] [61]. Der Verschleiß wird mit dem Modell nach *Krause und Poll* [27] berechnet. Die Vertikaldynamik des Rad-Schiene-Systems kann mit einem *Mehrmassechwinger-Modell* abgeschätzt werden. Das Rissinitiierungspotential wird mit dem sogenannten *Keilmodell nach Trummer* [32] [33] bewertet.

Das Rechenmodell ist in der Lage, die geometrische Entwicklung einer Schienenoberfläche mit sich in Längsrichtung verändernden Querprofilen darzustellen, das Rissinitiierungspotential zu bewerten sowie die Temperatur im Rad-Schiene-Kontakt sowohl auf als auch unter der Oberfläche zu berechnen.

Mit Hilfe von Simulationen und Versuchen an einem 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand wurde der Einfluss der Temperatur auf die Entstehung des WEL untersucht. Simulationen zeigten, dass die

Austenitisierungs-Grenztemperatur von Stahl (723 °C) in oberflächennahen Schichten bei erhöhten Relativgeschwindigkeiten zwischen Rad und Schiene erreicht werden kann. Mit entsprechenden Versuchsparametern konnten an einem 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand WEL erzeugt werden. Dabei entsprach die Dicke des WEL der Tiefe für die Temperaturen über der Austenitisierungs-Grenztemperatur von Stahl, welche mit einer Simulation, durchgeführt mit denselben Parametern, berechnet wurde.

Weitere Versuche an diesem Prüfstand machten deutlich, dass zyklische Rad-Schiene-Kontaktbelastungen sowohl im WEL als auch im Material unter dem WEL zu Rissen führen können. Auch kleine Ausbrüche der Schienenoberfläche wurden auf diesen Schienen gefunden.

Mit Hilfe des Rechenmodells wurden weitere Parameterstudien durchgeführt, wobei zwischen zwei verschiedenen Szenarien der Squat-Entstehung unterschieden wurde.

Beim ersten Szenario ist der Ausgangspunkt eine initiale geometrische Abweichung der Schienenoberfläche. Diese erste geometrische Abweichung kann wie bei den Versuchen am 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand durch Ausbrüche aus der Schienenoberfläche im Bereich eines WEL entstehen. Eine weitere Möglichkeit der Entstehung von geometrischen Abweichungen stellt, wie in der Literatur beschrieben, die Eindrückung eines harten Objektes in die Schienenoberfläche dar. Die durchgeführte Parameterstudie zeigte, dass initiale geometrische Abweichungen, deren Größe zu einer Beeinflussung des Fahrspiegels und damit der Kontaktspannungen führten, dauerhaft auf der Schiene blieben. Solche geometrische Abweichungen wiesen auch ein erhöhtes Rissinitiierungspotential auf. Kleine initiale geometrische Abweichungen mit einer ungefähren Länge und Breite von 6 mm verschwanden unabhängig von ihrer Tiefe von der Schienenoberfläche und führten auch zu keinem erhöhten Rissinitiierungspotential.

Diese Ergebnisse korrelieren gut mit Darstellungen aus Feldbeobachtungen in der Literatur [4] [6]. Sie zeigten, dass geometrische Abweichungen, die im Durchmesser kleiner als 8 mm bzw. 6 mm und 5 mm waren, im Laufe der Zeit von der Oberfläche verschwanden. Größere geometrische Defekte entwickelten sich hingegen zu Squats.

Große initiale geometrische Abweichungen mit Längen und Breiten von über 20 mm bilden zwar die am stärksten ausgeprägten dauerhaften Mulden auf der Schienenoberfläche, haben jedoch, verglichen mit den mittelgroßen geometrische Abweichungen, ein geringeres Schädigungspotential.

Eine Untersuchung des Einflusses der Vertikaldynamik auf die geometrische und schädigungstechnische Entwicklung von Schienenoberflächen mit initialen geometrischen Abweichungen zeigte, dass die Vertikaldynamik sowohl bei der Entwicklung der Oberfläche als auch beim Schädigungspotential eine untergeordnete Rolle zu spielen scheint.

Auch Simulationen, durchgeführt mit unterschiedlichen Radprofilen und variierenden lateralen Radsatzpositionen, führten zu keinem abweichenden Ergebnis. Geometrische Abweichungen, die einen Einfluss auf den Rad-Schiene-Kontakt ausüben, verbleiben laut diesen Simulationen dauerhaft auf der Schienenoberfläche.

Das zweite mit dem Rechenmodell untersuchte Szenario ist die Entwicklung einer geometrischen Abweichung aufgrund eines WEL. Vor-Ort-Untersuchungen von Schienen im Bereich des Bahnhofes von Marthalen in der Schweiz zeigten, dass lokale WEL-Bereiche in einem Abstand von ungefähr

15-30 mm auf Schienen auftreten können. Eine Simulation imitierte diesen Zustand. Basierend auf einer Studie [65] wurde angenommen, dass die Bereiche mit WEL ein verändertes Verschleißverhalten in Form von einem geringeren Materialabtrag im Vergleich zu den anderen Schienenbereichen aufweisen. Am Beginn der Simulation zeigte die Schiene keine geometrische Abweichung der Schienenoberfläche. Im Laufe der Überrollungen bildete sich eine Abweichung der Oberfläche. Hintereinanderliegende WEL-Bereiche auf der Schienenoberfläche könnten demnach zu bleibenden geometrischen Abweichungen der Schienenoberfläche führen.

In der Studie [65] hatten Oberflächenbereiche mit WEL gegenüber anderen Schienenoberflächenbereichen einen geringeren Materialabtrag, wenn die WEL keine Risse oder Ausbrüche aufwiesen. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche an einem 1:1 Rad-Schiene-Prüfstand zeigten jedoch, dass es unter Rad-Schiene-Kontaktbelastungen zu einer Rissbildung im WEL sowie zu Ausbrüchen aus dem WEL kommen kann. Aus diesem Grund ist im realen Eisenbahnbetrieb ein geringerer Materialabtrag des WEL gegenüber den anderen Bereichen der Schienenoberfläche nicht zwingend gegeben.

In der vorliegenden Arbeit konnte erstmals gezeigt werden, welche realen Rad-Schiene-Kontaktbedingungen die Entstehung eines *White Etching Layer* (WEL) auf Schienenoberflächen verursachen und unter welchen Bedingungen der WEL sowohl zu Ausbrüchen aus dessen Oberfläche als auch zur Rissbildung tendiert. Weitere Simulationen haben gezeigt, dass gewisse erste Abweichungen der Schienenoberfläche (z.B. Ausbrüche aus der Oberfläche im Bereich des WEL) bleiben und geometrische Dimensionen annehmen können, welche vergleichbar mit der Größe eines *Squats* aus dem realen Betrieb sind. Solche geometrischen Abweichungen weisen ein erhöhtes Rissinitiierungspotential auf. Eine weitere Simulation konnte zeigen, dass hintereinander liegende WEL-Bereiche auf der Schienenoberfläche zu einer geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche führen können, falls die WEL-Bereiche eine mit den anderen Oberflächenbereichen verglichen geringere Verschleißrate aufweisen. Eine solche geringere Verschleißrate des WEL kann laut einer Studie [65] nur gegeben sein, wenn sich im WEL keine Risse oder Ausbrüche finden.

Literaturverzeichnis

- [1] S. L. Grassie. Squats and squat-type defects in rails: the understanding to date. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 226, Ausgabe 3, S. 235-242, 2012.
- [2] P. Clayton. Tribological aspects of wheel-rail contact: a review of recent experimental research. In *Wear* 191, S. 170-183, 1996.
- [3] Z. Li, X. Zhao, C. Esveld, R. Dollevoet, M. Molodova. An investigation into the causes of squats—Correlation analysis and numerical modeling. In *Wear* 265, S. 1349-355, 2008.
- [4] Z. Li, X. Zhao, R. Dollevoet. The determination of a critical size for rail top surface defects to grow into squats. In *Proceedings of the 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, S. 379-388, 2009. Florenz, Italien.
- [5] Z. Li, R. Dollevoet, M. Molodova, X. Zhao. Squat growth—Some observations and the validation of numerical predictions. In *Wear* 271, S. 148-157, 2011.
- [6] X. Zhao. Dynamic Wheel/Rail Rolling Contact at Singular Defects with Application to Squats. Dissertation, 2012. Technische Universität Delft.
- [7] K. Kondo, K. Yoroizaka, Y. Sato. Cause, increase, diagnosis, countermeasures and elimination of Shinkansen shelling. In *Wear* 191, S. 199-203, 1996.
- [8] Z. Li. Squats on railway rails. Wheel-Rail Interface Handbook. R. Lewis (Hrsg.), U. Olofsson (Hrsg.). Woodhead Publishing Limited Oxford Cambridge New Dehli, S. 409-436, 2009.
- [9] P. Clayton, M. B. P. Allery. Metallurgical Aspects of Surface Damage Problems in Rails. In *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science* 21, Ausgabe 1, S. 31-46, 1982.
- [10] M. Kerr, A. Wilson, S. Marich. The Epidemiology of Squats and Related Defects. In *Conference on Railway Engineering (CORE)*, S. 83-96, 2008. Perth, Australien.
- [11] S. Marich, S. Mackie. The Development of Squat Defects under High Axle Load Operations. In *Conference on Railway Engineering (CORE)*, S. 17-26, 2002. Wollongong N.S.W., Australien.
- [12] S. L. Grassie, D. I. Fletcher, E. A. G. Hernandez, P. Summers. "Studs": a squat-type defect in rails. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 226, Ausgabe 3, S. 243-256, 2012.
- [13] S. L. Grassie. Studs and squats: The evolving story. In *Wear* 366-367, S. 194-199, 2016.
- [14] D. I. Fletcher. Numerical simulation of near surface rail cracks subject to thermal contact stress. In *Wear* 314, S. 96-103, 2014.
- [15] S. Bogdński, P. Lewicki. 3D model of liquid entrapment mechanism for rolling contact fatigue cracks in rails. In *Wear* 265, S. 1356-1362, 2008.
- [16] S. Bogdński. Quasi-static and dynamic liquid solid interaction in 3D squat-type cracks. In *Wear* 314, S. 20-27, 2014.
- [17] S. Bogdński, P. Lewicki, M. Szymaniak. Experimental and theoretical investigation of the phenomenon of filling the RCF crack with liquid. In *Wear* 258, S. 1280-1287, 2005.
- [18] M. Farjoo, S. Pal, W. Daniel, S. Mackie. Squat formation and propagation: metallurgical and mechanical points of view. In *Conference on Railway Engineering (CORE)*, S. 203-212, 2012. Brisbane, Australien.
- [19] S. Pal, W. J. T. Daniel, M. Farjoo. Early stages of rails squat formation and the role of a White Etching Layer. In *International Journal of Fatigue* 52, S. 144-156, 2013.

- [20] S. Pal, C. Valente, W. Daniel, M. Farjoo. Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation. In *Wear* 284-285, S. 30-42, 2012.
- [21] W. JT. Daniel, S. Pal, F. Farjoo. Rail squats: progress in understanding the Australian experience. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 227, S. 481-492, 2013.
- [22] M. Steenbergen, R. Dollevoet. On the mechanism of squat formation on train rails – Part I: Origination. In *International Journal of Fatigue* 47, S. 361-372, 2013.
- [23] M. Steenbergen, R. Dollevoet. On the mechanism of squat formation on train rails – Part II: Growth. In *International Journal of Fatigue* 47, S. 373-381, 2013.
- [24] R. I. Carroll, J.H. Beynon. Rolling contact fatigue of White Etching Layer: Part 1 Crack morphology. In *Wear* 262, S. 1253-1266, 2007.
- [25] R. I. Carroll, J.H. Beynon. Rolling contact fatigue of White Etching Layer Part 2. Numerical results. In *Wear* 262, S. 1267-1273, 2007.
- [26] S. Simon, A. Saulot, C. Dayot, X. Quost, Y. Berthier. Tribological characterization of rail squat defects. In *Wear* 297, S. 926-942, 2013.
- [27] H. Krause, G. Poll. Wear of wheel-rail surfaces. In *Wear* 113, S. 103-122, 1986.
- [28] A. Meierhofer. A new Wheel-Rail Creep Force Model based on Elasto-Plastic Thirds Body Layers. Dissertation, 2015. Technische Universität Graz.
- [29] C. Tomberger. Der Rad-Schiene Kraftschluss unter Berücksichtigung von Temperatur, fluiden Zwischenschichten und mikroskopischer Oberflächenrauheit. Dissertation, 2009. Technische Universität Graz.
- [30] M. Ertz, K. Knothe. A comparison of analytical and numerical methods for the calculation of temperatures in wheel/rail contact. In *Wear* 253, S. 498-508, 2002.
- [31] C. Tomberger, P. Dietmaier, W. Sextro, K. Six. Friction in wheel-rail contact: A model comprising interfacial fluids, surface roughness and temperature. In *Wear* 271, S. 2-12, 2011.
- [32] G. Trummer. Simulation und Prognose von Rollkontaktermüdung im Rad-Schiene-Kontakt. Dissertation, 2016. Technische Universität Graz.
- [33] G. Trummer, C. Marte, P. Dietmaier, C. Sommitsch, K. Six. Modeling surface rolling contact fatigue crack initiation taking severe plastic shear deformation into account. In *Wear* 352-353, S. 136-145, 2016.
- [34] K. Knothe (Hrsg.), S. Stichel (Hrsg.). Schienenfahrzeugdynamik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [35] K. L. Johnson. Contact Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- [36] C. Bernsteiner, G. Müller, A. Meierhofer, K. Six, D. Künstner, P. Dietmaier. Development of white etching layers on rails: simulations and experiments. In *Wear* 366-367, S. 116-122, 2016.
- [37] J. Ahlström. Residual stresses generated by repeated local heating events – Modelling of possible mechanisms for crack initiation. In *Wear* 366-367, S. 180-187, 2016.
- [38] B. Girstmair. Vergleich von Rad-Schiene-Kontaktmodellen und deren Einfluss auf den Kraftschluss. Diplomarbeit, 2012. Technische Universität Graz.
- [39] J. J. Kalker. Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact. Solid Mechanics and its Applications. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990.
- [40] J. J. Kalker, Rolling Contact Phenomena. Rolling Contact Phenomena, B. Jacobson (Hrsg.), J. J. Kalker (Hrsg.). Springer Verlag, Wien, S. 1-87, 2000.

-
- [41] E. A. H. Vollebregt. User guide for CONTACT, Rolling and sliding contact with friction. Technical Report, TR09-03, version v16.1, 2016. Delft, Niederlande.
- [42] J. J. Kalker. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction. Dissertation, 1967. Technische Universität Delft.
- [43] A. Eichberger, K. Six, M. Rosenberger, B. Lubert. Fahrzeug-Fahrweg Interaktion bei Schienenfahrzeugen. Skriptum der Lehrveranstaltung 331.040, Technische Universität Graz, Institut für Fahrzeugtechnik, 2012.
- [44] A. Haigermoser. Schienenfahrzeuge. Skriptum der Lehrveranstaltung 310.214, Technische Universität Graz, Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, 2002.
- [45] W. Stadlbauer, W. Loos, E. A. Werner. Tribologically induced changes in the microstructure of rail surfaces. In *Proceedings of the 2nd World Tribology Congress*, S. 651/1-651/4, 2001. Wien, Österreich.
- [46] G. Baumann, H. J. Fecht, S. Liebelt. Formation of white-etching layers on rail treads. In *Wear* 191, S. 133-140, 1996.
- [47] K. Six, A. Meierhofer, G. Müller, P. Dietmaier. Physical processes in wheel-rail contact and its implications on vehicle-track interaction. In *Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* 53, S. 635-650, 2015.
- [48] N. P. Suh. The Delamination Theory of Wear. Forschungsbericht, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1977. Massachusetts, USA.
- [49] K. Six, A. Meierhofer, G. Trummer, C. Bernsteiner, C. Marte, G. Müller, B. Lubert, P. Dietmaier, M. Rosenberger. Plasticity in wheel-rail contact and its implications on vehicle-track interaction. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 231, Ausgabe 5, S. 558-569, 2017.
- [50] K. Six, A. Meierhofer, G. Trummer, C. Marte, G. Müller, B. Lubert, P. Dietmaier, M. Rosenberger. Classification and Consideration of Plasticity Phenomena in Wheel-Rail Contact Modelling. In *International Journal of Railway technology* 5, S. 55-77, 2016.
- [51] F. Wetscher. Effect of Large Shear Deformation on Rail Steels and Pure Metals. Dissertation, 2006. Montanuniversität Leoben.
- [52] A. Hohenwarter, A. Taylor, R. Stock, R. Pippan. Effect of Large Shear Deformations on the Fracture Behavior of a Fully Pearlitic Steel. In *Metallurgical and Materials Transactionst A* 42, Ausgabe 6, S. 1609-1618, 2011.
- [53] K. L. Johnson. The strength of surfaces in rolling contact. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMechE)* 203, S. 151-163, 1989.
- [54] H. Hertz. Ueber die Berührung fester elastischer Körper. In *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92, S. 156-171, 1881.
- [55] W. Daves, M. Kracalik, W. P. Yao, S. Scheriau. Mechanisms of Driving Surfhrgsace Shear Cracks in Rolling Sliding Contact. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, Paper 110, 2014. Stirlingshire, England.
- [56] A. Böge (Hrsg.). Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. 18. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2007.
- [57] K.-H. Grote (Hrsg.), J. Feldhusen (Hrsg.). Dubbel Taschenbuch Maschinenbau. 22. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2007.
-

- [58] Y. Ivanisenko, I. Maclaren, X. Sauvage, R. Z. Valiev, H. J. Fecht. Phase Transformations in Perlitic Steels Induced by Severe Plastic Deformation. In *Solid State Phenomena 114*, S. 133-144, 2006.
- [59] D. I. Fletcher, S. H. Sanusi. The potential for suppressing rail defect growth through tailoring rail thermo-mechanical properties. In *Wear 366-367*, S. 401-406, 2016.
- [60] K. Knothe. Ein Beitrag zur Vereinheitlichung der Begriffe bei Kontaktvorgängen in Rad-Schiene-Systemen. Schriftenreihe des Sfb 605. Sfb-Bericht 1999/1. Technische Universität Berlin, Deutschland.
- [61] A. Meierhofer, G. Müller, K. Six, P. Dietmaier. A wheel-rail creep force model considering normal stress and temperature dependent plasticity effects. In *Proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD)*, S. 1005-1014, 2015. Graz, Österreich.
- [62] K. Knothe, S. Liebelt. Determination of temperatures for sliding contact with applications for wheel-rail systems. In *Wear 189*, S. 91-99, 1995.
- [63] C. Bernsteiner, A. Meierhofer, K. Six, D. Künstner, P. Dietmaier. White etching layer und deren Einfluss auf Rissinitiierung auf der Schienenoberfläche. In *Tagungsband der 15. Internationalen Schienenfahrzeugtagung Dresden*, DVV Media Group GmbH, Eurailpress, S. 34-36, 2017. Dresden, Deutschland.
- [64] C. Bernsteiner, A. Meierhofer, K. Six, D. Künstner, P. Dietmaier. White etching layer und deren Einfluss auf Rissinitiierung auf der Schienenoberfläche. Präsentation auf der 15. Internationalen Schienenfahrzeugtagung Dresden, 2017. Dresden, Deutschland.
- [65] Yu. V. Milman, K. E. Grinkevych, S. I. Chugunova, W. Lojkowski, M. Djahanbakhsh, H.J. Fecht. Tribological properties of the surface of railway tracks, studied by indentation technique. In *Wear 258*, S. 77-82, 2005.
- [66] A. Jörg, R. Stock, S. Scheriau, H. P. Brantner, B. Knoll, M. Mach, W. Daves. The Squat Condition of Rail Materials – a Novel Approach to Squat Prevention. In *Proceedings of the 10th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, 2015, Colorado Springs, USA.
- [67] A. Jörg, S. Scheriau. Ein neuer Zugang zum besseren Verständnis von Squats. In *ZEVrail Zeitschrift für das gesamte System Bahn 141*, Ausgabe 5, S. 190-199, 2017.

Abbildungsnachweis

Der Urheber aller in diesem Werk enthaltenen Fotos, Abbildungen, Grafiken und Diagramme ist, sofern keine andere Quelle angegeben ist, der Autor der Arbeit.

Anhang A: Tabellen

Modell Eingangsparameter

Elastizitätsmodul	in $\frac{N}{mm^2}$	210000
Querkontraktionszahl	in -	0,29

Tabelle 11: Eingangsparameter für das Programm CONTACT.

Milder Verschleiß:	$k_{KP-mild} = 2 \cdot 10^{-15}$	$\frac{kg}{Nm}$	für $\dot{q} \leq 4 \frac{W}{mm^2}$
Heftiger Verschleiß:	$k_{KP-heftig} = 2 \cdot 10^{-14}$	$\frac{kg}{Nm}$	für $\dot{q} > 4 \frac{W}{mm^2}$

Tabelle 12: Werte für den Proportionalitätsfaktor k_{KP} ($= k_{KP-mild}$ oder $= k_{KP-heftig}$) des Verschleißmodells. Die Unterscheidung erfolgt aufgrund der Reibleistungsdichte \dot{q} .

m_{WK}	$\frac{1}{8}$ der Masse des Wagenkastens	in kg	55500/8
m_{DG}	$\frac{1}{4}$ der Masse des Drehgestells (primär gefedert)	in kg	4637/4
m_R	$\frac{1}{2}$ der Masse des Radsatzes	in kg	2350/2
m_S	Masse des äquivalenten Schienenabschnittes	in kg	160
d_{OB}	Dämpfungskonstante Fahrweg	in $\frac{Ns}{m}$	$9,4 \cdot 10^4$
c_{OB}	Federsteifigkeit Fahrweg	in $\frac{N}{m}$	$7,5 \cdot 10^7$
d_{HZ}	Dämpfungskonstante Kontakt	in $\frac{Ns}{m}$	$1,5 \cdot 10^4$
c_{HZ}	Federsteifigkeit Kontakt	in $\frac{N}{m}$	$5,0 \cdot 10^8$
d_2	Dämpfungskonstante 2. Federstufe	in $\frac{Ns}{m}$	$1,245/2 \cdot 10^5$
c_2	Federsteifigkeit 2. Federstufe	in $\frac{N}{m}$	$7,35 \cdot 10^5$
d_1	Dämpfungskonstante 1. Federstufe	in $\frac{Ns}{m}$	$5,32 \cdot 10^4$
c_1	Federsteifigkeit 1. Federstufe	in $\frac{N}{m}$	$19,2 \cdot 10^5$
g	Erdbeschleunigung	in $\frac{m}{s^2}$	9,81

Tabelle 13: Angenommene Werte für das Vertikaldynamikmodell.

Simulationseingangswert- und Ergebnistabellen

Simulations- Bezeichnung	L _A /B _A /T _A	MP _{x/y}	F _N	c _x /%	P	RSP	#ÜR	≈L _E /≈B _E /≈T _E
	mm	mm	kN	%/%	-	mm	x1000	mm
Standardfall	20/20/0,15		110	0	S1002/UIC60			70/40/0,025
Fall 2	20/20/0,3		110	0	S1002/UIC60			90/40/0,06
Fall 3	30/20/0,15		110	0	S1002/UIC60			75/40/0,040
Fall 4	20/30/0,15		110	0	S1002/UIC60			75/40/0,034
Klein	6/6/0,15		110	0	S1002/UIC60			0/0/0
Groß	30/40/0,3		110	0	S1002/UIC60			115/40/0,11
Fall 5	20/20/0,15		110	-0,1/20	S1002/UIC60			50/40/0,021
Fall 6	20/20/0,15		110	0,1/200	S1002/UIC60			60/40/0,023
Fall 7	20/20/0,15		110	-0,1/40	S1002/UIC60			50/40/0,018
Fall 8	20/20/0,15		110	0,1/40	S1002/UIC60			55/40/0,021
Groß 9	30/40/0,3		110	0	S1002/UIC60			55/40/0,04
Groß 10	30/40/0,3		110	0	S1002/UIC60			60/40/0,08
Vertikaldyn.	20/20/0,15		90,96	0	S1002/UIC60			70/40/0,025
Fall 9	20/20/0,15		110	0	Profil 1/UIC60			70/40/0,024
Fall 10	20/20/0,15		110	0	Profil 2/UIC60			70/40/0,025
Variation	20/20/0,15		110	0	Profil 1, Profil 2, S1002/UIC60			60/40/0,027
WEL-Flecken	-		110		S1002/UIC60			80/40/0,03

Tabelle 14: Simulationseingangs- und -ausgangsdaten. L = Länge, B = Breite, T = Tiefe, MP_{x/y} = Mittelpunktkoordinaten der initialen geometrischen Abweichung der Schienenoberfläche, c_x/% = prozentuelle Anzahl der Gesamtüberrollungen mit Schlupf c_x>0 oder c_x<0, P = Schienenprofil und Radprofil, RSP = laterale Radsatzposition, #ÜR Anzahl der Gesamtüberrollungen. Index A = Anfangswert, Index E = Wert zum Endzeitpunkt der Simulation.