



Christian Pitterle

**Untersuchung der Eignung der 6-Axis
Upper-Neck-Load-Cell IF-205 für die Bewegungsanalysen
von Dummykomponenten eines HIII 50% Dummys anhand
von Nackenpendelversuchen**

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur in der
Studienrichtung Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau, Vertiefungsrichtung
Fahrzeugtechnik und -sicherheit

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Durchgeführt am Institut für Fahrzeugsicherheit (VSI) in Kooperation mit der Volkswagen AG

Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan

Betreuer: Dipl.-Ing. Jörg Moser (VSI)

Dr.-Ing. Karsten Raguse (Volkswagen AG)

Graz, April 2014



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Hinweis

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Masterarbeit sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Die vorliegende Arbeit ist nur den Mitarbeitern des Volkswagen Konzerns, den Korrektoren sowie den Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich zu machen.

Danksagung

Ein großes Dankeschön gilt meinem Betreuer Jörg Moser. Er hat mich sehr unterstützt und viel Zeit für die Betreuung der Masterarbeit investiert. An dieser Stelle ist auch die unkomplizierte und vor allem sehr rasche Abwicklung der organisatorischen Tätigkeiten zu nennen.

Für die Betreuung während meines Praktikums bei Volkswagen in Wolfsburg möchte ich mich bei Karsten Raguse bedanken. Er hat mir in der neuen Arbeitsumgebung ein familiäres Klima vermittelt und mich bei meiner Masterarbeit sehr unterstützt. In dieser Zeit hatte ich die Möglichkeit, viele Erfahrungen im Bereich der Fahrzeugsicherheitsentwicklung zu sammeln. Ein Dank gilt auch allen anderen Mitarbeitern der Abteilung EKSE bei Volkswagen für die vielen Anregungen und Informationen.

Neben meinen Betreuern möchte ich mich auch bei den Personen bedanken, die mich bei der Arbeit zusätzlich unterstützt haben.

- Bei Wolfgang Sinz für die sehr konstruktive Unterstützung und die Anregungen während der gesamten Erstellung meiner Masterarbeit
- Bei Christoph Klein für die gute Zusammenarbeit sowie bei den anderen Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugsicherheit der Technischen Universität Graz
- Bei Robert Greimel für die sehr angenehme Zusammenarbeit und für die Beantwortung vieler theoretischer Fragen

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Familie für die Motivation und vor allem für die finanzielle Unterstützung während des gesamten Studiums und der Abschlussarbeit bedanken.

Kurzfassung

Für die Analyse von Crashversuchen ist unter anderem die Dummykinematik von großem Interesse. Die präzise Bestimmung der gesamten Dummykinematik ist aber unter gewissen Umständen mit den derzeit eingesetzten Verfahren nicht möglich. Ein neu entwickeltes Verfahren hebt diese Einschränkung für gewisse Dummykomponenten theoretisch auf. Für dieses Verfahren werden unter anderem die Messgrößen der Kraft-Momenten-Messdose im Nackenbereich des Dummys als Eingangsgrößen herangezogen. Aus diesem Grund ist die Zielsetzung dieser Masterarbeit die Untersuchung der prinzipiellen Eignung der Kraft-Momenten-Messdose für die Bewegungsanalysen von Dummykomponenten. Die durchgeführte Eignungsanalyse erfolgt dabei anhand von Nackenpendelversuchen mit dem Kopf und Nacken eines HIII 50% Dummys mit eingebauter 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205. Die Untersuchung, basierend auf Nackenpendelversuchen, hat gegenüber Crashtests den Vorteil, dass die auftretenden Belastungen sehr gut abschätzbar sind, da keine zusätzlichen äußeren Kräfte und Momente auf den Dummykopf einwirken. Die einzigen Belastungsgrößen sind Kräfte und Momente, die aufgrund der Massenträgheit wirken. Somit ist es prinzipiell theoretisch möglich, die einwirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle aus den gemessenen Beschleunigungen und Drehraten im Kopf zu berechnen. Für die Auswertung der Pendelversuche wurde das Verfahren der simulationsbasierten Versuchsauswertung (SimbaV) erfolgreich angewendet. Mit diesem Verfahren ist es grundsätzlich möglich, präzise Bahnkurven des Dummykopfs zu bestimmen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgte in einem weiteren Schritt die Berechnung der theoretisch wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle. Der Vergleich der theoretisch berechneten Verläufe mit den gemessenen Kräften und Momenten hat gezeigt, dass die größten Abweichungen bei der Messung der Kräfte in X- und Y-Richtung, entsprechend der Konvention nach SAE J211/1, vorliegen. Die maximalen Differenzen zwischen den theoretisch berechneten und gemessenen X-Kräften können mit circa 150N angegeben werden. Deutlich bessere Übereinstimmungen wurden beim Vergleich der Z-Kräfte erzielt. Geringe Unterschiede ergaben sich auch für die Momente um die X- und Y-Achse. Bei den Z-Momenten konnten aufgrund der sehr geringen Belastungen keine zuverlässigen Aussagen getroffen werden. Der Fokus der weiteren Analysen wurde auf die Minimierung der Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Kräften in X- und Y-Richtung gelegt. Die durchgeführten Untersuchungen haben grundsätzlich zwei Erkenntnisse gezeigt. Mit der Modellierung eines Skalierungsfaktors konnten die Abweichungen der X- und Y-Kräfte bereits deutlich reduziert werden. Außerdem führte die Modellierung eines Querrichtungs-Einflusses des wirkenden Moments M_y auf den Differenzverlauf der Kraft F_x zu einer weiteren Reduktion der Differenzen von F_x . Die Modellierung der Skalierungs- und Querrichtungs-Effekte ergab über die gesamte Versuchsreihe sehr konstante und systematische Abweichungen, die jedoch physikalisch nicht plausibel sind. Inwieweit die verbleibenden Abweichungen jedoch auf sensor- bzw. versuchsspezifische Ursachen oder ein unzureichendes Optimierungsmodell zurückzuführen sind, kann anhand der durchgeführten Versuchsreihe nicht mit Bestimmtheit gesagt werden. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen scheinen die Messgrößen der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 als Eingangsgrößen für die Bewegungsanalyse von gewissen Dummykomponenten geeignet zu sein.

Abstract

The dummy kinematics is, among other things, of great interest for the analysis of crash tests. With the methods currently used, a precise determination of the entire dummy kinematics in certain circumstances is not possible. A newly developed method theoretically allows to compensate these restrictions for certain components of the dummy. For the new method, among other things, the measurements of the upper neck load cell are used as input quantities. Hence, the objective target of the master thesis is the investigation of the capability for using the measurements of the upper neck load cell for kinematic analysis of dummy components. The executed investigation of the capability is based on measurement data of pendulum tests with the head and neck components of a HIII 50% dummy with built in 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205. Compared to common crash tests the investigation based on pendulum tests has the advantage that the occurred loads can be estimated well because there are no additional external forces and moments acting on the dummy head. The only load acting on the dummy head is caused only by inertial forces and torques and therefore it is, in principle, possible to calculate the forces and torques at the upper neck point from the measured accelerations and angular rates in the head of the dummy. For the analysis of the pendulum tests the method "Simulation Based Analysis of Test Results" (SimbaV) has been applied successfully. This method basically enables the computation of precise trajectories of the dummy head. Based on these results it was possible to calculate the theoretically acting forces and torques at the upper neck measurement point. The comparison of the theoretical calculated forces and torques with the measured forces and torques showed the greatest differences in the measurements of the forces in x- and y-direction, according to the convention SAE J211/1. The maximum differences between theoretical calculated and measured forces in x-direction can be specified with approximately 150N. Significantly lower differences showed the comparison of the force F_z and low differences can also be specified for the torques around the x- and y-axis. Due to the very low torque load around the z-axis it was not possible to give reliable statements for the torque M_z . Based on these results the focus of the further analysis was directed to the minimization of the differences between the calculated and measured forces in x- and y-direction. Ultimately two effects could be demonstrated. With the modeling of a scale factor it's already possible to reduce the differences of the x- and y-forces considerably. In addition the modeling of a crosstalk-effect of the acting torque M_y to the deviations of F_x lead to a further reduction of the deviations of F_x . The modeling of the scale- and crosstalk-effects showed very constant and systematic deviations over the entire test series but the results are not physically plausible. How far the remaining deviations are a result of sensor- or test-specific characteristics or an insufficient model of optimization on the basis of the pendulum tests carried out cannot be said with certainty. Based on the knowledge gained it seems to be possible to use the measurements of the 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 as input quantities for kinematic analysis of certain dummy components.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	3
2	Methodik und Vorgangsweise bei der Analyse der Nackenmesswerte	5
3	Grundlagen.....	8
3.1	Beschreibung der Pendelversuche	8
3.2	Übersicht der durchgeführten Pendelversuche	9
3.3	Verwendete Sensorik.....	11
3.4	Aufbau und Messprinzip der Upper-Neck-Load-Cell IF-205.....	12
3.5	Piezoresistive Kraftmessung mittels Dehnungsmessstreifen (DMS).....	13
3.6	Prinzip der simulationsbasierten Versuchsauswertung (SimbaV)	16
3.6.1	Optimierungsprogramm CDA.....	17
3.7	Koordinatensysteme.....	18
4	Präzise Bestimmung der Dummykopf-Bahn	20
4.1	Besonderheiten bei der Auswertung der Pendelversuche	20
4.1.1	Zeitlicher Ablauf bei den Pendelversuchen	20
4.1.2	Berücksichtigung der g-Korrektur	22
4.2	Relevante Parameter für die Optimierung der Kopf-Trajektorien	24
4.2.1	Systembedingte Ungenauigkeiten	24
4.2.2	Sensorbedingte Ungenauigkeiten	26
4.2.2.1	Offset-Fehler (additiver Fehler)	26
4.2.2.2	Skalierungs-Fehler (multiplikativer Fehler).....	27
4.2.3	Einflussuntersuchung anhand des Parameters Offset AC (OAC)	29
4.3	Detailauswertung (Optimierung der Kopf-Trajektorien).....	31
4.3.1	Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung 0°, Versuch 9)	31
4.3.2	Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung +45°, Versuch 9)	34
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der präzisen Trajektorien-Bestimmung.....	36
5	Vergleich der gemessenen Kräfte und Momente mit den berechneten Größen.....	38
5.1	Berechnung der Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle	39
5.1.1	Berechnung der Kräfte an der oberen Nackenmessstelle	39

5.1.2	Berechnung der Momente an der oberen Nackenmessstelle	41
5.2	Detailauswertung (Vergleich der Kräfte und Momente)	42
5.2.1	Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung 0°, Versuch 9)	42
5.2.2	Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung +45°, Versuch 9)	45
5.3	Zusammenfassung der Abweichungen der gemessenen Kräfte und Momente.....	48
6	Differenzanalyse und Ableitung von möglichen Ursachen	52
6.1	Einflussfaktoren auf die Abweichungen der Kräfte.....	53
6.1.1	Einfluss der Kopfmasse auf die Abweichungen der Kräfte	53
6.1.2	Einfluss der Beschleunigungssignale auf die Abweichungen der Kräfte.....	55
6.2	Modellierung zur Analyse der Abweichungen der Kräfte	57
6.2.1	Skalierungs-Abweichungen	58
6.2.2	Querrichtungs-Empfindlichkeiten	59
6.2.3	Definition des Modells zur systematischen Analyse der Abweichungen	60
6.3	Detailauswertung (Optimierung der X-Kräfte).....	61
6.3.1	Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung 0°, Versuch 9)	61
6.3.2	Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung +45°, Versuch 9)	68
6.4	Zusammenfassung der Analyse der gemessenen Kräfte	72
6.5	Diskussion der Ergebnisse	75
7	Anwendung und Umsetzung der Erkenntnisse.....	77
8	Zusammenfassung und Ausblick	80
9	Abbildungsverzeichnis.....	82
10	Tabellenverzeichnis	85
11	Formelverzeichnis	86
12	Literaturverzeichnis und Bildnachweis	87
13	Anhang.....	88

1 Einleitung

Die Verbesserung der integralen Sicherheit von Kraftfahrzeugen bei Verkehrsunfällen ist eine wesentliche Zielsetzung der Fahrzeugentwicklung. Der Insassenschutz hat höchste Priorität für die Automobilhersteller, die um eine ständige Verbesserung der Fahrzeugsicherheit bemüht sind. Charakteristisch für moderne Sicherheitsentwicklungen sind ein sehr hohes Entwicklungsniveau, hohe anfallende Kosten sowie die Forderung nach immer präziseren Ergebnissen und ständigen Verbesserungen.

So ist unter anderem die Dummykinematik von großem Interesse für die Fahrzeugsicherheitsentwicklung. Die präzise Bestimmung der gesamten Dummykinematik bei Fahrzeugversuchen ist aber mit den derzeit eingesetzten Verfahren nicht möglich. Beispielsweise können ohne erheblichen Mehraufwand optische Messverfahren aufgrund von Sichtverdeckungen (beispielsweise Airbag, Tür, ...) nur bedingt und für wenige Dummyregionen eingesetzt werden. [10, 2010]

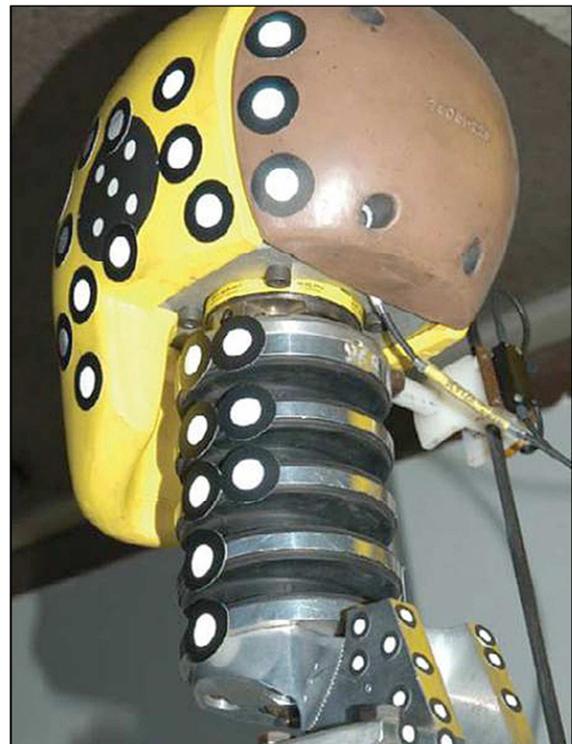


Abbildung 1: Euro NCAP Crashtest [1], Kraft-Momenten-Messdose im Nackenbereich [11]

Ein am Institut für Fahrzeugsicherheit, in Kooperation mit der AUDI AG und VOLKSWAGEN AG, entwickeltes Verfahren hebt theoretisch diese Einschränkung für gewisse Dummykomponenten auf. Für dieses neue Verfahren werden unter anderem auch die Nackenkräfte und –momente als Eingangsgrößen verwendet. [10, 2010]

Es stellt sich die Frage, ob die derzeit eingesetzten Kraft-Momenten-Messdosen im Nackenbereich des Dummies überhaupt geeignet sind, um eben auf präzise Bewegungen der Dummykomponenten zu schließen. Diesbezüglich sind keine Veröffentlichungen bekannt, welche die Eignung der derzeit eingesetzten Kraft-Momenten-Messdosen bewerten.

Der Fokus der Arbeit bezieht sich dabei auf die Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle eines Hybrid III 50% Dummies. Bei diesem Dummy sieht die Instrumentierung die Messung von Kräften und Momenten in allen drei Koordinatenachsen vor, das heißt von der Sensorik müssen insgesamt sechs Belastungsgrößen an der oberen Nackenmessstelle erfasst werden. Der in dieser Arbeit untersuchte Sensor verbindet die beiden Dummyelemente Kopf und Nacken und wird als 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 bezeichnet.

Da eine objektive Eignungsprüfung der Kraftmessdosen für präzise Bewegungsanalysen von Dummykomponenten, basierend auf Fahrzeugversuchen, gegenwärtig fast nicht möglich ist, soll in einem ersten Schritt der Eignungsnachweis anhand von Nackenpendelversuchen erfolgen. Die großen Vorteile der Nackenpendelversuche sind einerseits die definierten Randbedingungen als auch andererseits die einfachere Möglichkeit mittels optischer Messverfahren die Dummykopf-Bewegung präzise zu bestimmen. Infolge dieser Voraussetzungen kann, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, die grundsätzliche Eignung der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 für die Bewegungsanalyse von gewissen Dummykomponenten überprüft werden.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Rahmen der Masterarbeit erfolgt eine Eignungsuntersuchung der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 in einem Hybrid III 50% Dummy für den Einsatz zur Bewegungsanalyse von Dummykomponenten. Dazu werden Nackenpendelversuche durchgeführt, wobei nur der Kopf und der Nacken des Hybrid III Dummys bei den Versuchen eingesetzt werden. Bei diesem Versuchstyp erfährt der Dummykopf nur Belastungen aufgrund seiner eigenen Trägheit. Die Berechnung der wirkenden Belastungen an der oberen Nackenmessstelle ist prinzipiell möglich. Aus den ermittelten Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Belastungsgrößen lassen sich dann erste Rückschlüsse auf die Eignung der Nackenmesswerte als Inputgröße für ein Verfahren zur Bestimmung der Kinematik von Dummykomponenten ableiten. Die Variation des Belastungsniveaus erfolgt bei den durchgeführten Pendelversuchen durch ansteigende Pendel-Initialwinkel. Seitliche Belastungen auf den Dummykopf werden durch die Verdrehung von Kopf und Nacken am Pendelflansch ermöglicht.

Ein erster wesentlicher Aufgabenpunkt ist die Auswertung der Pendelversuche mit dem Verfahren der simulationsbasierten Versuchsauswertung, kurz SimbaV. Dieses Verfahren ermöglicht unter anderem die Berechnung von präzisen Kopf-Trajektorien (Bahnkurven) durch Datenfusion von elektrischen Messdaten und Daten der 3D-Filmmesstechnik. In weiterer Folge können mit diesem Verfahren die theoretisch wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle aufgrund der Trägheitsbelastung aus den Bewegungsgleichungen ermittelt werden. Die notwendigen Voraussetzungen sind dafür die Kenntnisse der Kopfmasse, des Trägheitstensors sowie der präzisen Beschleunigungs- und Drehratensignale im Kopfschwerpunkt. Die berechneten Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle werden mit den gemessenen verglichen. Die auftretenden Abweichungen geben dann ein Indiz über die Eignung der Messgrößen der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell als Eingangsgrößen für die Bewegungsanalyse von Dummykomponenten. [10, 2010]

Die zentrale Aufgabenstellung der Masterarbeit besteht somit darin, die theoretisch berechneten und gemessenen Kraft- und Momentenverläufe zu analysieren. Anhand der Auswertungen von mehreren Versuchen sollen auch Aussagen über die Tendenzen der Unterschiede und somit der Eignung zur Bewegungsanalyse bei unterschiedlichen Belastungsniveaus getroffen werden.

Eine weitere wesentliche Aufgabenstellung ist die Analyse der Differenzverläufe hinsichtlich systematischer Abweichungen. Dazu soll anhand einfacher Modelle versucht werden, die Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Größen systematisch zu reduzieren und das Reduktionspotential aufzuzeigen. Schlussendlich sollen die gemessenen Belastungsgrößen an der oberen Nackenmessstelle bei den durchgeführten Pendelversuchen und in weiterer Folge bei Crashversuchen durch die Berücksichtigung von Zusatzparametern für eine Bewegungsanalyse nutzbar gemacht werden.

Vereinfacht ausgedrückt soll die Masterarbeit das Ziel haben, die Eignung der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell für den Einsatz zur Bewegungsanalyse von Dummykomponenten bei einer crash-ähnlichen Kraft- und Momenten-Belastung anhand der durchgeführten Pendelversuche zu ermitteln.

Die Ergebnisse und Aussagen sollen die folgenden Punkte beinhalten:

- Differenzen in den einzelnen Sensorachsen bei dynamischer Belastung
- Tendenzen der Abweichungen bei ansteigender Belastung (Pendel-Initialwinkel)
- Analyse der Abweichungen bei unterschiedlicher Belastungsrichtung (Kopfverdrehung)
- Vergleich der einzelnen Sensorachsen
- Aufzeigen von systematischen Abweichungen
- Reduktionspotential der Differenzverläufe anhand einer einfachen Modellierung
- Analyse von Restsystematiken der Differenzverläufe

2 Methodik und Vorgangsweise bei der Analyse der Nackenmesswerte

Die prinzipielle Vorgangsweise zur Analyse der Nackenmesswerte der Upper-Neck-Load-Cell IF-205 ist in Abbildung 2 grafisch dargestellt und wird nachfolgend kurz beschrieben.

Benötigte Eingangsgrößen

Die Input-Daten sind die gemessenen Versuchsdaten der Pendelversuche und können prinzipiell in elektrische Messdaten und Daten der 3D-Filmauswertung gegliedert werden. Zu den elektrischen Messdaten zählen die Beschleunigungs- und Drehratenverläufe in allen drei Koordinatenrichtungen an der Kopfmessstelle sowie die gemessenen Kraft- und Momentenverläufe in allen drei Koordinatenachsen an der oberen definierten Nackenmessstelle. Zusätzlich zu den elektrischen Messdaten wird für die Analyse der Pendelversuche die Trajektorie (Bahnkurve) des Kopfschwerpunktes benötigt. Dazu erfolgt eine Aufzeichnung der durchgeführten Nackenpendelversuche mit einem Zwei-Kamerasystem. Die anschließende 3D-Filmauswertung ermöglicht die Verfolgung der am Dummykopf aufgeklebten Zielmarken und die Bestimmung der Trajektorie (Bahnkurve) des Kopfschwerpunkts. Zur eindeutigen Definition des Dummykopfs in einem globalen Koordinatensystem werden drei Positionskordinaten und drei Winkelangaben benötigt.

Die zeitliche Verschiebung zwischen den elektrischen Messdaten und den Videodaten ist ein weiterer Eingangsparameter für die Berechnung präziser Kopf-Trajektorien. Diese zeitliche Verschiebung resultiert aus den unabhängigen Datenaufzeichnungen der elektrischen Messtechnik und der Videotechnik. Mit der Kenntnis dieser zeitlichen Verschiebung kann die Genauigkeit der berechneten Bahnkurven weiter gesteigert werden. [10, 2010] Die Aufzeichnung der elektrischen Messdaten erfolgt grundsätzlich mit einer wesentlich höheren Frequenz als die Aufzeichnung der Videodaten.

Vorbereitung der Versuchsdaten

Dieser Arbeitsschritt betrifft in erster Linie die Messkanäle der elektrischen Messtechnik und beinhaltet die Punkte Offset-Abgleich und Entfernen von nicht relevanten Signalbereichen zu Beginn der Signalaufzeichnung. Ein automatischer Offset-Abgleich der elektrischen Messtechnik zu Versuchsbeginn wurde bei der Aufzeichnung der für diese Arbeit speziell durchgeführten Pendelversuchsreihen nicht durchgeführt.

Präzise Bestimmung der Dummykopf-Bahnen mit SimbaV

Die präzise Bestimmung der Dummykopf-Bahnen erfolgt mit dem Verfahren der simulationsbasierten Versuchsauswertung (SimbaV). Durch die Integration der gemessenen Beschleunigungs- und Drehratenverläufe ist es prinzipiell möglich, die Trajektorie des Dummykopfs zu berechnen. Die Genauigkeit der Bahnkurve, die ausschließlich aus den elektrischen Messdaten berechnet wird, ist jedoch für diese Anwendung nicht ausreichend. Erst die Anwendung des Verfahrens der simulationsbasierten Versuchsauswertung ermöglicht eine präzise Berechnung der Trajektorien durch Datenfusion. [10, 2010]

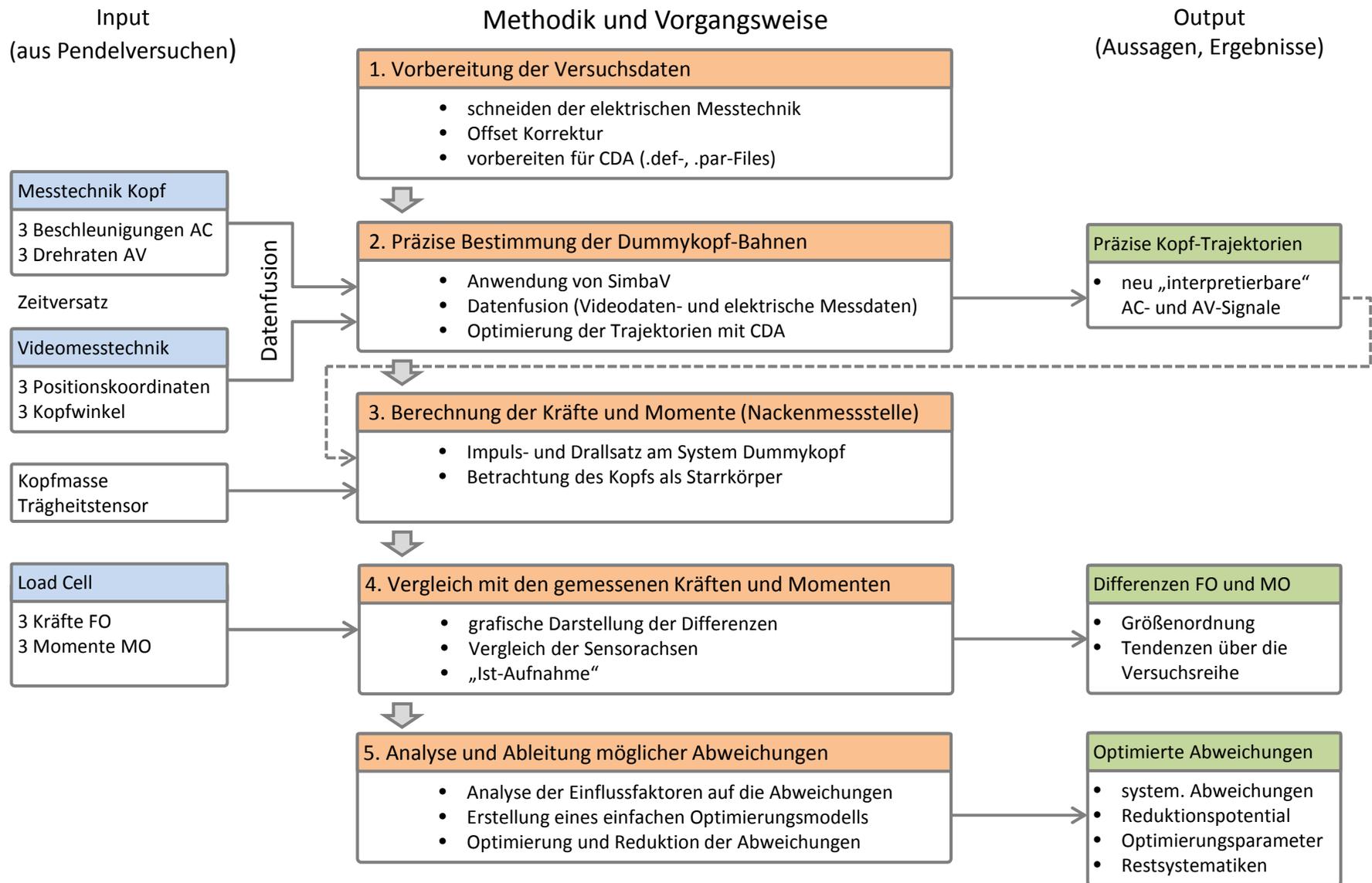


Abbildung 2: Methodik und Vorgangsweise bei der Analyse der Nackenmesswerte

Datenfusion bedeutet, dass elektrische und optische Messdaten fusioniert werden, wobei die Kopfbahn der Filmauswertung oder Teile davon als Referenz angesehen werden. Die Ergebnisse der Trajektorien-Optimierung sind neu interpretierbare Beschleunigungs- und Drehratensignale im Kopfschwerpunkt, mit denen Positionsabweichungen von $\leq 5\text{mm}$ zu der Videobahn erreicht werden. Im Folgeschritt werden diese optimierten Signalverläufe herangezogen, um die wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle zu berechnen. An dieser Stelle wird auch erwähnt, dass die so berechneten Kraft- und Momentenverläufe fehlerbehaftet sein können, da in dem Bestimmungsprozess nicht alle in Wirklichkeit auftretenden Abweichungen und Einflüsse berücksichtigt werden. [10, 2010]

Berechnung der wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle

Mithilfe der Bewegungsgleichungen (Impuls- und Drallsatz) für das mechanische System „Dummykopf“ können die wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle berechnet werden. Eine notwendige Voraussetzung für die Berechnung ist dabei, dass keine äußeren Kräfte und Momente auf den Kopf wirken. Diese Voraussetzung ist bei den durchgeführten Pendelversuchen für jeden Zeitpunkt gegeben. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden als Sollverläufe für die Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle definiert und für die Bewertung der Eignung der Upper-Neck-Load-Cell zur Bewegungsanalyse herangezogen. Die Berechnung der wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle ist nur unter den genannten Voraussetzungen möglich und es müssen die Parameter für die Kopfmasse und den Trägheitstensor bekannt sein. Wie bereits erwähnt werden im mathematischen Berechnungsmodell zurzeit einige, sicher aber nicht alle Abweichungsursachen und Einflüsse berücksichtigt.

Vergleich der berechneten Kräfte und Momente mit den gemessenen Größen

Die berechneten Kräfte und Momente werden mit den gemessenen Kraft- und Momentenverläufen verglichen und die Differenzen in den einzelnen Sensorachsen ausgewertet und grafisch dargestellt. Basierend auf den Ergebnissen dieser Auswertung soll die grundsätzliche Eignung der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 als Inputgröße für Bewegungsanalysen untersucht werden. Die Analyse von mehreren Versuchen soll schließlich Aussagen über die Tendenz der Unterschiede bei ansteigenden und richtungsabhängigen Belastungen ermöglichen.

Analyse und Ableitung möglicher Abweichungen

Eine wesentliche Aufgabenstellung der Masterarbeit besteht in der Analyse der Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Nackengrößen hinsichtlich systematischer Abweichungen. Anhand eines einfachen Modells soll versucht werden, die Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Größen an der oberen Nackenmessstelle zu reduzieren. Beispiele für systematische Abweichungen sind Offset-Abweichungen, Skalierungs-Abweichungen, Querrichtungs-Empfindlichkeiten etc. Von speziellem Interesse ist schlussendlich das Reduktionspotential durch die Modellierung sowie die Fragestellung, ob die Optimierung von mehreren Versuchen systematische Parameterwerte für die Abweichungen ergibt.

3 Grundlagen

3.1 Beschreibung der Pendelversuche

Um das Messverhalten der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 unter dynamischer Belastung zu untersuchen, wurden mehrere Nackenpendelversuche durchgeführt. Bei diesen Versuchen werden vom Dummy nur die Komponenten Kopf und Nacken am Pendelflansch montiert. Das Belastungsniveau beim Aufprall kann mit dem Pendel-Initialwinkel variiert werden.

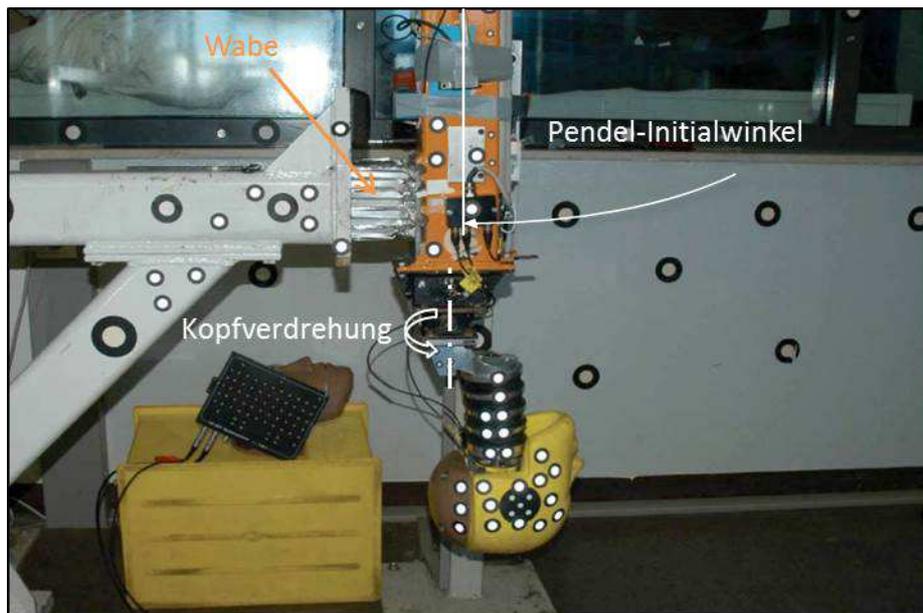


Abbildung 3: Versuchsaufbau bei den Pendelversuchen (Kopfverdrehung 180°) [11]

Bei der Versuchsdurchführung beschleunigt das Pendel aus der Pendel-Initiallage und trifft circa bei der Pendel-Nulllage auf die Wabenstruktur auf. Der Aufprall an die Wabe geschieht dabei nur am Pendelstangenrücken. Somit wirken am Dummykopf bei der Verzögerung nur die eigenen Trägheitskräfte und -momente, die Eigengewichtskraft sowie die Schnittreaktionen an der oberen Nackenmessstelle. Vom Kopf zum Nacken gibt es nur einen einzigen Lastpfad und dieser führt vollständig über die obere Nackenmessdose. Die Tatsache, dass auf den Dummykopf während der Versuchsdurchführung keine weiteren äußeren Kräfte und Momente wirken, ist eine notwendige Voraussetzung zur theoretischen Berechnung der wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle. Die Berechnung dieser Kräfte und Momente kann aus den gemessenen und optimierten Beschleunigungs- und Drehratenverläufen im Kopfschwerpunkt erfolgen.

3.2 Übersicht der durchgeführten Pendelversuche

Bei der Durchführung der Pendelversuche wurden prinzipiell zwei Versuchsparameter zur Variation der Belastungen an der oberen Nackenmessstelle gewählt. Diese sind der Auslenkwinkel (Pendel-Initialwinkel) der Pendelstange und die Verdrehung des Dummykopfs am Pendelflansch (siehe Abbildung 3).

Mit dem Pendel-Initialwinkel wird dabei die eingebrachte Energie und somit das Belastungsniveau an der oberen Nackenmessstelle beim Aufprall definiert. Die Abstufung des Pendel-Initialwinkels erfolgte bei den durchgeführten Versuchen von 35-90°.

Die gezielte Belastung der einzelnen Messachsen kann durch die Verdrehung des Dummykopfs am Pendelflansch realisiert werden. Dadurch ist es möglich, auch seitliche Belastungen auf den Dummykopf beziehungsweise Belastungen unter +/- 45° auf die Load-Cell einzuleiten. Diese Verdrehung wurde mittels einer Adapterplatte am Pendelflansch ermöglicht.

In Tabelle 1 sind die durchgeführten Versuche ohne Kopfverdrehung angeführt. Durch diese Versuchskonstellation ergaben sich relevante Kräfte nur in X- und Z-Richtung sowie ein Moment um die Y-Achse. Anhand der unterschiedlichen Kopforientierungen (vorwärts und rückwärts) soll die Eignungsuntersuchung für die beiden Belastungsrichtungen analysiert werden.

Tabelle 1: Versuchsreihe 1 (Kopfverdrehung 0° bzw. 180°)

Kopfverdrehung 0° (vorwärts)			Kopfverdrehung 180° (rückwärts)		
Versuch	Pendel-Initialwinkel	Wabe	Versuch	Pendel-Initialwinkel	Wabe
	[°]			[°]	
v01	34.7		v15	35.1	
v02	34.8	neu	v16	35.1	
v03	---		v17	40.1	
v04	39.8		v18	40.1	neu
v05	49.9		v19	50.0	
v06	50.0		v20	50.0	
v07	---	neu	v21	60.0	neu
v08	60.1		v22	60.0	
v09	70.0		v23	70.0	neu
v10	70.0		v24	70.0	
v11	79.9	neu	v25	80.0	neu
v12	80.0	neu	v26	80.0	neu
v13	90.0	neu	v27	90.0	neu
v14	89.9	neu	v28	90.0	neu

--- keine Versuchsdaten

Mit den Erkenntnissen aus den ersten Auswertungen wurde bei einer zweiten Versuchsreihe eine „allgemeinere“ Belastung auf die Upper-Neck-Load-Cell aufgebracht. Durch Verdrehung des Dummykopfs um +/- 45° am Pendelflansch konnte auch eine seitliche Krafteinleitung erfolgen. Somit ergaben sich relevante Kräfte in X-, Y- und Z-Richtung sowie Momente um die X- und Y-Achse. Die nur sehr geringen Momente um die Z-Achse sind aufgrund des geringen Hebelarms zu erklären.

Durch die veränderte Belastungssituation am Dummykopf soll vor allem das Eignungsverhalten der Load-Cell als Inputgröße für Bewegungsanalysen unter seitlicher Belastung analysiert werden. Zudem können durch weitere Versuchsdaten die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe bestätigt werden.

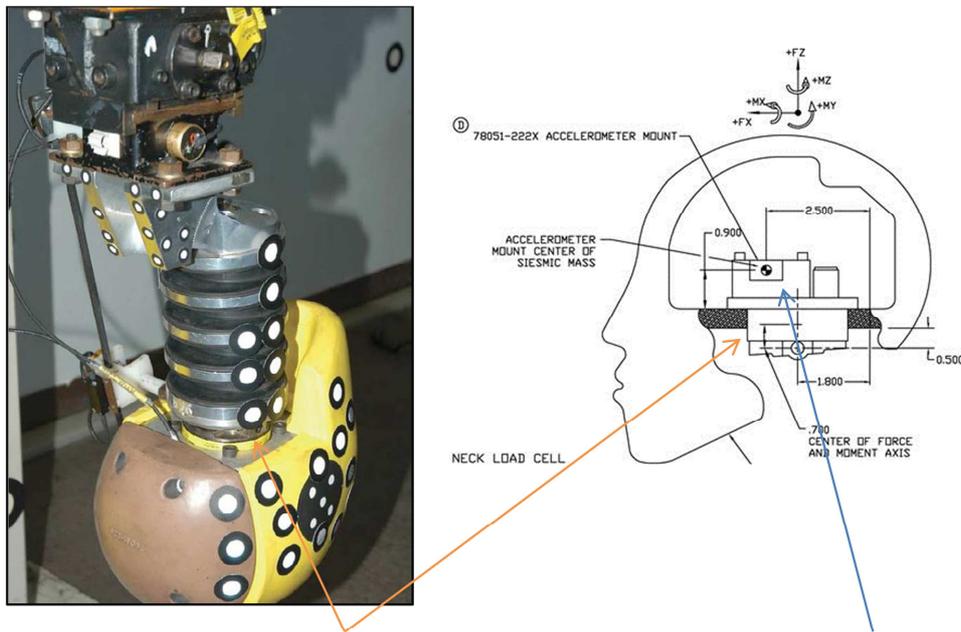
Tabelle 2: Versuchsreihe 2 (Kopfverdrehung +/- 45°)

Kopfverdrehung +45°			Kopfverdrehung -45°		
Versuch	Pendel-Initialwinkel	Wabe	Versuch	Pendel-Initialwinkel	Wabe
	[°]			[°]	
v01	35.1	neu	v15	35.0	
v02	35.1		v16	35.0	
v03	40.0		v17	40.0	
v04	40.0		v18	40.0	
v05	50.1	neu	v19	50.2	neu
v06	50.1		v20	50.0	
v07	60.1	neu	v21	60.0	neu
v08	60.1		v22	60.1	neu
v09	70.0	neu	v23	70.0	neu
v10	70.1	neu	v24	70.0	neu
v11	80.0	neu	v25	80.0	neu
v12	80.0	neu	v26	80.0	neu
v13	90.0	neu	v27	90.0	neu
v14	90.0	neu	v28	90.0	neu

Es wird noch angemerkt, dass bei den beiden durchgeführten Versuchsreihen zwei baugleiche Sensoren vom Typ IF-205 für die Messung der Belastungsgrößen an der oberen Nackenmessstelle verwendet wurden.

3.3 Verwendete Sensorik

Prinzipiell ist bei der Aufzeichnung der Versuchsdaten zwischen der elektrischen Messtechnik und der Videomesstechnik zu unterscheiden. Die verwendete elektrische Messtechnik ist in Abbildung 4 ersichtlich.



6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205

- 3 x Kräfte
- 3 x Momente

Gyro-Beschleunigungs-Sensor DTI-3106

- 3 x Beschleunigungen
- 3 x Drehraten

Abbildung 4: verwendete elektrische Messtechnik (Abbildung links [11], Abbildung rechts [9])

Zu der elektrischen Messtechnik zählen der Sensor-Sixpack DTI-3106 im Dummykopf sowie die Upper-Neck-Load-Cell IF-205 an der oberen Nackenmessstelle. Mit dem Sensor-Sixpack im Kopf werden die Beschleunigungen und Drehraten in allen drei Koordinatenachsen gemessen. Die Upper-Neck-Load-Cell erfasst sechs weitere Messgrößen, Kräfte und Momente in allen drei Koordinatenachsen. In Tabelle 3 sind die genauen Bezeichnungen der verwendeten Sensoren sowie die jeweiligen Messbereiche zusammengefasst. Das Hersteller-Datenblatt der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 ist im Anhang beigefügt.

Tabelle 3: verwendete elektrische Messtechnik bei den Pendelversuchen

Sensor	Bezeichnung	Messbereich (+/-)
6-Achsen Gyro-Beschleunigungs-Sensor	DTI-3106	<ul style="list-style-type: none"> • AC: 500 g • AV: 2400 °/s
6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205	1716	<ul style="list-style-type: none"> • F_x: 8900 N • F_y: 8900 N • F_z: 13340 N • M_x: 282.5 Nm • M_y: 282.5 Nm • M_z: 282.5 Nm

Die eingesetzte Videomesstechnik ermöglicht mit der anschließenden 3D-Filmauswertung die Berechnung der Bahnkurve des Kopfschwerpunktes. Dazu wurden die Pendelversuche mithilfe eines Zwei-Kamerasystems aufgezeichnet und anschließend die aufgeklebten Zielmarken am Dummykopf verfolgt sowie deren 3D-Koordinaten über photogrammetrische Auswerteverfahren ermittelt. Das Ergebnis der 3D-Filmauswertung ist die Trajektorie (Bahnkurve) des Kopfschwerpunktes, bestehend aus drei Positionskoordinaten und drei Kopfwinkel zur eindeutigen Definition der Lage in einem globalen Koordinatensystem.

3.4 Aufbau und Messprinzip der Upper-Neck-Load-Cell IF-205

Die Instrumentierung eines Hybrid III 50% Dummy sieht an der oberen Nackenmessstelle die Messung von drei Kräften und drei Momenten in jeweils allen drei Koordinatenrichtungen vor. Alle Sensoren zur Messung dieser sechs Größen sind in einem gemeinsamen Sensorgehäuse untergebracht. Die Einbaulage im Dummy ist in Abbildung 4 ersichtlich.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Messung der insgesamt sechs Größen ist der geringe Bauraum, der für den Sensor im Dummy zur Verfügung steht. Deshalb muss die Load-Cell eine sehr kompakte Bauform aufweisen. Zur genauen Messung bei einer derart kompakten Bauform wird gefordert, dass eine definierte Einleitung der Kräfte und Momente erfolgt. Eine Zwischenschaltung von längeren mechanischen Homogenisierungsstücken wäre im Allgemeinen anzustreben, ist aber im Fall der Kraft- und Momentenmessung an der oberen Nackenmessstelle aufgrund des Bauraums nicht realisierbar. [7, 2012, p. 83]

Aufbau

Der äußere, konstruktive Aufbau der Upper-Neck-Load-Cell ist im Datenblatt des Herstellers ersichtlich (siehe Anhang). Prinzipiell besteht die Upper-Neck-Load-Cell aus zwei Sensorplatten. An der oberen Sensorplatte erfolgt die Verschraubung mit dem Kopfgehäuse. Der 6-Achsen Gyro-Beschleunigungs-Sensor ist ebenfalls mit der oberen Sensorplatte der Load-Cell verschraubt. Die Positionierung der beiden Sensoren zueinander erfolgt mittels Zylinderstifte. Somit wird eine exakte Ausrichtung der Messachsen zwischen den beiden Sensoren (Load-Cell und Gyro-Beschleunigungs-Sensor) gewährleistet. Die untere Sensorplatte ist über eine Gelenkverbindung mit dem Nacken des Dummies verbunden. Zwischen den beiden Sensorplatten sind Verbindungselemente mit der gesamten Sensorik zur Messung der sechs Größen untergebracht.

In den Datenblättern sind keinerlei Informationen über den inneren Aufbau der Load-Cell angeführt und eine Literaturrecherche ergab nur wenige zusätzliche Details. Der innere Aufbau und die Verbindungselemente der Load-Cell IF-205 können, wie in Abbildung 5 ersichtlich, vermutet werden.

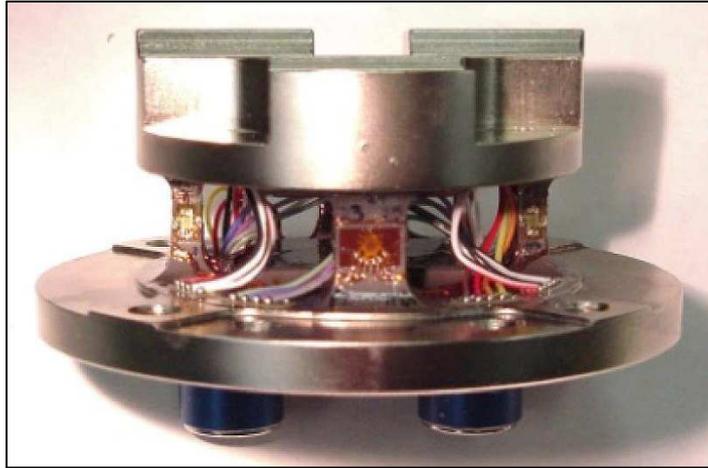


Abbildung 5: Aufbau der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 [8]

Die Abbildung der geöffneten Load-Cell zeigt, dass insgesamt vier Stäbe mit rechteckigem Querschnitt die beiden Sensorplatten verbinden. Auf den Außenflächen der Verbindungsstäbe sind Dehnungsmesselemente angebracht, mit denen die Dehnungszustände an den jeweiligen Stellen der Stäbe gemessen werden. Es liegen jedoch keine detaillierten Informationen vor, welche Dehnungen an den Stäben gemessen werden beziehungsweise wie viele Dehnungsmesselemente überhaupt verbaut sind. Aus den gemessenen Dehnungs- bzw. Spannungszuständen an den Verbindungsstäben erfolgt schließlich die Bestimmung der eingeleiteten Kräfte und Momente auf die Load-Cell.

Das Messprinzip zur Erfassung der Dehnungen an den Verbindungsstäben erfolgt nach dem piezoresistiven Prinzip und wird im nachfolgenden Kapitel kurz erläutert.

3.5 Piezoresistive Kraftmessung mittels Dehnungsmessstreifen (DMS)

Eine häufig eingesetzte und zuverlässige Methode zur Kraftmessung ist der Einsatz von Dehnungsmessstreifen, kurz DMS. Dabei erfolgt die Kraftmessung indirekt über die Messung der Dehnung am Prüfkörper. Bei einem Belastungsniveau im linear elastischen Bereich gilt das Hookesche Gesetz und es herrscht der lineare Zusammenhang zwischen der Spannung σ und der Dehnung ε . Für den eindimensionalen Fall gilt der Zusammenhang nach Gleichung (1). [7, 2012, p. 86]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

ε ... Dehnung

Δl ... Längenänderung

l ... Ausgangslänge

σ ... Spannung

E ... E-Modul

Dehnungsmessstreifen können in unterschiedlicher Form auf den Prüfkörper aufgetragen werden (eingepresst, aufgeschweißt, geklebt, ...) und sollen dessen Oberflächendehnung unverfälscht folgen. Die Längenänderung des Dehnungsmessstreifens ergibt eine Änderung des elektrischen Widerstandes, der in einer entsprechenden Messschaltung ausgewertet wird. Der Zusammenhang zwischen der Widerstandsänderung und der Dehnung ist in Gleichung (2) ersichtlich. [7, 2012, p. 86]

$$\frac{\Delta R}{R} = K * \varepsilon \quad (2)$$

$\frac{\Delta R}{R}$... Widerstandsänderung

K ... K-Faktor (Gage-Faktor)

Die Widerstandsänderung verhält sich also proportional zur Dehnung. Mit dem K-Faktor wird die Empfindlichkeit des Dehnungsmesselements angegeben. Es ist aber anzumerken, dass der K-Faktor selbst eine Abhängigkeit von der Dehnung ε , der Querkontraktionszahl μ und der relativen Änderung des spezifischen Widerstandes $\Delta\rho/\rho$ aufweist. Die Größenordnung des K-Faktors bei Metallen liegt in etwa bei 2. Wesentlich höhere Werte von bis zu 180 werden bei Halbleiter-DMS erreicht. Somit weisen Halbleiter-DMS eine wesentlich höhere Empfindlichkeit als Metall-DMS auf. Dieser Vorteil wird aber durch ein nichtlineares Widerstands-Dehnungs-Verhalten sowie eine höhere Temperaturabhängigkeit kompensiert. [2, 2006, p. 58f]

Dehnungsmesselemente aus Metall können prinzipiell als Draht-DMS oder Folien-DMS ausgeführt werden. In technischen Applikationen hat sich heute jedoch die Bauweise als Folien-DMS, nicht zuletzt auch aufgrund der relativ geringen Herstellungskosten und der Massentauglichkeit, durchgesetzt. Die prinzipielle Bauweise eines Folien-DMS ist in Abbildung 6 dargestellt. [2, 2006, p. 60]

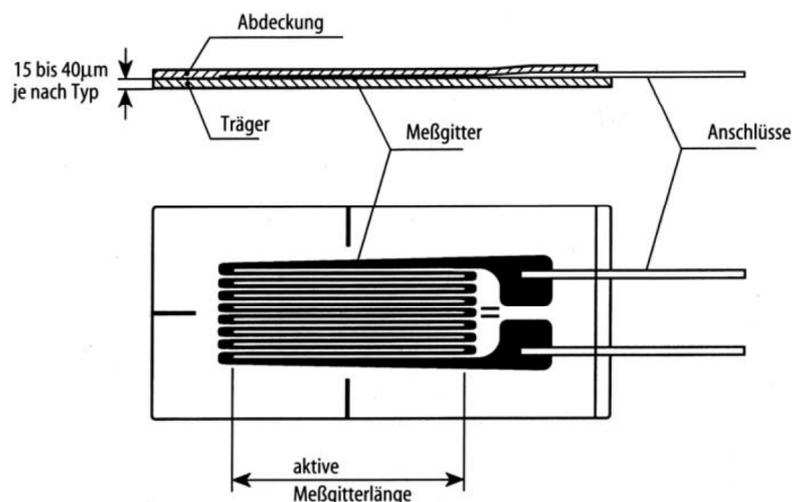


Abbildung 6: prinzipieller Aufbau eines Folien-DMS [2, 2006, p. 60]

Die Basisschicht des Dehnungsmesselements bildet eine Trägerfolie aus Kunststoff. Darauf wird eine sehr dünne Folie aus Konstantan oder einer Ni-Cr Legierung gewalzt und das entsprechende Messgitter herausgeätzt. Die nur circa 2 bis 5µm dicke Metallschicht wird mit einer weiteren Kunststoffschicht versiegelt. Das dargestellte Messgitter in Abbildung 6 ermöglicht die Messung von Dehnungen in einer Richtung (Linear-DMS), häufig werden aber auch mehrere Messgitter in Form einer Rosette ausgeführt. Die Auswertung der sehr kleinen Widerstandsänderungen ($\mu\Omega$ bis $m\Omega$) und Umwandlung in einen Spannungswert erfolgt häufig in einer Wheatstone'schen Brückenschaltung. Die Schaltung kann dabei als Viertel-, Halb- oder Vollbrücke ausgeführt werden. In Abbildung 7 ist die Schaltung einer Vollbrücke dargestellt. Im Fall einer Vollbrücke können die Dehnungsmesselemente so angeordnet werden, dass die beiden DMS R1 und R3 gedehnt und die beiden DMS R2 und R4 gestaucht werden. [2, 2006, p. 60ff]

Ein gleichsinnig einwirkender Temperatureinfluss auf alle Dehnungsmesselemente bewirkt bei der Verschaltung in einer Halb- oder Vollbrücke kein Ausgangssignal. [7, 2012, p. 86]

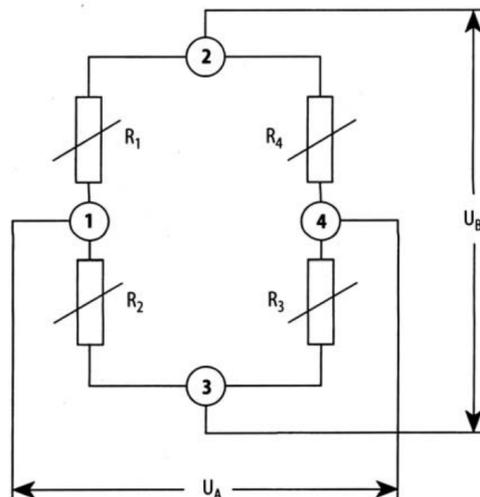


Abbildung 7: Wheatstone'sche Brückenschaltung (Vollbrücke) [2, 2006, p. 63]

Im Vergleich zu anderen Kraftaufnehmern werden abschließend noch einige Vorteile der piezoresistiven Kraftmessung mittels DMS angeführt:

- große Typenvielfalt und Einsatzmöglichkeiten sowie geringe Herstellkosten
- geringe Eigenmasse
- auch für dynamische Lasten geeignet (bis circa 1kHz)
- gutes Linearitätsverhalten und hohe Auflösung möglich
- hohe zeitliche Stabilität [2, 2006, p. 59f]

Als Nachteile der piezoresistiven Kraftmessung mittels DMS sind zu nennen:

- sehr geringe Ausgangssignale (mV) und der Bedarf einer hohen Verstärkung
- aufgrund der punktuellen Messung wird eine präzise und reproduzierbare Belastungseinleitung benötigt [7, 2012, p. 87]

3.6 Prinzip der simulationsbasierten Versuchsauswertung (SimbaV)

Die Bestimmung präziser Trajektorien von Körperteilen beim Crashtest ist generell von hohem Interesse, unter anderem wenn Körperteile vom sichtbaren Bereich der Videoauswertung verschwinden. Dies ist beispielsweise beim Eintauchen des Dummykopfs in den Airbag-Sack der Fall. Vor allem in diesen Zeitabschnitten ist beispielsweise der Restabstand des Dummykopfs zum Lenkrad von entscheidender Bedeutung und für den Entwicklungsprozess der Sicherheitssysteme wichtig. Eine Möglichkeit die Dummykopf-Bahn auch für diese Zeitabschnitte zu bestimmen ist die Berechnung der Bahnkurven ausschließlich durch die Integration der gemessenen Beschleunigungs- und Drehratenverläufe. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist jedoch für diese Anwendung nicht ausreichend. Nicht exakt bekannte Initialbedingungen (Initiallage der Körperteile, Startgeschwindigkeiten, ...) sowie unvermeidbare Sensorfehler bei der Messung der Beschleunigungen und Drehraten führen zu Abweichungen bei der Berechnung der Bahnen. [10, 2010]

Um dennoch die Berechnung von präzisen Bahnkurven aus den gemessenen elektrischen Messdaten zu ermöglichen, wird bei der simulationsbasierten Versuchsauswertung (SimbaV) das Prinzip der Datenfusion angewendet. Datenfusion bedeutet dabei die Vereinigung von elektrischen Messdaten mit den Daten der Videomesstechnik in einem Optimierungsprozess. Beim eigentlichen Verfahren der simulationsbasierten Versuchsauswertung (SimbaV) werden Initialbedingungen (Initialwinkel, Startgeschwindigkeiten, ...) und systematische Sensorfehler der elektrischen Messtechnik (Offset-Fehler, Skalierungs-Fehler, ...) modelliert und als Parameter variabel gehalten. In einem Optimierungsprozess werden schließlich jene optimalen Parameterwerte gefunden, welche die geringsten Abweichungen zwischen der integrierten Trajektorie und der Videobahn ergeben. Die Genauigkeit der Bahnkurven von Körperteilen aus der 3D-Filmauswertung bei einem Crashtest liegt beim derzeitigen Stand der Technik bei $\leq 5\text{mm}$. Das Resultat dieser Optimierung sind Parameterwerte für Initialbedingungen (Initialwinkel, Startgeschwindigkeiten) sowie für modellierte Sensorfehler (Offset-Fehler, Skalierungs-Fehler, ...). Außerdem können die bestimmten Parameter für die Plausibilisierung der Bahn verwendet werden. [10, 2010]

Bezogen auf diese Masterarbeit bildet das Verfahren der simulationsbasierten Versuchsauswertung die Grundlage für die Bewertung der Eignung der Messdaten an der oberen Nackenmessstelle als Inputgröße zur Bewegungsanalyse von Dummykomponenten.

3.6.1 Optimierungsprogramm CDA

Die Abkürzung CDA steht für **C**rash **D**ata **A**nalysis und bezeichnet das Softwareprogramm zur Anwendung des Verfahrens der simulationsbasierten Versuchsauswertung. CDA wurde am Institut für Fahrzeugsicherheit an der Technischen Universität Graz in Kooperation mit der VOLKSWAGEN AG und AUDI AG entwickelt. Für die Auswertung der Pendelversuche und die anschließende Analyse der Nackenmesswerte bildet dieses Optimierungstool die Basis. Die folgenden Punkte wurden dabei angewendet:

- Berechnung der Kopf-Trajektorien (Bahnkurven) aus den gemessenen Beschleunigungs- und Drehratensignalen
- Datenfusion mit den Ergebnissen der 3D-Filmauswertung
- Optimierung der berechneten Trajektorien
- Berechnung der theoretisch wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle mit den optimierten Beschleunigungs- und Drehratensignalen im Kopfschwerpunkt

3.7 Koordinatensysteme

Für die Berechnung von präzisen Trajektorien mithilfe der Datenfusion muss die Definition der drei folgenden Koordinatensysteme bekannt sein:

- Koordinatensystem der elektrischen Messtechnik für den Dummykopf (grün)
- Koordinatensystem der 3D-Filmauswertung (rot)
- Koordinatensystem der simulationsbasierten Versuchsauswertung, CDA (blau)

Die Definition dieser Koordinatensysteme für die Auswertung der Pendelversuche ist in Abbildung 8 ersichtlich. Beim Koordinatensystem der 3D-Filmauswertung (rot) handelt es sich um ein globales, raumfestes Koordinatensystem. Die Koordinatensysteme der elektrischen Messtechnik (grün) und der simulationsbasierten Versuchsauswertung (blau) sind mitbewegte, körperfeste Systeme und richten sich somit nach der Orientierung des Dummykopfs.

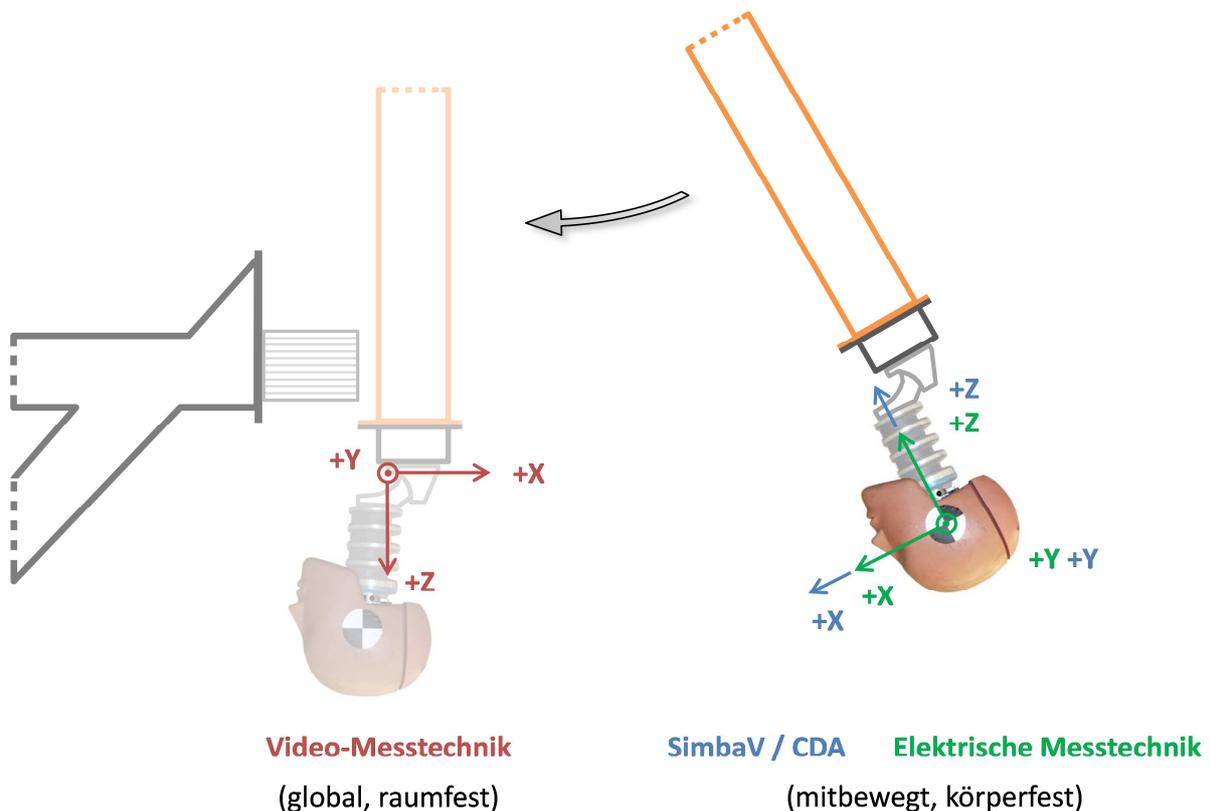


Abbildung 8: Definition der Koordinatensysteme (Kopforientierung vorwärts)

Das Koordinatensystem der elektrischen Messtechnik (grün) ist ein lokales, mitbewegtes und somit körperfestes Koordinatensystem für den Dummykopf. Die elektrische Instrumentierung eines Dummykopfs wird in der Norm SAE J211/1 festgelegt. Diese sieht die Achsausrichtung wie in Abbildung 8 dargestellt vor. Alle gemessenen elektrischen Größen (Beschleunigungen, Drehraten, Kräfte und Momente) beziehen sich auf dieses lokale Koordinatensystem.

Beim Koordinatensystem der 3D-Filmauswertung handelt es sich um ein globales, raumfestes Koordinatensystem, wobei der Ursprung bei der Auswertung der Videodaten festgelegt wird. Die Beschreibung der Kopf-Trajektorie erfolgt durch die Angabe von drei globalen Positionskoordinaten sowie durch drei Winkelwerte.

Zur Datenfusion der elektrischen Messdaten und der Videodaten wird das SimbaV-Koordinatensystem (blau) definiert. Die gewählte Achsorientierung ist in Abbildung 8 dargestellt, wobei die Z-Achse nach oben und somit entgegen der Erdbeschleunigung \vec{g} zeigt. Diese Achsorientierung mit der Z-Achse nach oben wurde deshalb gewählt, damit bei der Berechnung der Trajektorien mit dem Programm CDA und den Standardeinstellungen eine richtige g-Korrektur der gemessenen Beschleunigungen erfolgt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass das SimbaV-Koordinatensystem bei der Auswertung der Pendelversuche somit anders als bei der Auswertung von Fahrzeugversuchen definiert wurde.

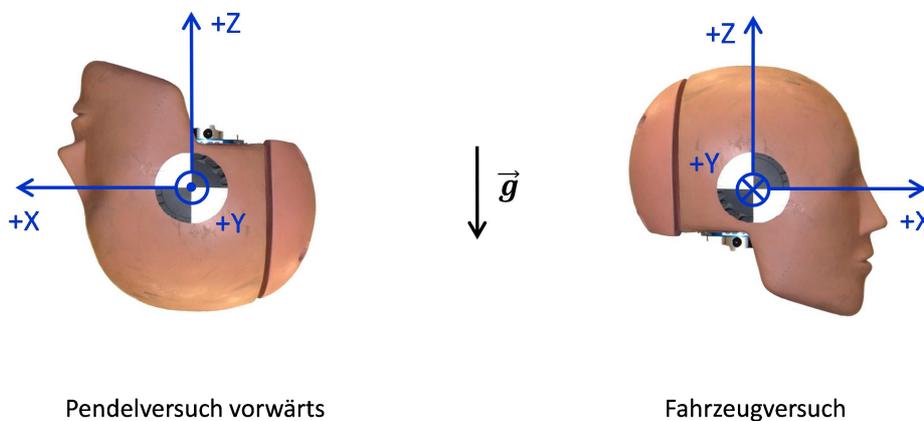


Abbildung 9: SimbaV-Koordinatensystem beim Pendelversuch und Fahrzeugversuch

Die Achsorientierung des SimbaV-Koordinatensystems (Abbildung 8) wurde für die Auswertung aller Versuchsreihen ident definiert. Somit ist ein Vergleich der Signalverläufe (Beschleunigungen, Drehraten, Kräfte und Momente) von verschiedenen Versuchen (beispielsweise Kopfrichtung vorwärts und rückwärts) sehr einfach möglich.

In Tabelle 4 wird abschließend noch ein Überblick gegeben, welche Größen bei den Auswertungen in den Diagrammen in raumfesten beziehungsweise in körperfesten Koordinaten angegeben werden.

Tabelle 4: Größen in globalen und lokalen Koordinaten

global (raumfest)	lokal (mitbewegt)
<ul style="list-style-type: none"> • Videobahn • berechnete und optimierte Kopf-Trajektorie • Positionsabweichungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigungen und Drehraten • Kräfte und Momente

Die dargestellten Kraft- und Momentenverläufe bei den durchgeführten Analysen sind somit immer auf die lokalen Koordinatenachsen des Dummykopfs bezogen.

4 Präzise Bestimmung der Dummykopf-Bahn

Die Bestimmung der präzisen Kopf-Trajektorien (Bahnkurven) aus den Beschleunigungs- und Drehratenverläufen ist der erste wesentliche Aufgabenpunkt und kann als Grundvoraussetzung für die anschließende Analyse der Eignung von Nackenmesswerten als Inputgrößen zur Bewegungsanalyse angesehen werden.

Bei der Anwendung der simulationsbasierten Versuchsauswertung zur Berechnung der präzisen Bahnkurven bei den Pendelversuchen ist, verglichen zu Fahrzeugversuchen, die spezielle Versuchskonstellation der Pendelversuche zu beachten. Die Besonderheiten sind vor allem der zeitliche Ablauf, die sehr gering wirkenden Beschleunigungen während der freien Pendelbewegung sowie die entgegengesetzte Kopforientierung (Kopforientierung nach unten).

Die Bestimmung der präzisen Kopf-Trajektorien muss bei den Pendelversuchen somit über einen wesentlich längeren Zeitraum erfolgen (ab Loslassen aus der Pendel-Initiallage). Zudem ist aufgrund der sehr geringen Beschleunigungen (wenige g) während der freien Pendelbewegung eine exakte Durchführung der g-Korrektur bei den gemessenen Beschleunigungen unbedingt erforderlich. Deshalb wird der Vorgang der g-Korrektur in diesem Kapitel als theoretischer Teil behandelt.

Als Ergebnisse der präzisen Trajektorien-Berechnung werden die Detailauswertungen von zwei Einzelversuchen (Kopf gerade 0° und Kopfverdrehung $+45^\circ$) sowie eine Zusammenfassung über die gesamte Versuchsreihe angeführt.

4.1 Besonderheiten bei der Auswertung der Pendelversuche

4.1.1 Zeitlicher Ablauf bei den Pendelversuchen

Der zeitliche Ablauf bei den Pendelversuchen ist am Beispiel eines Beschleunigungsverlaufes in Abbildung 10 dargestellt. Die Berechnung (Integration) der Bahnen aus der Pendel-Initiallage beginnt bereits „lange“ vor dem Aufprall. Während sich das wesentliche Aufprallgeschehen in einem Zeitbereich von 0.2 bis 0.3s abspielt, dauert die freie Pendelbewegung bei den durchgeführten Pendeltests circa 0.6 bis 0.8s.

Bei einem Pendel-Winkel von circa 0° erfolgt die Auslösung der Lichtschranke an der Pendelstange und die Triggerung der elektrischen Messtechnik ($t = 0s$). Zu diesem Zeitpunkt ist es jedoch noch nicht zum Kontakt der Pendelstange mit der Wabe gekommen. Je nach Wabengänge (Wabe neu oder gebraucht) ergeben sich somit etwas unterschiedliche Zeiten zwischen $t = 0s$ und dem Auftreffzeitpunkt.

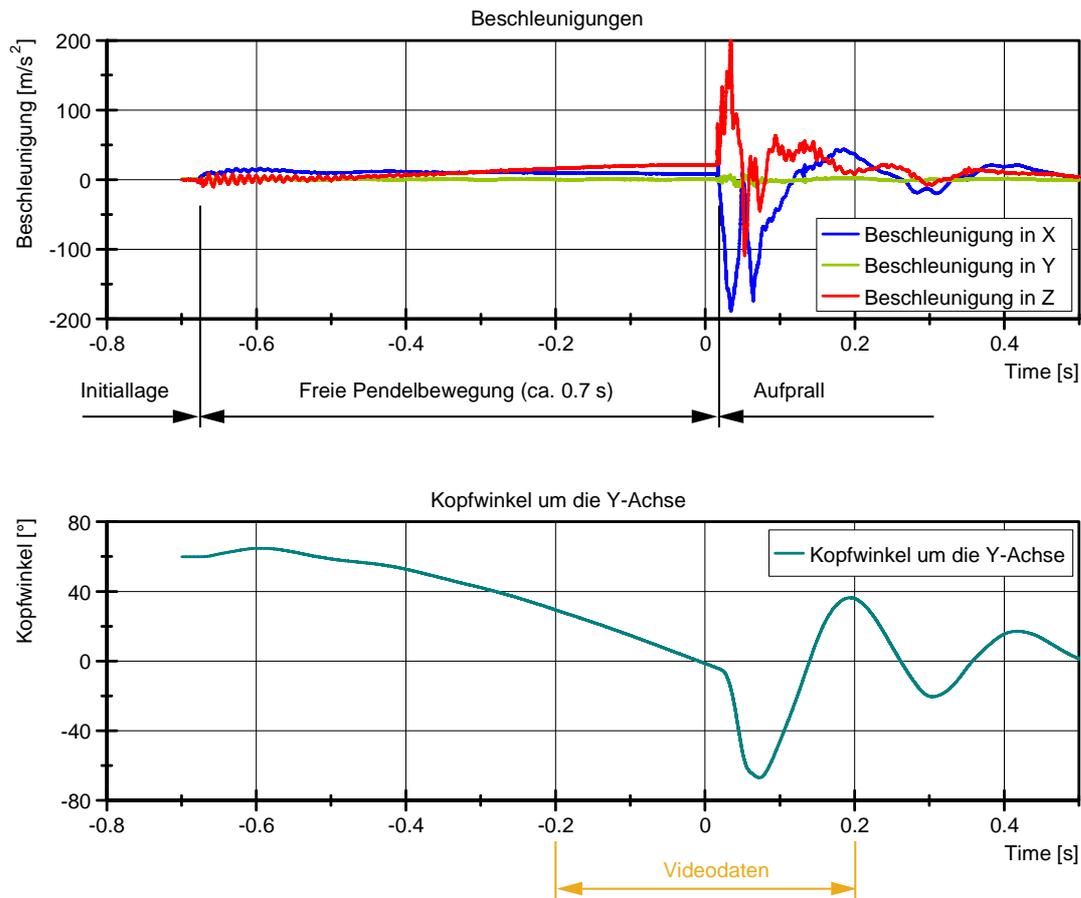


Abbildung 10: zeitlicher Ablauf eines Pendelversuchs (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)

Eine wesentlich kürzere Aufzeichnungsdauer der Daten erfolgte bei der Videomesstechnik. Aufgrund der Sichtverdeckung durch Sicherheitseinrichtungen (Scheiben, Rahmen, ...) konnte nicht die gesamte Pendelbewegung aufgezeichnet werden. Die Trajektorie der 3D-Filmauswertung steht im Zeitbereich von circa -0.2 bis 0.2s zur Verfügung. Für den Optimierungsprozess wurden die Videodaten erst ab dem Zeitpunkt $t = 0\text{s}$ herangezogen. Zu begründen ist dies durch die sehr geringen Beschleunigungswerte (wenige g) während der freien Pendelbewegung. Die Optimierung der Beschleunigungs- und Drehratenverläufe soll im relevanten Belastungsbereich ab $t = 0\text{s}$ erfolgen.

Die Berechnung der präzisen Kopf-Trajektorien erfolgt bei den Pendelversuchen bereits ab der Initiallage, wenn sich der Dummykopf noch in Ruhe befindet. Natürlich könnte eine Berechnung der Trajektorie auch erst ab dem Zeitpunkt $t = 0\text{s}$ erfolgen. Dann müssten jedoch die Initialparameter um eine Startgeschwindigkeit erweitert und die Parameterzahl der Optimierung erhöht werden. Zudem liegen keine Messungen der Geschwindigkeit bei $t = 0\text{s}$ vor.

4.1.2 Berücksichtigung der g-Korrektur

Während der freien Pendelbewegung wirken an der Kopf-Messstelle sehr geringe Beschleunigungswerte (wenige g). Um in diesem Abschnitt die Berechnung von präzisen Trajektorien zu gewährleisten, ist eine Berücksichtigung der g-Korrektur bei Beschleunigungssensoren unbedingt notwendig. Nachfolgend wird der Vorgang der g-Korrektur am Beispiel eines einachsigen Beschleunigungssensors und anschließend für den allgemeinen dreidimensionalen Fall kurz erläutert.

Kurz vor Versuchsbeginn erfolgt in der Initiallage des Beschleunigungssensors der Offset-Abgleich der elektrischen Messtechnik und der Beschleunigungsmesswert wird dadurch auf den Wert Null gesetzt. Dieser Schritt ist deshalb notwendig, da der Sensor auch ohne wirkende Beschleunigung eine Ausgangsspannung liefern kann, beispielsweise infolge eines Temperaturdrifts.

In Abbildung 11 wird zum einfachen Verständnis ein einachsiger Beschleunigungssensor mit der Initiallage in Richtung der positiven Z-Achse betrachtet. Der Sensor befindet sich in der Initiallage in Ruhe und der Einfluss der Gravitationskraft auf die seismische Masse ist zum besseren Verständnis übertrieben dargestellt.

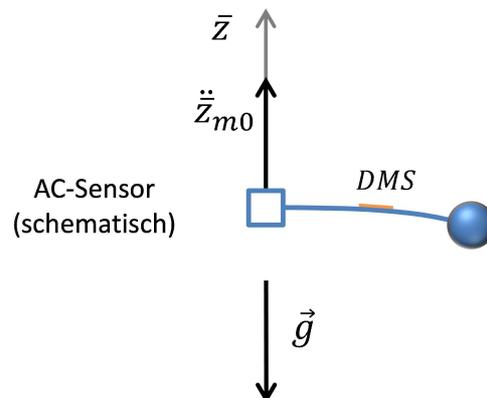


Abbildung 11: g-Korrektur am Beispiel eines einachsigen Beschleunigungssensors

Es scheint, als ob der Sensor eine „scheinbare“ Beschleunigung in Richtung der positiven Z-Achse erfährt. In Wirklichkeit liefert der Sensor nach dem Offset-Abgleich einen Messwert von Null, das heißt ein Ausgangssignal von Null entspricht einer Beschleunigung von einem g in Richtung der positiven Z-Achse. Die Differenz ist genau der Vektor der Erdbeschleunigung \vec{g} (Z-Komponente). Somit muss dieser Vektor zum gemessenen Beschleunigungswert addiert werden. Die nachfolgenden Gleichungen gelten für die lokale Z-Achse des Sensors. [3, p. 2ff]

$$\ddot{z}_w = \ddot{z}_m + \bar{g}_z \quad (3)$$

In der Initiallage (Ruhelage) wird der Messwert \ddot{z}_m auf Null gesetzt und auch der wirkliche Beschleunigungswert \ddot{z}_w muss in dieser Lage den Wert Null aufweisen. Daher ist noch der Anfangswert der Erdbeschleunigung in Gleichung (3) zu berücksichtigen. [3, p. 4]

$$\ddot{z}_w = \ddot{z}_m + \bar{g}_z + \ddot{z}_{m0} \quad (4)$$

\ddot{z}_w ... wirkende Beschleunigung

\ddot{z}_m ... angezeigte, gemessene Beschleunigung

\bar{g}_z ... Z-Komponente des Erdbeschleunigungsvektors

\ddot{z}_{m0} ... Anfangswert der Erdbeschleunigung beim Offsetabgleich

Mit dieser Gleichung kann die g-Korrektur des gemessenen Beschleunigungssignals erfolgen und die wirkende Beschleunigung berechnet werden. Die Richtigkeit wird mit drei einfachen Beispielen nachfolgend überprüft. In der dargestellten Initiallage befindet sich der Beschleunigungssensor in Ruhe und der Offset-Abgleich wird durchgeführt. Ausgehend von dieser Lage wird der Beschleunigungssensor fallen gelassen (zweites Beispiel) beziehungsweise um 90° gedreht (drittes Beispiel).

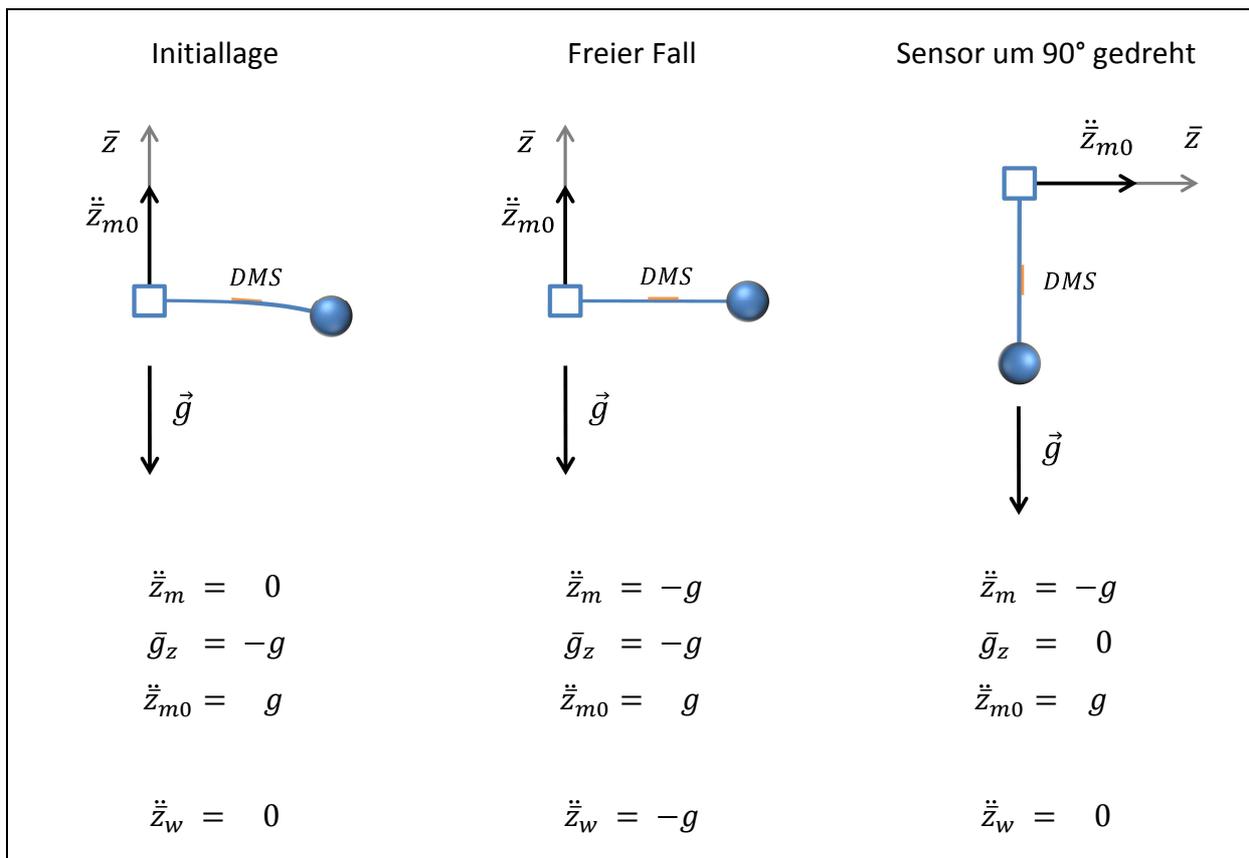


Abbildung 12: g-Korrektur (einfache Fallbeispiele)

Dieses Berechnungsschema kann schließlich für den allgemeinen dreidimensionalen Fall übernommen werden.

$$\ddot{\vec{x}}_w = \ddot{\vec{x}}_m + \vec{g} + \ddot{\vec{x}}_{m0} \quad (5)$$

$\ddot{\vec{x}}_w$... wirkender Beschleunigungsvektor

$\ddot{\vec{x}}_m$... angezeigter, gemessener Beschleunigungsvektor

\vec{g} ... Erdbeschleunigungsvektor

$\ddot{\vec{x}}_{m0}$... Ausgleichsvektor lokal mitbewegt (*g* - Kompensation)

Die wirkenden Beschleunigungen $\ddot{\vec{x}}_w$ sowie die gemessenen (angezeigten) Beschleunigungen $\ddot{\vec{x}}_m$ sind jeweils Vektoren in lokalen, körperfesten Koordinaten. Der Vektor der Erdbeschleunigung \vec{g} muss in das lokale, körperfeste Koordinatensystem umgerechnet werden. Dazu muss die Orientierung (Drehlage) des Beschleunigungssensors bezogen auf das globale, raumfeste Koordinatensystem bekannt sein. Den Ausgleichsvektor $\ddot{\vec{x}}_{m0}$ kann man sich als starr mitbewegten Vektor im lokalen, körperfesten Koordinatensystem vorstellen. Dieser Ausgleichsvektor bleibt ab dem Zeitpunkt des Offset-Abgleichs konstant. [3, p. 2ff]

4.2 Relevante Parameter für die Optimierung der Kopf-Trajektorien

In diesem Kapitel erfolgt eine kurze Erklärung und Beschreibung jener Parameter, die für die Optimierung der Kopf-Trajektorien bei den Pendelversuchen verwendet wurden. Im Optimierungsprogramm CDA sind bereits viele Parameter inkludiert. Grundsätzlich sollen jedoch nur jene Parameter für den Optimierungsprozess ausgewählt werden, die einen relevanten Einfluss bei der Reduktion der Abweichungen haben.

Abweichungen der berechneten Kopf-Trajektorie zu der Videobahn können durch systembedingte beziehungsweise sensorbedingte Ungenauigkeiten verursacht werden.

4.2.1 Systembedingte Ungenauigkeiten

Zu den systembedingten Ungenauigkeiten zählen beispielsweise nicht exakt bekannte Initialorientierungen der Sensoren (Beschleunigungs- und Drehratensensor) sowie auch unbekannte Initialgeschwindigkeiten (Startgeschwindigkeiten).

Initialorientierung von Beschleunigungs- und Drehratensensoren

Die Initialwinkel der Beschleunigungs- und Drehratensensoren bestimmen die anfängliche Lage der Sensorik und zeigen einen wesentlichen Einfluss auf die berechneten Bahnen bei

der Integration. Der Einfluss der Initialorientierung (Initialwinkel) auf die berechnete Trajektorie bei einem Pendeltest ist in Abbildung 13 dargestellt.

Die Einflussanalyse wurde anhand der Versuchsdaten eines Pendelversuchs ohne Kopfverdrehung mit einem Pendel-Initialwinkel von 60° durchgeführt. Eine Änderung der anfänglichen Lage des Beschleunigungs- und Drehratensensors um 3° (Y-Achse) führt zu Positionsabweichungen in Z-Richtung von circa 2cm bereits nach 170ms. Somit sind die Initialwinkel des Beschleunigungs- und Drehratensensors relevante Parameter bei der Berechnung präziser Kopf-Trajektorien.

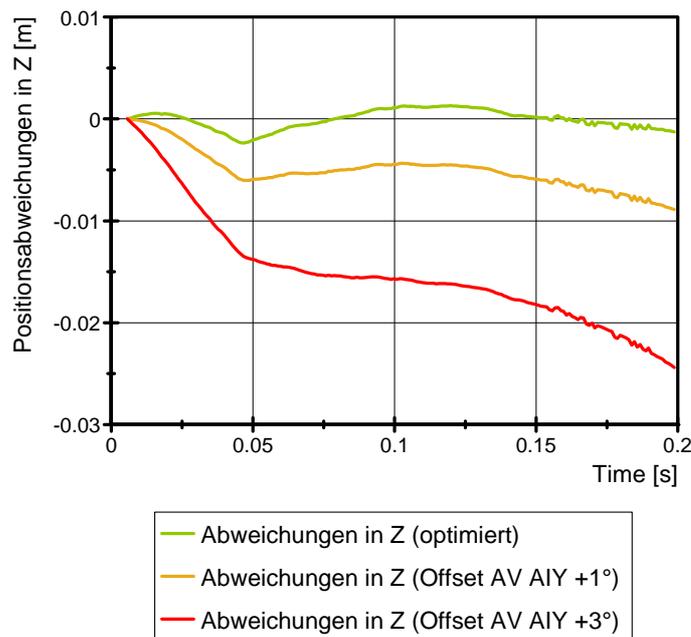


Abbildung 13: Einfluss des Initialwinkels Offset AV AIY auf die Berechnung der Kopf-Trajektorie (Versuch 60° , Verdrehung 0° , v8)

Die Beschreibung der Initialorientierung der Beschleunigungs- und Drehratensensoren erfolgt im Optimierungsprogramm CDA mit den drei Winkel-Parametern in Tabelle 5. Die Winkelwerte beziehen sich auf das Koordinatensystem der simulationsbasierten Versuchsauswertung und sind Drehungen um raumfeste Achsen in der Reihenfolge X, Y und Z (CDA Einstellung „Fixed XYZ“).

Tabelle 5: Parameter für die Initialorientierung der Sensorik im Programm CDA

Initialorientierung der Sensorik	Einheit
<ul style="list-style-type: none"> • Offset AV AIX • Offset AV AIY • Offset AV AIZ 	[°]

4.2.2 Sensorbedingte Ungenauigkeiten

Sensorbedingte Ungenauigkeiten werden durch Messfehler der Sensorik bei der Erfassung physikalischer Größen verursacht. Wichtige sensorbedingte Ungenauigkeiten sind Offset-Fehler und Skalierungs-Fehler. Die mathematische Modellierung dieser Abweichungen kann noch relativ einfach erfolgen.

4.2.2.1 Offset-Fehler (additiver Fehler)

Bei einem Offset-Fehler kommt es zu einer Verschiebung der Messgröße um einen konstanten Wert. Gleicher Betrag und Vorzeichen der Abweichung an jeder Stelle des Messbereichs sind die Charakteristiken dieses Fehlertyps. Der schematische Verlauf eines Offset-Fehlers ist in Abbildung 14 dargestellt. [6, 2008, p. 79]

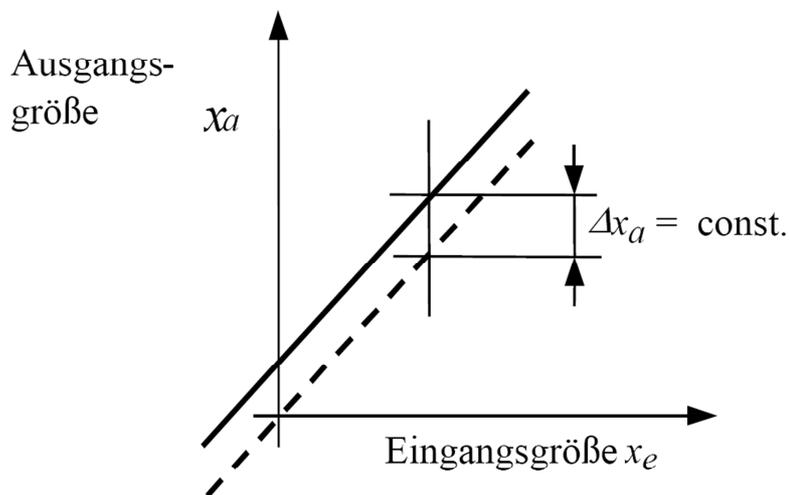


Abbildung 14: Offset-Fehler (additiver Fehler) [6, 2008, p. 80]

Der absolute Messfehler bei diesem Fehlertyp bleibt über den gesamten Messbereich gleich. Ein Offset-Fehler kann in der elektronischen Messtechnik beispielsweise durch einen fehlenden Offset-Abgleich oder durch Temperatureinflüsse verursacht werden.

Im Optimierungsprogramm CDA können Offset-Abweichungen von Beschleunigungs- und Drehratenverläufen mit den Parametern in Tabelle 6 berücksichtigt werden. Die Parameterwerte beziehen sich auf die gemessenen Signalverläufe in körperfesten Messachsen.

Tabelle 6: Parameter für Offset-Abweichungen im Programm CDA

Offset-Abweichungen	Einheit
Beschleunigungen <ul style="list-style-type: none"> • Offset ACX • Offset ACY • Offset ACZ 	[m/s ²]
Drehraten <ul style="list-style-type: none"> • Offset AVX • Offset AVY • Offset AVZ 	[deg/s]

4.2.2.2 Skalierungs-Fehler (multiplikativer Fehler)

Skalierungs-Fehler werden auch als Verstärkungsfehler bezeichnet und die Ursache dieses Fehlertyps ist ein unerwünschtes, nicht korrektes Verstärkungsverhalten der Messeinrichtung. Der schematische Verlauf dieses Fehlertyps ist in Abbildung 15 dargestellt. [6, 2008, p. 80]

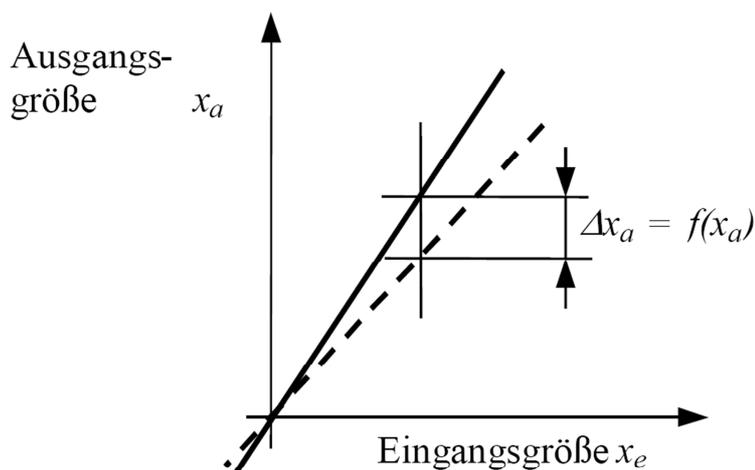


Abbildung 15: Skalierungs-Fehler (multiplikativer Fehler) [6, 2008, p. 81]

Die Berücksichtigung von Skalierungs-Abweichungen für Beschleunigungs- und Drehratenverläufe erfolgt im Optimierungsprogramm CDA mit den Parametern in Tabelle 7. Die Werte beziehen sich auf die gemessenen Signalverläufe in körperfesten Messachsen.

Tabelle 7: Parameter für Skalierungs-Abweichungen im Programm CDA

Skalierungs-Abweichungen	Einheit
Beschleunigungen <ul style="list-style-type: none"> • Scale ACX • Scale ACY • Scale ACZ 	[%]
Drehraten <ul style="list-style-type: none"> • Scale AVX • Scale AVY • Scale AVZ 	[%]

4.2.3 Einflussuntersuchung anhand des Parameters Offset AC (OAC)

Ein Offset eines Beschleunigungssignals bedeutet die Verschiebung der Messgröße um einen konstanten Wert. Kurz vor Versuchsbeginn wird ein Offset-Abgleich der elektrischen Messtechnik durchgeführt und somit sollte es zu keinen größeren Offset-Abweichungen, infolge eines Temperaturdrifts, kommen. Nachfolgend wird untersucht, ob ein Offset-Fehler in der Größenordnung der Quantisierung bei der A/D-Wandlung bereits zu unzulässig hohen Abweichungen bei der Trajektorien-Berechnung führen kann.

Im Hersteller-Datenblatt des verwendeten Gyro-Beschleunigungs-Sensors DTI-3106 wird für die Beschleunigungen ein Messbereich von +/- 500g angegeben. Für den gesamten Messbereich von 1000g und mit der Annahme einer 16bit A/D-Wandlung ergibt sich die angeführte Quantisierungsstufe.

$$Quantisierungsstufe = \frac{1000g}{2^{16}} = 0.0153g = 0.1497m/s^2 \quad (6)$$

Der Einfluss einer Offset-Abweichung von $0.1497m/s^2$ auf die Berechnung der Trajektorie bei den Pendelversuchen wird untersucht. Bei den Pendelversuchen setzt sich der zeitliche Ablauf aus der freien Pendelbewegung (circa 0.75s) und der Zeitdauer des Aufpralls (circa 0.2s) zusammen. Somit ergibt sich eine relativ „lange“ Integrationszeit, wenn die Trajektorie aus der Initialposition berechnet wird.

Ein konstanter Offsetwert der Beschleunigung verursacht über diesen Zeitraum die folgende berechnete Wegdifferenz. Die angeführte Berechnung in Gleichung (7) gilt natürlich nur für die Bewegung aus der Ruhe, trifft aber bei den Pendelversuchen zu. Außerdem wird hier der Extremfall betrachtet, da sich eine Offset-Abweichung bei einer Bewegungsumkehr nicht so stark auswirkt.

$$s(t)_{Offset\ AC} = \frac{Offset\ AC}{2} * t^2 \quad (7)$$
$$s(t)_{Offset\ AC} = \frac{0.1497m/s^2}{2} * (0.75s + 0.2s)^2 = 67.5mm$$

Die resultierende Wegdifferenz von 67.5mm kommt vor allem durch den quadratischen Einfluss der „langen“ Integrationszeit zustande und ist bei der Berechnung von präzisen Trajektorien nicht zulässig. Deshalb sind die Parameter Offset AC für die Optimierung der Kopf-Trajektorien relevant.

Der Einfluss des Beschleunigungs-Offsets auf die Berechnung der Kopf-Trajektorie wird abschließend noch am Optimierungsergebnis eines Pendelversuchs gezeigt und ist in Abbildung 16 ersichtlich. Für die Einflussanalyse wurden die Versuchsdaten eines Pendelversuchs mit einer Kopfverdrehung von $+45^\circ$ und einem Pendel-Initialwinkel von 80° herangezogen. Mit der Berücksichtigung der Parameter Offset AC bei der Trajektorien-Optimierung ergeben sich Positionsabweichungen von $< 3\text{mm}$ in allen Koordinatenachsen. Die berechneten Parameter sind in Tabelle 8 ersichtlich, wobei nur die Parameter für die Offset-Abweichungen AC angeführt sind. Ohne Berücksichtigung der Parameter Offset AC werden bereits nach 0.2s Positionsabweichungen von fast 3cm erreicht.

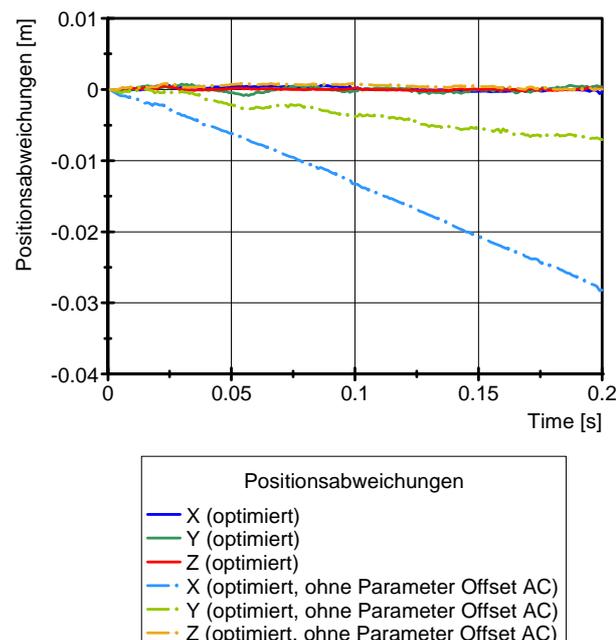


Abbildung 16: Einfluss des Parameters Offset AC auf die Berechnung der Kopf-Trajektorie (Versuch 80° , Verdrehung $+45^\circ$, v12)

Tabelle 8: Einfluss des Parameters Offset AC auf die Berechnung der Kopf-Trajektorie (Versuch 80° , Verdrehung $+45^\circ$, v12)

Optimierungsergebnis Offset AC	Einheit
• Offset ACX = 0.132	[m/s ²]
• Offset ACY = -0.066	
• Offset ACZ = 0.134	

Die Optimierung der Kopf-Trajektorie hat für die Offset-Abweichungen der gemessenen Beschleunigungsverläufe Werte von circa 0.13m/s^2 in den Sensorachsen X und Z ergeben. Alle berechneten Werte liegen unterhalb der theoretischen Quantisierungsstufe von circa 0.15m/s^2 bei der A/D-Wandlung. Die berechneten Optimierungsparameter in Tabelle 8 erscheinen bezüglich der Größenordnung plausibel und sind für die Berechnung präziser Kopf-Trajektorien bei den Pendelversuchen relevant.

4.3 Detailauswertung (Optimierung der Kopf-Trajektorien)

Die Ergebnisse der Trajektorien-Optimierung werden anhand von zwei Pendelversuchen gezeigt (Kopfverdrehung 0° bzw. $+45^\circ$). Der Pendel-Initialwinkel beträgt bei beiden Versuchen 70° und entspricht einem mittleren Belastungsniveau bei den Pendelversuchen.

4.3.1 Detailauswertung (Pendelversuch 70° , Kopfverdrehung 0° , Versuch 9)

In Abbildung 17 sind die Positionsabweichungen zwischen der berechneten, optimierten Kopf-Trajektorie und der Videobahn in allen drei Koordinatenachsen dargestellt. Zum besseren Verständnis der Kopfbewegung wurde unterhalb der Positionsabweichungen der zeitliche Verlauf des Kopfwinkels um die Y-Achse dargestellt. Somit kann eine zeitliche Zuordnung der einzelnen Positionsabweichungen besser erfolgen. Bei einem Pendel-Winkel von circa 0° erfolgt die Auslösung der Lichtschranke an der Pendelstange und die Triggerung der elektrischen Messtechnik ($t = 0s$). Zu diesem Zeitpunkt ist es jedoch noch nicht zum Kontakt der Pendelstange mit der Wabe gekommen. Je nach Wabenlänge (Wabe neu oder gebraucht) ergeben sich somit etwas unterschiedliche Zeiten zwischen $t = 0s$ und dem Auftreffzeitpunkt.

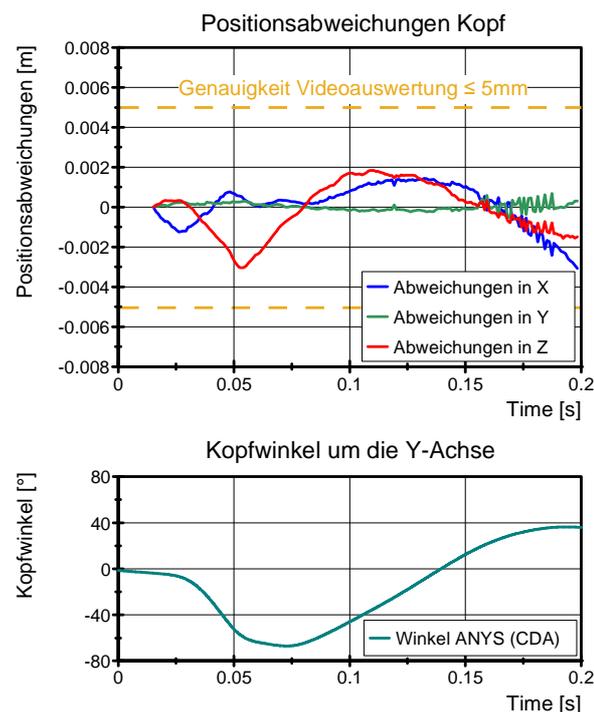


Abbildung 17: Positionsabweichungen der optimierten Kopf-Trajektorie (Versuch 70° , Verdrehung 0° , v9)

Die maximalen Positionsabweichungen betragen bei diesem Versuch circa 3mm. In Y-Richtung sind die Positionsabweichungen am geringsten. Hier erfolgt bei den Pendelversuchen ohne Kopfverdrehung keine relevante Kopfbewegung.

In dieser Größenordnung der Positionsabweichungen können jedoch keine aussagekräftigen Bewertungen der Restabweichungen erfolgen, da sich die Abweichungen bereits innerhalb des Toleranzbandes bei der Videoauswertung bewegen. Mit den Ergebnissen der 3D-Filmauswertung werden Genauigkeiten der Kopf-Trajektorie von $\leq 5\text{mm}$ erreicht. [10, 2010]

Tabelle 9: Parameter der Trajektorien-Optimierung (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)

Parameter	Einheit	v9 (70°)
Offset AV AIX	[°]	nicht sens.
Offset AV AIY	[°]	59.8
Offset AV AIZ	[°]	0.58
Scale ACX	[%]	101.01
Scale ACY	[%]	102.65
Scale ACZ	[%]	99.21
Scale AVX	[%]	nicht sens.
Scale AVY	[%]	101.64
Scale AVZ	[%]	nicht sens.
Offset ACX	[m/s ²]	0.1008
Offset ACY	[m/s ²]	-0.3199
Offset ACZ	[m/s ²]	0.0322
Offset AVX	[°/s]	nicht sens.
Offset AVY	[°/s]	nicht sens.
Offset AVZ	[°/s]	nicht sens.

- Berechnung der Trajektorie ab der Pendel-Initiallage
- Videobahn ab $t = 0\text{s}$
- neun Optimierungsparameter
- Optimierungsrichtung: xyz (nur Positionen)
- kein Scale-Parameter an den in SimbaV eingestellten Parametergrenzen von 97 bzw. 103%
- Optimierungszeit: 48min

An dieser Stelle wird angemerkt, dass die im Optimierungsprozess ermittelten Parameterwerte nicht zwangsläufig physikalisch begründbar sind. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass es einerseits nicht gesagt ist, dass alle Sensorfehler und Einflüsse abgebildet werden als auch andererseits, dass ermittelte Sensorfehler durch Parameterkorrelationen physikalisch nicht korrekt sind. In vergangenen Forschungsprojekten haben sich die gewählten Parametergrenzen in dem SimbaV-Optimierungsprozess bewährt.

Bei der genaueren Analyse der gefundenen Parameterwerte fällt auf, dass der Initialwinkel Offset AV AIY (= 59.8°) eine Differenz von 10.2° zum Pendel-Initialwinkel (= 70°) aus der Versuchsliste aufweist. Bei der Montage von Nacken und Kopf am Pendelflansch erfolgte keine Ausrichtung der Z-Achse des Kopfes auf die Pendelstange. Diese Winkeldifferenz ist auch eindeutig auf den Fotos der Versuchsdokumentation in Abbildung 18 zu erkennen.

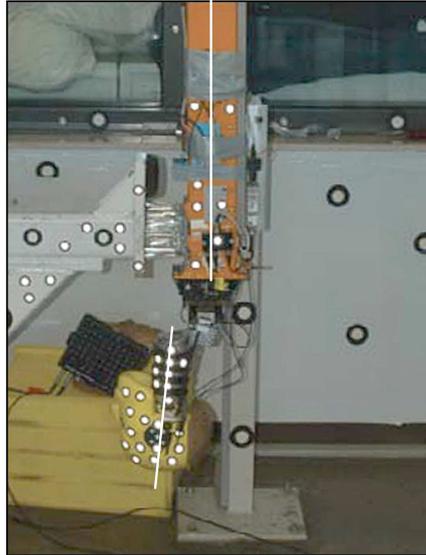


Abbildung 18: Winkeldifferenz zwischen Pendelstange und Kopf bei hängendem Pendel [11]

Somit sollte diese Winkeldifferenz zwischen dem Pendel-Initialwinkel und dem Parameter Offset AV AIY über die Versuchsreihe einen konstanten Wert einnehmen. Die Auswertungen bestätigen dies auch, wobei geringe Abweichungen durch eine mögliche Nacken-Durchbiegung in der Initiallage aufgrund der Schwerkraft zu erklären sind. Eine genaue photogrammetrische Einmessung der Initialorientierung des Kopfs (Sensorik) war aufgrund der Sichtverdeckung an der Versuchsanlage nicht möglich.

Die Optimierung der Kopf-Trajektorie hat für die Skalierungs-Abweichungen der drei Beschleunigungsverläufe Werte von 99.21 bis 102.65% ergeben. Bei der Skalierungs-Abweichung der Drehrate um die Y-Achse wurde das Minimum bei einem Wert von 101.64% gefunden.

Die Erfahrungen bei der Optimierung der Trajektorien bei den durchgeführten Pendelversuchen haben gezeigt, dass nicht alle Optimierungsparameter einen sensitiven Einfluss zeigen. Bei den Skalierungsfaktoren der Drehraten genügt beispielsweise der Parameter Scale AVY, da bei den Pendelversuchen ohne Kopfverdrehung nur relevante Rotationen um die Y-Achse auftreten. Die geringen Positionsabweichungen (unterhalb der Videotoleranz) bestätigen, dass die Reduktion auf die vorher angeführten Parameter für diesen Anwendungsfall zulässig ist.

4.3.2 Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung +45°, Versuch 9)

Analog zur vorherigen Auswertung sind in Abbildung 19 die Positionsabweichungen zwischen der berechneten, optimierten Kopf-Trajektorie und der Videobahn für einen Pendelversuch mit 45° Kopfverdrehung dargestellt.

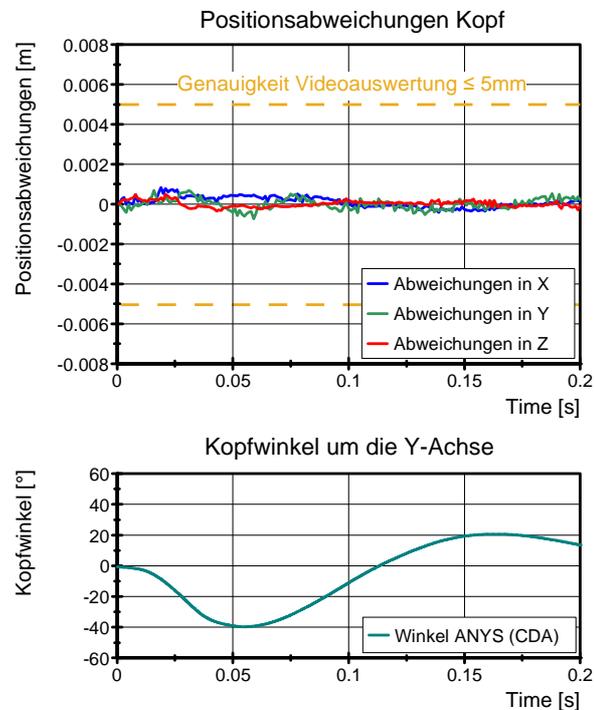


Abbildung 19: Positionsabweichungen der optimierten Kopf-Trajektorie (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)

Bei diesem Pendelversuch wird mit einer „allgemeineren“ Belastungssituation am Dummykopf ebenfalls ein sehr gutes Optimierungsergebnis der Positionsabweichungen erzielt. Alle drei Verläufe der Positionsabweichungen bewegen sich bei diesem Versuch innerhalb von +/- 1mm und somit innerhalb des Toleranzbandes bei der Videoauswertung ($\leq 5\text{mm}$).

Tabelle 10: Parameter der Trajektorien-Optimierung (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)

Parameter	Einheit	v09 (70°)
Offset AV AIX	[°]	56.6
Offset AV AIY	[°]	37.14
Offset AV AIZ	[°]	64.61
Scale ACX	[%]	98.8
Scale ACY	[%]	100.29
Scale ACZ	[%]	99.54
Scale AVX	[%]	102.39
Scale AVY	[%]	99.76
Scale AVZ	[%]	102.96
Offset ACX	[m/s ²]	0.066
Offset ACY	[m/s ²]	0.0158
Offset ACZ	[m/s ²]	-0.0267
Offset AVX	[°/s]	0.09
Offset AVY	[°/s]	-0.09
Offset AVZ	[°/s]	0.01

- Berechnung der Trajektorie ab der Pendel-Initiallage
- Videobahn ab $t = 0s$
- 15 Optimierungsparameter
- Optimierungsrichtung: xyz (nur Positionen)
- kein Scale-Parameter an den in SimbaV eingestellten Parametergrenzen von 97 bzw. 103%
- Optimierungszeit: 4h 40min

Das Optimierungsergebnis für die Skalierungsabweichungen, vor allem für die Skalierung der Drehratensignale, ergibt wiederum deutliche Abweichungen von der erreichbaren Kalibrierengenauigkeit (< 1%). Die Ergebnisse müssen, wie bei der Auswertung zuvor angeführt, richtig interpretiert werden und dürfen nicht einfach dem jeweiligen Sensorfehler zugeordnet werden. Der Grund liegt, wie schon in Kapitel 4.3.1 erwähnt, in der Tatsache, dass in dem Optimierungsprozess nicht alle Sensorfehler und Einflüsse richtig abgebildet werden. Mögliche Sensorfehlerkorrelationen können zu physikalisch nicht korrekten Werten der Optimierungsparameter führen.

Des Weiteren scheinen die Ergebnisse der drei Parameter für die Initialorientierung (Offset AV AIX, -AIY und -AIZ) auf den ersten Blick nicht plausibel. Bei diesen Winkelangaben handelt es sich aber um Drehungen um raumfeste Achsen in der Reihenfolge X, Y und Z (globales Koordinatensystem). Eine photogrammetrische Einmessung des Dummykopfs in der Initiallage wurde nicht durchgeführt. Deswegen erfolgt die Plausibilisierung der gefundenen Parameter durch die Auswertung der berechneten Kopfwinkel zum Zeitpunkt $t = 0s$. Zu diesem Zeitpunkt ist die Lage der Pendelstange aufgrund des Trigger-Signals der Lichtschranke eindeutig definiert und der Pendelwinkel beträgt circa 0°. Die Plausibilisierung der Kopfwinkel kann in dieser Lage wesentlich einfacher als in der Initiallage erfolgen.

Tabelle 11: berechnete Kopfwinkel zum Zeitpunkt $t = 0s$ (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)

Berechnete Kopfwinkel bei $t = 0s$ (CDA)	Einheit
<ul style="list-style-type: none"> Kopfwinkel X (ANXS) = 0.16 Kopfwinkel Y (ANYS) = -0.62 Kopfwinkel Z (ANZS) = 46.06 	[°]

Die theoretischen Winkelwerte in dieser Lage wären ANXS = 0°, ANYS = 0° und ANZS = 45°. Aufgrund des Differenzwinkels des Nackens zur Pendelstange bei der Montage (siehe Fotos Versuchsdokumentation beziehungsweise Abbildung 18) sowie der kinematischen Einflüsse zum Zeitpunkt $t = 0s$ sind die Ergebnisse in Tabelle 11 jedoch plausibel. Angemerkt wird auch hier, dass es zwischen den im Optimierungsprozess ermittelten Größen und der realen Kopforientierung Unterschiede aufgrund der Nichtberücksichtigung von Einflüssen, Sensorfehlern und Sensorfehlerkorrelationen geben kann.

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der präzisen Trajektorien-Bestimmung

In den folgenden beiden Tabellen sind die maximalen Positionsabweichungen zwischen der berechneten (optimierten) Kopf-Trajektorie und der Videobahn für 28 Pendelversuche mit Kopfverdrehung ersichtlich. Bei jeweils aufsteigendem Pendel-Initialwinkel wurden die Versuche 1-14 mit einer Kopfverdrehung von +45°, die Versuche 15-28 mit einer Verdrehung von -45° durchgeführt.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Trajektorien-Optimierung (Kopfverdrehung +45° und -45°)

Kopfverdrehung +45°					Kopfverdrehung -45°				
maximale Positionsabweichungen					maximale Positionsabweichungen				
Versuch	Pendel-Initialwinkel [°]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Versuch	Pendel-Initialwinkel [°]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	35	< 1	< 1	< 1	15	35	< 1	< 1	1.5
2	35	< 1	< 1	< 1	16	35	< 1	< 1	1
3	40	< 1	< 1	< 1	17	40	1.5	1	1.5
4	40	< 1	1	< 1	18	40	< 1	< 1	1.5
5	50	< 1	< 1	< 1	19	50	1	< 1	< 1
6	50	< 1	< 1	< 1	20	50	1.5	< 1	< 1
7	60	< 1	< 1	< 1	21	60	< 1	< 1	1
8	60	< 1	< 1	1	22	60	1	< 1	1
9	70	< 1	< 1	< 1	23	70	1.5	< 1	1
10	70	< 1	< 1	< 1	24	70	1.5	< 1	1.5
11	80	< 1	1	< 1	25	80	2	1	1
12	80	< 1	< 1	< 1	26	80	2	1	1
13	90	< 1	< 1	< 1	27	90	2.5	1	1
14	90	< 1	< 1	< 1	28	90	2.5	1	1.5

Bei allen 28 Pendelversuchen liegen die maximalen Positionsabweichungen unterhalb von 3mm, bei den meisten Versuchen sogar unterhalb von 1mm. Die Ergebnisse der Versuche 15-28 mit einer Kopfverdrehung von -45° zeigen im Schnitt etwas größere Positionsabweichungen und es kann auch ein leichter Anstieg der Abweichungen mit zunehmendem Pendel-Initialwinkel erkannt werden. Alle optimierten Positionsabweichungen sind innerhalb des möglichen Toleranzbandes der Videoauswertung ($\leq 5\text{mm}$) und somit kann eine Bewertung der Restabweichungen nur sehr schwierig erfolgen. [10, 2010] Von den insgesamt 420 Optimierungsparametern wurden bei 28 Skalierungsparametern die in SimbaV vorgegebenen Parametergrenzen von 97 bzw. 103% erreicht. Der Grenzwert von 97% wurde sechsmal beim Parameter Scale ACX und zweimal beim Parameter Scale ACZ erreicht. Bei den Drehraten wurde der Grenzwert von 103% häufiger erreicht, neunmal beim Parameter Scale AVX und 11-mal beim Parameter Scale AVZ.

Die erzielten Ergebnisse bei allen 28 Versuchen mit der Kopfverdrehung von $+45^\circ$ bzw. -45° zeigen, dass das Verfahren der simulationsbasierten Versuchsauswertung zur präzisen Berechnung der Kopf-Trajektorien bei den Pendelversuchen sehr gut funktioniert.

5 Vergleich der gemessenen Kräfte und Momente mit den berechneten Größen

In diesem Kapitel erfolgt in einem ersten Schritt die theoretische Betrachtung des mechanischen Systems „Dummykopf“. Mithilfe der Bewegungsgleichungen (Impuls- und Drallsatz) können die wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle berechnet werden. Diese so ermittelten Verläufe werden später für den Vergleich mit den gemessenen Kräften und Momenten herangezogen, wobei die berechneten Verläufe für die Kräfte und Momente nicht als fehlerfreie Größen anzusehen sind. Der Grund liegt in der Tatsache, dass auch die zugrunde liegende Kopftrajektorie beziehungsweise die getroffenen Annahmen wie beispielsweise der richtigen Kopfmasse in gewissen Grenzen fehlerbehaftet sind.

Die für die theoretischen Nackenkräfte und –momente benötigten Eingangsgrößen für diese Berechnung sind die durch SimbaV optimierten Beschleunigungs- und Drehratenverläufe im Kopfschwerpunkt. Weitere notwendige Parameter sind die wirkende Masse und der Trägheitstensor des Dummykopfs. Unvermeidbare Abweichungen bei der Annahme dieser Parameter führen, wie schon erwähnt, ebenfalls zu Fehlern bei der Berechnung der Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle.

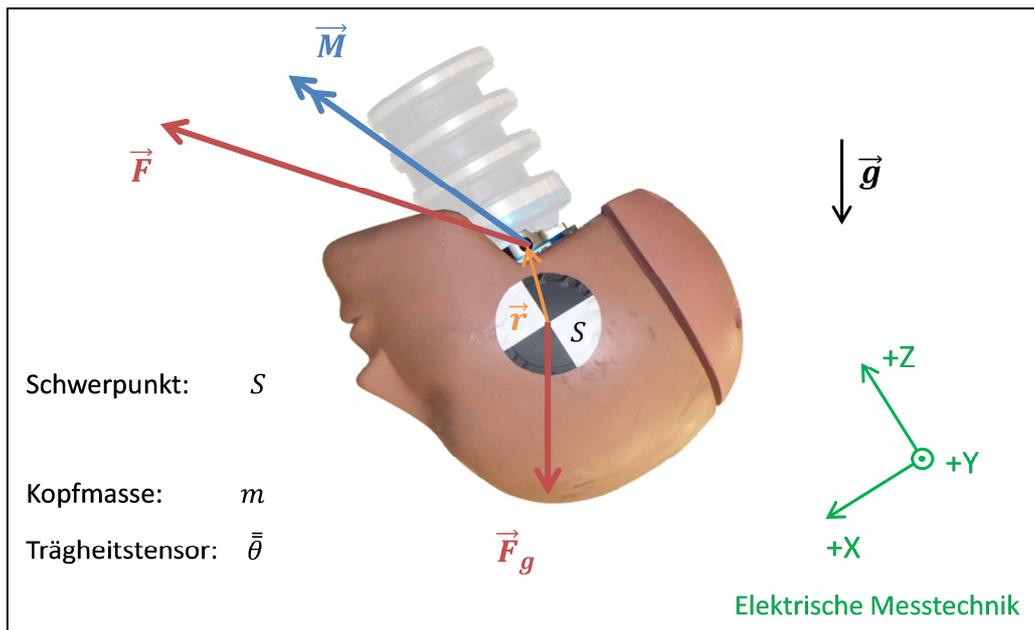


Abbildung 20: Betrachtung des mechanischen Systems "Dummykopf"

Eine notwendige Voraussetzung für die Berechnung der tatsächlich wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle ist, dass keine äußeren Kräfte und Momente auf den Dummykopf wirken und die Bahnkurve des Dummykopfs sowie die wirkenden Beschleunigungen und Drehraten im Kopfschwerpunkt fehlerfrei bekannt sind. Diese Voraussetzung ist bei den durchgeführten Pendelversuchen eigentlich nicht gegeben. Aufgrund der Tatsache, dass die Fehler abschätzbar sind beziehungsweise dass sich diese

Untersuchung auf die prinzipielle Eignung der Kraft-Momenten-Messdose als Input für die Bewegungsanalyse von Dummykomponenten beschränkt, wird die Verwendung der theoretisch berechneten Kraft- und Momentenverläufe als zulässig angesehen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen mit dem Programm CDA werden somit als Vergleichsgrößen für die Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle angenommen.

Der Vergleich der berechneten Vergleichsgrößen mit den gemessenen Kräften und Momenten ist die zentrale Aufgabenstellung in diesem Kapitel. Dazu werden die detaillierten Ergebnisse von zwei Pendelversuchen in der Arbeit angeführt.

Gewählt wurde ein Pendelversuch ohne Kopfverdrehung (Kopf gerade) und ein zweiter Versuch mit einer Kopfverdrehung von +45°. Der Pendel-Initialwinkel beträgt bei beiden Versuchen 70° und soll ein mittleres Belastungsniveau repräsentieren. Es wird noch angemerkt, dass es sich dabei um die gleichen Versuche handelt, die bereits bei der Optimierung der Kopf-Trajektorien in Kapitel 4 ausgewählt wurden.

Als Ergebnis dieser Auswertungen wird die Eignung der Upper-Neck-Load-Cell als Inputgröße für die Bewegungsanalyse von Dummykomponenten bewertet. Dafür werden die erreichbaren Genauigkeiten der Kontrollgrößen, basierend auf dem kinematischen Modell, ermittelt und unter Beachtung der Genauigkeit der Eingangsgrößen analysiert. Eine Zusammenfassung von mehreren Versuchen soll schließlich Aussagen über die Tendenz bei ansteigenden Belastungen ermöglichen.

5.1 Berechnung der Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle

5.1.1 Berechnung der Kräfte an der oberen Nackenmessstelle

Für die Berechnung der Kräfte an der oberen Nackenmessstelle aus den Beschleunigungen und Drehraten im Kopfschwerpunkt wird der Freischnitt des Dummykopfs betrachtet. Neben einem globalen, raumfesten Koordinatensystem wird auch ein lokales, mitbewegtes Koordinatensystem definiert. Die wirkenden Kräfte auf den Dummykopf sind die Gewichtskraft im Schwerpunkt sowie eine Schnittkraft an der oberen Nackenmessstelle (Schnittelement). Es wird angenommen, dass keine weiteren externen Kräfte auf den Dummykopf wirken. Die Koordinaten der oberen Nackenmessstelle, bezogen auf den Schwerpunkt (COG), werden durch den Abstandsvektor \vec{r} in körperfesten Koordinaten beschrieben.

Impulssatz für den betrachteten Körper in raumfesten Koordinaten:

$$m * \ddot{\vec{x}}_S = \vec{F} + \vec{F}_G \quad (8)$$

Beim Vektor $\ddot{\vec{x}}_S$ in Gleichung (8) handelt es sich um den Beschleunigungsvektor im Schwerpunkt des Dummykopfs in raumfesten Koordinaten. Diese Vektorgleichung kann in eine beliebige Richtung projiziert werden. Erfolgt die Projektion in Richtung der körperfesten Koordinatenachsen, so können die gemessenen Beschleunigungsverläufe (körperfest) in die Gleichung eingesetzt werden. Die körperfeste Betrachtung der Vektorgleichung wird mit dem Querstrich über den Variablen symbolisiert. Der Vektor der Eigengewichtskraft muss bei dieser Betrachtungsweise aber in seine Vektorkomponenten zerlegt werden. [3, p. 52]

$$m * \ddot{\vec{x}}_S = \bar{F} + \bar{F}_G \quad (9)$$

Zu beachten ist, dass es sich bei den Beschleunigungen und Kräften in Gleichung (9) um die tatsächlich wirkenden Größen handelt. Dies wird deshalb betont, da die gemessenen Beschleunigungen und Kräfte (ohne Miteinbeziehung von Messfehlern) nicht exakt den wirkenden Beschleunigungen und Kräften entsprechen. Die Ursache dieser Abweichungen ist unter anderem kurz vor Versuchsbeginn beim Offset-Abgleich der elektrischen Messtechnik zu finden. Dabei werden alle Kanäle der elektrischen Messtechnik genullt. Ein Messwert von Null entspricht aber den wirkenden Beschleunigungen und Kräften in der Initiallage. Deshalb müssen in den Gleichungen die wirkenden Größen (g-korrigiert, Index w) eingesetzt werden.

Wirkende Beschleunigungen im Schwerpunkt (siehe Kapitel 4.1.2):

$$\ddot{\vec{x}}_w = \ddot{\vec{x}}_m + \bar{g} - \bar{g}_0 \quad (10)$$

Wirkende Kräfte:

$$\bar{F}_w = \bar{F}_m - \bar{F}_{G0} \quad (11)$$

\bar{F}_m ... angezeigter, gemessener Kraftvektor

\bar{F}_{G0} ... Vektor der Gewichtskraft beim Offsetabgleich

Werden die wirkenden Beschleunigungen und Kräfte in Gleichung (9) eingesetzt, so vereinfacht sich die Gleichung und es kommen nur noch lokale, körperfeste Beschleunigungen und Kräfte (gemessene Größen) vor. Die absoluten Kopfwinkel (Orientierung) bezogen auf das raumfeste Koordinatensystem haben auf die Berechnung der Kräfte keinen Einfluss.

Durch Umformen auf \bar{F}_m kann schließlich der Vergleichsverlauf der gemessenen Kraft in Abhängigkeit der gemessenen Beschleunigungen im Kopf-Schwerpunkt berechnet werden. Bei dieser Berechnung wird vorausgesetzt, dass die Messachsen der Beschleunigungs- und Kraftsensoren übereinstimmen.

Berechnung der Kräfte an der oberen Nackenmessstelle:

$$\bar{F}_m = m * \ddot{\bar{x}}_m \quad (12)$$

\bar{F}_m ... gemessener Kraftvektor

$\ddot{\bar{x}}_m$... gemessener Beschleunigungsvektor im Kopfschwerpunkt

m ... Kopfmasse

5.1.2 Berechnung der Momente an der oberen Nackenmessstelle

Zur Berechnung der Momente an der oberen Nackenmessstelle aus den Beschleunigungen und Drehraten im Kopfschwerpunkt wird der Drallsatz in körperfesten (mitbewegten) Koordinaten für das System „Dummykopf“ aufgestellt. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass der Trägheitstensor in diesem Koordinatensystem eine konstante Größe darstellt. Dieser Sonderfall des mitbewegten, körperfesten Bezugssystems erfordert jedoch eine Transformation des Drallsatzes. [5, 2005, p. 209]

Drallsatz für das System „Dummykopf“ in körperfesten Koordinaten: [5, 2005, p. 209]

$$\frac{d\vec{L}_S}{dt} = \frac{d'\vec{L}_S}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{L}_S = \sum \vec{M}_S \quad (13)$$

$$\text{mit } \vec{L}_S = \bar{\bar{\Theta}} * \vec{\omega}$$

Für den Trägheitstensor kann im Allgemeinen eine 3x3 Matrix geschrieben werden. Durch den theoretisch symmetrischen Aufbau des Dummykopfs bezüglich der XZ-Ebene kann der Trägheitstensor vereinfacht werden.

$$\bar{\bar{\Theta}} = \begin{bmatrix} \Theta_{xx} & 0 & -\Theta_{xz} \\ 0 & \Theta_{yy} & 0 \\ -\Theta_{xz} & 0 & \Theta_{zz} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Auf der rechten Seite in Gleichung (13) sind die einzigen Beiträge zu einem Moment bezüglich des Schwerpunkts, die Kräfte und Momente in der Schnittebene der Load-Cell.

$$\sum \vec{M}_S = \bar{M} + \bar{r} \times \bar{F} \quad (15)$$

Analog zu der Berechnung der Kräfte sind auch hier die wirkenden Größen \bar{F} und \bar{M} durch die gemessenen (angezeigten) Größen \bar{F}_m und \bar{M}_m zu ersetzen. Somit vereinfacht sich die Gleichung und es kommen nur noch lokale, körperfeste Größen vor. Aus Gleichung (13) kann schließlich der Vergleichsverlauf der gemessenen Momente in Abhängigkeit der Beschleunigungen und Drehraten im Kopfschwerpunkt berechnet werden.

Berechnung der Momente an der oberen Nackenmessstelle:

$$\bar{M}_m = \bar{\Theta} * \dot{\bar{\omega}} + \bar{\omega} \times (\bar{\Theta} * \bar{\omega}) - \bar{r} \times (m * \ddot{x}_m) \quad (16)$$

\ddot{x}_m ... angezeigter, gemessener Beschleunigungsvektor

$\bar{\omega}$... gemessene Drehraten

\bar{r} ... Abstandsvektor (COG - Load Cell)

$\bar{\Theta}$... Trägheitstensor Kopf

m ... Kopfmasse

5.2 Detailauswertung (Vergleich der Kräfte und Momente)

5.2.1 Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung 0°, Versuch 9)

Für die erste Detailauswertung der Differenzverläufe von Kräften und Momenten wurde ein 70° Pendelversuch ohne Kopfverdrehung gewählt. Durch die Kopforientierung nach vorne ergeben sich nur in X- und Z-Richtung relevante Kräfte, sowie ein Moment um die Y-Achse des Dummykopfs.

Für diese drei Größen werden die berechneten und gemessenen Verläufe sowie die daraus resultierenden Abweichungen dargestellt. Die Koordinatenachsen der ausgewerteten Größen (Kräfte und Momente) beziehen sich dabei immer auf das lokale, mitbewegte Koordinatensystem des Dummykopfs. Die relevanten Belastungen beim Aufprall finden im Zeitbereich von $t = 0$ bis $0.3s$ statt. Zur besseren Zuordnung der Belastungen bei der Dummybewegung wird auch der Kopfwinkel um die Y-Achse dargestellt.

Annahmen bei der Berechnung der Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle:

- Berechnung mit den optimierten Beschleunigungs- und Drehratenverläufen
- Kopfmasse: $m = 4.54kg$
- Trägheitstensor Kopf:

$$\Theta_{xx} = 0.0160 \text{ kgm}^2$$

$$\Theta_{yy} = 0.0204 \text{ kgm}^2$$

$$\Theta_{zz} = 0.0181 \text{ kgm}^2$$

Für die Kopfmasse wurde die Angabe des Herstellers verwendet, die bei einem Wert von $4.54 \pm 0.05kg$ liegt. Die Werte für den Trägheitstensor wurden aus dem Programm CDA übernommen und stammen aus früheren Untersuchungen. In Abbildung 21 sind die gemessenen und berechneten Kräfteverläufe in X und Z sowie die Differenzverläufe dargestellt.

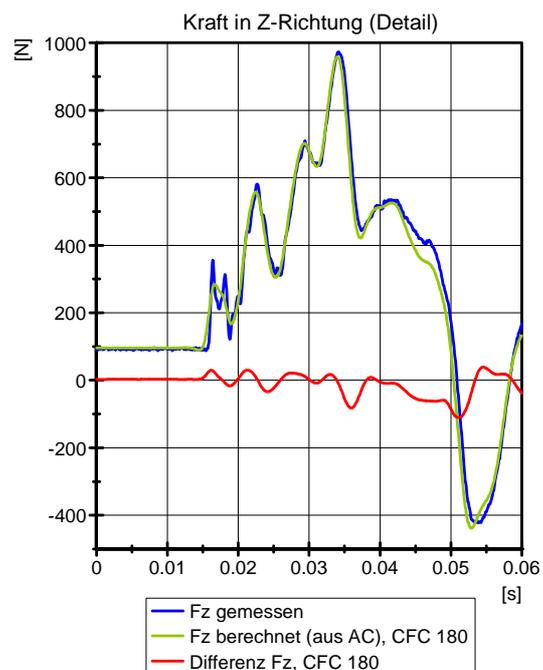
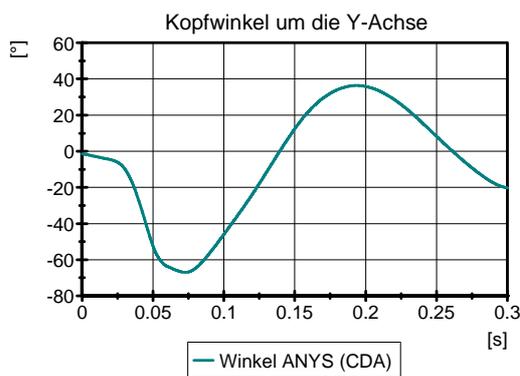
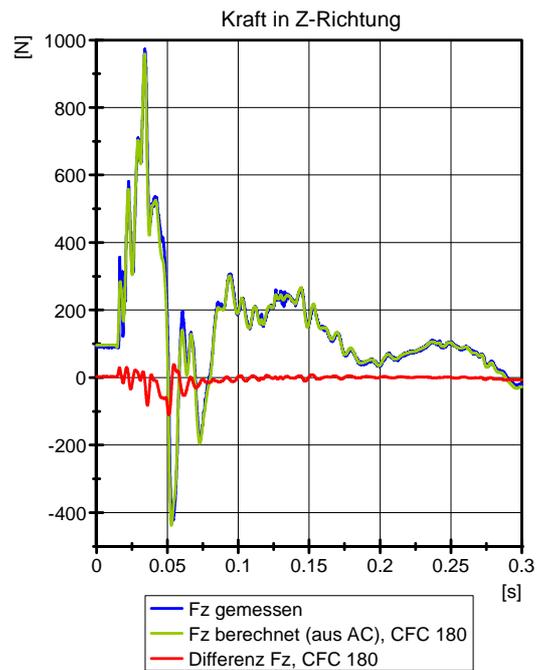
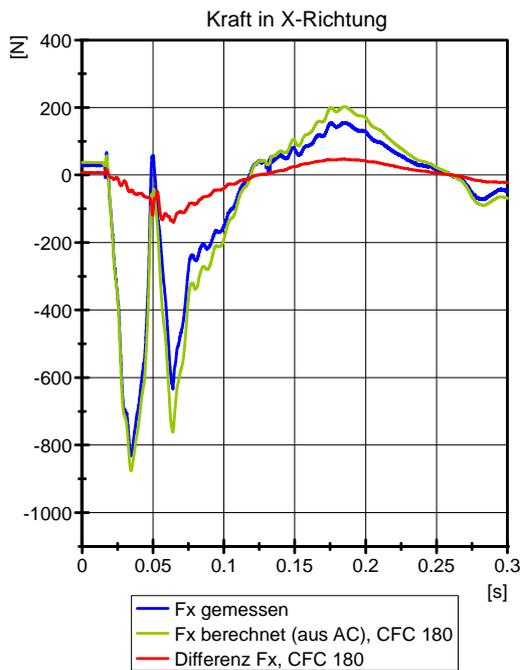


Abbildung 21: gemessene vs. berechnete Kräfte (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)

Der Vergleich der beiden Kraftverläufe in X- und Z-Richtung zeigt eine wesentlich höhere Signaldynamik der Z-Kraft, die sehr wahrscheinlich aufgrund der hohen Nackensteifigkeit in Längsrichtung verursacht wird. Bei diesem hochdynamischen Kraftverlauf ergeben sich nur sehr geringe Differenzen. Die maximale Differenz der Z-Kraft beträgt 110N, wobei diese beim Nulldurchgang der Z-Kraft bei circa 0.05s auftritt. Die größten Abweichungen können bei den starken An- und Abstiegen des Signalverlaufs festgestellt werden.

Der dargestellte Verlauf der X-Kraft zeigt eine andere Charakteristik als der Z-Kraftverlauf. Der Signalverlauf der X-Kraft an sich wird zwar gut erfasst, die Signalendwerte sind aber in den meisten Zeitabschnitten zu gering. Der Verlauf der Differenzen deutet in erster Linie auf Skalierungs-Abweichungen hin. Außerdem stimmen die Nulldurchgänge des Verlaufs gut mit den Nulldurchgängen der Messgröße überein. Besonders auffällig ist aber, dass der erste Signalpeak gut erfasst wird, die Messwerte beim zweiten Peak jedoch deutlich unterhalb des Referenzverlaufs liegen. Die maximale Differenz der X-Kraft beträgt 140N bei maximalen Belastungen von circa 870N.

In analoger Weise erfolgt die Auswertung der Momente. Bei den Pendelversuchen ohne Kopfverdrehung wurden nur um die Y-Achse relevante Momente gemessen. Die gemessenen und berechneten Verläufe sowie die Abweichungen des Y-Moments sind in Abbildung 22 dargestellt.

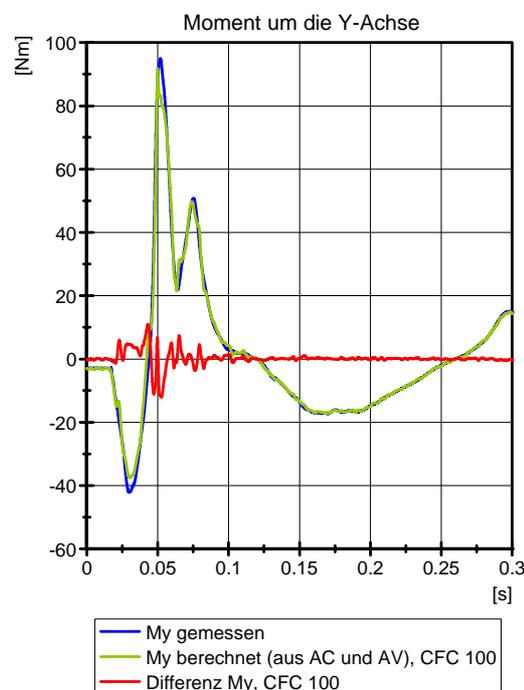


Abbildung 22: gemessene vs. berechnete Momente (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)

Das gemessene Y-Moment stimmt mit dem berechneten Referenzverlauf gut überein, wobei auch geringe Signalwerte sehr genau erfasst wurden. Die größten Abweichungen können in den Umkehrpunkten des Momentenverlaufs festgestellt werden. Der gemessene Wert kann der Signaländerung nicht folgen und es ergeben sich somit zu hohe Messwerte. Das Maximum wird an der Stelle des maximalen Y-Moments erreicht und beträgt circa 10-12Nm.

5.2.2 Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung +45°, Versuch 9)

Durch die Kopfverdrehung von +45° am Pendelflansch wird auf die Load-Cell zusätzlich eine seitliche Belastung eingeleitet. Dadurch kann das Messverhalten der Load-Cell auch in den anderen Sensorachsen untersucht werden. Bei dieser Versuchskonstellation ergeben sich relevante Kräfte in allen Koordinatenachsen sowie Momente um die X- und Y-Achse. Relevante Momente um die Z-Achse konnten aufgrund der geringen Hebelabstände nicht gemessen werden. Für alle sechs Größen werden wiederum die berechneten und gemessenen Verläufe sowie die daraus resultierenden Differenzen dargestellt.

Annahmen bei der Berechnung der Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle:

- Berechnung mit den optimierten Beschleunigungs- und Drehratenverläufen
- Kopfmasse: $m = 4.54\text{kg}$
- Trägheitstensor Kopf:

$$\Theta_{xx} = 0.0160 \text{ kgm}^2$$

$$\Theta_{yy} = 0.0204 \text{ kgm}^2$$

$$\Theta_{zz} = 0.0181 \text{ kgm}^2$$

Die gemessenen und berechneten Kräfteverläufe in X- und Y-Richtung sind in Abbildung 23 ersichtlich. Der Vergleich der Kräfteverläufe in X- und Y-Richtung zeigt eine ähnliche Charakteristik der gemessenen Kräfte. Die Signaldynamik an sich wird bei beiden Sensorachsen wieder gut erfasst, da auch sehr kleine und schnelle Änderungen der wirkenden Kräfte im gemessenen Verlauf nachgebildet werden.

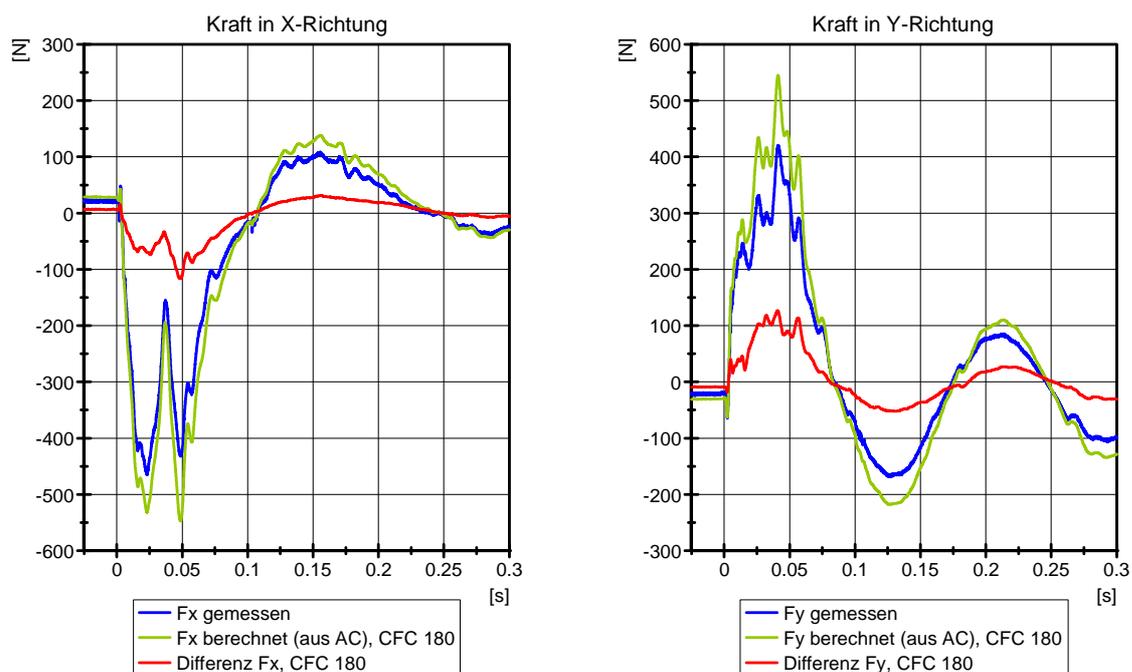


Abbildung 23: gemessene vs. berechnete Kräfte in X und Y (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)

Die Signalendwerte der gemessenen Kräfte sind aber in beiden Messachsen über den gesamten Zeitabschnitt zu gering. Die Charakteristiken mit den Nulldurchgängen lassen vermuten, dass die Abweichungen durch eine Skalierung bereits stark reduziert werden können. Ein Vergleich mit den Ergebnissen des Pendelversuchs ohne Kopfverdrehung (Kapitel 5.2.1) zeigt sehr ähnliche Charakteristiken. Bei diesem Versuch ist ebenfalls ein Unterschied im Verlauf der X-Kraft zwischen dem ersten und zweiten Signalpeak festzustellen. Der Effekt ist aber nicht so deutlich wie bei dem Versuch ohne Kopfverdrehung ausgeprägt. Die maximalen Differenzwerte der X- und Y-Kraftverläufe betragen circa 115N bzw. 125N und werden jeweils beim Signalmaximum der Kräfte erreicht.

Sichtbar geringere Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Größen werden bei der Kraft in Z-Richtung erzielt. Der gemessene und berechnete Verlauf sowie ein Detailausschnitt sind in Abbildung 24 dargestellt.

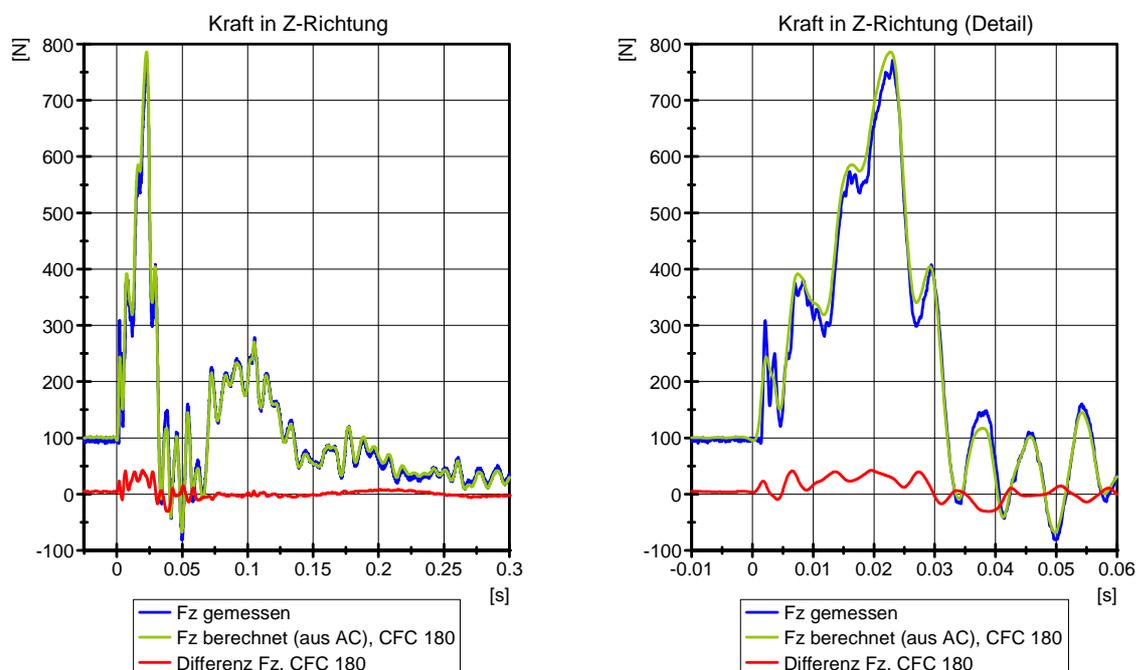


Abbildung 24: gemessene vs. berechnete Kräfte in Z (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)

Bei den gemessenen Z-Kräften ergeben sich, ähnlich wie bei dem Versuch ohne Kopfverdrehung, wiederum sehr geringe Abweichungen. Die hohe Signaldynamik wird sehr gut erfasst und die gemessenen Signalendwerte stimmen wesentlich besser als bei den X- und Y-Kräften. In der Detailansicht des Z-Kraftverlaufs kann erkannt werden, dass die Abweichungen häufig bei den großen Signalanstiegen und schnellen Änderungen der Z-Kraft auftreten. Im Zeitbereich ab circa 0,05s wird der Signalverlauf der Z-Kraft sehr gut erfasst, Differenzen sind hier kaum zu erkennen. Die durchschnittliche Differenz der Z-Kraft kann bei diesem Versuch mit circa 50N angegeben werden.

Die Verläufe der gemessenen Momente um die X- und die Y-Achse stimmen sehr gut mit den berechneten Verläufen überein und sind in Abbildung 25 ersichtlich. Es können so gut wie keine Unterschiede zwischen den beiden Sensorachsen bezüglich der Abweichungen erkannt werden.

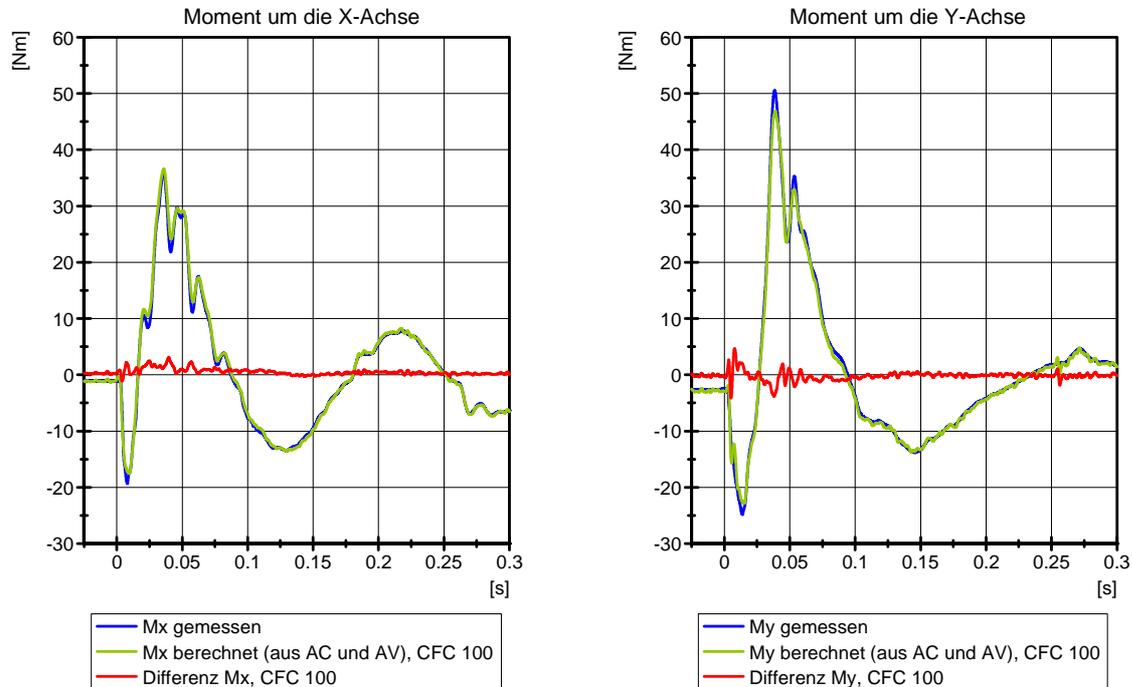


Abbildung 25: gemessene vs. berechnete Momente um X und Y (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)

Auch hier zeigen die gemessenen Momentenverläufe eine ähnliche Charakteristik wie beim Pendelversuch ohne Kopfverdrehung (Kapitel 5.2.1). Bei hohen Signaländerungen in den Umkehrpunkten kann der gemessene Verlauf dem theoretisch berechneten Verlauf nicht folgen und es ergeben sich etwas zu hohe Messwerte. Im Zeitbereich ab $t = 0.1s$, bei geringerer Signaldynamik, werden sehr gute Messergebnisse erreicht und es können fast keine Differenzen festgestellt werden. Die maximalen Differenzen bei den gemessenen Momenten um die X- und Y-Achse betragen circa 3 bzw. 5Nm.

Um die Z-Achse des Dummykopfs treten bei den Pendelversuchen keine relevanten Belastungen, aufgrund des geringen Hebelarms, auf. Die berechneten und gemessenen Verläufe der Momente um die Z-Achse sind in Abbildung 26 ersichtlich. Aussagen über die Charakteristiken sind bei den geringen Messwerten von 10-15N nicht möglich. An dieser Stelle ist anzumerken, dass der Messbereich der Load-Cell in dieser Sensorachse 282.5Nm beträgt.

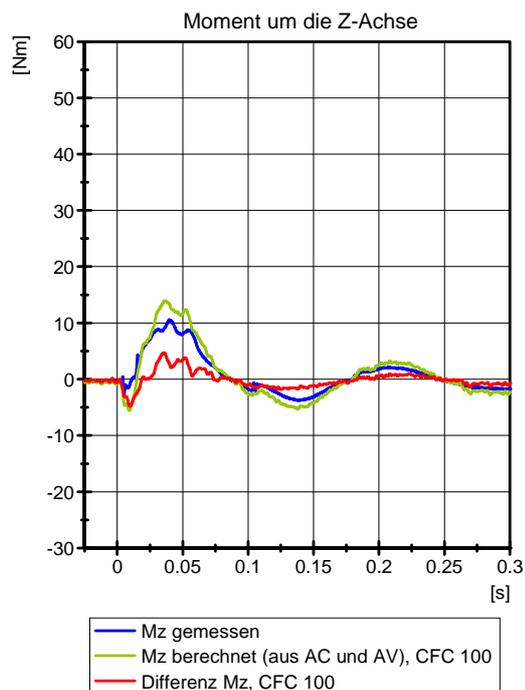


Abbildung 26: gemessene vs. berechnete Momente um Z (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)

5.3 Zusammenfassung der Abweichungen der gemessenen Kräfte und Momente

Die Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Nackenmessgrößen wurden wie in Kapitel 5.2 für alle durchgeführten Pendelversuche ausgewertet. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse von 14 Pendelversuchen zusammengefasst. Bei allen 14 Versuchen beträgt die Kopfverdrehung +45°, der Pendel-Initialwinkel (Auslenkwinkel) beginnt bei 35° und steigt über die Versuchsreihe bis 90° an.

Für diese zusammenfassende Auswertung wurden bewusst Pendelversuche mit einer Kopfverdrehung von +45° gewählt, da bei diesen Versuchen zusätzlich eine seitliche Belastungssituation am Dummykopf vorliegt. Bei den Versuchen mit Kopfverdrehung wurden relevante Kräfte in allen Sensorachsen und relevante Momente um die X- und Y-Achse gemessen. Die wirkenden Momente um die Z-Achse waren nur sehr gering.

Die Ergebnisse dieses Kapitels sollen einen Überblick über die Größenordnung der Differenzverläufe zwischen den berechneten und gemessenen Kräften und Momenten in den einzelnen Sensorachsen für die betrachteten Pendelversuche geben. Außerdem sollen mögliche Tendenzen der Abweichungen bei ansteigender Belastung und eventuelle Unterschiede zwischen den einzelnen Sensorachsen aufgezeigt werden.

In Abbildung 27 sind die Abweichungen der Kräfte für die Versuche zusammengefasst. Aus den Detailauswertungen der Pendelversuche wurden die Maximalwerte des Differenzverlaufs (roter Verlauf) sowie des berechneten Kraftverlaufs (grüner Verlauf) in die

nachfolgenden Diagramme übertragen. Je Pendelversuch sind deshalb zwei Punkte (rot und grün) eingezeichnet. Es wurden jeweils zwei Versuche pro Pendel-Initialwinkel durchgeführt, weshalb sich die eingezeichneten Punkte überdecken können.

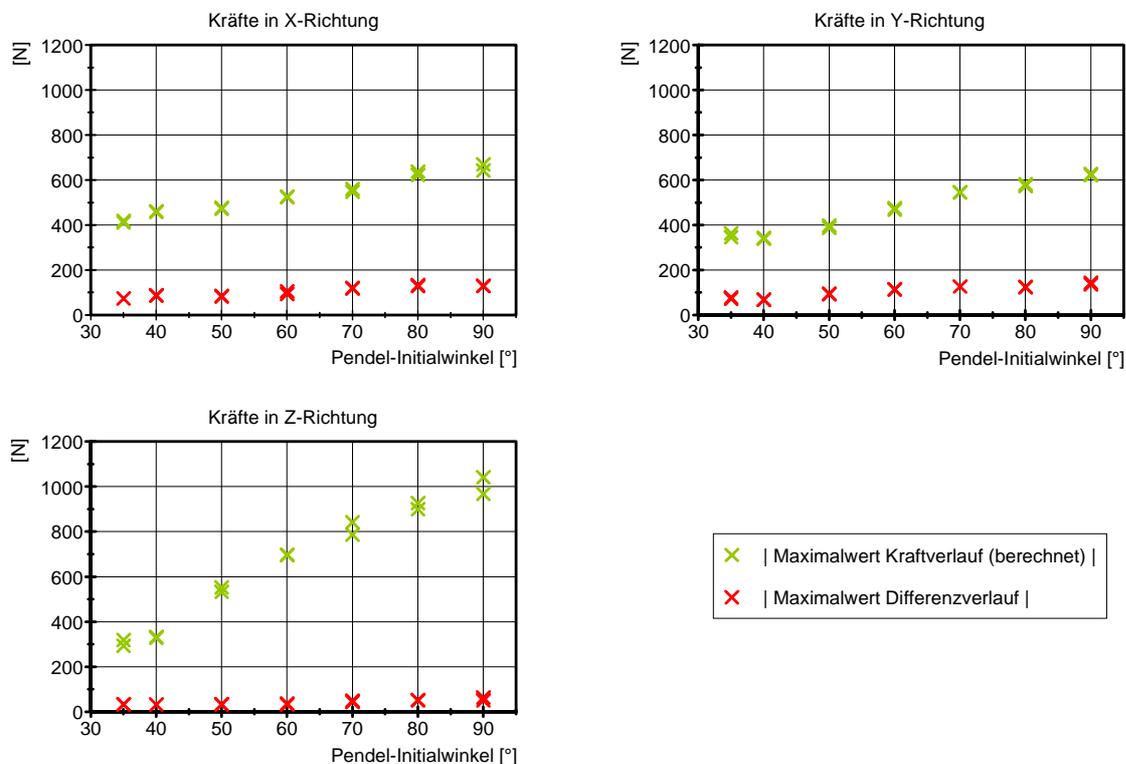


Abbildung 27: Zusammenfassung der Differenzen der Kräfte (Kopfverdrehung +45°, Pendelversuche 35 - 90°)

Die Auswertungen zeigen, dass das Belastungsniveau in X- und Y-Richtung bei den Pendelversuchen mit einer Kopfverdrehung von +45° fast ident ist. Auch die Größenordnung der maximalen Differenz (rot) ist in beiden Sensorachsen X und Y sehr ähnlich. Mit zunehmendem Belastungsniveau kann ein Anstieg der Maximalwerte der Differenz festgestellt werden. Die Größenordnung der Abweichungen der X- und Y-Kräfte kann über die gesamte Versuchsreihe mit circa 130N angegeben werden.

Bei den Abweichungen der Kräfte in Z-Richtung sind diese Effekte der ansteigenden Differenzwerte nicht ersichtlich. Obwohl das Belastungsniveau in Z-Richtung wesentlich stärker mit dem Pendel-Initialwinkel ansteigt als bei den Kräften in X- und Y-Richtung bleiben die Maximalwerte der Differenzen sehr konstant in der Größenordnung von 60N. Die Detailauswertungen haben bereits gezeigt, dass bei den Z-Kräften die Signalendwerte sehr gut gemessen werden und die maximalen Abweichungen meist bei den starken An- bzw. Abstiegen der Signalverläufe auftreten. Diese Charakteristik zeigt sich über die gesamte Versuchsreihe.

Die zusammenfassende Auswertung der Momente bei den Versuchen mit +45° Kopfverdrehung ist in Abbildung 28 dargestellt. Aus den Detailauswertungen der Pendelversuche wurden wiederum die Maximalwerte der Differenzen (roter Verlauf) sowie des berechneten Momentenverlaufs (grüner Verlauf) zusammengefasst. Die Maximalwerte der Differenzen betragen 3-5Nm und es kann kein wesentlicher Anstieg der Differenzen mit zunehmender Belastung erkannt werden. Mit zunehmendem Pendel-Initialwinkel steigt das Belastungsniveau bei den Momenten um die Y-Achse etwas stärker an als bei den Momenten um die X-Achse.

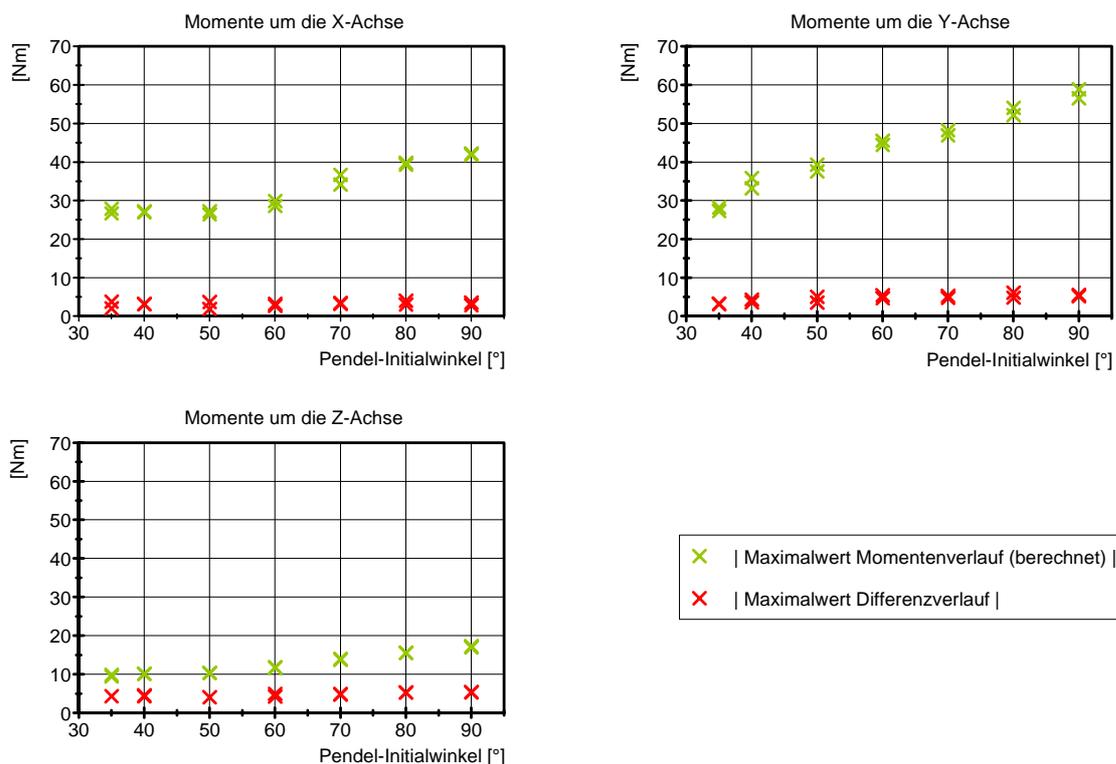


Abbildung 28: Zusammenfassung der Differenzen der Momente (Kopfverdrehung +45°, Pendelversuche 35 - 90°)

Die Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Momenten um die Z-Achse haben aufgrund der sehr geringen Messwerte nur eine begrenzte Aussagekraft. Die maximalen Abweichungen liegen zwar konstant bei 5Nm, jedoch bei sehr kleinen Messwerten von nur 10-20Nm.

Abschließend wird noch zusätzlich veranschaulicht, inwieweit der Messbereich der Upper-Neck-Load-Cell bei den Pendelversuchen ausgenutzt wurde. In Tabelle 13 erfolgt eine Gegenüberstellung der maximal gemessenen Kräfte und Momente bei den Pendelversuchen mit den Messbereichswerten (Full-Scale Werten) der Upper-Neck-Load-Cell IF-205. Die Messbereichswerte wurden dem Hersteller-Datenblatt entnommen (Modell 1716, Robert A. Denton, Inc.).

Tabelle 13: Ausnutzung des Messbereichs der Load Cell IF-205 bei den Pendelversuchen (Kopfverdrehung +45°)

Sensorachse	maximale Messwerte bei den Pendelversuchen	Messbereich Load-Cell IF-205 (Full-Scale Werte)
F_x	700 N	8900 N
F_y	600 N	8900 N
F_z	1000 N	13340 N
M_x	40 Nm	282.5 Nm
M_y	60 Nm	282.5 Nm
M_z	15 Nm	282.5 Nm

Kurz zusammengefasst wurde bei den Kräften nur das erste Zehntel des gesamten Messbereichs der Load-Cell genutzt. Bei den Momenten erreichten die Messwerte immerhin das erste Fünftel des gesamten Messbereichs. Die Pendelversuche ohne Kopfverdrehung ergaben etwas höhere Momente um die Y-Achse von circa 100Nm. Dies entspricht in etwa einem Drittel des Messbereichs der Load-Cell. Bei der abschließenden Bewertung und der Aussage zur Übertragbarkeit auf höhere Messbereiche muss dieser Aspekt berücksichtigt werden.

6 Differenzanalyse und Ableitung von möglichen Ursachen

Der Vergleich der berechneten Kräfte und Momente mit den gemessenen Größen hat gezeigt, dass die größten Abweichungen bei den Kräften in X- und Y-Richtung vorliegen. Die weitere Analyse und Ableitung von möglichen Ursachen ist das Ziel dieses Kapitels, wobei der Schwerpunkt auf die Differenzen der Kräfte in X- und Y-Richtung gelegt wird. Die zwei wesentlichen Inhaltspunkte in diesem Kapitel können am besten anhand der Impuls-Gleichung für das System „Dummykopf“ erläutert werden.

Impulssatz zur Berechnung der theoretisch wirkenden Kräfte:

$$\vec{F} = m * \ddot{\vec{x}} \quad (17)$$

Berechnung der Differenzverläufe der Kräfte:

$$\vec{F}_{Differenz} = m * \ddot{\vec{x}} - \vec{F}_{gemessen} \quad (18)$$

Ein erster wesentlicher Abschnitt in diesem Kapitel beschäftigt sich mit dem ersten Teil in Gleichung (18) zur Berechnung der theoretisch wirkenden Kräfte an der oberen Nackenmessstelle. Die relevanten Parameter in dieser Gleichung sind die wirkende Kopfmasse sowie mögliche Abweichungen bei den Beschleunigungssignalen (Skalierungs- und Offset-Abweichungen, ...). Von besonderem Interesse ist dabei die Fragestellung, welchen Einfluss mögliche Ungenauigkeiten dieser Parameter auf die Abweichungen der Kräfte haben. Deshalb erfolgt in einem ersten Schritt die Durchführung einer Einflussanalyse, wobei die wirkende Kopfmasse sowie die Skalierungsfaktoren der Beschleunigungen in gewissen Grenzen variiert werden. Der resultierende Einfluss auf die Differenzverläufe der Kräfte wird schlussendlich ausgewertet.

Anhand dieser Einflussanalyse soll abgeklärt werden, ob die Genauigkeit und Toleranz dieser Parameter bei der Berechnung der Nackenkräfte überhaupt ausreicht, um in weiterer Folge eine aussagekräftige Bewertung der gemessenen Kraftverläufe zu gewährleisten.

Der zweite Abschnitt in diesem Kapitel ist die Analyse der Differenzverläufe hinsichtlich systematischer Abweichungen. Die betrachtete Größe ist dabei $\vec{F}_{gemessen}$ und anhand einfacher Parameter wie Skalierungsfaktoren, Signal-Offset, konstante Querrichtungs-Empfindlichkeiten etc. soll versucht werden, die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Kräften systematisch zu reduzieren. Der Schwerpunkt dieser Analyse wird auf die Kräfte in X- und Y-Richtung gelegt, da hier die größten Differenzen vorliegen.

Das Ziel der Analyse ist die Angabe von Optimierungsparametern, mit denen die Differenzen zwischen den theoretisch berechneten und gemessenen Kräften systematisch reduziert werden können. Anhand der Detailauswertung von zwei Pendelversuchen soll das Potential zur Reduktion der Differenzverläufe gezeigt werden. Gewählt wurde ein Pendelversuch ohne Kopfverdrehung (Kopf gerade) und ein zweiter Versuch mit einer Kopfverdrehung von $+45^\circ$. Der Pendel-Initialwinkel beträgt bei beiden Versuchen 70° und soll ein mittleres Belastungsniveau repräsentieren. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse von mehreren Versuchen soll schließlich zeigen, ob die Optimierung systematische Ergebnisse über die gesamte Versuchsreihe ergibt.

6.1 Einflussfaktoren auf die Abweichungen der Kräfte

Bei den Untersuchungen wurde eine Skalierung der Kopfmasse beziehungsweise der Beschleunigungssignale in gewissen Grenzen vorgenommen und die daraus resultierende Änderung bei den Abweichungen der Kräfte in Diagrammen ausgewertet. Somit kann analysiert werden, ob mögliche Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Kopfmasse beziehungsweise in weiterer Folge bei den durch SimbaV berechneten Optimierungsparametern einen wesentlichen Einfluss auf die Abweichung der Kräfte haben.

6.1.1 Einfluss der Kopfmasse auf die Abweichungen der Kräfte

Besonders schwierig bei den Berechnungen ist die exakte Bestimmung der wirkenden Kopfmasse bis zur Sensorebene der Upper-Neck-Load-Cell. Die wirkende Masse des Dummykopfs ist deshalb so entscheidend, da die Trägheitskräfte beim Pendelversuch die wesentlichen Belastungsgrößen darstellen.

Die Kopfmasse des Hybrid HIII 50% Dummies wird im Hersteller-Datenblatt mit $4.54 \pm 0.05\text{kg}$ angegeben. Dieser Wert beinhaltet die gesamte Kopfmasse inklusive der Load-Cell. Jene Masse der Load-Cell bis zur Sensorebene muss jedoch von der gesamten Kopfmasse abgezogen werden, um die tatsächlich wirkende Kopfmasse bis zur Messstelle zu erhalten. Eine Abschätzung der tatsächlich wirkenden Kopfmasse bis zur Sensorebene der Load-Cell hat einen Wert von 96% der gesamten Kopfmasse ergeben. Die Bestimmung des zu hohen Massenanteils erfolgte durch eine Einzelwiegung der Upper-Neck-Load-Cell sowie durch die Kalkulation der Masse der oberen Sensorplatte.

Für die Einflussanalyse wird ein Skalierungswert der Kopfmasse von 96% angenommen. Zur Vollständigkeit erfolgt auch eine Untersuchung mit einer zu hohen Kopfmasse von 104%. Die Skalierungswerte beziehen sich auf die gesamte Kopfmasse von 4.54kg aus dem Datenblatt. In Abbildung 29 und Abbildung 30 sind die Einflüsse einer Massenskalierung auf die Abweichungen der Kräfte in X- und Z-Richtung für einen Pendelversuch ohne Kopfverdrehung dargestellt.

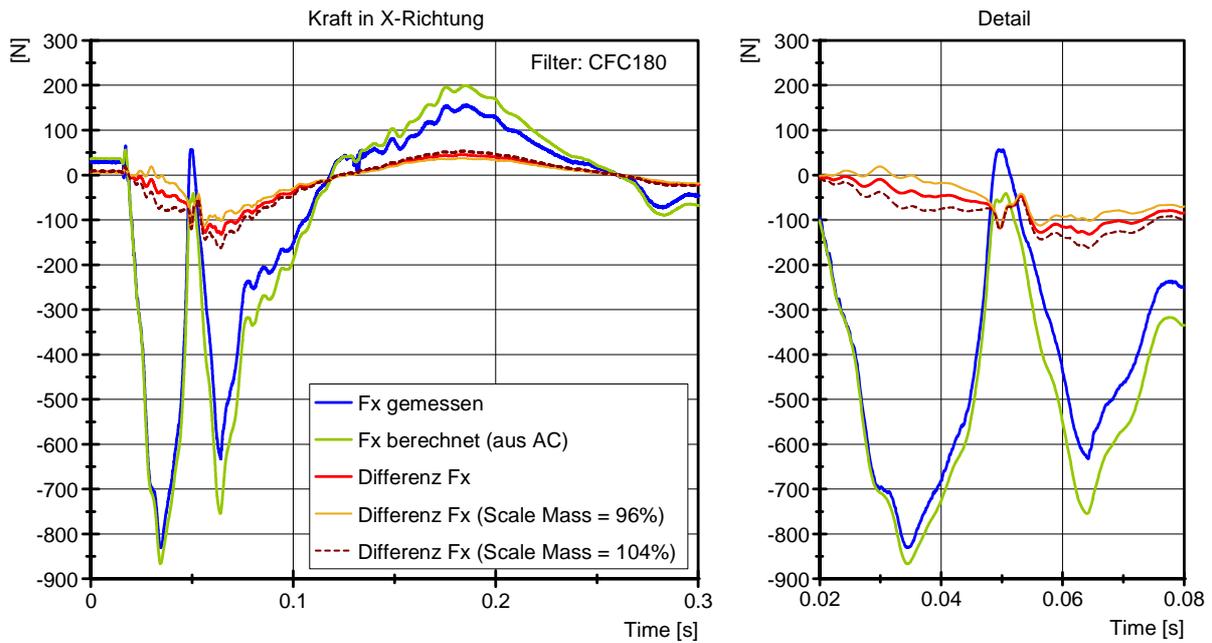


Abbildung 29: Einfluss des Parameters "Scale Mass" auf die Abweichungen der X-Kraft (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)

Der Einfluss einer Massenskalisierung bedeutet prinzipiell eine Skalierung des theoretisch berechneten Kraftverlaufs an der oberen Nackenmessstelle. Somit ergeben sich maßgebliche Änderungen bei den Abweichungen der Kräfte nur bei den größten Signalwerten. Mit einer Skalierung der Masse von 96% ergeben sich über den gesamten Verlauf der Kraft in X-Richtung etwas geringere Differenzwerte. Es kommt auch zu einer Reduktion des Maximalwertes. Die Abschätzung der tatsächlich wirkenden Kopfmasse bis zur Sensorebene bringt somit eine geringfügige Reduktion der Differenzen über den gesamten Verlauf.

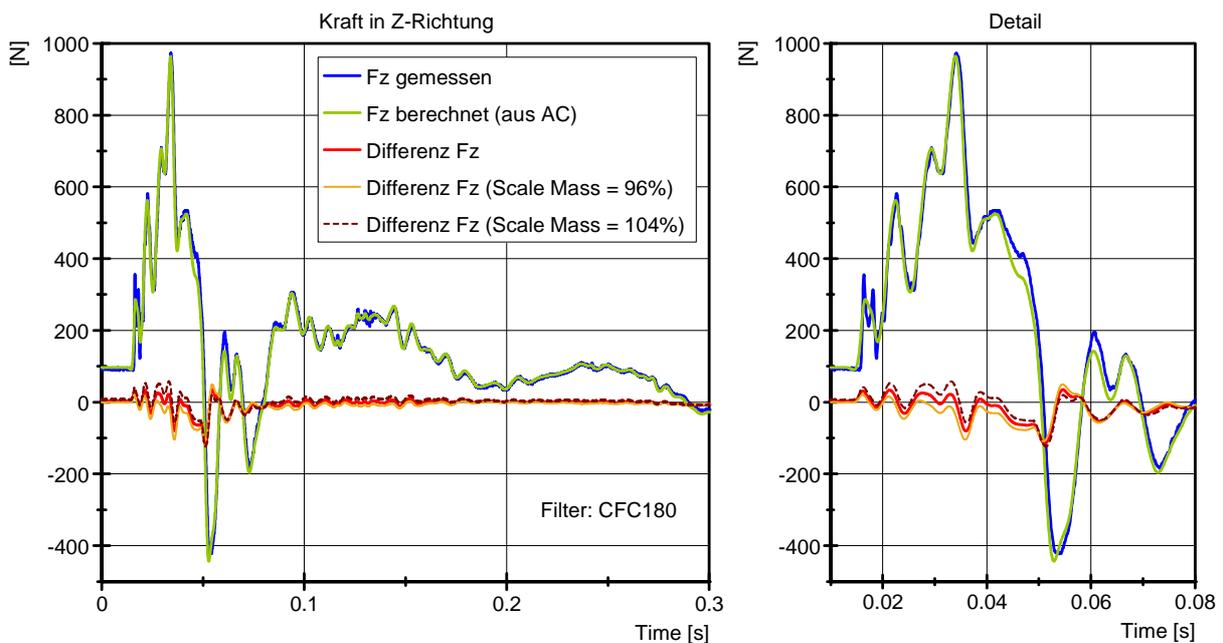


Abbildung 30: Einfluss des Parameters "Scale Mass" auf die Abweichungen der Z-Kraft (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)

Bei den Abweichungen der Kraft in Z-Richtung zeigt eine Massenskalierung von 96% bzw. 104% nur sehr geringe Einflüsse. Das Maximum bei circa 0.05s wird nicht merkbar beeinflusst, da die maximale Differenz bei nur sehr geringen Werten von F_z auftritt und somit eine Skalierung wenig Einfluss zeigt.

6.1.2 Einfluss der Beschleunigungssignale auf die Abweichungen der Kräfte

Für die Berechnung der theoretisch wirkenden Kräfte an der oberen Nackenmessstelle werden die durch SimbaV ermittelten Beschleunigungsverläufe aus der Optimierung der Kopf-Trajektorie verwendet. Als Optimierungsparameter für die Beschleunigungssignale wurden Skalierungsfaktoren sowie Offset-Parameter in allen drei Sensorachsen, also insgesamt sechs Parameter, gewählt.

Die im SimbaV-Optimierungsprozess berechneten Parameterwerte für die Beschleunigungs-Skalierung dürfen aber keineswegs direkt als Sensorfehler interpretiert werden. Zu begründen ist dies aufgrund der Tatsache, dass in dem durchgeführten Optimierungsprozess sicher nicht alle Sensorfehler und Einflüsse abgebildet werden. Die in SimbaV festgelegten Parametergrenzen von 97 bzw. 103% für die Beschleunigungs-Skalierung haben sich in vergangenen Forschungsprojekten bewährt. Anhand dieser Parametergrenzen werden die Einflüsse auf die Berechnung der theoretisch wirkenden Kräfte an der oberen Nackenmessstelle ausgewertet.

Der Einfluss der Skalierungsfaktoren von 97%, 100% und 103% auf die Differenzverläufe der Kräfte ist in Abbildung 31 und Abbildung 32 ersichtlich. Für die Auswertung wurde ein Pendelversuch ohne Kopfverdrehung mit dem Pendel-Initialwinkel von 70° gewählt.

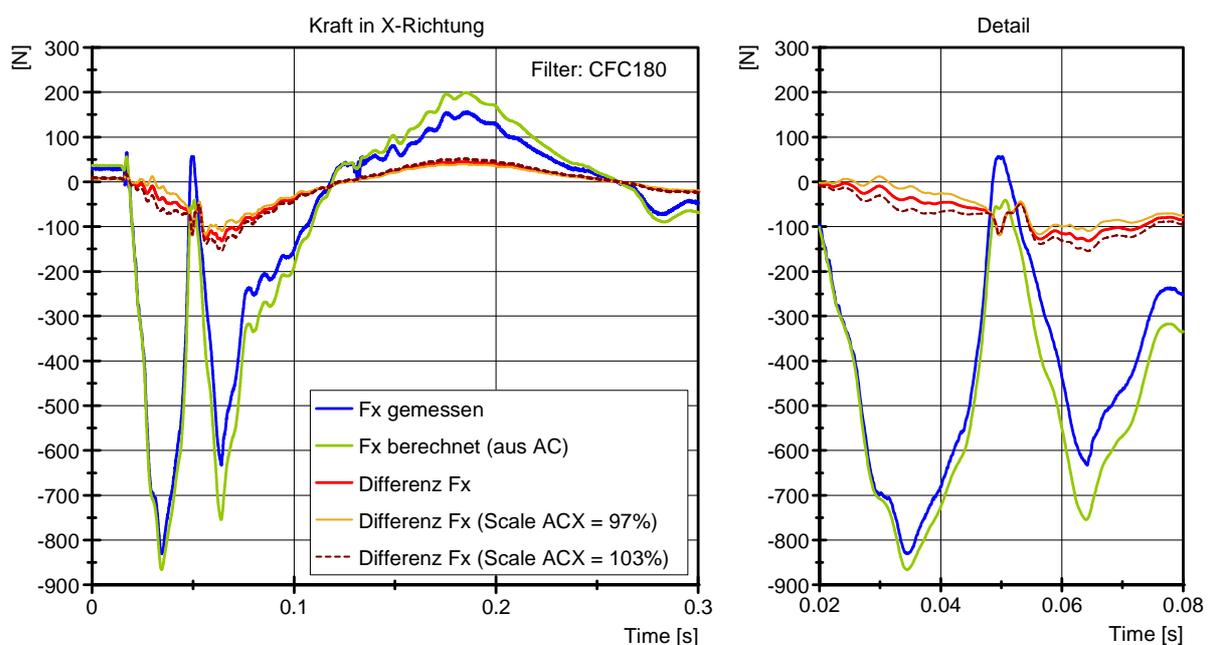


Abbildung 31: Einfluss des Parameters "Scale ACX" auf die Abweichungen der X-Kraft (Versuch 70° , Verdrehung 0° , v9)

Eine Skalierung des Beschleunigungsverlaufs zeigt prinzipiell die gleichen Einflüsse auf die Differenzen der Kräfte wie eine Massenskalierung. Bei der Berechnung der Kräfte anhand des Impulssatzes macht es keinen Unterschied, ob eine Skalierung der Masse oder eine Skalierung der Schwerpunkt-Beschleunigungen vorgenommen wird.

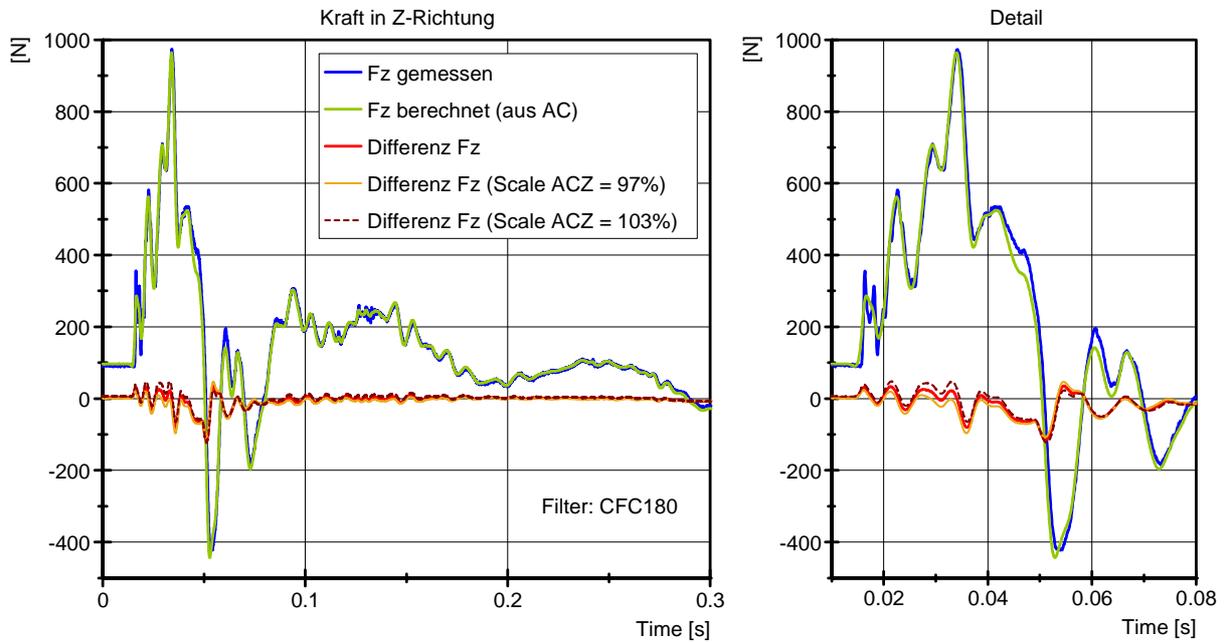


Abbildung 32: Einfluss des Parameters "Scale ACZ" auf die Abweichungen der Z-Kraft (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)

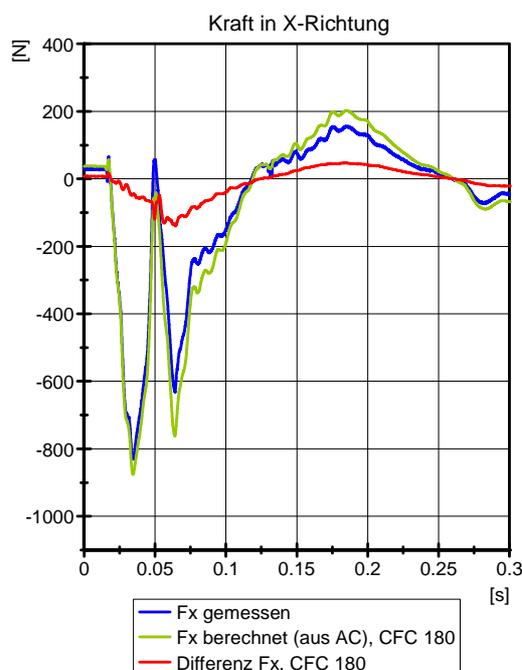
6.2 Modellierung zur Analyse der Abweichungen der Kräfte

Die Auswertungen der Pendelversuche haben gezeigt, dass die größten Abweichungen zwischen den theoretisch berechneten und gemessenen Kräften in X- und Y-Richtung vorliegen. Die Differenzen bei den Z-Kräften sowie bei den Momenten um die X- und Y-Achse sind deutlich geringer. Bei den Momenten um die Z-Achse können aufgrund der sehr geringen Messwerte keine aussagekräftigen Bewertungen gemacht werden.

Aufgrund der großen und vor allem systematischen Differenzen bei den Kräften in X- und Y-Richtung bilden diese beiden Größen den Schwerpunkt der weiteren Analyse. Anhand von Gleichung (19) kann die Vorgangsweise bei der Modellierung sehr einfach erläutert werden. Der erste Teil der Gleichung wurde bereits im vorherigen Kapitel behandelt, um die Einflüsse der Kopfmasse beziehungsweise der Beschleunigungssignale auf die Differenzverläufe der Kräfte zu analysieren.

$$\vec{F}_{Differenz} = m * \ddot{\vec{x}} - \vec{F}_{gemessen} \quad (19)$$

In diesem Kapitel wird die gemessene Größe betrachtet und mit einem einfachen Modell sollen systematische Abweichungen zwischen den theoretisch berechneten und gemessenen Kräften in X- und Y-Richtung gefunden werden. Aus den bisherigen Erkenntnissen der Auswertungen sollen relevante Parameter für die Modellierung der Abweichungen definiert werden. In Abbildung 33 sind die Kraftverläufe in X-Richtung eines Pendelversuchs dargestellt und prinzipiell mögliche Abweichungen angeführt.



Mögliche Abweichungen:

- Skalierungs-Abweichungen
- Offset-Abweichungen
- Nichtlinearitäten
- Hysterese-Effekte
- Querrichtungs-Empfindlichkeiten
- ...

Abbildung 33: mögliche Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Kräften

Der Verlauf der Differenzen deutet in erster Linie auf Skalierungs-Effekte hin. Außerdem stimmen die Nulldurchgänge des Differenzverlaufs mit den Nulldurchgängen der Messgröße

gut überein. Besonders auffällig sind aber die deutlichen Unterschiede bei der Messung der beiden ersten Signal-Peaks. Während der erste Peak gut erfasst wird, liegen die Messwerte bei der zweiten Signalspitze deutlich unterhalb des theoretisch berechneten Kraftverlaufs.

Prinzipiell mögliche Ursachen für diese Abweichungen könnten Nichtlinearitäten, Hysterese-Effekte oder auch Querrichtungs-Empfindlichkeiten sein. Eine mögliche Nichtlinearität sollte aber beide Signal-Peaks in ähnlicher Weise betreffen. In den Kalibrierprotokollen sind zudem sehr geringe Werte von unter 1%, bezogen auf den Full-Scale Wert, für das nichtlineare Verhalten angegeben. Die mathematische Beschreibung von Nichtlinearitäten sowie von Hysterese-Effekten ist im Allgemeinen sehr schwierig und wird hier nicht näher betrachtet.

Mit der Upper-Neck-Load-Cell werden insgesamt sechs Größen (Kräfte und Momente) in einer einzigen Sensoreinheit gemessen. Deshalb kann auch der Einfluss einer anderen Messgröße auf die Kraftmessung vermutet werden, beispielsweise der Einfluss eines wirkenden Moments auf die Messung der Kräfte. Häufig werden diese Querrichtungs-Effekte auch in den Kalibrierprotokollen in sogenannten Crosstalk-Tabellen anhand von Prozentangaben zusammengefasst und beziehen sich meist auf den maximalen Messwert (Full-Scale Wert). Das Verhalten dieser Querrichtungs-Empfindlichkeiten über den gesamten Messbereich und besonders bei kleinen Messwerten ist jedoch weitgehend unbekannt.

Aus diesen genannten und prinzipiell möglichen Abweichungen werden für die Modellierung jene Ursachen gewählt, die in erster Linie eine einfache mathematische Beschreibung zulassen. Die Modellierung erfolgt mit Parametern für eine Skalierungs-Abweichung sowie für konstante Querrichtungs-Empfindlichkeiten.

Bevor das Modell für die Kräfte mathematisch definiert wird, erfolgt noch eine kurze theoretische Beschreibung von Skalierungs-Abweichungen und Querrichtungs-Empfindlichkeiten.

6.2.1 Skalierungs-Abweichungen

Eine Skalierungs-Abweichung resultiert aus dem nicht korrekten Verstärkungsverhalten der Messeinrichtung. Die relative Messabweichung, die durch diesen Fehlertyp verursacht wird, ist über den gesamten Messbereich konstant. [6, 2008, p. 80]

Der schematische Verlauf einer Skalierungs-Abweichung wurde bereits in Kapitel 4.2.2.2 in Abbildung 15 dargestellt.

6.2.2 Querrichtungs-Empfindlichkeiten

Der unerwünschte Effekt der Querrichtungs-Empfindlichkeit eines Sensors kann durch die nicht exakte Ausrichtung der größten Sensorempfindlichkeit erklärt werden. Im Allgemeinen deckt sich die Richtung der größten Sensorempfindlichkeit nicht immer exakt mit der nominellen Messrichtung eines realen Sensors. Die nominelle Messrichtung eines Sensors ist dabei die Soll-Messrichtung, in der die entsprechende Messgröße (Beschleunigung, Kraft, ...) gemessen werden soll. Der Effekt der Querrichtungs-Empfindlichkeit kann daher dazu führen, dass vom Sensor Messgrößen (Beschleunigungen, Kräfte, ...) in Messrichtung (nominelle Achse) ausgegeben werden, obwohl in Wirklichkeit keine Größen in dieser Richtung wirken. In Abbildung 34 ist die Wirkungsweise der Querrichtungs-Empfindlichkeit anschaulich in vektorieller Form dargestellt. [2, 2006, p. 141]

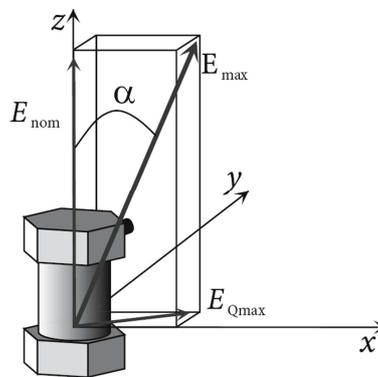


Abbildung 34: vektorielle Beschreibung der Querrichtungs-Empfindlichkeit von Sensoren [2, 2006, p. 141]

Der Vektor E_{max} definiert dabei die Richtung der größten Sensorempfindlichkeit und kann in die beiden Vektorkomponenten E_{nom} und E_{Qmax} zerlegt werden.

$$|E_{nom}| = S = |E_{max}| * \cos \alpha \quad (20)$$

$$|E_{Qmax}| = E_{Qmax} = |E_{max}| * \sin \alpha$$

Mit dem Betrag von E_{nom} wird die Sensorempfindlichkeit (Sensitivity S) für die nominale Messrichtung definiert und der Betrag von E_{Qmax} ist ein Maß für die Querrichtungs-Empfindlichkeit, das heißt eine physikalische Messgröße wirkt senkrecht zur Messachse. Der Betrag von E_{Qmax} definiert dabei das Verhältnis der Ausgangsgröße des Sensors zu einer wirkenden Messgröße senkrecht zur nominellen Messachse in Richtung des Vektors E_{Qmax} . [2, 2006, p. 141f]

Zur Bewertung der Querrichtungs-Empfindlichkeit wird häufig das Verhältnis von E_{Qmax} zur Sensorempfindlichkeit S herangezogen und in Prozent angegeben. Die Größenordnung dieses Wertes ist in der Literatur für gute Sensoren mit dem Wert von 3% beziffert. [2, 2006, p. 142]

$$E_{Qmax \%} = \frac{E_{Qmax}}{S} * 100\% = \tan \alpha * 100\% \quad (21)$$

Als Ursachen der Querrichtungs-Empfindlichkeit sind in erster Linie die geforderten Toleranzen bei der Fertigung, Platzierung und Ausrichtung der Sensorelemente innerhalb des Sensors zu nennen. Bei piezoelektrischen Sensoren kommen zusätzlich noch Polarisationsfehler der piezoelektrischen Elemente vor. [2, 2006, p. 141]

6.2.3 Definition des Modells zur systematischen Analyse der Abweichungen

Zur systematischen Analyse der Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Kraftverläufen erfolgt eine Modellierung mit den Parametern für eine Skalierungs-Abweichung sowie für konstante Querrichtungs-Empfindlichkeiten. Die Definition des Modells mit den gewählten Parametern ist in Gleichung (22) ersichtlich.

Modellierung der Abweichungen der Kräfte in X-Richtung:

$$F_{x \text{ Differenz}} = m * \ddot{x} - F_{x \text{ gemessen}}$$

$$F_{x \text{ Differenz}} = m * \ddot{x} - (S_{Fx} * F_{x \text{ gem.}} + CS_{Mx \rightarrow Fx} * M_{x \text{ gem.}} + CS_{My \rightarrow Fx} * M_{y \text{ gem.}} + \dots) \quad (22)$$

Parameter:

S_{Fx} ... Skalierungsfaktor F_x

$CS_{Mx \rightarrow Fx}$... Cross Sense (Einfluss von M_x auf F_x) [N/Nm]

$CS_{My \rightarrow Fx}$... Cross Sense (Einfluss von M_y auf F_x) [N/Nm]

Die Modellierung der Querrichtungs-Empfindlichkeiten erfolgt mit konstanten Faktoren und ist in Gleichung (22) ersichtlich. Mit dieser Modellierung wird ein linearer Anteil einer gemessenen Größe, beispielsweise des Moments M_y , zur Kraft F_x addiert beziehungsweise subtrahiert. Bei den Pendelversuchen ohne Kopfverdrehung reduziert sich das Modell auf einen einzigen Cross-Sense Faktor bei den Momenten, da relevante Momente nur um die Y-Achse auftreten. Die Modellierung der Abweichungen der Kräfte in Y-Richtung erfolgt in analoger Weise.

Modellierung der Abweichungen der Kräfte in Y-Richtung:

$$F_{y \text{ Differenz}} = m * \ddot{y} - F_{y \text{ gemessen}}$$

$$F_{y \text{ Differenz}} = m * \ddot{y} - (S_{F_y} * F_{y \text{ gem}} + CS_{M_x \rightarrow F_y} * M_{x \text{ gem}} + CS_{M_y \rightarrow F_y} * M_{y \text{ gem}} + \dots) \quad (23)$$

Parameter:

S_{F_y} ... Skalierungsfaktor F_y

$CS_{M_x \rightarrow F_y}$... Cross Sense (Einfluss von M_x auf F_y) [N/Nm]

$CS_{M_y \rightarrow F_y}$... Cross Sense (Einfluss von M_y auf F_y) [N/Nm]

Durch die Variation der gewählten Parameter wird nun versucht, die Abweichungen der Kräfte in X- und Y-Richtung systematisch zu reduzieren und das Minimum zu finden. Als Bewertungskriterium bei diesem Optimierungsprozess werden die integrierten Fehlerquadrate des Differenzverlaufs der Kraft herangezogen.

Die Ergebnisse der Modellierung werden anhand der Detailauswertung von zwei Pendelversuchen gezeigt. Von Bedeutung sind in erster Linie die gefundenen Parameterwerte, mit denen die geringsten Differenzen der Kräfte erreicht werden. In weiterer Folge wird auch das Reduktionspotential der Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Werten durch diese einfache Modellierung aufgezeigt. Eine Zusammenfassung der Auswertungen von mehreren Pendelversuchen soll schlussendlich zeigen, ob die gefundenen Parameter systematische Werte über die gesamte Versuchsreihe ergeben.

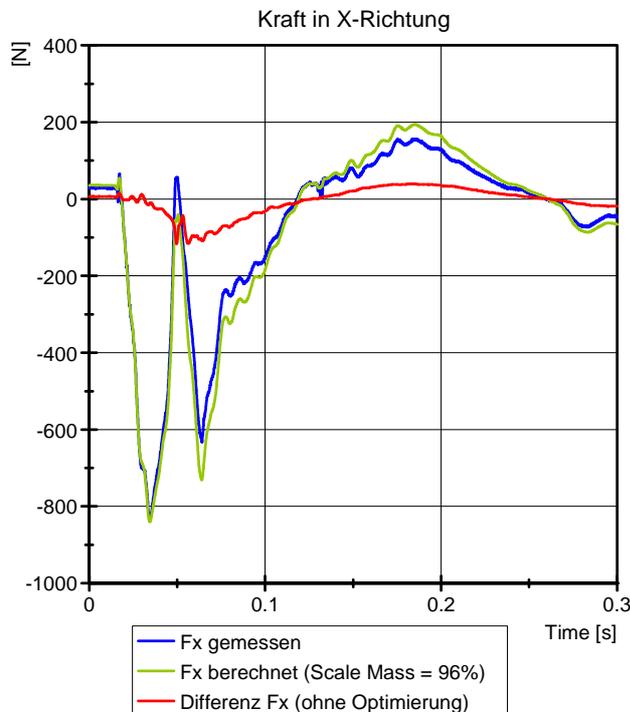
6.3 Detailauswertung (Optimierung der X-Kräfte)

6.3.1 Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung 0°, Versuch 9)

Am Beispiel eines Pendelversuchs ohne Kopfverdrehung wird die Anwendung des Modells zur Analyse des Differenzverlaufs der X-Kraft gezeigt. Bei den Pendelversuchen ohne Kopfverdrehung sind die relevanten Belastungen auf den Dummykopf Kräfte in X- und Z-Richtung sowie ein Moment um die Y-Achse. Der Vergleich der gemessenen Kräfte und Momente mit den berechneten Vergleichsgrößen in Kapitel 5 hat gezeigt, dass die größten Differenzen bei den Kräften in X-Richtung vorliegen.

Der Differenzverlauf der X-Kraft ist in Abbildung 35 dargestellt und bildet die Ausgangsbasis für die Analyse der systematischen Abweichungen. Im Vergleich zu Kapitel 5 wurde lediglich eine Skalierung der Kopfmasse von 96% vorgenommen. Mit diesem Skalierungswert erfolgt eine Abschätzung der tatsächlich wirkenden Kopfmasse bis zur Sensorebene, an der die

Messung der Kräfte und Momente erfolgt. Die Vorgangsweise bei der Abschätzung der tatsächlich wirkenden Kopfmasse wurde bereits in Kapitel 6.1.1 erläutert. In Kapitel 5 wurde mit einer Kopfmasse (inklusive der gesamten Load-Cell) von 4.54kg gerechnet. Somit erfolgte eine etwas zu hohe Annahme der tatsächlich wirkenden Kopfmasse.



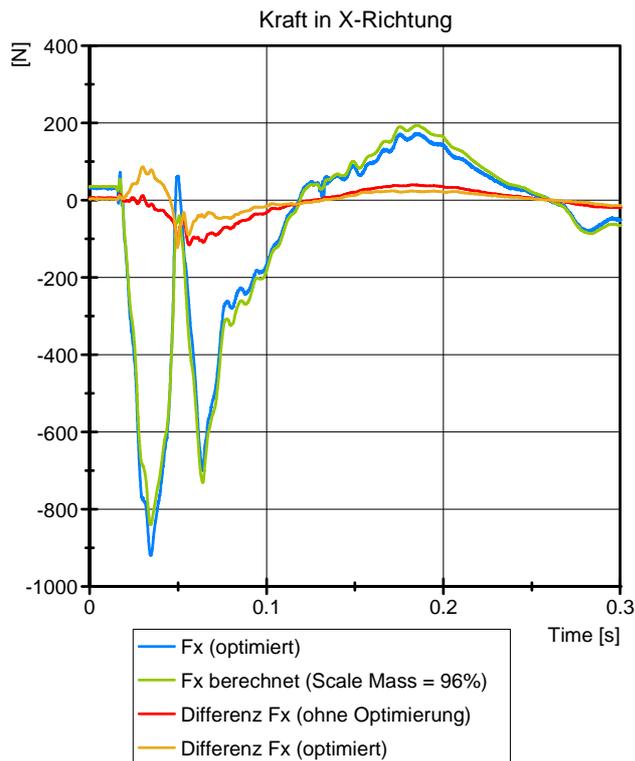
Ohne Optimierung:

- Massenskalierung: 96%
- maximale Differenz F_x : -116.5N

Abbildung 35: Abweichungen der X-Kraft ohne Optimierung (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)

Der Differenzverlauf deutet in erster Linie auf Skalierungs-Abweichungen hin. Deshalb erfolgt in einem ersten Schritt die Optimierung des Verlaufs mit einer Skalierung der gemessenen Kraft als einzigen Optimierungsparameter. Die Ergebnisse dieser ersten Optimierung sind in Abbildung 36 dargestellt.

Der ursprüngliche Differenzverlauf wird weiterhin in Rot dargestellt und mit den berechneten Parameterwerten der Optimierung ergibt sich der Verlauf in Orange.



Optimierung 1:

- Scale $F_x = 110.66\%$
- Bereich der Optimierung: 0 bis 0.3s
- maximale Differenz F_x : -122.74N

Abbildung 36: Abweichungen der X-Kraft, Optimierung 1 (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)

Mit einer Skalierung der gemessenen X-Kraft von 110.66% ergeben sich die geringsten integrierten Fehlerquadrate. Die Optimierung mit einer Skalierung als einzigen Parameter ergibt jedoch keine Reduktion des maximalen Differenzwertes. Der Maximalwert erhöht sich sogar geringfügig auf -122.74N.

Für die weitere Analyse des Differenzverlaufs nach dieser ersten Optimierung wurde eine Korrelationsanalyse mit anderen Sensorgrößen durchgeführt. Der Differenzverlauf im Zeitbereich von 0.04 bis 0.1s lässt vermuten, dass möglicherweise eine andere Sensorgröße einen Einfluss auf die Kraftdifferenz in X-Richtung zeigt. Die einzigen relevanten Belastungsgrößen bei den Versuchen ohne Kopfverdrehung sind neben der Kraft F_x die Größen F_z und M_y . In Abbildung 37 ist der Verlauf des Moments M_y und der Differenzverlauf der X-Kraft nach der Optimierung ersichtlich.

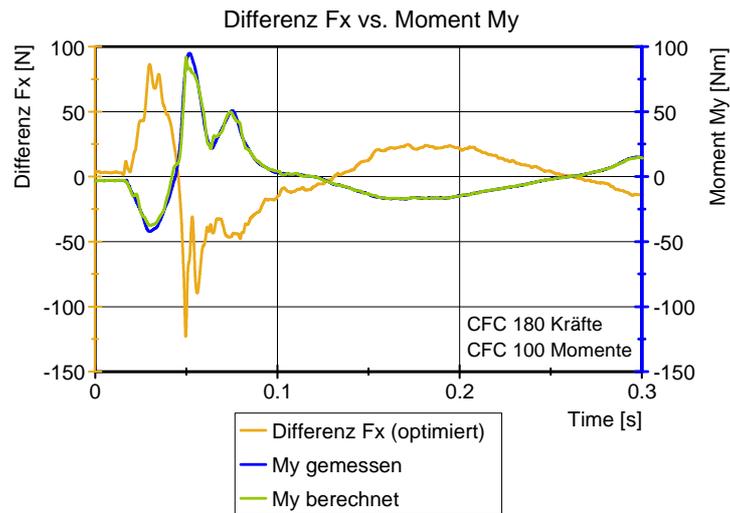
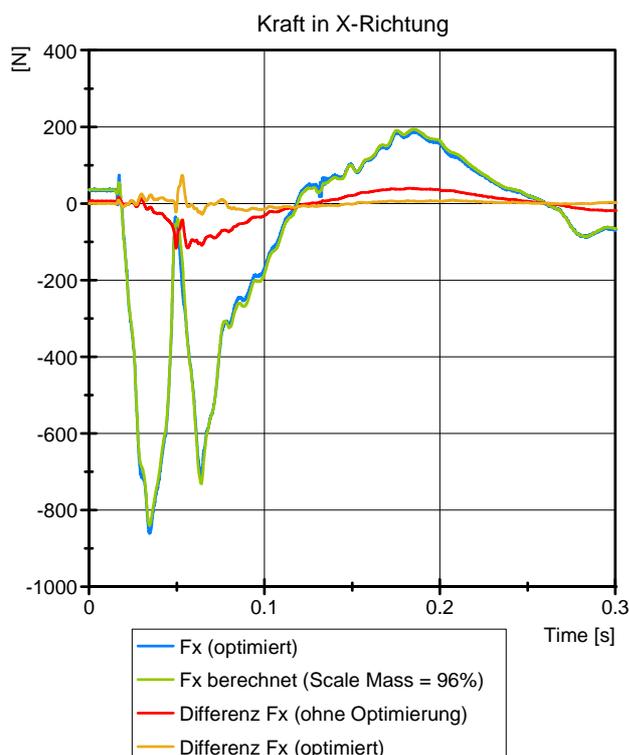


Abbildung 37: Differenz F_x vs. Moment M_y , Optimierung 1 (Versuch 70° , Verdrehung 0° , v9)

Die Darstellung dieser beiden Verläufe in einem Diagramm zeigt eine eindeutige Korrelation zwischen dem Verlauf von M_y und dem Differenzverlauf der X-Kraft nach der Optimierung (orange). Auch bei den Nulldurchgängen der beiden Verläufe kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden.

Mit diesen Erkenntnissen wird die Optimierung des Differenzverlaufs mit einem weiteren Parameter durchgeführt. Neben einem Skalierungsfaktor für die gemessene Kraft F_x wird versucht, auch die Querrichtungs-Effekte des Moments M_y durch einen Parameter zu berücksichtigen. Dabei erfolgt eine Skalierung des gemessenen Moments M_y mit einem konstanten Faktor und anschließend wird der Verlauf zur gemessenen Kraft F_x addiert bzw. subtrahiert. In Kapitel 6.2.3 wurde das Modell bereits mathematisch beschrieben.



Optimierung 2:

- Scale $F_x = 108.92\%$
- CS $M_y \rightarrow F_x = -116.95 \text{ N}/100\text{Nm}$
- Bereich der Optimierung: 0 bis 0.3s
- maximale Differenz F_x : 73.5N
- maximale Differenz F_x : 28.1N
(ohne Signalspitze)

Abbildung 38: Abweichungen der X-Kraft, Optimierung 2 (Versuch 70° , Verdrehung 0° , v9)

Mit den gefundenen Ergebnissen der Optimierung kann eine deutliche Reduktion des Differenzverlaufs der X-Kraft erreicht werden. Besonders im Zeitbereich von 0.04 bis 0.1s konnte im Vergleich zur vorherigen Optimierung eine wesentliche Verbesserung erzielt werden. Das Minimum wurde bei Scale $F_x = 108.92\%$ und Cross-Sense $M_y \rightarrow F_x = -116.95 \text{ N}/100\text{Nm}$ erreicht. Die im Optimierungsprozess berechneten Parameterwerte dürfen, wie schon im vorangegangenen Kapitel erwähnt, nicht direkt als physikalische Sensorfehler interpretiert werden. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass für die Analyse der Differenzverläufe ein sehr einfaches mathematisches Modell angewendet wurde. Mit den verwendeten Parametern werden keineswegs alle Abweichungsursachen und Einflüsse im Modell abgebildet und somit sind die ermittelten Parameterwerte, nicht zuletzt auch zusätzlich aufgrund von möglichen Parameterkorrelationen, physikalisch nicht korrekt. Im Kalibrierprozess werden wesentlich höhere Genauigkeiten erreicht und das Optimierungsergebnis muss an dieser Stelle richtig interpretiert werden.

Mit Ausnahme der einzigen Signalspitze von 75N befindet sich der gesamte Differenzverlauf nach dem Optimierungsprozess in einem Toleranzband von circa $\pm 25\text{N}$. Somit wurde eine wesentliche Reduktion des Differenzverlaufs durch die Anwendung dieses einfachen Modells mit zwei Optimierungsparametern erreicht. Zur Einstufung der Größenordnung der Differenzwerte von $\pm 25\text{N}$ wird abschließend noch die theoretisch mögliche Sensorauflösung der Load-Cell IF-205 bei der Messung von F_x angeführt. Ein Messbereich von 8900N ergibt bei einer 16bit A/D-Wandlung eine theoretische Quantisierungsstufe von 0.136N. Somit liegen die Restabweichungen nach dem Optimierungsprozess noch deutlich über der theoretisch möglichen Sensorauflösung der Upper-Neck-Load-Cell IF-205. Dies deutet darauf hin, dass es noch relevante Abweichungsursachen und Einflüsse gibt, welche im angeführten Modell derzeit noch nicht korrekt abgebildet beziehungsweise berücksichtigt werden. Dies lässt in weiterer Folge darauf schließen, dass die berechneten Parameterwerte grundsätzlich physikalisch nicht korrekt sind.

Es wird noch angemerkt, dass bei den Berechnungen die Kräfteverläufe mit einer Filterklasse CFC 180 und die Momentenverläufe mit einer Filterklasse CFC 100 gefiltert wurden.

Plausibilisierung der mathematischen Optimierungslösung

Das Minimum der integrierten Fehlerquadrate wurde mit den beiden Parameterwerten Scale $F_x = 108.92\%$ und Cross Sense $M_y \rightarrow F_x = -116.95 \text{ N}/100\text{Nm}$ gefunden. Zur Plausibilisierung der mathematischen Lösung wurden die beiden Parameter im Bereich der gefundenen Lösung variiert, die integrierten Fehlerquadrate berechnet und anschließend grafisch dargestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 39 ersichtlich.

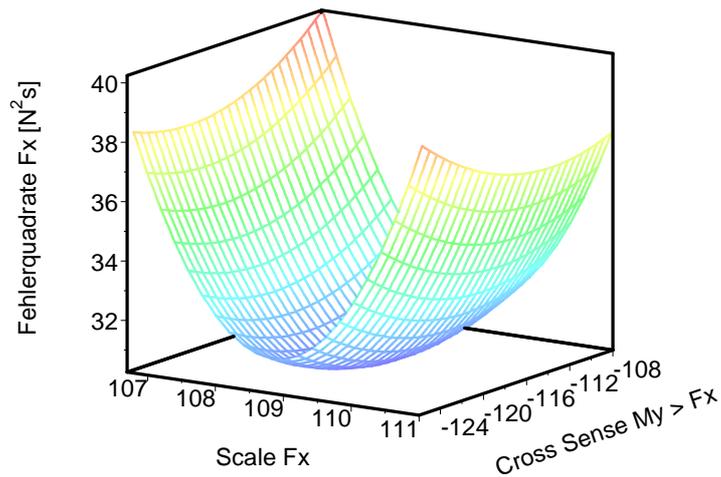


Abbildung 39: Plausibilisierung der mathematischen Optimierungslösung, Optimierung 2 (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)

Aus Abbildung 39 ist ersichtlich, dass es in dem untersuchten Bereich nur eine Lösung gibt. Somit ist mathematisch gesehen die gefundene Lösung jene, die als richtig angesehen werden sollte. Wenn die ermittelten Parameterwerte mit den Kalibrierungen verglichen werden, kann die Lösung eigentlich nicht stimmen. Die Tatsache, dass die Fehlerquadrate beim Minimum nicht Null sind, muss nicht zwangsläufig falsch sein, da ja auch die ermittelten und in dieser Untersuchung verwendeten theoretischen Kraft- und Momentenverläufe fehlerbehaftet sind. Aufgrund dessen sind alle Interpretationen, die auf diesen Größen beruhen, kritisch zu betrachten. Diese Aspekte müssen in zukünftigen Untersuchungen genauer betrachtet werden.

Zusammenfassung der Optimierung

Die Ergebnisse der Optimierung haben Skalierungs-Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Kräften in X-Richtung sowie eine deutliche Korrelation des Differenzverlaufs mit den Y-Momenten ergeben. In Abbildung 40 sind die optimierten Differenzverläufe der X-Kraft, ausgehend vom ursprünglichen Verlauf, zusammengefasst.

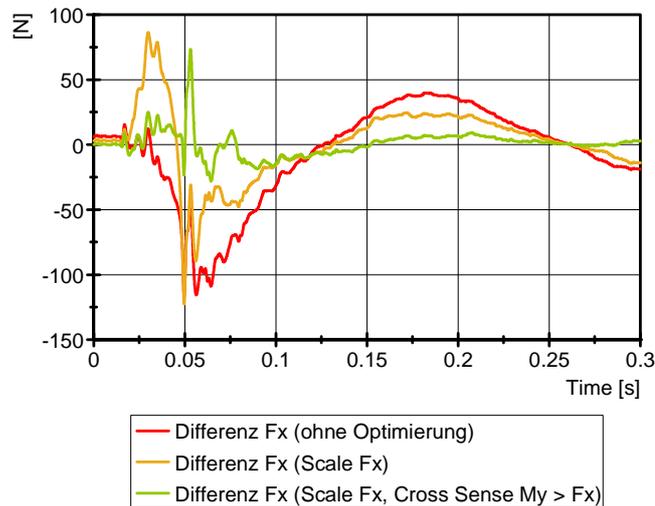


Abbildung 40: Zusammenfassung der optimierten Differenzverläufe F_x (Versuch 70° , Verdrehung 0° , v9)

Die Differenzverläufe zeigen, dass mit einer Skalierung der gemessenen Kraft als einzigem Parameter zwar die integrierten Fehlerquadrate des Verlaufs reduziert werden, jedoch eine Reduktion des Differenzverlaufs zwischen den berechneten und gemessenen Werten im Wesentlichen nicht erfolgt. Der Verlauf weist in etwa die gleichen Maximalwerte auf.

Erst eine weitere Optimierung mit einem zweiten Parameter für die Querrichtungs-Empfindlichkeit $M_y \rightarrow F_x$ führt zu einer deutlichen Reduktion der Abweichungen. Mit Ausnahme der einzigen Signalspitze von 75N weist der restliche Verlauf nur Abweichungen von $\pm 25\text{N}$ auf. Mit einer einfachen Modellierung mit nur zwei Parametern konnte somit eine merkliche Reduktion der Differenzverläufe erzielt werden.

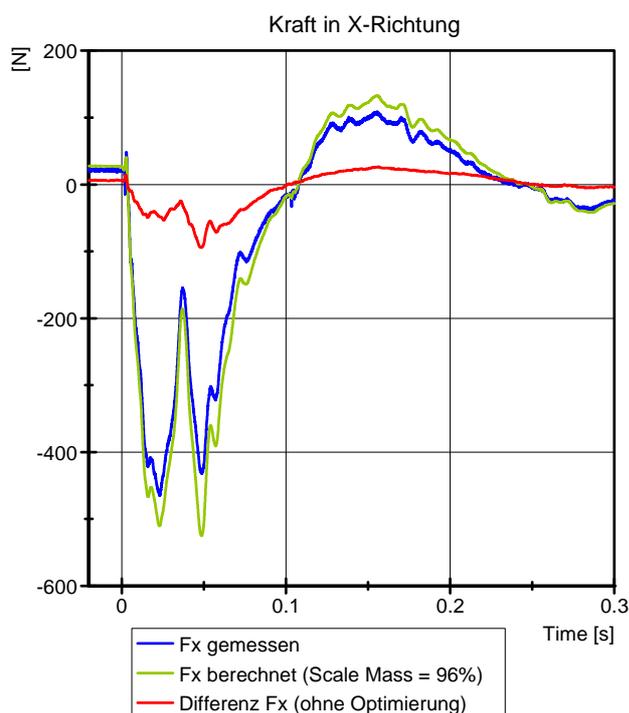
Der Wert von $-116.95\text{ N}/100\text{ Nm}$ erscheint auf den ersten Blick sehr hoch. Bezogen auf den Messendwert (Full-Scale Wert) ergibt dies jedoch einen Prozentsatz von 3.71%. Im Hersteller-Datenblatt der Load-Cell des Typs 1716 (siehe Anhang) sind mögliche Abweichungen infolge von Querrichtungs-Empfindlichkeiten mit $\leq 5\%$ vom Messendwert (Full-Scale Wert) angegeben. [9] Das Ergebnis der Optimierung für die Querrichtungs-Empfindlichkeit $M_y \rightarrow F_x$ liegt somit innerhalb der möglichen Toleranzangabe des Sensor-Herstellers. Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich die Werte für mögliche Querrichtungs-Empfindlichkeiten von Sensor zu Sensor unterscheiden und es sich somit um sensorspezifische Eigenschaften handelt. Inwieweit sich die Querrichtungs-Effekte beim gleichen Sensor von Versuch zu Versuch verändern, kann durch die Auswertung einer einzigen Versuchsreihe jedoch nicht analysiert werden.

6.3.2 Detailauswertung (Pendelversuch 70°, Kopfverdrehung +45°, Versuch 9)

Die systematische Analyse des Differenzverlaufs zwischen der berechneten und gemessenen X-Kraft wird bei der zweiten Detailauswertung für einen Pendelversuch mit Kopfverdrehung durchgeführt. Von Interesse ist vor allem, ob sich die Erkenntnisse auch bei seitlichen Belastungen der Load-Cell bestätigen. Bereits zu Beginn der Auswertung wird angemerkt, dass bei den beiden Versuchsreihen (Kopf gerade und Kopf verdreht) zwei unterschiedliche, aber baugleiche Load-Cells vom Typ IF-205 verwendet wurden.

Durch eine Kopfverdrehung von +45° ergeben sich relevante Kräfte auf die Load-Cell in X-, Y- und Z-Richtung sowie Momente um die X- und Y-Achse. Aus den Auswertungen in Kapitel 5 ist bereits bekannt, dass die größten Differenzen bei den Querkräften F_x und F_y der Load-Cell vorliegen. Die Ergebnisse der Differenzanalyse werden nachfolgend für die Abweichungen der Kraft in X-Richtung angeführt.

Der ursprüngliche Verlauf der gemessenen X-Kraft bildet wiederum die Ausgangsbasis für die Analyse der Abschätzung systematischen Abweichungen und ist in Abbildung 41 dargestellt. Mit einer Massenskalierung von 96% erfolgt die Abschätzung der tatsächlich wirkenden Kopfmasse bis zur Sensorebene der Load-Cell.



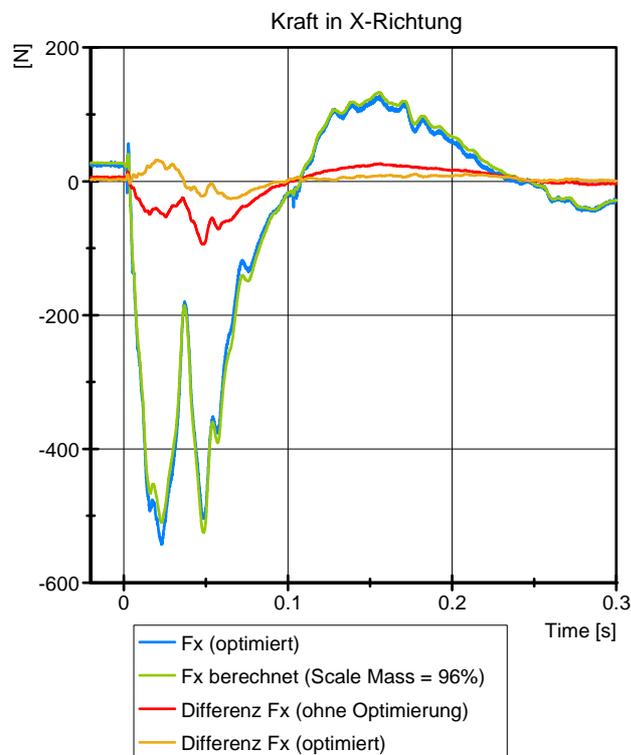
Ohne Optimierung:

- Massenskalierung: 96%
- maximale Differenz F_x : -94.1N

Abbildung 41: Abweichungen der X-Kraft ohne Optimierung (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)

Wie schon bei den Versuchen ohne Kopfverdrehung sind auch hier deutliche Skalierungsabweichungen zu erkennen. Deshalb erfolgen in einem ersten Schritt wiederum Untersuchungen mit einer Skalierung des gemessenen Kraftverlaufs als einzigen Optimierungsparameter.

Die Ergebnisse der Optimierung sind in Abbildung 42 ersichtlich und im Vergleich zum ursprünglichen Differenzverlauf (rot) führt dieser Optimierungsschritt bereits zu einer deutlichen Reduktion der Abweichungen (orange).



Optimierung 1:

- Scale $F_x = 116.73\%$
- Bereich der Optimierung: 0 bis 0.3s
- maximale Differenz F_x : 31.63N

Abbildung 42: Abweichungen der X-Kraft, Optimierung 1 (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)

Mit einer Skalierung des gemessenen Kraftverlaufs von 116.73% kann der Differenzverlauf der X-Kraft bereits auf circa +/- 30N reduziert werden. Der im Optimierungsprozess berechnete Parameterwert von 116.73% für die Skalierung des Kraftverlaufs ist sehr kritisch zu betrachten und darf wiederum nicht direkt als physikalischer Sensorfehler interpretiert werden. Die wesentlich höhere, erreichbare Kalibriergenauigkeit lässt darauf schließen, dass die Lösung eigentlich nicht plausibel ist. Mit der betrachteten, sehr vereinfachten Modellierung und den im Allgemeinen fehlerbehafteten Eingangsgrößen bei der theoretischen Berechnung der Kräfte ergibt sich das Minimum der integrierten Fehlerquadrate mit dem angegebenen Skalierungswert.

Zur Analyse der Restsystematiken des Differenzverlaufs erfolgt eine Korrelationsanalyse mit anderen Sensorgrößen der Load-Cell. Der optimierte Verlauf der X-Kraft wird den beiden Momenten um die X- bzw. Y-Achse gegenübergestellt. Die seitliche Belastungssituation bei den Versuchen mit Kopfverdrehung macht diese Analyse wesentlich schwieriger, da prinzipiell beide Momente einen Einfluss auf die Messung der X-Kraft haben können.

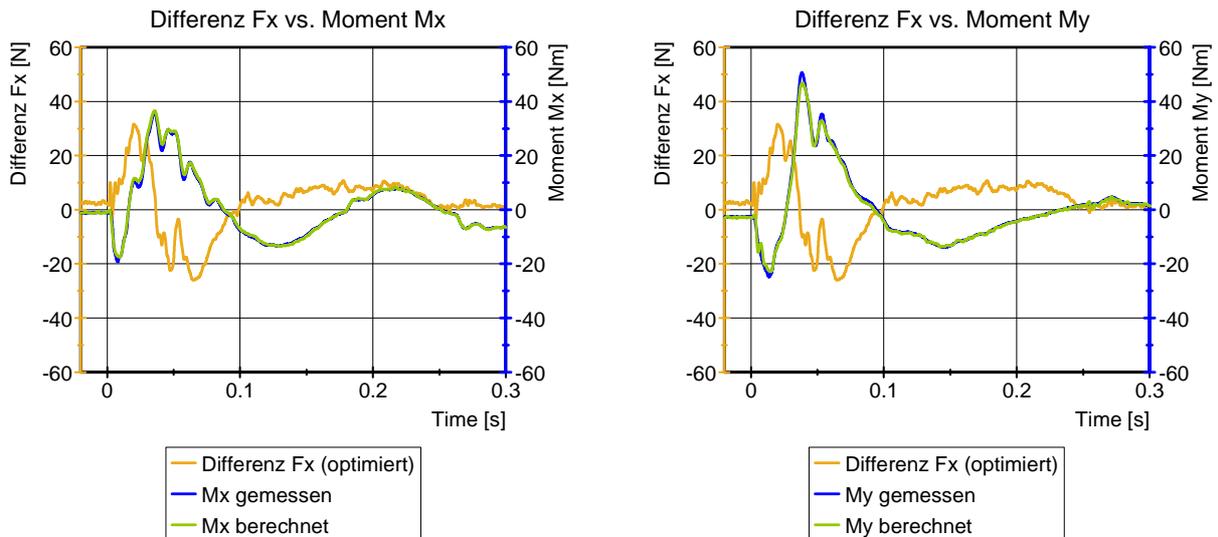
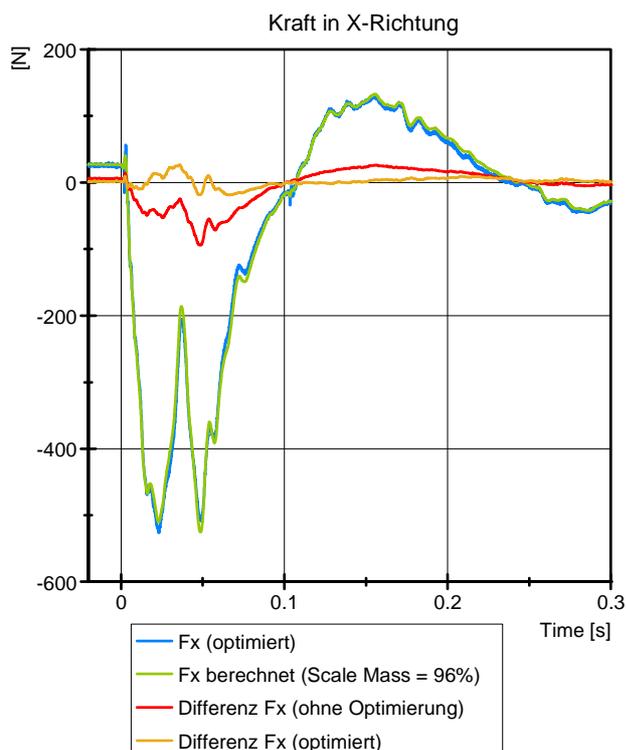


Abbildung 43: Differenz F_x vs. Moment M_x und M_y , Optimierung 1 (Versuch 70° , Verdrehung $+45^\circ$, v9)

Eine deutliche Korrelation des Differenzverlaufs F_x mit dem Moment um die X-Achse ist nicht zu erkennen. Der Vergleich mit dem Y-Moment zeigt eine tendenziell bessere Übereinstimmung der Verläufe. Das Korrelationsverhalten des Differenzverlaufs von F_x mit dem Moment M_y war beim Pendelversuch ohne Kopfverdrehung in Kapitel 6.3.1 jedoch wesentlich deutlicher ausgeprägt. Ersichtlich ist dies vor allem bei den Nulldurchgängen der Signalverläufe.

Analog zur Optimierung beim geraden Pendelversuch wird ein weiterer Optimierungsschritt mit den beiden Parametern Scale F_x und Cross Sense $M_y \rightarrow F_x$ durchgeführt.



Optimierung 2:

- Scale $F_x = 114.32\%$
- CS $M_y \rightarrow F_x = -59.65 \text{ N}/100\text{Nm}$
- Bereich der Optimierung: 0 bis 0.3s
- maximale Differenz F_x : 26.75N

Abbildung 44: Abweichungen der X-Kraft, Optimierung 2 (Versuch 70° , Verdrehung $+45^\circ$, v9)

Obwohl die integrierten Fehlerquadrate durch den zusätzlichen Parameter weiter minimiert wurden, konnte der Maximalwert des Differenzverlaufs nur geringfügig verbessert werden. Das Minimum wurde bei Scale $F_x = 114.32\%$ und Cross Sense $M_y \rightarrow F_x = -59.65 \text{ N}/100\text{Nm}$ erreicht. Die hohe Abweichung des Skalierungsfaktors, verglichen zur erreichbaren Kalibriergenauigkeit, lässt wiederum darauf schließen, dass anhand des einfachen mathematischen Modells und der im Allgemeinen fehlerbehafteten Inputgrößen die tatsächlichen Abweichungsursachen nicht korrekt abgebildet werden. Deshalb sind die berechneten Parameterwerte grundsätzlich nicht korrekt und dürfen nur als mathematisches Optimum anhand des betrachteten Modells angesehen werden.

Mit den berechneten Optimierungsparametern liegen die verbleibenden Differenzen in einem Bereich von circa $\pm 25\text{N}$. Die Restabweichungen der Kraft F_x liegen wiederum, aufgrund der bereits genannten Ursachen, deutlich über der theoretisch möglichen Sensorauflösung der Upper-Neck-Load-Cell. Somit gibt es noch relevante Abweichungsursachen und Einflüsse, welche im derzeitigen Modell nicht korrekt abgebildet werden. Von den berechneten Parameterwerten darf daher nicht auf physikalisch korrekte Ursachen geschlossen werden.

Trotz der Tatsache, dass mit dem stark vereinfachten Modell nicht physikalische Sensorparameter ermittelt wurden, eignet sich die Untersuchung für eine erste Abschätzung der Eignung der Upper-Neck-Load-Cell als Inputgröße für die Bewegungsanalyse von Dummykomponenten. Bevor diese als Inputgröße verwendet wird, müssen aber sicher noch weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden, um die derzeitigen Unsicherheiten möglichst zu minimieren.

Zusammenfassung der Optimierung

In Abbildung 45 sind die optimierten Differenzverläufe der X-Kraft ausgehend von den ursprünglichen Abweichungen zusammengefasst. Die wesentliche Reduktion des Differenzverlaufs konnte durch die Berücksichtigung eines Skalierungsfaktors erfolgen. Im Vergleich zum Pendelversuch ohne Kopfverdrehung (Kapitel 6.3.1) hat die Optimierung bei diesem Versuch einen wesentlich geringeren Einfluss der Querrichtungs-Empfindlichkeit $M_y \rightarrow F_x$ gezeigt.

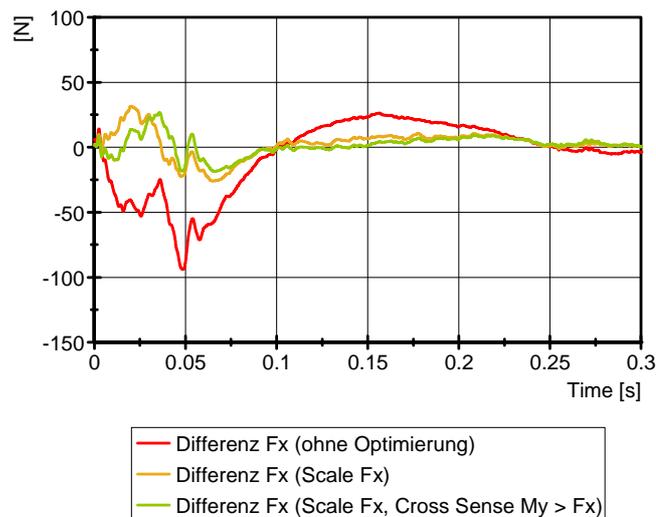


Abbildung 45: Zusammenfassung der optimierten Differenzverläufe F_x (Versuch 70° , Verdrehung $+45^\circ$, v9)

An dieser Stelle wird angemerkt, dass bei den beiden Versuchsreihen (Kopf gerade und Kopf verdreht) zwar eine baugleiche, aber nicht idente Load-Cell vom Typ IF-205 verwendet wurde. Zudem war das Belastungsniveau des Y-Moments beim Pendelversuch ohne Kopfverdrehung circa doppelt so hoch als bei diesem Versuch.

6.4 Zusammenfassung der Analyse der gemessenen Kräfte

Die Detailergebnisse der Optimierung wurden am Beispiel von zwei ausgewählten Pendelversuchen gezeigt. In gleicher Weise erfolgte die Auswertung der restlichen Pendelversuche und die Ergebnisse der Optimierung werden nachfolgend zusammengefasst. Dadurch sollen die Erkenntnisse aus den beiden Detailauswertungen bestätigt und mögliche Systematiken der Optimierungsparameter aufgezeigt werden.

Für die beiden Versuchstypen Kopfverdrehung 0° bzw. $+45^\circ$ werden die Optimierungsergebnisse der gesamten Versuchsreihe angeführt. Pro Versuchstyp sind das jeweils 14 Versuche mit ansteigendem Pendel-Initialwinkel von 35° - 90° .

Die Optimierung der X-Kräfte erfolgte im ersten Schritt mit einer reinen Skalierung der gemessenen X-Kraft und in weiterer Folge mit einem zweiten Parameter zur Modellierung der Querrichtungs-Empfindlichkeit $M_y \rightarrow F_x$. Die Ergebnisse der Optimierung sind in Abbildung 46 für die gesamte Versuchsreihe dargestellt. Pro Pendelversuch (Versuchsnummer 1-14) sind die absoluten Maximalwerte des Differenzverlaufs der X-Kraft eingezeichnet. Die farblich dargestellten Differenzen in Orange und Grün zeigen, ausgehend von den ursprünglichen Abweichungen in Rot, das theoretische Reduktionspotential durch die Optimierung auf.

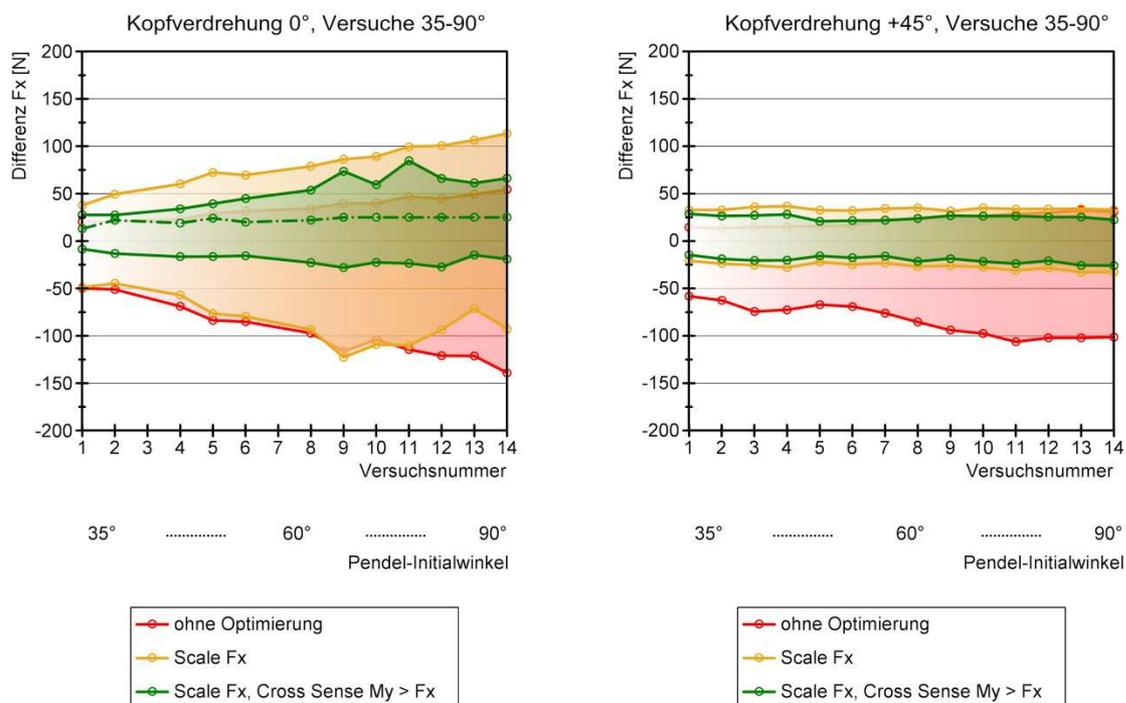


Abbildung 46: Reduktionspotential der Differenzverläufe F_x (Kopfverdrehung 0° bzw. $+45^\circ$, Pendel-Initialwinkel 35° - 90°)

Zwischen den beiden Versuchsreihen ist grundsätzlich ein deutlicher Unterschied in der Größenordnung der Differenzen (rot) ersichtlich. Ein direkter Vergleich der Abweichungen kann jedoch nicht erfolgen, da aufgrund der Kopfverdrehung ein geringeres Belastungsniveau von F_x bei gleichem Pendel-Initialwinkel vorliegt. Der Vergleich ist auch deshalb schwierig, da bei den beiden Versuchsreihen zwar eine baugleiche, aber nicht idente Load-Cell IF-205 an der oberen Nackenmessstelle des Dummys verwendet wurde.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Versuchsreihen ist beim Optimierungsergebnis ersichtlich. Bei den Versuchen mit Kopfverdrehung können mit einer reinen Skalierung der gemessenen X-Kräfte die Differenzverläufe bereits deutlich reduziert werden. Die analoge Optimierung bei den Versuchen ohne Kopfverdrehung hingegen ergibt

keine Reduktion der maximalen Abweichungen. Erst eine Optimierung mit einem weiteren Parameter für die Querrichtungs-Empfindlichkeit $M_y \rightarrow F_x$ führt zu einer wesentlichen Reduktion der Abweichungen. Der Einfluss der Y-Momente auf die Abweichungen der X-Kräfte scheint somit bei dieser Load-Cell deutlich höher zu sein. An dieser Stelle muss jedoch klar gesagt werden, dass die im Optimierungsprozess berechneten Parameterwerte für die Skalierungsabweichungen nicht direkt als physikalische Sensorfehler interpretiert werden dürfen. Die Begründung wurde bereits in den Kapiteln zuvor erwähnt und beruht auf der Tatsache, dass für die Analyse der Differenzverläufe ein sehr einfaches mathematisches Modell angewendet wurde beziehungsweise fehlerbehaftete Inputwerte vorliegen. Es werden keineswegs alle Abweichungsursachen und Einflüsse damit abgebildet.

In Abbildung 46 (linkes Diagramm) ist zusätzlich eine punktierte Linie in Grün dargestellt. Diese Grenze ergibt sich, wenn die Signalspitze im optimierten Differenzverlauf (siehe Detailauswertung Kapitel 6.3.1) nicht berücksichtigt wird. Die Optimierung der Differenzverläufe ergibt schlussendlich bei beiden Versuchsreihen eine ähnliche Größenordnung der Restabweichungen von F_x (grüner Verlauf).

Die berechneten Optimierungsparameter sind in Abbildung 47 grafisch dargestellt. Bei der Versuchsreihe ohne Kopfverdrehung (Diagramme links) hat die Optimierung sowohl beim Skalierungsfaktor F_x als auch beim Parameter für die Querrichtungs-Empfindlichkeit $M_y \rightarrow F_x$ konstante Werte ergeben. Deutlich höhere Skalierungsfaktoren von F_x ergibt die Optimierung bei den Versuchen mit einer Kopfverdrehung von $+45^\circ$.

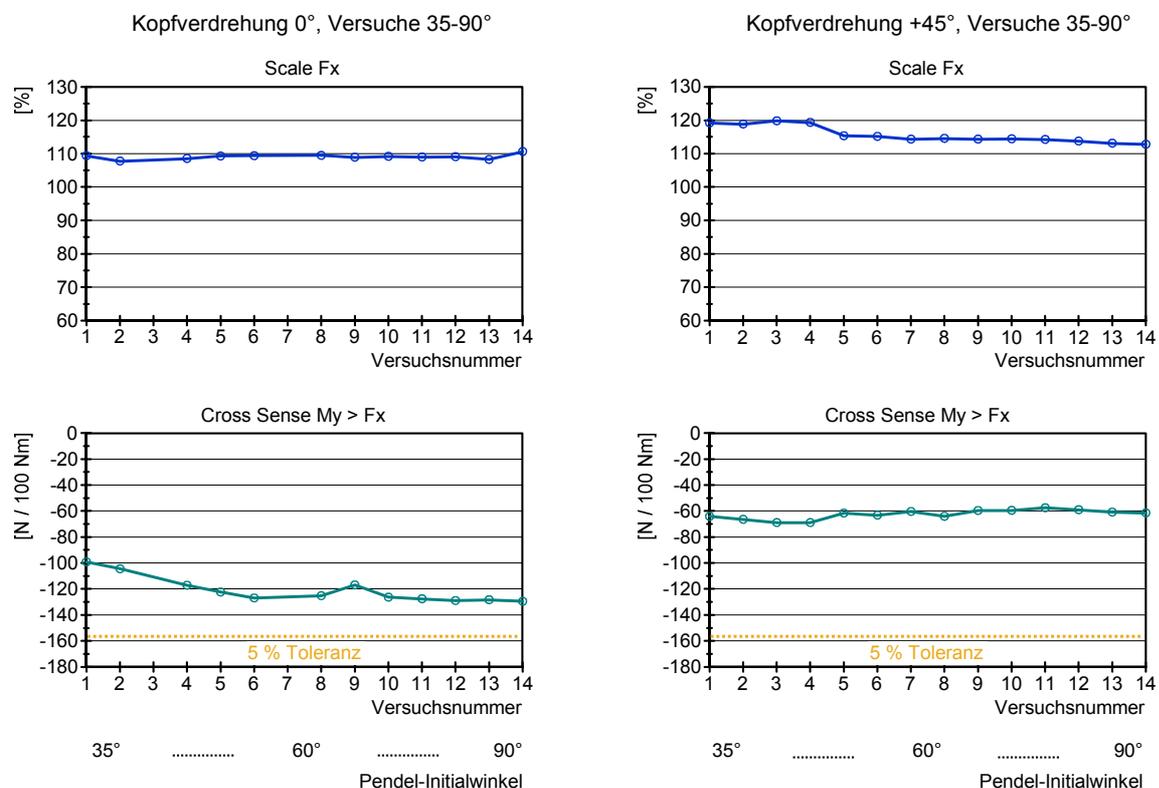


Abbildung 47: Parameter der Optimierung F_x (Kopfverdrehung 0° bzw. $+45^\circ$, Pendel-Initialwinkel $35-90^\circ$)

Die konstanten Skalierungswerte von circa 114% im oberen Belastungsbereich, basierend auf den stark vereinfachten Modellansätzen und Annahmen, ergeben eine deutliche Differenz von circa 5%, verglichen zu den Versuchen ohne Kopfverdrehung.

Einen sehr konstanten Verlauf, basierend auf den getroffenen Modellannahmen, zeigen die berechneten Parameterwerte für die Querrichtungs-Empfindlichkeit $M_y \rightarrow F_x$, wobei der Einfluss bei den beiden Sensoren deutlich unterschiedlich ausgeprägt ist. Eine mögliche Abweichung der Load-Cell infolge von Querrichtungs-Empfindlichkeiten ist im Hersteller-Datenblatt mit 5% angegeben und bezieht sich auf den Messendwert (Full-Scale Wert). [9] Die Ergebnisse der Optimierung zeigen für die beiden Sensoren systematische Werte und die Toleranzgrenze von 5% wurde nicht überschritten.

6.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse in Kapitel 6.4 zeigen, dass die Abweichungen der gemessenen X-Kräfte anhand einfacher Modellansätze deutlich reduziert werden können. Zu den wesentlichen Diskussionspunkten zählen die Größenordnungen der gefundenen Optimierungsparameter sowie die Unterschiede zwischen den beiden Pendelversuchsreihen (Kopf gerade und Kopf verdreht).

Bei den Pendelversuchen ohne Kopfverdrehung ergab die Optimierung der X-Kräfte sehr konstante Skalierungsfaktoren von circa 109% über die gesamte Versuchsreihe mit steigendem Belastungsniveau, was auf systematische Einflüsse schließen lässt. Die im Optimierungsprozess berechneten Parameterwerte dürfen aber wie bereits erwähnt nicht direkt als physikalische Sensorfehler interpretiert werden. Die Größenordnung der Abweichungen liegt deutlich über der erreichbaren Kalibriergenauigkeit und lässt darauf schließen, dass anhand der einfachen mathematischen Modellierung und mit den im Allgemeinen fehlerbehafteten Inputgrößen nicht alle relevanten Abweichungsursachen und Einflüsse abgebildet werden. Die berechneten Parameterwerte sind daher, nicht zuletzt auch aufgrund von möglichen Parameterkorrelationen, physikalisch nicht korrekt.

Einflussfaktoren auf die Abweichungen der Kräfte sind unter anderem grundsätzlich die Genauigkeit der Bahnkurve aus der Videoauswertung, Abweichungen bei den durch SimbaV optimierten Beschleunigungssignalen und Ungenauigkeiten bei der Annahme der wirkenden Kopfmasse.

Die Annahme der tatsächlich wirkenden Kopfmasse erfolgte durch eine Abschätzung der Masse bis zur Sensorebene der Load-Cell. Dabei wurde ein Skalierungswert von 96% der gesamten Kopfmasse ermittelt. Eine mögliche Toleranz bei dieser Abschätzung kann aber einen sehr unwahrscheinlichen Skalierungsfaktor der Kraft F_x von 109% zur Folge haben, da vor allem bei der Messung der Kräfte in Z-Richtung sehr gute Ergebnisse erzielt wurden.

Bei den Pendelversuchen mit Kopfverdrehung hat die Optimierung der Differenzverläufe von F_x wesentlich höhere Werte für die Skalierungsabweichungen ergeben, besonders bei den ersten vier Versuchen. Obwohl die Abweichungen durch die Optimierungen deutlich reduziert wurden, müssen an dieser Stelle die Optimierungsergebnisse vorsichtig interpretiert werden. Durch die Kopfverdrehung werden auf die Upper-Neck-Load-Cell Belastungsgrößen in allen Sensorachsen eingeleitet. Möglicherweise gibt es hier zusätzliche Effekte, die durch diese einfache Modellierung nicht erfasst werden.

Da bei den beiden Versuchsreihen unterschiedliche Load-Cells eingesetzt wurden, ist ein direkter Vergleich der Skalierungsfaktoren schwierig. Für die weitere Analyse der deutlich höheren Skalierungs-Abweichungen bei der zweiten Versuchsreihe wäre die Durchführung einer weiteren Versuchsreihe ohne Kopfverdrehung mit derselben Load-Cell nötig gewesen.

Neben den Skalierungs-Abweichungen hat die Optimierung systematische Einflüsse infolge von Querrichtungs-Empfindlichkeiten gezeigt. Bei der Versuchsreihe ohne Kopfverdrehung haben sich mit ansteigender Belastung konstante und systematische Werte von circa $-125 \text{ N}/100\text{Nm}$ ergeben. Wird dieser Wert auf den Messendwert (Full-Scale Wert) der Load-Cell bezogen, so kann ein Prozentsatz von 3.95% angegeben werden. Der Hersteller gibt im Datenblatt der verwendeten Load-Cell des Typs 1716 eine maximale Abweichung von 5% infolge von Querrichtungs-Empfindlichkeiten an. [9] Das Optimierungsergebnis der Versuchsreihe mit einer Kopfverdrehung von $+45^\circ$ ergab einen deutlich geringeren Einfluss des Moments M_y auf den Differenzverlauf der Kraft F_x . Ein direkter Vergleich der berechneten Optimierungsparameter Cross Sense $M_y \rightarrow F_x$ zwischen den beiden Versuchsreihen ist aber schwierig, da zwei verschiedene Load-Cells verwendet wurden. Bei beiden Versuchsreihen wurden jedoch systematische Querrichtungs-Einflüsse gezeigt und die Unterschiede zwischen den beiden Sensoren sind sehr wahrscheinlich auf sensorspezifische Eigenschaften zurückzuführen.

7 Anwendung und Umsetzung der Erkenntnisse

Die Auswertungen der Pendelversuche haben gezeigt, dass bei der Messung der Belastungsgrößen an der oberen Nackenmessstelle die größten Differenzen bei den beiden Querkräften F_x und F_y auftreten. Anhand einer einfachen Modellierung mit nur wenigen Parametern ist es gelungen, die Differenzverläufe der X-Kräfte deutlich zu reduzieren. Die wesentlichen Erkenntnisse der Auswertungen sind dabei, dass sich die Differenzen durch die Modellierung einer Skalierungs-Abweichung deutlich reduzieren lassen. Des Weiteren lassen sich Reduktionen durch die Modellierung des Querrichtungs-Einflusses des Moments M_y auf den Differenzverlauf der Kraft F_x erzielen. Allerdings sind die optimierten Skalierungswerte physikalisch nicht plausibel, was auf ein nicht ausreichend parametrisiertes Modell hinweist.

Am Beispiel der Messdaten eines geraden Schlittenversuchs wird theoretisch untersucht, inwieweit die Erkenntnisse aus den Pendelversuchen und die Optimierung umgesetzt werden können. Von besonderem Interesse ist vor allem, ob die Parameter (Skalierung F_x , ...) basierend auf denselben stark vereinfachten Modellannahmen eine ähnliche Größenordnung wie bei den Auswertungen der Pendelversuche ergeben. Beim Schlittenversuch wurde ebenfalls ein Hybrid III 50% Dummy eingesetzt und für die elektrische Instrumentierung (Gyro-Beschleunigungs-Sensor, Upper-Neck-Load-Cell) wurden prinzipiell die gleichen Sensortypen wie bei den Pendelversuchen verwendet.

Für die Berechnung der theoretisch wirkenden Kräfte und Momente an der oberen Nackenmessstelle aus den gemessenen Beschleunigungs- und Drehratensignalen ist es eine notwendige Voraussetzung, dass keine externen Kräfte und Momente auf den Dummykopf wirken. Die Kraftverläufe in Abbildung 48 sowie die Verläufe der Beschleunigungen deuten darauf hin, dass diese Voraussetzungen beim untersuchten Schlittenversuch im dargestellten Zeitbereich erfüllt sind. Ein möglicher Kontakt, beispielsweise zwischen Kopf und Brust, ist im Regelfall in den Versuchsdaten deutlich erkennbar.

In Abbildung 48 sind die berechneten und gemessenen Kräfteverläufe dargestellt. Bei den Abweichungen der X-Kraft ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Pendelversuchen. Der Verlauf der gemessenen Z-Kraft stimmt sehr gut überein und auch bei der Y-Kraft können verhältnismäßig geringe Differenzen festgestellt werden.

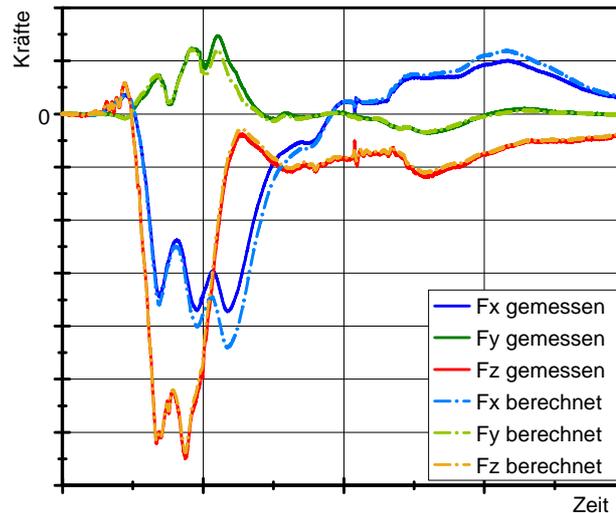


Abbildung 48: gemessene vs. berechnete Kräfte (gerader Schlittenversuch)

Bei der Optimierung des Verlaufs der X-Kraft wurde die idente Vorgangsweise wie bei den Pendelversuchen angewendet. Die Optimierung mit nur einem Parameter für die Skalierung der gemessenen X-Kraft ergab, ähnlich wie bei den Pendelversuchen ohne Kopfverdrehung, eine deutliche Korrelation der Restabweichungen mit dem Y-Moment. Mit einem weiteren Optimierungsparameter für die Querrichtungs-Empfindlichkeit $M_y \rightarrow F_x$ konnte schließlich das Ergebnis in Abbildung 49 erzielt werden. Anhand der Modellierung mit nur zwei Parametern wird somit eine deutliche Reduktion der Abweichungen beim Kraftverlauf F_x erzielt.

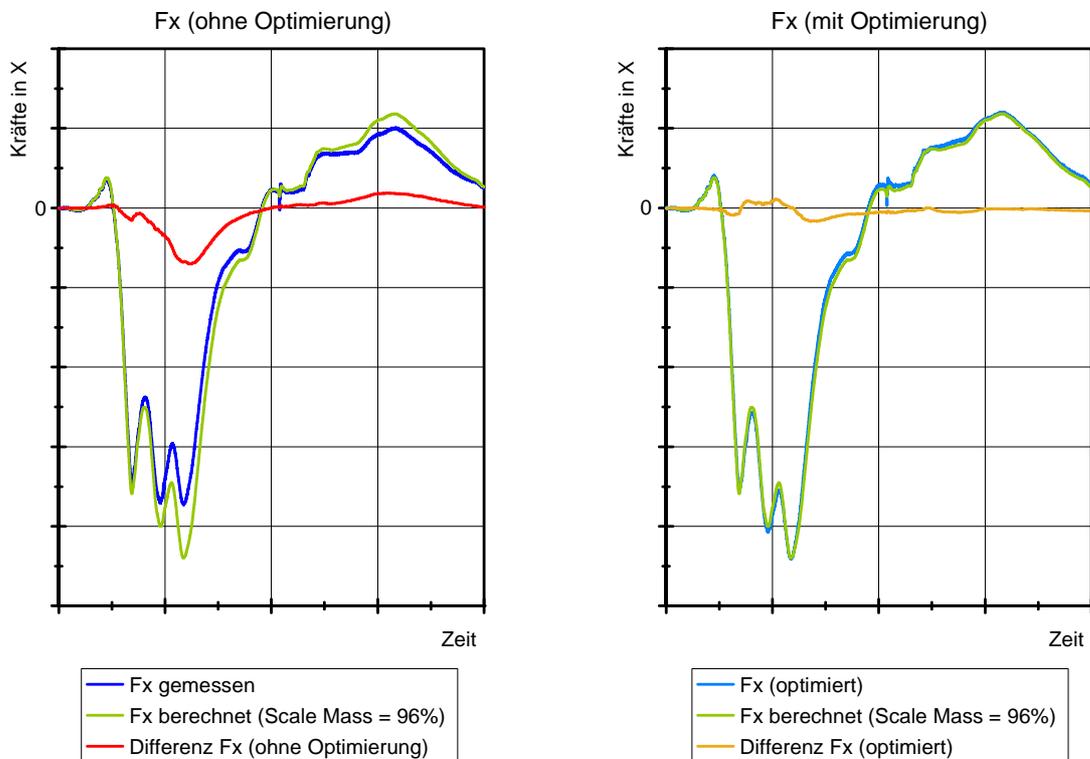


Abbildung 49: Optimierung der X-Kraft (Scale F_x , Cross Sense $M_y \rightarrow F_x$), gerader Schlittenversuch

Die geringsten Differenzen wurden mit einer Skalierung F_x von 109.18% und einer Querrichtungs-Empfindlichkeit $M_y \rightarrow F_x$ von 124.88 N/100Nm erreicht. Der berechnete Parameterwert für die Skalierungsabweichung von circa 109%, basierend auf den getroffenen Modellannahmen, ist physikalisch jedoch keineswegs plausibel und darf wiederum nicht als physikalischer Sensorfehler interpretiert werden. Außerdem liegen die Restabweichungen des Kraftverlaufs noch deutlich über der theoretisch möglichen Sensorauflösung der Load-Cell, was auf eine nicht ausreichende Parametrisierung des Modells hinweist.

Verglichen mit den Ergebnissen der Pendelversuche ohne Kopfverdrehung ergibt sich eine sehr ähnliche Größenordnung der berechneten Parameter. Vor allem für den Skalierungsfaktor F_x von circa 109% ergeben sich fast idente Werte, was theoretisch auf systematische Abweichungen schließen lässt. Auch bei der Querrichtungs-Empfindlichkeit $M_y \rightarrow F_x$ kann eine ähnliche Größenordnung festgestellt werden. Ein unterschiedliches Vorzeichen bei diesem Wert resultiert aus der Tatsache, dass bei der Auswertung der Pendelversuche eine andere Ausrichtung des CDA-Koordinatensystems wie beim Schlittenversuch vorliegt.

Die Ergebnisse in Abbildung 49 bzw. Abbildung 50 zeigen, dass durch die Anwendung einer einfachen Modellierung auch bei diesem geraden Schlittenversuch eine deutliche Reduktion der Abweichungen erzielt werden kann. Durch die Optimierung wird der Maximalwert des Differenzverlaufs von F_x auf circa 24% des ursprünglichen Maximalwertes reduziert.

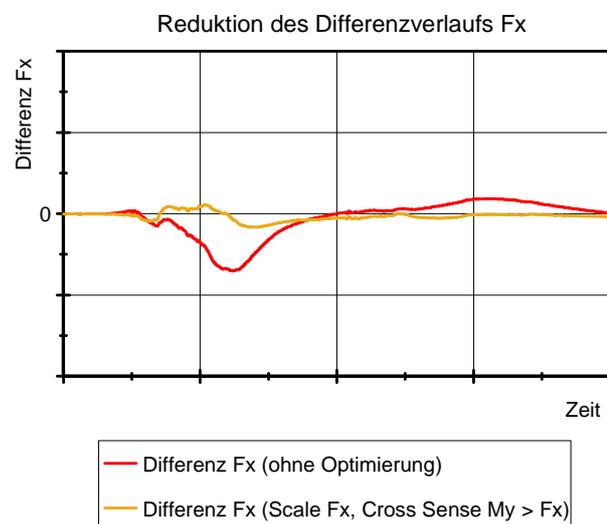


Abbildung 50: Reduktion des Differenzverlaufs F_x (gerader Schlittenversuch)

Wie bei den untersuchten Pendelversuchen ohne Kopfverdrehung lassen sich die Abweichungen überwiegend durch die Modellierung von Skalierungs-Effekten sowie Querrichtungs-Einflüssen deutlich reduzieren. Die Größenordnungen der Parameter stimmen ebenfalls sehr gut überein. Das bedeutet aber auch, dass hier physikalisch nicht plausible Skalierungswerte ermittelt werden, was wiederum auf ein unzureichendes Modell der Optimierung hinweist.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Analyse der Eignung der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 zur Bewegungsanalyse von Dummykomponenten konnte das Verfahren der simulationsbasierten Versuchsauswertung für die Berechnung der theoretisch wirkenden Kräfte und Momente, allerdings unter dem Aspekt, dass die Eingangsgrößen fehlerbehaftet sind und somit einen Einfluss auf die Genauigkeit haben, sehr erfolgreich eingesetzt werden. Grundsätzlich bestätigen beide Pendelversuchsreihen (Kopf gerade und Kopf verdreht), dass die größten Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Kräften in X- und Y-Richtung vorliegen. Diese Kräfte sind die beiden Querkräfte der Load-Cell. Wesentlich geringere Differenzen waren beim Vergleich der berechneten und gemessenen Z-Kräfte sowie bei den Momenten um die X- und Y-Achse zu erzielen. Aufgrund der geringen Belastungen bei den Momenten um die Z-Achse kann für diese Achsrichtung keine Aussage über mögliche Abweichungen gemacht werden.

Die maximalen Differenzwerte der Kräfte in X-Richtung können bei den durchgeführten Untersuchungen, basierend auf Nackenpendelversuchen, mit circa 150N bei wirkenden Belastungen von 800N beziffert werden. Diese maximalen Werte wurden bei den Versuchen ohne Kopfverdrehung und bei Pendel-Initialwinkel von 80-90° erreicht. Die Differenzverläufe der Z-Kräfte weisen zwar auch Spitzenwerte von circa 100N auf, jedoch liegen deutlich andere Charakteristiken als bei den Kräften in X- und Y-Richtung vor. Die Absolutwerte für die verbleibenden Differenzen können hier allerdings nicht als eigentliche Genauigkeit herangezogen werden, da die Werte einer Optimierung entstammen, die teilweise physikalisch nicht plausible Werte liefert (beispielsweise Skalierungsfaktor F_x). An dieser Stelle sind weitere Untersuchungen und eine Erweiterung des Optimierungsmodells notwendig, damit sich die Ergebnisse physikalisch plausibilisieren lassen.

Anhand einer einfachen Modellierung konnten prinzipiell zwei deutliche Effekte aufgezeigt werden. Die Optimierung der Differenzverläufe der X-Kraft hat bei den beiden untersuchten Load-Cells sehr hohe, konstante, aber physikalisch nicht plausible Skalierungs-Abweichungen in der Größenordnung von 9% bzw. 14% ergeben. Außerdem konnte ein merklicher Einfluss des wirkenden Moments M_y auf den Differenzverlauf der Kraft F_x festgestellt werden. Die Größenordnung der verbleibenden Differenz beträgt circa +/- 25N.

Es wird an dieser Stelle angemerkt, dass die Erkenntnisse dieser Arbeit unter anderem auch auf den mit dem SimbaV-Verfahren ermittelten Beschleunigungs- und Drehratenverläufen für den Dummykopf als Referenz beruhen. Diese Werte sind jedoch, unter anderem auch durch Unsicherheiten in der photogrammetrischen Ermittlung der 3D-Bahnkurve beeinflusst. Die Auswirkungen dieser Fehler auf die Bewertung der ermittelten Differenzen in den Kräften und Momenten muss zukünftig unbedingt noch genau analysiert und in Hinblick auf systematische Einflüsse bewertet werden.

Bei der Planung von weiteren Pendelversuchen wäre es außerdem notwendig, mit derselben Load-Cell alle Versuchstypen (Kopfverdrehung 0° , 45° und 90°) durchzuführen, was die Ergebnisinterpretation vereinfachen würde. Bei den Versuchstypen (0° und 90°) liegt nämlich eine deutlich „einfachere“ Belastungssituation mit nur einem relevanten Moment vor. Der Vergleich mit der 45° -Versuchsreihe kann schließlich aufzeigen, ob sich ein erweitertes Optimierungsmodell positiv auf die Ergebnisse auswirkt und die Optimierungsparameter physikalisch plausible Werte liefern.

Die Ergebnisse der Nackenpendelversuche und auch die Anwendung der Erkenntnisse bei einem geraden Schlittenversuch haben gezeigt, dass sich durch die Modellierung mit zusätzlichen Parametern deutlich bessere Ergebnisse erzielen lassen. Wie bereits erwähnt, ist das Optimierungsmodell aber noch nicht hinreichend parametrisiert. Die aktuell noch nicht modellierten Effekte scheinen sich allerdings systematisch und unter dieser Versuchskonstellation ähnlich eines Skalierungsfaktors auszuwirken. Dies zeigt, dass die Eignung der untersuchten Sensorik zur Bewegungsanalyse von Dummykomponenten aus aktueller Sicht geeignet ist. In weiteren Versuchsreihen sowie durch die angesprochenen Erweiterungen der Modellierung muss dies aber noch weiter validiert werden.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Euro NCAP Crashtest [1], Kraft-Momenten-Messdose im Nackenbereich [11]... 1	1
Abbildung 2: Methodik und Vorgangsweise bei der Analyse der Nackenmesswerte..... 6	6
Abbildung 3: Versuchsaufbau bei den Pendelversuchen (Kopfverdrehung 180°) [11] 8	8
Abbildung 4: verwendete elektrische Messtechnik (Abbildung links [11], Abbildung rechts [9]) 11	11
Abbildung 5: Aufbau der 6-Axis Upper-Neck-Load-Cell IF-205 [8]..... 13	13
Abbildung 6: prinzipieller Aufbau eines Folien-DMS [2, 2006, p. 60] 14	14
Abbildung 7: Wheatstone'sche Brückenschaltung (Vollbrücke) [2, 2006, p. 63] 15	15
Abbildung 8: Definition der Koordinatensysteme (Kopforientierung vorwärts) 18	18
Abbildung 9: SimbaV-Koordinatensystem beim Pendelversuch und Fahrzeugversuch 19	19
Abbildung 10: zeitlicher Ablauf eines Pendelversuchs (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9) 21	21
Abbildung 11: g-Korrektur am Beispiel eines einachsigen Beschleunigungssensors 22	22
Abbildung 12: g-Korrektur (einfache Fallbeispiele) 23	23
Abbildung 13: Einfluss des Initialwinkels Offset AV AIY auf die Berechnung der Kopf-Trajektorie (Versuch 60°, Verdrehung 0°, v8) 25	25
Abbildung 14: Offset-Fehler (additiver Fehler) [6, 2008, p. 80]..... 26	26
Abbildung 15: Skalierungs-Fehler (multiplikativer Fehler) [6, 2008, p. 81] 27	27
Abbildung 16: Einfluss des Parameters Offset AC auf die Berechnung der Kopf-Trajektorie (Versuch 80°, Verdrehung +45°, v12)..... 30	30
Abbildung 17: Positionsabweichungen der optimierten Kopf-Trajektorie (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9) 31	31
Abbildung 18: Winkeldifferenz zwischen Pendelstange und Kopf bei hängendem Pendel [11] 33	33
Abbildung 19: Positionsabweichungen der optimierten Kopf-Trajektorie (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9) 34	34
Abbildung 20: Betrachtung des mechanischen Systems "Dummykopf" 38	38

Abbildung 21: gemessene vs. berechnete Kräfte (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)	43
Abbildung 22: gemessene vs. berechnete Momente (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)	44
Abbildung 23: gemessene vs. berechnete Kräfte in X und Y (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)	45
Abbildung 24: gemessene vs. berechnete Kräfte in Z (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)....	46
Abbildung 25: gemessene vs. berechnete Momente um X und Y (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9).....	47
Abbildung 26: gemessene vs. berechnete Momente um Z (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)	48
Abbildung 27: Zusammenfassung der Differenzen der Kräfte (Kopfverdrehung +45°, Pendelversuche 35 - 90°)	49
Abbildung 28: Zusammenfassung der Differenzen der Momente (Kopfverdrehung +45°, Pendelversuche 35 - 90°)	50
Abbildung 29: Einfluss des Parameters "Scale Mass" auf die Abweichungen der X-Kraft (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9).....	54
Abbildung 30: Einfluss des Parameters "Scale Mass" auf die Abweichungen der Z-Kraft (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9).....	54
Abbildung 31: Einfluss des Parameters "Scale ACX" auf die Abweichungen der X-Kraft (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9).....	55
Abbildung 32: Einfluss des Parameters "Scale ACZ" auf die Abweichungen der Z-Kraft (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9).....	56
Abbildung 33: mögliche Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Kräften	57
Abbildung 34: vektorielle Beschreibung der Querrichtungs-Empfindlichkeit von Sensoren [2, 2006, p. 141]	59
Abbildung 35: Abweichungen der X-Kraft ohne Optimierung (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)	62
Abbildung 36: Abweichungen der X-Kraft, Optimierung 1 (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)	63
Abbildung 37: Differenz F_x vs. Moment M_y , Optimierung 1 (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)	64

Abbildung 38: Abweichungen der X-Kraft, Optimierung 2 (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)	64
Abbildung 39: Plausibilisierung der mathematischen Optimierungslösung, Optimierung 2 (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9).....	66
Abbildung 40: Zusammenfassung der optimierten Differenzverläufe F_x (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)	67
Abbildung 41: Abweichungen der X-Kraft ohne Optimierung (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9).....	68
Abbildung 42: Abweichungen der X-Kraft, Optimierung 1 (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)	69
Abbildung 43: Differenz F_x vs. Moment M_x und M_y , Optimierung 1 (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9).....	70
Abbildung 44: Abweichungen der X-Kraft, Optimierung 2 (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)	70
Abbildung 45: Zusammenfassung der optimierten Differenzverläufe F_x (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)	72
Abbildung 46: Reduktionspotential der Differenzverläufe F_x (Kopfverdrehung 0° bzw. +45°, Pendel-Initialwinkel 35-90°)	73
Abbildung 47: Parameter der Optimierung F_x (Kopfverdrehung 0° bzw. +45°, Pendel- Initialwinkel 35-90°)	74
Abbildung 48: gemessene vs. berechnete Kräfte (gerader Schlittenversuch).....	78
Abbildung 49: Optimierung der X-Kraft (Scale F_x , Cross Sense $M_y \rightarrow F_x$), gerader Schlittenversuch	78
Abbildung 50: Reduktion des Differenzverlaufs F_x (gerader Schlittenversuch).....	79
Abbildung 51: Datenblatt, Hybrid III Six-Channel Neck-Load-Cell 1716 [Robert A. Denton, Inc.]	88

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsreihe 1 (Kopfverdrehung 0° bzw. 180°)	9
Tabelle 2: Versuchsreihe 2 (Kopfverdrehung +/- 45°).....	10
Tabelle 3: verwendete elektrische Messtechnik bei den Pendelversuchen.....	11
Tabelle 4: Größen in globalen und lokalen Koordinaten	19
Tabelle 5: Parameter für die Initialorientierung der Sensorik im Programm CDA	25
Tabelle 6: Parameter für Offset-Abweichungen im Programm CDA	27
Tabelle 7: Parameter für Skalierungs-Abweichungen im Programm CDA.....	28
Tabelle 8: Einfluss des Parameters Offset AC auf die Berechnung der Kopf-Trajektorie (Versuch 80°, Verdrehung +45°, v12)	30
Tabelle 9: Parameter der Trajektorien-Optimierung (Versuch 70°, Verdrehung 0°, v9)	32
Tabelle 10: Parameter der Trajektorien-Optimierung (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9) ...	35
Tabelle 11: berechnete Kopfwinkel zum Zeitpunkt t = 0s (Versuch 70°, Verdrehung +45°, v9)	36
Tabelle 12: Zusammenfassung der Trajektorien-Optimierung (Kopfverdrehung +45° und -45°)	36
Tabelle 13: Ausnutzung des Messbereichs der Load Cell IF-205 bei den Pendelversuchen (Kopfverdrehung +45°)	51

11 Formelverzeichnis

(1)	Hook'sches Gesetz (ein-dimensional)	13
(2)	Zusammenhang Widerstandsänderung und Dehnungsänderung (DMS).....	14
(3)	g-Korrektur, Berücksichtigung der Erdbeschleunigung (ein-dimensional)	22
(4)	g-Korrektur (ein-dimensional).....	23
(5)	g-Korrektur (drei-dimensional)	24
(6)	Berechnung der theoretischen Quantisierungsstufe (AC-Sensor).....	29
(7)	Wegdifferenz verursacht durch einen konstanten Offsetwert der Beschleunigung...	29
(8)	Impulssatz für das System "Dummykopf"	39
(9)	Impulssatz für das System "Dummykopf" in körperfesten Koordinaten.....	40
(10)	wirkende Beschleunigungen (g-Korrektur)	40
(11)	wirkende Kräfte (Offset-Abgleich in der Initillage)	40
(12)	Berechnung der Kräfte an der oberen Nackenmessstelle	41
(13)	Drallsatz für das System "Dummykopf" in körperfesten Koordinaten	41
(14)	Trägheitstensor des Dummykopfs	41
(15)	Momentenanteile bezüglich des Schwerpunkts am Dummykopf.....	41
(16)	Berechnung der Momente an der oberen Nackenmessstelle	42
(17)	Impulssatz für das System „Dummykopf“.....	52
(18)	Berechnung der Abweichungen der Kräfte an der oberen Nackenmessstelle.....	52
(19)	Berechnung der Abweichungen der Kräfte an der oberen Nackenmessstelle.....	57
(20)	Beschreibung der Querrichtungs-Empfindlichkeit von Sensoren	59
(21)	Bewertung der Querrichtungs-Empfindlichkeit in %	60
(22)	Modellierung der Abweichungen der X-Kräfte	60
(23)	Modellierung der Abweichungen der Y-Kräfte	61

12 Literaturverzeichnis und Bildnachweis

1. Euro NCAP: Frontal Impact VW Golf 2012,
http://de.euroncap.com/files/VW_Golf_2012_Front---0-89e04926-d8a9-4382-b988-4a96e50e97ed.jpg, Abfrage vom 11.02.2014 (Bildnachweis)
2. Gevatter H.; Grünhaupt U.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion, 2. vollständig bearbeitete Auflage, Springer, Berlin Heidelberg 2006
3. Greimel R.: CDA Dokumentation
4. Kramer F.: Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen, 4. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2013
5. Magnus K.; Müller-Slany H.: Grundlagen der Technischen Mechanik, 7. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2005
6. Parthier R.: Messtechnik Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure, 4. verbesserte Auflage, Fried. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2008
7. Reif K.: Sensoren im Kraftfahrzeug, 2. ergänzte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2012
8. Robert A. Denton Inc.: Strain Gage Patterns (Bildnachweis)
9. Robert A. Denton Inc.: Hybrid III Six-Channel Neck-Load-Cell 1716, Datenblatt (Bildnachweis)
10. Sinz W.; Greimel R.; Hoschopf H.; Raguse K.; Färnstrand H.: Simulation Based Analysis of Test Results, SAE Paper Number 2010-01-1013, 2010
11. Volkswagen AG: Nackenpendelversuche 2012 (Bildnachweis)

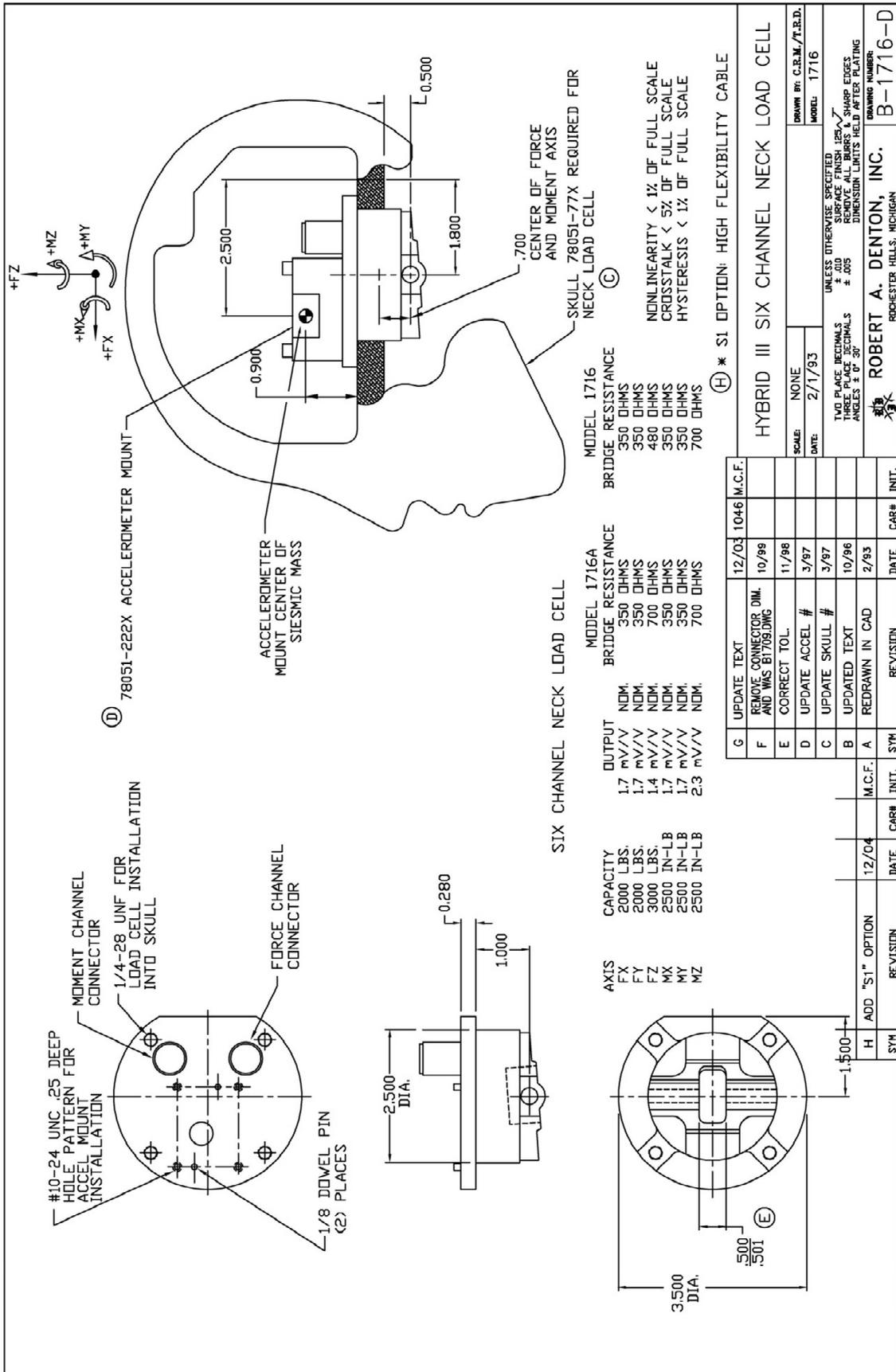


Abbildung 51: Datenblatt, Hybrid III Six-Channel Neck-Load-Cell 1716 [Robert A. Denton, Inc.]