



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Arne Diers

# **Untersuchung der Auswirkungen von Toleranzen einzelner Bauteile auf kinematisch relevante Parameter eines gesamten Motorrades**

**Arne Diers**

**Untersuchung der Auswirkungen von  
Toleranzen einzelner Bauteile auf  
kinematisch relevante Parameter eines  
gesamten Motorrades**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugtechnik (Antrieb und Fahrwerk)  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

BMW AG Motorrad  
Abteilung UX-EF-4  
Anton-Ditt-Bogen 5  
80939 München

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. C. W. Fervers  
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) M. Meinecke

# **Zusammenfassung**

**Arne Diers**

## **Thema der Bachelorthesis**

Untersuchung der Auswirkungen von Toleranzen einzelner Bauteile auf kinematisch relevante Parameter eines gesamten Motorrades.

## **Stichworte**

Motorrad, Fahrwerk, Kinematik, Toleranzen, Abweichung, Fahrwerksvermessung

## **Kurzzusammenfassung**

Für die Entwicklung eines Motorrades sind fahrwerkseitige Vermessungen der Prototypen und ein folgender Abgleich mit der theoretischen Geometrie unabdingbar. Diese Arbeit umfasst die Untersuchung der Auswirkungen von Toleranzen eines gesamten Motorrades auf kinematische Parameter. Dabei werden einerseits die Toleranzen einzelner, die Fahrgeometrie bestimmende, Bauteile analysiert und andererseits wird der gesamte Vermessungsprozess, mit anschließendem Abgleich im CAD, untersucht.

**Arne Diers**

## **Title of the paper**

Analysis of the effects of tolerances of individual components on kinematical relevant parameters of an entire motorcycle.

## **Keywords**

Motorcycle, suspension, kinematic, tolerances, deviation, suspension measurement

## **Abstract**

In the development of a motorcycle, it is relevant to measure the suspension of the prototype and to compare the generated data with the theoretical geometry. This thesis is an analysis of the effects of the tolerances of an entire motorcycle on kinematical parameters. On the one hand the tolerances of separate components defining the suspension geometry will be analysed and on the other hand the hole measurement process with CAD-comparison will be investigated.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>1</b>
<b>Zeichenerklärung .....</b>	<b>1</b>
<b>Begriffserklärung .....</b>	<b>2</b>
<b>Vorwort.....</b>	<b>3</b>
<b>1 Aufgabenstellung.....</b>	<b>4</b>
<b>2 Erfassen des Ist-Standes und Motivation .....</b>	<b>6</b>
<b>3 Grundlagen des Motorradfahrwerks.....</b>	<b>8</b>
3.1 Fahrwerksgeometrie eines Motorrades .....	8
3.2 Hauptrahmen.....	10
3.3 Vorderradführung .....	11
3.4 Heckrahmen.....	13
3.5 Hinterradführung .....	14
<b>4 Grundlagen des Messsystems.....</b>	<b>16</b>
4.1 Das Prinzip der Nahbereichsphotogrammetrie und dessen Anwendung ....	17
4.2 Das TRITOP-System von der GOM GmbH.....	19
<b>5 Untersuchung der Einzelkomponenten.....</b>	<b>20</b>
5.1 Relevante Messmerkmale .....	21
5.2 Erfassen der Toleranzen in den technischen Zeichnungen.....	21
5.2.1 Toleranzen des Hauptrahmens .....	22
5.2.2 Toleranzen der Schwinge.....	24
5.2.3 Toleranzen des Heckrahmens.....	27
5.2.4 Toleranzen der Federungselemente .....	29
5.3 Auswertung der Messprotokolle einzelner, relevanter Bauteile .....	31

5.3.1 Auswertung des Hauptrahmens .....	32
5.3.2 Auswertung der Schwinge.....	33
5.4 Ergebnis der Untersuchung der Einzelkomponenten .....	34
<b>6 Untersuchung des Gesamtfahrzeugs.....</b>	<b>36</b>
6.1 CAD-gestützte 2D-Analyse kritischer Elemente .....	37
6.2 Fahrgeometrievermessung .....	47
6.2.1 Messaufbau der Fahrgeometrievermessung.....	47
6.2.2 Durchführung der Fahrgeometrievermessung.....	49
6.3 Auswertungen und Ergebnisse der Untersuchungen .....	51
6.3.1 Auswertung der 2D-Analyse.....	51
6.3.2 Auswertung der Fahrgeometrievermessung .....	52
6.4 Ergebnis der Untersuchungen.....	55
<b>7 Ausblick .....</b>	<b>57</b>
<b>8 Fazit.....</b>	<b>59</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>60</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>62</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>63</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>64</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>KEX</b>	-	Konzept- und Experimentalerprober
<b>BS0</b>	-	Baustufe-0
<b>BS1</b>	-	Baustufe-1
<b>CAD</b>	-	computer-aided design (rechnergestütztes Konstruieren)
<b>BI</b>	-	Bewertungsindex
<b>K81</b>	-	betriebsinterne Bezeichnung für den untersuchten Prototypen
<b>GOM</b>	-	Gesellschaft für optische Messtechnik
<b>DOS</b>	-	disc-operating system
<b>ZSB</b>	-	Zusammenbau
<b>NL</b>	-	Normallage
<b>n.a.</b>	-	nicht angegeben

## Zeichenerklärung

⊙	-	Konzentrizität
∅	-	Durchmesser
//	-	Parallelität
⊕	-	Position/Lage zu Bezug
□	-	theoretisches Genaumaß
□←	-	Bezug

## Begriffserklärung

Hier werden betriebsinterne Begriffe und Vereinbarungen, die für diese Bachelorarbeit relevant sind, kurz erläutert:

### BI (Bewertungsindex)

Der Bewertungsindex dient der subjektiven Beurteilung von Fahrzeugen, Fahrzeugsystemen und -komponenten und bildet die Basis für eine einheitliche Sprachregelung im Unternehmen. Die Bewertung wird über eine Notenskala von 1 bis 10 durchgeführt. (1)

### Definition Koordinatensystem

Die X-Achse zeigt in Fahrzeuginnenrichtung nach hinten, die Y-Achse zeigt in Fahrzeugquerrichtung nach rechts und die Z-Achse zeigt nach oben.

### Normallage

Als Normallage wird bei einem Motorrad der Zustand unter normaler Beladung bezeichnet. Dabei ist das Fahrzeug betriebsbereit, hat den Tank zu 90% gefüllt und einen 85 kg schweren Fahrer auf der Sitzbank. Unter dieser Last tauchen die Federungselemente idealerweise bis zur Normallage ein. Damit wird zudem die Konstruktionsgrundlage definiert. Einfedern wird von der Normallage aus als positiv und Ausfedern als negativ definiert.

## Vorwort

Zu Beginn meiner Zeit bei BMW Motorrad habe Ich mein Pflichtpraktikum im Zuge meines Studiums im Fahrwerk in der Fahrversuchsabteilung gemacht. Dort habe Ich sympathische, motorradfahrende Kollegen und eine entspannte Arbeitsatmosphäre genossen. Weiterhin habe Ich in meinem Praktikum weite sowie tiefe Einblicke in verwendete Messverfahren und deren Auswertungen sammeln dürfen.

Zum Ende meines Praktikums lernte Ich Mathias kennen. Mathias ist Fahrwerkskonstrukteur bei BMW Motorrad und hat sich des Öfteren über die Abweichungen der fahrgeometrischen Messwerte bestimmter Fahrzeuge gewundert. Da ich zu diesem Zeitpunkt noch auf der Suche nach einem Thema für meine Abschlussarbeit war und in meinem Praktikum sowie in der Zeit vorher in der Formula Student bereits mehrfach mit diesem Thema konfrontiert wurde, ergriff Ich die Möglichkeit und wir formulierten das Thema, mit dem Ich mich die folgenden drei Monate intensiv auseinandersetzte.

An dieser Stelle möchte Ich meinem Zweitprüfer und Betreuer Mathias Meinecke für seine Unterstützung danken und besonders hervorheben, dass er mich, trotz Verletzung und damit einhergehender Krankschreibung, zu sich nach Hause einlud, um das weitere Vorgehen der Arbeit zu besprechen und wichtige Themen zu diskutieren. Dieses Engagement schätze Ich sehr. Darüber hinaus war Mathias jederzeit telefonisch für Fragen und Überlegungen erreichbar.

Ebenso bedanke Ich mich bei meinem Erstprüfer und betreuenden Professor Herr Fervers, der mich sogar in München bei BMW Motorrad besuchte, um dort mit mir das Thema zu besprechen und auch jederzeit – selbst später am Abend – für Fragen und Rückmeldungen telefonisch zur Verfügung stand. Diese außergewöhnliche Motivation eines Professors gegenüber seinen Studenten finde ich sehr lobenswert.

Ich blicke sehr zufrieden und glücklich auf meine Zeit bei BMW Motorrad und das geniale, freundschaftliche Verhältnis zu sehr sympathischen Kollegen und Motorradenthusiasten zurück.

# 1 Aufgabenstellung

Die Fahrdynamik eines Motorrades wird grundlegend durch die Auslegung der Fahrwerksgeometrie definiert, welche maßgeblich von der Gestaltung des Hauptrahmens und der Radführungen abhängt. Durch die in der Fertigung und Montage zulässigen Toleranzen können Abweichungen von der vorgesehenen Geometrie auftreten, die zu unerwünschten Effekten hinsichtlich der fahrdynamischen Eigenschaften des Motorrades führen. Für das Gesamtfahrzeug ist das Zusammenwirken aller Toleranzen entscheidend. Zur Überprüfung der geometrischen Abweichungen werden im Entwicklungsprozess Messungen an Prototypen durchgeführt. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass die geometrischen Abweichungen teilweise größer sind, als es die theoretische Überlagerung aller Toleranzen erwarten lässt.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll das derzeitige, methodische Vorgehen zum Abgleich der theoretischen und realen Kinematik untersucht und bewertet werden. Hierzu sind die Einflüsse von Fertigungs- und Montagetoleranzen der einzelnen Bauteile Hauptrahmen, Heckrahmen, Vorder- und Hinterradführung, sowie deren Zusammenbau auf die geforderte Fahrwerksgeometrie eines Motorrades zu analysieren. Die Untersuchungen beziehen sich auf die fahrdynamisch relevanten Parameter Nachlauf, Lenkkopfwinkel, Schwingendrehpunkt, auf die Fahrbahn projizierte Schwingenlänge, Radstand und Sitzhöhe. Hierbei sollen die Betrachtungen in der durch die Hoch- und Längsachse des Fahrzeugs aufgespannten Ebene erfolgen.

Neben der Bewertung der derzeitigen Methodik, wird als Ergebnis dieser Untersuchungen auch das Ausweisen von evtl. vorhandenem Verbesserungspotential und, falls erforderlich, sinnvollen weiteren Untersuchungen erwartet.

In der Hauptsache sind hierfür folgende Punkte zu bearbeiten:

- Erfassen des derzeitigen, methodischen Vorgehens zum Abgleich der theoretischen und realen Kinematik.
- Erfassen der Toleranzen der relevanten Bauteile Gabel, Hauptrahmen, Heckrahmen, Schwinge und Federbein.
- Vermessen eines montierten Prototyps hinsichtlich Zusammenbautoleranzen.
- Untersuchen des Einflusses der Messergebnisse auf die kinematischen Parameter Nachlauf, Lenkkopfwinkel, auf die Fahrbahn projizierte Schwingenlänge, Schwingendrehpunkt und Radstand.
- Bewerten der derzeitigen Methodik und Ausblick auf mögliche weitere Schritte.

Annahme: Die in dieser Bachelorarbeit betrachteten Parameter werden nur durch Abweichungen in der durch die Hoch- und Längsachse des Motorrades aufgespannten Ebene beeinflusst. Das Gesamtfahrzeug und die einzelnen Komponenten werden dementsprechend nur zweidimensional in dieser Ebene untersucht.

Die originale Aufgabenstellung auf dem dafür vorgesehenen Formblatt befindet sich in Anhang A.

## 2 Erfassen des Ist-Standes und Motivation

Bei der Neuauslegung eines Fahrzeuges wird die Fahrwerkskinematik auf Basis des Vorgängermodells, Erfahrungen aus anderen Projekten und ggf. auf Grundlage von möglichen Wettbewerbsfahrzeugen festgelegt. Danach wird ein Konzept- und Experimentalerprober (kurz: KEX) mit einem Verstellfahrwerk zur Erprobung der theoretisch festgelegten Parameter aufgebaut. Verhält sich der KEX in der Praxis anders, werden grundlegende Untersuchungen am Konzept unternommen. Hier werden konzeptbedingte Eigenschaften wie Steifigkeiten und Schwerpunktlage untersucht – es muss „tiefer gebohrt“ werden, damit das Ziel erreicht wird. Der KEX bestätigt allerdings in ca. 70% der Fälle die theoretischen Überlegungen in der Praxis, woraufhin der Entwicklungsprozess ohne Änderungen fortgeführt werden kann. Im nächsten Entwicklungsschritt wird mit dem KEX ein Stand erprobt, der die Funktionsanforderungen erfüllt und Potenzial zur Optimierung hat. Dieser wird vermessen und im CAD auf das theoretische Kinematikmodell projiziert. An dieser Stelle gibt es meist keine nennenswerten Abweichungen, da die Entwicklungsfahrzeuge noch sehr präzise in ihrer Ausführung sind und beispielsweise noch keine Erprobung hinsichtlich der Feder-Dämpfer-Abstimmung stattfand, welche auf die einzelnen Fahrlagen große Einflüsse hat. Die Feder-Dämpfer-Abstimmung beruht hier noch auf den theoretischen Überlegungen und wird erst im Detail ausgearbeitet, wenn die Fahrwerkskinematik mit der Baustufe-0 (kurz: BS0) grundlegend festgelegt wird. Allerdings herrscht beim Übergang des KEX zur BS0 oft zeitliche Knappheit, ergo muss das BS0-Fahrzeug noch weitreichendere Reserven in der Verstellung bestimmter, kinematischer Parameter bieten, als dies für den Produktentstehungsprozess (Zeitplan) sinnvoll ist. So soll beispielsweise die Sitzhöhe als Ziel erreicht und das Design finalisiert werden, da diese zu den übergeordneten, kundenrelevanten Parametern und Erfolgsfaktoren gehören und somit bei der Feinabstimmung der BS0-Fahrzeuge hinsichtlich Fahrwerkskinematik- und Feder-Dämpferabstimmung stets beachtet werden müssen. Abschließend werden die Fahrzeuge bezüglich ihrer geforderten Funktionen mit dem internen, subjektiven Bewertungsindex (kurz: BI) bewertet, wodurch die Zielvereinbarung idealerweise erreicht wird und somit die Konzeptbestätigung erfolgt. Nun wird der Aufbau der Baustufe-1 (kurz: BS1) eingesteuert, welcher mit einer höheren

Stückzahl und damit einhergehend verringerter Vermessungsdichte der einzelnen Bauteile sowie einem beschleunigten und seriennäheren Montagevorgang gegenüber der BS0 für vermehrte Abweichungen im Abgleich der realen mit der geforderten Kinematik im CAD führt. Bei der folgenden Baustufe, dem Funktionsbau, verstärken sich diese Faktoren weiter, weil die Montage mit ähnlicher Taktung wie in der anschließenden Serienmontage erfolgt ist und so mehrere Aufbauten täglich realisiert werden.

Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen erst im späteren Entwicklungsprozess in Richtung seriennaher Fertigung und Montage auftreten. Da die Toleranzen der einzelnen Bauteile jedoch beibehalten werden, lässt sich daraus schließen, dass die Abweichungen durch die massenhafte Fertigung bei den Lieferanten, der beschleunigten, seriennäheren Montage und der damit einhergehenden, verringerten Vermessungsdichte entstehen. Abweichungen in der Fertigung werden nicht erkannt, da weniger geprüft wird, beziehungsweise abweichende Messwerte aufgrund von Zeitdruck unerkannt bleiben und die anschließende Montage der Bauteile erfolgt ebenfalls unter Zeitdruck und mit weniger Sorgfalt.

### 3 Grundlagen des Motorradfahrwerks

In diesem Kapitel werden die für diese Bachelorarbeit wichtigen Komponenten des Motorradfahrwerks und die fahrwerksgeometrischen Grundgrößen erklärt.

Jedes konventionelle Motorradfahrwerk wird grundlegend durch die Bauteile Hauptrahmen, Vorradführung mit Lenkung, Heckrahmen und Hinterradführung bestimmt. Rahmen und Radführungen ergeben eine Einheit bezüglich Fahrwerksgrundgeometrie, Fahrstabilität und Fahrverhalten. Um diese Funktionen zu erfüllen, müssen Vorder- und Hinterrad einander auch unter hohen Belastungen und ohne große Verwindungen folgen. Somit muss der gesamte Zusammenbau von Vorder- bis Hinterrad stabil ausgelegt und maßhaltig sein, damit die gewünschten Fahreigenschaften realisiert werden können.

#### 3.1 Fahrwerksgeometrie eines Motorrades

Die Fahrwerksgeometrie wird durch die kinematischen Parameter Nachlauf, Lenkkopfwinkel, Schwingendrehpunkt, Schwingenlänge, Schwingenwinkel, Lotlänge von der Lenkachse zum Schwingendrehpunkt, Gesamtoffset und Radstand definiert, welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit behandelt werden. Diese und weitere Parameter werden in der folgenden Abbildung 1 geometrisch dargestellt.

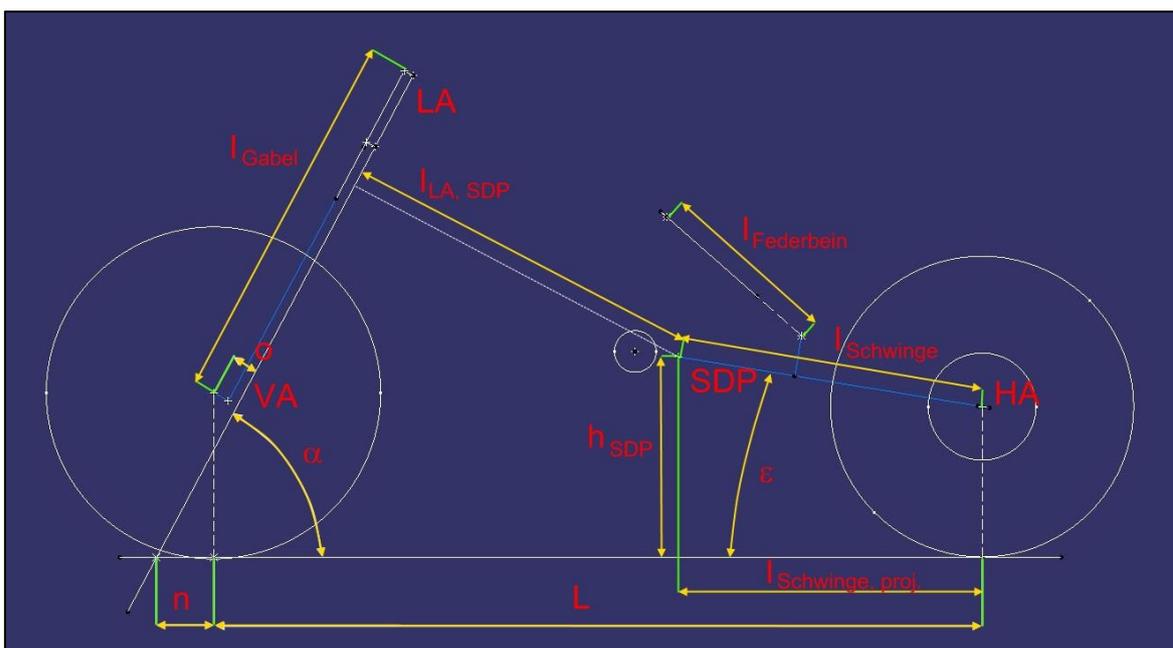


Abbildung 1: Fahrwerksgeometrie eines Motorrades in Normallage (=Konstruktionslage)

Die Tabelle 1 erklärt die Kurzzeichen der Parameter und gibt die Größenordnungen dieser am Beispiel der zu untersuchenden K81 in Normallage an.

Tabelle 1: Fahrwerksparameter eines Motorrades (2)

Parameter	Kurzzeichen	Größenordnung (Beispiel: K81)
Nachlauf	n	120 mm
Lenkkopfwinkel	$\alpha$	62 °
Radstand	L	1585,3 mm
Schwingenwinkel	$\varepsilon$	9,5 °
Gesamtoffset	o	56 mm
Vorderachse	VA	-
Hinterachse	HA	-
Lenkachse	LA	-
Länge des Federbeins	$l_{\text{Federbein}}$	372,5 mm
Länge der Gabel	$l_{\text{Gabel}}$	823,2 mm
Schwingendrehpunkt	SDP	-
Lot – Lenkachse zu SDP	$L_{\text{LA, SDP}}$	756,8 mm
Höhe des Schwingendrehpunkts	$h_{\text{SDP}}$	417,5 mm
Länge der Schwinge	$l_{\text{Schwinge}}$	635 mm
Projizierte Länge der Schwinge	$L_{\text{Schwinge, proj.}}$	626,5 mm

Der Lenkkopfwinkel ergibt sich aus der geometrischen Beziehung zwischen Fahrbahn und Lenkachse. Aus der Distanz zwischen dem Durchstoßpunkt der Lenkachse in der Fahrbahn und dem Vorderradaufstandspunkt ergibt sich der Nachlauf somit in Abhängigkeit zum Lenkkopfwinkel, Achsversatz und Gabelbrückenversatz. Achs- und Gabelbrückenversatz definieren in Summe das Gesamtoffset. Die Verstellung des Lenkkopfwinkels und des Nachlaufs beeinflusst das Verhalten des Motorrades hinsichtlich Agilität und Stabilität in der Kurven- und Geradeausfahrt, da der Nachlauf als Hebel zusammen mit der angreifenden Normalkraft im Reifenaufstandspunkt das Rückstellmoment definiert. Je länger der Nachlauf, desto größer ist die Rückstellkraft bereits bei kleinen Auslenkungen. Daraus resultiert ein tendenziell stabileres Verhalten bei hohen Geschwindigkeiten, in der Geradeausfahrt oder langgezogenen Kurven, jedoch weniger Agilität. Somit ergibt ein steilerer Lenkkopfwinkel zusammen mit einem kleinen Nachlauf ein

handlicheres, also agileres Fahrzeug. Gleichzeitig tendiert dieses aber zu einer Instabilität bei hohen Geschwindigkeiten.

Die Lage des Schwingendrehpunkts zusammen mit dem Schwingenwinkel und der Schwingenlänge bestimmen das Verhalten beim Beschleunigen in Abhängigkeit von der Art des Antriebs und dessen Lage in Relation zum Schwingendrehpunkt. Je größer der vertikale Abstand zwischen Schwingendrehpunkt und Hinterradachse (daraus folgt der Schwingenwinkel) und je kürzer die Schwingenlänge, desto weniger taucht das Motorrad beim Beschleunigen ein. Kontrovers dazu taucht ein Motorrad mit einem geringeren Schwingenwinkel und einer längeren Schwinge, auch aufgrund des längeren Hebels zur Abstützung beim Beschleunigen, weiter ein.

Die Lotlänge von der Lenkachse zum Schwingendrehpunkt ergibt sich aus der Gesamtfahrzeugarchitektur, also dem Package des Fahrzeugs. In Abhängigkeit zu den oben genannten Parametern wird so der Radstand des Motorrades beeinflusst. Bei der Erstausslegung werden diese Parameter so klein wie möglich gehalten, da sie sich im Laufe der Entwicklung tendenziell eher vergrößern.

Diese Aussagen sind verallgemeinert und sollen dem Leser lediglich einen Einblick geben. Beim gesamten Motorrad ist zwingend immer die Interaktion aller die Kinematik beeinflussenden Parameter zu berücksichtigen, da der Beladungszustand und die Sitzhaltung die Fahrgeometrie und damit das Fahrverhalten maßgeblich mit beeinflussen.

## 3.2 Hauptrahmen

Der Hauptrahmen bildet das zentrale Bauteil, an dem die Vorradführung, der Heckrahmen und die Hinterradführung angebunden werden und trägt somit grundlegend zur Maßhaltigkeit des Motorrades bei. Über die Jahrzehnte der Zweiradentwicklung wurden verschiedene Hauptrahmenkonzepte wie z.B. Gitterrohrrahmen, Aluminiumprofilrahmen und (Doppel-)Schleifenrahmen entwickelt, welche mehr oder weniger die geforderten Funktionen erfüllen. Der Rahmen muss eine möglichst struktursteife Verbindung zwischen Lenkkopf (Aufnahme der Vorderradführung) und Schwingenlagerung (Aufnahme der Hinterradführung) bilden und dabei den Motor schwingungsgünstig lagern, aber trotzdem leicht sein.

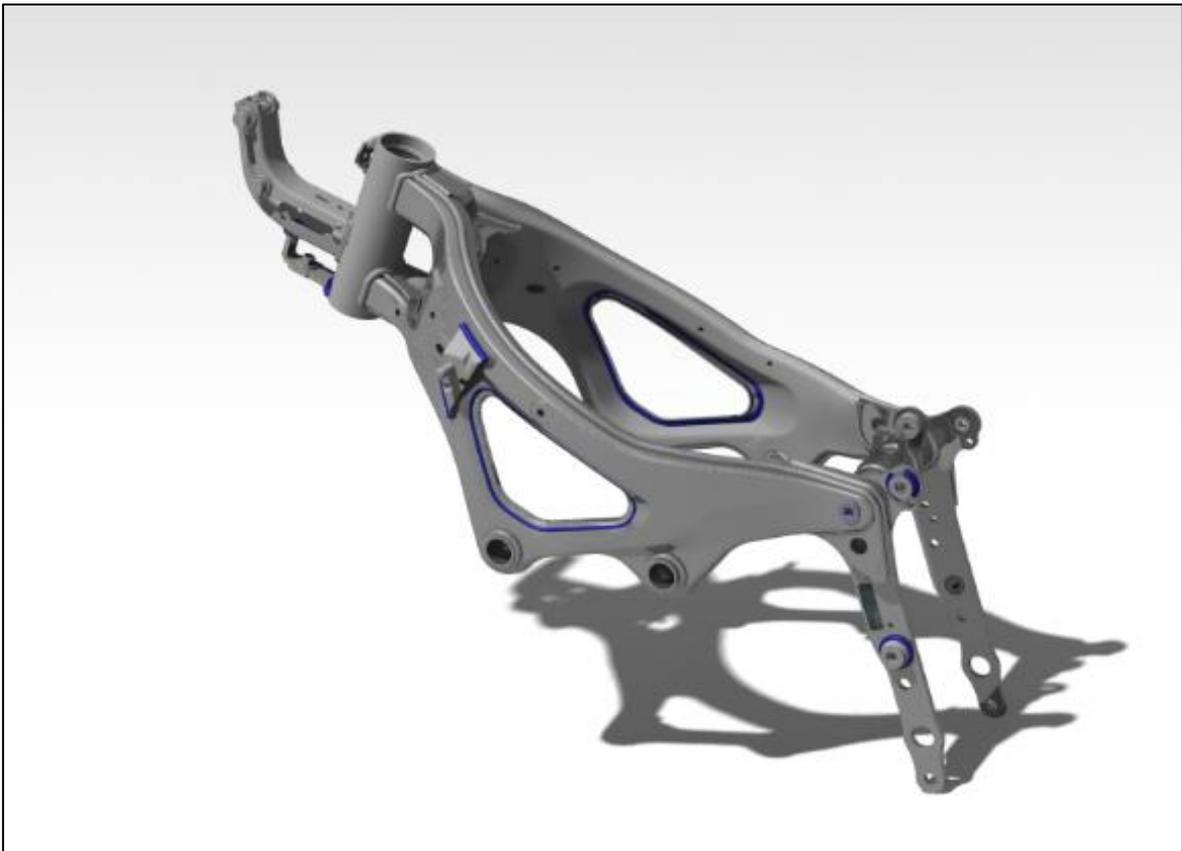


Abbildung 2: Hauptrahmen der K81

Die verschiedenen Rahmenkonzepte werden in dieser Arbeit nicht näher beleuchtet. In der Abbildung 2 ist der Blechprofilrahmen der K81 als Schweißausführung zu sehen. Der Motor wird hängend eingebaut und übernimmt zudem tragende Eigenschaften (trägt also zur Gesamtsteifigkeit des Motorrads bei und übernimmt Fahrwerkslasten).

### 3.3 Vorderradführung

Die Vorderradführung wird über das Lenkrohr im Lenkkopf gelagert und an den Hauptrahmen angebunden. Die Telegabeln werden über die obere und untere Gabelbrücke mit der Lenkkopflagerung verbunden und nehmen das Vorderrad über die Vorderradachse auf. Die Vorderradführung hat einen rotatorischen Freiheitsgrad für die Lenkung am Lenkkopf, einen translatorischen Freiheitsgrad in den Gabeln, um den Aufbau zu federn und zu dämpfen sowie einen rotatorischen Freiheitsgrad um die Radachse, wodurch das Rollen des Vorderrades ermöglicht wird und durch die Bremsanlage verzögert werden kann.

Somit ergeben sich die notwendigen Funktionen Radführung, Übertragung des Lenkmoments, Federung/Dämpfung und Abstützung des Bremsmoments. Hier wurden in der Entwicklungsgeschichte des Motorrades ebenfalls verschiedene Konzepte wie die Telegabel, Upside-Down-Telegabel, Telelever, Duolever und weitere entwickelt, welche mit ihren Eigenschaften die obengenannten Funktionen unterschiedlich gut erfüllen. Die Upside-Down-Telegabel, wie sie in Abbildung 3 zu sehen ist, ist mittlerweile am weitesten verbreitet, da sie noch den besten Kompromiss in den geforderten Funktionen bildet. Weiterhin zeigt die Abbildung 3 die komplette Vorderradführung der K81 mit Speichenfelge, Bremsanlage, Upside-Down-Telegabel, oberer und unterer Gabelbrücke sowie Steuerrohr mit Lagerung.



Abbildung 3: ZSB-Vorderradführung der K81

### 3.4 Heckrahmen

Der Heckrahmen wird meist mit dem Hauptrahmen verschraubt oder verschweißt. Oft ausgeführt als Schweißkonstruktion mit Rund- oder Vierkantrohren, muss er die Lasten von Fahrer, Sozius und eventuellem Gepäck in allen Fahrsituationen sicher aufnehmen und in den Hauptrahmen einleiten. Gerade bei voller Beladung und höheren Geschwindigkeiten trägt ein steifer Heckrahmen maßgeblich zur Fahrstabilität und damit auch zur Fahrsicherheit bei. Einbußen unter dynamischer Belastung können, aufgrund der zunehmenden Anforderungen an das zulässige Gesamtgewicht, somit steigender Zuladung und höheren Motorleistungen, also schnelleren Geschwindigkeiten, nicht geduldet werden.

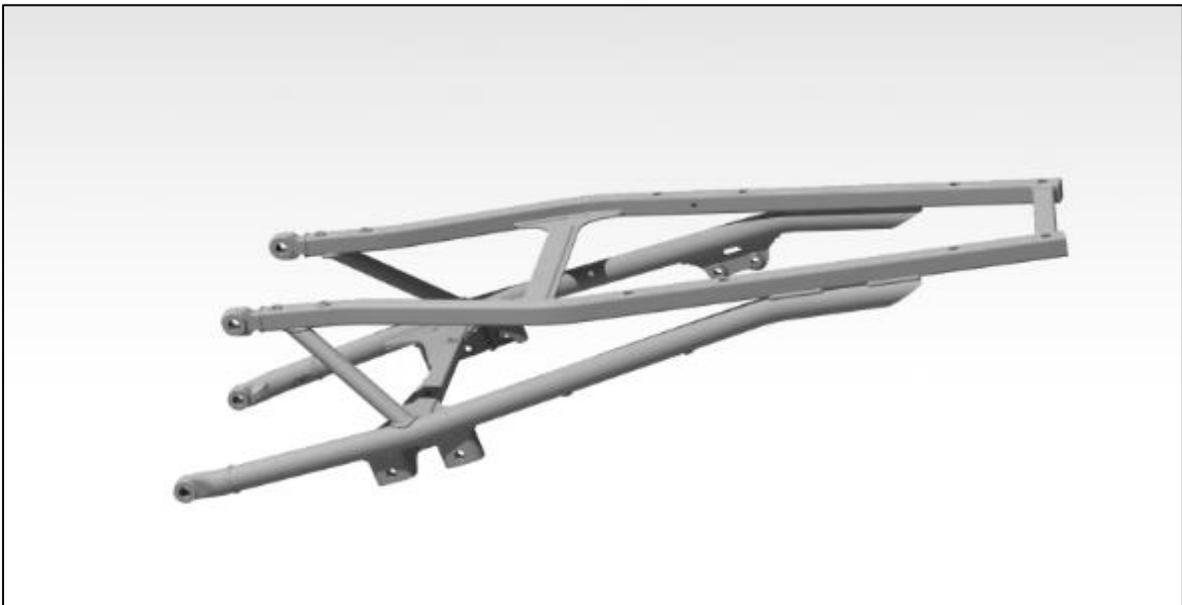


Abbildung 4: Heckrahmen der K81

In Abbildung 4 ist der Heckrahmen der K81 als Schweißausführung mit Vierkant- und Rundprofilen zu sehen, der mit dem Hauptrahmen verschraubt wird und zur Aufnahme der Sitzbank, des Gepäckträges sowie elektronischer Komponenten dient.

### 3.5 Hinterradführung

Die Hinterradführung besteht aus der Schwinge, welche in der Schwingenaufnahme am Hauptrahmen drehbar gelagert ist, und dem Federbein, welches für die Federung und Dämpfung der Aufbaubewegung zuständig ist. Das Federbein wird meist am Hauptrahmen (seltener auch am Heckrahmen) translatorisch fix angebunden und entweder direkt von der Schwinge oder einer Hebelkinematik angeregt. Bei der Umsetzung einer gewünschten Übersetzung (Radhub/Federbeinhub) und einer progressiven Charakteristik der Kennlinie, wandert das Federbein konstruktivbedingt meist sehr nah an das Hinterrad. Die Tabelle 2 zeigt einen kurzen Überblick möglicher Übersetzungen und deren konstruktive Umsetzungsmöglichkeiten.

Tabelle 2: Übersicht Anlenkung Federbein

Bezeichnung	Übersetzung	konstruktive Umsetzung
direkt/sehr klein	$1 < 2$	aufwendige Hebelkinematik (z.B. Full Floater)
klein	$2 < 3$	Hebelkinematik (z.B. Pro-Link)
normal	$\sim 3$	direkte Anlenkung (Abbildung 5) o. Hebelkinematik

Die Übersetzung, genauer das Übersetzungsverhältnis, ist der Quotient aus Radhub und Federbeinhub. Damit zu jedem Zeitpunkt die bestmögliche Traktion erreicht wird, ist es von Vorteil, wenn die Übersetzung kleiner und somit die Geschwindigkeiten am Federbein größer sind, da die Hysterese der Dämpfungselemente so weniger negative Auswirkungen hat und die Dämpfung effizienter genutzt werden kann.



Abbildung 5: ZSB-Hinterradführung der K81

In Abbildung 5 ist die Hinterradführung der K81 bestehend aus Speichenfelge ohne Reifen, Bremsanlage, Druckguss-Zweiarmschwinge und direkt angelenktes Zentralfederbein zu sehen.

## 4 Grundlagen des Messsystems

In diesem Kapitel wird das verwendete Messsystem der Firma GOM GmbH vorgestellt und die Funktionsweise erklärt. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit dem Messsystem das Gesamtfahrzeug vermessen, um alle Einflüsse zu erfassen. Das Messsystem wird aufgrund seiner Verfügbarkeit bei BMW Motorrad gewählt und stetig im Entwicklungsprozess genutzt. Aufgrund guter Erfahrungen und hoher Zuverlässigkeit wird den gemessenen Werten dieses Messsystems in seinem Auflösungs- und Genauigkeitsbereich grundsätzlich vertraut. Im Zuge dieser Arbeit wird jedoch auch die Wiederholgenauigkeit, für den hier vorliegenden Fall, untersucht und wenn sinnvoll, ein Vorschlag zur Optimierung des Messvorgangs formuliert. So soll eine Sicherheit für zukünftige Messungen gegeben und mögliche Fehler in der Anwendung minimiert werden.

Dieses Messsystem hat sich bei BMW Motorrad aufgrund einfacher Bedienung, hoher Genauigkeit und geringem Zeitaufwand durchgesetzt. Es hat vor einigen Jahren das Computrack-System der Firma G.M.D. abgelöst (auf die Funktionsweise des Systems wird nicht näher eingegangen). Das auf Basis von DOS laufende System wurde eigens für die Vermessung von Einspurfahrzeugen entwickelt. Der Support ist jedoch ausgelaufen und das System stark veraltet. Weiterhin ist die Bedienung komplizierter und die Messgenauigkeit deutlich geringer. Als drittes System steht ein 3D-Messarm der Firma Faro zur Verfügung. Der Messarm eignet sich aufgrund der Handhabung und dem damit verbundenen Aufwand nicht für eine fahrgeometrische Vermessung eines gesamten Motorrades. Für die Vermessung einzelner Komponenten und dem CAD-gestützten, aktiven Abtasten von Flächen eignet dieser sich wiederum sehr gut.

## 4.1 Das Prinzip der Nahbereichsphotogrammetrie und dessen Anwendung

Die Photogrammetrie, im Allgemeinen auch Bildmessung genannt, beschreibt ein berührungsloses Messprinzip der Fernerkundung, um aus Fotografien (Messbildern) eines zu vermessenden Objektes dessen Größe, Form und Lage im Raum zu definieren oder beispielsweise topographische Landkarten zu erstellen. Im Folgenden soll jedoch die Nahbereichsphotogrammetrie als Teilbereich näher beleuchtet werden.

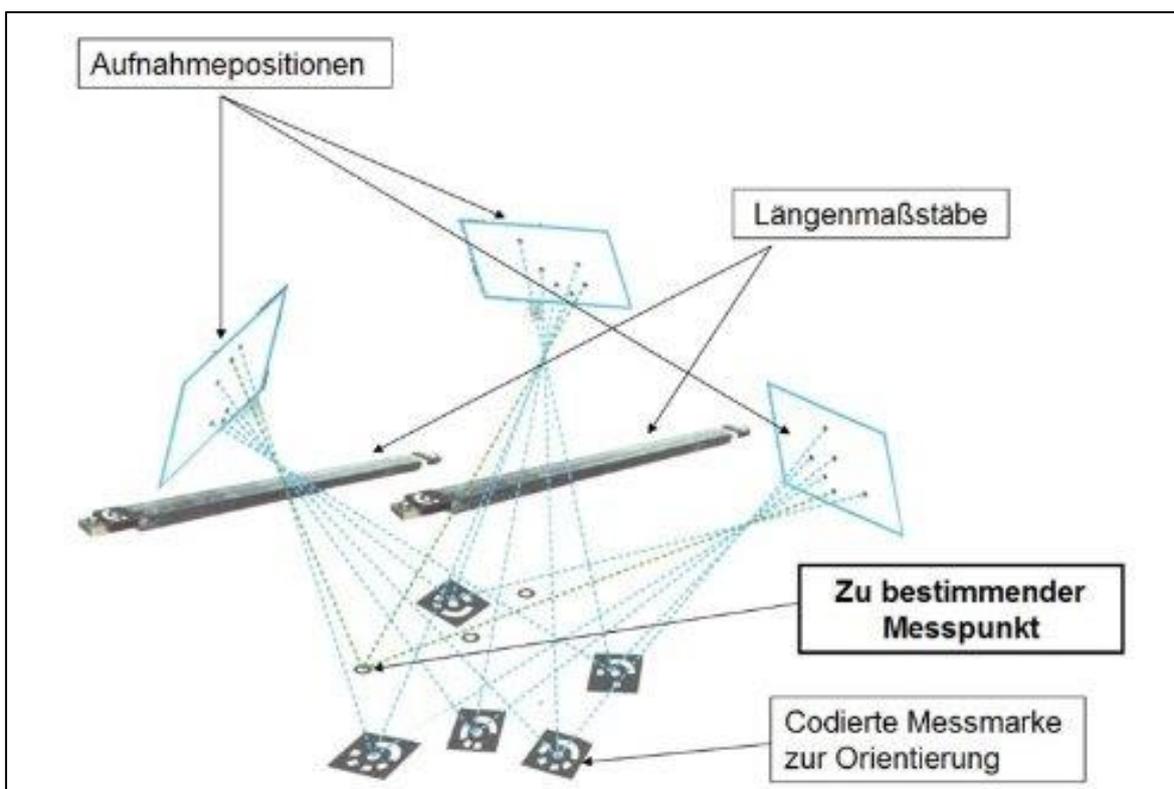


Abbildung 6: Das Prinzip der Nahbereichsphotogrammetrie(4)

Die industrielle Nahbereichsphotogrammetrie bedient sich dem gleichen Messprinzip, ist jedoch auf kleinere Messbereiche optimiert, siehe Abbildung 6. So können Messobjekte von wenigen Millimetern bis zu mehreren Hundertmetern vermessen werden. Die Genauigkeit hängt immer direkt von der Qualität, also Auflösung und Belichtung der Messbilder ab. In der letzten Dekade hat die industrielle Nahbereichsphotogrammetrie einen Aufschwung erlebt, da die zunehmend höher auflösenden, digitalen Bildsensoren, leistungsfähigere Algorithmen zur Bildvermessung und Objektrekonstruktion, sowie die erheblich

schnelleren Prozessoren der aktuellen Rechner, eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung dieser Messmethodik ermöglichen. So wird auch die Genauigkeit dieser Systeme durch die technologische Weiterentwicklung stark gesteigert. Die von GOM angegebene Messabweichung des verwendeten Systems „TRITOP“ beträgt 0,004 Millimeter in einem Messbereich bis zu mehreren Metern. Dabei ist auch der Messaufbau von großer Bedeutung, da die Qualität der verwendeten Messpunkte und un/-codierten Adapter maßgeblich zur Messgenauigkeit beitragen. Eine Sichtprüfung auf Vollständigkeit, Richtigkeit und Intaktheit des Equipments und Aufbaus ist hier unerlässlich. Weiterhin gilt bei diesem Messprinzip der Grundsatz: Je mehr Messbilder und darauf befindliche Messpunkte, Adapter und Marken, desto genauer das Ergebnis. Hierbei muss der Benutzer allerdings auch heute noch einen gesunden Kompromiss zwischen angestrebter Messgenauigkeit und Rechenaufwand finden. Dabei wird dieser von der Software unterstützt, da diese abschließend die Gesamtabweichung der Messung angibt und der Benutzer die Entscheidung treffen kann, ob die Messung wiederholt werden muss. Die zunehmende Automatisierung der Methodik bedingt zudem ein schnelleres Vorgehen, trivialere Bedienung und somit einen günstigeren Prozess. Bei BMW Motorrad wird die Messung von einem eigens geschriebenen Skript begleitet, das den Benutzer während der Messung unterstützt. Das Skript und das Vorgehen während der Messung wird in Abschnitt 6.2 genauer beschrieben.

## 4.2 Das TRITOP-System von der GOM GmbH

Das TRITOP-System ist ein mobiles, optisches 3D-Koordinatenmesssystem, das mittels Nahbereichsphotogrammetrie (siehe unten) – also ohne Objektberührung während der Messung – die zu vermessenden Objekte in Form und Lage im Raum erfassen kann. Hierzu werden die Messobjekte und deren Umgebung mit Messpunkten beklebt und mit un-/codierten Adaptern versehen, die anschließend mit einer hochauflösenden Kamera aus verschiedenen Positionen, kugelförmig auf mehreren Ebenen um das zu Objekt herum fotografiert werden. Die codierten Adapter sind dabei mit einem zweidimensionalen, grafischen Code versehen (ähnlich wie ein QR-Code), damit die Software diese bei der Auswertung eindeutig identifizieren kann. Die Messsoftware wertet die mit bis zu 24 Megapixel aufgenommenen Bilder aus, indem sie die Form, Größe sowie die Position der einzelnen Messpunkte und Adapter im Raum erkennt und diese mittels Triangulation miteinander verrechnet. Die Ausgabe erfolgt beispielsweise als CAD-kompatible 3D-Punktwolke. So wird ein digitales Modell eines realen Objektes erzeugt, welches auch zum Abgleich eines vorhandenen, theoretischen Modells im



Abbildung 7: Messsystem der GOM GmbH (4)

CAD dienen kann. Beides wird bei BMW Motorrad in der Entwicklung angewandt. Einerseits werden Benchmark-Modelle anderer Hersteller zu Vergleichszwecken digitalisiert und mit den eigenen Fahrzeugen verglichen, andererseits werden die eigenen Prototypen überprüft und mit den theoretischen Daten abgeglichen. Die Abbildung 7 zeigt einen Auszug aus dem Equipment des Messsystems. Auf

dem Bild sind Kreuze mit codierten Marken, die das System erkennt und dazu nutzt, die erstellten Messbilder einander zuzuordnen, die Spiegelreflexkamera und weitere magnetische, codierte Marken zu sehen.

## 5 Untersuchung der Einzelkomponenten

In diesem Kapitel werden die technischen Zeichnungen der Bauteile Telegabel, Gabelbrücken, Hauptrahmen, Heckrahmen, Federbein und Schwinge sowie anschließend die zur Verfügung stehenden Messprotokolle der Bauteile Hauptrahmen und Schwinge hinsichtlich der die Fahrwerksgeometrie beeinflussenden, relevanten Messmerkmale erfasst und ausgewertet. Der Heckrahmen beeinflusst nicht die Fahrwerksgeometrie, nimmt allerdings die Sitzbank auf und beeinflusst damit die Sitzhöhe. Deshalb wird am Heckrahmen ein repräsentativer Sitzhöhenpunkt definiert, damit auch die Sitzhöhe untersucht werden kann. Die Sitzbank wird nicht untersucht, da diese nicht in der Fahrwerksabteilung entwickelt wird.

Aufgrund einer defekten Messmaschine stehen keine Messprotokolle der Federelemente zur Verfügung. Der Heckrahmen sowie die obere Gabelbrücke können aus zeitlichen Gründen im Entwicklungsprozess nicht vermessen werden. Die untere Gabelbrücke wird im Zusammenbau mit der Telegabel geliefert und nicht vermessen. Auf eine selbstständige Vermessung der Bauteile muss aus zeitlichen Gründen verzichtet werden.

Die Bauteile Hauptrahmen und Schwinge des Prototypen K81 werden vermessen. Mit den Messwerten kann anschließend eine fundierte Aussage über die Einflüsse abgegeben werden.

## 5.1 Relevante Messmerkmale

Als relevante Messmerkmale sind die den Zusammenbau beeinflussenden Schnittstellen zu erfassen. In der Abbildung 8 wird eine Übersicht dieser Messmerkmale dargestellt. Weiterhin sind noch die Längentoleranzen der Federelemente zu betrachten.

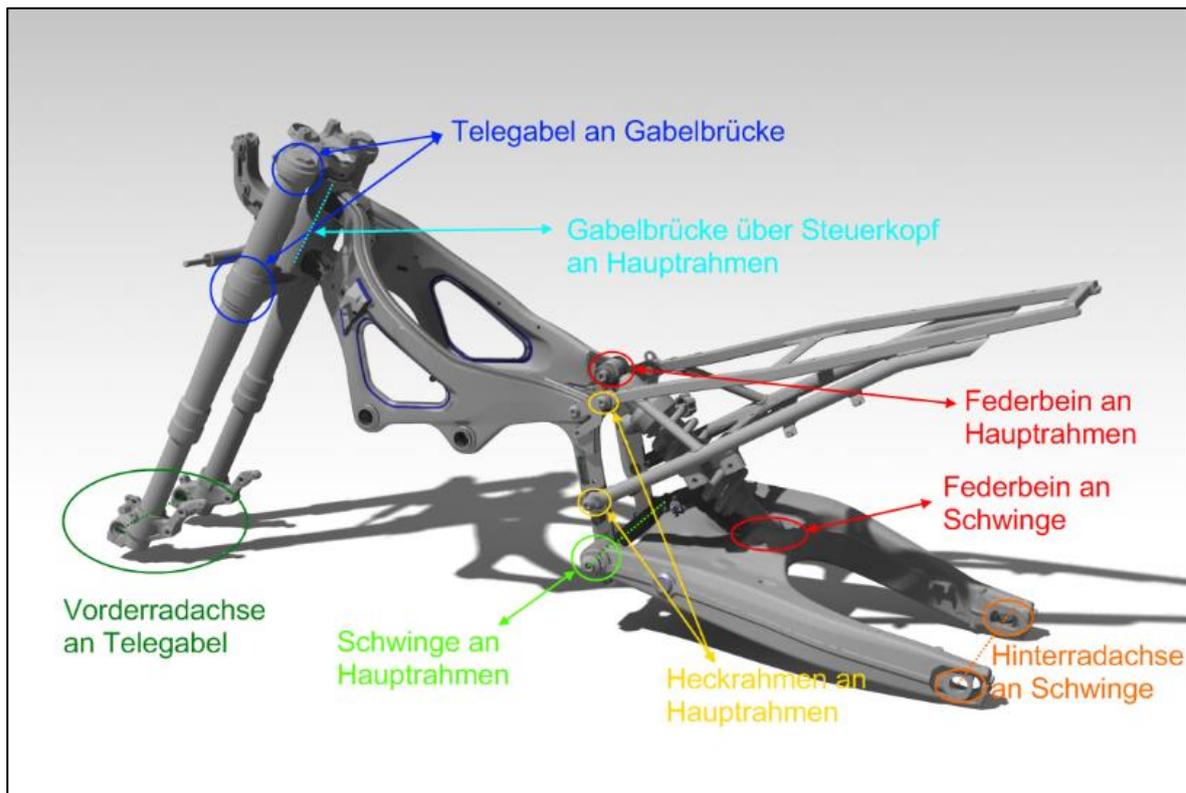


Abbildung 8: Übersicht der Schnittstellen (Messmerkmale)

## 5.2 Erfassen der Toleranzen in den technischen Zeichnungen

Um Aussagen über das Zusammenwirken aller die Fahrgeometrie bestimmenden Bauteile zu machen, werden die Schnittstellen dieser Bauteile genauer betrachtet. Dazu werden die technischen Zeichnungen dieser Bauteile hinsichtlich der für diese Betrachtung wichtigen Toleranzen analysiert. Im Folgenden werden diese Zeichnungsmerkmale erfasst. Auf den Zeichnungsausschnitten sind die relevanten Messmerkmale rot eingekreist und für eine einfache Zuordnung durchnummeriert.

## 5.2.1 Toleranzen des Hauptrahmens

Angefangen wird mit dem Hauptrahmen, da dieser das zentrale Bauteil darstellt und alle anderen wichtigen Komponenten verbindet. Die Auswirkungen dieser Toleranzen haben somit immer Auswirkungen auf den Zusammenbau. Abbildung 9 zeigt den Hauptrahmen der K81 in der Rückansicht und Abbildung 10 zeigt diesen im Zusammenbau als Ausschnitt aus der Gesamtbauteilzeichnung in der Seitenansicht von links.

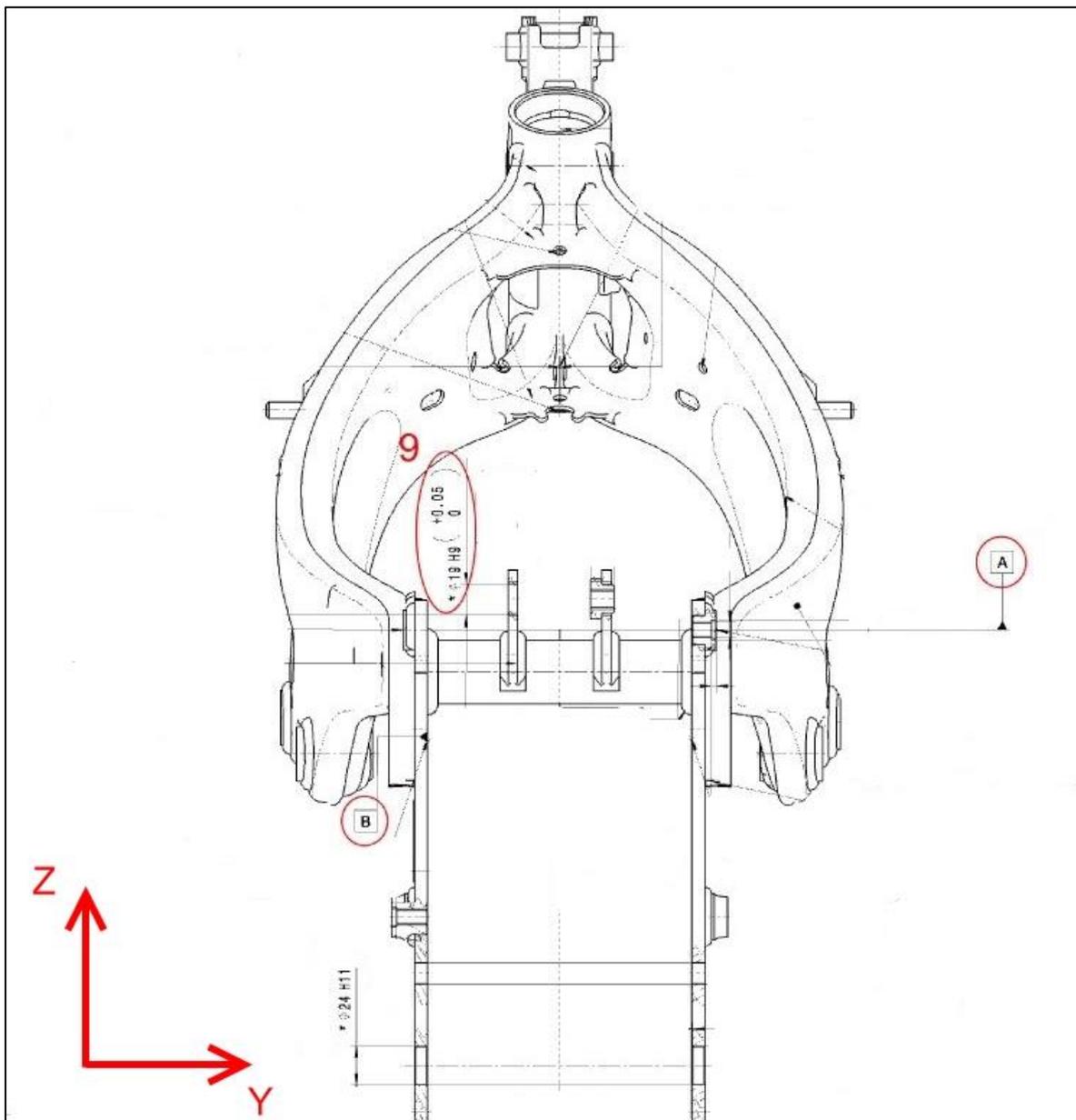


Abbildung 9: Rückansicht Hauptrahmen K81

Die Positionstoleranzen beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf die Basis ABC. Der Bezug A verläuft als Linie in Fahrzeugquerrichtung (Y-Richtung), parallel zur X-0- und Z-0-Ebene durch die obere Heckrahmenanbindung. Der Bezug B liegt auf der Y-0-Ebene in Richtung der Hochachse (Z-Richtung) und der Bezug C ist ein Punkt auf der Lenkachse.

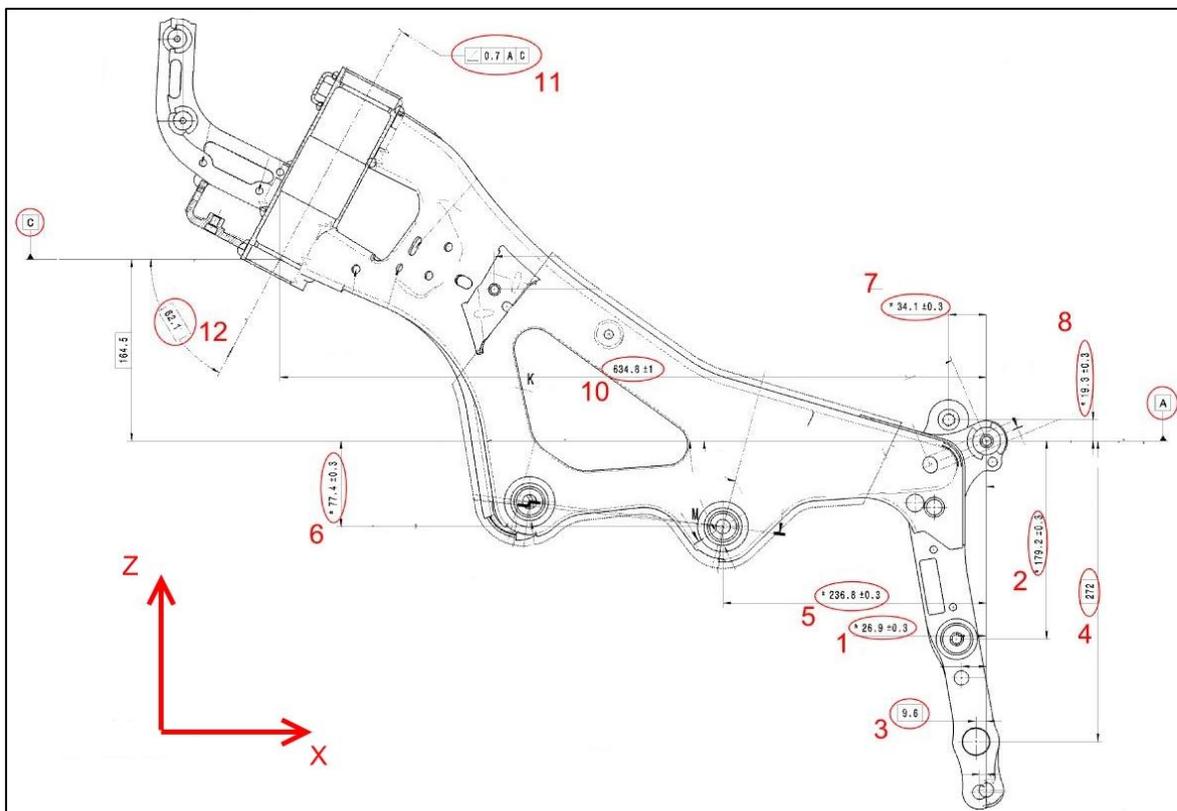


Abbildung 10: Seitenansicht links Hauptrahmen K81

Der Mittelachse des Lenkkopfes (12) ist als theoretisches Maß mit  $62.1^\circ$  angegeben und muss sich zwischen zwei parallelen Ebenen vom Abstand 0,7 Millimeter in Bezug auf A und C befinden (11).

Definition der Messmerkmale:

Messmerkmal:	Nummern der Maße:	Bezug:
Steuerkopf	10, 11, 12	A, C
Motoranbindungspunkt	5, 6	A
Federbeinanbindung	7, 8, 9	A
Heckrahmen	1, 2	A
Schwingendrehpunkt	3, 4	A

## 5.2.2 Toleranzen der Schwinge

Die Schwinge wird über die Schwingenlagerung an den Hauptrahmen angebunden und bildet zusammen mit dem Federbein die Hinterradführung. Abbildung 11 zeigt einen Ausschnitt aus der Gesamtbauteilzeichnung mit der Seitenansicht von links und der Draufsicht. Diese Abbildung dient lediglich der Orientierung. Für die genauere Betrachtung sind die folgenden Abbildungen relevant.

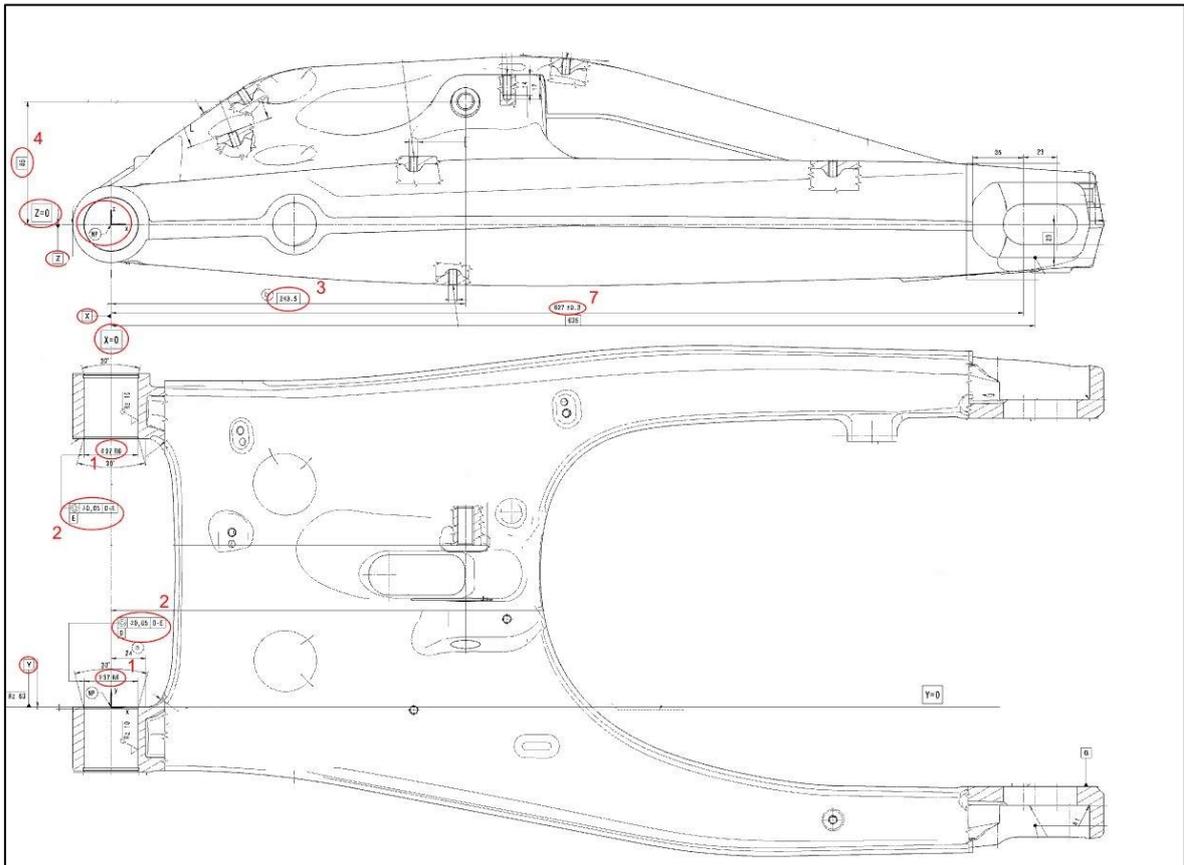


Abbildung 11: Übersicht Schwinge K81

Die Positionstoleranzen beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf die Basis XYZ. Es gilt das rechtwinkelige Koordinatensystem XYZ. Die Y-Achse entspricht der Achse D-E. Der Nullpunkt (NP) liegt im Schnittpunkt der Y-Achse mit der inneren Planfläche des vorderen, linken Schwingenarms. Zur Ausrichtung der Z-Achse ist Bezug auf den Punkt Z zu nehmen. Die Bezüge sowie das Koordinatensystem sind in der detaillierteren Abbildung 12 zu erkennen.

Die Maße 1 und 2 geben für die jeweilige Seite die (Lage-)Toleranzen der Bohrung für die Schwingenlagerung an, über die die Schwinge mit der Schwingenachse an



Das Messmerkmal 7 gibt die Längentoleranz zur vordersten Position der Hinterradachse an. Ab dieser vordersten Position des Hinterrades gibt es einen 23 Millimeter langen Verstellbereich um die Kettenspannung anzupassen. In Abbildung 13 sind das Messmerkmal 7 sowie das der Kettenspannung (oben rechts) zu erkennen.

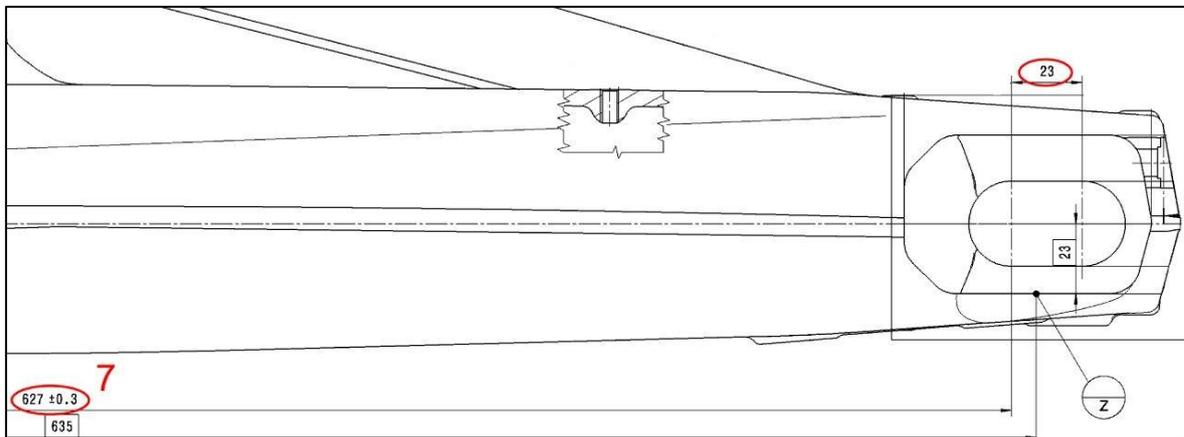


Abbildung 13: Detailansicht 2 Schwinge K81

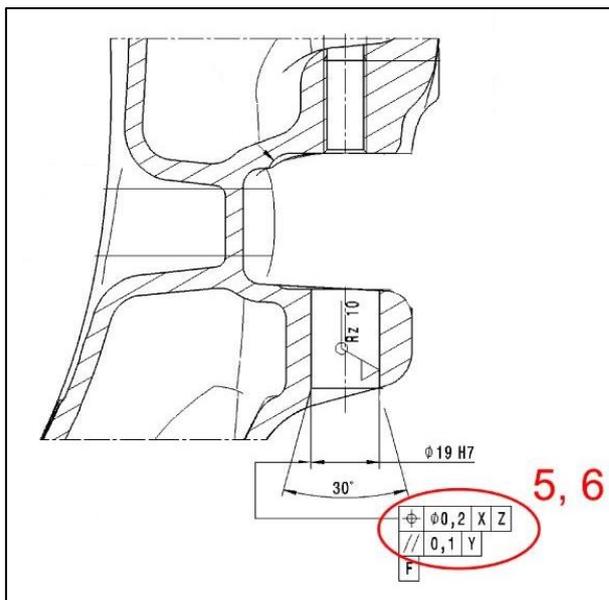


Abbildung 14: Detailansicht Federbeinbindung

Definition der Messmerkmale:

Messmerkmal:	Nummern der Maße:	Bezug:
Schwingenachse (Y-Achse)	1, 2	X, Y (D-E), Z
Federbeinbindung unten	3, 4, 5, 6	X, Y, Z
Hinterradachse	7	X, Z

### 5.2.3 Toleranzen des Heckrahmens

Der Heckrahmen wird über vier Schraubverbindungen mit dem Hauptrahmen verbunden. In Abbildung 15 ist der Heckrahmen in der Draufsicht zu sehen. Links in der Abbildung sind die Anbindungen zum Hauptrahmen zu erkennen – also der vordere Teil des Heckrahmens. Zudem ist in Rot das Messmerkmal 5 als Schnittpunkt zweier Linien eingezeichnet. Die Linien verbinden jeweils zwei Punkte, die in der anschließenden Vermessung des Prototypen in Kapitel 6 herangezogen werden, um repräsentativ für die Sitzhöhe das Messmerkmal 5 zu erzeugen.

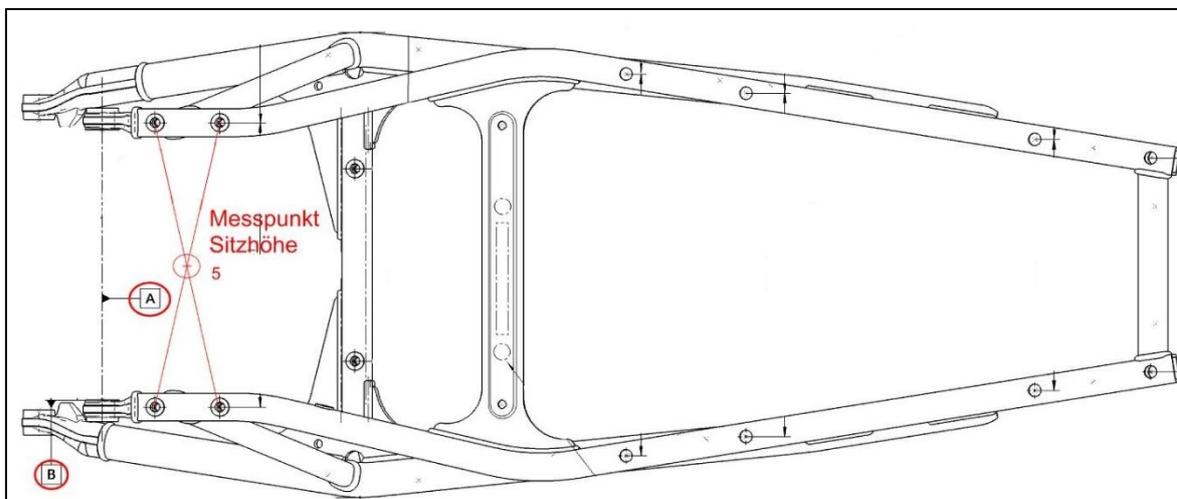


Abbildung 15: Draufsicht Heckrahmen

Weiterhin sind in Abbildung 15 die beiden Bezüge A und B zu erkennen. A wird als Linie durch die beiden Mittelpunkte der Bohrungen der oberen Anbindungspunkte gebildet. Bezug B ist die innenseitige Anlagefläche der linken, oberen Anbindung und schneidet dort den Bezug A.

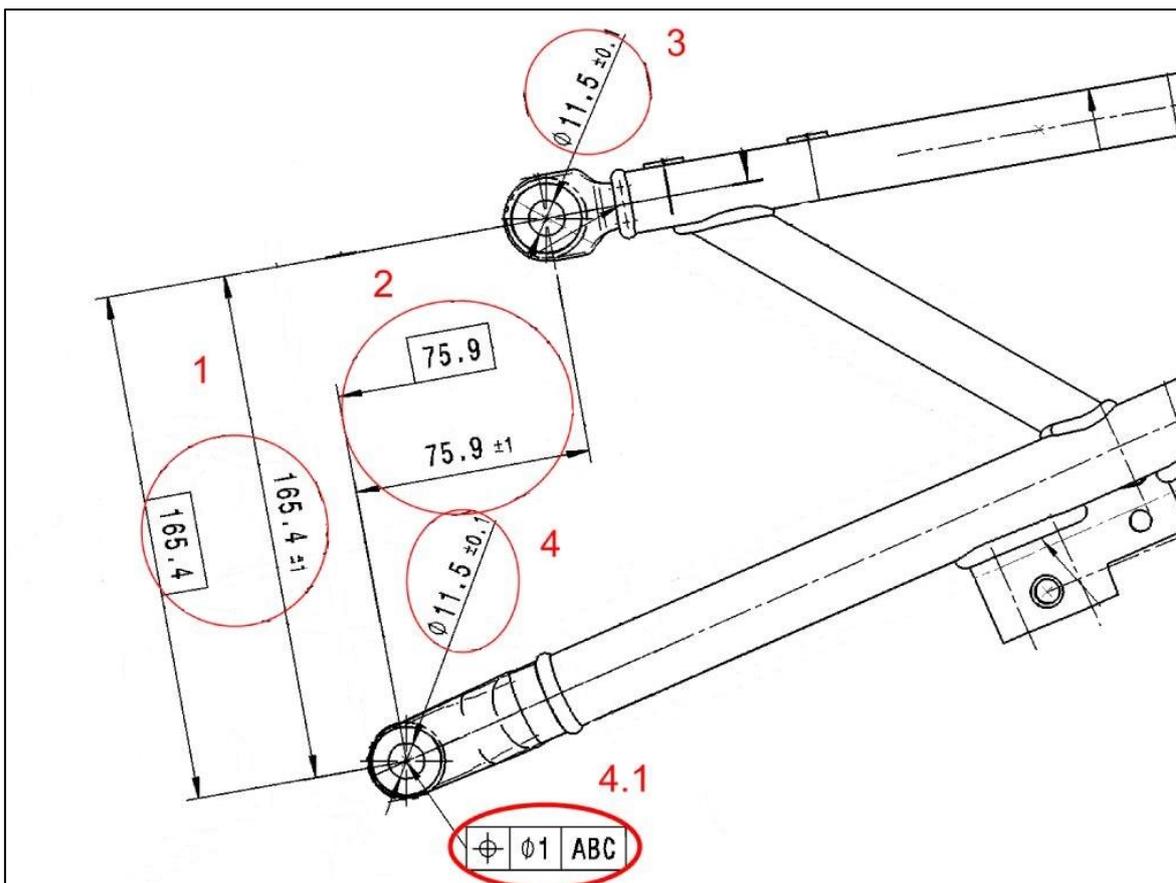


Abbildung 16: Detailansicht Heckrahmen

In der Detailansicht in Abbildung 16 werden die Anschraubpunkte mit ihren Messmerkmalen 1 bis 4 gezeigt. Der obere Anbindungspunkt dient als Bezug, von welchem aus der untere Punkt bemaßt ist. Das Messmerkmal 4.1 definiert die Positionstoleranz der unteren Anbindung. Diese definiert, dass der tatsächliche Mittelpunkt der unteren Bohrung in einem Kreis vom Ø 1 Millimeter liegen muss, dessen Mitte mit der theoretisch genauen Lage des tolerierten Punktes bezogen auf A, B und C übereinstimmt. (3)

Definition der Messmerkmale:

Messmerkmal:	Nummern der Maße:	Bezug:
Anbindung oben	liegt in A und B, 3	A, B
Anbindung unten	1, 2, 4, 4.1	A, B, C
Sitzhöhe	7	X, Z

### 5.2.4 Toleranzen der Federungselemente

Das Federbein dient für die Hinterradführung als Federelement und wird unten an der Schwinge sowie oben am Hauptrahmen angebunden. In der zweidimensionalen Betrachtung ist nur die Längentoleranz des Federbeins relevant, welche unter dem Messmerkmal 1 in der Abbildung 17 zu sehen ist.

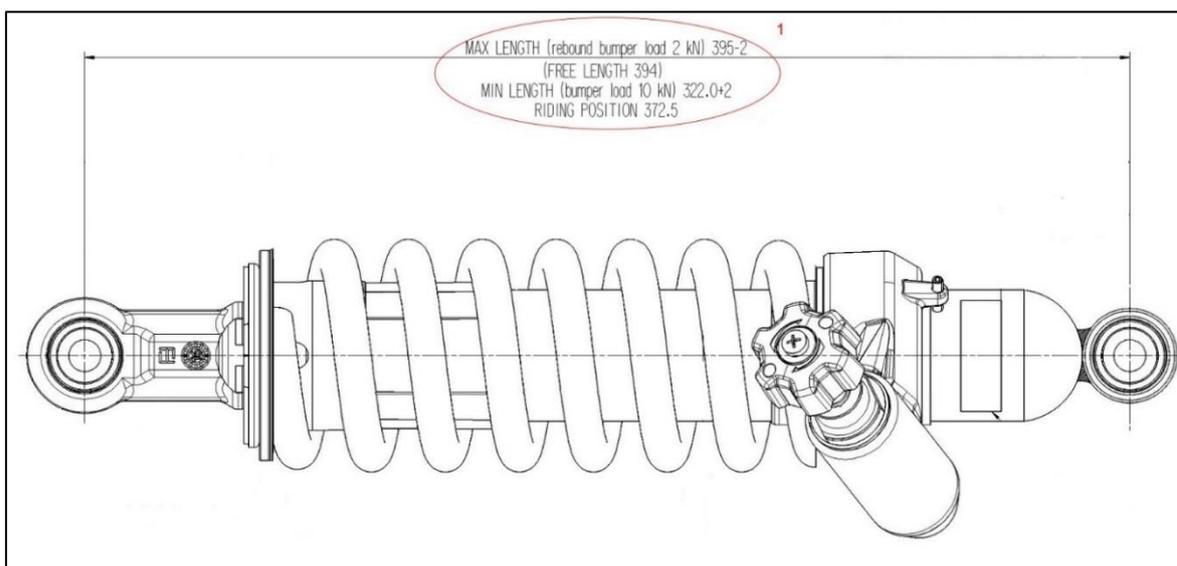


Abbildung 17: Federbein

Definition des Messmerkmals:

Messmerkmal:	Maß [mm]:	bei Kraft [kN]:	Maß frei [mm]:
Max. Länge	395 0/-2	2 in Zuganschlagfeder	394 (frei)
Min. Länge	322 +2/0	10 in Hauptfeder	-
Normallage	372,5	-	-

Das vordere Federungselement ist die Upside-Down-Telegabel im Zusammenbau mit der unteren und oberen Gabelbrücke. Zusätzlich zu der Längstoleranz der Telegabel ist hier noch der Gabelbrücken- und Achsversatz von Relevanz. Die Abbildung 18 zeigt links mit dem Messmerkmal 6 den Gabelbrückenversatz als theoretisches Genaumaß und rechts den Achsversatz mit dem tolerierten Messmerkmal 5 sowie die Passungen der Vorderradachsenklammern mit den Messmerkmalen 2 und 3 dargestellt.

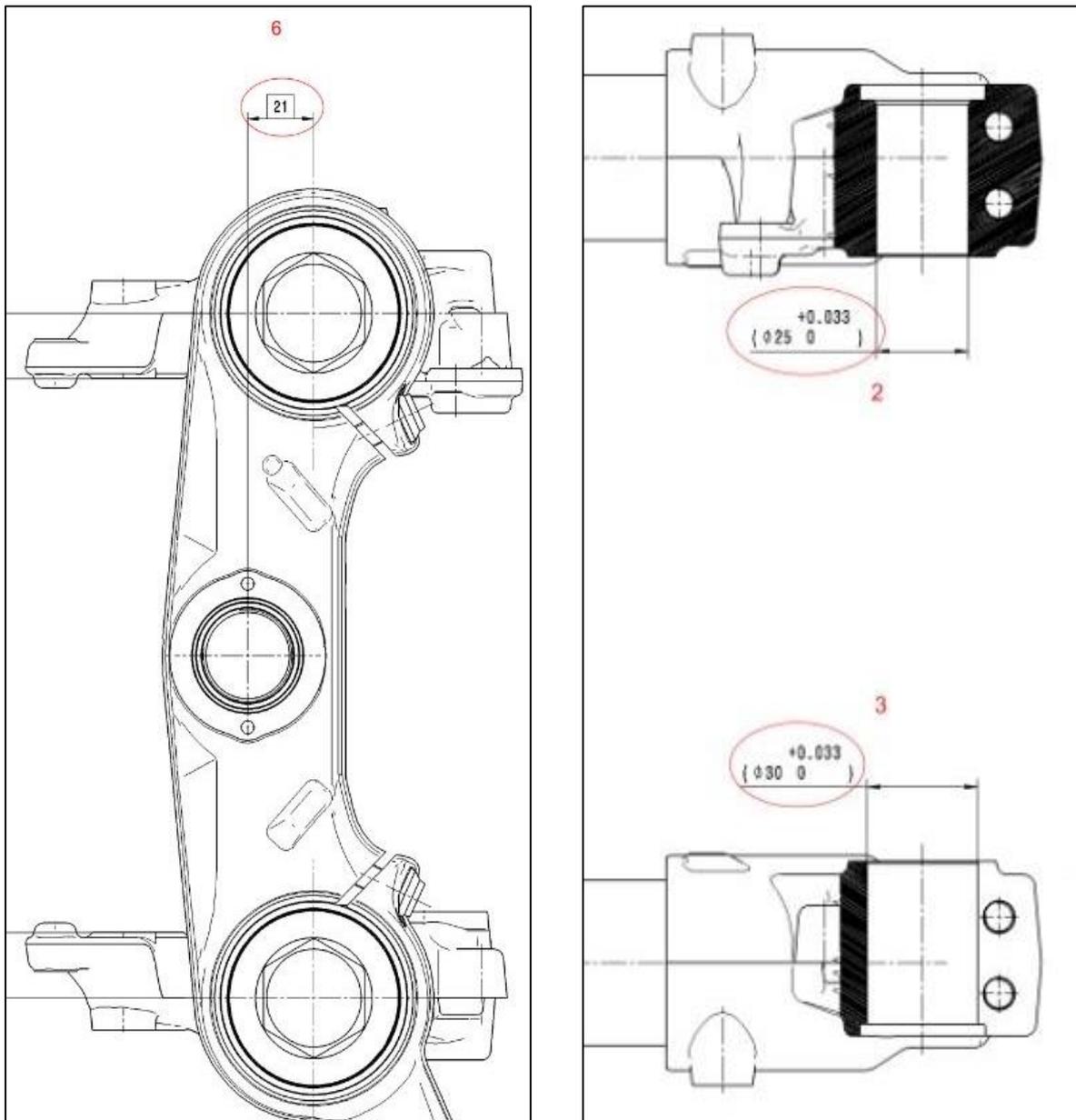


Abbildung 18: Detailansicht der Draufsicht (links) und der Vorderansicht (rechts) der Telegabel

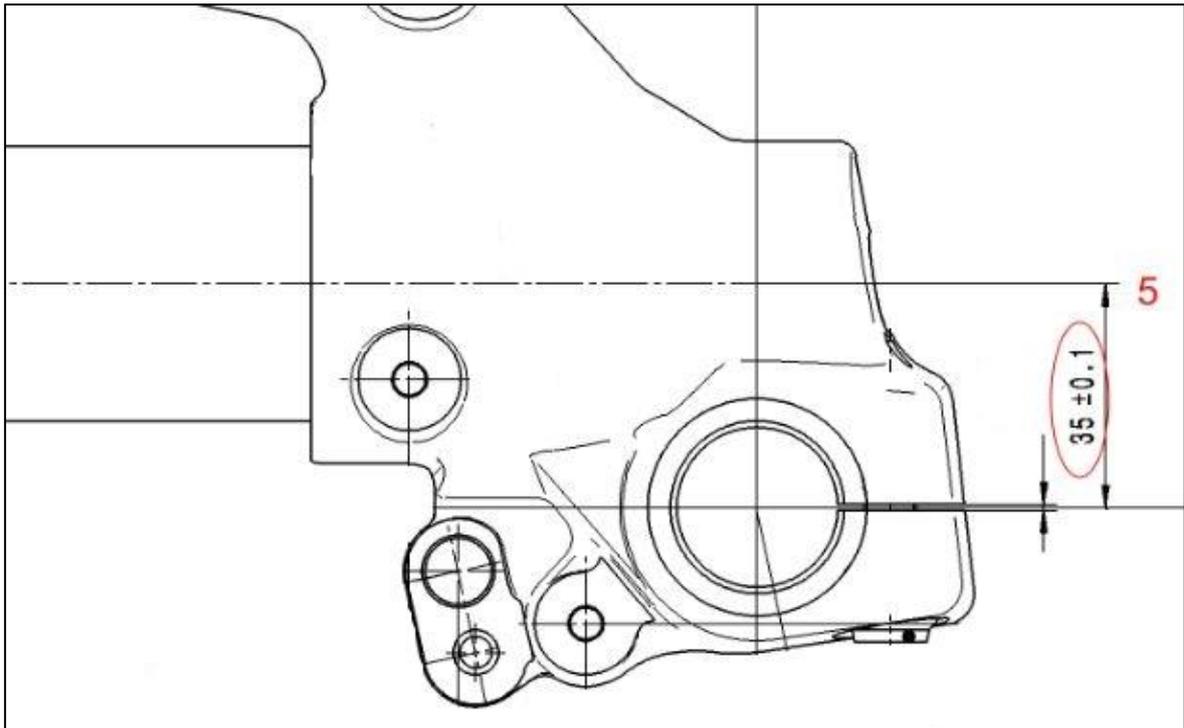


Abbildung 19: Seiten-Detailansicht Telegabel unten

Definition der Messmerkmale pro Holm:

Messmerkmal:	Maß [mm]:	bei Kraft [kN]:	Maß	frei/NL
	[mm]:			
Max. Länge	903 0/-2	2 in Zuganschlagfedern	n.a.	
Min. Länge	673 +2/0	5 in Hauptfedern	372,5 (in NL)	
Normallage	823,15	-	-	

### 5.3 Auswertung der Messprotokolle einzelner, relevanter Bauteile

Im Folgenden werden die Messprotokolle der im Prototyp verbauten Komponenten Hauptrahmen und Schwinge ausgewertet, um eventuelle Abweichungen zu erkennen. Ausgehend von den Auswertungen lassen sich, im Abgleich mit den Messdaten des Gesamtfahrzeugs, Aussagen über eventuelle Abweichungen tätigen.

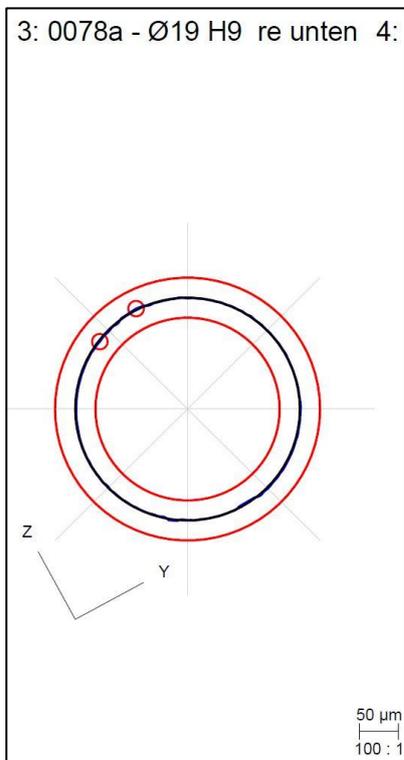
### 5.3.1 Auswertung des Hauptrahmens

Das Messprotokoll wird im Zuge der Qualitätssicherung bei BMW Motorrad in Berlin in der dafür zuständigen Abteilung UX-T-23 erzeugt. Tabelle 3 zeigt einen Überblick über die relevanten Messwerte mit Istmaß, Nennmaß, untere und obere Toleranzgrenze sowie der Abweichung in Millimeter [mm] und der Nummer, womit die Messmerkmale in der Zeichnung zuvor in Abbildung 9 und Abbildung 10 markiert wurden.

Tabelle 3: Auswertung des Messprotokolls des Hauptrahmens

Schnittstelle zu	Nr./Seite	Art	Istmaß	Nennmaß	o. Tol.	u. Tol.	Abw.
Heckrahmen	1 rechts	X	26,961	26,9	0,3	-0,3	0,061
Heckrahmen	2 rechts	Z	179,378	179,2	0,3	-0,3	0,178
Schwinge	3 rechts	X	9,562	9,6	Genaumaß		-0,377
Schwinge	4 rechts	Z	271,972	272	Genaumaß		-0,277
Motor	5 rechts	X	236,714	236,8	0,3	-0,3	-0,086
Motor	6 rechts	Z	77,356	77,4	0,3	-0,3	-0,044
Heckrahmen	1 links	X	26,881	26,9	0,3	-0,3	-0,019
Heckrahmen	2 links	Z	179,102	179,2	0,3	-0,3	-0,098
Schwinge	3 links	X	9,511	9,6	Genaumaß		-0,089
Schwinge	4 links	Z	271,960	272	Genaumaß		-0,040
Motoranbindung	5 links	X	236,800	236,8	0,3	-0,3	0
Motoranbindung	6 links	Z	77,260	77,4	0,3	-0,3	-0,140
Federanbindung	7	X	34,309	34,1	0,3	-0,3	0,209
Federanbindung	8	Z	19,329	19,3	0,3	-0,3	0,029
Federanbindung	9	Ø	19,065	19H9	0,052	0	0,065
Steuerkopf	10	X	634,764	634,8	1	-1	-0,036
Steuerkopf	11	∠	0,165	0	0,7	0	0,165
Steuerkopf	12	∠	62,151	62,1	Genaumaß		0,051

In Tabelle 3 sind in der rechten Spalte die Abweichungen zum jeweiligen Nennmaß aufgeführt. Die Maße sind je nach Toleranz und entsprechender Abweichung farblich markiert. Maße, die in der in Toleranz liegen sind grün, theoretische Genaumaße schwarz und Maße die außerhalb der Toleranz liegen rot. Positiv auffällig ist, dass



fast alle Maße innerhalb ihrer Toleranz liegen und nur die Passung 19H9 der Federbeinbindung am Hauptrahmen außerhalb ihrer Toleranz liegt. Die Abweichung ist jedoch auch hier vertretbar, da bei genauerer Betrachtung der Sondermessung dieser Passung auffällt, dass nur zwei kleine Bereiche außerhalb der Toleranz liegen. Die Bereiche sind mit kleinen, roten Kreisen markiert und im Ergebnis der Sondermessung in Abbildung 20 zu sehen. Auswertend ist zuzusagen, dass somit die geforderte Rundheit der Passung nicht gegeben ist, das Federbein im Zusammenbau aber in seiner vorgesehenen Position sitzen wird, da die restliche Passfläche gegeben ist und somit die Konzentrität erreicht wird.

Abbildung 20: Sondermessung

### 5.3.2 Auswertung der Schwinge

Die Messprotokolle der Schwinge werden bei dem zertifizierten Lieferanten ZBG (Zerspanungstechnik Bruck GmbH) im Haus nach vorheriger Endbearbeitung erzeugt. ZBG kann damit gegenüber BMW Motorrad die gewünschte Qualität nachweisen. Eine ausführliche Auswertung erfolgt zum Messprotokoll der Schwinge V2, die in dem zu vermessenden Prototypen K81 verbaut ist. Damit lassen sich eventuelle Abweichungen am Gesamtfahrzeug untersuchen.

Ein Überblick der relevanten Messwerte mit Istmaß, Nennmaß, untere und obere Toleranzgrenze sowie der Abweichung in Millimeter [mm] und der Nummer, wodurch die Messmerkmale in den jeweiligen Zeichnungsausschnitten markiert sind, wird in Tabelle 4 dargestellt. Wie auch beim Hauptrahmen sind die Abweichungen grün markiert, wenn sie innerhalb der Toleranz liegen und rot, sofern nicht.

Tabelle 4: Auswertung des Messprotokolls der Schwinge

Schnittstelle zu	Nr./Seite	Art	Istmaß	Nennmaß	o. Tol.	u. Tol.	Abw.
Hauptrahmen	1 rechts	∅	36,969	37 R6	-0,029	-0,045	-0,031
Hauptrahmen	2 rechts	⊙	0,015	0	0,05		0,015
Hauptrahmen	1 links	∅	36,970	37 R6	-0,029	-0,045	-0,030
Hauptrahmen	2 links	⊙	0,009	0	0,05		0,009
Federbein	3	X	243,449	243,5	0,1	-0,1	-0,051
Federbein	4	Z	85,008	85,0	0,1	-0,1	0,008
Federbein	5	⊕	0,104	0	0,2		0,104
Federbein	6	//	0,007	0	0,1		0,007
Hinterrad	7 links	X	626,914	627,0	0,3	-0,3	-0,086
Hinterrad	7 rechts	X	626,917	627,0	0,3	-0,3	-0,083

Im gesamten Messprotokoll sind nur wenige Werte minimal außerhalb der Toleranz. Bei den hier betrachteten Messwerten liegt keines außerhalb der Toleranz. Das bedeutet, dass auch keine ungewöhnlichen Abweichungen im Zusammenbau hinsichtlich der Schwinge zu erwarten sind.

## 5.4 Ergebnis der Untersuchung der Einzelkomponenten

Die Untersuchung der einzelnen Komponenten zeigt auf, dass die Bauteile Schwinge und Hauptrahmen einerseits hinsichtlich ihrer Toleranzen wenig Spielraum für Abweichungen lassen, die sich auf die Fahrwerksgeometrie des Gesamtfahrzeugs auswirken und andererseits zeigen die Messprotokolle dieser Komponenten, dass nahezu alle – für diese Betrachtungen – relevanten Messmerkmale mit ihren gemessenen Werten in den vorgegebenen Toleranzgrenzen liegen. Es wurden wenige kleine Abweichungen, wie beispielsweise in Abbildung 20 zu sehen, messtechnisch erfasst. Diese haben jedoch keine nennenswerten Auswirkungen auf die Gesamtfahrzeuggeometrie.

Der Heckrahmen wird messtechnisch nicht ausgewertet, beeinflusst aber auch nur den Parameter Sitzhöhe, welcher im Zuge der Untersuchung des Gesamtfahrzeugs weiter beleuchtet wird.

Die Längentoleranzen der Federelemente sind sehr grob, da diese aus der Toleranzkette der einzelnen Bauteile entstehen. Deshalb wird vermutet, dass die Einflüsse dieser Bauteile auf die kinematisch relevanten Parameter im Gesamtfahrzeug sehr groß sind. Speziell beim Federbein, da dort Abweichungen in der Länge aufgrund des großen Übersetzungsverhältnisses von 3:1 (Radhub/Federbeinhub) in NL größere Auswirkungen haben. Die Längenmaße der Federelemente sowie die Kettenspannungsverstellung an der Schwinge werden deshalb als kritische Elemente angenommen und in einer zusätzlichen 2D-Analyse im CAD untersucht, da sie direkt die Normallage des Motorrades beeinflussen.

Annahme: Hauptrahmen und Schwinge beeinflussen die in dieser Arbeit zu untersuchenden Parameter kaum bis gar nicht, da diese Bauteile an ihren relevanten Schnittstellen eng toleriert sind und die Messprotokolle zeigen, dass kaum bzw. keine Abweichungen vorliegen oder die Maße sogar genauer eingehalten werden, als gefordert. Hingegen werden die Federelemente und die Kettenspannungsverstellung der Schwinge als kritische Elemente angenommen und weiter untersucht. Näheres dazu wird in der Gesamtfahrzeuguntersuchung in Kapitel 6 gezeigt.

## 6 Untersuchung des Gesamtfahrzeugs

In Kapitel 6 wird das Gesamtfahrzeug mit dem TRITOP-System der Firma GOM GmbH bezüglich seiner Fahrwerksgeometrie vermessen. Das 3D-Koordinatenmesssystem wird rechnergestützt und skriptbasierend zuverlässig in der Entwicklung bei BMW Motorrad genutzt. Die einfache Bedienung lässt jedoch auch Fehlerpotenzial vermuten, weshalb die Messungen im Zuge dieser Abschlussarbeit mehrfach wiederholt, hinterfragt und ggf. erweitert werden.

Es soll erfasst werden, wie die Genauigkeit der Messungen durch den Benutzer in seiner individuellen Tagesform beeinflusst wird und ob ggf. eine Erweiterung des Messvorgangs für eine erhöhte Sicherheit in der Wiederholgenauigkeit sorgen kann.

Mit Hilfe einer 2D-Analyse des Kinematikmodells werden im CAD die kritischen Elemente näher untersucht und in verschiedenen Kombinationen in ihrem Zusammenwirken betrachtet.

Als Versuchsfahrzeug wird ein Prototyp K81 vermessen, da dieser sich momentan im fortgeschrittenen Entwicklungsstatus befindet und in diesem Stadium bekanntermaßen vermehrt Abweichungen auftreten.

Die Reifendurchmesser werden nicht gemessen. Es werden allgemeingültige Reifendurchmesser auf Konstruktionsbasis definiert, die für die 2D-Analyse sowie für die Berechnung der Messdaten in der Software verwendet werden. So können die Einflüsse der Reifen vernachlässigt werden und die Messreihen sinnvoll mit den theoretischen Daten verglichen werden.

Vorderraddurchmesser  $D_{\text{vorne}} = 690\text{mm}$

Hinterraddurchmesser  $D_{\text{hinten}} = 625,2\text{mm}$

## 6.1 CAD-gestützte 2D-Analyse kritischer Elemente

Als kritische Elemente werden die Federelemente und die Kettenspannungsverstellung der Hinterradschwinge in Abschnitt 5.4 definiert. Anhand eines Kinematikmodells werden die Einflüsse dieser kritischen Elemente auf die kinematisch relevanten Parameter CAD-gestützt in einer 2D-Analyse untersucht. Dazu werden im CAD jeweils die Normallage und der voll ausgefederte Zustand dargestellt. In beiden Zuständen werden die Toleranzangaben in ihren Extrema und Zwischenschritten einzeln sowie miteinander kombiniert untersucht. Zudem werden geringe Ausweitungen der Toleranzgrenzen herangezogen, um zu verdeutlichen, welchen Einfluss beispielsweise das Federbein auf die Fahrwerksgeometrie hat, wenn es (statt der erlaubten 2 Millimeter) 3 Millimeter kürzer ist.

Eine tabellarische Übersicht sowie graphische Auswertungen mit allen untersuchten Paarungen zwischen Länge der Telegabel, Länge des Federbeins und der Kettenspannungsverstellung sind aufgrund ihrer Größe in der elektronisch beigelegten Excel-Datei „Auswertung 2D-Analyse“ zu finden. Hier werden nur die Paarungen gezeigt und genauer beleuchtet, die die größten Abweichungen bedingen und in den Toleranzgrenzen liegen.

In der Abbildung 21 wird das 2D-Kinematikmodell mit Maßangaben in Normallage im CAD gezeigt. In der Workbench „Digital Mock-Up Kinematics“ in CATIA V5 lässt sich ein Kinematikmodell erstellen und anschließend in den definierten Bereichen verstellen. In diesem Modell ist es möglich die Federwege und die Schwingenlänge zu verstellen. Alle Verstellmöglichkeiten sind im Rahmen der theoretischen Extrema eingegrenzt, lassen sich bei Bedarf anpassen, um über die Toleranzgrenzen hinaus die Einflüsse darzustellen.

Die Angabe der Sitzhöhe bezieht sich in dieser theoretischen Betrachtung auf die Ergonomie-Linie der Sitzbank, da diese im Kinematikmodell hinterlegt ist. Bei der Auswertung der Untersuchungen wird der Bezug zu dem definierten Sitzhöhenpunkt am Heckrahmen hergestellt, welche in der Vermessung genutzt wird.

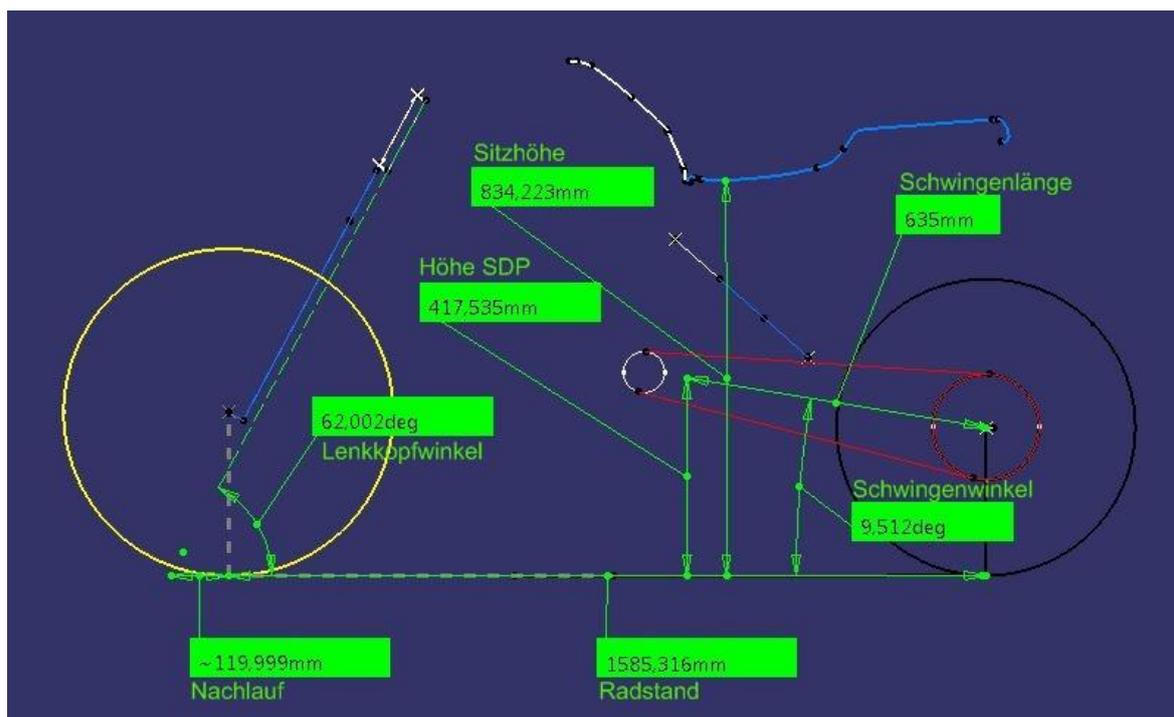


Abbildung 21: 2D-Kinematikmodell im CAD mit Maßangaben in Normallage

Im Folgenden werden die Extremfälle mit den größten Einflüssen auf die kinematisch relevanten Parameter – wie in Abbildung 21 graphisch gezeigt – dargestellt und abschließend tabellarisch verglichen.

Weiterhin werden die kritischen Elemente nach Größe ihres Einflusses und in der Interaktion miteinander sortiert, damit bei zukünftigen Untersuchungen schneller ermittelt werden kann, welche Abweichung den gemessenen Fehler bedingt.

Der tabellarische Ausschnitt in Abbildung 22 zeigt die Extremfälle in der Übersicht. Im blauen Abschnitt sind die einzelnen Parameter mit ihren jeweiligen Kürzeln (und Besonderheiten) aufgetragen. Im grauen Teil sind die verschiedenen Fälle in ihren Kombinationen mit den jeweiligen Abweichungen an Schwinge, Federbein und/oder Telegabel aufgetragen. Der grüne Abschnitt zeigt die Sollwerte in Normallage und im orangenen werden die Istwerte in Abhängigkeit zur Abweichungskombination dargestellt. Alle Werte werden in und um die Normallage des Fahrzeugs betrachtet. Die folgenden Diagramme stellen die Abweichungen nach Parametern sortiert und mit dem jeweiligen Sollwert dar.

2D-Analyse: Angaben beziehen sich auf die Normlage und sind, wenn nicht anders angegeben, in Millimeter [mm]														
Abweichung	Gabel	0	0	0	2	2	0	0	2	0	0	2	2	2
	Einfederung	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2
Diff. Schwingenlänge	$\Delta l_{\text{Schwinge}}$	0	-2	5	-2	5	-2	5	-2	5	-2	5	-2	5
	n	119,999	120,085	119,787	119,629	119,333	121,683	121,395	121,227	120,941	121,227	121,395	121,683	120,941
Lenkkopfwinkel	$\Delta n$	0	0,086	0,212	0,37	0,666	1,684	1,396	1,228	0,942	1,228	1,396	1,684	0,942
	$\alpha$ in [°]	62,002	61,99	62,032	62,054	62,096	61,767	61,807	61,831	61,871	61,831	61,807	61,767	61,871
	$\Delta \alpha$ in [°]	0	0,012	0,03	0,052	0,094	0,235	0,195	0,171	0,131	0,171	0,195	0,235	0,131
Schwingendrehpunkt (z)	SDP <sub>z</sub>	417,535	417,335	418,034	416,638	417,332	413,592	414,265	412,897	413,565	412,897	414,265	413,592	413,565
	$\Delta \text{SDP}_z$	0	0,2	0,499	0,897	0,203	3,943	3,27	4,638	3,97	4,638	3,27	3,943	3,97
Schwingenlänge	$l_{\text{Schwinge}}$	635	633	640	633	640	633	640	633	640	633	640	633	640
	$\Delta l_{\text{Schwinge}}$	0	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5
Schwingenwinkel	$\varepsilon$ in [°]	9,512	9,524	9,482	9,46	9,418	9,18	9,14	9,117	9,077	9,117	9,14	9,18	9,077
	$\Delta \varepsilon$ in [°]	0	0,012	0,03	0,052	0,094	0,332	0,372	0,395	0,435	0,395	0,372	0,332	0,435
proj. Schwingenlänge	$l_{\text{Schwinge,proj.}}$	626,269	624,275	631,256	624,392	631,373	624,893	631,874	625,003	631,985	625,003	631,874	624,893	631,985
	$\Delta l_{\text{Schwinge,proj.}}$	0	1,994	4,987	1,877	5,104	1,376	5,605	1,266	5,716	1,266	5,605	1,376	5,716
Radstand	L	1585,32	1583,34	1590,26	1582,44	1589,36	1584,23	1591,16	1583,32	1590,25	1583,32	1591,16	1584,23	1590,25
	$\Delta L$	0	1,983	4,944	2,885	4,043	1,092	5,842	2,001	4,934	2,001	5,842	1,092	4,934
Sitzhöhe	S	834,223	834,005	834,764	833,401	834,154	829,935	830,668	829,334	830,061	829,334	830,668	829,935	830,061
	$\Delta S$	0	0,218	0,541	0,822	0,069	4,288	3,555	4,889	4,162	4,889	3,555	4,288	4,162

Abbildung 22: Übersicht der Extremfälle aus der 2D-Analyse

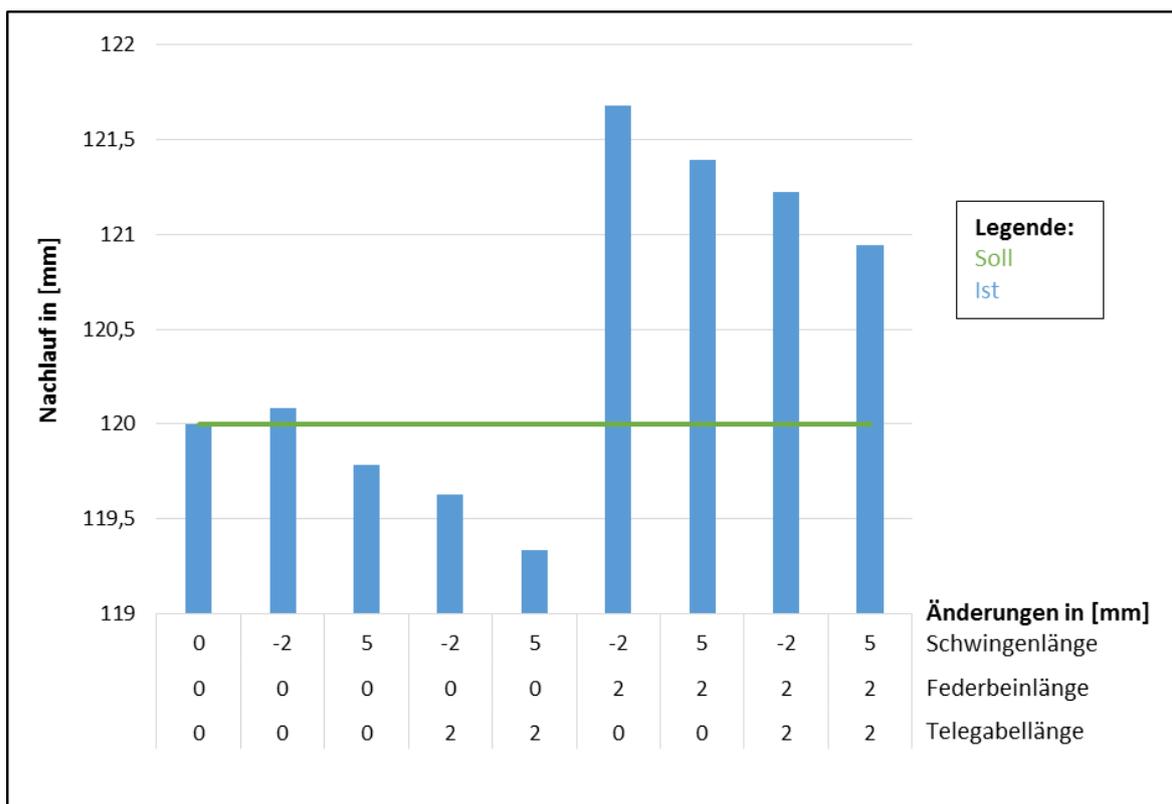


Abbildung 23: Einflüsse der kritischen Elemente auf den Nachlauf

In der Abbildung 23 werden die Einflüsse der Abweichungen auf den Parameter Nachlauf gezeigt. Die größte Abweichung tritt mit  $\Delta n = 1,683\text{mm}$  bei der Kombination mit einem  $\Delta l_{\text{Federbein}} = 2\text{mm}$  kürzeren Federbein und einer um  $\Delta l_{\text{Schwinge}} = 2\text{mm}$  längeren Schwinge auf.

Allgemein sind die größten Einflüsse bei den Kombinationen mit involvierter Federbeinlänge zu beobachten.

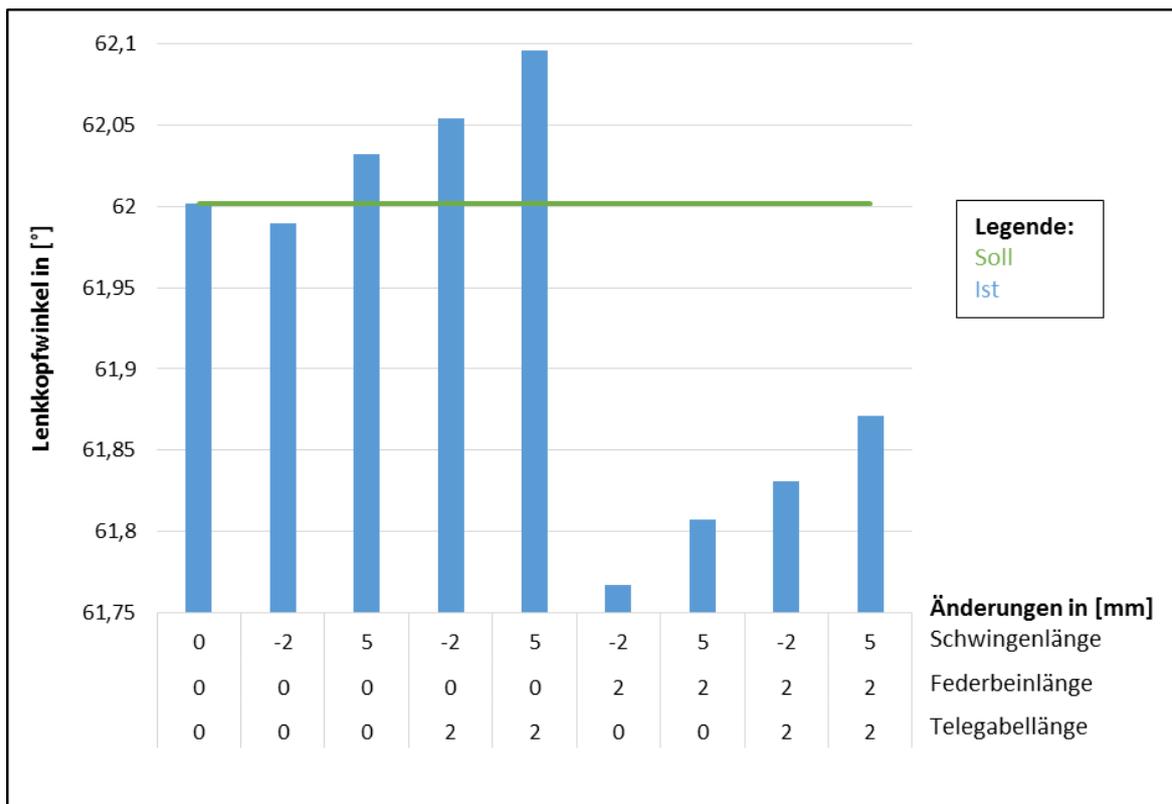


Abbildung 24: Einflüsse der kritischen Elemente auf den Lenkkopfwinkel

Die Abbildung 24 zeigt die Einflüsse der kritischen Elemente auf den Parameter Lenkkopfwinkel. Hier bedingt ebenfalls die Kombination mit einem  $\Delta l_{\text{Federbein}} = 2\text{mm}$  kürzeren Federbein und einer um  $\Delta l_{\text{Schwinge}} = 2\text{mm}$  längeren Schwinge die größte Abweichung mit einem Einfluss von  $\Delta\alpha = 0,235^\circ$ . Die geometrische Abhängigkeit von Lenkkopfwinkel und Nachlauf ist in den beiden Grafiken deutlich zu erkennen. Vergrößert sich beispielweise der Lenkkopfwinkel, verkleinert sich der Nachlauf in gleicher Relation und umgekehrt.

Auch hier sind die größten Einflüsse durch Abweichungen der Federbeinlänge zu erkennen.

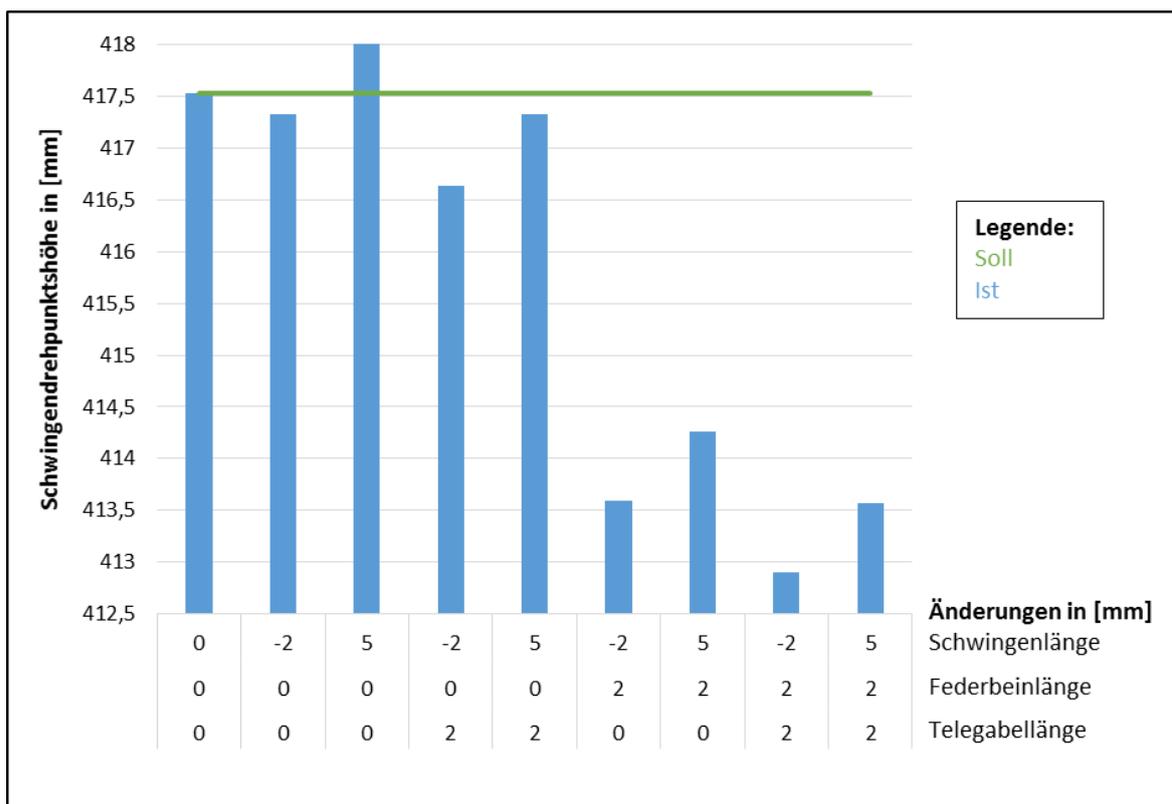


Abbildung 25: Einflüsse der krit. Elemente auf die Schwingendrehpunktshöhe

In der Abbildung 25 werden die Einflüsse der Abweichungen auf die Schwingendrehpunktshöhe graphisch dargestellt. Den größten Einfluss zeigt hier die Kombination aus allen drei kritischen Elementen. Schwingenlänge, Federbeinlänge und Telegabellänge sind jeweils um  $\Delta l = 2\text{mm}$  kürzer und bedingen somit einen um  $\Delta\text{SDP}_z = 4,638\text{mm}$  tieferen Schwingendrehpunkt.

Die Schwingenlänge wird an dieser Stelle nicht grafisch dargestellt und näher beleuchtet, da sie ein Steuerungsparameter in der 2D-Analyse im CAD ist und somit festgelegt wird. In der tabellarischen Übersicht ist die Schwingenlänge aufgetragen.

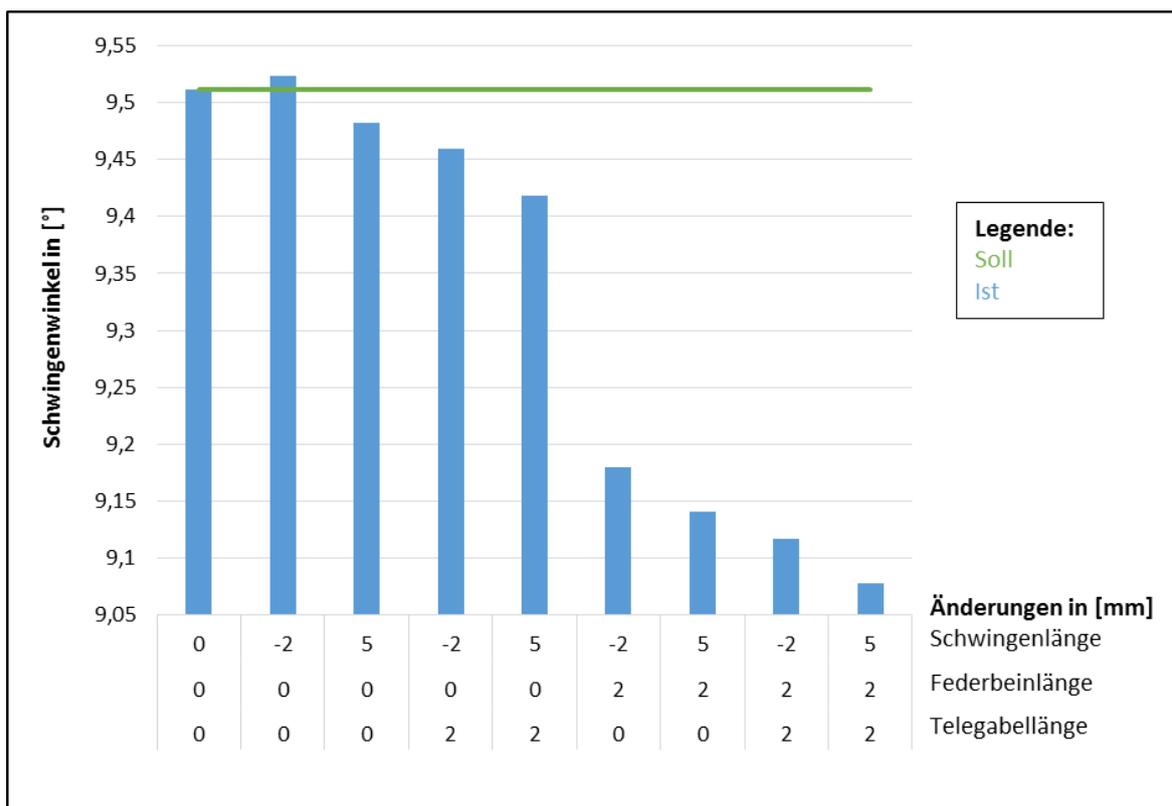


Abbildung 26: Einflüsse der kritischen Elemente auf den Schwingenwinkel

Die Einflüsse auf den Parameter Schwingenwinkel werden in der Abbildung 26 grafisch verdeutlicht. Hier ist ebenfalls eine Kombination aus allen drei kritischen Bauteilen die mit dem größten Einfluss. Federbeinlänge und Telegabellänge sind wieder um  $\Delta l = 2\text{mm}$  kürzer. Die Schwingenlänge ist in dieser Kombination um  $\Delta l_{\text{Schwinge}} = 5\text{mm}$  länger. Der Schwingenwinkel ist damit um  $\Delta \varepsilon = 0,435^\circ$  kleiner als der Sollwert. Hier ist ebenfalls die geometrische Abhängigkeit der Federelemente und der Schwingenlänge auf den Schwingenwinkel zu beobachten. Verkürzt sich beispielsweise eines der Federelemente, verringert sich auch der Schwingenwinkel. Eine Verlängerung der Schwingenlänge begünstigt dies noch.

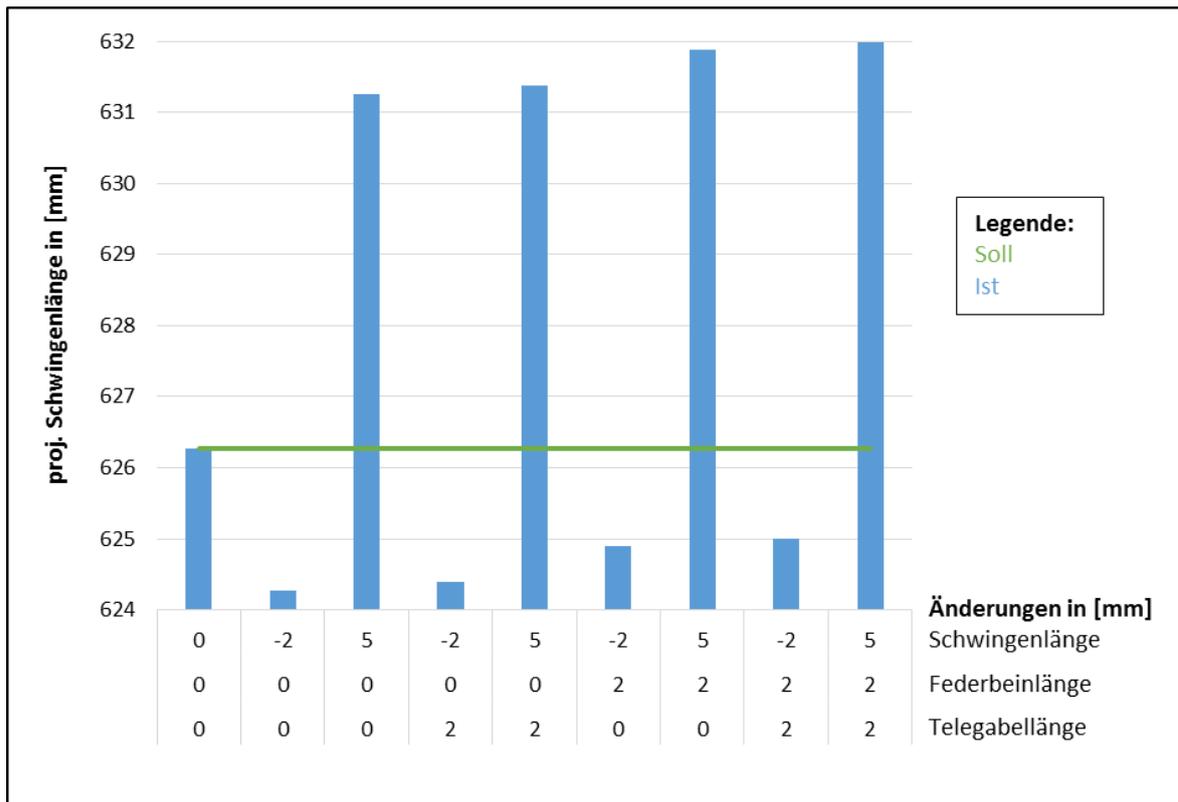


Abbildung 27: Einflüsse der kritischen Elemente auf die proj. Schwingenlänge

Die projizierte Schwingenlänge wird in Abbildung 27 gezeigt und verhält sich wegen ihrer direkten Abhängigkeit zur realen Schwingenlänge linear dazu. Jedoch ist deutlich zu erkennen, dass die Längen der Federelemente auch Einflüsse haben. Den extremsten Einfluss hat hier ebenfalls die Kombination aus allen drei kritischen Bauteilen. Federbeinlänge und Telegabellänge sind um  $\Delta l = 2\text{mm}$  kürzer. Die Schwingenlänge ist in der um  $\Delta l_{\text{Schwinge}} = 5\text{mm}$  länger. Der Einfluss ist dabei  $\Delta l_{\text{Schwinge, proj.}} = 5,716\text{mm}$  auf die projizierte Schwingenlänge.

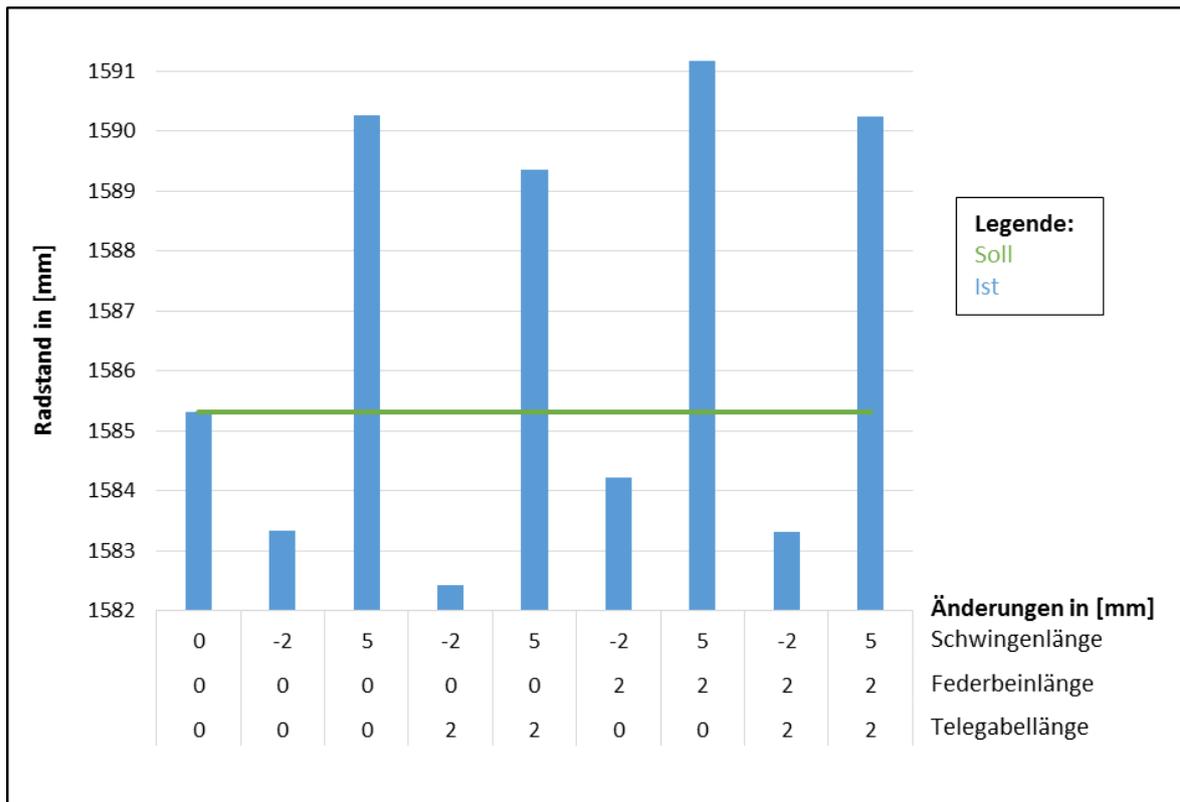


Abbildung 28: Einflüsse der kritischen Elemente auf den Radstand

In Abbildung 28 werden die Einflüsse auf den Radstand grafisch dargestellt. Auch hier ist die geometrische Abhängigkeit vom Radstand zur Schwingenlänge deutlich zu erkennen. Den größten Einfluss hat die Kombination aus einer um  $\Delta l_{\text{Schwinge}} = 5\text{mm}$  längeren Schwinge und einem um  $\Delta l_{\text{Federbein}} = 2\text{mm}$  kürzeren Federbein. Der Radstand ist damit um  $\Delta L = 5,842\text{mm}$  größer.

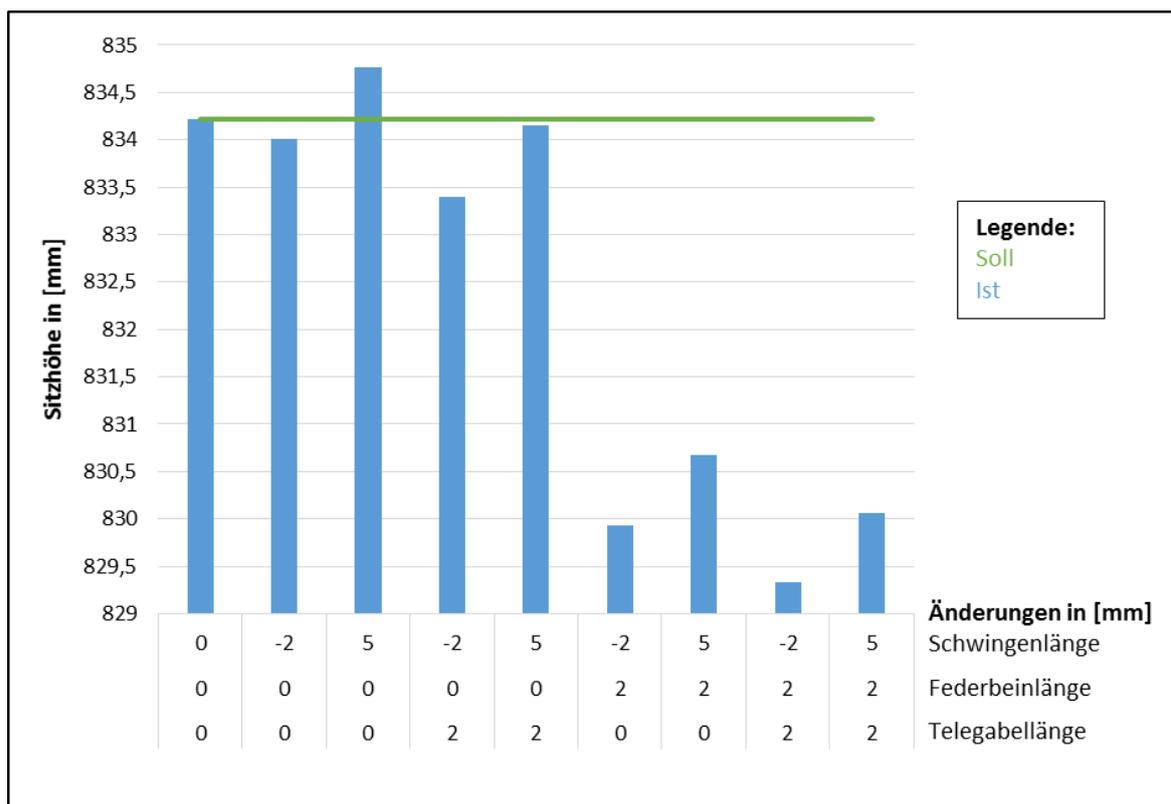


Abbildung 29: Einflüsse der kritischen Elemente auf die Sitzhöhe

Zuletzt wird in der Abbildung 29 die Sitzhöhe mit ihren Einflüssen visualisiert. Wie geometrisch zu erwarten und grafisch gut sichtbar, sind die Einflüsse der Abweichungen an den Federelementen hier am größten. Eine Kombination aus allen drei kritischen Elementen zeigt auch hier den größten Einfluss. Schwingenlänge, Federbeinlänge und Telegabellänge sind jeweils um  $\Delta l = 2\text{mm}$  kürzer und bedingen damit eine um  $\Delta S = 4,889\text{mm}$  geringere Sitzhöhe.

Allgemein sind die größten Einflüsse bei den Kombinationen mit involvierter Federbeinlänge zu beobachten.

Die Beobachtungen der 2D-Analyse werden später mit der folgenden Fahrgeometrievermessung abgeglichen.

## 6.2 Fahrgeometrievermessung

Der Prototyp K81 wird nach einer standardisierten Fahrgeometrievermessung, wie sie seit einigen Jahren im Entwicklungsprozess bei BMW Motorrad angewandt wird, vermessen.

Der Aufbau sowie der Ablauf und das Ergebnis sind in ihrer Qualität standardisiert und können miteinander verglichen werden. Weiterhin wird der Benutzer beginnend mit dem Aufbau während der Messung bis zum Ergebnis von einem eigens programmierten Skript beim Bedienen der Software Schritt für Schritt unterstützt. Dabei wird die Reihenfolge zwingend eingehalten, der Benutzer kann sich auf das Wesentliche konzentrieren und das Fehlerpotenzial wird reduziert. Bei Missachtung oder fehlerhaftem Aufbau wird der Benutzer informiert und die Messung muss wiederholt werden. Zudem gibt die Software am Ende eine Gesamtabweichung der Messung an, sodass die gemessenen Ergebnisse direkt bewertet und die Messung bei Bedarf wiederholt wird.

### 6.2.1 Messaufbau der Fahrgeometrievermessung

Der Aufbau ist in Abbildung 30 zu sehen und wird Schritt für Schritt erklärt.



Abbildung 30: Messaufbau der Fahrgeometrievermessung

Das Fahrzeug wird aufgebockt, sodass die Räder frei hängen, bzw. die Federung voll ausgefedert ist und wenn nötig fixiert, damit während der Messung nichts bewegt werden kann. Dabei ist darauf zu achten, dass die Lenkung freigängig ist. An der Telegabel vorne wird ein Gabelspreizer angesetzt, der die Zuganschlagfeder komprimiert. Dann werden die Felgen jeweils beidseitig am äußeren Rand mit mindestens acht 3-mm-Messpunkten beklebt (grün eingekreist). In der Abbildung 31 ist rechts eine Detailansicht des Vorderrades, auf dem die 3-mm-Messpunkte auf der Felge gut zu erkennen sind. Dabei ist darauf zu achten, dass die Messpunkte möglichst im gleichen Abstand und auf gleichem Radius gesetzt werden. Die beiden Radachsen und die Schwingenachse werden mit den dafür vorgesehenen, codierten Adaptern bestückt (orange eingekreist und in Abbildung 31 rechts zu sehen). Die Adapter laufen konisch zu und werden beidseitig mit Hilfe einer Gewindestange verschraubt, damit die exakte Lage der jeweiligen Achse dargestellt werden kann. Die Kalibriermaßstäbe, auch Längenmaßstäbe genannt, werden normal zueinander neben dem Motorrad positioniert und das Koordinatenkreuz wird im Winkel der Maßstäbe ausgerichtet, siehe dazu Abbildung 31 links. Die restlichen Kreuze mit den codierten Marken (rot eingekreist) werden anschließend rund um das Messobjekt herum positioniert. Dabei ist darauf zu achten, dass auf jedem Messbild mindestens ein Kreuz zu erkennen ist, da die Bilder nur so von der Software verarbeitet und einander zu geordnet werden können. Abschließend sind jeweils beidseitig am Motorrad zwei rahmenfeste, codierte Marken zu setzen. Diese dienen der Software beim Übergang von Stufe 1 (Linkseinschlag der Lenkung) zu Stufe 2 (Rechtseinschlag der Lenkung) und währenddessen zur Analyse der Gesamtgenauigkeit der Messung. Wird hier eine Verschiebung detektiert, gibt die Software einen Fehler aus und empfiehlt dem Benutzer, die Messung zu wiederholen.

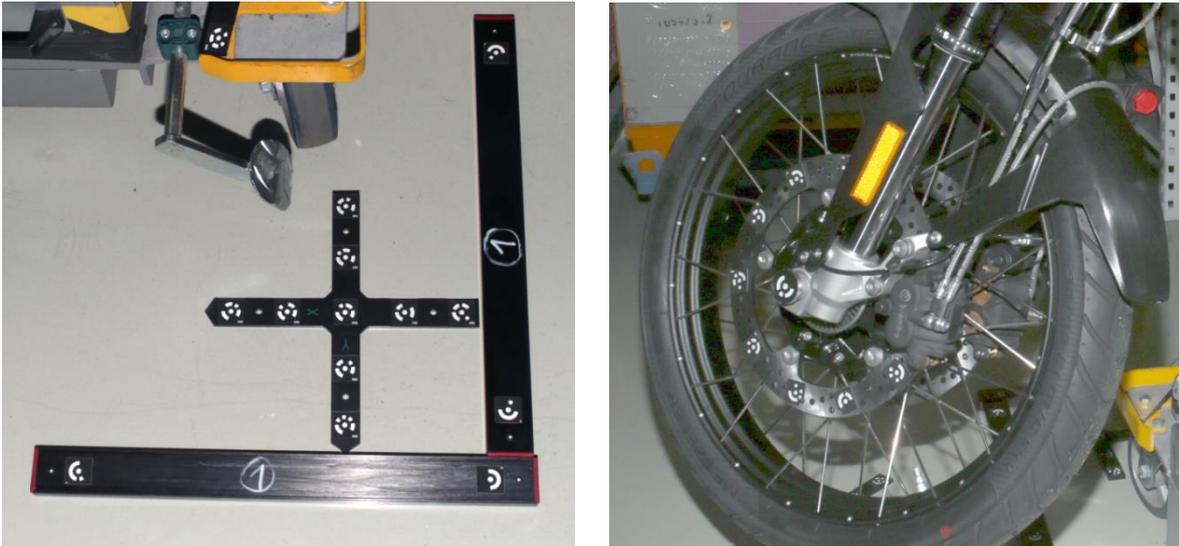


Abbildung 31: Maßstäbe mit Koordinatenkreuz (links) und Detailansicht vom Vorderrad (rechts)

## 6.2.2 Durchführung der Fahrgeometrievermessung

Die Messung wird nach dem folgenden Schema sechs Mal wiederholt. Die ersten drei Messungen erfolgen mit immer gleichem Aufbau. So kann die Messgenauigkeit des Messvorgangs an sich untersucht werden. Die letzten drei Messungen werden immer komplett mit Auf- und Abbau durchgeführt. Das Motorrad wird also in seiner Position verändert und die Messpunkte sowie die un-/codierten Marken und Adapter neu positioniert. Damit soll die Wiederholgenauigkeit des gesamten Messprozesses dargestellt und mögliche Fehlerquellen ausgemacht werden. Auf Änderungen in der Quantität der Messbilder und/oder der Messpunkte wird aus zeitlichen Gründen verzichtet.

Der Messvorgang erfolgt nach erfolgreichem Aufbau wie folgt:

- Software TRITOP via Skript starten und der Schritt für Schritt Anleitung folgen
  - o Messaufbau anhand der Liste im Skript auf Vollständigkeit kontrollieren
- Kalibrierung
  - o Längenmaßstäbe mit X-Y-Koordinatenkreuz aufnehmen
  - o Vier Mal um jeweils 90° verdreht
  - o Erfolgreiche Kalibrierung wird von der Software bestätigt

- Stufe 1
  - Lenker nach links einschlagen und fixieren
  - Fahrzeug auf mindestens drei 3 Ebenen jeweils 360°-umlaufend mit ausreichend Messbildern aufnehmen
  - Kontrollieren, ob alle relevanten Messpunkte erkannt wurden. Ansonsten weitere Messbilder aufnehmen
- Stufe 2
  - Lenker nach rechts einschlagen und fixieren
  - Fahrzeug auf mindestens drei 3 Ebenen jeweils 360°-umlaufend mit ausreichend Messbildern aufnehmen
  - Kontrollieren, ob alle relevanten Messpunkte erkannt wurden. Ansonsten weitere Messbilder aufnehmen

In Abbildung 32 sind die Messbilder der Stufe 1 der ersten Messung in ihrer Position und Ausrichtung um das Messobjekt mit den erzeugten Geometrien zu erkennen. Hier ist gut zu erkennen, wie die Bilder auf 3 Ebenen kugelförmig um das Messobjekt erzeugt werden.

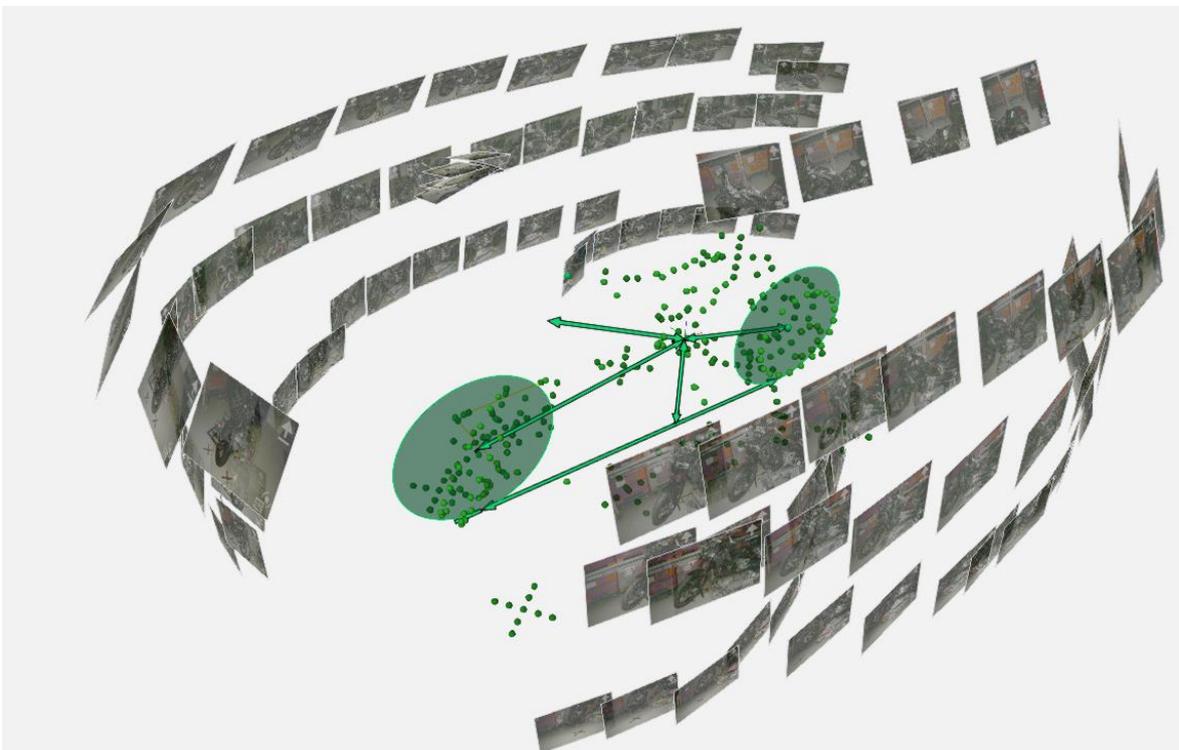


Abbildung 32: Messbilder der Stufe 1 der Messung 1

## 6.3 Auswertungen und Ergebnisse der Untersuchungen

Mit der abschließenden Auswertung der theoretisch durchgeführten 2D-Analyse und der am Prototyp K81 durchgeführten Fahrgeometrievermessung, lässt sich ein Abgleich zwischen den Messdaten erzeugen.

### 6.3.1 Auswertung der 2D-Analyse

Mit der 2D-Analyse kann die Annahme in Abschnitt 5.4 in einer Hinsicht bestätigt werden. Hier wird unter anderem angenommen, dass die Federelemente und die Kettenspannungsverstellung kritische Elemente hinsichtlich ihrer Einflüsse auf ungewollte Abweichungen sind. Mit Sicht auf die grafische und tabellarische Darstellung in Abschnitt 6.1 wird deutlich, dass Abweichungen von mehreren Millimetern, beispielsweise bei der Höhe des Schwingendrehpunktes, des Radstandes oder der Sitzhöhe, sogar im Rahmen der erlaubten Toleranzen möglich sind. Allgemein sind die größten Abweichungen bei den Kombinationen mit involvierter Federbeinlänge zu beobachten.

Der um  $\Delta SDP_z = 4,638\text{mm}$  tiefere Schwingendrehpunkt ist beim betrachteten Prototypen eher unkritisch, da die direkten Auswirkungen bezüglich Bodenfreiheit und Verhalten beim Beschleunigen keine merklichen, negativen Auswirkungen für den Kunden der betrachteten Fahrzeuggattung darstellen.

Der um  $\Delta L = 5,842\text{mm}$  größere Radstand ist ebenso unkritisch, da das vermutlich weniger agile Fahrverhalten vom Kunden nicht bemerkt wird. In einem direkten Vergleich mit einem gleichen Fahrzeug und kürzeren Radstand, der in seltenen Fällen vorliegt, kann dies jedoch bemerkt werden.

Die um  $\Delta S = 4,889\text{mm}$  geringere Sitzhöhe ist nicht kritisch, da der Kunde meist über eine hohe Sitzhöhe klagt. Seitens des Fahrwerks ist eine Entwarnung auszusprechen, da mögliche Abweichungen aufgrund der Tolerierung der Federelemente nur tiefere Sitzhöhenwerte zulassen (siehe Abschnitt 5.2.4). Abweichungen zu höheren Sitzhöhen sind in der Sitzbank und deren Anbindung zu vermuten.

Inwiefern die ermittelten Abweichungsmöglichkeiten der Realität entsprechen können, wird später im Abgleich mit den Messwerten aus der folgenden Auswertung der Fahrgeometrievermessung dargestellt.

### 6.3.2 Auswertung der Fahrgeometrievermessung

In diesem Abschnitt werden die 6 Vermessungsreihen des Prototyps ausgewertet. Die Tabellen unten zeigen einen Überblick der betrachteten Parameter.

Pro Tabelle sind für jeden Parameter aufgetragen:

- 3 Messreihen mit Istwerten
- Durchschnitt der jeweiligen Istwerte
- Sollwerte (bzw. angepasste Sollwerte in Tabelle 7)
- Differenz zwischen Ist- und Sollwerten als Betrag

Die Messreihen 1 bis 3 werden in Tabelle 5 gezeigt und mit immer gleichem Aufbau erzeugt – es wird also nur der Messvorgang als solcher verglichen. In den Messwerten sind untereinander keine auffälligen Ausreißer zu erkennen. Beim Großteil der Messwerte sind lediglich Abweichungen von wenigen Hundertstel Millimetern zu erkennen. Diese Abweichungen werden als Messungenauigkeit toleriert. Es ist jedoch auffällig, dass der Radstand sowie der Nachlauf um 2 bzw. knapp 4 Zehntel zwischen den einzelnen Messreihen streuen. Die Länge von der Vorderradachse zum Schwingendrehpunkt schwankt ebenfalls um knapp 1,5 Zehntel Millimeter. Hier wird vermutet, dass die Abweichungen auf Ungenauigkeiten in der Berechnung dieser Werte zurückzuführen sind.

Tabelle 5: Messungen 1 bis 3 ohne Anpassungen

Parameter	Ist 1	Ist 2	Ist 3	Ist Ø	Soll	Ist - Soll
Radstand [mm]	1606,07	1606,2	1606	1606,09	1606,939	0,849
Nachlauf [mm]	119,76	119,63	120,01	119,8	120,087	0,287
Lenkkopfwinkel [°]	62,03	62,01	62,01	62,017	61,99	0,027
SDP-Höhe [mm]	486,61	486,65	486,69	486,65	487,958	1,308
Schwingenlänge [mm]	634,71	634,75	634,69	634,717	635	0,283
Schwingenwinkel [°]	15,91	15,91	15,91	15,91	16,031	0,121
Länge VR - SDP [mm]	1005,69	1005,8	1005,65	1005,71	1006,834	1,121

Die Geometrie der Vorderradführung mit Nachlauf und Lenkkopfwinkel sowie dem davon beeinflussten Radstand wird über die geometrische Überlagerung der beiden Stufen im Messvorgang von der Software erzeugt. Dabei bildet die Schnittlinie der beiden Mittelebenen des Vorderrades in der jeweiligen Stufe die Lenkachse. Die

Vorderradachse wird aus beiden Stufen in die erzeugte Mittelebene des Gesamtfahrzeugs transformiert. Da diese Berechnung die meisten Abhängigkeiten hat, wird vermutet, dass damit auch die Abweichungen einhergehen.

Aufgrund eines Fehlers im Aufbau wird mit den Messwerten der Messreihen 1 bis 3 nicht weitergearbeitet. Das Hinterrad setzte bei allen Messungen leicht am Rangierwagen, auf dem das Motorrad fixiert war, auf. Der Fehler wurde erst am Ende entdeckt. Damit ist ein quantitativer Vergleich mit den Messreihen 4 bis 6 und eine Anpassung an die theoretische Geometrie hinfällig. Der Fehler mindert allerdings nicht die qualitative Aussagekraft über die Wiederholgenauigkeit zwischen den Messungen, da alle Messungen den gleichen, systematischen Fehler haben.

Die Messreihen 4 bis 6 sind in Tabelle 6 zu sehen. Hier wird der komplette Messaufbau für jede Messung separat auf und wieder abgebaut sowie das Motorrad in seiner Position verändert. Damit lassen sich die Einflüsse des Aufbaus in Relation zum eigentlichen Messvorgang ermitteln. Auch hier ist zu erkennen, dass die meisten Messwerte nur wenige Hundertstel Millimeter zwischen den Messreihen abweichen. Die Parameter Radstand, Nachlauf und Länge von der Vorderradachse zum Schwingendrehpunkt weichen jedoch noch deutlicher untereinander ab, als bei den Messreihen 1 bis 3. Die größeren Abweichungen lassen darauf schließen, dass der Messaufbau einen wesentlichen Anteil zur Messabweichung des Systems beiträgt.

Tabelle 6: Messungen 4 bis 6 ohne Anpassungen

Parameter	Ist 4	Ist 5	Ist 6	Ist Ø	Soll	Ist - Soll
Radstand [mm]	1606,3	1606,49	1606,13	1606,307	1606,939	0,632
Nachlauf [mm]	120,23	119,83	120,34	120,133	120,087	0,046
Lenkkopfwinkel [°]	62	62,06	62	62,02	61,99	0,03
SDP-Höhe [mm]	487,06	487,02	487,02	487,033	487,958	0,925
Schwingenlänge [mm]	634,87	634,9	634,87	634,88	635	0,12
Schwingenwinkel [°]	15,95	15,94	15,95	15,947	16,031	0,084
Länge VR - SDP [mm]	1005,95	1006,1	1005,77	1005,94	1006,834	0,894

Die Messreihen 4 bis 6 in Tabelle 6 lassen ebenfalls einen ersten Vergleich der Ist- mit den Sollwerten aus der theoretischen Geometrie zu. Die Abweichungen, auch

wenn sie teils knapp einen Millimeter betragen, lassen jedoch vermuten, dass sie größtenteils von den kritischen Elementen herrühren. Dabei sind Änderungen der Längen der Federelemente zwischen den Messreihen aufgrund von Reibung innerhalb der Systeme möglich. Die Länge der Gabel kann zudem um  $\pm 1$  Millimeter aufgrund des verwendeten Gabelspreizers schwanken.

In Tabelle 7 wird die Vermutung bestätigt, da hier die kritischen Elemente in ihren jeweiligen Toleranzbereichen an die durchschnittlichen Messwerte angepasst werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass somit nur noch Abweichungen von einigen Hundertstel Millimeter vorliegen, die im Rahmen dieser Betrachtung toleriert werden.

Tabelle 7: Messungen 4 bis 6 mit Anpassungen der kritischen Elemente

Parameter	Ist 4	Ist 5	Ist 6	Ist Ø	Soll	Ist - Soll
Radstand [mm]	1606,3	1606,49	1606,13	1606,307	1606,387	0,08
Nachlauf [mm]	120,23	119,83	120,34	120,133	120,087	0,046
Lenkkopfwinkel [°]	62	62,06	62	62,02	62,01	0,01
SDP-Höhe [mm]	487,06	487,02	487,02	487,033	487,012	0,021
Schwingenlänge [mm]	634,87	634,9	634,87	634,88	634,88	0
Schwingenwinkel [°]	15,95	15,94	15,95	15,947	15,945	0,002
Länge VR - SDP [mm]	1005,95	1006,1	1005,77	1005,94	1006,009	0,069

Für die Anpassung der Sollwerte in Tabelle 7 wird geändert:

- Einfederung vorne um  $\Delta l_{\text{Telegabel}} = 1,4\text{mm}$
- Einfederung hinten um  $\Delta l_{\text{Federbein}} = 0,23\text{mm}$
- Kettenspannungsverstellung um  $\Delta l_{\text{Schwinge}} = 0,12\text{mm}$

Die Änderungen für den Abgleich befinden sich alle im guten, mittleren Toleranzbereich der jeweiligen Elemente. Jedoch ist zu erwähnen, dass die Komprimierung der Zuganschlagfeder an der Telegabel mit Hilfe eines Gabelspreizers ohne Kenntnis der verwendeten Kraft vorgenommen wird. Eine Aussage über die Toleranzgüte der Federelemente ist mit der Fahrgeometrievermessung also nicht möglich und muss separat auf einem geeigneten Prüfstand erfolgen. Die dort erzeugten Messwerte können anschließend im Abgleich bzw. bei der Fahr-

geometrievermessung verwendet werden und lassen dann aussagekräftige Angaben über die realen Abweichungen zu.

Die Sitzhöhe wird auf Basis der 3D-Punktwolke der 4. Messreihe grafisch im CAD gemessen. Dazu wird die kürzeste Distanz von der Fahrbahn zum erzeugten Sitzhöhenmesspunkt auf dem Heckrahmen gemessen. Um diesen abzusichern, wird erstens die Sitzhöhe in Normallage und mit angepassten, kritischen Elementen in NL in der theoretischen Geometrie gemessen. Im zweiten Schritt wird die repräsentative Sitzhöhe in NL im CAD mit der repräsentativen Sitzhöhe in NL am Prototyp K81 verglichen.

Tabelle 8: Absicherung des repräsentativen Sitzhöhenmesspunktes

Was und wo	Art	Wert [mm]	Diff. [mm]
Sitzhöhe in NL im CAD	Soll	834,21	-0,847
Sitzhöhe in angepasster NL im CAD	Ist	833,363	
Repräsentativer Sitzhöhenpunkt in NL im CAD	Soll	717,923	-0,848
Repräs. Sitzhöhenpunkt in NL am Prototyp K81	Ist	717,075	

In der Tabelle 8 wird gezeigt, dass der erzeugte Sitzhöhenmesspunkt als repräsentativer Punkt für die Sitzhöhe herangezogen werden kann. Die beiden Differenzen der Soll- und Istwerte unterscheiden sich nur im Mikrometerbereich. Ebenfalls wird gezeigt, dass die Sitzhöhe um  $\Delta h_{\text{Sitzhöhe}} = 0,848\text{mm}$  tiefer ist. In Anbetracht der Einflüsse durch die Abweichungen der Federelemente ist dieser Wert gerechtfertigt und nachvollziehbar. Ebenso kann hier bestätigt werden, dass die Annahme aus der 2D-Analyse in Abschnitt 6.3.1, die besagt, dass die Sitzhöhe aus Fahrwerkssicht nur nach unten abweichen kann, stimmt.

## 6.4 Ergebnis der Untersuchungen

Als Ergebnis der Untersuchungen ist positiv zu vermerken, dass der untersuchte Prototyp mit allen betrachteten Parametern innerhalb der in Abschnitt 6.1 analysierten Toleranzgrenzen liegt. Ebenso liegen die Anpassungen der kritischen Elemente innerhalb der Toleranzgrenzen der Komponenten. Die hohe Güte des Fahrzeugs und die geringen Einflüsse der Montagetoleranzen lassen auf eine gute und solide Konstruktion schließen.

Der Messaufbau sowie die Vermessung sind in Hinblick auf die Messwerte des Nachlaufs, Radstands sowie der Länge von der Vorderradachse zum Schwingendrehpunkt und den dort ersichtlichen Abweichungen untereinander im Zehntelbereich fehlerbehaftet. Dabei ist auch ersichtlich, dass diese Parameter geometrische Abhängigkeiten untereinander haben. Damit liegt die Vermutung nahe, dass bei der Berechnung der Vorderradführungsgeometrie aus den aufgenommenen Messdaten die Abweichungen entstehen.

Mit Sicht auf die Messung ist positiv anzumerken, dass die restlichen, betrachteten Parameter lediglich im unteren Hundertstelbereich untereinander abweichen. Diese Wiederholgenauigkeit ist sehr zufriedenstellend.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die gemessene Abweichung unweit von der angegebenen Messabweichung der GOM GmbH liegt. Dabei sei angemerkt, dass die angegebene Messabweichung sicherlich unter erheblich strengeren Bedingungen ermittelt wird.

Das TRITOP-System der GOM GmbH ist für die Fahrgeometrievermessung in der Entwicklung bei BMW Motorrad, hinsichtlich geringer Messabweichung und einfacher Handhabung, gut geeignet.

Die Abweichungen der Ist- von den Sollwerten sind den kritischen Elementen geschuldet und können durch Anpassungen dieser herausgefiltert werden.

Die Sitzhöhe lässt sich fahrwerksintern ideal über einen repräsentativen Sitzhöhenpunkt darstellen und messen. So kann sichergestellt werden, welche Bauteile hier Abweichungen (in welche Richtung) bedingen.

## 7 Ausblick

Für zukünftige Entwicklungen bei BMW Motorrad sind die geringen Abweichungen des betrachteten Prototypen mit Sicherheit als positiv zu sehen. Es ist jedoch zwingend notwendig, mehrere gleichartige Prototypen zu vermessen und die Daten zu vergleichen, damit eine fundierte Aussage gemacht werden kann.

Gleiches gilt für den kompletten Messprozess. Dieser ist in vielerlei Hinsicht für den genutzten Bereich sehr gut. Es gibt jedoch Bedarf der Weiterentwicklung und Verbesserung bei der Berechnung der Vorderradführungsgeometrie. Hier sind in allen Messreihen die größten Abweichungen zu sehen. Es wird empfohlen, dass die Berechnung der Vorderradführungsgeometrie hinsichtlich ihrer Wiederholgenauigkeit genauer untersucht wird. Dort wird das größte Verbesserungspotenzial im Messprozess vermutet.

Weiterhin gibt es Potenzial bei der Kommunikation der ermittelten Messdaten. Derjenige, der die Messdaten aufnimmt, macht i.d.R. nicht den Abgleich mit der theoretischen Kinematik im CAD. Bei der Übermittlung der Messdaten werden nur die Werte der betrachteten Parameter übersendet. Für den Abgleich ist jedoch auch interessant, welche Reifen verbaut sind, bzw. wie z.B. die gemessenen Längen der Feder Elemente sind. Hier wird eine Erweiterung des Messprotokolls um die gemessenen Längen der Feder Elemente empfohlen, da diese im Zuge der Vermessung der Feder Elemente aufgenommen werden und lediglich übertragen werden müssen. Oder die Messprotokolle der Feder Elemente des jeweiligen Fahrzeugs werden dem Messprotokoll der Fahrgeometrie bei der Übermittlung angehängt. Mit dieser Erweiterung kann anschließend ein präziser Abgleich im CAD stattfinden. Die Aussagekraft des theoretischen Abgleichs wird damit hinsichtlich Qualität und Quantität signifikant steigen.

Eine andere Idee ist, dass die gemessenen Längen der Feder Elemente des zu vermessenden Fahrzeugs direkt bei der Vermessung über das vorhandene Skript mit der dort hinterlegten What-If-Funktion berücksichtigt werden. Das Skript bietet hier am Ende der Vermessung die Möglichkeit, dass der Benutzer bestimmte Korrekturen der Messwerte eingibt. So kann beispielsweise die Einfederung an Vorder- und Hinterrad geändert werden. Ebenso kann der korrekte, von der

Konstruktion genutzte Reifendurchmesser eingegeben werden. So werden die erzeugten Messdaten sinnvoll gefiltert und der Abgleich erfolgt deutlich effizienter.

Die Berücksichtigung der Federelementlängen bei der Fahrgeometrievermessung sorgt dafür, dass die erzeugten Messwerte auch ohne Kommentar über mögliche Abweichungen oder eine Zusatzinformation gedeutet und verarbeitet werden können. Damit kann zukünftig sichergestellt werden, dass Messdaten nicht fehlinterpretiert werden.

In beiden Ansätzen wird die Berücksichtigung der gemessenen Längen der Federelemente die Abweichungen reduzieren – auch in Hinblick auf den verwendeten Gabelspreizer an der Telegabel. Dieser dient lediglich dazu, die Länge auf  $\pm 1$  Millimeter anzunähern. Diese Annäherung mag in vielen Fällen ausreichen, sollte jedoch bei einer präzisen Vermessung durch die Berücksichtigung der gemessenen Längen der Federelemente ersetzt werden.

Schließlich sei angemerkt, dass im Entwicklungsprozess geprüft werden muss, welche der beiden möglichen Ansätze umgesetzt werden kann und womit am effizientesten gearbeitet werden kann. Eine Erweiterung des Messprotokolls ist auf jeden Fall zu empfehlen, dann damit sichergestellt werden kann, dass ein Dokument alle benötigten Informationen enthält, um einen sinnvollen Abgleich der Messwerte zu rechtfertigen.

Die fahrdynamischen Auswirkungen der in dieser Arbeit ermittelten Abweichungen sind für Profis und im direkten Vergleich sicherlich erfahrbar. Für den Kunden sind diese Abweichungen vertretbar, da dieser die kleinen Änderungen der Fahrgeometrie nicht merken wird und meist auch nur ein Motorrad einer Gattung besitzt. Außerdem werden in den Fahrerprobungen in der Entwicklung des Fahrzeugs kleine Abweichungen der Fahrgeometrie untersucht. Dabei wird versucht, dass die Auswirkungen der Zusammenbautoleranzen, soweit bekannt, nicht dazu führen, dass das Fahrzeug sich in bestimmten Situationen kritisch verhält.

## 8 Fazit

Die hier durchgeführten Untersuchungen zeigen nur geringe Abweichungen auf, die sich zudem aus den Toleranzen der kritischen Elemente ergründen lassen. Das bedeutet, dass das untersuchte Fahrzeug, welches sich im fortgeschrittenen Entwicklungsstatus befindet, nicht die großen Abweichungen aufweist, die bei vergangenen Entwicklungen in diesem Status beobachtet werden konnten. Für das untersuchte Fahrzeug kann eine Entwarnung ausgesprochen werden.

Eingehend auf die zu bearbeitenden Punkte der Aufgabenstellung zeigt die vorliegende Arbeit auf, dass die Abweichungen in der Fahrgeometrie maßgeblich durch die definierten, kritischen Elemente erzeugt werden. Das methodische Vorgehen im Produktentwicklungsprozess bei BMW Motorrad kann grundsätzlich bestätigt werden, bedarf jedoch kleine Verbesserungen, die im Ausblick aufgezeigt werden und das Fehlerpotenzial im Vorgehen reduzieren können. Die Zusammenbautoleranzen können, zumindest im vorliegenden Fall, vernachlässigt werden. Für folgende Entwicklungen muss im Einzelnen untersucht werden, inwiefern sich die Erkenntnisse dieser Arbeit projizieren lassen.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fahrwerksgeometrie eines Motorrades in Normallage (=Konstruktionslage) .....	8
Abbildung 2: Hauptrahmen der K81 .....	11
Abbildung 3: ZSB-Vorderradführung der K81 .....	12
Abbildung 4: Heckrahmen der K81.....	13
Abbildung 5: ZSB-Hinterradführung der K81 .....	15
Abbildung 6: Das Prinzip der Nahbereichsphotogrammetrie(4).....	17
Abbildung 7: Messsystem der GOM GmbH (4) .....	19
Abbildung 8: Übersicht der Schnittstellen (Messmerkmale) .....	21
Abbildung 9: Rückansicht Hauptrahmen K81 .....	22
Abbildung 10: Seitenansicht links Hauptrahmen K81 .....	23
Abbildung 11: Übersicht Schwinge K81 .....	24
Abbildung 12: Detailansicht 1 Schwinge K81 .....	25
Abbildung 13: Detailansicht 2 Schwinge K81 .....	26
Abbildung 14: Detailansicht Federbeinbindung .....	26
Abbildung 15: Draufsicht Heckrahmen .....	27
Abbildung 16: Detailansicht Heckrahmen.....	28
Abbildung 17: Federbein .....	29
Abbildung 18: Detailansicht der Draufsicht (links) und der Vorderansicht (rechts) der Telegabel .....	30
Abbildung 19: Seiten-Detailansicht Telegabel unten .....	31
Abbildung 20: Sondermessung .....	33
Abbildung 21: 2D-Kinematikmodell im CAD mit Maßangaben in Normallage .....	38
Abbildung 22: Übersicht der Extremfälle aus der 2D-Analyse .....	39
Abbildung 23: Einflüsse der kritischen Elemente auf den Nachlauf.....	40

---

Abbildung 24: Einflüsse der kritischen Elemente auf den Lenkkopfwinkel .....	41
Abbildung 25: Einflüsse der krit. Elemente auf die Schwingendrehtpunktshöhe ....	42
Abbildung 26: Einflüsse der kritischen Elemente auf den Schwingenwinkel .....	43
Abbildung 27: Einflüsse der kritischen Elemente auf die proj. Schwingenlänge....	44
Abbildung 28: Einflüsse der kritischen Elemente auf den Radstand .....	45
Abbildung 29: Einflüsse der kritischen Elemente auf die Sitzhöhe .....	46
Abbildung 30: Messaufbau der Fahrgeometrievermessung .....	47
Abbildung 31: Maßstäbe mit Koordinatenkreuz (links) und Detailansicht vom Vorderrad (rechts) .....	49
Abbildung 32: Messbilder der Stufe 1 der Messung 1 .....	50

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fahrwerksparameter eines Motorrads (2).....	9
Tabelle 2: Übersicht Anlenkung Federbein .....	14
Tabelle 3: Auswertung des Messprotokolls des Hauptrahmens .....	32
Tabelle 4: Auswertung des Messprotokolls der Schwinge .....	34
Tabelle 5: Messungen 1 bis 3 ohne Anpassungen.....	52
Tabelle 6: Messungen 4 bis 6 ohne Anpassungen.....	53
Tabelle 7: Messungen 4 bis 6 mit Anpassungen der kritischen Elemente.....	54
Tabelle 8: Absicherung des repräsentativen Sitzhöhenmesspunktes .....	55

## Literaturverzeichnis

1. **Weichert, BMW AQ-1.** *Qualitätslexikon - Definitionen der Qualitätsbegriffe.* [.pdf-Dokument] München : BMW, 2005.
2. **Stoffregen, J.** *Motorradtechnik - Grundlagen und Konzepte von Motor, Antrieb und Fahrwerk - 8. Auflage.* Olching, Deutschland : Springer Vieweg, 2012. 978-3-8348-1716-7.
3. **Hesser, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried.** *"Hoischen" - technisches Zeichnen - 32. Auflage.* Hamburg : cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG, Berlin, 2009. 978-3-589-24132-3.
4. **B.Eng. Wagenknecht, Falk.** *Bericht Praktikum.* München : s.n., 2015.

# Anhang A



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Hamburg University of Applied Sciences

**FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK  
DEPARTMENT FAHRZEUGTECHNIK UND FLUGZEUGBAU  
Professor Dr.-Ing. C. Wolfgang Fervers**

## **Bachelorarbeit Arne Diers (Matr.-Nr. 2027324)**

**Thema:           Untersuchung der Auswirkungen von Toleranzen einzelner Bauteile auf kinematisch relevante Parameter eines gesamten Motorrades**

### **Beschreibung:**

Die Fahrdynamik eines Motorrades wird grundlegend durch die Auslegung der Fahrwerksgeometrie definiert, welche maßgeblich von der Gestaltung des Hauptrahmens und der Radführungen abhängt. Durch die in der Fertigung und Montage zulässigen Toleranzen können Abweichungen von der vorgesehenen Geometrie auftreten, die zu unerwünschten Effekten hinsichtlich der fahrdynamischen Eigenschaften des Motorrades führen. Für das Gesamtfahrzeug ist das Zusammenwirken aller Toleranzen entscheidend. Zur Überprüfung der geometrischen Abweichungen werden im Entwicklungsprozess Messungen an Prototypen durchgeführt. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass die geometrischen Abweichungen teilweise größer sind, als es die theoretische Überlagerung aller Toleranzen erwarten lässt.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll das derzeitige, methodische Vorgehen zum Abgleich der theoretischen und realen Kinematik untersucht und bewertet werden. Hierzu sind die Einflüsse von Fertigungs- und Montagetoleranzen der einzelnen Bauteile Hauptrahmen, Heckrahmen, Vorder- und Hinterradführung, sowie deren Zusammenbau auf die geforderte Fahrwerksgeometrie eines Motorrades zu analysieren. Die Untersuchungen beziehen sich auf die fahrdynamisch relevanten Parameter Nachlauf, Lenkkopfwinkel, Schwingendrehpunkt, auf die Fahrbahn projizierte Schwingenlänge, Radstand und Sitzhöhe. Hierbei sollen die Betrachtungen in der durch die Hoch- und Längsachse des Fahrzeugs aufgespannten Ebene erfolgen.

Neben der Bewertung der derzeitigen Methodik wird als Ergebnis dieser Untersuchungen auch das Ausweisen von evtl. vorhandenem Verbesserungspotential und, falls erforderlich, sinnvollen weiteren Untersuchungen erwartet.

In der Hauptsache sind hierfür folgende Punkte zu bearbeiten:

- Erfassen des derzeitigen, methodischen Vorgehens zum Abgleich der theoretischen und realen Kinematik.
- Erfassung der Toleranzen der relevanten Bauteile Gabel, Hauptrahmen, Heckrahmen, Schwinge und Federbein.
- Vermessung eines montierten Prototyps hinsichtlich Zusammenbautoleranzen.
- Untersuchung des Einflusses der Messergebnisse auf die kinematischen Parameter Nachlauf, Lenkkopfwinkel, auf die Fahrbahn projizierte Schwingenlänge, Schwingendrehpunkt und Radstand.
- Bewertung der derzeitigen Methodik und Ausblick auf mögliche weitere Schritte.

Die Bachelorarbeit wird in Kooperation mit BMW Motorrad in München durchgeführt.