



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

## Diplomarbeit

# Ermittlung der Flächenpressung zwischen Spurführungsrollen und Schiene für People Mover

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

## Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg KARTNIG**

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik

Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik

und

**Univ.Lektor Dipl.-Ing Dr.techn. Anton STRIBERSKY**

Siemens AG

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Johannes Erasim BSc**

0825219 (066 482)

1140 Wien

Wien, im Mai 2015

---

Johannes Erasim



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Mai 2015

---

Johannes Erasim

## Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Kontakt zwischen Spurführungsrollen und Schiene für People Mover genauer untersucht und es wurden Versuche zur Bestimmung der Größe der Kontaktfläche und der Normalspannung im Kontaktgebiet durchgeführt.

Zusätzlich sollte gezeigt werden, ob beim vorliegenden Kontakt von Spurführungsrolle und Schiene eine richtige Berechnung der Flächenpressung mittels der Theorie nach Hertz möglich ist.

Als Vorbereitung für die Versuche und die Berechnung wurden theoretische Lösungsansätze für das Normal- bzw. erweiterte Normalkontaktproblem sowie für den Tangentialkontakt gezeigt. Zusätzlich wurde ein Ansatz entwickelt, der un stetige Krümmungen im Kontaktgebiet berücksichtigt.

Mit Hilfe dieses Ansatzes konnte gezeigt werden, dass die analytische Berechnung der Größe der Kontaktfläche und der Spannungen im Falle des vorliegenden Rad-Schiene-Kontaktes möglich ist.

Da die untersuchten Spurführungsrollen Laufflächen aus Kunststoff besitzen, wird der Kontakt Kunststoff/Stahl sowohl bei der Recherche, als auch bei der analytischen Berechnung berücksichtigt.

Im Hinblick auf zukünftige Verschleißberechnungen wurden auch Versuche zur Ermittlung der Oberflächenrauigkeit durchgeführt.

## Abstract

Within the context of this Master thesis the contact of guiding rollers and rail for People Mover has been investigated in detail and tests for determining the size of the contact area and how the contact pressure occurs have been conducted.

Additional calculations should verify if it's possible to predict with the Hertzian contact theory the right contact pressure within the contact of the guiding rollers and the rail. In preparation for the tests and the calculations possible solutions for the normal- and tangential contact problem are presented. In addition, a new approach is developed to take the discontinuous curvature within the contact area in account.

Using this approach has shown that the analytic calculation of the contact area and pressure relating to the guiding rollers and rail is possible.

The running surfaces of the guiding rollers are made of plastic. Therefore, the theoretical research and the calculations are considering the special case of the contact of steel and plastic.

Further measurements of the surface roughness of the guiding rollers and the rail highlight the importance of the connection between contact pressure and wear.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	4
1.1	Aufgabenstellung.....	4
1.2	Zielsetzung .....	7
2	Theoretische Grundlagen.....	9
2.1	Analyse des Rad – Schiene-Kontakts .....	10
2.2	Normalkontaktproblem nach Hertz .....	13
2.2.1	Voraussetzungen für die Anwendung der Hertzschen Theorie .....	14
2.2.2	Formeln und Beschreibung der Theorie nach Hertz .....	15
2.2.3	Normalkontakt zwischen Kunststoffrad und Stahlschiene.....	19
2.3	Erweiterungen der Theorie nach Hertz.....	22
2.3.1	Semi-Hertz Ansätze .....	23
2.3.2	Multi-Hertz-Ansätze .....	25
2.4	Anpassung des Multi-Hertz-Ansatzes.....	27
2.4.1	Bestimmung der Anzahl der Ellipsen .....	27
2.4.2	Ermittlung der Kräfte .....	28
2.4.3	Berechnung der Halbachsen der Ellipsen.....	29
2.4.4	Ermittlung der Spannungen .....	30
2.5	Tangentialkontakt .....	32
2.5.1	Reibung und Schlupf.....	32
2.5.2	Theorien zur Lösung des Tangentialkontaktproblems .....	36
2.5.3	Tangentialkontakt zwischen Kunststoffrad und Schiene .....	37
2.6	Verschleiß beim Rad Schiene Kontakt .....	37
2.7	Der Werkstoff Polyurethan .....	39
3	Praktische Untersuchungen .....	42
3.1	Analyse des Systems .....	42
3.1.1	Betrachtung der Kontaktgeometrie .....	42
3.1.2	Bestimmung der auftretenden Kräfte .....	45
3.1.3	Bestimmung der Materialien und deren Eigenschaften.....	49
3.2	Messung Flächenpressung .....	50
3.2.1	Ziele .....	50

3.2.2	Rahmenbedingungen.....	50
3.2.3	Vorbereitung .....	51
3.2.4	Messplan .....	54
3.2.5	Messaufbau .....	58
3.2.6	Durchführung .....	60
3.2.7	Messmittel.....	61
3.3	Messung Oberflächenrauheit .....	62
3.3.1	Messung Schiene .....	62
3.3.2	Messung Lauffläche .....	65
3.3.3	Messung Spurkranz. ....	67
3.3.4	Messmittel.....	68
4	Analytische Berechnungen .....	69
4.1	Überprüfung der Voraussetzungen für die Theorie nach Hertz .....	69
4.2	E Modul .....	70
4.3	Berechnung .....	72
4.3.1	Rechnung .....	74
4.3.2	Lösungen .....	78
5	Ergebnisse .....	81
5.1	Auswertung der Messergebnisse .....	81
5.2	Messfehler .....	83
5.2.1	Fehler bei der Messung .....	83
5.2.2	Fehler aufgrund der Auswertungen.....	84
5.3	Ergebnisse der Messung .....	84
5.3.1	Kontaktpunkt C .....	86
5.3.2	Ergebnisse Kontaktpunkt Nom.....	91
5.3.3	Ergebnisse Kontaktpunkt A.....	97
5.3.4	Ergebnisse Kontaktpunkt B.....	100
5.4	Zeitliche Zuordnung.....	104
5.5	Diagramme der Kontaktflächen .....	106
5.5.1	Diagramme der Kontaktflächen bei Kontaktpunkt Nom .....	106
5.5.2	Diagramme der Kontaktflächen in Kontaktpunkt A.....	111
5.5.3	Diagramme der Kontaktflächen in Kontaktpunkt B.....	113

5.5.4	Diagramme der Kontaktflächen in Kontaktpunkt C .....	118
5.6	Diagramme Spannungen.....	123
5.6.1	Diagramme der Spannungen in Kontaktpunkt Nom .....	123
5.6.2	Diagramme der Spannungen in Kontaktpunkt A .....	128
5.6.3	Diagramme der Spannungen in Kontaktpunkt B .....	132
5.6.4	Diagramme der Spannungen in Kontaktpunkt C.....	140
5.7	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	148
5.8	Schlussfolgerungen .....	150
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	152
7	Literaturverzeichnis .....	153
8	Abbildungsverzeichnis .....	156
9	Formelverzeichnis .....	159
10	Tabellenverzeichnis .....	160
11	Abkürzungsverzeichnis .....	163
12	Anhang .....	A1

# 1 Einleitung

Dem Materialverhalten eines Radsatzes für Schienenfahrzeuge wurde seit der Erfindung der Eisenbahn viel Beachtung geschenkt [Wöhler, Hertz, Kalker]. Die Flächenpressung zwischen Rad und Schiene spielt dabei eine besondere Rolle.

In dieser Masterarbeit wird ein spezieller Fall eines Rad-Schiene-Kontaktes betrachtet, welcher beim Rollen von zwei Spurführungsrollen mit Laufflächen aus Kunststoff auf einer Stahlschiene entsteht.

Nach der Beschreibung der Aufgabenstellung und der Ziele werden die theoretischen Grundlagen zur Flächenpressung zwischen Rad und Schiene erläutert. Hierbei wird speziell auf die Flächenpressung des vorliegenden Falles eingegangen. Der Begriff Rad-Schiene-Kontakt ist im Zuge dieser Arbeit mit dem Kontakt zwischen Spurführungsrollen und Schiene gleichzusetzen.

In Kapitel 2 wird ein im Rahmen dieser Arbeit entwickelter angepasster Multi-Hertz-Ansatz beschrieben.

Die weiteren Abschnitte beinhalten Erläuterungen zu den praktischen Untersuchungen. Dazu zählen die Bestimmung der Berührungspunkte und die Beschreibung der Versuche im Labor. Zusätzlich werden Messungen der Oberflächenrauheit durchgeführt und erläutert.

In Kapitel 4 werden die analytischen Berechnungen detailliert behandelt und die Lösungen präsentiert.

Den Abschluss dieser Arbeit bildet die Diskussion der Ergebnisse der Messungen und der analytischen Berechnungen. Dazu werden die Ergebnisse aus Versuch und Berechnung verglichen, um daraus Schlüsse für die Rechenansätze zu ziehen.

## 1.1 Aufgabenstellung

Wie in der Einleitung schon erwähnt, soll durch diese Arbeit die Flächenpressung zwischen Spurführungsrollen und einer Stahlschiene genauer untersucht werden. Dabei handelt es sich um die Spurführungsrollen eines Automated People Movers des Typs Neoval. Dieses fahrerlose Personentransportmittel wird aufgrund von höherer Reibung und besseren Dämpfungseigenschaften von Gummireifen getragen, welche auf einer Fahrbahn aus Beton abrollen. Da die Reifen keine seitliche Führung aufweisen, muss das Fahrzeug mittels Spurführungsrollen auf der Spur gehalten werden. Im Gegensatz zum Fahrzeug Val 208, das mit seitlichen Spurführungsrollen ausgestattet ist, weist der Neoval am Fahrwerk mittig angebrachte Spurführungsrollen auf. Diese benötigen nur eine in der Mitte der Fahrbahn verlaufende Spurführungsschiene.

Die Besonderheit dieser Spurführungsrollen liegt darin, dass sie paarweise im 90°-Winkel angeordnet sind und an einer eigens für diesen Fahrzeugtyp angefertigten



Schiene abrollen (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2).

Die spezielle Anordnung der Spurführungsrollen ist durch erhöhte Entgleisungssicherheit begründet, da es nur durch erheblichen Kraftaufwand möglich ist, die Rollen von der Schiene vertikal zu trennen.



Abbildung 1: Neoval<sup>1</sup>

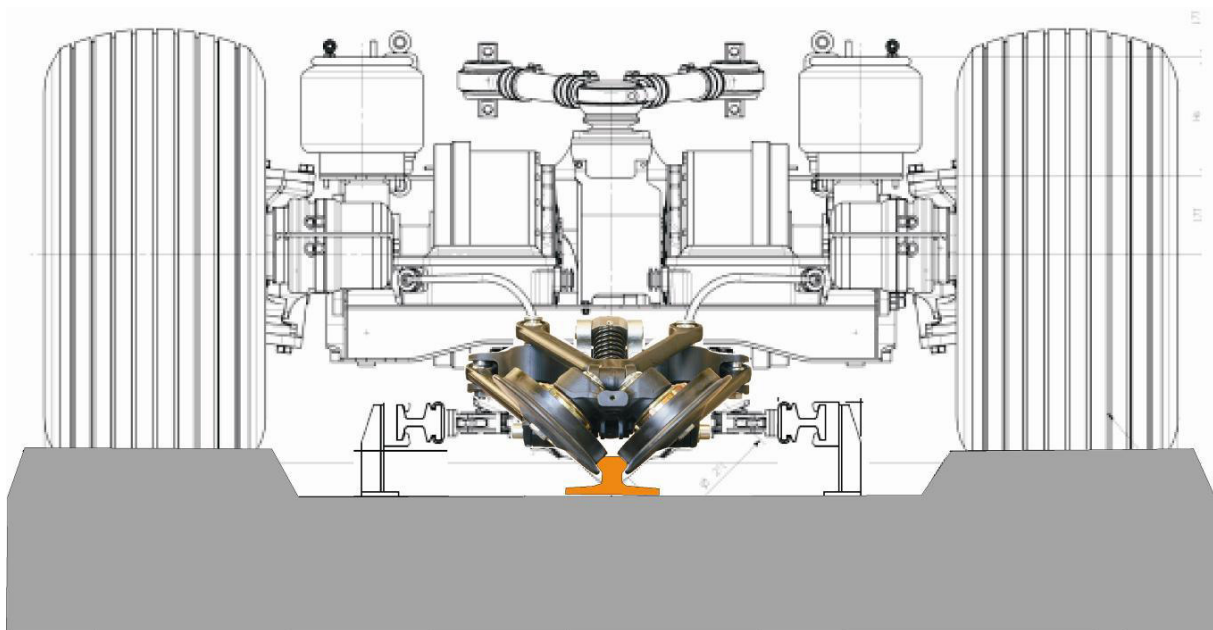


Abbildung 2: Anordnung Spurführungsrollen<sup>2</sup>

Die Aufgabe der am Fahrwerk befestigten Spurführungsrollen besteht darin, in der Kurvenfahrt die Gummiräder einzulenken

Pro Radachse sind jeweils zwei Paar Spurführungsrollen, ein Paar in Fahrtrichtung vor der Achse und eines hinter der Achse, angebracht. Dies dient dazu, dass die Achsen auch bei Fahrtrichtungswechsel eingelenkt werden können.

<sup>1</sup> Siemens AG

<sup>2</sup> Siemens AG

Während der Fahrt lenken die Spurführungsrollen in Fahrtrichtung die Gummiräder ein. Das Rollenpaar, welches gegen die Fahrtrichtung angeordnet ist, wird vom Fahrwerk entriegelt, um eine Blockieren des Fahrwerkes zu verhindern. In Abbildung 3 ist das Spurführungsprinzip des Neoval dargestellt.

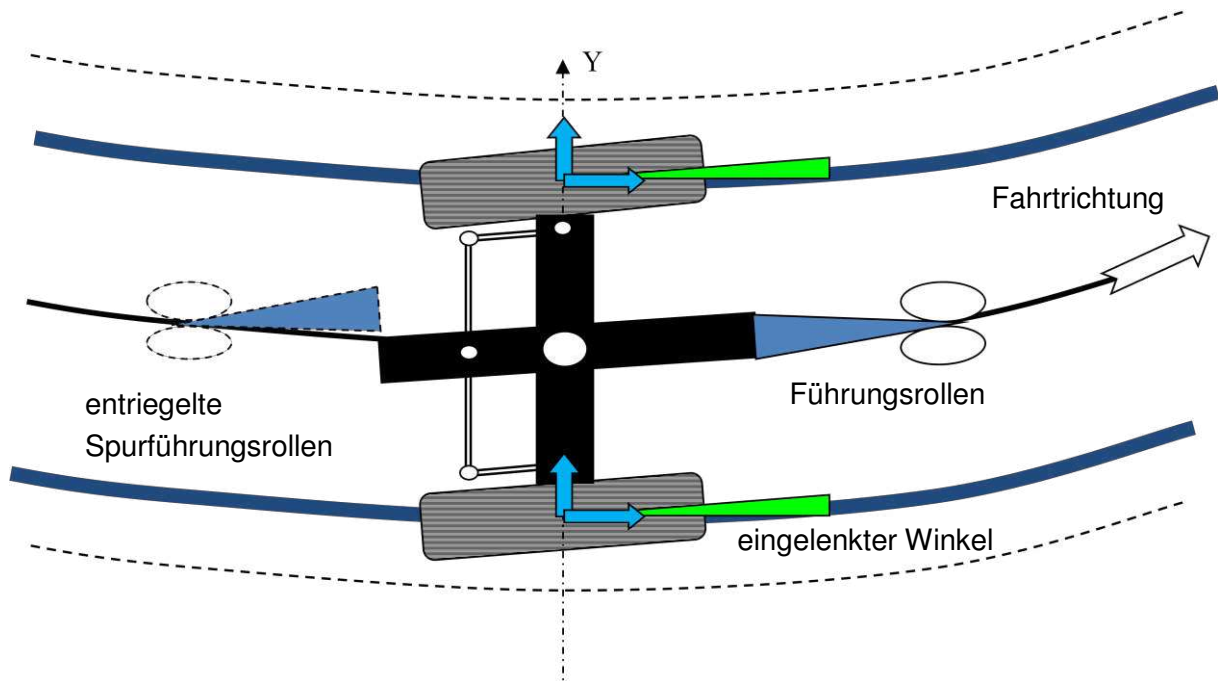


Abbildung 3: Führungsprinzip Neoval<sup>3</sup>

Die Spurführungsrollen werden mittels Feder auf die Schiene gedrückt und nehmen somit einen kleinen Teil des Gewichtes des Fahrzeugs auf. Die durch die Feder aufgebrauchte Kraft verhindert das Abheben und gewährleistet eine gute Spurführung.

Die Spurführungsrollen besitzen im Gegensatz zu normalen Stahlrädern bei Schienenfahrzeugen eine Lauffläche aus Kunststoff. Der Spurkranz der Rollen besteht aus Stahl.

Aufgrund der Feder, die auf die Rollen drückt, und der Kräfte, die in der Kurvenfahrt wirken, sind die Spurführungsrollen einer ständigen Last ausgesetzt. Durch Computersimulationen kann die Größe dieser Kräfte bestimmt werden, jedoch kann nur mit hohem Aufwand berechnet werden welche Auswirkung diese Kräfte auf die Lauffläche bzw. auf die Lebensdauer der Rollen haben.

Um die Simulationen der Bewegung zu verbessern und somit die Auswirkungen der Kräfte auf die Laufflächen genauer bestimmen zu können, soll in dieser Arbeit die entstehende Flächenpressung zwischen Spurführungsrollen und Schiene des fahrerlosen Transportsystems Neoval genauer untersucht werden. Gleichzeitig sollen Berechnungen mittels der Kontakttheorie nach Hertz durchgeführt werden, um

<sup>3</sup> Siemens AG

Schlüsse für mögliche Berechnungsmodelle ziehen zu können.

Es sollen ein Versuchsstand aufgebaut, Messreihen festgelegt und Versuche durchgeführt werden. Bei der anschließenden Auswertung der Messungen ist es das Ziel, die Anwendbarkeit der Theorie nach Hertz zu überprüfen und gegebenenfalls zur Bestimmung der Flächenpressung andere Lösungsansätze zu finden. Begleitend soll eine Literaturrecherche durchgeführt werden.

Ergänzend werden Messungen der Oberflächenrauheiten der Spurführungsrollen und der Schiene gemacht, um diese Parameter in eine Verschleißsimulation einbinden zu können.

Im folgenden Abschnitt sind die Ziele der Diplomarbeit noch einmal aufgelistet und im Detail beschrieben.

## 1.2 Zielsetzung

Primäres Ziel der Diplomarbeit ist es, die Auswirkungen der durch die Simulation am Computer bekannten Kräfte auf die Spurführungsrollen des Neoval genauer zu untersuchen. Hierzu wird ein Versuch mit einer Zug-Druck-Prüfmaschine durchgeführt und die Flächenpressung mittels Druckmessfolien ermittelt.

Um den Versuch durchführen zu können, muss entsprechend den auftretenden Kräften eine geeignete Versuchsvorrichtung entworfen und konstruiert werden. Es werden die durch eine Computersimulation bekannten Kräfte einer Kurvenfahrt für die Versuche herangezogen.

Zusätzlich muss die Lage möglicher Kontaktpunkte zwischen den Spurführungsrollen und der Schiene grafisch ermittelt und in den Versuch übertragen werden.

Als Vorbereitung für den Versuch soll der Ablauf der Messungen festgelegt und ein Messplan entworfen werden.

Die Ergebnisse aus den Messungen mit den Druckmessfolien sollen einerseits Aufschluss über die Form der Druckfläche und andererseits Aufschluss über die Höhe der auftretenden Spannungen geben.

Hierbei soll überprüft werden, ob einerseits die Kontaktflächen elliptisch und ob andererseits zusätzlich die Spannungsverläufe halbelliptisch sind und somit die Theorie von Hertz im Falle der untersuchten Spurführungsrollen anwendbar ist.

Wenn dies nicht zutrifft, müssen geeignete Theorien gefunden werden, die das ermittelte Versuchsergebnis beschreiben können. Zur Überprüfung der Gültigkeit der Theorie nach Hertz werden analytische Berechnungen durchgeführt.

Des Weiteren werden für bessere Vorhersagen des Verschleißes und der Lebensdauer die Oberflächenrauheiten der Spurführungsrollen und der Schiene gemessen.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist es, mittels Literaturrecherche den derzeitigen Stand der Technik zum Rad-Schiene-Kontakt zu berücksichtigen und Theorien bzw.

Untersuchungen zu finden, die sich mit der Flächenpressung zwischen einer Rolle mit einer Laufläche aus Kunststoff und einer Stahlschiene beschäftigen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen für die Verbesserung der Computersimulation herangezogen werden, um die Materialbelastungen sowie das Verschleißverhalten genauer vorhersagen zu können.

Die Messung der Flächenpressung soll im Labor des Institutes für Konstruktionswissenschaften und technische Logistik, Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik der TU Wien durchgeführt werden.

Die Messung der Oberflächenrauigkeiten soll im Labor des Instituts für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik, Forschungsbereich Austauschbau Messtechnik / Produktionsmesstechnik und Qualität durchgeführt werden.

## 2 Theoretische Grundlagen

Die Kräfte, die zwischen Rad und Schiene auftreten, haben einen sehr großen Einfluss auf die Fahrzeugdynamik und den Verschleiß der Kontaktpartner. Deshalb ist es von großer Bedeutung, die Vorgänge, die bei dem Kontakt zwischen Rad und Schiene bzw. Spurführungsrollen und Schiene auftreten, zu verstehen. Oftmals ist es aber sehr schwierig die Größe und die Auswirkungen der auftretenden Kräfte zu ermitteln. Eine Vielzahl von Berechnungsmethoden die dieses Thema behandeln, spiegelt die Wichtigkeit der Lösung der Kontaktproblematik wieder.

Unter Kontaktproblem wird hierbei die Unkenntnis über die Größe und Form der Kontaktfläche, sowie über die auftretenden Spannungen im Kontaktgebiet, verstanden. Diese Unkenntnis gilt es durch geeignete Rechenmodelle zu verringern.

Viele namhafte Wissenschaftler haben sich seit Erfindung der Eisenbahn mit dem Thema der Flächenpressung beschäftigt. Angefangen bei H. Hertz, der schon im 19. Jahrhundert das Normalkontaktproblem erforschte, bis hin zu J. J. Kalker der durch Computerprogramme und Algorithmen einen wesentlichen Fortschritt auf diesem Gebiet erzielen konnte.

Grundsätzlich muss bei der Untersuchung des Rad-Schiene-Kontaktes unterschieden werden, ob dieser statisch oder dynamisch betrachtet wird. Statisch bedeutet in diesen Fall, dass das sich drehende Rad als nicht bewegter Körper angesehen wird. Bei der dynamischen Betrachtung hingegen wird die Bewegung berücksichtigt, was das Auftreten eines Schlupfes hervorruft. Als Sonderfall gilt der Leerlaufschlupf, der unter anderem in diesem Kapitel genauer erläutert wird.

Die unterschiedliche Betrachtungsweise hat zur Folge, dass entweder nur Normalkräfte für die Untersuchungen herangezogen, oder zusätzlich Tangentialkräfte berücksichtigt werden. Diese Differenzierungen sind notwendig, da dadurch verschiedene Theorien und Formeln für die Berechnungen beachtet werden müssen.

Am Beginn dieses Kapitels werden die Vorbereitungsschritte beschrieben, die für die Lösung des Kontaktproblems notwendig sind.

Anschließend wird der Unterschied zwischen Normal- und Tangentialkontaktproblem genauer erläutert und die derzeit angewendeten Theorien beschrieben. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf der Betrachtung des Normalkontaktproblems, welches auch durch analytische Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit untersucht wird.

Des Weiteren wird ein im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelter angepasster Multi-Hertz-Ansatz für die Lösung des vorliegenden Rad-Schiene-Kontaktproblems präsentiert.

Der in dieser Arbeit behandelte Kontakt zwischen Spurführungsrollen und Schiene erfolgt mit unterschiedlichen Materialien. Die zu untersuchende Rolle besitzt eine

Lauffläche aus Polyurethan, wohingegen die Schiene aus reinem Stahl gefertigt ist. Daher liegt ein zusätzlicher Fokus der theoretischen Betrachtungen auf dem Kontakt zwischen Stahl und Kunststoff.

Ein weiterer Abschnitt dieses Kapitels widmet sich dem möglichen Verschleiß, der zwischen den Rollen und der Schiene auftreten kann.

Den Abschluss bilden Erläuterungen zum Werkstoff Polyurethan, der als Werkstoff für die Lauffläche eingesetzt wird.

## 2.1 Analyse des Rad – Schiene-Kontakts

Die Kraftübertragung zwischen Rad und Schiene ist entscheidend für die Fahrsicherheit, den Fahrkomfort und den Verschleiß. Das Rad trägt das Schienenfahrzeug und hält dieses in der Spur. Bei der Konstruktion von Rad und Schiene ist es deshalb notwendig, die im Kontaktbereich auftretenden Kräfte und Spannungen zu kennen.

Um eine effiziente und zielorientierte Lösung des Kontaktproblems durchführen zu können und um anschließend die richtigen Theorien zur Berechnung auszuwählen, ist eine genaue Analyse des Systems „Rad-Schiene“ notwendig. Das Vorgehen bei der Analyse des Systems kann in folgende Schritte eingeteilt werden:

- Betrachtung der Kontaktgeometrie
- Bestimmung der auftretenden Kräfte
- Bestimmung der Materialien und deren Eigenschaften

Nachstehend soll das Vorgehen für die einzelnen Punkte kurz erläutert werden.

### Betrachtung der Kontaktgeometrie

Der erste Schritt der Analyse ist die Betrachtung der vorhandenen Geometrie der im Kontakt stehenden Körper. Hierbei wird untersucht, wo mögliche Berührungspunkte zwischen Rad und Schiene auftreten können. Des Weiteren ist es bei vielen Profilen der Fall, dass Zweipunkt- bzw. Mehrpunktberührungen vorkommen, die die Größe der Flächenpressung sehr stark beeinflussen. Wenn diese Punkte nahe bei einander liegen, tritt sogar eine Verschmelzung der Kontaktgebiete auf.

In der folgenden Abbildung ist auf der rechten Seite die Veränderung der Kontaktfläche bei der Erhöhung der Anzahl der Kontaktpunkte von einem bis hin zu drei und wieder zu einem Kontaktpunkt ersichtlich.

Im Falle von nur einem Kontaktpunkt, ist in der Abbildung nur eine einzige ellipsenförmige Kontaktfläche zu sehen (rechte Seite, erstes und letztes Bild). Bei Zweipunktkontakt wirkt es so, als ob zwei Kontaktflächen miteinander verschmolzen wären (rechte Seite, zweites Bild). Beim Dreipunktkontakt ist neben der verschmolzenen Kontaktfläche noch ein weiterer Kontaktpunkt sichtbar (rechte Seite, drittes Bild).

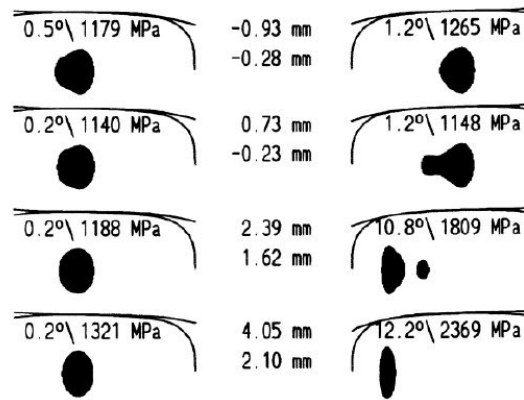


Abbildung 4: Beispiel von Kontaktflächen bei Mehrpunktberührung <sup>4</sup>

Im Zuge der Betrachtung der Kontaktpunkte sollten ebenfalls die Krümmungen im Kontaktgebiet untersucht werden, da diese für die Auswahl des Berechnungsmodells für die Lösung des Kontaktproblems eine wichtige Rolle spielen. Je nach Profil der Lauffläche ist es möglich, dass in einem Kontaktgebiet unterschiedliche Krümmungsradien vorhanden sind.

### Bestimmung der auftretenden Kräfte

Nachdem die möglichen Kontaktpunkte festgestellt wurden, müssen die zwischen Rad und Schiene übertragenen Kräfte bestimmt werden. Hier ist zu unterscheiden, ob es sich um ein Rad, das mit einem Moment um die Rollachse belastet ist (Antrieb oder Bremse), oder um ein frei laufendes Rad handelt.

Bei einem ungebremsten und nicht angetriebenen Rad müssen, abgesehen vom Rollwiderstand, nur die Kräfte, die durch den Gewichtsanteil des zu tragenden Fahrzeugs sowie durch die Kurvenfahrt entstehen, zwischen Rad und Schiene übertragen werden. Hierbei können je nach Lage der Lauffläche zur Schiene im Kontaktgebiet Normalkräfte und Tangentialkräfte in lateraler Richtung auftreten.

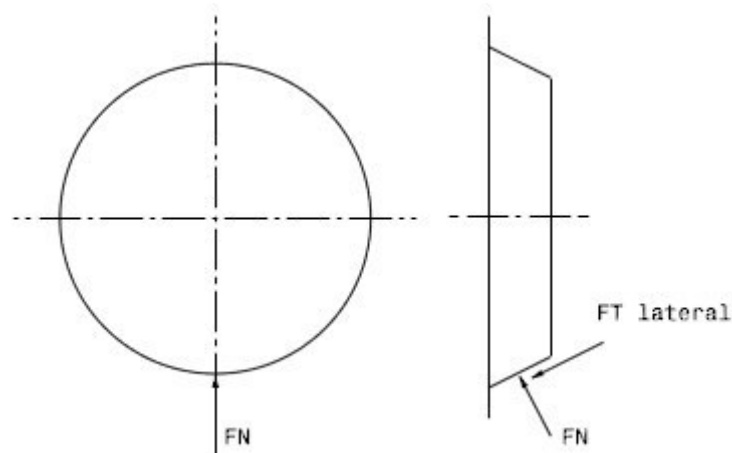


Abbildung 5: Kräfte auf ein frei rollendes Rad

<sup>4</sup> Piotrowski J., 2005, S. 458

Bei einem mit einem Moment behafteten Rad tritt, neben den oben schon beschriebenen Kräften, zusätzlich eine Tangentialkraft in longitudinaler Richtung auf. Diese entsteht durch das Antriebs- bzw. Bremsmoment. Dadurch müssen die Theorien des Tangentialkontaktproblems für die Bestimmung der Schubspannungen herangezogen werden. Hierbei wird die Oberflächenrauheit und der Schlupf zwischen Rad und Schiene berücksichtigt.

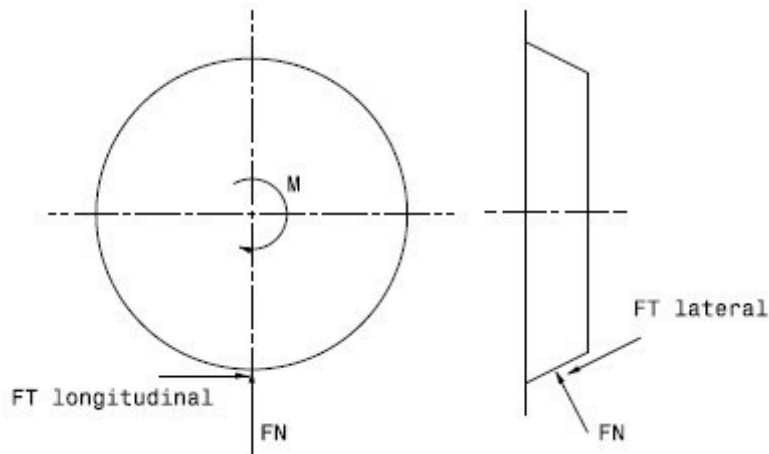


Abbildung 6: Kräfte auf ein Rad, das mit einem Moment behaftet ist

### Bestimmung der Materialien und deren Eigenschaften

Der nächste Schritt der Analyse des Systems ist die Berücksichtigung der Materialien. Dies ist essentiell für die weitere Vorgehensweise, da die Materialeigenschaften die Wahl der anzuwendenden Theorie beeinflussen. Hierbei müssen folgende Fragen geklärt werden:

- Weisen beide Kontaktpartner dieselben Materialparameter auf?
- Handelt es sich um Metall oder Kunststoff?
- Ist das Materialverhalten elastisch, viskoelastisch oder möglicherweise bei den vorhandenen Kräften plastisch?

Welchen Einfluss die Materialien auf die Ermittlung der Kontaktgrößen haben, wird in den anschließenden Kapiteln erläutert.



## 2.2 Normalkontaktproblem nach Hertz

Normalkontakt tritt in vielen technischen Anwendungen auf, bei denen sich zwei Körper durch Krafteinwirkung auf einem kleinen Teil ihrer Oberfläche berühren und dabei im Kontaktgebiet nur Kräfte, die normal zur Berührfläche stehen, auftreten. Das Ziel ist nun einerseits die Größe der Kontaktfläche zu bestimmen und andererseits die Spannung zu ermitteln, die in der Berührfläche auftritt. Ein weiterer Aspekt der mit der Untersuchung der Größe der Kontaktfläche einher geht, ist die Berechnung der Eindringung bzw. Abplattung der Körper.

Ein Name, der bei der Erforschung dieses Problems eine sehr große Rolle spielt, ist Heinrich Hertz. Seine im Jahr 1881 beschriebene Theorie über die Berührung fester elastischer Körper gilt bis heute und wird als Grundlage für viele Rechenmodelle genutzt. Sie ermöglicht die analytische Bestimmung der Flächenpressung, der Starrkörperverschiebung bzw. Abplattung und der Größe der Berührfläche.

In seinen Untersuchungen ging er dem oben schon erläuterten allgemeinen Problem der Berührung zweier elastischer isotroper Körper, die aufgrund von Krafteinwirkung gegenseitig aufeinander einen Druck ausüben, nach. Die zwei Körper berühren sich in einem kleinen Teil der Oberfläche, wobei hier klein auf die Gesamtoberfläche des Körpers bezogen ist.<sup>5</sup>

Für die Anwendbarkeit der Formeln nach Hertz muss mindestens ein Körper einen Krümmungsradius entlang einer Koordinatenachse aufweisen. Beispiele hierfür wären die Berührung zweier Zylinder oder zweier Kugeln. Bei der Berührung zweier Zylinder bzw. eines Zylinders mit einer Ebene spricht man von einer Linienberührung, wohingegen der Kontakt von zwei Kugeln als Punktkontakt bezeichnet wird. Zusätzlich gelten einige weitere Voraussetzungen für die Gültigkeit der Theorie nach Hertz, die im nachstehenden Abschnitt genauer erläutert werden.

Nach Hertz nimmt die Kontaktfläche bei Punktkontakt die Form einer Ellipse an. Diese kann mittels von ihm analytisch berechneten Formeln und Beiwerten aus Tabellen einfach bestimmt werden. Des Weiteren ist es möglich, die Flächenpressung in jedem Punkt innerhalb der Ellipse zu berechnen und die gegenseitige Eindringung der beiden Körper zu ermitteln.

Diese Formeln sind ein wichtiges Hilfsmittel bei der Berechnung von Rad-Schiene-Kontakten. Sie helfen bei der richtigen Auswahl der Werkstoffe und der richtigen Dimensionierung der Abmessungen. Brändlein<sup>6</sup>, Severin<sup>7</sup> und Steinhilper<sup>8</sup> haben in ihren Arbeiten die Formeln nach Hertz sehr gut beschrieben und zusammengefasst.

<sup>5</sup>Vgl. Hertz H., 1881, S. 156ff.

<sup>6</sup> Brändlein J., 1995, S. 96ff.

<sup>7</sup> Severin D., 1989, S. 123f.

<sup>8</sup> Steinhilper W., 2008, S. 96ff.

## 2.2.1 Voraussetzungen für die Anwendung der Hertzschen Theorie

Die Theorie von Hertz gilt nicht für jeden Fall der Berührung zweier Körper. Die Voraussetzungen für die Gültigkeit und Anwendbarkeit der Formeln nach Hertz sollen in diesem Abschnitt behandelt werden.

- Grundsätzlich ist die Theorie von Hertz nur anwendbar, wenn mindestens einer der im Kontakt stehenden Körper gekrümmt ist, sodass entweder eine Punkt- oder Linienberührung auftritt. Die Körper dürfen dabei maximal eine Fläche zweiten Grades besitzen. Um die Krümmungsradien bestimmen zu können, müssen die Abmessungen der sich berührenden Körper bekannt sein.<sup>9</sup>  
Die sich ergebene Kontaktfläche ist bei Punktberührung elliptisch. Bei einer Linienberührung ergibt sich eine rechteckige Kontaktfläche (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).
- Die Krümmung muss im betrachteten Kontaktgebiet konstant sein. Ist diese nicht konstant muss eine erweiterte Theorie angewendet werden.<sup>10</sup>
- Die sich berührenden Körper müssen aus einem homogenen, isotropen Material bestehen. Hierbei untersuchte Hertz nur den Kontakt zweier Körper aus dem selben homogenen, isotropen Werkstoff. Für die Berechnungen nach Hertz muss der Elastizitätsmodul beider in Kontakt stehenden Werkstoffe bekannt sein. Anpassungen für unterschiedliche Werkstoffe werden im Rahmen dieser Arbeit erläutert.<sup>11</sup>
- Die Betrachtung der Flächenpressung mittels Hertzscher Theorie ist nur bei elastischen Materialverhalten zulässig. Sobald sich das Material eines der beiden Körper plastisch verformt, darf nicht nach Hertz vorgegangen werden.<sup>12</sup>
- Die Abmessungen der Kontaktfläche müssen klein im Bezug auf die Größe der betrachteten Körper sein, damit die Halbraumtheorie erfüllt ist.<sup>13</sup>
- Der Kontakt zwischen den zwei Körpern darf nicht konform sein.<sup>14</sup> Konformer Kontakt bedeutet, dass sich beide Kontaktpartner eng aneinander schmiegen (konkave auf konvexe Fläche) und die Last von einer großen Kontaktfläche getragen wird.<sup>15</sup>
- Die Oberfläche beider Körper wird ideal glatt angenommen.<sup>16</sup>
- Struktur- und Kontaktmechanik können getrennt voneinander behandelt werden.<sup>17</sup>

<sup>9</sup> Vgl Knothe K., 2003, S 52f

<sup>10</sup> Vgl ebenda

<sup>11</sup> Vgl. ebenda

<sup>12</sup> Vgl. Steinhilper W., 2008, S. 97

<sup>13</sup> Vgl. Severin D.; Hammele W., 1989, S.123

<sup>14</sup> Vgl. Quost, 2006, S. 791

<sup>15</sup> Vgl Steinhilper, 2012, S. 30

<sup>16</sup> Vgl Hertz H., 1881, S. 156

## 2.2.2 Formeln und Beschreibung der Theorie nach Hertz

Unter den bereits beschriebenen Voraussetzungen ist die Anwendung der nun folgenden Formeln nach Hertz zulässig. Lediglich wenige Daten, wie Krümmungen, Materialkennwerte und die Normalkraft müssen für die Bestimmung der Flächenpressung im Bereich der Kontaktfläche und der Starrkörperverschiebung bekannt sein.

Wichtig hierbei ist, wie öfters schon erwähnt, die Unterscheidung zwischen Punkt- und Linienberührung. Aufgrund der unterschiedlichen Form der Kontaktflächen (Ellipse und Rechteck) sind verschiedene Formeln für die Bestimmung der Flächenpressung heranzuziehen.

Als Grundlage für die Berechnungen muss ein geeignetes Koordinatensystem eingeführt werden. Bei diesem Koordinatensystem ist es üblich, dass die z-Achse normal auf die Kontaktfläche steht und die x-Achse in Rollrichtung der Körper zeigt.

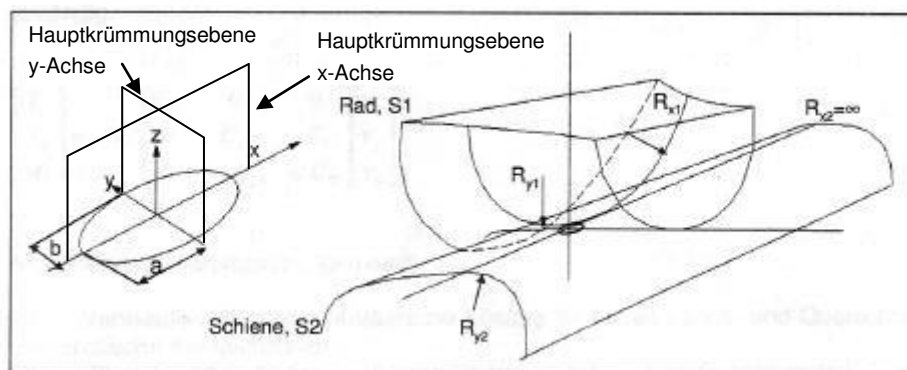


Abbildung 7: Koordinatensystem Punktberührung<sup>18</sup>

<sup>17</sup> Knothe K., 2003, S. 52

<sup>18</sup> Vgl. Stribersky A., 2014, S. 3.3

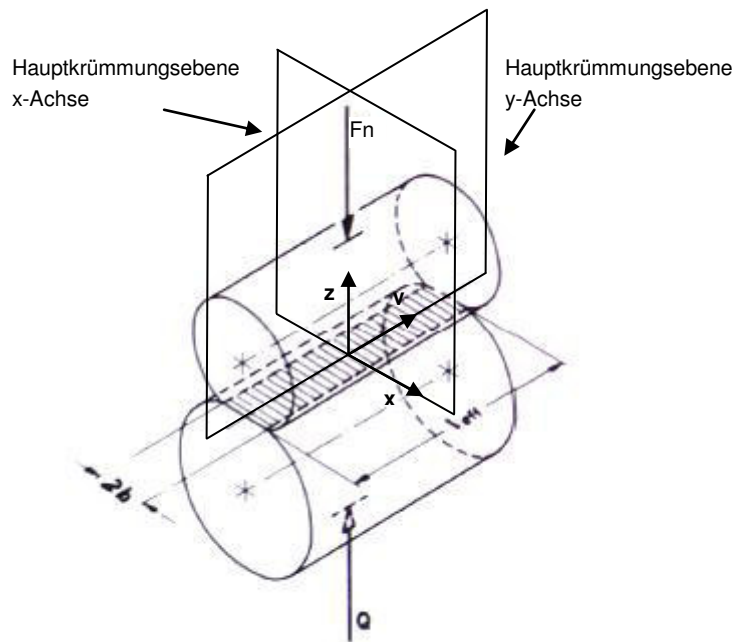


Abbildung 8: Koordinatensystem Linienberührung<sup>19</sup>

Die Krümmungsradien der beiden Körper, die für die Berechnung essentiell sind, werden durch die Hauptkrümmungsebenen entlang der x- und der y-Achse festgelegt. Index 1 in Abbildung 7 kennzeichnet das Rad, Index 2 die Schiene. Je nachdem, ob sich der Krümmungsradius innerhalb oder außerhalb des Körpers befindet, ist dieser positiv oder negativ, wie in der nachstehenden Abbildung deutlich wird.

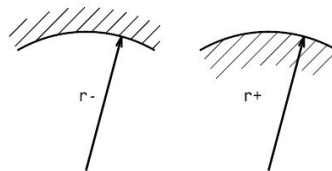


Abbildung 9: Positive und negative Krümmungsradien<sup>20</sup>

## Punktberührung

Punktberührung tritt dann auf, wenn mindestens ein Kontaktpartner Krümmungsradien auf beiden Krümmungshalbachsen aufweist, oder wenn die Kontaktpartner jeweils auf verschiedenen Hauptachsen eine Krümmung besitzen. Beispiele hierfür wären die Berührung eines kugelförmigen Körpers mit einer Ebene oder der Kontakt eines Zylinders mit einer profilierten Schiene.

Die dadurch entstehende Berührfläche nimmt nach Hertz die Form einer Ellipse an. Für die Bestimmung der Abmessung der Kontaktellipse werden die beiden

<sup>19</sup> Vgl. Brändlein J, 1995, S. 106

<sup>20</sup> Vgl. Brändlein J., 1995, S. 98

Halbachsen  $m$  und  $n$  der Ellipse nach den folgenden Formeln berechnet, wobei  $m$  stets die kleine Halbachse bildet. Dies ist später für die Zuordnung der Halbachsen zum Koordinatensystem wichtig.<sup>21</sup>

$$m = \mu \cdot \sqrt[3]{3 \cdot Fn \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1 - \nu^2}{E}}$$

**Formel 1: Halbachse m**

$$n = \eta \cdot \sqrt[3]{3 \cdot Fn \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1 - \nu^2}{E}}$$

**Formel 2: Halbachse n**

$\rho$  ist hier die Summe aller Krümmungen:

$$\rho = \frac{1}{R_{x,1}} + \frac{1}{R_{y,1}} + \frac{1}{R_{x,2}} + \frac{1}{R_{y,2}}$$

**Formel 3: Summe der Krümmungen**

$F_n$  ist die Normalkraft, die beide Körper aneinander drückt.

Die vor der Wurzel stehenden sogenannten Hertzschen Beiwerte  $\mu$  und  $\eta$  sind mittels eines Hilfswertes  $\cos(\tau)$  aus Tabellen auszulesen, welche z.B. bei Brändlein<sup>22</sup> und Steinhilper<sup>23</sup> zu finden sind. Da die Halbachse  $n$  für die Gültigkeit der nachstehenden Zuordnung zum Koordinatensystem immer die größere Halbachse sein muss und in der Literatur unterschiedliche Nomenklatur bezüglich der Hertzschen Beiwerte herrscht, muss für den Beiwert  $\eta$  immer der größere der beiden Beiwerte eingesetzt werden.

Der Hilfswert  $\cos(\tau)$  wird wie folgt berechnet:

$$\cos(\tau) = \frac{\left| \frac{1}{R_{x,1}} - \frac{1}{R_{y,1}} + \frac{1}{R_{x,2}} - \frac{1}{R_{y,2}} \right|}{\rho}$$

**Formel 4: Hilfswinkel**

<sup>21</sup> Vgl. Severin D., 1989, S. 124

<sup>22</sup> Brändlein J., 1995, S. 99f.

<sup>23</sup> Steinhilper W., 2008, S. 98

In die bisherigen Formeln zur Bestimmung der Halbachsen wurde die Lage dieser zum Koordinatensystem nicht berücksichtigt. Abhängig von den Krümmungen in den Krümmungshauptachsen (siehe Abbildung 7) wird die Lage der Halbachsen  $m$  und  $n$  im Koordinatensystem durch folgenden geometrischen Vergleich festgelegt<sup>24</sup>:

$$\text{wenn } \frac{1}{R_{x,1}} + \frac{1}{R_{x,2}} \geq \frac{1}{R_{y,1}} + \frac{1}{R_{y,2}} \text{ dann } \begin{cases} m = a \\ n = b \end{cases} \text{ bei } m \leq n$$

$$\text{wenn } \frac{1}{R_{x,1}} + \frac{1}{R_{x,2}} \leq \frac{1}{R_{y,1}} + \frac{1}{R_{y,2}} \text{ dann } \begin{cases} m = b \\ n = a \end{cases} \text{ bei } m \leq n$$

#### Formel 5: Zuweisung Halbachsen

Mit Hilfe der ermittelten Halbachsen der Kontaktellipse ist es nun möglich die Flächenpressung in jedem Punkt innerhalb der Ellipse zu bestimmen.

$$\sigma_{zz}(x, y) = \frac{3 \cdot Fn}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}$$

#### Formel 6: Spannung Punktberührung

Die Flächenpressung ist halb elliptisch über die x- und y-Achse verteilt und hat im Ursprung ihr Maximum.

Die Verformung (Eindringung) bei der Berührung wird wie folgt bestimmt:

$$\delta = \kappa \cdot \sqrt[3]{\frac{3^2 \cdot \rho \cdot (1 - \nu^2)^2 \cdot Fn^2}{2^3 \cdot E^2}}$$

#### Formel 7: Eindringung Punktberührung

$\kappa$  ist in dieser Formel der zugehörige Hertzsche Beiwert der aus der Literatur zu entnehmen ist. Steinhilper verwendet für diese Beiwert die Bezeichnung  $\kappa = \frac{2K}{\pi\xi}$ <sup>25</sup>.

### Linienberührung

Obwohl der in dieser Arbeit untersuchte Fall des Rad-Schiene-Kontakts keine Linienberührung aufweist, wird diese hier der Vollständigkeit halber kurz behandelt. Linienberührung tritt dann auf, wenn ein Körper nur eine Krümmung in einer Hauptkrümmungsebene aufweist und der Kontaktpartner eben oder ebenfalls nur eine Krümmung in derselben Hauptkrümmungsebene besitzt. Beispiele hierfür wären der Kontakt eines Zylinders bzw. einer Walze mit einer ebenen Fläche oder der Kontakt zweier achsparalleler Zylinder.

Die entstehende Kontaktfläche im Falle der Linienberührung nimmt die Form eines Rechtecks an. Die Länge  $l$  des Rechtecks ist gleich der Länge des Zylinders. Falls

<sup>24</sup> Vgl. Severin D., S. 124

<sup>25</sup> Vgl. Steinhilper W., 2008, S. 98

zwei Walzen unterschiedlicher Größe aneinander gepresst werden, ist  $l$  die Länge der kürzeren Walze. Die halbe Breite  $b$  (siehe Abbildung 8) der Kontaktfläche wird anhand einer von Hertz angepassten Formel bestimmt.

$$b = \sqrt{\frac{8 \cdot Fn}{\pi \cdot l} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1 - \nu^2}{E}}$$

**Formel 8: Breite Kontaktfläche bei Linienberührung<sup>26</sup>**

$Fn$  ist wiederum die Kraft, mit der die beiden Körper zusammen gedrückt werden.

$\rho$  ist die Summe der Krümmungen.

Die Flächenpressung ist von der Lage innerhalb der Kontaktfläche abhängig und halb elliptisch über die Breite  $2b$  verteilt.

$$\sigma_{zz}(x) = \frac{2 \cdot Fn}{\pi \cdot b \cdot l} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{b}\right)^2}$$

**Formel 9: Spannung bei Linienberührung<sup>27</sup>**

Die Bestimmung der Abplattung bei Linienberührung ist nach Hertz nicht möglich. Hier gibt es nur eine empirische Formel für die Verformung von Stahl/Stahl-Paarungen.<sup>28</sup>

$$\delta = \frac{4,05}{10^5} \cdot \frac{Fn^{0,925}}{l^{0,85}}$$

**Formel 10: Empirische Formel für Eindrigung bei Linienberührung**

### 2.2.3 Normalkontakt zwischen Kunststoffrad und Stahlschiene

Bei den bisherigen Betrachtungen des Normalkontaktproblems wurde von der Erfüllung aller Voraussetzungen der Theorien nach Hertz ausgegangen. Die Körper, die beim klassischen Rad-Schiene-Kontakt in Berührung kommen, weisen beide annähernd die gleichen Materialeigenschaften auf (Stahl auf Stahl) und sind homogene, isotrope Körper. Ihr Kontaktgebiet ist klein im Gegensatz zu ihren Körperabmessungen und das Materialverhalten ist linear elastisch. Ausgenommen hierbei ist die Betrachtung der Krümmungsverhältnisse der Radprofile im Kontaktgebiet, die in Kapitel 2.3 genauer erläutert werden.

Die Behandlung des Normalkontaktproblems bei Rädern, die eine Lauffläche aus Kunststoff besitzen, wie es z.B. bei den in dieser Arbeit untersuchten Rollen der Fall

<sup>26</sup> Vgl. Steinhilper W., 2008, S. 100

<sup>27</sup> Vgl. Severin D., 1989, S. 124

<sup>28</sup> Steinhilper W., 2008, S. 101

ist, bedarf jedoch einer genaueren Überprüfung der Materialeigenschaften, ob die Voraussetzungen für die Anwendung der Theorie von Hertz erfüllt werden.

Viele Kunststoffe weisen im Vergleich zu Stahl kein schön linear-elastisches Verhalten auf und verformen sich bei wesentlich geringeren Lasten plastisch.

Des Weiteren müssen je nach eingesetztem Kunststoff neben dem E-Modul und der Querkontraktionszahl eventuell auch die Retardationszeit und das Steifigkeitsverhältnis bei den Berechnungen berücksichtigt werden. Dies ist bei Einsatz von viskoelastischen Materialien als Bandagenwerkstoff der Fall.<sup>29</sup>

Obwohl die Behandlung des Normalkontaktproblems von Kunststoffen mittels des Ansatzes von Hertz auf den ersten Anblick nicht möglich scheint, ist keine pauschale Aussage über die Gültigkeit der Formeln zu treffen. Die Vielzahl von Kunststoffen und deren unterschiedlichsten Eigenschaften bedarf einer genaueren Überprüfung jedes einzelnen Normalkontaktproblems.

Der Kontakt eines mit einer Kunststoffbandage überzogenen Rades bzw. eines reinen Kunststoffrades mit einem gleichwertigen Kontaktpartner oder einer harten Oberfläche wurde aufgrund der häufigen Anwendung öfters in der Literatur behandelt.

Das allgemeine Problem des Kontaktes eines Kunststoffrades mit einer Stahlfahrbahn wurde von Severin<sup>30</sup> und Möhler<sup>31</sup> ausführlich betrachtet. Severin vergleicht in seinem Artikel gemessene Kraftschluss-Schlupf Beziehungen mit berechneten Werten und gibt als Einführung eine Zusammenfassung über mögliche Theorien zu Normal- und Tangentialkraftberechnung an. Möhler führte Messungen der auftretenden Kräfte im Kontaktpunkt eines rollenden Kunststoffrades mit einer Stahlfahrbahn durch und stellte die Ergebnisse den rechnerisch bestimmten Größen gegenüber. Sowohl Severin als auch Möhler erwähnen, dass bei Erfüllung gewisser nachfolgend beschriebener Bedingungen des Werkstoffverhaltens die Theorie von Hertz angewendet werden kann. Des Weiteren untersuchten Severin und Möhler unter Anderem den Werkstoff Polyurethan.

Wie bereits erwähnt weisen Kunststoffe im Allgemeinen kein linear elastisches Verhalten auf. Ist der Werkstoff im betrachteten Belastungsbereich jedoch elastisch, genauer gesagt linear elastisch, so ist eine Grundbedingung für die Ermittlung der Größen des Kontaktproblems nach Hertz erfüllt.<sup>32</sup>

Zusätzlich muss bei Rollen, auf denen eine Kunststoffbandage aufgebracht ist, die Dicke des Ringes ausreichend groß gegenüber den Abmessungen der Berührungsfläche sein.<sup>33</sup> Die Bandagenstärke muss so gewählt werden, dass die

<sup>29</sup> Vgl. Möhler P., 1995, S. 30f.

<sup>30</sup> Severin D., 1989, S. 123ff bzw. 163ff.

<sup>31</sup> Möhler P., 1995, S. 29ff.

<sup>32</sup> Vgl. Severin D., 1989, S. 123

<sup>33</sup> Vgl. Möhler P., 1995, S. 29



Gültigkeit des Halbraummodells angenommen werden kann.<sup>34</sup> Jedoch ist nicht beschrieben, welche Grenzwerte für die Verhältnisse der Abmessungen für die Gültigkeit der Theorie nach Hertz gelten. Lediglich Severin verwendet bei seinen Untersuchungen ein Verhältnis der Bandagendicke von Außen- zu Innendurchmesser von 1.5, definiert dieses Maß aber auch nicht als Grenzwert.

Für die Berücksichtigung der unterschiedlichen Werkstoffe in den Formeln von Hertz wird der Mittelwert, der für die Berechnung relevanten Materialkennwerte, gebildet. Die Indizes bezeichnen hierbei wieder die unterschiedlichen Körper.

$$\frac{1 - \nu^2}{E} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)$$

**Formel 11: Materialkennwert bei unterschiedlichen Werkstoffen**

Dieser Wert wird anschließend in die schon erläuterten Formeln eingesetzt. Somit kann bei unterschiedlichen Werkstoffen das Normalkontaktproblem ebenfalls mittels Hertz gelöst werden.

Falls es sich jedoch um einen viskoelastischen Kunststoff handelt, gelten die oben beschriebenen Annahmen größtenteils nicht. Im Gegensatz zur klassischen Elastizitätstheorie, wo ein linearer und zeitunabhängiger Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung besteht, werden die Materialkennwerte bei viskoelastischen Werkstoffen von der Belastungszeit und der Belastungsfrequenz beeinflusst.<sup>35</sup> Die Beschreibung des zeitabhängigen viskoelastischen Materialverhaltens erfolgt mit dem in Abbildung 10 gezeigten 3-Parameter-Modell, welches eine einfache Lösung für die Bestimmung der Materialkennwerte nicht mehr zulässt. Das nachmodellerte, schwingungsfähige, viskoelastische System besteht aus einer Feder, die in Serie mit einer Parallelschaltung von einer Feder und einem Dämpfer verbunden ist. Dabei ist die Rollgeschwindigkeit des viskoelastischen Rades zu berücksichtigen. Falls die Rollgeschwindigkeit gleich Null ist, verhält sich das Material rein elastisch und das Modell geht in eine Serienschaltung von zwei Federn über. Auch wenn die Rollgeschwindigkeit nicht begrenzt ist, kann man ein rein elastisches Materialverhalten erkennen. Hierbei wird das 3-Parametermodell durch einen einzigen E-Modul ersetzt.<sup>36</sup>

<sup>34</sup> Vgl. Severin D., 1989, S. 165

<sup>35</sup> Vgl. Severin D., 1994, S. 111

<sup>36</sup> Vgl. Knothe K., 1989, S. 196

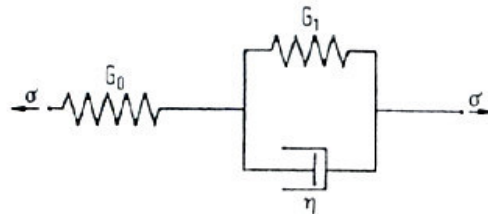


Abbildung 10: 3-Parameter-Modell<sup>37</sup>

Knothe<sup>38</sup> und Severin<sup>39</sup> beschreiben in ihren Arbeiten Möglichkeiten, um die Differentialgleichung der Materialkennwerte numerisch und durch zusätzliche Versuche bzw. Messungen zu bestimmen. Nach aufwendiger Berechnung dieser ist nach Severin die Bestimmung der quasi-Hertzschen Normalspannungsverteilung durch Ersetzen des E-Moduls durch einen viskoelastischen E-Modul möglich.

Da der in dieser Arbeit untersuchte Werkstoff kein viskoelastischer Kunststoff ist, wird für die genaue Vorgehensweise bei viskoelastischen Kunststoffrollen auf die Arbeit von Severin verwiesen.

Die in diesen Abschnitt betrachtete Literatur zum Thema Kunststofflaufräder auf Stahlfahrbahn haben gezeigt, dass unter den gegebenen Bedingungen auch bei Kunststoffrollen die Flächenpressung mittels der Methode von Hertz bestimmt werden kann. Deshalb wird auch im praktischen Teil versucht das Normalkontaktproblem mit der Theorie von Hertz zu lösen.

## 2.3 Erweiterungen der Theorie nach Hertz

Eine Voraussetzung, die für die Anwendung der Theorie von Hertz notwendig ist und häufig bei vielen Rad-Schiene-Kontakten nicht erfüllt wird, ist die Bedingung der konstanten Krümmung im Kontaktgebiet.

Aufgrund der heute eingesetzten Radprofile kommt es sehr oft vor, dass beim Verlassen der Nominallage, z.B. in der Kurvenfahrt, das Profil im Kontaktgebiet keine konstante Krümmung aufweist bzw. Mehrpunktberührung auftritt.



Abbildung 11: Beispiel für einen Mehrpunktkontakt<sup>40</sup>

In diesen Fällen ist es nicht mehr möglich nach der Theorie von Hertz vorzugehen, da die auftretenden Kontaktflächen nicht mehr die Form einer Ellipse annehmen.

Deshalb wurden weitere Theorien entwickelt, die sich mit der Lösung dieser Kontaktprobleme beschäftigen. Hierbei ist zwischen den Methoden zu unterscheiden,

<sup>37</sup> Knothe K., 1989, S. 194

<sup>38</sup> Knothe K., 1989, S. 193ff.

<sup>39</sup> Severin D., 1994, S.110ff

<sup>40</sup> Piotrowski J., 2005. S. 458

die den nicht elliptischen Kontaktbereich durch mehrere Ellipsen annähern und denjenigen, die die gesuchten Größen des Kontaktproblems streifenweise berechnen.

Die Methoden die den nicht elliptischen Kontaktbereich durch mehrere Ellipsen annähern werden Multi-Hertz-Ansätze genannt. Als Semi-Hertz-Ansatz wird die streifenweise Berechnung der Größen des Kontaktproblems, einer durch „virtuelle Eindringung“ gebildeten Kontaktfläche, bezeichnet.<sup>41</sup> 0,

Beide Ansätze sind als Erweiterung der Theorie nach Hertz zu sehen, da diese auf den Überlegungen von Heinrich Hertz aufbauen.

Im Folgenden werden diese Ansätze genauer beschrieben.

### 2.3.1 Semi-Hertz Ansätze

Eine Möglichkeit um das Normalkontaktproblem bei un stetigen Krümmungen zu lösen ist, wie schon erwähnt, der Semi Hertz Ansatz.

Grundlage für diesen Ansatz bildet die virtuelle Ein- bzw. Durchdringung. Hierbei werden die sich berührenden Körper virtuell um einen Betrag  $\delta$  gegeneinander verschoben, sodass sie sich überschneiden. Dadurch entsteht ein Bereich, der in Abbildung 12 als „interpenetration region“ bezeichnet wird. Aufgrund der Widerstände der beiden Körper und der elastischen Verformung bildet sich jedoch ein wesentlich kleinerer Bereich, die gesuchte Kontaktzone, aus. Die Größe der Kontaktzone kann durch Verschiebung  $\delta_0 < \delta$  beschrieben werden.<sup>42</sup>

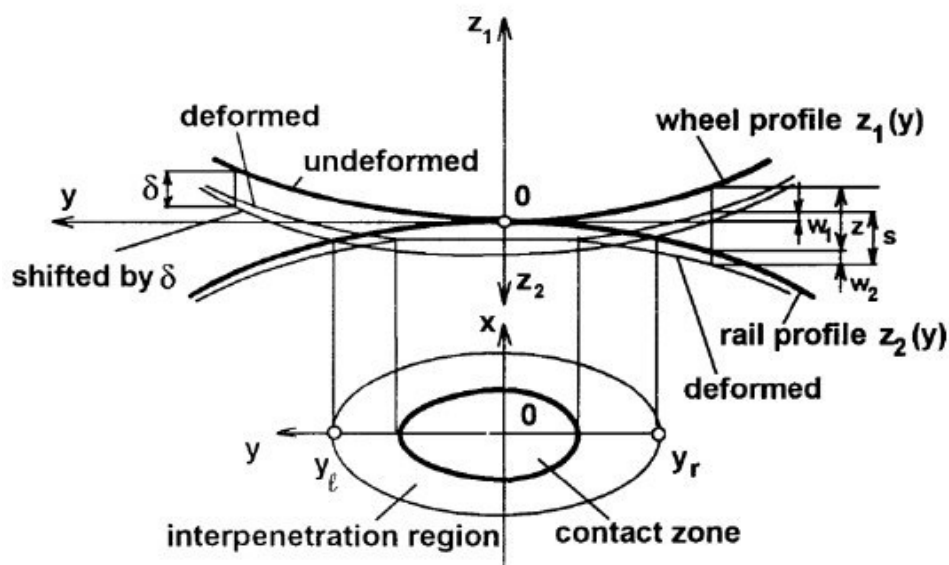


Abbildung 12: Virtuelle Ein- bzw. Durchdringung<sup>43</sup>

<sup>41</sup> Vgl. Piotrowski J., 2005, S.459

<sup>42</sup> Vgl. Piotrowski J., 2005, S. 466

<sup>43</sup> Piotrowski J., 2005, S. 466

Aufbauend auf der Theorie von Hertz wird auch bei den hier beschriebenen Ansätzen die Druckverteilung halbelliptisch angenommen. Die anfängliche virtuelle Eindringung  $\delta$  wird ebenfalls mittels der von Hertz bestimmten Formeln ausgerechnet. Je nach Ansatz werden unterschiedliche Werte für  $\delta_0$  angenommen. Linder<sup>44</sup> konnten zeigen, dass  $\delta_0 = 0,55 \cdot \delta$  eine gute Näherung für die Bestimmung der Kontaktzone ist.<sup>45</sup>

Ayasse und Chollet<sup>46</sup> geben an, dass  $\frac{\delta}{2}$  ein guter Wert für die Approximation des Kontaktgebietes ist. Zusätzlich nehmen sie im Gegensatz zum Ansatz von Linder eine Korrektur der durch die virtuelle Eindringung entstandenen Ellipse vor, da deren Form bei schlanken Kontaktgebieten nicht stimmt.<sup>47</sup>

Linder bzw. Ayasse und Chollet teilen die gefundene Ellipse in gleich große Abschnitte längs der Rollrichtung (x-Koordinate). Die einzelnen Abschnitte werden getrennt voneinander betrachtet.

In jedem Abschnitt gelten die Hertzischen Bedingungen lokal. Dies bedeutet, dass jeder Streifen eine eigene konstante Krümmung und eine eigene Eindringung besitzt. Mit der Abschnittswisen virtuellen Eindringung ist es sowohl möglich, die Halbachse der Ellipse in Rollrichtung für diesen Abschnitt zu bestimmen, als auch die dort auftretenden Normalkräfte zu berechnen.<sup>48</sup>

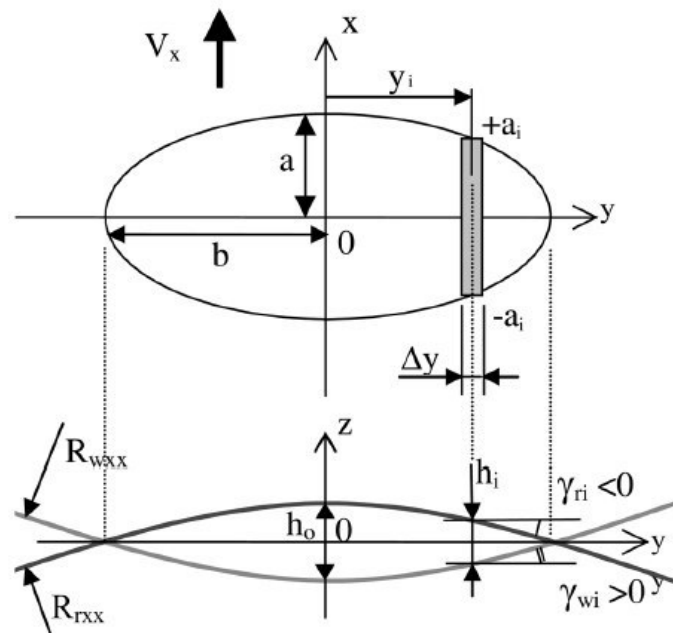


Abbildung 13: Unterteilung in Streifen<sup>49</sup>

<sup>44</sup> Vgl Linder C., 1997, S. 1ff

<sup>45</sup> Vgl. Piotrowski J., 2005, S. 466f

<sup>46</sup> Vgl Ayasse J. B., 2005, 161ff

<sup>47</sup> Vgl. Ayasse J. B., 2005, S. 162

<sup>48</sup> Vgl. Ayasse J. B., 2005, S. 164ff

<sup>49</sup> Ayasse J. B., 2005, S. 163

Die Halbachsen und Spannungen der Abschnitte werden einzeln berechnet und anschließend zusammengesetzt. So ist es möglich, auch bei Körpern die keine konstante Krümmung im Kontaktgebiet aufweisen, die Kontaktfläche sehr gut zu bestimmen.

Mit der Einbindung von FASTSIM (Programm zur Bestimmung der Tangentialkräfte, siehe Kapitel 2.5 Tangentialkontakt), ist es bei dieser Methode auch möglich, Tangentialkräfte in der Berechnung zu berücksichtigen.

Der Ansatz von Ayasse und Chollet kann mittels STRIPES Algorithmus, welcher in das Programm VOCOLIN integriert ist, am Computer berechnet werden und liefert gute Ergebnisse.<sup>50</sup>

### 2.3.2 Multi-Hertz-Ansätze

Wie in Abbildung 14 ersichtlich, wirkt es, als ob das Kontaktgebiet bei Mehrpunktberührung bzw. bei Berührung zweier Körper mit nicht konstanter Krümmung aus der Überlagerung mehrerer Ellipsen besteht. Dieser Umstand wird für die Berechnung mittels Multi-Hertz-Ansätzen herangezogen.

Bei Multi-Hertz-Ansätzen wird die nicht elliptische Kontaktfläche durch Superposition mehrerer Ellipsen angenähert. Die Schwierigkeit liegt dabei in der Wahl der richtigen Anzahl der Ellipsen, mit denen die Größe der Kontaktfläche bestimmt wird.<sup>51</sup>



Abbildung 14: Mehrpunktberührung<sup>52</sup>

Ausgangspunkt für die Bestimmung der äquivalenten Ellipse ist die Form des Kontaktgebiets und die Eindringung. Abhängig von der Krümmung der Kontaktfläche, und der Eindringung, sowie der Anzahl der gewählten Ellipsen werden die auftretenden Normalkräfte bestimmt.

Durch die bekannten Normalkräfte ist es möglich, die Größe der einzelnen Ellipsen zu berechnen und schließlich die Äquivalente Ellipse zu ermitteln.

Pascal<sup>53</sup> hat bei der Annäherung des Kontaktgebietes durch zwei Ellipsen eine einfache Formel entwickelt, mit der die Größe der äquivalenten Ellipse berechnet werden kann.

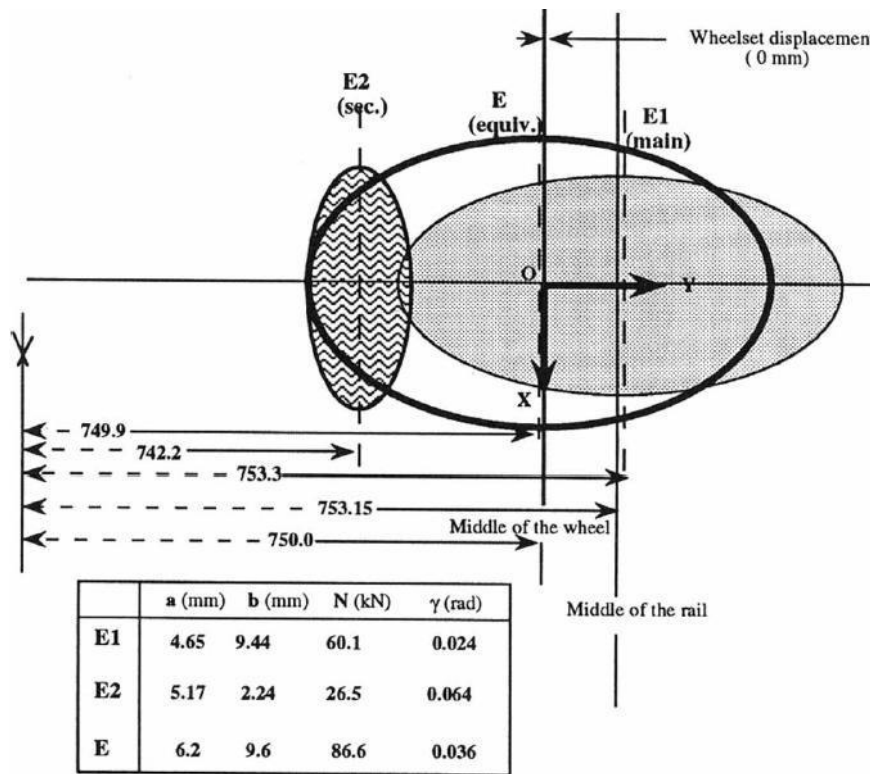
<sup>50</sup> Vgl. Piotrowski J., 2005, S. 480

<sup>51</sup> Vgl. Sebès M., 2014, S. 118

<sup>52</sup> Piotrowski J., 2005, S. 458

<sup>53</sup> Vgl Pascal J. P., 1991

$$\left(\frac{a}{b}\right)_{\text{äquiv}} = \left[ \left(\frac{a_1}{b_1}\right) \cdot FN_1 + \left(\frac{a_2}{b_2}\right) \cdot FN_2 \right] \frac{1}{FN_1 + FN_2}$$

Formel 12: Halbachsenverhältnis der äquivalenten Ellipse<sup>54</sup>Abbildung 15: Multi-Hertz-Ansatz nach Pascal<sup>55</sup>

Ayasse<sup>56</sup> hat ebenfalls eine schnelle analytische Berechnungsmethode entwickelt, um das Kontaktproblem bei Mehrpunktberührung und/oder nicht konstanter Krümmung zu lösen.

Der Multi-Hertz Ansatz von Ayasse verläuft ähnlich wie der von ihm entwickelte Semi-Hertz Ansatz. Dabei wird das Schienenprofil in Streifen unterteilt und es werden wichtige Daten wie Kontaktwinkel, Krümmung, Lage im Bezug zur Nominallage und der Spalt zwischen Schienen- und Radprofil bei Nominallage in einer Tabelle gespeichert. Aus diesen Daten werden die einzelnen Ellipsen berechnet und die äquivalente Ellipse gebildet. Für die Beschreibung der genauen Vorgehensweise wird auf die Artikel von Piotrowski<sup>57</sup> und Sebès<sup>58</sup> verwiesen.

<sup>54</sup> Vgl. Piotrowski J., 2005, S. 461

<sup>55</sup> Pascal J. P., 1993

<sup>56</sup> Ayasse J. B., 2000

<sup>57</sup> Vgl. Piotrowski J., 2005, S. 461ff

<sup>58</sup> Vgl. Sebès M., 20014, S. 118ff

## 2.4 Anpassung des Multi-Hertz-Ansatzes

Beim vorliegenden Kontakt von Spurführungsrollen und Schiene erstreckt sich, wie bei der Präsentation der Ergebnisse in Kapitel 5.3 gezeigt wird, das Kontaktgebiet über einen Bereich mit nicht konstanter Krümmung.

Um trotzdem eine analytische Berechnung mit den Formeln nach Hertz durchführen zu können, ist die Anwendung eines Multi-Hertz-Ansatzes nötig. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit die Idee des Ansatzes nach Pascal (siehe voriges Kapitel) verwendet und die Annäherung der Kontaktfläche durch mehrerer Ellipsen gebildet. Im Gegensatz zum Ansatz von Pascal, wo die Kontaktfläche durch eine äquivalente Ellipse ersetzt wird, wurde bei dem hier beschriebenen Ansatz versucht die Kontaktfläche so gut wie möglich durch mehrere Ellipsen anzunähern. Grundlage für den hier beschriebenen Ansatz bilden die Ergebnisse aus den Versuchen. Die Gültigkeit des hier beschriebenen Ansatzes ist nur bei dem in dieser Arbeit untersuchten Rad-Schiene-Kontakt überprüft.

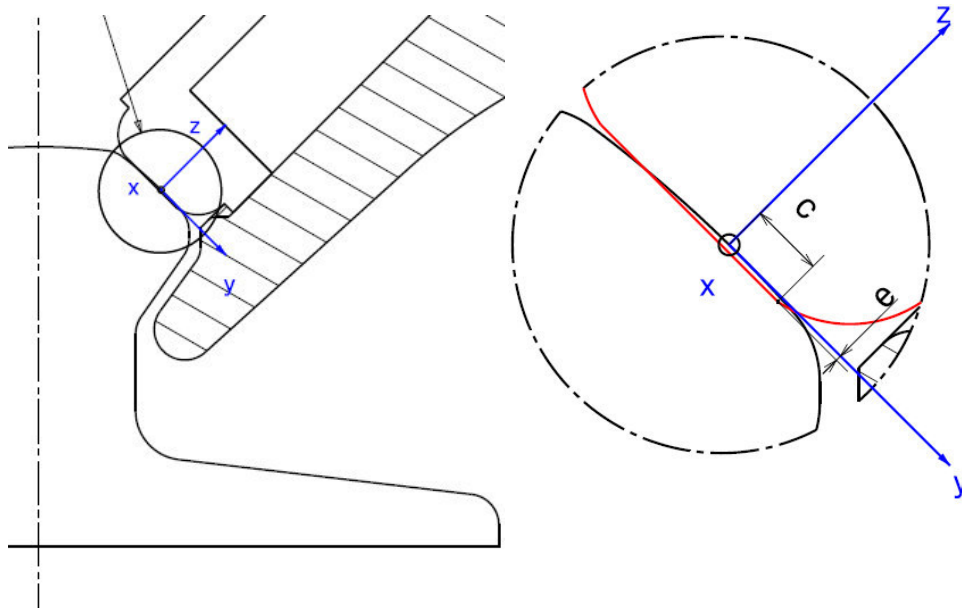
Nachfolgend ist der adaptierte Multi-Hertz-Ansatz genauer beschrieben. Dieser kann in folgende Schritte eingeteilt werden:

1. Bestimmung der Anzahl der Ellipsen
2. Ermittlung der Kräfte
3. Berechnung der Halbachsen der Ellipsen
4. Ermittlung der Spannungen

### 2.4.1 Bestimmung der Anzahl der Ellipsen

Der erste Schritt zur Berechnung der Berührungsfläche und der Flächenpressung stellt die Analyse der Kontaktfläche hinsichtlich der vorhandenen Krümmungen dar. Hierzu wird in den Kontaktpunkten die Kontaktfläche durch virtuelle Eindringung gebildet und die dort auftretenden Krümmungen untersucht (siehe Abbildung 16). Abhängig von den Krümmungsverhältnissen, wird eine Anzahl von virtuellen Kontaktpunkten festgelegt. Die virtuellen Kontaktpunkte sind jeweils die Mittelpunkte der Ellipsen, mit denen das Kontaktgebiet angenähert wird.

Im Fall, dass ein Körper im Berührungsgebiet eine konstante Krümmung aufweist und der andere Kontaktpartner zwei verschiedene Krümmungen im Kontaktgebiet besitzt, werden für die Annäherung 2 Ellipsen bzw. 2 virtuelle Kontaktpunkte gewählt.



**Abbildung 16: Skizze Eindringung Rolle-Schiene**

Beim Kontakt zwischen Spurführungsrolle und Schiene treten maximal zwei unterschiedliche Krümmungen in ein und demselben Berührungsgebiet auf. Die Krümmung der Schiene ist konstant, wohingegen die Lauffläche der Rolle am Rand eine nicht konstante Krümmung aufweist. Somit wurde die Annäherung des Kontaktgebietes mit zwei Ellipsen durchgeführt.

## 2.4.2 Ermittlung der Kräfte

Grundlage für die Berechnung der Abmessungen der Ellipsen stellt die Kenntnis der Normalkraft dar.

Anfangs ist nur die Kraft die auf die gesamte Kontaktfläche wirkt, bekannt ( $F_{ges}$ ). Diese muss geeignet auf die zwei Ellipsen aufgeteilt werden.

Angelehnt an den Multi-Hertz-Ansatz nach Pascal wird mittels der Eindringungsformel Formel nach Hertz bestimmt, ab welcher Kraft sich beide Krümmungen im Kontaktgebiet befinden (Kraft  $F_e$ ). Der Betrag der Eindringung  $\delta$  wird aus der Zeichnung des Kontaktes abgelesen (siehe Abbildung 16, Maß e). Die nachstehende Formel ist die Umformung der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Eindringungsformel nach Hertz. Die Bezeichnung  $Mat$  ersetzt hierbei die durch die Querkontraktionszahl und den E-Modul bestimmten Materialparameter  $\frac{1-\nu^2}{E}$  bzw. bei zwei verschiedenen Materialien  $\left\{ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_1^2}{E_2} \right) \right\}$ .

$$F_e = \sqrt{\frac{\delta^3 \cdot 8}{3^2 \cdot \kappa^3 \cdot Mat^2 \cdot \rho}}$$

**Formel 13: Kraft bei vorgegebener Eindringung**



Dieser Anteil geht nur in die Berechnung der Kraft für die Bildung der ersten Ellipse ( $F_1$ ) ein und wird deshalb von der Kraft abgezogen, mit denen die zwei Körper aneinander gepresst werden.

Ab dem Zeitpunkt wo beide Krümmungen das Kontaktgebiet berühren, wird angenommen, dass sich der verbleibende Kraftanteil ( $F$ ), symmetrisch auf die zwei Ellipsen aufteilt. Somit ergibt sich für die Kraftaufteilung der Ellipsen:

$$F = F_{ges} - F_e$$

**Formel 14: Anteil der aufgeteilt wird**

$$F_1 = F_e + \frac{F}{2}$$

**Formel 15: Kraftanteil Ellipse 1**

$$F_2 = \frac{F}{2}$$

**Formel 16: Kraftanteil Ellipse 2**

### 2.4.3 Berechnung der Halbachsen der Ellipsen

Nachdem die Kräfte ermittelt wurden, ist die Bestimmung der Abmessungen der beiden Ellipsen rechnerisch nach Hertz möglich.

Die Krümmungen die für die Berechnung der zwei Ellipsen herangezogen werden, sind aus der geometrischen Untersuchung der Kontaktfläche bekannt. Eine Ellipse wird mit der Krümmung der Fläche im Kontaktpunkt bestimmt (Ellipse 1). Die zweite Ellipse wird mit der Krümmung, die erst nach virtueller Eindringung des zweiten Körpers ins Kontaktgebiet eindringt, berechnet (Ellipse 2).

Für die Festlegung der Lage der zwei Ellipsen zueinander wird noch eine dritte Ellipse benötigt. Diese Ellipse wird aus den Krümmungen im geometrisch bestimmten Kontaktpunkt und der gesamten Kraft, mit denen die zwei Körper aneinander gepresst werden, bestimmt. Diese wird im Weiteren als Ellipse 3 bezeichnet.

Der Mittelpunkt von Ellipse 3 liegt genau im Kontaktpunkt der beiden Körper. Der Mittelpunkt von Ellipse 1 ist so verschoben, dass sich Ellipse 1 und Ellipse 3 berühren (siehe Abbildung 17).

Der Betrag um den der Mittelpunkt von Ellipse 2 verschoben wird, muss aus der Zeichnung bestimmt werden. Dies ist der Abstand zwischen dem Kontaktpunkt und dem Beginn der zweiten Krümmung (siehe Abbildung 16, Maß c).

Eine gute Annäherung der Kontaktfläche ergibt sich aus einer Kombination von Ellipse 2 und Ellipse 3.

Ellipse 1 wird für die Ermittlung der Spannungskurve benötigt (siehe nächster Abschnitt)

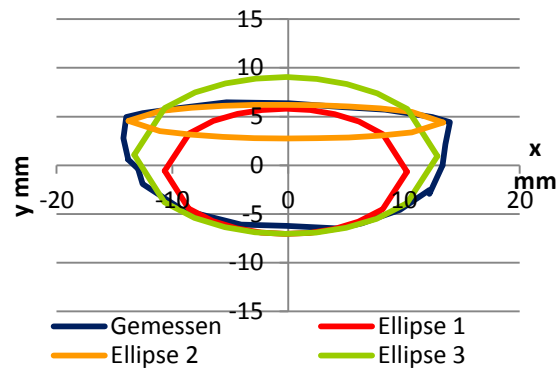


Abbildung 17: Berechnete Annäherung der Kontaktfläche bei 1749 N

#### 2.4.4 Ermittlung der Spannungen

Die Berechnung der Spannungen erfolgt ebenfalls nach Hertz. Dazu werden die zuvor bestimmten Halbachsen der beiden Ellipsen und deren Kräfte in die Formeln eingesetzt.

Ziel war es nun, eine möglichst gute Annäherung an die gemessene Spannungskurve zu erhalten. Die Spannung entlang der y-Achse wird aus den berechneten Spannungen von Ellipse 1 und Ellipse 2 gebildet (siehe Abbildung 18). Die Spannung entlang der x-Achse wird nur aus der Spannung der Ellipse 1 gebildet (siehe Abbildung 19).

Bei Betrachtung der in Abbildung 18 mit blau und violett eingezeichneten berechneten Spannungskurven entlang der y-Achse ist eindeutig erkennbar, dass die Spannungskurve von Ellipse 2 viel zu hoch ist. Um eine gute Annäherung zu erhalten wurde die Spannung von Ellipse 2 halbiert. Dies ist in Abbildung 18 durch die grün eingezeichnete Kurve dargestellt. Es ist ersichtlich, dass diese die Messergebnisse sehr gut nachbildet.

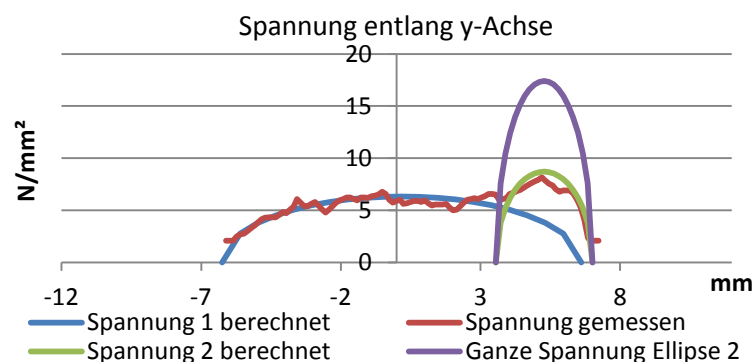
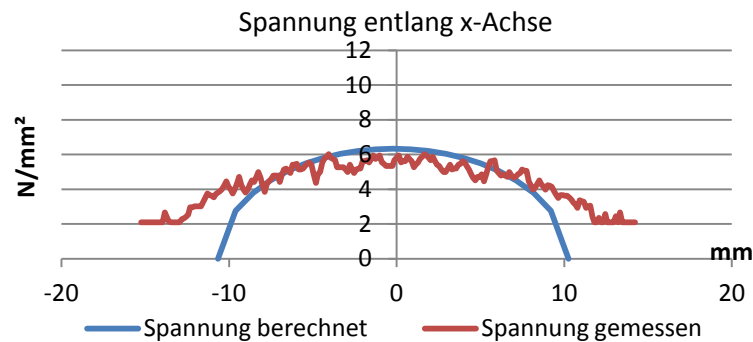
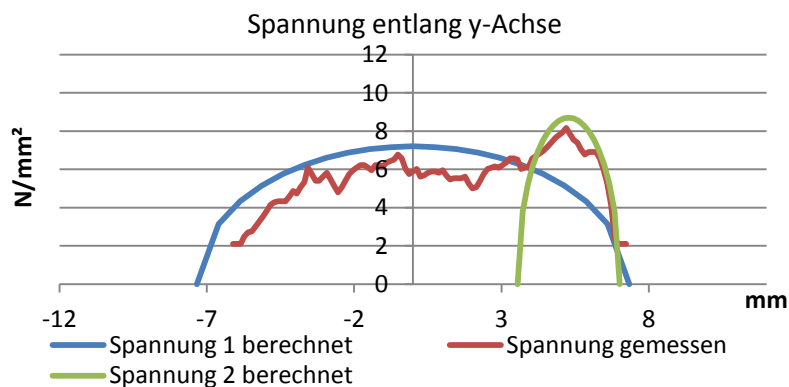


Abbildung 18: Berechnete Annäherung der Spannung entlang der y-Achse bei 1749 N



**Abbildung 19: Berechnete Annäherung der Spannung entlang der x-Achse bei 1749 N**

Hierbei ist ausdrücklich zu erwähnen, dass diese Annäherung mit halbiertes Spannung von Ellipse 2 nur lokal für den in der Kontaktfläche mittig gesetzten Schnitt entlang der y-Achse gilt. Aufgrund des Kräftegleichgewichts müsste sich bei Halbierung der Spannung der Ellipse 2, die Spannung von Ellipse 1 erhöhen. Wenn dies jedoch gemacht wird (siehe Abbildung 20) erfolgt keine so gute Annäherung an die Messergebnisse.



**Abbildung 20: Spannungsverlauf bei erhöhter Kraft von Ellipse 1**

Eine Halbierung der Spannung von Ellipse 2 ohne Vergrößerung der Kraft von Ellipse 1 ist nur bei Berücksichtigung aller Spannungen im gesamten Kontaktgebiet zulässig. Laut Hertz nimmt die Spannungsverteilung über das Kontaktgebiet die Form eines idealen Halbellipsoids an. Bei Betrachtung des Schnittes entlang der x-Achse und der 3D-Darstellung der gemessenen Spannungen (siehe Abbildung 21) fällt auf, dass die Messungen nicht die Form einer idealen Halbellipse bzw. Halbellipsoids annehmen. Mit dem angepassten Multi-Hertz-Ansatz wird lediglich die maximale Spannung sehr gut angenähert. Die Kraft die bei Halbierung der Spannung von Ellipse 2 für die Erreichung des lokalen Kräftegleichgewichts fehlt, geht global in die Bildung einer nicht halbellipsoiden Spannungsverteilung ein. Dies ist bei Betrachtung des Schnittes entlang der x-Achse sehr gut zu sehen, bei dem am Rand eine Differenz zwischen gemessener und berechneter Spannungsverteilung zu erkennen ist (siehe Abbildung 19).

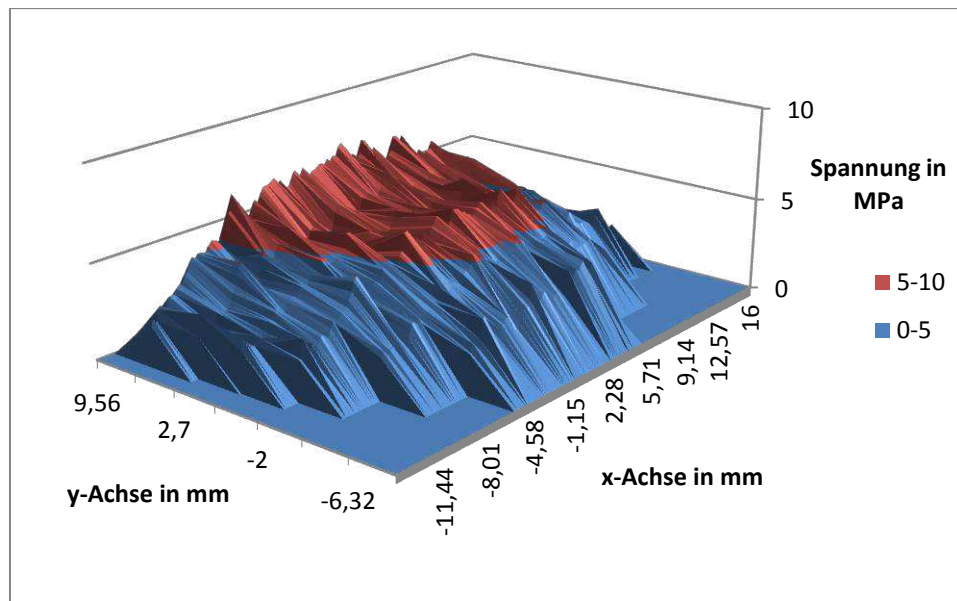


Abbildung 21: Gemessene 3D Spannungsverteilung bei 1749 N

## 2.5 Tangentialkontakt

Das Rad Schiene System ist im Allgemeinen ein bewegtes System. Obwohl der im praktischen Teil durchgeführte Versuch die auftretenden Normal- und Querkräfte statisch simuliert, soll in diesem Kapitel das Problem des Tangentialkontaktes genauer beschrieben werden.

Hierbei geht es um die detaillierte Betrachtung der Einflüsse der auftretenden Tangentialkräfte in longitudinaler Richtung auf die Kontaktfläche und die Kontaktspannungen.

Bei der Lösung des Tangentialkontaktproblems ist auch der Einfluss der Relativbewegungen zu berücksichtigen. Zwischen Rad und Schiene tritt aufgrund der Rollbewegung und der Querkräfte ein Schlupf in lateraler und longitudinaler Richtung auf, der die Spannungsverteilung im Kontaktgebiet beeinflusst.

Im Zuge dieses Kapitels werden die wichtigsten Theorien bzw. Programme für die Lösung des Tangentialkontaktproblems vorgestellt.

### 2.5.1 Reibung und Schlupf

Im Allgemeinen wirken auf ein frei rollendes Rad Widerstandskräfte, die eine Verlangsamung der Rollbewegung hervorrufen. Dazu zählen einerseits Reibkräfte, die zwischen Rad und Schiene auftreten und andererseits asymmetrisch verteilte Normalspannungen, die durch eine starke elastische Verformung des Materials eines Kontaktpartners hervorgerufen werden.

Um ein stetiges Rollen aufrecht zu erhalten, muss eine Kraft aufgewendet werden, die der Größe der Widerstandskräfte entspricht und somit den Rollwiderstand überwindet.

Um jedoch das Rad zu beschleunigen bzw. zu bremsen, muss ein zusätzliches Moment auf das Rad aufgebracht werden. Dieses Moment ruft im Kontaktgebiet neben der Radaufstandskraft eine Tangentialkraft in longitudinaler Richtung hervor, die wiederum Schubspannungen erzeugt.

In der Kontaktzone herrscht jedoch nicht vollständiges Haften. Wie Carter<sup>59</sup> 1926 in seiner Arbeit über zylindrische Räder beschrieben hat, besteht das Kontaktgebiet aus einer Haft- und Gleitzone. Hierbei wird angenommen, dass der Haft- und Gleitreibungskoeffizient identisch und über die Kontaktfläche konstant ist.

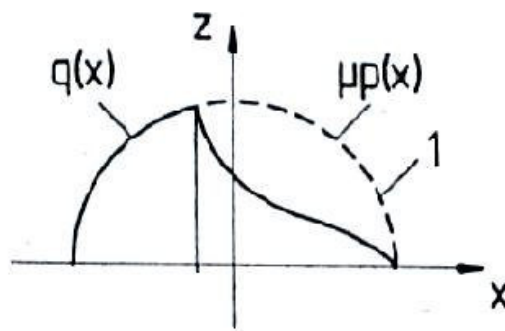


Abbildung 22: Haft- und Gleitzone bei Tangentialspannung<sup>60</sup>

Die Grenze zwischen Haften und Gleiten wird erreicht, wenn die Schubspannung  $q(x)$  das Produkt von Normalkraft  $p(x)$  und Reibungszahl  $\mu$  übersteigt, was durch den strichlierten Halbkreis mit der Ziffer 1 dargestellt ist. Die Rollrichtung zeigt in Richtung der  $x$ -Achse. Das Rad durchläuft beim Einlaufen in die Kontaktzone das Haftgebiet, wo ein Formänderungsschlupf ohne Gleiten auftritt und geht schließlich in die Gleitzone über, in der die Haftgrenze überschritten wird und ein Gleitschlupf entsteht.<sup>61</sup>

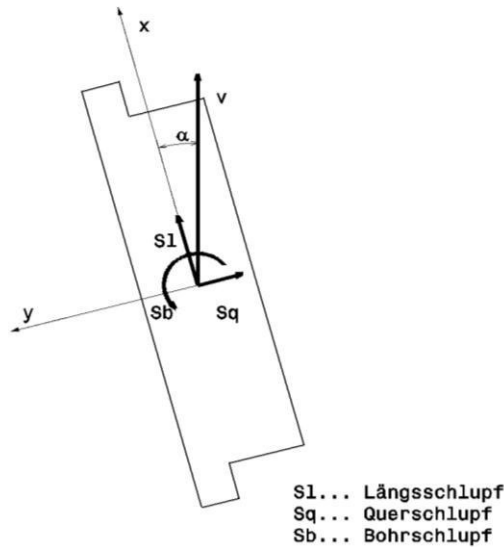
Schlupf bedeutet, dass eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der Geschwindigkeit des Schwerpunkts bzw. Mittelpunkts des Rades und der Umfangsgeschwindigkeit im Kontaktgebiet auftritt. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Längsschlupf, Querschlupf und Bohrschlupf.<sup>62</sup>

<sup>59</sup> Carter, 1926, S. 151ff

<sup>60</sup> Vgl. Severin D., 1989, S. 126

<sup>61</sup> Vgl. Severin D., 1986, S. 173

<sup>62</sup> Vgl. Fendrich L., 2013, S. 3f.

Abbildung 23: Arten von Schlupf<sup>63</sup>

Die Formel für die Berechnung des Schlupfes lauten wie folgt:

Längsschlupf: 
$$Sl = \frac{v_{Umfang} - v_x}{v}$$

**Formel 17: Längsschlupf**

Querschlupf: 
$$Sq = \frac{v_{Umfang} \cdot \sin \alpha - v_y}{v}$$

**Formel 18: Querschlupf**

Bohrschlupf: 
$$Sb = \frac{\dot{\alpha}}{v}$$

**Formel 19: Bohrschlupf**

$v$  ist hierbei eine Referenzgeschwindigkeit, die meistens der Fahrgeschwindigkeit entspricht.

Je höher der Schlupf ist, desto mehr gleitet das Rad im Kontaktgebiet. Für die Kraftübertragung zwischen Rad und Schiene ist jedoch immer ein Schlupf notwendig.

Wo der Übergang zwischen Haften und Gleiten genau stattfindet hängt in der Realität hauptsächlich vom vorhandenen Schlupf bzw. Kraftschluss zwischen Rad und Schiene ab. Bei niedrigem Schlupf ist die Größe der Gleitzone sehr gering. Bei hohem Schlupf gleitet das Rad vollständig und die Gleitzone erstreckt sich über die gesamte Kontaktfläche (siehe Abbildung 24 bei  $\frac{TL}{\mu Nl} = 1$ )

<sup>63</sup> Vgl. Abdelfattah B. 2014, S. 5

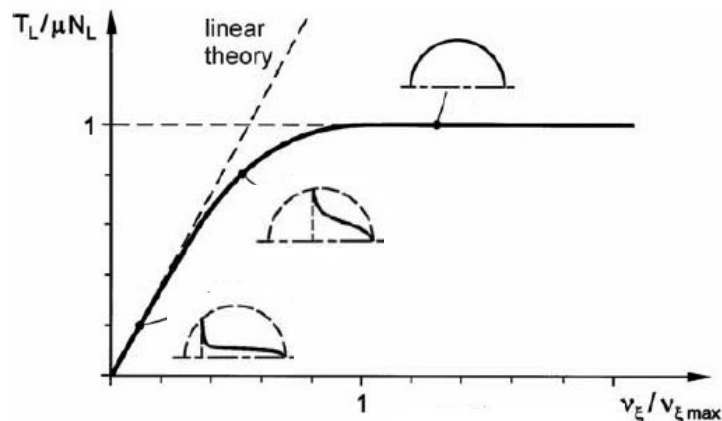


Abbildung 24: Größe Haft-/Gleitzone in Abhängigkeit vom Schlupf<sup>64</sup>

Wenn die Kontaktpartner aus unterschiedlichen Materialien bestehen, tritt eine weitere Art von Schlupf auf. Dieser ist von der Geschwindigkeit unabhängig und wird als Leerlaufschlupf bezeichnet, da er auch im tangentialkraftfreien Zustand, wie dem reinen Rollen, auftritt. Die Ursache des Schlupfes liegt in den unterschiedlichen elastischen Verformungen der beiden Kontaktpartner und hängt von der Normalkraft ab.<sup>65</sup>

Wird z.B. eine elastische Walze gegen eine starre Unterlage gepresst, will das elastische Material seitlich ausweichen. In den Randzonen des Kontaktgebiets sind die dadurch entstehenden Tangentialspannungen so groß, dass Gleiten auftritt.<sup>66</sup>

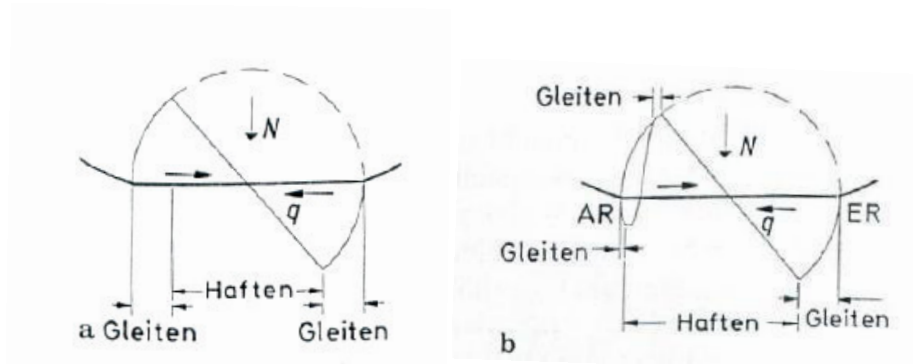


Abbildung 25: Leerlaufschlupf beim Anpressen (a) und tangentialkraftfreien Rollen (b)<sup>67</sup>

<sup>64</sup> Vgl. Knothe K., 2008, S. 20

<sup>65</sup> Vgl. Severin D., 1989, S. 164

<sup>66</sup> Vgl. Hiss F., 1992, S. 107

<sup>67</sup> ebenda

## 2.5.2 Theorien zur Lösung des Tangentialkontaktproblems

Im Laufe der Jahre wurden Methoden entwickelt, die eine gute Lösung des Tangentialkontaktproblems ermöglichen.

Eine der ersten Ansätze für die Lösung des Tangentialkontaktproblems entwickelten Carter und Fromm. Ihnen gelang es die Tangentialspannungen im Kontaktgebiet zweier abrollender Zylinder analytisch zu bestimmen. Voraussetzungen dafür sind, dass der Rollvorgang stationär verläuft und im Kontaktgebiet das Coulombsche Reibungsgesetz gilt.<sup>68</sup>

Vermeulen und Johnson entwickelten, aufbauend auf die vorhin erwähnte Theorie, ein 3-dimensionales Verfahren, welches die Bestimmung der Tangentialspannungen bei einer elliptischen Kontaktfläche ermöglicht. Zusätzlich gilt ihre Methode bei auftretenden Längs- oder Querschleif.<sup>69</sup>

Da weder die Theorien von Carter und Fromm, noch von Vermeulen und Johnson realitätsgetreu sind, wurden von Kalker Theorien entwickelt, die Längs-, Quer- und Bohrschleif bei elliptischen Kontaktflächen berücksichtigen.

Für den Fall, dass nur Haften in der Kontaktfläche auftritt, ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Kraft- und Schleifgröße, die Kalker in seiner exakten linearen Theorie beschreibt.<sup>70</sup>

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ M_z \end{pmatrix} = G \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & C_{13} \\ 0 & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Sl \\ Sq \\ Sb \end{pmatrix}$$

**Abbildung 26: Exakte lineare Theorie von Kalker<sup>71</sup>**

Die Proportionalitätskoeffizienten, die auch „Kalker-Koeffizienten“ genannt werden, sind in Abhängigkeit des Halbachsenverhältnisses der Kontaktellipse und der Querkontraktionszahl berechnet.<sup>72</sup>

Des Weiteren entwickelte Kalker die exakte und vereinfachte nichtlineare Theorie, welche eine große Rechenzeitverkürzung bedeutet. Die vereinfachte nichtlineare Theorie geht von der Modellvorstellung aus, dass auf den aufeinander abrollenden starren Grundkörpern infinitesimal dicht sitzende elastische Borsten aufgebracht sind. Auch hier besteht wieder eine Proportionalität zwischen Tangentialverschiebungen und Schubspannungen.<sup>73</sup>

Die Normalspannungsverteilung ist jedoch nicht mehr elliptisch, sondern parabolisch.<sup>74</sup>

Alle von Kalker beschriebenen Methoden sind nur numerisch zu lösen und finden

<sup>68</sup> Vgl. Severin D., 1989, S. 126

<sup>69</sup> Vgl. Ebenda, S. 127

<sup>70</sup> Vgl. Knothe K., 1984, S. 191f.

<sup>71</sup> ebenda

<sup>72</sup> Vgl. Severin D., 1989, S. 128

<sup>73</sup> Vgl. ebenda

<sup>74</sup> Vgl. Knothe K., 2003, S. 72f



sich in von ihm geschriebenen Computerprogrammen wie FASTIM, für die vereinfachte nichtlineare Theorie, und CONTACT wieder.

Die fundamentale Bedeutung der Theorie von Hertz auch in der heutigen Zeit, wird bei der Betrachtung der Methoden für die Berechnung der Größen des Tangentialkontaktproblems sichtbar. Bei sehr vielen Theorien gelten die Gleichungen nach Hertz als Grundlage für die Berechnungsmethoden für den Tangentialkontakt.

### 2.5.3 Tangentialkontakt zwischen Kunststoffrad und Schiene

Auch bei der Lösung des Tangentialkontaktproblems nehmen die Materialeigenschaften Einfluss auf die Rechenmethoden.

Grundsätzlich gelten auch für die Lösung des Tangentialkontaktproblems bei Kontaktpaarungen mit Kunststoffen die im Kapitel Normalkontakt beschriebenen Voraussetzungen für Kunststofflaufräder. Ebenfalls ist im Fall vom Kontakt unterschiedlicher Werkstoffe eine Anpassung der Materialparameter für die Berechnungen nötig.

Viskoelastische Kunststoffe stellen auch hier wieder einen erhöhten Rechenaufwand dar. Knothe<sup>75</sup> zeigt in seinem Artikel sehr gut, welchen Einfluss viskoelastische Materialien auf das Spannungsverhalten im Kontaktgebiet haben können.

## 2.6 Verschleiß beim Rad Schiene Kontakt

Alle Körper, die in Kontakt kommen und eine Relativbewegung vollziehen, weisen nach einer gewissen Zeit Verschleißerscheinungen auf. Verschleiß ist: „der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers“<sup>76</sup>

Auch beim Rad-Schiene-Kontakt treten Verschleißerscheinungen nach einer bestimmten Rollstrecke auf. Der Materialverlust führt zu einer Änderung des Rad- bzw. Schienenprofils, was wiederum das dynamische Verhalten des Rad-Schiene-Systems stark beeinflusst. Neben den Kosten, die durch den Abrieb und das Wiederherstellen des Profils entstehen, gilt es auch die Änderungen der Systemdynamik zu minimieren.

Deshalb ist es bei der Auswahl der Werkstoffe und der Profile wichtig, den auftretenden Verschleiß zu berücksichtigen. Dafür sind geeignete Rechenmodelle und Simulationen heranzuziehen.

Je nach Belastungsart treten unterschiedliche Stoff- und Formänderungen auf, die verschiedenste Arten von Verschleiß hervorrufen. Der Verschleißmechanismus, der beim Rad-Schiene-Kontakt sehr oft auftritt, ist der der Oberflächenzerrüttung. Das Radmaterial erfährt aufgrund der Rollbewegung eine periodische Belastung. Je nach

<sup>75</sup> Knothe K., 1989, S193ff

<sup>76</sup> Czichos H., 2010, S. 113

Betrag der auftretenden Kräfte und Anzahl der Belastungszyklen können Risse und Ausbrüche entstehen, die das Profil nachhaltig schädigen. Zusätzlich entsteht Abriebmaterial, das eine weitere Schädigung der Kontaktflächen hervorruft. Hierbei beeinflussen die Materialeigenschaften das Verschleißverhalten maßgeblich.<sup>77</sup>

Die größten Spannungen treten beim Kontakt zweier Körper knapp unterhalb der Kontaktfläche auf und sind proportional zur Flächenpressung.<sup>78</sup> Dies macht deutlich, dass die Kenntnis sowohl der vorhandenen Flächenpressung als auch der Größe der Kontaktfläche die Grundvoraussetzung für eine qualitative Vorhersage des Verschleißverhaltens ist.

Zusätzlich übt die Oberflächenrauheit einen wichtigen Einfluss auf das Verschleißverhalten aus. Bei Oberflächenunebenheiten entstehen bei Kontakt stärkere Pressungen an Stellen, die höher als die restliche Oberfläche sind. Des Weiteren ist die Oberflächenrauheit ausschlaggebend für die Größe der übertragenen Tangentialkräfte und somit der auftretenden Spannungen.

Deshalb ist es notwendig auch die Reibung in die Verschleißberechnung mit einzubeziehen.

Wie aus den oben schon genannten Gründen hervorgeht, ist eine möglichst exakte Verschleißsimulation für die Hersteller und Betreiber von Schienenfahrzeugen wünschenswert. Chudzikiewicz<sup>79</sup> hat in seinem Aufsatz die nötigen Entwicklungsschritte für ein solches Programm sehr gut beschrieben.

Der erste Schritt, um eine geeignete Verschleißsimulation entwickeln zu können, besteht in der Festlegung des Verschleißmodells.

Ein sehr häufig angewendetes Modell stellt den folgenden linearen Zusammenhang zwischen dem Verschleißvolumen  $W_v$  und der Reibungsarbeit  $W_r$  her.

$$W_v = C \cdot W_r$$

#### Formel 20: Verschleißvolumen

Hierbei ist  $C$  der Verschleißkoeffizient der Materialpaarung, der entweder aus Versuchen oder mathematische Modellen ermittelt wird. Eine qualitative Aussage der mathematischen Modelle sollte jedoch durch vergleichende Versuche überprüft werden.

<sup>77</sup> Vgl. Czichos H, 2010, S. 113ff

<sup>78</sup> Vgl. Beagly T. M., 1976, S. 328

<sup>79</sup> Chudzikiewicz A., 1996, S. 207ff

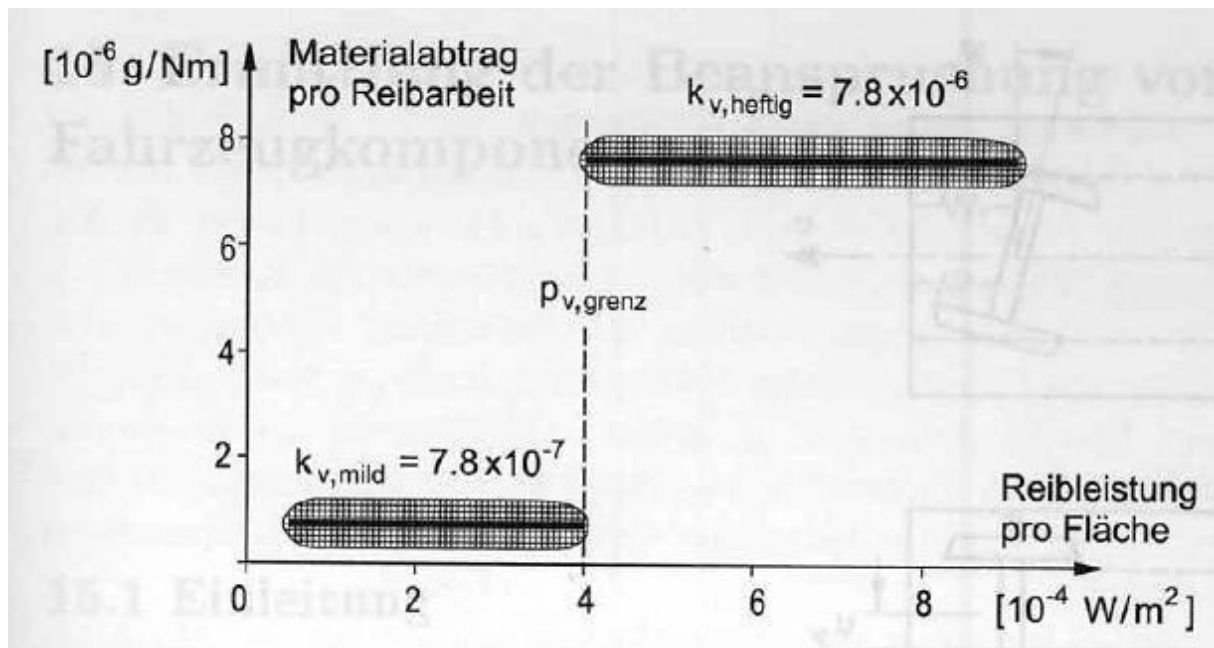


Abbildung 27: Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit der Reibleistung<sup>80</sup>

Um nun die Reibungsarbeit bestimmen zu können, muss ein Programm/Modell festgelegt werden, dass sowohl die Kräfte, als auch die Fläche des Kontaktbereichs passend simuliert (CONTACT, VOCOLIN,...).

Zusätzlich müssen dynamische Komponenten wie die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Rad-Schiene-Systems durch geeignete Gleichungen eingebunden werden.<sup>81</sup>

Vohla<sup>82</sup> hat in seiner PhD-These ein nicht-lineares Kontakt-Modell entwickelt, das durch stückweise Betrachtung der Kontaktzone versucht, die Reibungsarbeit möglichst genau zu bestimmen. Dieses Modell ist in das Programm MEDYNA implementiert.<sup>83</sup>

## 2.7 Der Werkstoff Polyurethan

Wie bei der Beschreibung der Aufgabenstellung eingangs schon erwähnt, handelt es sich bei dem untersuchten Rad-Schiene-Kontakt um die Kontaktpaarung Kunststoff-Stahl. Auf die Spurführungsrolle ist eine Bandage aus Polyurethan (PUR) aufgebracht, die die Lauffläche bildet. Die Stärke der Bandage beträgt ca. 8,5 mm und hat einen Außendurchmesser von 271 mm.

Im Rahmen dieses Kapitels sollen die Eigenschaften und die daraus folgenden Einsatzgebiete kurz beschrieben werden.

<sup>80</sup> Specht W., 1985

<sup>81</sup> Vgl. Chudzikiewicz A., 1996, S. 208ff

<sup>82</sup> Vohla G., 1995

<sup>83</sup> Vgl. Linder C., 1996, S. 221

Der Werkstoff Polyurethan ist ein Elastomer, das aus einer Kombination von flexiblen Kettenabschnitten, sogenannten Weichsegmenten, und Hartsegmenten gebildet wird.

Die Hartsegmente bestimmen die Eigenschaften des Elastomers, jedoch hängt das Kälteverhalten von den Weichsegmenten ab.<sup>84</sup>

Man kann bei Polyurethanen zwischen thermoplastischen Elastomeren, Gießsystemen und Kautschuktypen unterscheiden. Die Einteilung hängt von den verschiedenen Verarbeitungsmethoden ab.<sup>85</sup>

Das Einsatzgebiet von Polyurethanen ist sehr vielseitig und erstreckt sich von Armaturenblechen, Federn, Dichtungen, Verschaltungen, usw. in der Autoindustrie bis hin zu Skischuhen und Fußballschuhen in der Bekleidungsbranche. Ebenfalls werden damit Rollen und Bandagen für unzählige Industriezweige hergestellt.

Bei der Verwendung von Polyurethan als Rollen- oder Bandagenwerkstoff handelt es sich um gegossenes Polyurethan. Der große Vorteil dieses Werkstoffes ist, dass er einen hohen Widerstand gegen Ein- und Weiterreißen aufweist. Daher weist Polyurethan auch bei rauen Betriebsbedingungen eine hohe Lebensdauer auf. Zusätzlich weisen Polyurethanelastomere einen doppelt so hohen E-Modul auf wie Gummi mit gleicher Härte. Dies führt zu einem geringeren Rollwiderstand und somit zur Möglichkeit, größere Belastungen aufzubringen. Je härter das PUR-Elastomer ist, desto höhere Kräfte können diese aufnehmen. Mit steigender Härte sinken auch gleichermaßen die Dämpfungseigenschaften.<sup>86</sup>

Um die Änderung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von Temperatur, Härte und Zusammensetzung des Polyurethans zu verdeutlichen sind in Abbildung 28 und Abbildung 29 der Zug-E-Modul des Polyurethan-Elastomers Elastollan von BASF über der Temperatur dargestellt.

In den Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass bei Zunahme der Temperatur der E-Modul sinkt. Wie schon beschrieben, ist ebenfalls zu erkennen, dass der E-Modul mit der Shore-Härte steigt.

<sup>84</sup> Vgl. Dominghaus H. 2008, S. 1286f

<sup>85</sup> Vgl. ebenda

<sup>86</sup> Kunststoff Handbuch, 1983, S. 454f

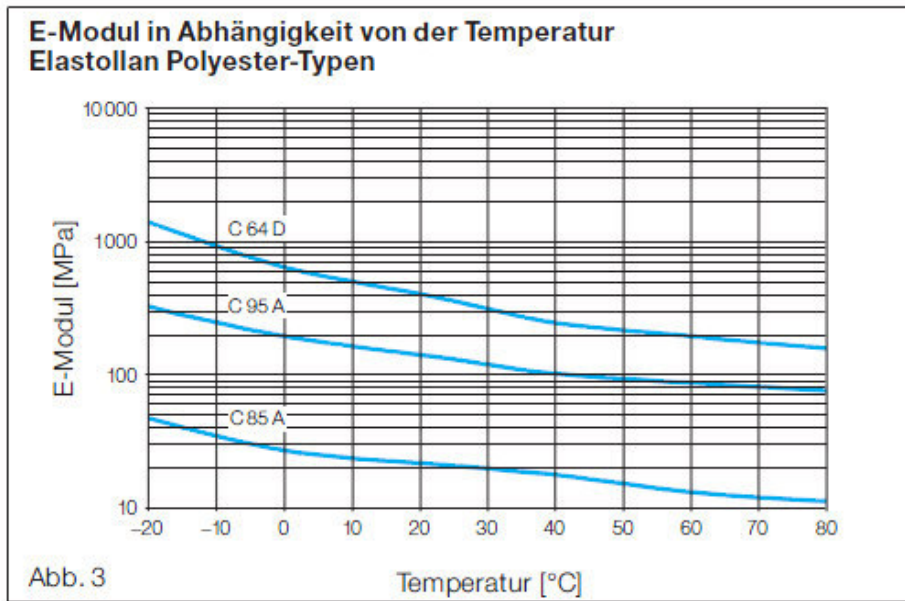


Abbildung 28: Mechanische Eigenschaften Elastollan Polyester-Typen BASF<sup>87</sup>

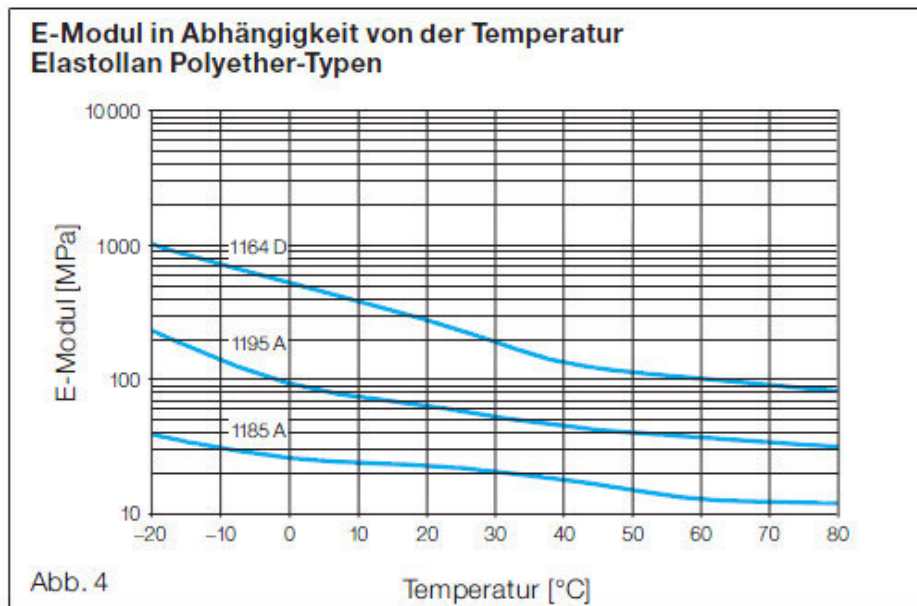


Abbildung 29: Mechanische Eigenschaften Elastollan Polyether-Typen BASF<sup>88</sup>

<sup>87</sup> BASF Polyurethane GmbH, S. 8

<sup>88</sup> ebenda

## 3 Praktische Untersuchungen

Die praktischen Untersuchungen bilden den wichtigsten Teil dieser Arbeit. Hierbei soll die Größe und Form der Kontaktfläche und die Flächenpressung ermittelt werden, die zwischen den Spurführungsrollen und der Schiene auftreten.

Nach einer Analyse des Spurführungsrollen-Schiene-Systems werden im Rahmen dieses Kapitels die durchgeführten Versuche und die dafür notwendigen Vorbereitungen genau beschrieben.

Anschließend folgen die Beschreibung und die Ergebnisse der Rauigkeitsmessung.

### 3.1 Analyse des Systems

Wie im theoretischen Teil beschrieben, ist als erster Schritt zur Bestimmung der Kontaktfläche und der Flächenpressung eine Analyse der Rahmenbedingungen notwendig. Hierbei werden alle Aspekte untersucht, die Einfluss auf den Rad-Schiene-Kontakt und somit auch auf die Versuchsdurchführung haben.

Im Folgenden werden die Kontaktgeometrie, die auftretenden Kräfte und die Materialien des zu untersuchenden Kontaktes von Spurführungsrollen und Schiene genauer betrachtet.

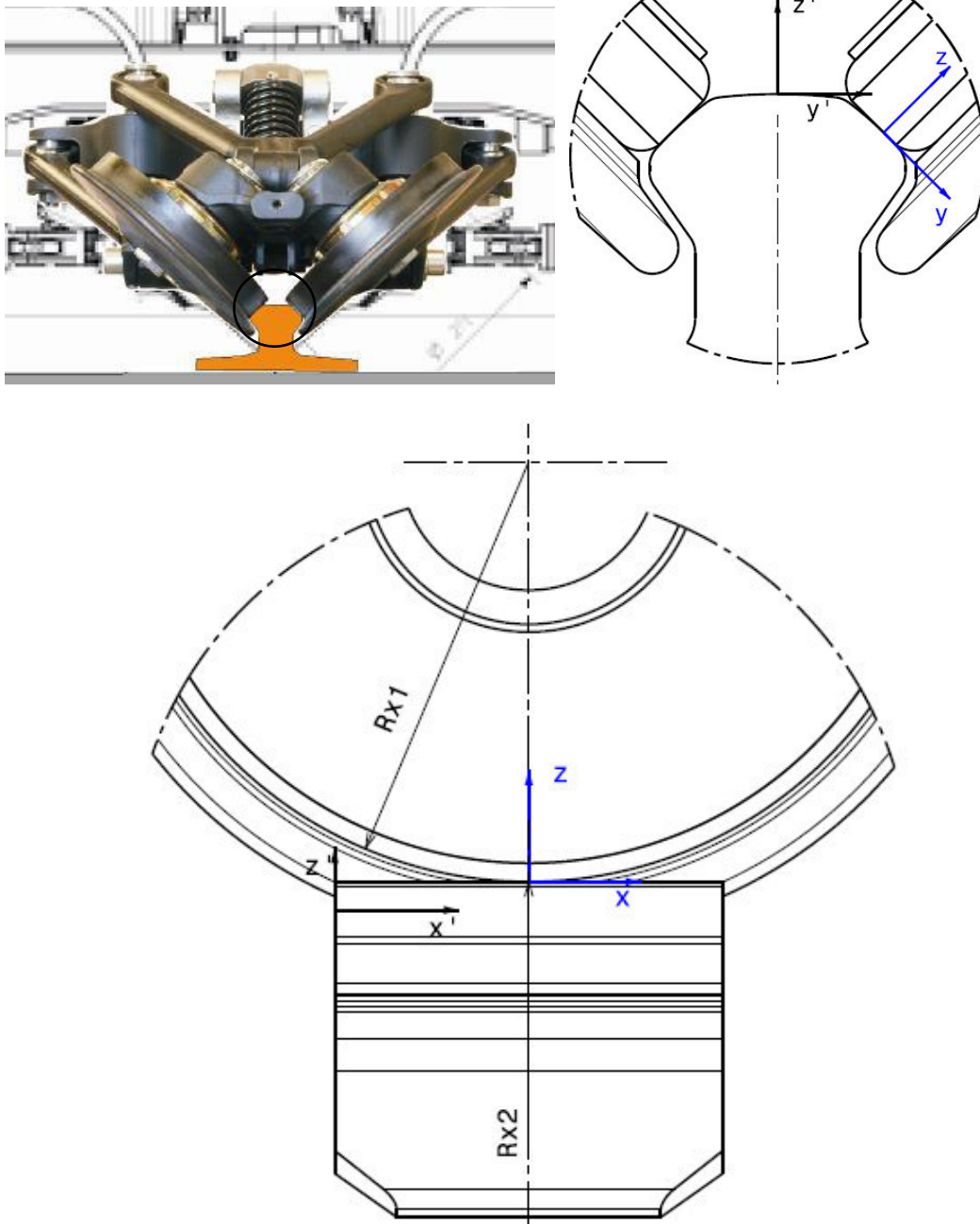
Die Grundlage für die Analyse stellten Angaben über die Geometrie von Rad und Schiene, sowie die Ergebnisse der dynamischen Simulation einer Kurvenfahrt dar, welche von Siemens bereit gestellt wurden.

#### 3.1.1 Betrachtung der Kontaktgeometrie

Für die Betrachtung der Kontaktgeometrie wurden die Spurführungsrollen und die Schiene mittels des CAD- Programm Catia V5 nachgebildet und der Realität entsprechend angeordnet.

Ausgangspunkt für die ersten Untersuchungen der Kontaktpunkte war die Nominallage. Diese war durch einen Nennabstand zwischen den beiden Spurführungsrollen und der Bedingung der Flächenberührung mit der Schiene vorgegeben. Bei der Flächenberührung wurde darauf geachtet, dass aufgrund der speziellen Anordnung der Rollen und der Form der Schiene, die Lauffläche stets um 45 Grad geneigt war. Die Punkte, zwischen denen der Nennabstand gemessen wurde, waren auf den Rollen vordefiniert.

Aus den soeben beschriebenen Bedingungen ergab sich der in Abbildung 30 gezeigte Nominalkontaktpunkt. In der Zeichnung ist sowohl das durch die Simulation festgelegte  $(x', y')$ , als auch ein auf die Kontaktfläche bezogenes Koordinatensystem eingezeichnet. Das Koordinatensystem wurde zur einfacheren Darstellung auf die Schienenoberkante gelegt.



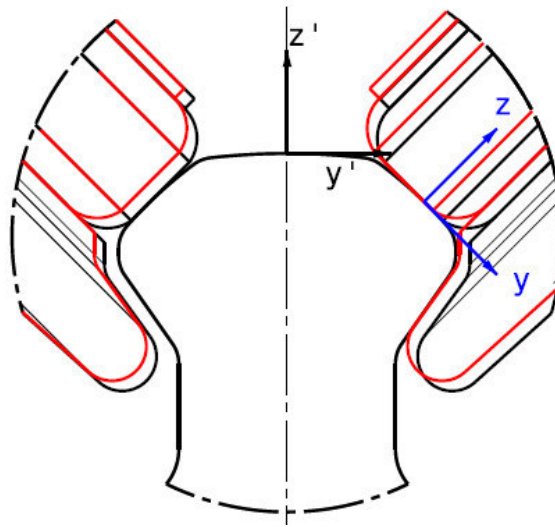
**Abbildung 30: Koordinatensysteme**

Aufgrund der Querkräfte während der Kurvenfahrt kommt es zu Querverschiebungen des Wagens, und somit auch zu einer Änderung der Relativstellung von Spurführungsrollen und Schiene. Diese, durch die Fliehkraft hervorgerufene Verschiebung, wird bei der Untersuchung der Kontaktgeometrie berücksichtigt.

Ausgehend von der Nominallage wurde das Rollenpaar entlang der  $y$ -Achse verschoben, um die Lage weiterer möglicher Berührungspunkte zu ermitteln.

Eine Einschränkung bezüglich der Verschiebung besteht darin, dass diese nur in Richtung negativer  $y$ -Achse vollzogen werden kann (siehe Abbildung 31). Eine Bewegung in Richtung positiver  $y$ -Achse wird durch die spiegelverkehrt angeordnete Rolle verhindert.

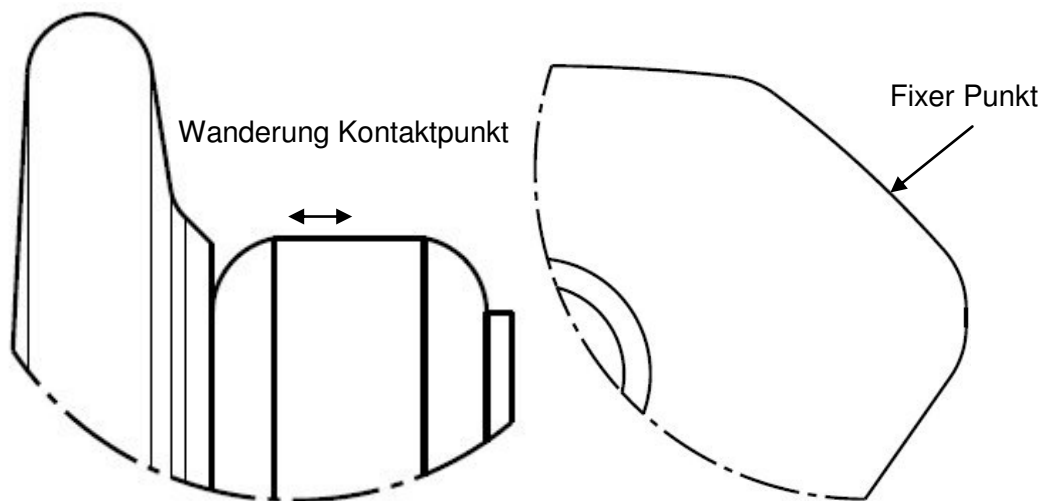
Des Weiteren kann die Rolle nur soweit verschoben werden, bis diese am Spurkranz mit der Schiene in Berührung kommt. Dieser Zustand wird im Rahmen dieser Arbeit als Dreipunktkontakt bezeichnet.



**Abbildung 31: Mögliche Verschiebung**

Die Lauffläche der Spurführungsrolle ist ein Zylinder der an den Enden abgerundet ist und auf einer Seite in den Spurkranz übergeht.

Die Schiene weist im Kontaktbereich eine konstante Krümmung auf.



**Abbildung 32: Geometrie von Rolle und Schiene**

Aufgrund der Tatsache, dass die Lauffläche der Spurführungsrolle eine ebene Fläche ist, bleibt die Lage des Berührungspunktes auf der Schiene konstant. Die Stelle des Kontaktes auf der Rolle wandert hingegen entlang der Lauffläche (siehe Abbildung 32).

Zusätzlich hebt die zweite Rolle bei einer Verschiebung aus der Nominallage ab. Dies ist für die nachfolgende Bestimmung der auftretenden Kräfte entscheidend.



Ein weiterer Aspekt, der bei der Bestimmung der Kontaktgeometrie untersucht wird, ist der der Krümmungen im Bereich des Kontaktes. Auf den ersten Blick gibt es keine Kontaktbereiche, in denen un stetige Krümmungen vorhanden sind. Abhängig davon, wie groß die Abplattung aufgrund der Kraftaufbringungen ist, ist es jedoch möglich, dass sich die Kontaktfläche auch auf Gebiete mit nicht konstanter Krümmung erstreckt. Dies ist zum Beispiel am Rand der Lauffläche der Fall. Ob dies eintritt ist, werden die Ergebnisse aus den Versuchen zeigen.

### 3.1.2 Bestimmung der auftretenden Kräfte

Als Grundlage der Analyse der zwischen den Spurführungsrollen und der Schiene wirkenden Kräfte diente eine von Siemens durchgeführte dynamische Simulation einer Kurvenfahrt. Bei dieser wurden sowohl die vorlaufenden, als auch die nachlaufenden Spurführungsrollen einer Achse als Punktmasse simuliert. Die auf die Punktmassen wirkenden Kräfte in  $y'$ - und  $z'$ -Richtung sind in den nachfolgenden Diagrammen über der Zeit dargestellt.

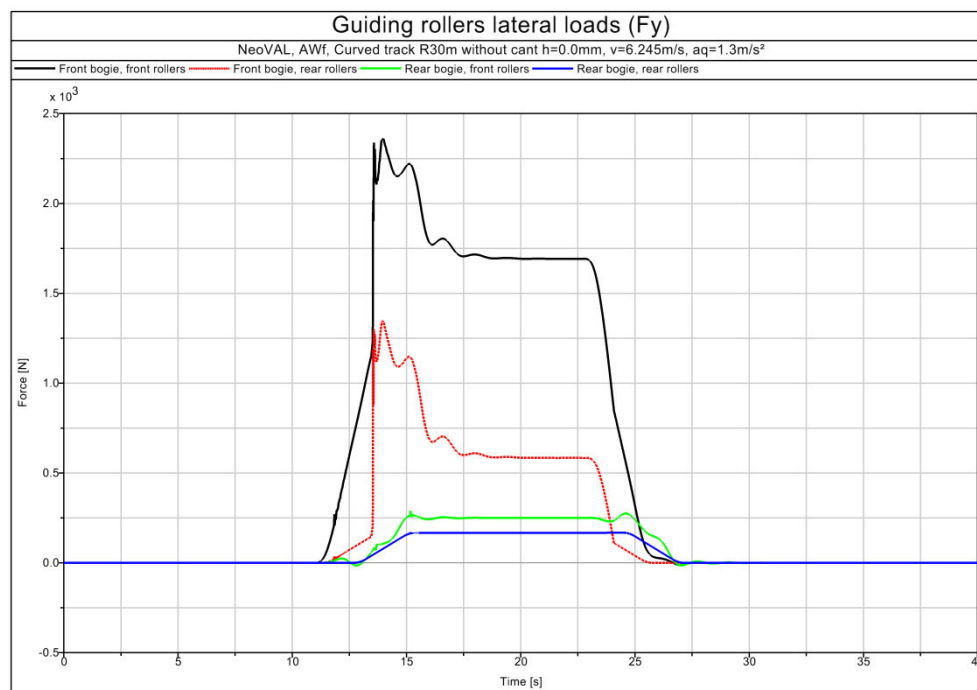


Abbildung 33: Kraft während Kurvenfahrt in  $y'$ -Richtung<sup>89</sup>

<sup>89</sup> Siemens AG

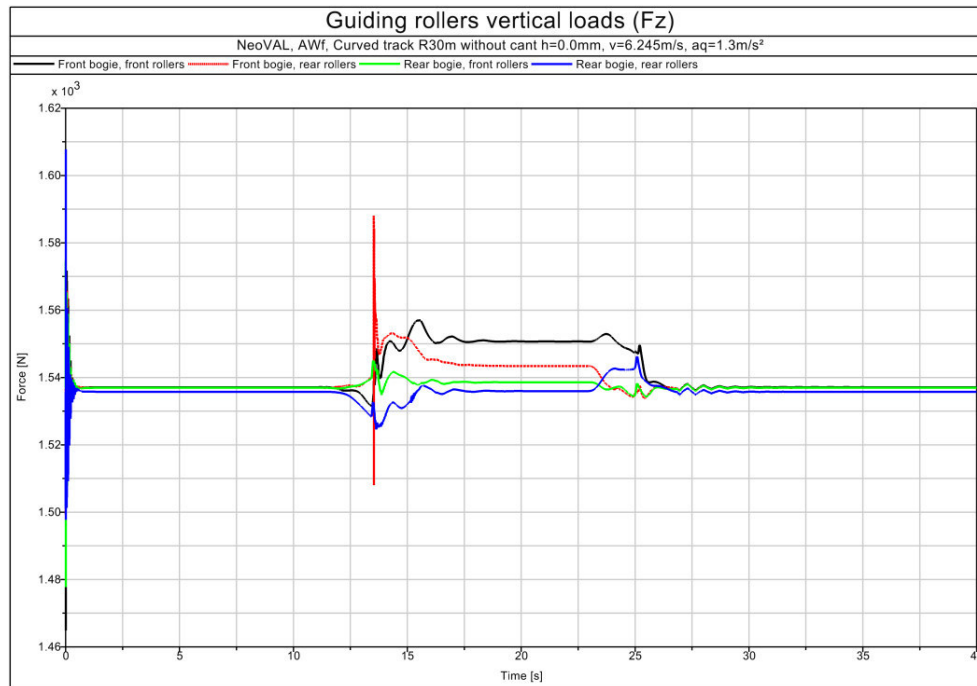


Abbildung 34: Kraft während Kurvenfahrt in z'-Richtung<sup>90</sup>

In der Simulation durchfährt der Wagen mit konstanter Geschwindigkeit von 6,245 m/s eine Kurve mit dem Radius 30 m. Während der Kurvenfahrt wird von der Schiene auf die Spurführungsrolle eine der Fliehkraft entgegengesetzte Kraft in y'-Richtung ausgeübt.

Die Kraft in z'-Richtung bleibt beim Durchfahren des Bogens nahezu konstant und wird von der Feder aufgebracht (siehe Kapitel 1.1).

Da die Messungen nicht dynamisch, d.h. im statischen Zustand, durchgeführt wurden, musste das Kraft-Zeit-Diagramm diskretisiert werden. Dazu wurden an markanten Stellen des  $F_y$ -Kraftverlaufes jeweils Zeit und Kraft abgelesen. Für die Bestimmung der Kräfte in z'-Richtung wurden an den in Abbildung 33 zuvor ausgelesenen Zeitpunkten die Kraftwerte abgelesen.

Daraus wurden schließlich die resultierenden Kräfte, die auf beide Rollen wirken, bestimmt und deren Winkel gebildet, welche in der nachstehenden Tabelle eingetragen sind.

<sup>90</sup> Siemens AG

Zeit	Fy	Fz	Resultierende	Winkel Resultierende
11,00 s	0 N	768,5 N	768,5 N	90,00 °
12,00 s	340 N	768,5 N	840,4 N	66,13 °
13,00 s	940 N	769,0 N	1214,5 N	39,29 °
13,48 s	1140 N	766,0 N	1373,4 N	33,90 °
14,00 s	2360 N	773,0 N	2483,4 N	18,14 °
14,48 s	2160 N	774,0 N	2294,5 N	19,71 °
15,00 s	2220 N	776,0 N	2351,7 N	19,27 °
15,64 s	2020 N	778,5 N	2164,8 N	21,08 °
16,00 s	1780 N	775,5 N	1941,6 N	23,54 °
17,00 s	1760 N	776,0 N	1923,5 N	23,79 °
18,00 s	1720 N	775,5 N	1886,7 N	24,27 °
19,00 s	1700 N	775,5 N	1868,5 N	24,52 °
20,00 s	1700 N	775,5 N	1868,5 N	24,52 °
21,00 s	1700 N	775,5 N	1868,5 N	24,52 °
22,00 s	1700 N	775,5 N	1868,5 N	24,52 °
23,00 s	1700 N	775,5 N	1868,5 N	24,52 °
23,70 s	1260 N	776,5 N	1480,1 N	31,64 °
24,00 s	840 N	775,5 N	1143,2 N	42,71 °
25,00 s	300 N	774,5 N	830,6 N	68,83 °
26,00 s	60 N	769,0 N	771,3 N	85,54 °
27,00 s	0 N	768,5 N	768,5 N	90,00 °

Tabelle 1: Ausgelesene Werte aus Simulation

Wenn die Kraftvektoren der resultierenden Kraft in die Anordnung von Rad und Schiene eingezeichnet werden, ist leicht ersichtlich, dass eine der beiden Rollen bei der Kurvenfahrt entlastet wird (siehe Abbildung 35). Zusätzlich ergibt sich aus der 45°-Stellung der Lauffläche, dass auf diese sowohl eine Normal- als auch eine Tangentialkraft in lateraler Richtung wirken (siehe Abbildung 36). Nur wenn die resultierende Kraft einen Winkel von 45° annimmt, wirkt lediglich eine Normalkraft auf das Rad.

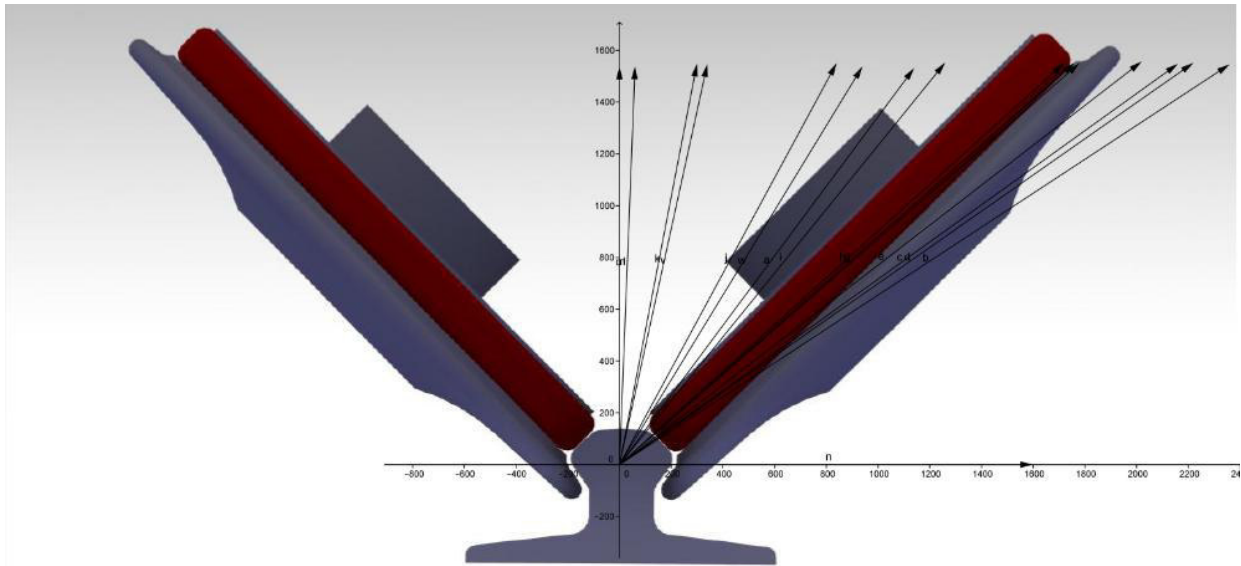


Abbildung 35: Kraftvektoren

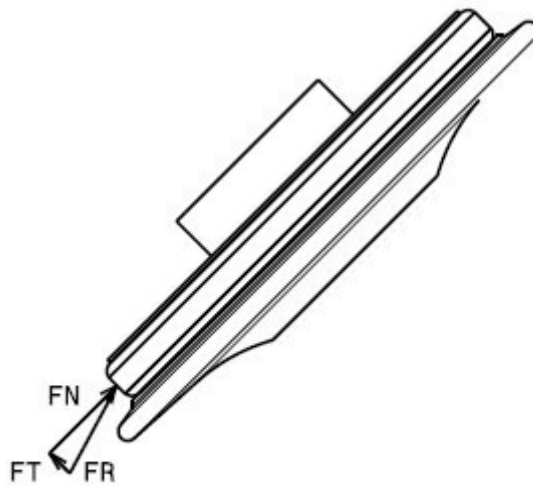


Abbildung 36: Kräfte auf die Rolle

Da es sich bei der Spurführungsrolle um ein frei rollendes Rad handelt und die Messungen statisch erfolgen, wird auf die Tangentialkräfte in longitudinaler Richtung nicht genauer eingegangen.

Des Weiteren wird aufgrund der statischen Betrachtung der auftretende Schlupf nicht untersucht.

Nachdem nun alle Kräfte, die auf das Rad einwirken, ermittelt wurden, kann der nächste Schritt der Analyse erfolgen.

### 3.1.3 Bestimmung der Materialien und deren Eigenschaften

Beim vorliegenden Rad-Schiene-Kontakt handelt es sich um die Materialpaarung Kunststoff/Stahl. Die Schiene besteht aus gewöhnlichem Schienenstahl. Die Lauffläche der Spurführungsrolle besteht aus Polyurethan. Diese ist auf einen Stahlkern aufgebracht. Der Spurkranz der Rolle ist ebenfalls aus Stahl gefertigt. Von beiden Werkstoffen waren weder der E-Modul, noch die Oberflächenbeschaffenheit gegeben.

Um die analytischen Berechnungen nach Hertz durchführen zu können, mussten die unbekanntes Materialeigenschaften ermittelt werden.

Da die Schiene aus Stahl besteht, der im Allgemeinen allen Voraussetzungen der Theorie nach Hertz genügt, wurde bei der Schiene für den E-Modul der übliche Wert von 206000 N/mm<sup>2</sup> gewählt.

Aus den im theoretischen Teil beschriebenen Materialeigenschaften von Polyurethan kann geschlossen werden, dass die Lauffläche elastisches Verhalten aufweist. Die Lauffläche aus Polyurethan musste jedoch dahingehend überprüft werden, ob diese im Belastungsbereich linear-elastisches Verhalten aufweist. Die Durchführung und die Ergebnisse dieser Überprüfung werden im Abschnitt 4 präsentiert.

Der E-Modul von Polyurethan hängt, wie im theoretischen Teil beschrieben, von einigen Faktoren wie der Zusammensetzung und der Härte ab. Da keine chemische Analyse und keine zerstörenden Prüfungen durchgeführt werden sollten, musste ein anderer Weg für die Ermittlung des E-Moduls gefunden werden. Hierbei wurde über das Hooksche Gesetz  $\sigma = \varepsilon \cdot E$  der E-Modul hergeleitet. Für die genaue Beschreibung der Vorgehensweise und der Ergebnisse wird ebenfalls auf das Kapitel 4 verwiesen.

Die unbekanntes Oberflächenrauheit sowohl der Schiene als auch der Spurführungsrolle wurde mittels Versuchen ermittelt. In Kapitel 3.3 ist das Vorgehen dazu genau beschrieben.

## 3.2 Messung Flächenpressung

Dieser Abschnitt widmet sich der praktischen Untersuchung der Flächenpressung zwischen Spurführungsrolle und Schiene. Zu Beginn werden noch einmal die Ziele der Messung erläutert. Anschließend werden die Rahmenbedingungen und die Messmittel beschrieben. Danach folgen Erklärungen zum Messplan und den notwendigen Vorbereitungen für die Messung. Den Abschluss bilden die Beschreibungen des Messaufbaus und der Durchführung.

Die Ergebnisse werden in Kapitel 4 präsentiert.

### 3.2.1 Ziele

Im Rahmen der Messungen sollen die Auswirkungen der Kräfte auf die Größe und die Form der Kontaktfläche sowie die Flächenpressung untersucht werden. Hierbei sollen die Kräfte, die durch eine Simulation einer Kurvenfahrt bekannt sind, möglichst realitätsgetreu aufgebracht werden. Die Spurführungsrolle und die Schiene werden dazu gegeneinander gepresst.

Der Messplan muss so konzipiert sein, dass überprüft werden kann, ob auch bei dem vorliegenden Kontakt von Kunststoff und Stahl eine Anwendung der Theorie von Hertz möglich ist. Hierzu sind die Kenntnis über die Form und die Größe der Kontaktfläche, sowie über den Verlauf der entstehenden Druckverteilung nötig. Diese Werte müssen gemessen werden können.

Um zu überprüfen, ob die auftretenden Tangentialkräfte Einfluss auf den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten der Theorie nach Hertz haben, sollen Vergleichsmessungen nur mit dem Normalkraftanteil der resultierenden Kraft durchgeführt werden.

Des Weiteren gilt es, mögliche Lageänderungen aufgrund der Querkräfte während der Kurvenfahrt durch unterschiedliche Lagen der Rolle zur Schiene, zu berücksichtigen. Dabei soll zusätzlich ermittelt werden, wie sich das Verhalten der Flächenpressung bei Anlaufen am Spurkranz verändert.

### 3.2.2 Rahmenbedingungen

Die Messungen der Flächenpressungen wurden im Labor des Institutes für Konstruktionswissenschaften und technische Logistik, Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik der TU Wien durchgeführt.

Für die Aufbringung der Kraft stand eine Zug-Druck-Prüfmaschine des Typs Zwick/Roell Z250 zur Verfügung. Mit der Prüfmaschine ist es möglich, nur in vertikaler Richtung eine Kraft aufzubringen. Da es jedoch in der Kurvenfahrt eine Überlagerung von vertikalen und horizontalen Kräften gibt, mussten konstruktive Maßnahmen getroffen werden, um die auftretenden Kräfte realitätsgetreu aufbringen zu können. Details dazu werden im Abschnitt 3.2.3 genauer erläutert.

Die Zug-Druck-Prüfmaschine misst sowohl den zurückgelegten Weg als auch die aufgebrachte Kraft. Die Kraft wird mittels Kraftmessdose gemessen.

Die Messung der Flächenpressung und der Größe der Kontaktfläche wurde mittels FUJI Film Prescale Messfolien durchgeführt. Abhängig vom Messbereich wurden ein oder zwei Folien verwendet. Bei Aufbringung von Kraft reagiert die Messfolie und färbt sich im Kontaktbereich rot. Je nach Betrag der Pressung entstehen unterschiedliche Rotstufen, die mittels einer Kalibrierungsmessung und einer Software ausgewertet werden können. So ist es möglich, die auftretende Flächenpressung und auch die Größe des Kontaktbereichs zu messen.

Die Folie des Typs Low weist einen Messbereich von 2,5-10 MPa auf. Die Folien des Typs Super Low sind im Bereich von 0,5-2,5 MPa einsetzbar.

Mit den Folien ist es aber nicht möglich den zeitlichen Spannungsverlauf aufgrund der Kraftaufbringung nachzuvollziehen, da diese nur den im Messungszeitraum aufgetretenen höchsten Druck anzeigen.

Weiters kann bei der Auswertung nicht unterschieden werden, ob die gemessenen Spannungen von Normal- oder Tangentialkräften hervorgerufen worden sind. Diese Problematik führte zu einer Erweiterung der Untersuchungen, da aufgrund der Schräglage der Lauffläche und der Richtung der auftretenden Kräfte Tangentialspannungen zu erwarten sind und für die Bestimmung der Kontaktgrößen nach Hertz nur die Normalspannungen herangezogen werden dürfen.

Deshalb werden auch Messungen der reinen Normalspannungen durchgeführt, die durch Berechnung des Normalkraftanteils der resultierenden Kraft und Aufbringen dieses Anteils auf die Kontaktpaarung bestimmt werden.

Für die Durchführung der Messungen stand eine originale Spurführungsrolle und ein Stück Schiene zur Verfügung. Die Messungen wurden nur mit einer Spurführungsrolle durchgeführt.

### 3.2.3 Vorbereitung

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt wurde, mussten aufgrund der einachsigen Bewegung der Prüfmaschine konstruktive Maßnahmen getroffen werden, um die auftretenden Normal- und Tangentialkräfte der Kurvenfahrt möglichst gut zu simulieren.

Dazu wurde aus der am PC simulierten Normal- und Querkraft die resultierende Kraft gebildet (siehe Kapitel 3.1.2). Bei der Geradeausfahrt tritt nur eine Kraft in vertikaler Richtung auf, die ohne speziellen Aufwand von der Prüfmaschine aufgebracht werden kann. Sobald jedoch der Wagen in die Kurve eintritt, entsteht eine Querkraft auf den Wagen, die eine Veränderung des Winkels der resultierenden Kraft hervorruft. Das führte dazu, dass eine Vorrichtung nötig war, die die Winkeländerung berücksichtigt.

Zusätzlich war zu beachten, dass aufgrund der Anordnung von Rolle und Schiene beim Neoval, die Lauffläche der Spurführungsrolle stets  $45^\circ$ , bezogen auf die Stellung zur Schiene, geneigt sein musste.

Dies bedeutete: Bei der Gestaltung der Vorrichtung war ergänzend zu berücksichtigen, dass die Rolle auch bei der Geradeausfahrt  $45^\circ$  geneigt sein muss und sich mit der Winkeländerung der resultierenden Kraft mitdrehen soll.

Um die konstruierte Vorrichtung möglichst einfach zu halten und die Kraftmessdose nicht zusätzlich zu belasten, wurde entschieden, die Schiene am beweglichen Teil der Prüfmaschine zu befestigen und gegen eine am Boden stehende Rollen-Vorrichtung zu pressen.

Für die Einspannung der Schiene wurde eine Vorrichtung konstruiert, die eine einfache Drehung der Schiene um den entsprechenden Winkel der resultierenden ermöglichte. Die Vorrichtung bestand aus einer u-förmigen Spange, in die die Schiene mittels zweier Schrauben festgespannt worden ist. Zum Verdrehen des Winkels, wurde die Schrauben gelöst und nach einstellen der Grade wieder festgespannt.



**Abbildung 37: Vorrichtung Schiene**

Wie bereits erwähnt, musste es ebenfalls möglich sein, die Einspannvorrichtung der Spurführungsrolle mit der Veränderung des Schienenwinkels mitdrehen zu können. Hierbei musste diese ein Schwenken der Achse der Rolle zwischen  $+45^\circ$  und  $-45^\circ$  ermöglichen.

Hierzu konnte eine Vorrichtung verwendet werden, die im Labor schon für Messungen an Rollen für Seilbahnen angefertigt worden war. Damit war es möglich, alle gewünschten Winkel einzustellen. Die Vorrichtung ist in nachfolgender Abbildung zu sehen.

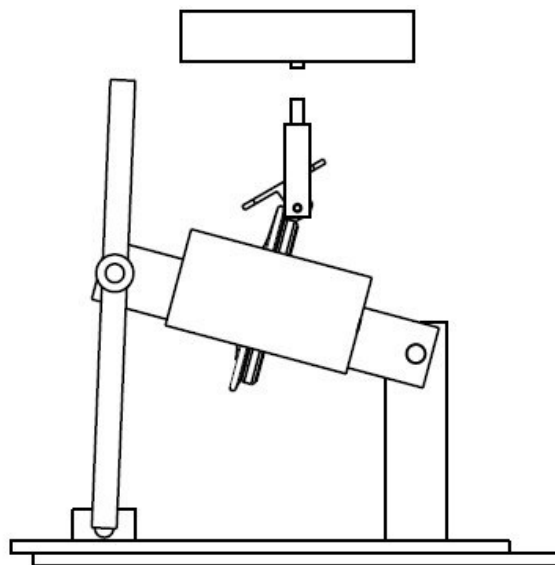




**Abbildung 38: Vorrichtung Rolle**

Um die Rolle spielfrei einspannen zu können, wurden zwei Hülsen konstruiert, die einerseits die Durchmesserunterschied zwischen der Welle der Vorrichtung und der Bohrung der Rolle ausglich und andererseits ein seitliches Verschieben der Spurführungsrolle verhinderten.

Um die problemlose Durchführung der Messungen zu gewährleisten, wurde mittels CAD überprüft, ob es zu Kollisionen zwischen Prüfmaschine und Vorrichtung kommt. Dazu wurden die zu messenden Winkeleinstellungen überprüft.



**Abbildung 39: Skizze Prüfmaschine**

Alle konstruierten Teile wurden im Labor des Institutes für Konstruktionswissenschaften und technische Logistik gefertigt. Die detaillierten technischen Zeichnungen befinden sich im Anhang.

### 3.2.4 Messplan

Grundlage für den Messplan waren die aus der Analyse des Systems bekannten resultierenden Kräfte und deren Winkel (siehe Tabelle 1)

Ziel war es, den Messplan so zu gestalten, dass ein möglichst guter Kompromiss zwischen realitätsnaher Messung der Kurvenfahrt und dem Messaufwand gefunden wird.

Um das Vorgehen bei der Erstellung des Messplans besser nachvollziehen zu können, sind folgend nochmals die Ergebnisse der Computersimulation abgebildet.

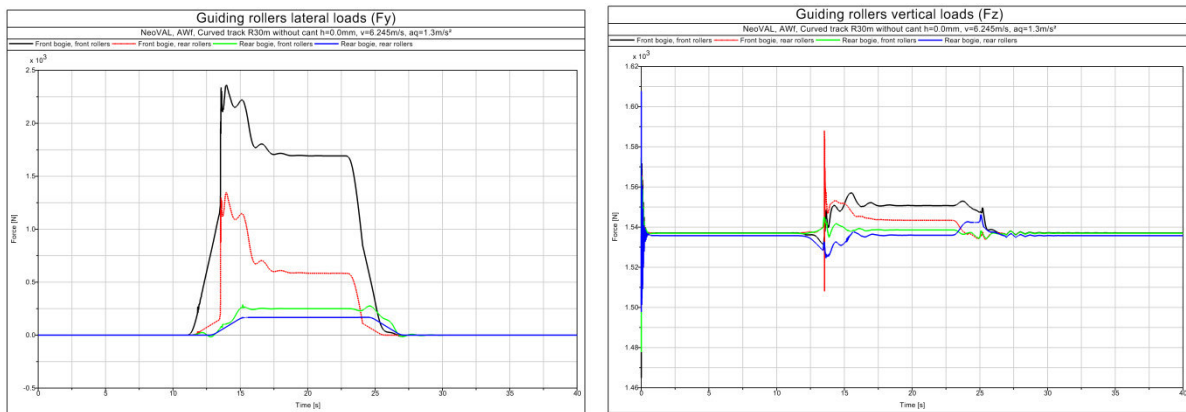


Abbildung 40: Wiederholte Darstellung Diagramme Simulation

### Vertikale Kraft

Die erste vereinfachte Annahme wurde bei der Kraft  $F_z$  in vertikaler Richtung getroffen. Da die Kraft in dieser Richtung nur sehr geringe Schwankungen aufweist, wurde der Mittelwert über die ausgelesenen Werte gebildet und dieser für die gesamte Messung konstant angenommen.

Hierbei war zu beachten, dass die Kräfte in der PC-Simulation an einer Punktmasse, bestehend aus zwei Rollen, angreifen. Deshalb ist bei der Untersuchung von nur einer Rolle in der Nominallage die Kraft in vertikaler Richtung zu halbieren.

Bei Verschiebung der Rolle aus der Nominallage heraus hebt jedoch die zweite Rolle ab. Dies bedeutet, dass auf die Rolle wiederum die ganze Kraft in vertikaler Richtung wirkt.

## Querkraft

Die Querkraft wurde für die Messung variabel angenommen, da der Einfluss dieser untersucht werden soll. In der Simulation ist deutlich zu erkennen, dass nach Einfahrt in die Kurve die Kraft bis zu ihrem höchsten Wert ansteigt und sich kurz danach auf einen relativ konstanten Wert einpendelt, der im Rahmen dieser Arbeit als stationärer Wert der Kurvenfahrt bezeichnet wird.

Dieser konstante, sowie der höchste Wert wurden für die Unterteilung des  $F_y$ -Kraftverlaufs als Fixpunkte angenommen, wobei hier auf ganze Zahlen gerundet wurde. Die Schritte wurden möglichst groß gewählt, um sowohl den Messaufwand zu reduzieren, als auch einen deutlichen Unterschied zwischen den gemessenen Kontaktflächen zu sehen.

Die Beschreibung der Lage der Kontaktpunkte ist in Abbildung 42 ersichtlich.

## Kräfte des Messplans

Zu messende Kräfte bei Nominallage						
$F_y$	$F_y$ - Schritte	$F_z$ - durchschnitt	Resultierende	Winkel der Resultierenden	Winkel der Vorrichtung	Normalkraftanteil
0,0 N		773,4 N	773,4 N	90,00 °	45,00 °	546,9 N
450,0 N	450,0 N		894,8 N	59,81 °	14,81 °	865,1 N
900,0 N	450,0 N		1186,7 N	40,67 °	-4,33 °	1183,3 N
1350,0 N	450,0 N		1555,8 N	29,81 °	-15,19 °	1501,5 N
1700,0 N	350,0 N		1867,7 N	24,46 °	-20,54 °	1749,0 N
2100,0 N	400,0 N		2237,9 N	20,22 °	-24,78 °	2031,8 N
2400,0 N	300,0 N		2521,5 N	17,86 °	-27,14 °	2243,9 N

**Tabelle 2: Kräfte der Messung bei Nominallage und Pkt. C**

Zu messende Kräfte bei Kontaktpunkte A/B						
$F_y$	$F_y$ - Schritte	$F_z$ - durchschnitt	Resultierende	Winkel der Resultierenden	Winkel der Vorrichtung	Normalkraftanteil
0,0 N		1546,9 N	1546,9 N	90,00 °	45,00 °	1093,8 N
450,0 N	450,0 N		1611,0 N	73,78 °	28,78 °	1412,0 N
900,0 N	450,0 N		1789,7 N	59,81 °	14,81 °	1730,2 N
1350,0 N	450,0 N		2053,1 N	48,89 °	3,89 °	2048,4 N
1700,0 N	350,0 N		2298,5 N	42,30 °	-2,70 °	2295,9 N
2100,0 N	400,0 N		2608,2 N	36,38 °	-8,62 °	2578,7 N
2400,0 N	300,0 N		2855,3 N	32,80 °	-12,20 °	2790,9 N

**Tabelle 3: Kräfte der Messung bei Kontaktpunkt A/B**

In Tabellen 2 und 3 sind die konstante Kraft in vertikaler Richtung und die Kräfte in horizontaler Richtung für die Fälle des Kontaktes in Nominallage und bei Verschiebung aus der Nominallage aufgelistet.

Aus den zwei Kraftanteilen wurden die resultierende Kraft und der Winkel dieser berechnet. Ein negativer Winkel der Vorrichtung bedeutet, dass die Rolle in der

Vorrichtung umgespannt werden muss. (siehe Abbildung 41)

Da aufgrund der Aufgabenstellung der Einfluss der Normalkraftanteile der resultierenden Kraft separat gemessen werden soll, ist dieser ebenfalls in den Tabellen angeführt.

Bei der Betrachtung der Kräfte bei Kontaktpunkt A/B fällt auf, dass beim stationären Wert der Kurvenfahrt der Anteil der auftretenden Tangentialkräfte sehr gering ist.

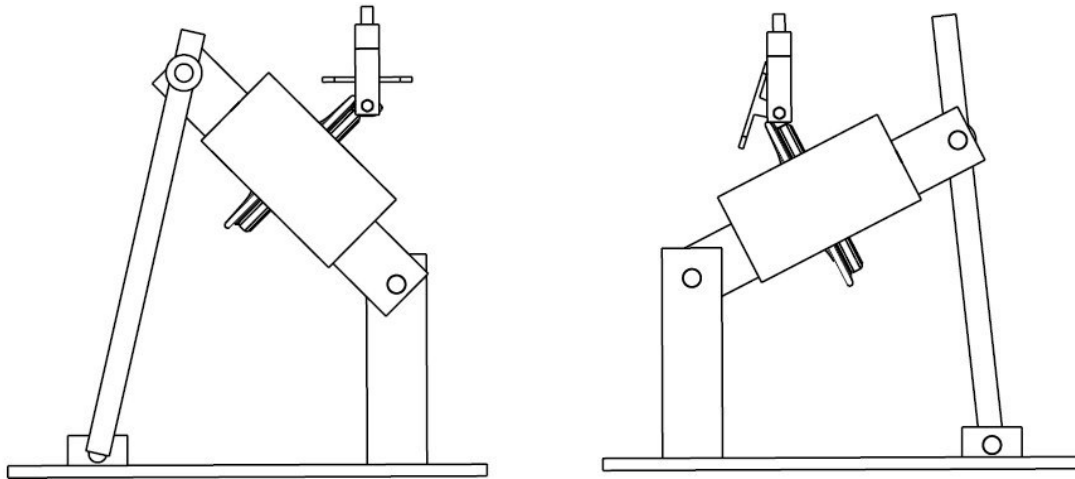


Abbildung 41: Positiver und negativer Winkel Vorrichtung (rechts)

## Kontaktpunkte

Ein weiterer Punkt, der für die Erstellung des Messplans nötig war und noch nicht erläutert wurde, ist die Festlegung der zu messenden Kontaktpunkte.

Hierzu wurden die im Abschnitt „Analyse“ bestimmten möglichen Berührungspunkte herangezogen. Neben der Nominallage ist die Messung bei Anlauf am Spurkranz sehr interessant, da diese Lage mögliche Aufschlüsse über die in diesem Fall auftretende Kraftaufteilung geben könnte. Des Weiteren kann dadurch der Verschleiß der Spurkranzflanke in weiteren Simulationen berücksichtigt werden. Dieser Punkt wird im Rahmen dieser Arbeit als Kontaktpunkt B bezeichnet. Der Kontaktpunkt in Nominallage wird als Kontaktpunkt „Nom“ bezeichnet (siehe Abbildung 42).

Da bei erhöhten Querkräften ein Versatz während der Kurvenfahrt zu erwarten ist, wurde zusätzlich zum Berührungspunkt B ein Kontaktpunkt, der zwischen Nominallage und Punkt B liegt, untersucht, der als Punkt A bezeichnet wird.

Um die Gültigkeit der Theorie nach Hertz zu überprüfen, wurde noch ein weiterer Kontaktpunkt gewählt, der im Normalfall nicht auftreten kann, aber von dem erwartet wird, dass dort eine mittig liegende Kontaktfläche entsteht. Dieser Punkt wird Punkt C genannt. Die Lage dieses Punktes wurde im Rahmen der ersten Versuche ermittelt und festgelegt.

In Abbildung 42 sind die Lagen der untersuchten Berührungspunkte eingezeichnet. Die Differenz zwischen Kontaktpunkt B und den restlichen Positionen wurde als Grundlage für die Verschiebungen der Vorrichtung herangezogen.

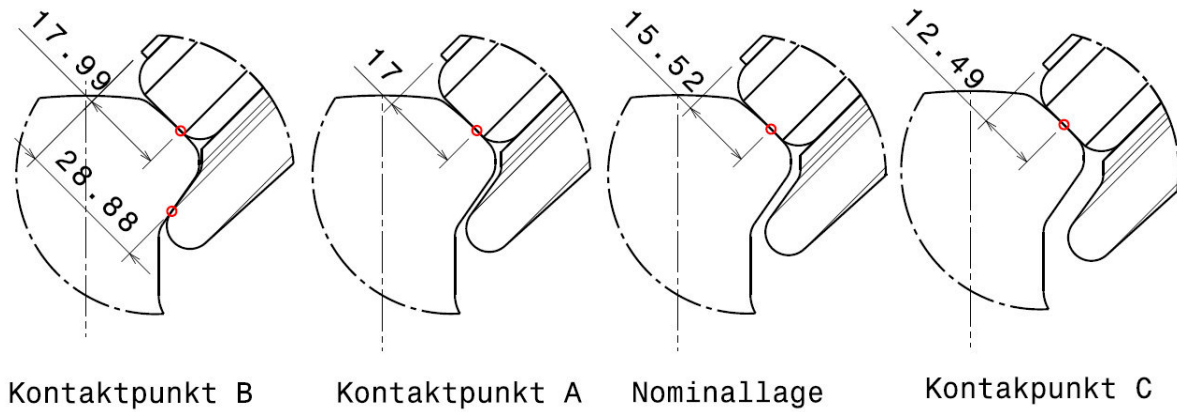


Abbildung 42: Übersicht Kontaktpunkte

### Erläuterungen zum Messplan

Die erste Messung stellte die Aufzeichnung der Federkennlinie der Rolle bzw. der Vorrichtung dar.

Der weitere Messplan bestand aus jeweils einer Messreihe der resultierenden Kraft und einer Messreihe des Normalkraftanteils der Resultierenden in den Berührungspunkten Nom, B und C. Als Messreihe werden die Messungen bei Aufbringen der in Tabelle 2 bzw. Tabelle 3 angeführten Kräfte bezeichnet. Aufgrund der Messgenauigkeit der Kraftmessdose wurden alle Kräfte im Messplan auf ganze Werte gerundet.

In den Punkten Nom und C wurde die verminderte Kraft in vertikaler Richtung berücksichtigt. Messungen im Punkt A wurden bei den resultierenden Kräften 2299 N und 2855 N, sowie bei den Normalkraftanteilen 1094 N, 2296 N und 2791 N durchgeführt.

Da die Druckempfindlichkeit der Folienklasse Low bei den kleineren Kräften zu gering war, wurden auch Messungen mit den Folien Super Low durchgeführt. Diese wurden jedoch nicht über die gesamte Messreihe eingesetzt, da das Ergebnis bezüglich der Druckverteilung bei höheren Kräften nicht aussagekräftig war.

Im Falle des Kontaktpunktes C wurden für die Bestimmung des E-Moduls auch Messungen mit den Kräften 100 N bzw. 300 N und der Folienklasse Super Low gemacht.

Die Messungen bei resultierender Kraft in Berührungspunkt A und B wurden aufgrund der hohen Kräfte nur mit den Folien „Low“ durchgeführt.

Des Weiteren wurde auch eine Vergleichsmessung mit der verminderten Kraft  $F_z$  in Punkt B durchgeführt, um die Ergebnisse mit den Resultaten aus der Messung in der Nominallage vergleichen zu können.

Um sowohl den Winkel der Schiene als auch den der Vorrichtung einstellen zu können, sind die notwendigen Winkel im Messplan angeführt.

der genaue Messplan mit dem Messablauf befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

### 3.2.5 Messaufbau

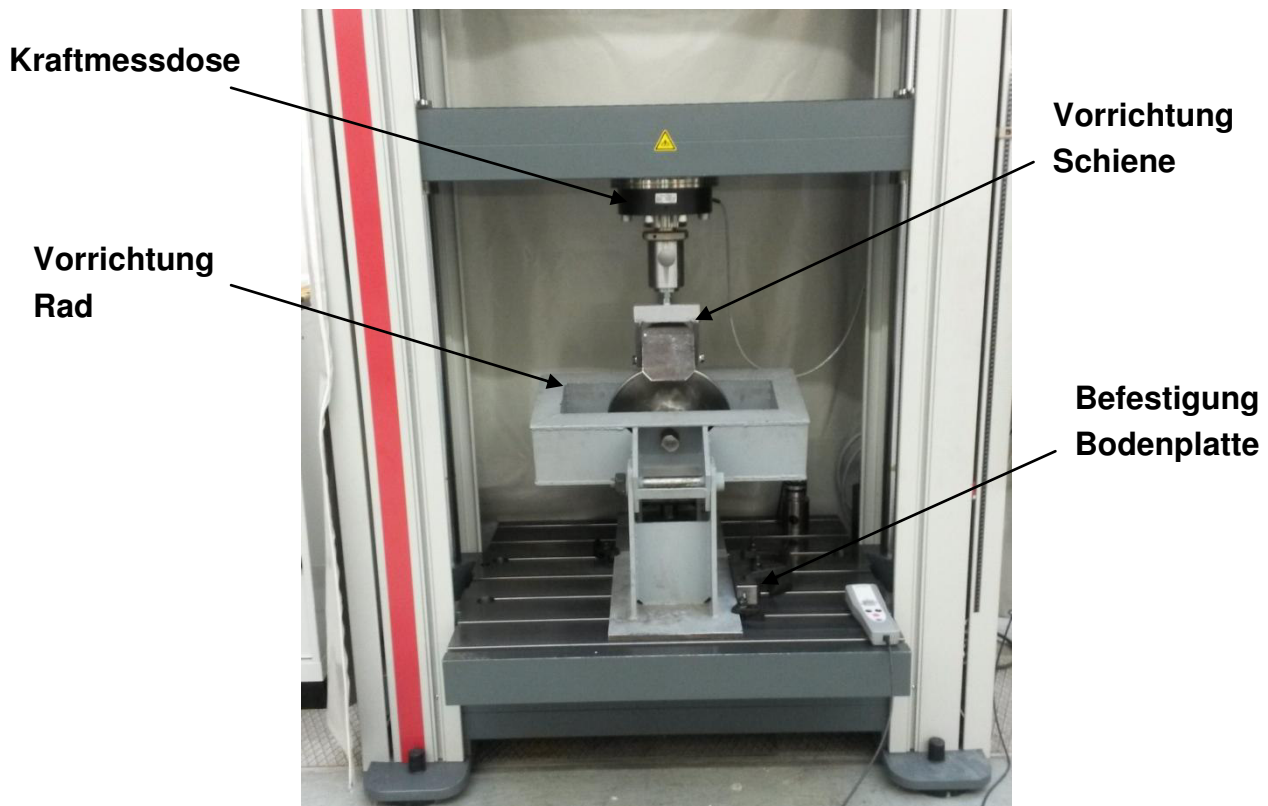


Abbildung 43: Messaufbau Messung Flächenpressung Foto 1

Der Messaufbau bestand aus einer Zug-Druck-Prüfmaschine, die mittels Kraftmessdose die aufgebrachte Kraft maß.

Die Schiene wurde direkt mit der Vorrichtung an der Kraftmessdose befestigt.

Die Einspannvorrichtung für die Spurführungsrolle wurde auf die Bodenplatte der Prüfmaschine gestellt. Damit diese nicht verrutschen konnte, wurde eine seitliche Führung angebracht und die Vorrichtung mit Klemmen niedergespannt.

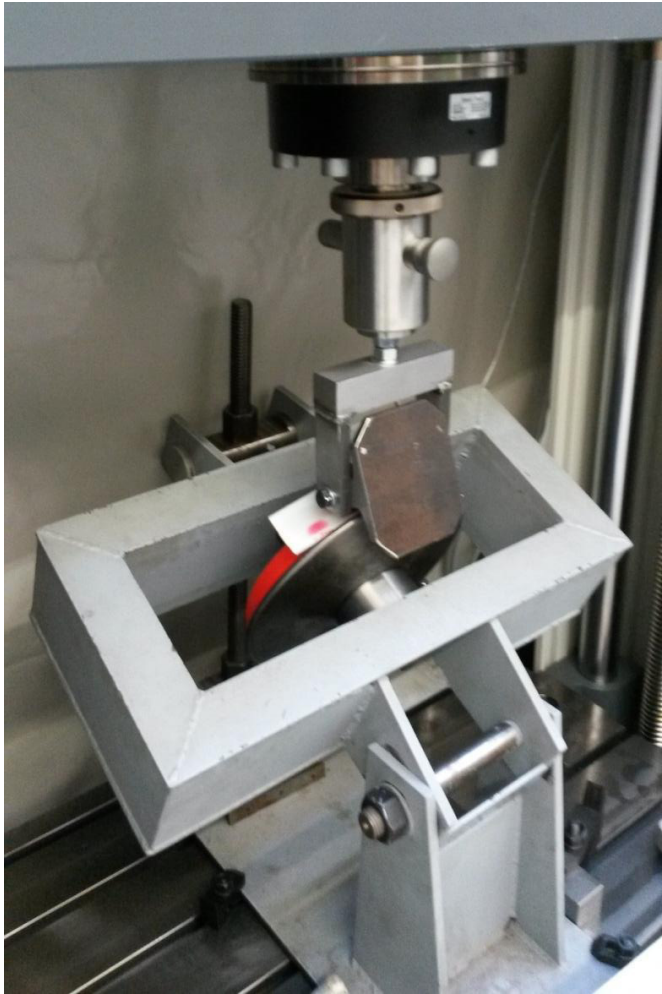


Abbildung 44: Messaufbau Messung Flächenpressung Foto 2

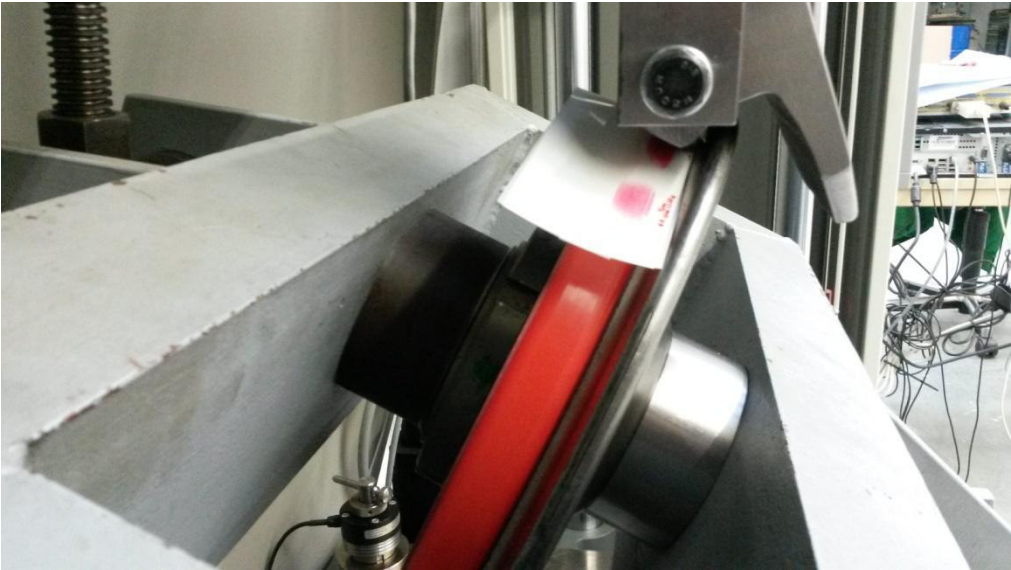


Abbildung 45: Messaufbau Messung Flächenpressung Foto 3

### 3.2.6 Durchführung

Die Durchführung der Messungen erfolgte in folgenden Schritten:

- Einstellen des erforderliche Winkels der Schiene
- Einstellen des erforderlichen Winkels der Vorrichtung
- Ermittlung der Lage des Anlaufens am Spurkranz
- Wenn erforderlich, Verschieben der Vorrichtung zum gewünschten Kontaktpunkt
- Einlegen der Messfolie
- Einstellen der Kraft und Durchführung der Messung
- Entnehmen der Folie
- Vornehmen neuer Einstellungen

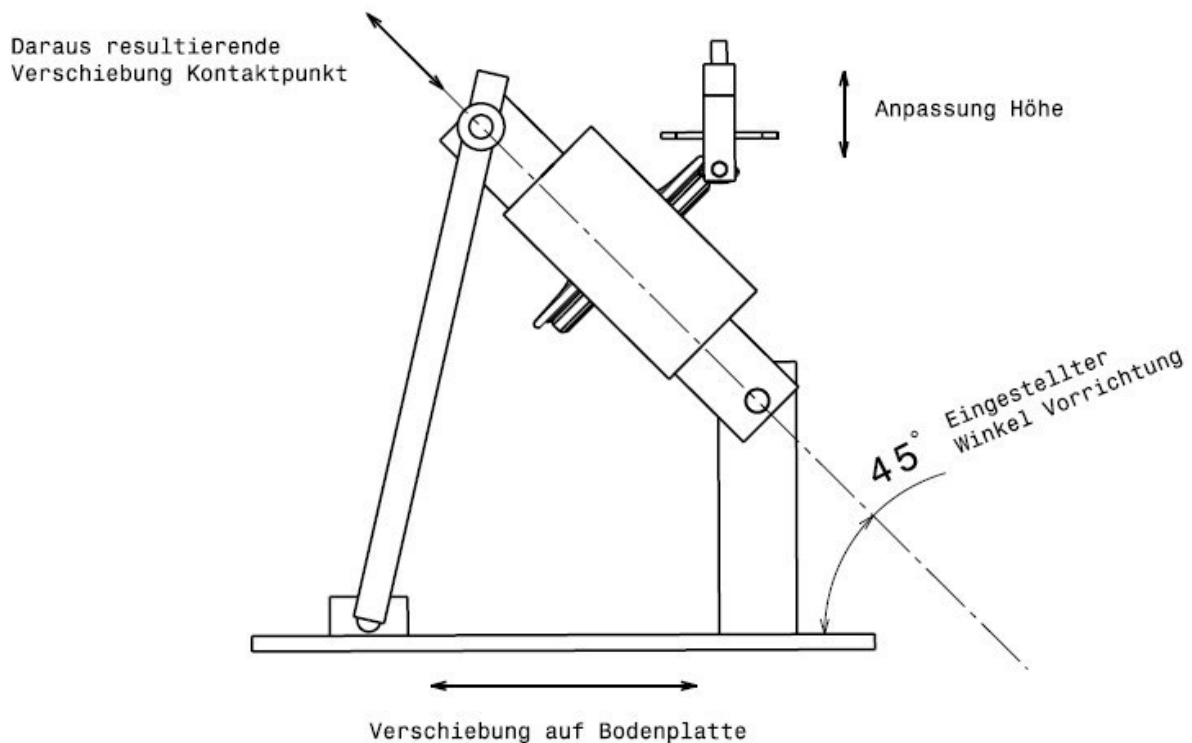
Die Einstellung der Winkel wurde mit einem digitalen Winkelmessegerät durchgeführt.

Die Ermittlung der Berührung mit dem Spurkranz erfolgte mittels elektronischer Tekscan Folie, die bei Berührung die Stelle des Kontaktes anzeigt. Diese wurde zwischen Rolle und Schiene eingelegt und die Einspannvorrichtung der Rolle soweit auf der Bodenplatte der Prüfmaschine verschoben, bis die Folie einen Kontakt auf der Lauffläche und auf dem Spurkranz anzeigte. Danach wurde die Vorrichtung festgespannt und die Lage der Vorrichtung auf der Bodenplatte der Prüfmaschine mittels eines Referenzpunktes ermittelt.

Um weitere Kontaktpunkte zu messen, wurde die Vorrichtung verschoben. Der Betrag der Verschiebung wurde abhängig vom eingestellten Winkel der Einspannvorrichtung berechnet. Bei horizontaler Lage der Achse der Einspannvorrichtung stimmt die Verschiebung mit den beim Messplan festgelegten Entfernungen vom Berührungspunkt B überein. Bei Zunahme des Winkels wird der Betrag der Verschiebung um den Cosinus des Winkels verringert.

Die Höhe der Schiene wurde jeweils entsprechend angepasst.





**Abbildung 46: Vorgang Einstellung der unterschiedlichen Kontaktpunkte**

Für die Messungen wurden Folien der Druckempfindlichkeitsklasse Low verwendet. Zusätzlich wurden einige Messungen auch mit der Klasse Super Low durchgeführt. Die Messungen erfolgten bei einer Raumtemperatur von 22 °C.

### 3.2.7 Messmittel

Bezeichnung	Typ
Zug-Druck-Prüfmaschine	Zwick/Roell Z250
Kraftmessdose	Zwick/Roell Load Cell Type: Xforce P Nominal Force: 250kN Characteristic: 2 mV/V
Folien Super Low	Fuji Film Prescale Pressure Type LLW (0,5-2,5 MPa) 2 Komponenten
Folien Low	Fuji Film Prescale Pressure Type LW (2,5-10 MPa) 2 Komponenten
Winkelmessgerät	Sola Digitale Wasserwage ENW 60cm

### 3.3 Messung Oberflächenrauheit

Für die Vorhersage des Verschleißverhaltens ist die Kenntnis der Oberflächenbeschaffenheiten von großer Bedeutung. Deshalb wurden neben der Messung der Flächenpressung auch die Oberflächenbeschaffenheit der Spurführungsrolle und der Schiene genauer untersucht.

Die Messung der Oberflächenrauigkeiten von Spurführungsrolle und Schiene wurden im Labor des Instituts für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik, Forschungsbereich Austauschbau Messtechnik / Produktionsmesstechnik und Qualität durchgeführt. Hierbei kam ein Oberflächenmessgerät zum Einsatz, das die Oberfläche mittels Fühler abtastet. Es wurden sowohl die Rauigkeit der Schiene als auch die der Lauffläche und des Spurkranzes ermittelt. .

Für die Bestimmung des über die Messlänge gemittelten Rauigkeitswertes  $R_a$  wurden bei allen Werkstücken mehrere Messungen an unterschiedlichen Stellen durchgeführt. Diese wurden anschließend gemittelt. Da es sich bei der Spurführungsrolle und der Schiene um gebrauchte Werkstücke handelte, waren an allen Oberflächen Schäden zu erkennen. Um die Oberflächenrauigkeit eines unbeschädigten Werkstückes zu simulieren, wurde bei allen Messungen ein zweiter Mittelwert gebildet, der die erhöhten Rauheitswerte an den Stellen der Beschädigung nicht berücksichtigt.

Die detaillierten Ergebnisse aller Messungen befinden sich im Anhang.

Alle Messungen erfolgten bei einer konstanten Raumtemperatur von 20 °C.

#### 3.3.1 Messung Schiene

Die Messung der Oberflächenrauheit der Schiene erfolgte an drei verschiedenen Stellen. In der nachfolgenden Abbildung 47 sind die Stellen der Messungen skizziert. Die Messungen hatten jeweils eine Länge von 4 mm.

Da, wie schon erwähnt, Schäden auf der Oberfläche zu erkennen waren (siehe Abbildung 49) wurde an der Position „mitte“ eine Vergleichsmessung bei möglichst unbeschädigter Oberfläche durchgeführt.

In Abbildung 48 ist der Messaufbau dargestellt.

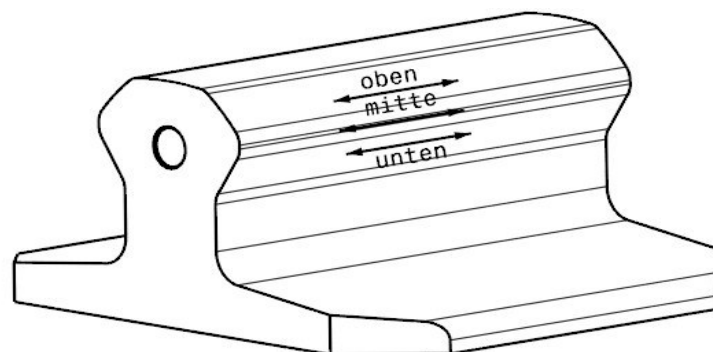


Abbildung 47: Stellen der Messung der Oberflächenrauheit der Schiene

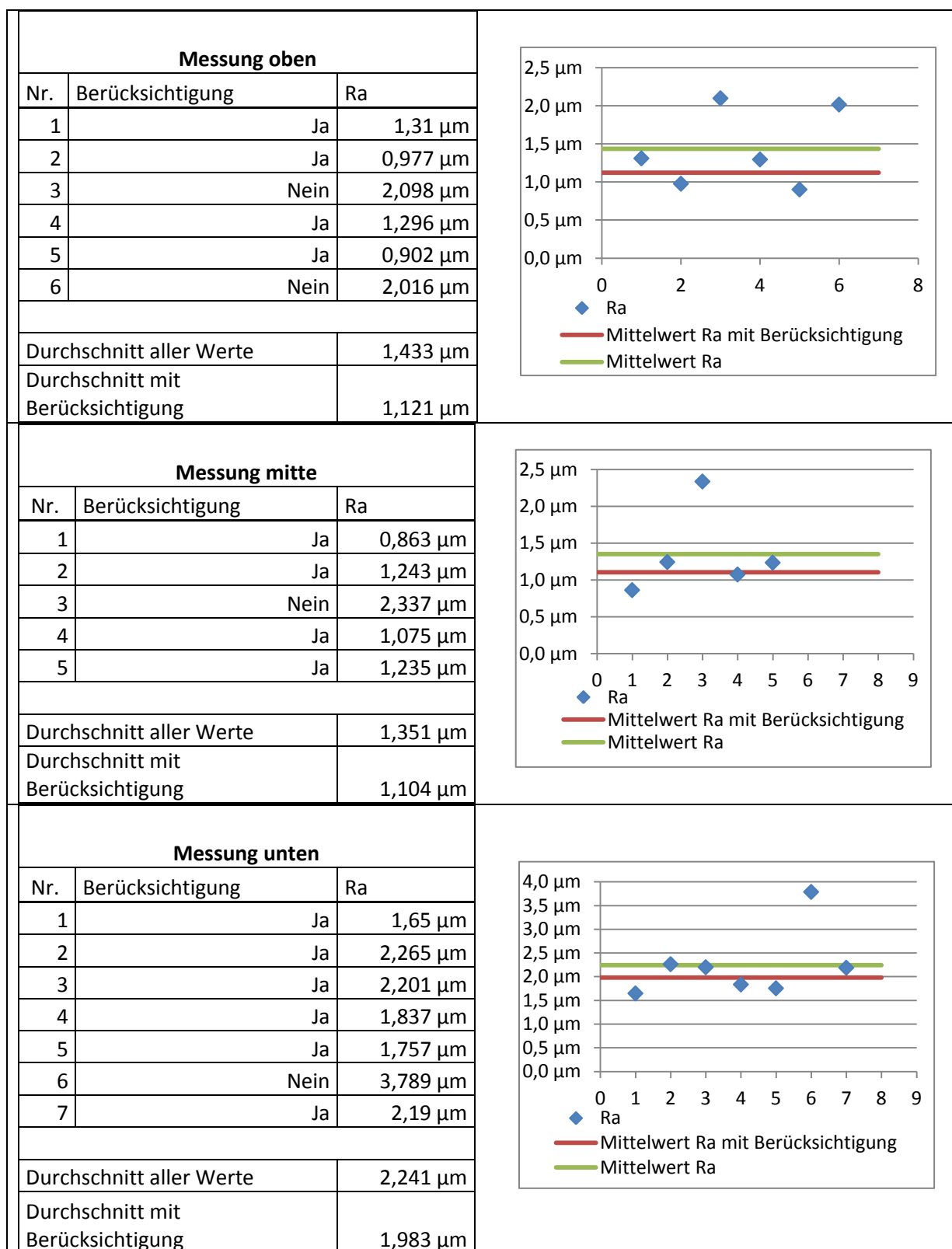


**Abbildung 48: Messaufbau Oberflächenmessung Schiene**



**Abbildung 49: Schäden Schiene**

**Ergebnisse der Messungen**



**Tabelle 4: Ergebnisse Oberflächenrauigkeitsmessung Schiene**

### 3.3.2 Messung Lauffläche

Die Messung der Oberflächenrauheit der Lauffläche der Spurführungsrolle erfolgte ebenfalls an drei verschiedenen Stellen, die in Abbildung 50 abgebildet sind. Position 1 berücksichtigt den Umstand, dass sich die Kontaktfläche zwischen Rolle und Schiene auch über die gerade Lauffläche hinaus erstreckt. In dieser Position wurden 4 mm gemessen.

Die Messungen in Position 1 und 2 erfolgten auf der geraden Lauffläche. In Position 2 wurden 4 mm und in Position 8 mm gemessen.

Das Rad wurde an 5 verschiedenen Stellen untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt.

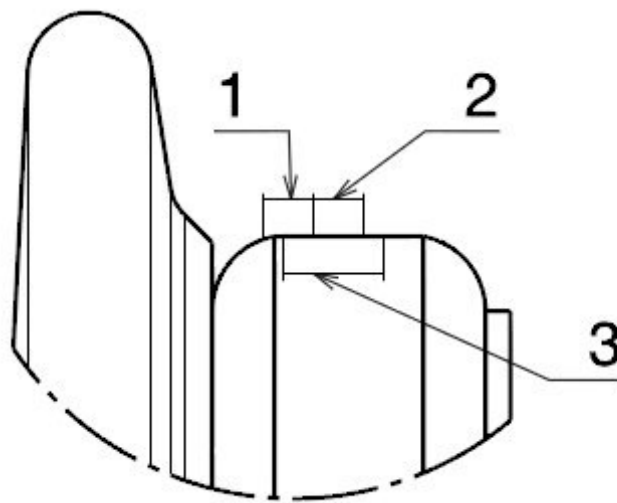


Abbildung 50: Stellen der Messung der Oberflächenrauigkeit der Schiene



Abbildung 51: Versuchsaufbau Messung Oberflächenrauheit Lauffläche

Messung Laufflächenrand Position 1		
Nr.	Berücksichtigung	Ra
1	Nein	0,849 $\mu\text{m}$
2	Ja	1,244 $\mu\text{m}$
3	Ja	1,125 $\mu\text{m}$
4	Ja	1,067 $\mu\text{m}$
5	Ja	1,122 $\mu\text{m}$
Durchschnitt aller Werte		1,082 $\mu\text{m}$
Durchschnitt mit Berücksichtigung		1,14 $\mu\text{m}$

Messung halbe Lauffläche (ohne Rand) Position 2		
Nr.	Berücksichtigung	Ra
1	Ja	0,543 $\mu\text{m}$
2	Ja	0,696 $\mu\text{m}$
3	Ja	0,605 $\mu\text{m}$
4	Ja	0,564 $\mu\text{m}$
5	Ja	0,712 $\mu\text{m}$
Durchschnitt aller Werte		0,624 $\mu\text{m}$
Durchschnitt mit Berücksichtigung		0,624 $\mu\text{m}$

Messung gesamte Lauffläche (ohne Rand) Position 3		
Nr.	Berücksichtigung	Ra
1	Ja	0,634 $\mu\text{m}$
2	Nein	0,963 $\mu\text{m}$
3	Ja	0,642 $\mu\text{m}$
4	Ja	0,577 $\mu\text{m}$
5	Ja	0,683 $\mu\text{m}$
Durchschnitt aller Werte		0,7 $\mu\text{m}$
Durchschnitt mit Berücksichtigung		0,634 $\mu\text{m}$

Tabelle 5: Ergebnisse Oberflächenrauigkeitsmessung Lauffläche

Die Oberflächenrauigkeit im Randbereich der Lauffläche ist höher als der restliche Bereich der Lauffläche.

### 3.3.3 Messung Spurkranz.

Da es während der Fahrt der Spurführungsrolle auch zum Anlaufen des Spurkranzes an der Schiene kommen kann, wurden im Bereich des Spurkranzes ebenfalls Messungen durchgeführt. Die Messungen erfolgten an den Stellen, wo der Spurkranz durch den Betrieb schon beschädigt war.

Die Messungen wurden an 7 verschiedenen Stellen des Spurkranzes durchgeführt, wobei versucht wurde, ein möglichst unterschiedliches Profil zu messen.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse dieser Messungen dargestellt.



Abbildung 52: Messung Oberflächenrauigkeit Spurkranz

Messung Spurkranz		
Nr.	Berücksichtigung	Ra
1	Ja	0,168 $\mu\text{m}$
2	Ja	0,345 $\mu\text{m}$
3	Ja	0,15 $\mu\text{m}$
4	Ja	0,413 $\mu\text{m}$
5	Nein	2,379 $\mu\text{m}$
6	Ja	0,181 $\mu\text{m}$
7	Ja	0,16 $\mu\text{m}$
Durchschnitt aller Werte		0,542 $\mu\text{m}$
Durchschnitt mit Berücksichtigung		0,236 $\mu\text{m}$

Messstelle	Ra-Wert ( $\mu\text{m}$ )
1	0,168
2	0,345
3	0,15
4	0,413
5	2,379
6	0,181
7	0,16

Tabelle 6: Ergebnisse Oberflächenrauigkeitsmessung Spurkranz

Messung Nummer 2 erfolgte an einer Stelle mit einigen Kratzern in der Oberfläche. Die Messung Nummer 5 erfolgte an einer Stelle, wo Rost vorhanden war.

### 3.3.4 Messmittel

Die Messung der Oberflächenrauigkeit erfolgte mit dem nachstehend beschriebenen Oberflächenmessgerät.

Bezeichnung	Typ
Oberflächenmessgerät	Taylor Hobson Precision Form Talysurf Series 50mm Intra System Nr FTSI-6667



## 4 Analytische Berechnungen

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, zu überprüfen, ob die Ergebnisse der Messungen der Größe der Kontaktfläche und der Spannungen mit der analytischen Lösung nach Hertz übereinstimmen. Dazu müssen Berechnungen durchgeführt werden. Diese erfolgen unter den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Voraussetzungen und nach den in Abschnitt 2.2.2 erläuterten Formeln.

Des Weiteren werden die Berechnungen mit dem in Kapitel 2.4 beschriebenen angepassten Multi-Hertz Ansatz durchgeführt.

Nachfolgend wird überprüft, ob die Voraussetzungen für die analytische Berechnung nach Hertz beim vorliegenden Kontakt von Spurführungsrolle und Schiene gegeben sind.

Anschließend werden die fehlenden Werkstoffparameter ermittelt und die analytischen Berechnungen durchgeführt.

### 4.1 Überprüfung der Voraussetzungen für die Theorie nach Hertz

Aufgrund der vorher schon durchgeführten Analyse des Rad-Schiene-Systems ist es ohne Probleme möglich die Anwendbarkeit der Theorie nach Hertz nach den in Kapitel 2.2.1 erwähnten Bedingungen zu überprüfen. Es folgt eine kurze Wiederholung dieser Voraussetzungen:

- Mindestens ein Körper muss im Kontaktgebiet gekrümmt sein.
- Im Kontaktgebiet muss die Krümmung konstant sein.
- Die Körper müssen homogene isotrope Körper sein.
- Beide Körper müssen linear elastisches Materialverhalten aufweisen.
- Die Abmessungen der Kontaktfläche müssen klein im Bezug auf die Körperabmessungen sein.
- Die Berührung muss ein nicht konformer Kontakt sein.
- Die Oberfläche beider Körper wird ideal glatt angenommen.
- Struktur- und Kontaktmechanik können getrennt voneinander behandelt werden.

Nach der Analyse des Systems war ersichtlich, dass bei der betrachteten Kontaktpaarung von Spurführungsrolle und Schiene nur überprüft werden muss, ob linear-elastisches Materialverhalten gegeben ist.

Um zu überprüfen ob das Polyurethan linear-elastisches Materialverhalten aufweist, wurde auf die sich in horizontaler Lage befindliche Spurführungsrolle eine Kraft von

2500 N aufgebracht und das Kraft-Weg-Diagramm aufgezeichnet. In der nachstehenden Abbildung ist ersichtlich, dass im Arbeitsbereich der Spurführungsrolle (in Nominallage zwischen 773 N und 2522 N) das Materialverhalten weitgehend linear ist.

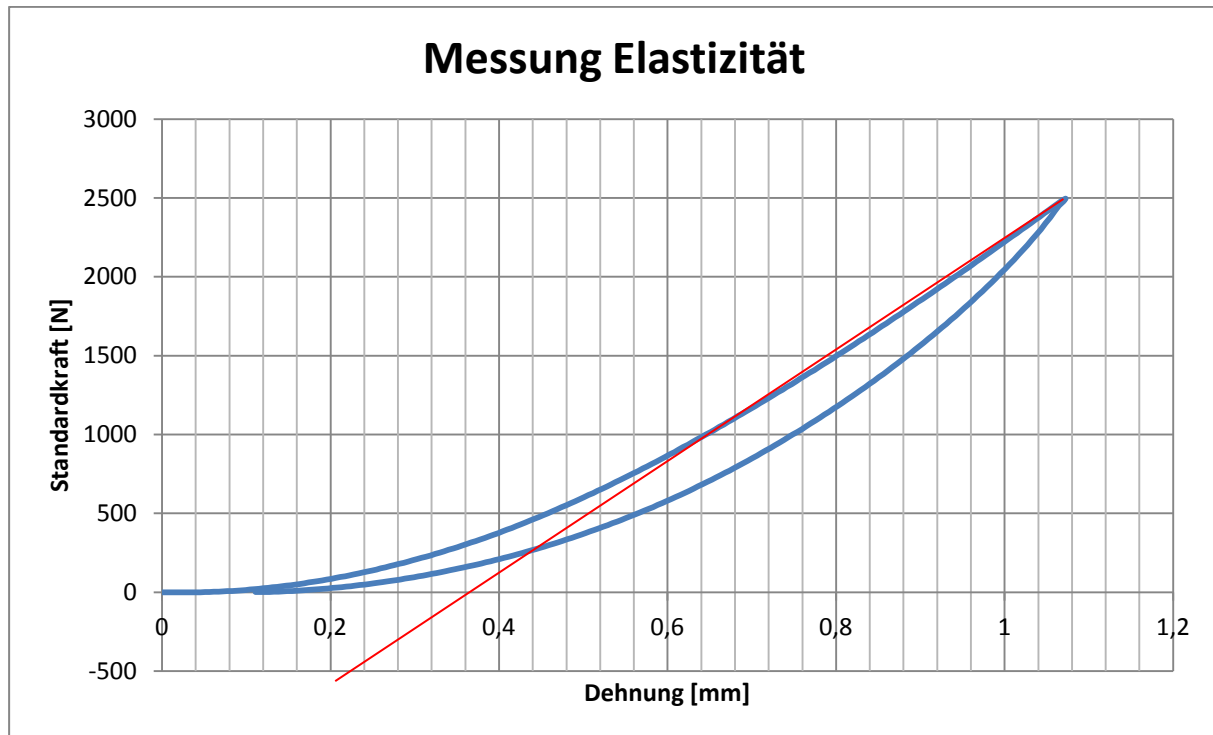


Abbildung 53: Kraft-Weg Diagramm Messung Elastizität

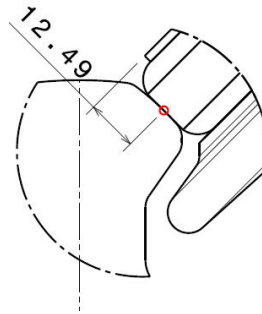
Da das linear elastische Materialverhalten gezeigt wurde, ist eine Lösung des Kontaktproblems nach Hertz möglich. Lediglich der fehlende E-Modul des Polyurethans muss noch bestimmt werden, was im folgenden Abschnitt geschieht.

## 4.2 E Modul

Für die Berechnung nach Hertz war, wie schon erwähnt, der E-Modul des eingesetzten Werkstoffes Polyurethan unbekannt. Da der E-Modul von Polyurethan von der Werkstoffzusammensetzung und der Härte abhängt, wurde dieser mittels des Hookschen Gesetzes  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  ermittelt. Grundlage für diese Vorgehensweise bildete die DIN EN ISO 844:2014 „Harte Schaumstoffe - Bestimmung der Druckeigenschaften“. Da die Versuche aber nicht an einem definierten Probekörper, sondern an der Spurführungsrolle durchgeführt wurden, ist der hier bestimmte E-Modul des Polyurethans nur eine genäherte Lösung.

Die Spannung  $\sigma$  wurde über die Prüfkräfte und die durch den Versuch bestimmte Größe der Kontaktfläche bestimmt. Hierbei wurde die Kontaktfläche in Kontaktpunkt C (siehe Abbildung 54) herangezogen, da diese Kontaktfläche am ehesten die Form einer Ellipse aufwies. Zusätzlich wurden hauptsächlich die

Ergebnisse aus den Messungen des Normalkraftanteils mit den Super Low Folien herangezogen, da diese eine bessere Auflösung bezüglich der Größe der Kontaktfläche aufwiesen.



Kontaktpunkt C

Abbildung 54: Kontaktpunkt C

$\epsilon$  ist in dem betrachteten Fall die Stauchung und wurde mit Hilfe der Kraft-Weg-Diagramme bestimmt. An der steilsten Stelle des jeweiligen Diagramms wurde eine Tangente angelegt und die auftretende Stauchung bestimmt. Diese wurde dann durch die aus der technischen Zeichnung herausgelesene Dicke der Polyurethanauflfläche dividiert.<sup>91</sup>

Der Einfluss der Elastizität der Stahlrolle, auf die die Bandage aus Polyurethan aufgebracht ist, wurde aufgrund der zu erwartenden großen Differenz der E-Module vernachlässigt.

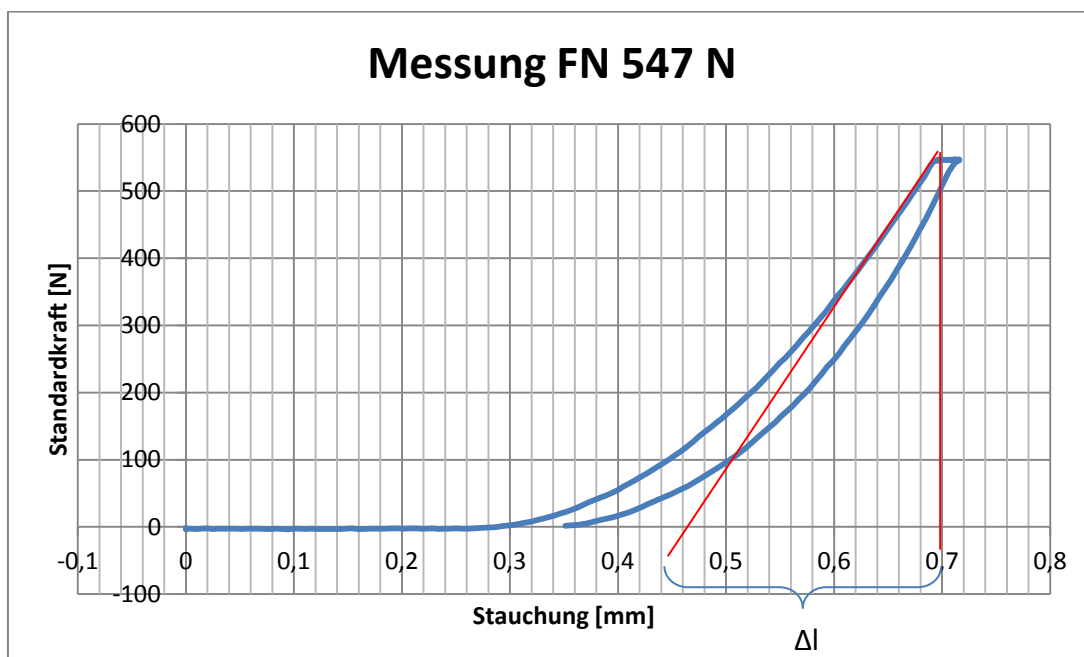


Abbildung 55: Stauchung

<sup>91</sup> Vgl. DIN EN ISO 844, 2014, S.9f

	F	A	$\sigma$	$\Delta l$	$\varepsilon$	E	Einbeziehung
SuperLow	100 N	60,60 mm <sup>2</sup>	1,65 N/mm <sup>2</sup>	0,102	0,012	137,51 N/mm <sup>2</sup>	Nein
SuperLow	300 N	148,00 mm <sup>2</sup>	2,03 N/mm <sup>2</sup>	0,176	0,020705882	97,90 N/mm <sup>2</sup>	Nein
SuperLow	547 N	201,00 mm <sup>2</sup>	2,72 N/mm <sup>2</sup>	0,2384	0,028047059	97,03 N/mm <sup>2</sup>	Ja
Low	547 N	131,00 mm <sup>2</sup>	4,18 N/mm <sup>2</sup>	0,2376	0,027952941	149,38 N/mm <sup>2</sup>	Nein
SuperLow	865 N	247,00 mm <sup>2</sup>	3,50 N/mm <sup>2</sup>	0,3159	0,037164706	94,23 N/mm <sup>2</sup>	Ja
Low	865 N	192,00 mm <sup>2</sup>	4,51 N/mm <sup>2</sup>	0,3192	0,037552941	119,97 N/mm <sup>2</sup>	Nein
SuperLow	1183 N	298,00 mm <sup>2</sup>	3,97 N/mm <sup>2</sup>	0,3928	0,046211765	85,90 N/mm <sup>2</sup>	Ja
Low	1183 N	246,00 mm <sup>2</sup>	4,81 N/mm <sup>2</sup>	0,38495	0,045288235	106,19 N/mm <sup>2</sup>	Nein
SuperLow	1502 N	316,00 mm <sup>2</sup>	4,75 N/mm <sup>2</sup>	0,4467	0,052552941	90,45 N/mm <sup>2</sup>	Ja
Low	1502 N	327,00 mm <sup>2</sup>	4,59 N/mm <sup>2</sup>	0,4408	0,051858824	88,57 N/mm <sup>2</sup>	Nein
SuperLow	1749 N	333,00 mm <sup>2</sup>	5,25 N/mm <sup>2</sup>	0,4784	0,056282353	93,32 N/mm <sup>2</sup>	Ja
Low	1749 N	297,00 mm <sup>2</sup>	5,89 N/mm <sup>2</sup>	0,5067	0,059611765	98,79 N/mm <sup>2</sup>	Nein
Low	2032 N	326,00 mm <sup>2</sup>	6,23 N/mm <sup>2</sup>	0,5402	0,063552941	98,08 N/mm <sup>2</sup>	Ja
Low	2244 N	343,00 mm <sup>2</sup>	6,54 N/mm <sup>2</sup>	0,575	0,067647059	96,71 N/mm <sup>2</sup>	Ja
						Mittelwert	93,674 N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 7: Bestimmung des E-Moduls in Kontaktpunkt C

In der obigen Tabelle sind die Ergebnisse der Berechnung des E-Moduls dargestellt. Aufgrund der schlechten Auflösung der Folien bei geringen Kräften, weichen die bestimmten E-Modul-Werte sehr weit vom Durchschnitt ab. Um eine Verzerrung des Ergebnisses aufgrund der Folienuflösung zu verhindern, wurden nicht alle E-Module in die Berechnung des Mittelwertes einbezogen (siehe Spalte „Einbeziehung“ in Tabelle 7).

Für die weitere Berechnung wurde 93 N/mm<sup>2</sup> als E-Modul gewählt.

### 4.3 Berechnung

Die Berechnungen nach Hertz erfolgten nach den in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Formeln und nach dem in Kapitel 2.4 erläuterten angepassten Multi-Hertz-Ansatz. Für diesen Ansatz müssen 3 Ellipsen mit unterschiedlichen Kräften und Krümmungen nach Hertz berechnet werden.

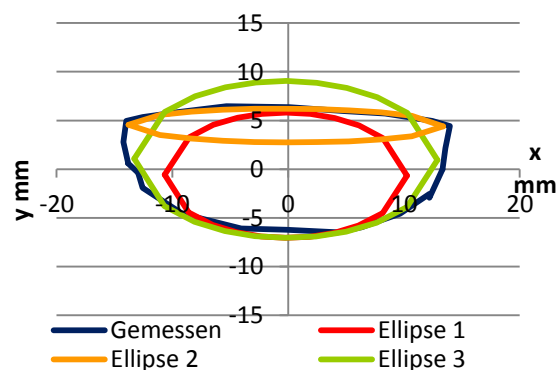


Abbildung 56: Angepasster Multi-Hertz-Ansatz

In den nachfolgenden Abbildungen sind das Koordinatensystem und die Krümmungsachsen ersichtlich, mit denen die Berechnungen durchgeführt wurden. Die positive Richtung der Achsen ist jeweils die Seite, wo die Achsenbezeichnung eingetragen ist.

Der Koordinatenursprung liegt immer genau im Zentrum der Kontaktfläche.

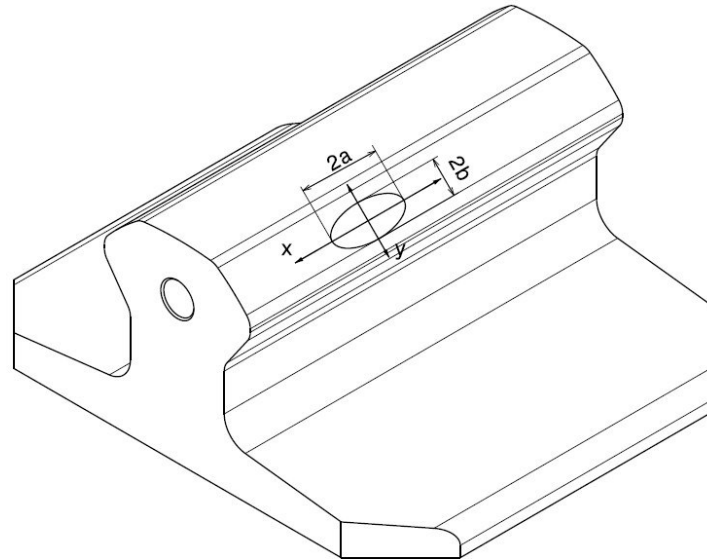


Abbildung 57: Koordinatensystem Berechnung nach Hertz

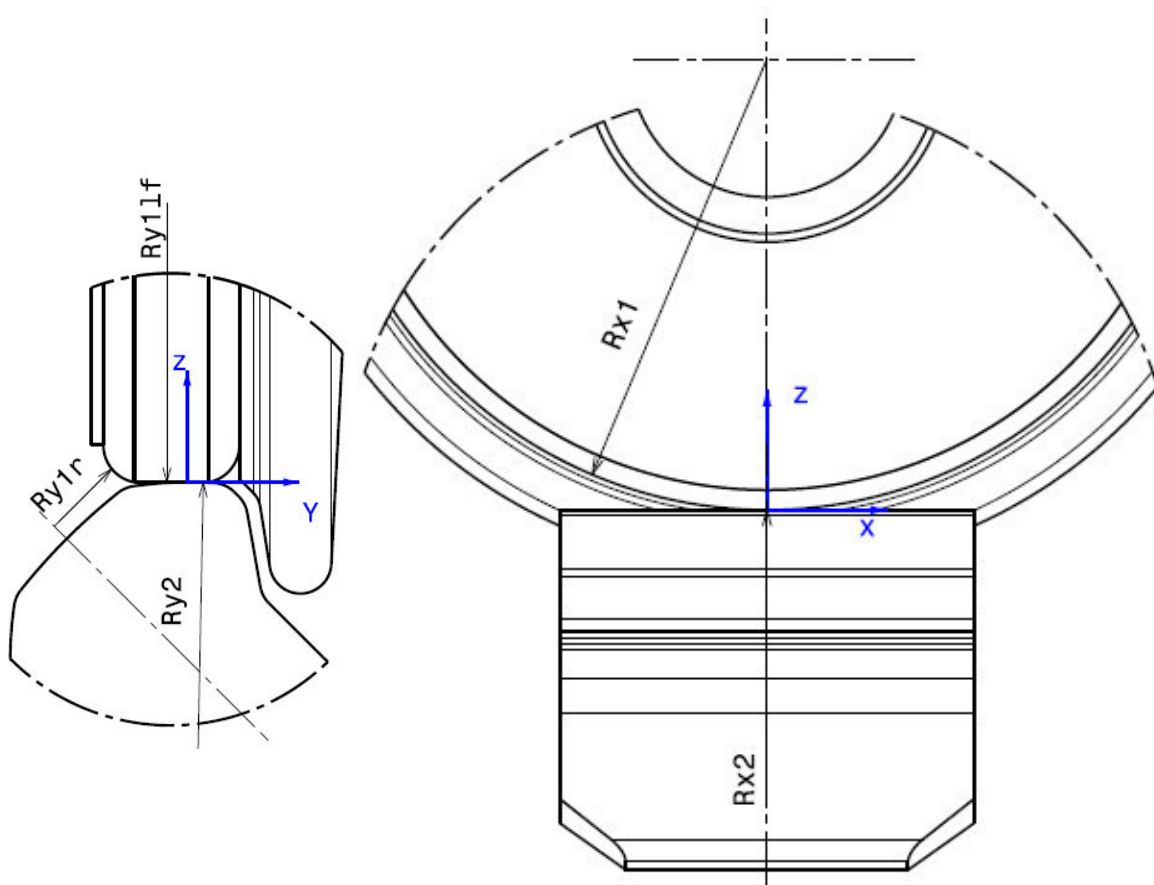


Abbildung 58: Koordinatensystem und Krümmungen Rolle-Schiene

### 4.3.1 Rechnung

Im Zuge der Berechnungen werden zuerst die Krümmungen der Lauffläche und des Randes der Lauffläche berechnet und der Hilfswinkel bestimmt. Anschließend werden die Hertzschen Beiwerte angegeben.

Für die Bestimmung der Hertzschen Beiwerte wurde eine Tabelle aus dem im Literaturverzeichnis angeführten Buch von Steinhilper und Sauerer herangezogen und der gesuchte Wert linear interpoliert.

Danach wird die Kraft berechnet, die im jeweiligen Kontaktpunkt benötigt wird bis die Krümmung des Randes der Lauffläche in das Kontaktgebiet eingedrungen ist (siehe Kapitel 2.4.2).

Im Anschluss werden die Kräfte der einzelnen Ellipsen berechnet und schließlich die Halbachsen nach Hertz ermittelt.

Die Berechnung der Spannungen erfolgte ebenfalls nach den Formeln von Hertz. Da die Spannungen von der Lage in der Kontaktellipse abhängen, werden die Ergebnisse der Spannungsberechnung in Kapitel 5 gezeigt.

#### Angaben

Index 1 = Rad                      Ry1f = Krümmungsradius der Lauffläche der Rolle  
 Index 2 = Schiene                Ry1r = Krümmungsradius am Rand der Lauffläche (siehe Abbildung 58)

#### Krümmungsradien

$R_{x1} := 135.5 \text{ mm}$                        $R_{y1f} := \infty \cdot \text{mm}$        $R_{y1r} := 6.1 \cdot \text{mm}$   
 $R_{x2} := \infty \cdot \text{mm}$                        $R_{y2} := 65 \text{ mm}$

#### Querkontraktionszahl

$\nu_1 := 0.4$                        $\nu_2 := 0.3$

#### E-Modul

$E_1 := 93 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$                        $E_2 := 206000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

#### Materialkonstante

$M_{at} := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) = 0.004518 \frac{\text{mm}^2}{\text{N}}$

## Berechnung der Krümmungen

Krümmung der Lauffläche

$$\rho_{lf} := \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}} + \frac{1}{R_{y1lf}} + \frac{1}{R_{y2}} = 0.022765 \frac{1}{\text{mm}}$$

Krümmung des Randes der Lauffläche

$$\rho_r := \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}} + \frac{1}{R_{y1r}} + \frac{1}{R_{y2}} = 0.186699 \frac{1}{\text{mm}}$$

## Berechnung des Hilfwinkels

Hilfwinkel der Lauffläche

$$\cos_{\tau_{lf}} := \frac{\left| \frac{1}{R_{x1}} - \frac{1}{R_{y1lf}} + \frac{1}{R_{x2}} - \frac{1}{R_{y2}} \right|}{\rho_{lf}} = 0.352$$

Hilfwinkel des Randes der Lauffläche

$$\cos_{\tau_r} := \frac{\left| \frac{1}{R_{x1}} - \frac{1}{R_{y1r}} + \frac{1}{R_{x2}} - \frac{1}{R_{y2}} \right|}{\rho_r} = 0.921$$

## Ermittlung der Hertzschen Beiwerte

Hertzsche Beiwerte Lauffläche

Aus Steinhilper und Saurer:

$$\text{bei } \cos(\tau) = 0,35 \quad \mu_{0.35} := 0.796 \quad \eta_{0.35} := 1.29 \quad \kappa_{0.35} := 0.971$$

$$\text{bei } \cos(\tau) = 0,4 \quad \mu_{0.4} := 0.771 \quad \eta_{0.4} := 1.34 \quad \kappa_{0.4} := 0.962$$

Interpolation

$$\mu_{lf} := \mu_{0.35} + \frac{\mu_{0.4} - \mu_{0.35}}{0.93 - 0.91} \cdot (\cos_{\tau_{lf}} - 0.35) = 0.794$$

$$\eta_{lf} := \eta_{0.35} + \frac{\eta_{0.4} - \eta_{0.35}}{0.4 - 0.35} \cdot (\cos_{\tau_{lf}} - 0.35) = 1.292$$

$$\kappa_{lf} := \kappa_{0.35} + \frac{\kappa_{0.4} - \kappa_{0.35}}{0.4 - 0.35} \cdot (\cos_{\tau_{lf}} - 0.35) = 0.971$$

## Hertzsche Beiwerte des Randes der Lauffläche

Aus Steinhilper und Saurer:

$$\text{bei } \cos(\tau) = 0,91 \quad \mu_{0,91} := 0,44 \quad \eta_{0,91} := 3,25$$

$$\text{bei } \cos(\tau) = 0,93 \quad \mu_{0,93} := 0,426 \quad \eta_{0,93} := 3,56$$

Interpolation

$$\mu_r := \mu_{0,91} + \frac{\mu_{0,93} - \mu_{0,91}}{0,93 - 0,91} \cdot (\cos_{\tau_r} - 0,91) = 0,437$$

$$\eta_r := \eta_{0,91} + \frac{\eta_{0,93} - \eta_{0,91}}{0,93 - 0,91} \cdot (\cos_{\tau_r} - 0,91) = 3,427$$

$$\kappa_r := \kappa_{0,91} + \frac{\kappa_{0,93} - \kappa_{0,91}}{0,93 - 0,91} \cdot (\cos_{\tau_r} - 0,91) = 0,643$$

**Berechnung der Kraft bis zur Eindringung der zweiten Krümmung ins Kontaktgebiet**

Grafisch ermittelte Eindringung bis zweite Krümmung in das Kontaktgebiet eintritt

$$\text{Kontaktpunkt Nom} \quad \delta_{0\text{nom}} := 0,081\text{mm}$$

$$\text{Kontaktpunkt A} \quad \delta_{0A} := 0,04\text{mm}$$

$$\text{Kontaktpunkt B} \quad \delta_{0B} := 0,014\text{mm}$$

Nötige Kraft

$$F_{N\text{Nom}} := \sqrt{\frac{\delta_{0\text{nom}}^{3,8}}{3^2 \cdot \kappa_{\text{If}}^3 \cdot \rho_{\text{If}} \cdot \text{Mat}^2}} = 33,336\text{N}$$

$$F_{NA} := \sqrt{\frac{\delta_{0A}^{3,8}}{3^2 \cdot \kappa_{\text{If}}^3 \cdot \rho_{\text{If}} \cdot \text{Mat}^2}} = 11,568\text{N}$$

$$F_{NB} := \sqrt{\frac{\delta_{0B}^{3,8}}{3^2 \cdot \kappa_{\text{If}}^3 \cdot \rho_{\text{If}} \cdot \text{Mat}^2}} = 2,395\text{N}$$



## Berechnung der Kräfte von Ellipse 1 und Ellipse 2

Kräfte Ellipse 1 (Lauffläche)

$$Flf_x := FN_x + \frac{(F_x - FN_x)}{2}$$

Kräfte Ellipse 2 (Rand der Lauffläche)

$$Fr_x := \frac{(F_x - FN_x)}{2}$$

Der Index x ist lediglich für die einfacheren Berechnung im Rechenprogramm eingeführt.

Für die Bezeichnung der Ellipsen siehe Abbildung 56.

## Berechnung der Halbachsen

Ellipse 1 (Lauffläche)

$$mlf_i := \mu_{lf} \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \text{Mat} \cdot Flf_i \cdot \frac{1}{\rho_{lf}}}$$

$$nlf_i := \eta_{lf} \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \text{Mat} \cdot Flf_i \cdot \frac{1}{\rho_{lf}}}$$

Ellipse 2 (Rand)

$$mr_i := \mu_r \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \text{Mat} \cdot Fr_i \cdot \frac{1}{\rho_r}}$$

$$nr_i := \eta_r \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \text{Mat} \cdot Fr_i \cdot \frac{1}{\rho_r}}$$

Ellipse 3 (Lauffläche, gesamte Kraft)

$$m_i := \mu_{lf} \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \text{Mat} \cdot F_i \cdot \frac{1}{\rho_{lf}}}$$

$$n_i := \eta_{lf} \cdot \sqrt[3]{3 \cdot \text{Mat} \cdot F_i \cdot \frac{1}{\rho_{lf}}}$$

## Zuordnung der Halbachsen zu den Koordinaten in Abbildung 57

Zuordnung Halbachsen Ellipse 1 und Ellipse 3

$$v := \frac{1}{R_{x_1}} + \frac{1}{R_{x_2}} = 0.00738 \frac{1}{\text{mm}} \quad w := \frac{1}{R_{y_{1lf}}} + \frac{1}{R_{y_2}} = 0.015385 \frac{1}{\text{mm}}$$

$$olf_i := 0 \quad ulf_i := 0$$

$$alf_i := \begin{cases} olf_i \leftarrow mlf_i & \text{if } v \geq w \\ olf_i \leftarrow nlf_i & \text{otherwise} \\ \text{return } olf_i \end{cases} \quad blf_i := \begin{cases} ulf_i \leftarrow mlf_i & \text{if } v \leq w \\ ulf_i \leftarrow nlf_i & \text{otherwise} \\ \text{return } ulf_i \end{cases}$$

Zuordnung Halbachsen Ellipse 2

$$v := \frac{1}{R_{x_1}} + \frac{1}{R_{x_2}} = 0.00738 \frac{1}{\text{mm}} \quad w := \frac{1}{R_{y_{1r}}} + \frac{1}{R_{y_2}} = 0.179319 \frac{1}{\text{mm}}$$

$$or_i := 0 \quad ur_i := 0$$

$$ar_i := \begin{cases} or_i \leftarrow mr_i & \text{if } v \geq w \\ or_i \leftarrow nr_i & \text{otherwise} \\ \text{return } or_i \end{cases} \quad br_i := \begin{cases} ur_i \leftarrow mr_i & \text{if } v \leq w \\ ur_i \leftarrow nr_i & \text{otherwise} \\ \text{return } ur_i \end{cases}$$

## 4.3.2 Lösungen

Normalkraft Kontaktpunkt Nom								
Ellipse 1			Ellipse 2			Ellipse 3		
F	a	b	F	a	b	F	a	b
290,17 N	7,20 mm	4,42 mm	256,83 N	9,09 mm	1,16 mm	547,00 N	8,89 mm	5,46 mm
449,17 N	8,32 mm	5,12 mm	415,83 N	10,67 mm	1,36 mm	865,00 N	10,36 mm	6,36 mm
608,17 N	9,21 mm	5,66 mm	574,83 N	11,89 mm	1,52 mm	1183,00 N	11,50 mm	7,06 mm
767,67 N	9,95 mm	6,12 mm	734,33 N	12,90 mm	1,64 mm	1502,00 N	12,45 mm	7,65 mm
891,17 N	10,46 mm	6,43 mm	857,83 N	13,58 mm	1,73 mm	1749,00 N	13,10 mm	8,05 mm
1033,00 N	10,99 mm	6,75 mm	999,33 N	14,29 mm	1,82 mm	2032,00 N	13,77 mm	8,46 mm
1139,00 N	11,35 mm	6,98 mm	1105,00 N	14,78 mm	1,88 mm	2244,00 N	14,23 mm	8,75 mm

Tabelle 8: Lösungen Kontaktpunkt Nom bei Normalkraft

Resultierende Kraft Kontaktpunkt Nom								
Ellipse 1			Ellipse 2			Ellipse 3		
F	a	b	F	a	b	F	a	b
403,17 N	8,03 mm	4,94 mm	369,83 N	10,26 N	1,31 mm	773,00 N	9,98 mm	4,14 mm
464,17 N	8,42 mm	5,17 mm	430,83 N	10,80 N	1,38 mm	895,00 N	10,47 mm	6,44 mm
610,17 N	9,22 mm	5,67 mm	576,83 N	11,90 N	1,52 mm	1187,00 N	11,51 mm	7,07 mm
794,67 N	10,07 mm	6,19 mm	761,33 N	13,05 N	1,66 mm	1556,00 N	12,60 mm	7,21 mm
950,67 N	10,69 mm	6,57 mm	917,33 N	13,89 N	1,77 mm	1868,00 N	13,39 mm	8,23 mm
1136,00 N	12,72 mm	6,97 mm	1102,00 N	14,77 N	1,88 mm	2238,00 N	14,22 mm	8,74 mm
1278,00 N	11,79 mm	7,25 mm	1244,00 N	15,38 N	1,96 mm	2522,00 N	14,80 mm	9,09 mm

Tabelle 9: Lösungen Kontaktpunkt Nom bei resultierender Kraft

Normalkraft Kontaktpunkt A								
Ellipse 1			Ellipse 2			Ellipse 3		
F	a	b	F	a	b	F	a	b
552,78 N	8,92 mm	5,48 mm	541,22 N	11,65 mm	1,49 mm	1094,00 N	11,20 mm	6,88 mm
1154,00 N	11,40 mm	7,01 mm	1142,00 N	14,94 mm	1,91 mm	2296,00 N	14,34 mm	8,81 mm
1401,00 N	12,16 mm	7,48 mm	1390,00 N	15,95 mm	2,03 mm	2790,00 N	15,30 mm	9,41 mm

Tabelle 10: Lösungen Kontaktpunkt A bei Normalkraft

Resultierende Kraft Kontaktpunkt A								
Ellipse 1			Ellipse 2			Ellipse 3		
F	a	b	F	a	b	F	a	b
779,28 N	10,00 mm	6,15 mm	767,72 N	13,09 mm	1,67 mm	1547,00 N	12,57 mm	7,73 mm
1155,00 N	11,41 mm	7,01 mm	1144,00 N	14,95 mm	1,91 mm	2299,00 N	14,35 mm	8,82 mm
1433,00 N	12,26 mm	7,53 mm	1422,00 N	16,08 mm	2,05 mm	2855,00 N	15,42 mm	9,48 mm

Tabelle 11: Lösungen Kontaktpunkt A bei resultierender Kraft

Normalkraft Kontaktpunkt B								
Ellipse 1			Ellipse 2			Ellipse 3		
F	a	b	F	a	b	F	a	b
548,20 N	8,90 mm	5,47 mm	545,80 N	11,68 mm	1,49 mm	1094,00 N	11,20 mm	6,88 mm
707,20 N	9,68 mm	5,95 mm	704,80 N	12,72 mm	1,62 mm	1412,00 N	12,19 mm	7,49 mm
866,20 N	10,36 mm	6,37 mm	863,80 N	13,62 mm	1,74 mm	1730,00 N	13,05 mm	8,02 mm
1025,00 N	10,96 mm	6,74 mm	1023,00 N	14,40 mm	1,84 mm	2048,00 N	13,80 mm	8,48 mm
1149,00 N	11,39 mm	7,00 mm	1147,00 N	14,96 mm	1,91 mm	2296,00 N	14,34 mm	8,81 mm
1291,00 N	11,83 mm	7,27 mm	1288,00 N	15,56 mm	1,98 mm	2579,00 N	14,91 mm	9,16 mm
1397,00 N	12,15 mm	7,47 mm	1394,00 N	15,97 mm	2,04 mm	2791,00 N	15,30 mm	9,41 mm

Tabelle 12: Lösungen Kontaktpunkt B bei Normalkraft

Resultierende Kraft Kontaktpunkt B								
Ellipse 1			Ellipse 2			Ellipse 3		
F	a	b	F	a	b	F	a	b
774,70 N	9,98 mm	6,14 mm	772,30 N	13,12 mm	1,67 mm	1547,00 N	12,57 mm	7,73 mm
806,70 N	10,12 mm	6,22 mm	804,30 N	13,30 mm	1,70 mm	1611,00 N	12,74 mm	7,83 mm
896,20 N	10,48 mm	6,44 mm	893,80 N	13,77 mm	1,76 mm	1790,00 N	13,20 mm	8,11 mm
1028,00 N	10,97 mm	6,74 mm	1025,00 N	14,42 mm	1,84 mm	2053,00 N	13,81 mm	8,49 mm
1151,00 N	11,39 mm	7,00 mm	1148,00 N	14,97 mm	1,91 mm	2299,00 N	14,35 mm	8,82 mm
1305,00 N	11,88 mm	7,30 mm	1303,00 N	15,61 mm	1,99 mm	2608,00 N	14,96 mm	9,19 mm
1429,00 N	12,24 mm	7,52 mm	1426,00 N	16,09 mm	2,05 mm	2855,00 N	15,42 mm	9,48 mm

Tabelle 13: Lösungen Kontaktpunkt B bei resultierender Kraft

Normalkraft (Vergleich) Kontaktpunkt B								
Ellipse 1			Ellipse 2			Ellipse 3		
F	a	b	F	a	b	F	a	b
274,70 N	7,07 mm	4,34 mm	272,30 N	9,27 mm	1,18 mm	547,00 N	8,89 mm	5,46 mm
433,70 N	8,23 mm	5,06 mm	431,30 N	10,80 mm	1,38 mm	865,00 N	10,36 mm	6,36 mm
592,70 N	9,13 mm	5,61 mm	590,30 N	11,99 mm	1,53 mm	1183,00 N	11,50 mm	7,06 mm
752,20 N	9,89 mm	6,08 mm	749,80 N	12,99 mm	1,66 mm	1502,00 N	12,45 mm	7,65 mm
875,70 N	10,40 mm	6,39 mm	873,30 N	13,67 mm	1,74 mm	1749,00 N	13,10 mm	8,05 mm
1017,00 N	10,93 mm	6,72 mm	1015,00 N	14,37 mm	1,83 mm	2032,00 N	13,77 mm	8,46 mm
1123,00 N	11,30 mm	6,94 mm	1121,00 N	14,85 mm	1,89 mm	2244,00 N	14,23 mm	8,75 mm

Tabelle 14: Lösungen Kontaktpunkt Nom bei Normalkraft (Vergleich)

Resultierende Kraft (Vergleich) Kontaktpunkt B								
Ellipse 1			Ellipse 2			Ellipse 3		
F	a	b	F	a	b	F	a	b
387,70 N	7,93 mm	4,87 mm	385,30 N	10,40 mm	1,33 mm	773,00 N	9,98 mm	6,13 mm
448,70 N	8,32 mm	5,11 mm	446,30 N	10,93 mm	1,39 mm	895,00 N	10,47 mm	6,44 mm
594,70 N	9,14 mm	5,62 mm	592,30 N	12,01 mm	1,53 mm	1187,00 N	11,51 mm	7,07 mm
779,20 N	10,00 mm	6,15 mm	776,80 N	13,14 mm	1,68 mm	1556,00 N	12,60 mm	7,74 mm
935,20 N	10,63 mm	6,53 mm	932,80 N	13,97 mm	1,78 mm	1868,00 N	13,39 mm	8,23 mm
1120,00 N	11,29 mm	6,94 mm	1118,00 N	14,84 mm	1,89 mm	2238,00 N	14,22 mm	8,74 mm
1262,00 N	11,75 mm	7,22 mm	1260,00 N	15,44 mm	1,97 mm	2522,00 N	14,80 mm	9,09 mm

Tabelle 15: Lösungen Kontaktpunkt B bei resultierender Kraft (Vergleich)

Normalkraft Kontaktpkt. C		
F	a	b
100,00 N	5,05 mm	4,20 mm
300,00 N	7,28 mm	4,47 mm
547,00 N	8,89 mm	5,46 mm
865,00 N	10,36 mm	6,36 mm
1183,00 N	11,50 mm	7,06 mm
1502,00 N	12,45 mm	7,65 mm
1749,00 N	13,10 mm	8,05 mm
2032,00 N	13,77 mm	8,46 mm
2244,00 N	14,23 mm	8,75 mm

Tabelle 16: Lösungen Kontaktpunkt C bei Normalkraft

Resultierende Kraft Kontaktpkt. C		
F	a	b
773,00 N	9,98 mm	4,14 mm
895,00 N	10,47 mm	6,44 mm
1187,00 N	11,51 mm	7,07 mm
1556,00 N	12,60 mm	7,21 mm
1868,00 N	13,39 mm	8,23 mm
2238,00 N	14,22 mm	8,74 mm
2522,00 N	14,80 mm	9,09 mm

Tabelle 17: Lösungen Kontaktpunkt C bei resultierender Kraft

## 5 Ergebnisse

Nach den Messungen erfolgte die Auswertung der erhaltenen Daten. Das Vorgehen bei der Auswertung und die sich daraus ergebenden Ergebnisse werden in diesem Kapitel behandelt.

Zusätzlich wird auf mögliche Abweichungen der Messungen und deren Ursachen genauer eingegangen.

Danach folgt die Darstellung der zeitlichen Abfolge der gemessenen Kontaktflächen. Den Abschluss dieses Abschnitts stellt die grafische Abbildungen der Mess- und Rechenergebnisse dar.

### 5.1 Auswertung der Messergebnisse

Die Auswertung der Druckmessfolien erfolgte mit dem Programm Godav 6.0. Dazu wurden die bei der Messung eingesetzten Druckmessfolien in Graustufen eingescannt und in das Programm importiert.

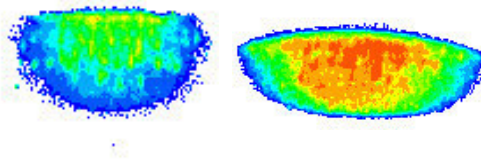
Um den Graustufen Druckwerte zuordnen zu können, mussten Kalibrierungsmessungen durchgeführt werden.

Die Kalibrierungsmessung erfolgte durch einen ebenen Druckstempel mit 20 mm Durchmesser. Der Messbereich der jeweiligen Folien wurde in 4 gleich große Abschnitte geteilt und 5 Druckwerte ermittelt (siehe Tabelle 18). Danach wurde zu jedem Druckwert die nötige Kraft bestimmt, die bei einem Stempeldurchmesser von 20 mm aufgebracht werden muss, um diesen Druckwert zu erreichen. Anschließend wurde der Stempel mittels Pneumatikkolben auf eine Druckmessfolie mit den vorher bestimmten Kräften gepresst und die Folie ebenfalls eingescannt.

Super Low	Kraft	Druck	Low	Kraft	Druck	Fläche	314,16 mm <sup>2</sup>
	157,08 N	0,5 MPa		785,40 N	2,5 MPa		
	314,16 N	1,0 MPa		1382,30 N	4,4 MPa		
	471,24 N	1,5 MPa		1979,20 N	6,3 MPa		
	628,32 N	2,0 MPa		2576,11 N	8,2 MPa		
	785,40 N	2,5 MPa		3141,59 N	10,0 MPa		

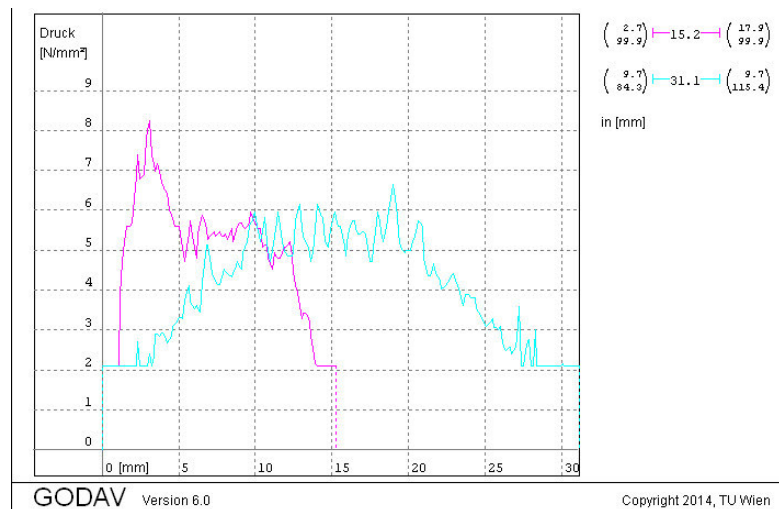
Tabelle 18: Kraftschritte bei Kalibrierungsmessung

Durch den Vergleich der Graustufen der Kalibrierungsmessung mit denen der eingescannten Messungen ordnet das Programm Druckgrößen zu und färbt diese je nach Größe des Drucks ein. Je röter die Färbung ist, desto höher ist auch der auftretende Druck (siehe Abbildung 59).



**Abbildung 59: Beispiel niedriger Druck links und hoher Druck rechts**

Für den Vergleich der Messungen untereinander und mit der analytischen Berechnung nach Hertz mussten diese in ein Tabellenkalkulationsprogramm übertragen werden. Dazu wurden in GODAV Schnitte durch die verschiedenen Kontaktflächen gezogen und die gewonnenen Daten des entlang des Schnitts auftretenden Drucks, sowie die Koordinaten des Schnittverlaufs abgespeichert. Diese wurden anschließend in das Tabellenkalkulationsprogramm übertragen.



**Abbildung 60: Beispiel einer grafischen Schnittauswertung**

Um die Kontaktflächen mittels Diagramme darstellen zu können, wurden die Koordinaten bei denen der Druck das erste Mal im Schnittverlauf ansteigt, als Randpunkte für die Kontaktfläche herangezogen. Durch Berücksichtigung der Daten aus mehreren Schnitten war es möglich, die Kontaktfläche in einem Diagramm abzubilden.

Des Weiteren ermöglicht das Programm, die Fläche der gemessenen Kontaktgebiete zu ermitteln. Diese Daten wurden, wie weiter oben schon beschrieben, für die Berechnung des E-Moduls herangezogen.

## 5.2 Messfehler

Wie bei allen Messungen treten auch bei der Messung der Flächenpressung zwischen Spurführungsrolle und Schiene Messfehler auf. Nachfolgend soll erläutert werden wo mögliche Abweichungen aufgetreten sind und deren Ursachen beschrieben werden.

### 5.2.1 Fehler bei der Messung

Für die Messung der Drücke zwischen Spurführungsrolle und Schiene wurden Druckmessfolien mit einer sehr glatten Oberfläche eingesetzt. Aufgrund der Kombination von extremen Winkelstellungen der Vorrichtung mit der glatten Oberfläche, verrutschten die Folien bei einigen Messungen. Dies war bei einer Winkelstellung der resultierenden Kraft von  $90^\circ$  sowie bei allen Winkeln kleiner  $24^\circ$  der Fall. Dies entspricht der Winkelstellung der Rollenvorrichtung von  $45^\circ$  bzw.  $-21^\circ$ . Bei den Ergebnissen der Messungen sind die Auswirkungen des Rutschens durch Verzerrung der Stellen höheren Drucks deutlich zu sehen. In der folgenden Abbildung ist der Vergleich des Kraft-Weg-Diagramms der Messung des Kontaktpunktes Nom bei einer Winkelstellung der Vorrichtung von  $-27^\circ$  mit und ohne Folie zu sehen. Das Rutschen der Folie ist durch die Zacken ersichtlich.

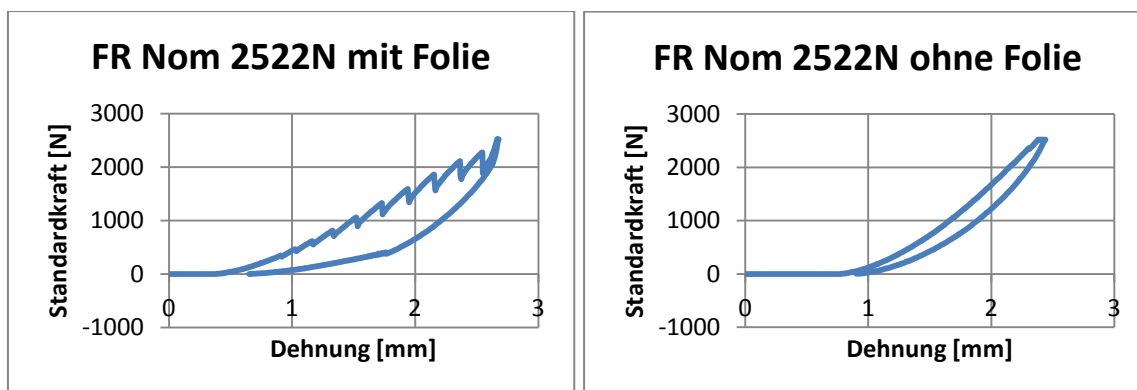


Abbildung 61: Vergleich Messung mit und ohne Folie bei  $17,8^\circ$  Winkel der Resultierenden

Für die Einstellung der verschiedenen Kontaktpunkte wurde jeweils der Kontakt des Spurkranzes mit der Schiene als Ausgangspunkt für die Verschiebungen gewählt. Die Bestimmung der Stelle des Anlaufens des Spurkranzes erfolgte mit einer elektrischen Messfolie der Firma Tekscan, die zwischen Spurkranz und Schiene eingelegt wurde. Bei Winkeln der resultierenden Kraft über  $45^\circ$  war es aufgrund der Winkelstellung der Vorrichtung und der Schiene nicht möglich, nur mit der Folie den Kontaktpunkt zu bestimmen, da die Folie nach dem Einstellen nicht mehr herausgezogen werden konnte. Deshalb wurden zusätzlich die Kraftmessung mit der Kraftmessdose und die optische Überprüfung zur Einstellung herangezogen. Diese Abweichung zu den übrigen Messungen war jedoch minimalst und sei nur aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt.

### 5.2.2 Fehler aufgrund der Auswertungen

Aufgrund der rauen Oberfläche der Schiene, der Auflösung der Folien und der pixelweisen Auswertungen der Drücke durch das Programm Godav waren speziell im Randbereich bei Messungen mit geringen Drücken große Sprünge bzw. Leerstellen zu sehen. Dieses Problem ist bei den Darstellungen der Kontaktflächen sichtbar, wenn unerwartete spitze Zacken hervorstechen.

Des Weiteren war es nicht möglich die Schnitte durch die Kontaktfläche immer an der gleichen Stelle zu setzen. Die Auswertungen zeigen jedoch, dass dies keine großen Auswirkungen auf die Resultate hat.

Lediglich die Form der Kontaktfläche wurde dadurch ein wenig beeinflusst und erscheint an manchen Stellen etwas eckig.

## 5.3 Ergebnisse der Messung

Im Rahmen dieses Abschnitts werden die markantesten Ergebnisse der Messung der Größe der Kontaktfläche und der Spannung präsentiert, diskutiert und miteinander verglichen. Dabei werden die Ergebnisse der niedrigsten und höchsten Kräfte der Messreihen sowie der stationären Kraft der Kurvenfahrt präsentiert. In einigen Fällen wird aufgrund des Rutschens auch das Ergebnis der zweitniedrigsten Kraft genauer erläutert.

Zusätzlich sind alle Messungen, bei den Rutschen aufgetreten ist, markiert. In Abschnitt 5.5 und Abschnitt 5.6 sind die in diesem Kapitel beschriebenen Diagramme abgebildet.

Die vollständige Auswertung aller Messungen befindet sich im Anhang.

Da die Auswertung der Größe der Kontaktfläche und der Spannung separat erfolgt sind, werden diese auch nachfolgend getrennt behandelt.

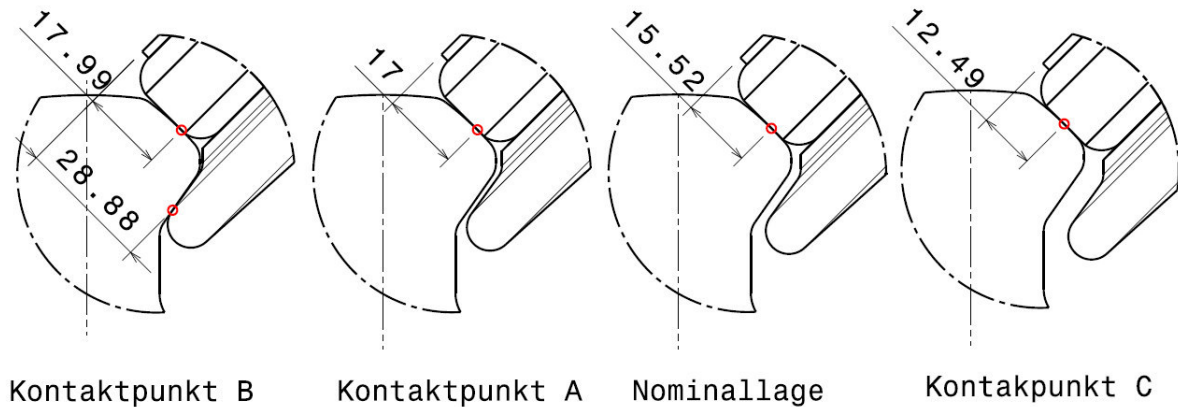
Alle Diagramme sind maßstabsgetreu nachgebildet. Die Grafiken der Kontaktflächen sind auswertungsbedingt nicht maßstabsgetreu dargestellt.

Im Rahmen der Präsentation der Ergebnisse werden die resultierenden Kräfte mit „FR“ abgekürzt und die Normalkraftanteile der resultierenden Kraft als Normalkraft oder als „FN“ bezeichnet.

Low und Super Low bezeichnen die Druckempfindlichkeit bzw. die Messbereiche der Folien. Die Folie Super Low kann Drücke zwischen 0,5 und 2,5 MPa messen. Die Folie Low misst Drücke zwischen 2,5 und 10 MPa.

Um Verwechslungen zu vermeiden, soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass sich die Winkel der resultierenden Kraft von denen der Vorrichtung unterscheiden. Die Winkelstellung der Vorrichtung ist um  $45^\circ$  geringer als der Winkel der resultierenden Kraft.





**Abbildung 62: Übersicht der Kontaktpunkte**

Aufbauend auf den Ergebnissen im Berührungspunkt C folgen die Ergebnisse aus den Messungen in der Nominallage, im Kontaktpunkt A und im Punkt B.

### Kontaktflächen

Wie im Kapitel 5.1 erläutert, wurden die Kontaktflächen mittels Tabellenkalkulationsprogramm als Diagramme dargestellt. Die Längeneinheiten der Diagramme sind in Millimeter dargestellt.

Zusätzlich wurde für die Darstellung der Ergebnisse die nach dem angepassten Multi-Hertz-Ansatz berechneten Kontaktellipsen eingezeichnet. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen mit den Messungen des vorliegenden Rad-Schiene-Kontaktes.

Die Farbschattierungen in den Grafiken der ausgewerteten Folien kennzeichnen die Stellen unterschiedlichen Drucks. Je röter die Färbung ist, desto höher ist der gemessene Druck. In Abbildung 63 sind die den Farben zugordneten Pressungen für die Folien Low und Super Low dargestellt. Die genaue Auswertung der Spannung erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

Druck [N/mm <sup>2</sup> ]	Druck [N/mm <sup>2</sup> ]
12.532	4.308
11.042	3.766
9.552	3.225
8.061	2.683
6.571	2.142
5.081	1.601
3.591	1.059
2.100	0.518

**Abbildung 63: Farbzuordnung Drücke Folie Low links und Folie Super Low rechts**

## Spannung

Für die Darstellung der Spannungen wurde versucht, einen möglichst mittigen Schnitt entlang der x- und y-Achse der Kontaktfläche zu setzen. Entlang dieser Achsen sind die Spannungen in  $\text{N/mm}^2$  eingezeichnet.

In den Diagrammen ist neben der gemessenen Spannung auch die nach dem angepassten Multi-Hertz-Ansatz berechnete Spannungskurve eingezeichnet, wobei auch hier die Kräfte, die nach diesem Ansatz bestimmt wurden, eingesetzt worden sind.

### 5.3.1 Kontaktpunkt C

#### Kontaktfläche

Aufgrund der paarweisen Anordnung der Spurführungsrollen kann die Lage des Kontaktpunktes C während der Fahrt nicht vorkommen. Wie in Abbildung 62 ersichtlich, liegt der Kontaktpunkt in der Nominallage sehr weit am Rand der Lauffläche. Um eine auf der Lauffläche mittig liegende Kontaktfläche zu erhalten und somit den Einflüssen der nicht konstanten Krümmung auszuweichen, wurden die Messungen im Kontaktpunkt C durchgeführt.

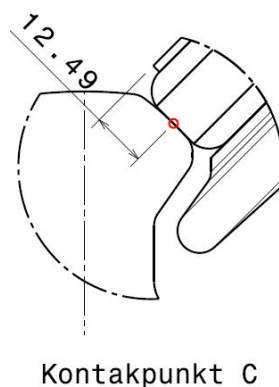
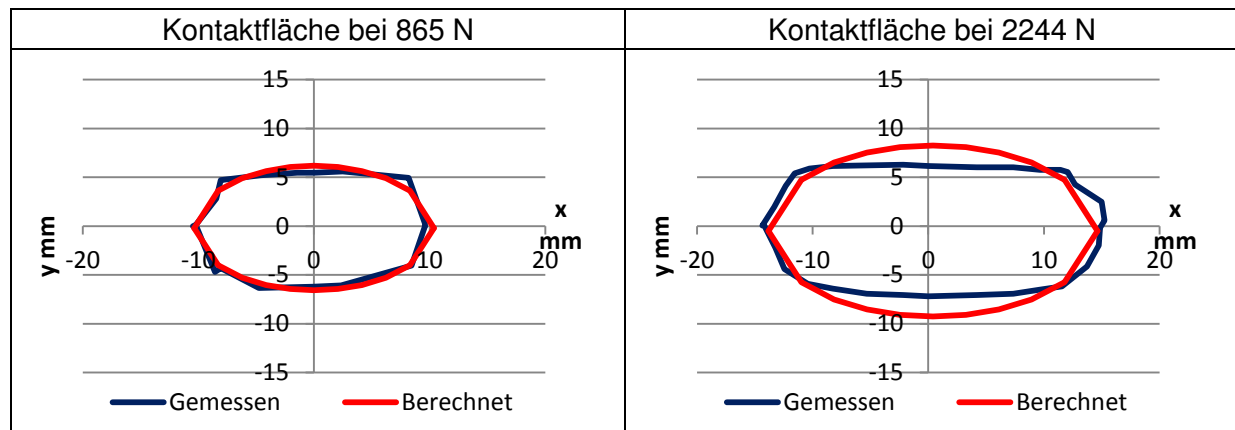


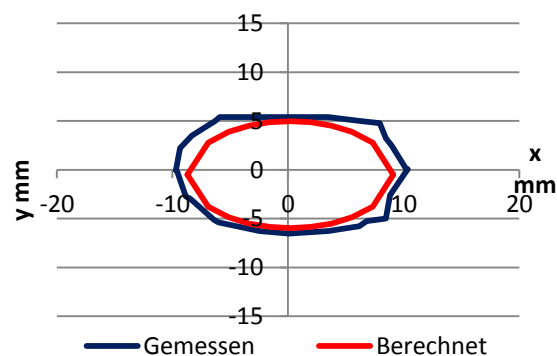
Abbildung 64: Kontaktpunkt C

In den Auswertungen ist gut zu erkennen, dass bei den Messungen der Auswirkungen der Normalkräfte mit den Folien des Druckbereichs Low, die Halbachsen der nach Hertz berechneten Ellipse sehr gut mit den wirklich vorkommenden Kontaktflächenformen übereinstimmen. Die bei höheren Kräften entstehende „Begradigung“ der gemessenen Kontaktfläche (siehe Tabelle 19) ist darin begründet, dass die Lauffläche nur eine gewisse Breite aufweist und deshalb die Kontaktfläche entlang der y-Achse nicht größer werden kann.



**Tabelle 19: Vergleich der Kontaktflächen in Kontaktpunkt C bei FN**

Bei Betrachtung der Messungen mit dem Normalkraftanteil der resultierenden Kraft und mit den wesentlich druckempfindlicheren Folien Super Low ist zu erkennen, dass die berechnete Ellipse bei höheren Kräften wesentlich kleiner ist, als die tatsächlich auftretende Berührungsfläche. Ein interessanter Aspekt dabei ist, dass der E-Modul für die Berechnungen der Halbachsen nach Hertz aus diesen Messungen bestimmt wurde und dennoch Abweichungen auftreten.



**Abbildung 65: Kraft FN 547 N, Folie Super Low**

Die Messungen mit den resultierenden Kräften zeigen im Vergleich zu den Messungen mit der Normalkraft eine etwas schlechtere Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Berechnungen nach Hertz.

Der Unterschied zwischen dem reinen Normalkraftanteil und der resultierenden Kraft wird ebenfalls durch den Vergleich der Größen der gemessenen Kontaktellipsen deutlich.

Bei Betrachtung der Messungen bei 773 N und 845 N ist ein eindeutiger Formunterschied der Kontaktfläche zu sehen, da die Folie während der Messungen bei 773 N gerutscht ist (siehe Abbildung 66). Im Falle der zwei größten negativen Winkel im Punkt C bei 2522 N und 2238 N (siehe Anhang) ist die Folie ebenfalls gerutscht.

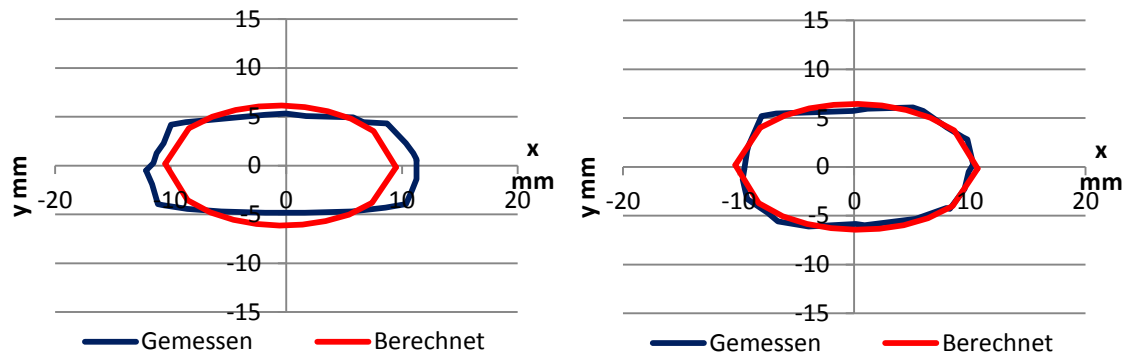


Abbildung 66: Vergleich beim Rutschen, 773 N links und 895 N rechts

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Folien Super Low fällt wieder auf, dass die gemessene Fläche größer ist als die berechnete Fläche.

In Abschnitt 5.5.4 sind die ausgewählten Diagramme der Kontaktflächen des Kontaktpunktes C dargestellt.

In Tabelle 46 sind die Kontaktflächen der Kräfte FN und FR gegenübergestellt.

## Spannung

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Messungen mit der Normalkraft fällt auf, dass sich der gemessene Spannungsverlauf entlang der x-Achse bei Erhöhung der Kräfte relativ gut an die berechnete Spannungskurve nach Hertz annähert. Die gemessene Spannung entlang der y-Achse weist jedoch ein komplett konträres Verhalten auf. Bei geringen Kräften nähert sich die Form des Spannungsverlaufs einer Halbellipse an. Bei höheren Kräften ist die Form nicht halbelliptisch. Dies liegt einerseits daran, dass die Kontaktfläche durch die Laufflächenbreite begrenzt ist und andererseits daran, dass die Spannung aufgrund der veränderten Krümmung am Rand der Lauffläche sehr stark beeinflusst wird.

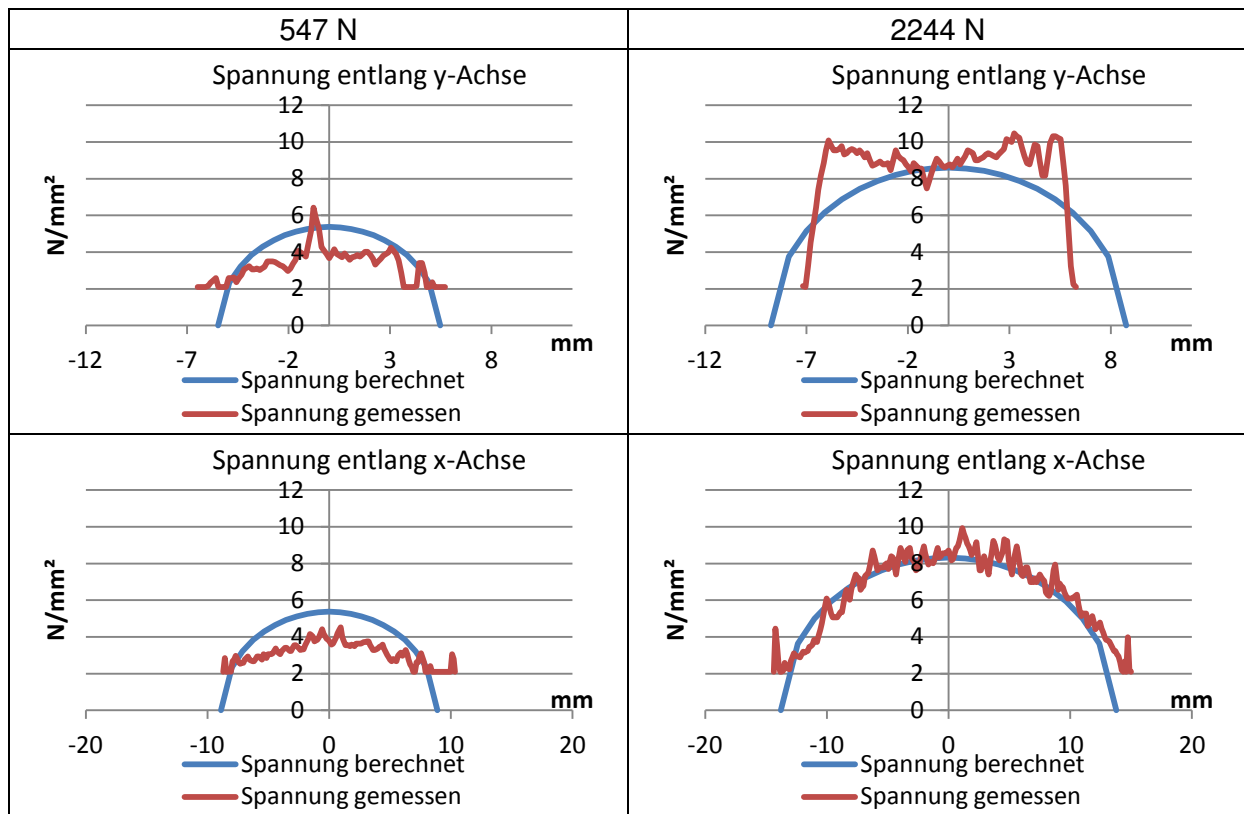


Abbildung 67: Verhalten der Spannungen bei Steigerung der Normalkraft

Zusätzlich fällt kurz vor dem Ende der Kontaktfläche in positiver y-Achse ein Strich mit erhöhter Spannung auf. Dieser Streifen entsteht durch das Eindrücken eines Grates, der auf der Schiene vorhanden ist. Dieser Fall kommt aber nur bei der Messung des Kontaktpunktes C vor.

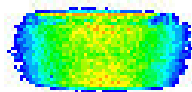


Abbildung 68: Grat

Bessere Annäherungen an die berechnete Spannungskurve entlang der y-Achse liefern die Messungen mit der resultierenden Kraft. Jedoch ist auch hier der Einfluss der geänderten Krümmung im Randbereich ersichtlic.

Bei 1868 N, was der nach der Einfahrt in die Kurve auftretenden konstanten Kraft entspricht, ist eine gute Annäherung der gemessenen und berechneten Spannungskurven zu erkennen (siehe Abbildung 69).

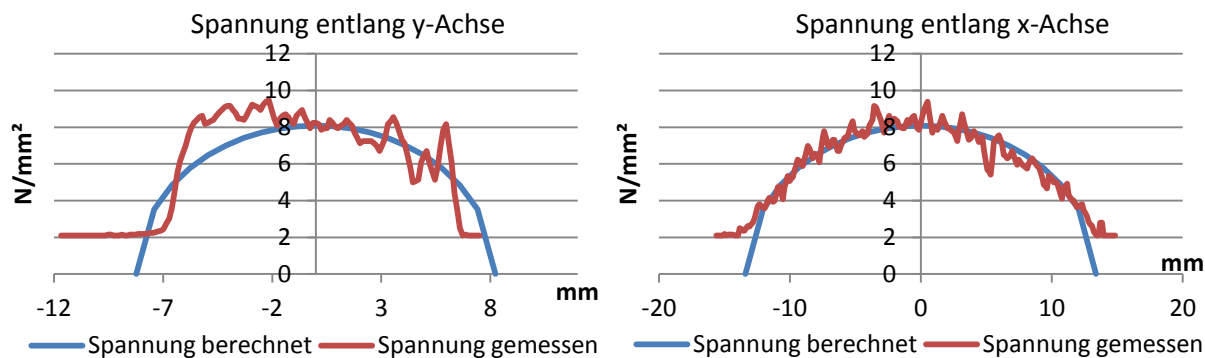


Abbildung 69: FR 1868 N, Folie Low

Wie in den Auswertungen der Folien mit der Druckempfindlichkeit Super Low zu erkennen ist, stößt die Folie bei den aufgebrachtten Kräften sehr schnell an ihre Messgrenze. Da dieser Umstand für die Auswertung der Spannungen nicht geeignet ist, werden bei der weiteren Präsentation der Ergebnisse die Folien Super Low nicht mehr berücksichtigt. Die durchgeführten Auswertungen dieser Druckempfindlichkeitsklasse befinden sich jedoch im Anhang.

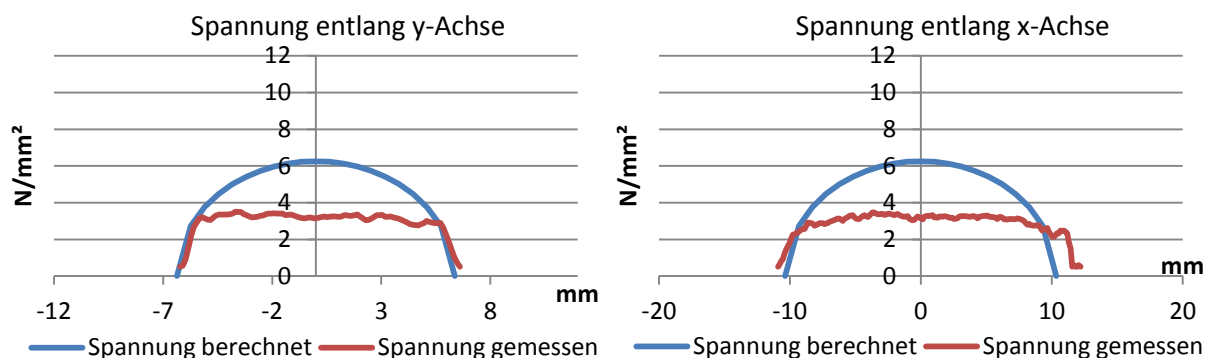


Abbildung 70: Grenze der Folie Super Low

Aufgrund der stark abweichenden Kurven und der rötlicheren Färbung in der Kontaktfläche ist der Einfluss des bei 773 N und 2522 N aufgetretenen Rutschens zu sehen (siehe Tabelle 20). Obwohl beide Vorrichtungen fest eingespannt waren, rutschte die Folie bei den Winkelstellungen der oben erwähnten Kräfte. Zusätzlich trat auch bei 2238 N Rutschen auf. Die Auswertung für diese Kraft befindet sich im Anhang.


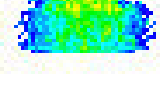
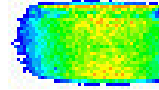
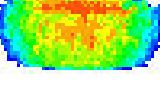
Normalkraft	Resultierende Kraft
547 N	773 N – Messfehler durch Rutschen
	
2244 N	2522 N – Messfehler durch Rutschen
	

Tabelle 20: Rutschen der Folie in Kontaktpunkt C

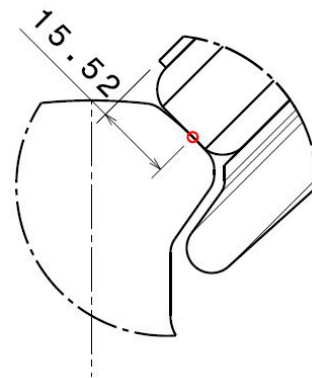
In Abschnitt 5.6.4 sind die ausgewählten Diagramme der Spannungen des Kontaktpunktes C dargestellt.

In Tabelle 62 sind die Spannungen bei FN und FR gegenübergestellt.

### 5.3.2 Ergebnisse Kontaktpunkt Nom

#### Kontaktfläche

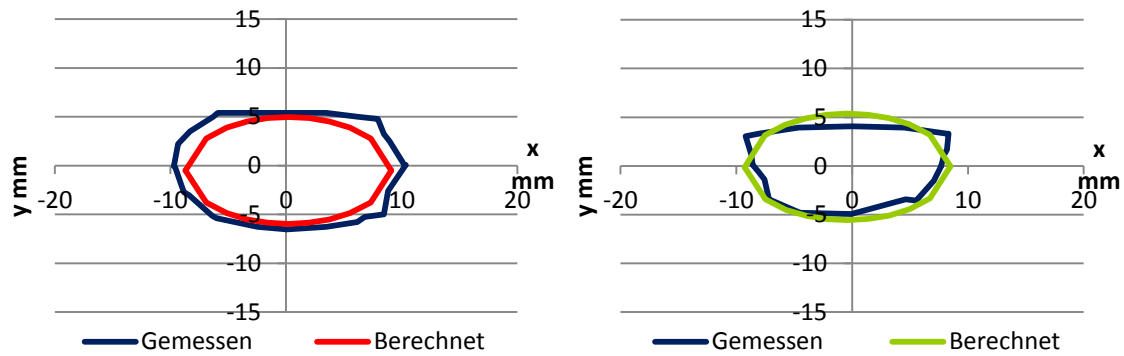
Die Nominallage ist jene Lage, in der beide Rollen die Schiene berühren. Sie stellt den Sollzustand dar.



Nominallage

Abbildung 71: Kontaktpunkt Nom

Bei Betrachtung der ersten Auswertungen ist ein deutlicher Unterschied zwischen den vorhin behandelten Kontaktflächen in Berührungspunkt C und denen der Nominallage zu erkennen.



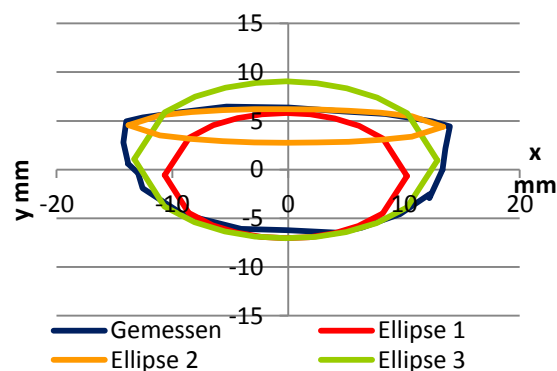
**Abbildung 72: Vergleich Messung Kontaktpunkt C (links) und Nom (rechts)**

Die Kontaktflächen weisen keine eindeutig elliptische Form auf. Vielmehr gleichen sie einem Verschnitt aus zwei Ellipsen. Dies ist darin begründet, dass der Kontaktpunkt sehr nahe am Rand der Lauffläche liegt. Bei Aufbringen der Kraft wird das Material so weit eingedrückt, sodass sich die Kontaktfläche auch über den Rand der Lauffläche erstreckt. Somit ist der Krümmungsradius innerhalb des Kontaktgebietes nicht mehr konstant und eine wesentliche Bedingung für die Gültigkeit der Theorie nach Hertz ist verletzt. Dies wird durch die fehlende Übereinstimmung der in den Diagrammen grün eingezeichneten Ellipse sichtbar.

Der Umstand, dass die Kontaktfläche keiner Ellipse entspricht, macht den Einsatz des angepassten Multi-Hertz-Ansatzes für die Berechnung der Kontaktfläche und der Spannung nötig.

In die Diagramme der Ergebnisse der Messungen wurden alle drei in Kapitel 4.3 berechneten Ellipsen eingezeichnet.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Normalkraft ist zu erkennen, dass der angepasste Multi-Hertz-Ansatz eine sehr gute Näherung der Form und Größe der Kontaktfläche über alle gemessenen Kräfte ergibt. Eine besonders gute Annäherung ist beim stationären Wert der Kurvenfahrt bei 1749 N zu erkennen.



**Abbildung 73: Ergebnis Kontaktfläche Nom, FN 1749 N**



Eine sehr gute Nachbildung der Kontaktfläche bei der Normalkraft entsteht im Gegensatz zu normalen Multi-Hertz-Ansätzen jedoch aus der Kombination von Ellipse 2 (verminderte Kraft) und Ellipse 3 (ganze Kraft).

Die Messergebnisse bei resultierender Kraft können nicht so genau wie bei der Normalkraft angenähert werden. Die Ellipsen bilden die Form der gemessenen Kontaktfläche gut nach, sind aber um einen über die Kräfte konstanten Faktor zu klein.

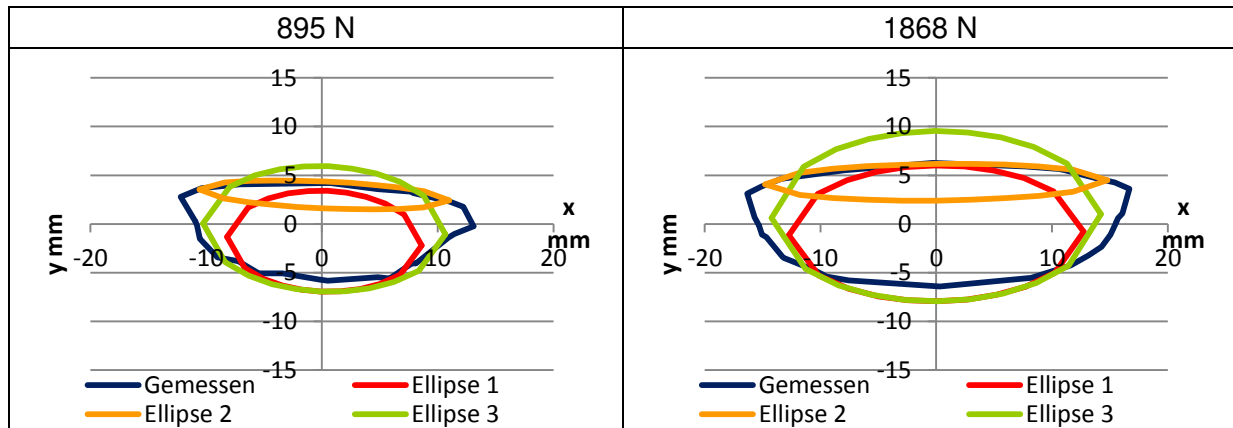


Tabelle 21: Kontaktflächen in Kontaktpunkt Nom bei FR

Zusätzlich wird die Form der Kontaktfläche im Vergleich zu den berechneten Ellipsen bei steigender Kraft schmaler. Dies könnte daran liegen, dass sich bei hohen Kräften das Material der Lauffläche stärker eindrückt und somit die Krümmung im Übergangsbereich verändert.

Ebenfalls ist wie bei Kontaktpunkt C eine Abplattung auf Seite der negativen y-Achse zu erkennen.

In Abschnitt 5.5.1 sind die ausgewählten Diagramme der Kontaktflächen des Kontaktpunktes Nom dargestellt.

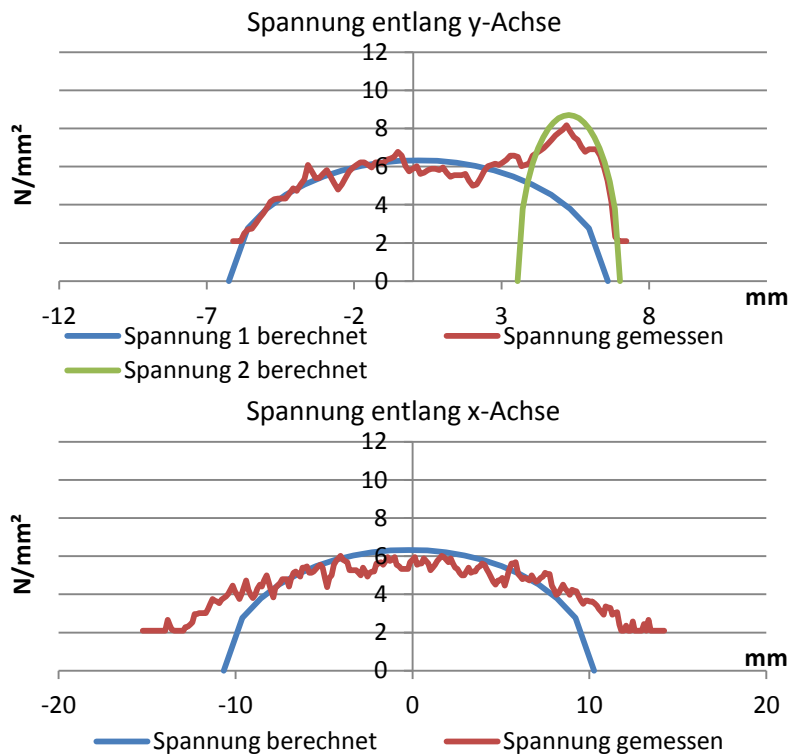
In Tabelle 33 sind die Kontaktflächen der Kräfte FN und FR gegenübergestellt.

## Spannung

Auch bei Vergleich der berechneten und gemessenen Spannungen der Normalkraft ist mittels angepassten Multi-Hertz-Ansatzes eine sehr gute Näherung möglich.

Hierzu wurde für die Darstellung der berechneten Spannungskurve entlang der y-Achse die Spannungskurve von Ellipse 1 (Spannung 1) und die halbe Spannungskurve von Ellipse 2 (Spannung 2) gewählt (siehe Kapitel 2.4.4).

Die Spannungskurve entlang der x-Achse ist nur aus der Spannung von Ellipse 1 (Spannung berechnet) gebildet.



**Abbildung 74: Ergebnisse Spannung in Kontaktpunkt Nom bei FN 1749 N**

Aufgrund der Auflösung der Folie und den Oberflächenunebenheiten weicht bei geringeren Kräften die gemessene Spannungskurve ein wenig ab. Bei 547 N sind diese Einflüsse bei der Betrachtung des zackigen Verlaufs sehr gut erkennbar. (siehe Abbildung 75)

Je größer die Kraft wird desto besser nähern sich die berechneten Spannungskurven an die Ergebnisse der Messungen an.

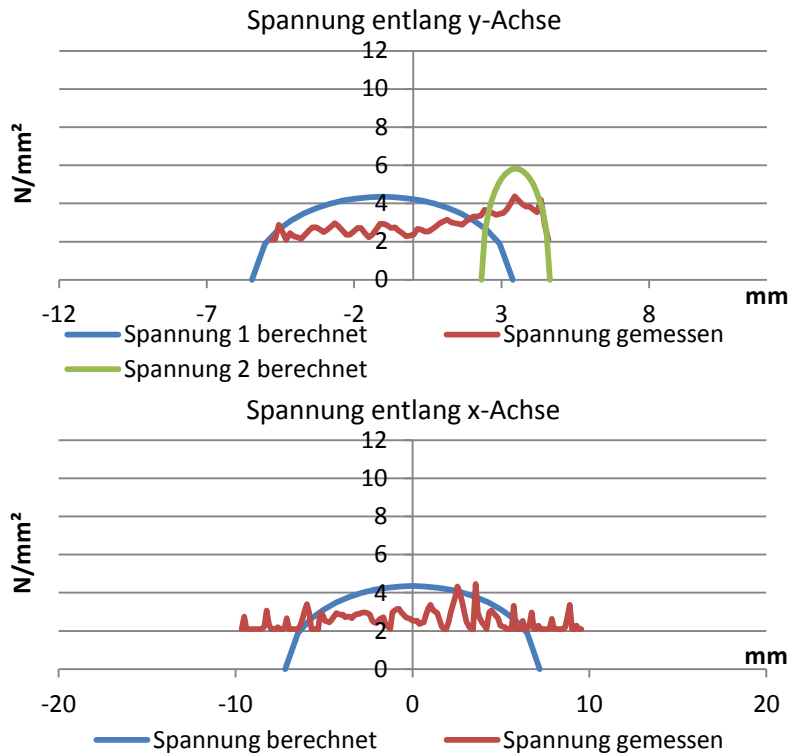


Abbildung 75: Ergebnis Spannung in Kontaktpunkt Nom bei FN 547 N

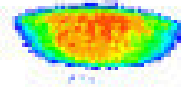
Die Betrachtung des Vergleichs zwischen Berechnung und Messung der resultierenden Kräfte zeigt im Gegensatz zu den Messungen mit der Normalkraft ein komplett konträres Verhalten.

Je höher die Kraft wird, desto schlechter ist die Annäherung. Dies könnte einerseits am Rutschen der Folien und andererseits an der Spannungserhöhung aufgrund der beschränkten Breite der Lauffläche liegen.

865 N	2522 N – Messfehler durch Rutschen
<p>Spannung entlang y-Achse</p>	<p>Spannung entlang y-Achse</p>
<p>Spannung entlang x-Achse</p>	<p>Spannung entlang x-Achse</p>

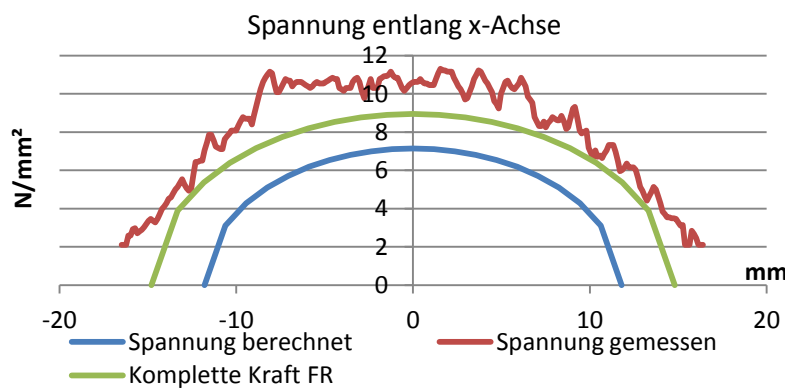
Tabelle 22: Schlechte Annäherung bei hohen Kräften in Kontaktpunkt Nom

Die Auswirkungen des Rutschens sind beim Vergleich mit der Messung in der horizontalen Lage in Tabelle 49 gut erkennbar. Dort, wo sich die Folie verschoben hat, sind wesentlich mehr rot eingefärbte Spannungsspitzen zu erkennen. (773 N und 2522 N).



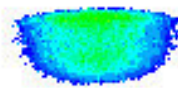
**Abbildung 76: Rutschen bei FR 2522 N**

Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Betrag der berechneten Spannung entlang der x-Achse bei hohen Kräften stets unterhalb der gemessenen Spannung ist. Hier würde eine Annäherung mit der aus der kompletten resultierenden Kraft berechneten Pressung besser übereinstimmen.



**Abbildung 77: Annäherung der Spannung mit kompletter Kraft FR 2522 N**

Zusätzlich ist in Abbildung 78 gut zu erkennen, dass in der Kontaktfläche zwei Bereiche mit erhöhtem Druck vorhanden sind (grün gefärbt). Dies bestätigt neben dem Vergleich der Messungen mit den Berechnungen, dass die Kontaktfläche und die Spannung durch zwei nach Hertz berechnete Ellipsen angenähert werden können.



**Abbildung 78: Kontaktpunkt Nom bei FN 1749 N**

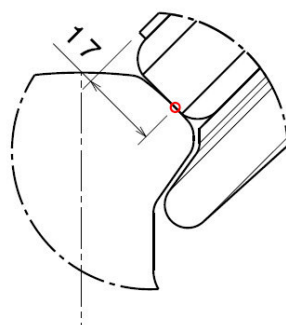
In Abschnitt 5.6.1 sind die ausgewählten Diagramme der Spannungen des Kontaktpunktes Nom dargestellt.

In Tabelle 49 sind die Spannungen der Kräfte FN und FR gegenübergestellt.

### 5.3.3 Ergebnisse Kontaktpunkt A

#### Kontaktfläche

Um eine eventuelle Verschiebung der Kontaktpunkte aufgrund der in der Kurvenfahrt auf das Fahrzeug wirkenden Querkraft ebenfalls zu untersuchen, wurden zusätzlich bei einem Kontaktpunkt, der zwischen der Nominallage und dem Anlaufen am Spurkranz liegt, Messungen durchgeführt. Dieser Punkt wird als Kontaktpunkt A bezeichnet und ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Kontaktpunkt A

Abbildung 79: Kontaktpunkt A

Hierbei erfolgten jeweils drei Messungen und wegen der großen Kräfte keine Messungen mit der Folie Super Low.

Ebenfalls wurde aufgrund des zu erwartenden Rutschens die Messung bei FR 1547 N ausgelassen.

Die Messungen liefern ähnliche Ergebnisse wie bei der resultierenden Kraft im Kontaktpunkt Nom. Die Größe der Kontaktfläche unterscheidet sich zu der der Nominallage. Aufgrund des Abhebens der zweiten Rolle in Kontaktpunkt A wirken wesentlich höhere Kräfte.

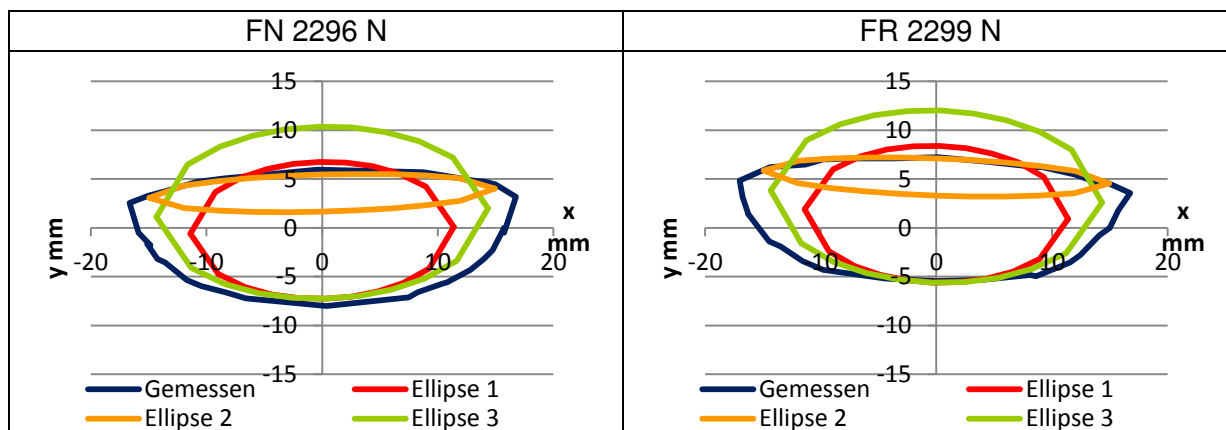


Tabelle 23: Kontaktflächen in Kontaktpunkt A bei FN und FR

Sowohl bei der Normalkraft als auch bei der resultierenden Kraft in Kontaktpunkt A, sind die berechneten Ellipsen kleiner als die gemessene Kontaktfläche.

In Abschnitt 5.5.1 sind die ausgewählten Diagramme der Kontaktflächen des Kontaktpunktes A dargestellt.

In Tabelle 36 sind die Kontaktflächen der Kräfte FN und FR gegenübergestellt.

## Spannung

Die Messungen der Spannungen im Kontaktpunkt A zeigen, dass aufgrund der hohen Kräfte eine Berechnung der Spannungen mittels angepassten Multi-Hertz-Ansatz nicht mehr möglich ist.

Lediglich bei der Normalkraft von 1094 N ist eine Annäherung mittels analytischer Berechnung möglich.

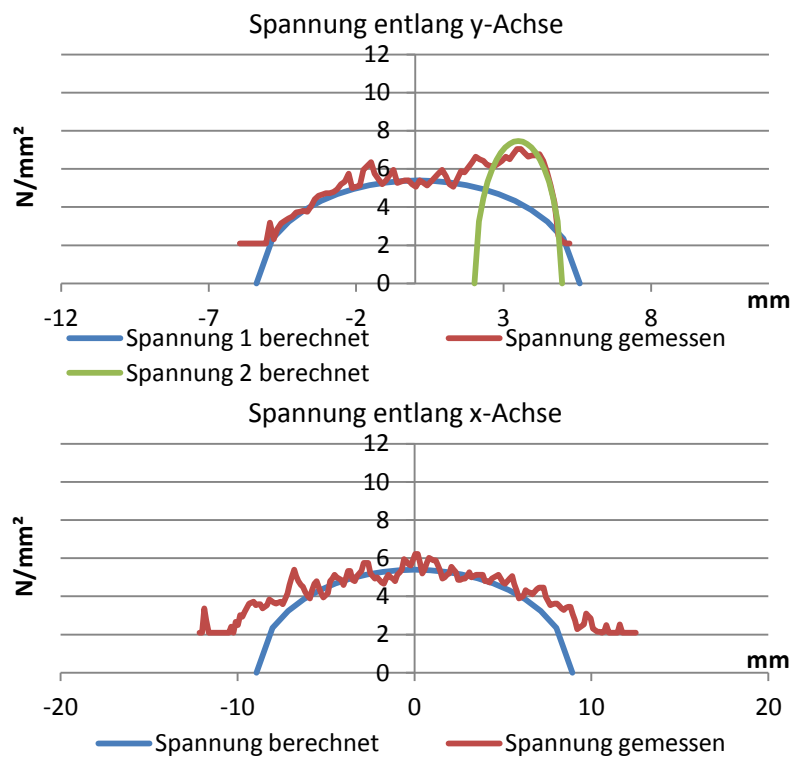
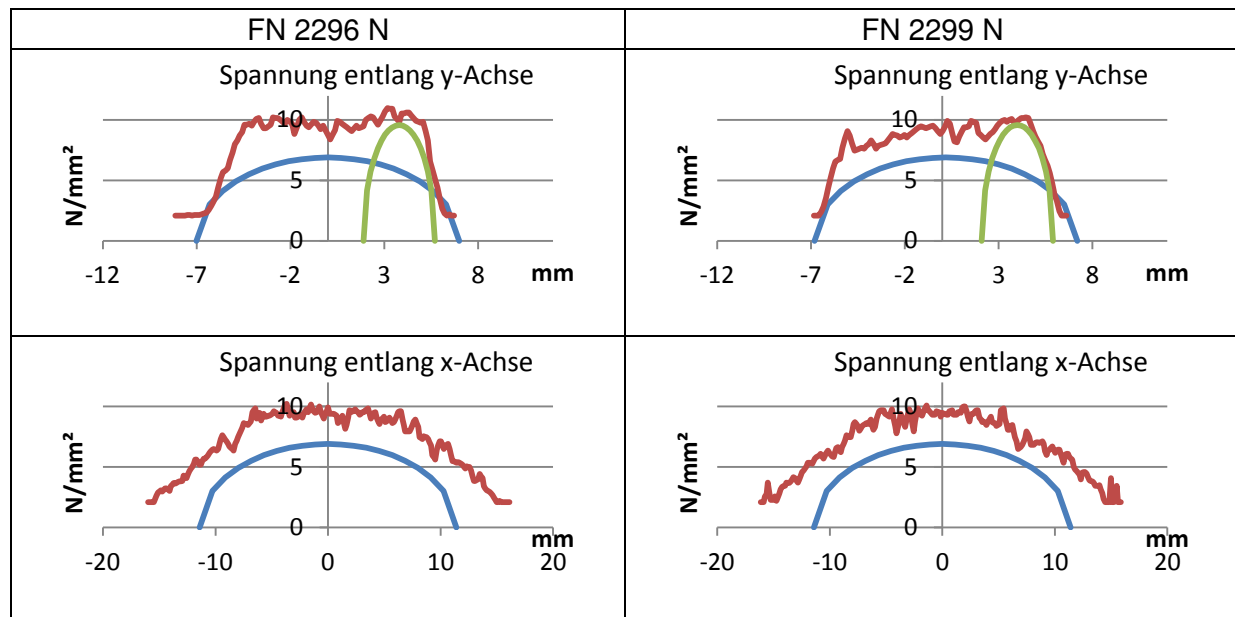


Abbildung 80: Spannung in Kontaktpunkt A bei FN 1094 N



**Tabelle 24: Grenze des Messbereichs der Folie Low**

Des Weiteren konnten die hohen Spannungen nicht mehr mit den Folien der Klasse Low gemessen werden. Dies ist an der Abflachung der Spannungskurve ab einer Spannung von  $10 \text{ N/mm}^2$  zu erkennen.

Eine Messung mit der Folienempfindlichkeit Medium (ab  $10 \text{ N/mm}^2$ ) wurde nicht durchgeführt, da die Ergebnisse bei den vorhandenen Spannungen zu ungenau gewesen wären.

Für den Fall der Messungen bei den resultierenden Kräften wurde in Kontaktpunkt A die Messung bei der Laufflächenneigung von  $45^\circ$  ausgelassen. Dies ist, wie oben schon erläutert, in der Schrägstellung der Lauffläche begründet, da die Folie stark rutscht und keine genauen Ergebnisse ausgewertet werden können.

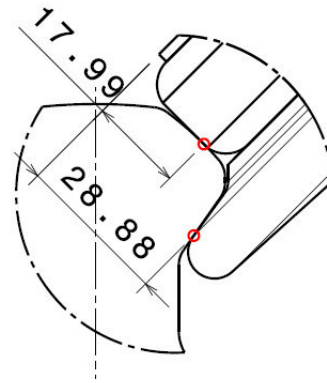
In Abschnitt 5.6.2 sind die ausgewählten Diagramme der Spannungen des Kontaktpunktes A dargestellt.

In Tabelle 52 sind die Spannungen der Kräfte FN und FR gegenübergestellt.

### 5.3.4 Ergebnisse Kontaktpunkt B

#### Kontaktfläche

Dieser Kontaktpunkt ist derjenige, bei dem auch der Spurkranz der Rolle in Kontakt mit der Schiene kommt. Im Betrieb sollte dieser Zustand üblicherweise nicht auftreten.



Kontaktpunkt B

Abbildung 81: Kontaktpunkt B

Die Kontaktflächen weisen im Gegensatz zu den anderen Berührungspunkten sowohl bei Aufbringung der Normalkraft als auch bei der resultierenden Kraft eine wesentlich spitzere Form auf. Die Genauigkeit der Annäherung ähnelt sehr den schon beschriebenen Kontaktpunkten.

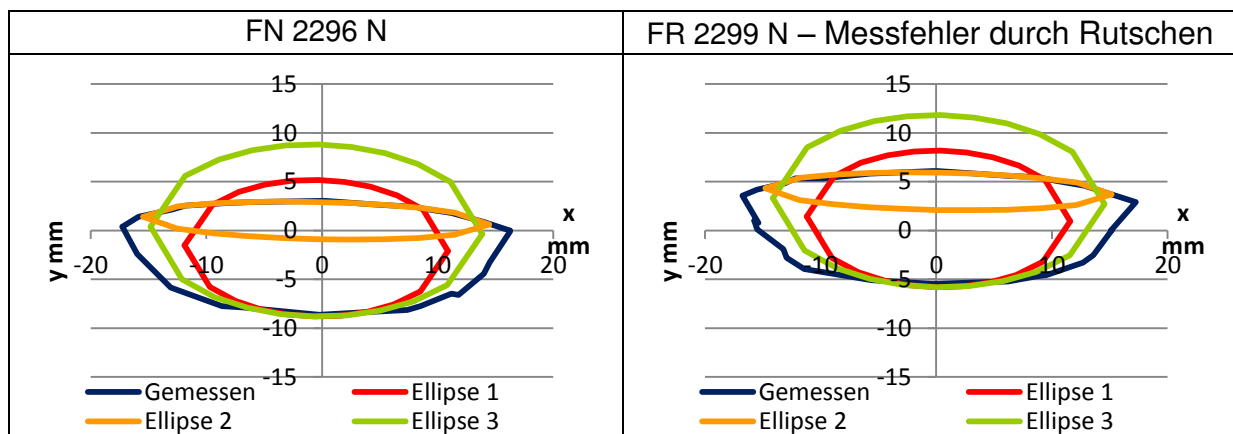


Tabelle 25: Kontaktflächen in Kontaktpunkt B bei FN und FR

Fast alle Flächen weisen beim Übergang vom oberen zum unteren Rand eine Art Schnabel auf. Dies dürfte darin begründet sein, dass die Kontaktfläche in diesem Kontaktpunkt schon sehr nahe am Rand der Lauffläche liegt und somit die Krümmung großen Einfluss auf die Form der Kontaktfläche ausübt.

Des Weiteren ist der Fehler durch das Rutschen der Folie bei einer Winkelstellung der Vorrichtung von 45°, bei Betrachtung der ersten beiden Messungen der resultierenden Kraft, ersichtlich (siehe Tabelle 26).



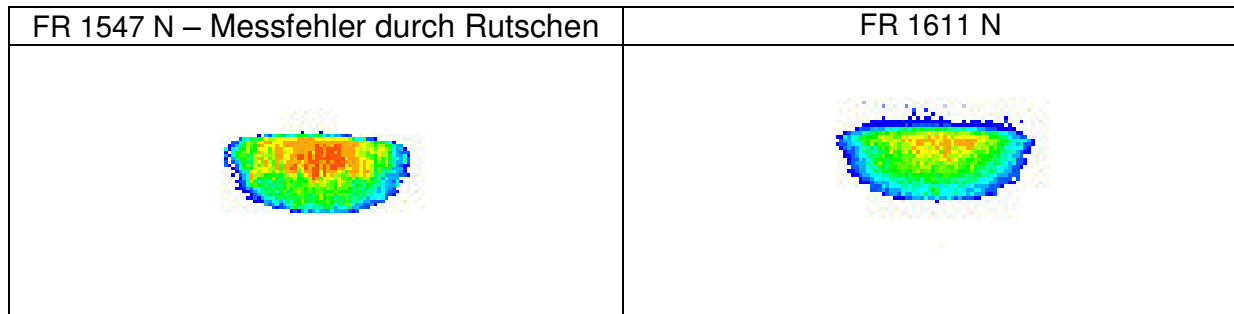


Tabelle 26: Rutschen in Kontaktpunkt B

In Tabelle 39 sind die Kontaktflächen der Kräfte FN und FR gegenübergestellt.

Um einen direkten Vergleich zwischen der Nominallage und dem Kontaktpunkt B zu erhalten, wurden ebenfalls Messungen mit den Kräften der Nominallage in Kontaktpunkt B durchgeführt. In Tabelle 40 und Tabelle 41 sind die Ergebnisse gegenübergestellt.

Auffallend ist, dass die Ergebnisse der Messung der resultierenden Kraft der Nominallage bei Kontaktpunkt B besser mit den Kontaktellipsen nach Hertz angenähert werden können als bei Simulation der Kräfte in Kontaktpunkt Nom.

Der Einfluss der Berührung am Spurkranz wird bei der Betrachtung des Vergleichs in Tabelle 41 sichtbar. Die Halbachsen der Kontaktflächen der resultierenden Kraft sind bei 1868 N und 2522 N wesentlich kleiner als die bei FN. Somit muss vom Spurkranz Kraft aufgenommen werden.

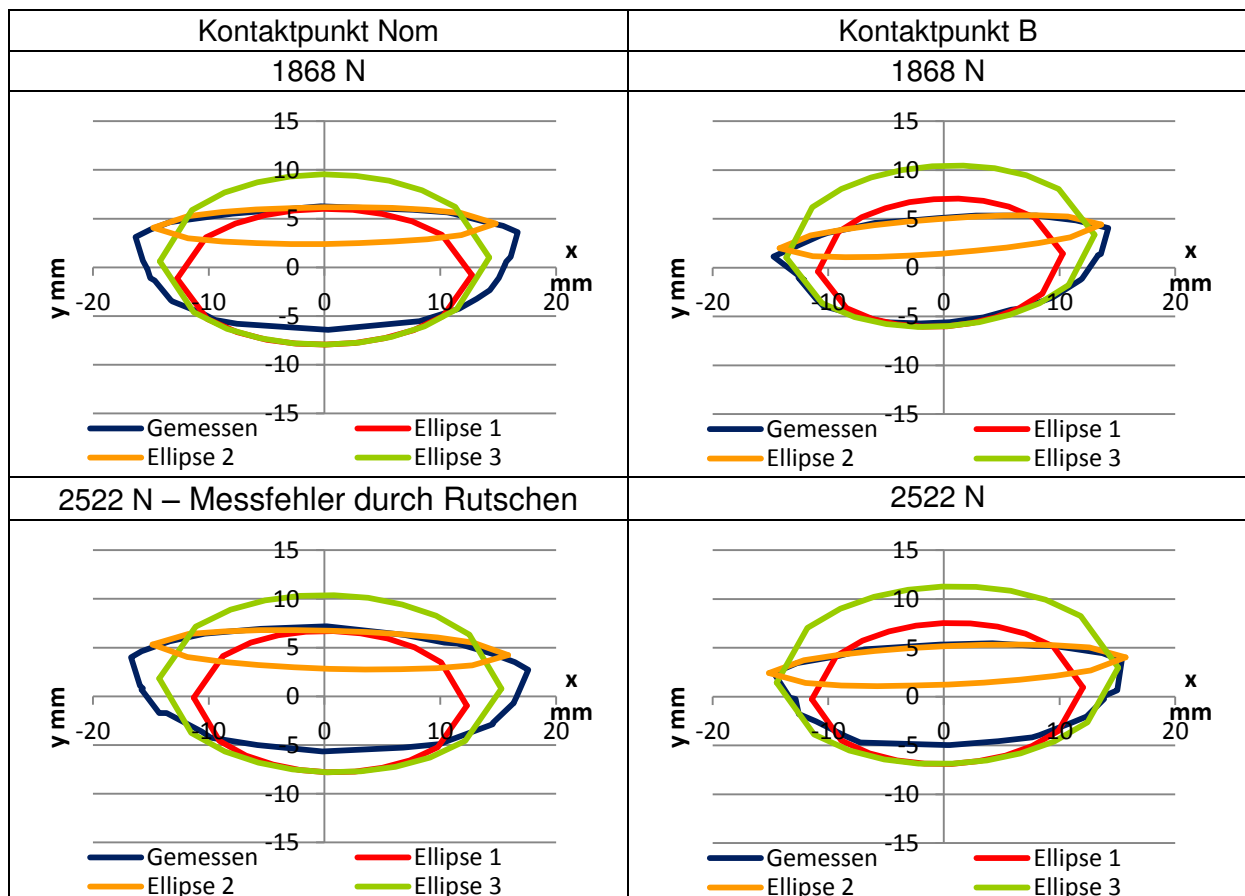
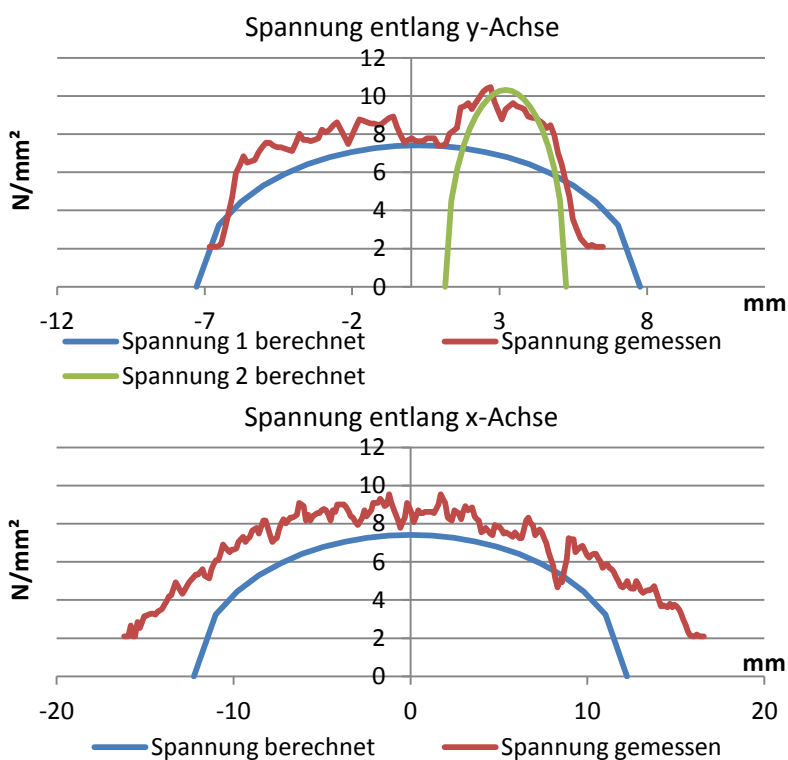


Tabelle 27: Vergleich des Kontaktpunktes Nom mit Kontaktpunkt B bei gleicher Kraft

In Abschnitt 5.5.3 sind die ausgewählten Diagramme der Kontaktflächen des Kontaktpunktes B dargestellt.

## Spannung

Das Verhalten des Spannungsverlaufs in Kontaktpunkt B ähnelt ebenfalls den schon besprochenen Messungen in der Nominallage. Obwohl größere Kräfte aufgebracht werden als in Kontaktpunkt Nom, ist im Gegensatz zu Kontaktpunkt A eine bessere rechnerische Annäherung der Spannungskurve möglich. Dies ist darin begründet, dass bei Kontaktpunkt B eindeutig Kräfte am Spurkranz aufgenommen werden und somit die Kraft die auf die Lauffläche wirkt geringer ist.



**Abbildung 82: Spannung in Kontaktpunkt B bei Kraft FR 2855 N**

Wie schon erwähnt, wurden auch Messungen in Kontaktpunkt B mit den gleichen Kräften wie in der Nominallage durchgeführt. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich des Einflusses des Anlaufens am Spurkranz auf die Spannungskurve. In Tabelle 56 und Tabelle 57 sind die gemessenen Werte der beiden Kontaktpunkte gegenübergestellt.

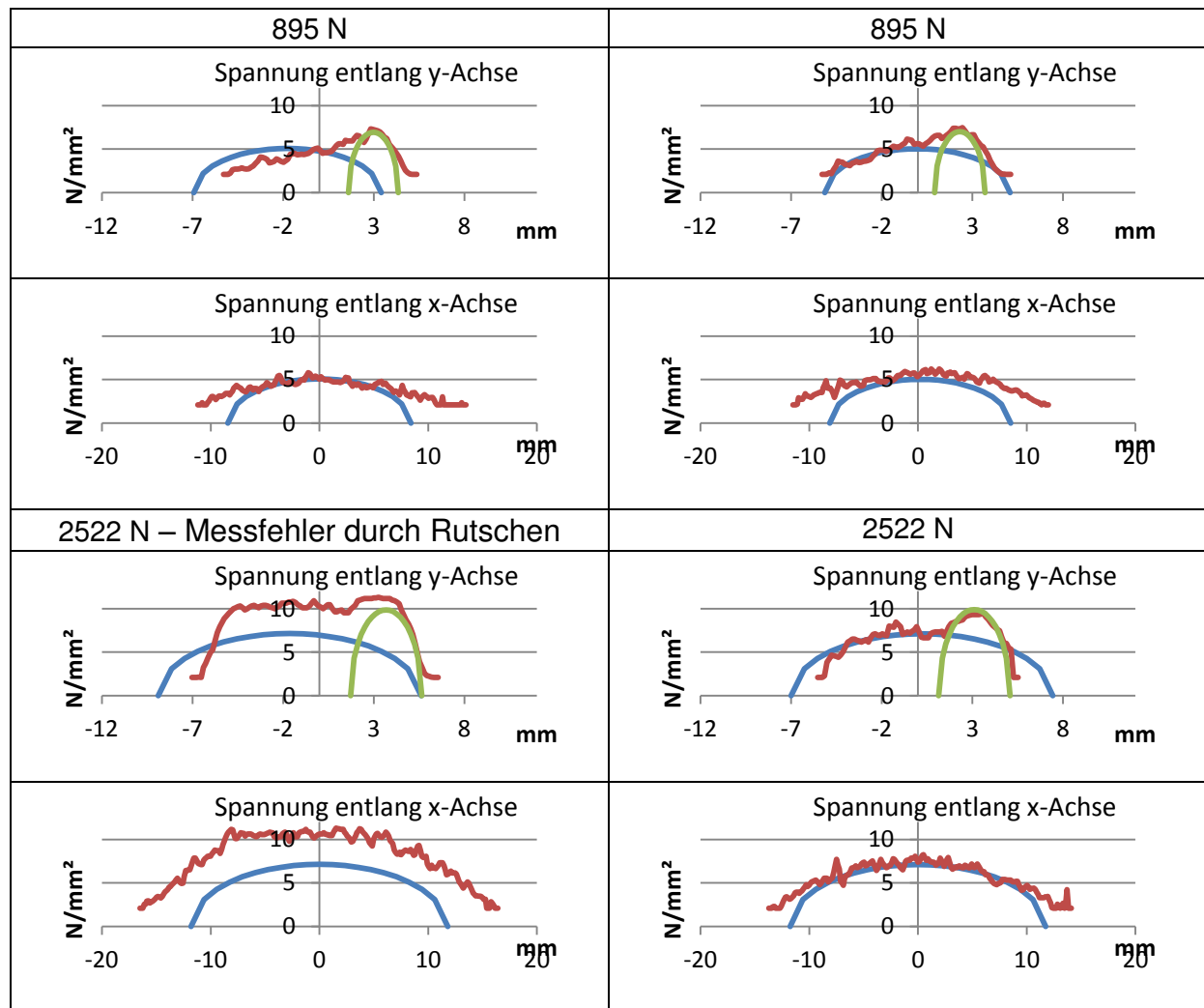


Tabelle 28: Einfluss des Anlaufens am Spurkranz

Die Diagramme der obigen Tabelle zeigen, dass die Berührung am Spurkranz erst dann einen Einfluss auf den Spannungsverlauf hat, wenn der Winkel der resultierenden Kraft kleiner als  $45^\circ$  ( $> 895 \text{ N}$ ) wird. Die Grenzlage entspricht somit der horizontalen Lage der Lauffläche bzw. der Vorrichtung.

Solange der Winkel der resultierenden Kraft größer als  $45^\circ$  ist, wird zwischen Schiene und Spurkranz keine Kraft übertragen. Sinkt dieser jedoch unter die oben genannten  $45^\circ$ , dann werden sowohl auf der Lauffläche, als auch am Spurkranz Kräfte aufgenommen.

Bei Betrachtung der Gegenüberstellung der Diagramme ist ersichtlich, dass ab  $895 \text{ N}$  die gemessene Spannung bei Kontakt mit dem Spurkranz wesentlich geringer ist, als in der Nominallage. Diese Spannungsverminderung auf der Lauffläche geht einher mit der Spannungszunahme am Spurkranz.

Da jedoch am Spurkranz hauptsächlich Schubspannungen auftreten, war es mit den vorhandenen Messmitteln nicht möglich, die zwischen Spurkranz und Schiene entstehenden Spannungen zu messen. Lediglich die Spannungsdifferenz zwischen dem Ergebnis der Nominallage und des Kontaktpunktes B gibt Aufschluss auf die Kraftaufteilung.

In Abschnitt 5.6.3 sind die ausgewählten Diagramme der Spannungen des Kontaktpunktes B dargestellt.

In Tabelle 55 sind die Spannungen der Kräfte FN und FR gegenübergestellt.

## 5.4 Zeitliche Zuordnung

Die bisherigen Auswertungen wurden nach dem Betrag der Kraft in aufsteigender Reihenfolge geordnet. Um den zeitlichen Verlauf der Kraftauswirkungen während der Kurvenfahrt auf die Flächenpressung ersichtlich zu machen, sind in den folgenden zwei Abbildungen die Auswirkungen der Kräfte zeitlich geordnet.

Die Ergebnisse der Messungen sind jeweils auf Höhe der zugehörigen Kraft angeordnet. Der Schnittpunkt der Kraft mit der schwarz eingezeichneten Kurve ergibt den Zeitpunkt des Auftretens.

### Zeitlicher Verlauf bei Nominallage

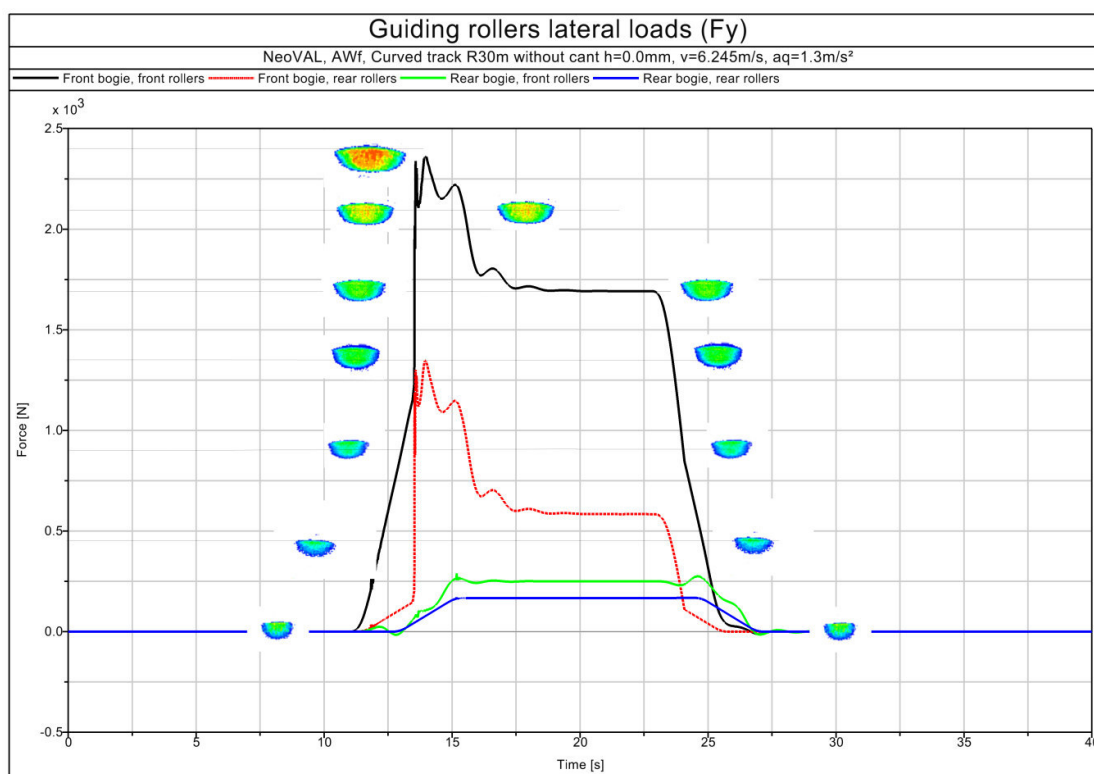
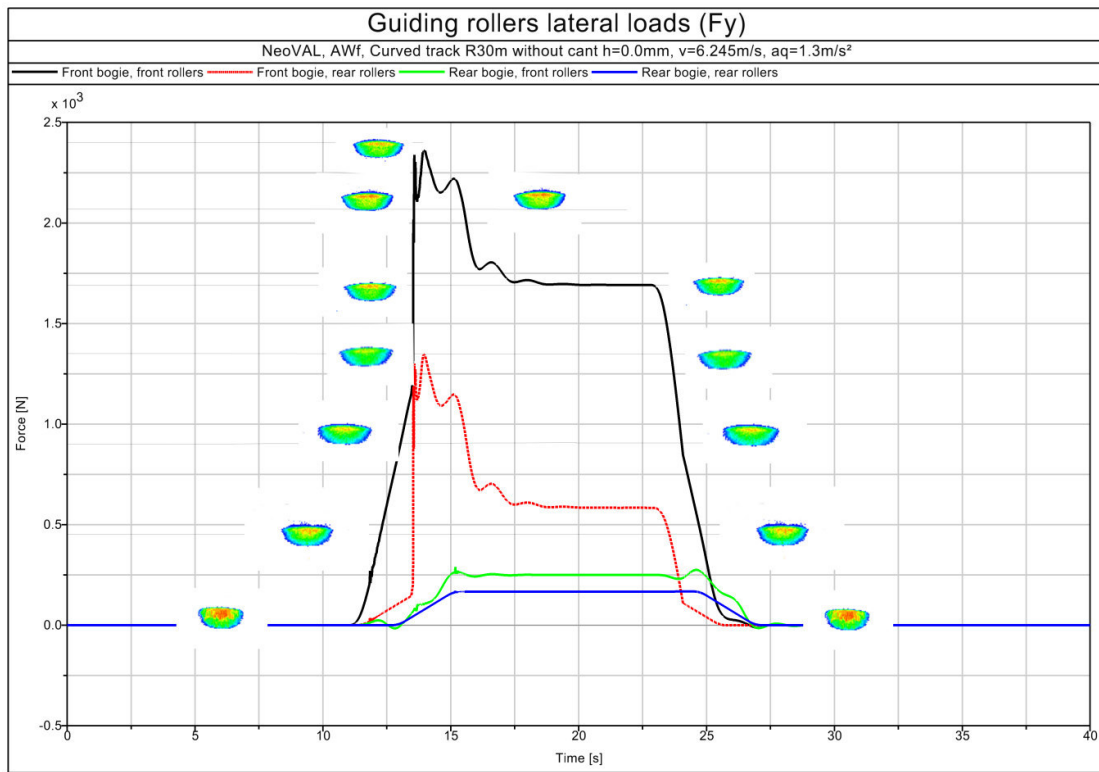


Abbildung 83: Zeitlicher Verlauf der Auswirkungen der resultierenden Kräfte in Nominallage

**Zeitlicher Verlauf in Kontaktpunkt B**



**Abbildung 84: Zeitlicher Verlauf der Auswirkungen der resultierenden Kräfte in Pkt. B**

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 5.5 Diagramme der Kontaktflächen

### 5.5.1 Diagramme der Kontaktflächen bei Kontaktpunkt Nom

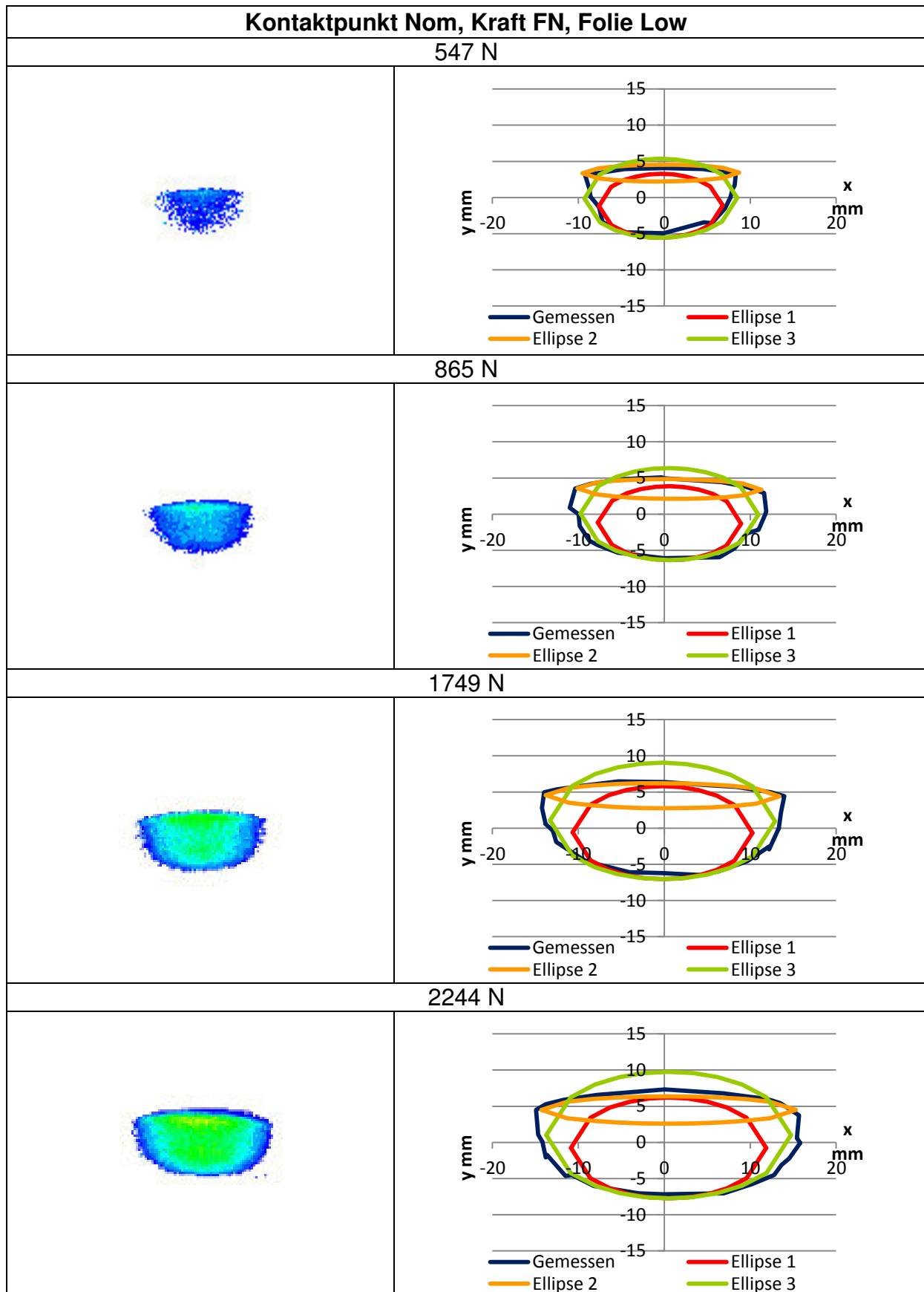


Tabelle 29: Ergebnisse Kontaktfläche bei Nominallage und Normalkraft, Folie Low


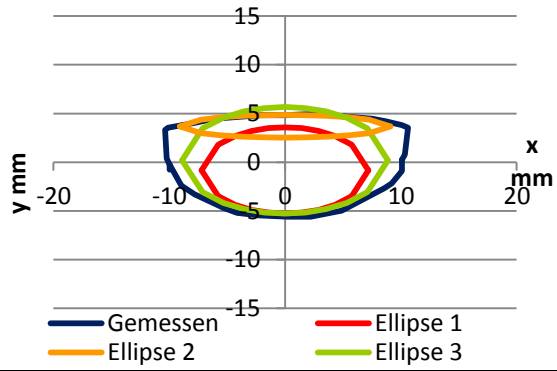
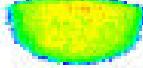
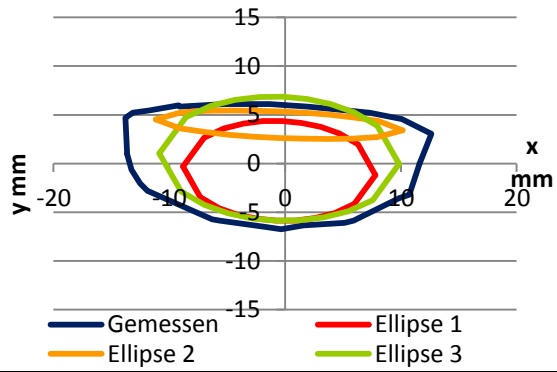
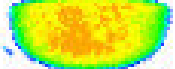
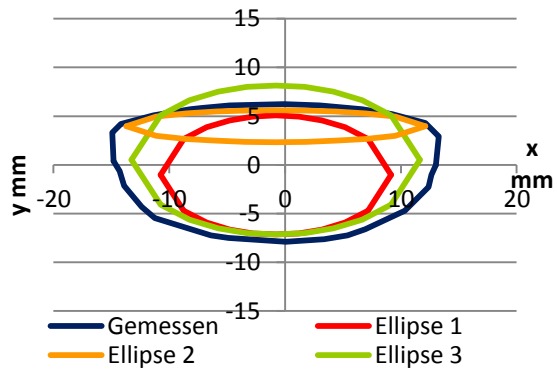
Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie Super Low	
547 N	
	
865 N	
	
1502 N	
	

Tabelle 30: Ergebnisse Kontaktfläche bei Nominallage und Normalkraft, Folie Super Low

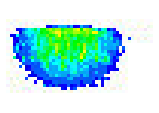
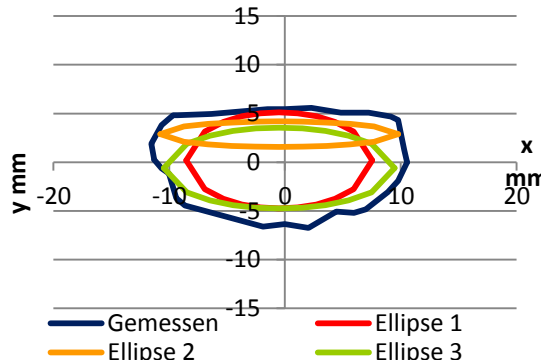
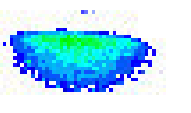
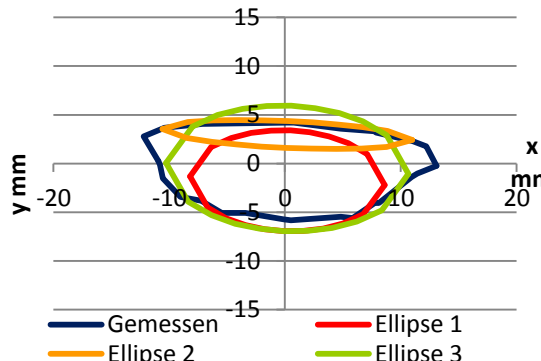
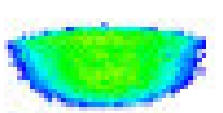
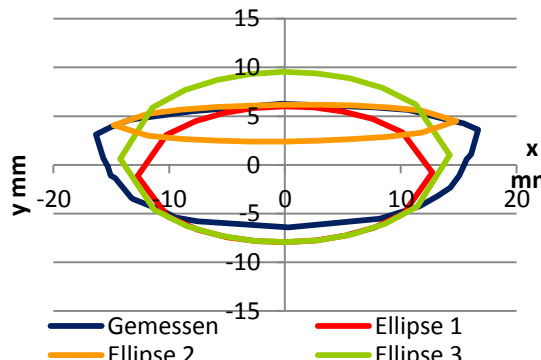
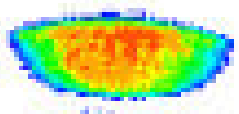
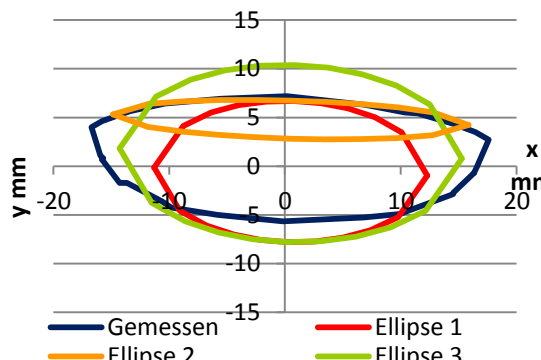
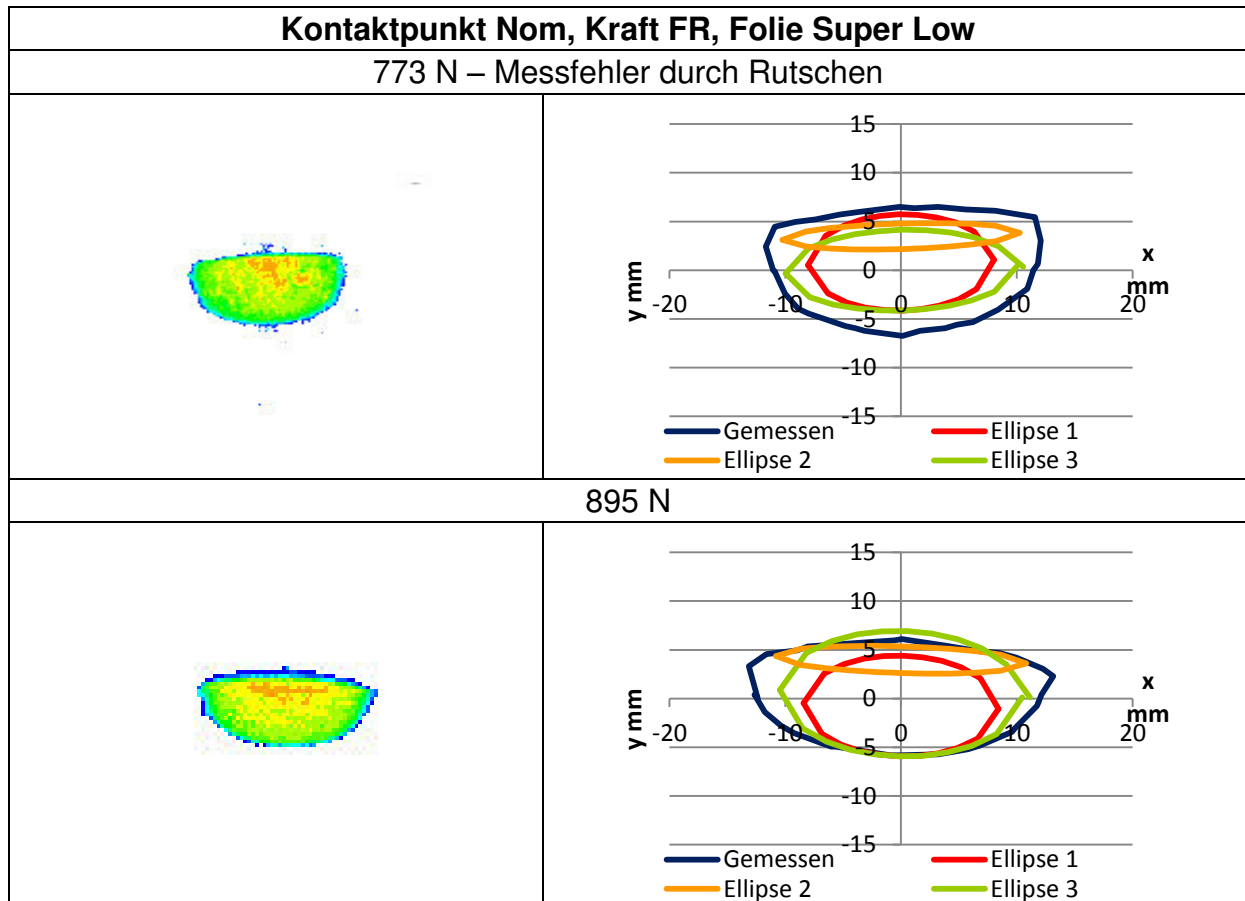
<b>Kontaktpunkt Nom, Kraft FR, Folie Low</b>	
773 N – Messfehler durch Rutschen	
	
895 N	
	
1868 N	
	
2522 N – Messfehler durch Rutschen	
	

Tabelle 31: Ergebnisse Kontaktfläche bei Nominallage und resultierender Kraft, Folie Low





**Tabelle 32: Ergebnisse Kontaktfläche bei Nominallage und resultierender Kraft, Folie Super Low**

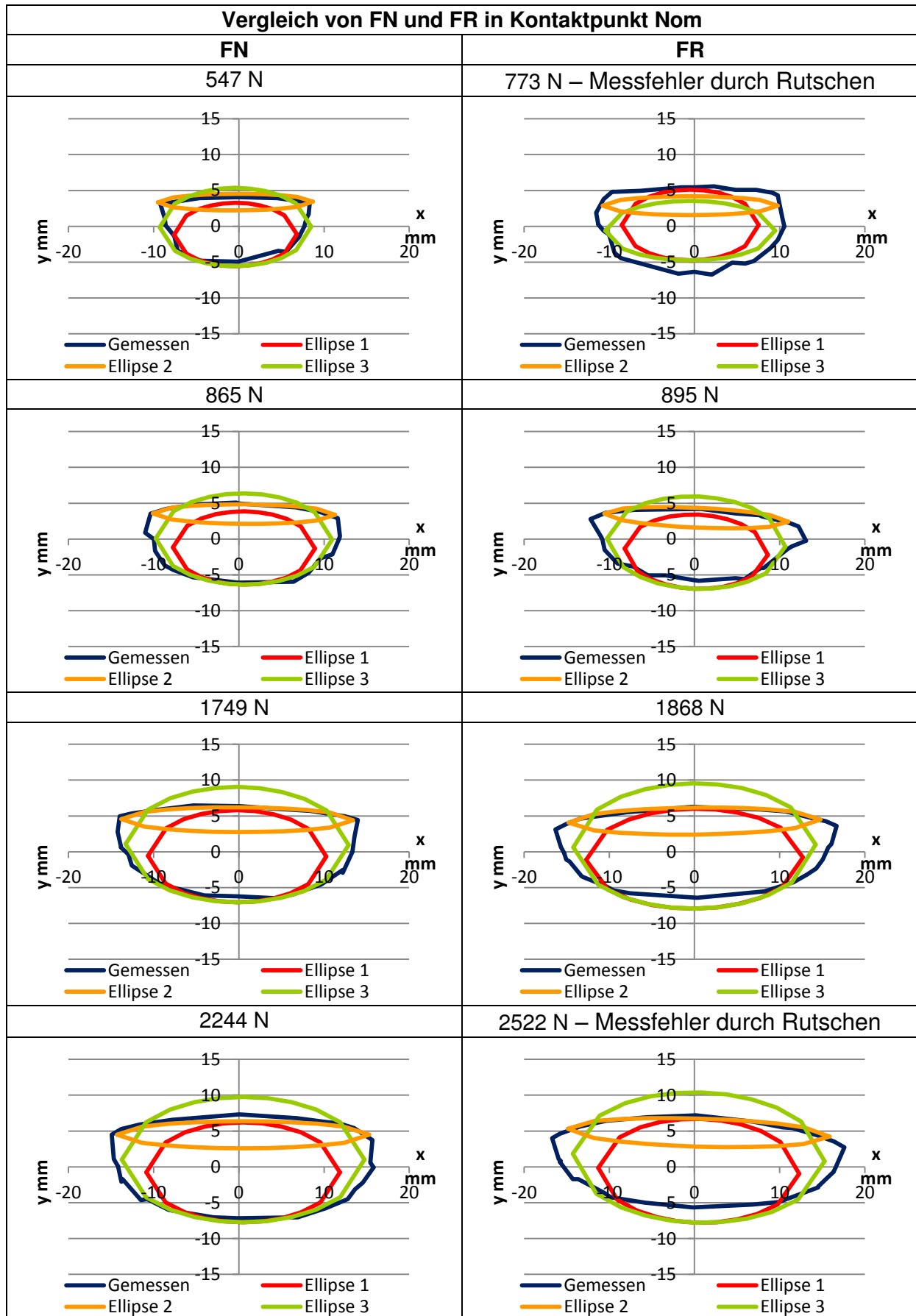


Tabelle 33: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR und FN bei Nominallage, Folie Low

### 5.5.2 Diagramme der Kontaktflächen in Kontaktpunkt A

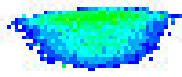
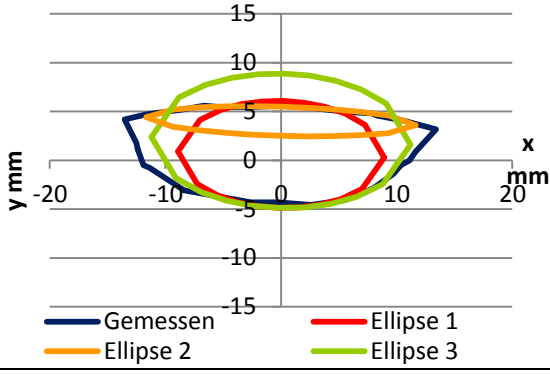
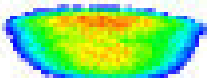
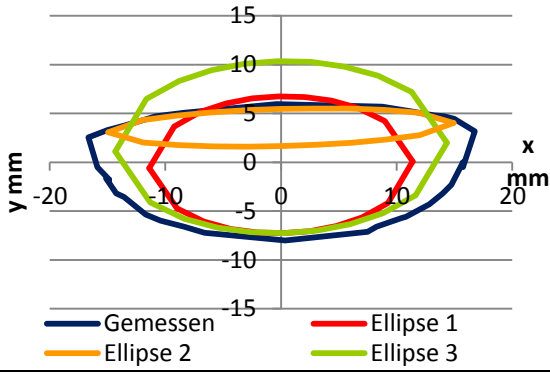
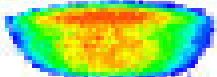
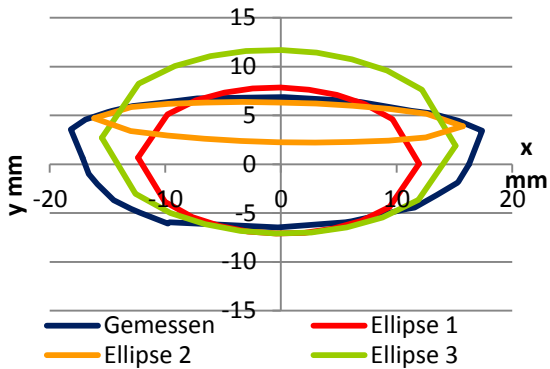
Kontaktpunkt A, Kraft FN, Folie Low	
1094 N	
	
2296 N	
	
2790 N	
	

Tabelle 34: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt A und Normalkraft, Folie Low

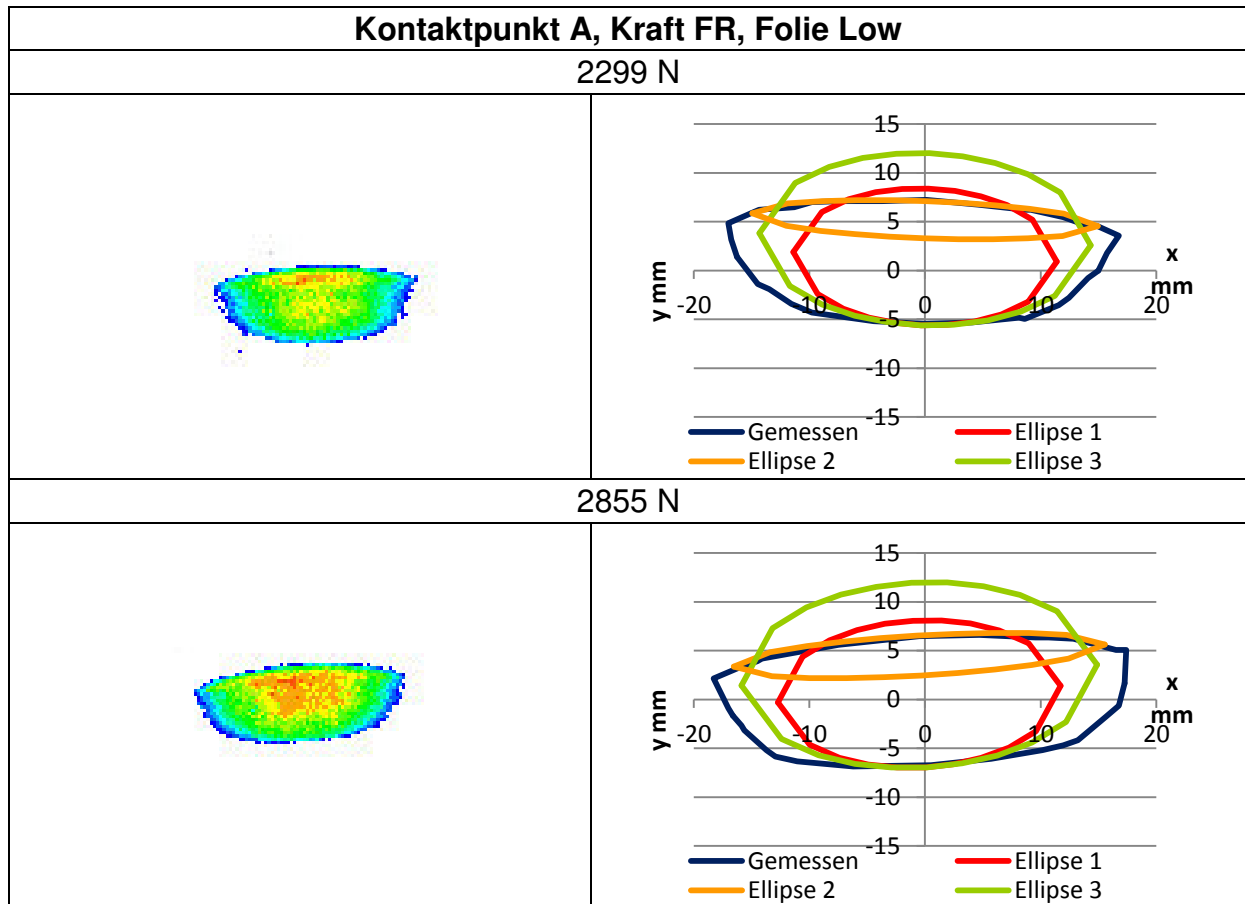


Tabelle 35: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt A und resultierender Kraft, Folie Low

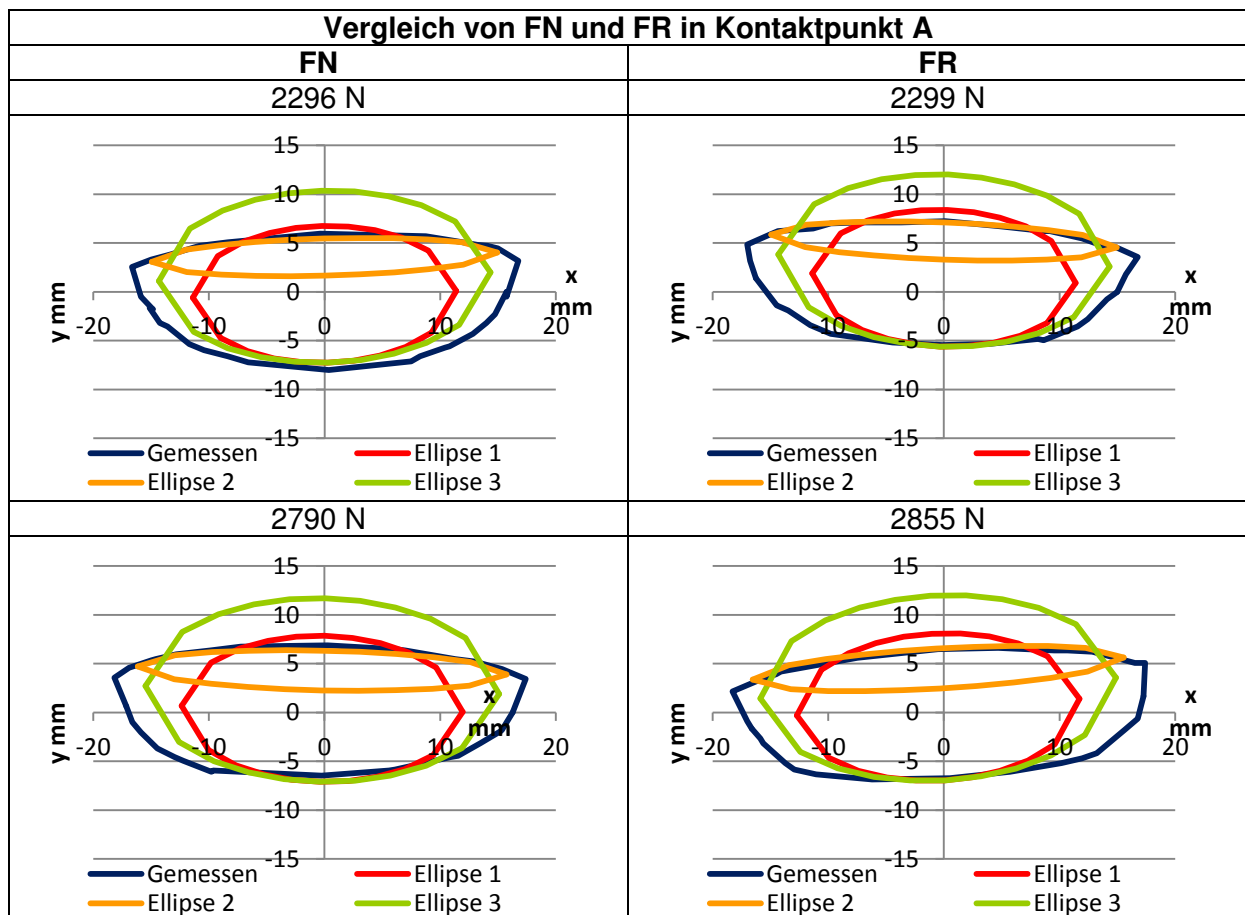


Tabelle 36: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR und FN bei Kontaktpunkt A, Folie Low

### 5.5.3 Diagramme der Kontaktflächen in Kontaktpunkt B

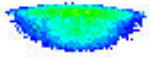
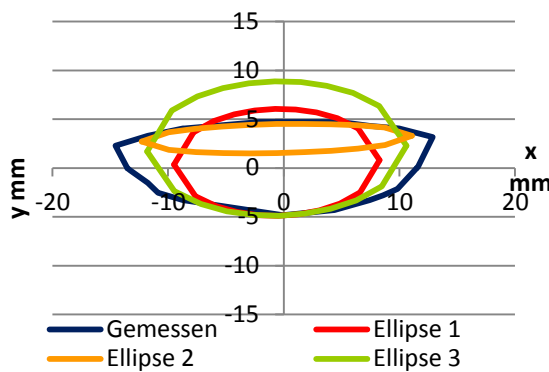
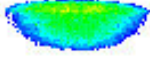
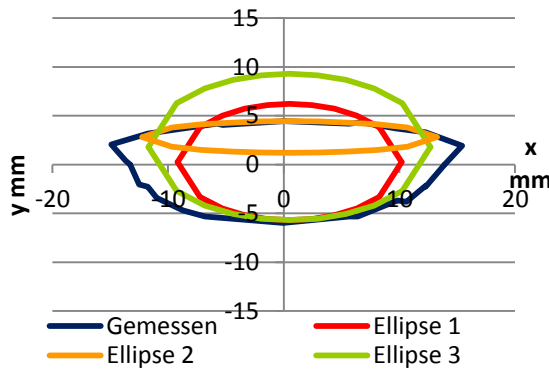
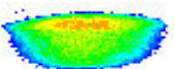
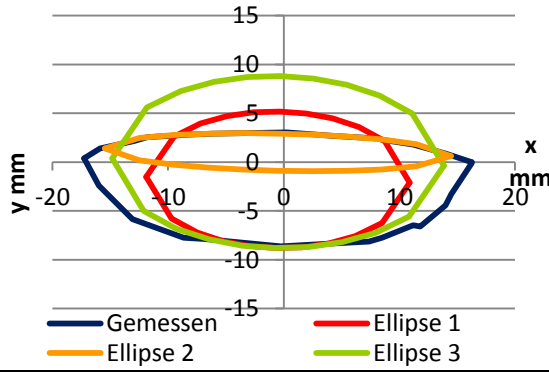
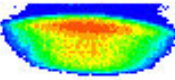
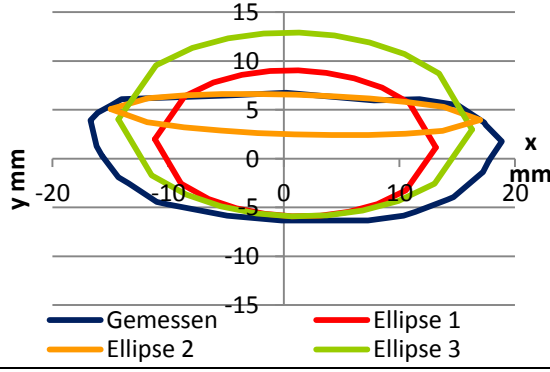
Kontaktpunkt B, Kraft FN, Folie Low	
1094 N	
	
1412 N	
	
2296 N	
	
2791 N	
	

Tabelle 37: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt B und Normalkraft, Folie Low

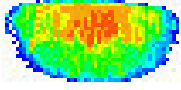
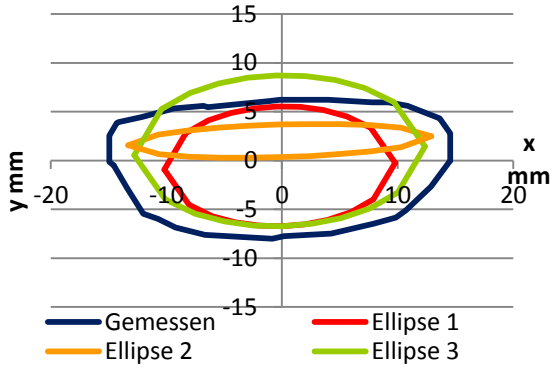
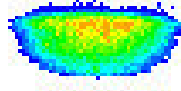
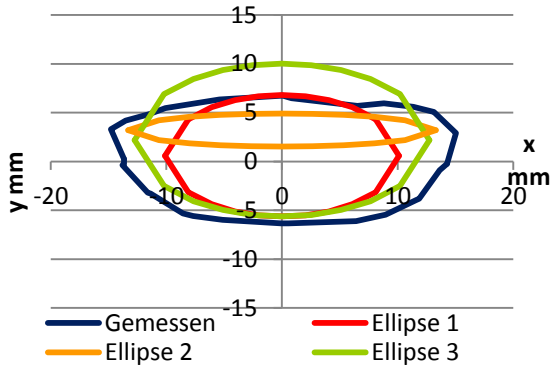
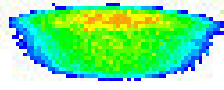
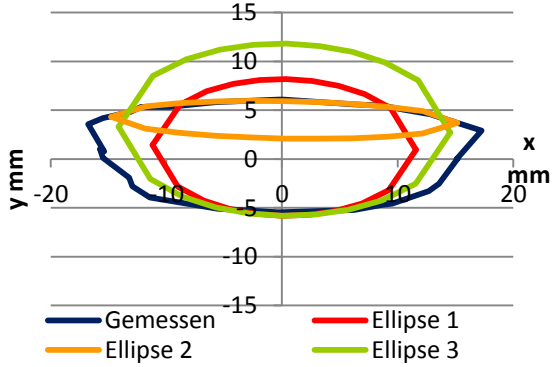
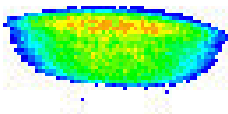
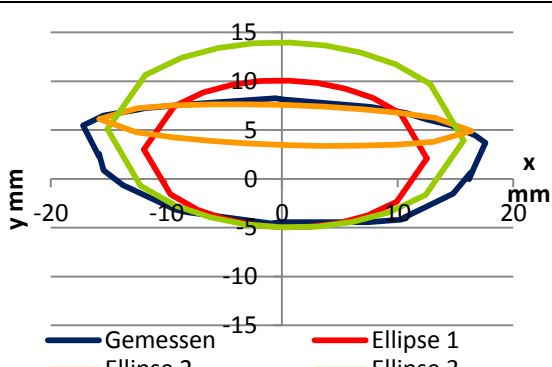
<b>Kontaktpunkt B, Kraft FR, Folie Low</b>	
1547 N – Messfehler durch Rutschen	
	
1611 N	
	
2299 N	
	
2855 N	
	

Tabelle 38: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt B und resultierender Kraft, Folie Low

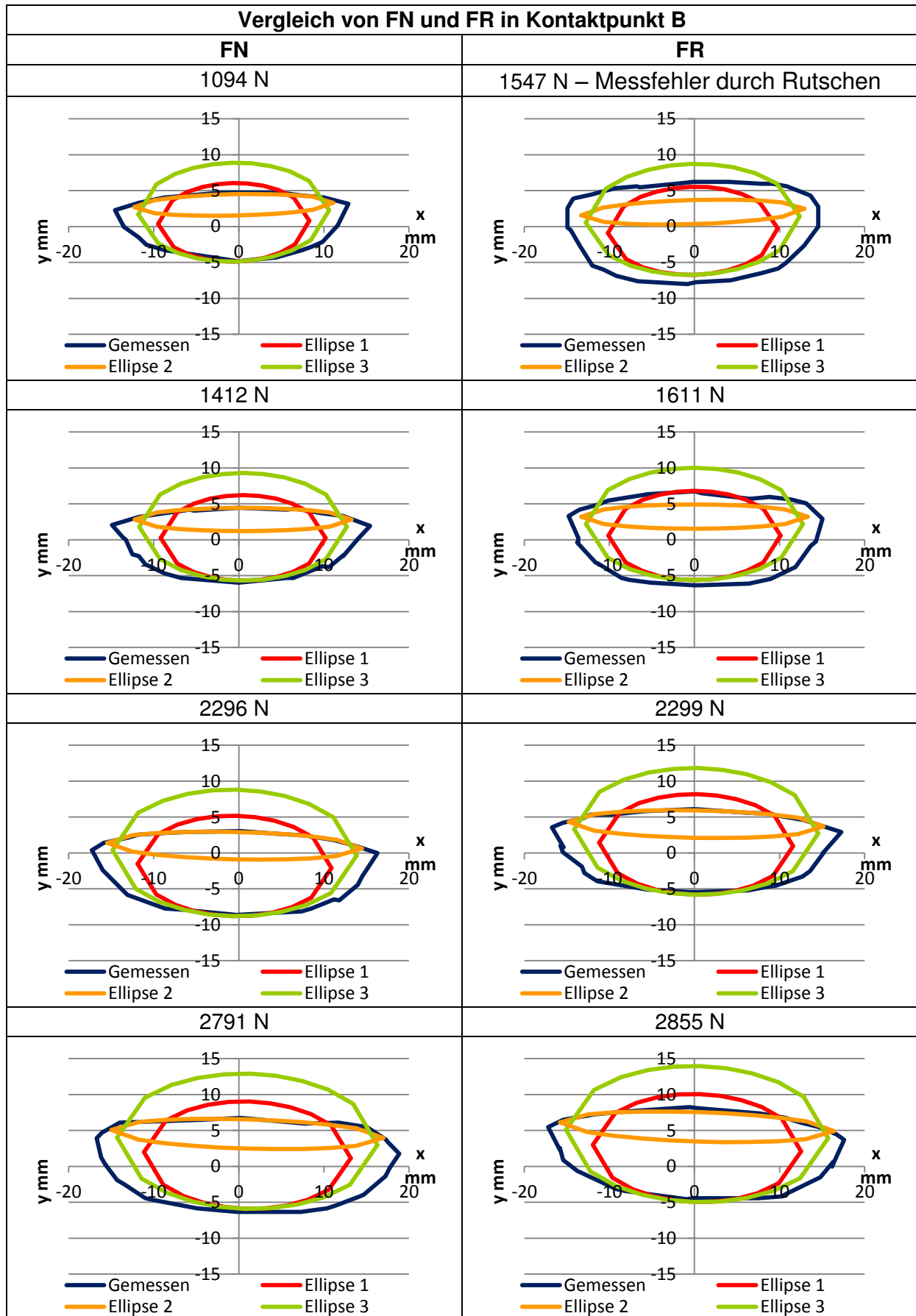


Tabelle 39: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR und FN in Kontaktpunkt B, Folie Low

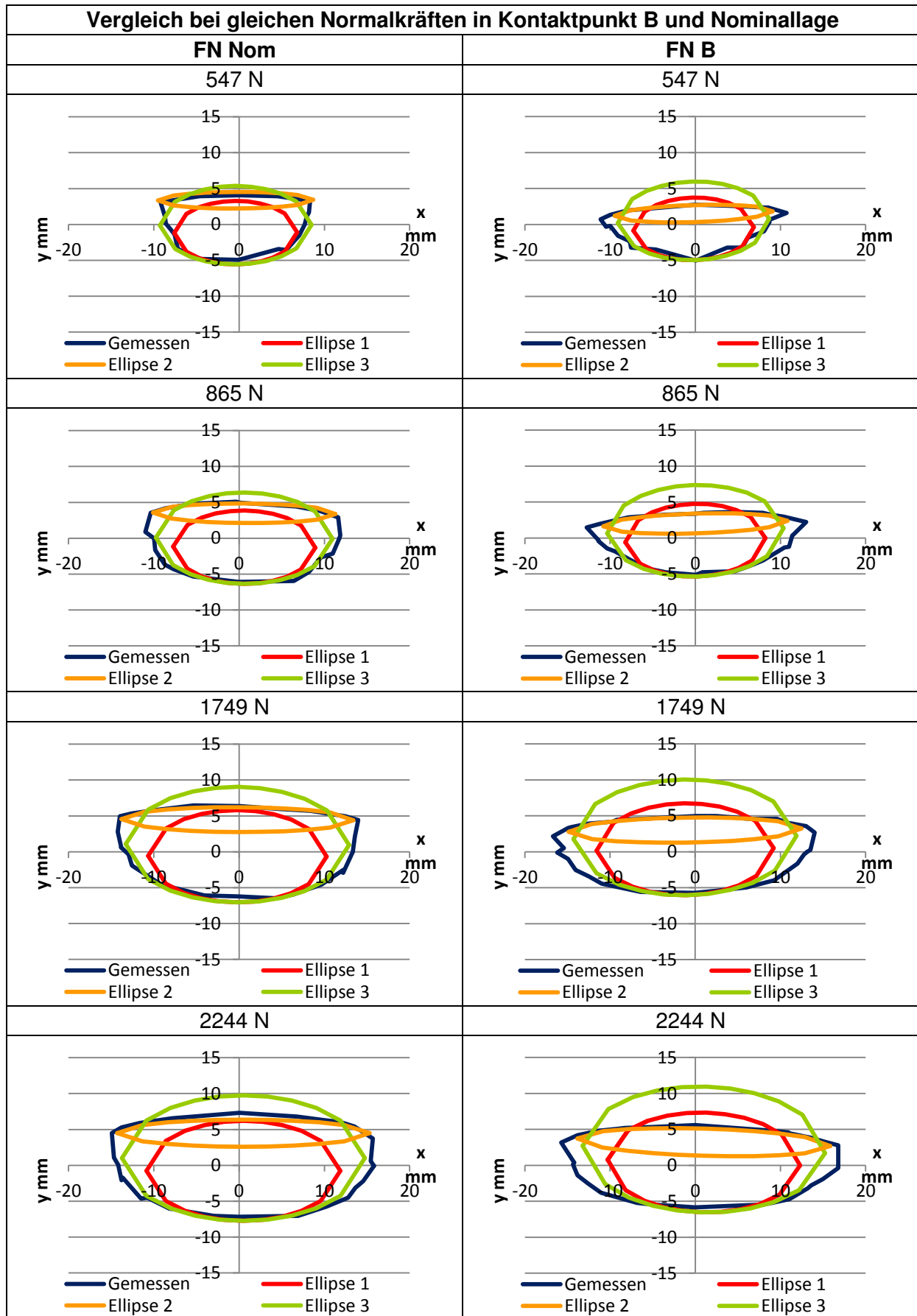


Tabelle 40: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR bei Normalkraft in Kontaktpunkten B und Nom, Folie Low



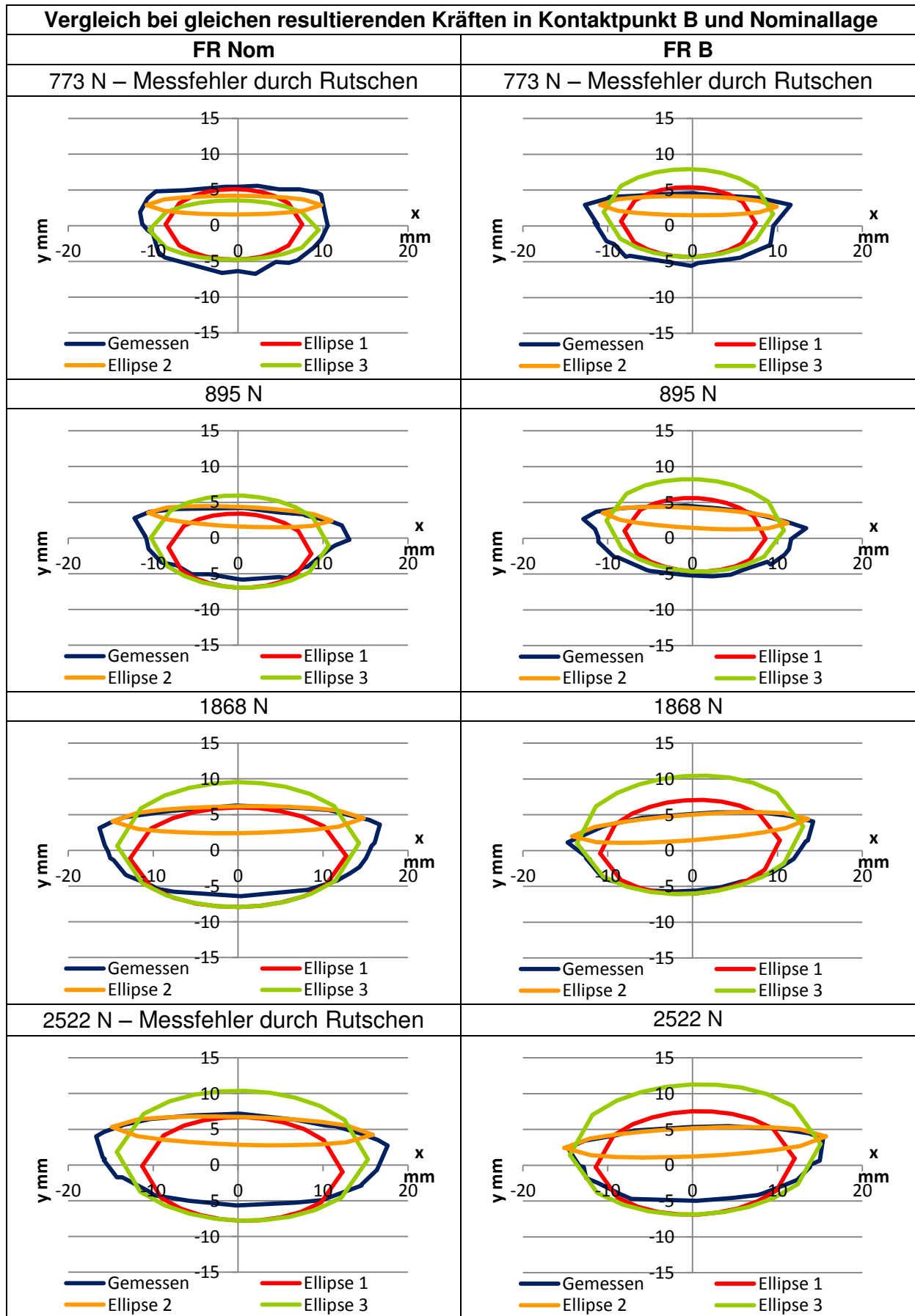


Tabelle 41: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR bei gleicher Kraft in Kontaktpunkten B und Nom, Folie Low

### 5.5.4 Diagramme der Kontaktflächen in Kontaktpunkt C

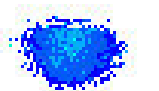
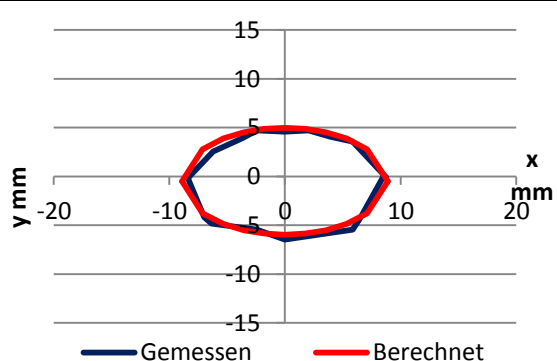
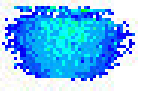
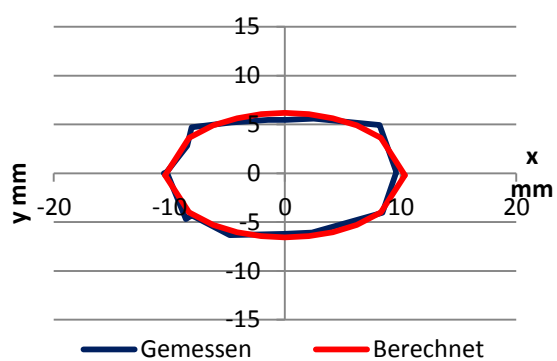
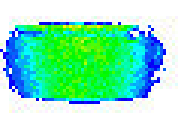
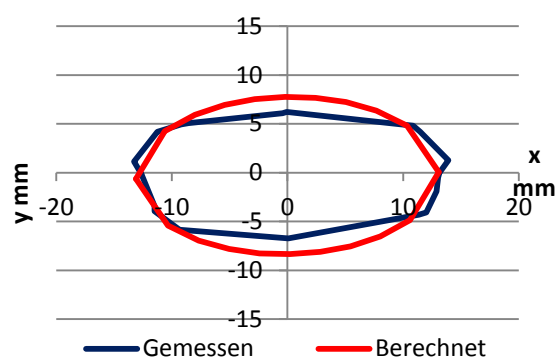
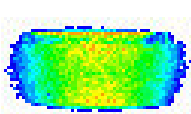
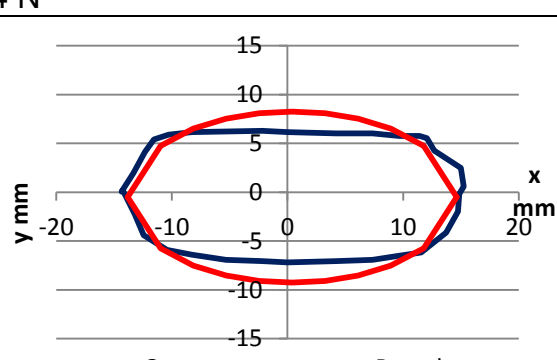
Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Low	
547 N	
	
865 N	
	
1749 N	
	
2244 N	
	

Tabelle 42: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt C und Normalkraft, Folie Low


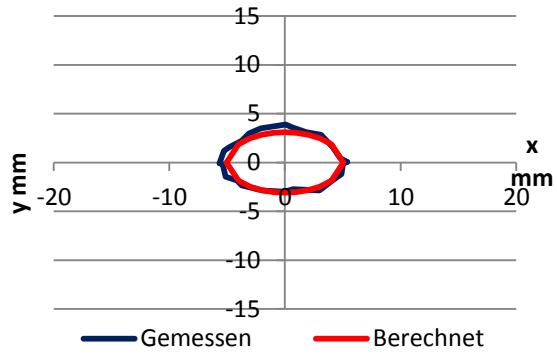
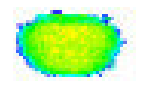
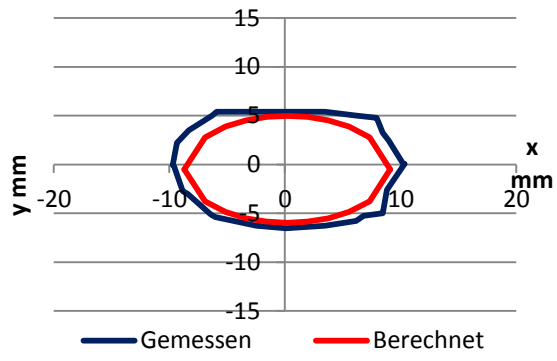
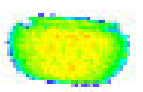
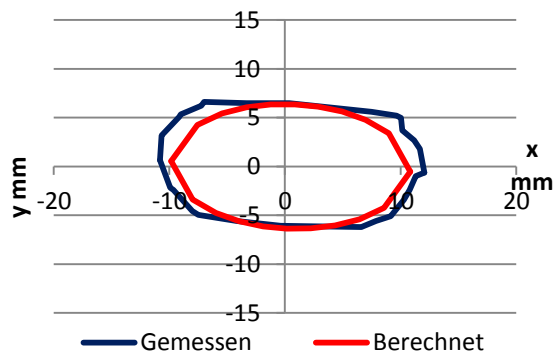
Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Super Low	
100 N	
	
547 N	
	
865 N	
	

Tabelle 43: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt C und Normalkraft, Folie Super Low

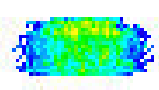
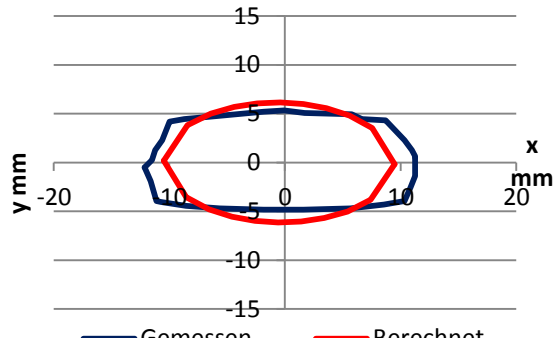
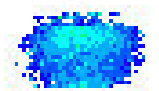
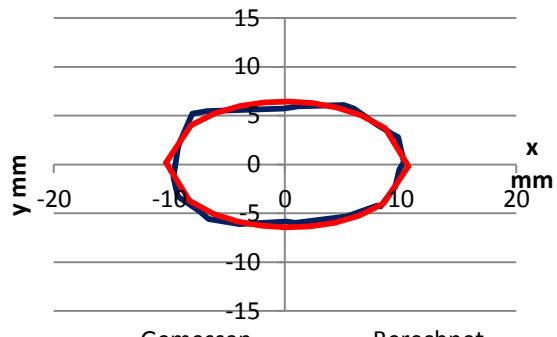
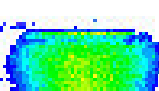
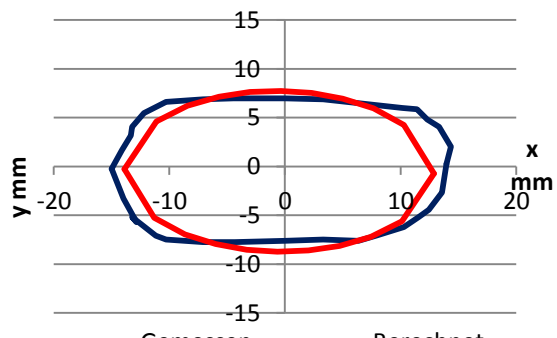
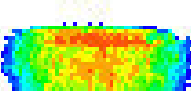
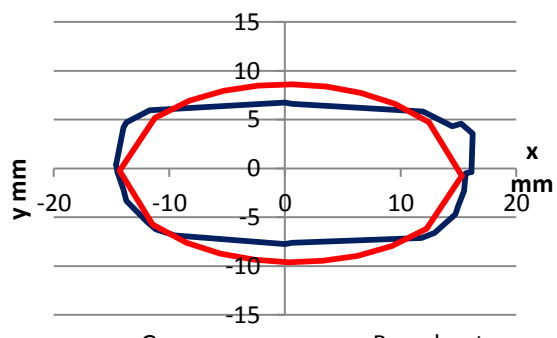
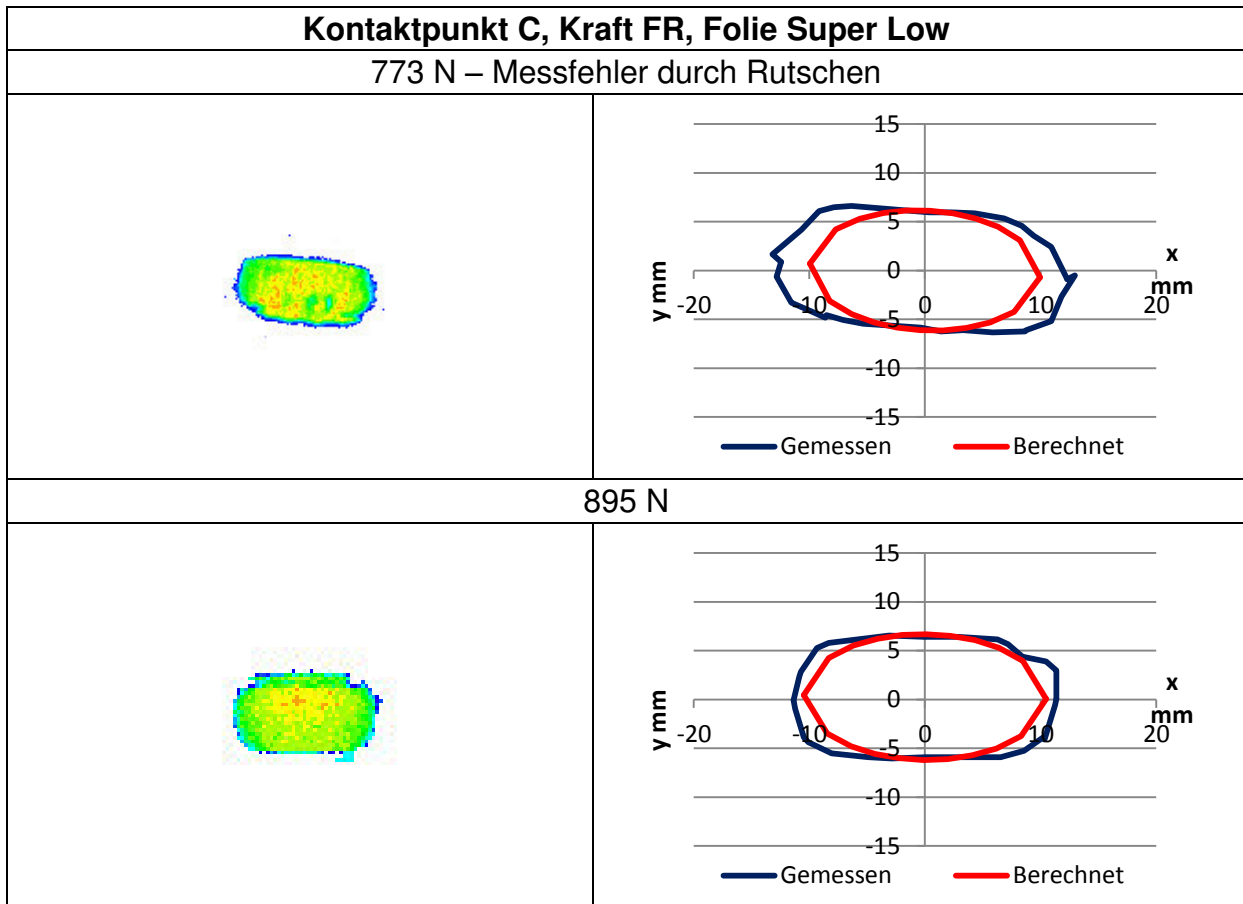
<b>Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Low</b>	
773 N – Messfehler durch Rutschen	
	
895 N	
	
1868 N	
	
2522 N – Messfehler durch Rutschen	
	

Tabelle 44: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt C undresultierender Kraft, Folie Low



**Tabelle 45: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt C bei resultierender Kraft, Folie Super Low**

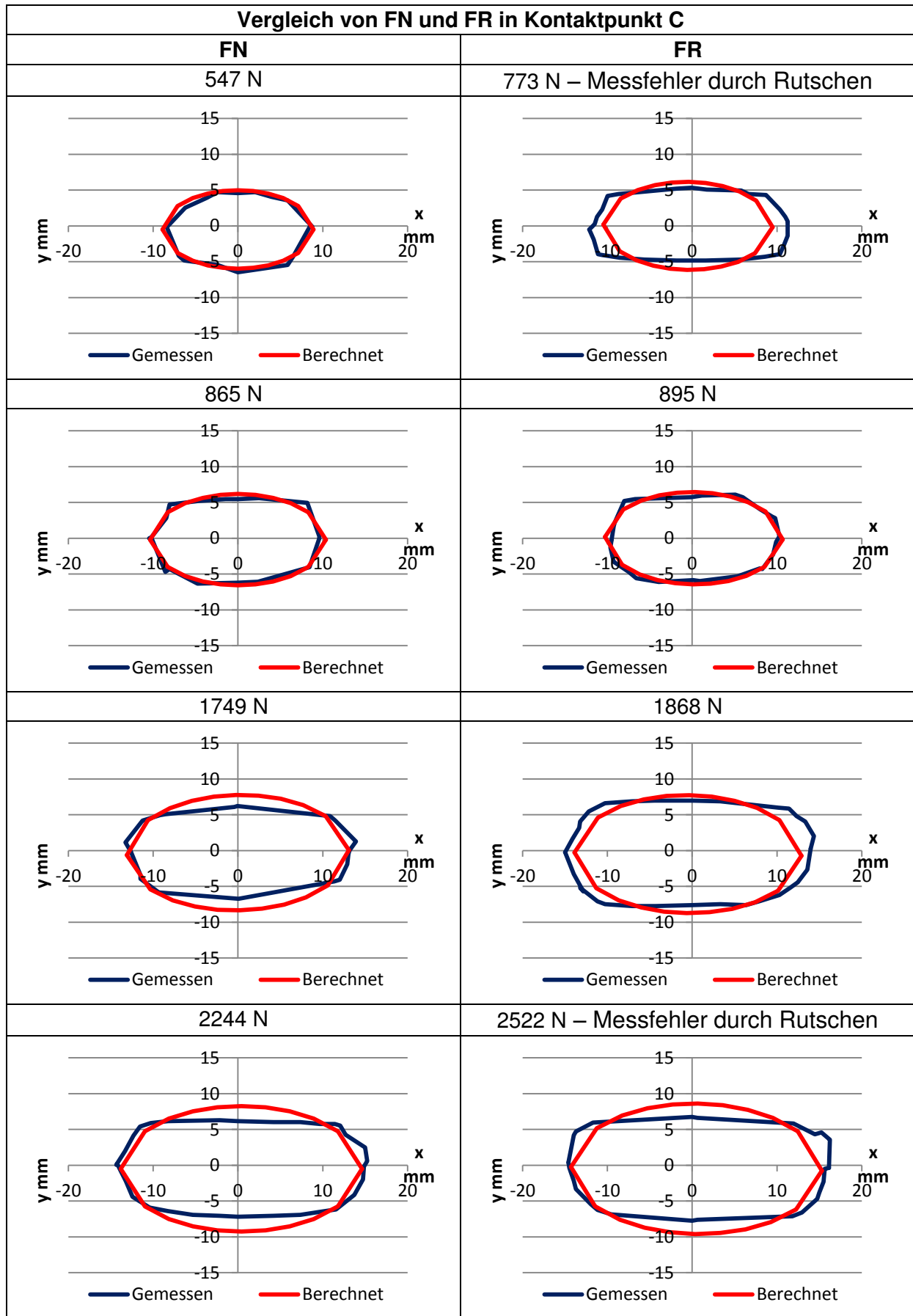
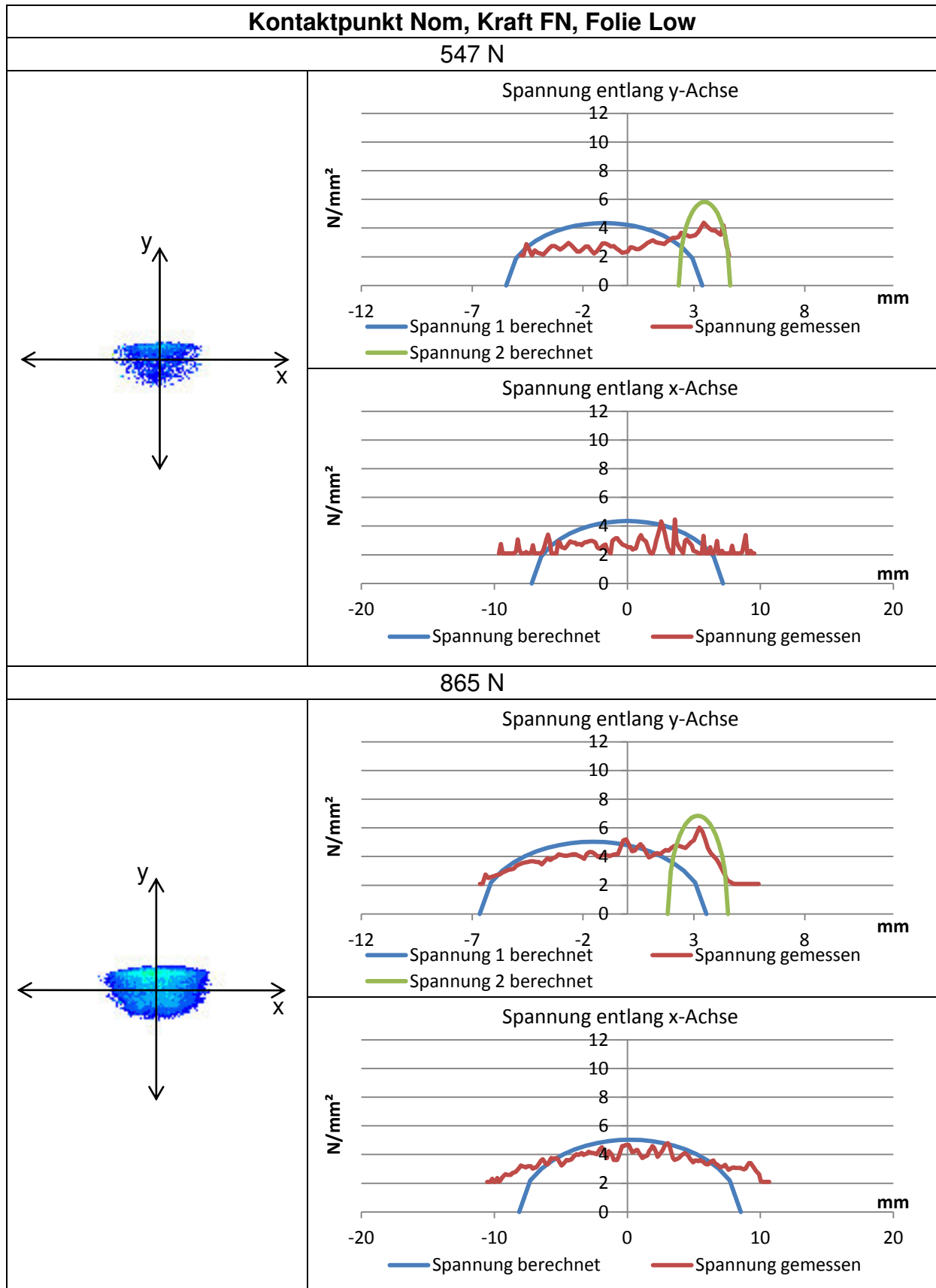


Tabelle 46: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR und FN in Kontaktpunkt C, Folie Low

## 5.6 Diagramme Spannungen

### 5.6.1 Diagramme der Spannungen in Kontaktpunkt Nom



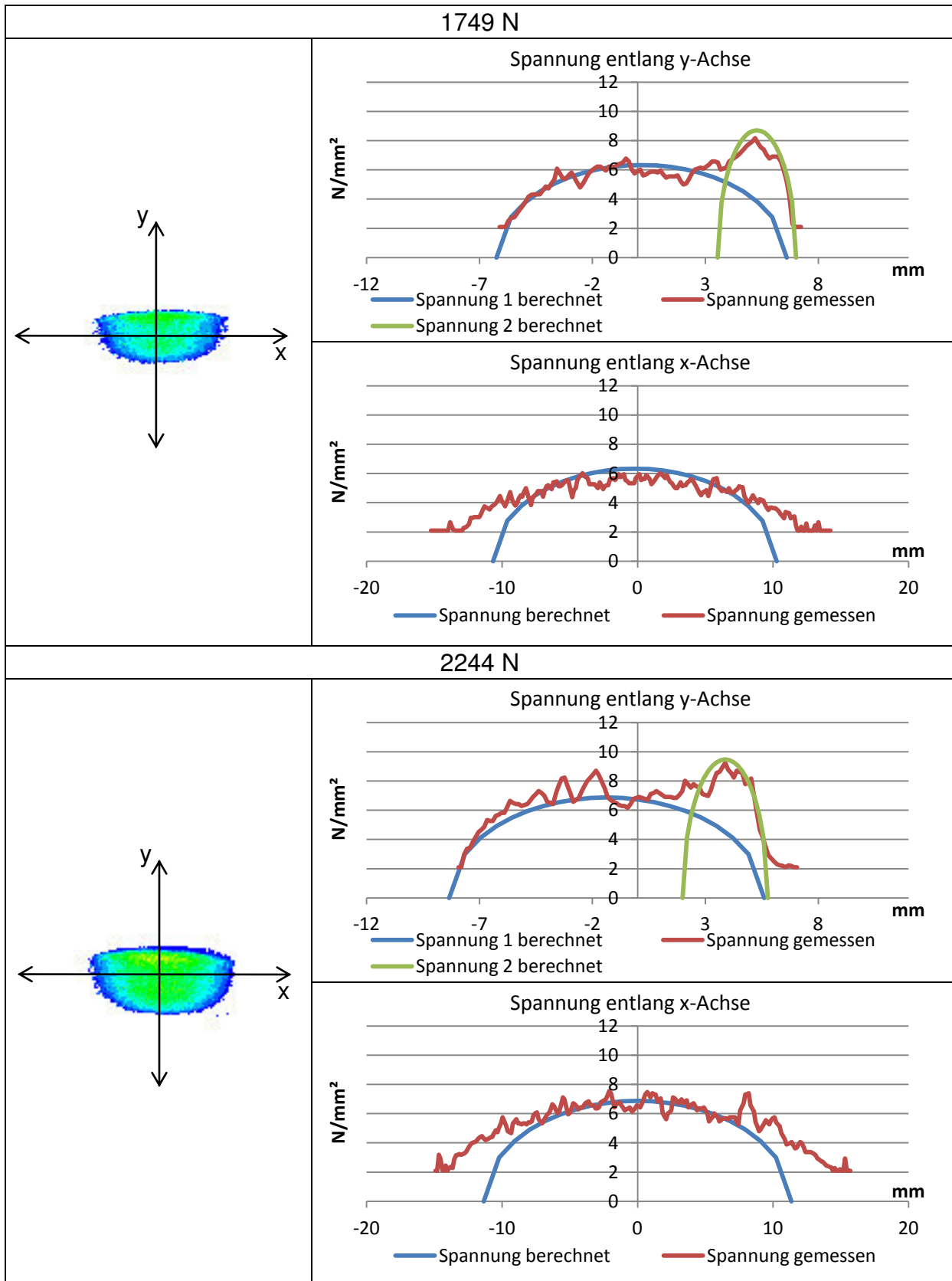
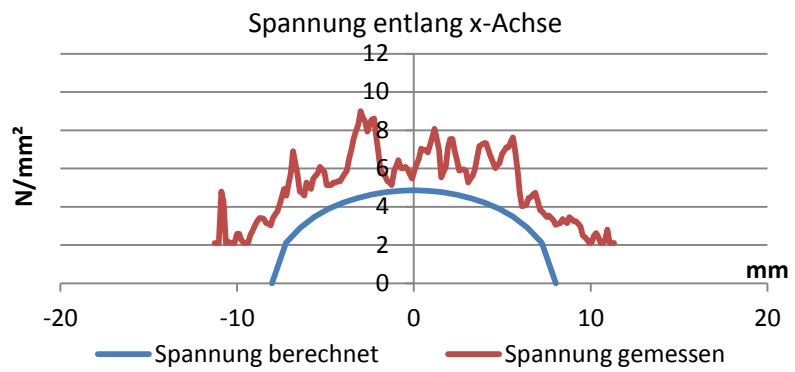
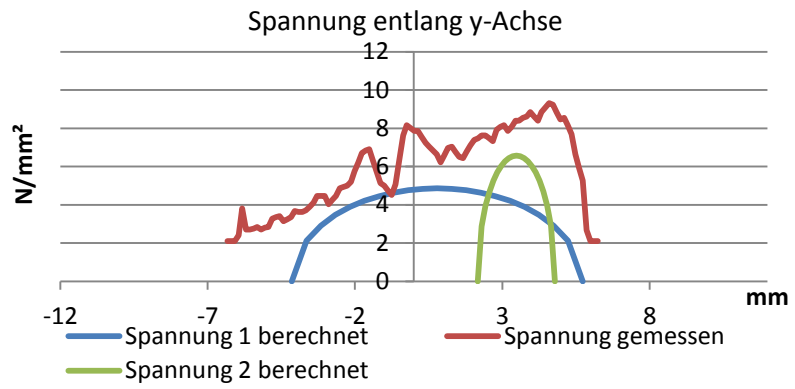
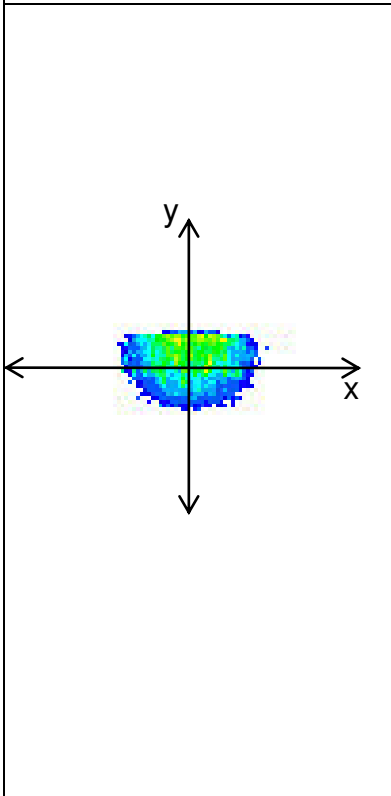


Tabelle 47: Ergebnisse Spannung bei Nominallage und Normalkraft, Folie Low

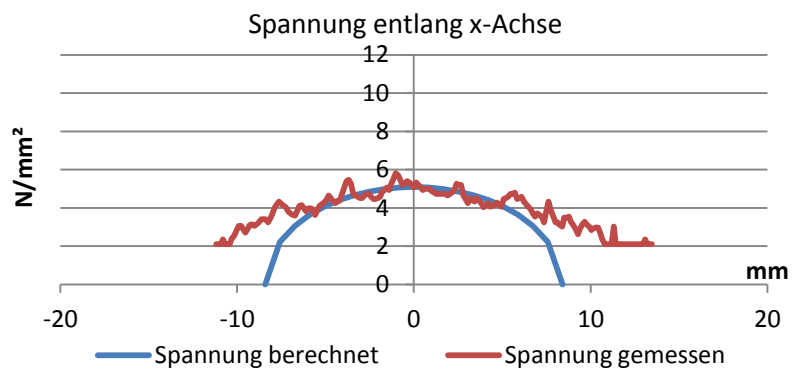
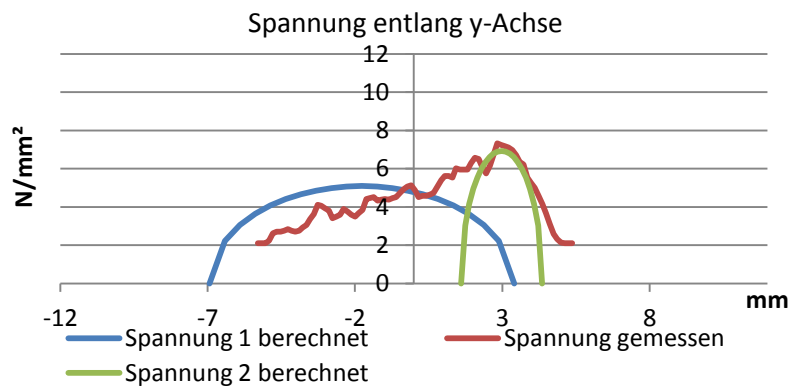
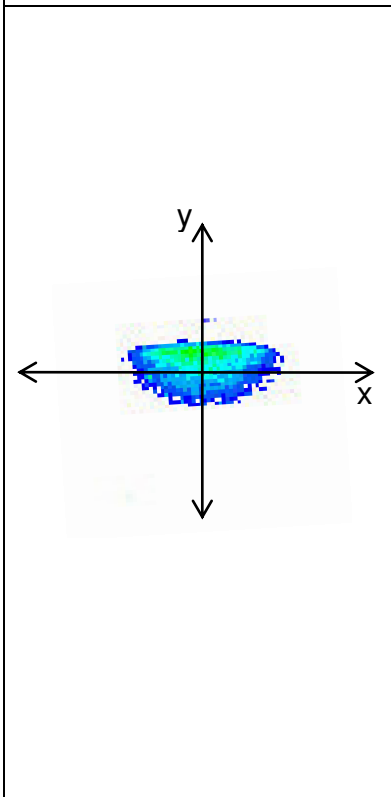


**Kontaktpunkt Nom, Kraft FR, Folie Low**

773 N – Messfehler durch Rutschen



895 N



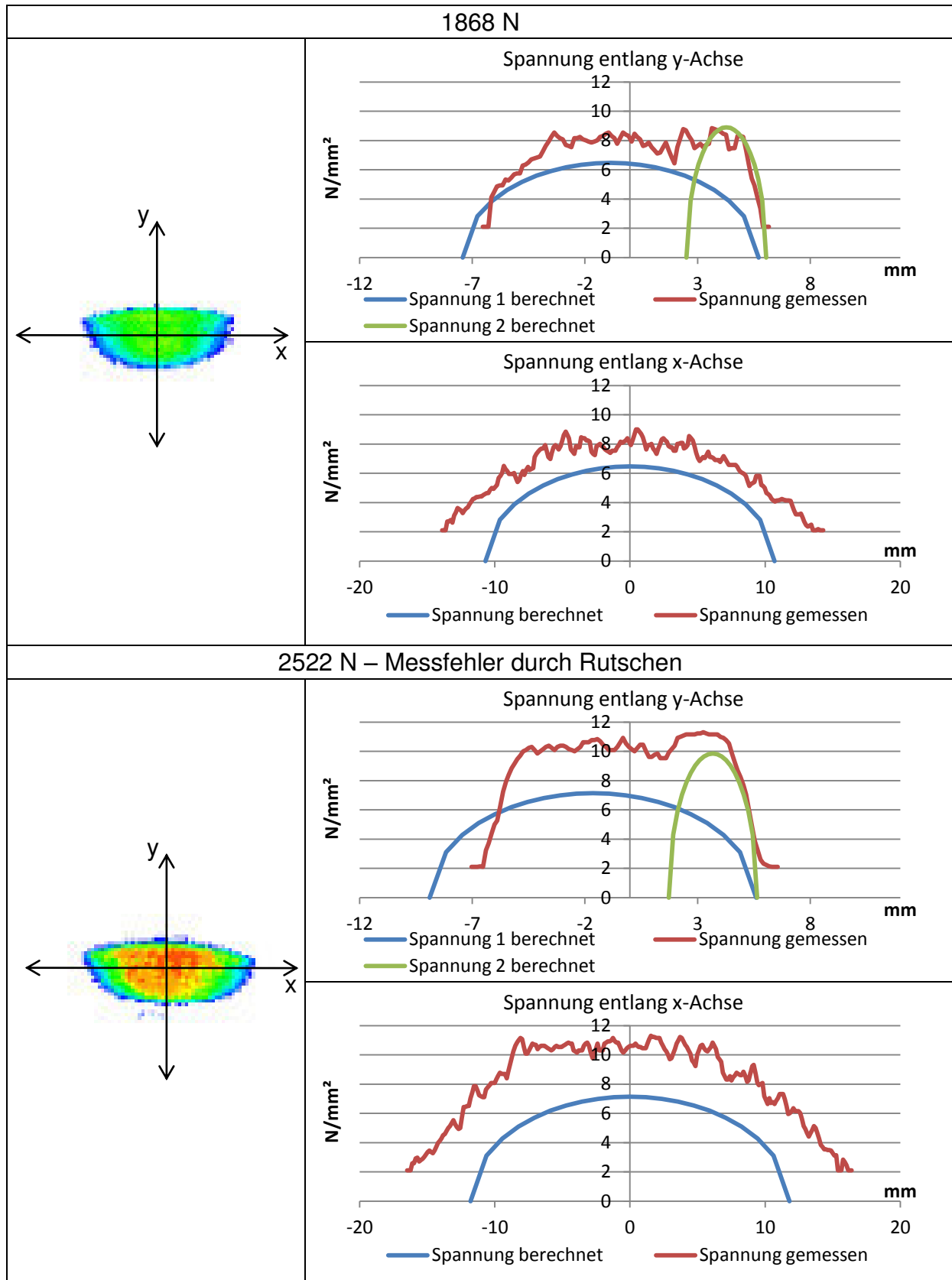
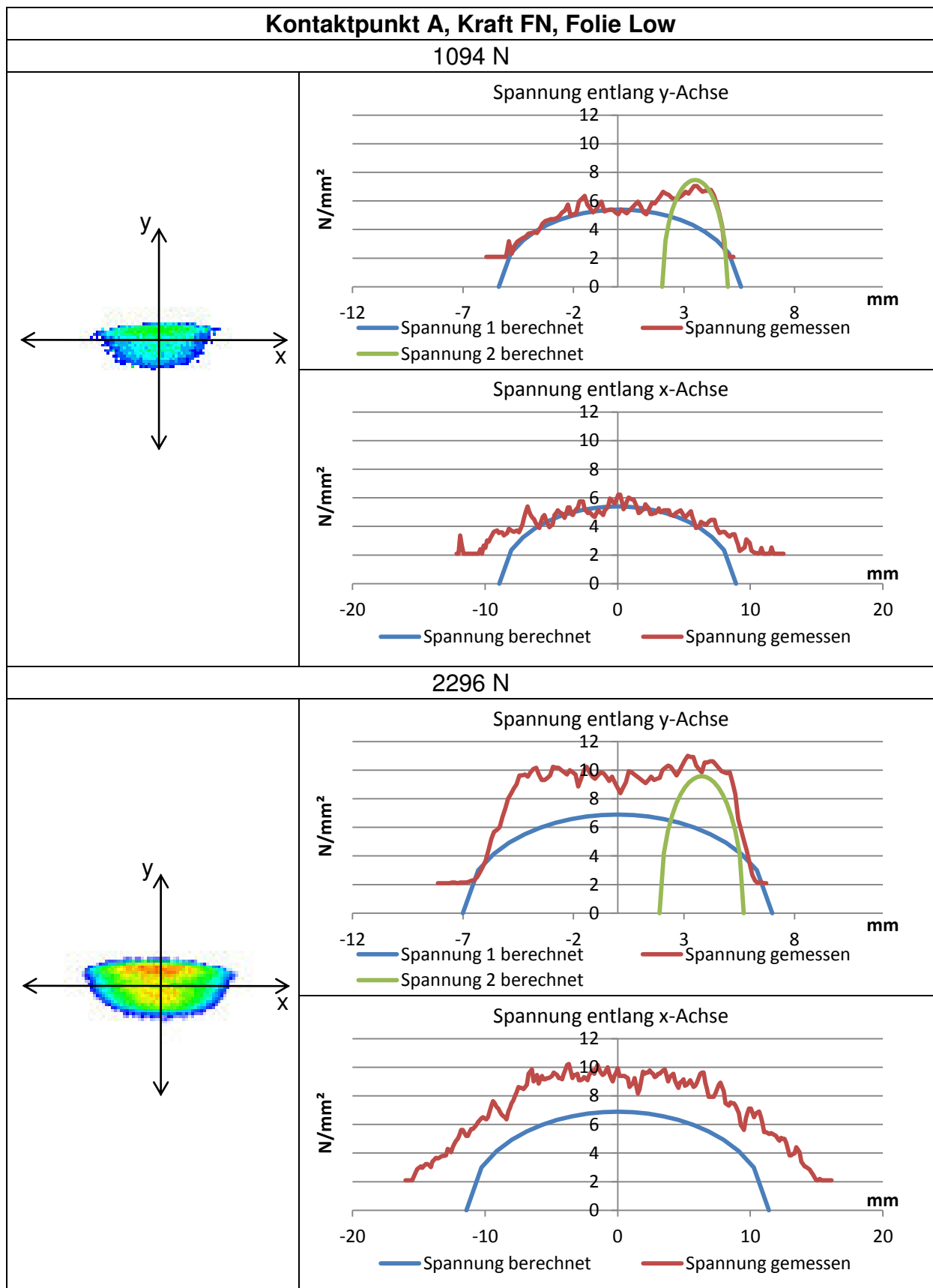


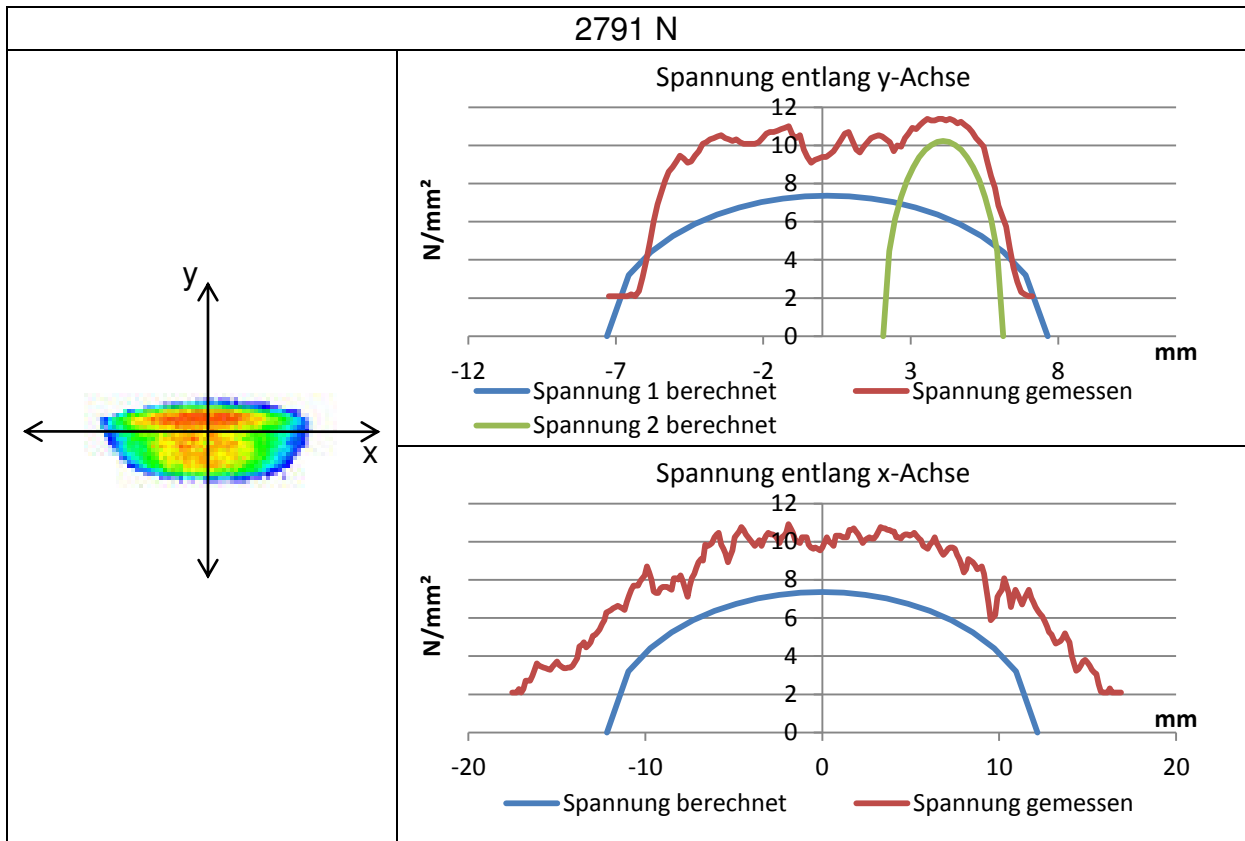
Tabelle 48: Ergebnisse Spannung bei Nominallage und resultierender Kraft, Folie Low

Vergleich von FN und FR in Kontaktpunkt Nom	
FN	FR
547 N	773 N – Messfehler durch Rutschen
<p>Spannung entlang y-Achse</p>	<p>Spannung entlang y-Achse</p>
<p>Spannung entlang x-Achse</p>	<p>Spannung entlang x-Achse</p>
1749 N	1868 N
<p>Spannung entlang y-Achse</p>	<p>Spannung entlang y-Achse</p>
<p>Spannung entlang x-Achse</p>	<p>Spannung entlang x-Achse</p>
2422 N	2522 N – Messfehler durch Rutschen
<p>Spannung entlang y-Achse</p>	<p>Spannung entlang y-Achse</p>
<p>Spannung entlang x-Achse</p>	<p>Spannung entlang x-Achse</p>

Tabelle 49: Vergleich Ergebnisse Spannung FR und FN in Nominallage, Folie Low

### 5.6.2 Diagramme der Spannungen in Kontaktpunkt A





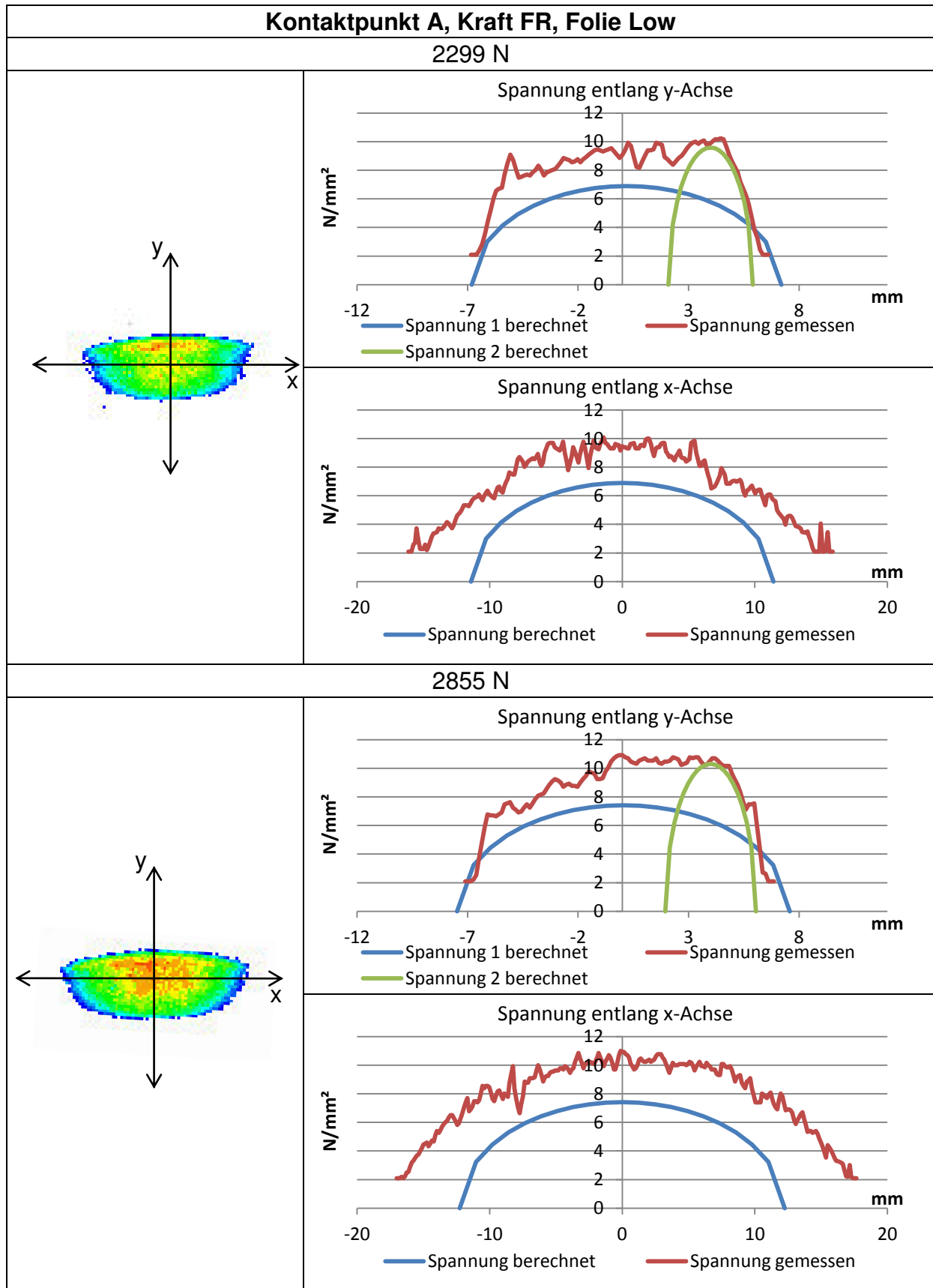


Tabelle 51: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt A und resultierender Kraft, Folie Low

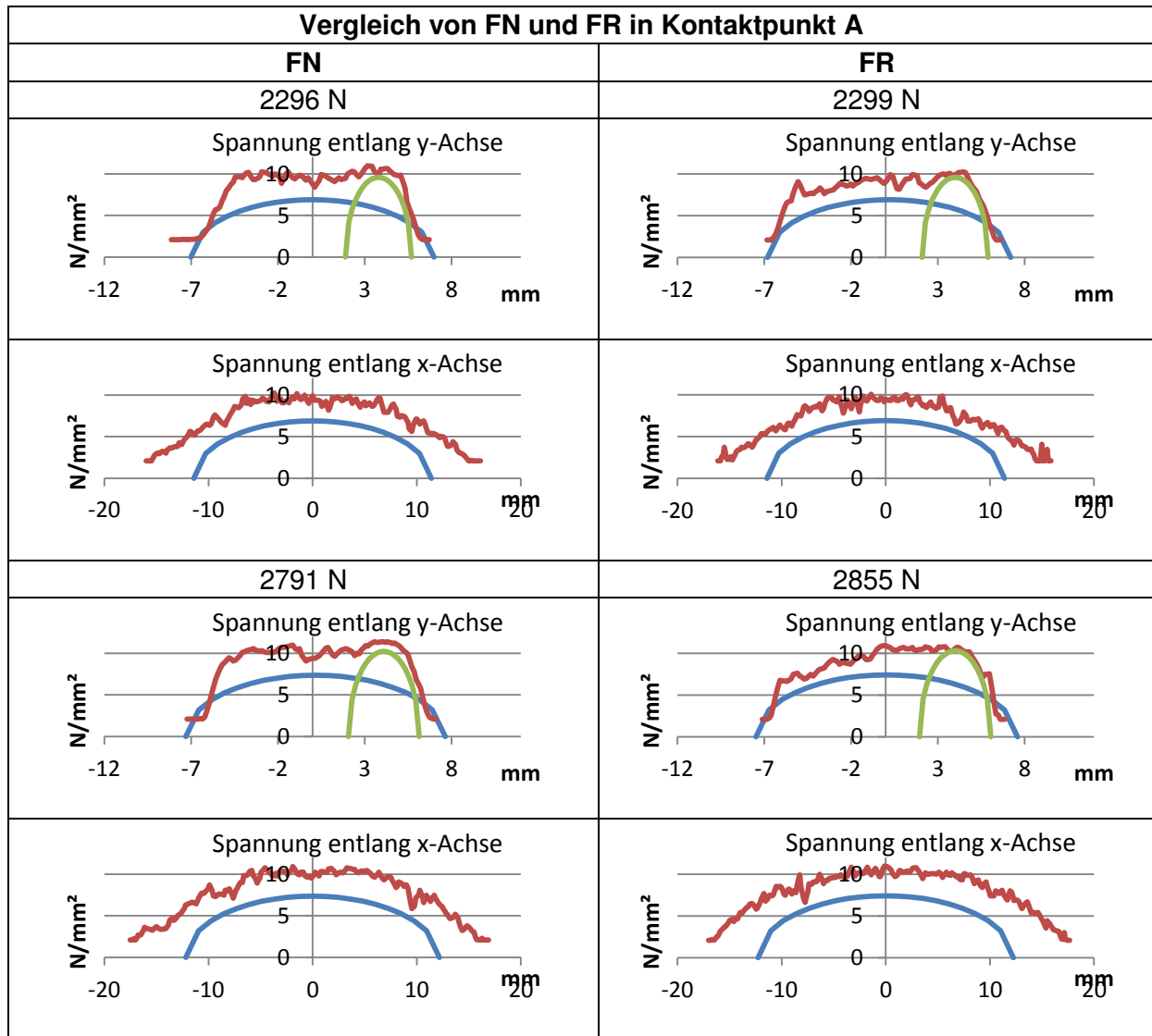
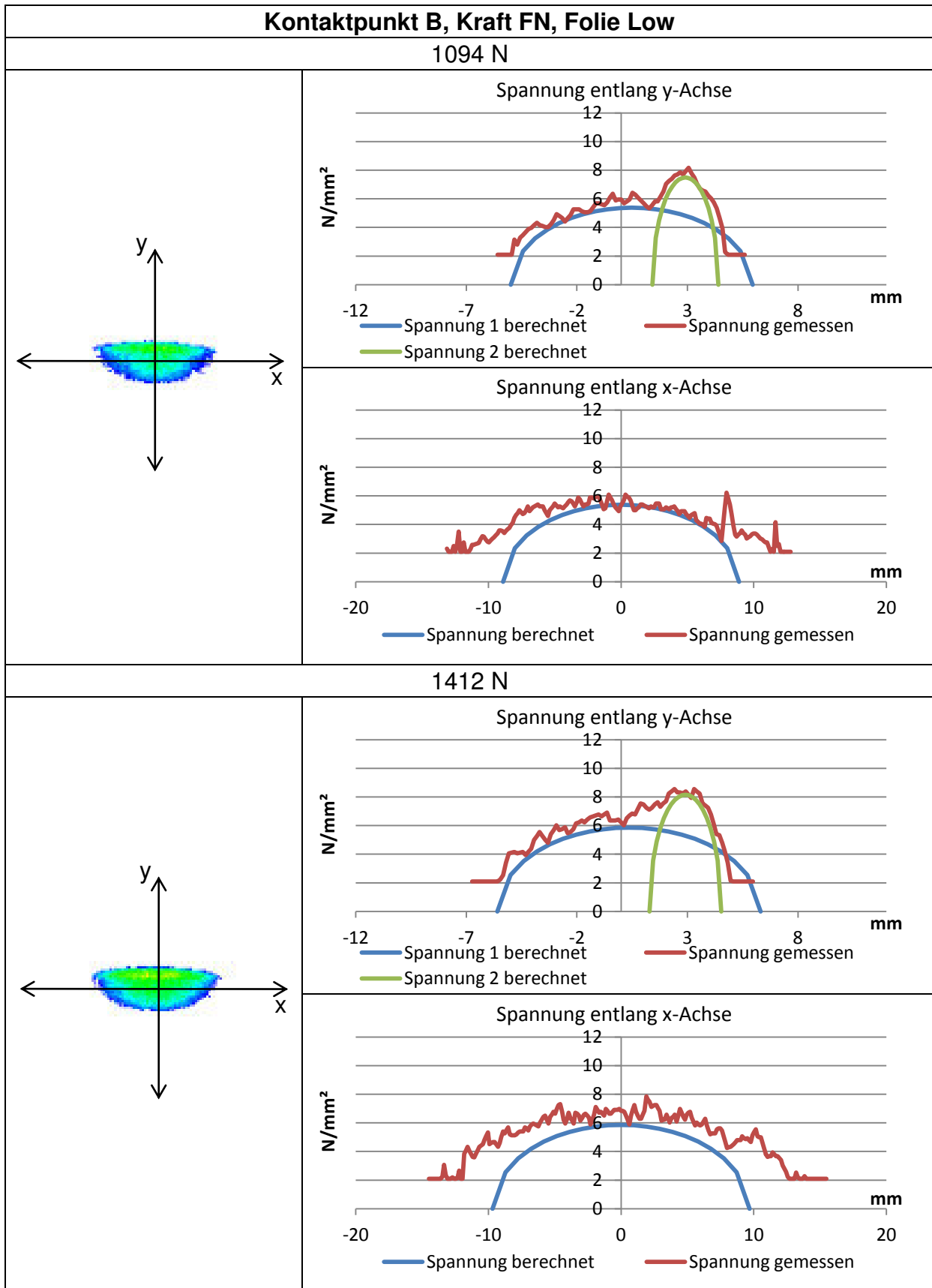


Tabelle 52: Vergleich Ergebnisse Spannung FR und FN in Kontaktpunkt A, Folie Low

### 5.6.3 Diagramme der Spannungen in Kontaktpunkt B





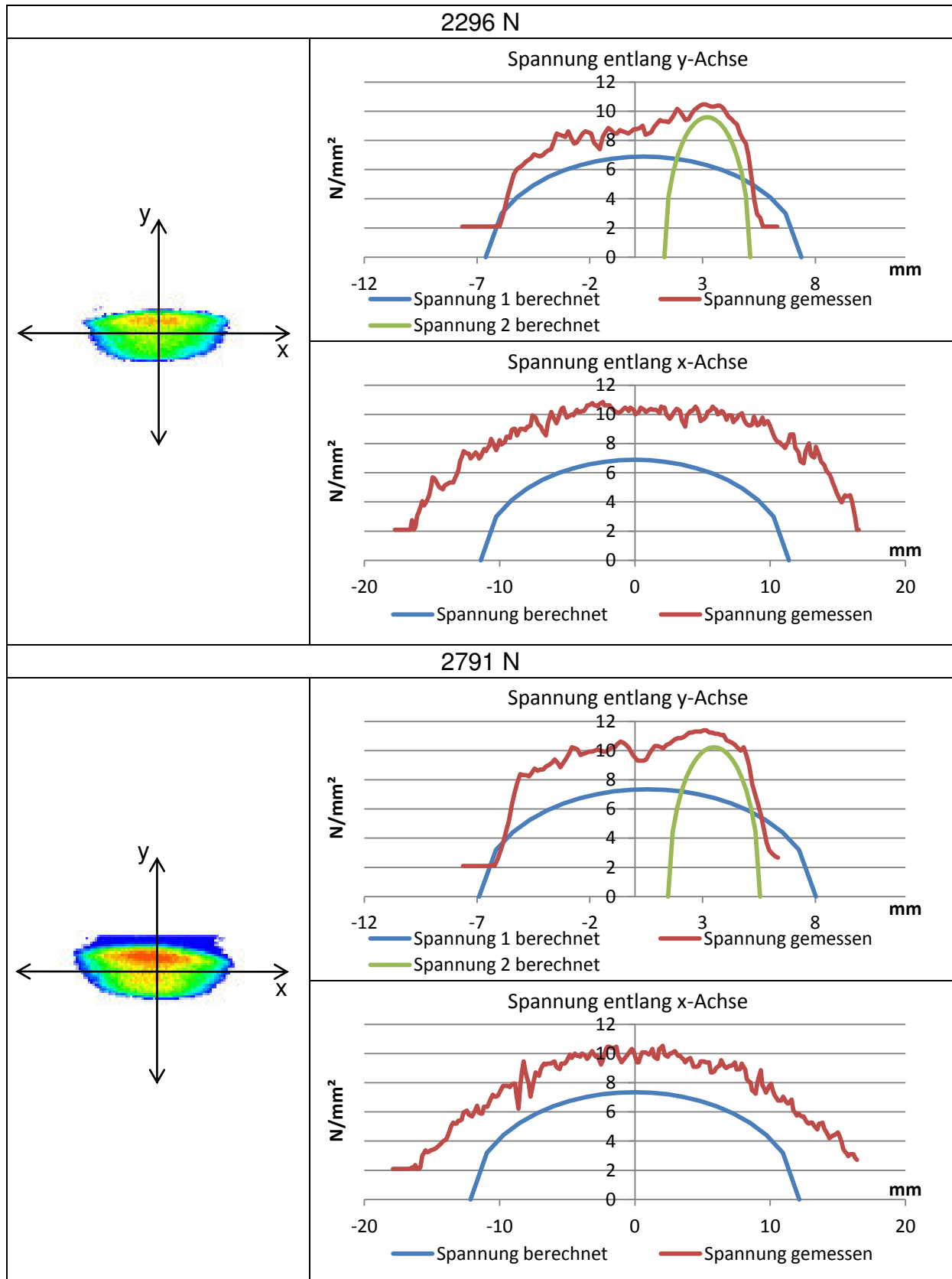
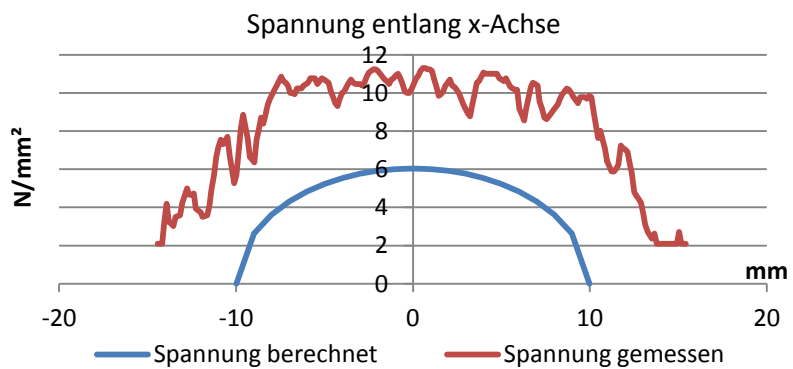
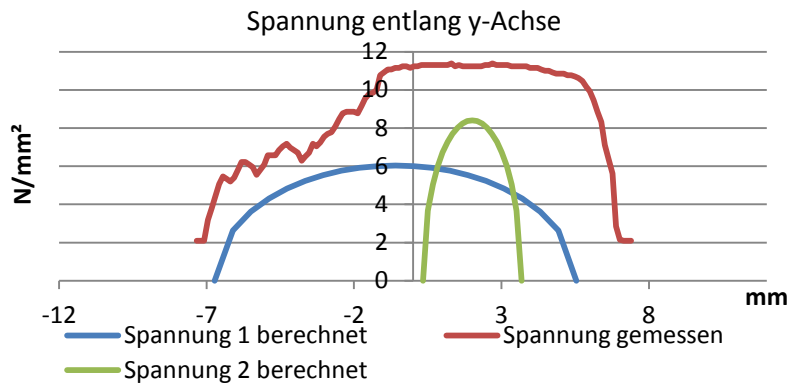
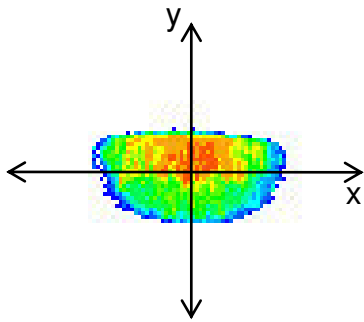


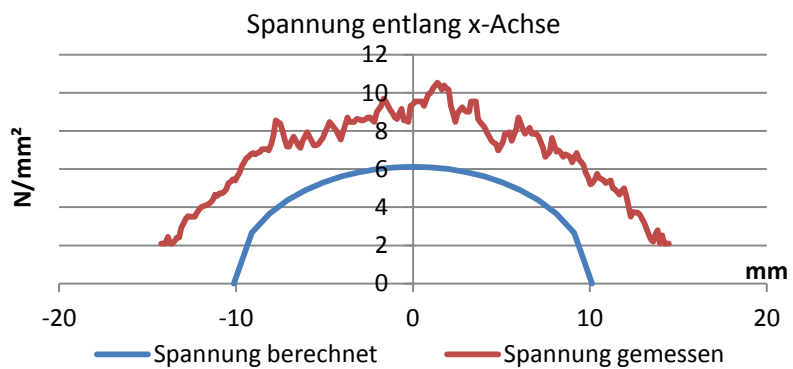
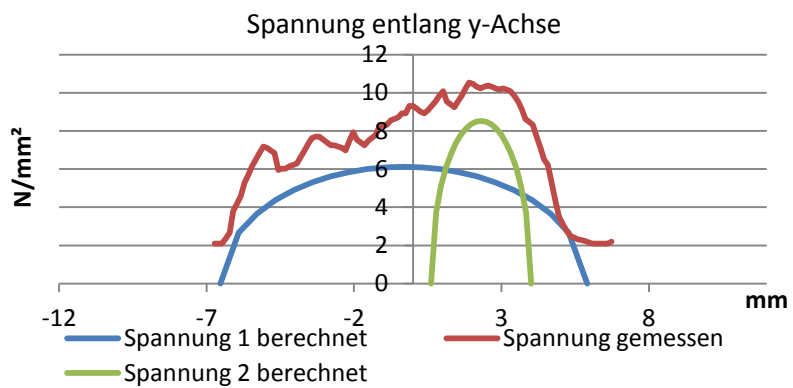
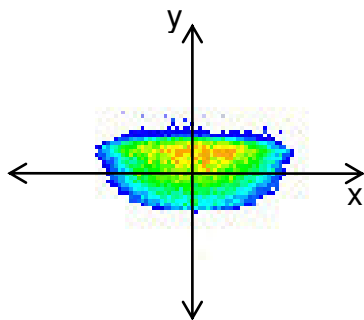
Tabelle 53: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt B und Normalkraft, Folie Low

**Kontaktpunkt B, Kraft FR, Folie Low**

1547 N – Messfehler durch Rutschen



1611 N



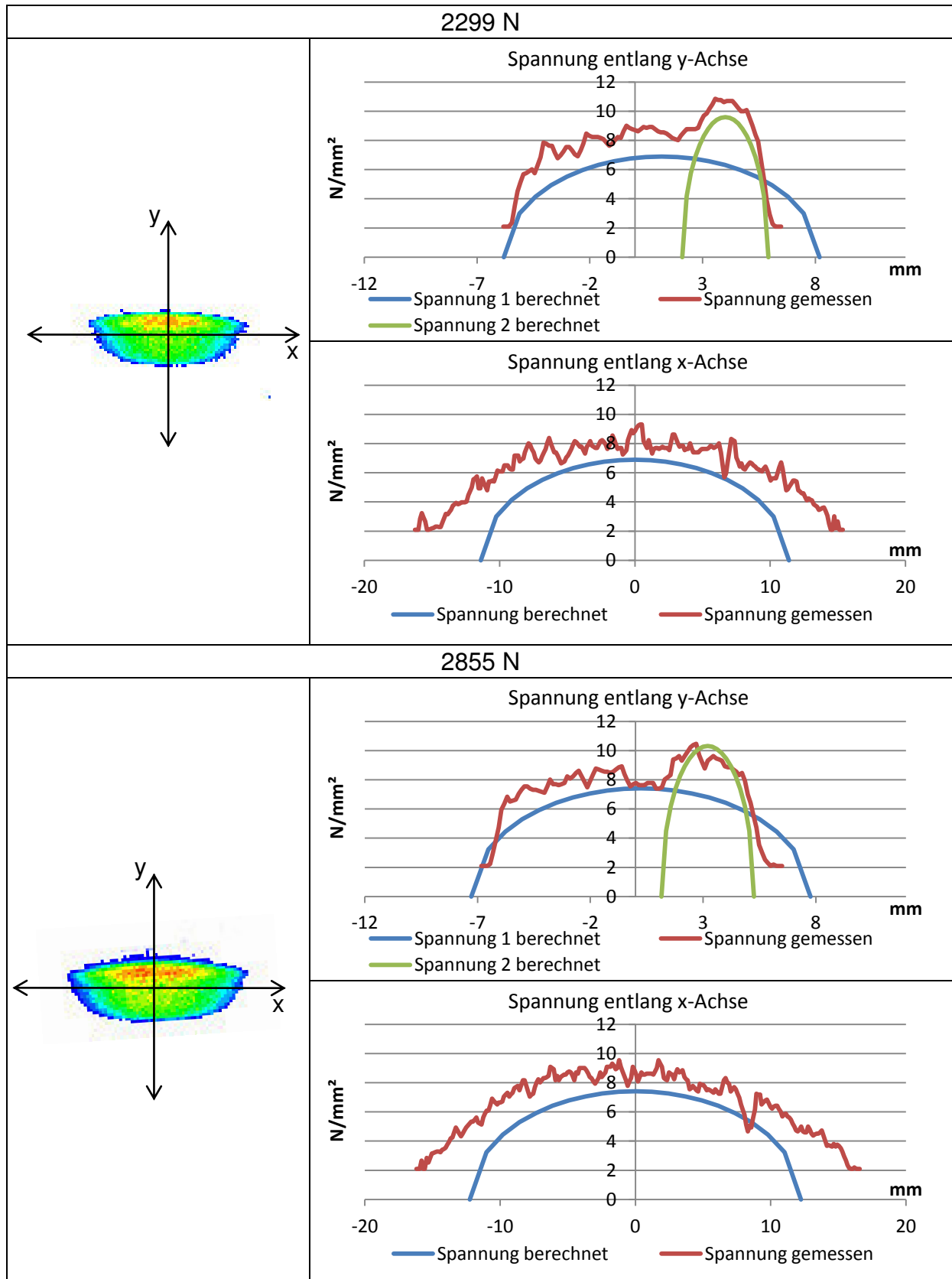
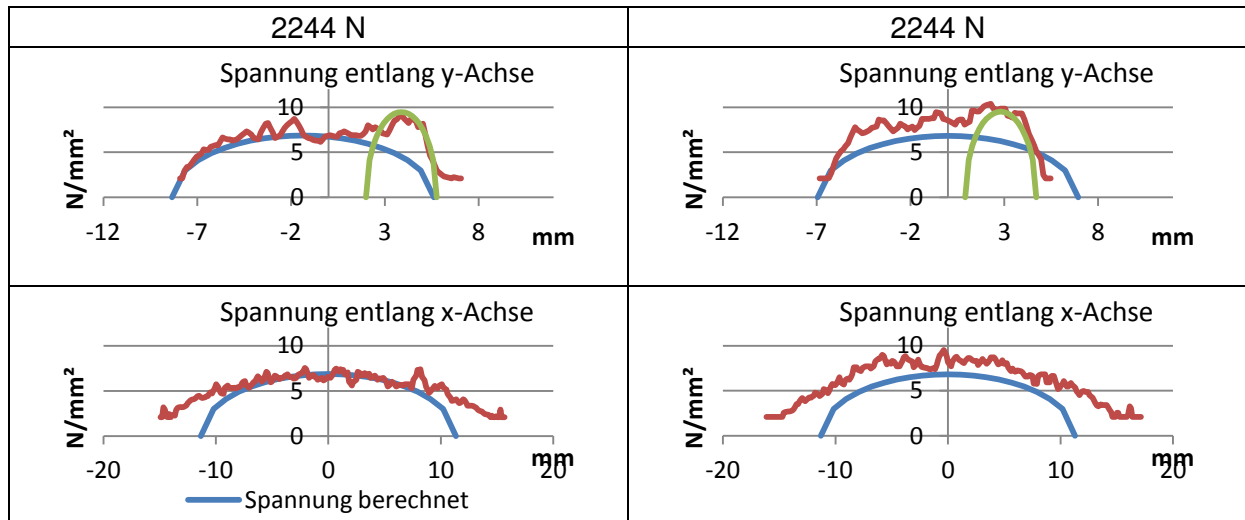


Tabelle 54: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt B und resultierender Kraft, Folie Low

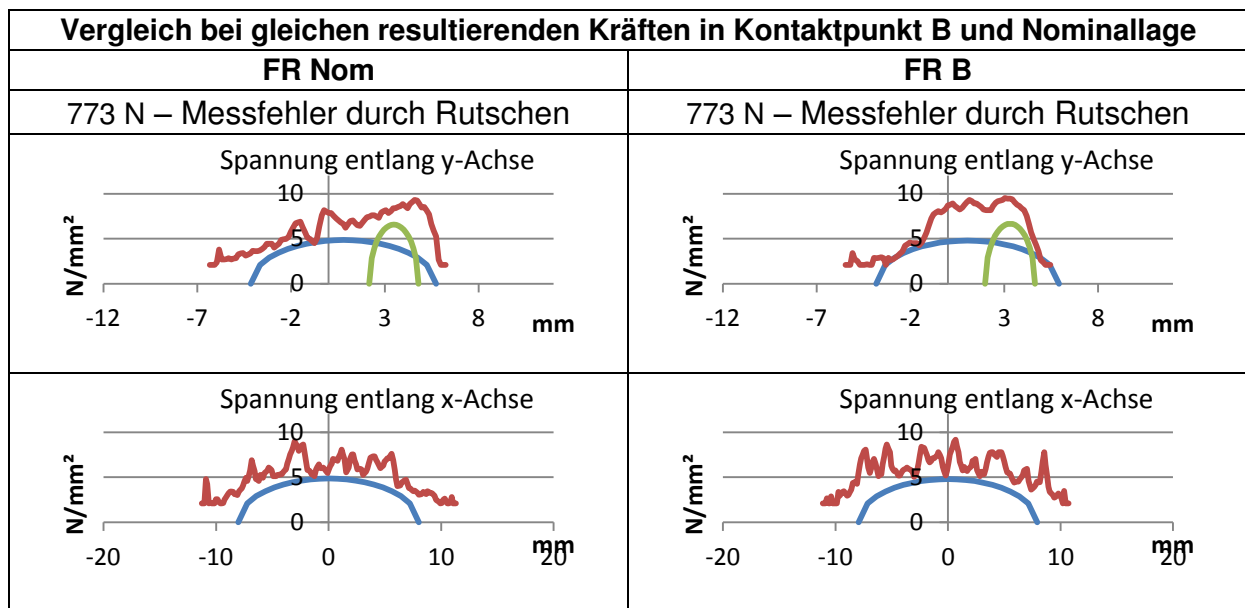
Vergleich von FN und FR in Kontaktpunkt B	
FN	FR
1094 N	1547 N – Messfehler durch Rutschen
<p>Spannung entlang y-Achse</p>	<p>Spannung entlang y-Achse</p>
<p>Spannung entlang x-Achse</p>	<p>Spannung entlang x-Achse</p>
2296 N	2299 N
<p>Spannung entlang y-Achse</p>	<p>Spannung entlang y-Achse</p>
<p>Spannung entlang x-Achse</p>	<p>Spannung entlang x-Achse</p>
2791 N	2855 N
<p>Spannung entlang y-Achse</p>	<p>Spannung entlang y-Achse</p>
<p>Spannung entlang x-Achse</p>	<p>Spannung entlang x-Achse</p>

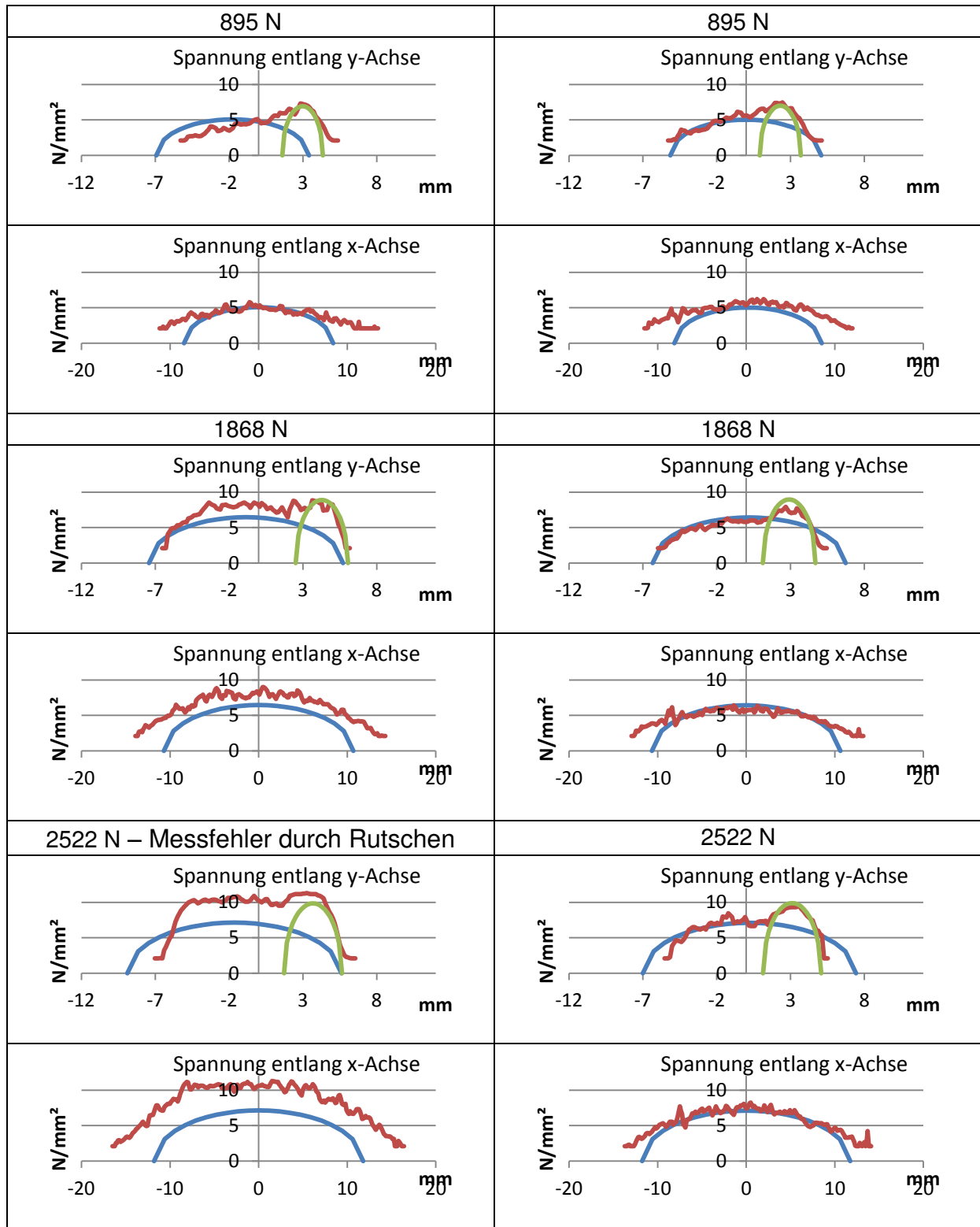
Tabelle 55: Vergleich Ergebnisse Spannung FR und FN in Kontaktpunkt B, Folie Low

Vergleich bei gleichen Normalkräften in Kontaktpunkt B und Nominallage	
FN Nom	FN B
547 N	547 N
<p>Spannung entlang y-Achse</p>	<p>Spannung entlang y-Achse</p>
<p>Spannung entlang x-Achse</p>	<p>Spannung entlang x-Achse</p>
865 N	865 N
<p>Spannung entlang y-Achse</p>	<p>Spannung entlang y-Achse</p>
<p>Spannung entlang x-Achse</p>	<p>Spannung entlang x-Achse</p>
1749 N	1749 N
<p>Spannung entlang y-Achse</p>	<p>Spannung entlang y-Achse</p>
<p>Spannung entlang x-Achse</p>	<p>Spannung entlang x-Achse</p>



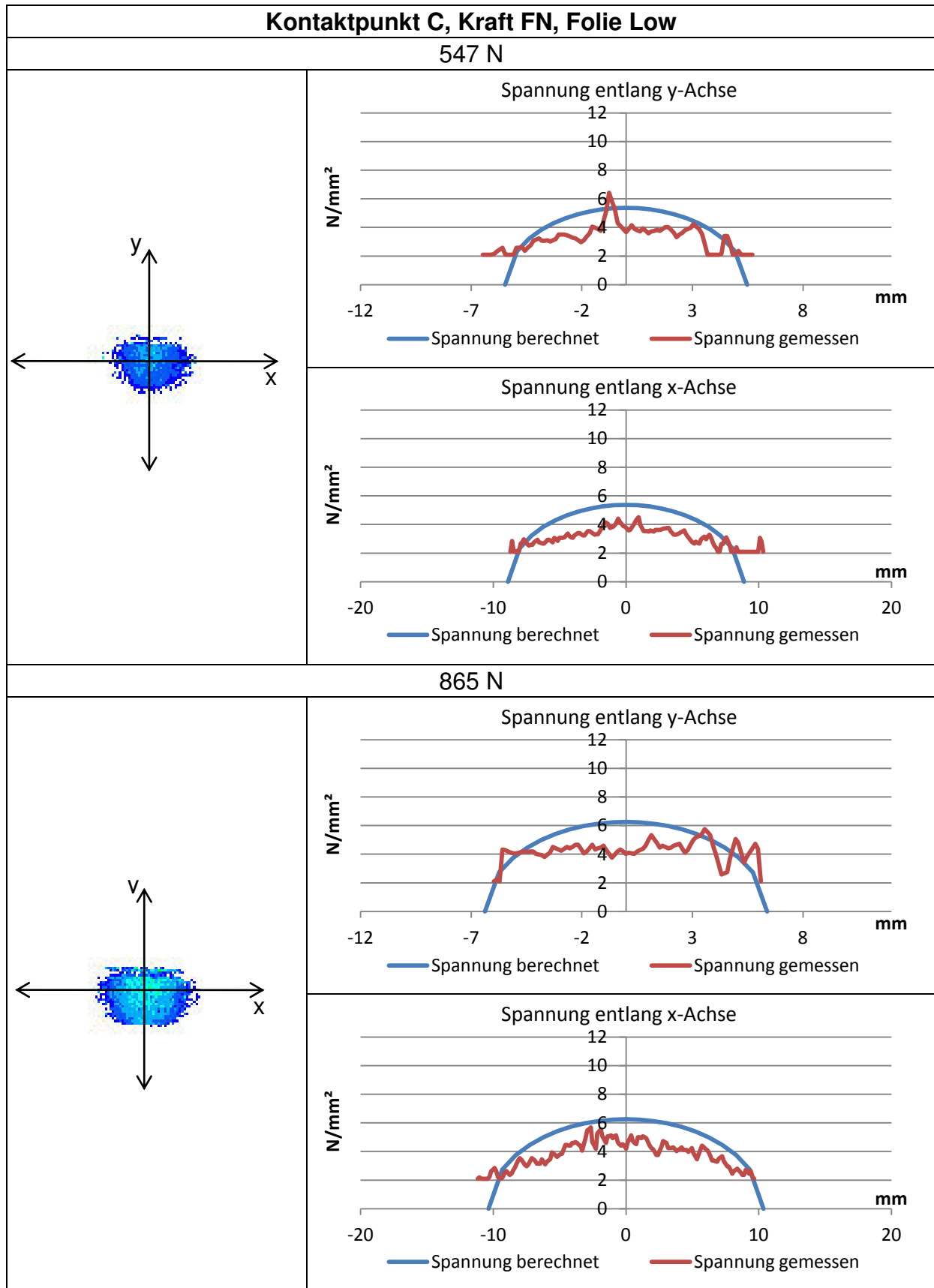
**Tabelle 56: Vergleich Ergebnisse Spannung FN bei gleicher Kraft in Kontaktpunkten B und Nom, Folie Low**





**Tabelle 57: Vergleich Ergebnisse Spannung FR bei gleicher Kraft in Kontaktpunkten B und Nom, Folie Low**

### 5.6.4 Diagramme der Spannungen in Kontaktpunkt C





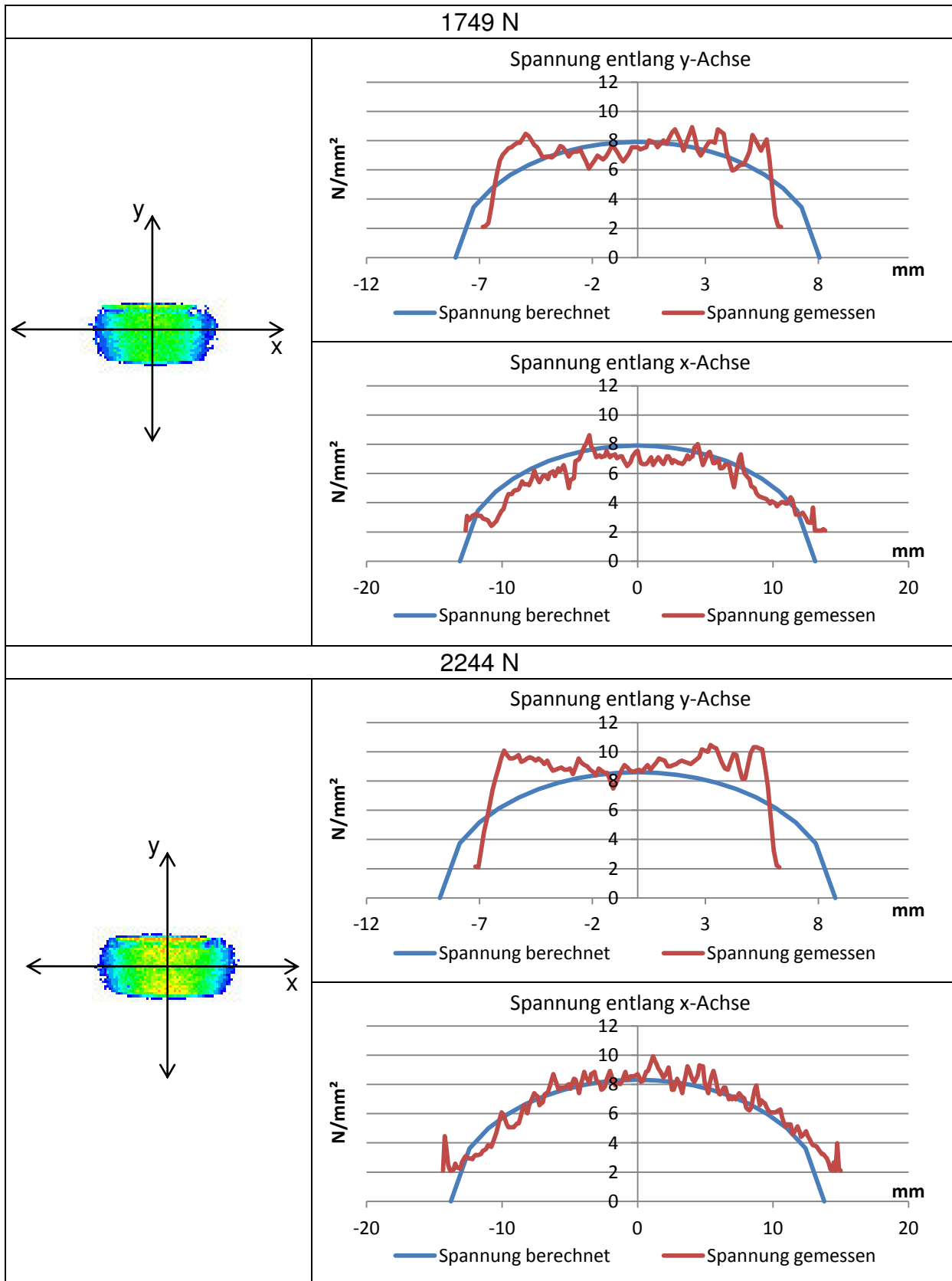
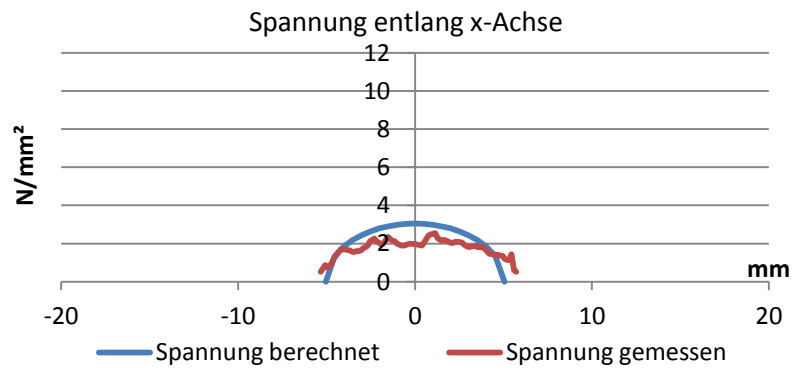
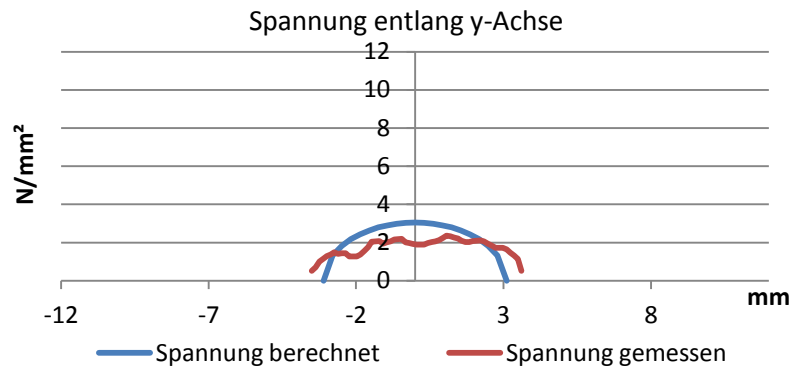
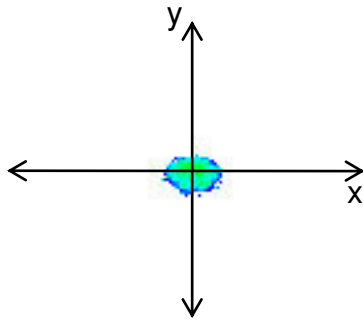


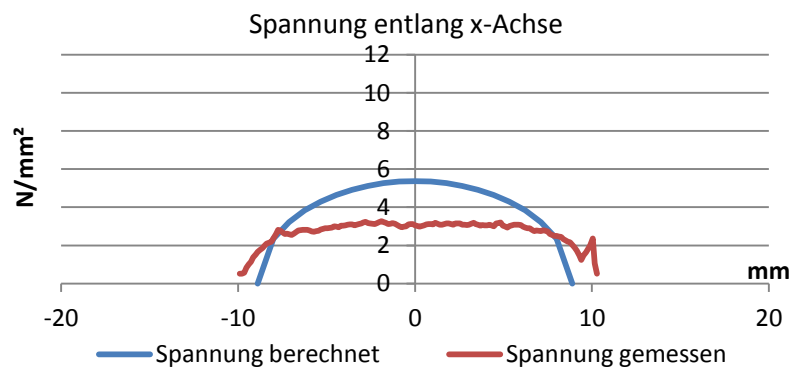
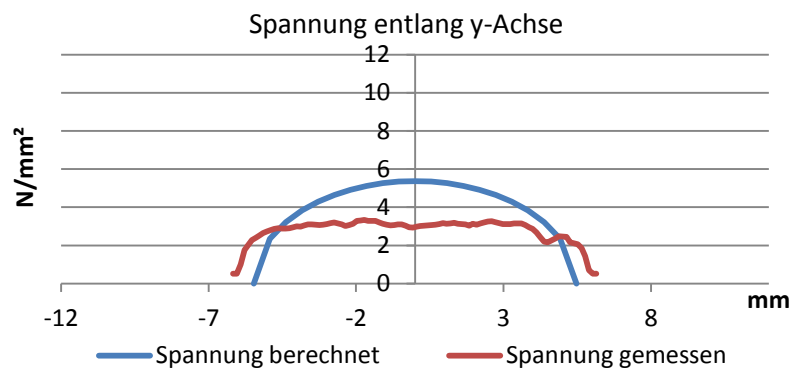
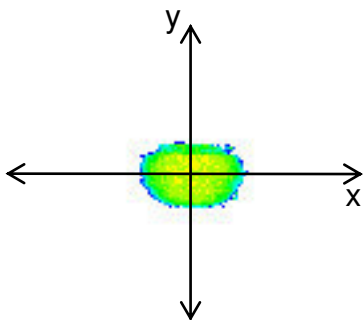
Tabelle 58: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt C und Normalkraft, Folie Low

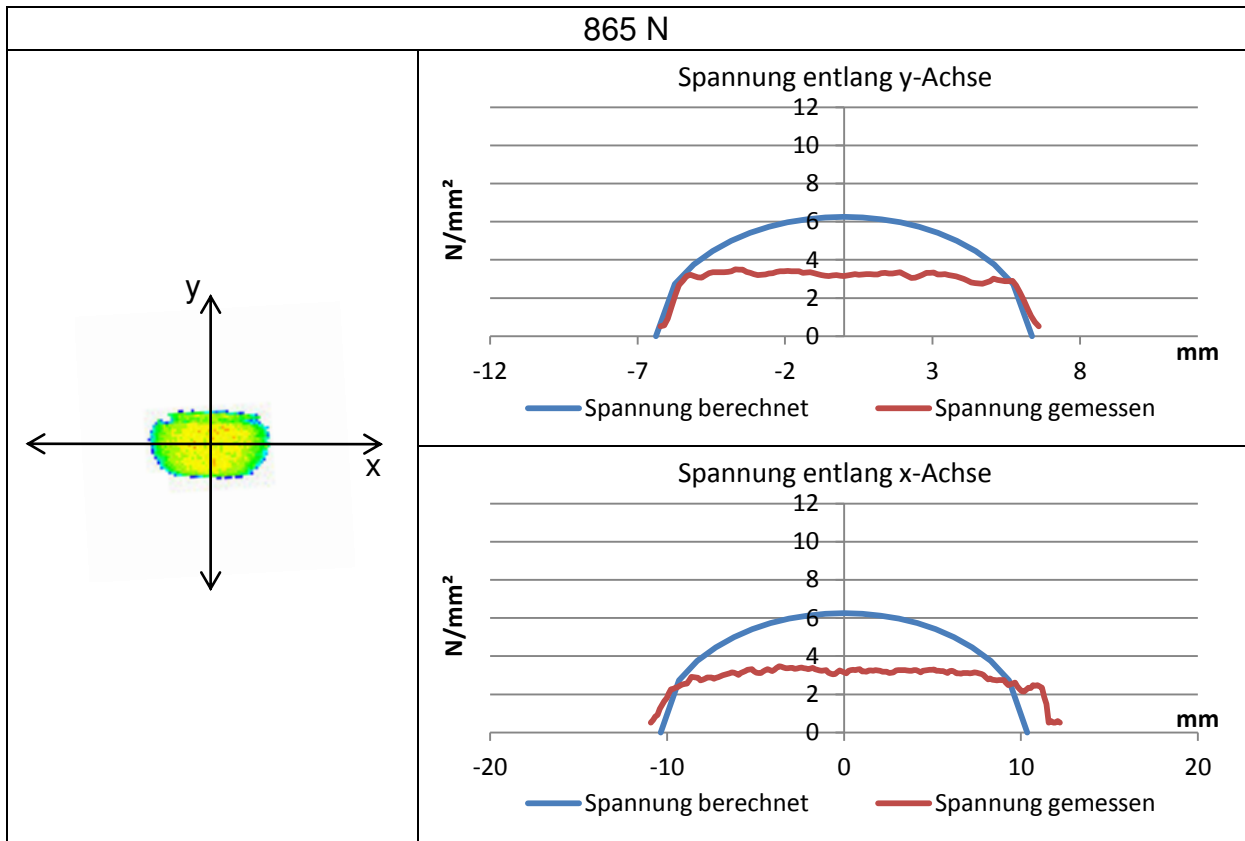
**Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Super Low**

100 N



547 N

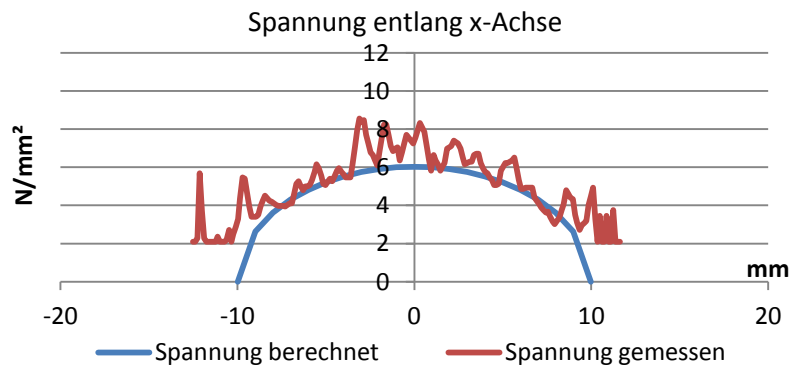
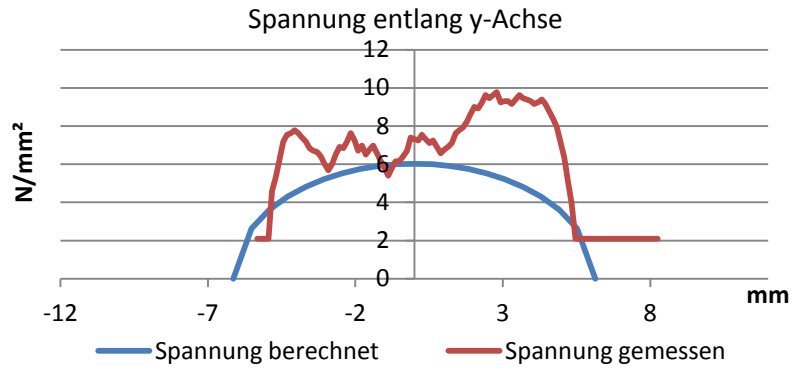
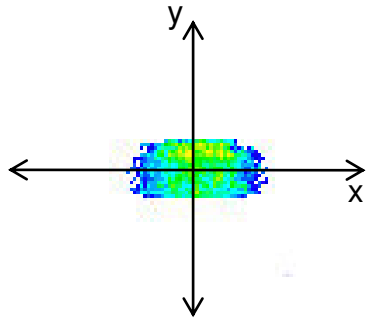




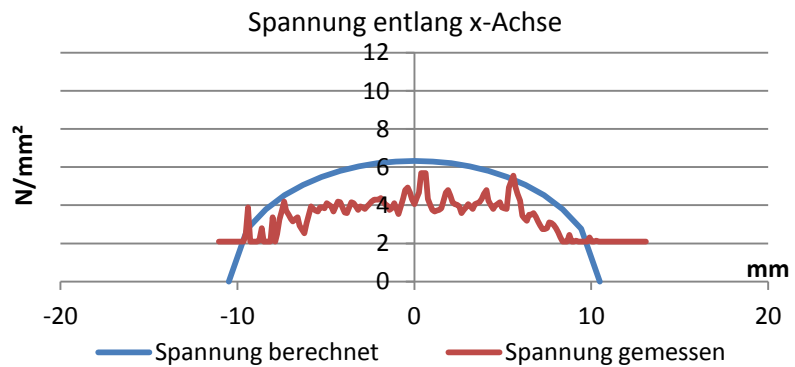
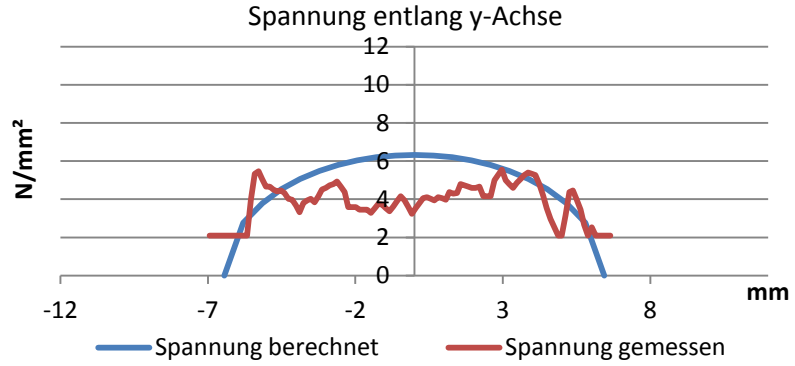
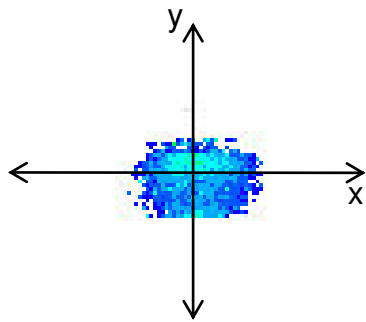
**Tabelle 59: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt C und Normalkraft, Folie Super Low**

**Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Low**

773 N – Messfehler durch Rutschen



895 N



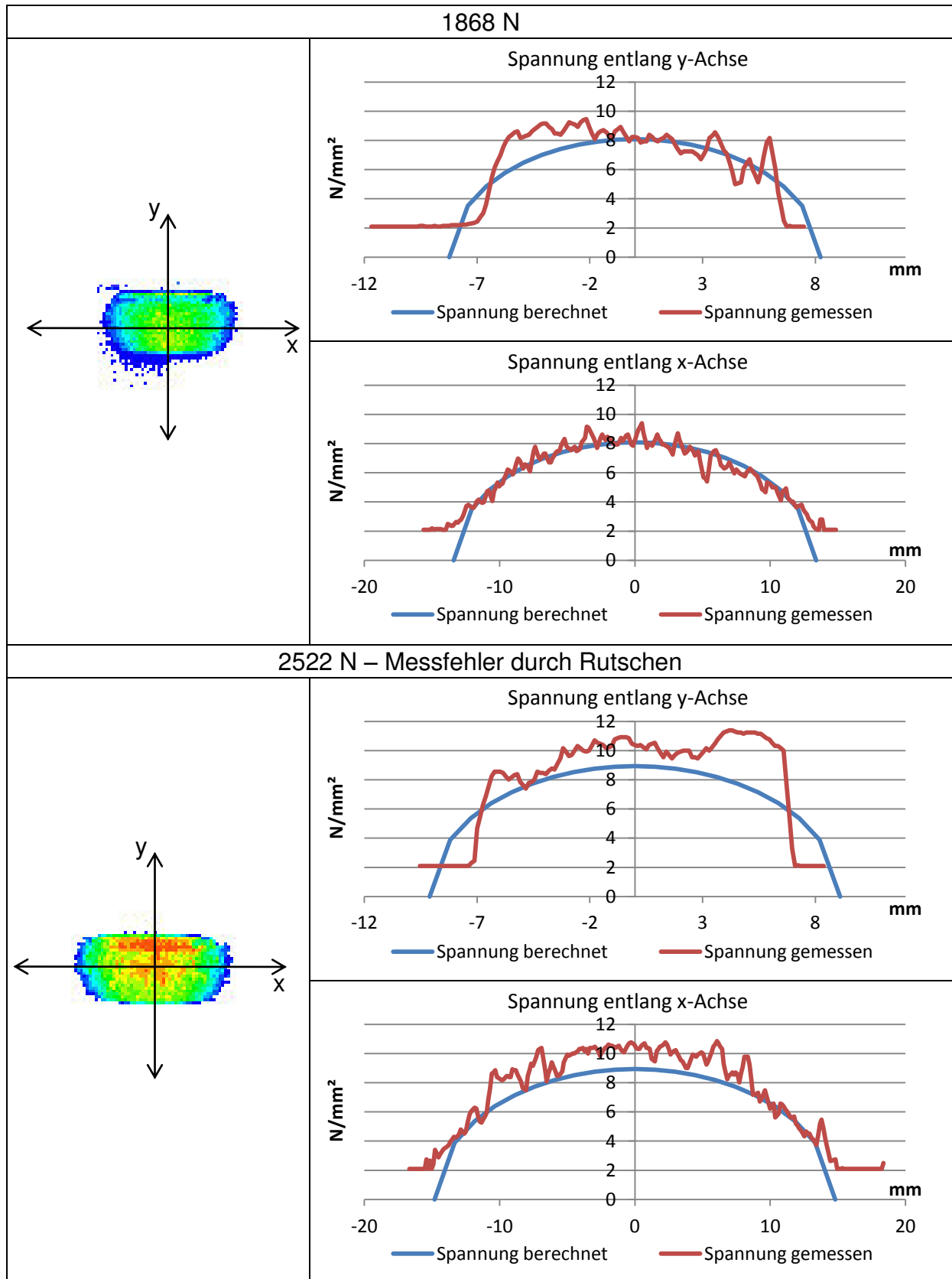
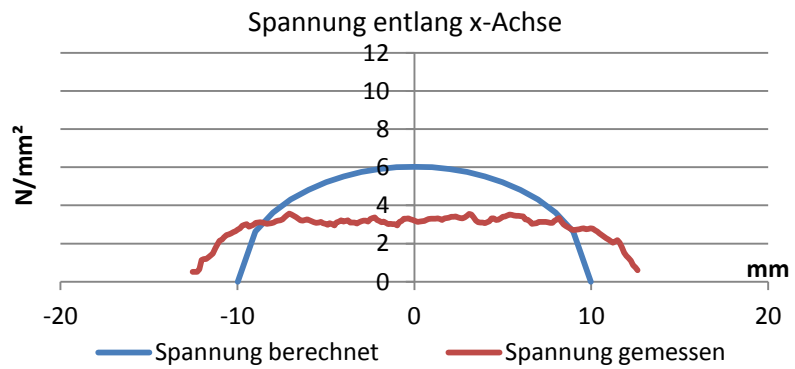
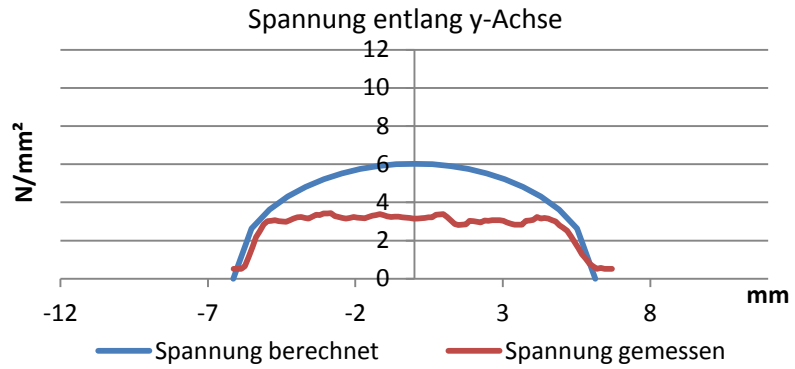
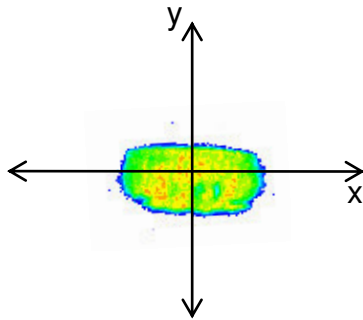


Tabelle 60: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt C und resultierender Kraft, Folie Low

**Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Super Low**

773 N – Messfehler durch Rutschen



895 N

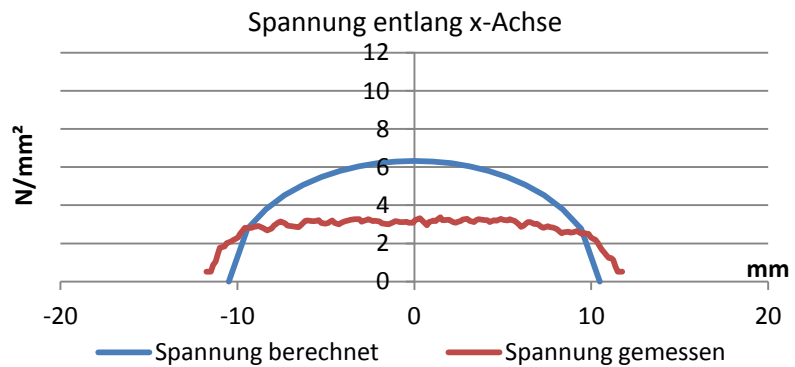
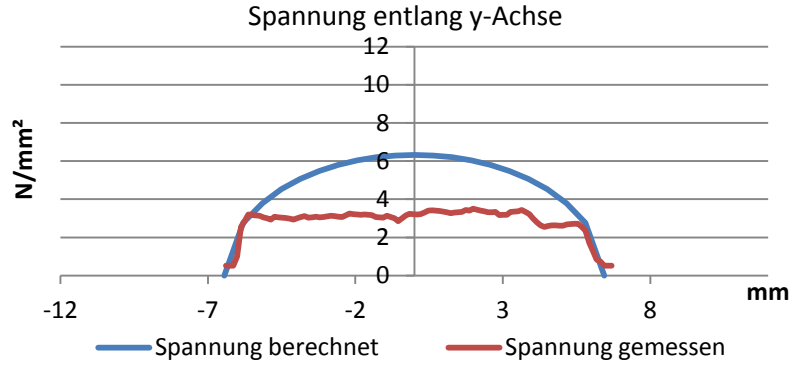
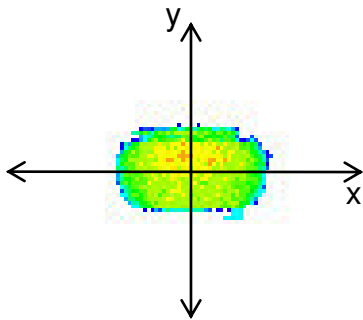


Tabelle 61: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt C und resultierender Kraft, Folie Super Low

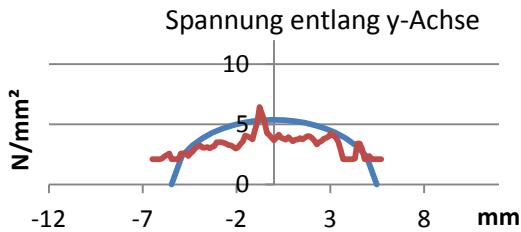
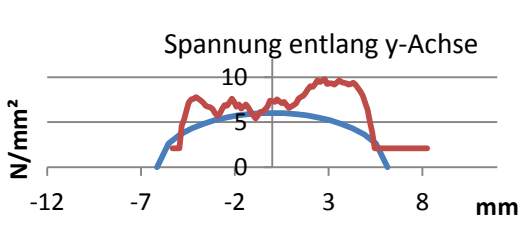
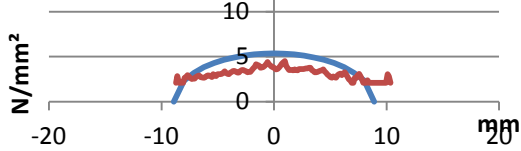
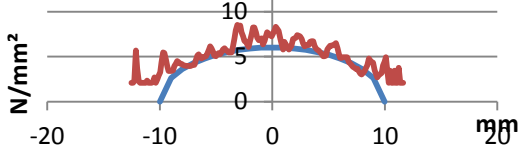
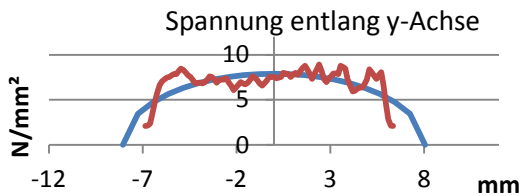
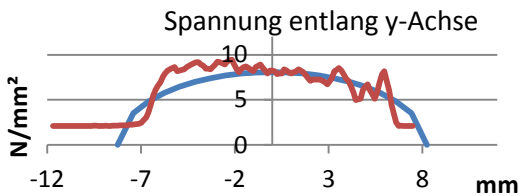
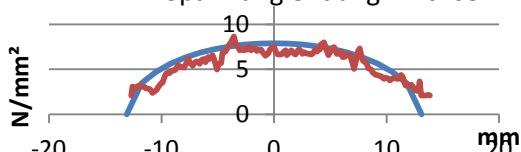
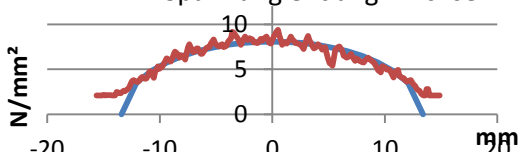
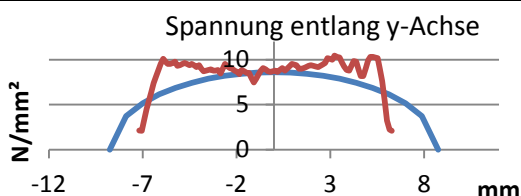
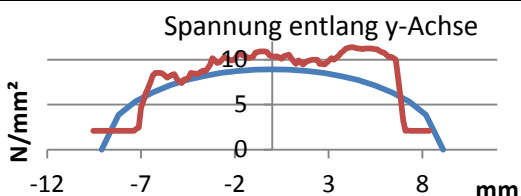
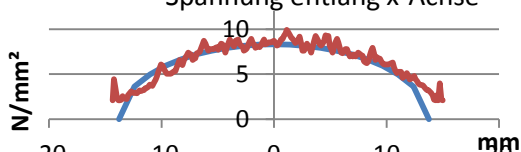
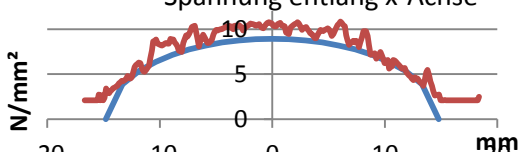
FN	FR
<p style="text-align: center;">547 N</p> <p style="text-align: center;">Spannung entlang y-Achse</p> 	<p style="text-align: center;">773 N – Messfehler durch Rutschen</p> <p style="text-align: center;">Spannung entlang y-Achse</p> 
<p style="text-align: center;">Spannung entlang x-Achse</p> 	<p style="text-align: center;">Spannung entlang x-Achse</p> 
<p style="text-align: center;">1749 N</p> <p style="text-align: center;">Spannung entlang y-Achse</p> 	<p style="text-align: center;">1868 N</p> <p style="text-align: center;">Spannung entlang y-Achse</p> 
<p style="text-align: center;">Spannung entlang x-Achse</p> 	<p style="text-align: center;">Spannung entlang x-Achse</p> 
<p style="text-align: center;">2244 N</p> <p style="text-align: center;">Spannung entlang y-Achse</p> 	<p style="text-align: center;">2522 N – Messfehler durch Rutschen</p> <p style="text-align: center;">Spannung entlang y-Achse</p> 
<p style="text-align: center;">Spannung entlang x-Achse</p>  <p style="text-align: center;">— Spannung berechnet</p>	<p style="text-align: center;">Spannung entlang x-Achse</p> 

Tabelle 62: Vergleich Ergebnisse Spannung FR und FN in Kontaktpunkt C, Folie Low

## 5.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeit lassen sich in die nachstehend aufgezählten Grundaussagen zusammenfassen. Aussagen 1 bis 5 betreffen den Vergleich von Berechnung und Messung. Aussage 6 bezieht sich auf das Messverfahren. Mit resultierender Kraft ist diejenige Kraft bezeichnet, die aus der Querkraft in der Kurvenfahrt und der vertikalen Kraft aufgrund der Feder gebildet wird. Unter Normalkraft wird der Normalkraftanteil der resultierenden Kraft verstanden.

1. Bei mittlerer Lage des Kontaktpunktes ist eine Annäherung mit der Theorie nach Hertz möglich.
2. In der Nominallage sowie in allen anderen Kontaktpunkten kann die einfache Theorie von Hertz nicht angewendet werden.
3. Bei reiner Normalkraft ist eine sehr gute Annäherung der Messungen mit dem in dieser Arbeit entwickelten angepassten Multi-Hertz-Ansatz möglich.
4. Bei hohen Kräften außerhalb der Nominallage (größer als ca. 1800 N) bzw. bei resultierenden Kräften in Nominallage stößt der angepasste Multi-Hertz-Ansatz an seine Grenzen.
5. Bei Anlaufen am Spurkranz ermöglicht die Kraftaufnahme des Spurkranzes bei den größten gemessenen Kräften die Annäherung mittels angepassten Multi-Hertz-Ansatzes.
6. Grundsätzlich ist das angewendete Messverfahren geeignet. Bei starker Schräglage der Vorrichtung ist die Messfolie jedoch verrutscht und hat dadurch das Messergebnis verfälscht.

Anschließend sind die einzelnen Punkte detailliert beschrieben. Nachstehende Abbildung soll die Lage beschriebenen Kontaktpunkte noch einmal verdeutlichen.

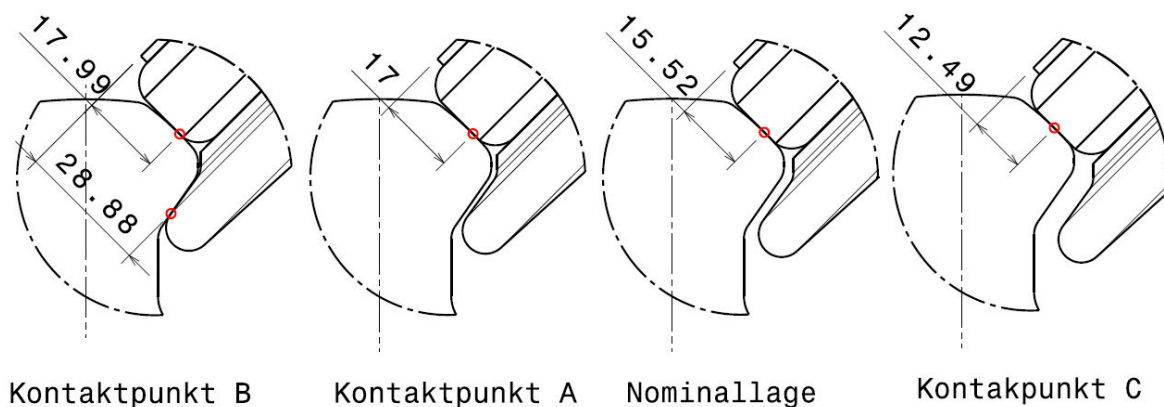


Abbildung 85: Übersicht Lage der Kontaktpunkte



### **Anmerkungen zu Aussage 1**

Wie die Betrachtungen der Ergebnisse der Messungen des Kontaktpunktes C (siehe Abbildung 85) gezeigt haben, liefern die analytischen Berechnungen der Kontaktellipsen des Kontaktes der Lauffläche aus Polyurethan mit der Schiene aus Stahl im Allgemeinen gute Annäherungen. Abweichungen der Berechnungen und der Messungen in diesem Kontaktpunkt entstehen aufgrund der begrenzten Breite der Lauffläche und der sich am Rand bildenden Spannungserhöhungen (siehe Tabelle 46 und Tabelle 62).

### **Anmerkungen zu Aussage 2**

Im Falle der Berührung der Rollen und der Schiene, in allen während der Fahrt möglichen Kontaktpunkten (Punkte Nom, A, B, siehe Abbildung 85), ist aufgrund der randnahen Lage der Kontaktpunkte auf der Lauffläche der Einfluss des Krümmungswechsels sehr gut zu erkennen. Die Annäherung der Kontaktfläche durch eine einzige durch Hertz berechnete Ellipse ist nicht möglich (siehe Abbildung 72).

### **Anmerkungen zu Aussage 3**

Der Vergleich der Lösungen des in Kapitel 2.4 präsentierten angepassten Multi-Hertz-Ansatzes mit den Ergebnissen der Messung hat gezeigt, dass bei Aufbringung des Normalkraftanteils in Nominallage mit dem angepassten Multi-Hertz-Ansatz eine sehr gute rechnerische Annäherung an die Messergebnisse möglich ist. Dies gilt sowohl für die Größe und Form der Kontaktfläche (siehe Tabelle 30), als auch für die Spannungskurve (siehe Tabelle 47).

### **Anmerkungen zu Aussage 4**

Bei Verlassen der Nominallage bzw. bei Aufbringen der resultierenden Kräfte wirken wesentlich höhere Kräfte als bei der Normalkraft in Kontaktpunkt Nom. In diesem Fall weichen die Berechnungen des angepassten Multi-Hertz-Ansatzes von den Messungen ab. Trotz dieser Abweichungen ist eine gute Annäherung der Form Kontaktfläche an die Messungen möglich (siehe Tabelle 31). Im Falle der Spannungen steigt jedoch die Abweichung der Berechnungen gegenüber der Messung mit dem Betrag der Kraft an (siehe Tabelle 52).

### **Anmerkungen zu Aussage 5**

Da auch Messungen mit der gleichen Kraft in Kontaktpunkt Nom und Kontaktpunkt B (siehe Abbildung 85) durchgeführt wurden, ist ein direkter Vergleich der Auswirkungen des Anlaufens am Spurkranz erkennbar. Ab dem Zeitpunkt wo auch eine Kraft auf den Spurkranz übertragen wird, tritt eine Verminderung der Kraft auf der Lauffläche auf. Dies ermöglicht auch bei hohen Kräften in Kontaktpunkt B die

Berechnung der Spannungen mittels angepassten Multi-Hertz-Ansatzes (siehe Tabelle 56 und Tabelle 57).

### **Anmerkungen zu Aussage 6**

Die Betrachtung der Ergebnisse zeigt deutlich, dass bei den Messungen der resultierenden Kraft, bei der eine große Schrägstellung der Vorrichtung vorhanden war, die Folie gerutscht ist (siehe Tabelle 26). Dadurch ist eine Verfälschung des Messergebnisses gegeben, da sowohl die Größe der Kontaktfläche verzerrt wird, als auch die Stellen der hohen Spannungen verschoben wurden.

## **5.8 Schlussfolgerungen**

Der Vergleich der analytischen Lösung mit den Ergebnissen der Messung hat gezeigt, dass die Kontaktflächen und auch die Spannungen bei Aufbringung der Normalkraft in Nominallage mittels des in dieser Arbeit entwickelten angepassten Multi-Hertz-Ansatzes sehr gut angenähert werden können.

Im Falle der resultierenden Kräfte und der Normalkräfte außerhalb der Nominallage ist eine Verbesserung des Ansatzes nötig, da bei hohen Kräften ( $>ca.1800\text{ N}$ ) die gemessenen Spannungen sehr weit von den analytisch bestimmten Spannungen abweichen. Die Form der Kontaktflächen kann jedoch gut angenähert werden.

Eine Verbesserung der analytischen Lösungen ergibt sich durch die Kenntnis des genauen E-Moduls des Polyurethans. Bei der Bestimmung des E-Moduls in dieser Arbeit wurden starke Vereinfachungen getroffen.

Zusätzlich könnte das nicht ganz lineare Verhalten des Werkstoffes Polyurethan bei geringen Kräften durch das Einsetzen eines spannungsabhängigen E-Moduls berücksichtigt werden.

Ein weiterer Lösungsvorschlag für eine Annäherung wäre der Einsatz von Computerprogrammen zur Berechnung der Kontaktflächen und der Spannungen.

Die Tatsache, dass der Spannungsverlauf der Schnitte halb elliptisch ist, macht eine Lösung des Kontaktproblems mit einem Semi- oder Multi-Hertz-Ansatz möglich. Die streifenweise Behandlung des Kontaktproblems beim Semi-Hertz-Ansatz ist z.B. im Programm VOCOLIN implementiert. Der Vorteil dieses Programms liegt daran, dass es schnell rechnet.

Eine weitere Lösungsmethode wäre die Anwendung eines Multi-Hertz-Ansatzes, der die Kontaktfläche durch die Superposition mehrerer Ellipsen annähert. Dieser Ansatz ist in das Mehrkörpersimulationsprogramm VOCO integriert und liefert ebenfalls gute Ergebnisse bezüglich der Rechenzeit.<sup>92</sup>

<sup>92</sup> Vgl. Chollet H., 2013, S. 570ff

Sowohl VOCO als auch VOCOLIN wurden am französischen Forschungsinstitut IFSTTAR (vormals INRETS) entwickelt und sind bei der französischen Bahn SNCF in Verwendung.

Auch das von Kalker entwickelte Programm CONTACT wäre hier eine Möglichkeit. Dieses liefert gute Lösungen, bedarf jedoch sehr langer Rechenzeiten und ist deshalb für eine effiziente Simulation der Auswirkungen der Kurvenfahrt auf die Flächenpressung nicht geeignet.

Die Anwendung numerischer Berechnungsmethoden zur Lösung des Kontaktproblems zwischen Spurführungsrollen und einer Spurführungsschiene könnte die Aufgabe zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

Bei der Recherche wurde ebenfalls ein Bericht über das Programm COUNTAC1- „Counter-formal contact stress problems“ gefunden. Dieses stammt aus dem Jahre 1977 und bedarf sehr hoher Rechenzeit. Da jedoch die in diesem Bericht gezeigten Ergebnisse des Programms sehr gut mit den Formen der in dieser Arbeit gemessenen Kontaktflächen übereinstimmen, wird dieses Programm hier erwähnt. In der folgenden Abbildung ist die Lösung einer nicht Hertzschen Kontaktfläche gezeigt. Auf der linken Seite (a) ist die berechnete Kontaktfläche und auf der rechten Seite (b) die Spannung zu sehen.<sup>93</sup>

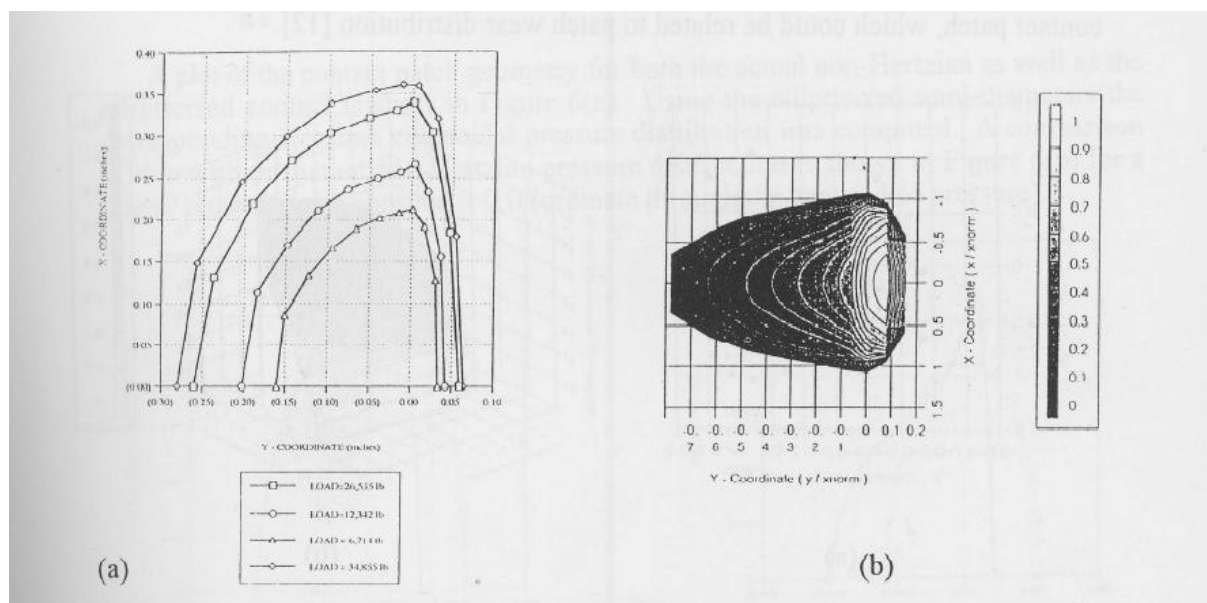


Abbildung 86: Ergebnisse Programm Countact<sup>94</sup>

<sup>93</sup> Vgl. Harder R. F., 1996, S. 21ff

<sup>94</sup> Harder R. F., 1996, S. 25

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Messverfahren angewendet, das sowohl die Messung der Flächenpressung als auch die Größe und Form der Kontaktfläche des Kontaktes der Spurführungsrollen mit der Schiene für People Mover ermöglicht.

Ebenfalls wurden Messungen der Oberflächenrauigkeiten von Rolle und Schiene durchgeführt.

Zusätzlich konnte ein Rechenverfahren, hier bezeichnet als angepasster Multi-Hertz-Ansatz, gefunden werden, das eine analytische Berechnung der Spannung und der Größe der Kontaktfläche ermöglicht.

Durch den Vergleich von Ergebnissen aus Versuchen und Berechnungen konnte gezeigt werden, dass die Vorhersage der Größe der Kontaktfläche und der dort auftretenden Spannung mit dem angepassten Multi-Hertz-Ansatz möglich ist.

Mit dem angepassten Multi-Hertz-Ansatz ist es somit gelungen, eine einfache analytische Berechnungsmethode zu finden, die eine Ermittlung der Flächenpressung erlaubt.

Bei Kräften über 1800 N außerhalb der Nominallage stößt der Ansatz jedoch an seine Grenzen.

Ein nächster Schritt könnte eine Verbesserung des angepassten Multi-Hertz-Ansatzes für Kräfte über 1800 N sein.

Die Ausweitung des angepassten Multi-Hertz-Ansatzes auf die gesamte nicht halbellipsoide Spannungsverteilung könnte auch das Thema weiterer Forschungstätigkeiten sein.

Ebenfalls könnte ein Vergleich der analytischen Berechnungen mit numerischen Rechenprogrammen, die mit Semi- bzw. Multi-Hertz-Ansätze rechnen (z.B.: VOCO, VOCOLIN) durchgeführt werden.

Ziel der Berechnung der Spannungen ist es, die Materialbelastungen und den daraus entstehenden Verschleiß vorherzusagen.

Ein weiterer Schritt wäre es, den Zusammenhang zwischen der ermittelten Spannung und dem Rollenverschleiß herzustellen. Die Messergebnisse der Oberflächenrauheit könnten hier als zusätzliche Information einfließen.

## 7 Literaturverzeichnis

Abdelfattah B: Entwicklung eines Losradfahrwekskonzepts für Schienenfahrzeuge, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Diss., 2014

Ayasse, J. B.; Chollet, H.: Determination of the wheel rail contact patch in semi-Hertzian concitions, in: Vehicle System Dynamics, 43 (2005), S. 161-1727

Ayasse, J. B.; Chollet, H.; Maupu, J. L.: Paramètres caractéristiques du contact roué rail, Inrets report Nr 225, 2000

Beagly, T. M.: Severe wear rolling/sliding contact, in: Wear, 36 (1976), S. 317-335

Brändlein, J.; Eschmann, P.; Hasbargen, L.: Die Wälzlagerpraxis, Handbuch für die Berechnung und Gestaltung von Lagerungen, 3., neu bearbeitete Auflage, Vereinigte Fachverlage GmbH, Mainz, 1995

BASF Polyurethane GmbH, Materialeigenschaften Polyurethan, [http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/elastollan/de/function/conversions:publish/content/group/Arbeitsgebiete\\_und\\_Produkte/Thermoplastische\\_Spezialelastomere/Infomaterial/elastollan\\_material\\_d.pdf](http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/elastollan/de/function/conversions:publish/content/group/Arbeitsgebiete_und_Produkte/Thermoplastische_Spezialelastomere/Infomaterial/elastollan_material_d.pdf) (28.01.2015)

Carter, F. W.: On the action of a locomotive driving wheel, in: Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 112, Nr. 760 (1926), S. 151-157

Chollet, H.; Sèbes, M.; Maupu, J. L.: The VOCO multi-body software in the context of real time simulation, in: Vehicle System Dynamics, 51(2013), S. 570- 580

Chudzikiewicz, A.: Evolution of the simulation study of a railway wheel profile through wear, in: Zobory I. (Hrsg.): Proceedings of the 2<sup>nd</sup> mini conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems, Budapest, 1996, S. 207-214

Czichos, H.; Habig, K.H.: Tribologie-Handbuch, Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010

DIN EN ISO 844: Harte Schaumstoffe-Bestimmung der Druckeigenschaften, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014

Dominghaus, H.; Elsner, P. (Hrsg); Eyerer, P. (Hrsg.): Kunststoffe, Eigenschaften und Anwendungen, 7., neu bearbeitet und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008

Fendrich, L.; Fengler, W. (Hrsg.): Handbuch Eisenbahninfrastruktur, 2., neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013

Harder, R. F.; Jones, J.; Meekisho, L. L.: Generalized approximations of wheel-rail creep forces and contact patch frictional work using neural network simulation, in: Zobory I. (Hrsg.): Proceedings of the 2<sup>nd</sup> mini conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems, Budapest, 1996, S. 21-33

Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper, in: Journal für reine und angewandte Mathematik, 92 (1881), S. 156-171

Knothe, K.: History of wheel/rail contact mechanics: from Redtenbacher to Kalker, in: Vehicle System Dynamics, 46 (2008), S. 9-26

Knothe, K.; Kohl, C.; Le The, H.: Weiterentwicklung der Theorie des rollenden Kontaktes, in: VDI-Berichte, 510 (1984), S. 189-195

Knothe, K.; Stichel, S.: Schienenfahrzeugdynamik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2003

Knothe, K.; Wang, G.: Zur Theorie der Rollreibung zylindrischer Kunststofflaufräder, in: Konstruktion, 41 (1989), S. 193-200

Kunststoff Handbuch, 7. Polyurethane, 2., völlig neu bearbeitete Auflage, Carls Hanser Verlag, München Wien, 1983

Lewis, R.; Olofsson, U.: Wheel-rail interface handbook, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009

Linder, C.: Verschleiss von Eisenbahnrädern mit Unrundheit, ETH Zürich, Diss., 1997

Linder, C.; Brauchli, H.: Prediction of wheel wear, in: Zobory I.: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> mini conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems, Budapest, 1996, S. 215-223

Möhler, P.: Lokale Kraftgrößen in der Berührungsfläche zwischen Kunststoffrad und Stahlfahrbahn, in: Forschung im Ingenieurwesen-Engineering Research, 61 (1995) Nr. 3, S. 29-41

Pascal, J. P.: About multi Hertzian contact hypothesis and equivalent conicity in the case of S1002 and UiC60 analytical wheel/rail profiles, in : Vehicle System Dynamics, 22 (1993), S. 57-78

Pascal, J. P.; Sauvage, G.: New method for reducing the multicontact wheel/rail problem to one equivalent rigid contact patch, in : Proceedings of the 12th IAVSD Symposium, Lyon, 1991

Piotrowski, J.; Chollet, H.: Wheel-rail contact models for vehicle system dynamics including multi-point contact, in: Vehicle System Dynamics, 43 (2005), S. 455-483

Quost, X.; Sebès, M.; Eddhahak, A.: Assessment of a semi-Hertzian method for determination of wheel-rail contact patch, in: *Vehicle System Dynamics*, 44 (2006), S. 789-814

Sebès, M.; Chollet, H.; Ayasse, J. B.: A multi-Hertzian contact model considering plasticity, in: *Wear*, 314 (2014), S. 118-124

Severin, D.; Hammele, W.: Zur Kraftübertragung zwischen Kunststoffrad und Stahllaufbahn, Teil 1: Theoretische Behandlung kontaktmechanischer Probleme, in: *Konstruktion*, 41 (1989), S. 123-129

Severin, D.; Hammele, W.: Zur Kraftübertragung zwischen Kunststoffrad und Stahllaufbahn, Teil 2: Experimentelle Untersuchungen auf einem Radprüfstand, in: *Konstruktion*, 41 (1989), S. 163-171

Severin, D.; Hammele, W.; Qiao L.: Die quasi-elastische Berechnung viskoelastischer Rollkörper, in: *Forschung um Ingenieurwesen-Engineering Research*, 60 (1994) Nr. 5, S. 110-119

Severin, D.; Lütkebohle, H.: Wälzreibung zylindrischer Räder aus Kunststoff, in: *Konstruktion*, 38 (1986), S. 173-179

Specht, W.: Beitrag zur rechnerischen Bestimmung des Rad- und Schienenverschleißes durch Güterwagendrehgestelle, RWTH Aachen, Diss., 1985

Steinhilper, W.; Sauer, B. (Hrsg.): *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1, Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen*, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008

Steinhilper, W.; Sauer, B. (Hrsg.): *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2, Grundlagen von Maschinenelementen für antriebsaufgaben*; 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012

Stribersky, A.: *Unterlagen zur Vorlesung Schienenfahrzeugbau, Kapitel 3: Grundkonzepte der Fahrzeugdynamik*, TU Wien, 2014

Vohla, G. K. W.: *Werkzeuge zur realitätsnahen Simulation der Laufdynamik von Schienenfahrzeugen*, ETH Zürich, Diss, 1995

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Neoval .....	5
Abbildung 2: Anordnung Spurführungsrollen .....	5
Abbildung 3: Führungsprinzip Neoval .....	6
Abbildung 4: Beispiel von Kontaktflächen bei Mehrpunktberührung .....	11
Abbildung 5: Kräfte auf ein frei rollendes Rad .....	11
Abbildung 6: Kräfte auf ein Rad, das mit einem Moment behaftet ist .....	12
Abbildung 7: Koordinatensystem Punktberührung .....	15
Abbildung 8: Koordinatensystem Linienberührung .....	16
Abbildung 9: Positive und negative Krümmungsradien .....	16
Abbildung 10: 3-Parameter-Modell .....	22
Abbildung 11: Beispiel für einen Mehrpunktkontakt .....	22
Abbildung 12: Virtuelle Ein- bzw. Durchdringung .....	23
Abbildung 13: Unterteilung in Streifen .....	24
Abbildung 14: Mehrpunktberührung .....	25
Abbildung 15: Multi-Hertz-Ansatz nach Pascal .....	26
Abbildung 16: Skizze Eindringung Rolle-Schiene .....	28
Abbildung 17: Berechnete Annäherung der Kontaktfläche bei 1749 N .....	30
Abbildung 18: Berechnete Annäherung der Spannung entlang der y-Achse bei 1749 N .....	30
Abbildung 19: Berechnete Annäherung der Spannung entlang der x-Achse bei 1749 N .....	31
Abbildung 20: Spannungsverlauf bei erhöhter Kraft von Ellipse 1 .....	31
Abbildung 21: Gemessene 3D Spannungsverteilung bei 1749 N .....	32
Abbildung 22: Haft- und Gleitzone bei Tangentialspannung .....	33
Abbildung 23: Arten von Schlupf .....	34
Abbildung 24: Größe Haft-/Gleitzone in Abhängigkeit vom Schlupf .....	35
Abbildung 25: Leerlaufschlupf beim Anpressen (a) und tangentialkraftfreien Rollen (b) .....	35
Abbildung 26: Exakte lineare Theorie von Kalker .....	36
Abbildung 27: Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit der Reibleistung .....	39
Abbildung 28: Mechanische Eigenschaften Elastollan Polyester-Typen BASF .....	41
Abbildung 29: Mechanische Eigenschaften Elastollan Polyether-Typen BASF .....	41
Abbildung 30: Koordinatensysteme .....	43
Abbildung 31: Mögliche Verschiebung .....	44
Abbildung 32: Geometrie von Rolle und Schiene .....	44
Abbildung 33: Kraft während Kurvenfahrt in $y'$ -Richtung .....	45
Abbildung 34: Kraft während Kurvenfahrt in $z'$ -Richtung .....	46
Abbildung 35: Kraftvektoren .....	48



Abbildung 36: Kräfte auf die Rolle .....	48
Abbildung 37:Vorrichtung Schiene .....	52
Abbildung 38: Vorrichtung Rolle .....	53
Abbildung 39: Skizze Prüfmaschine .....	53
Abbildung 40: Wiederholte Darstellung Diagramme Simulation .....	54
Abbildung 41: Positiver und negativer Winkel Vorrichtung (rechts) .....	56
Abbildung 42: Übersicht Kontaktpunkte.....	57
Abbildung 43: Messaufbau Messung Flächenpressung Foto 1 .....	58
Abbildung 44: Messaufbau Messung Flächenpressung Foto 2 .....	59
Abbildung 45: Messaufbau Messung Flächenpressung Foto 3 .....	59
Abbildung 46: Vorgang Einstellung der unterschiedlichen Kontaktpunkte .....	61
Abbildung 47: Stellen der Messung der Oberflächenrauheit der Schiene .....	62
Abbildung 48: Messaufbau Oberflächenmessung Schiene .....	63
Abbildung 49: Schäden Schiene.....	63
Abbildung 50: Stellen der Messung der Oberflächenrauigkeit der Schiene .....	65
Abbildung 51: Versuchsaufbau Messung Oberflächenrauheit Lauffläche .....	65
Abbildung 52: Messung Oberflächenrauigkeit Spurkranz .....	67
Abbildung 53: Kraft-Weg Diagramm Messung Elastizität .....	70
Abbildung 54: Kontaktpunkt C .....	71
Abbildung 55: Stauchung.....	71
Abbildung 56: Angepasster Multi-Hertz-Ansatz .....	72
Abbildung 57: Koordinatensystem Berechnung nach Hertz .....	73
Abbildung 58: Koordinatensystem und Krümmungen Rolle-Schiene .....	73
Abbildung 59: Beispiel niedriger Druck links und hoher Druck rechts.....	82
Abbildung 60: Beispiel einer grafischen Schnittauswertung .....	82
Abbildung 61: Vergleich Messung mit und ohne Folie bei 17,8° Winkel der Resultierenden .....	83
Abbildung 62: Übersicht der Kontaktpunkte.....	85
Abbildung 63: Farbzuordnung Drücke Folie Low links und Folie Super Low rechts ..	85
Abbildung 64: Kontaktpunkt C .....	86
Abbildung 65: Kraft FN 547 N, Folie Super Low .....	87
Abbildung 66: Vergleich beim Rutschen, 773 N links und 895 N rechts .....	88
Abbildung 67: Verhalten der Spannungen bei Steigerung der Normalkraft .....	89
Abbildung 68: Grat.....	89
Abbildung 69: FR 1868 N, Folie Low .....	90
Abbildung 70: Grenze der Folie Super Low .....	90
Abbildung 71: Kontaktpunkt Nom .....	91
Abbildung 72: Vergleich Messung Kontaktpunkt C (links) und Nom (rechts).....	92
Abbildung 73: Ergebnis Kontaktfläche Nom, FN 1749 N .....	92
Abbildung 74: Ergebnisse Spannung in Kontaktpunkt Nom bei FN 1749 N .....	94
Abbildung 75: Ergebnis Spannung in Kontaktpunkt Nom bei FN 547 N .....	95

Abbildung 76: Rutschen bei FR 2522 N .....	96
Abbildung 77: Annäherung der Spannung mit kompletter Kraft FR 2522 N .....	96
Abbildung 78: Kontaktpunkt Nom bei FN 1749 N .....	96
Abbildung 79: Kontaktpunkt A .....	97
Abbildung 80: Spannung in Kontaktpunkt A bei FN 1094 N .....	98
Abbildung 81: Kontaktpunkt B .....	100
Abbildung 82: Spannung in Kontaktpunkt B bei Kraft FR 2855 N.....	102
Abbildung 83: Zeitlicher Verlauf der Auswirkungen der resultierenden Kräfte in Nominallage.....	104
Abbildung 84: Zeitlicher Verlauf der Auswirkungen der resultierenden Kräfte in Pkt. B .....	105
Abbildung 85: Übersicht Lage der Kontaktpunkte.....	148
Abbildung 86: Ergebnisse Programm Countact.....	151

## 9 Formelverzeichnis

Formel 1: Halbachse m.....	17
Formel 2: Halbachse n .....	17
Formel 3: Summe der Krümmungen .....	17
Formel 4: Hilfswinkel .....	17
Formel 5: Zuweisung Halbachsen .....	18
Formel 6: Spannung Punktberührung.....	18
Formel 7: Eindringung Punktberührung.....	18
Formel 8: Breite Kontaktfläche bei Linienberührung.....	19
Formel 9: Spannung bei Linienberührung .....	19
Formel 10: Empirische Formel für Eindrigung bei Linienberührung.....	19
Formel 11: Materialkennwert bei unterschiedlichen Werkstoffen.....	21
Formel 12: Halbachsenverhältnis der äquivalenten Ellipse .....	26
Formel 13: Kraft bei vorgegebener Eindringung.....	28
Formel 14: Anteil der aufgeteilt wird .....	29
Formel 15: Kraftanteil Ellipse 1 .....	29
Formel 16: Kraftanteil Ellipse 2.....	29
Formel 17: Längsschlupf .....	34
Formel 18: Querschlupf .....	34
Formel 19: Bohrschlupf .....	34
Formel 20: Verschleißvolumen .....	38

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgelesene Werte aus Simulation .....	47
Tabelle 2: Kräfte der Messung bei Nominallage und Pkt. C .....	55
Tabelle 3: Kräfte der Messung bei Kontaktpunkt A/B .....	55
Tabelle 4: Ergebnisse Oberflächenrauigkeitsmessung Schiene.....	64
Tabelle 5: Ergebnisse Oberflächenrauigkeitsmessung Lauffläche .....	66
Tabelle 6: Ergebnisse Oberflächenrauigkeitsmessung Spurkranz .....	67
Tabelle 7: Bestimmung des E-Moduls in Kontaktpunkt C.....	72
Tabelle 8: Lösungen Kontaktpunkt Nom bei Normalkraft .....	78
Tabelle 9: Lösungen Kontaktpunkt Nom bei resultierender Kraft.....	78
Tabelle 10: Lösungen Kontaktpunkt A bei Normalkraft.....	78
Tabelle 11: Lösungen Kontaktpunkt A bei resultierender Kraft.....	78
Tabelle 12: Lösungen Kontaktpunkt B bei Normalkraft.....	79
Tabelle 13: Lösungen Kontaktpunkt B bei resultierender Kraft.....	79
Tabelle 14: Lösungen Kontaktpunkt Nom bei Normalkraft (Vergleich) .....	79
Tabelle 15: Lösungen Kontaktpunkt B bei resultierender Kraft (Vergleich) .....	80
Tabelle 16: Lösungen Kontaktpunkt C bei Normalkraft .....	80
Tabelle 17: Lösungen Kontaktpunkt C bei resultierender Kraft .....	80
Tabelle 18: Kraftschritte bei Kalibrierungsmessung.....	81
Tabelle 19: Vergleich der Kontaktflächen in Kontaktpunkt C bei FN .....	87
Tabelle 20: Rutschen der Folie in Kontaktpunkt C.....	91
Tabelle 21: Kontaktflächen in Kontaktpunkt Nom bei FR .....	93
Tabelle 22: Schlechte Annäherung bei hohen Kräften in Kontaktpunkt Nom .....	95
Tabelle 23: Kontaktflächen in Kontaktpunkt A bei FN und FR.....	97
Tabelle 24: Grenze des Messbereichs der Folie Low.....	99
Tabelle 25: Kontaktflächen in Kontaktpunkt B bei FN und FR.....	100
Tabelle 26: Rutschen in Kontaktpunkt B.....	101
Tabelle 27: Vergleich des Kontaktpunktes Nom mit Kontaktpunkt B bei gleicher Kraft .....	101
Tabelle 28: Einfluss des Anlaufen am Spurkranzes .....	103
Tabelle 29: Ergebnisse Kontaktfläche bei Nominallage und Normalkraft, Folie Low .....	106
Tabelle 30: Ergebnisse Kontaktfläche bei Nominallage und Normalkraft, Folie Super Low.....	107
Tabelle 31: Ergebnisse Kontaktfläche bei Nominallage und resultierender Kraft, Folie Low.....	108
Tabelle 32: Ergebnisse Kontaktfläche bei Nominallage und resultierender Kraft, Folie Super Low .....	109

Tabelle 33: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR und FN bei Nominallage, Folie Low .....	110
Tabelle 34: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt A und Normalkraft, Folie Low .....	111
Tabelle 35: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt A und resultierender Kraft, Folie Low .....	112
Tabelle 36: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR und FN bei Kontaktpunkt A, Folie Low .....	112
Tabelle 37: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt B und Normalkraft, Folie Low .....	113
Tabelle 38: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt B und resultierender Kraft, Folie Low .....	114
Tabelle 39: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR und FN in Kontaktpunkt B, Folie Low .....	115
Tabelle 40: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR bei Normalkraft in Kontaktpunkten B und Nom, Folie Low .....	116
Tabelle 41: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR bei gleicher Kraft in Kontaktpunkten B und Nom, Folie Low .....	117
Tabelle 42: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt C und Normalkraft, Folie Low .....	118
Tabelle 43: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt C und Normalkraft, Folie Super Low .....	119
Tabelle 44: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt C und resultierender Kraft, Folie Low .....	120
Tabelle 45: Ergebnisse Kontaktfläche bei Kontaktpunkt C bei resultierender Kraft, Folie Super Low .....	121
Tabelle 46: Vergleich Ergebnisse Kontaktfläche FR und FN in Kontaktpunkt C, Folie Low .....	122
Tabelle 47: Ergebnisse Spannung bei Nominallage und Normalkraft, Folie Low ....	124
Tabelle 48: Ergebnisse Spannung bei Nominallage und resultierender Kraft, Folie Low .....	126
Tabelle 49: Vergleich Ergebnisse Spannung FR und FN in Nominallage, Folie Low .....	127
Tabelle 50: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt A und Normalkraft, Folie Low	129
Tabelle 51: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt A und resultierender Kraft, Folie Low .....	130
Tabelle 52: Vergleich Ergebnisse Spannung FR und FN in Kontaktpunkt A, Folie Low .....	131
Tabelle 53: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt B und Normalkraft, Folie Low	133
Tabelle 54: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt B und resultierender Kraft, Folie Low .....	135

Tabelle 55: Vergleich Ergebnisse Spannung FR und FN in Kontaktpunkt B, Folie Low .....	136
Tabelle 56: Vergleich Ergebnisse Spannung FN bei gleicher Kraft in Kontaktpunkten B und Nom, Folie Low .....	138
Tabelle 57: Vergleich Ergebnisse Spannung FR bei gleicher Kraft in Kontaktpunkten B und Nom, Folie Low .....	139
Tabelle 58: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt C und Normalkraft, Folie Low	141
Tabelle 59: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt C und Normalkraft, Folie Super Low .....	143
Tabelle 60: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt C und resultierender Kraft, Folie Low .....	145
Tabelle 61: Ergebnisse Spannung bei Kontaktpunkt C und resultierender Kraft, Folie Super Low .....	146
Tabelle 62: Vergleich Ergebnisse Spannung FR und FN in Kontaktpunkt C, Folie Low .....	147

# 11 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
FN	Normalkraftanteil der resultierenden Kraft
FR	resultierende Kraft
Hrsg.	Herausgeber
Nr.	Nummer
Pkt.	Punkt
PUR	Polyurtehan
z.B.	zum Beispiel

## 12 Anhang

### Inhaltsverzeichnis

12	Anhang .....	A1
12.1	Messplan.....	A2
12.2	Kontaktflächen bei Normalkraft .....	A6
12.2.1	Kontaktpunkt Nom .....	A7
12.2.2	Kontaktpunkt A .....	A10
12.2.3	Kontaktpunkt B .....	A11
12.2.4	Kontaktpunkt C .....	A16
12.3	Spannungen bei Normalkraft.....	A20
12.3.1	Kontaktpunkt Nom .....	A21
12.3.2	Kontaktpunkt A .....	A27
12.3.3	Kontaktpunkt B .....	A29
12.3.4	Kontaktpunkt C .....	A38
12.4	Kontaktflächen bei resultierender Kraft .....	A46
12.4.1	Kontaktpunkt Nom .....	A47
12.4.2	Kontaktpunkt A .....	A50
12.4.3	Kontaktpunkt B .....	A51
12.4.4	Kontaktpunkt C .....	A56
12.5	Spannungen bei resultierender Kraft.....	A59
12.5.1	Kontaktpunkt Nom .....	A60
12.5.2	Kontaktpunkt A .....	A65
12.5.3	Kontaktpunkt B .....	A66
12.5.4	Kontaktpunkt C .....	A75
12.6	Ergebnisse der Messung der Oberflächenrauigkeit .....	A80
12.6.1	Oberflächenrauigkeit Schiene Stelle „oben“ .....	A80
12.6.2	Oberflächenrauigkeit Schiene Stelle „mitte“ .....	A87
12.6.3	Oberflächenrauigkeit Schiene Stelle „unten“ .....	A93



12.6.4	Oberflächenrauigkeit Rad Position 1 .....	A101
12.6.5	Oberflächenrauigkeit Rad Position 2 .....	A107
12.6.6	Oberflächenrauigkeit Rad Position 3 .....	A113
12.6.7	Oberflächenrauigkeit Spurkranz .....	A119
12.7	Technische Zeichnungen für die Adaptierung der Messvorrichtungen.	A127
12.8	Tabellenverzeichnis Anhang .....	A133

## 12.1 Messplan

Nachfolgend ist der Messplan der Messungen abgebildet.

## Messplan

Nr	Beschreibung	Kraft	Winkel		Abstand von Kontaktpunkt B			Anmerkung
			Vorrichtung	Schiene	Res.	Soll	Verschiebung der Vorr.	
1	Bestimmung Federkonstante	2500 N	0,00°	45,00°	0,00°	2,5 mm	2,5 mm	
	Messreihen Normalkraft							
2	Kontaktpunkt B, FN	1094 N	0,00°	45,00°	90,00°	0,0 mm	0,0 mm	Low und Super Low
3	Kontaktpunkt B, FN	1412 N	0,00°	45,00°	73,78°	0,0 mm	0,0 mm	Low
4	Kontaktpunkt B, FN	1730 N	0,00°	45,00°	59,81°	0,0 mm	0,0 mm	Low
5	Kontaktpunkt B, FN	2048 N	0,00°	45,00°	48,89°	0,0 mm	0,0 mm	Low
6	Kontaktpunkt B, FN	2296 N	0,00°	45,00°	42,30°	0,0 mm	0,0 mm	Low
7	Kontaktpunkt B, FN	2579 N	0,00°	45,00°	36,38°	0,0 mm	0,0 mm	Low
8	Kontaktpunkt B, FN	2791 N	0,00°	45,00°	32,80°	0,0 mm	0,0 mm	Low
9	Kontaktpunkt B, FN	547 N	0,00°	45,00°	90,00°	0,0 mm	0,0 mm	Low und Super Low
10	Kontaktpunkt B, FN	865 N	0,00°	45,00°	59,81°	0,0 mm	0,0 mm	Low und Super Low
11	Kontaktpunkt B, FN	1183 N	0,00°	45,00°	40,67°	0,0 mm	0,0 mm	Low
12	Kontaktpunkt B, FN	1502 N	0,00°	45,00°	29,81°	0,0 mm	0,0 mm	Low
13	Kontaktpunkt B, FN	1749 N	0,00°	45,00°	24,46°	0,0 mm	0,0 mm	Low
14	Kontaktpunkt B, FN	2032 N	0,00°	45,00°	20,22°	0,0 mm	0,0 mm	Low
15	Kontaktpunkt B, FN	2244 N	0,00°	45,00°	17,86°	0,0 mm	0,0 mm	Low
16	Kontaktpunkt A, FN	1094 N	0,00°	45,00°	90,00°	1,0 mm	1,0 mm	Low
17	Kontaktpunkt A, FN	2296 N	0,00°	45,00°	42,30°	1,0 mm	1,0 mm	Low
18	Kontaktpunkt A, FN	2791 N	0,00°	45,00°	32,80°	1,0 mm	1,0 mm	Low
19	Kontaktpunkt Nom, FN	547 N	0,00°	45,00°	90,00°	2,5 mm	2,5 mm	Low und Super Low
20	Kontaktpunkt Nom, FN	865 N	0,00°	45,00°	59,81°	2,5 mm	2,5 mm	Low und Super Low
21	Kontaktpunkt Nom, FN	1183 N	0,00°	45,00°	40,67°	2,5 mm	2,5 mm	Low und Super Low
22	Kontaktpunkt Nom, FN	1502 N	0,00°	45,00°	29,81°	2,5 mm	2,5 mm	Low und Super Low
23	Kontaktpunkt Nom, FN	1749 N	0,00°	45,00°	24,46°	2,5 mm	2,5 mm	Low
24	Kontaktpunkt Nom, FN	2032 N	0,00°	45,00°	20,22°	2,5 mm	2,5 mm	Low
25	Kontaktpunkt Nom, FN	2244 N	0,00°	45,00°	17,86°	2,5 mm	2,5 mm	Low
26	Kontaktpunkt C, FN	100 N	0,00°	45,00°		5,5 mm	5,5 mm	Super Low
27	Kontaktpunkt C, FN	300 N	0,00°	45,00°		5,5 mm	5,5 mm	Super Low
28	Kontaktpunkt C, FN	547 N	0,00°	45,00°	90,00°	5,5 mm	5,5 mm	Low und Super Low

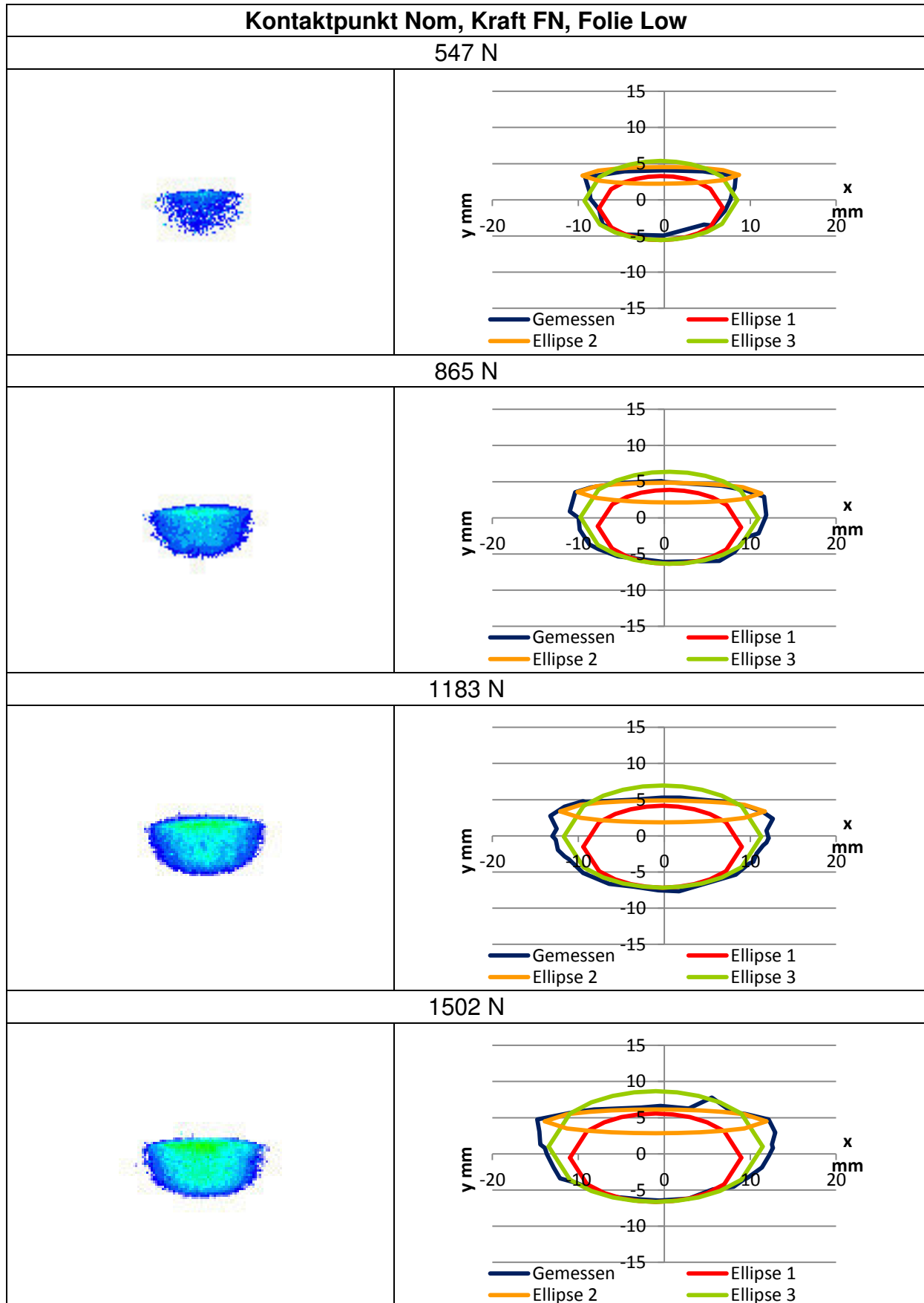
Nr	Beschreibung	Kraft	Winkel		Abstand von Kontaktpunkt B			Anmerkung
			Vorrichtung	Schiene	Res.	Soll	Verschiebung der Vorr.	
29	Kontaktpunkt C, FN	865 N	0,00°	45,00°	59,81°	5,5 mm	5,5 mm	Low und Super Low
30	Kontaktpunkt C, FN	1183 N	0,00°	45,00°	40,67°	5,5 mm	5,5 mm	Low und Super Low
31	Kontaktpunkt C, FN	1502 N	0,00°	45,00°	29,81°	5,5 mm	5,5 mm	Low und Super Low
32	Kontaktpunkt C, FN	1749 N	0,00°	45,00°	24,46°	5,5 mm	5,5 mm	Low und Super Low
33	Kontaktpunkt C, FN	2032 N	0,00°	45,00°	20,22°	5,5 mm	5,5 mm	Low
34	Kontaktpunkt C, FN	2244 N	0,00°	45,00°	17,86°	5,5 mm	5,5 mm	Low
	<b>Messreihe resultierende Kraft</b>							
35	Kontaktpunkt B, FR	2299 N	-2,70°	47,70°	42,30°	0,0 mm	0,0 mm	Low
36	Kontaktpunkt A, FR	2299 N	-2,70°	47,70°	42,30°	1,0 mm	1,0 mm	Low
37	Kontaktpunkt B, FR	1187 N	-4,33°	49,33°	40,67°	0,0 mm	0,0 mm	Low
38	Kontaktpunkt Nom, FR	1187 N	-4,33°	49,33°	40,67°	2,5 mm	2,5 mm	Low
39	Kontaktpunkt C, FR	1184 N	-4,33°	49,33°	40,67°	5,5 mm	5,5 mm	Low
40	Kontaktpunkt B, FR	2602 N	-8,62°	53,62°	36,38°	0,0 mm	0,0 mm	Low
41	Kontaktpunkt B, FR	2855 N	-12,20°	57,20°	32,80°	0,0 mm	0,0 mm	Low
42	Kontaktpunkt A, FR	2855 N	-12,20°	57,20°	32,80°	1,0 mm	1,0 mm	Low
43	Kontaktpunkt B, FR	1556 N	-15,19°	60,19°	29,81°	0,0 mm	0,0 mm	Low
44	Kontaktpunkt Nom, FR	1556 N	-15,19°	60,19°	29,81°	2,5 mm	2,4 mm	Low
45	Kontaktpunkt C, FR	1556 N	-15,19°	60,19°	29,81°	5,5 mm	5,3 mm	Low
46	Kontaktpunkt B, FR	1868 N	-20,54°	65,54°	24,46°	0,0 mm	0,0 mm	Low
47	Kontaktpunkt Nom, FR	1868 N	-20,54°	65,54°	24,46°	2,5 mm	2,3 mm	Low
48	Kontaktpunkt C, FR	1868 N	-20,54°	65,54°	24,46°	5,5 mm	5,2 mm	Low
49	Kontaktpunkt B, FR	2238 N	-24,78°	69,78°	20,22°	0,0 mm	0,0 mm	Low
50	Kontaktpunkt Nom, FR	2238 N	-24,78°	69,78°	20,22°	2,5 mm	2,3 mm	Rutschen der Folie, Low
51	Kontaktpunkt C, FR	2238 N	-24,78°	69,78°	20,22°	5,5 mm	5,0 mm	Rutschen der Folie, Low
52	Kontaktpunkt B, FR	2522 N	-27,14°	72,14°	17,86°	0,0 mm	0,0 mm	Low
53	Kontaktpunkt Nom, FR	2522 N	-27,14°	72,14°	17,86°	2,5 mm	2,2 mm	Rutschen der Folie, Low
54	Kontaktpunkt C, FR	2522 N	-27,14°	72,14°	17,86°	5,5 mm	4,9 mm	Rutschen der Folie, Low
55	Kontaktpunkt B, FR	2053 N	3,89°	41,11°	48,89°	0,0 mm	0,0 mm	Umspannen der Vorr., Low
56	Kontaktpunkt B, FR	1790 N	14,81°	30,19°	59,81°	0,0 mm	0,0 mm	Low
57	Kontaktpunkt B, FR	895 N	14,81°	30,19°	59,81°	0,0 mm	0,0 mm	Low und Super Low
58	Kontaktpunkt Nom, FR	895 N	14,81°	30,19°	59,81°	2,5 mm	2,4 mm	Low und Super Low

Nr	Beschreibung	Kraft	Winkel		Abstand von Kontaktpunkt B			Anmerkung
			Vorrichtung	Schiene	Res.	Soll	Verschiebung der Vorr.	
59	Kontaktpunkt C, FR	895 N	14,81 °	30,19 °	59,81 °	5,5 mm	5,3 mm	Low und Super Low
60	Kontaktpunkt B, FR	1611 N	28,78 °	16,22 °	73,78 °	0,0 mm	0,0 mm	Low
61	Kontaktpunkt B, FR	1547 N	45,00 °	0,00 °	90,00 °	0,0 mm	0,0 mm	Rutschen der Folie, Low und Super Low
62	Kontaktpunkt B, FR	773 N	45,00 °	0,00 °	90,00 °	0,0 mm	0,0 mm	Rutschen der Folie Low und Super Low
63	Kontaktpunkt Nom, FR	773 N	45,00 °	0,00 °	90,00 °	2,5 mm	1,8 mm	Rutschen der Folie Low und Super Low
64	Kontaktpunkt C, FR	773 N	45,00 °	0,00 °	90,00 °	5,5 mm	3,9 mm	Rutschen der Folie Low und Super Low

## 12.2 Kontaktflächen bei Normalkraft

Auf den anschließenden Seiten sind alle Diagramme der Kontaktflächen und deren Annäherungen bei den Messungen mit der Normalkraft  $F_N$  abgebildet.

### 12.2.1 Kontaktpunkt Nom



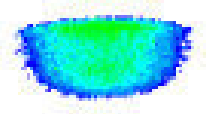
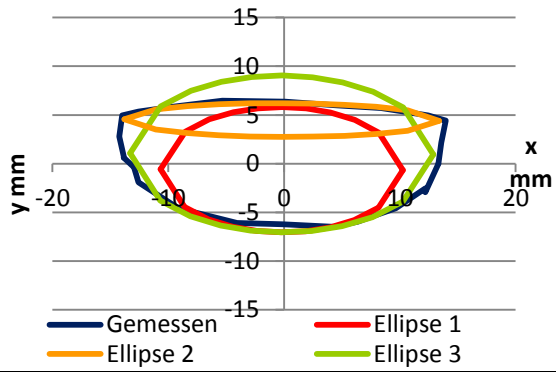
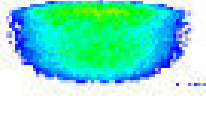
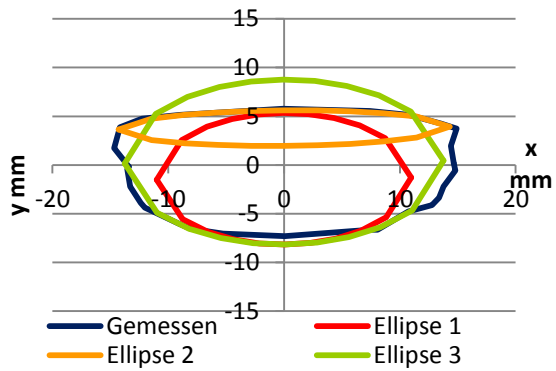
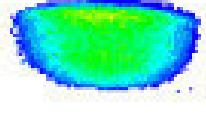
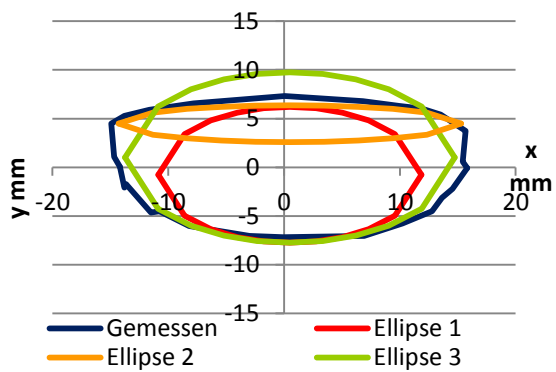
1749 N	
	
2032 N	
	
2244 N	
	

Tabelle 1: Kontaktfläche, Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie Low

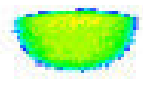
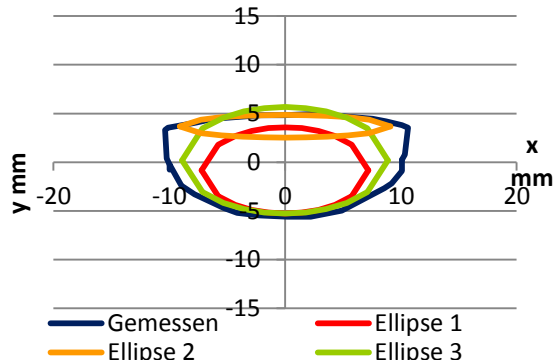
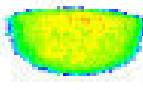
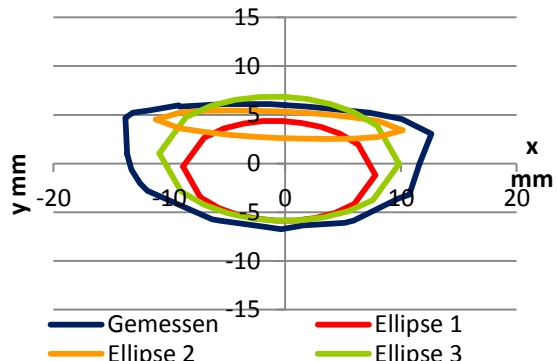
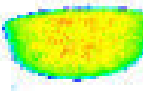
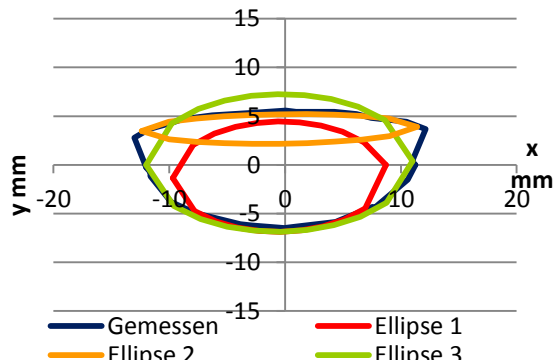
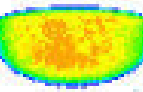
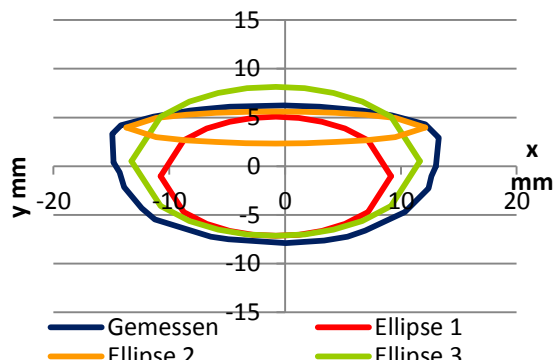
Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie Super Low	
547 N	
	
865 N	
	
1183 N	
	
1502 N	
	

Tabelle 2: Kontaktfläche, Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie Super Low



### 12.2.2 Kontaktpunkt A

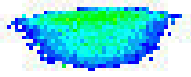
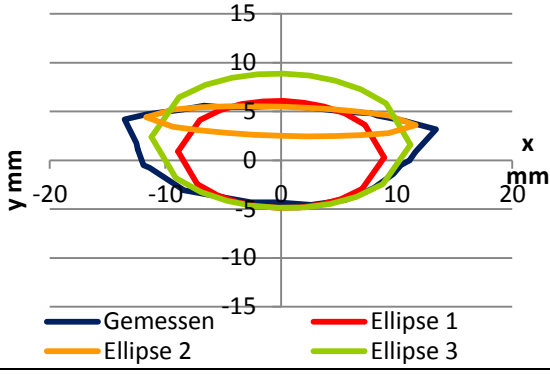
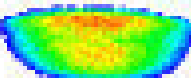
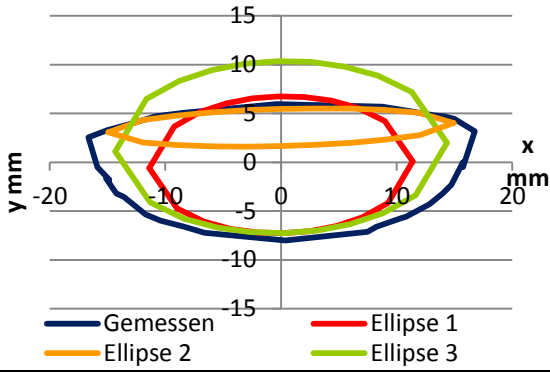
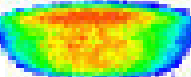
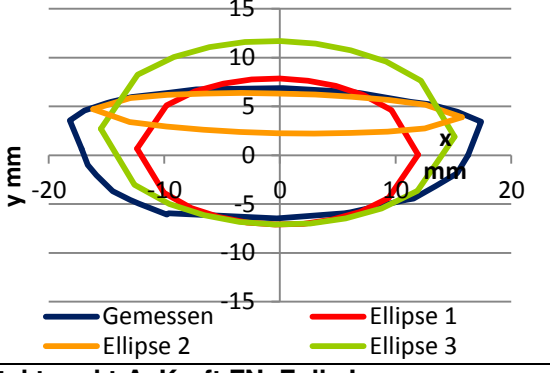
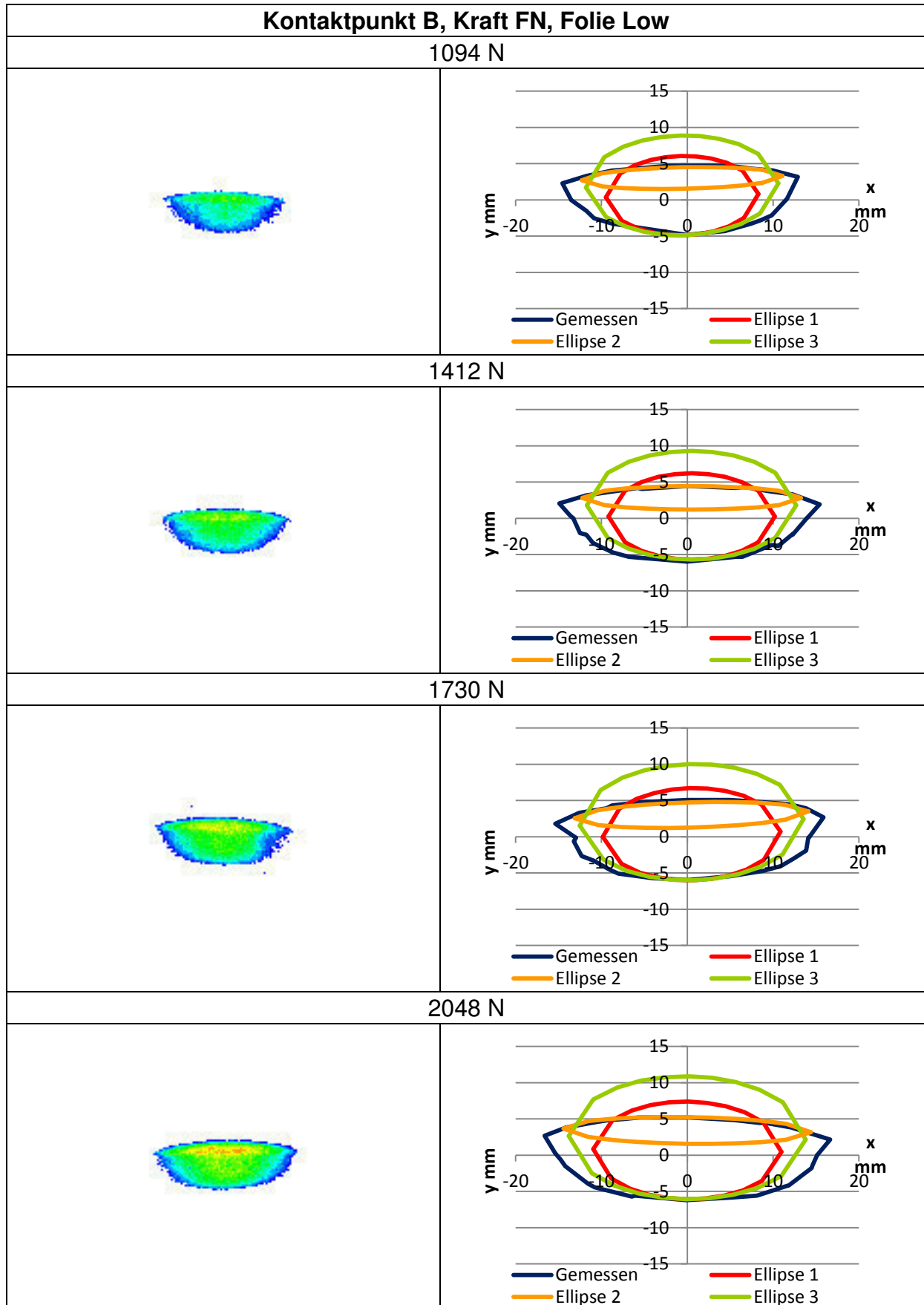
Kontaktpunkt A, Kraft FN, Folie Low	
1094 N	
	
2296 N	
	
2790 N	
	

Tabelle 3: Kontaktfläche, Kontaktpunkt A, Kraft FN, Folie Low

### 12.2.3 Kontaktpunkt B



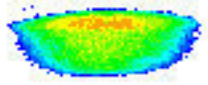
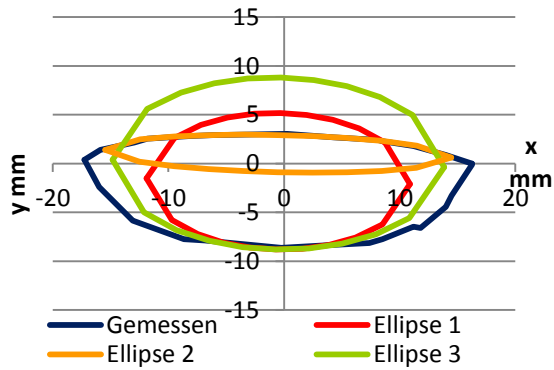
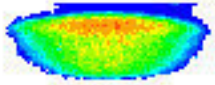
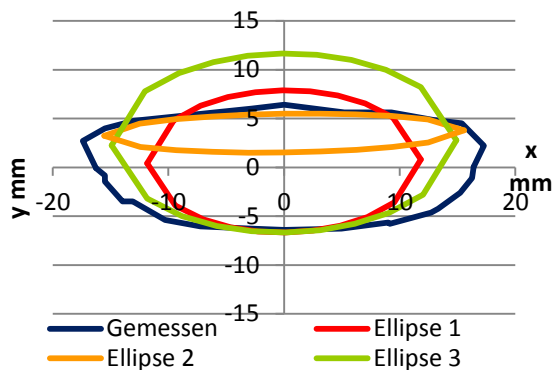
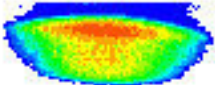
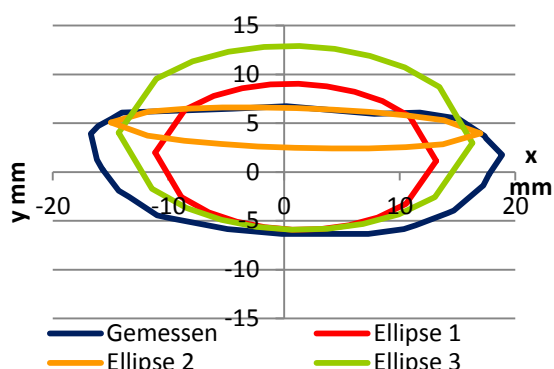
2296 N	
	
2579 N	
	
2791 N	
	

Tabelle 4: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FN, Folie Low

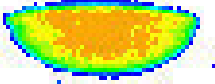
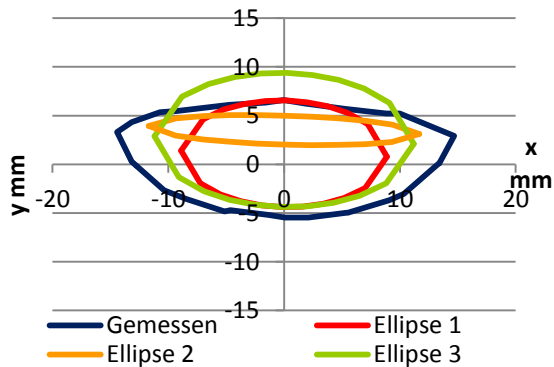
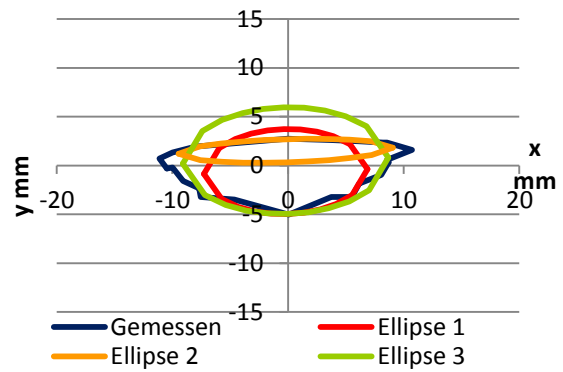
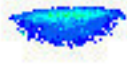
Kontaktpunkt B, Kraft FN, Folie Super Low	
1094 N	
	

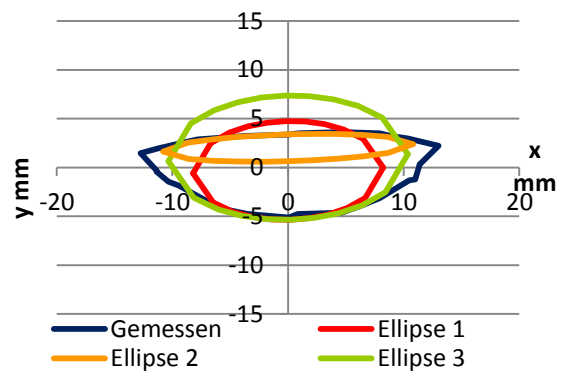
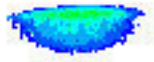
Tabelle 5: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FN, Folie Super Low

**Kontaktpunkt B, Kraft FN (Vergleich), Folie Low**

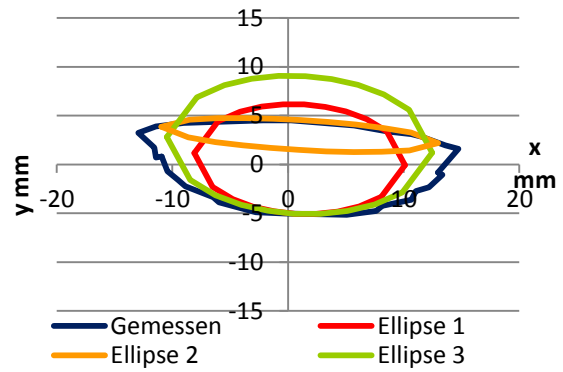
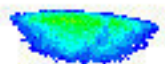
547 N



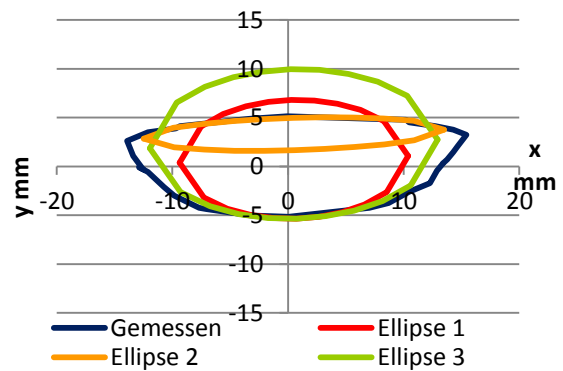
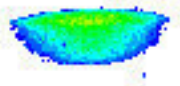
865 N



1183 N



1502 N



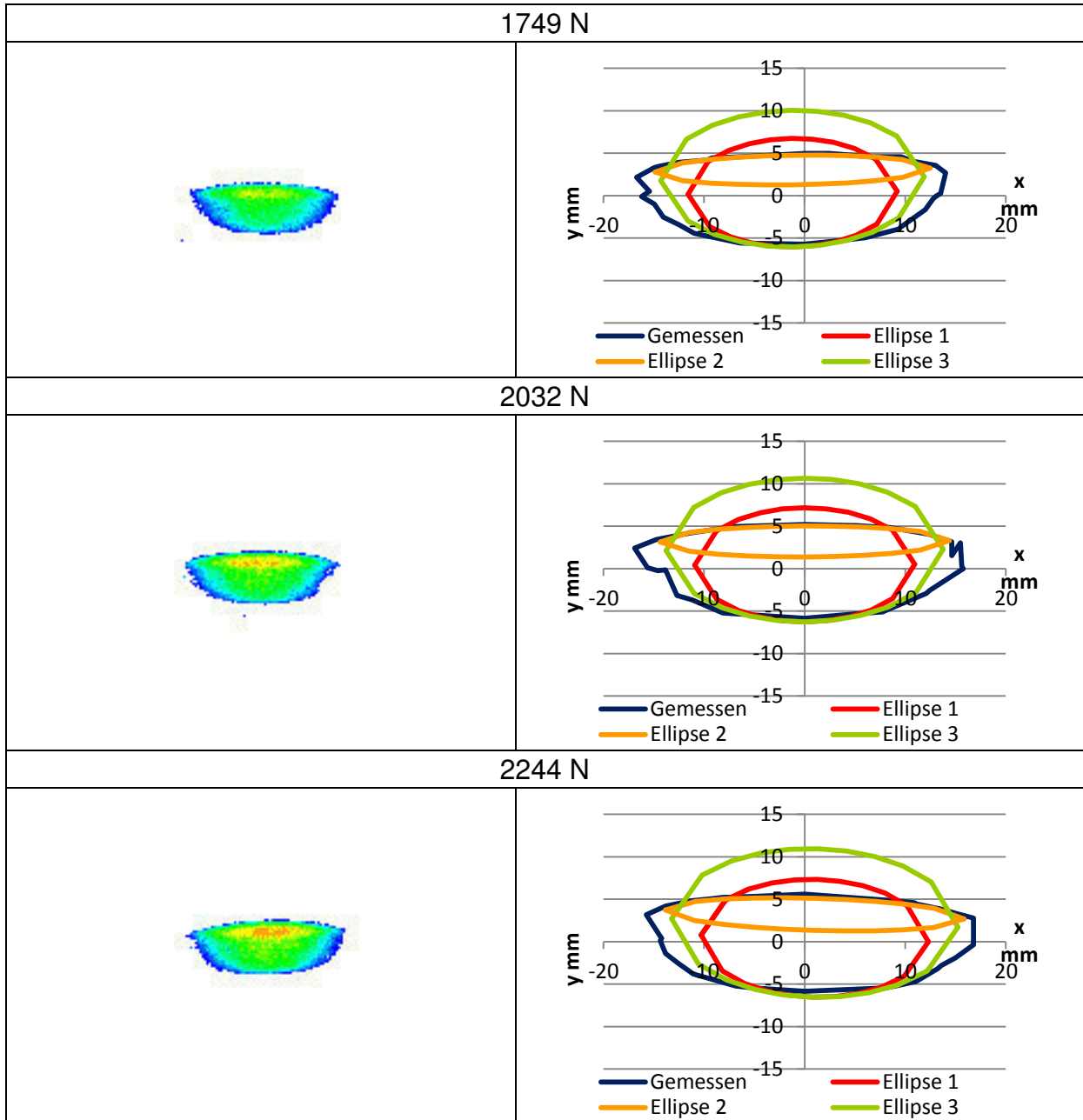


Tabelle 6: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FN (Vergleich), Folie Low

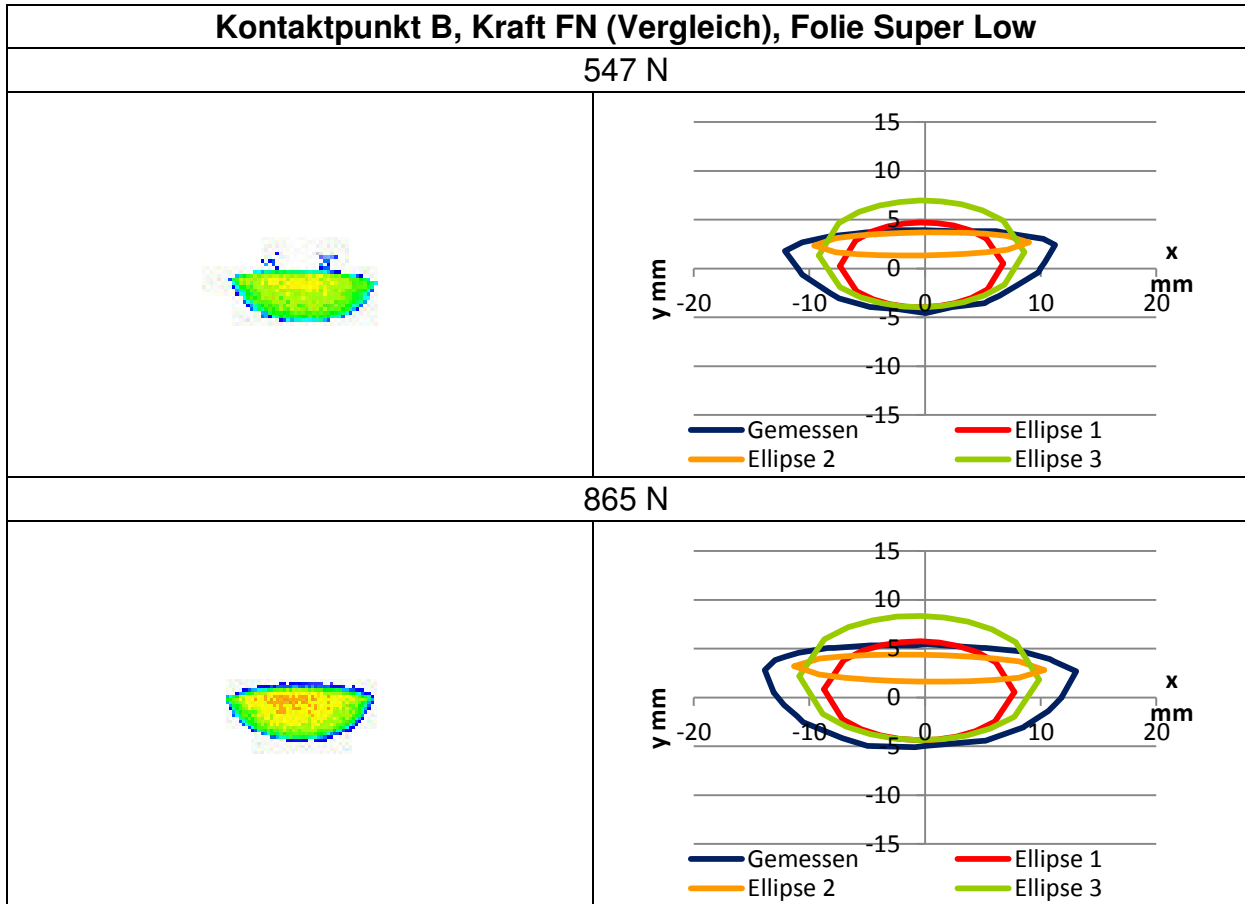
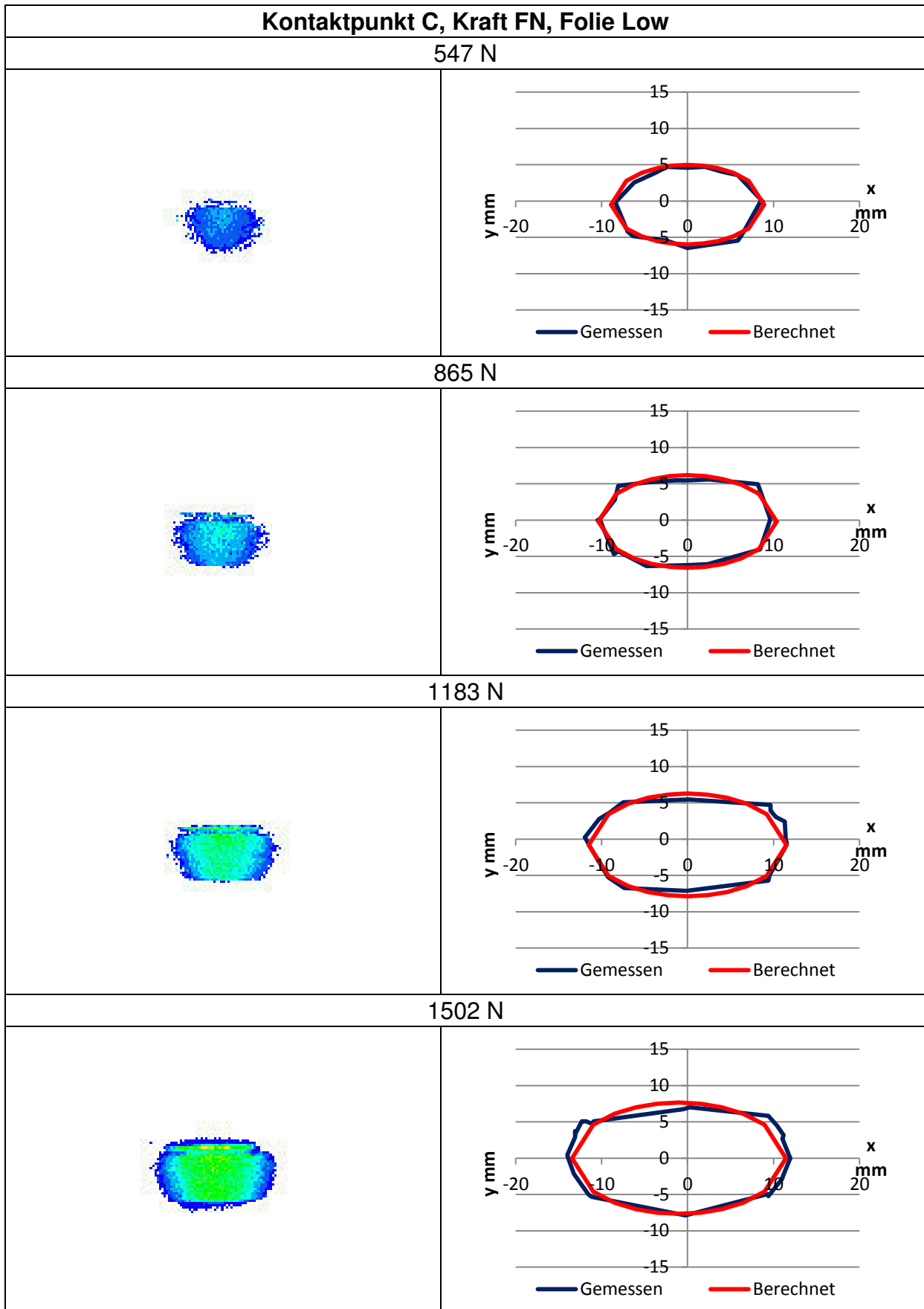


Tabelle 7: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FN (Vergleich), Folie Super Low

### 12.2.4 Kontaktpunkt C



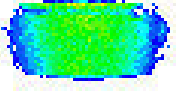
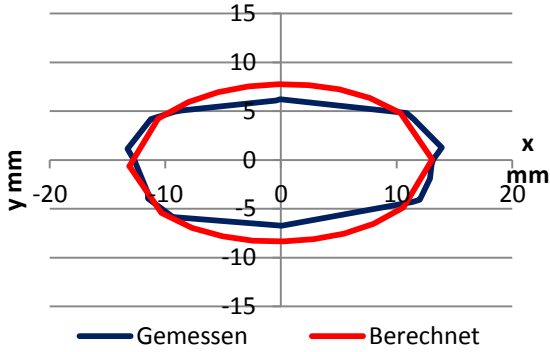
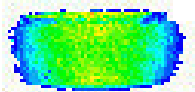
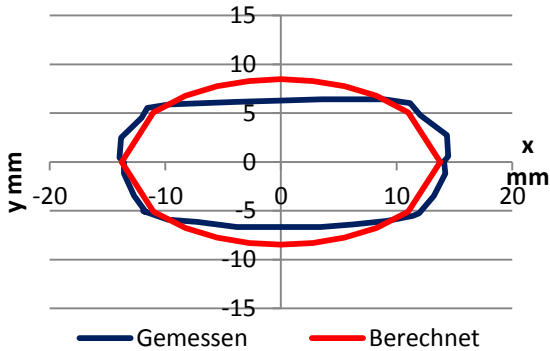
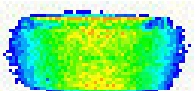
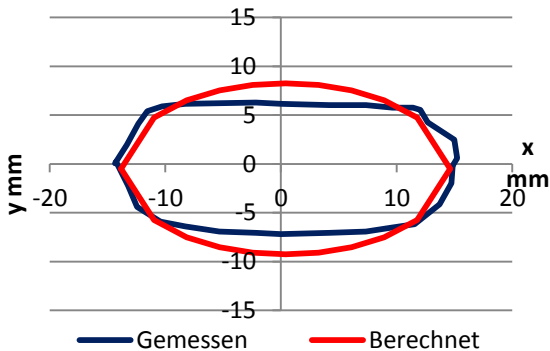

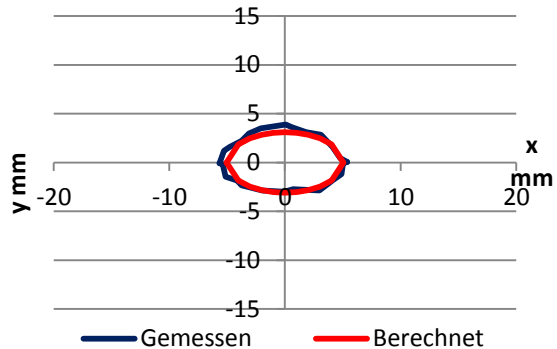
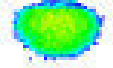
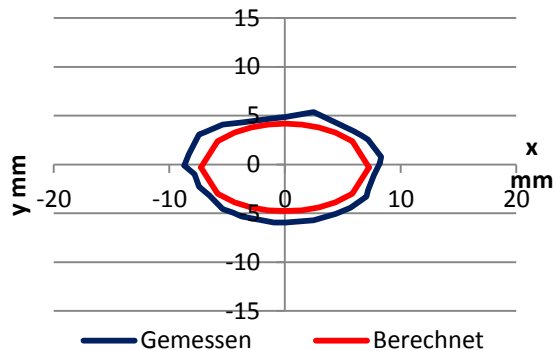
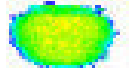
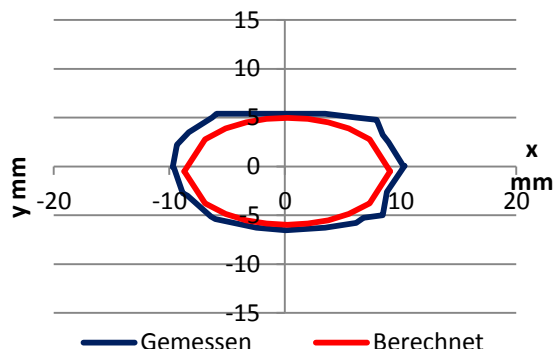
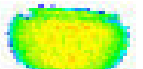
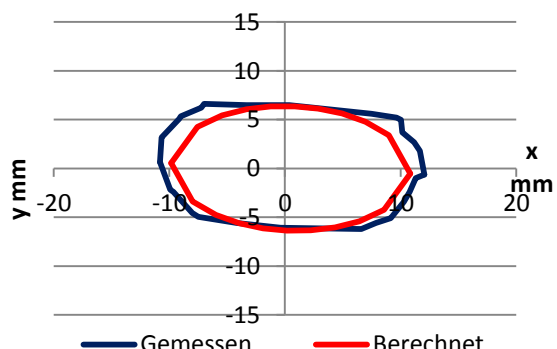
1749 N	
	
2032 N	
	
2244 N	
	

Tabelle 8: Kontaktfläche, Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Low



**Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Super Low**

100 N	
	
300 N	
	
547 N	
	
865 N	
	

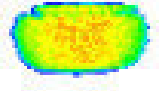
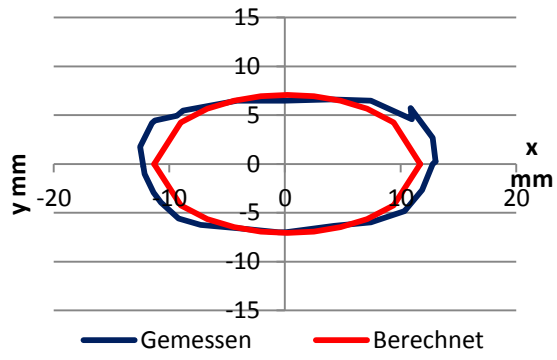
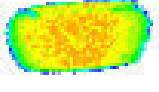
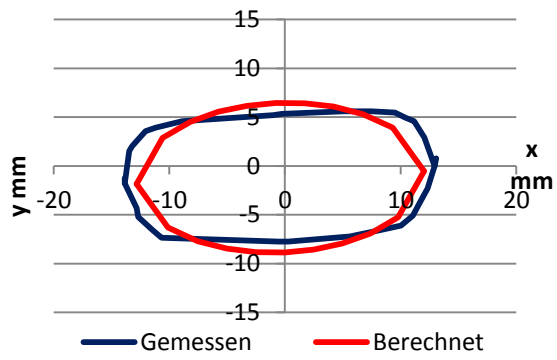
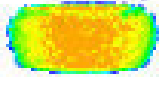
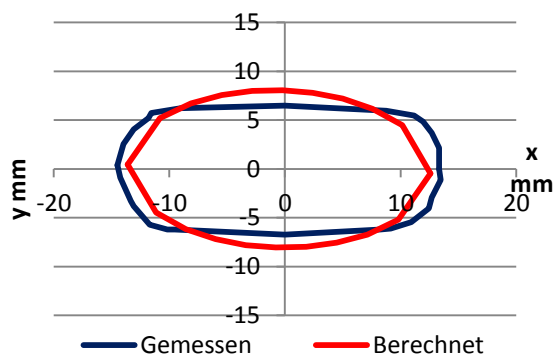
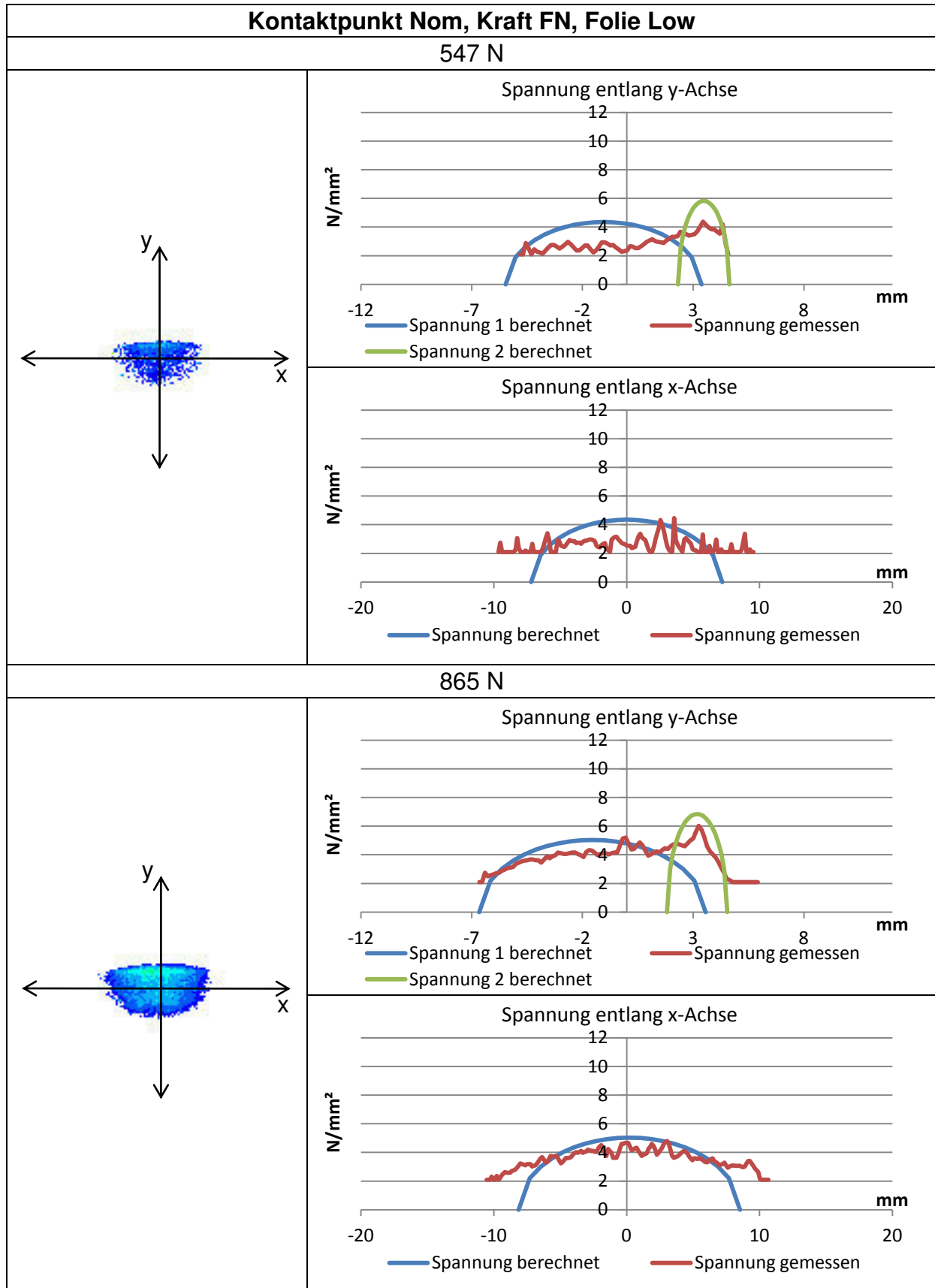
1183 N	
	
1502 N	
	
1749 N	
	

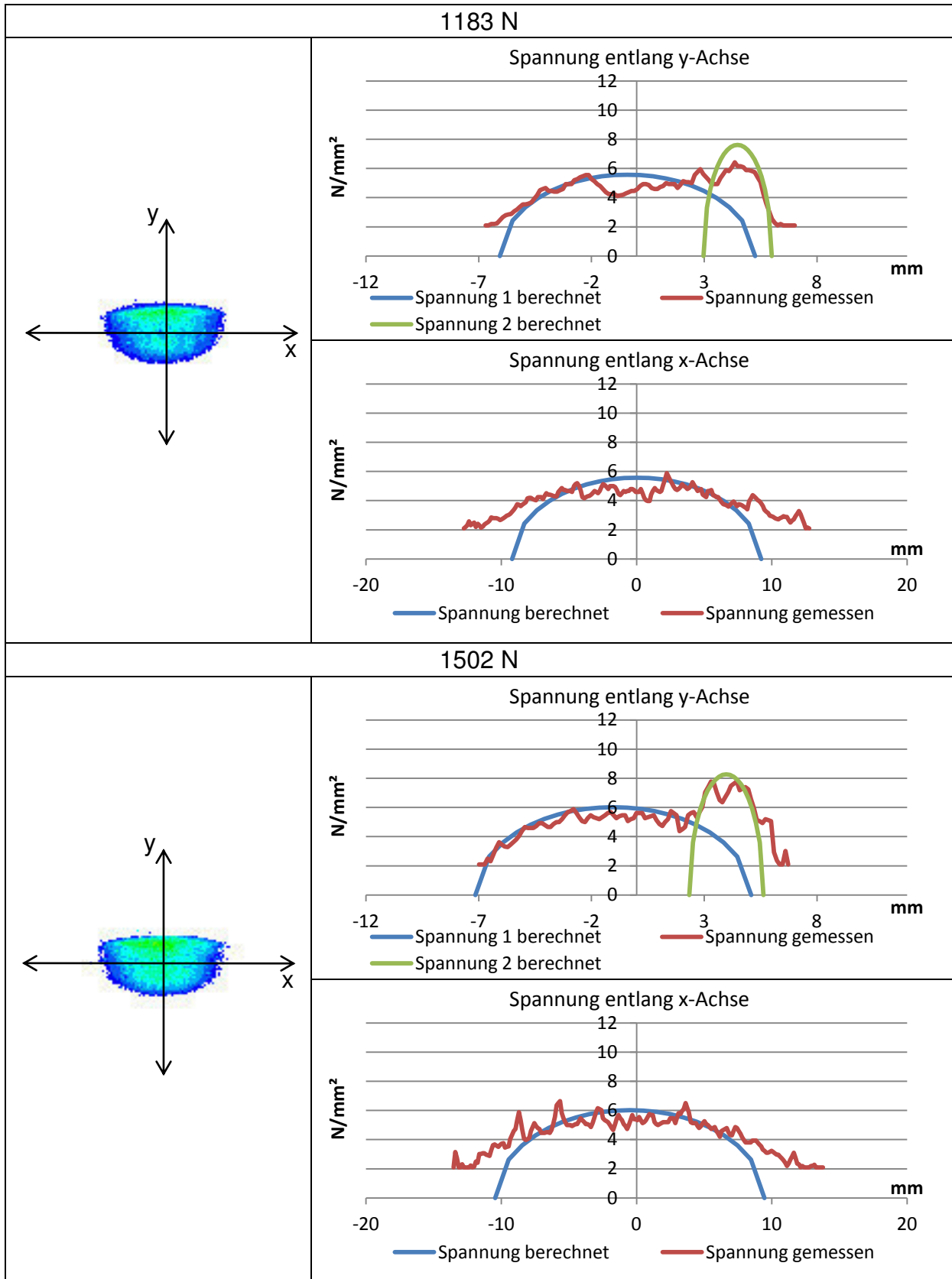
Tabelle 9: Kontaktfläche, Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Super Low

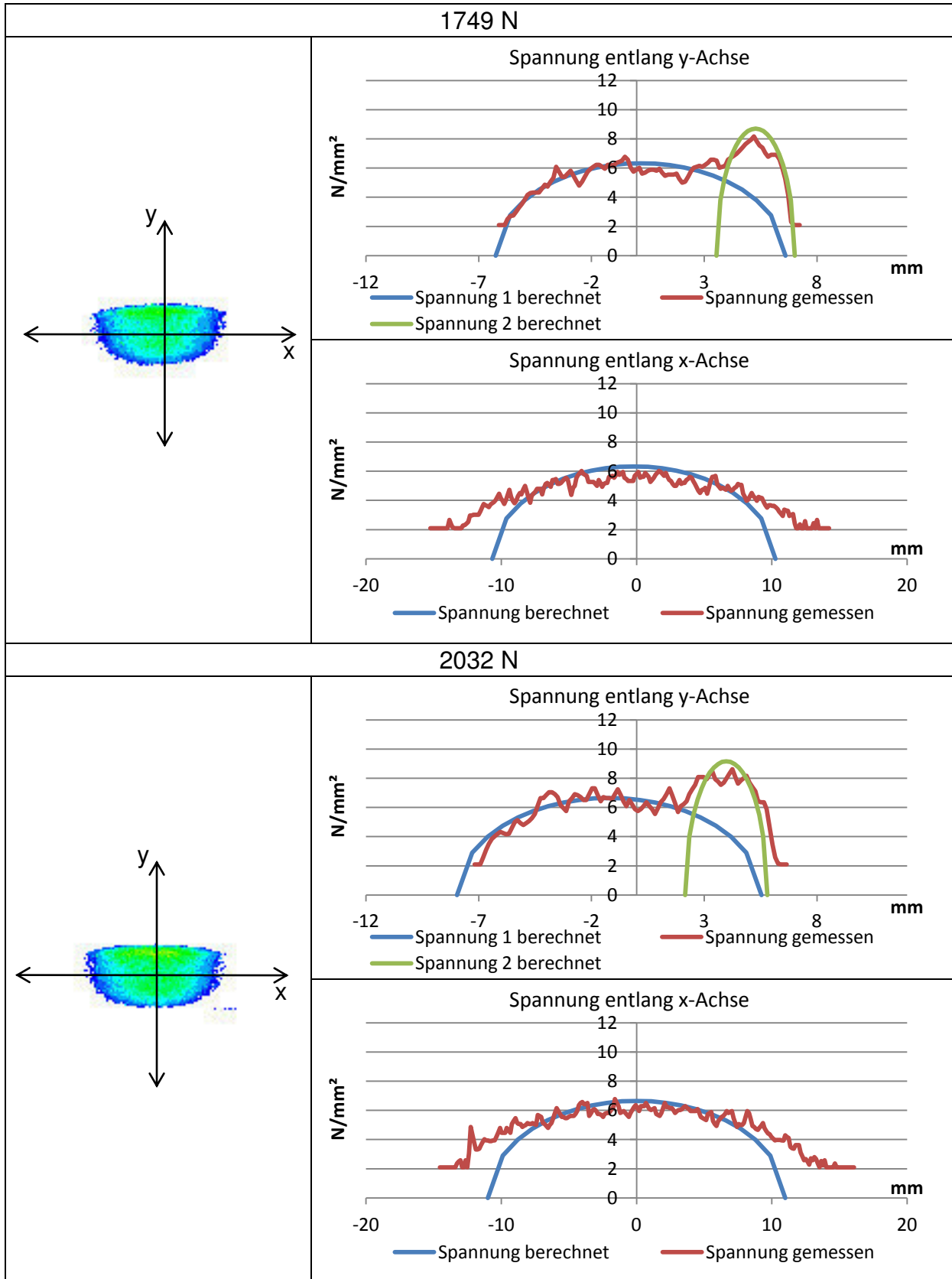
## 12.3 Spannungen bei Normalkraft

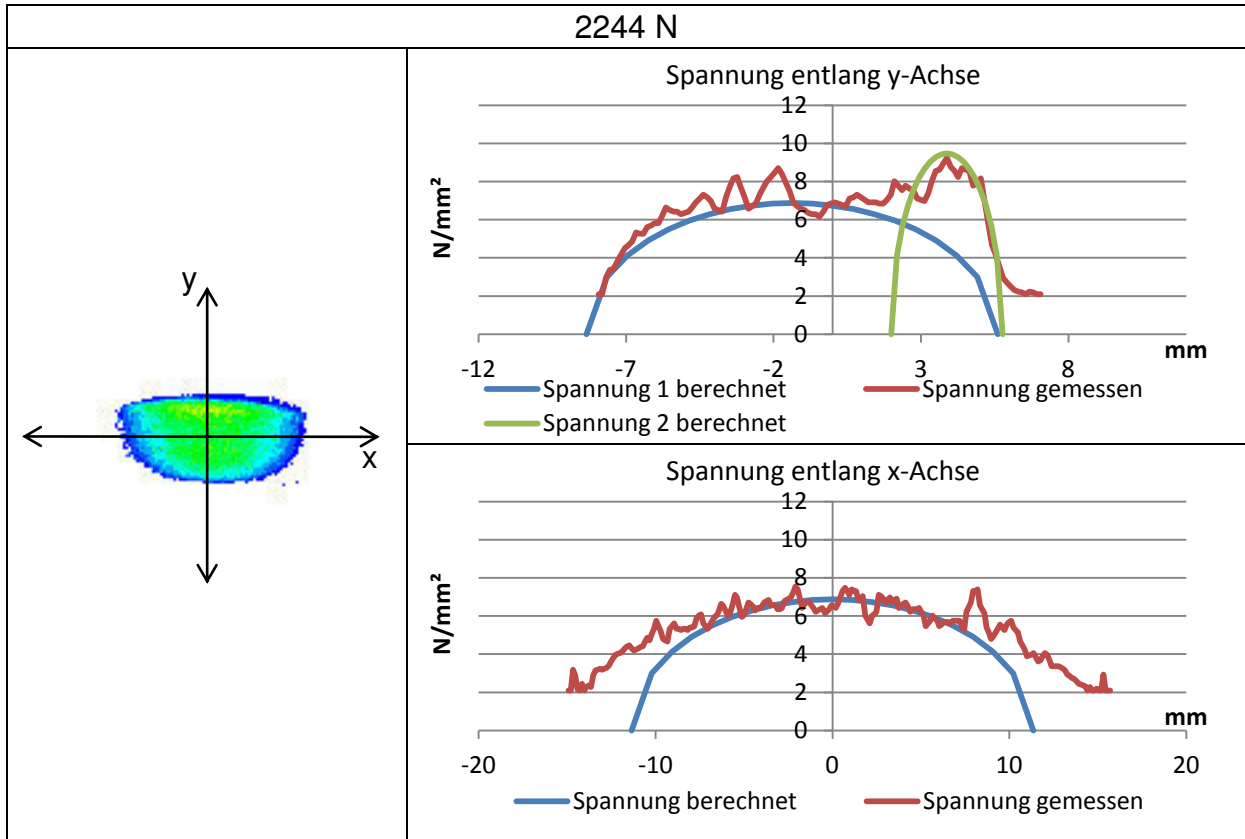
Die nachfolgenden Tabellen zeigen alle gemessenen und berechneten Spannungen bei Aufbringung der Normalkraft.

### 12.3.1 Kontaktpunkt Nom





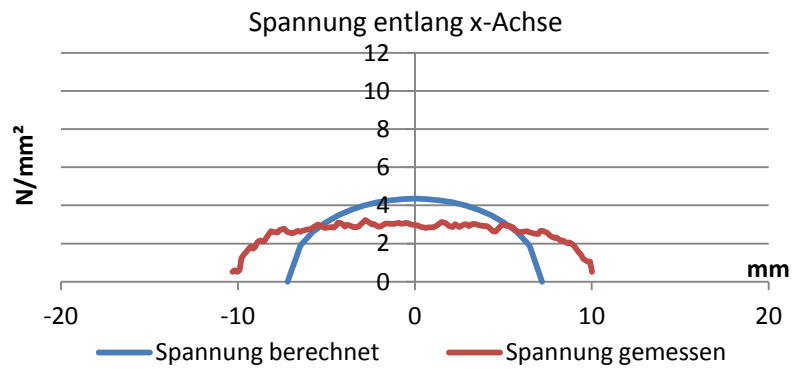
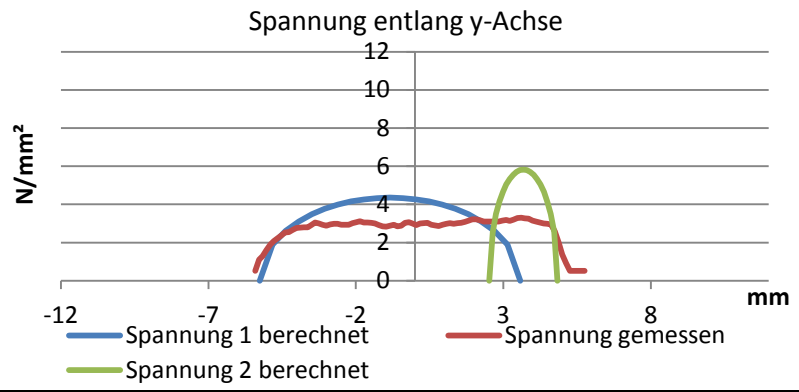
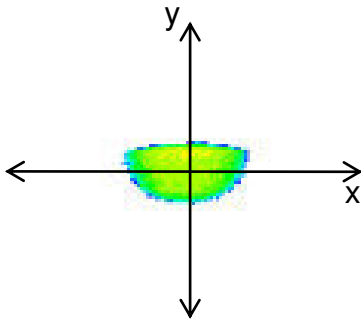




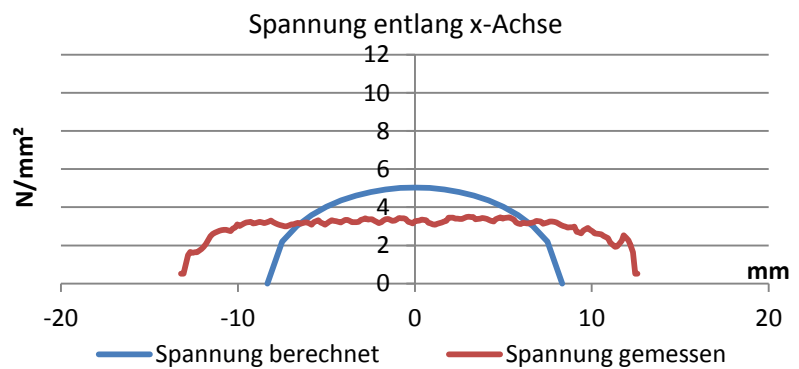
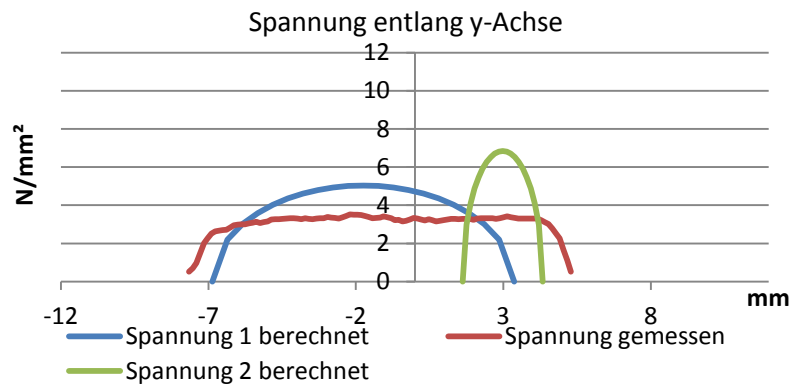
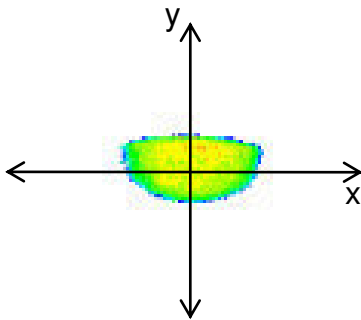
**Tabelle 10: Spannung, Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie Low**

**Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie Super Low**

547 N



865 N





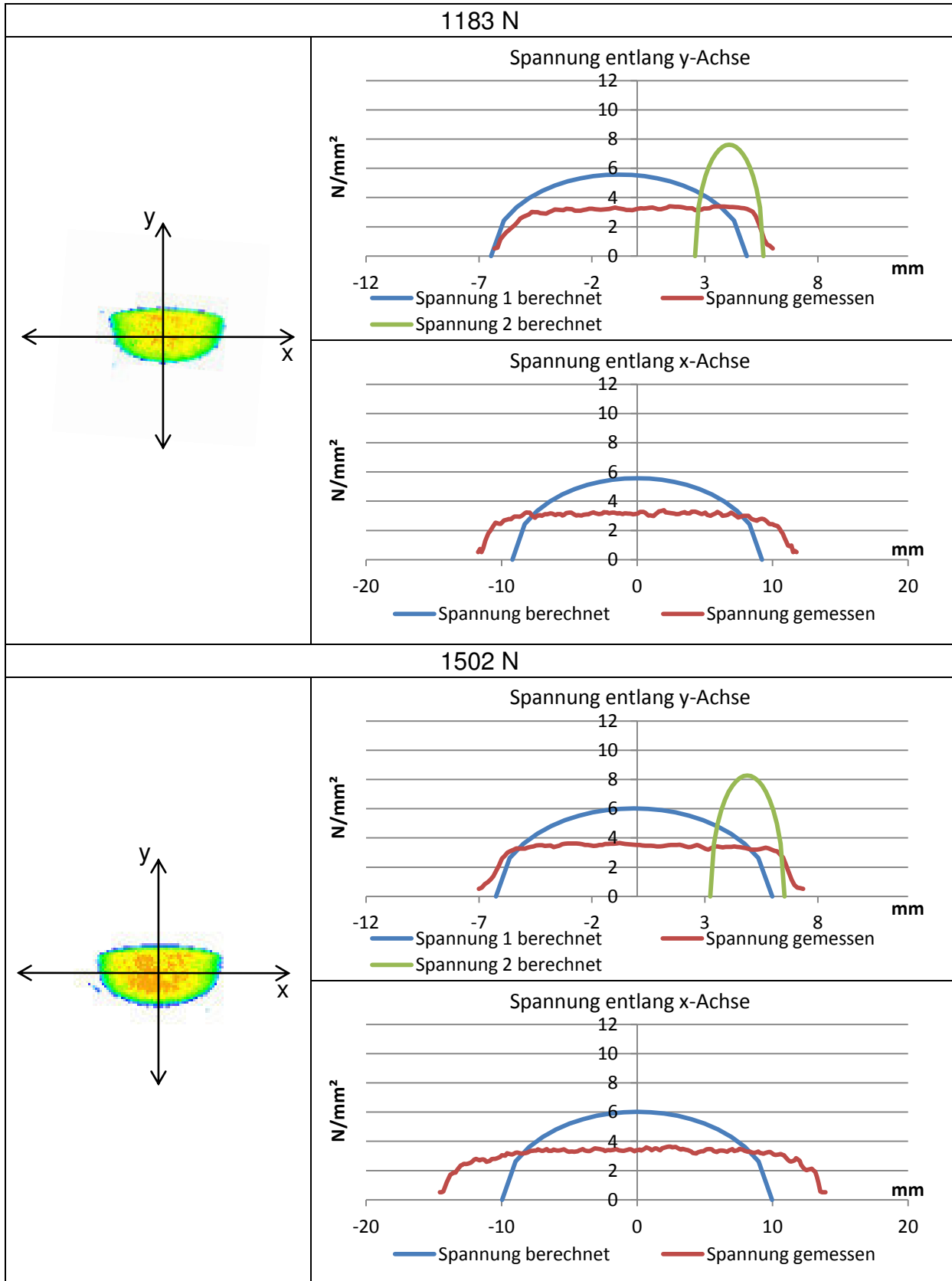
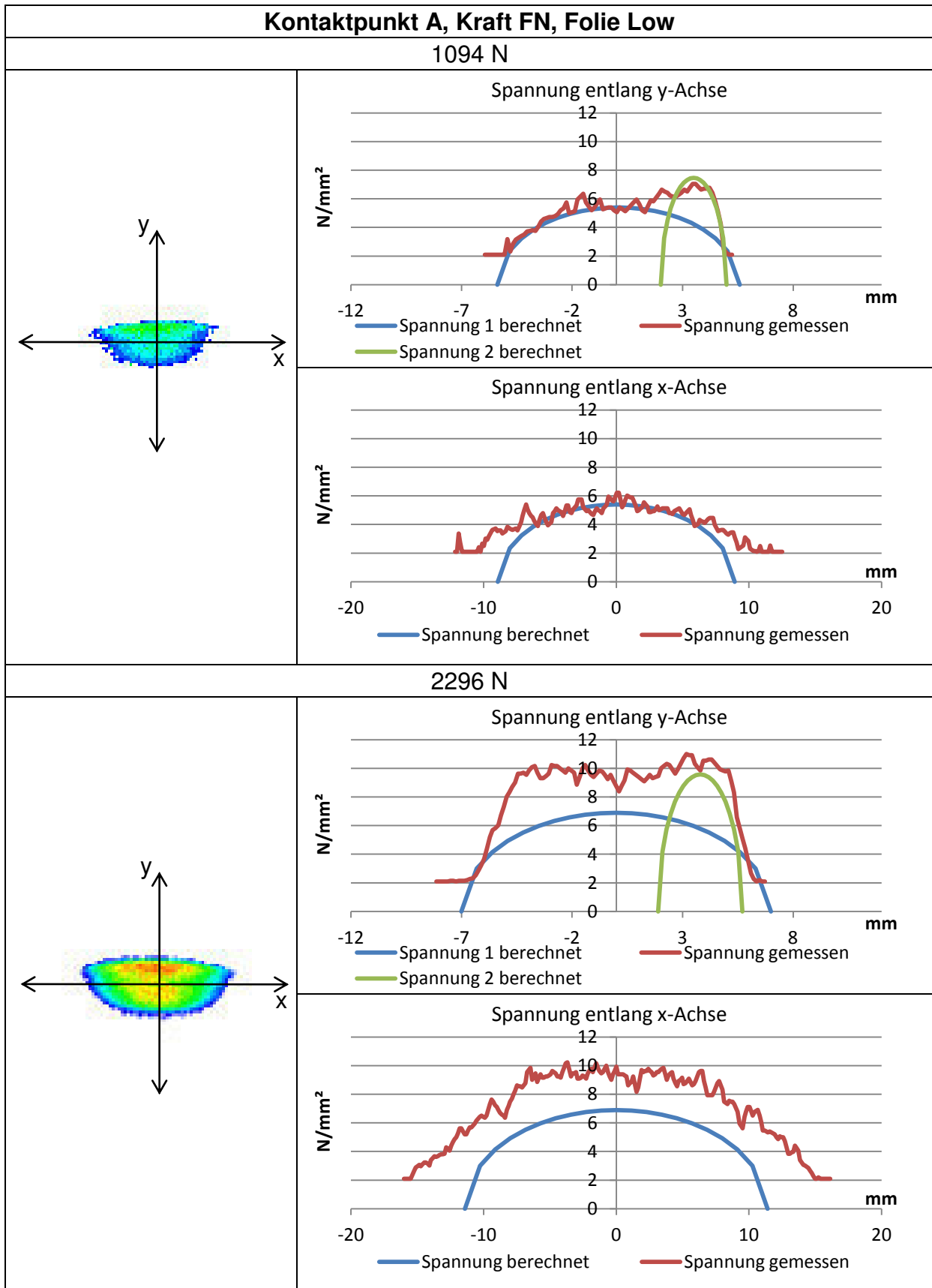


Tabelle 11: Spannung, Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie SuperLow

### 12.3.2 Kontaktpunkt A



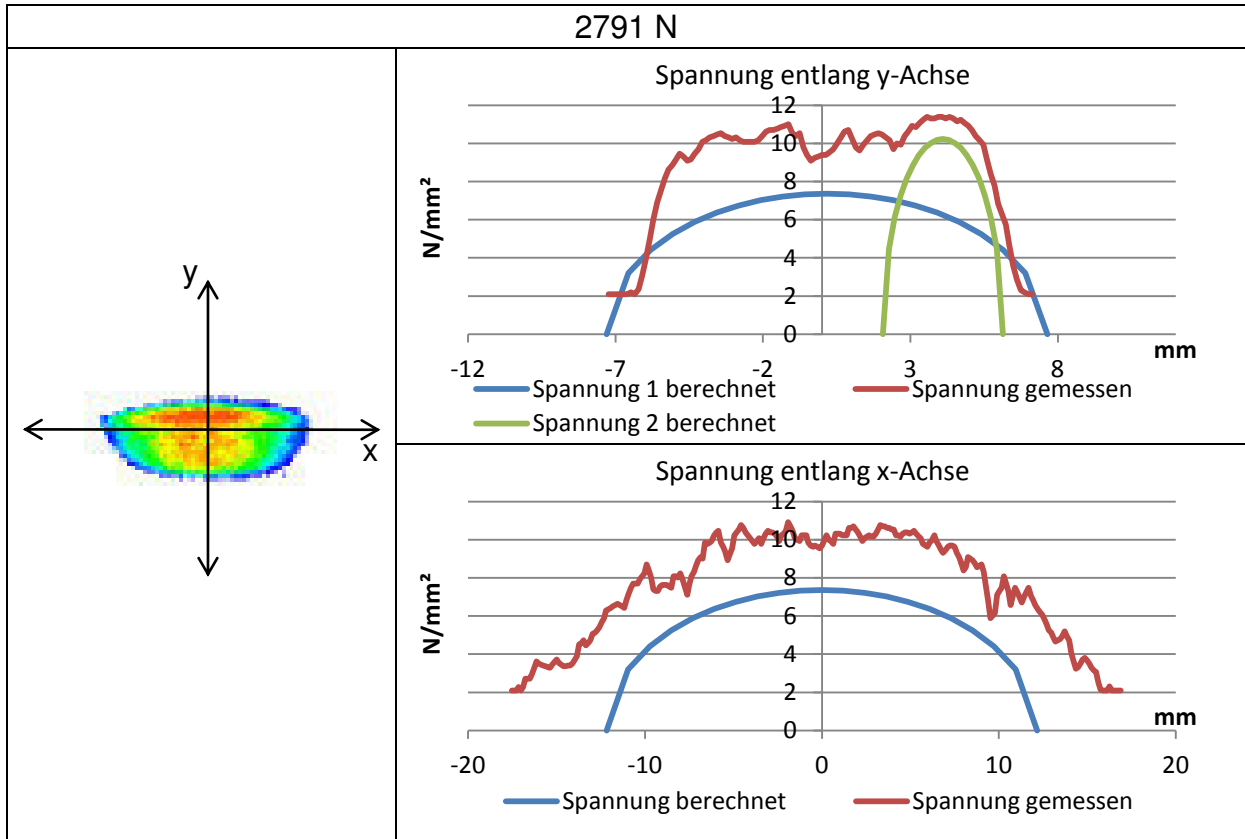
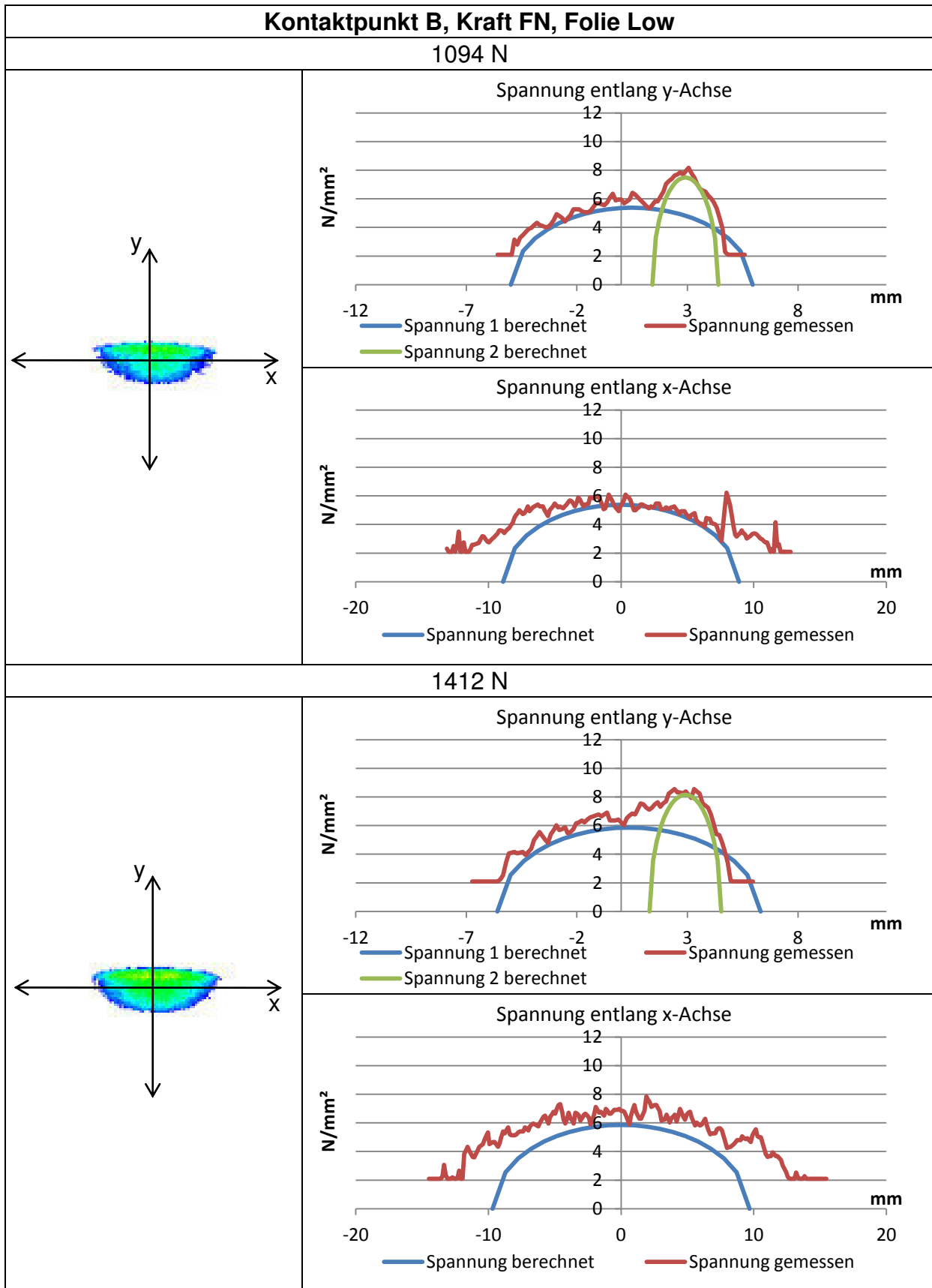
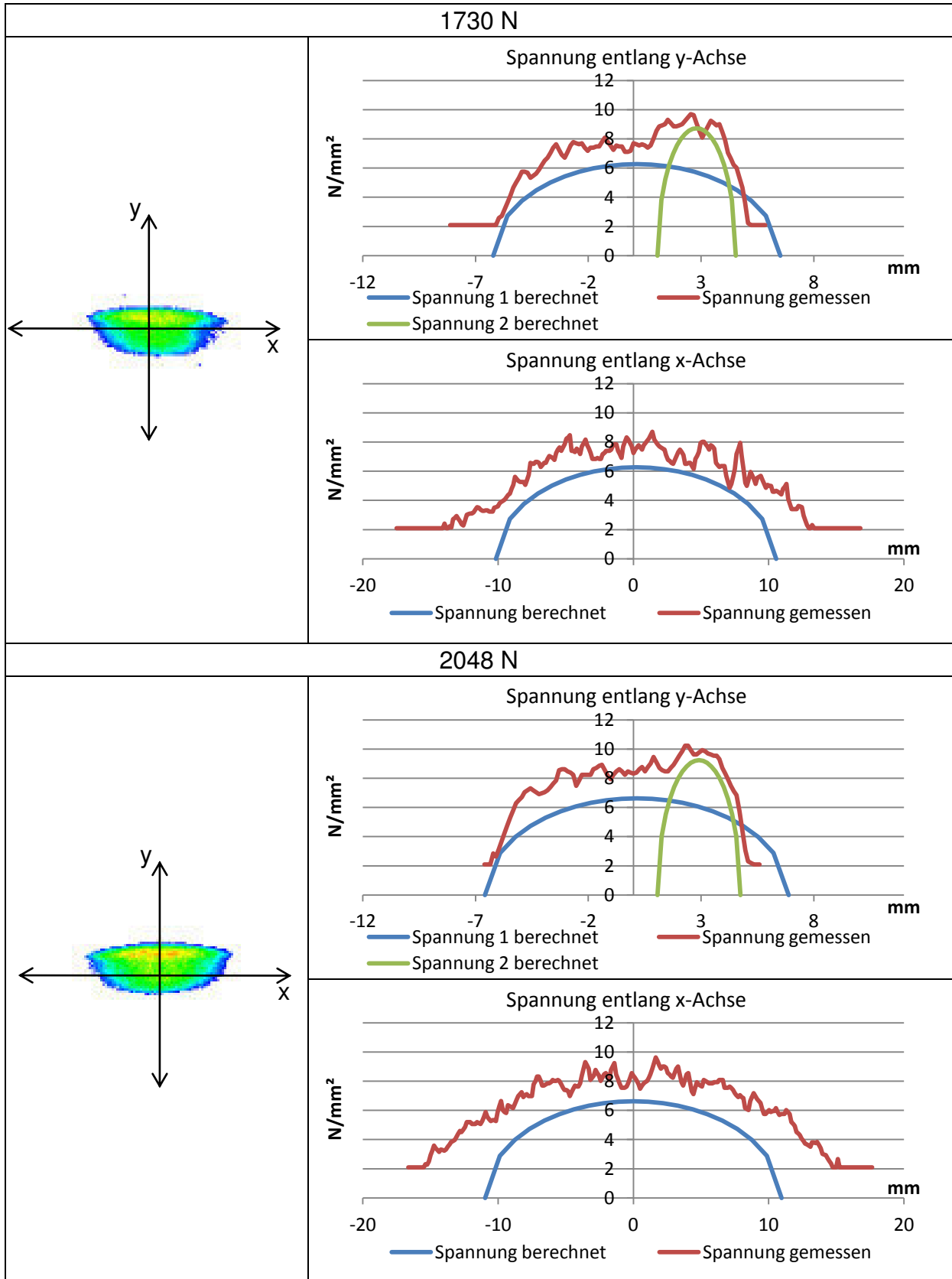
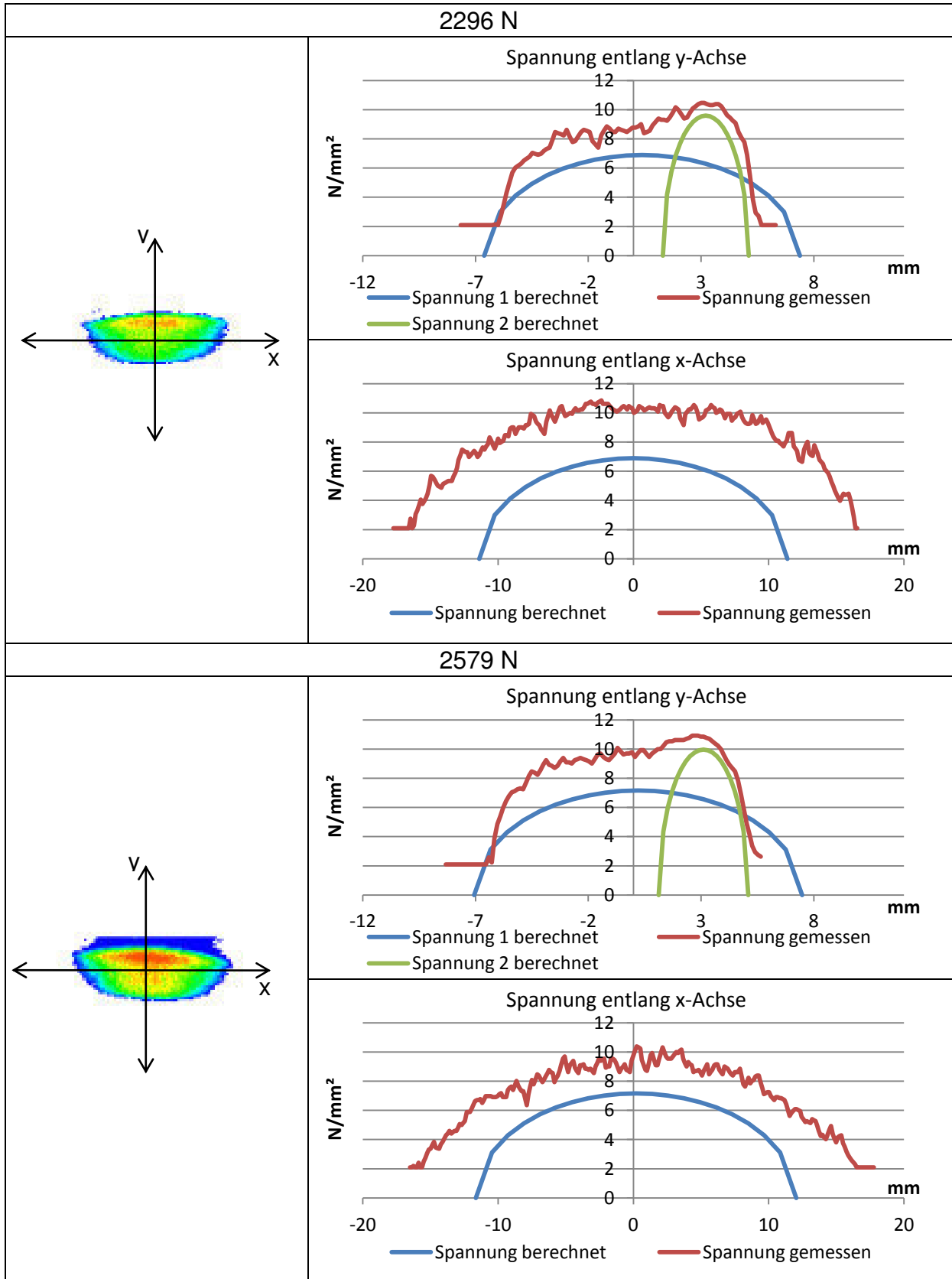


Tabelle 12: Spannung, Kontaktpunkt A, Kraft FN, Folie Low

### 12.3.3 Kontaktpunkt B







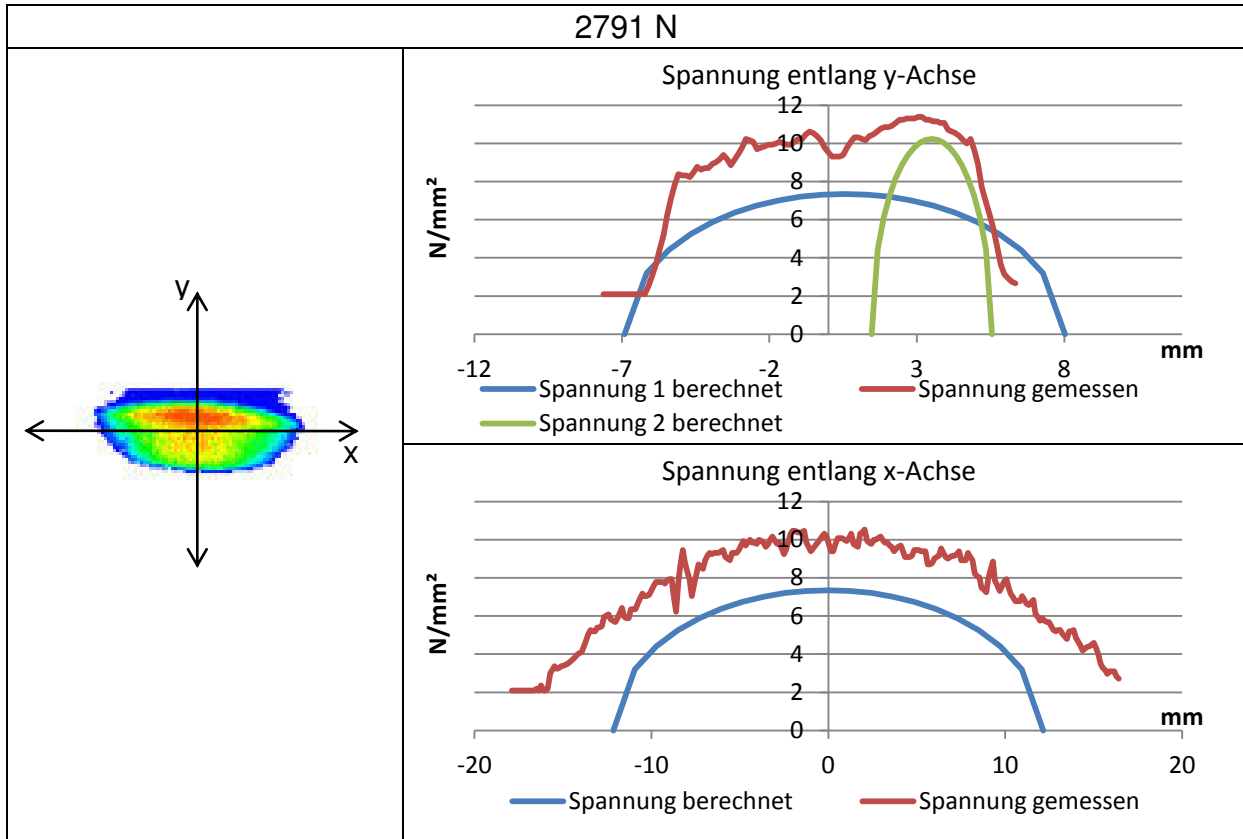


Tabelle 13: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FN, Folie Low

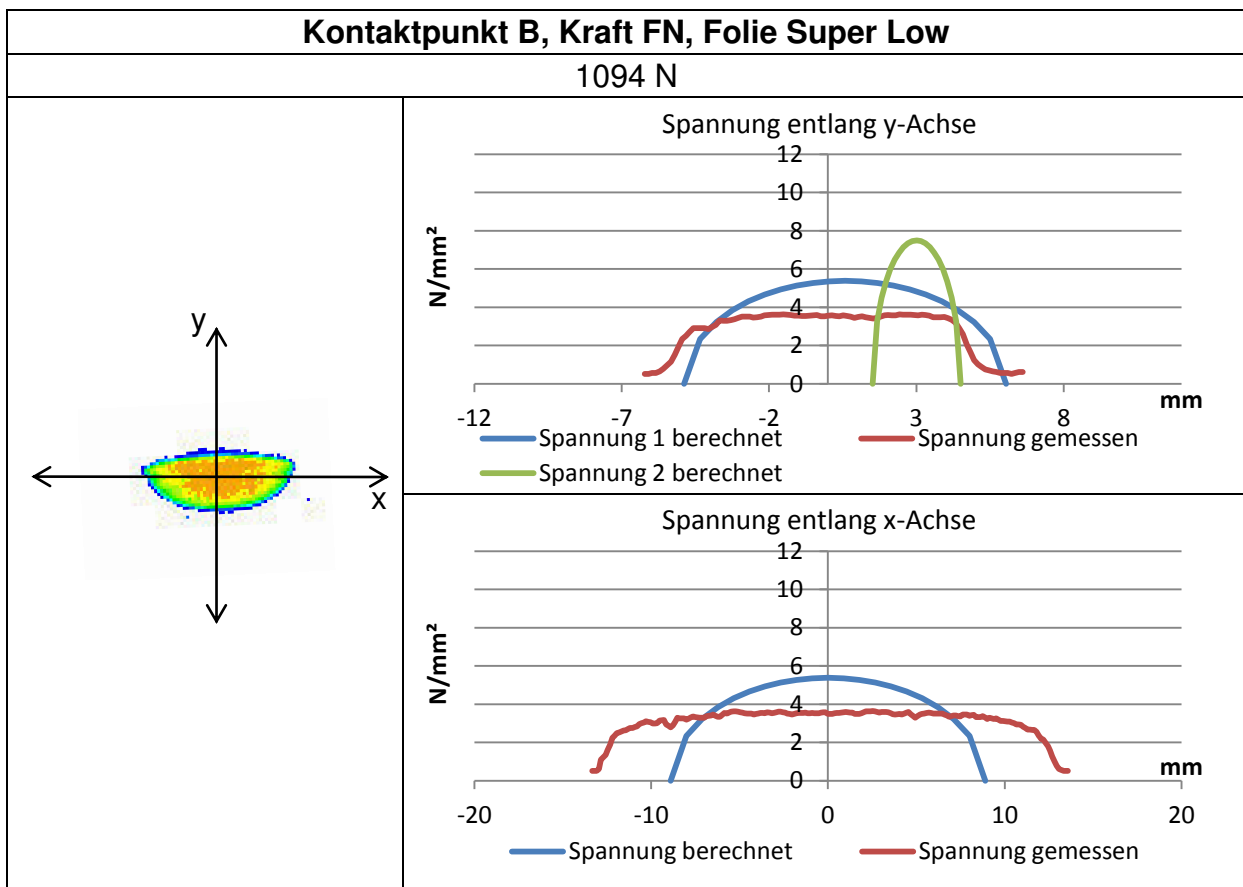
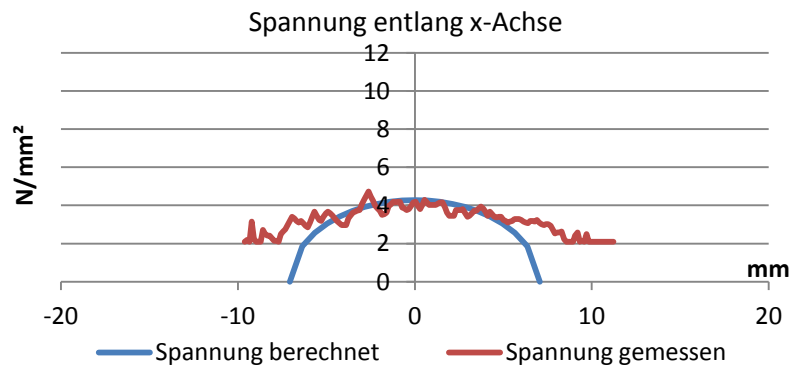
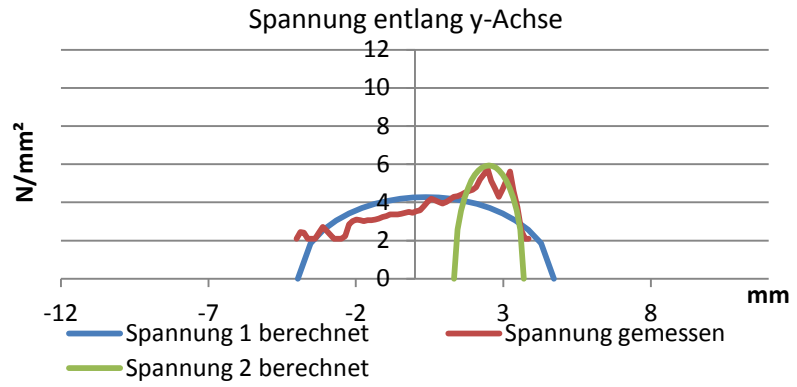
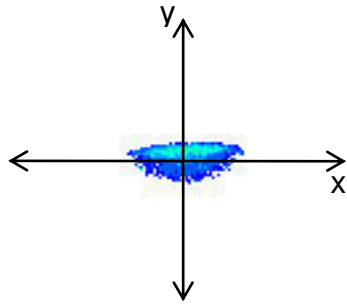


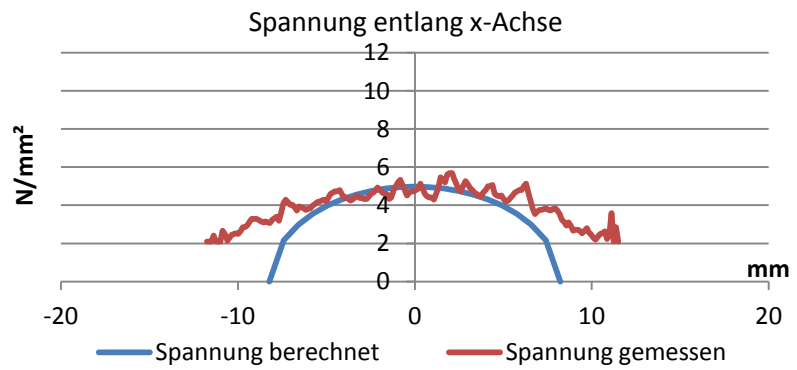
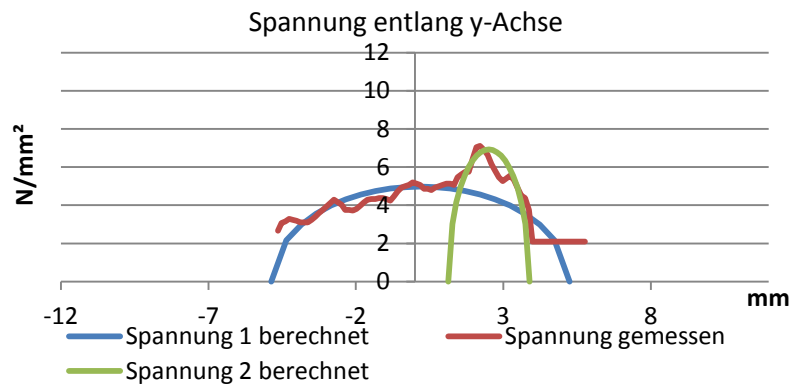
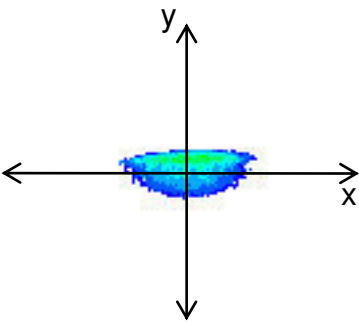
Tabelle 14: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FN, Folie Super Low

**Kontaktpunkt B, Kraft FN (Vergleich), Folie Low**

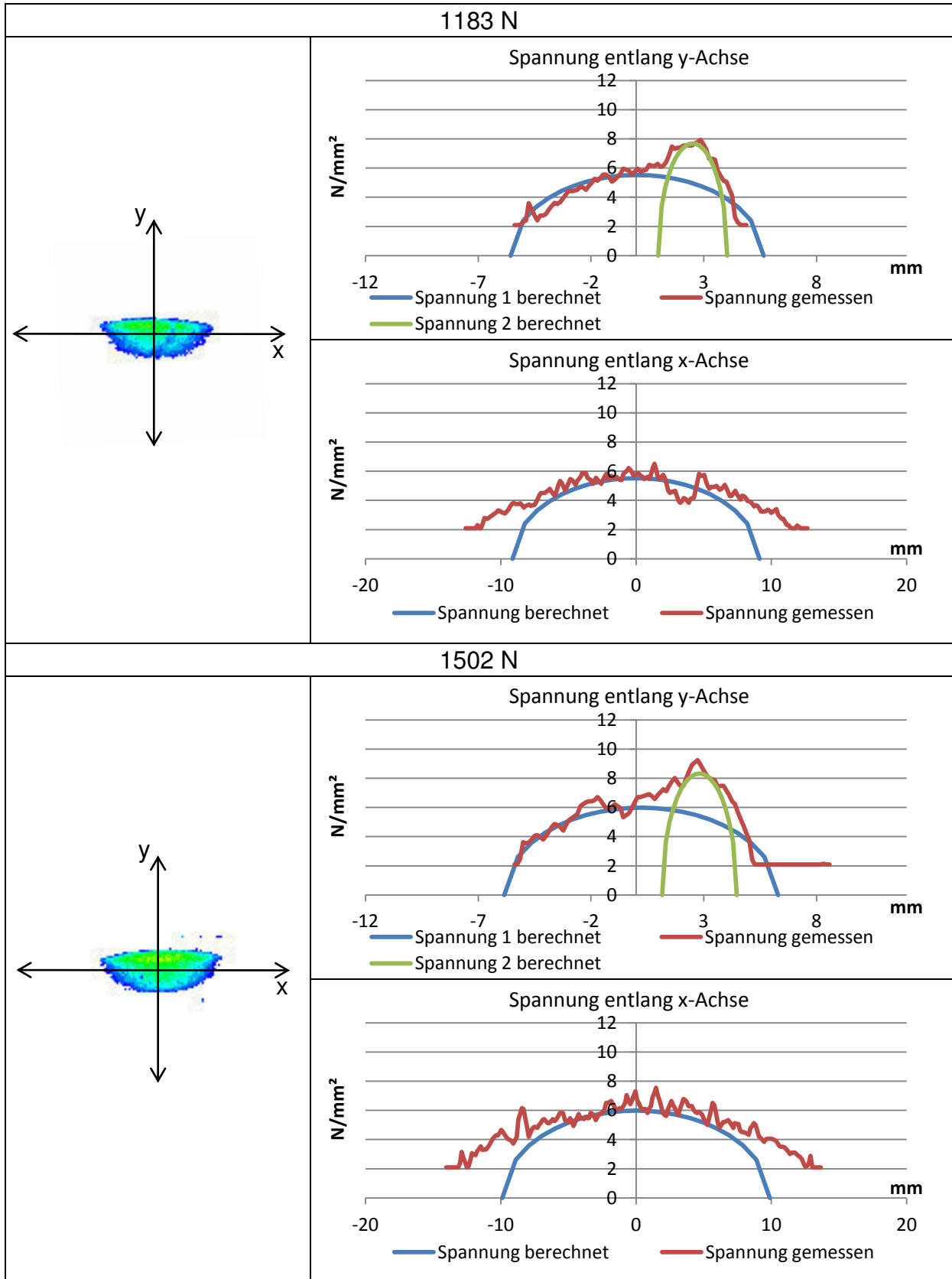
547 N

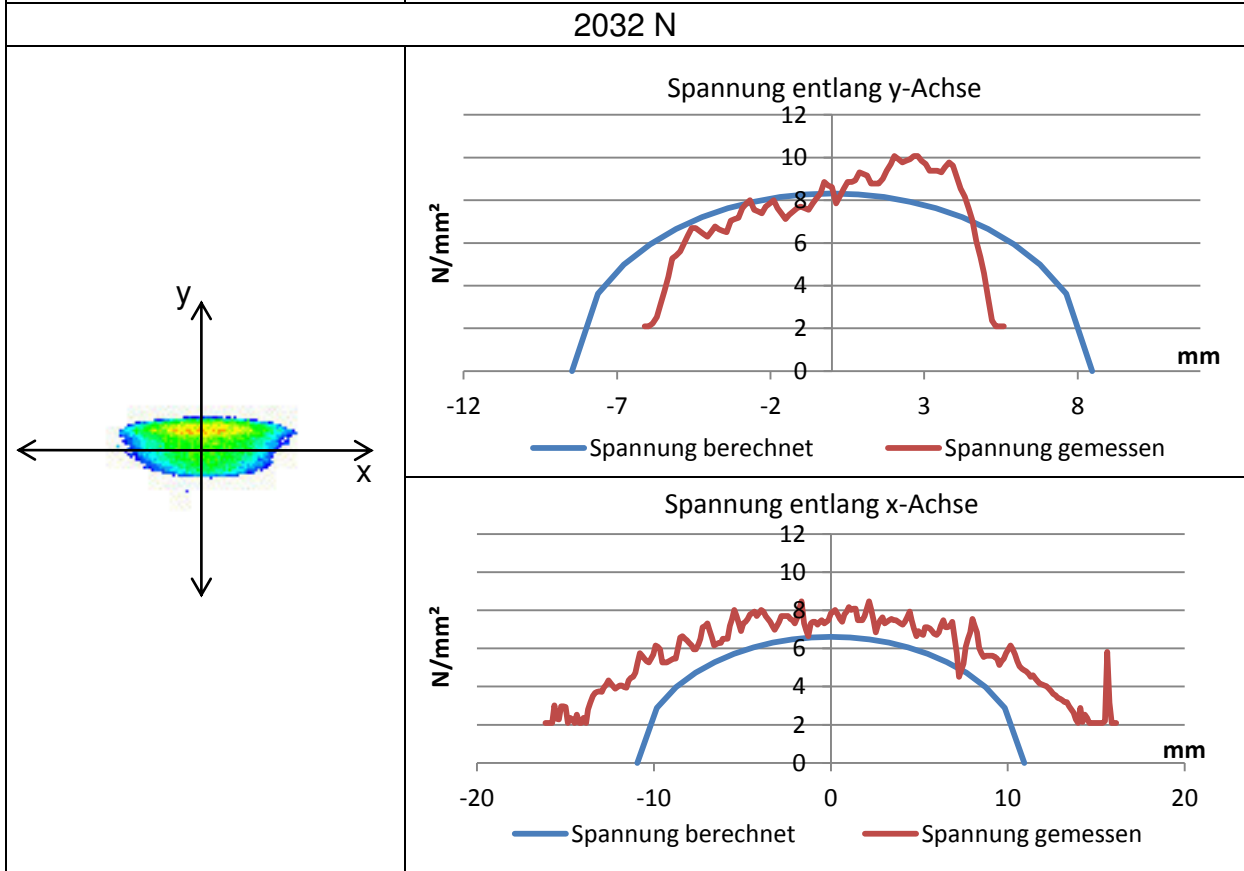
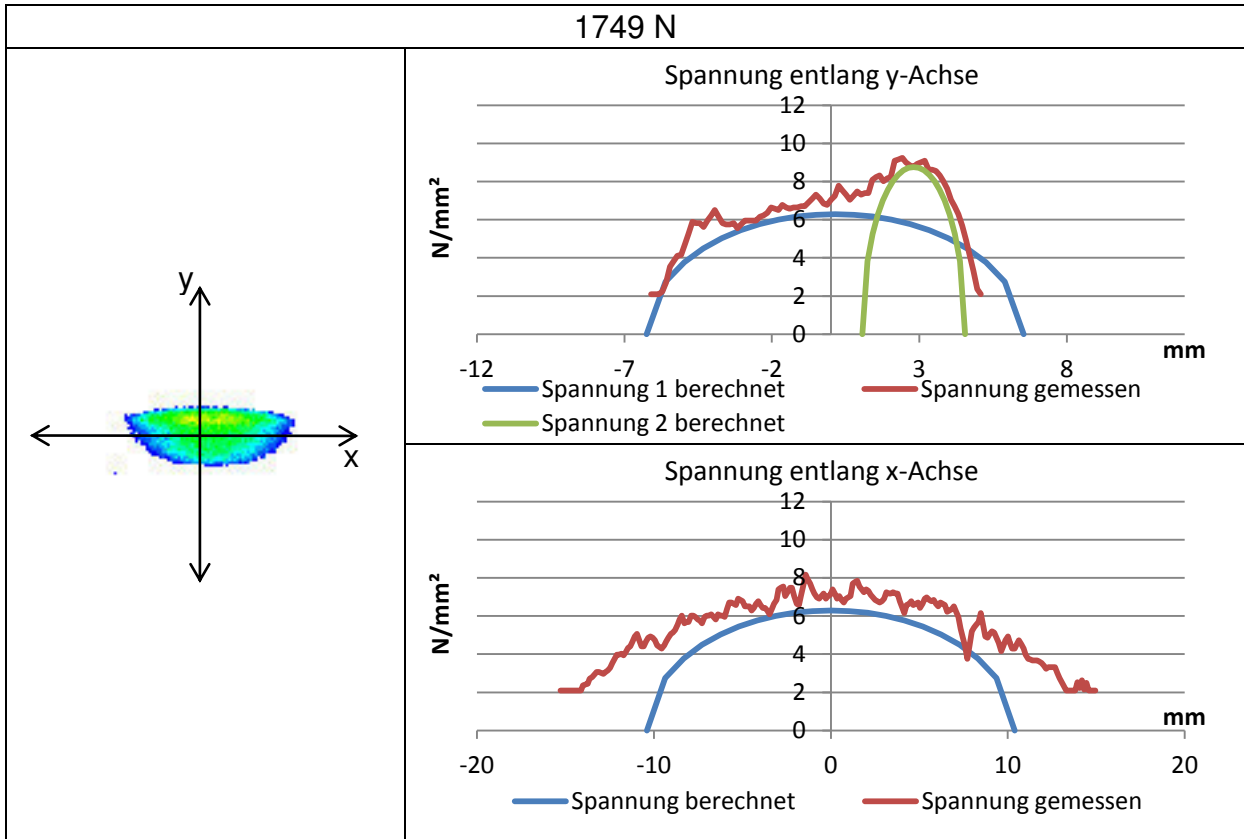


865 N









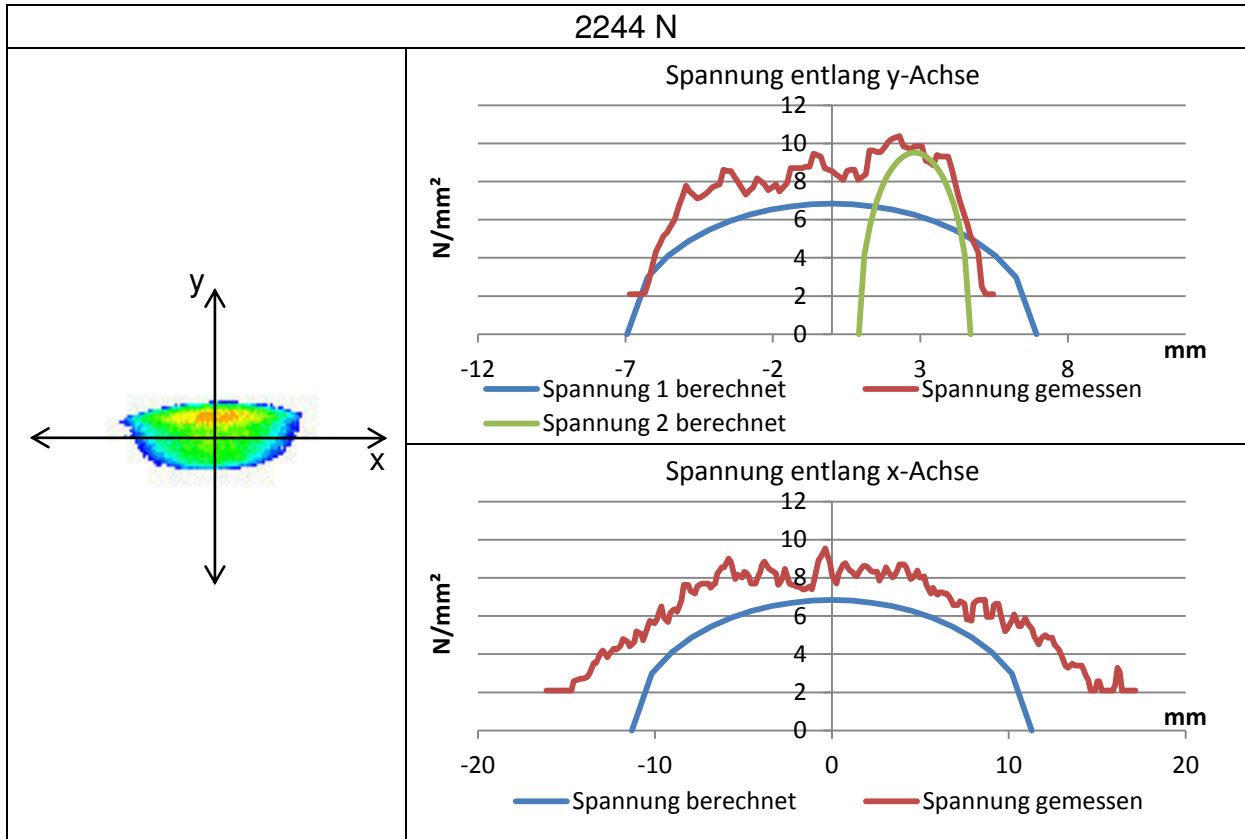


Tabelle 15: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FN (Vergleich), Folie Low

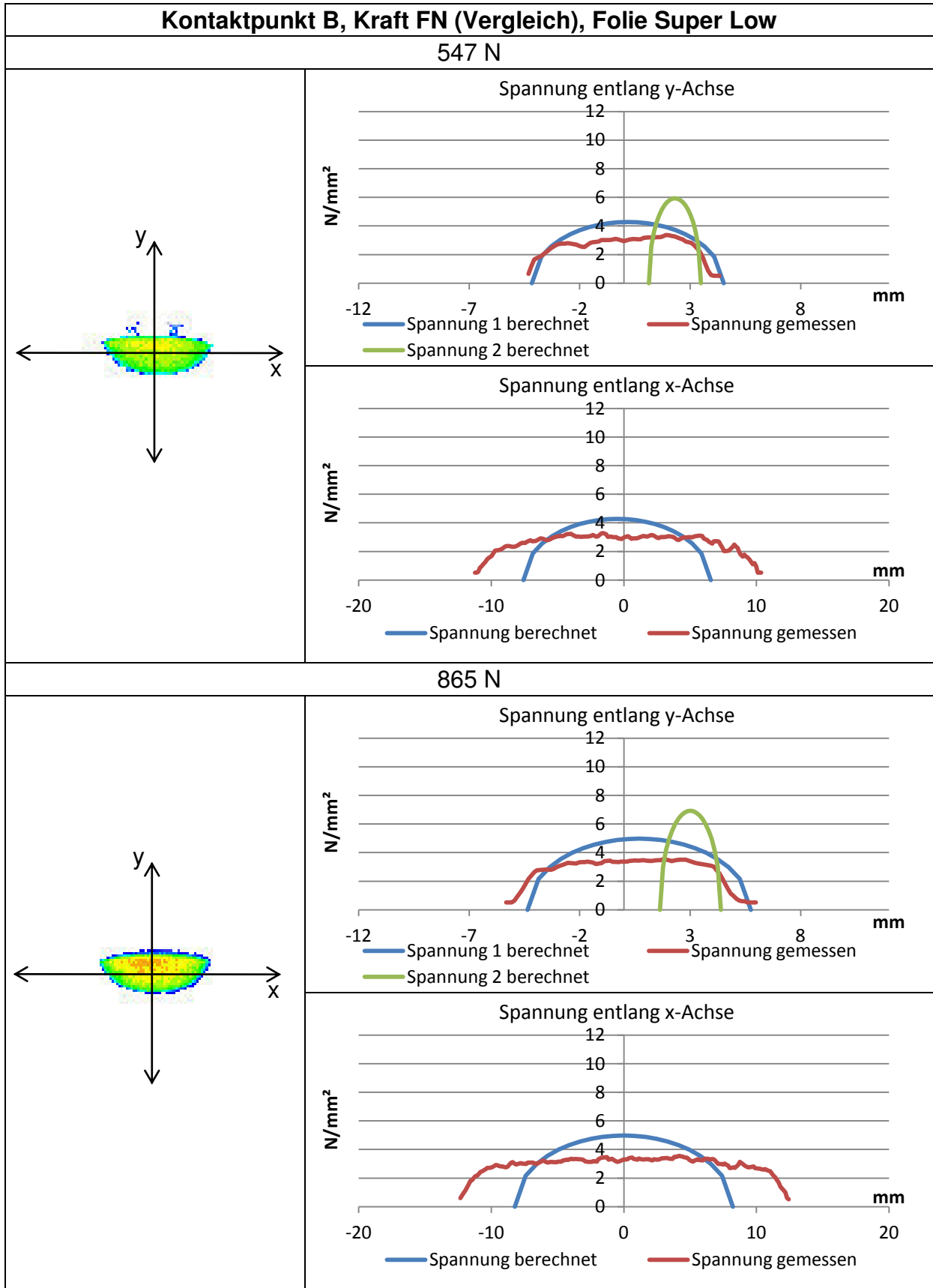
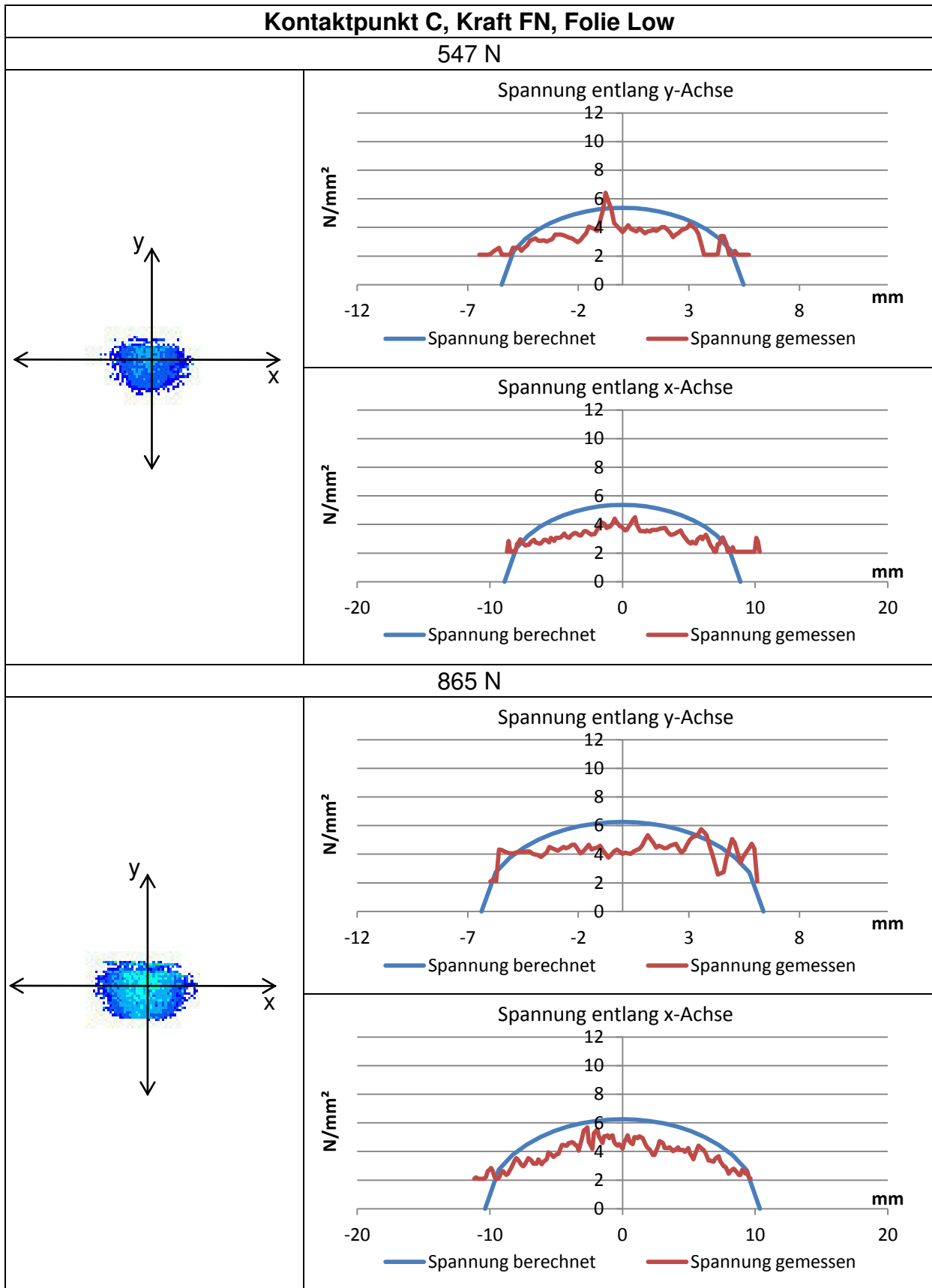
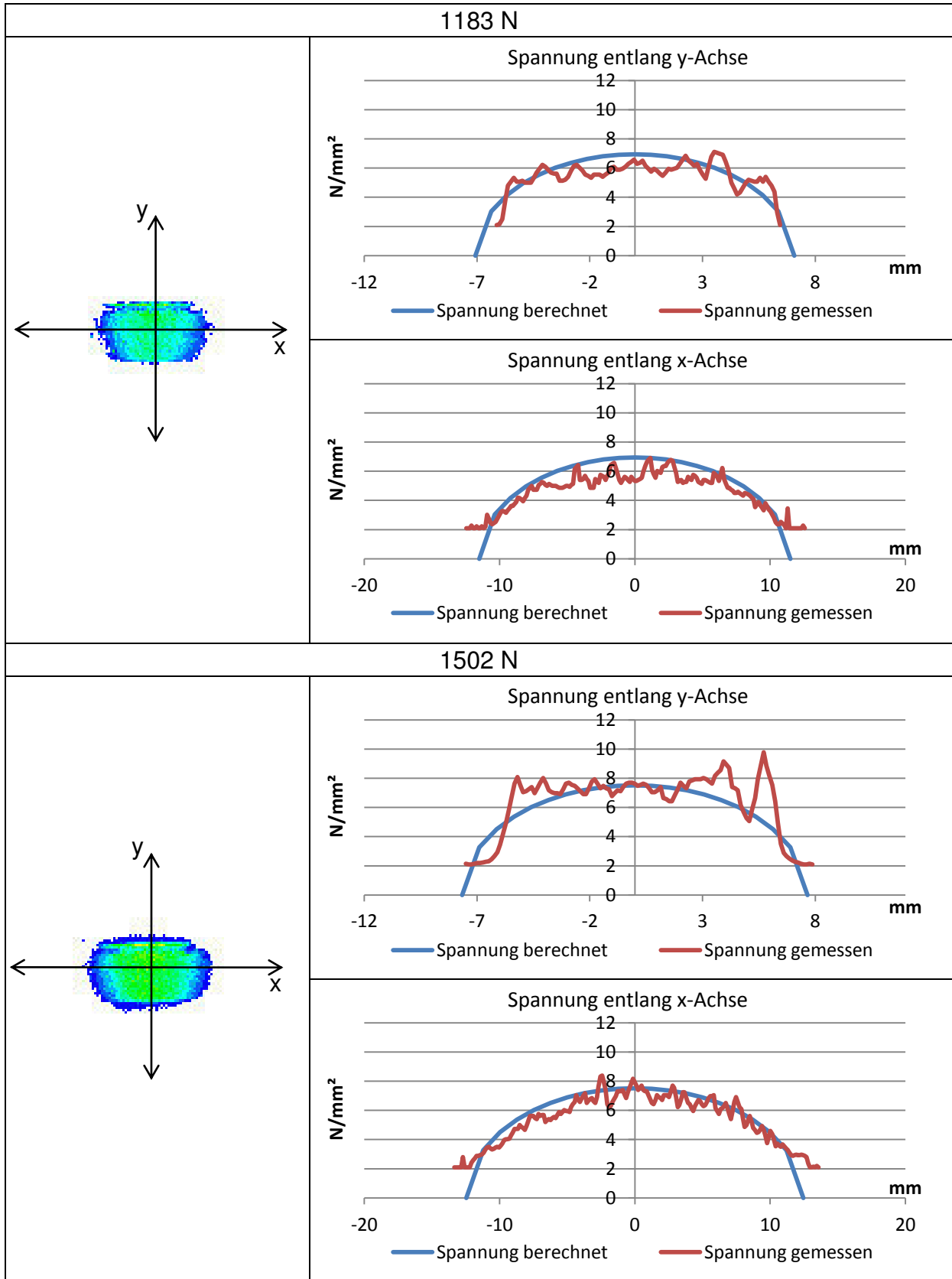
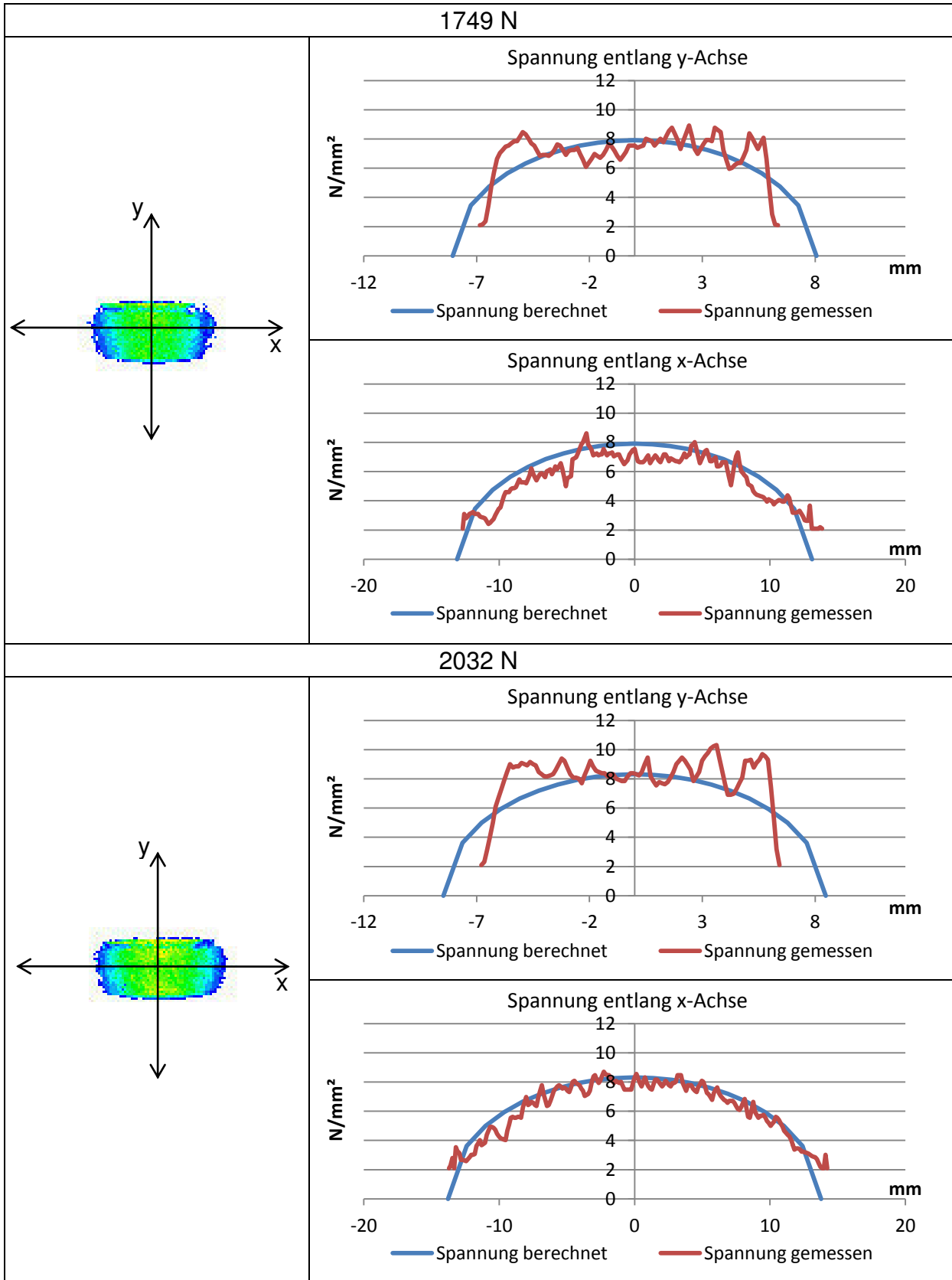


Tabelle 16: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FN (Vergleich), Folie Super Low

### 12.3.4 Kontaktpunkt C







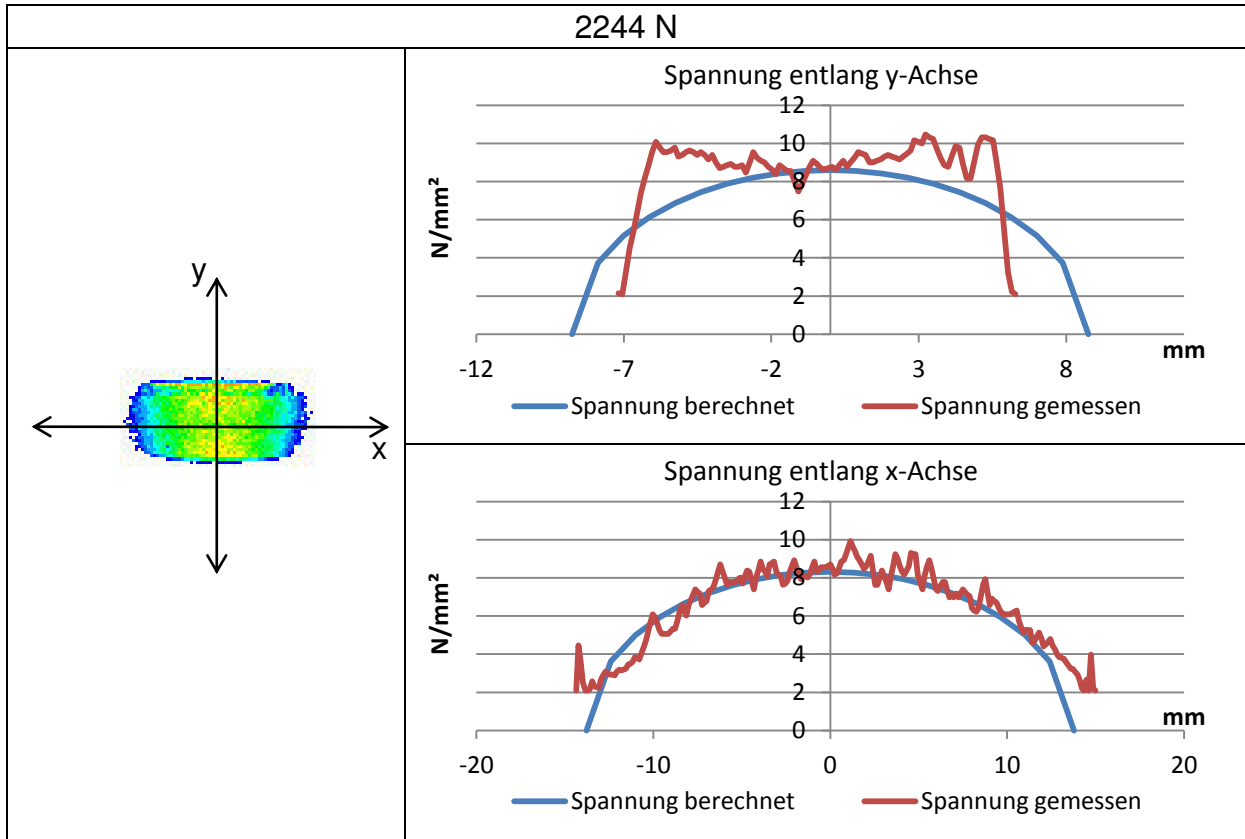
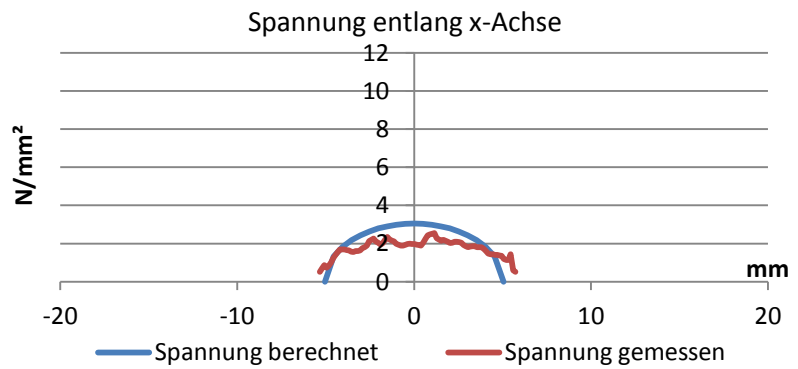
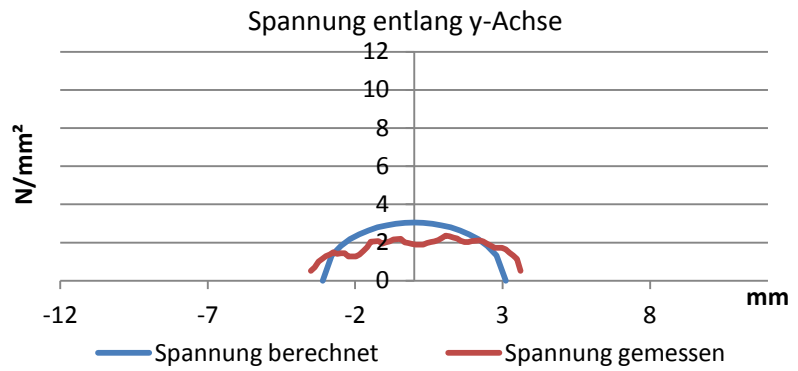
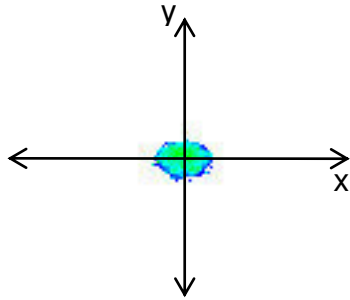


Tabelle 17: Spannung, Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Low

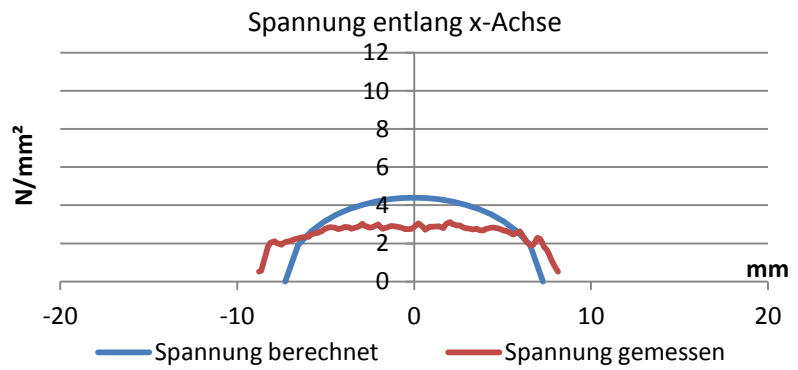
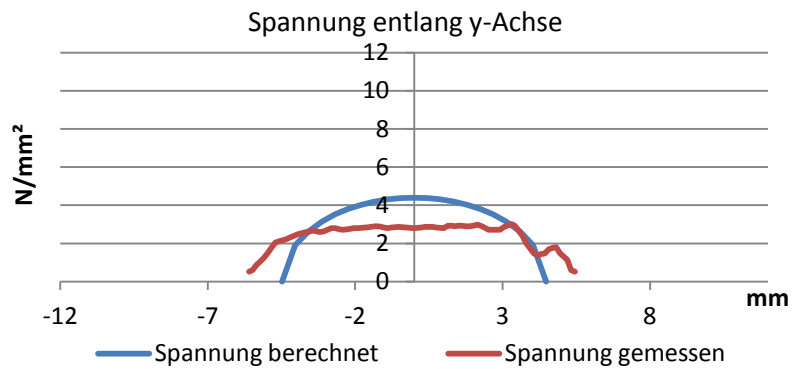
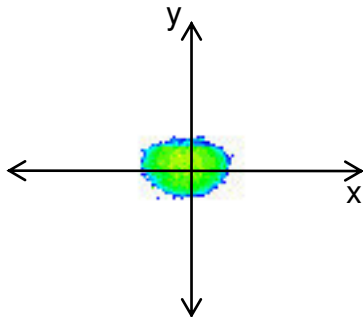


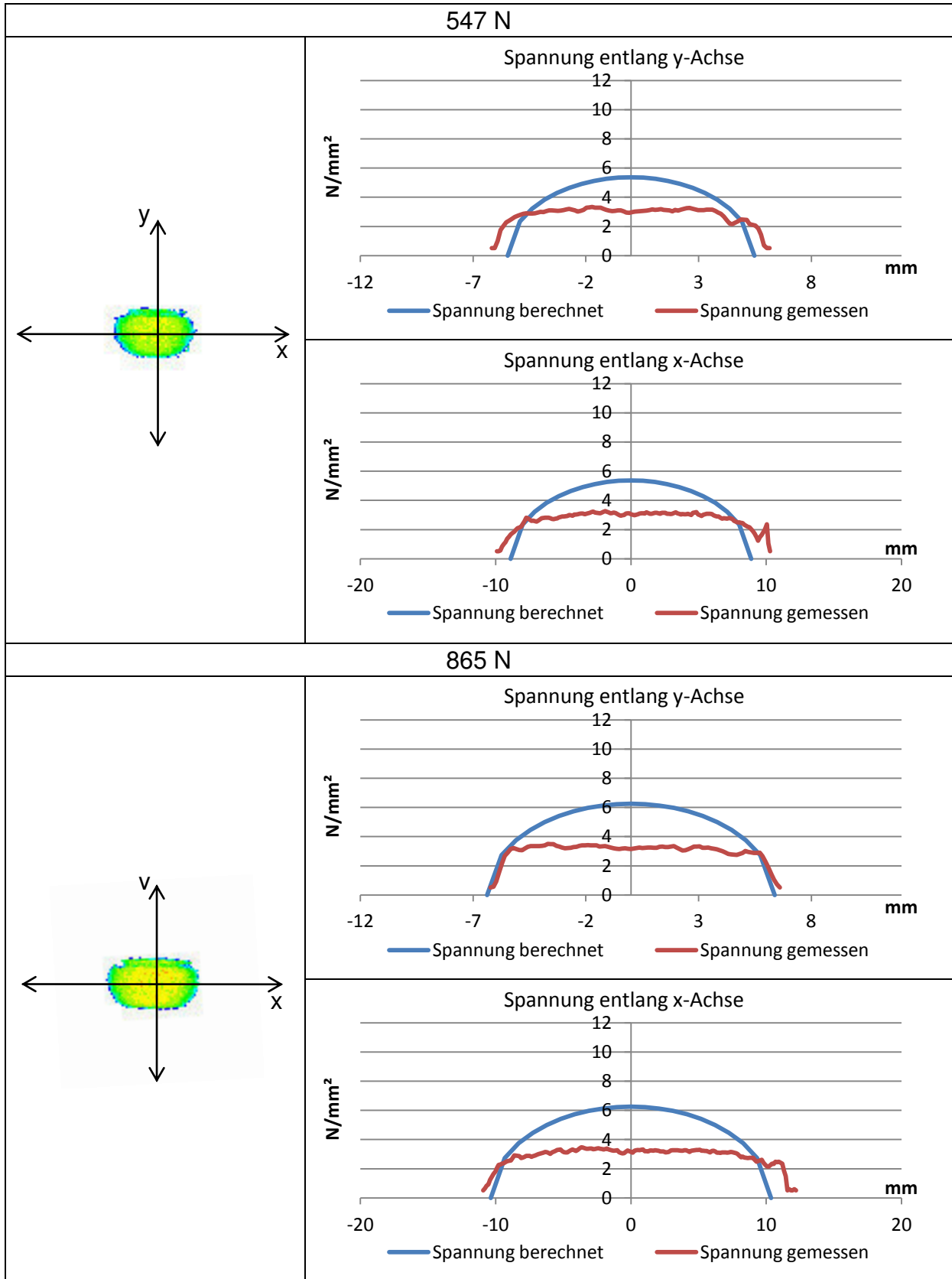
**Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Super Low**

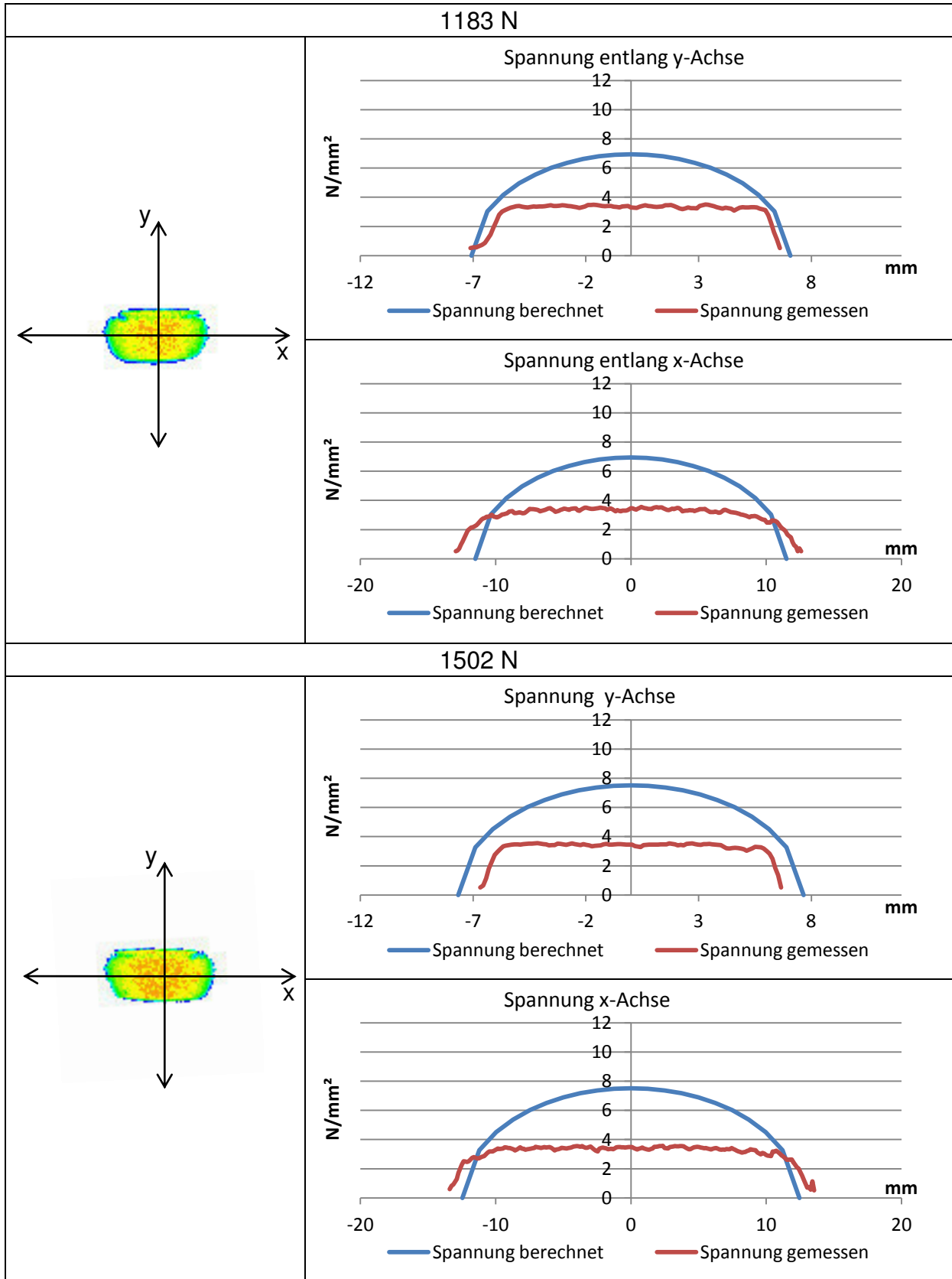
100 N



300 N







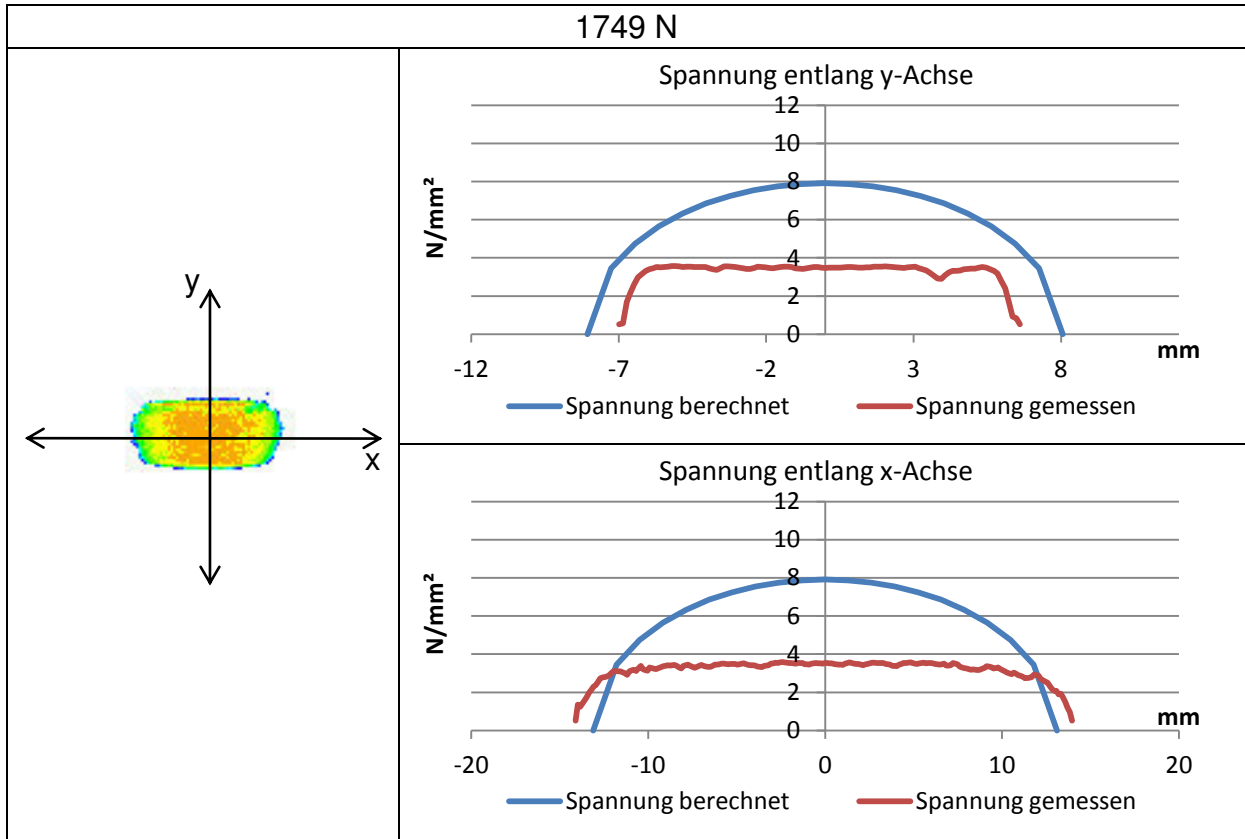
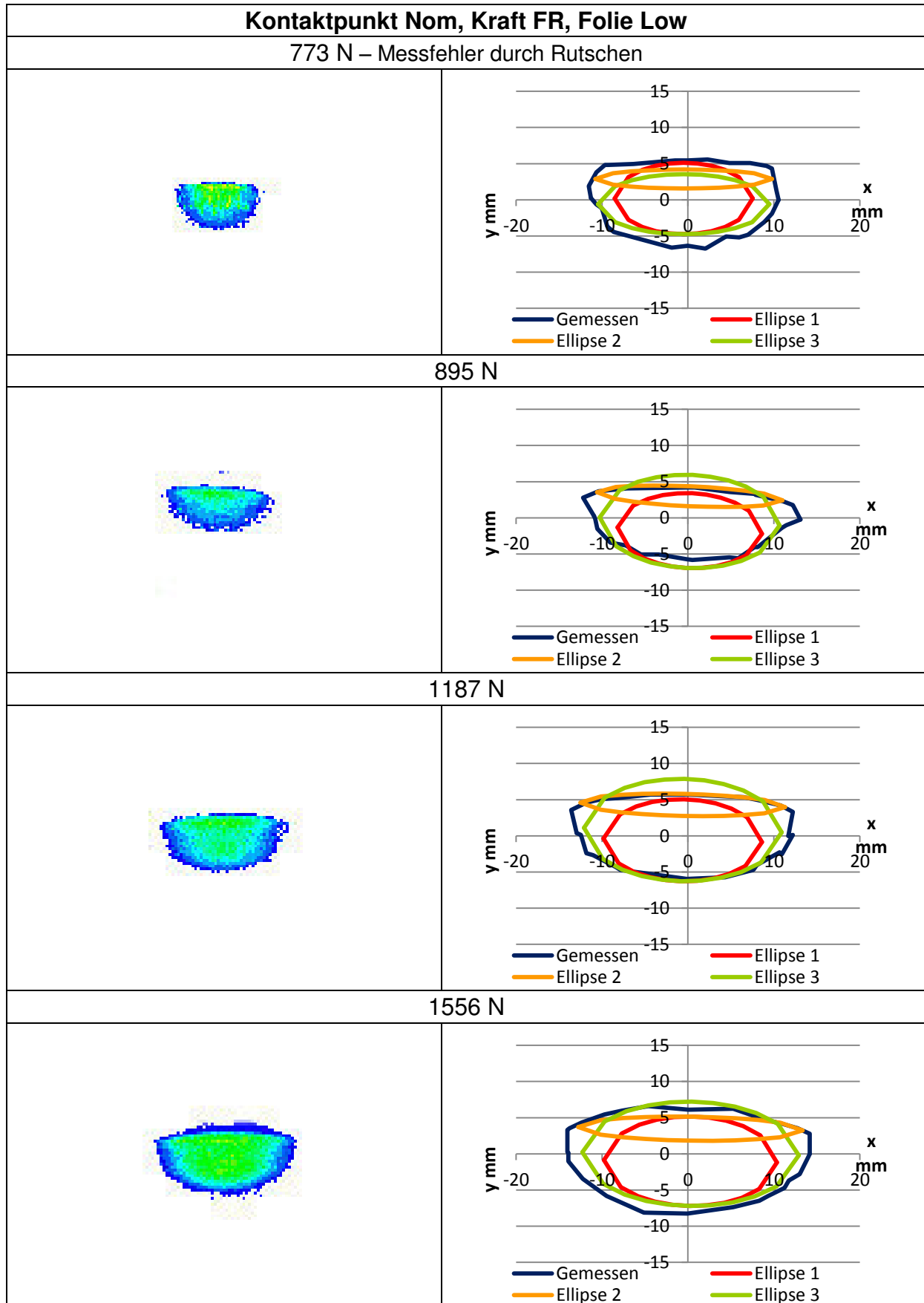


Tabelle 18: Spannung, Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Super Low

## 12.4 Kontaktflächen bei resultierender Kraft

Anschließend sind alle Diagramme der Messung der Größe und Form der Kontaktflächen, sowie die Berechnung bei resultierender Kraft dargestellt.

### 12.4.1 Kontaktpunkt Nom



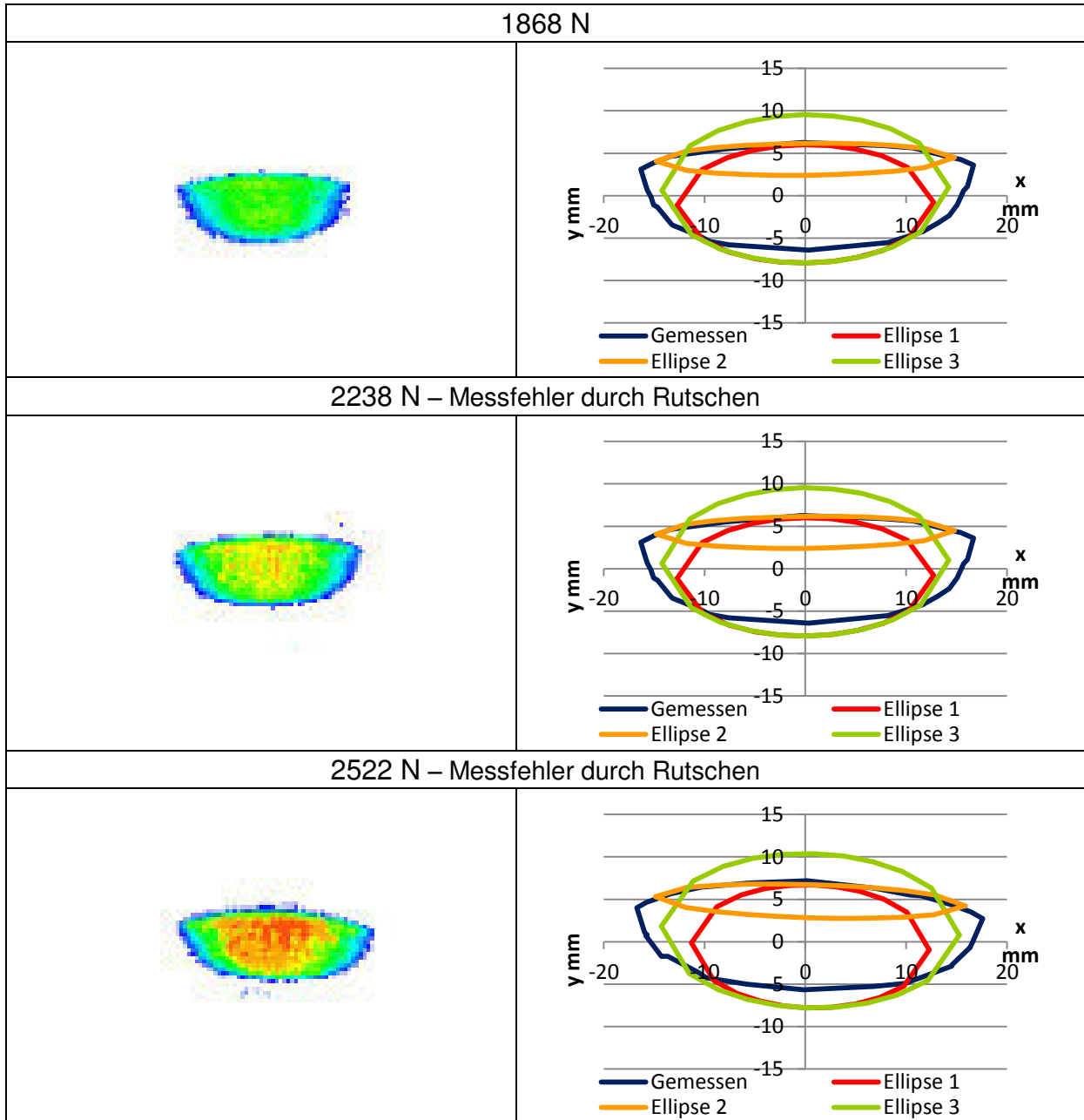
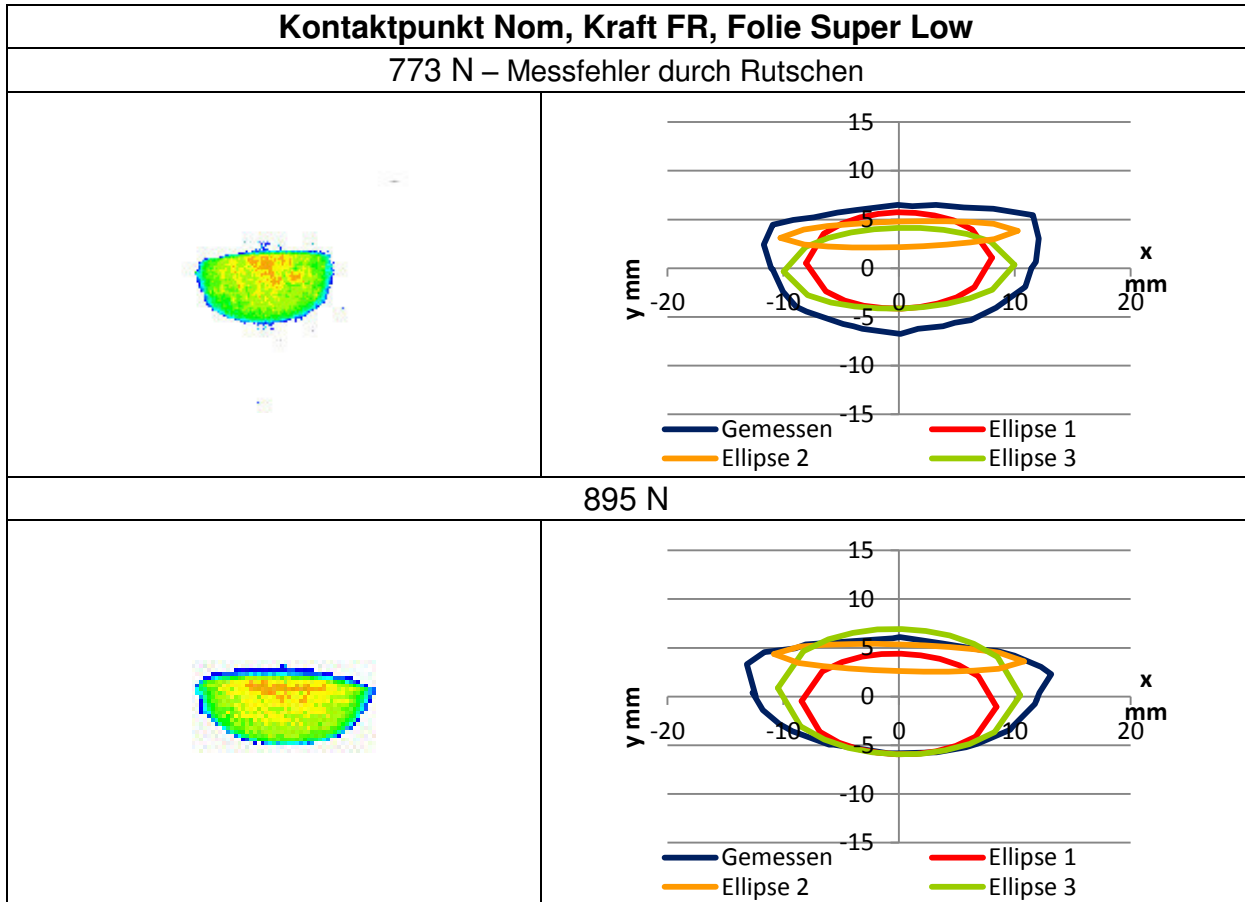


Tabelle 19: Kontaktfläche, Kontaktpunkt Nom, Kraft FR, Folie Low



**Tabelle 20: Kontaktfläche, Kontaktpunkt Nom, Kraft FR, Folie Super Low**



### 12.4.2 Kontaktpunkt A

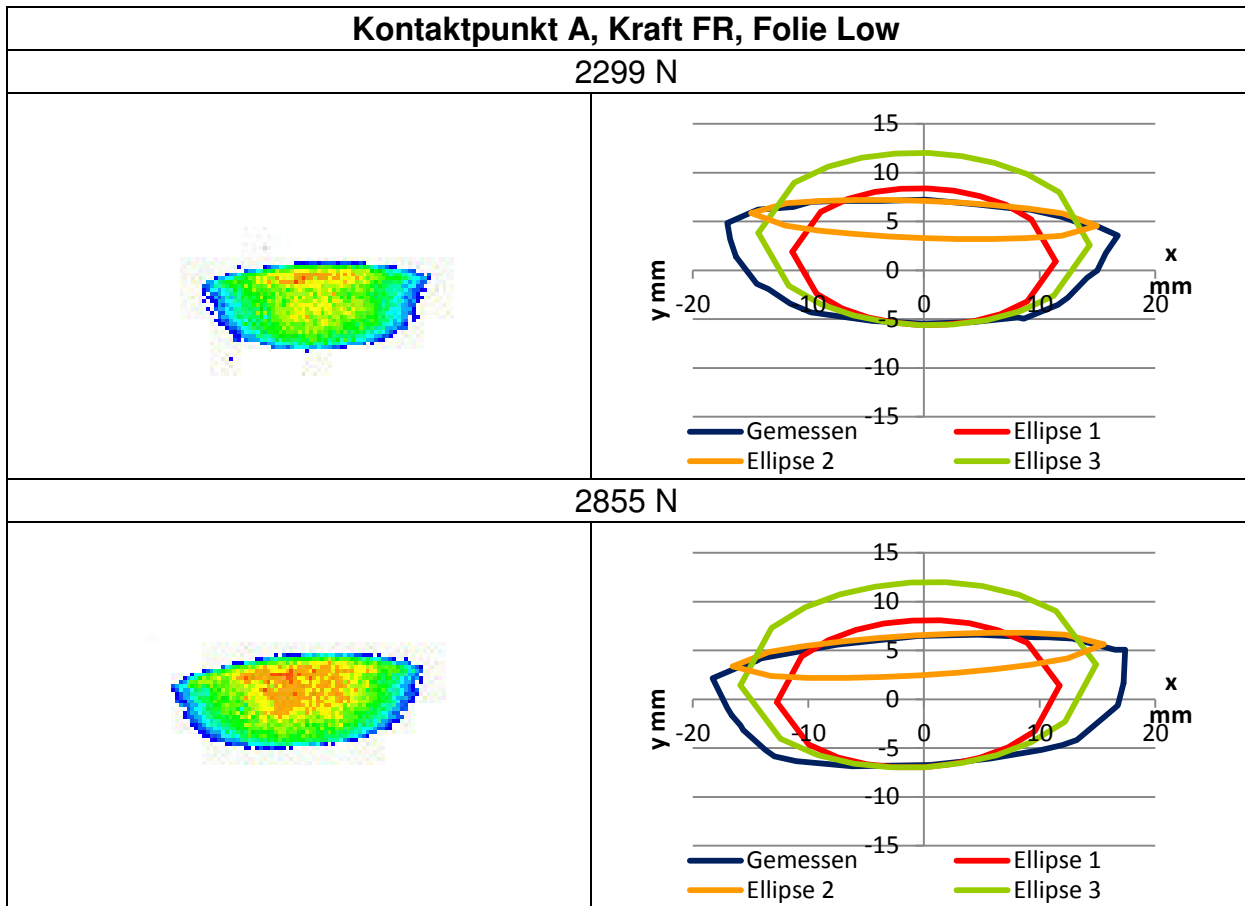
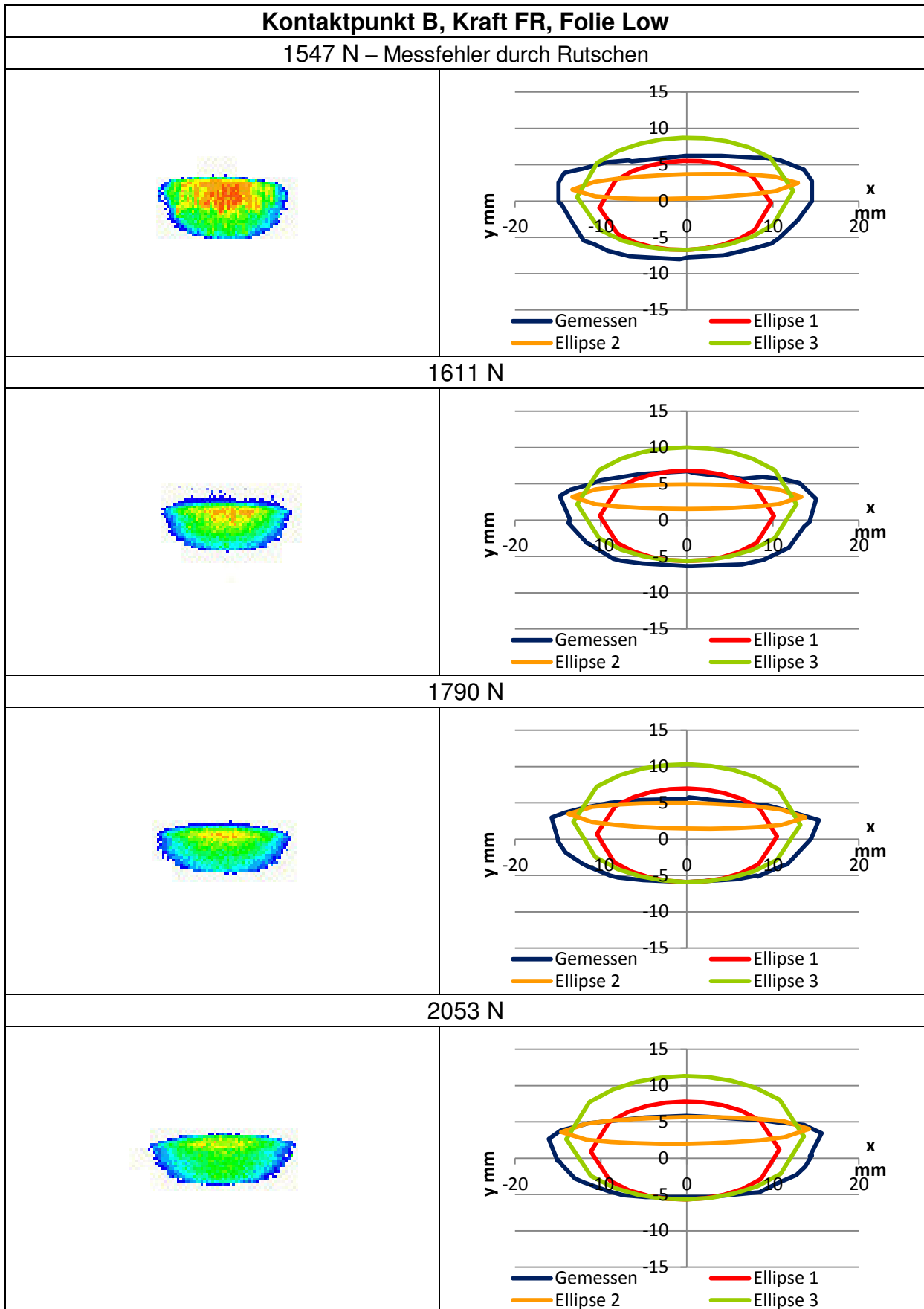


Tabelle 21: Kontaktfläche, Kontaktpunkt A, Kraft FR, Folie Low

### 12.4.3 Kontaktpunkt B



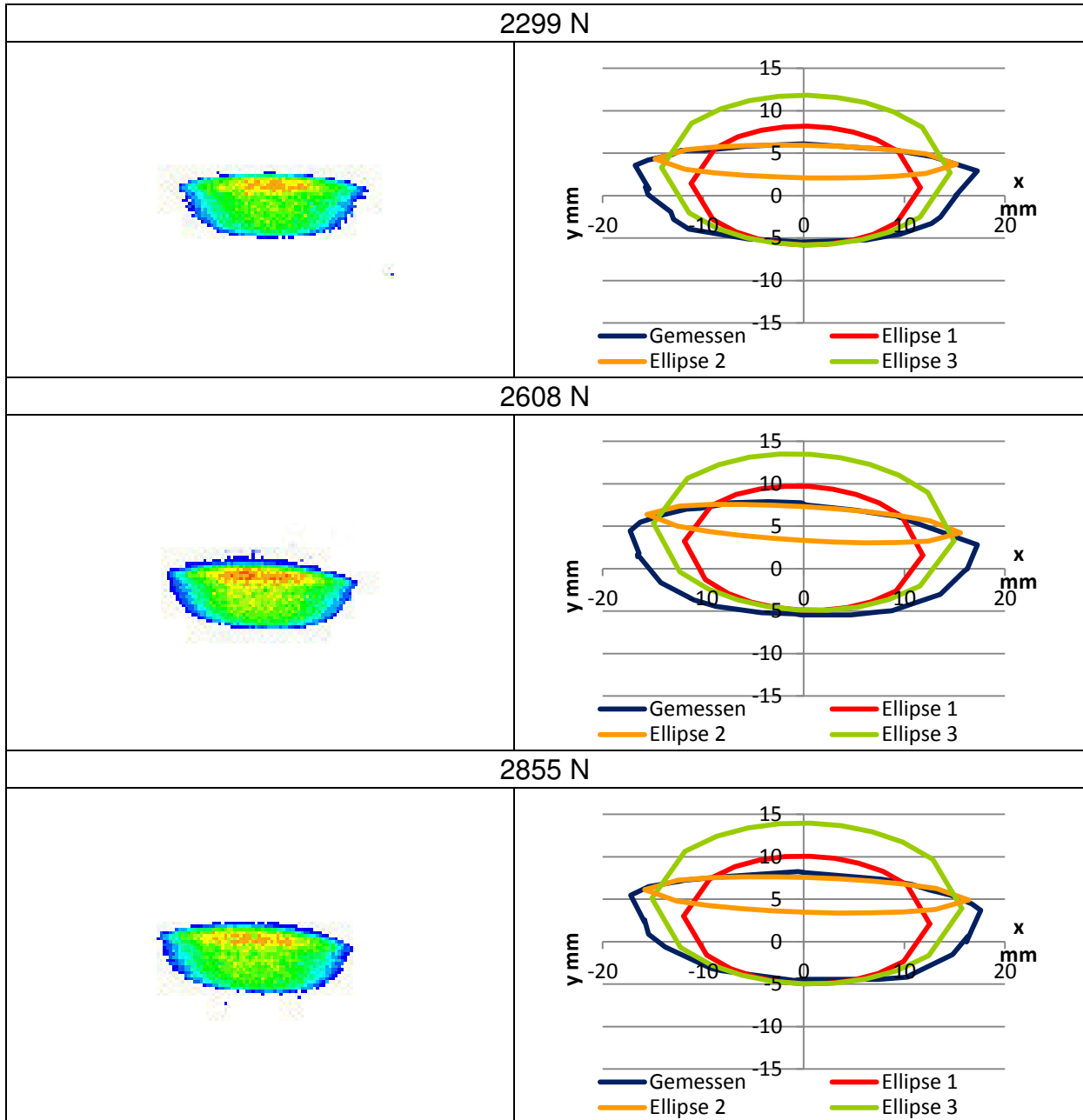
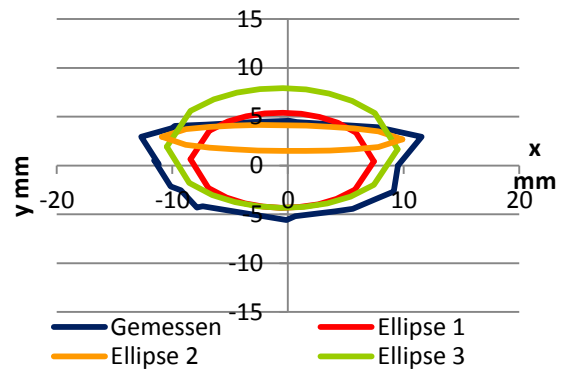
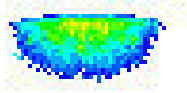


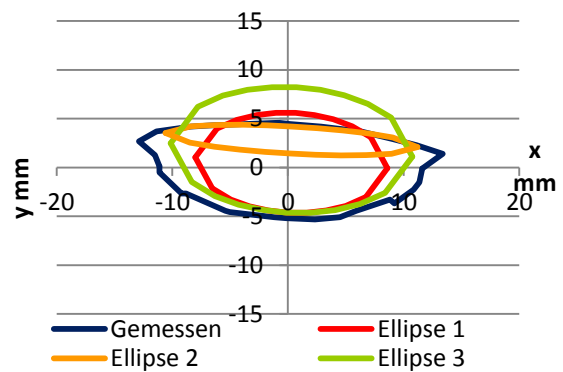
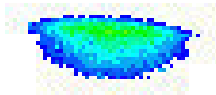
Tabelle 22: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FR, Folie Low

**Kontaktpunkt B, Kraft FR (Vergleich), Folie Low**

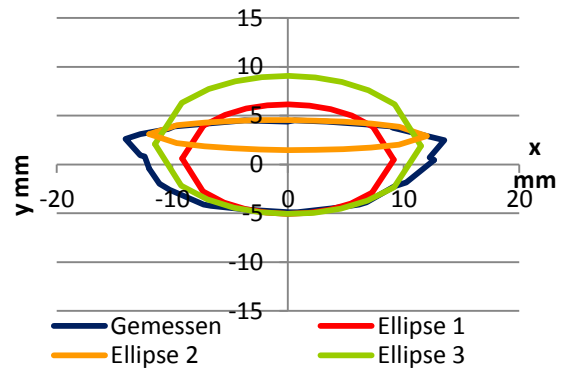
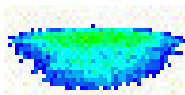
773 N – Messfehler durch Rutschen



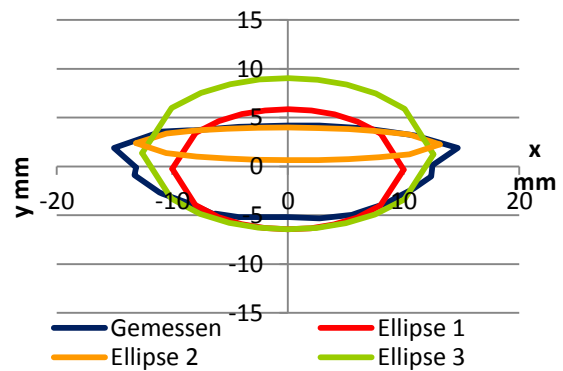
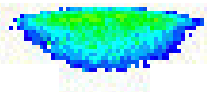
895 N



1187 N



1556 N



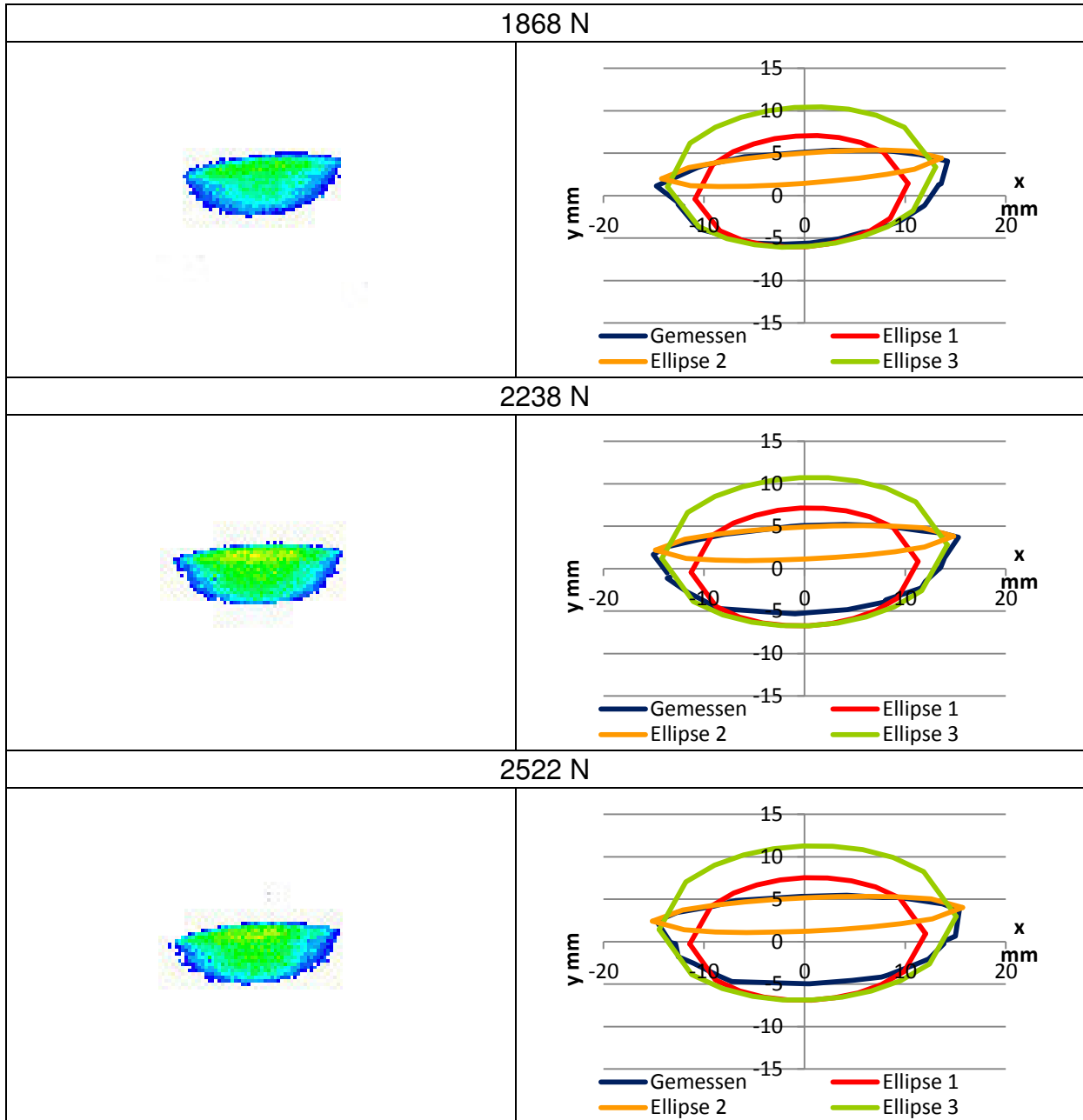


Tabelle 23: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FR (Vergleich), Folie Low

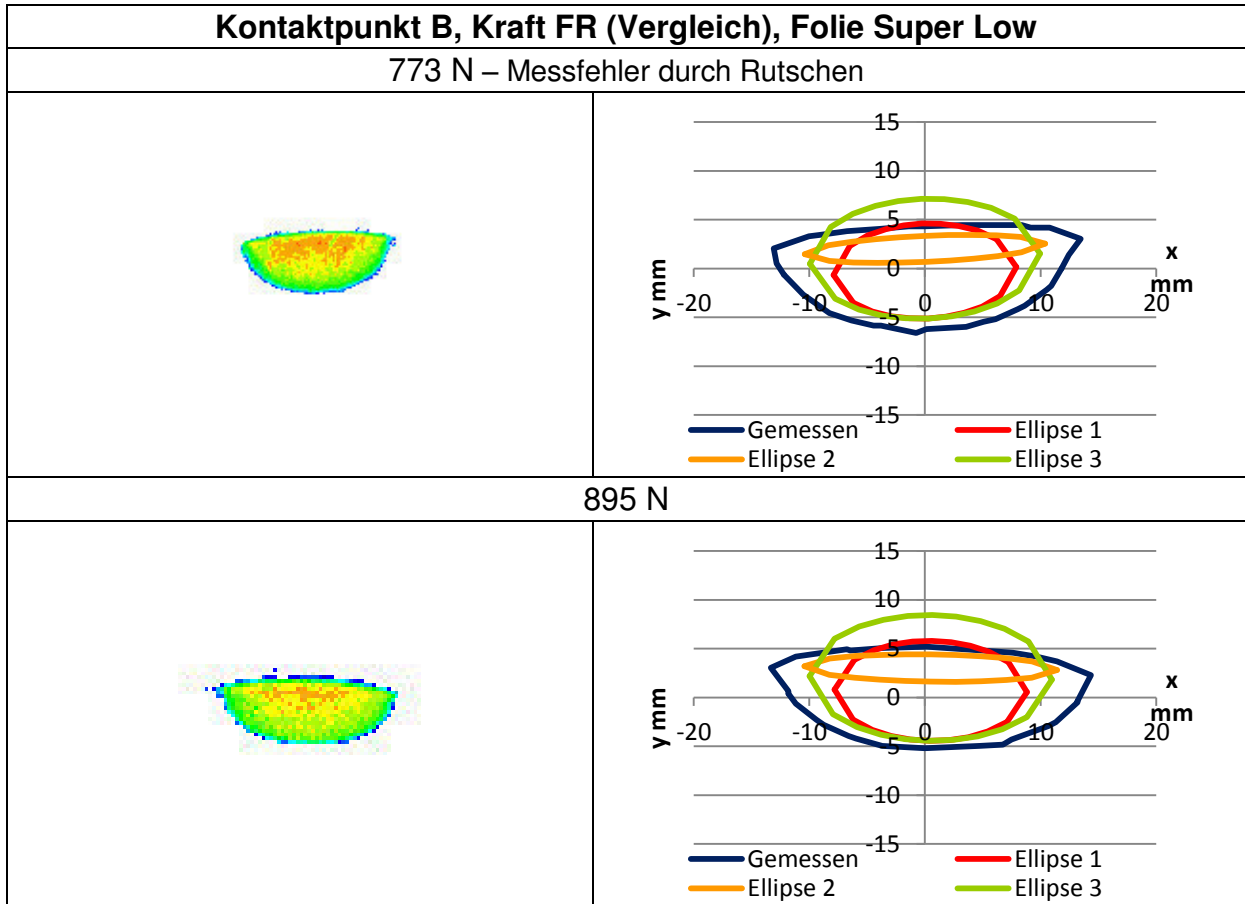
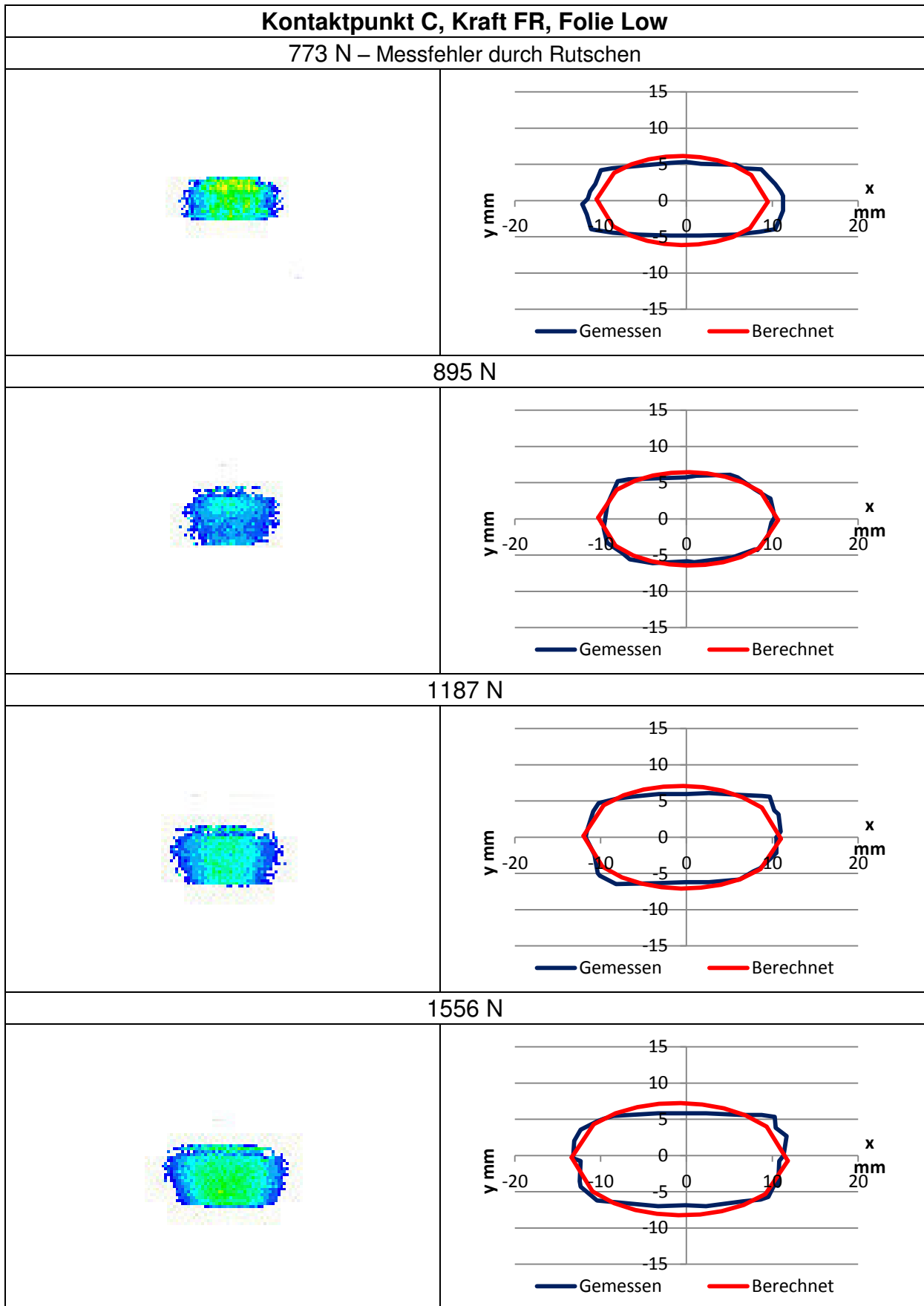


Tabelle 24: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FR (Vergleich), Folie Super Low

### 12.4.4 Kontaktpunkt C



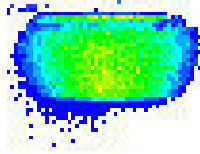
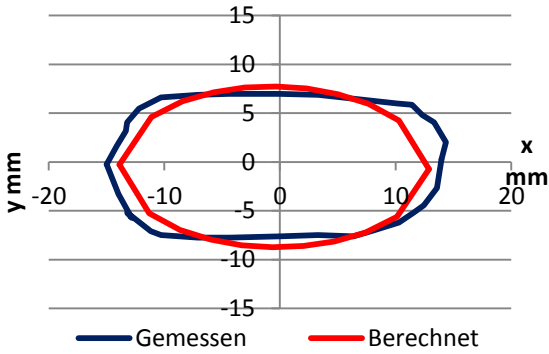
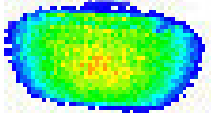
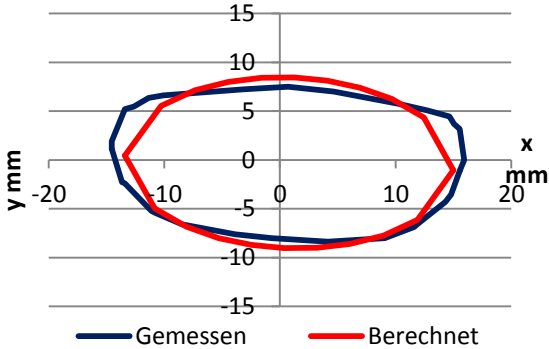
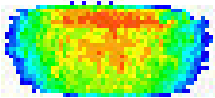
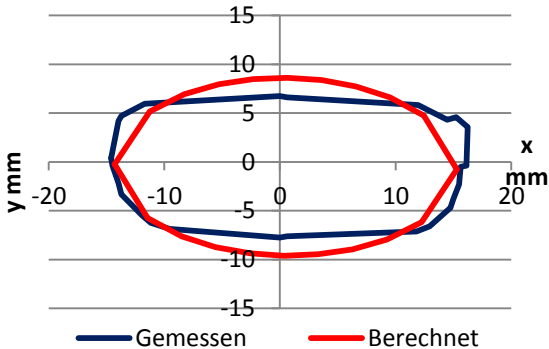
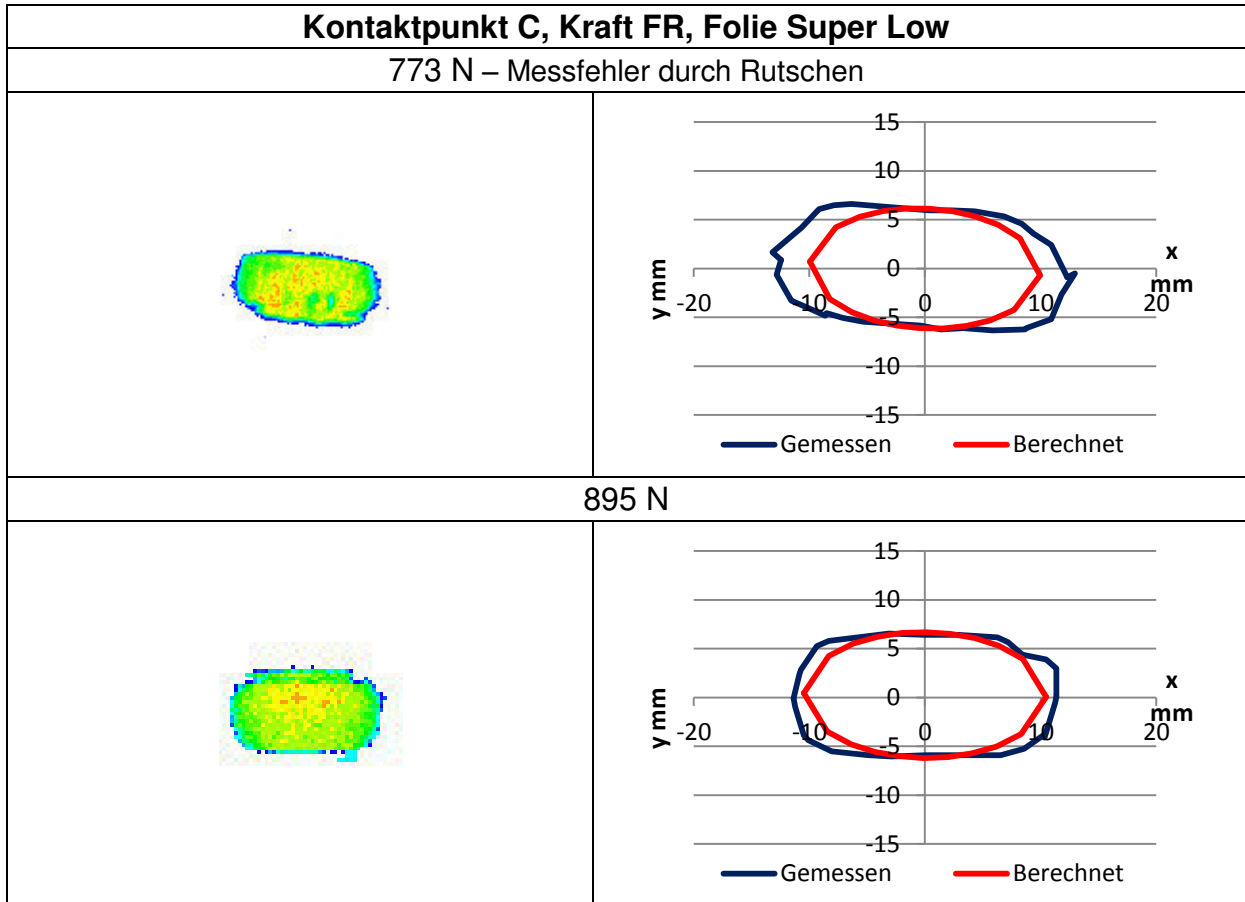
1868 N	
	
2238 N – Messfehler durch Rutschen	
	
2522 N – Messfehler durch Rutschen	
	

Tabelle 25: Kontaktfläche, Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Low



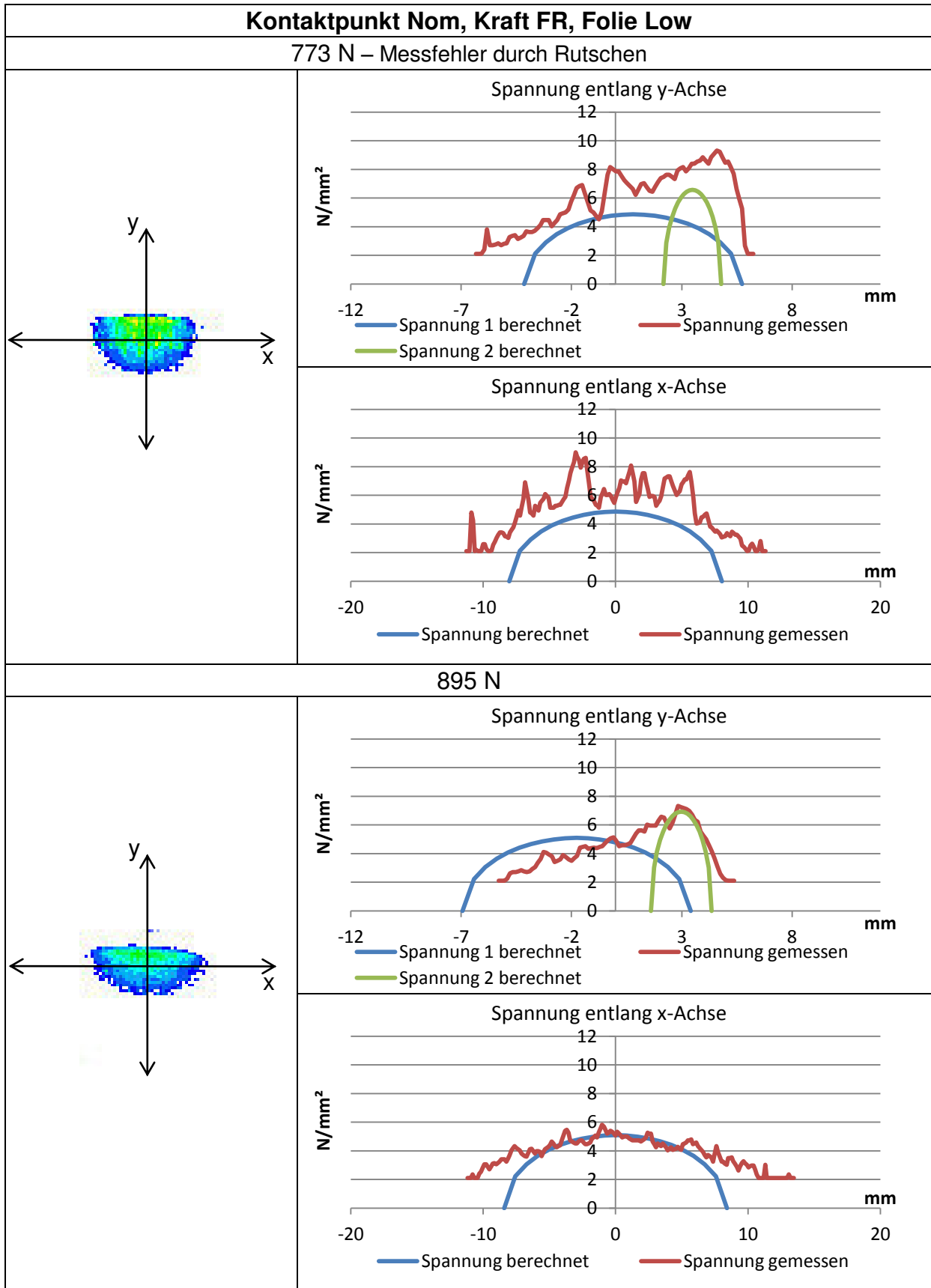


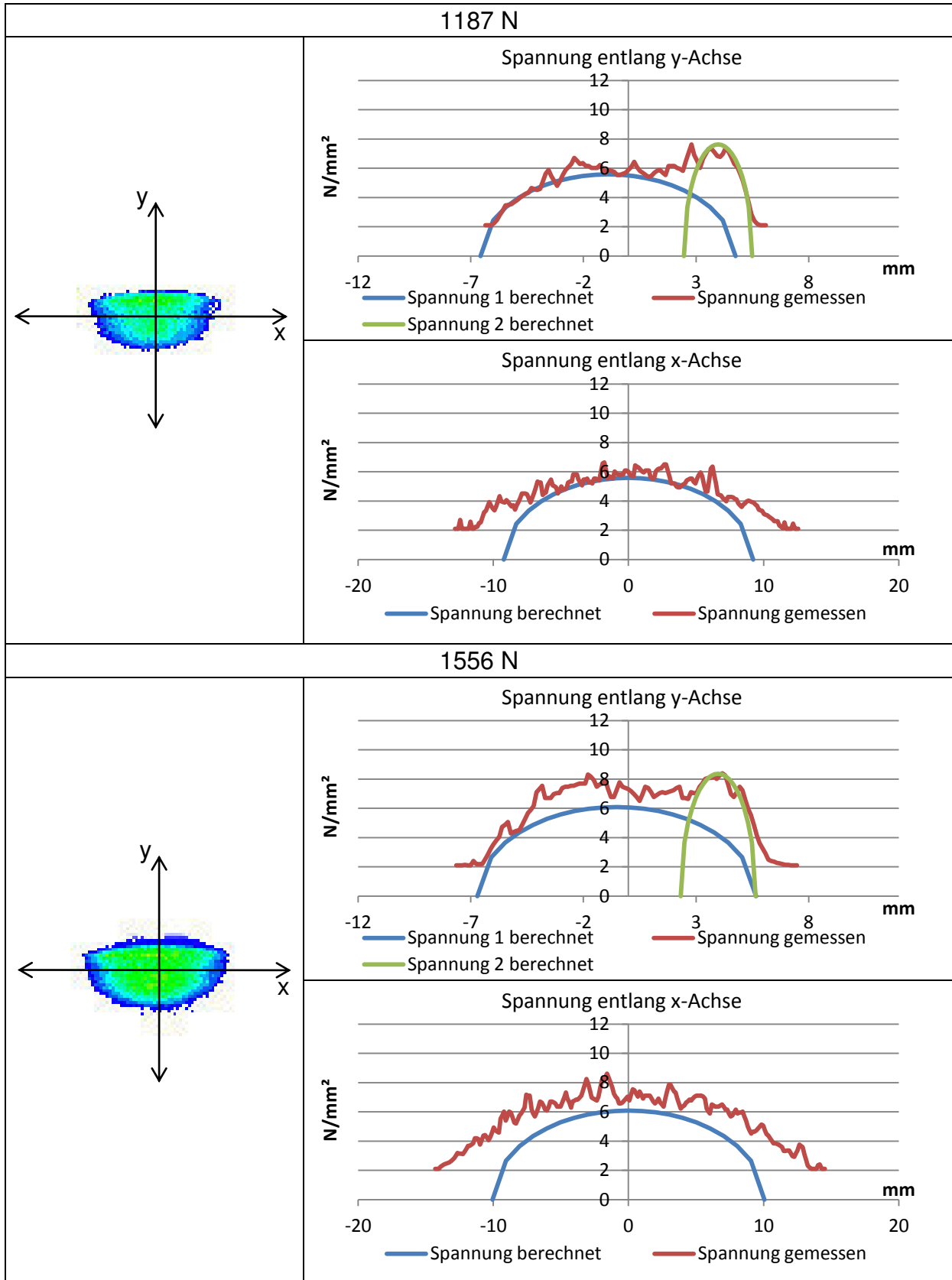
**Tabelle 26: Kontaktfläche, Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Super Low**

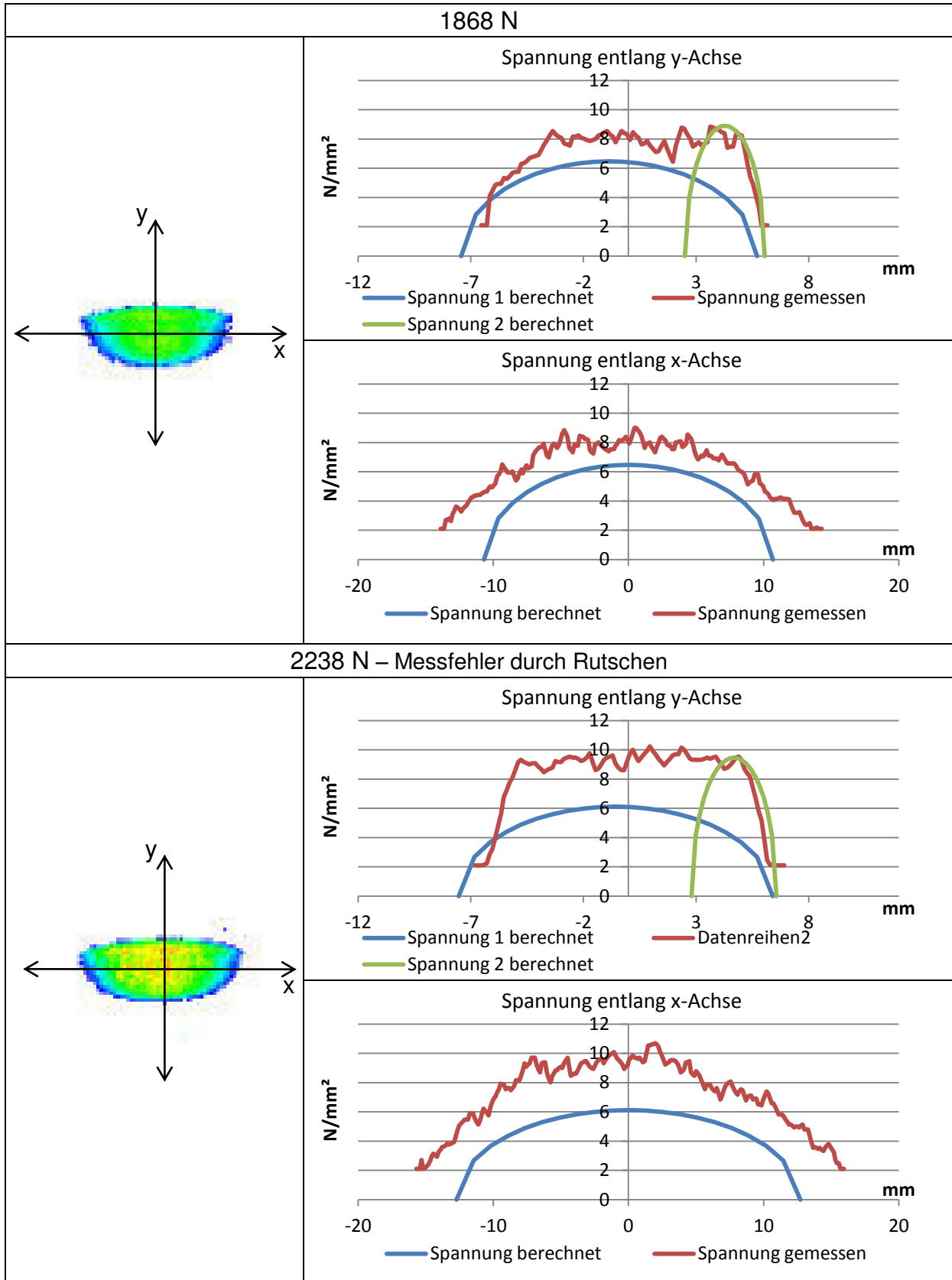
## 12.5 Spannungen bei resultierender Kraft

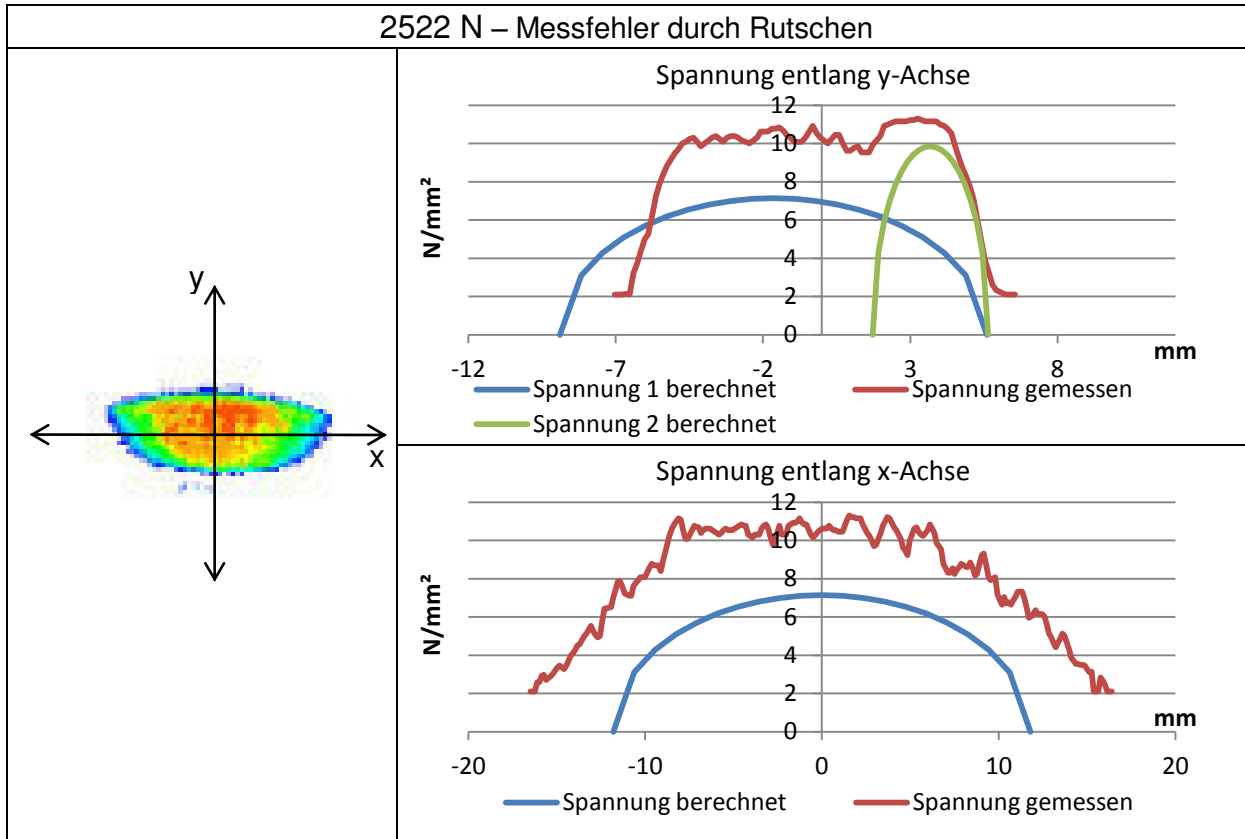
Die nachfolgenden Tabellen zeigen die gemessenen und berechneten Spannungen bei resultierender Kraft.

### 12.5.1 Kontaktpunkt Nom









**Tabelle 27: Spannung, Kontaktpunkt Nom, Kraft FR, Folie Low**

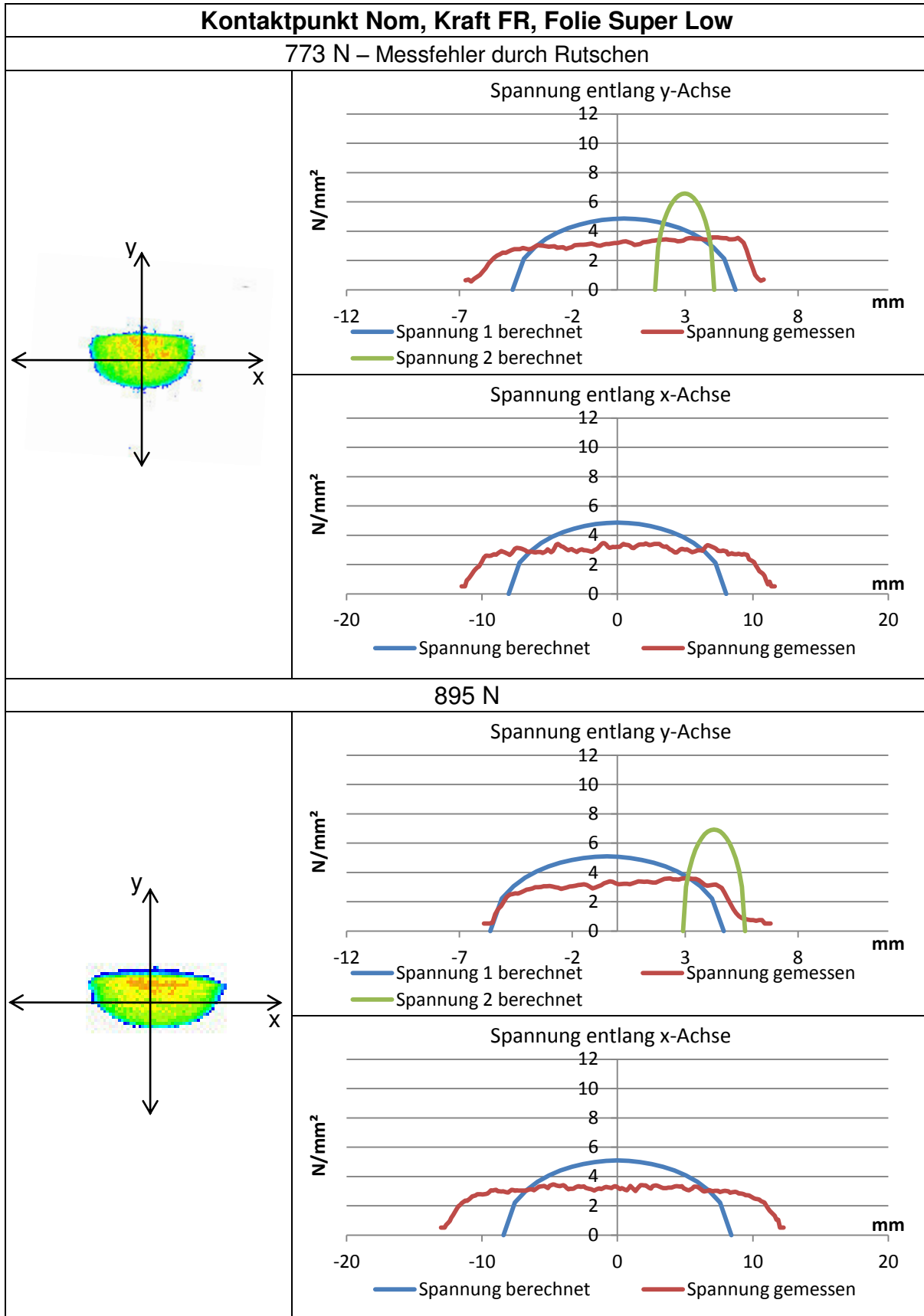


Tabelle 28: Spannung, Kontaktpunkt Nom, Kraft FR, Folie Super Low

### 12.5.2 Kontaktpunkt A

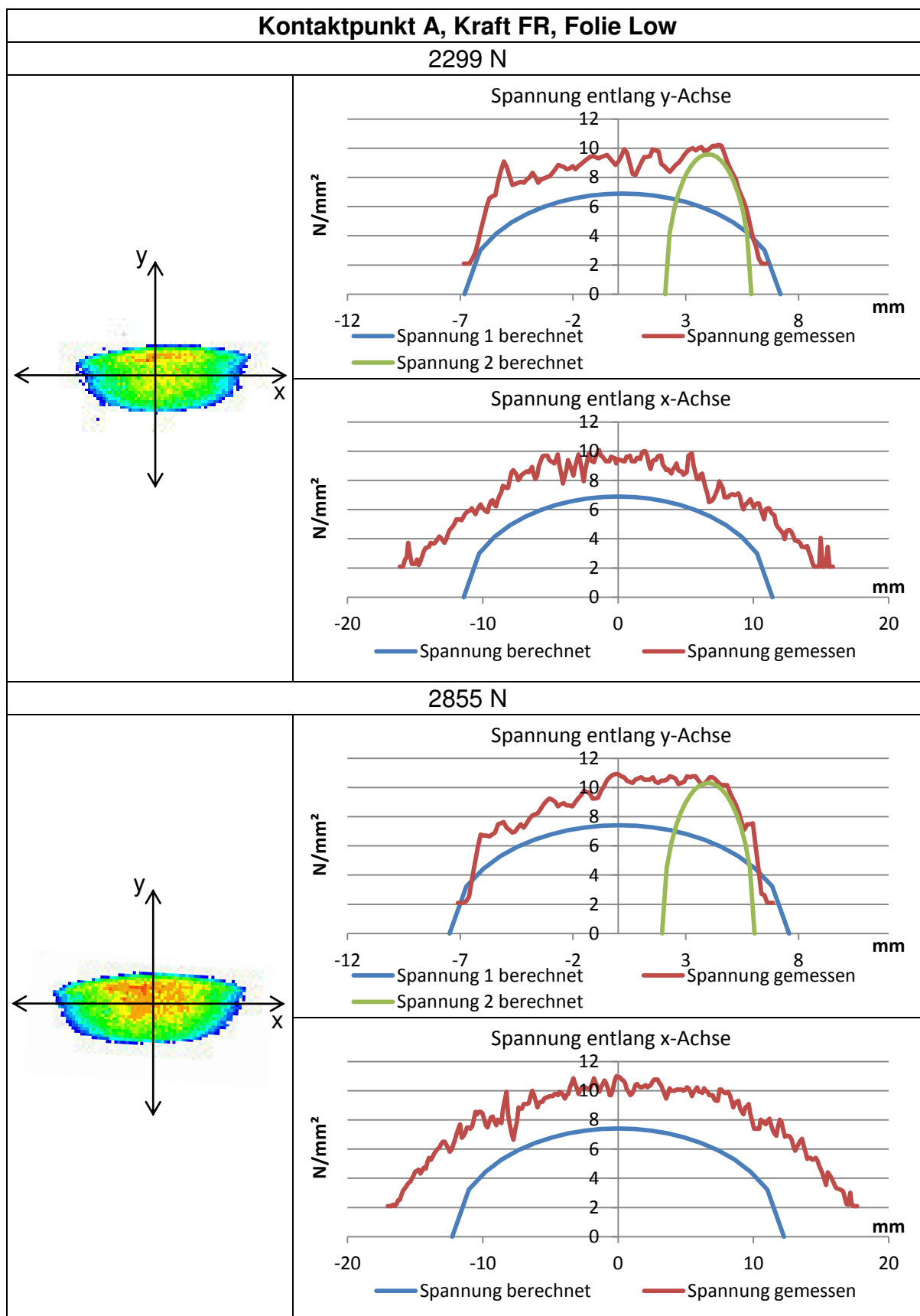
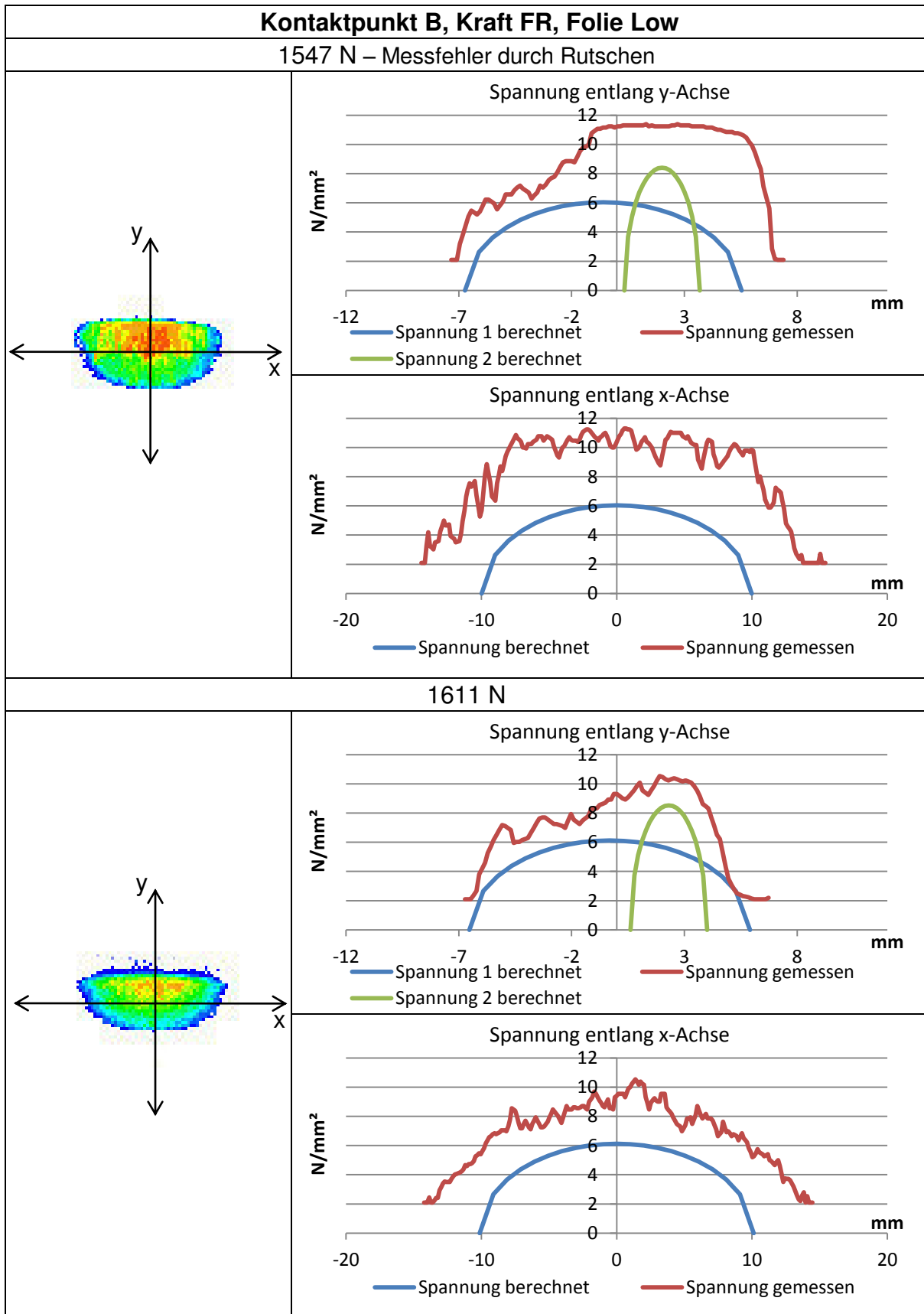
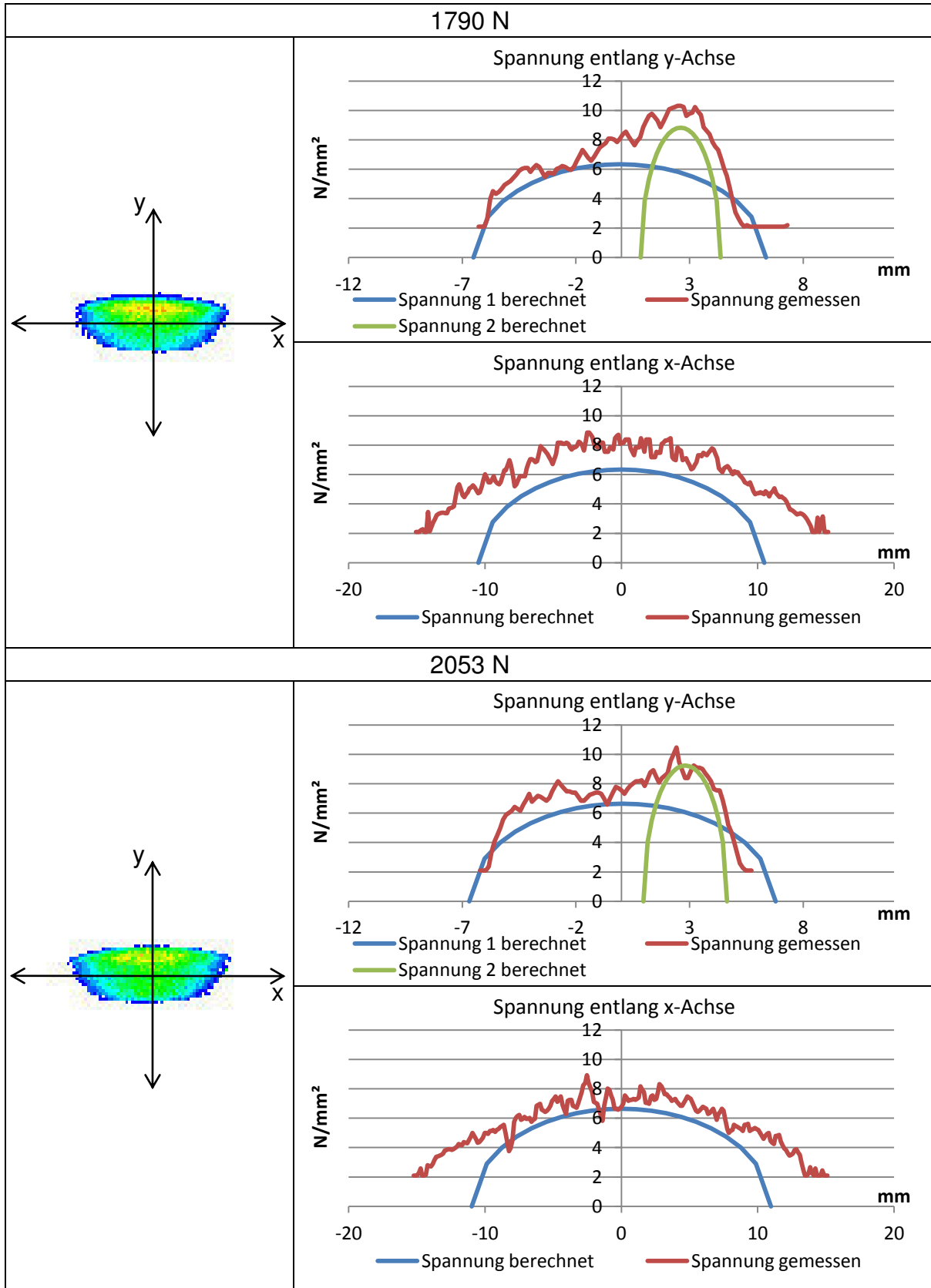


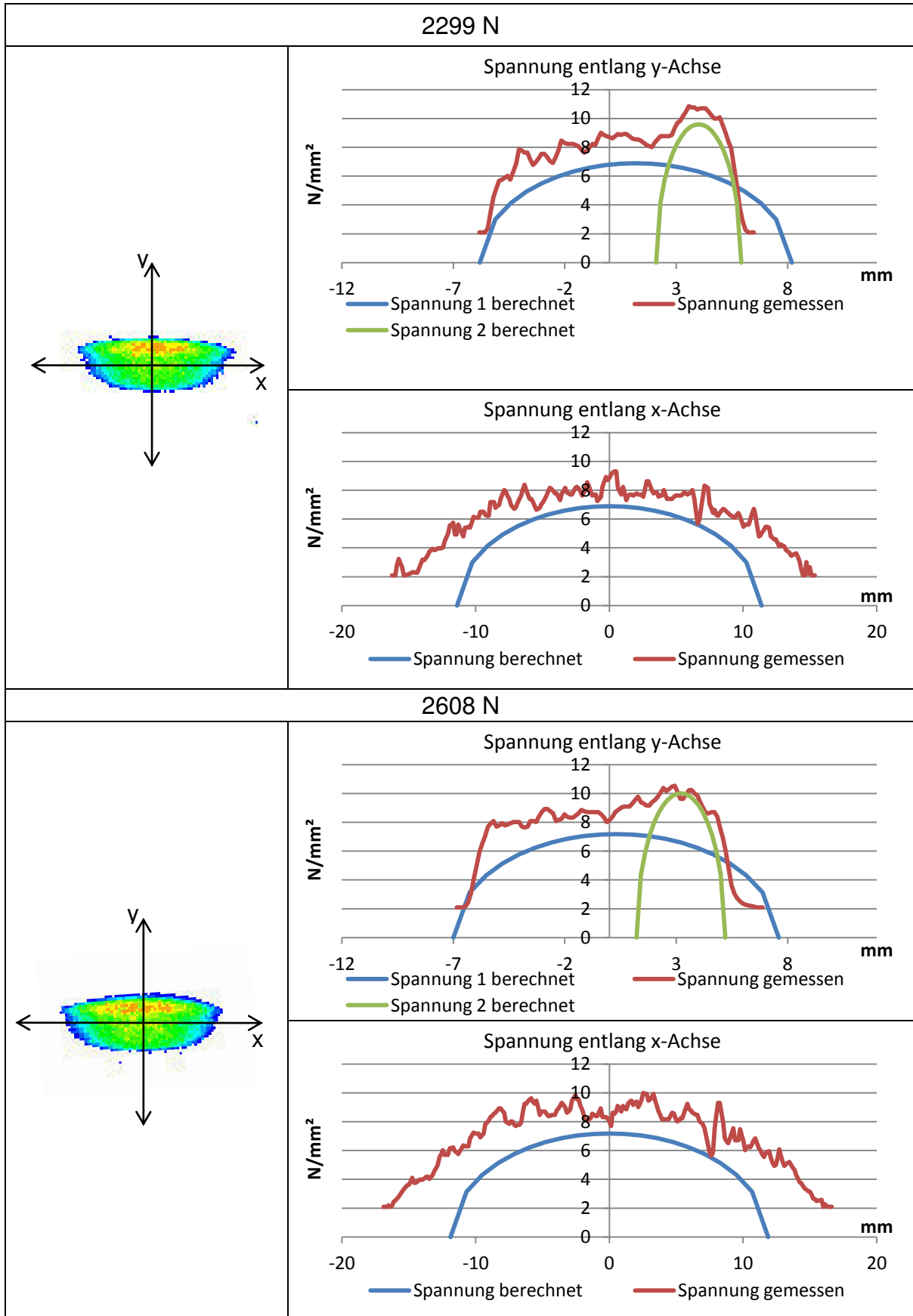
Tabelle 29: Spannung, Kontaktpunkt A, Kraft FR, Folie Low

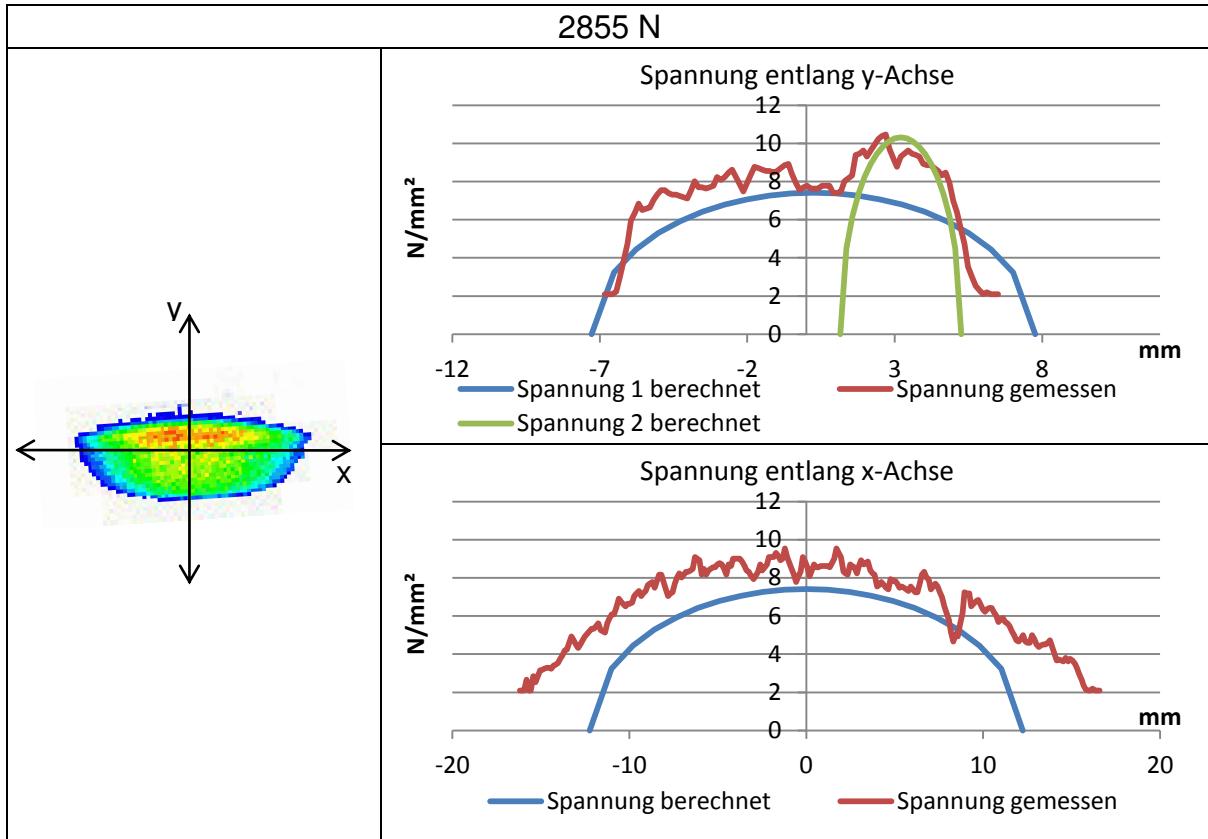


### 12.5.3 Kontaktpunkt B





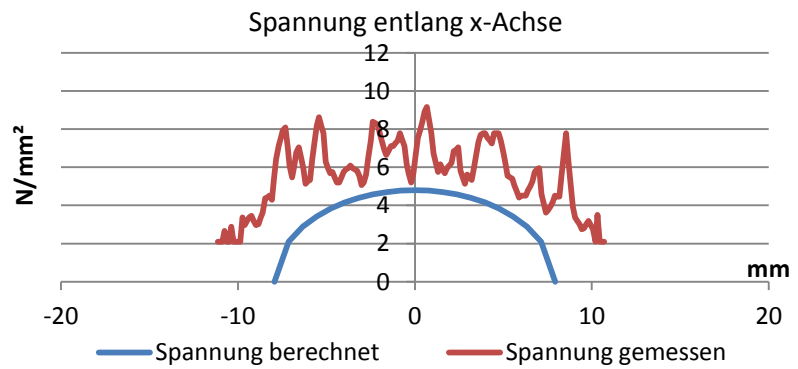
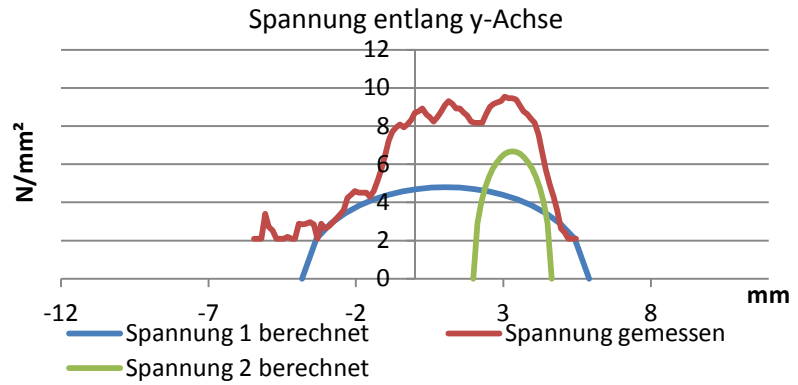
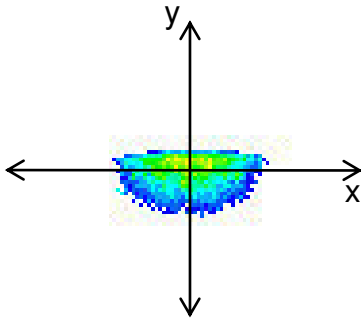




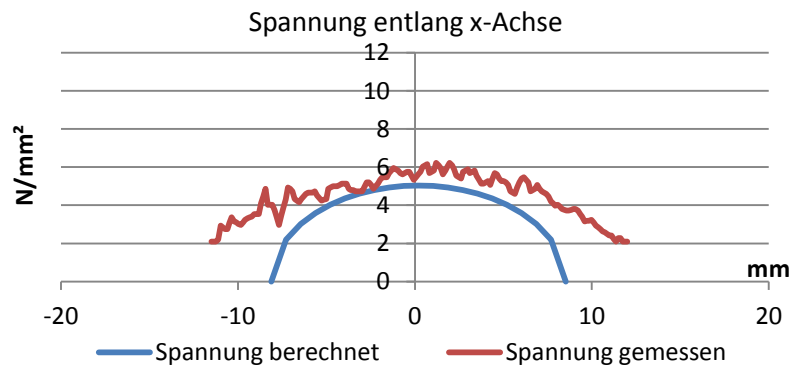
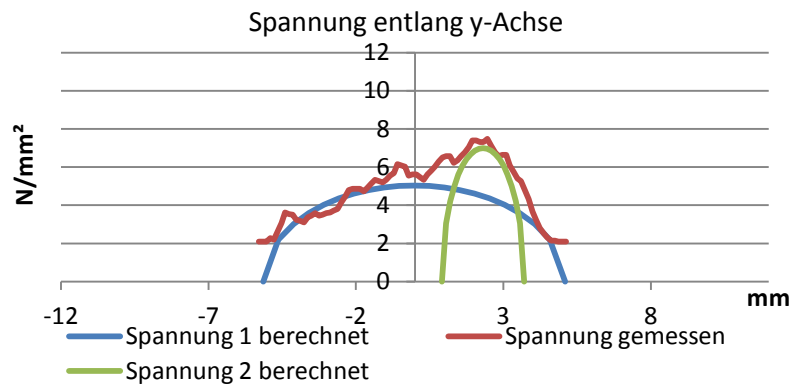
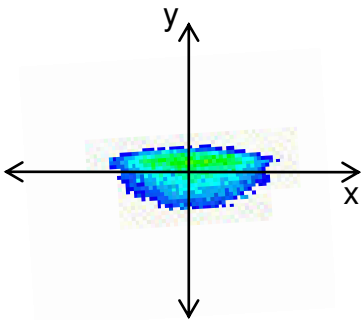
**Tabelle 30: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FR, Folie Low**

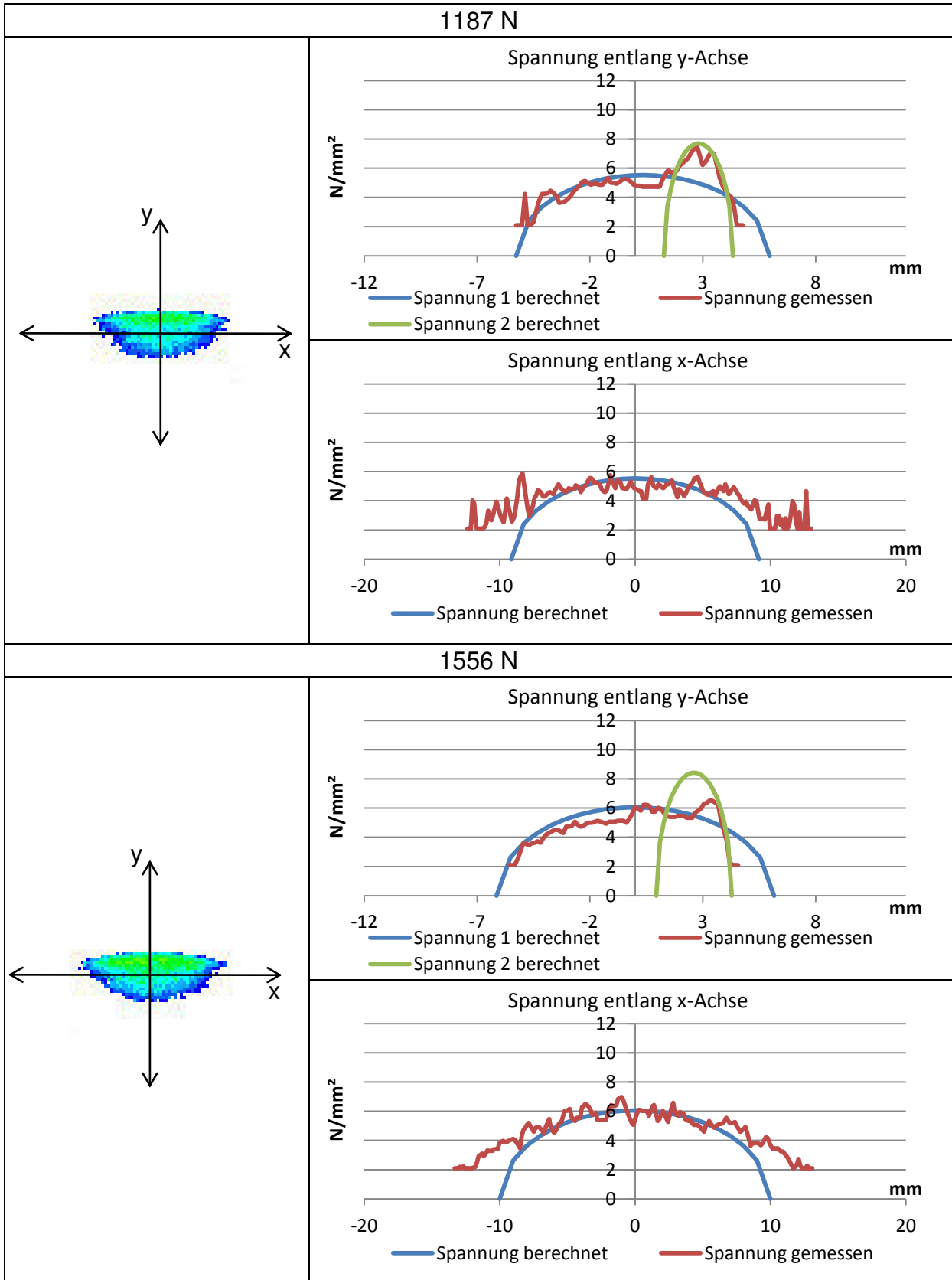
**Kontaktpunkt B, Kraft FR (Vergleich), Folie Low**

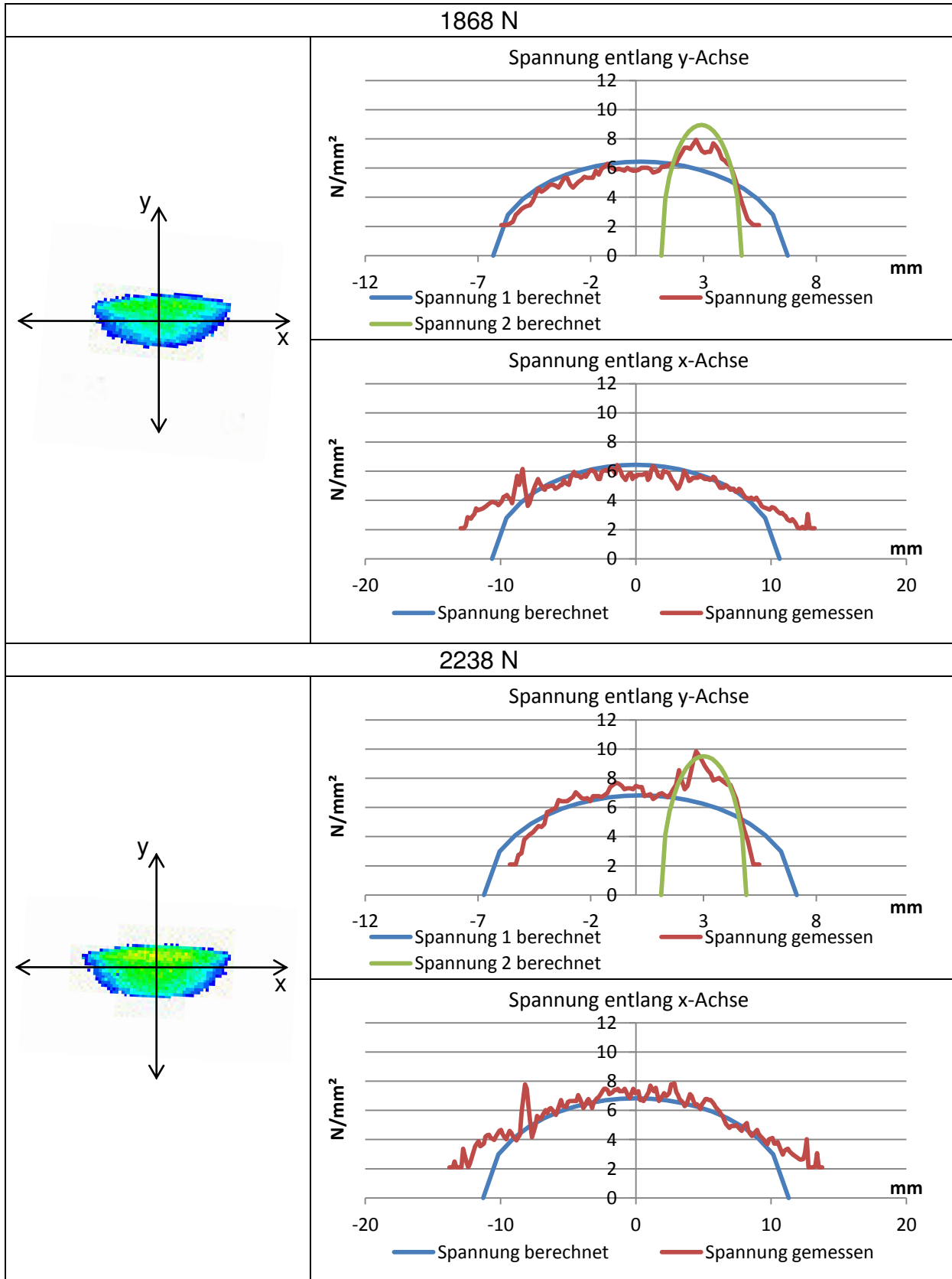
773 N – Messfehler durch Rutschen



895 N







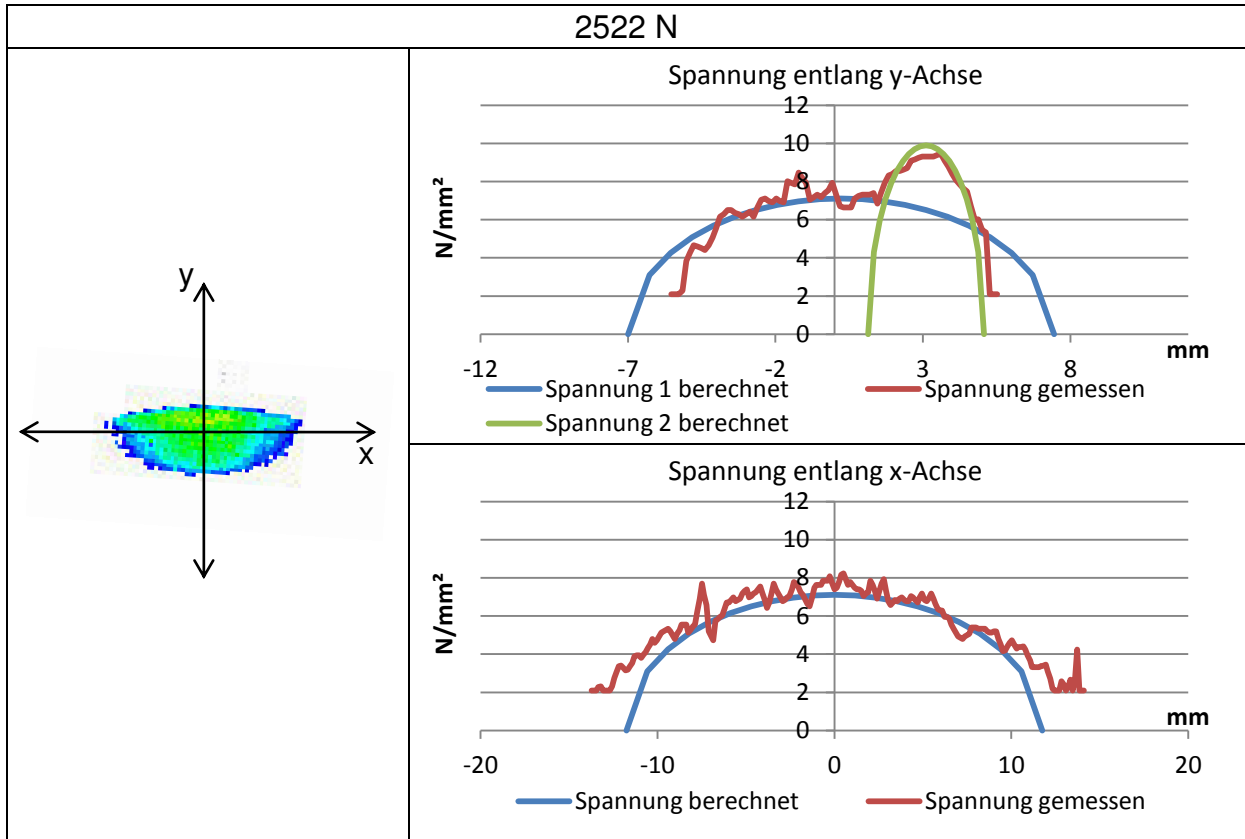


Tabelle 31: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FR (Vergleich), Folie Low



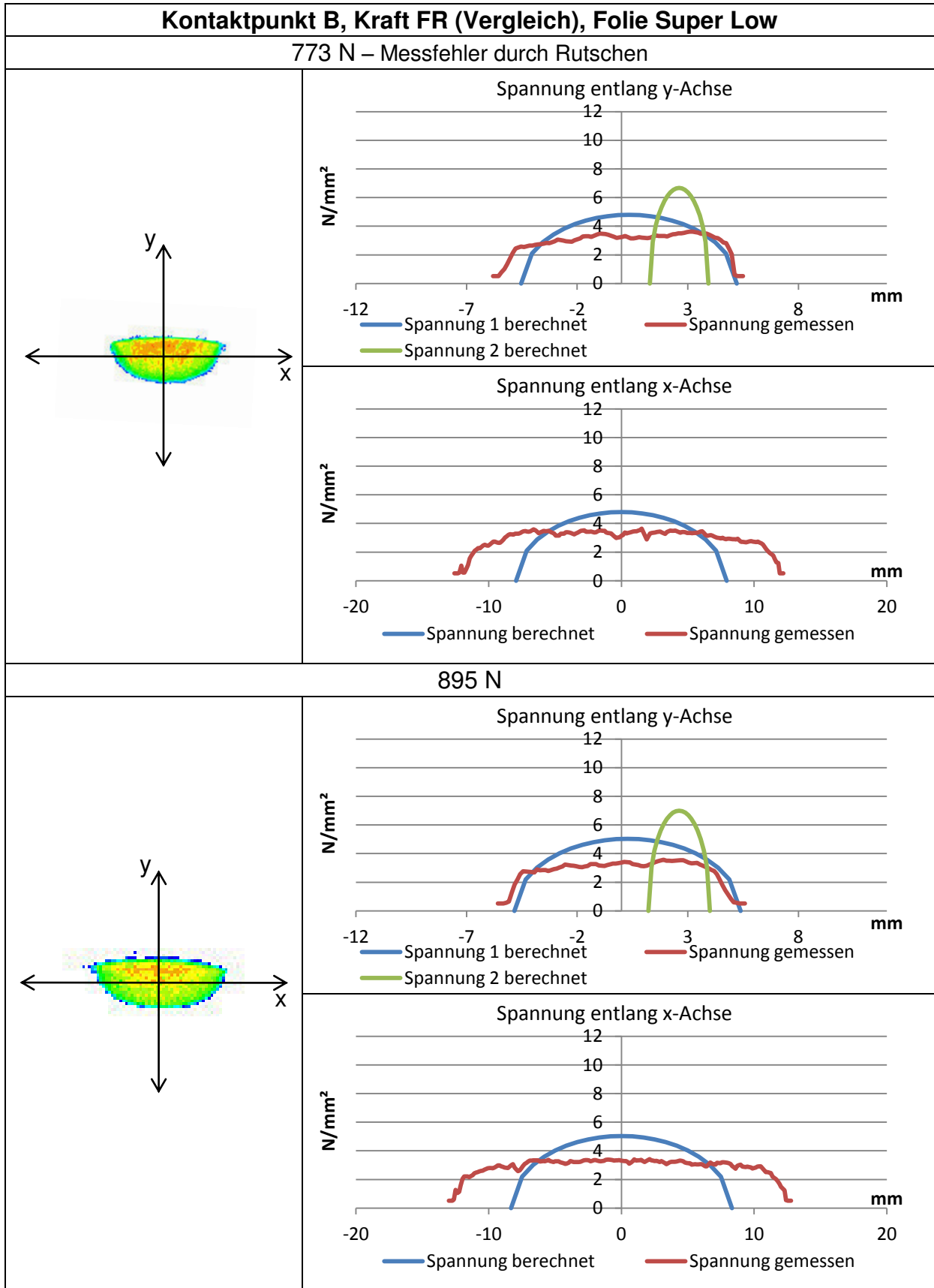
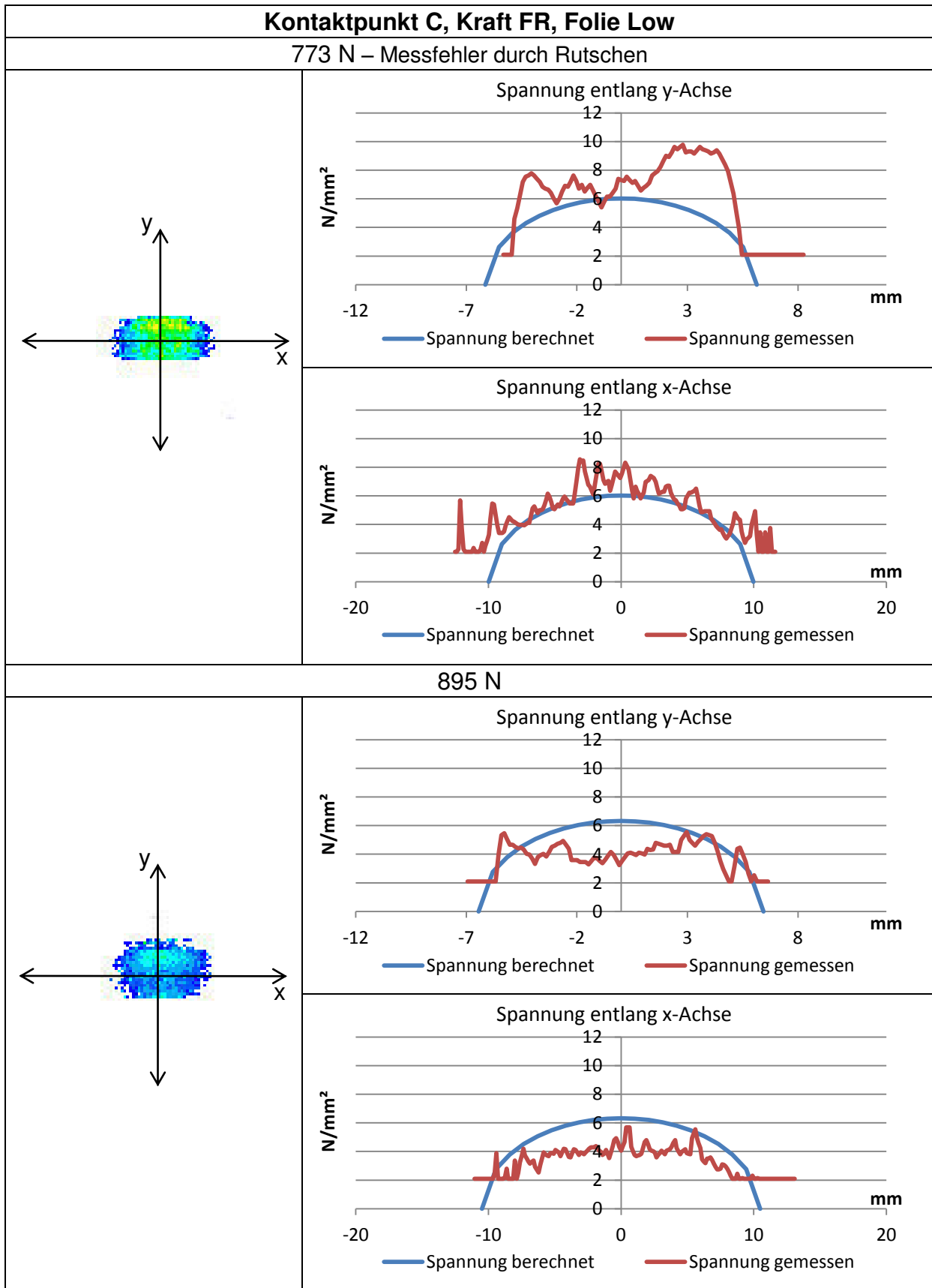
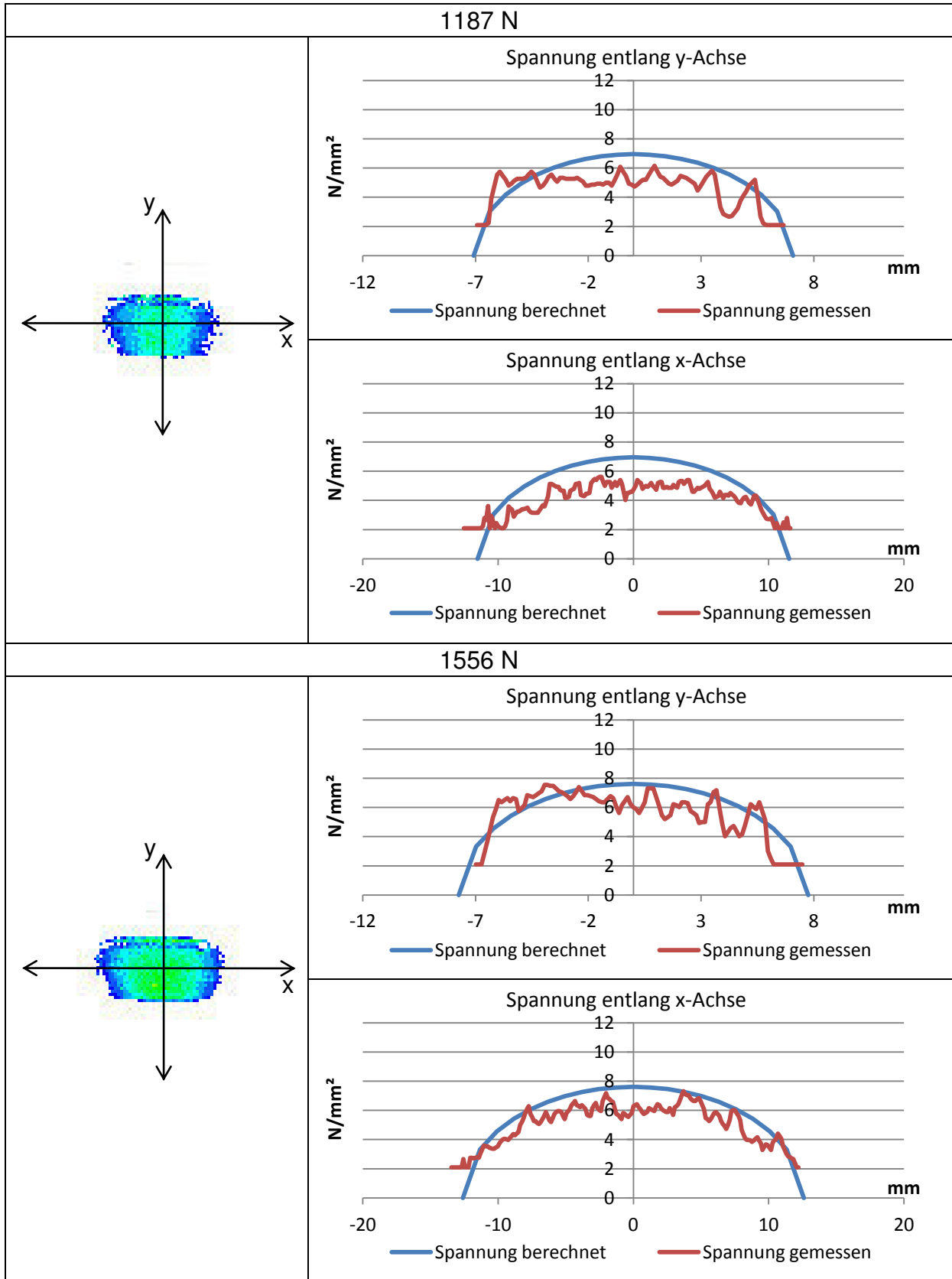
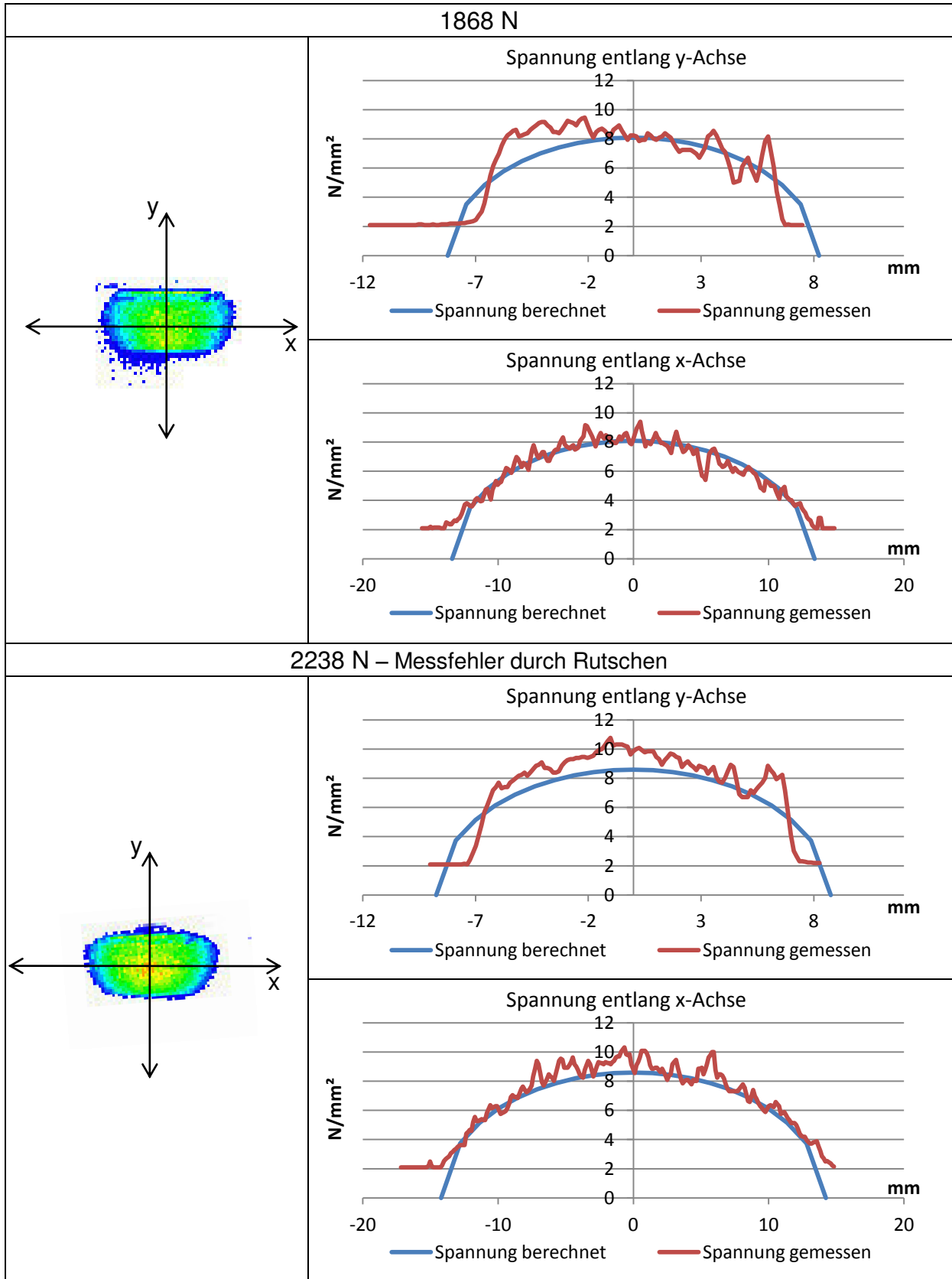


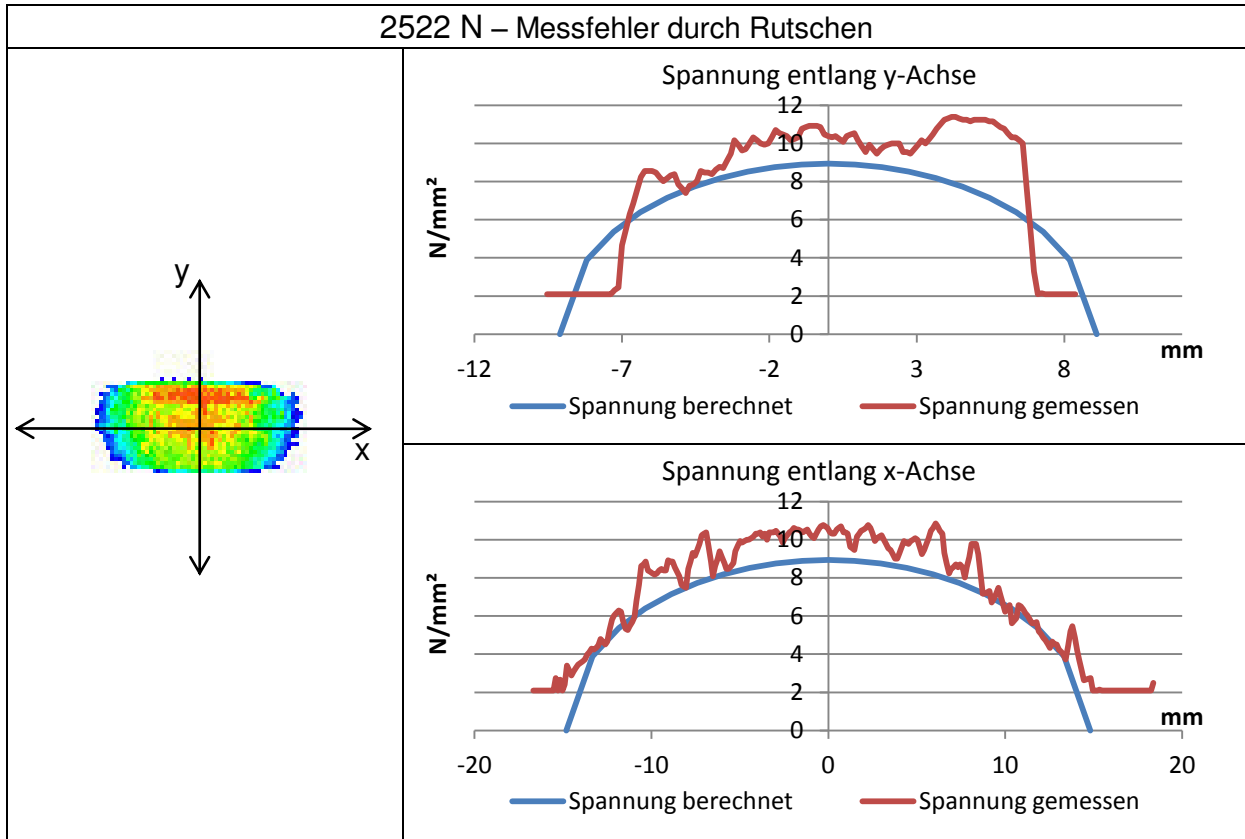
Tabelle 32: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FR (Vergleich), Folie Super Low

### 12.5.4 Kontaktpunkt C





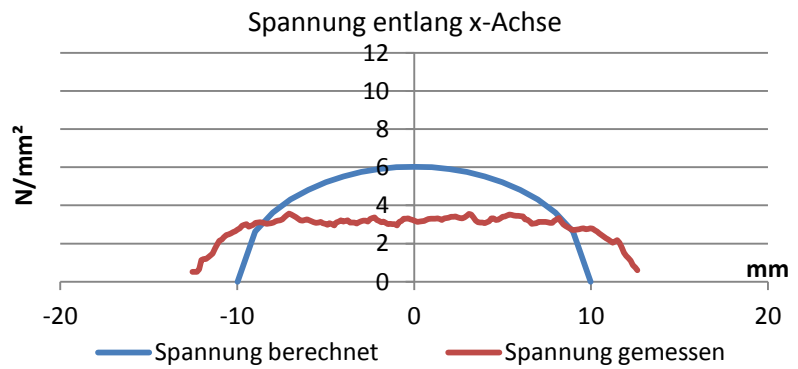
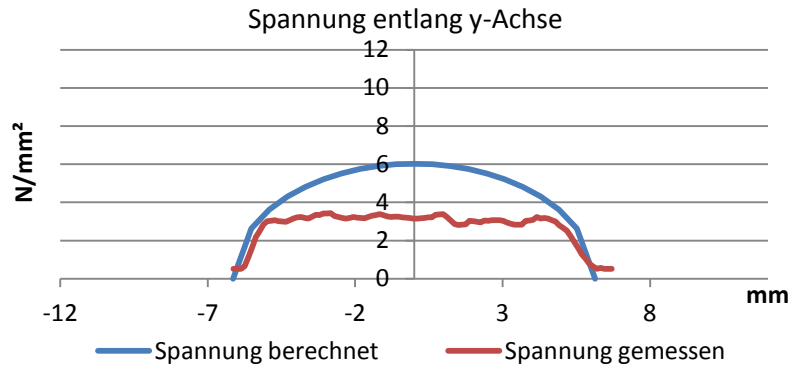
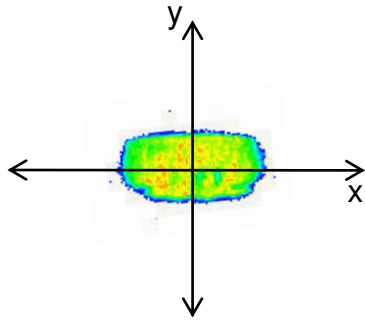




**Tabelle 33: Spannung, Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Low**

**Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Super Low**

773 N – Messfehler durch Rutschen



895 N

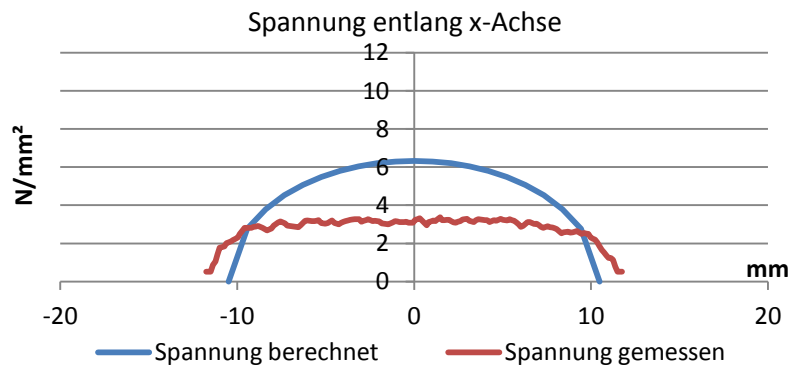
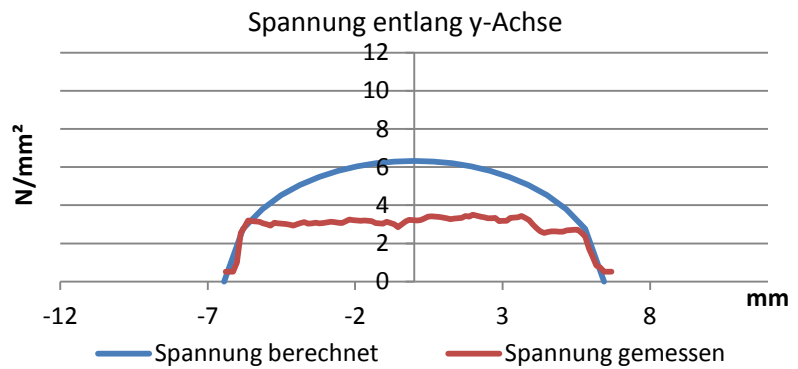
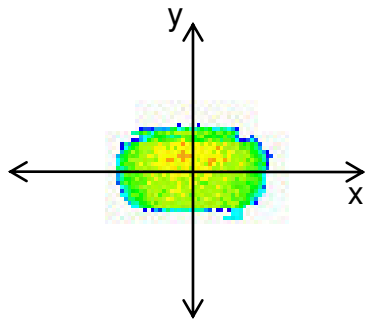


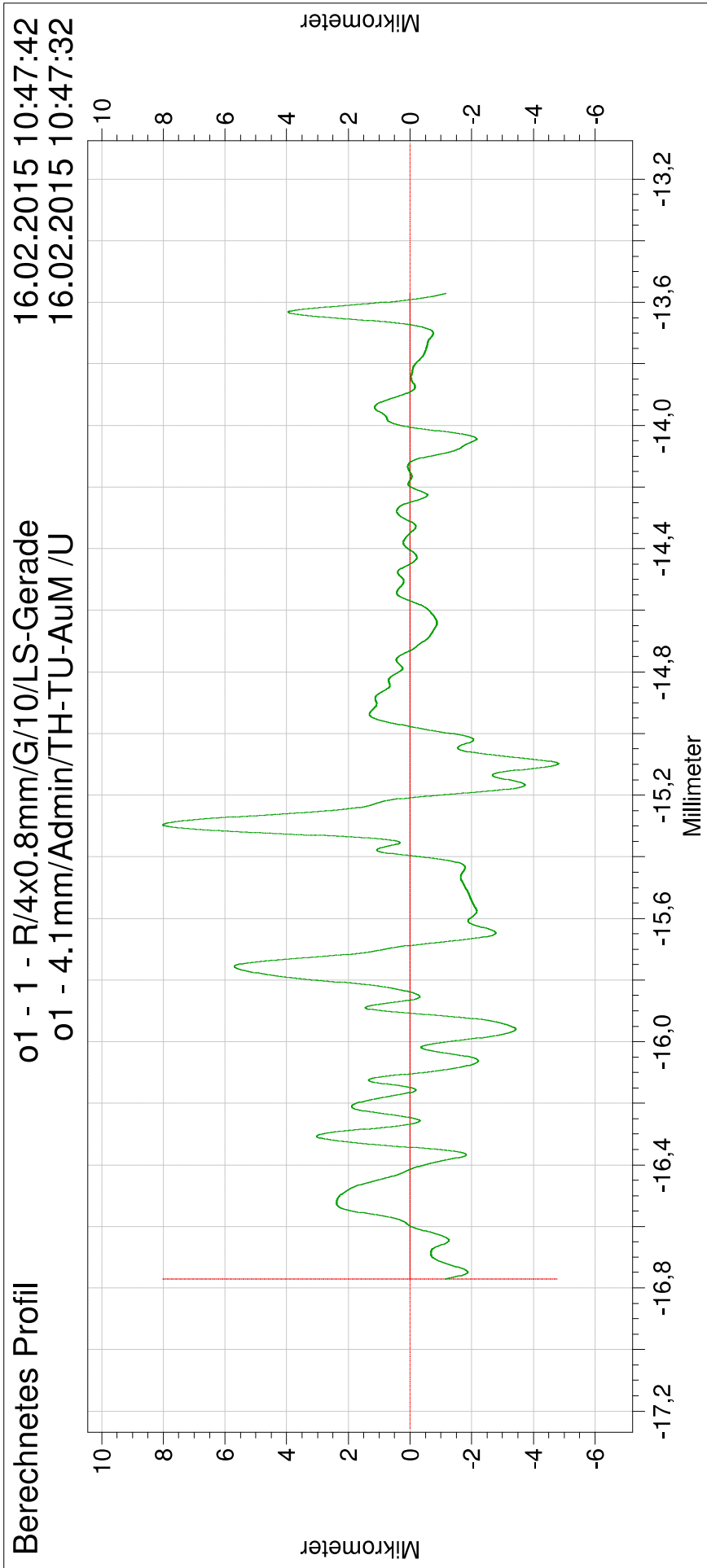
Tabelle 34: Spannung, Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Super Low

## 12.6 Ergebnisse der Messung der Oberflächenrauigkeit

### 12.6.1 Oberflächenrauigkeit Schiene Stelle „oben“

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messung der Oberflächenrauigkeit der Schiene an der Stelle „oben“ dargestellt.

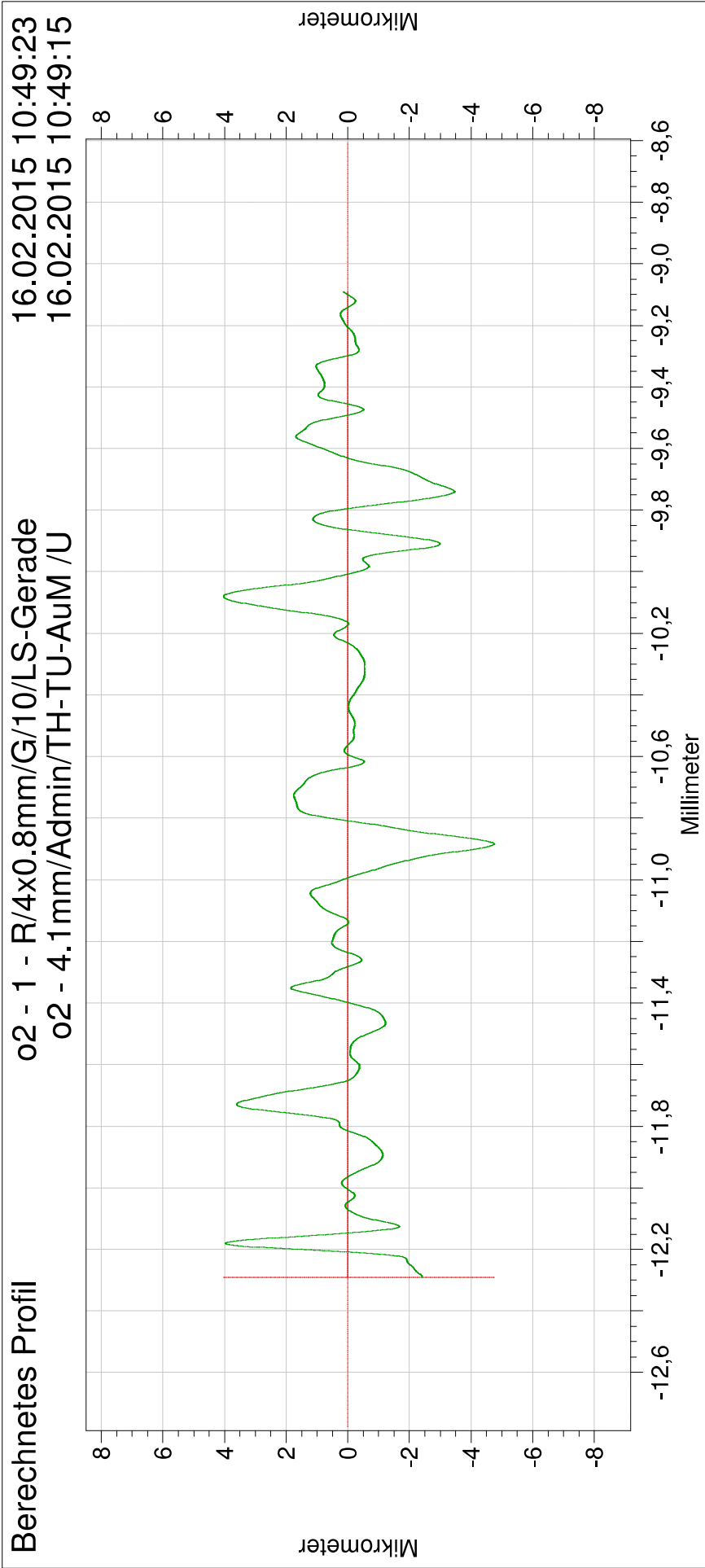
# Taylor Hobson



Ra	1,3102	µm	Rq	1,8851	µm
Rp	4,0791	µm	Rt	12,8230	µm
			Rz	7,5288	µm



# Taylor Hobson



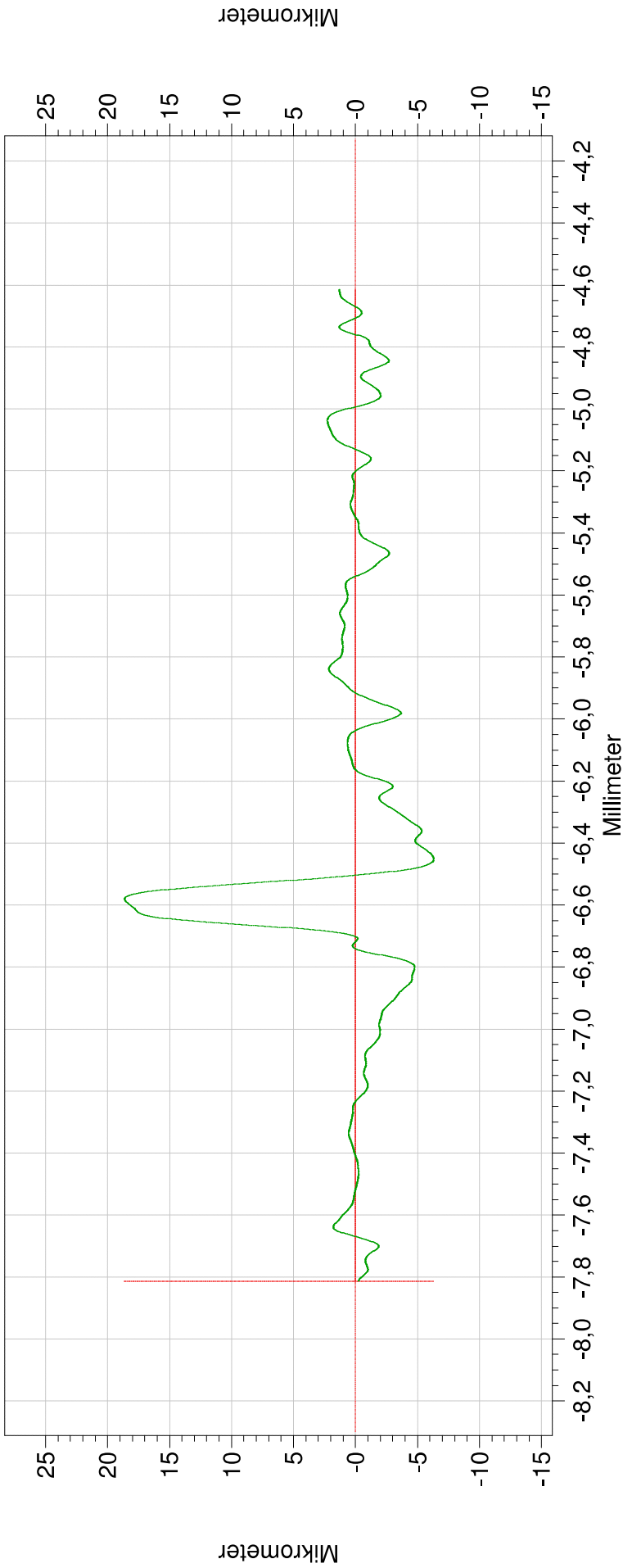
Ra	0,9774	µm	Rq	1,4055	µm
Rp	2,8884	µm	Rt	8,7777	µm
			Rz	6,2891	µm

# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

o3 - 1 - R/4x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
o3 - 4.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U

16.02.2015 10:51:04  
16.02.2015 10:50:55



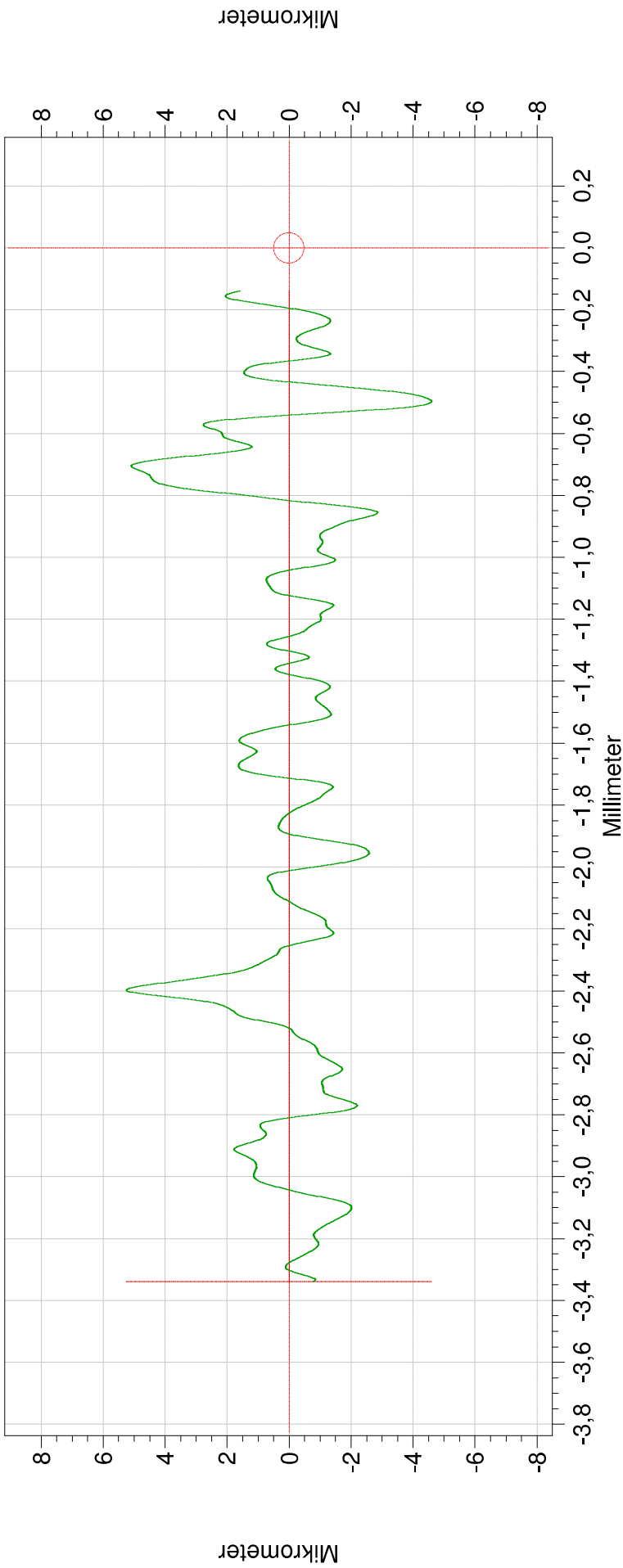
Ra	2,0981	µm	Rq	3,9063	µm
Rp	6,2220	µm	Rt	24,9284	µm
			Rz	9,8733	µm

# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

04 - 1 - R/4x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
04 - 4.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U

16.02.2015 10:53:14  
16.02.2015 10:53:05



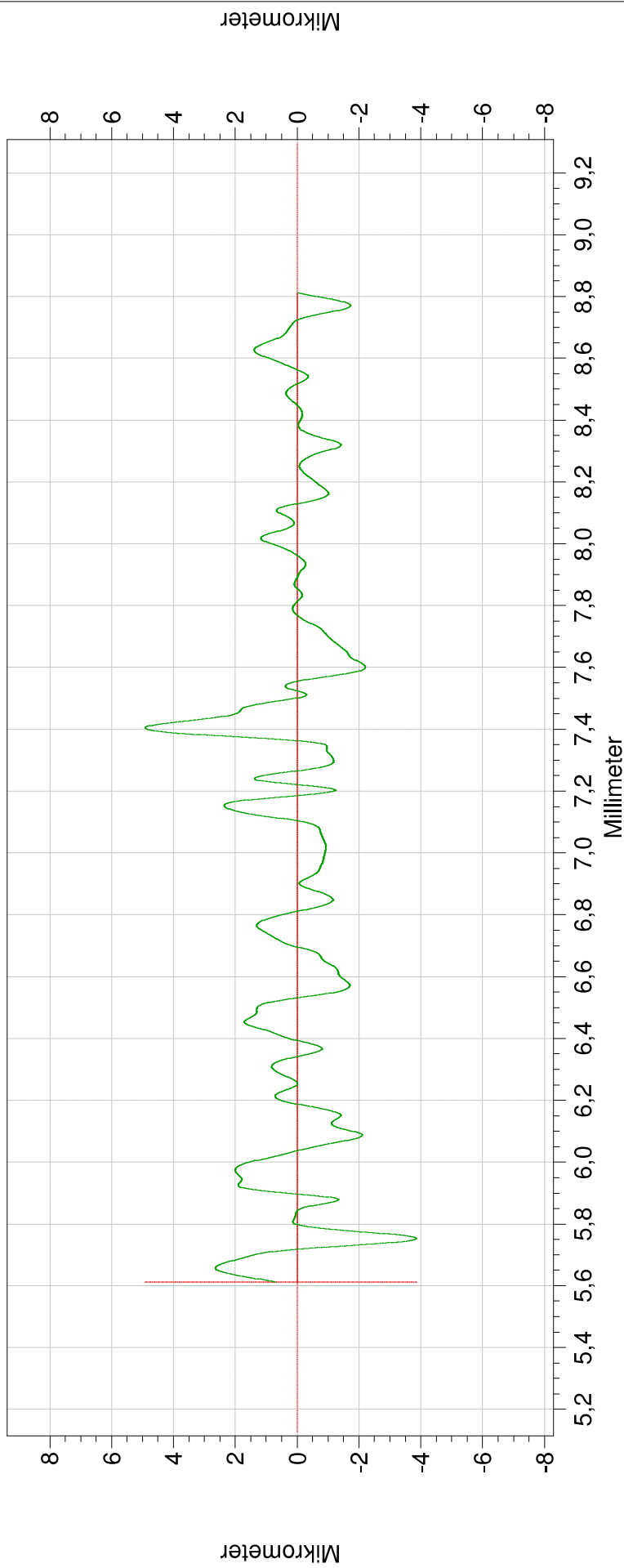
Ra	1,2956	µm	Rq	1,6796	µm
Rp	3,4428	µm	Rt	9,8459	µm
			Rz	6,1523	µm

# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

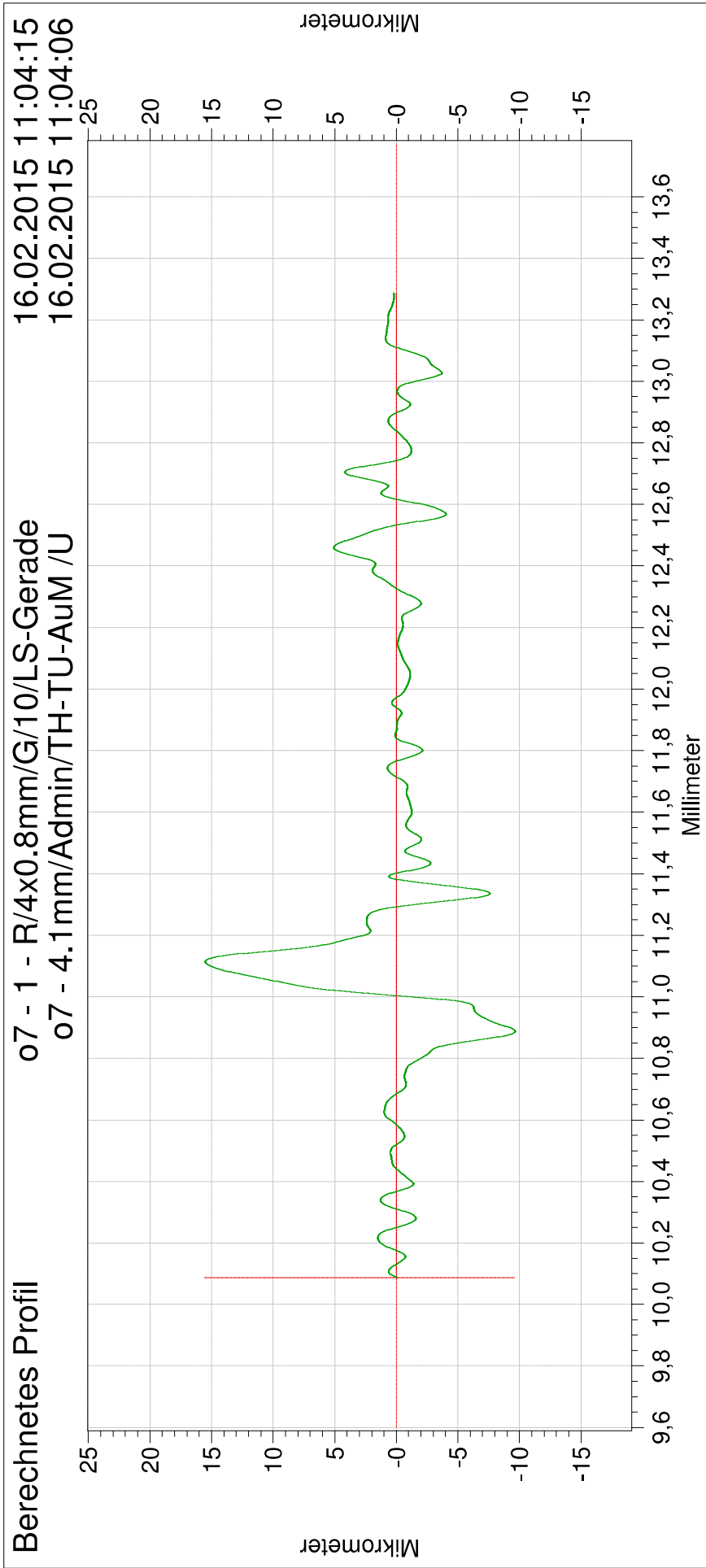
06 - 1 - R/4x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
06 - 4.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U

16.02.2015 11:02:15  
16.02.2015 11:02:06



Ra	0,9019	µm	Rq	1,2086	µm
Rp	2,8320	µm	Rt	8,7722	µm
			Rz	5,1990	µm

# Taylor Hobson



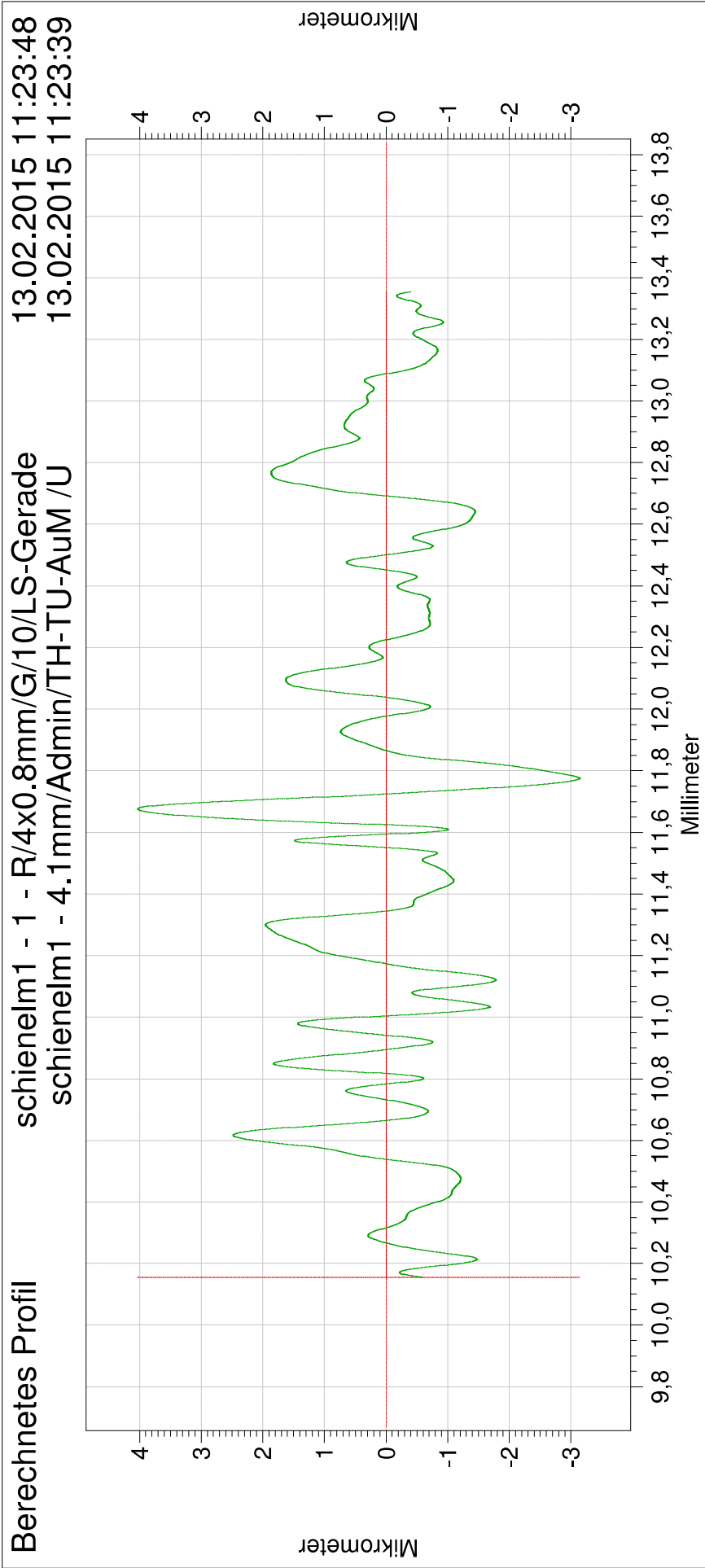
Ra	2,0164	µm	Rq	3,4705	µm
Rp	6,5833	µm	Rt	25,1855	µm
			Rz	12,9395	µm

## 12.6.2 Oberflächenrauigkeit Schiene Stelle „mitte“

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messung der Oberflächenrauigkeit der Schiene an der Stelle „mitte“ dargestellt

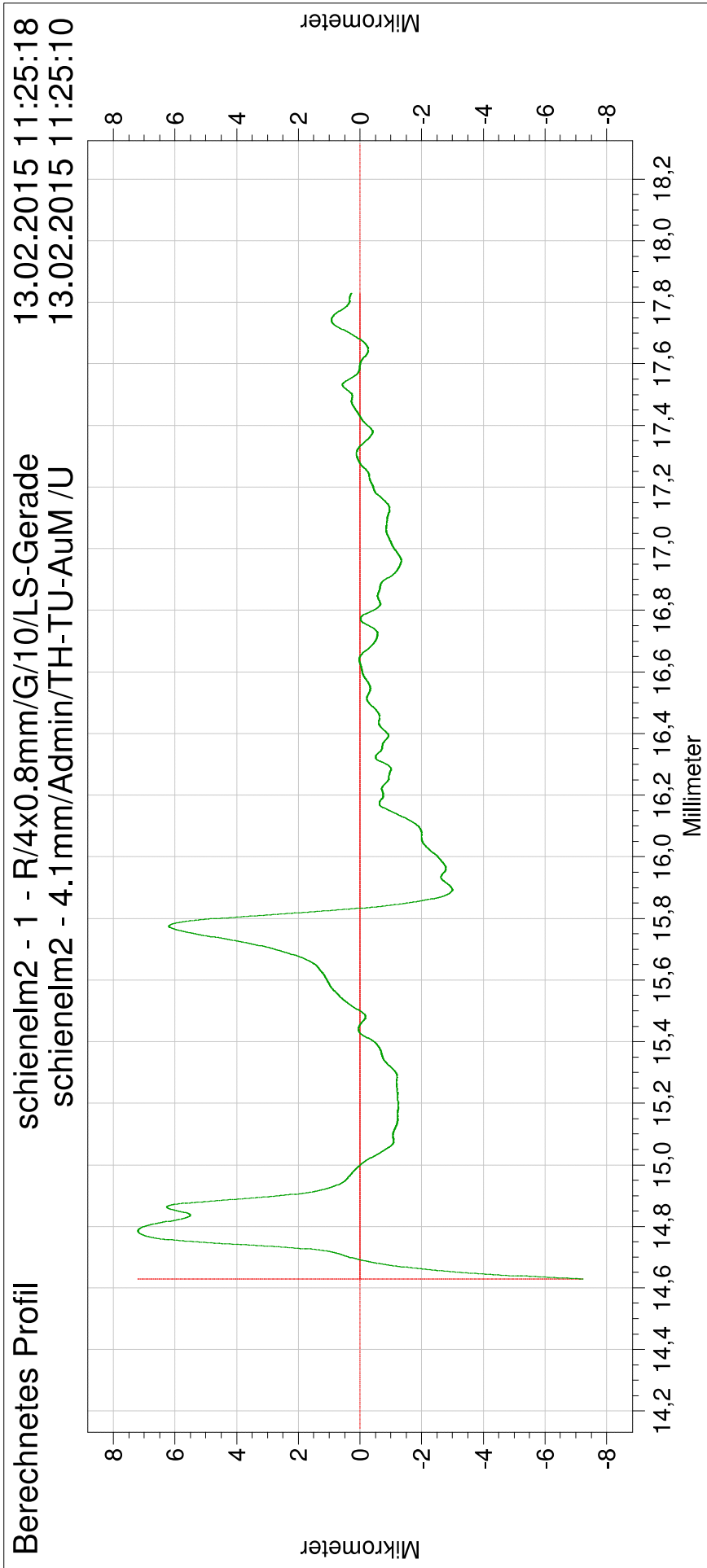
.

# Taylor Hobson



Ra	0,8627	µm	Rq	1,1016	µm
Rp	2,5020	µm	Rt	7,1706	µm
			Rz	4,6216	µm

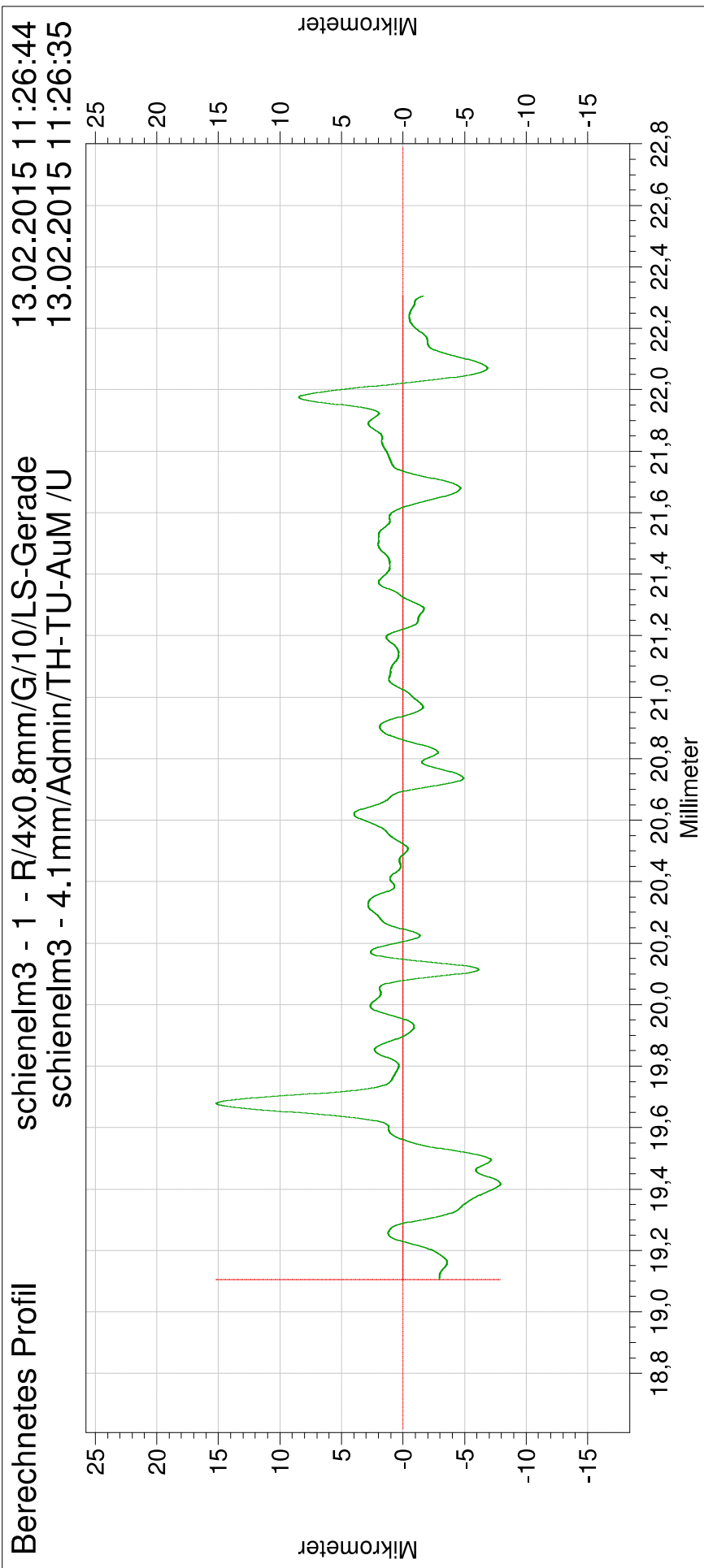
# Taylor Hobson



Ra	1,2433	µm	Rq	1,9722	µm
Rp	3,5954	µm	Rt	14,4522	µm
			Rz	6,7278	µm

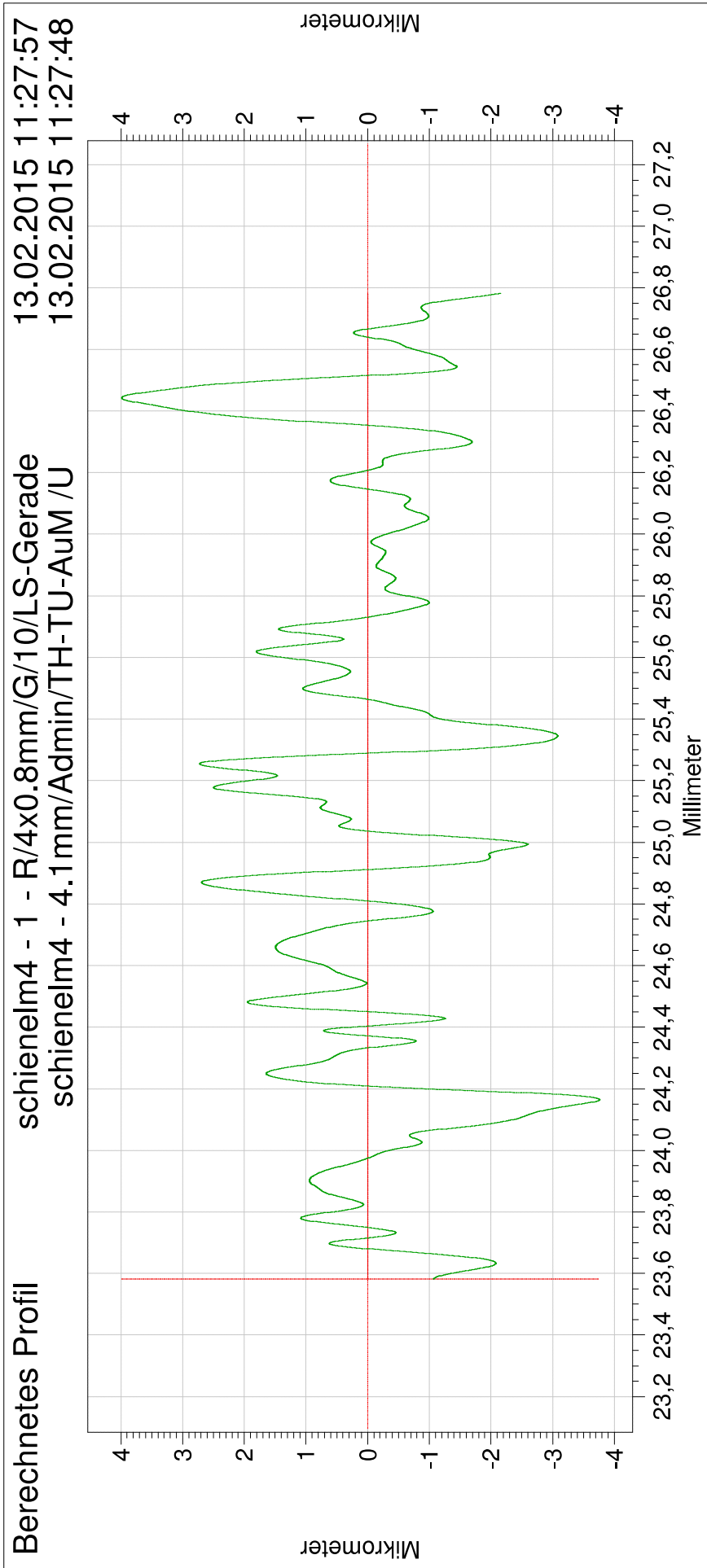


# Taylor Hobson



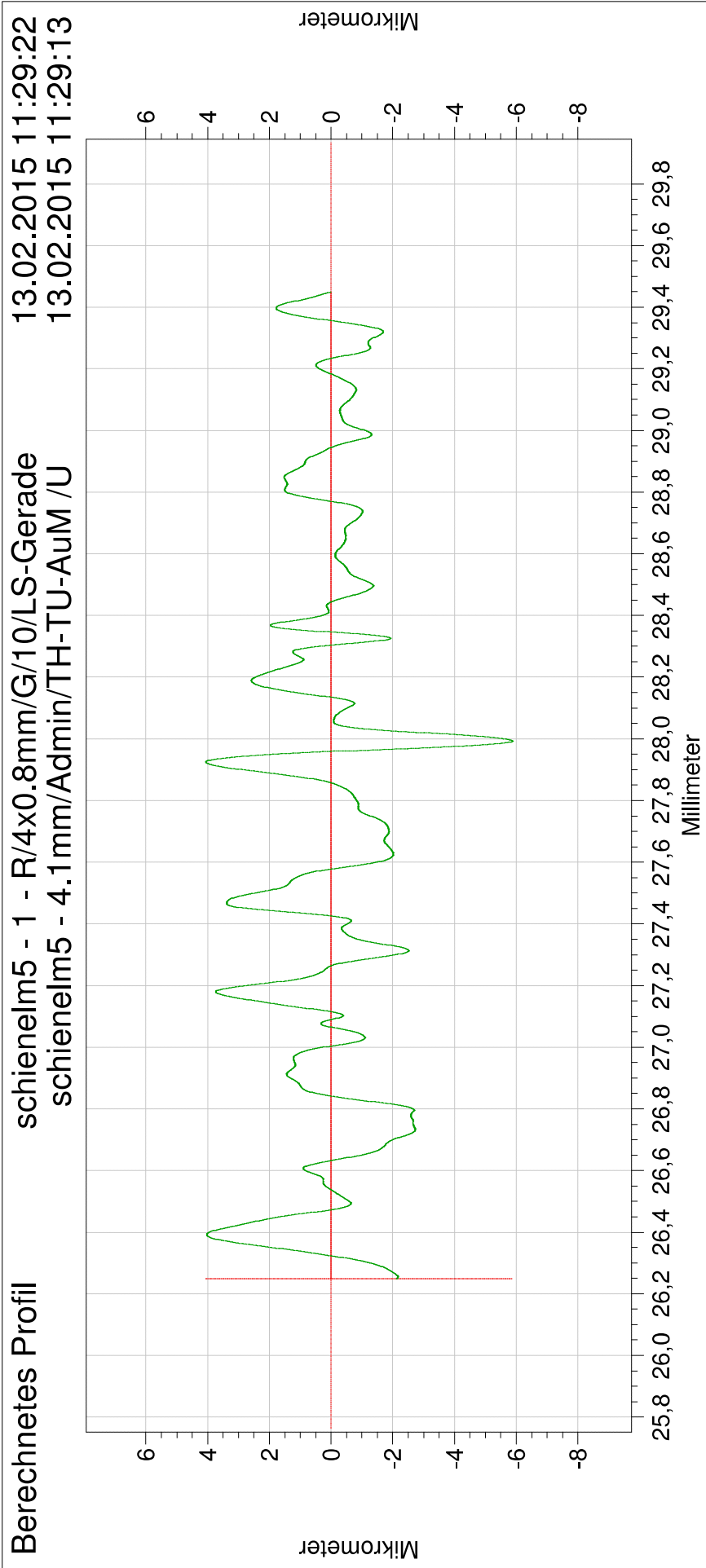
Ra	2,3366	µm	Rq	3,3043	µm
Rp	7,4211	µm	Rt	23,0822	µm
			Rz	13,8585	µm

# Taylor Hobson



Ra	1,0748	µm	Rq	1,3838	µm
Rp	2,7651	µm	Rt	7,7507	µm
			Rz	5,6583	µm

# Taylor Hobson

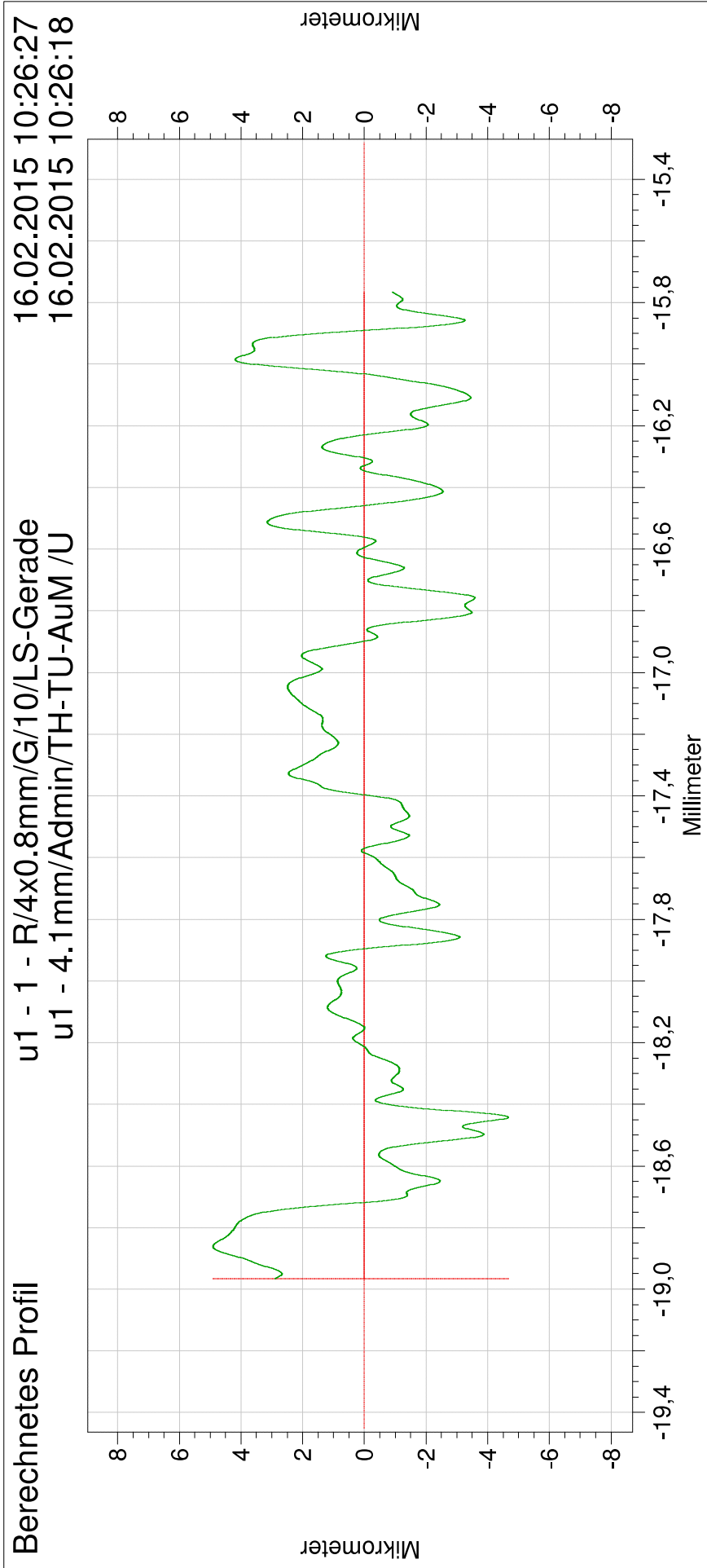


Ra	1,2352	µm	Rq	1,6020	µm
Rp	3,4048	µm	Rt	9,9390	µm
			Rz	6,6036	µm

### 12.6.3 Oberflächenrauigkeit Schiene Stelle „unten“

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messung der Oberflächenrauigkeit der Schiene an der Stelle „unten“ dargestellt.

# Taylor Hobson



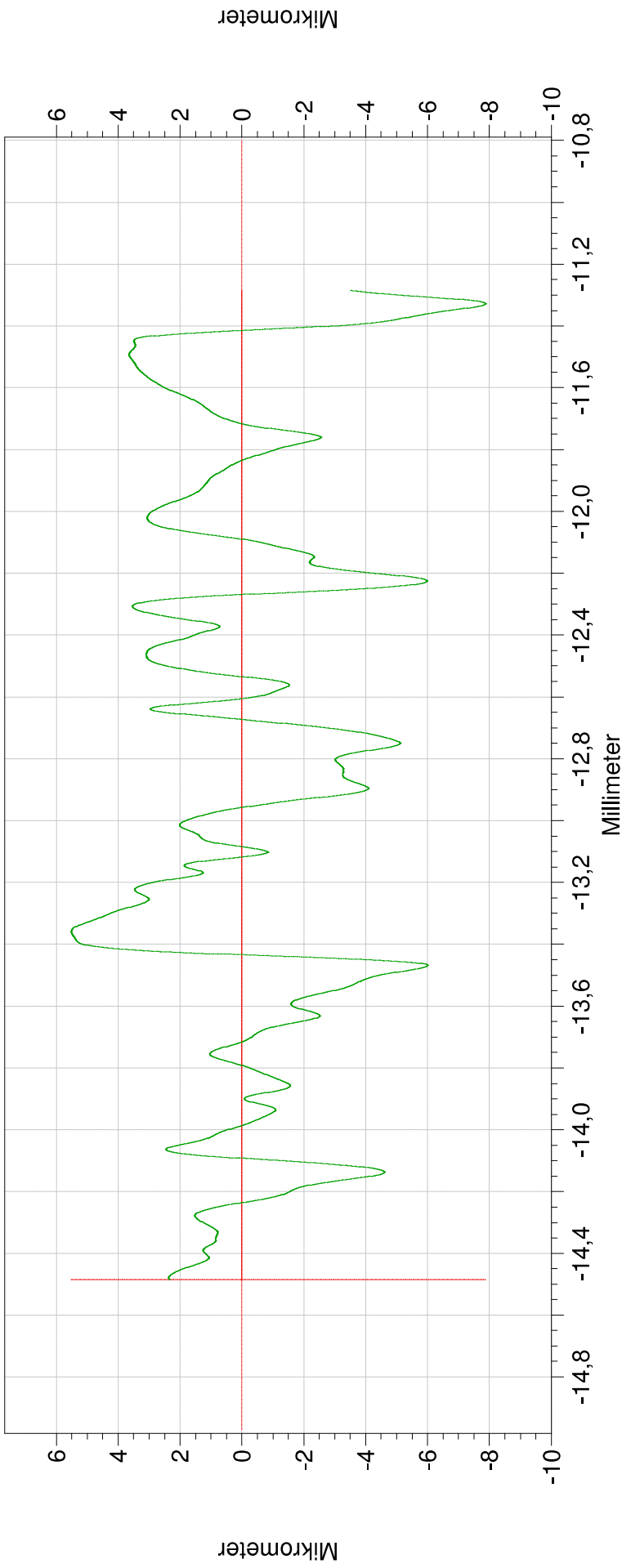
Ra	1,6498	µm	Rq	2,0341	µm
Rp	3,2590	µm	Rt	9,5864	µm
			Rz	6,9519	µm

# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

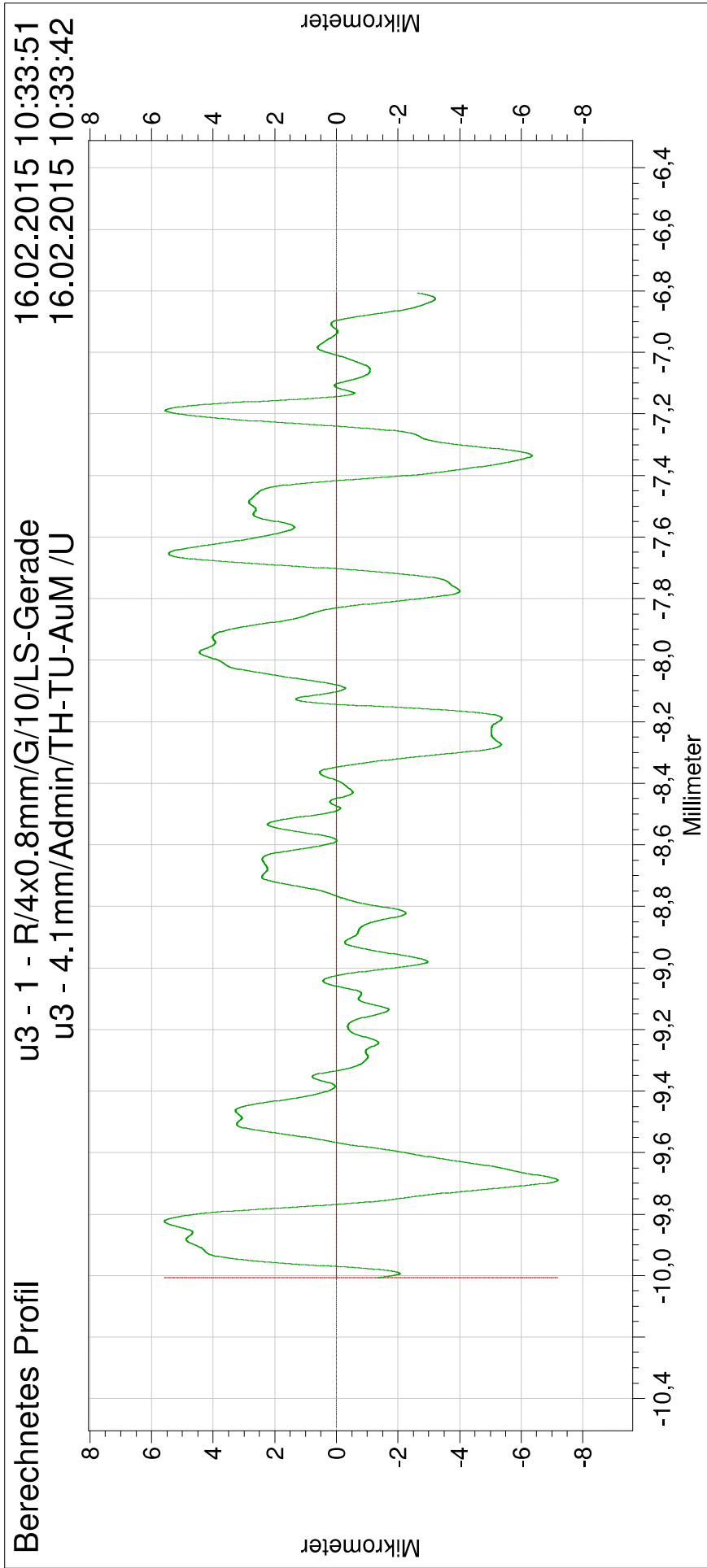
u2 - 1 - R/4x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
u2 - 4.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U

16.02.2015 10:30:17  
16.02.2015 10:30:08



Ra	2,2653	µm	Rq	2,7649	µm
Rp	3,7902	µm	Rt	13,3897	µm
			Rz	9,9072	µm

# Taylor Hobson



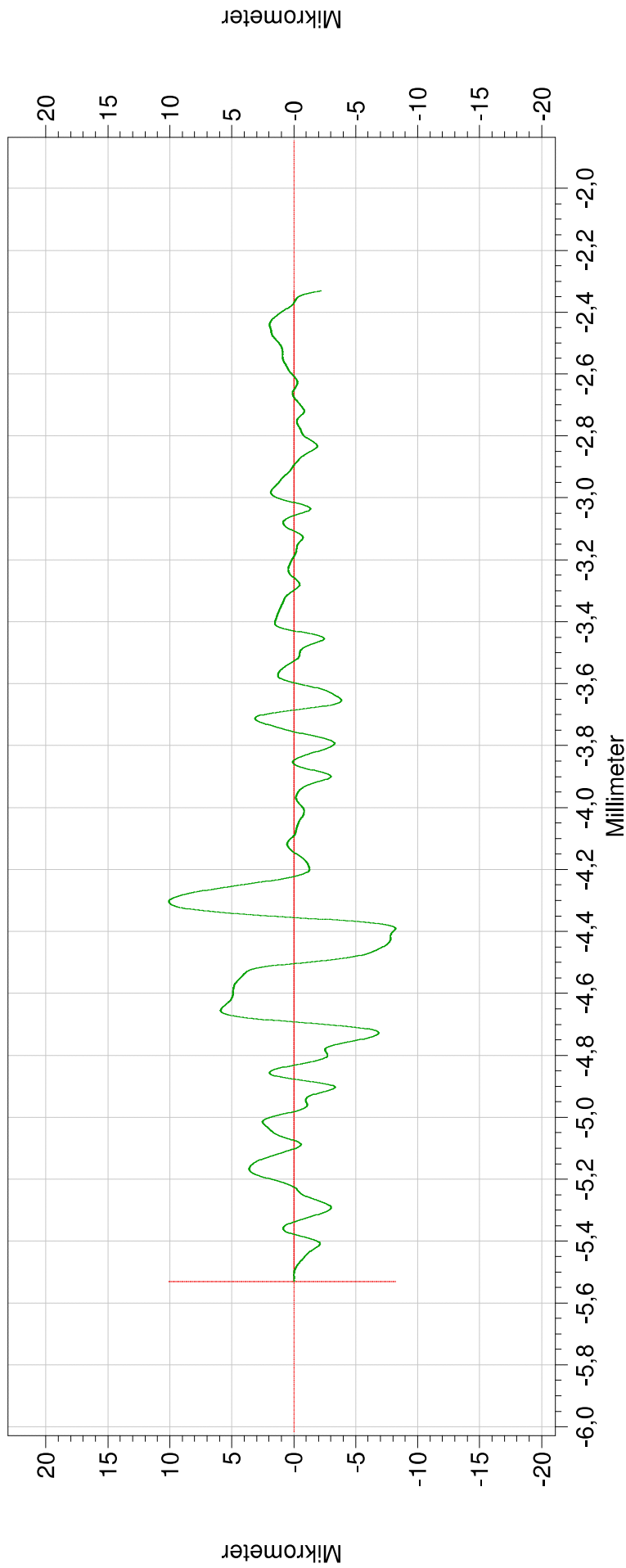
Ra	2,2009	µm	Rq	2,8245	µm
Rp	4,7540	µm	Rt	12,7695	µm
			Rz	10,2186	µm

# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

u4 - 1 - R/4x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
u4 - 4.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U

16.02.2015 10:35:05  
16.02.2015 10:34:57



Ra	1,8367	µm	Rq	2,7724	µm
Rp	4,6983	µm	Rt	18,2969	µm
			Rz	9,9345	µm

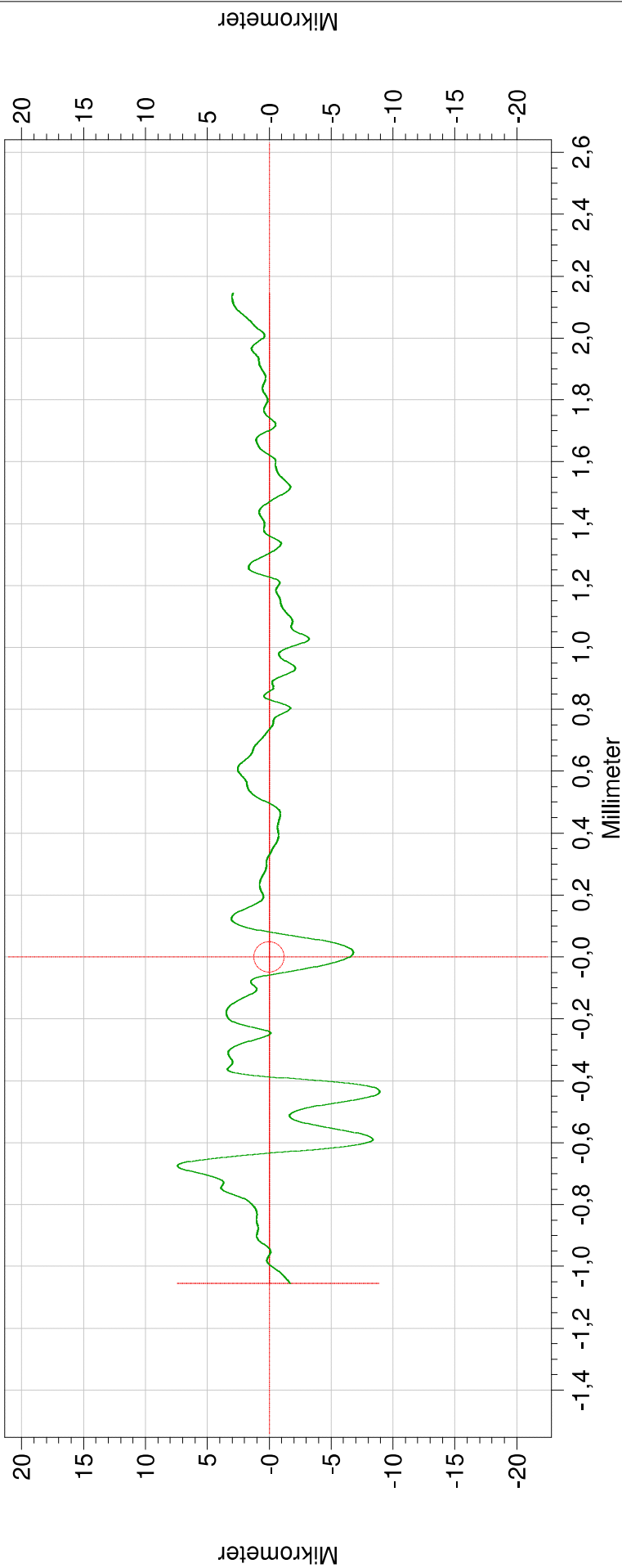


# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

u5 - 1 - R/4x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
u5 - 4.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U

16.02.2015 10:36:45  
16.02.2015 10:36:36



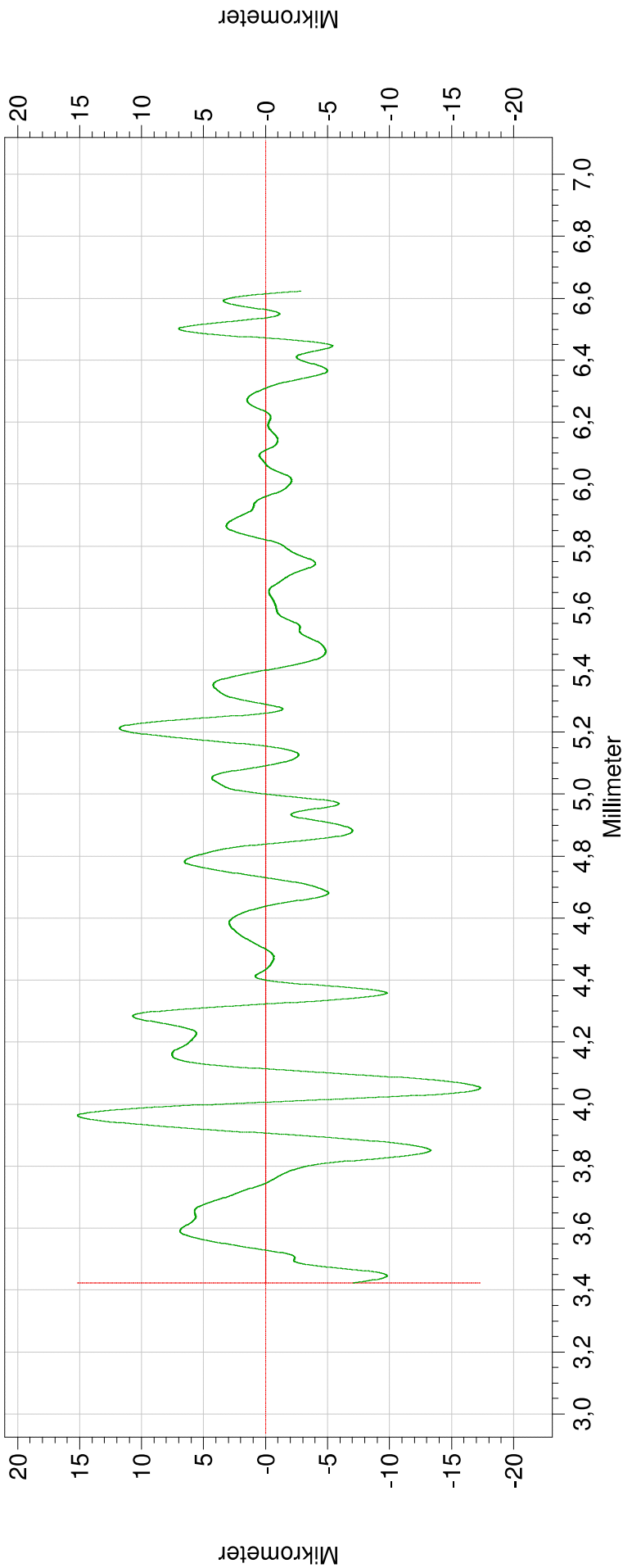
Ra	1,7565	µm	Rq	2,5576	µm
Rp	4,1175	µm	Rt	16,3077	µm
			Rz	9,2596	µm

# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

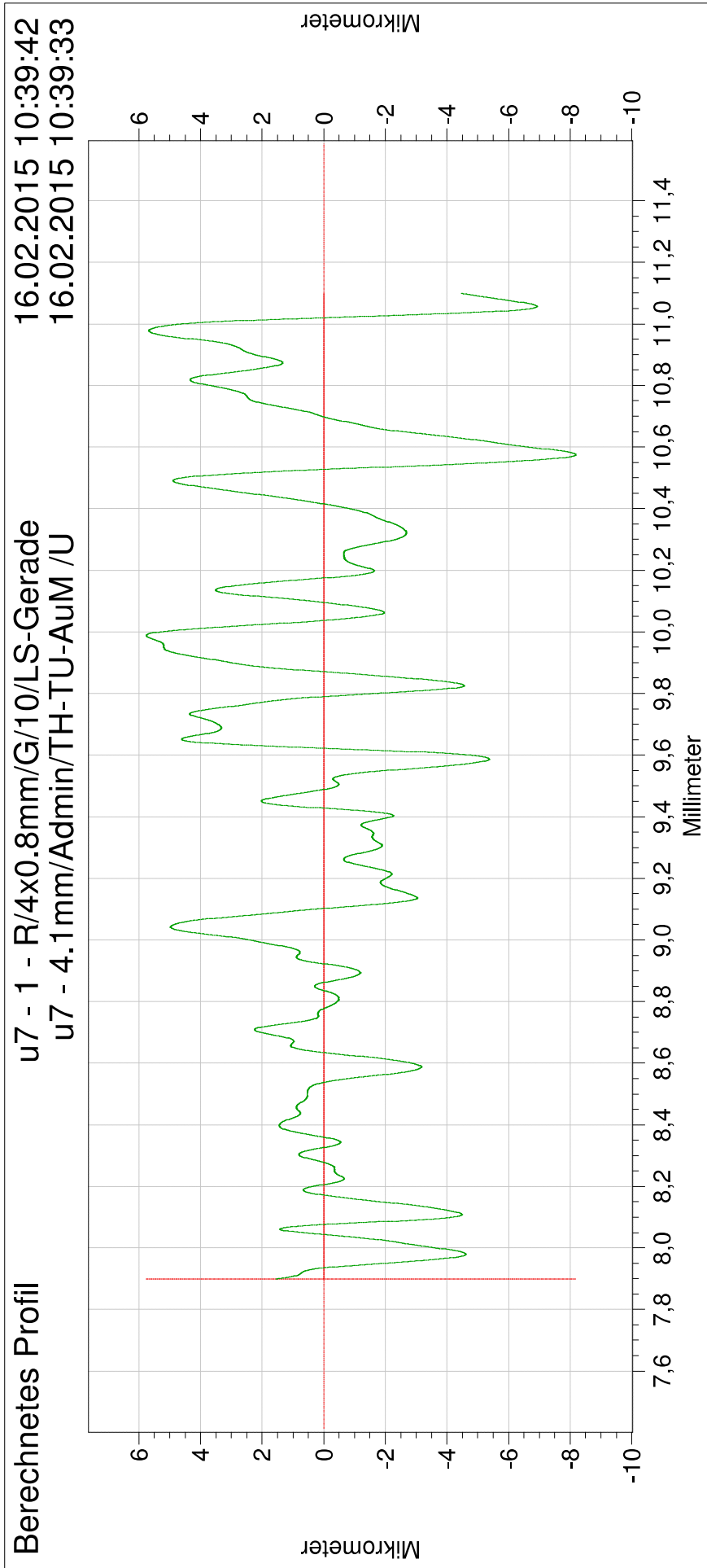
u6 - 1 - R/4x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
u6 - 4.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U

16.02.2015 10:38:01  
16.02.2015 10:37:53



Ra	3,7890	µm	Rq	5,1420	µm
Rp	11,1618	µm	Rt	32,4694	µm
			Rz	20,4980	µm

# Taylor Hobson



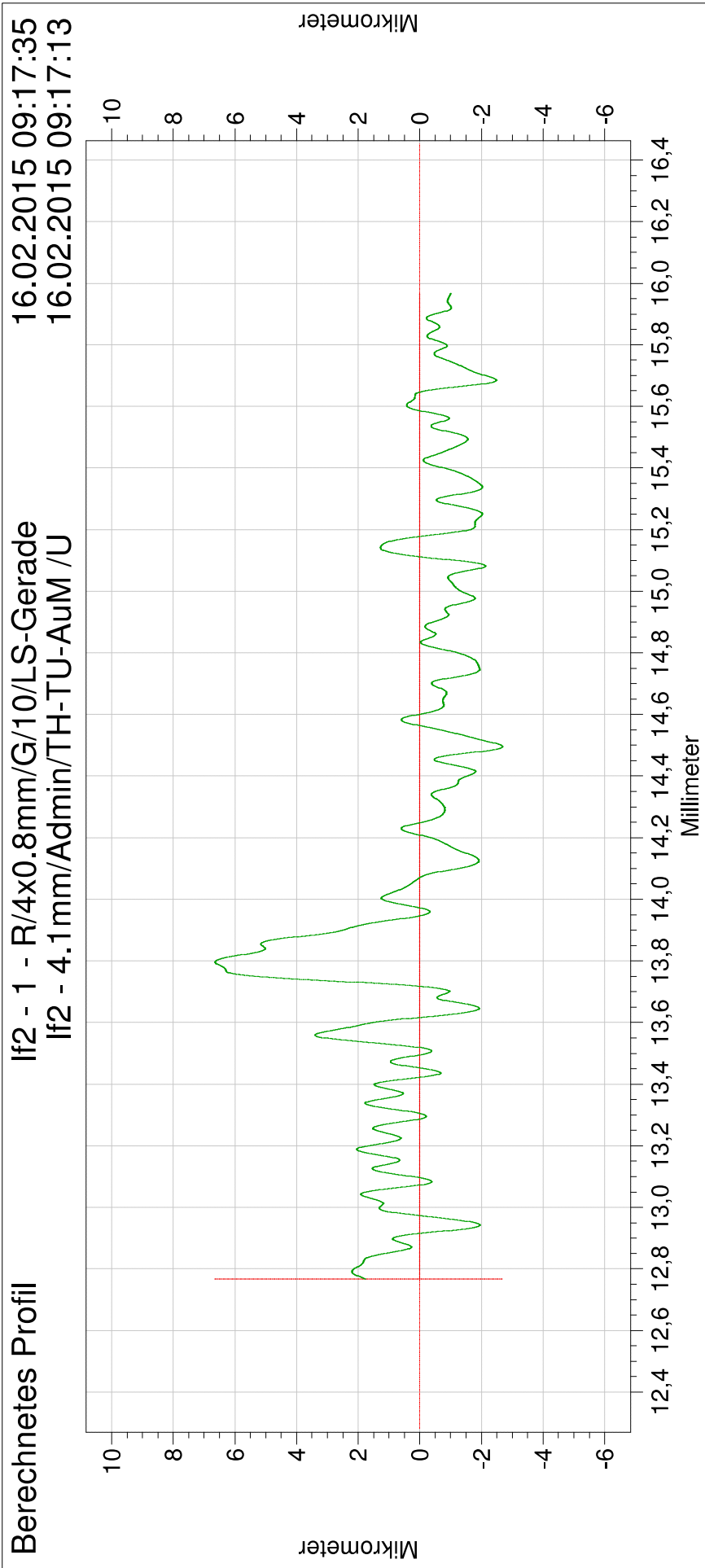
Ra	2,1901	µm	Rq	2,7964	µm
Rp	4,5955	µm	Rt	13,9414	µm
			Rz	9,8933	µm

## 12.6.4 Oberflächenrauigkeit Rad Position 1

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messung der Oberflächenrauigkeit des Rades an der Position 1 dargestellt.

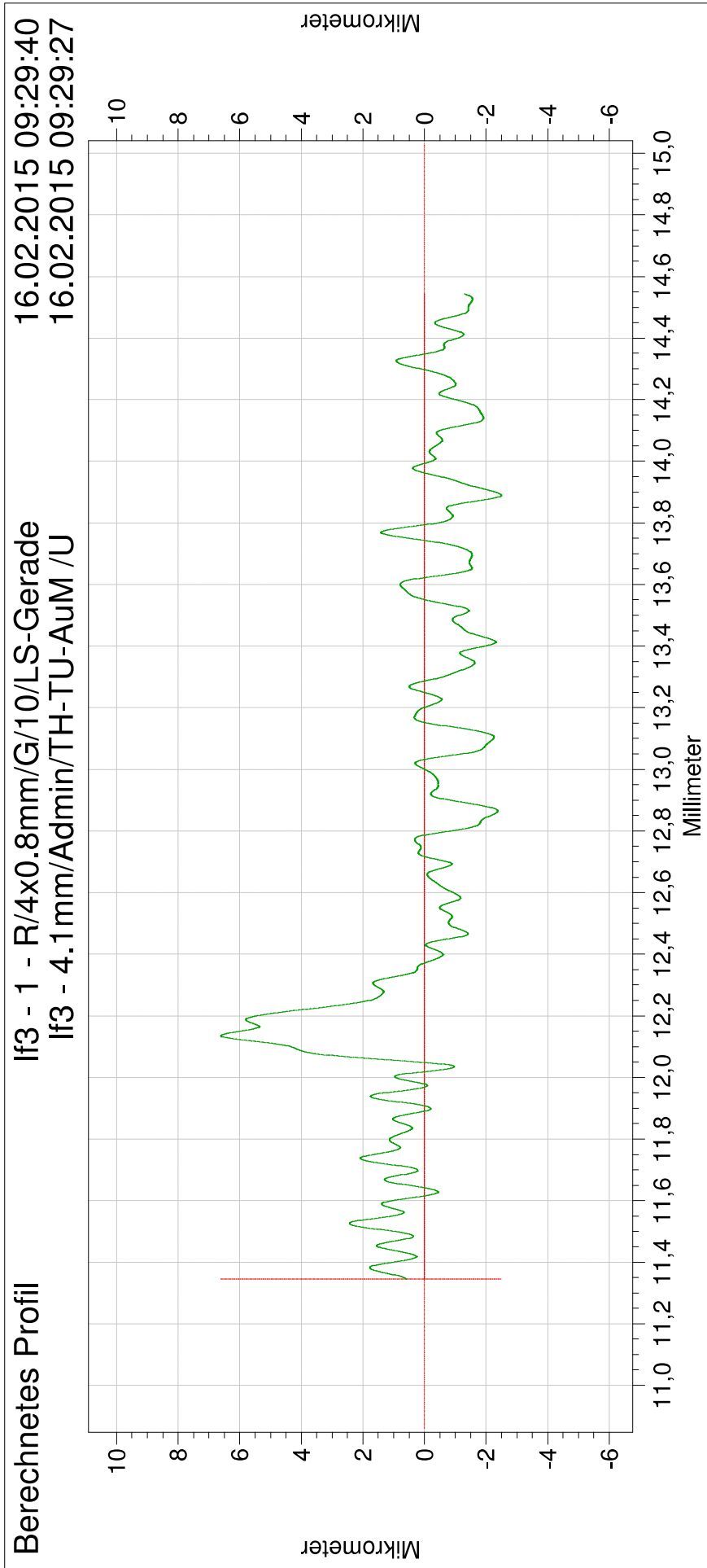


# Taylor Hobson



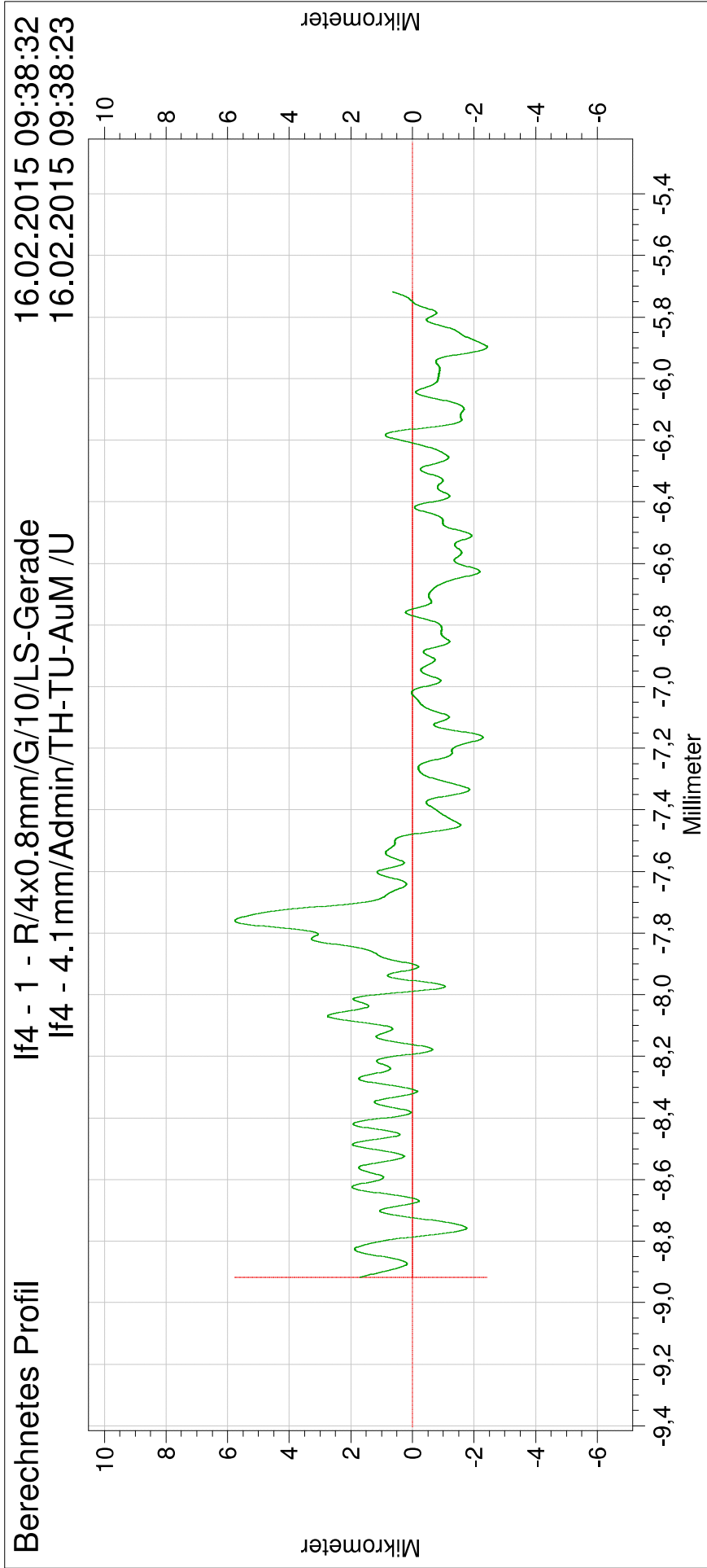
Ra	1,2444	µm	Rq	1,6997	µm
Rp	3,0257	µm	Rt	9,3304	µm
			Rz	5,2835	µm

# Taylor Hobson



Ra	1,1252	µm	Rq	1,5824	µm
Rp	3,7828	µm	Rt	9,1073	µm
			Rz	5,8192	µm

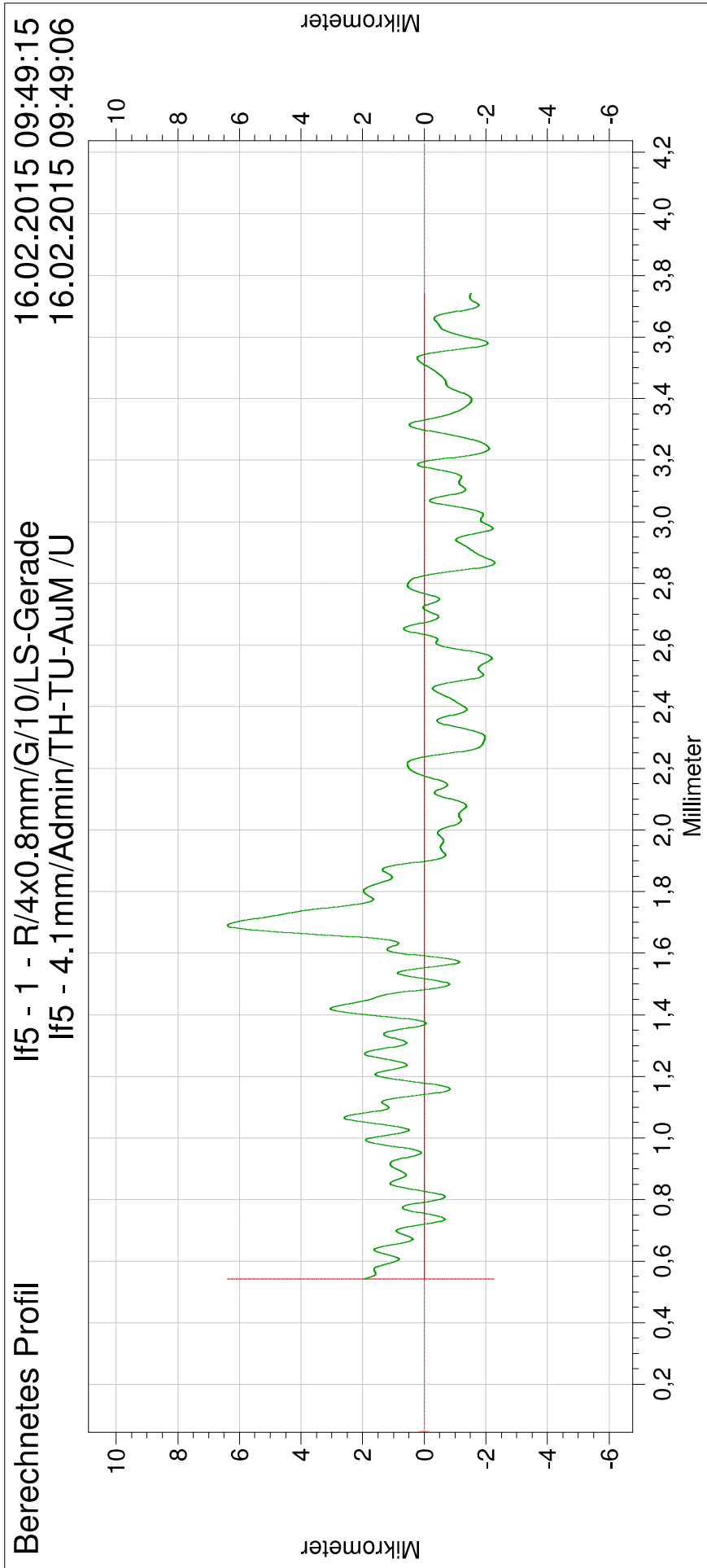
# Taylor Hobson



Ra	1,0669	µm	Rq	1,3769	µm
Rp	2,2100	µm	Rt	8,1902	µm
			Rz	4,2870	µm



# Taylor Hobson

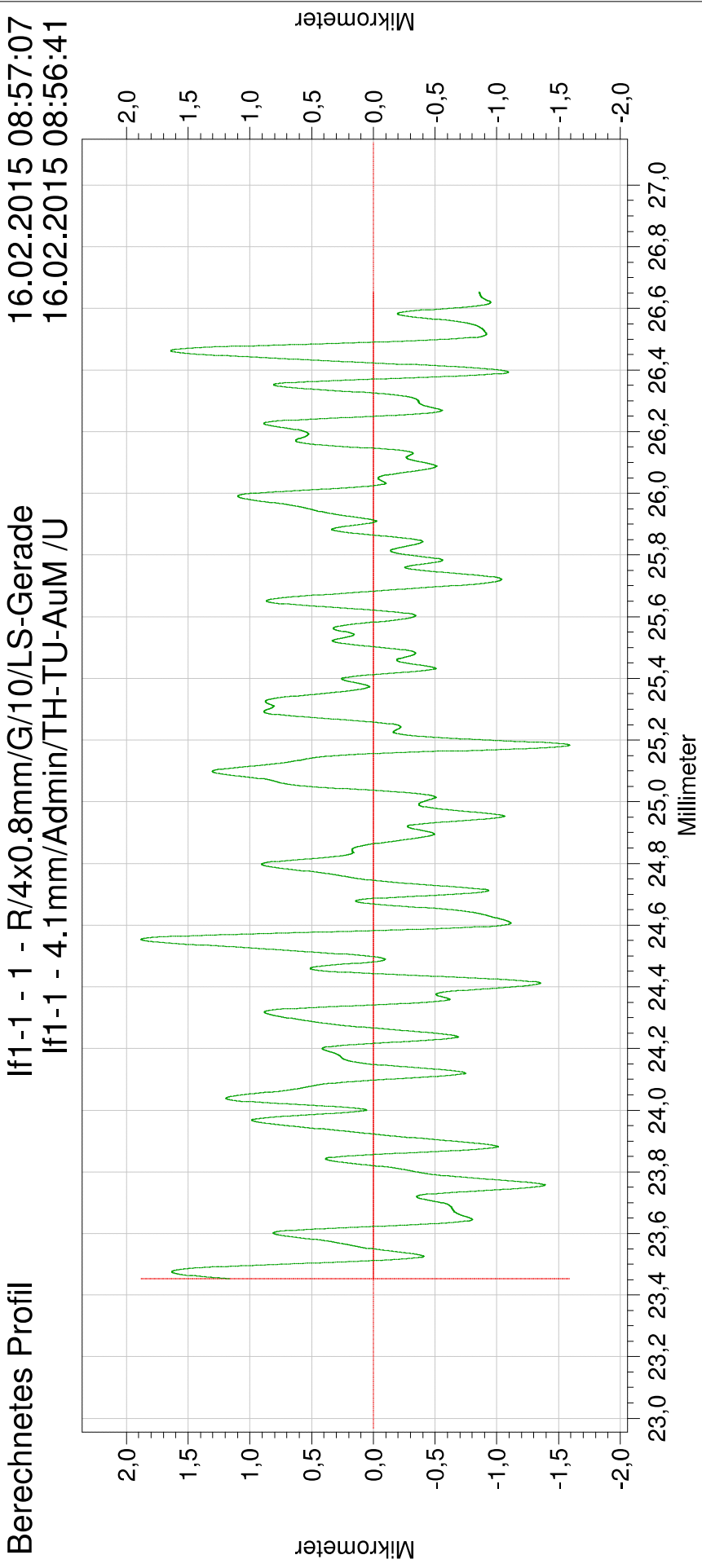


Ra	1,1216	$\mu\text{m}$	Rq	1,4594	$\mu\text{m}$
Rp	2,5374	$\mu\text{m}$	Rt	8,6712	$\mu\text{m}$
			Rz	4,2103	$\mu\text{m}$

## 12.6.5 Oberflächenrauigkeit Rad Position 2

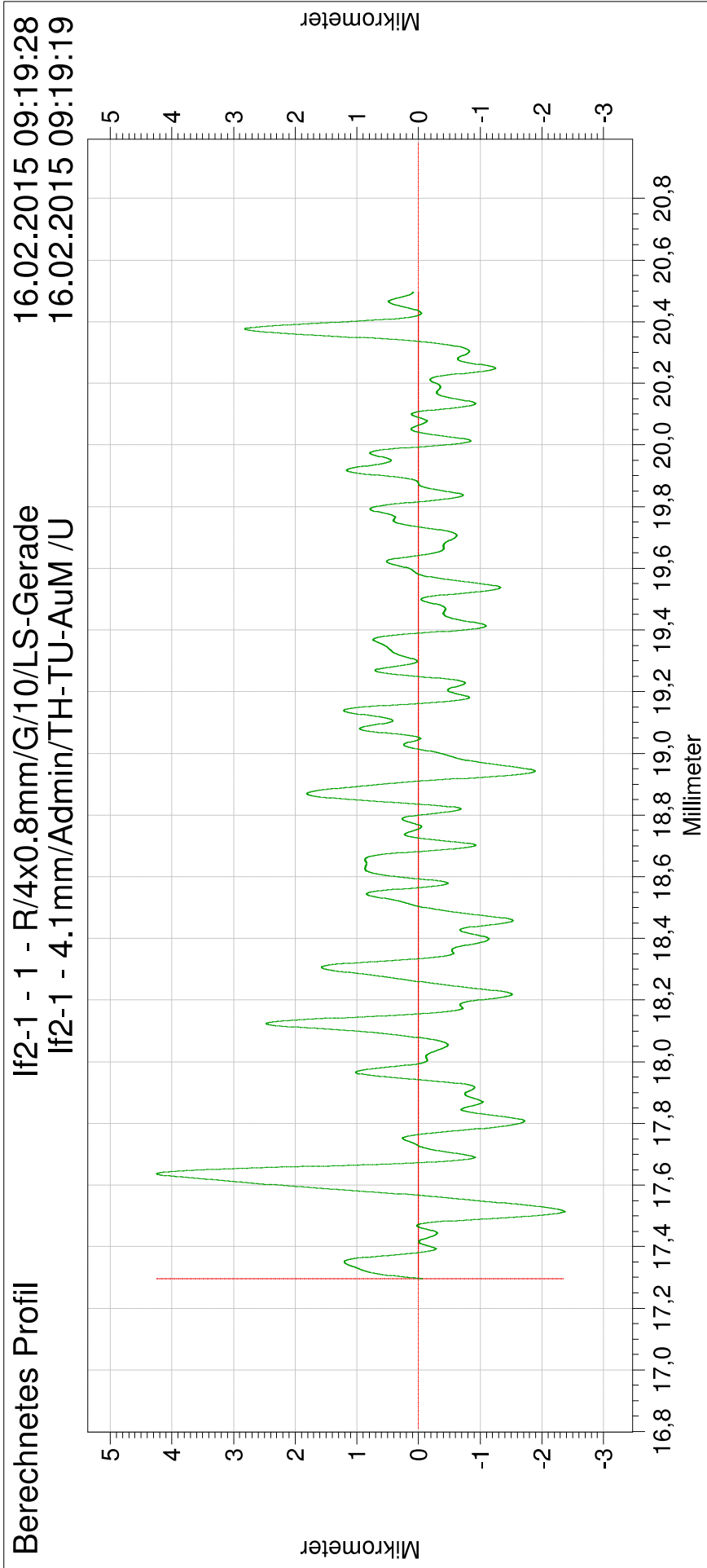
Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messung der Oberflächenrauigkeit des Rades an der Position 2 dargestellt

# Taylor Hobson



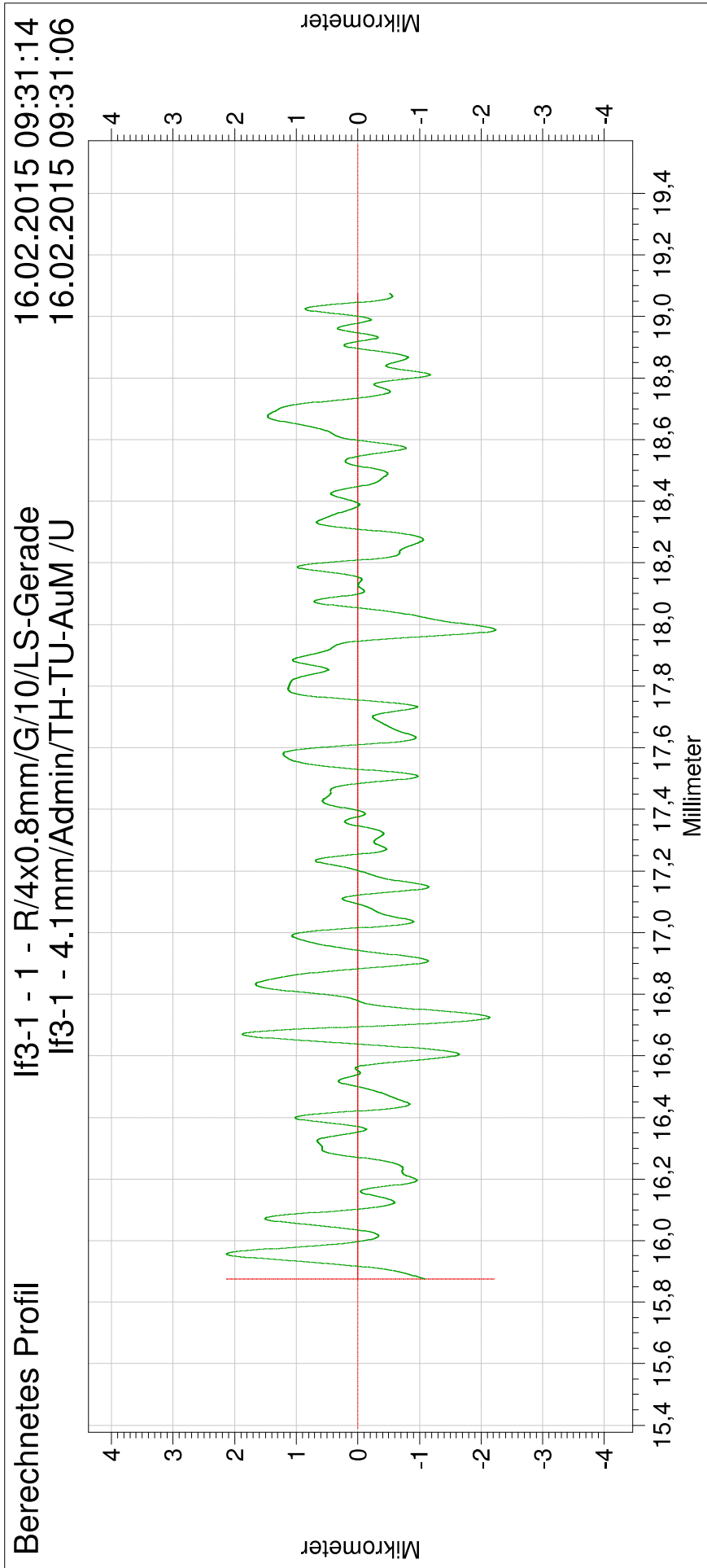
Ra	0,5426	µm	Rq	0,6598	µm
Rp	1,6151	µm	Rt	3,4696	µm
			Rz	2,9709	µm

# Taylor Hobson



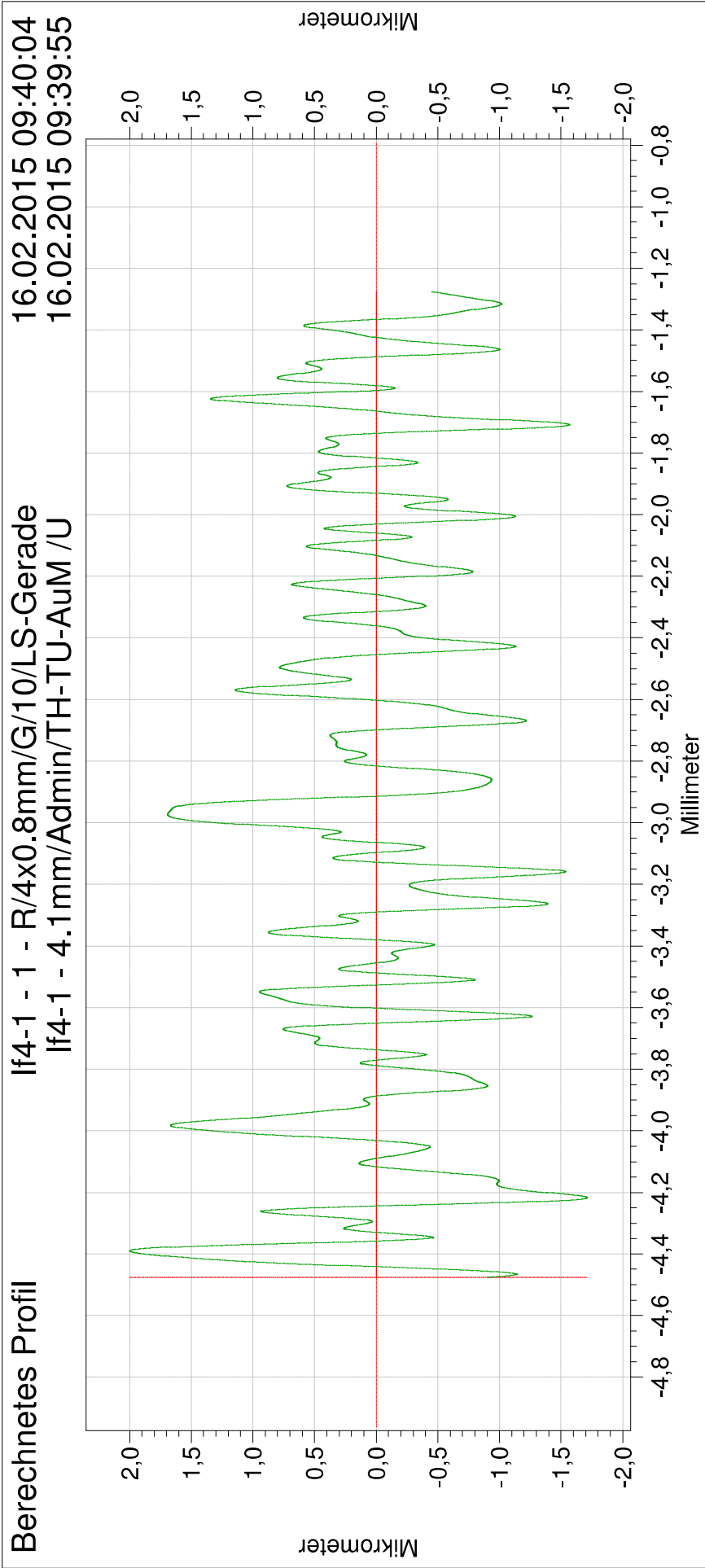
Ra	0,6963	µm	Rq	0,9466	µm
Rp	2,6881	µm	Rt	6,6101	µm
			Rz	4,4433	µm

# Taylor Hobson



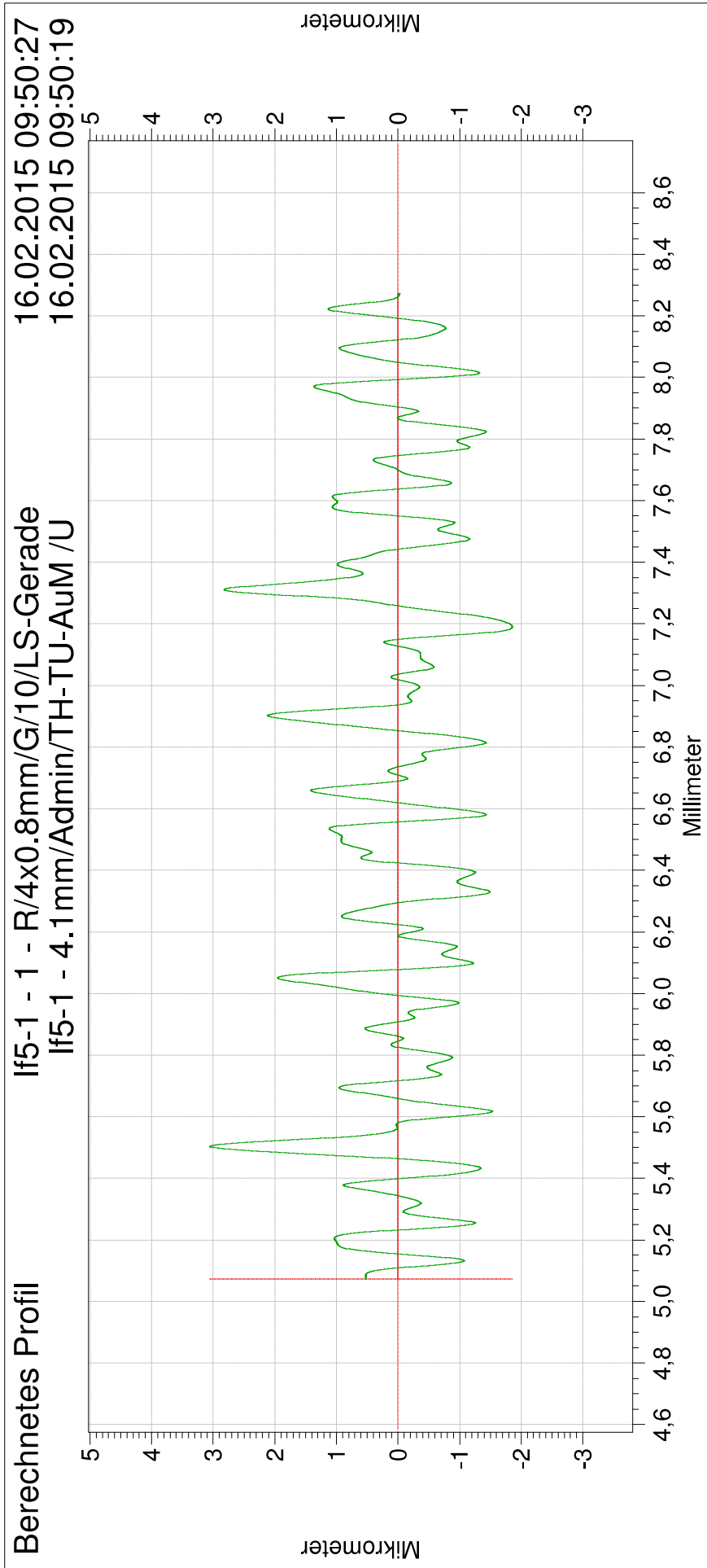
Ra	0,6047	$\mu\text{m}$	Rq	0,7628	$\mu\text{m}$
Rp	1,6548	$\mu\text{m}$	Rt	4,3656	$\mu\text{m}$
			Rz	3,4516	$\mu\text{m}$

# Taylor Hobson



Ra	0,5642	µm	Rq	0,7055	µm
Rp	1,5442	µm	Rt	3,7130	µm
			Rz	3,0536	µm

# Taylor Hobson



Ra	0,7115	µm	Rq	0,8923	µm
Rp	2,2985	µm	Rt	4,9099	µm
			Rz	3,8741	µm

### 12.6.6 Oberflächenrauigkeit Rad Position 3

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messung der Oberflächenrauigkeit des Rades an der Position 3 dargestellt

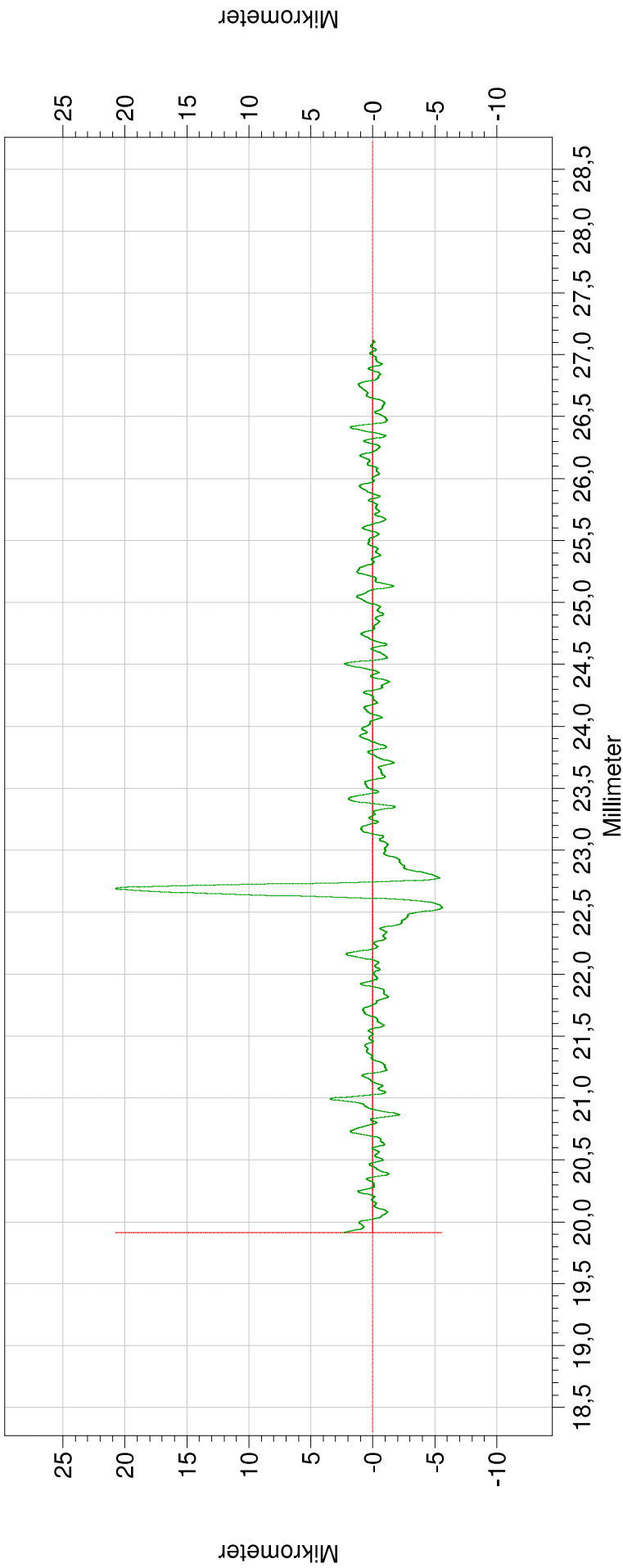


# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

If1-8 - 1 - R/9x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
If1-8 - 8.1 mm/Admin/TH-TU-AuM /U

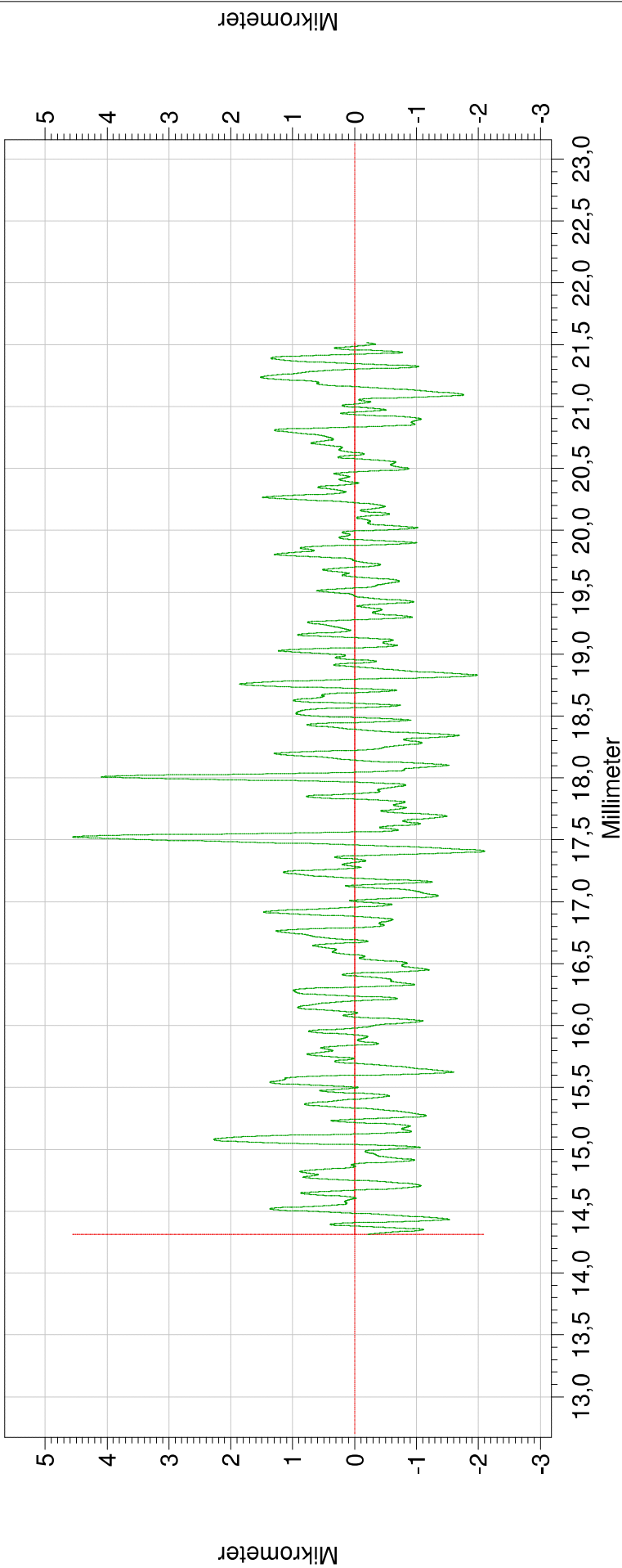
16.02.2015 09:12:13  
16.02.2015 09:11:56



Ra	0,9631	µm	Rq	2,2195	µm
Rp	4,1212	µm	Rt	26,2862	µm
			Rz	6,0099	µm

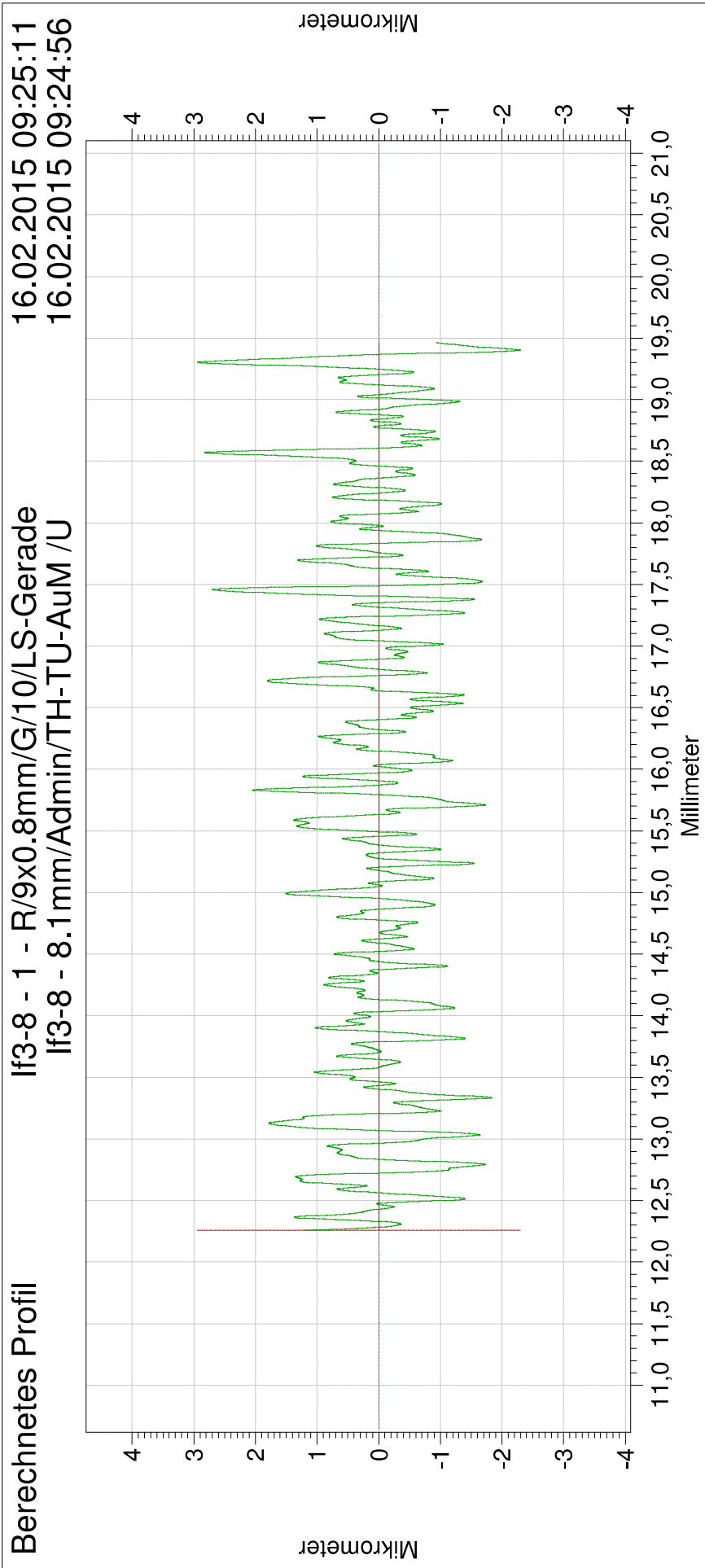
# Taylor Hobson

Berechnetes Profil **If2-8 - 1 - R/9x0.8mm/G/10/LS-Gerade** 16.02.2015 09:22:05  
**If2-8 - 8.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U** 16.02.2015 09:21:50



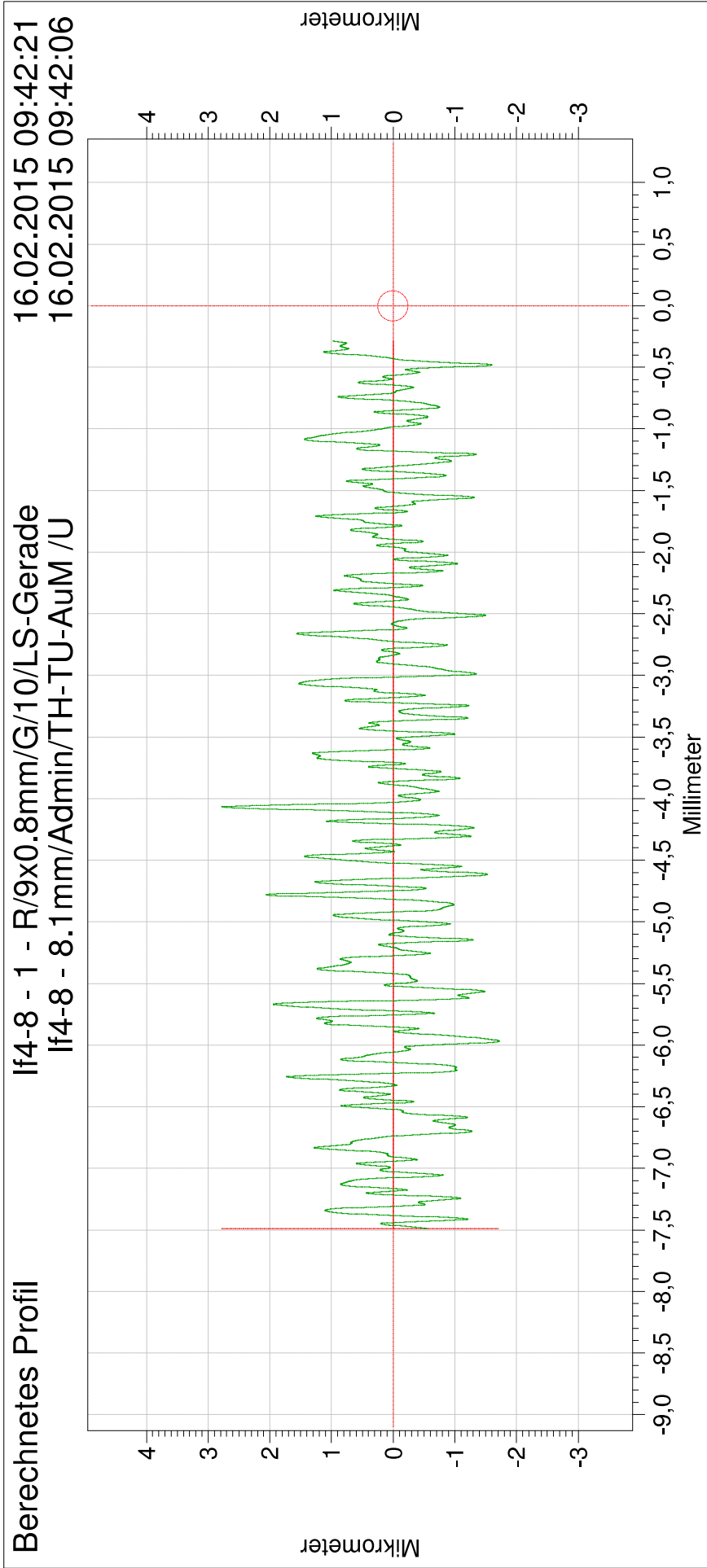
Ra	0,6337	µm	Rq	0,8458	µm
Rp	2,1776	µm	Rt	6,6517	µm
			Rz	3,6967	µm

# Taylor Hobson



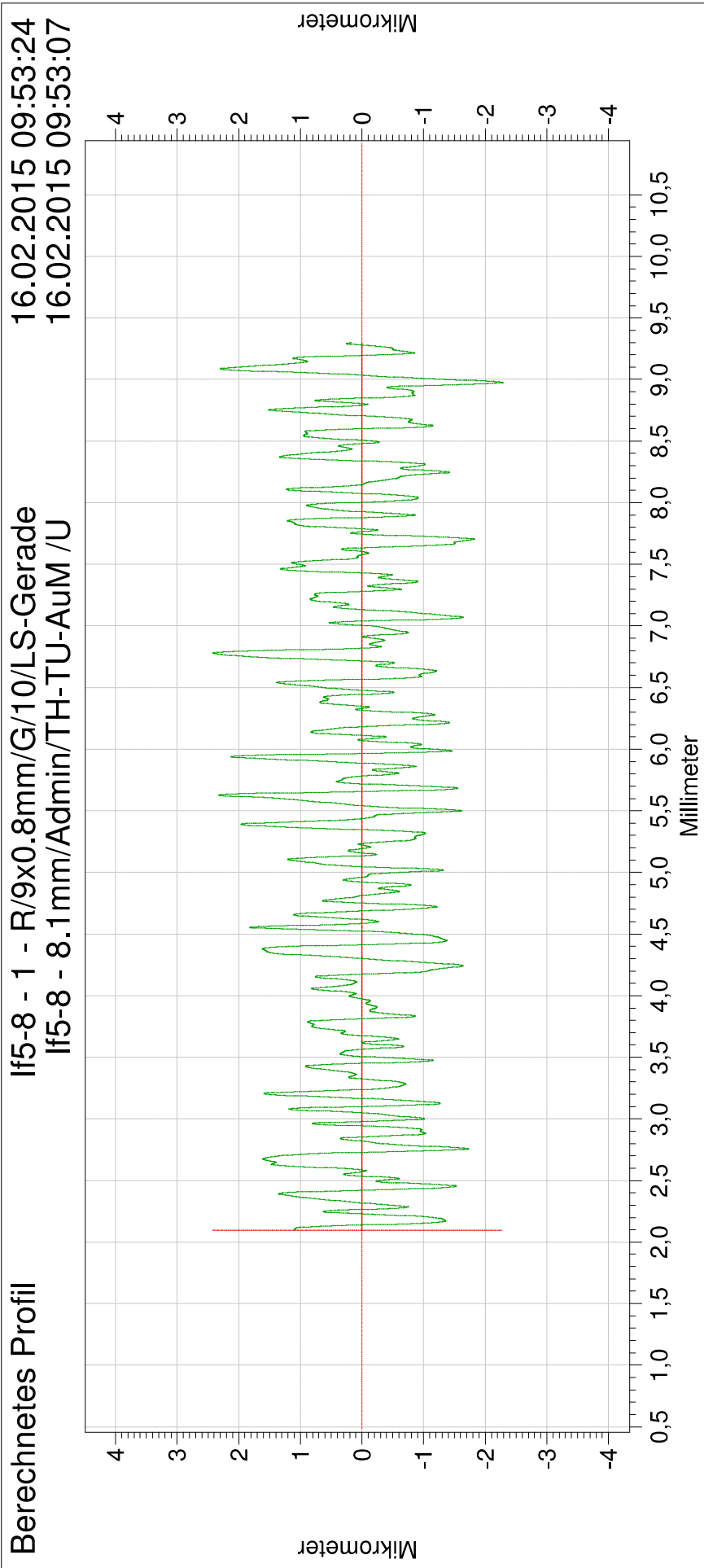
Ra	0,6417	µm	Rq	0,8197	µm
Rp	1,9984	µm	Rt	5,2335	µm
			Rz	3,6710	µm

# Taylor Hobson



Ra	0,5770	µm	Rq	0,7230	µm
Rp	1,7500	µm	Rt	4,4941	µm
			Rz	3,2033	µm

# Taylor Hobson

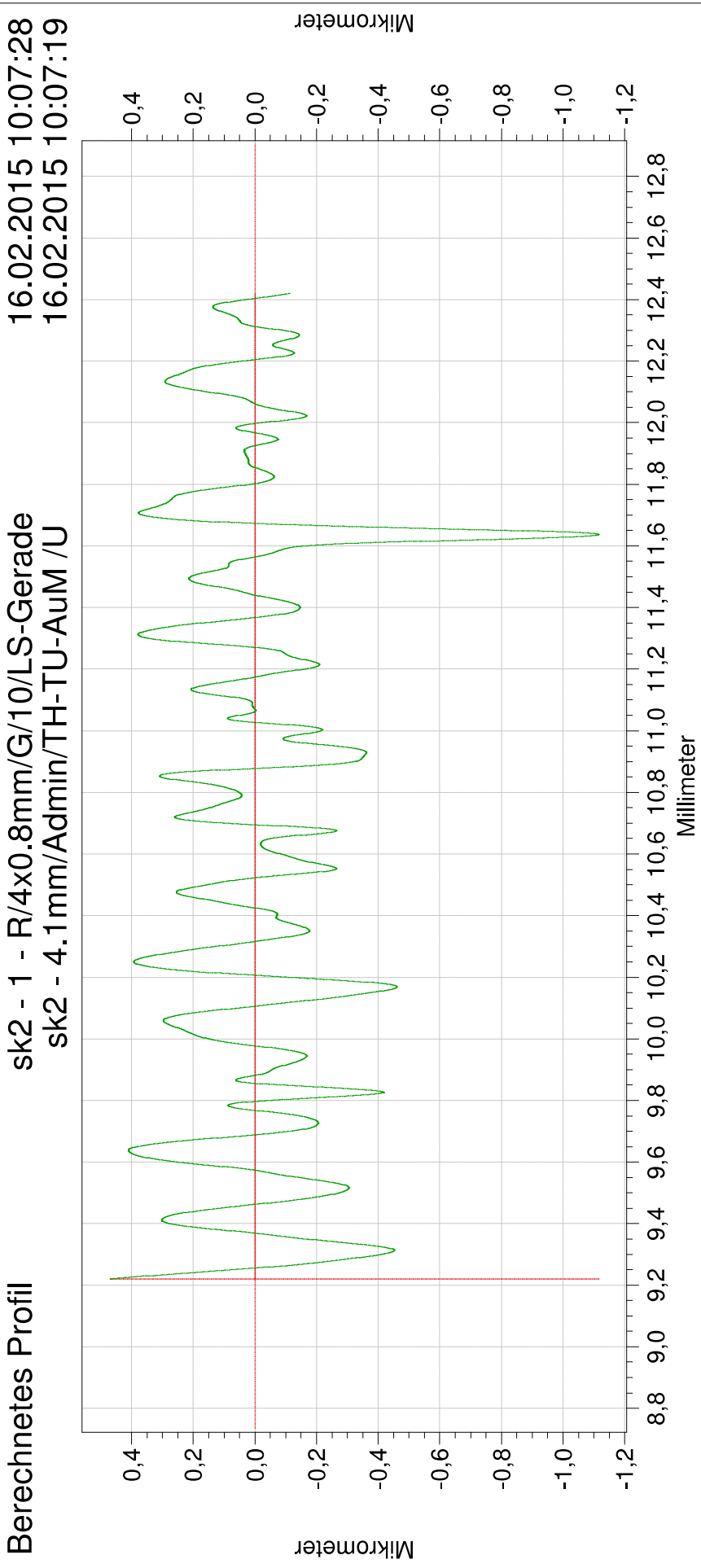


Ra	0,6827	µm	Rq	0,8440	µm
Rp	1,8158	µm	Rt	4,7041	µm
			Rz	3,4655	µm

## 12.6.7 Oberflächenrauigkeit Spurkranz

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messung der Oberflächenrauigkeit des Spurkranzes dargestellt

# Taylor Hobson



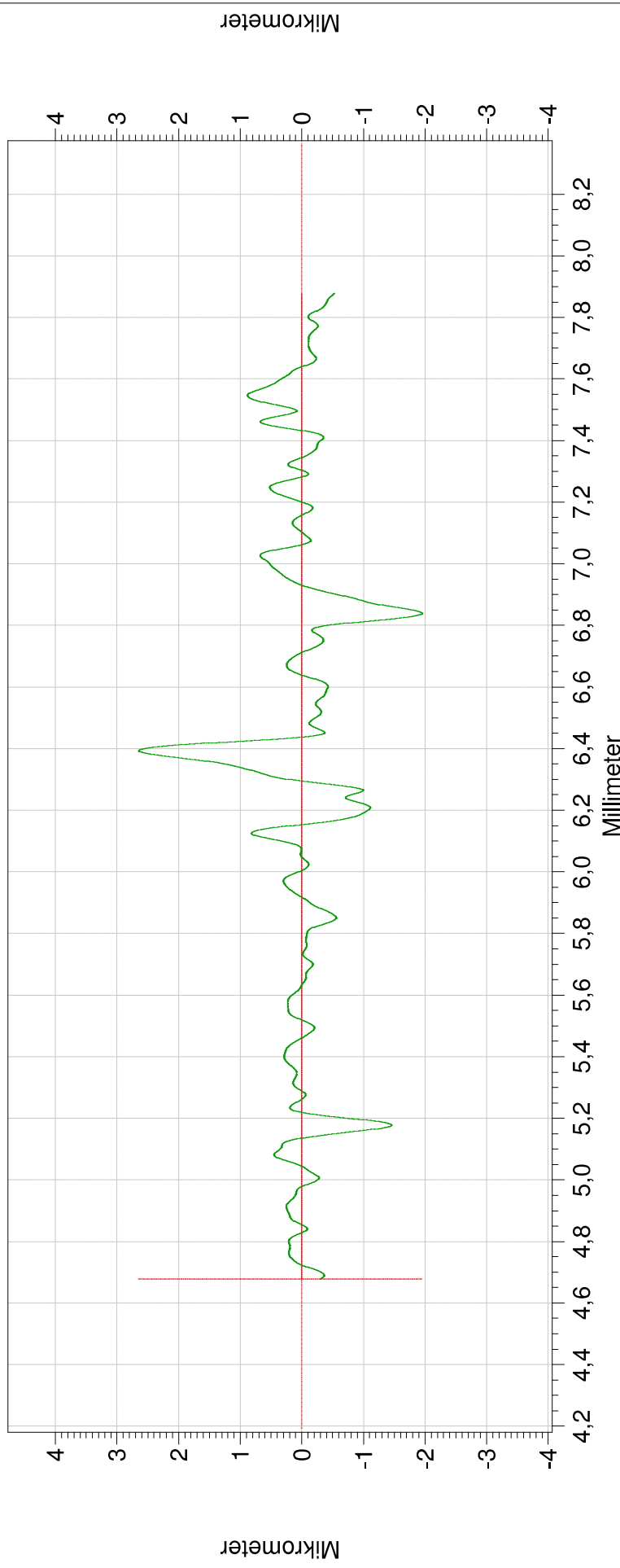
Ra	0,1675	µm	Rq	0,2204	µm
Rp	0,4050	µm	Rt	1,5862	µm
			Rz	1,0842	µm

# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

sk1 - 1 - R/4x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
sk1 - 4.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U

16.02.2015 10:05:21  
16.02.2015 10:05:11



Ra	0,3451	$\mu\text{m}$	Rq	0,5396	$\mu\text{m}$
Rp	1,2023	$\mu\text{m}$	Rt	4,6047	$\mu\text{m}$
			Rz	2,4621	$\mu\text{m}$

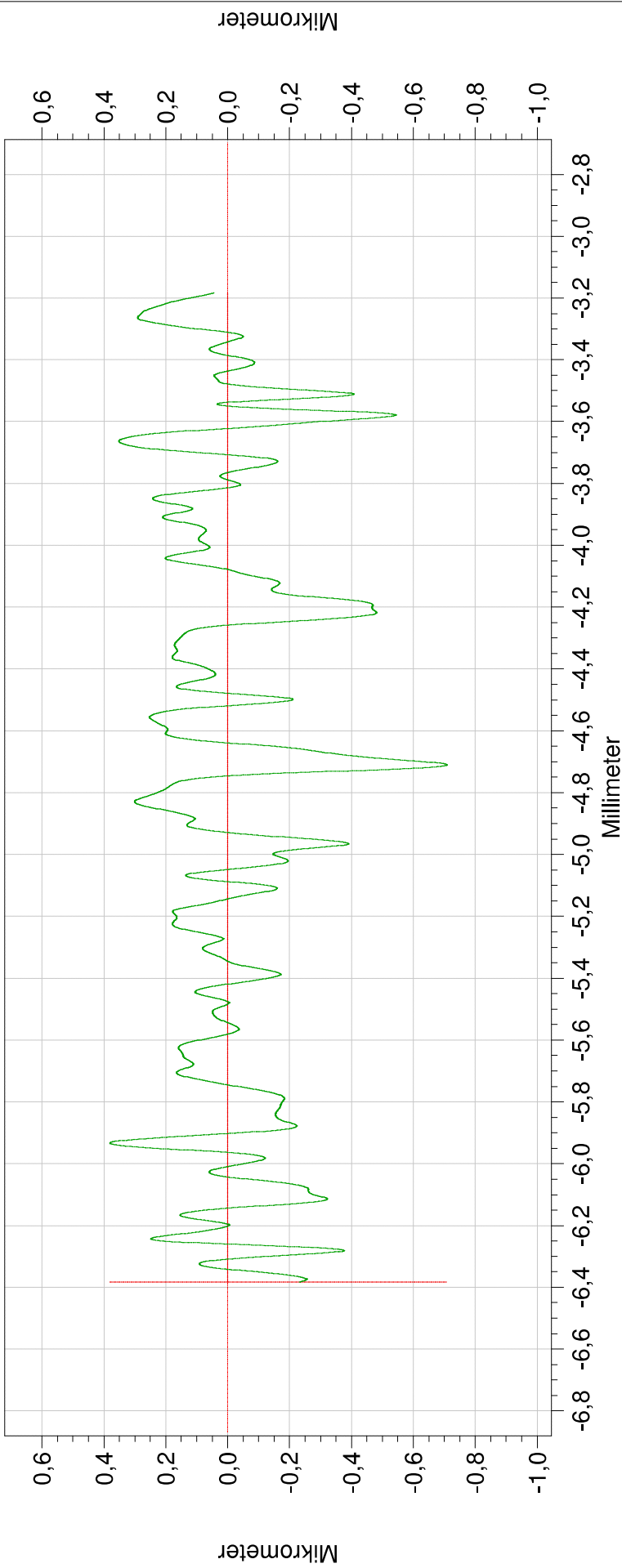


# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

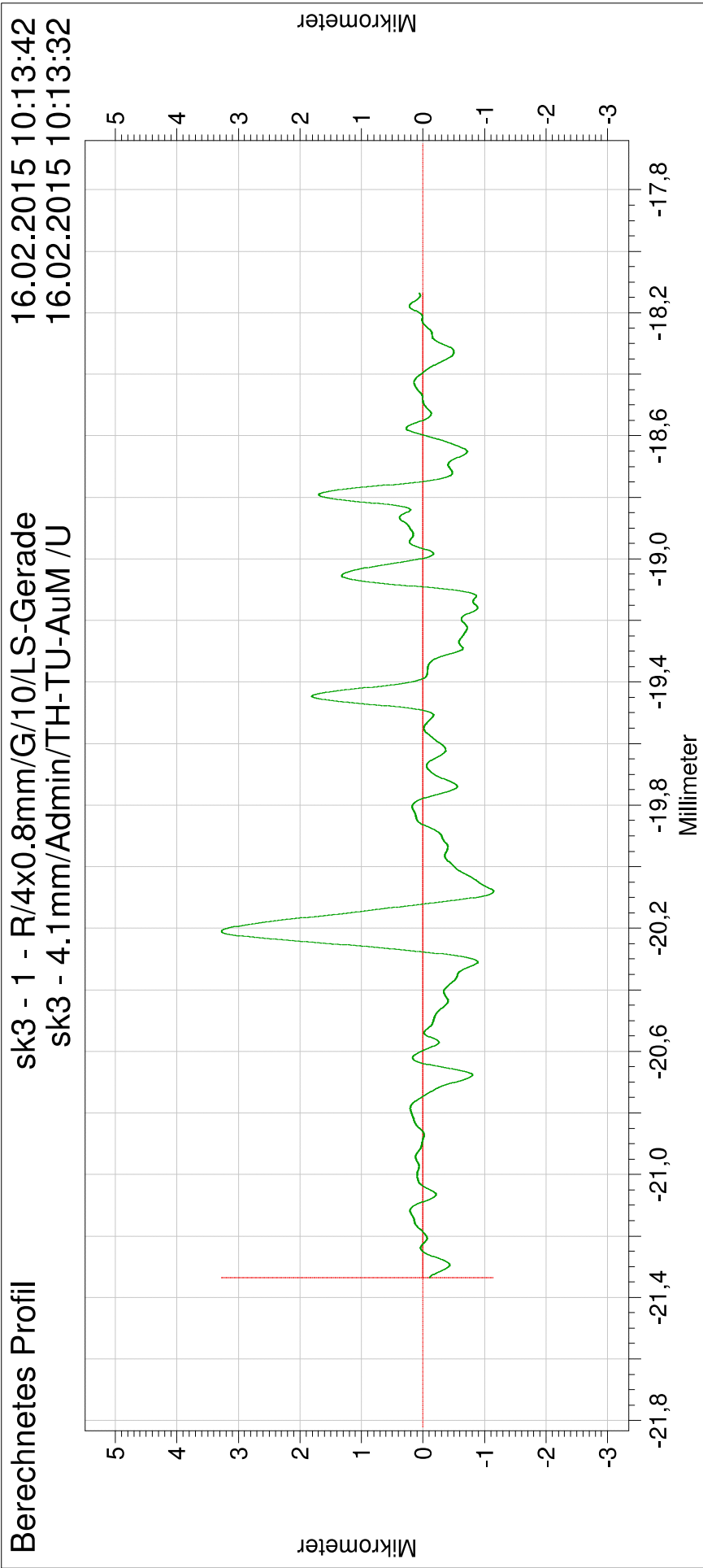
sk3 - 1 - R/4x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
sk3 - 4.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U

16.02.2015 10:10:17  
16.02.2015 10:10:08



Ra	0,1504	µm	Rq	0,1912	µm
Rp	0,3219	µm	Rt	1,0904	µm
			Rz	0,8265	µm

# Taylor Hobson



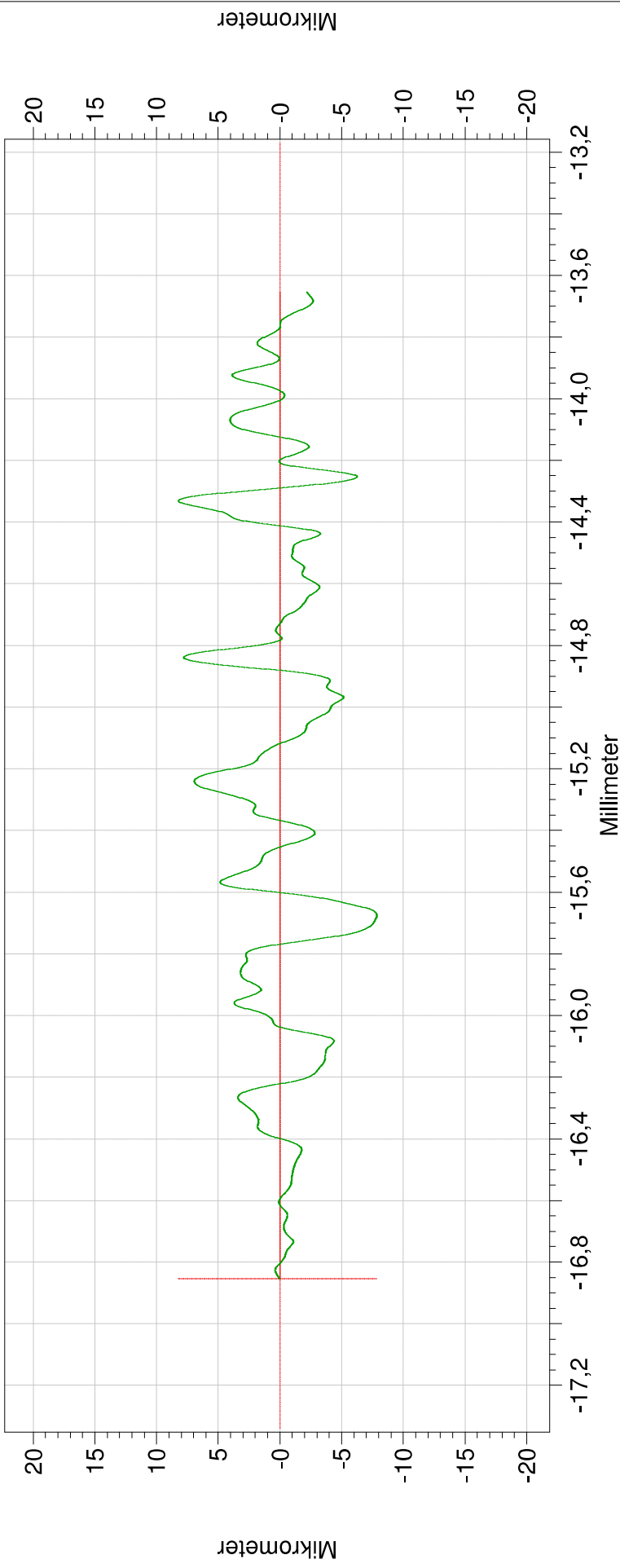
Ra	0,4129	µm	Rq	0,6649	µm
Rp	1,7516	µm	Rt	4,4226	µm
			Rz	2,6369	µm

# Taylor Hobson

Berechnetes Profil

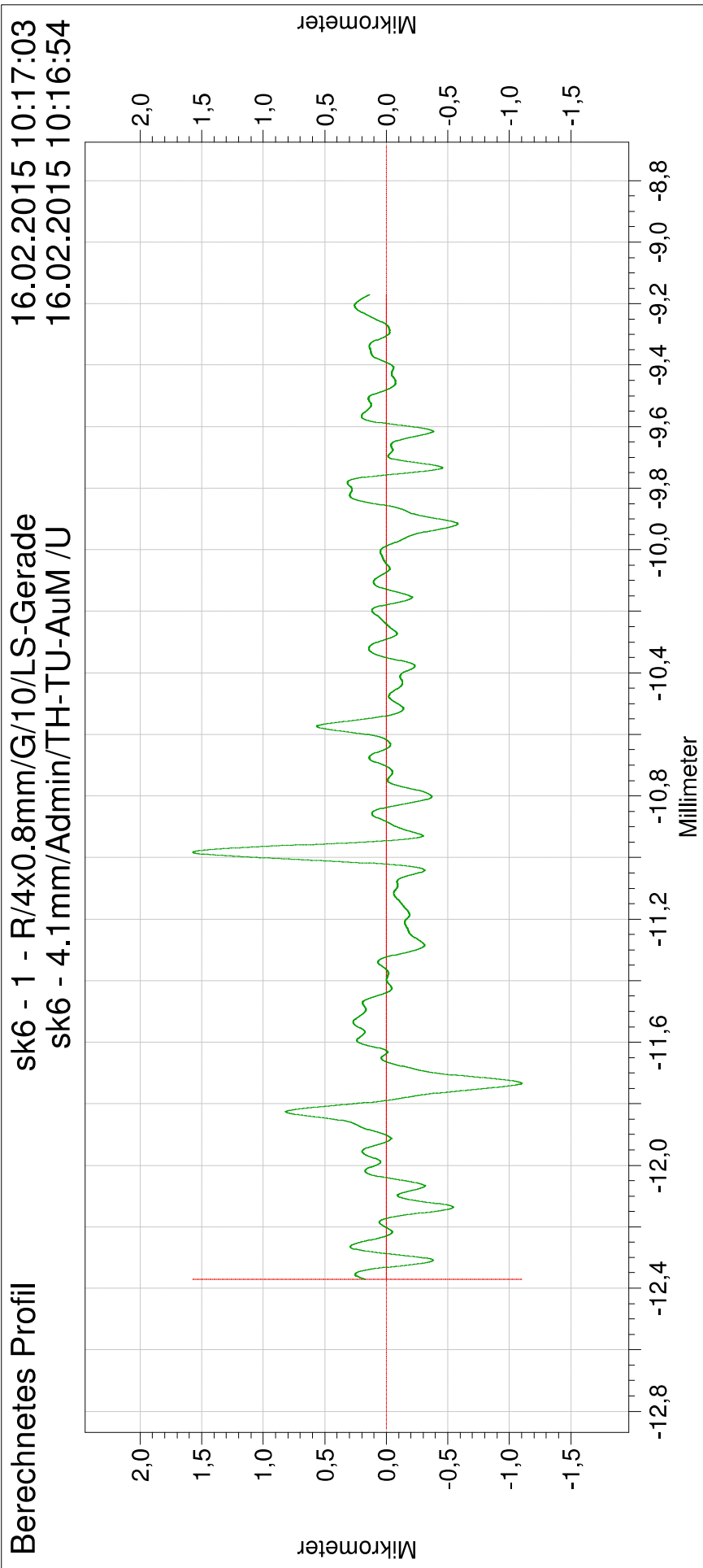
sk5 - 1 - R/4x0.8mm/G/10/LS-Gerade  
sk5 - 4.1mm/Admin/TH-TU-AuM /U

16.02.2015 10:15:30  
16.02.2015 10:15:21



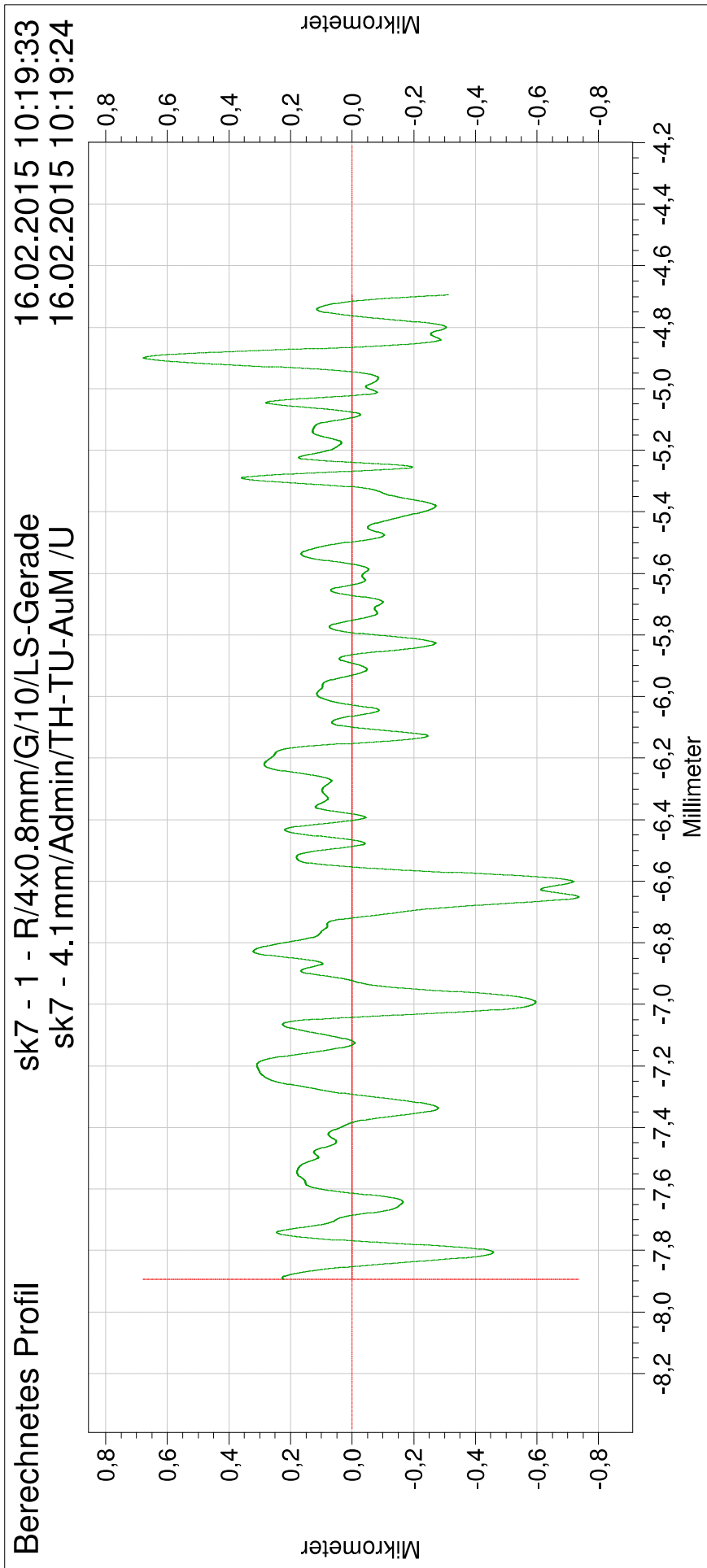
Ra	2,3793	µm	Rq	3,0513	µm
Rp	6,5152	µm	Rt	16,0494	µm
			Rz	12,4145	µm

# Taylor Hobson



Ra	0,1812	µm	Rq	0,2792	µm
Rp	0,8185	µm	Rt	2,6724	µm
			Rz	1,3884	µm

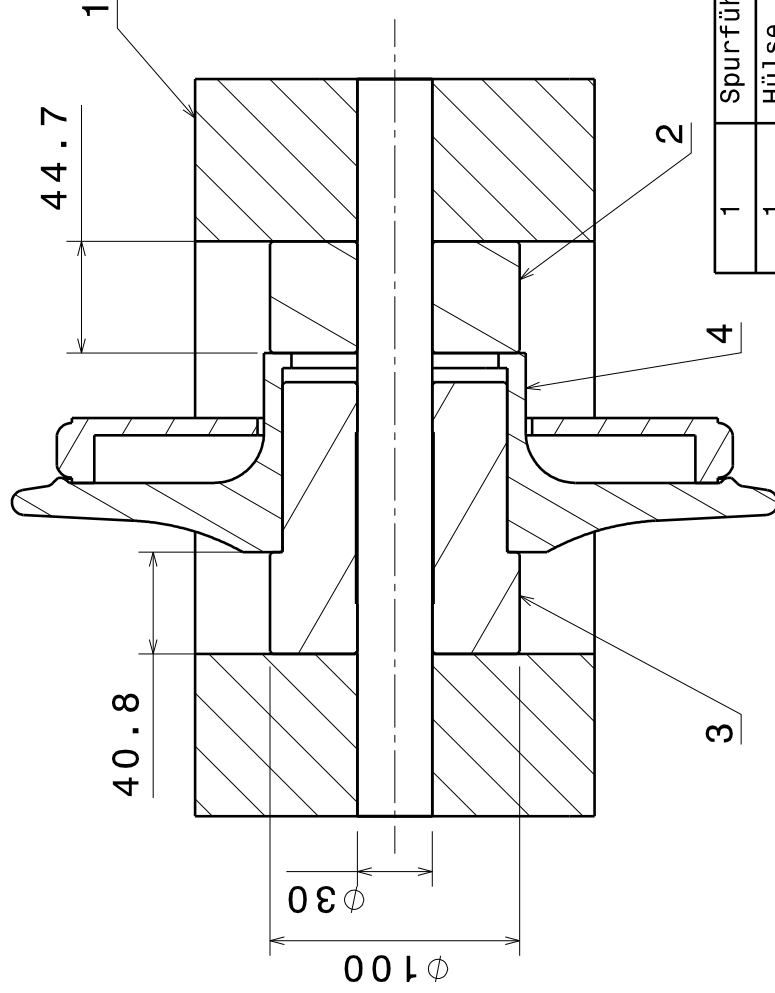
# Taylor Hobson



Ra	0,1598	µm	Rq	0,2175	µm
Rp	0,3988	µm	Rt	1,4129	µm
			Rz	0,8415	µm

## 12.7 Technische Zeichnungen für die Adaptierung der Messvorrichtungen

Im folgenden Abschnitt sind die technischen Zeichnungen der für die Messungen angefertigten Konstruktionen dargestellt.



1	Spurführungsrolle	4	
1	Hülse	3	
1	Distanzhülse	2	
1	Einspannvorrichtung	1	
Stück	Bezeichnung	Teil	Werkstoff
			Norm

Bemerkung

**TU-Wien**

Name:

Erasim J.

Matr.Nr.:

0825219

Abgabedatum:  
Okt. 2014

Maßstab: Inst. für Konstruktionswissenschaften

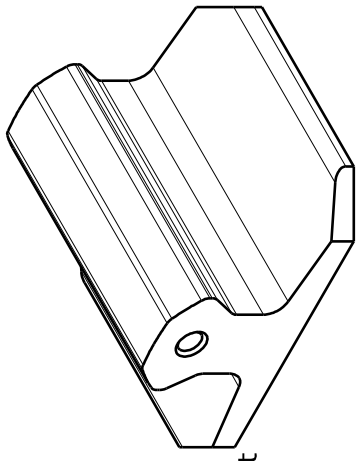
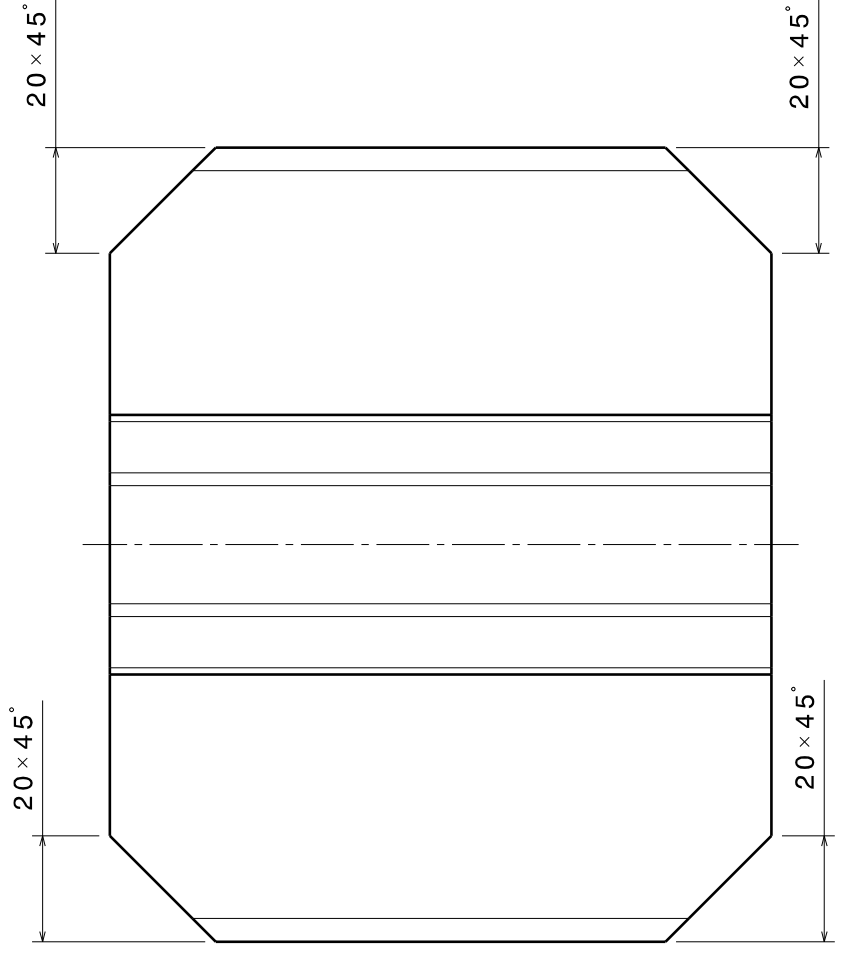
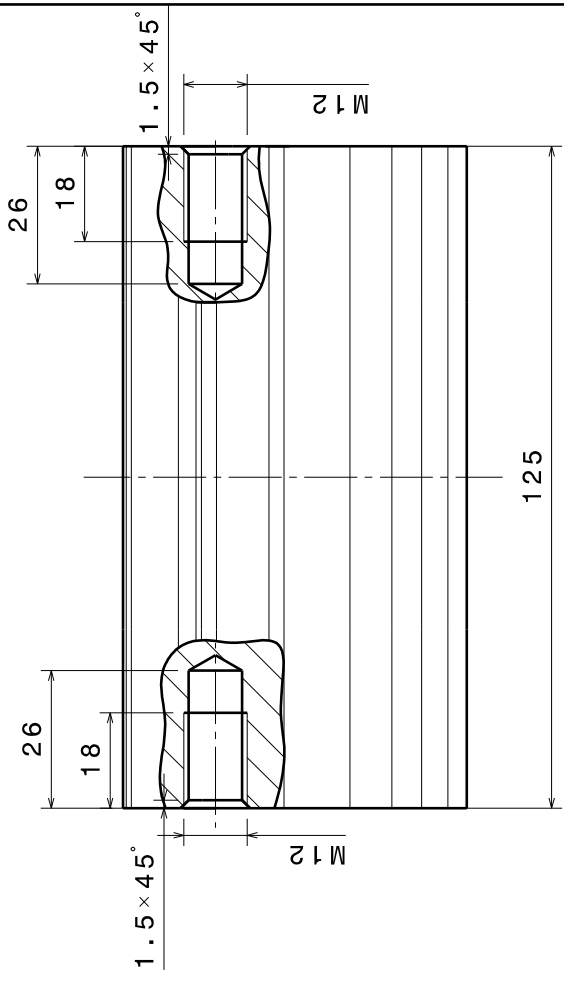
Benennung:

**Zusammenstellungszeichnung**

1:3

Allg.-  
toleranz:  
ÖN ISO  
2768-T1  
m

Zeichnung.Nr.: 1

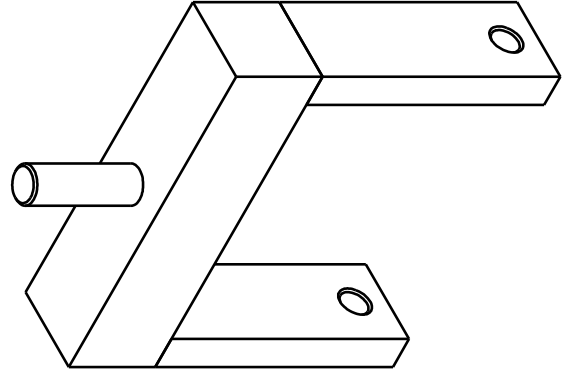
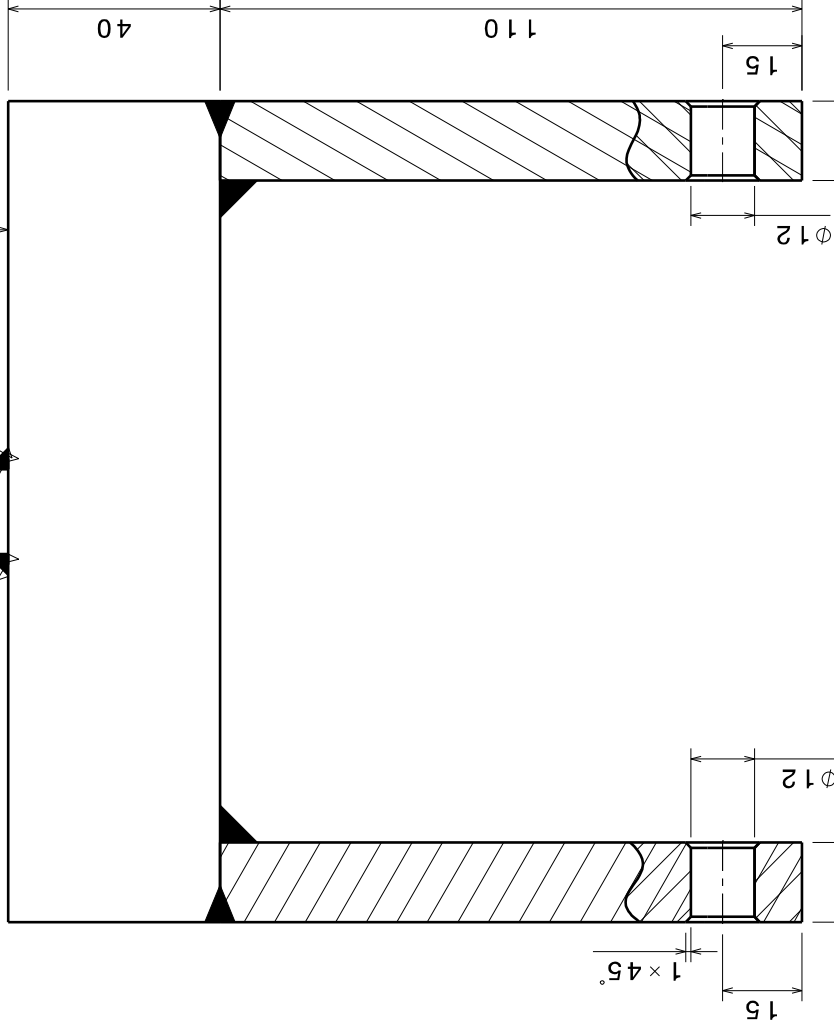
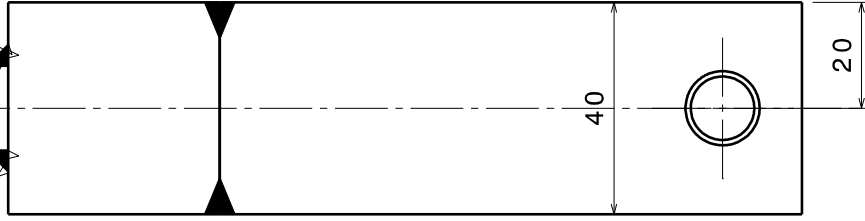
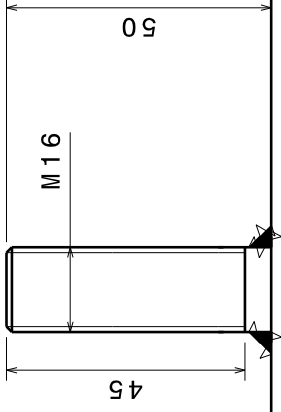


Isometrische Ansicht  
Maßstab: 1:2

Stück	Bezeichnung	Teil	Werkstoff	Norm	Bemerkung
Maßstab:	Inst. für Konstruktionswissenschaften				
1:1 (1:2)	Benennung:				
Allg.-toleranz:	<b>Schiene</b>				
ÖN ISO 2768-T1 m					
Zeichnung.Nr.: 1					Name: Erasmus J.
					Matr.Nr.: 0825219
					Abgabedatum: Okt. 2014

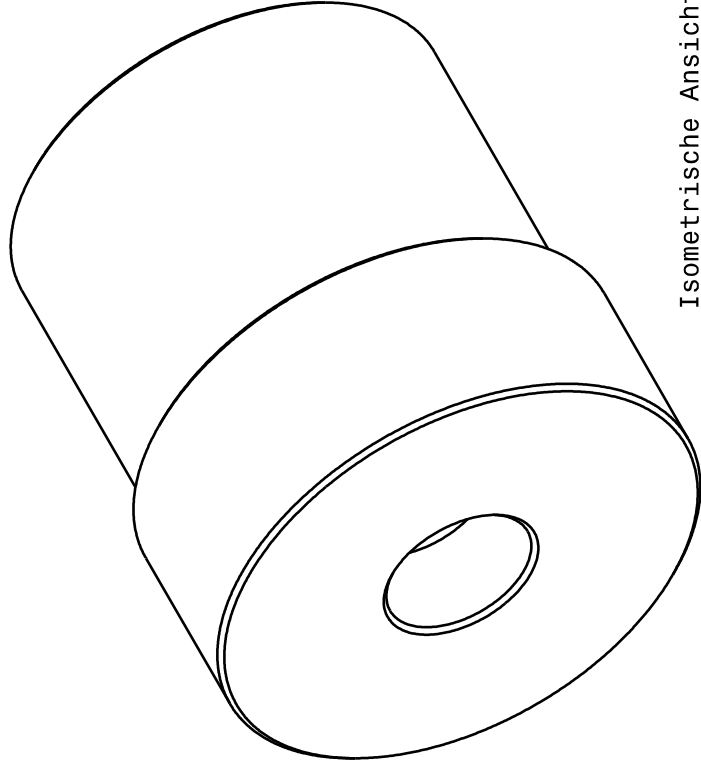
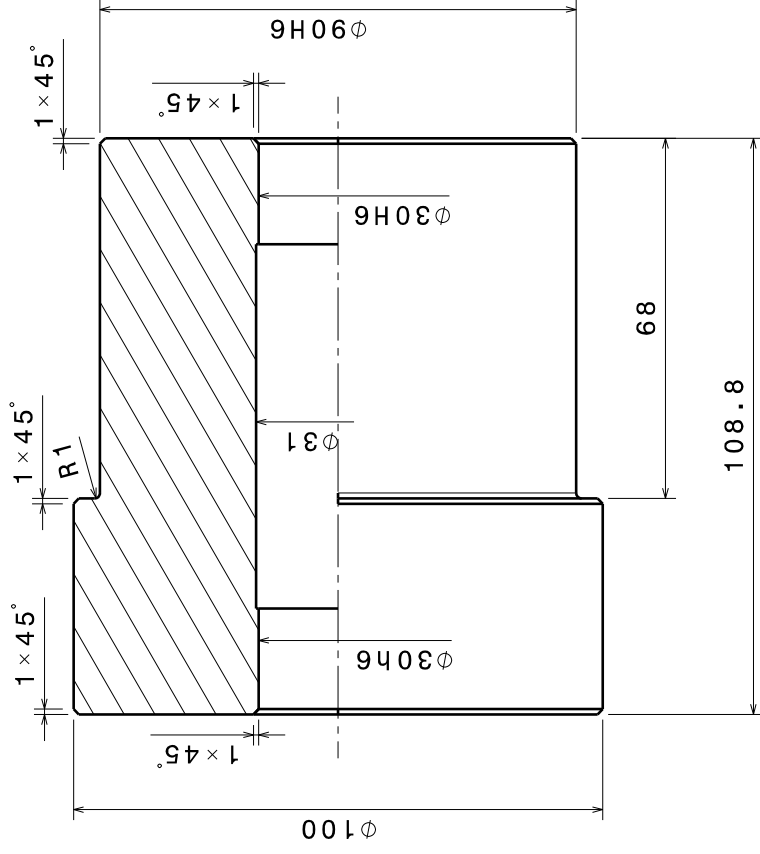
TU-Wien





Isometrische Ansicht  
Maßstab: 1:2

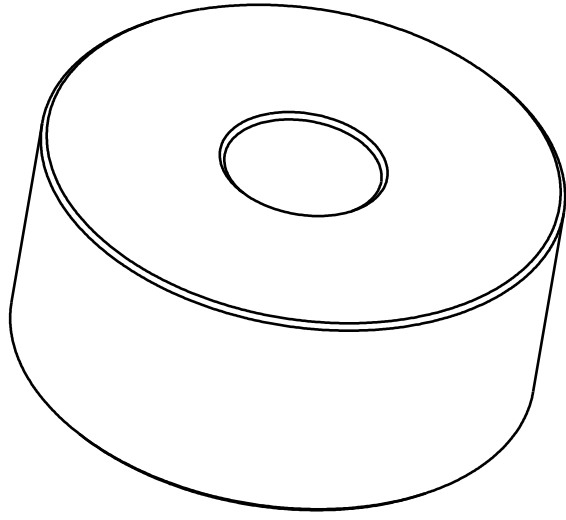
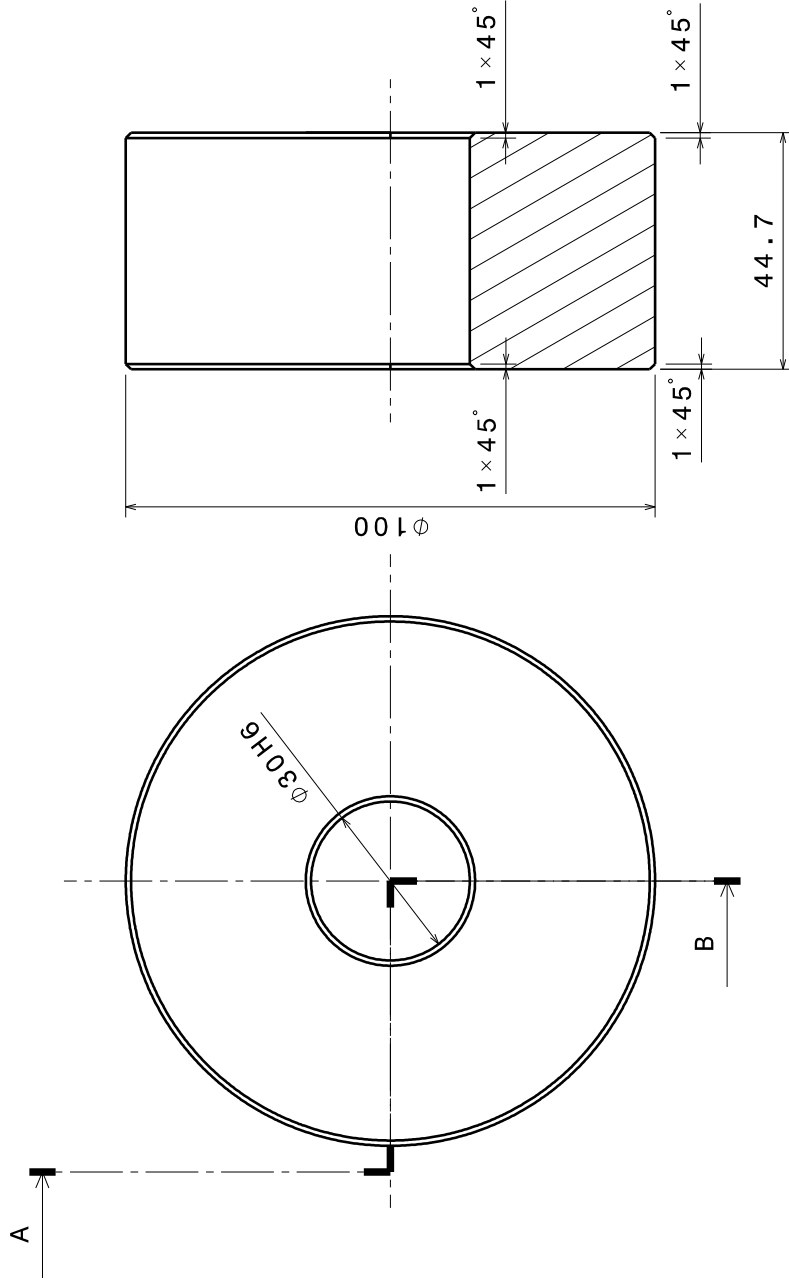
15 Stück	15 Bemerkung
Bezeichnung: Alle Fasern der Bohrung Norm	
Inst. für Konstruktionswissenschaften	
TU-Wien	
Name: ERASIM J.	
Matr. Nr.: 0825219	
Abgabedatum: Okt. 2014	
Maßstab: 1:1	
Benennung: Spange	
(1:2)	
Allg.-toleranz: ÖN ISO 2768-T1 m	
Zeichnung.Nr.: 1	



Isometrische Ansicht

Stück	Bezeichnung	Teil	Werkstoff	Norm	Bemerkung
Maßstab:	Inst. für Konstruktionswissenschaften				
1:1	Benennung:				
(1:2)	<b>Hülse</b>				
Allg.-toleranz:					
ÖN ISO 2768-T1 m					
Zeichnung.Nr.: 1					
Name: ERASIM J.					
Matr.Nr.: 0825219					
Abgabedatum: Okt. 2014					

Schnitt A-B



Isometrische Ansicht

Stück	Bezeichnung	Teil	Werkstoff	Norm	Bemerkung
Maßstab:	Inst. für Konstruktionswissenschaften				
1:1	Benennung:				
Allg.-toleranz:	<b>Distanzhülse</b>				
ÖN ISO 2768-T1 m					
Zeichnung.Nr.: 1					
Name: ERASIM J.					
Matr.Nr.: 0825219					
Abgabedatum: Okt. 2014					

## 12.8 Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle 1: Kontaktfläche, Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie Low .....	A8
Tabelle 2: Kontaktfläche, Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie Super Low .....	A9
Tabelle 3: Kontaktfläche, Kontaktpunkt A, Kraft FN, Folie Low .....	A10
Tabelle 4: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FN, Folie Low .....	A12
Tabelle 5: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FN, Folie Super Low .....	A12
Tabelle 6: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FN (Vergleich), Folie Low .....	A14
Tabelle 8: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FN (Vergleich), Folie Super Low..	A15
Tabelle 9: Kontaktfläche, Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Low .....	A17
Tabelle 10: Kontaktfläche, Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Super Low .....	A19
Tabelle 11: Spannung, Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie Low .....	A24
Tabelle 12: Spannung, Kontaktpunkt Nom, Kraft FN, Folie SuperLow .....	A26
Tabelle 13: Spannung, Kontaktpunkt A, Kraft FN, Folie Low .....	A28
Tabelle 14: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FN, Folie Low .....	A32
Tabelle 15: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FN, Folie Super Low .....	A32
Tabelle 16: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FN (Vergleich), Folie Low .....	A36
Tabelle 17: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FN (Vergleich), Folie Super Low .....	A37
Tabelle 18: Spannung, Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Low .....	A41
Tabelle 19: Spannung, Kontaktpunkt C, Kraft FN, Folie Super Low .....	A45
Tabelle 20: Kontaktfläche, Kontaktpunkt Nom, Kraft FR, Folie Low .....	A48
Tabelle 21: Kontaktfläche, Kontaktpunkt Nom, Kraft FR, Folie Super Low .....	A49
Tabelle 22: Kontaktfläche, Kontaktpunkt A, Kraft FR, Folie Low .....	A50
Tabelle 23: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FR, Folie Low .....	A52
Tabelle 24: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FR (Vergleich), Folie Low .....	A54
Tabelle 25: Kontaktfläche, Kontaktpunkt B, Kraft FR (Vergleich), Folie Super Low	A55
Tabelle 26: Kontaktfläche, Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Low .....	A57
Tabelle 27: Kontaktfläche, Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Super Low .....	A58
Tabelle 28: Spannung, Kontaktpunkt Nom, Kraft FR, Folie Low .....	A63
Tabelle 29: Spannung, Kontaktpunkt Nom, Kraft FR, Folie Super Low .....	A64
Tabelle 30: Spannung, Kontaktpunkt A, Kraft FR, Folie Low .....	A65
Tabelle 31: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FR, Folie Low .....	A69
Tabelle 32: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FR (Vergleich), Folie Low .....	A73
Tabelle 33: Spannung, Kontaktpunkt B, Kraft FR (Vergleich), Folie Super Low .....	A74
Tabelle 34: Spannung, Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Low .....	A78
Tabelle 35: Spannung, Kontaktpunkt C, Kraft FR, Folie Super Low .....	A79