



Jörg Moser

Sensitivitätsanalyse von Beschleunigungs- und Gyrosensoren zur genauen Berechnung von Kopftrajektorien im Crashtestfall

*Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur in der
Studienrichtung Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau, Studiengang Verkehrstechnik*

Durchgeführt am Institut für Fahrzeugsicherheit in Kooperation mit der Volkswagen AG

TU-Graz Dekanat für Maschinenbau

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

Betreuer: Dipl.-Ing. Christoph Klein

Graz, Jänner 2012



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene 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 Diplomarbeit 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

Großer Dank gilt meinem Betreuer Christoph Klein, der mich immer unterstützt hat und mir immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist, sowie bei Robert Greimel der all meine Fragen immer geduldig beantwortet hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei Wolfgang Sinz für die Vermittlung der Diplomarbeit, sowie seiner Hilfe und Anregungen für die Erstellung dieser Diplomarbeit und bei allen anderen Mitarbeitern des Instituts für das nette Arbeitsklima bedanken.

Bei Karsten Raguse und allen andere Mitarbeitern der Volkswagen AG möchte ich mich für die Zeit in Wolfsburg bedanken, in der ich so viel gelernt und gesehen habe.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich sowohl finanziell als auch mental unterstützt haben und immer für mich da waren. Ohne euch wäre das Studium in dieser Form nicht möglich gewesen. Ich hoffe ich bin euren Erwartungen gerecht geworden.

Abschließend möchte ich mich auch bei meiner Freundin Kerstin bedanken, die immer hinter mir gestanden ist und so viel Geduld mit mir gehabt hat. Danke für dein Verständnis.

Kurzfassung

Bei der Durchführung von Crashtests ist die Bestimmung der Insassenbewegung von großer Bedeutung. Diese Insassenbewegung kann mit Hilfe von Highspeed Kameras erfasst werden, und aus diesen Daten sehr präzise Bahnkurven (Trajektorien) von einzelnen sichtbaren Körperteilen bestimmt werden. Aus diesen Filmaufnahmen können aber die Trajektorien der einzelnen Körperteile nicht vollständig nachvollzogen werden, weil diese während der Bewegung immer wieder von Interiorteilen (B-Säule, Airbag,...) des Fahrzeugs verdeckt werden. Um Aussagen über diesen nicht erfassten Bereich treffen zu können, wurde vom VSI (Vehicle Safety Institute) in Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG ein neuartiges Verfahren entwickelt, welches die Berechnung von präzisen Trajektorie aus der Fusion von Sensor- und Videodaten zur Grundlage hat. Die Weiterentwicklung dieser simulationsbasierenden Versuchsauswertung (SimbaV) soll das Ziel dieser Diplomarbeit sein. Dazu soll zunächst der derzeitige Ablauf der Auswertung analysiert werden. Wie sich in vorhergehenden Untersuchungen gezeigt hat, haben die Sensorfehler einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der errechneten Trajektorie. Diese Sensorfehler können mittels Optimierungsverfahren bestimmt werden. Da jedoch eine Optimierung für alle möglichen Sensorfehler sehr zeitaufwendig ist, wird versucht die Anzahl der Fehler auf diejenigen zu begrenzen, welche den größten Einfluss auf die errechnete Trajektorie haben. Dazu wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, die den Einfluss einer Eingangsgröße auf die darauffolgende Ausgangsgröße beschreibt, sollen die zu optimierenden Parameter und damit auch die Rechenzeit reduziert werden. Es sollen aber auch Aussagen über benötigte Sensorgenauigkeiten getroffen werden, um die Trajektorien mit der geforderten Genauigkeit bestimmen zu können. Schlussendlich steht das Ziel, eine allgemeine Clusterung von verschiedenen Versuchsdurchführungen mit den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse zu realisieren, damit der Ablauf der simulationsbasierenden Versuchsauswertung automatisiert und verbessert wird, was die Grundvoraussetzung für den Einsatz in den Entwicklungsprozess ist.

Abstract

When performing crash tests the determination of the occupant kinematics is crucial. Kinematics is captured using high speed cameras. From this footage precise trajectories of visible body parts can be extracted. Trajectories cannot be fully determined since vehicle components (b-pillar, airbag,...) obstruct the view (of the cameras). To still be able to fully obtain kinematics, a novel method was established by the VSI (Vehicle Safety Institute) in cooperation with Volkswagen AG, which calculates the trajectory by fusion of sensor- and video data. The method is called 'Simulation Based Analysis of Test Results'.

The goal of this diploma thesis is the improvement of this method in terms of CPU-time. Firstly, the current procedure is analyzed. Previous studies showed that sensor errors have relevant influence on the accuracy of the calculated trajectories. These sensor errors can be compensated by an optimization process. The optimization of all sensor-errors is very time-consuming. Therefore only sensor errors having the most significant influence on the trajectory are considered. To find the most relevant sensor errors a sensitivity analysis is performed. The sensitivity analysis, which quantifies the influence of an input parameter on a subsequent output parameter, shall reduce the opted optimization parameters and the computation time. Further, the required sensor accuracy to determine the trajectory with a given accuracy can be determined. Finally the aim is a general clustering of different experimental procedures taking into consideration the results of the sensitivity analysis, in order to automate and improve the 'Simulation Based Analysis of Test Results'. This is a crucial precondition for the application of 'SimbaV' in the development process.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Trajektorienberechnung aus Beschleunigungs- und Gyrosensordaten.....	3
1.1.1	Koordinatensysteme und Koordinatentransformation	3
1.1.2	Bahnkurvenbestimmung für den idealen Fall	6
1.1.3	Bahnkurvenbestimmung für den realen Fall.....	8
1.2	Verwendete Sensorik	12
1.2.1	Beschleunigungssensor	12
1.2.2	Drehratensensor	14
2	Grundlagen der Sensorfehler	17
2.1	Überblick über die im CDA inkludierten Fehler	18
2.1.1	Offset-Fehler Beschleunigung, Geschwindigkeit, Weg, Winkelgeschwindigkeit und Schwerpunktlage.....	18
2.1.2	Skalierungsfehler Beschleunigungs-, Winkelgeschwindigkeit-, Kraftsensor und Massenannahme	19
2.1.3	Initialwinkel der Beschleunigungs-, Gyro- und Kraftsensor.....	19
2.1.4	Abstand der Beschleunigungssensoren zum Gyrosensor	20
2.1.5	Schiefwinkeligkeit der Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitsrichtung .	20
2.1.6	Querempfindlichkeit der Beschleunigungs- und Gyrosensoren	21
2.1.7	Zeitversatz zwischen optischer und elektrischer Messtechnik.....	22
2.1.8	Verschiebung des Film- und Messkoordinatenursprungs.....	23
2.2	Ausgewählte Sensorfehler zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse.....	24
2.2.1	Offset-Fehler	24
2.2.2	Skalierungsfehler.....	24
2.2.3	Initiallagen der Sensoren.....	25
2.2.4	Nicht orthogonale Messachsen.....	26
3	Optimierungsverfahren.....	28
3.1	Bergsteigeralgorithmus.....	29

3.2	Evolutionäre Algorithmen	29
3.2.1	Grundformen evolutionärer Verfahren	30
3.3	Simuliertes Abkühlen	30
3.3.1	Schwellenakzeptanz	30
3.3.2	Sintflutalgorithmus.....	31
3.3.3	Rekordorientiertes Wandern	31
3.4	Erläuterung des im CDA implementierten Optimierungsverfahrens	32
3.4.1	Chi ²	32
3.4.2	1.Phase: Anfahren der Lösung	34
3.4.3	2.Phase: Loops.....	35
4	Sensitivitätsanalyse	37
4.1	Ablauf einer Sensitivitätsanalyse	38
4.1.1	Festlegung der Parameter für die Sensitivitätsanalyse.....	39
4.1.2	Bestimmung des Sensitivitätsanalyseverfahrens.....	39
4.1.3	Definieren des Abbruchkriteriums	40
4.1.4	Vergleich der unterschiedlichen Abbruchkriterien	42
5	Durchführen der Sensitivitätsanalyse	44
5.1	Ziele der Sensitivitätsanalyse	46
5.2	Definition Sensitivität	47
5.3	Ermitteln der notwendigen Sensorgenauigkeiten	53
5.4	Ergebniszusammenfassung	57
6	Durchführung der Optimierung	58
6.1	Fahrzeugversuch	59
6.1.1	Beschreibung ODB Versuch.....	59
6.1.2	Bestimmung Dummykopfkinematik Fahrzeugversuch	60
6.2	Schlittenversuch	65
6.2.1	Bestimmung Dummykopfkinematik Schlittenversuch.....	67
6.3	Analyse der optimierten Parameter auf Plausibilität.....	77
6.4	Sensitivitätsanalyse ODB Versuch	79

6.5	Sensitivitätsanalyse Schlittenversuch	80
6.6	Vergleich der Standardoptimierung und der Optimierung mit den sensitivsten Parametern.....	82
6.6.1	Optimierung ODB Versuch mit den sensitivsten Parametern	82
6.6.2	Optimierung Schlittenversuch mit den sensitivsten Parametern.....	84
6.7	Untersuchung der Optimierungsreihenfolge.....	88
6.8	Auswertbarkeit von Passivversuchen	89
6.9	Ergebniszusammenfassung	94
7	Automatisierung der Versuchsauswertung im CDA.....	96
7.1	Durchführen der Clusterung	96
7.2	Übersicht der analysierten Versuche	99
7.3	Beschreibung der unterschiedlichen Clustergruppen.....	102
7.4	Tool zur Bestimmung der Optimierungsparameter.....	109
7.5	Vergleich Standardoptimierung – Clusteroptimierung.....	111
7.5.1	Untersuchung der Positionsabweichungen	111
7.5.2	Analyse der optimierten Parameterwerte	112
7.5.3	Vergleich der Rechenzeiten	115
7.6	Versuchsauswertung mit den Erkenntnissen aus der Clusterung	116
7.6.1	Ablauf der Versuchsauswertung	116
7.6.2	Zusammenfassung der Vorteile der Clusteroptimierung.....	117
8	Zusammenfassung und Ausblick	118
9	Literaturverzeichnis.....	119
10	Internetquellenverzeichnis	120
11	Abbildungsverzeichnis.....	121
12	Tabellenverzeichnis	125
13	Anhang	i

1 Einführung

Im Entwicklungsprozess eines Automobils ist die Weiterentwicklung der Fahrzeugsicherheit von besonderer Bedeutung. Zu diesem Zweck werden Crash Tests mit dem Ziel durchgeführt, unter anderem den Insassenschutz zu verbessern. Bei der Durchführung dieser Crash Tests sind die Randbedingungen besonders wichtig die wie folgt lauten: [Kramer F. 2009, S. 325]

- Relevanz des Unfallgeschehens
- Repräsentativität der Unfall- und Verletzungsmechanik
- Reproduzierbarkeit der Messdaten

Die aus den Crash Tests gewonnenen Daten können zur Verbesserung und Weiterentwicklung des Fahrzeugkonzepts verwendet werden. Dabei sind besonders die Belastungen auf den Insassen wichtig. Um diese Belastungen messen bzw. bewerten zu können wurden spezielle Crashtestdummies entwickelt. Diese Dummies sollen in guter Näherung einem Modell des menschlichen Körpers entsprechen, wobei die auftretenden Belastungen durch Sensoren gemessen werden. Die Sensoren können unter anderem Kräfte, Momente, Beschleunigungen usw. messen, mit denen dann biomechanische Vergleichswerte bestimmt werden können.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus dem Crash Test ist die Insassenbewegung. Sie gibt darüber Auskunft, zu welchem Zeitpunkt sich der Körper wo befindet. Dabei lässt sich z.B. feststellen, ob es zu einem Kontakt zwischen Kopf und Lenkrad gekommen ist. Die Bewegung der einzelnen Körperteile wird mit deren Bahnkurven (Trajektorien) beschrieben, welche beispielsweise mit Hilfe der Videoanalyse bestimmt werden können. Derzeit wird die Dummybewegung nur von „außen“ gefilmt, da präzise Bahnen zur Zeit nur so bestimmt werden können. Probleme bei der Trajektorienbestimmung treten auf, wenn der Dummykopf von Objekten wie zum Beispiel dem Airbag oder der B-Säule verdeckt wird und es daher aus den Daten der Videoaufzeichnung nicht möglich ist, Schlüsse auf dessen Bewegung über einen bestimmten Zeitraum ziehen zu können.

Um auch Aussagen über diese, sehr wichtigen Bereiche treffen zu können, kann eine zusätzliche Berechnung der Bahn mit Hilfe der Daten von Beschleunigungs- und Drehratensensoren die im Dummy montiert sind. Diese Diplomarbeit befasst sich speziell mit der Berechnung und Bestimmung der Kopftrajektorie.



Abbildung 1.1: Crash Test [EuroNCAP 2011]

Bei diesem Verfahren zur Bestimmung der Kopftrajektorie kommt es jedoch zu mehr oder weniger großen Abweichungen zwischen berechneter Trajektorie im Vergleich zur gefilmten Trajektorie (Videokurve). Diese Abweichung wird bedingt durch Sensorfehler oder andersartige Einflüsse, wie zum Beispiel der Ungenauigkeit in der Ermittlung der Startgeschwindigkeit. Um diese Fehler in der Bestimmung der Messdaten ausgleichen, beziehungsweise um die Abweichungen minimieren zu können wird das von dem VSI entwickelte Programm CDA (Crash Data Analysis) verwendet. CDA optimiert die Sensorfehler, um die beiden Bahnen (Videoanalyse, Berechnung aus den Sensordaten) bestmöglich anzugleichen. Dieses neuartige Verfahren zur Berechnung der Bahnkurven wurde am VSI (Vehicle Safety Institute) in Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG entwickelt. Der grundsätzliche Hintergrund der Berechnung der Bahnkurven wird in den folgenden Kapiteln erklärt.

1.1 Trajektorienberechnung aus Beschleunigungs- und Gyrosensordaten

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Berechnung der Trajektorie (lat. Bahnkurve) eines Körpers. Sie ergibt sich aus der Lage und der Orientierung des Körpers im Raum zu jedem Zeitpunkt. Die Position und Orientierung eines Körpers im Raum wird durch sechs Freiheitsgrade (drei rotatorische und drei translatorische) beschrieben. Soll die Position des Körpers im Raum eindeutig bestimmt werden, so muss jede dieser sechs Größen bekannt sein. Berechnet wird die Trajektorie durch Integration der durch die Sensoren gemessenen Beschleunigungen und Drehraten, wobei die Voraussetzung dafür die Initialposition ist. Man kann die Position jedoch nicht nur aus den Beschleunigungen rechnen, da die Sensorachsen durch die Drehung nicht mehr zu dem globalen Koordinatensystem passen (siehe nächste Unterkapitel), sondern stets mitgedreht werden. Die Position und die Orientierung können nur gemeinsam aus Beschleunigungen und Drehraten bestimmt werden.

1.1.1 Koordinatensysteme und Koordinatentransformation

Zuerst werden anhand der folgenden Abbildung die unterschiedlich definierten Koordinatensysteme der elektrischen Messtechnik, der Videomesstechnik und der simulationsbasierenden Versuchsauswertung erklärt.

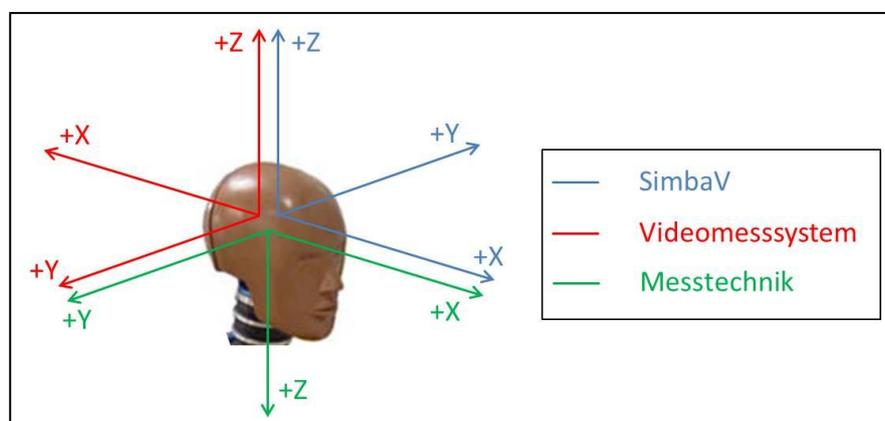


Abbildung 1.2: Unterschiedliche Koordinatensystem am Dummykopf

Der Koordinatenursprung aller drei Systeme liegt im Schwerpunkt des Dummykopfes. Das Videomesssystem (rot) orientiert sich in der Achsausrichtung am Fahrzeugkoordinatensystem bei dem die x-Richtung nach hinten geht. Die elektrische Messtechnik (grün) definiert die Ausrichtung der Koordinatenachsen hinsichtlich der SAE Norm J211-1. Beim SimbaV Koordinatensystem geht die x-Richtung nach vorn, die y-Richtung nach links und die z-Richtung nach oben.

Bei der Berechnung der Trajektorien sind zwei Koordinatensysteme nötig, einerseits das lokale Koordinatensystem in dem die Messdaten dargestellt werden, andererseits das globale Koordinatensystem welches als Bezugssystem erforderlich ist. Zwei Koordinatensysteme sind deshalb nötig, da die Sensordaten nur im lokalen Koordinatensystem des Sensors gemessen und ausgegeben werden können, die Trajektorie jedoch im globalen Koordinatensystem errechnet werden sollte, da nur in dem Fahrzeug- bzw. Videokoordinatensystem Vergleiche mit dem Video getroffen werden können.

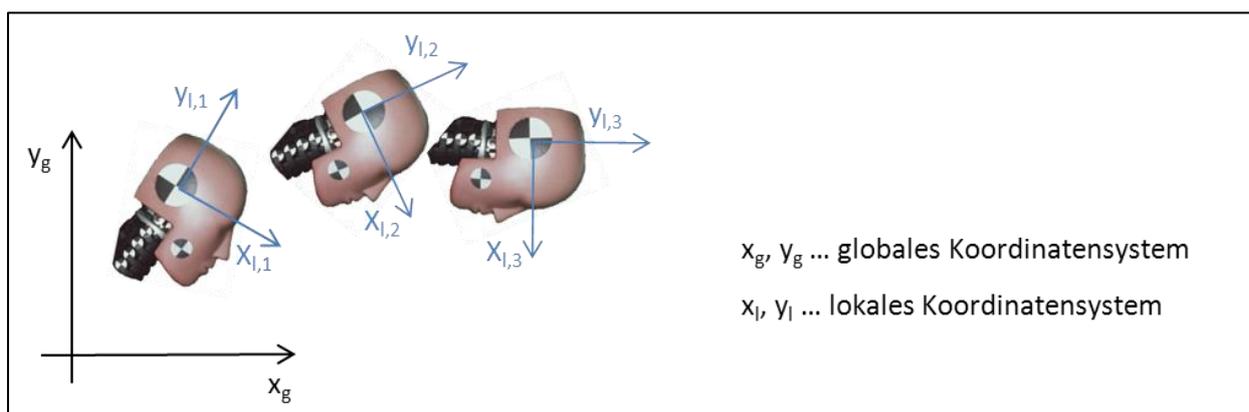


Abbildung 1.3: Unterschied globales, lokales Koordinatensystem

In der oben angeführten Abbildung sind die Unterschiede zwischen den beiden Koordinatensystemen graphisch dargestellt.

Physikalische Größen wie z.B. die Beschleunigung werden im Raum häufig als Vektor dargestellt. Die einzelnen Einträge des Vektors beziehen sich auf ein ganz bestimmtes Koordinatensystem und der Vektor beschreibt dann den Zustand der physikalischen Größe in genau diesem System. Soll jetzt der Vektor „aus der Sicht“ eines anderen Koordinatensystems dargestellt werden, so müssen seine Einträge (Koordinaten) transformiert werden. Im aktuellen Beispiel ist das der Beschleunigungsvektor der einmal aus dem globalen und einmal aus dem lokalen System betrachtet wird. Die Umrechnung zwischen den beiden Systemen geschieht mittels einer Koordinatentransformation.

Damit man die Lage eines Körpers im Raum eindeutig beschreiben kann, werden neben der Position drei voneinander unabhängige Winkel benötigt. Durch das Hintereinanderschalten der einzelnen Rotationen um die Achsen kann die allgemeine Rotation mit Hilfe der Transformationsmatrix beschrieben werden wobei die Reihenfolge der Drehungen von Bedeutung ist. [ITM Uni Stuttgart 2011]

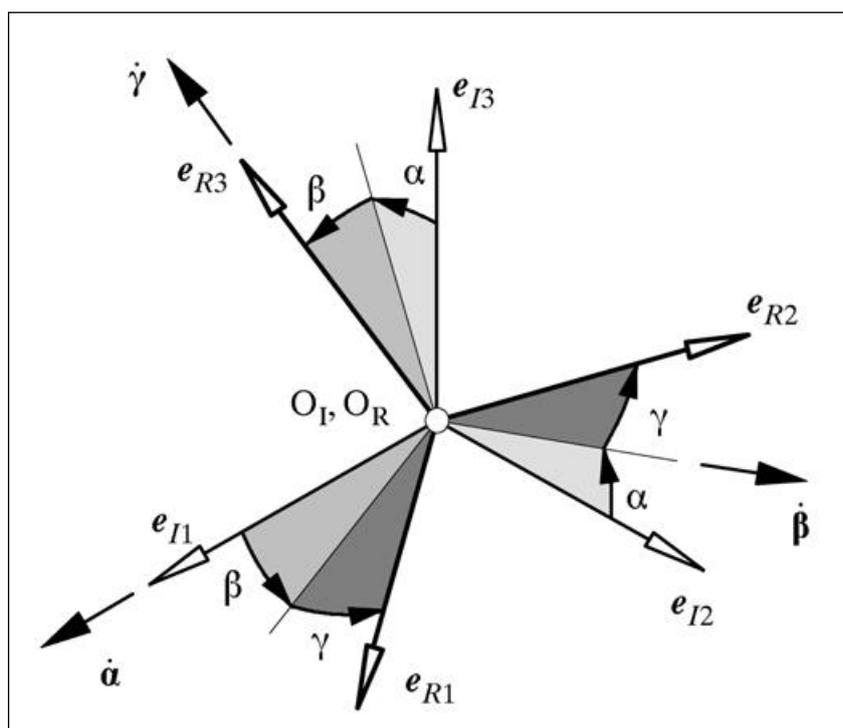


Abbildung 1.4: Kardan-Winkel [ITM Uni Stuttgart 2011]

Zur Festlegung dieser Reihenfolge kann beispielweise die Kardan-Winkel-Vorschrift unter Benutzung der drei Winkel α , β und γ genutzt werden. [FMS Uni Rostock 2011]

1. Teilrotation: Rotation mit dem Winkel α um die e_{R1} -Achse
2. Teilrotation: Rotation mit dem Winkel β um die e_{R2} -Achse
3. Teilrotation: Rotation mit dem Winkel γ um die e_{R3} -Achse

Daraus ergibt sich die dazugehörige Transformationsmatrix:

$$\begin{aligned}
 T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Um einen Vektor, der im lokalen Koordinatensystem dargestellt und beschrieben ist, in das globale Koordinatensystem überzuführen, wird die Transformationsmatrix mit dem zu transformierenden Vektor multipliziert.

$$x_{global} = T \cdot x_{lokal}$$

1.1.2 Bahnkurvenbestimmung für den idealen Fall

Zum besseren Verständnis wird die Berechnung zuerst anhand eines einfachen Beispiels unter Annahmen idealer Bedingungen erklärt, wobei immer von Messpunkt zu Messpunkt gerechnet wird.

Der ideale Fall setzt voraus, dass die Beschleunigungs- und Gyrodaten fehlerfrei sind und jene gemessenen Werte mit den tatsächlich auftretenden übereinstimmen. Zusätzlich sind die Messachsen der beiden Sensoren deckungsgleich, es wirkt keine Erdbeschleunigung und die Initiallagen der Sensoren sind bekannt. Zur Erklärung wird nur ein zweidimensionales Koordinatensystem verwendet.

Zuerst erfolgt die Berechnung der translatorischen Bewegung wobei die Verschiebung durch zweimaliges Integrieren der Beschleunigung errechnet wird.

$$v_{x,y\ n} = v_{x,y\ n-1} + a_{x,y\ n-1} \cdot \Delta t_{n-1}$$

$$\Delta s_{x,y(n)} = \frac{a_{x,y(n)}}{2} \cdot \Delta t^2_{(n)} + v_{x,y(n)} \cdot \Delta t_n$$

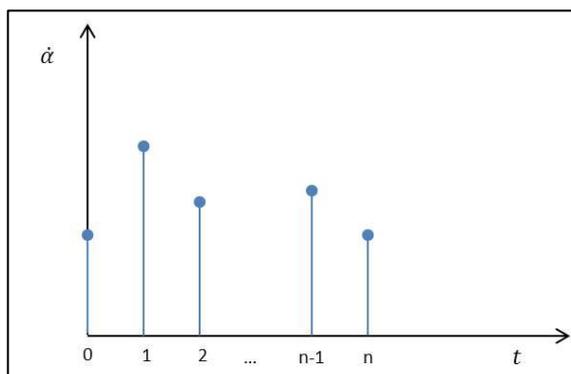


Abbildung 1.5: Schematischer Sensorausgang der Winkelgeschwindigkeit

Nach der Translation erfolgt die Rotation. Aus der durch den Sensor gemessenen Winkelgeschwindigkeit mit dem Zeitintervall Δt kann die Verdrehung für kleine Winkel wie folgt berechnet werden:

$$\alpha_0 \cdot \Delta t_{0 \rightarrow 1} = \Delta \alpha_{0 \rightarrow 1}$$

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \Delta \alpha_{0 \rightarrow 1}$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta \alpha_{1 \rightarrow 2}$$

$$\vdots$$

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} + \Delta \alpha_{n-1 \rightarrow n}$$

Nach diesen zwei Schritten, also der Verschiebung, die sich aus der Beschleunigung ergibt und der Verdrehung, die sich aus der Winkelgeschwindigkeit herleitet, kann die neue Position und Lage des Punktes bzw. des Körpers errechnet werden.

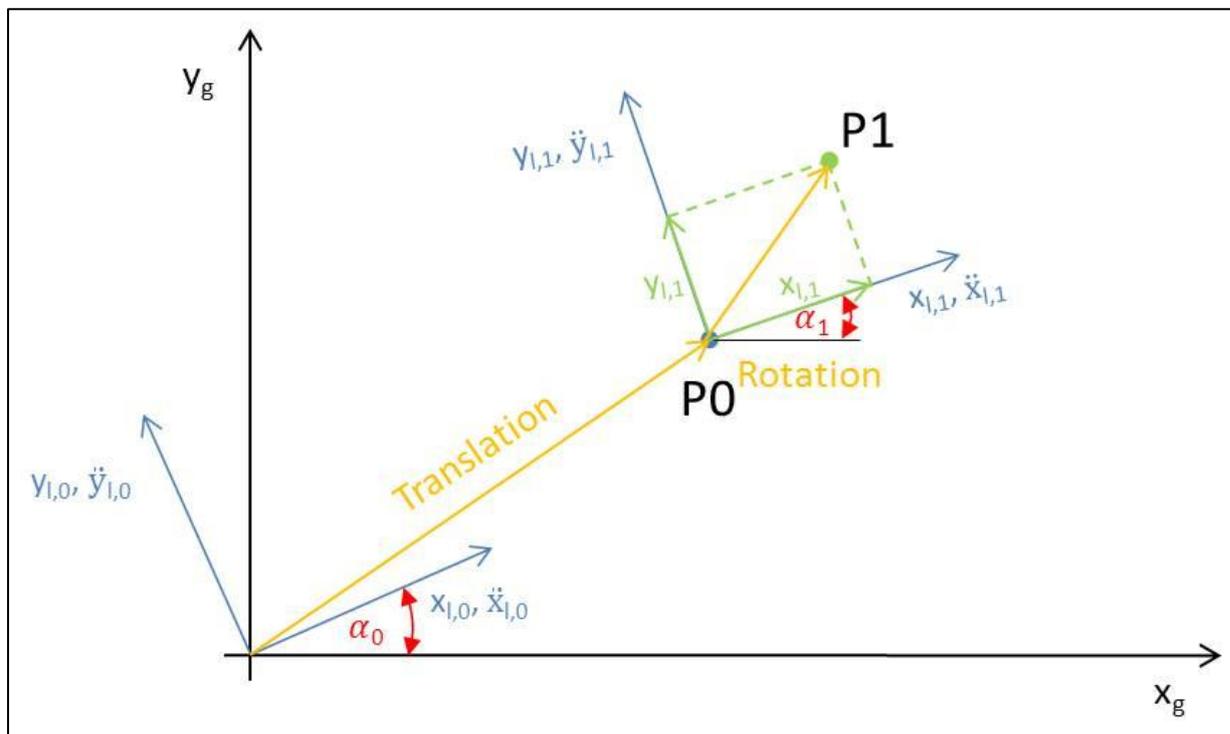


Abbildung 1.6: Bestimmung der Trajektorie

Der Punkt P1 in Abbildung 1.6, von dem die Koordinaten im lokalen Koordinatensystem bekannt sind, muss in das globale System übergeführt werden, da die Trajektorie im globalen System dargestellt werden soll. Dies soll anhand eines Beispiels für den Punkt P1 erklärt werden:

$$\begin{bmatrix} x_{g,1} \\ y_{g,1} \end{bmatrix} = T(\alpha_1) \cdot \begin{bmatrix} x_{l,1} \\ y_{l,1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{g,0} \\ y_{g,0} \end{bmatrix}$$

Ausgehend von diesem Punkt (n) werden die Translation und Rotation für den neuen Punkt (n+1) errechnet. Der zeitliche Ablauf dieser Positionen im globalen Koordinatensystem ergibt dann die gesuchte Trajektorie.

1.1.3 Bahnkurvenbestimmung für den realen Fall

Im letzten Kapitel wurde kurz die Bahnkurvenbestimmung für den idealen Fall beschrieben. Da der reale Fall jedoch nicht mit dem vorher Beschriebenen übereinstimmt, müssen folgende Punkte in die Berechnung miteinbezogen werden:

- g-Abgleich: Auf die Sensoren wirkt die Schwerkraft die berücksichtigt werden muss. Der g-Abgleich muss aufgrund des Sensorabgleichs am Versuchsbeginn durchgeführt werden
- Initiallagen der Sensoren: Die Anfangsposition der Sensoren ist nicht exakt bekannt. (siehe Kapitel 2)
- Fehler in der Bestimmung der Messsignale: Beschleunigungssensoren außerhalb der Drehachsen, Sensorfehler,...

Weiterführend werden die einzelnen Punkte näher erklärt.

g-Abgleich

Es ist wichtig die Erdbeschleunigung in der Trajektorienbestimmung zu berücksichtigen, um die gesuchte Trajektorie in der geforderten Genauigkeit bestimmen zu können. Aufgrund von Erwärmung oder anderen äußeren Einflüssen driften die Messwerte der verwendeten Sensoren, d.h. die Messwerte verändern sich auch bei Stillstand des Sensors. Um dieses Sensordriften zu minimieren werden die Ausgangssignale der Messkanäle durch die Messtechnik kurz vor dem Crash mittels Offsetkorrektur auf null gesetzt. Dies bewirkt jedoch einen Messfehler bei der Rotation des Beschleunigungssensors bedingt durch die Vernachlässigung des Effekts des Erdschwerefeldes. Dieser Fehler muss mit Hilfe des g-Abgleichs korrigiert werden. Der g-Abgleich ist nur bei der Trajektorienbestimmung wichtig, da bei den Insassenbelastungen Werte bis zu 100g auftreten und da ein Fehler von 1g nicht gravierend ist.

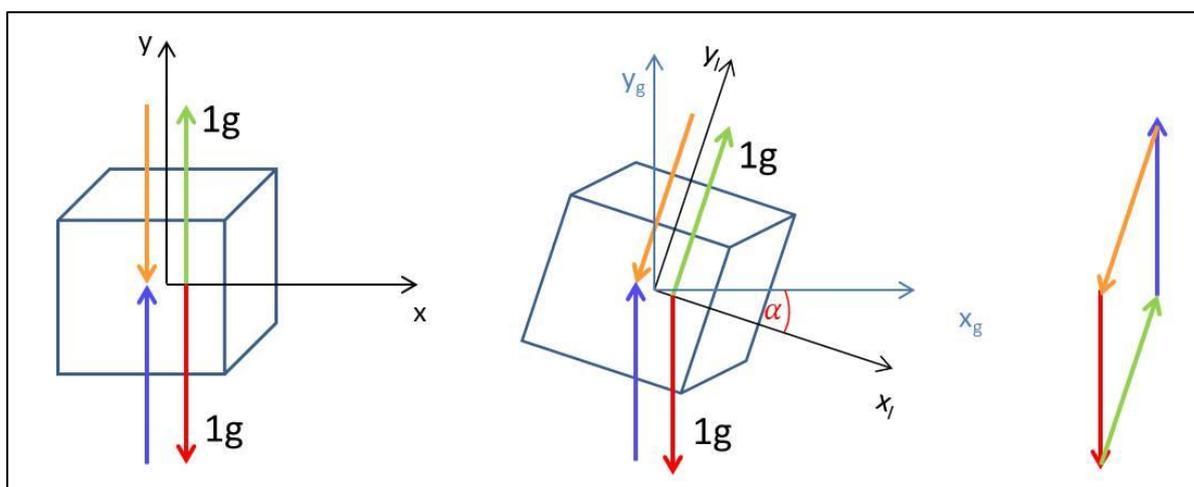


Abbildung 1.7: g-Abgleich

In der Abbildung 1.7 stellt der rote Vektor den Gravitationsvektor dar. Werden alle Messkanäle auf den Wert null gesetzt, so wird von der Messtechnik ein Vektor mit demselben Betrag in Messrichtung, also im lokalen Koordinatensystem in y -Richtung, addiert (grüner Vektor). Stimmt die Messrichtung mit der Richtung des Gravitationsvektors überein (linkes Bild) so ist die Erdbeschleunigung mit diesem Schritt ausgeglichen. Wird das lokale Koordinatensystem um den Winkel α verdreht so rotiert auch der addierte (grüne) Vektor um denselben Winkel womit sich ein falscher Summenvektor ergibt. Daraus resultiert auch eine nicht physikalische Beschleunigung in x - und y -Richtung. Diese Beschleunigung ist zwar im Vergleich zu den Beschleunigungen beim Crashtest gering, durch die zweifache Integration beeinflusst sie die Bahnkurve jedoch erheblich. Um dem entgegenzuwirken wird ein Vektor in Messrichtung subtrahiert (oranjer Vektor) und ein Vektor in globaler y -Richtung addiert. Somit ergibt der Summenvektor null. Der g-Abgleich ist jedoch nur möglich, wenn die Winkellage des Körpers im globalen System zu jedem Zeitpunkt bekannt ist.

Beschleunigungssensoren außerhalb der Drehachsen

Abbildung 1.8 zeigt den für die Arbeit zugrunde liegenden Sensoraufbau, welcher in den Dummy eingesetzt wird. Der größere hellgraue Würfel symbolisiert den Gyrosensor auf dem die Beschleunigungssensoren, als dunkelgraue Würfel dargestellt, angebracht sind. Die roten und blauen Pfeile sind die jeweiligen Koordinatensysteme der Sensoren, wobei die roten Pfeile die Achsen der Beschleunigungssensoren darstellen und die blauen Pfeile die Messachsen des Gyrosensors beschreiben. Der Abstand r gibt den konstruktiv bedingten Abstand vom Mittelpunkt des Gyrosensors zum Mittelpunkt des Beschleunigungssensors in y -Richtung an. Bei dieser Erklärung wird angenommen, dass sich die Messachsen genau in der Mitte des Sensors schneiden.

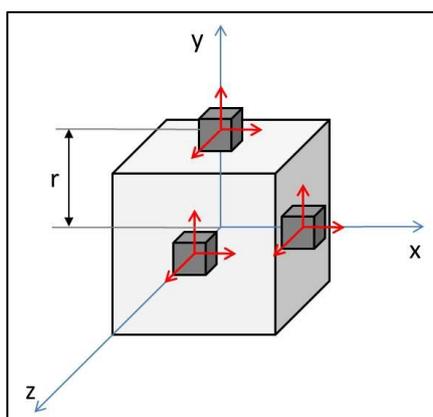


Abbildung 1.8: Schematische Darstellung der Anordnung von Gyro- und Beschleunigungssensor

Um die Beschleunigung im Mittelpunkt des Gyrosensors zu erhalten, wäre es optimal wenn die Beschleunigungen genau im Sensormittelpunkt gemessen würden, da auch die Berechnungen in diesem Punkt durchgeführt werden. Das ist aber bei der verwendeten Sensorik (ein Gyrosensor und drei Beschleunigungssensoren) nicht der Fall. Die Auswirkung dieser Tatsache wird anhand der nächsten Abbildung zweidimensional bildlich veranschaulicht.

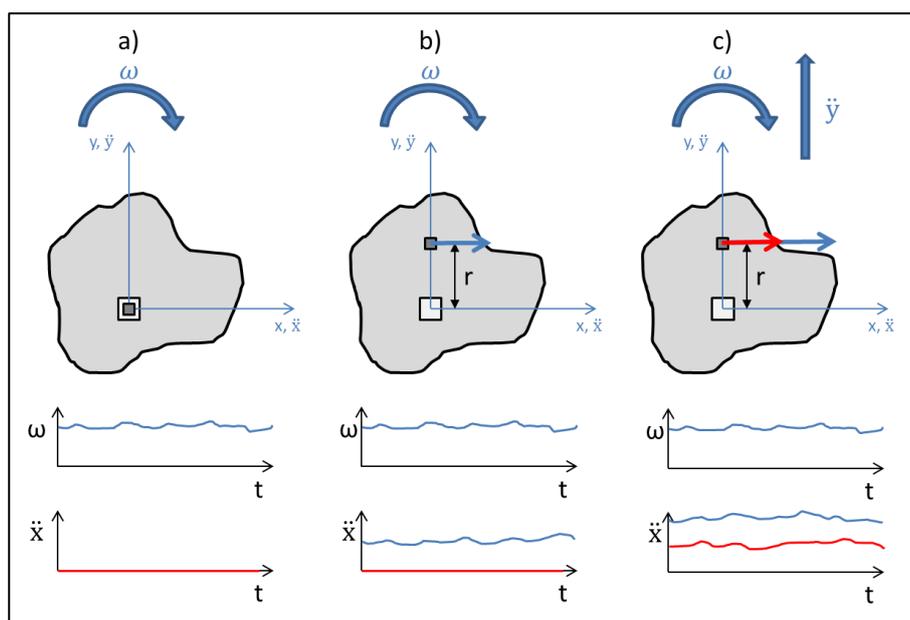


Abbildung 1.9: Auswirkung der unterschiedlichen Koordinatenachsen im zweidimensionalen Raum

Im obigen Bild ist die Bestimmung der Bewegungsgrößen im Koordinatenmittelpunkt von Interesse.

Im Punkt a) fallen die Koordinatensysteme der beiden Sensoren zusammen. Auch hier kennzeichnet das hellgraue Quadrat den Gyrosensor und das Dunkelgraue den Beschleunigungssensor. Wirkt jetzt die Drehrate ω mit dem Drehmittelpunkt im

Koordinatenursprung auf das System ergibt sich kein Beschleunigungsausgangssignal. Lediglich der Gyrosensor gibt die wirkende Drehrate aus.

Der Punkt b) und c) entspricht dem realen Fall der eingesetzten Sensoren, in dem der Mittelpunkt des Beschleunigungssensors um den Abstand r in y -Richtung verschoben ist. Das gemessene Ausgangssignal des Beschleunigungssensors ist die blaue Kurve, wobei die rote Kurve die tatsächliche Beschleunigung in y -Richtung angibt, die eigentlich null sein sollte. Dies resultiert daher, dass auf den Sensor durch die unterschiedlichen Mittelpunkte eine zusätzliche Beschleunigung $x = r \cdot \omega^2$ wirkt.

Der Fall, dass sowohl Rotationsgeschwindigkeit, also auch Beschleunigung auf das System wirken wird in Punkt c) dargestellt. Um die tatsächliche Beschleunigung des Sensors zu erhalten muss der Betrag $r \cdot \omega^2$ vom gemessenen Wert subtrahiert werden, was im Beschleunigungs-Diagramm die rot gekennzeichnete Kurve entsprechen würde.

1.2 Verwendete Sensorik

Die Aufgabe von Sensoren ist die Umwandlung einer physikalischen Größe in ein elektrisches Signal, um dieses unverstärkt, verstärkt oder aufbereitet an ein Steuergerät weiterzuleiten. Das Prinzip eines Sensors soll in Abbildung 1.10 näher erläutert werden. [Trautmann 2009, S.93]

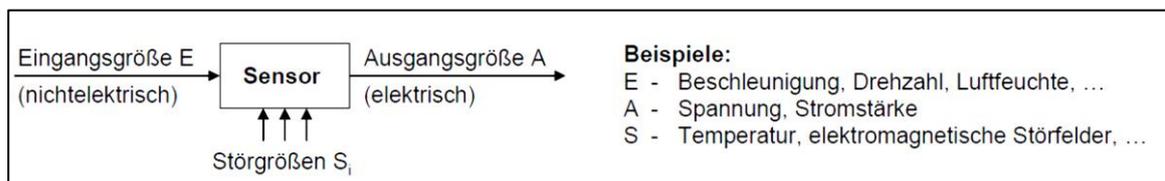


Abbildung 1.10: Prinzip eines Sensors [Trautmann 2009, S.93]

1.2.1 Beschleunigungssensor

Das Prinzip der Beschleunigungssensoren beruht darauf, dass die auf eine träge Masse m ausgeübte Kraft F resultierend aus der Beschleunigung a gemessen wird.

$$F = m \cdot a$$

Wie auch bei der Kraftmessung gibt es hier wegmessende und mechanische Spannung messende Systeme (piezoelektrisches Messprinzip), wobei im nächsten Abschnitt die wegmessenden Systeme näher beschrieben werden sollen. [Reif 2010, S.75]

Wegmessende Systeme

Bei wegmessenden Systemen wird die Beschleunigung eines Körpers dahingehend gemessen, dass die seismische Masse elastisch mit diesem Körper verbunden ist. [Reif 2010, S.75]

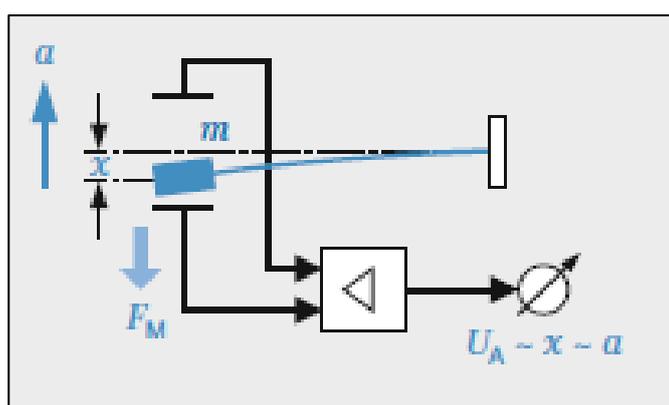


Abbildung 1.11: Wegmessender Beschleunigungssensor [Reif 2010, S.75]

Erfährt der Körper eine konstante Beschleunigung so kann diese durch das Gleichgewicht zwischen Beschleunigungskraft und Rückstellkraft mit der Auslenkung der Feder x , der Federkonstanten c und der Masse m berechnet werden: [Reif 2010, S.75]

$$F=m \cdot a=c \cdot x$$

Diese Auslenkung kann durch ein geeignetes Messverfahren in ein elektrisches Signal umgesetzt werden. Aus diesem Signal wird über Umrechnungsfaktoren die gesuchte Beschleunigung ermittelt.

Messprinzipien

Für das Erfassen der Auslenkung gibt es grundsätzlich vier Messprinzipien: [Reif 2010, S.76]

- Piezoresistiv: die Spannungsmessung erfolgt durch die Widerstandsänderung bei der Dehnung aufgrund der Beschleunigung des Feder-Masse-Systems
- Piezoelektrisch: durch die angelegte Kraft bzw. Beschleunigung kommt es zu einer Ladungsverschiebung im Kristall
- Kapazitiv: ein Plattenkondensator bestimmt über eine Kapazitätsmessung die Auslenkung des Feder-Masse-Systems
- Thermisch: durch die bei der Beschleunigung einsethende Asymmetrie einer "Blase erhitzten Gases" kann ein Beschleunigungssignal dargestellt werden

Auf den piezoresistiven Abgriff wird in weiterer Folge noch genauer eingegangen.

Piezoresistiver Beschleunigungssensor

Wie schon vorher erwähnt, führt die Beschleunigung der seismischen Masse aufgrund ihrer Trägheit zu einer Durchbiegung der Feder bzw. des Biegebalkens. Bei der Durchbiegung treten am Biegebalken Dehnungen auf, die mittels Dehnmessstreifen gemessen werden können. Diese Dehnwiderstände sind auf dem Biegebalken aufgebracht und ändern ihren elektrischen Widerstand unter Einwirkung von mechanischen Spannungen. Ein Dehnmessstreifen besteht aus einem Widerstandsdraht oder aus einer Widerstandsfolie dem Trägermaterial und den Anschlussdrähten.

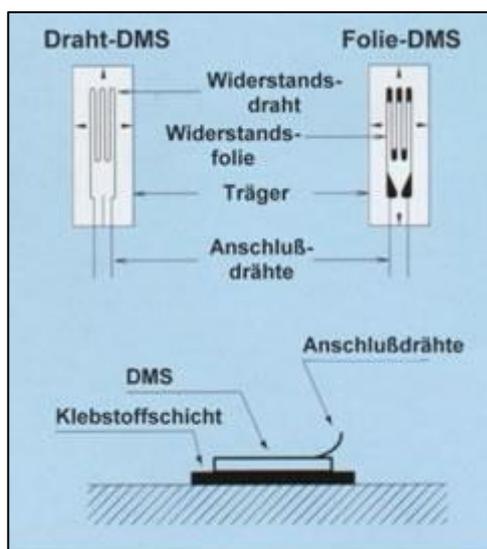


Abbildung 1.12: Dehnmessstreifen [Uni Kassel 2011]

Um die Temperaturabhängigkeit oder andere Störfaktoren wie z.B. Dehnungen außerhalb der Dehnrichtung kompensieren zu können sind die Messwiderstände in einer Wheatstone'schen Brückenschaltung angeordnet.

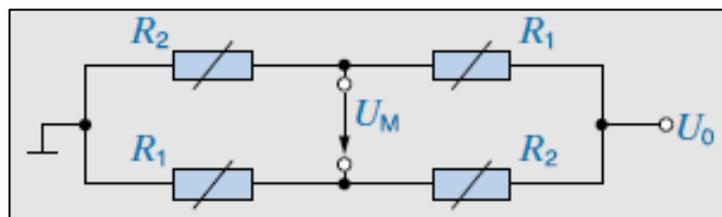


Abbildung 1.13:Wheatstone'sche Brückenschaltung [Reif 2010, S.134]

In der Brückenschaltung sind die Widerstände R_1 jene die gestaucht werden, die Widerstände R_2 werden gedehnt, U_0 ist die Versorgungsspannung und U_M die Messspannung. [Reif 2010, S.134]

Werden die Dehnmessstreifen gedehnt bzw. gestaucht ändert sich ihr elektrischer Widerstand und somit die Messspannung U_M . Die Messspannung U_M gibt also Aufschluss über die Dehnung bzw. Stauchung der Dehnmessstreifen, somit auf die Durchbiegung und schlussendlich über entsprechende Umrechnungsfaktoren auf die Beschleunigung.

1.2.2 Drehratensensor

Drehratensensoren oder Gyrosensoren bedienen sich dem Prinzip des mechanischen Kreisels und nutzen die Trägheitskräfte um unabhängig von Bezugssystemen Winkelbewegungen messen zu können. Vom mechanischen Kriese (engl.: Gyroscope bzw. Gyro) hat der Gyrosensor

auch seinen Namen. Schwingungsgyrometer (engl.: vibrating gyros) nutzen die bei einer Drehbewegung und gleichzeitiger Schwingbewegung auftretende Coriolisbeschleunigung.

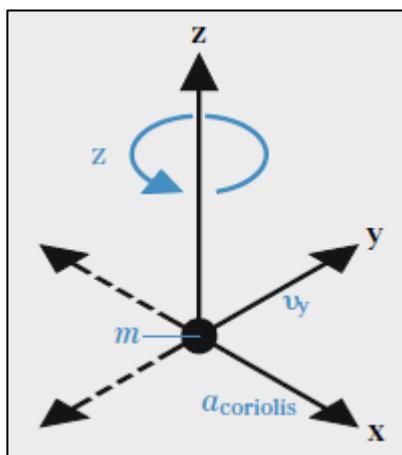


Abbildung 1.14: Zusammenhänge bei der Drehbewegung [Reif 2010, S.73]

Die Zusammenhänge der Drehrate, der Geschwindigkeit der Schwingbewegung v_y und der Coriolisbeschleunigung a_{coriolis} einer Punktmasse m sind in Abbildung 1.14 dargestellt. Die Achse um die die Drehrate von Schwingungsgyrometern gemessen wird (z-Achse), wird als „sensitive Achse“ bezeichnet. [Reif 2010, S.73]

Verwendung finden Schwingungsgyrometer beispielsweise im elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) und in Navigationssystemen.

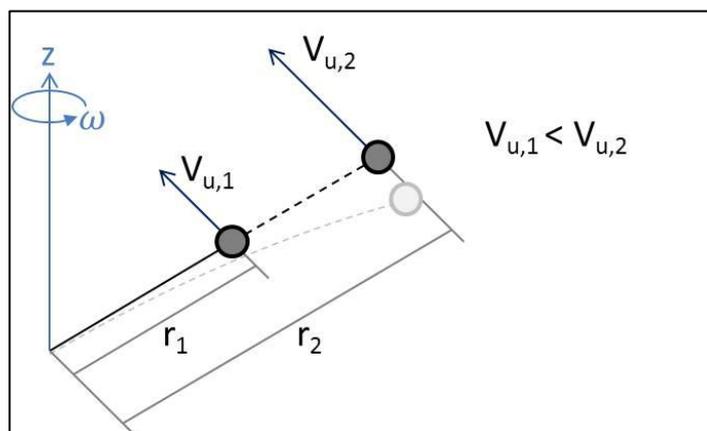


Abbildung 1.15: Messung der Coriolisbeschleunigung (Prinzip)

Die Art wie Schwingungsgyrometer die Coriolisbeschleunigung messen wird im folgenden Abschnitt erklärt. Ausgangssituation ist eine sich um eine Drehachse konstant drehende Masse. Wenn der Abstand der Masse vom Drehmittelpunkt vergrößert wird muss sie bei gleichbleibender Zeit einen längeren Weg zurücklegen und somit eine höhere Geschwindigkeit haben. Um auf diese höhere Umfangsgeschwindigkeit zu kommen muss die Masse

beschleunigt werden (Coriolisbeschleunigung). Wird die Masse federnd aufgehängt so ist die Durchbiegung proportional der Beschleunigung. Wird der Abstand wieder verkleinert so muss folglich auch die Geschwindigkeit reduziert werden. Die dafür benötigte Bremsbeschleunigung kann ebenfalls mittels Durchbiegung der Aufhängung gemessen werden.

Ausgehend von einer periodischen Schwingungsanregung wird bei Schwingungsgyrometern der Abstand zur Drehachse einer oder mehrerer Massen zuerst vergrößert und dann wieder verkleinert, wobei die Masse hierfür beschleunigt und abgebremst werden muss. Die Beschleunigungs- und Bremskräfte hängen von der Drehrate und der Schwingungsamplitude ab. Wenn die Schwingungsanregung konstant gehalten wird, kann mit Hilfe der Beschleunigungskräfte die Drehrate bestimmt werden. [Reif 2010, S.74]

Aufbau und Funktion eines Drehratensensors

Zwei Schwingplatten (4), auf denen jeweils ein kapazitiver Coriolisbeschleunigungssensor (5) getragen wird, schwingen im Gegenteil, wobei die Frequenz durch die Masse der beiden Platten und der Koppelfeder (1) bestimmt wird. Die Beschleunigungssensoren messen die Coriolisbeschleunigung (6) der durch Führungsfedern (7) gehaltenen Platten senkrecht zur Schwingrichtung (3) wenn sich dieser um seine Hochachse mit der Drehrate Ω dreht. Die Drehrate ergibt sich aus der gemessenen Coriolisbeschleunigung und der auf einem konstanten Wert gehaltenen Schwinggeschwindigkeit. Die konstante Schwingung wird durch einen Permanentmagneten (2) auf induktive Weise erzeugt. [Reif 2010, S.130f]

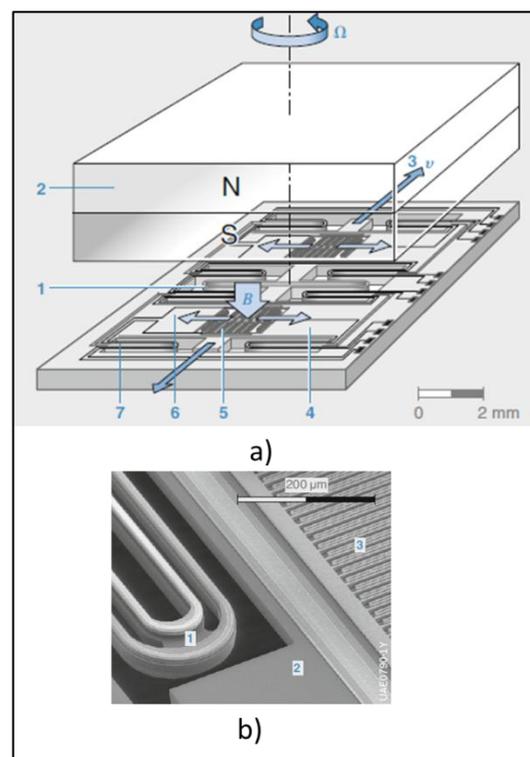


Abbildung 1.16: a) Aufbau und b) Struktur eines Drehratensensors [Reif 2010,S. 130]

Durch die gegenläufige Schwingung der beiden Masseplatten ergeben sich zwei Sensorsignale, die beide den gleichen Wert jedoch unterschiedliche Vorzeichen haben. Durch die Summenbildung dieser zwei Sensorsignale können externe Fremdbeschleunigungen kompensiert werden.

2 Grundlagen der Sensorfehler

Ein Fehler bedeutet im Prinzip in der Sensorik, dass der gemessene Wert nicht mit dem tatsächlichen Wert übereinstimmt. Besonders hervorzuheben sind der Offset- und der Skalierungsfehler, da diese großen Einfluss auf die Trajektorie haben und deshalb detaillierter beschrieben werden. [Reif 2010, S.20]

Des Weiteren erfolgt anschließend ein Überblick über die bereits im CDA inkludierten Fehler. Es gibt natürlich noch mehrere Fehler die noch nicht im CDA integriert sind, da sie allgemein schwierig mathematisch zu beschreiben sind. (z.B. Nichtlinearität)

Bevor die im CDA inkludierten Fehler angeführt bzw. näher erklärt werden, erfolgt eine kurze Erklärung des Programms CDA mit dem die Untersuchungen dieser Arbeit durchgeführt wurden.

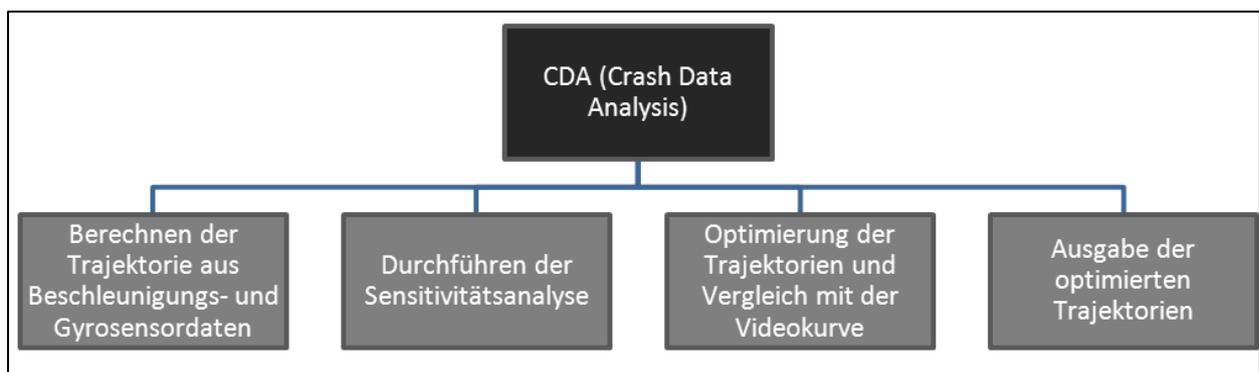


Abbildung 2.1: Beschreibung CDA (Crash Data Analysis)

Neben der Berechnung der Trajektorie aus den Beschleunigungs- und Gyrosensordaten, deren Ablauf in den vorangegangenen Kapiteln erklärt wurde, kann mit dem CDA die Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Mit dem CDA erfolgen die Optimierung der Trajektorien und der Vergleich der berechneten Trajektorie mit der Trajektorie aus der Filmanalyse, sowie schlussendlich die Ausgabe der optimierten Trajektorie. Die letzten drei Punkte werden in den folgenden Kapiteln näher erklärt.

2.1 Überblick über die im CDA inkludierten Fehler

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die bereits im CDA inkludierten Sensorfehler gegeben, sowie deren Bezeichnung und Einheit.

2.1.1 Offset-Fehler Beschleunigung, Geschwindigkeit, Weg, Winkelgeschwindigkeit und Schwerpunktlage

Mit den Offset-Fehlern wird die Nullpunktverschiebung berücksichtigt. Das bedeutet, dass der Startwert vom Punkt Null um einen bestimmten Betrag abweicht.

Bezeichnung im CDA:	Beschleunigung (acceleration): <ul style="list-style-type: none"> • Offset ACX (OACX) • Offset ACY (OACY) • Offset ACZ (OACZ) 	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
	Startgeschwindigkeit (velocity): <ul style="list-style-type: none"> • Offset VAX (VAX) • Offset VAY (VAY) • Offset VAZ (VAZ) 	$\left[\frac{cm}{s}\right]$
	Weg (displacement): <ul style="list-style-type: none"> • Offset DSX • Offset DSY • Offset DSZ 	$[cm]$
	Winkelgeschwindigkeit (angular velocity): <ul style="list-style-type: none"> • Offset AVX (OAVX) • Offset AVY (OAVY) • Offset AVZ (OAVZ) 	$\left[\frac{deg}{s}\right]$
	Schwerpunktlage (Centre of Gravity) <ul style="list-style-type: none"> • Offset COG X • Offset COG Y • Offset COG Z 	$[cm]$

Tabelle 2-1: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Offset

2.1.2 Skalierungsfehler Beschleunigungs-, Winkelgeschwindigkeit-, Kraftsensor und Massenannahme

Das gemessene Signal weicht um einen bestimmten linearen Faktor vom tatsächlichen Wert ab.

Bezeichnung im CDA:	<u>Beschleunigung (acceleration)</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Scale ACX (SACX)</i> • <i>Scale ACY (SACY)</i> • <i>Scale ACZ (SACZ)</i> 	[%]
	<u>Winkelgeschwindigkeit (angular velocity)</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Scale AVX (SAVX)</i> • <i>Scale AVY (SAVY)</i> • <i>Scale AVZ (SAVZ)</i> 	[%]
	<u>Kraft (force)</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Scale FOX</i> • <i>Scale FOY</i> • <i>Scale FOZ</i> 	[%]
	<u>Masse (mass)</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Scale Mass</i> 	[%]

Tabelle 2-2: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Skalierung

2.1.3 Initialwinkel der Beschleunigungs-, Gyro- und Kraftsensor

Mit diesen Parametern kann die anfängliche Schiefstellung der Koordinatensysteme der einzelnen Sensoren in Relation zu den „theoretischen“ Startwinkeln ausgeglichen werden.

Bezeichnung im CDA:	<u>Beschleunigungssensor</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Offset AC AIX</i> • <i>Offset AC AIY</i> • <i>Offset AC AIZ</i> 	[deg]
	<u>Gyrosensor</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Offset AV AIX (AIX)</i> • <i>Offset AV AIY (AIY)</i> 	[deg]

	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Offset AV AIZ (AIZ)</i> 	
	<u>Kraftsensor</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Offset FO AIX</i> • <i>Offset FO AIY</i> • <i>Offset FO AIZ</i> 	[deg]

Tabelle 2-3: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Schiefstellung

2.1.4 Abstand der Beschleunigungssensoren zum Gyrosensor

Dieser Parameter beschreibt den konstruktiv bedingten Abstand der Mittelpunkte der einzelnen Beschleunigungssensoren zum Mittelpunkt des Gyrosensors.

Eine detailliertere Beschreibung erfolgt im nächsten Kapitel.

Bezeichnung im CDA:	<u>Beschleunigungssensor in X-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>ACX Sensor X</i> • <i>ACX Sensor Y</i> • <i>ACX Sensor Z</i> 	[cm]
	<u>Beschleunigungssensor in Y-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>ACY Sensor X</i> • <i>ACY Sensor Y</i> • <i>ACY Sensor Z</i> 	[cm]
	<u>Beschleunigungssensor in Z-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>ACZ Sensor X</i> • <i>ACZ Sensor Y</i> • <i>ACZ Sensor Z</i> 	[cm]

Tabelle 2-4: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Abstand der Sensoren

2.1.5 Schiefwinkeligkeit der Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitsrichtung

Die Messrichtungen der Sensoren entsprechen keinem orthogonalen Koordinatensystem. Ebenso wie auch schon vorher die Initiallagen der Sensoren wird die Schiefwinkeligkeit der Beschleunigungs- und Gyrosensoren im folgenden Kapitel näher erklärt.

Bezeichnung im CDA:	<u>Beschleunigungssensor in X-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Alpha ACX</i> 	[deg]
----------------------------	---	-------

	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Phi ACX</i> 	
	<u>Beschleunigungssensor in Y-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Alpha ACY</i> • <i>Phi ACY</i> 	[deg]
	<u>Beschleunigungssensor in Z-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Alpha ACZ</i> • <i>Phi ACZ</i> 	[deg]
	<u>Gyrosensor in X-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Alpha AVX</i> • <i>Phi AVX</i> 	[deg]
	<u>Gyrosensor in Y-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Alpha AVY</i> • <i>Phi AVY</i> 	[deg]
	<u>Gyrosensor in Z-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Alpha AVZ</i> • <i>Phi AVZ</i> 	[deg]

Tabelle 2-5: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Schiefwinkeligkeit

2.1.6 Querempfindlichkeit der Beschleunigungs- und Gyrosensoren

Auch wenn die Messrichtungen der Sensoren deckungsgleich mit den Koordinatenrichtungen der Berechnung sind, geben die Sensoren ein Signal in Querrichtung, also normal zur Messrichtung, aus.

Bezeichnung im CDA:	<u>Beschleunigungssensor in X-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>ACX Cross-Sens Y</i> • <i>ACX Cross-Sens Z</i> 	[%]
	<u>Beschleunigungssensor in Y-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>ACY Cross-Sens X</i> • <i>ACY Cross-Sens Z</i> 	[%]
	<u>Beschleunigungssensor in Z-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>ACZ Cross-Sens X</i> 	[%]

	<ul style="list-style-type: none"> • <i>ACZ Cross-Sens Y</i> 	
	<u>Gyrosensor in X-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>AVX Cross-Sens Y</i> • <i>AVX Cross-Sens Z</i> 	[%]
	<u>Gyrosensor in Z-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>AVY Cross-Sens X</i> • <i>AVY Cross-Sens Z</i> 	[%]
	<u>Gyrosensor in Z-Richtung</u> <ul style="list-style-type: none"> • <i>AVZ Cross-Sens X</i> • <i>AVZ Cross-Sens Y</i> 	[%]

Tabelle 2-6: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Querempfindlichkeit

2.1.7 Zeitversatz zwischen optischer und elektrischer Messtechnik

Mit diesem Parameter wird der Zeitversatz der Videomesdaten und der Sensormesdaten berücksichtigt.

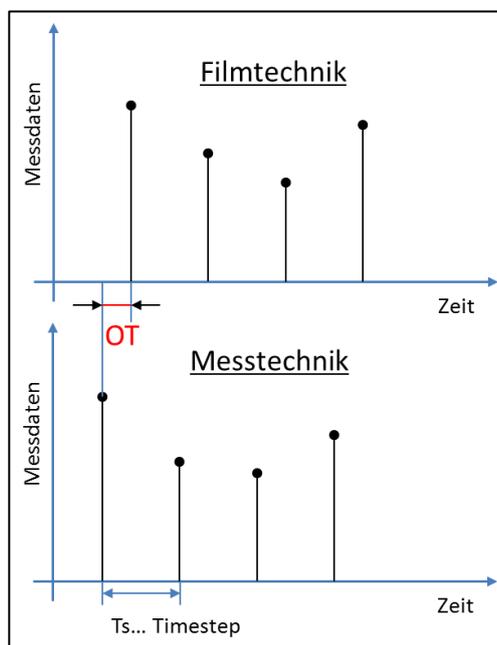


Abbildung 2.2: Erklärung OT

Der Grund für diesen Parameter ist die unterschiedliche Aufzeichnungsfrequenz der Video- und der elektrischen Messtechnik. Im Normalfall ist die Aufzeichnungsfrequenz der elektrischen Messtechnik größer als die der Videoaufzeichnung. Dadurch müssen die elektrischen

Messwerte den Videobildern „zeitlich“ zugeordnet werden um einen Versatz der Messwerte von den Videobildern zu verhindern.

Bezeichnung im CDA:	<u>Zeitversatz Video Messung</u> • <i>Offset Time</i>	$\left[\frac{ts}{100}\right]$
----------------------------	--	-------------------------------

Tabelle 2-7: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Zeitversatz

2.1.8 Verschiebung des Film- und Messkoordinatenursprungs

Die Koordinatensysteme der Filmmesstechnik (rot) und der elektrischen Messtechnik (grün) sind im Allgemeinen nicht deckungsgleich. Dieser Abstand kann über diesen Parameter in der Berechnung berücksichtigt werden.

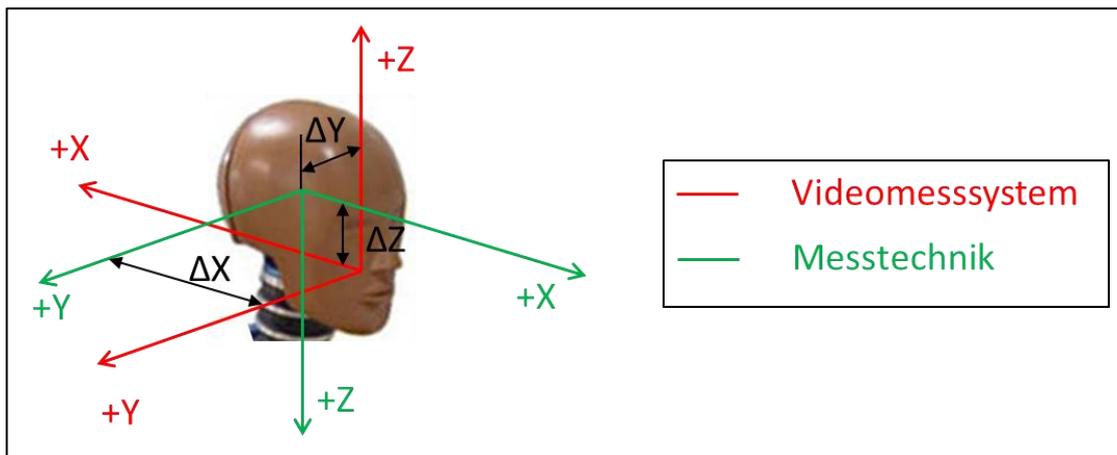


Abbildung 2.3: Erklärung VP

Dieser Parameter berücksichtigt diese mögliche Ungenauigkeit.

Bezeichnung im CDA:	<u>Verschiebung Videopunkt – Messpunkt</u> • <i>Offset VPX</i> • <i>Offset VPY</i> • <i>Offset VPZ</i>	$[cm]$
----------------------------	---	--------

Tabelle 2-8: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Verschiebung des Koordinatenursprungs

2.2 Ausgewählte Sensorfehler zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse

In diesem Kapitel werden die im Rahmen der Diplomarbeit für die Sensitivitätsanalyse ausgesuchten Sensorfehler näher beschrieben. Zur Sensitivisierung wurden Offset-Fehler sowie die Skalierungsfehler, die anfängliche Schiefstellung der Koordinatensysteme der Beschleunigungs- und Gyrosensoren, sowie die Schiefwinkeligkeit der Messrichtungen von der Beschleunigung und der Winkelgeschwindigkeit gewählt. Wobei die anfängliche Schiefstellung der Koordinatensysteme genauer gesehen kein eindeutiger Sensorfehler ist, sondern eher eine nicht exakt bekannte Initialbedingung im Versuchsaufbau ist. Gleiches gilt auch für die Startgeschwindigkeit.

2.2.1 Offset-Fehler

Der Offset-Fehler oder auch additiver Fehler bewirkt eine Parallelverschiebung der Ist-Kennlinie, also ein Abweichung mit dem gleichen Betrag und dem gleichen Vorzeichen an jeder Stelle des Messbereiches. [Parthier 2008, S.79]

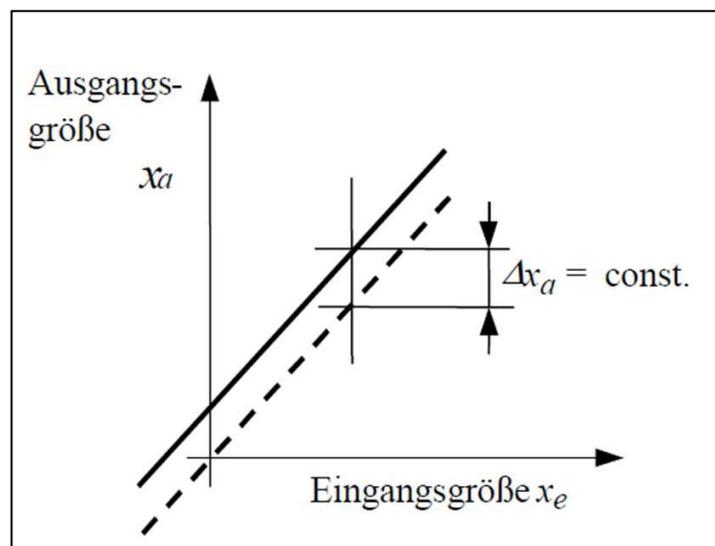


Abbildung 2.4: Auswirkung Offset-Fehler [Parthier 2008, S.80]

2.2.2 Skalierungsfehler

Der Skalierungsfehler oder auch Verstärkungsfehler führt zu einer unerwünschten Veränderung der Übertragungsfunktion, er verstärkt also die Messeinrichtung und bewirkt somit eine unterschiedliche Steigung der Kennlinie.

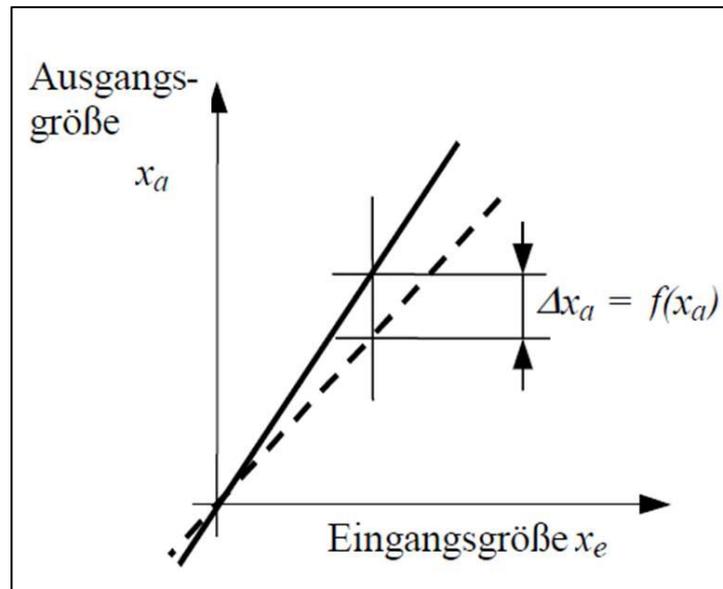


Abbildung 2.5: Auswirkung Skalierungsfehler [Parthier 2008, S.81]

2.2.3 Initiaillagen der Sensoren

Die Initiaillagen der Sensoren haben einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnung der Trajektorie. Sie werden für die anfängliche Integration der Beschleunigungssignale benötigt. Die Anfangslage der Sensoren fließt also direkt in die Berechnung mit ein und ist daher zu berücksichtigen, da sich durch sie der Verlauf der Bahnkurve erheblich verändert.

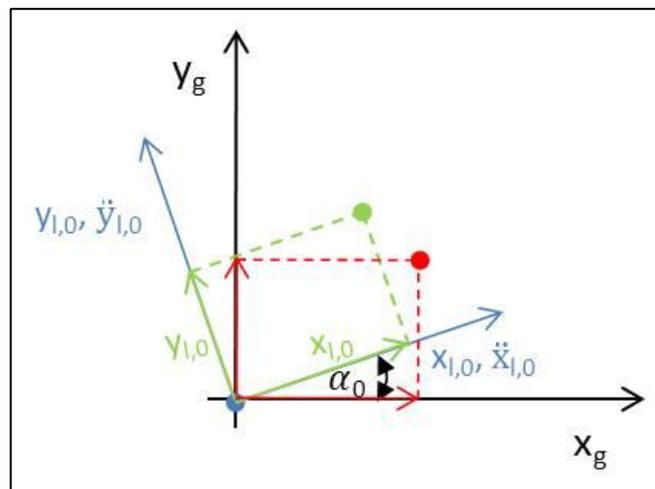


Abbildung 2.6: Einfluss der Initiaillage

Die Graphik zeigt den Einfluss der Initiaillage für die Verschiebung eines Punktes. Dabei wird der Punkt ausgehend vom Koordinatenursprung im jeweiligen Inertialsystem um y_{10} bzw. x_{10} verschoben. In Abbildung 2.6 kennzeichnet der grüne Punkt die Verschiebung unter Berücksichtigung der Initiaillage. Bei der Verschiebung des roten Punktes wurde die Initiaillage

des Sensors vernachlässigt. Eine anfängliche Schiefstellung der Sensoren kann unter anderem konstruktiv bedingt sein, wenn beispielsweise die Beschleunigungssensoren auf dem Gyrosensor montiert werden.

Im mathematischen Modell fließen die Initiallagen der Beschleunigungs- und Gyrosensoren als veränderlicher Startwert der ersten Integration mit ein.

2.2.4 Nicht orthogonale Messachsen

Der Messwert eines Sensors wird immer einer Messrichtung zugeordnet. Das heißt bei einem Beschleunigungssensor wird der gemessenen Beschleunigung immer eine Richtung zugeteilt. Idealerweise bilden die Messachsen ein orthogonales System. Im realen Fall weichen die tatsächlichen Achsrichtungen von diesem orthogonalen System ab. Stimmen die Winkel der Koordinatenachsen nicht würde die Beschleunigung in der Trajektorienberechnung in die falsche Richtung zeigen. Die Auswirkungen von nicht orthogonalen Messachsen soll anhand der Abbildung 2.7 erläutert werden, wobei P die Verschiebung infolge der Beschleunigung im orthogonalen/idealen System und P' die Verschiebung im realen/schiefwinkligen Koordinatensystem ist.

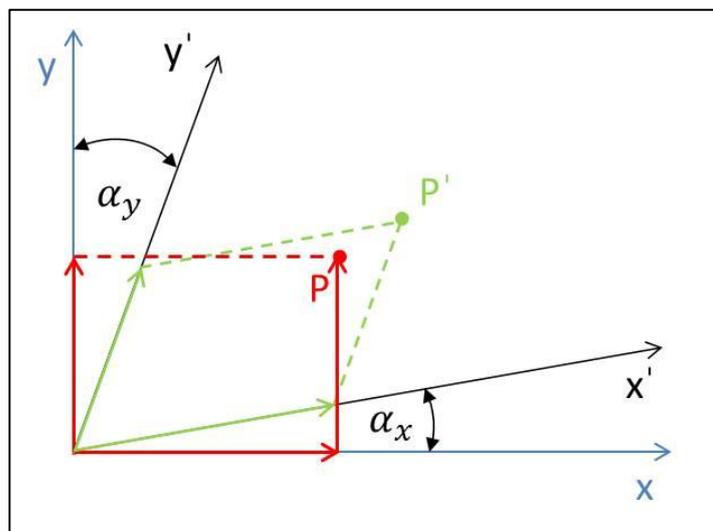


Abbildung 2.7: Auswirkung von nicht orthogonalen Messachsen

Um die realen/schiefwinkligen Messachsen bestimmen und beschreiben zu können wird zunächst ein Kegel mit dem Öffnungswinkel α definiert. Es sei angenommen, dass die Messachse auf diesem Kegel liegt. Um die schiefwinklige Messachse eindeutig bestimmen zu können wird noch ein zweiter Winkel benötigt, nämlich γ . Das ist der Winkel zwischen der Messachse und der Koordinatenebene der gewollten und folgenden Koordinatenrichtung. Der Winkel γ_x ist also jener Winkel zwischen der Messachse und der x-y Koordinatenebene. Durch

die Anwendung auf jede Messachse wird aus diesen sechs Winkeln ein neues schiefwinkeliges Koordinatensystem definiert, deren Achsen in die korrekte Messrichtung zeigen.

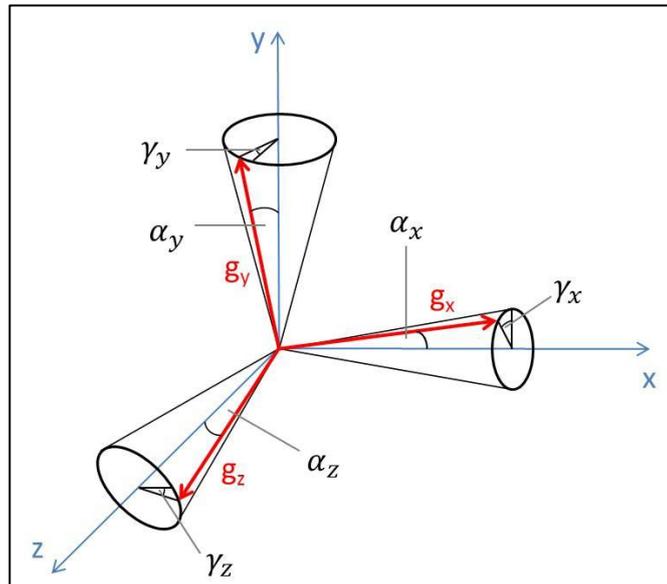


Abbildung 2.8: Schiefwinkelige Messachsen

Im mathematischen Modell wird die Schiefwinkeligkeit der Messachsen wie folgt behandelt. Für die Beschleunigungsmessung sei der Einheitsvektor ga_i , für die Winkelgeschwindigkeit gw_i . Mit den oben angeführten Winkeln lassen sich die Einheitsvektoren der veränderten Koordinatenrichtungen beschreiben, wobei e_i der Einheitsvektor des körperfesten, orthogonalen Koordinatensystems ist. Für die Beschleunigungsrichtung gilt:

$$ga_x = \cos \alpha_x e_x + \sin \alpha_x \cos \gamma_x e_y + \sin \alpha_x \sin \gamma_x e_z$$

$$ga_y = \sin \alpha_y \sin \gamma_y e_x + \cos \alpha_y e_y + \sin \alpha_y \cos \gamma_y e_z$$

$$ga_z = \sin \alpha_z \cos \gamma_z e_x + \sin \alpha_z \sin \gamma_z e_z + \cos \alpha_z e_z$$

Die Indizes x , y , z wurden deshalb verwendet, da angenommen wird, dass sich die Messrichtungen nur gering ändern. Für die Winkelgeschwindigkeit gilt:

$$gw_x = \cos \alpha_x e_x + \sin \alpha_x \cos \gamma_x e_y + \sin \alpha_x \sin \gamma_x e_z$$

$$gw_y = \sin \alpha_y \sin \gamma_y e_x + \cos \alpha_y e_y + \sin \alpha_y \cos \gamma_y e_z$$

$$gw_z = \sin \alpha_z \cos \gamma_z e_x + \sin \alpha_z \sin \gamma_z e_z + \cos \alpha_z e_z$$

Mit Hilfe dieser Vektoren lässt sich das schiefwinkelige Koordinatensystem eindeutig beschreiben.

3 Optimierungsverfahren

Der Begriff „Optimierung“ wird sowohl in der Mathematik, als auch Umgangssprachlich sehr häufig verwendet, wobei es das „möglichst gute“ Lösen eines Problems bezeichnet. In der Mathematik kann der Begriff im Unterschied zur Umgangssprache präziser formuliert werden. Hierbei soll der Wert einer Funktion oder auch ein Parameter bezogen auf eine bestimmte Problemstellung hingehen maximal bzw. minimal werden, wobei auch auf einschränkende Nebenbedingungen eingegangen wird. [Walz 2011, S.147]

Der Lösungsweg bzw. das Verfahren um die optimale Lösung zu finden wird als Optimierungsverfahren bezeichnet, wobei es mittlerweile in der Literatur eine Vielzahl solcher Verfahren gibt.

Wie schon vorher erwähnt dienen Optimierungsverfahren zur Findung des Optimums. Dabei muss zwischen dem globalen und dem lokalen Optimum unterschieden werden. Das globale Optimum ist die optimale Lösung eines Optimierungsverfahrens. Bei einem globalen Optimum gibt es keine zulässige Lösung mit bessern Werten. Als lokales Optimum werden Lösungen bezeichnet, die den bestmöglichen Wert in einem bestimmten Umfeld aufweisen. [RSF Uni Greifswald, 2011]

Zur näheren Erklärung soll die Abbildung 3.1 dienen, welche den Unterschied zwischen dem globalen und lokalen Optimum darstellen soll. Gesucht werden die Maxima einer Funktion $F(x)$.

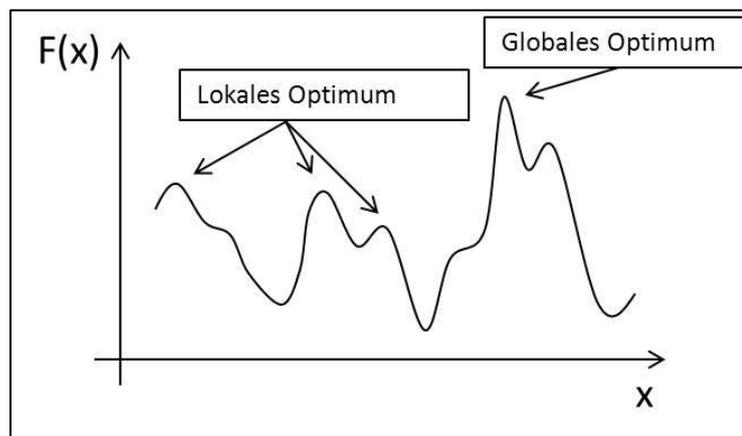


Abbildung 3.1: Globales und lokales Optimum

Des Weiteren muss zwischen Parameter- und Funktionsoptimierung unterschieden werden. Bei der Parameteroptimierung besteht das Ziel darin, den für die Aufgabe am bestmöglich geeigneten Parameter zu finden, wobei im Gegensatz dazu bei der Funktionsoptimierung die optimale Funktion gesucht wird.

In den folgenden Abschnitten werden einige ausgewählte, bereits bestehende Optimierungsverfahren kurz beschrieben, bevor das im CDA verwendete Verfahren näher erklärt wird.

3.1 Bergsteigeralgorithmus

Der Bergsteigeralgorithmus, auch als Hill-Climbing-Verfahren bekannt, ist ein weit verbreitetes Optimierungsverfahren um zielsicher das nächstgelegene lokale Optimum zu finden. Die Suche nach der besten Lösung erfolgt durch gezielte Schritte in einem Suchraum. Zuerst wird ein Ausgangspunkt zufällig gewählt der die Anfangslösung darstellt. In der Umgebung des Ausgangspunktes wird die Richtung mit dem steilsten Anstieg bestimmt. Gibt es keine Richtung in der sich eine bessere Lösung finden lässt, stoppt das Verfahren, wobei es vorher den Lösungs- bzw. Suchraum iterativ durchsucht hat. Das damit gefundene lokale Optimum entspricht jedoch nur im besten Fall dem globalen Optimum. Dadurch lässt sich auf das Problem dieses Verfahrens schließen, da das Finden des globalen Optimums nicht garantiert ist. [Ten Hompel, Schmidt 2010, S.149]

3.2 Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen werden teilweise auch als naturinspirierte Optimierungsverfahren bezeichnet. Ohne über weitläufiges Problemwissen zu verfügen erlauben sie das Generieren von optimalen Lösungen für ein weites Spektrum an Problemen. Das Prinzip, welches sich hinter diesen evolutionären Verfahren verbirgt, ist die stochastische Erkundung eines Suchraumes. Als Vorbild für die Zufallssuche dient die natürliche Evolution. Der Ablauf eines evolutionären Algorithmus kann wie folgt beschrieben werden: Durch zufällige Paarung entsteht eine Population von Lösungen die dann mutiert werden. Die jeweils besten Lösungen werden selektiert und in die nächste Generation übernommen. Diese Schritte werden wiederholt, bis das Ergebnis konvergiert oder ein vorher definiertes Abbruchkriterium erfüllt ist. Das allgemeine Prinzip hinter diesem Algorithmus ist also die stochastische Veränderung von Lösungen, das Akzeptieren einer Lösung bei Verbesserung sowie das Nichtakzeptieren bei verschlechterter Qualität. Der Vorteil von evolutionären Algorithmen liegt in ihrer universellen Anwendbarkeit. [Kramer 2009, S.13]

3.2.1 Grundformen evolutionärer Verfahren

Da die Grundformen der evolutionären Verfahren sehr ähnlich sind, sollen sie nur aufgezählt, nicht aber weiter erklärt werden. [Kramer 2009, S.18ff]

- Genetische Algorithmen
- Evolutionsstrategien
- Evolutionäre Programmierung
- Genetische Programmierung

3.3 Simuliertes Abkühlen

Simuliertes Abkühlen (engl. simulated annealing) kopiert einen metallurgischen Prozess, der als „kontrolliertes Abkühlen“ oder auch „Tempern“ bekannt ist. Dabei werden einzelne Atome im Kristallgitter, die sich nicht im globalen Energieminimum befinden, durch erneute Temperaturerhöhung auf optimale Gitterplätze verschoben. Dies geschieht durch das Überwinden eines energetisch höheren Übergangszustandes. Genau diesen Prozess simuliert das simulated annealing, wobei die Suche nach dem globalen Energieminimum der Suche nach dem Optimum entspricht. Signifikant für dieses Verfahren ist, dass während der algorithmischen Suche nach dem Minimum mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auch schlechtere Lösungen akzeptiert werden. Dadurch ist es möglich, ein lokal erreichtes Minimum wieder zu verlassen um damit das globale Minimum zu finden. Wird eine endliche Abkühlzeit gewählt, so kann simulated annealing aufgrund des definierten Abbruchkriteriums möglicherweise nur ein suboptimales Minimum liefern. Beim simulated annealing-Algorithmus nimmt der Effekt, dass auch schlechtere Konfigurationen akzeptiert werden, gemäß einer Temperatur-Zeitfunktion ab. [Schmidt, Klüver C., Klüver J. 2010, S.101ff]

3.3.1 Schwellenakzeptanz

Die Schwellenakzeptanz (engl. threshold accepting) ist eine Abwandlung des vorher beschriebenen Verfahrens der simulierten Abkühlung. Auch hier wird im Vorhinein eine monoton sinkende Folge bestimmt. Jedoch erfolgt die Akzeptierung einer Verschlechterung nicht über eine Temperatur-Zeitfunktion, sondern über das Kriterium einer maximalen Verschlechterung um eine bestimmte Temperatur zu einer bestimmten Zeit, also einem definierten Schwellenwert. [Weicker 2007, S.157]

3.3.2 Sintflutalgorithmus

Beim Sintflutalgorithmus (engl. great deluge) erfolgt die Akzeptierung einer neuen Konfiguration zu jedem Iterationsschritt innerhalb eines fest vorbestimmten Gütebereichs. Die Grundidee hinter diesem Verfahren liegt in der Betrachtung von ständigem Regen und des daraus resultierenden stetig steigenden Wasserspiegels. Der Optimierer kann beliebig viele Schritte vornehmen, solange er das steigende Wasser nicht unterschreitet. Bei Minimierungsaufgaben wird die Regengeschwindigkeit negativ gewählt und der Wasserspiegel zu hoch angesetzt. [Weicker 2007, S.157f]

3.3.3 Rekordorientiertes Wandern

Auch beim rekordorientierten Wandern wird wie beim Sintflutalgorithmus ein steigender Wasserpegel verwendet. Bei diesem Verfahren wird der Wasserpegel jedoch mit der bis dahin besten gefundenen Lösung gekoppelt. Um eine Verschlechterung der aktuellen Lösung zu erlauben wird stets die Relation zur besten gefundenen Lösung betrachtet. [Weicker 2007, S.158]

3.4 Erläuterung des im CDA implementierten Optimierungsverfahrens

Das im CDA verwendete Verfahren ähnelt der linearen Optimierung. Das bedeutet, dass bei der Optimierung von mehreren Parametern immer nur ein Parameter verändert wird und die Restlichen konstant gehalten werden, bzw. auf den besten Wert der letzten Berechnung gestellt werden.

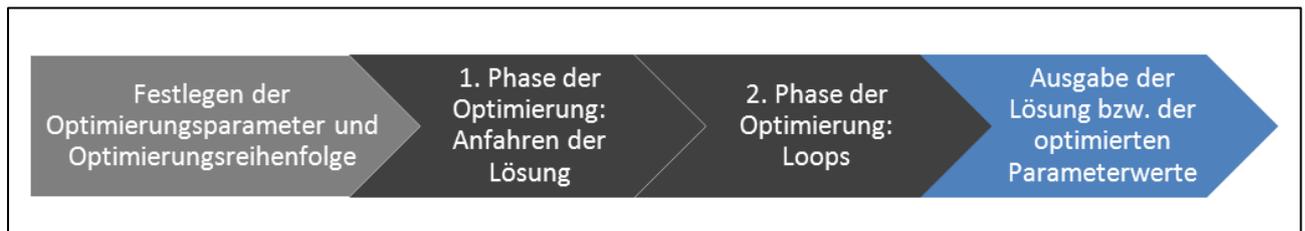


Abbildung 3.2: Ablauf "aktuelles Optimierungsverfahren"

Im Wesentlichen besteht das Optimierungsverfahren aus zwei Phasen. Eine detaillierte Erklärung des Ablaufs bzw. der einzelnen Phase geschieht in Kapitel 3.4.2 und im Kapitel 3.4.3.

Bevor die Optimierung gestartet werden kann, müssen zuerst die zu optimierenden Parameter ausgewählt und deren Reihenfolge bestimmt werden. Wie schon vorher erwähnt, wird bei dem verwendeten Optimierungsverfahren immer nur ein Parameter verändert, deshalb muss vorweg die Reihenfolge bestimmt werden in denen die Optimierung der einzelnen Parameter ablaufen soll.

3.4.1 Chi²

Zum besseren Verständnis wird vorweg der Begriff Chi² erklärt. Er ist jener Wert im Optimierungsverfahren, der Aufschluss über die Qualität der Lösung liefert. Chi² steht für die Summe der quadrierten Abweichungen der berechneten Kurve von der Videokurve dividiert durch die quadrierte Standardabweichung bzw. Varianz der Videokurve.

$$Chi^2 = \frac{\sum(\text{berechnet Kurve} - \text{Videokurve})^2}{\text{Standardabweichung Videokurve}^2}$$

Die Standardabweichung der Videokurve wird über den ganzen Optimierungsprozess konstant mit 3 mm angenommen, kann aber natürlich auch einen anderen Wert zugewiesen bekommen.

Standardabweichung der Videokurve

Bei der photogrammetrischen Auswertung kann die erreichbare Objektgenauigkeit näherungsweise abgeschätzt werden. Sie hängt hauptsächlich von der Aufnahmegeometrie und der Identifizierbarkeit der Messpunkte ab. [Luhmann 2010, S.138f.]

Die Identifizierbarkeit der Messpunkte kann auf 0.1 Pixel genau bestimmt werden. Diese 0.1 Pixel gelten für die Analyse von Highspeed - Bildsequenzen in Kombination mit den eingesetzten Detektierungsalgorithmen für die Marken. Einfluss auf diesen Wert hat die Auflösung der Highspeed-Kameras in Kombination mit der erforderlichen Markengröße. Ebenfalls spielt die Kompression des Filmmaterials eine nicht unwesentliche Rolle.

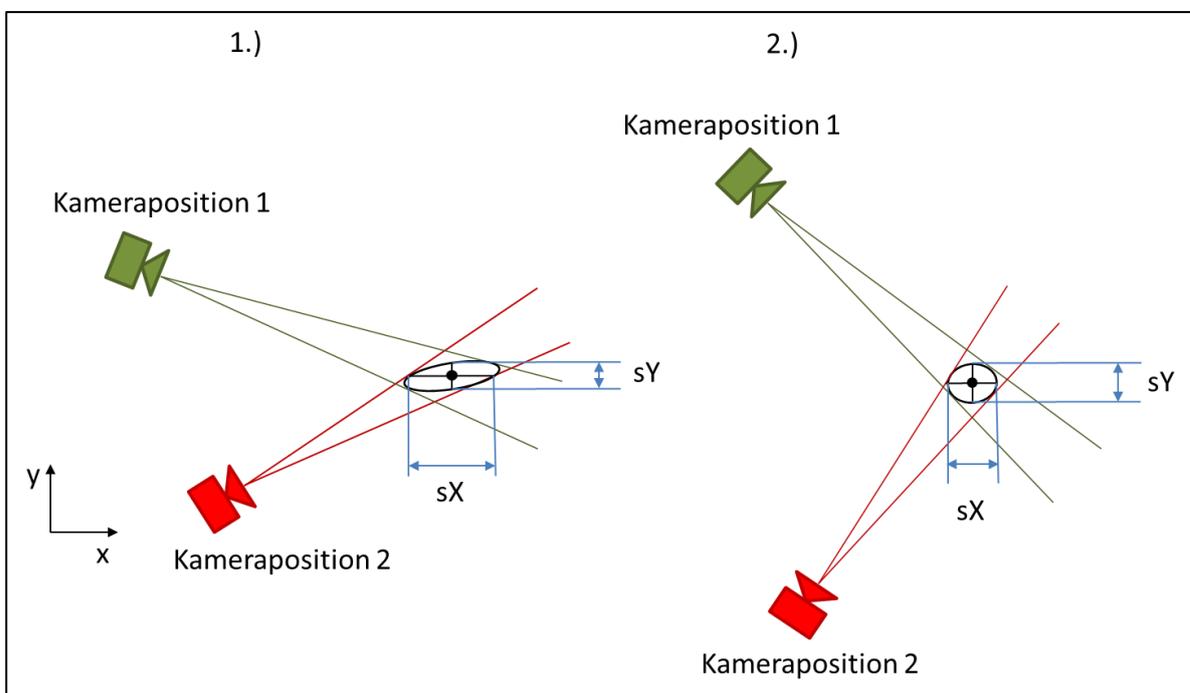


Abbildung 3.3: Genauigkeit der Filmanalyse

Der Einfluss der Aufnahmegeometrie auf die Genauigkeit der Filmanalyse ist in der oben gezeigten Abbildung ersichtlich. Die Kegel die aus der Kamera laufen sind die Genauigkeitsbereiche. Der Öffnungswinkel dieses Kegels ergibt sich aus dem vorher erwähnten Identifizierbarkeit der Messpunkte (0.1 Pixel) in Kombination mit dem Bildmaßstab. Optimal wäre, bei einem Zwei-Kamera-System, ein Winkel von 90° zwischen den beiden Kameras. Diese Ellipse gibt den Bereich an in dem sich der Messpunkt befinden kann. sX und sY sind die Standardabweichungen der Filmanalyse die auch noch von dem Abstand der Kameras zu dem Messpunkt abhängt. Diese Standardabweichung lässt sich aufgrund der bekannten Randbedingungen, der Position der Kameras zum Messpunkt sowie die Identifizierbarkeit des

Messpunktes, berechnen und beträgt im Mittel 3mm. Das sind genau diese 3mm die auch bei der Berechnung des χ^2 Wertes verwendet werden.

Im nächsten Abschnitt wird der genaue Ablauf bzw. die zwei Phasen des Optimierungsverfahrens erklärt, wobei dieser beispielhaft anhand der Optimierung von drei Parametern näher erläutert wird.

3.4.2 1.Phase: Anfahren der Lösung

Nachdem die Parameter gewählt und deren Reihenfolge festgelegt wurde kann das Optimierungsverfahren gestartet werden. Zum leichteren Verständnis wird der Ablauf des Optimierungsverfahrens anhand eines Beispiels von nur drei optimierten Parametern erklärt.

Für den ersten Parameter werden zuerst ein Parameterbereich und eine Schrittweite gewählt. Bei jedem Schritt innerhalb des Bereiches wird die Bahnkurve berechnet, wobei der davon berechnete χ^2 -Wert Aufschluss über die Qualität der Lösung liefert. Liegt der gefundene minimale χ^2 -Wert innerhalb des vorgegebenen Parameterbereichs, speichert das CDA den Wert und geht zum nächsten Parameter. Liegt der minimale Wert jedoch am Grenzwert des Bereiches wird eine Ausgleichsparabel durch die berechneten χ^2 -Werte gefittet von der das Minimum berechnet wird. Dieses berechnete Minimum wird zum Bestimmen eines neuen Parameterbereichs verwendet. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt bis das Minimum innerhalb des Parameterbereichs liegt.

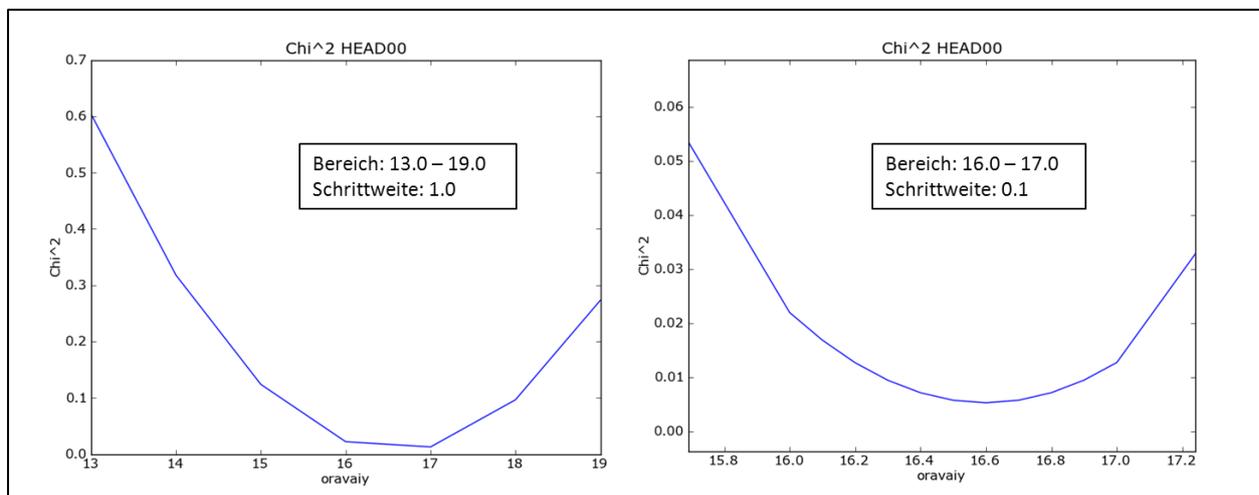


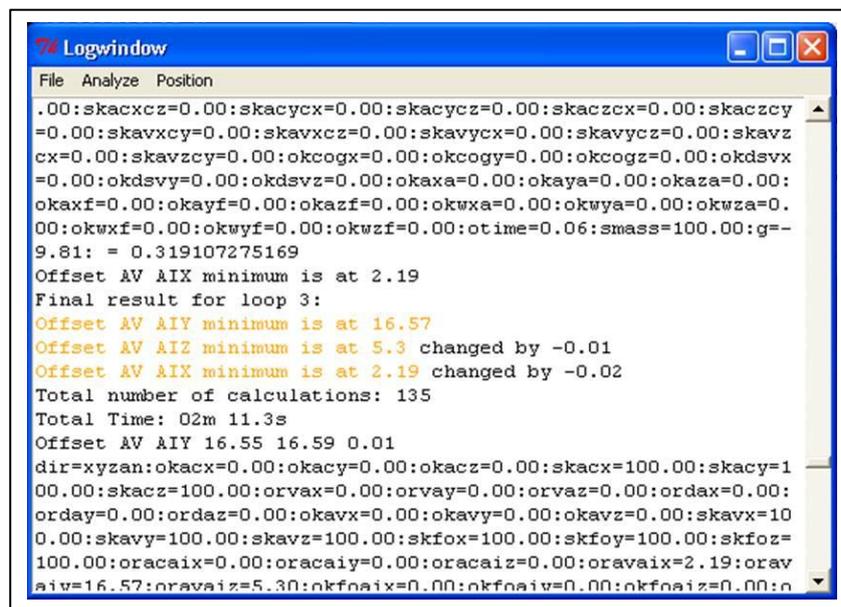
Abbildung 3.4: Ausgleichsparabel für verschieden Parameterbereiche und Schrittweiten

In Abbildung 3.4 sind zwei Ausgleichsparabeln dargestellt. Das linke Bild zeigt die Berechnung im Bereich $13.0^\circ - 19.0^\circ$ mit der Schrittweite 1.0° . Das in der Berechnung gefundene Minimum liegt bei 16.0° , also genau am Grenzwert des Bereichs. Durch die berechneten Werte wird die im

linken Bild abgebildet Parabel gelegt von der das Minimum bestimmt wird, das ungefähr bei 17.0° liegt. Aufgrund dieses Wertes wird ein neuer Bereich und Schrittweite gewählt. Das rechte Bild zeigt diesen zweiten Schritt. Auch hier wird wieder das Minimum berechnet, welches in etwa bei 16.6° liegt. Da dieser Wert innerhalb des Parameterbereichs liegt wird dieser gespeichert und der in der Reihenfolge danach stehende Parameter wird betrachtet. Dieselbe Vorgehensweise wird auch auf den zweiten Parameter angewandt. Wurde auch für diesen Wert ein Minimum gefunden springt das Verfahren wieder auf den Ersten zurück und überprüft dessen Minimum wieder mit dem veränderten zweiten Parameter. Danach wird das Minimum für den dritten Parameter bestimmt, mit dem die ersten zwei Parameter nachgerechnet werden. Mit diesen Parameterwerten geht das Verfahren dann in die nächste Phase.

3.4.3 2.Phase: Loops

Nachdem in der ersten Phase vorläufige Startwerte zur Optimierung gefunden wurden wird in sogenannte Schleifen oder Loops gegangen in denen die Parameter nacheinander optimiert werden. Abbildung 3.5 zeigt eine Abweichung der Werte.



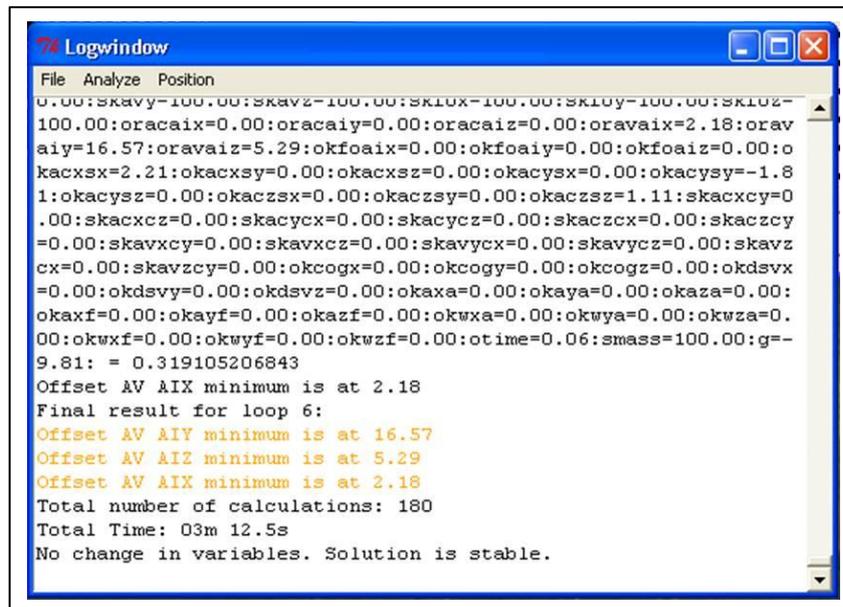
```

Logwindow
File Analyze Position
.00:skacxcz=0.00:skacycx=0.00:skacycz=0.00:skaczcx=0.00:skaczcycy
=0.00:skavxcy=0.00:skavxcz=0.00:skavycx=0.00:skavycz=0.00:skavz
cx=0.00:skavzcy=0.00:okcogx=0.00:okcogy=0.00:okcogz=0.00:okdsvx
=0.00:okdsvy=0.00:okdsvz=0.00:okaxa=0.00:okaya=0.00:okaza=0.00:
okaxf=0.00:okayf=0.00:okazf=0.00:okwxa=0.00:okwya=0.00:okwza=0.
00:okwxf=0.00:okwyf=0.00:okwzf=0.00:otime=0.06:smass=100.00:g=-
9.81: = 0.319107275169
Offset AV AIX minimum is at 2.19
Final result for loop 3:
Offset AV AIY minimum is at 16.57
Offset AV AI2 minimum is at 5.3 changed by -0.01
Offset AV AIX minimum is at 2.19 changed by -0.02
Total number of calculations: 135
Total Time: 02m 11.3s
Offset AV AIY 16.55 16.59 0.01
dir=xyzan:okacx=0.00:okacy=0.00:okacz=0.00:skacx=100.00:skacy=1
00.00:skacz=100.00:orvax=0.00:orvay=0.00:orvaz=0.00:ordax=0.00:
orday=0.00:ordaz=0.00:okavx=0.00:okavy=0.00:okavz=0.00:skavx=10
0.00:skavy=100.00:skavz=100.00:skfox=100.00:skfoy=100.00:skfoz=
100.00:oracaix=0.00:oracaiy=0.00:oracaiz=0.00:oravaix=2.19:orav
aiv=16.57:oravaiz=5.30:nkfoaix=0.00:nkfoaiv=0.00:nkfoaiz=0.00:n

```

Abbildung 3.5: Abweichung der neu berechneten Werte von den Startwerten in einem Loop

Das Bild zeigt den dritten Loop der Optimierung, in dem der zweite (Offset AV AI2) und dritte Parameter (Offset AV AIX) von den vorhergehenden Werten abweicht. Das bedeutet, dass ein neuer Loop mit den orange gekennzeichneten Werten gestartet wird. Die Schleife wird so oft wiederholt, bis keine Abweichung der Parameter vorliegt.



```
Logwindow
File Analyze Position
0.00:skavy=100.00:skavz=100.00:sklox=100.00:skloy=100.00:skluz=
100.00:oracaix=0.00:oracaiy=0.00:oracaiz=0.00:oravaix=2.18:orav
aiy=16.57:oravaiz=5.29:okfoaix=0.00:okfoaiy=0.00:okfoaiz=0.00:o
kacxsx=2.21:okacxsy=0.00:okacxsx=0.00:okacysx=0.00:okacysy=-1.8
1:okacysz=0.00:okaczsx=0.00:okaczsy=0.00:okaczsz=1.11:skacxcy=0
.00:skacxcz=0.00:skacycx=0.00:skacycz=0.00:skaczcx=0.00:skaczcy
=0.00:skavxcy=0.00:skavxcz=0.00:skavycx=0.00:skavycz=0.00:skavz
cx=0.00:skavzcy=0.00:okcogx=0.00:okcogy=0.00:okcogz=0.00:okdsvx
=0.00:okdsvy=0.00:okdsvz=0.00:okaxa=0.00:okaya=0.00:okaza=0.00:
okaxf=0.00:okayf=0.00:okazf=0.00:okwxa=0.00:okwya=0.00:okwza=0.
00:okwxf=0.00:okwyf=0.00:okwzf=0.00:otime=0.06:smass=100.00:g=-
9.81: = 0.319105206843
Offset AV AIX minimum is at 2.18
Final result for loop 6:
Offset AV AIY minimum is at 16.57
Offset AV AI2 minimum is at 5.29
Offset AV AIX minimum is at 2.18
Total number of calculations: 180
Total Time: 03m 12.5s
No change in variables. Solution is stable.
```

Abbildung 3.6: Ausgabe der stabilen Lösung im Optimierungsverfahren

Die in Abbildung 3.6 orange markierten Werte sind die endgültigen Lösungen. Es wurden keine Variablen verändert, wodurch die Lösung als stabil betrachtet werden kann.

4 Sensitivitätsanalyse

Die Kenntnis des Einflusses von den einzelnen Optimierungsparametern auf die Bewegungstrajektorie ist von großem Interesse, um die vorliegende komplexe Problemstellung umfassend analysieren zu können. Das Verfahren, welches die Kenngröße ermittelt, die den Zusammenhang zwischen der Varianz der Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße angibt, wird als Sensitivitätsanalyse bezeichnet. [Siebertz, van Bebber, Hochkirchen 2010, S.247]

Generell kann die Sensitivitätsanalyse in drei unterschiedliche Kategorien unterteilt werden. [Siebertz, van Bebber, Hochkirchen 2010, S.247]

Faktor Screening

Bei diesem Verfahren wird der qualitative Einfluss der Eingangsgröße auf die Ausgangsgröße, bestimmt um zwischen signifikanten und nicht signifikanten Faktoren unterscheiden zu können, ohne dabei die Quantität der Kenngröße zu beschreiben. Ein qualitativer Vergleich der Faktoren ist damit jedoch nicht möglich.

Lokale Sensitivitätsanalyse

Mit Hilfe der lokalen Sensitivitätsanalyse ist es möglich den Einfluss von Faktoren bei einem bestimmten Funktionswert der Ausgangsvariable (z.B. lokales Optimum) zu untersuchen. Prinzipiell werden die Auswirkungen kleiner Varianzen der Faktoren auf die Ausgangsvariablen analysiert.

Globale Sensitivitätsanalyse

Bei der globalen Sensitivitätsanalyse werden die Faktoren über ihren ganzen Definitionsbereich variiert und deren Einfluss auf die Ausgangsvariablen ermittelt. Diese Verfahren liefern eine Aussage über die Wichtigkeit der unterschiedlichen Faktoren in einem Modell und können diese gleichzeitig untereinander vergleichen. Daher haben sie sich in der Praxis besonders bewährt. Der prinzipielle Ablauf der globalen Sensitivitätsanalyse wird in Abbildung 4.1 gezeigt. Die Varianz der verschiedenen Faktoren führt in Abhängigkeit eines Modells zu einer Varianz der Ausgangsvariablen. Anschließend wird der durch den Faktor verursachte Anteil der Varianz der Ausgangsvariablen durch die Sensitivitätsanalyse bestimmt, der den Vergleich der Signifikanz unterschiedlicher Faktoren ermöglicht.

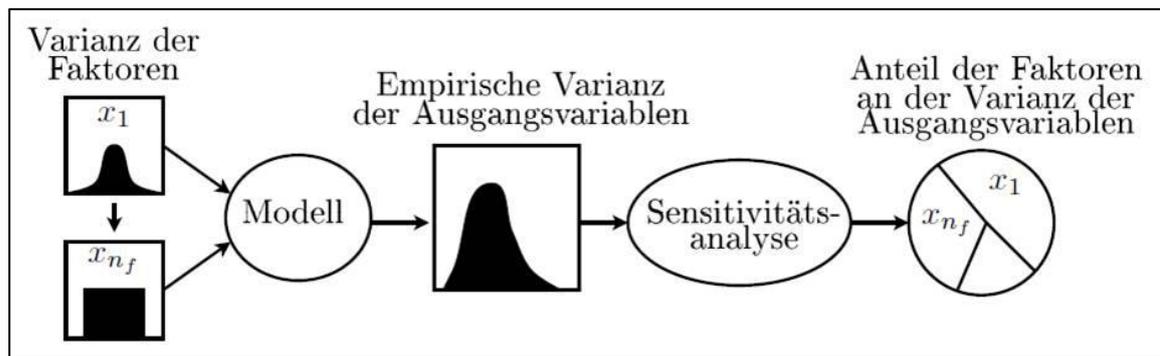


Abbildung 4.1: Globale Sensitivitätsanalyse [Siebertz, van Bebber, Hochkirchen 2010, S.247]

4.1 Ablauf einer Sensitivitätsanalyse

In diesem Kapitel soll der Ablauf und die Funktion der im CDA integrierten Sensitivitätsanalyse erklärt werden. Bei der im CDA integrierten Sensitivitätsanalyse handelt es sich im Vergleich zu den vorher erwähnten Methoden am ehesten um eine lokale Sensitivitätsanalyse.

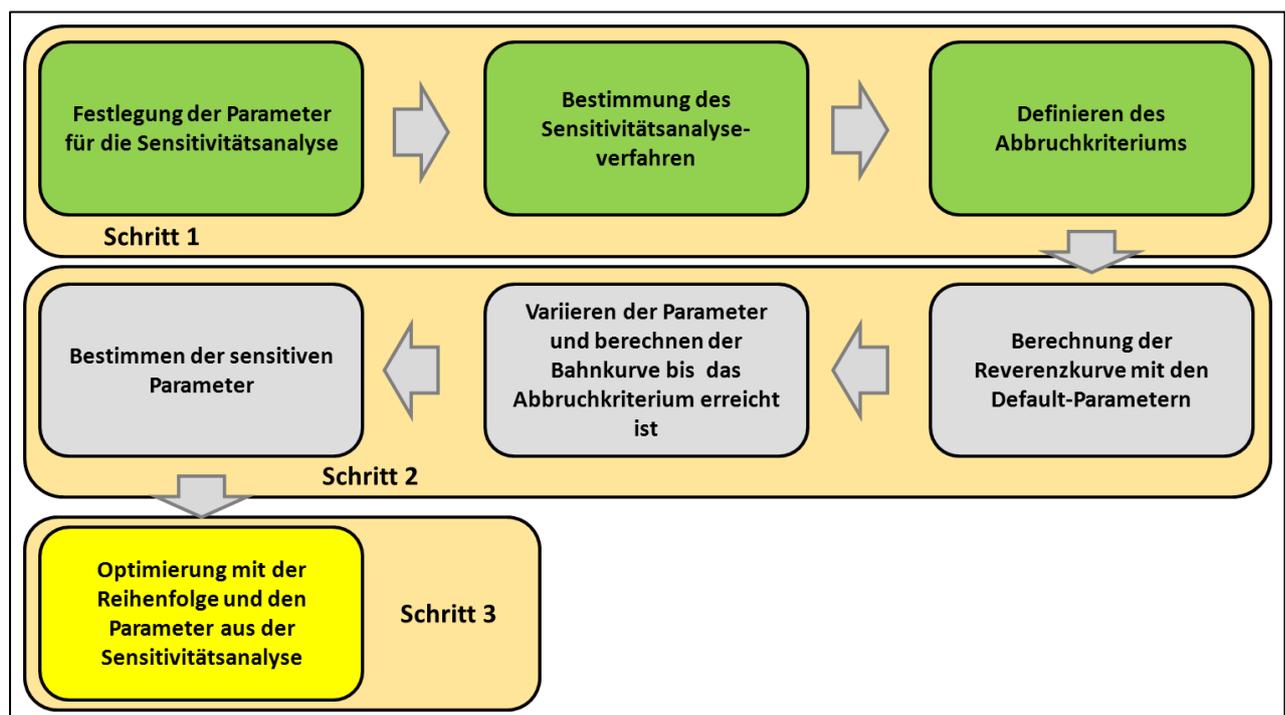


Abbildung 4.2: Ablauf der Sensitivitätsanalyse

Abbildung 4.2 zeigt den schematischen Ablauf der Sensitivitätsanalyse vom Festlegen der Parameter bis hin zur Optimierung der Parameter. Grob lässt sich die Sensitivitätsanalyse in drei Schritte unterteilen. Im ersten Schritt erfolgt die Definition der Eigenschaften der Sensitivitätsanalyse. Dieser Schritt wird vom User des Programms durchgeführt. Sind die einzelnen variierbaren Aspekte festgelegt erfolgt der zweite Schritt, die Berechnung der

Sensitivitäten durch das CDA selbst. Der dritte und letzte Schritt zählt genauer gesehen nicht mehr zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse, soll aber zur Vervollständigung angeführt werden. Die Optimierung mit den sensitiven Parametern ist die Verwendung der durch die Sensitivitätsanalyse gewonnenen Erkenntnisse. Auf die einzelnen Punkte soll im Weiteren noch näher eingegangen werden.

4.1.1 Festlegung der Parameter für die Sensitivitätsanalyse

Bevor die Sensitivitätsanalyse gestartet wird, müssen die Parameter festgelegt werden, deren Sensitivität bestimmt werden soll. Da die sensitiven Parameter im Vorhinein nicht bekannt sind, ist es notwendig die Sensitivitätsanalyse mit allen Parametern durchzuführen.

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Sensitivitätsanalyse mit den vorher ausgewählten Parametern durchzuführen. Eine davon wäre das systematische Abhandeln mit jeweils einem einzigen Parameter nach dem anderen. Es wäre auch möglich in Parametergruppen zu arbeiten. Es könnte zum Beispiel immer ein spezieller Fehler in allen drei Richtungen hergenommen werden (Offset der Beschleunigung in x-Richtung kurz OACX, in y-Richtung kurz OACY und in z-Richtung oder auch abgekürzt OACZ) oder gleiche Fehlerarten zusammengefasst werden (z.B. die Offsets des Beschleunigungs- und Gyrosensors in und um die x-Achse abgekürzt OACX und OAVX). Die einfachste und wahrscheinlich zielführendste Methode ist die Durchführung der Sensitivitätsanalyse mit allen Parametern gleichzeitig. Dies ist nur möglich, da die Sensitivitätsanalyse im Vergleich zur Optimierung eine sehr viel geringere Rechenzeit in Anspruch nimmt, da die Berechnung für einen Parameter nur einen Durchlauf benötigt. Somit erscheint diese Variante als die Optimale, da dadurch ein kompaktes, zusammengefasstes Ergebnis geliefert wird, ohne unnötig viele Daten zu erzeugen.

4.1.2 Bestimmung des Sensitivitätsanalyseverfahrens

Bei der Bestimmung der Sensitivitätsanalyseverfahren kann zwischen drei Methoden unterschieden werden, die in weiterer Folge kurz beschrieben werden.

Methode 1: „Per Hand“

Einige selbst ausgewählte Parameter werden zur Optimierung verwendet. Je nach Gefühl und nach dem Vergleich untereinander wird entschieden, wie groß der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Optimierung ist.

Methode 2: „Die im CDA integrierte Analyse“

Die Werte eines jeden Parameters werden so lange variiert, bis ein vorher definierter Fehler auftritt. Eine präzisere Beschreibung des Ablaufs erfolgt im Kapitel 4.1.4.

Methode 3: „Statistische Auswertung“

Hier wird eine Full-Factorial Analyse durchgeführt. Das bedeutet, dass alle Parameter der Sensitivitätsanalyse in allen möglichen Kombinationen durchgespielt werden und deren Fehler ermittelt wird. Die Ergebnisse werden mit Hilfe von statistischen Auswerteverfahren verarbeitet. Diese Methode bringt zwar den Vorteil, dass auch der Einfluss der einzelnen Parameter zueinander untersucht werden kann, die benötigte Rechenleistung ist bei dieser Methode jedoch bedeutend größer als die Methode 2 „Die im CDA integrierte Analyse“.

4.1.3 Definieren des Abbruchkriteriums

Für die Sensitivitätsanalyse werden die zu untersuchenden Parameter variiert um den Einfluss auf die Ausgangsgröße (Abweichung Videokurve zu berechneter Kurve) zu untersuchen. Dabei werden die Parameterwerte so lange variiert, bis die Ausgangsgröße einen vorher definierten Wert übersteigt. Im Anschluss wird verglichen, wie stark der Parameter verändert werden musste, um den definierten Wert in der Ausgangsgröße zu erreichen. Dieser definierte Wert wird in der Folge Abbruchkriterium genannt und es werden verschiedene Möglichkeiten für die Definition gezeigt.

In der Software CDA sind gegenwärtig drei unterschiedliche Abbruchkriterien integriert, wobei im Zuge der Diplomarbeit die Abbruchkriterien „Distance less than 0.005m at every point“ und „Sum of squared distances less than 0.005“ neu implementiert wurden.

Displacement of 0.005 m at t=0.2 s

Bei diesem Abbruchkriterium darf die maximale Abweichung der berechneten Kurve bei 0.2 s nicht größer als 5 mm sein. Das Problem dieses Verfahrens ist, dass mit ihm keine Aussage über das Verhalten der Kurve vor 0.2 s treffen kann. Wenn der Parameter zum Beispiel eine maximale Abweichung von über 5 mm erzeugt, diese jedoch nicht genau bei 0.2 s auftritt so wird dieser nicht als Abbruchkriterium herangezogen.

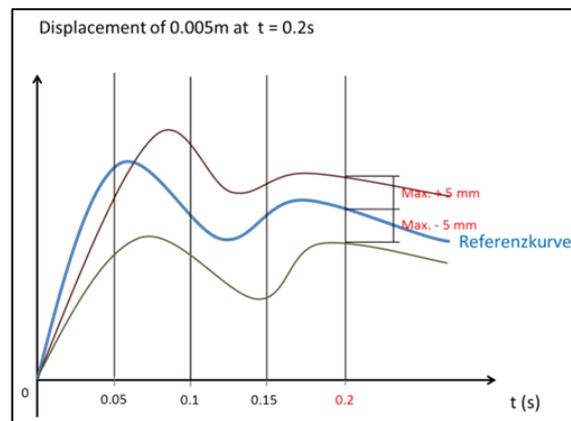


Abbildung 4.3: Abbruchkriterium: Displacement of 0.005m at t=0.2s

Distance less than 0.005m at every point

Dieses Verfahren ist eine Weiterentwicklung der Methode: Displacement of 0.005 m at t=0.2 s. Hier wird der Fehler, also die maximale Abweichung zu jedem Zeitpunkt bestimmt, die 5 mm nicht überschreiten darf. Der Bereich von 0.2 s wurde deshalb gewählt, da der Großteil der Dummybewegung beim Frontalcrash in diesem Zeitbereich liegt.

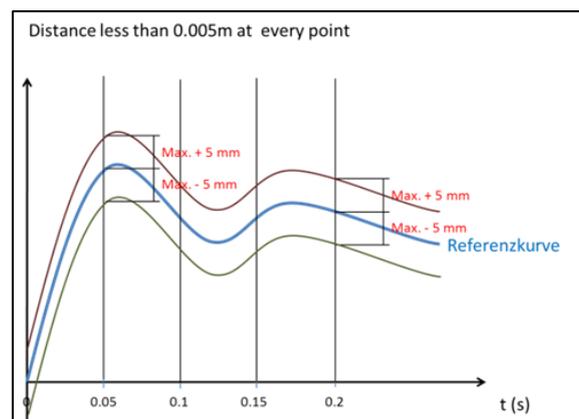


Abbildung 4.4: Abbruchkriterium: Distance less than 0.005m at every point

Sum of squared distances less than 0.005

“Sum of squared distances less than 0.005” bedeutet, dass die Summe der quadrierten Abweichungen nicht größer als ein bestimmter Wert, hier 0.005, sein darf. Genauer gesagt wird die Summe der quadratischen Abweichung noch durch das Quadrat der Standardabweichung dividiert was folgende Formel ergibt:

$$X = \frac{\sum(x_{calc} - x_{rev})^2}{\sigma^2}$$

x_{calc} ... Position der berechneten Kurve
 x_{rev} ... Position der Referenzkurve
 σ ... Standardabweichung

Die Standardabweichung wurde mit 3 mm angenommen, was der Standardabweichung der Videokurve entspricht. Dieses Abbruchkriterium wurde deshalb so definiert, um die Durchgängigkeit zur Optimierung zu schaffen, da dort mit dem χ^2 dieselbe Zielgröße eingesetzt wird. Dieses Verfahren bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass der Wert mit zunehmender Länge der Bahnkurve steigt. Das heißt, unterschiedlich lange Trajektorien können nicht miteinander verglichen werden. Abhilfe könnte hier unter anderem die Normierung auf die Bahnlänge bzw. die Versuchsdauer schaffen.

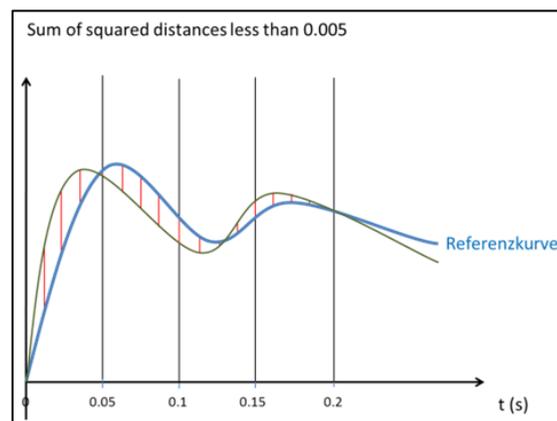


Abbildung 4.5: Abbruchkriterium: Sum of squared distances less than 0.005

4.1.4 Vergleich der unterschiedlichen Abbruchkriterien

Die Frage ist, wie sich diese drei verschiedenen Kriterien im Hinblick auf das Ergebnis unterscheiden. Dazu wurde die Sensitivitätsanalyse für einen gleichbleibenden Versuch mit allen drei Kriterien durchgeführt und die Ergebnisse der Analyse gegenübergestellt. Bei dem analysierten Versuch handelt es sich um einen Schlittenversuch. Das Ergebnis ist in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

		Abbruchkriterium		
		Displacement of 0.005 m at t=0.200 s	Distance less than 0.005 m at every time	Sum of squared distances less than 0.005
parameter	unit			
Offset ACX	[m/s ²]	0,13	0,11	0,18
Offset ACY	[m/s] ²	0,12	0,10	0,17
Offset ACZ	[m/s ²]	0,13	0,11	0,18
Scale ACX	[%]	0,38	0,32	0,65
Scale ACY	[%]	1,47	1,24	2,48
Scale ACZ	[%]	0,29	0,25	0,48
Offset AVX	[deg/s]	4,81	4,33	6,61
Offset AVY	[deg/s]	1,01	0,85	1,70
Offset AVZ	[deg/s]	0,97	0,82	1,65
Scale AVX	[%]	13,73	11,09	20,80
Scale AVY	[%]	0,36	0,30	0,63
Scale AVZ	[%]	3,78	3,08	6,56
Offset AV AIX	[deg]	0,54	0,49	0,76
Offset AV AIY	[deg]	0,18	0,15	0,30
Offset AV AIZ	[deg]	0,19	0,16	0,31
Alpha ACX	[deg]	0,94	0,80	1,55
Alpha ACY	[deg]	0,16	0,13	0,26
Alpha ACZ	[deg]	0,24	0,20	0,42
Alpha AVX	[deg]	1,19	1,01	1,90
Alpha AVY	[deg]	3,80	2,79	13,55
Alpha AVZ	[deg]	1,31	1,09	2,27

Tabelle 4-1: Vergleich der unterschiedlichen Verfahren zur Sensitivitätsbestimmung

Die Werte der Parameter ändern sich in Abhängigkeit der verschiedenen Verfahren. Was jedoch auffällt, ist die Tatsache, dass sich bei jedem Verfahren die gleichen Parameter als sensitiv erweisen. Die Parameter ändern zwar ihren Wert von einem Kriterium zum nächsten, die Verhältnisse zueinander bleiben jedoch gleich. Zur genaueren Erklärung soll als Beispiel die Skalierung des Beschleunigungssensors herangezogen werden (Scale AC). Bei allen drei Kriterien ist die Skalierung in y-Richtung (1.47/1.24/2.48) weniger sensitiv als die Skalierungen in x- (0.38/0.32/0.65) und z-Richtung (0.29/0.25/0.48). Die in der Klammer stehenden Werte entsprechen jeweils den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse aus der Tabelle. Lediglich die Differenzen der Parameter zueinander ändern sich in Abhängigkeit des verwendeten Kriteriums. Die unterschiedlichen Kriterien haben also keinen Einfluss auf das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse. Für die Versuchsanalysen im Rahmen dieser Diplomarbeit können die drei Verfahren als gleichwertig betrachtet werden.

5 Durchführen der Sensitivitätsanalyse

Wie schon im vorigen Kapitel erwähnt, ermittelt die Sensitivitätsanalyse den Einfluss einer Eingangsgröße auf die Ausgangsgröße. Genauer gesagt wird dabei untersucht, wie stark sich eine Änderung der Eingangsgröße auf die Ausgangsgröße auswirkt. Wird die Ausgangsgröße bei einer geringen Änderung der Eingangsgröße stark verändert so ist die Eingangsgröße sensitiv, wird die Ausgangsgröße hingegen nur geringfügig verändert ist die Eingangsgröße nicht sensitiv.

Im Fall der Sensitivitätsanalyse die im CDA verwendet wird, sind die Eingangsgrößen die Sensorfehler beziehungsweise deren beschreibender Parameter. Die Ausgangsgröße ist die berechnete Bahnkurve.

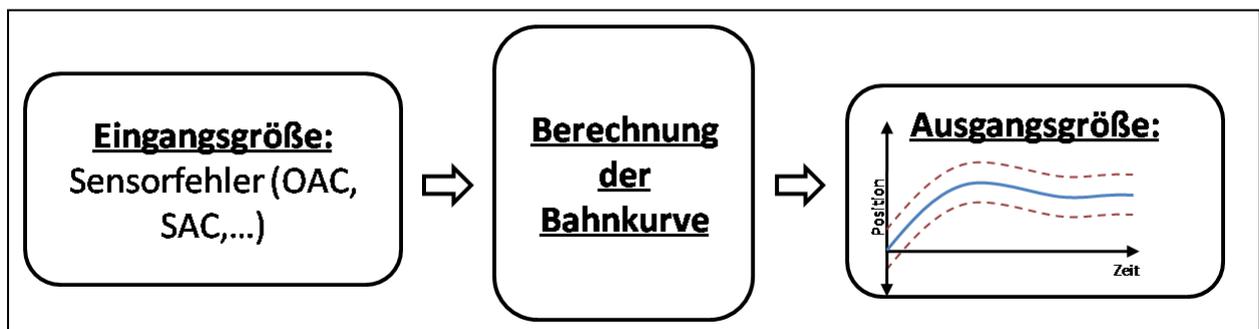


Abbildung 5.1: Schema der Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse gibt an, wie sehr eine Veränderung des Parameters die berechnete Bahnkurve verändert. Als Referenzkurve dient jene berechnete Kurve, die anfänglich ohne Berücksichtigung von Sensorfehlern berechnet wird. Bei der Sensitivitätsanalyse wird nicht nur der Einfluss von Sensorfehlern ermittelt, sondern auch andere Parameter wie zum Beispiel die Initialwinkel des Dummykopfes können analysiert werden.

Der Ablauf der Durchführung der Sensitivitätsanalyse ist in Abbildung 5.2 zu erkennen. Der erste Schritt der Sensitivitätsanalyse ist immer die Berechnung der Referenzkurve. Hierzu wird die Bahnkurve mit den Werten der Default-Parameter berechnet. Das sind jene Werte die zu Anfang der Versuchsauswertung eingegeben worden sind. Zu ihnen zählen unter anderem die gemessene Startgeschwindigkeit oder die Initialwinkel falls diese gemessen worden sind. Die Sensorfehler wie die Offsets des Beschleunigungssensors werden auf null gesetzt. Mit diesen Parametern, also den gemessenen Werten und den Sensorfehlern die auf null gesetzt sind,

wird aus den elektrischen Messdaten die Dummykopftrajektorie oder auch Initialkurve berechnet, welche in weiterer Folge als Referenz dient (Punkt 1)

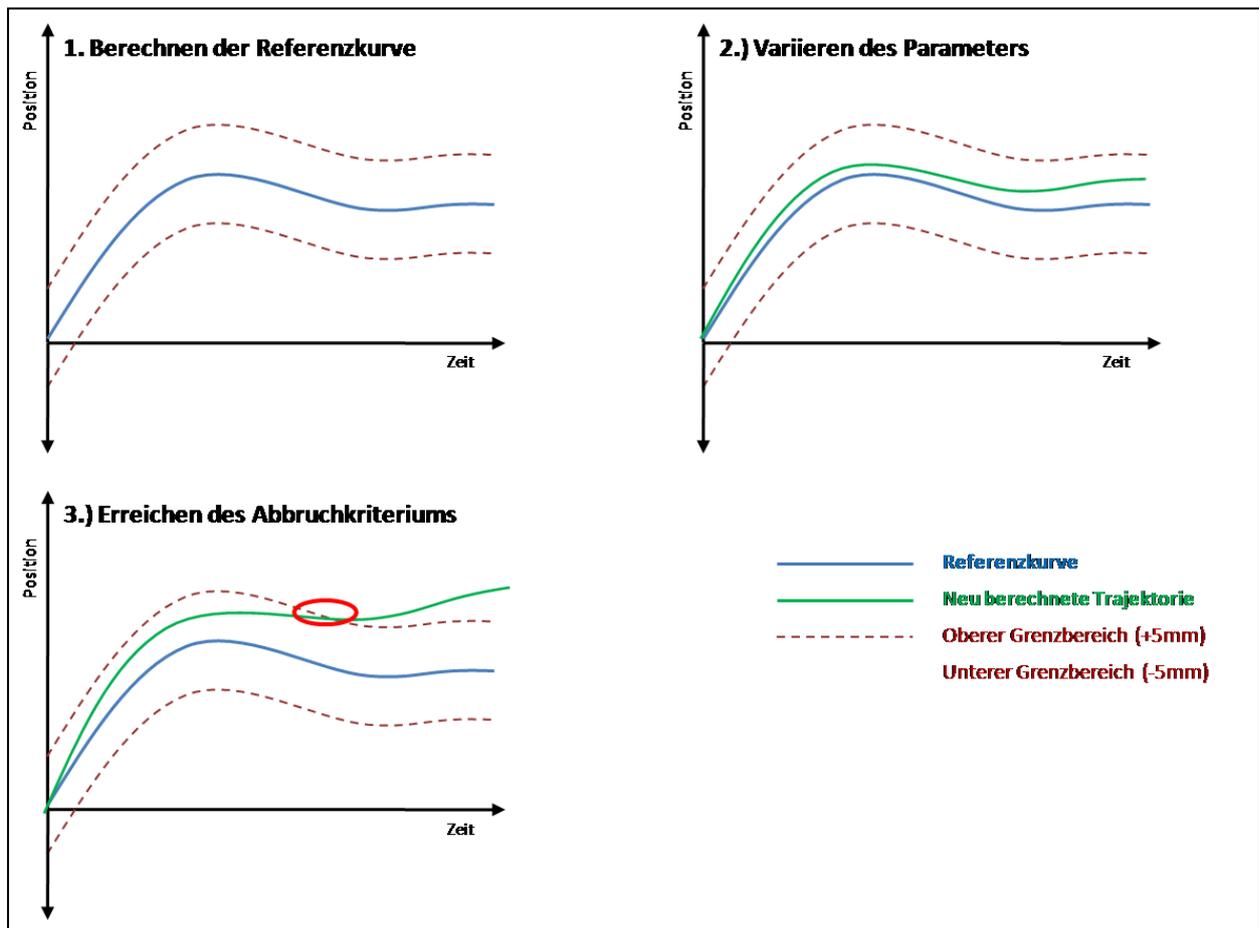


Abbildung 5.2: Durchführung der Sensitivitätsanalyse

Nach der Berechnung der Referenzkurve wird der ausgewählte Parameter der einer Sensitivitätsanalyse unterzogen wird mit einer bestimmten Schrittweite variiert. Mit diesem veränderten Parameter wird die Bahnkurve neu berechnet und mit der Referenzkurve verglichen. Der Berechnungsvorgang endet, wenn ein vordefiniertes Abbruchkriterium erfüllt ist. Die drei im CDA auswählbaren Kriterien wurden im Kapitel 4.1.3 schon genauer erklärt. Bei den weiteren Untersuchungen mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse wird immer das Abbruchkriterium Distance less than 0.005m at every point verwendet. Nachfolgend werden die Ziele und Möglichkeiten der Sensitivitätsanalyse behandelt, sowie deren Umsetzung und Nutzen für die Versuchsauswertung mit Hilfe des Programmes CDA beschrieben.

5.1 Ziele der Sensitivitätsanalyse

Folgende Ziele für die Sensitivitätsanalyse wurden festgelegt:

1. Ermittlung der notwendigen Sensorgenauigkeiten

Durch das Abbruchkriterium wird der Wert des Parameters bestimmt bei dem die berechnete Bahnkurve um maximal 5 mm von der Referenzkurve abweicht. Unter der Bedingung dass die Trajektorien auf 5 mm genau bekannt sein müssen, liefern diese Werte der Parameter nach der Sensitivitätsanalyse die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Sensor- bzw. Parametergenauigkeiten, unter der Voraussetzung, dass nur ein Sensorfehler gleichzeitig auftritt, was im Allgemeinen nicht der Fall ist Kann die errechnete Genauigkeitsanforderung an die Sensorgenauigkeit nicht erreicht werden so sind die Abweichungen der Bahnkurve evtl. auch über 5 mm.
2. Analyse der optimierten Parameter auf Plausibilität

Aufgrund der Sensitivitätsanalyse kann nachgewiesen werden, dass ein Parameter der nach der Optimierung ein „unphysikalisches“ Ergebnis geliefert hat, trotzdem plausibel sein kann, wenn dieser nicht sensitiv ist. (Große Veränderung der Eingangsgröße bewirkt nur eine geringe Änderung der Ausgangsgröße) „Unphysikalisches Ergebnis“ bedeutet, dass der Wert nach der Optimierung mit großer Wahrscheinlichkeit nicht möglich ist, das wäre zum Beispiel eine Querempfindlichkeit von über 3% der laut Herstellerangaben unter diesem Wert liegen soll (siehe Anhang).
3. Reduktion der Optimierungsparameter

Es soll die minimale Anzahl an Parametern gefunden werden, die Rahmen der Genauigkeitsforderung das gleiche Ergebnis liefern wie das Optimierungsergebnis mit allen Parameter. Die Idee dahinter ist, dass eine Änderung der sensitiven Parameter die Berechnung der Bahnkurve stärker beeinflussen, die nicht sensitiven hingegen weniger. Dadurch brauchen die nicht sensitiven in der Optimierung nicht berücksichtigt zu werden wodurch die Rechenzeit deutlich reduziert werden kann.
4. Clusterung verschiedener Versuchsdurchführungen anhand der Sensitivität der Parameter

Hier sollen, wenn möglich, Aussagen über versuchsspezifische Parameter getroffen werden, um je nach Versuchsdurchführung unterschiedliche Optimierungsparameter zu definieren.

5.2 Definition Sensitivität

Die Durchführung der Sensitivitätsanalyse liefert als Ergebnis dimensionsbehaftete Größen bei denen das gewählte Abbruchkriterium erfüllt ist. Ein Vergleich dieser Größen untereinander erweist sich jedoch als sehr schwierig, da der Vergleich von verschiedenen Werten mit unterschiedlichen Einheiten nicht möglich ist. Deshalb war es nötig Referenzen zu schaffen die aus den dimensionsbehafteten Größen dimensionslose machen, deren Vergleich dadurch einfacher möglich ist. Dazu wurden für die wichtigen Parameter Aussagen getroffen, wie genau diese überhaupt bestimmt werden können (Sensorgenauigkeit). Diese möglichen Genauigkeiten dienen als Bezugsgröße um Aussagen über die mit der Sensitivitätsanalyse ermittelten Genauigkeiten treffen zu können.

$$\text{Sensitivität} = \frac{\text{ermittelte Genauigkeit}}{\text{mögliche Genauigkeit}}$$

Sensitivität > 1 ... Parameter sensitiv

Sensitivität < 1 ... Parameter nicht sensitiv

Durch die Division der ermittelten Genauigkeit durch die mögliche Genauigkeit ergibt sich eine dimensionslose Größe die in weiterer Folge als „Sensitivität“ bezeichnet wird. Dabei ist die ermittelte Genauigkeit jener Wert, der durch die Sensitivitätsanalyse mit dem CDA bestimmt wird und die mögliche Genauigkeit ist die Abschätzung wie genau dieser Parameter überhaupt bestimmt werden kann. Die Sensitivität gibt Aufschluss ob der Parameter sensitiv ist, also ob sich eine Veränderung dieses Parameters stark auf das Ergebnis auswirkt. Die Bestimmung der möglichen Genauigkeit wird im nächsten Abschnitt genauer erklärt.

Offset Beschleunigungs- und Drehratensensor (OAC, OAV)

Beim Offset des Beschleunigungssensors wurde die mögliche Genauigkeit anhand der maximalen Sensorauflösung ermittelt. Maximale Sensorgenauigkeit bedeutet die minimale Aufzeichnungsrate des A/D-Wandlers. Die maximale Sensorauflösung errechnet sich aus dem Messbereich des Sensors und der maximalen Auflösung des A/D-Wandlers.

$$\text{Maximale Sensorauflösung} = \frac{\text{Messbereich des Beschleunigungssensors}}{\text{Maximale Auflösung des A/D Wandlers}}$$

Der Messbereich des verwendeten Beschleunigungssensors liegt zwischen +/- 800g was einen gesamten Messbereich von 1600g ergibt. Die maximale Auflösung des A/D Wandlers beträgt 16Bit also 2^{16} Stellen.

$$\text{Maximale Sensorgenauigkeit} = \frac{1600g}{2^{16}} = 0.02g = 0.2 \frac{m}{s^2}$$

In x-Richtung wird zusätzlich die Verzögerung des Fahrzeuges nach der Auskopplung der Beschleunigungseinrichtung berücksichtigt, was einen zusätzlichen Offset von geschätzten 0.1 m/s² ergibt.

	OACX	OACY	OACZ
mögliche Sensorgenauigkeit	0.3 m/s²	0.2 m/s²	0.2 m/s²

Tabelle 5-1: Mögliche Sensorgenauigkeit OAC

Daraus ergibt sich eine mögliche Sensorgenauigkeit hinsichtlich des Offsets des Beschleunigungssensors von 0.3 m/s² in x-Richtung (OACX), von 0.2 m/s² in y-Richtung (OACY) und von 0.2 m/s² in z-Richtung (OACZ).

Die mögliche Genauigkeit bei den Offsets des Drehratensensors berechnet sich auf dieselbe Weise wie auch schon beim Beschleunigungssensor. Auch hier dienen der Messbereich und die maximale Auflösung des A/D-Wandlers als Anhaltspunkt.

Der verwendete Drehratensensor hat einen Messbereich von +/-2400°/s, die maximale Auflösung des A/D-Wandlers liegt wieder bei 16Bit.

$$\text{Maximale Sensorgenauigkeit} = \frac{4800 \frac{\circ}{s}}{2^{16}} = 0.073 \frac{\circ}{s} \approx 0.1 \frac{\circ}{s}$$

Die mögliche Sensorgenauigkeit des Offsets des Gyrosensors ist also 0.1°/s in x-Richtung (OAVX), 0.1°/s in y-Richtung (OAVY) und 0.1°/s in z-Richtung (OAVZ).

	OAVX	OAVY	OAVZ
mögliche Sensorgenauigkeit	0.1 °/s	0.1 °/s	0.1 °/s

Tabelle 5-2: Mögliche Sensorgenauigkeit OAV

Skalierung Beschleunigungs- und Drehratensensor (SAC, SAV)

Um Aussagen über die möglichen Sensorgenauigkeiten hinsichtlich der Skalierungen treffen zu können wurde die mögliche Kalibriergenauigkeit als Bezug herangezogen. Diese liegt beim Beschleunigungssensor bei maximal 1%.

	SACX	SACY	SACZ
mögliche Sensorgenauigkeit	1%	1%	1%

Tabelle 5-3: Mögliche Sensorgenauigkeit SAC

Es ergeben sich mögliche Sensorgenauigkeiten von 1% sowohl in x-Richtung (SACX), als auch in y- (SACY) und z-Richtung (SACZ).

Die Ermittlung der möglichen Sensorgenauigkeiten der Skalierung erfolgt beim Drehratensensor auf dieselbe Weise wie auch schon bei dem Beschleunigungssensor. Auch hier liegt die mögliche Kalibriergenauigkeit bei 1%.

	SAVX	SAVY	SAVZ
mögliche Sensorgenauigkeit	1%	1%	1%

Tabelle 5-4: Mögliche Sensorgenauigkeit SAV

SAVX bedeutet die Skalierung des Drehratensensors in x-Richtung, SAVY die Skalierung in y-Richtung und SAVZ die Skalierung in z-Richtung.

Die nächste Abbildung zeigt das Diagramm eines Kalibrierungsprotokolls für einen Beschleunigungsaufnehmer.

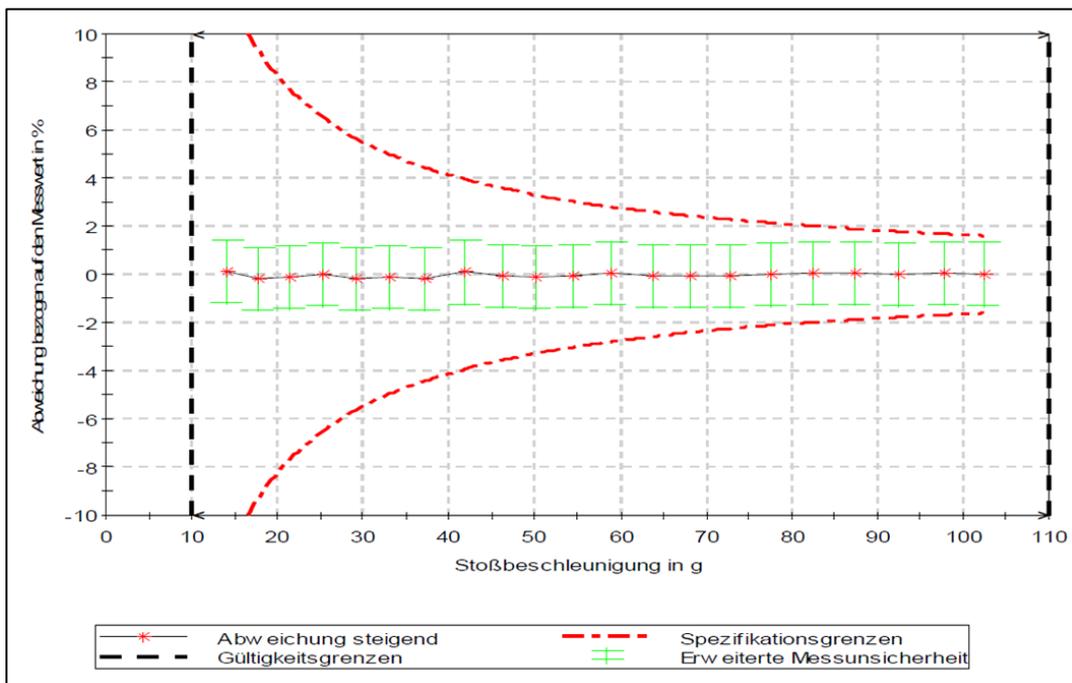


Abbildung 5.3: Kalibrierprotokoll eines Beschleunigungssensors

Die Kalibrierung erfolgt mittels Stoßbeschleunigung in einem Bereich von 10g bis 110g. Die Kalibrierung wurde bei konstanten Randbedingungen durchgeführt, das heißt bei einer konstanten Temperatur von 22°C mit einem Toleranzbereich von +/- 0.5°C, einem definiertem Luftdruck von 1005mbar +/- 5mbar, einer relativen Luftfeuchte von 50% +/- 5% und einem Anschlusskabel von 15 cm. Die roten Linien symbolisieren die Grenzen der Ungenauigkeiten und die grünen Linien geben eine vordefinierte erweiterte Messunsicherheit an. Bei dieser Kalibrierung liegen die Werte weit innerhalb von 1%, wenn man die Messunsicherheit nicht berücksichtigt.

Schiefwinkeligkeit Beschleunigungs- und Drehratensensor (Alpha AC, Alpha AV)

Die mögliche Sensorgenauigkeit hinsichtlich der Schiefwinkeligkeit der Messachsen ist sehr schwierig zu ermitteln. Daher wurde sie beim Beschleunigungssensor, um alle drei Achsen gleich, auf 0.5° geschätzt.

	Alpha ACX	Alpha ACY	Alpha ACZ
mögliche Sensorgenauigkeit	0.5°	0.5°	0.5°

Tabelle 5-5: Mögliche Sensorgenauigkeit Alpha AC

Auch beim Drehratensensor kann die mögliche Schiefwinkeligkeit nur auf 0.5° geschätzt werden. Alpha beschreibt den Öffnungswinkel des Kegels der die Schiefwinkeligkeit beschreibt. Dieser Punkt wurde schon genauer in einem vorherigen Kapitel beschrieben.

	Alpha AVX	Alpha AVY	Alpha AVZ
mögliche Sensorgenauigkeit	0.5°	0.5°	0.5°

Tabelle 5-6: Sensorgenauigkeit Alpha AV

Abstände der Koordinatenachsen der Beschleunigungssensoren zum Drehratensensor (AC Sensor)

Über die Fertigungstoleranzen sind leider keine Informationen vorhanden. Der Grund der Abweichungen zu den angegebenen Abständen kann evtl. auf die Dicke des Klebers zurückgeführt werden und wurde auf unter 1 mm angenommen. Mit den Fertigungstoleranzen ergibt sich eine mögliche Abweichung von 1 mm. Für die Befestigung der Beschleunigungssensoren auf dem Drehratensensor wird zusätzlich ein Kleber verwendet, da es zuvor in bestimmten Frequenzbereichen zu starken Schwingungen gekommen ist. Deshalb soll dieser neben seiner Haftwirkung auch als Dämpfung gegen diesen kritischen Schwingungsbereich wirken.

	ACX Sensor X	ACY Sensor Y	ACZ Sensor Z
mögliche Sensorgenauigkeit	1 mm	1 mm	1 mm

Tabelle 5-7: Sensorgenauigkeit AC Sensor

ACX Sensor X beschreibt den x-Abstand des Beschleunigungssensors der in x-Richtung misst.

Initialwinkel des Dummykopfes (AI)

Zur Bestimmung der Genauigkeit der Initialwinkel wurde die Standardabweichung der gemessenen Orientierung aus der 3D Filmanalyse verwendet. Sie errechnet sich aus der möglichen Messgenauigkeit des Kamerasystems.

Die Bestimmung der Initialwinkel aus der Filmanalyse erfolgt über die Bildung des Durchschnitts der gemessenen Werte vor t_0 . Der Restfehler des Initialwinkels pro Zeitschritt beträgt etwa 0.5° .

	Offset AV AIX	Offset AV AIY	Offset AV AIZ
mögliche Sensorgenauigkeit	0.5°	0.5°	0.5°

Tabelle 5-8: Sensorgenauigkeit Offset AV AI

Offset AV AIX bezeichnet den Initialwinkel des Dummykopfes um die x-Achse, AIY die Drehung um die y-Achse und AIZ die Winkel um die z-Achse.

Zusammenfassung der möglichen Sensorgenauigkeiten

Das Bestimmen der möglichen Sensorgenauigkeiten und somit auch die Bestimmung der Sensitivität als dimensionslose Größe sind für die weitere Verwendung der Sensitivitätsanalyse von großer Bedeutung. Jetzt können qualitative Aussagen über die Parameter hinsichtlich ihrer Sensitivität getroffen werden.

Parameter	unit	mögliche Genauigkeit	Bemerkung
Offset ACX	m/s ²	0.30	Sensorauflösung + geschätzte Verzögerung
Offset ACY	m/s ²	0.20	Sensorauflösung
Offset ACZ	m/s ²	0.20	Sensorauflösung
Scale ACX	%	1.00	Kalibriergenauigkeit
Scale ACY	%	1.00	Kalibriergenauigkeit
Scale ACZ	%	1.00	Kalibriergenauigkeit
Alpha ACX	deg	0.50	Schätzung
Alpha ACY	deg	0.50	Schätzung
Alpha ACZ	deg	0.50	Schätzung
Offset AVX	deg/s	0.10	Sensorauflösung
Offset AVY	deg/s	0.10	Sensorauflösung
Offset AVZ	deg/s	0.10	Sensorauflösung
Scale AVX	%	1.00	Kalibriergenauigkeit
Scale AVY	%	1.00	Kalibriergenauigkeit
Scale AVZ	%	1.00	Kalibriergenauigkeit
Alpha AVX	deg	0.50	Schätzung
Alpha AVY	deg	0.50	Schätzung
Alpha AVZ	deg	0.50	Schätzung
ACX Sensor X	mm	1.00	Toleranz Klebstoff zwischen AC- und AV-Sensor
ACY Sensor Y	mm	1.00	Toleranz Klebstoff zwischen AC- und AV-Sensor
ACZ Sensor Z	mm	1.00	Toleranz Klebstoff zwischen AC- und AV-Sensor
Offset AV AIX	deg	0.50	Genauigkeit der Filmanalyse
Offset AV AIY	deg	0.50	Genauigkeit der Filmanalyse
Offset AV AIZ	deg	0.50	Genauigkeit der Filmanalyse

Tabelle 5-9: Zusammenfassung der möglichen Sensorgenauigkeiten

In der Tabelle ist noch einmal eine Zusammenfassung aller möglichen Sensorgenauigkeiten samt kurzer Erklärung auf einen Blick zusammengefasst. Besonders wichtig sind in weiterer Folge die Offsets, die Skalierungen und die Initialwinkel des Dummykopfes, da diese auch für die Optimierung relevant sind.

5.3 Ermitteln der notwendigen Sensorgenauigkeiten

Ziel dieser Untersuchung ist es, Kenntnis über die benötigte Sensorgenauigkeit zu bekommen. Die Frage die sich stellt ist, wie genau die Parameter bekannt sein müssen um die vorgegebenen Genauigkeiten von 5 mm einzuhalten. Hierzu wurde wieder die Sensitivitätsanalyse verwendet. Das Abbruchkriterium „Distance less than 0.005 m at every time“, bei dem der maximale Abstand zur Referenzkurve zu keinem Zeitpunkt größer als 5 mm sein darf, gibt Aufschluss über diese Parameterwerte. Die Sensitivitätsanalyse mit diesem Kriterium liefert die benötigten Sensorgenauigkeiten um die Abweichung zur Referenzkurve unter 5 mm zu halten. Da unterschiedliche Versuche unterschiedlich sensitiv sind, muss die benötigte Sensorgenauigkeit über eine Vielzahl von Versuchen ermittelt werden. Aus diesem Datenpool an Sensitivitätsanalysen wird die jeweils größte Anforderung an die Genauigkeit ermittelt. Um eine ausreichende Vielzahl an unterschiedlichen Versuchen zu erhalten wurden 22 Fahrzeugversuche analysiert und ausgewertet.

```

TEST200902_11HEAD00_sensitivity_every point.log - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
low=0.50 high=0.60 dstep=0.55
Alpha AVZ 0.55 0.55 0.1
diff = 0.0 at ots=2500 t=0.2 goaldiff=0.005
dx=-0.000704986122828 dy=0.00204503757986 dz=0.000111195905886
low=0.55 high=0.60 dstep=0.58
Alpha AVZ 0.58 0.58 0.1
diff = 0.0 at ots=2500 t=0.2 goaldiff=0.005
dx=-0.000743412780118 dy=0.00215560270861 dz=0.00011742069517
low=0.55 high=0.58 dstep=0.57
Alpha AVZ 0.57 0.57 0.1
diff = 0.0 at ots=2500 t=0.2 goaldiff=0.005
dx=-0.000730604222469 dy=0.00211875890928 dz=0.00011534394828
low=0.57 high=0.58 dstep=0.58

Finding sensitivity:
-----
distance less than 0.005 m at every time
Offset AV AIX 0.65 deg
Offset AV AIY 0.09 deg
Offset AV AIZ 0.1 deg
Offset ACX 11.76 cm/s^2
Offset ACY 11.51 cm/s^2
Offset ACZ 11.87 cm/s^2
Scale ACX 0.18 %
Scale ACY 0.55 %
Scale ACZ 0.33 %
Offset AVX 2.80 deg/s
Offset AVY 0.58 deg/s
Offset AVZ 0.57 deg/s
Scale AVX 1.41 %
Scale AVY 0.36 %
Scale AVZ 0.96 %
ACX sensor X 0.14 cm
ACX sensor Y 0.21 cm
ACX sensor Z 0.33 cm
ACY sensor X 0.19 cm
ACY sensor Y 0.14 cm
ACY sensor Z 0.40 cm
ACZ sensor X 0.25 cm
ACZ sensor Y 0.28 cm
ACZ sensor Z 0.19 cm
Offset VPX 0.50 cm
Offset VPY 0.50 cm
Offset VPZ 0.50 cm
Alpha ACX 0.29 deg
Alpha ACY 0.19 deg
Alpha ACZ 0.11 deg
Alpha AVX 1.01 deg
Alpha AVY 0.48 deg
Alpha AVZ 0.58 deg
base vdcalc 0.00 + dstep 0.58

```

Abbildung 5.4: Ausgabe des Ergebnisses einer Sensitivitätsanalyse im CDA

Die Daten der Ausgabe wurden dann in eine Excel Tabelle übertragen und die Parameterwerte aller 22 Versuche wurden hinsichtlich ihrer minimalen Werte für die unterschiedlichen Parameter untersucht.

Die Gliederung der ermittelten benötigten Sensorgenauigkeiten erfolgt erstens in die benötigten Sensorgenauigkeiten des Beschleunigungssensors, wobei hier die Offsets, die

Skalierungen und die Schiefwinkeligkeit betrachtet wurden, zweitens in die benötigten Sensorgenauigkeiten des Gyrosensors, die ebenfalls die Offsets, die Skalierungen und die Schiefwinkeligkeit beinhalten und drittens die benötigten Genauigkeiten der allgemeinen Parameter, welche die Initialwinkel und die Abstände der Beschleunigungssensoren zum Gyrosensor einschließen.

Benötigte Sensorgenauigkeiten der Beschleunigungssensoren

In den einzelnen Tabellen sind die jeweiligen benötigten Sensorgenauigkeiten der unterschiedlichen Parameter angegeben.

Parameter	unit	Min	Max	∅
Offset ACX	m/s ²	0.12	0.22	0.16
Offset ACY	m/s ²	0.11	0.21	0.15
Offset ACZ	m/s ²	0.12	0.22	0.16

Tabelle 5-10: Benötigte Sensorgenauigkeiten OAC

Der Offset der Beschleunigungssensoren muss in jede Richtung in etwa gleich genau bekannt sein, nämlich unter 0.12 m/s².

Parameter	unit	Min	Max	∅
Scale ACX	%	0.15	0.24	0.20
Scale ACY	%	0.51	37.91	5.02
Scale ACZ	%	0.25	1.62	0.52

Tabelle 5-11: Benötigte Sensorgenauigkeiten SAC

Die Skalierungen sind hingegen richtungsabhängig. Die Skalierung muss in x-Richtung auf 0.15% genau bekannt sein, in y-Richtung sind es 0.51% und in z-Richtung 0.25%. Am sensitivsten ist bei den Skalierungen der Beschleunigungssensoren also die x-Richtung was auch der Richtung mit den größten Beschleunigungen entspricht.

Parameter	unit	Min	Max	∅
Alpha ACX	deg	0.28	4.43	1.36
Alpha ACY	deg	0.14	0.69	0.29
Alpha ACZ	deg	0.09	0.14	0.12

Tabelle 5-12: Benötigte Sensorgenauigkeiten Alpha AC

Die notwendigen Sensorgenauigkeiten sind auch bei der Schiefwinkeligkeit der Messachsen richtungsabhängig. Alpha ACX beträgt 0.28°, die benötigte Kenntnis über die Genauigkeit der

Schiefwinkeligkeit um die y-Achse ist 0.14° und ist mit 0.09° um die z-Achse am geringsten und somit auch am sensitivsten.

Benötigte Sensorgenauigkeiten des Gyrosensors

Auch bei der Berechnung der notwendigen Genauigkeiten des Gyrosensors wurden wieder alle Fahrzeugversuche betrachtet.

Parameter	unit	Min	Max	\emptyset
Offset AVX	deg/s	1.82	13.80	5.24
Offset AVY	deg/s	0.58	1.18	0.82
Offset AVZ	deg/s	0.57	1.18	0.81

Tabelle 5-13: Benötigte Sensorgenauigkeiten OAV

Die Offsets scheinen allgemein wenig sensitiv zu sein. Die mögliche Messgenauigkeit liegt beim Offset des Gyrosensors, wie im vorigen Kapitel besprochen, bei $0.1 \text{ }^\circ/\text{s}$. Die geringste benötigte Genauigkeit liegt jedoch nur bei $0.57^\circ/\text{s}$ was weit darüber liegt.

Parameter	unit	Min	Max	\emptyset
Scale AVX	%	1.27	49.18	13.25
Scale AVY	%	0.25	0.96	0.49
Scale AVZ	%	0.96	11.55	3.85

Tabelle 5-14: Benötigte Sensorgenauigkeiten SAV

Bei der Skalierung ist mit 0.25% die y-Richtung jene, die mit Abstand am sensitivsten ist und somit auch am genauesten bekannt sein muss.

Parameter	unit	Min	Max	\emptyset
Alpha AVX	deg	0.54	6.63	1.72
Alpha AVY	deg	0.48	7.34	1.91
Alpha AVZ	deg	0.40	27.98	3.28

Tabelle 5-15: Benötigte Sensorgenauigkeiten Alpha AV

Im Vergleich zu den Parametern der Beschleunigungssensoren müssen die Parameter des Gyrosensors allgemein weniger genau bekannt sein. Das ist auch bei der Schiefwinkeligkeit der Fall. Die einzige Ausnahme ist die Skalierung der Winkelgeschwindigkeit um die y-Achse.

Benötigte Genauigkeiten der allgemeinen Parameter

Zu den allgemeinen Parametern zählen die Abstände der Messmittelpunkte der Beschleunigungssensoren zum Gyrosensor und die Initialwinkel des Dummykopfes. Bei diesen Parametern handelt es sich nicht um Sensorfehler.

Parameter	unit	Min	Max	∅
ACX Sensor X	mm	1.10	3.80	1.97
ACY Sensor Y	mm	2.10	24.30	7.20
ACZ Sensor Z	mm	1.20	4.20	2.24

Tabelle 5-16: Benötigte Genauigkeiten AC Sensor

Die benötigten Genauigkeiten der Abstände der Beschleunigungssensor zum Gyrosensor sind mit 1.1 mm relativ groß. Auch im Vergleich zu den möglichen Sensorgenauigkeiten, die aufgrund des Klebers mit unter 1 mm angenommen wurden.

Parameter	unit	Min	Max	∅
Offset AV AIX	deg	0.34	2.15	1.12
Offset AV AIY	deg	0.09	0.15	0.12
Offset AV AIZ	deg	0.09	0.15	0.12

Tabelle 5-17: Benötigte Genauigkeiten AI

Anders verhalten sich dazu die Initialwinkel des Dummykopfes, die besonders um die y- und z-Richtung auf 0.09° genau bekannt sein müssen. Ebenso muss die Drehung um die x-Achse sehr genau bestimmt werden.

Die benötigten Genauigkeiten sind wichtig, um Kenntnisse über die geforderten Genauigkeiten der Messungen zu erhalten. Ist es nicht möglich die Parameter so genau messen bzw. bestimmen zu können, so müssen sie auf jeden Fall optimiert werden. Besonders genau müssen die Parameter der Beschleunigungssensoren, aber auch die Initialwinkel des Dummykopfes um die y- und z-Achse bestimmt und gemessen werden.

5.4 Ergebniszusammenfassung

Bei der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss einer Eingangsgröße (Sensorfehler) auf die Ausgangsgröße (Positionsabweichung der berechneten Bahnkurve) betrachtet.

Nutzen der Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse beziehungsweise deren Ziele sind die Ermittlung der notwendigen Sensorgenauigkeiten, die Analyse der optimierten Parameter auf Plausibilität, die Reduktion der Optimierungsparameter und die Clusterung verschiedener Versuchsdurchführungen anhand der Sensitivität der Parameter, wobei in diesem Kapitel nur der erste Punkt behandelt wurde. Die Punkte werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

Ein Vergleich der in Kapitel 4.1.3 erwähnten Abbruchkriterien ergibt, dass in den untersuchten Versuchskonstellationen aus allen drei Abbruchkriterien die gleichen sensitiven Parameter resultieren, die meisten Anwendungsmöglichkeiten jedoch das Kriterium „Distance less than 0.005m at every time“ liefert, weshalb es als Standard zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse eingeführt wird.

Mit Hilfe der Festlegung der möglichen Genauigkeiten der Parameter lässt sich eine dimensionslose Kenngröße der Sensitivität bestimmen, mit der sich alle Parameter hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Sensitivität untereinander vergleichen lassen.

Mit dem Kriterium, dass der maximale Abstand der neu berechneten Kurve zu der Referenzkurve zu keinem Zeitpunkt größer als 5 mm sein darf, lassen sich die notwendigen Sensorgenauigkeiten bestimmen. Dazu sei noch erwähnt, dass die Parameter der Beschleunigungssensoren genauer bekannt sein müssen, als jene des Gyrosensors.

Die weiteren vorher erwähnten Ziele der Sensitivitätsanalyse, wie etwa die Analyse der optimierten Parameterwerte auf Plausibilität, die Reduktion der Optimierungsparameter durch die Optimierung mit den ausschließlich sensitiven Parametern und die Clusterung der Versuchsdurchführungen anhand ihrer sensitiven Parametern werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

6 Durchführung der Optimierung

In diesem Kapitel wird die Durchführung der Optimierung anhand von zwei Beispielen erklärt. Zuerst wird die Kopftrajektorie eines Dummys bei einem Fahrzeugversuch optimiert und im Weiteren die Kopftrajektorie bei einem Schlittenversuch optimiert. Ziel ist dabei die Minimierung der Positionsabweichungen zwischen der berechneten Trajektorie (aus den Daten der Beschleunigungs- und des Gyrosensors) und der Trajektorie aus der Videoanalyse.

Wie in Kapitel 3 erwähnt dient die Optimierung der Lokalisation des Minimums. Bei der Datenfusion, also der Zusammenführung der optischen und elektrischen Messtechnik oder auch simulationsbasierte Versuchsauswertung, fungiert die Optimierung als Möglichkeit die maximale Abweichung der aus den Messdaten berechneten Bahnkurve und der Videokurve zu minimieren.

Die Optimierung wird im CDA durchgeführt. Die Vorgehensweise ist dabei folgende: Die für die Optimierung herangezogenen Parameter werden variiert, sowohl in ihrer Anzahl als auch die Parameterauswahl selbst. Dabei muss auch die Reihenfolge der zu optimierenden Parameter angegeben werden. Das CDA liefert unter anderem die maximale Abweichung der Bahnkurve die mit den optimierten Parametern berechnet wurde. Nach jeder Optimierung wird die Verbesserung überprüft, das heißt die Abweichung der neu optimierten Bahnkurve wird mit der Vorangegangenen verglichen. Des Weiteren werden die Werte der Parameter hinsichtlich ihrer Plausibilität analysiert.

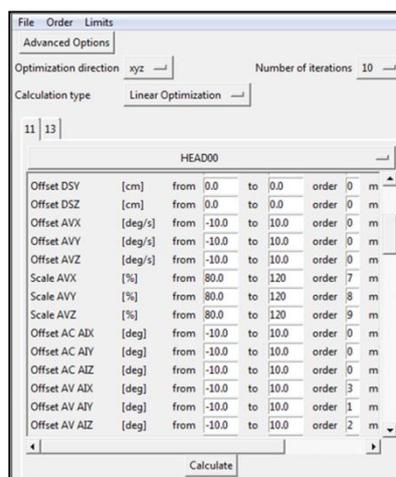


Abbildung 6.1: Bedienungsfläche der Optimierungsfunktion

6.1 Fahrzeugversuch

Die Durchführung der Optimierung soll anhand von zwei Beispielen erklärt werden. Der erste Versuch, an dem der Ablauf einer Optimierung gezeigt werden soll, ist ein Fahrzeugversuch. Fahrzeugversuche werden mit vollständigen Fahrzeugen durchgeführt, wobei das Bewegungs- und Deformationsverhalten untersucht wird und mit ihnen die wohl realistischste Darstellung eines Verkehrsunfalls möglich ist. In weiterer Folge werden Frontalaufprallversuche behandelt. [Kramer 2009, S.326]

Bei dem betrachteten Versuch handelt es sich um eine Frontalkollision genauer um einen ODB Versuch. Zunächst wird der Fahrzeugversuch in der Theorie betrachtet, bevor die Optimierung nach dem vorher erwähnten Ablauf durchgeführt wird. Ziel dieser Untersuchung ist die Minimierung der Positionsabweichungen zwischen der berechneten Trajektorie und der Trajektorie aus der Videoanalyse.

6.1.1 Beschreibung ODB Versuch

Der ODB (Offset Deformable Barrier) ist eine Versuchsmethode zur Abbildung einer Frontalkollision. Das Fahrzeug wird wie bei anderen frontalen Fahrzeug-Aufprallversuchen mit Hilfe einer Beschleunigungseinrichtung auf einer Crash Bahn auf eine bestimmte Geschwindigkeit gebracht und trifft dann auf ein definiertes Hindernis. Dieses Hindernis kann starr oder deformierbar sein und der Aufprall kann entweder mit voller oder nur teilweiser Überdeckung erfolgen. Beim ODB Versuch erfolgt der Aufprall gegen eine deformierbare Barriere bei 40% Überdeckung. Eine kurze Zusammenfassung einiger unterschiedlicher Versuchsmethoden für Frontalkollisionen soll die nächste Tabelle zeigen, wobei nicht alle für die Diplomarbeit relevant sind. [Kramer 2009, S.327]

Geltungsber.	Barriere	Überdeckung	Geschw. [km/h]	Zielsetzung
Europa	deformierbar	40 % Fahrers.	56/64	Struktur, ISS, Dummy-Belastung
USA, Kanada	0°, starr	100%	48...53	Struktur, ISS, Dummy-Belastung
USA	30°, starr	100%	48...53	Struktur, ISS, Dummy-Belastung
NCAP (USA)	0°, starr	100%	56	Rating-Versuch zu passiven Sicherheit
AMS	15° links, starr	50 % Fahrers.	55	Rating-Versuch zu passiven Sicherheit
Europa	10°, starr	40 % Fahrers.	15	Rep.freundlichkeit, VK-Vers.einstufung
USA	starres Pendel	seitlich, mittig	2,5/4	Rep.freundlichkeit, VK-Vers.einstufung

Tabelle 6-1: Versuchsmethoden zu Frontkollisionen [Kramer 2009, S. 327]

Diese Tests dienen hauptsächlich der Untersuchung der Struktur und der Insassenschutz-Systeme. Des Weiteren werden mit ihnen beispielsweise auch

Vollkaskoversicherungseinstufungen durchgeführt, um die Reparaturfreundlichkeit des Fahrzeuges festgestellt. [Kramer 2009, S.327]

6.1.2 Bestimmung Dummykopfkinematik Fahrzeugversuch

Die Bestimmung der Dummykopfkinematik lässt sich im Allgemeinen in vier Schritte unterteilen. Der erste Schritt ist die Signalanalyse, bei der die elektrischen Messsignale analysiert werden. Danach folgt die Berechnung der Bahnkurve mit den Daten aus der Vorvermessung. Der dritte Schritt ist die Optimierung der messbaren Startparameter, bevor im vierten und letzten Schritt zusätzlich verschiedene Sensorfehler mitoptimiert werden.

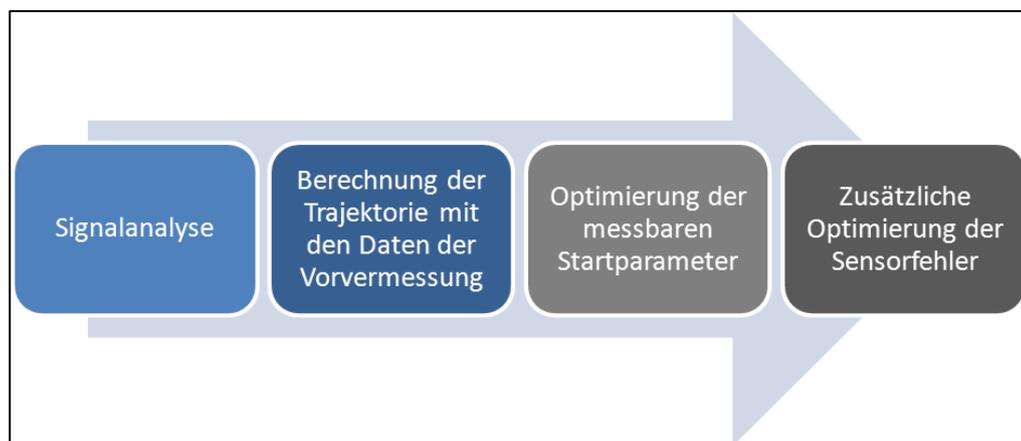


Abbildung 6.2: Ablauf bei der Durchführung einer Optimierung

Signalanalyse

Bei der Signalanalyse sollen im Allgemeinen Fehler im Signal erkannt und korrigiert werden. Meist wird dabei Folgendes bearbeitet: Polarität des Signals, Sprünge in den Videokurven

Ein weiterer Teil der Signalanalyse ist die Untersuchung der Videodaten. Hier sind die Videoposition und der Winkel auf Sprünge im Verlauf zu analysieren. Diese Sprünge sind, wenn vorhanden, im Zentimeterbereich und wirken sich deutlich auf die berechneten Abweichungen aus. Bei diesem Versuch sind keinem Sprung in den Videodaten feststellbar.

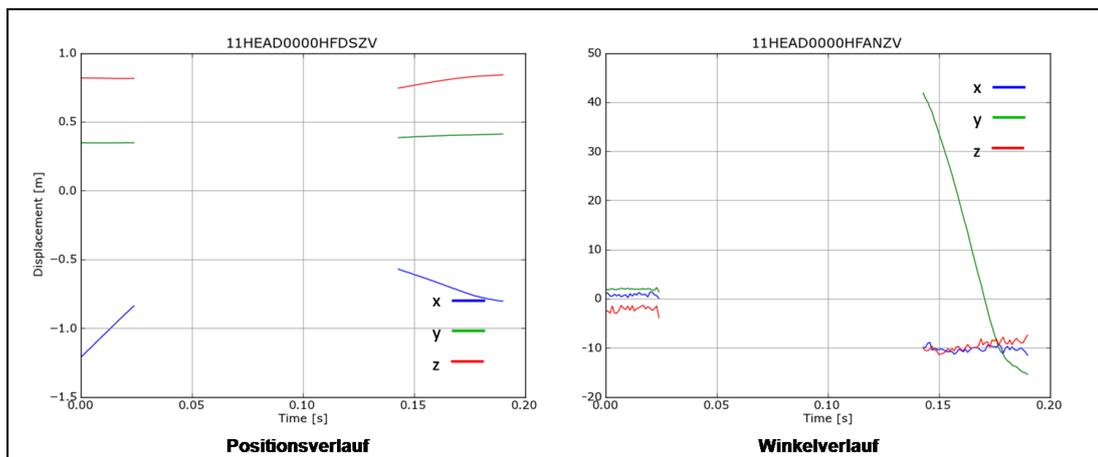


Abbildung 6.3: Signalanalyse des Videopositions- und Winkelverlaufs beim ODB Versuch

Vorvermessung

Nach der Signalanalyse wird die Bahnkurve als erstes mit den Daten aus der Vorvermessung berechnet, um Informationen über die anfänglichen Abweichungen zu bekommen. Daten aus der Vorvermessung können die Startgeschwindigkeit (Offset VA), die Initialwinkel (Offset AV AI) oder der Timeoffset (OT) sein. Diese „messbaren Startparameter“ können, müssen aber nicht bekannt sein. Bei diesem Versuch wurde nur die Startgeschwindigkeit in x-Richtung gemessen. Die Messung der Startgeschwindigkeit erfolgt mit Hilfe einer Lichtschranke und beträgt für diesen Versuch 15.75 m/s. Des Weiteren werden bei der Vorvermessung die konstruktiv bedingten Abstände der Koordinatenursprünge der Beschleunigungssensoren zum Gyrosensor berücksichtigt (siehe Kapitel 1.1.3). Das Ergebnis der maximalen Abweichung nach der Berechnung der Bahnkurve aus den elektrischen Messdaten mit den Werten aus der Vorvermessung ist im nächsten Bild ersichtlich.

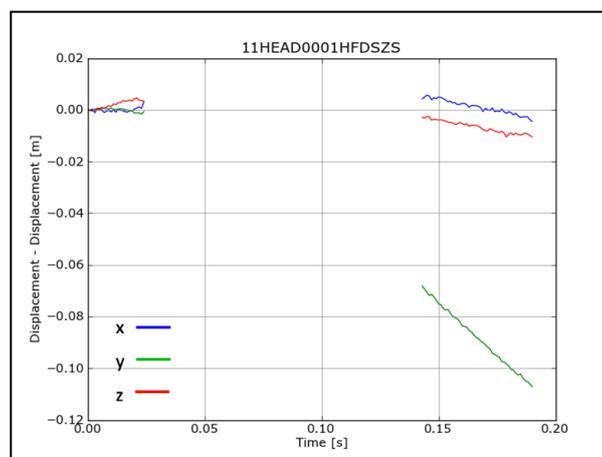


Abbildung 6.4: Positionsabweichung Vorvermessung (ODB Versuch)

Es ergibt sich eine maximale Abweichung von 12 cm. Die gewünschte Abweichung liegt bei etwa 5 mm. Daher ist das Ergebnis nach der Berechnung mit den Parameterwerten aus der Vorvermessung noch nicht zufriedenstellend. Es müssen also mögliche auftretende Fehler optimiert werden, um die gewünschte präzise Bahnkurve zu erhalten. Der Bereich in dem keine Abweichung abgebildet beziehungsweise berechnet wurde ist jener, in dem keine Videodaten vorhanden sind. In diesem Bereich ist der Dummykopf in den Airbag eingetaucht sein.

Optimierung der messbaren Startparameter

Nachdem die Berechnung mit den Daten aus der Vorvermessung erfolgt ist und die Abweichungen noch nicht zufriedenstellend sind, wird die erste Optimierung durchgeführt. Die Parameter die als erstes optimiert werden sind jene Parameter die gemessen wurden oder auch gemessen werden können. Dazu zählen, wie vorher erwähnt, die Initialwinkel des Dummykopfes, sowie seine Startgeschwindigkeit und der Timeoffset. Genau diese Parameter wurden bei dem untersuchten ODB Versuch optimiert. Das Ergebnis der Abweichungen der Position ist im folgenden Bild dargestellt.

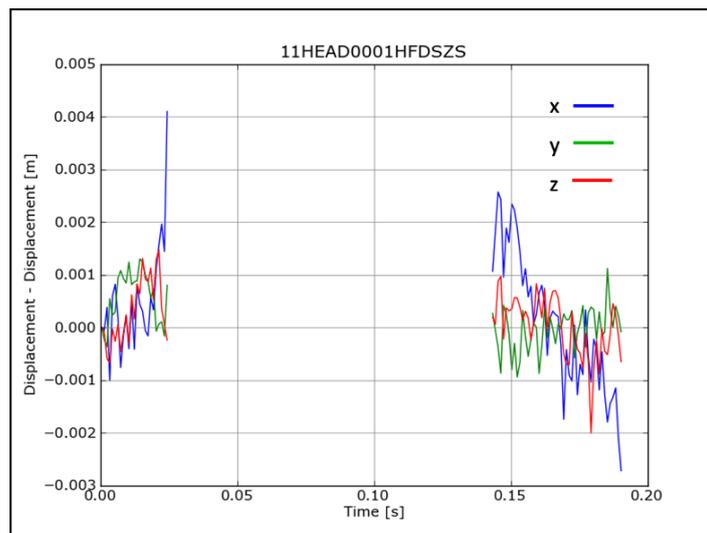


Abbildung 6.5: Positionsabweichung nach der Optimierung mit den messbaren Startparametern

Nach der Optimierung der Startwinkel und Startgeschwindigkeit, sowie des Timeoffsets beträgt die maximale Positionsabweichung nur mehr 4 mm, was eine beträchtliche Verbesserung im Vergleich zur Berechnung mit den Daten aus der Vorvermessung ist. Die Abstände der Beschleunigungssensoren zum Gyrosensor wurden wiederum berücksichtigt. Interessant sind die Werte der optimierten Parameter die in der folgenden Tabelle eingetragen sind.

Initialwinkel		Startgeschwindigkeit		Timeoffset	
AIX	0.26 [°]	VAX	15.79 [m/s]	OT	0.4 [ms]
AIY	0.85 [°]	VAY	0.06 [m/s]		
AIZ	-2.11 [°]	VAZ	-0.15 [m/s]		

Tabelle 6-2: Parameterwerte nach Optimierung AI, VA, OT beim ODB Versuch

Die Parameterwerte scheinen plausibel, da sie nur geringfügig von denen aus der Vorvermessung abweichen.

Zusätzliche Optimierung der Sensorfehler

Die nächste Frage die sich stellt ist, wie sich die Bahnkurve nach der Optimierung mit ausgewählten Sensorfehlern verhält. Dabei sind nicht nur die maximalen Abweichungen, sondern auch die Parameterwerte, die sich aus der Optimierung ergeben und an die im CDA voreingestellten Grenzwerte laufen, von Bedeutung. Die Sensorfehler die für diese Berechnung berücksichtigt und mitoptimiert wurden, sind die Skalierungsfehler und die Offsetfehler der Beschleunigungssensoren und des Gyrosensors. Diese Parameter werden in weiterer Folge als Standardparameter bezeichnet. Dieser Parametersatz diente bis zur Durchführung dieser Diplomarbeit als letzter Optimierungsschritt, da mit diesen Parametern meistens die besten Ergebnisse erzielt werden. Zusätzlich wurden die schon vorher optimierten messbaren Startparameter, also die Startwinkel, Startgeschwindigkeiten und der Timeoffset mitoptimiert. Daraus ergibt sich eine Optimierung mit 19 Parametern. Der große Nachteil der Optimierung mit so vielen Parametern (Standardoptimierung) ist die lange Rechenzeit, ein Vorteil ist jedoch das gute Ergebnis der Optimierung resultierend aus der Optimierung mit so vielen Parametern.

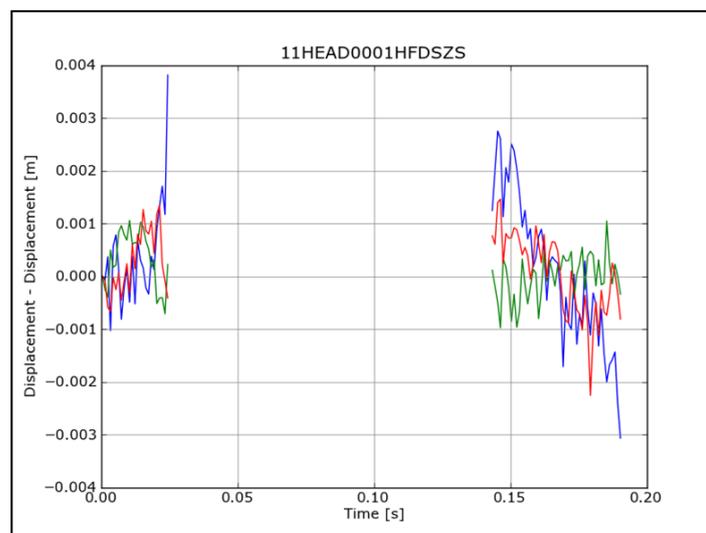


Abbildung 6.6: Positionsabweichung nach der Optimierung mit zusätzlichen Sensorfehlern beim ODB Versuch

Bei der Optimierung ergeben sich keine markanten Verbesserungen der Bahnkurve. Die maximale Abweichung liegt weiterhin bei zirka 4 mm, wobei beachtet werden muss, dass die Standardabweichung der Videoanalyse schon 3 mm beträgt. Bei der Optimierung ergeben sich verschiedene Werte für die Parameter die in Tabelle 6-3 dargestellt sind.

Initialwinkel		Startgeschwindigkeit		Timeoffset	
AIX	0.89 [°]	VAX	15.81 [m/s]	OT	0.4 [ms]
AIY	2.13 [°]	VAY	0.09 [m/s]		
AIZ	-1.82 [°]	VAZ	-0.10 [m/s]		
Skalierung AC-Sensor		Skalierung AV-Sensor			
SACX	99.60 [%]	SAVX	99.68 [%]		
SACY	97.00 [%]	SAVY	100.28 [%]		
SACZ	98.50 [%]	SAVZ	99.17 [%]		
Offset AC-Sensor		Offset AV-Sensor			
OACX	-0.43 [m/s ²]	OAVX	-2.84 [°/s]		
OACY	0.90 [m/s ²]	OAVY	7.78 [°/s]		
OACZ	1.00 [m/s ²]	OAVZ	3.40 [°/s]		

Tabelle 6-3: Parameterwerte Optimierung AI, VA, SAC, SAV, OAC, OAV, OT beim ODB Versuch

Bei der Untersuchung der Parameter fällt auf, dass die sich die Parameter AI und VA im Gegensatz zur vorherigen Optimierung verändert haben. Des Weiteren ist hervorzuheben, dass sich die Rechenzeit bei der Optimierung mit 19 Parametern deutlich erhöht hat, die maximale Abweichung hat sich jedoch nicht merklich verbessert. Außerdem laufen zwei Parameter (SACY, OACZ) an die im CDA voreingestellten Grenzen.

6.2 Schlittenversuch

Im Unterschied zu Fahrzeug-Versuchen, bei denen die Wechselwirkung zwischen der Deformation des Fahrzeuges und dem Rückhaltesystem untersucht wird, dienen Schlittenversuche vor allem zur Auslegung von Rückhaltesystem-Komponenten (Gurt, Airbag,...). [Kramer 2009, S. 331]

Mit Hilfe von Schlittenversuchen kann die Wirkung von Insassenschutzsystemen untersucht werden, die jedoch den großen Vorteil haben, dies ohne die Zerstörung eines ganzen Fahrzeuges zu tun. Oftmals werden die Schlitten mit Teilkarosserien versehen die zur Aufnahme des Insassenschutzsystems dienen. Die Teilkarosserien sind derart versteift, dass sie meist mehrere Tests überstehen, ohne sich im Allgemeinen zu verformen. Das bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass Verletzungen die durch Intrusionen, wie zum Beispiel das Eindringen des Lenkrads oder der Armaturentafel beziehungsweise auch des Fußraumes, nur mit großem Aufwand und daher eher selten realisiert werden. [Kramer 2009, S.331]

Zur Nachbildung einer Frontalkollision gibt es zwei unterschiedliche Möglichkeiten, den Beschleunigungs- und den Verzögerungsschlitten die kurz noch näher erklärt werden.

Beschleunigungsschlitten

Bei dem Beschleunigungsschlitten oder auch Katapultschlitten sieht der Versuchsaufbau so aus, dass dieser aus der Ruhelage entgegen der Fahrtrichtung beschleunigt wird. Der zeitliche Verlauf der Beschleunigung entspricht der Verzögerung des Fahrzeugs. In dieser Beschleunigungsphase werden die Dummy-Belastungen gemessen und danach mit Hilfe einer Bremse zum Stillstand gebracht. Die Beschleunigung des Schlittens erfolgt über einen Hydraulikkolben. [Kramer 2009, S.331f]

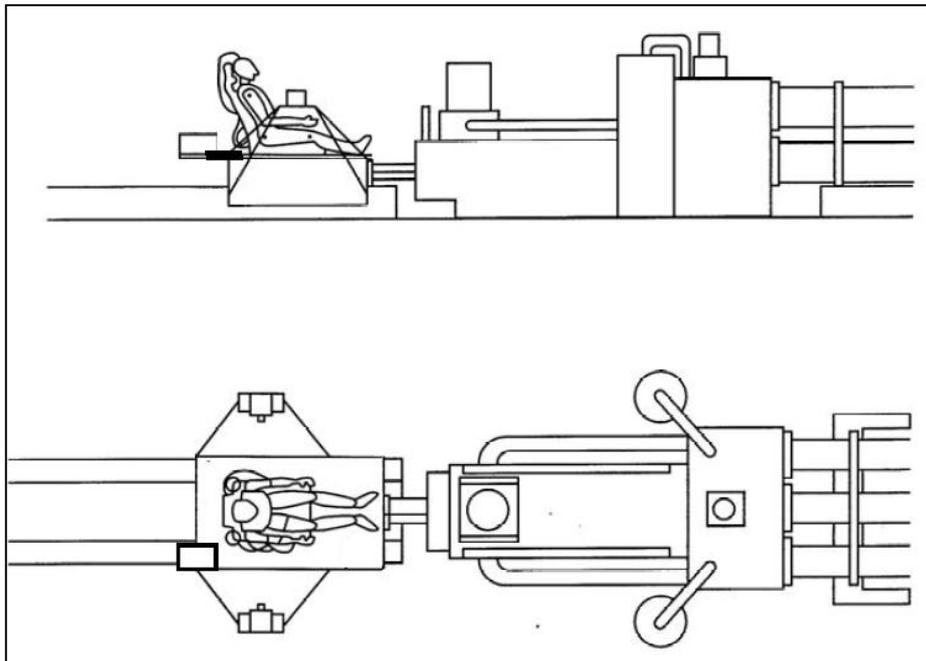


Abbildung 6.7: Beschleunigungsschlitten mit hydraulischem Antrieb [Kramer 2009, S.332]

Verzögerungsschlitten

Der Ablauf eines Versuches mit einem Verzögerungsschlitten kann in drei Phasen unterteilt werden: die Antriebsphase, die Freilaufphase und die Verzögerungsphase. In der Antriebsphase wird der Schlitten in Fahrtrichtung auf eine definierte Versuchsgeschwindigkeit gebracht, was mit Hilfe eines Zugseils (Antrieb durch Fallgewicht, Hydraulik,- Elektro- oder Verbrennungsmotor oder vorgespanntes Gummiseil) geschieht. In der Freilaufphase wird der Schlitten, nachdem er die Testgeschwindigkeit erreicht wurde, von dem Seilantrieb getrennt, bevor er in der Verzögerungsphase mittels einer stationären Verzögerungseinrichtung gebremst wird. Die Möglichkeit vorgegebene Verzögerungsverläufe nachzubilden und zu variieren ist jedoch gering und erfolgt beispielsweise mit Bandbiegebremseinrichtungen, bei denen der Schlitten Flachstahlbänder deformiert, die je nach Verzögerungsverlauf auch parallel angeordnet werden können. Die nächste Abbildung zeigt den möglichen Versuchsaufbau eines Verzögerungsschlittens mit versteifter Karosserie und Bandbiegebremse. [Kramer 2009, S.332f]

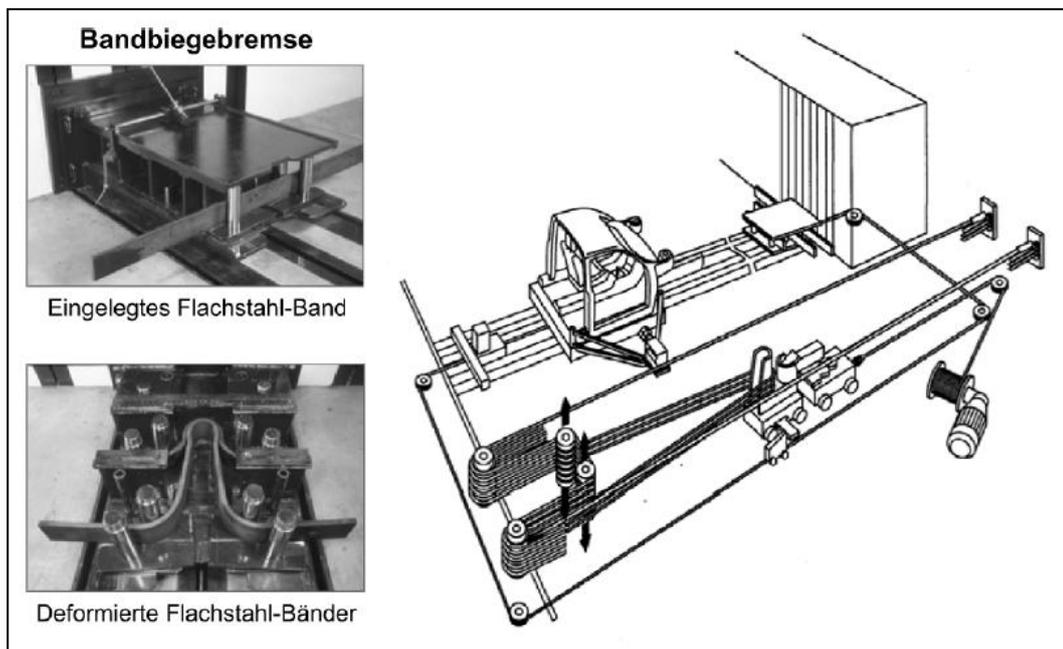


Abbildung 6.8: Verzögerungsschlitten mit Verzögerungseinrichtung [Kramer 2009, S.333]

6.2.1 Bestimmung Dummykopfk kinematik Schlittenversuch

Die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Dummykopfk kinematik ist die gleiche wie auch schon vorher beim Fahrezugversuch.

Signalanalyse

Um die Dummykopfk kinematik mit Hilfe des CDAs berechnen zu können müssen vorher noch zwei Programmfiles angelegt werden. Das ist einerseits das Default-File andererseits des Parameter-File. Das Default-File dient unter anderem der Transformation der Koordinatensysteme. Wie in Kapitel 1 erwähnt unterscheiden sich die Koordinatensysteme der elektrischen Messtechnik und der Filmtechnik von dem im CDA verwendeten Koordinatensystem. Um mit allen Daten rechnen zu können müssen das Koordinatensystem der elektrischen Messtechnik und das Filmtechnikkoordinatensystem in das Koordinatensystem des CDAs transformiert werden. Im Parameter-File werden die Daten der Vorvermessung festgehalten.

In der Signalanalyse erfolgt wieder die Kontrolle der Messsignale und die Überprüfung der Videodaten. Wie auch schon zuvor bei dem ODB Versuch erfolgt zuerst die Analyse der Beschleunigungen und der Drehraten bevor die Videokurven hinsichtlich Sprüngen untersucht werden. Bei dem analysierten Schlittenversuch kommt es zu Peaks im Kurvenverlauf. Bei diesem Versuch ist die Ursache wahrscheinlich ein Durchschlagen der Dämpfer am Thoracic

Spine (Schutz des Brustpotentiometers) auf das Beckenelement. Bei diesem Versuch sind sie jedoch weniger ausgeprägt und schwer zu erkennen.

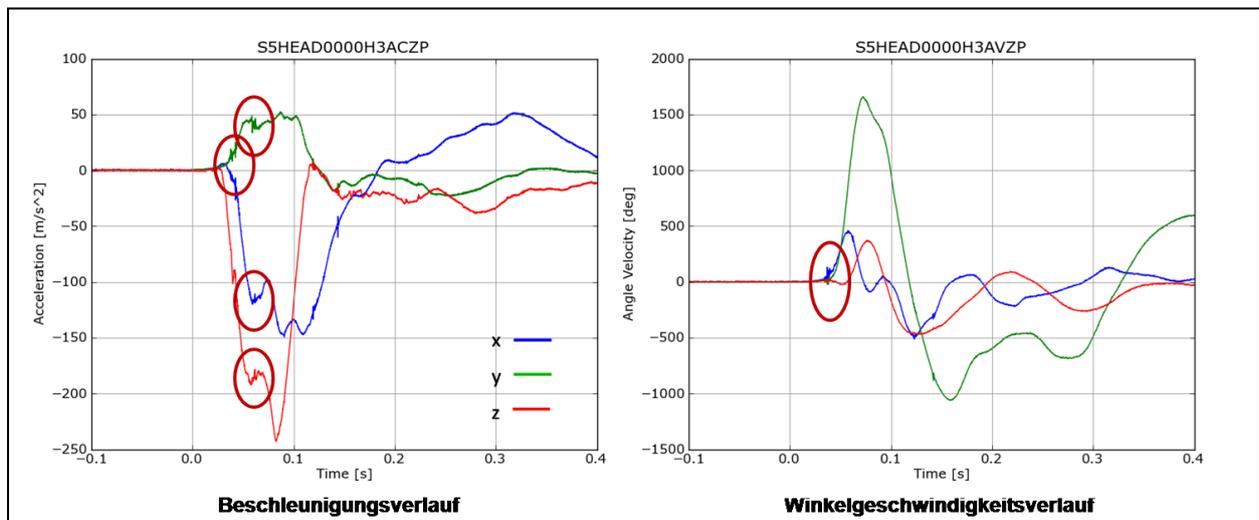


Abbildung 6.9: Signalanalyse des Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitsverlaufs beim Schlittenversuch

Aus den Beschleunigungssignalen ist ersichtlich, dass die maximale Beschleunigung in etwa 240 m/s^2 in z-Richtung beträgt. Auffallend ist auch, dass die maximale Beschleunigung beim Schlittenversuch in z-Richtung erfolgt. Die Drehrate liegt mit zirka $1700^\circ/\text{s}$.

Als nächster Schritt der Signalanalyse erfolgt die Untersuchung der Videokurven. Bei dem betrachteten und analysierten Schlittenversuch kommt es zu schon vorher erwähnten Sprüngen in der Videokurve.

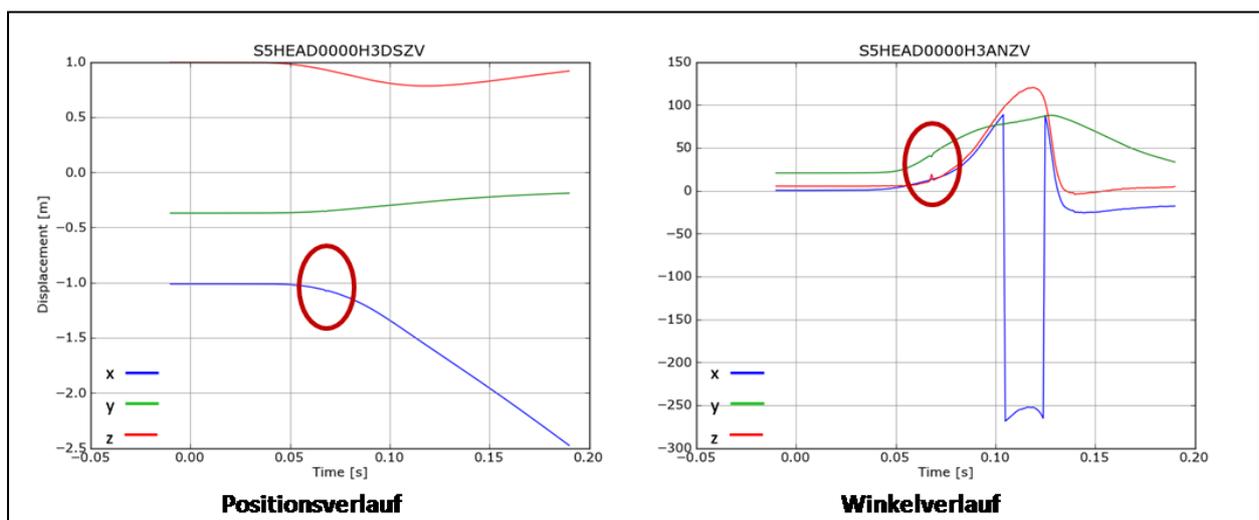


Abbildung 6.10: Signalanalyse des Videopositions- und Winkelverlaufs beim Schlittenversuch

In dieser Abbildung sind die Sprünge jedoch schwer zu erkennen. Sie liegen im Bereich von etwa 0.07 s. Um die Sprünge besser erkennen zu können wird der betroffene Bereich noch einmal vergrößert.

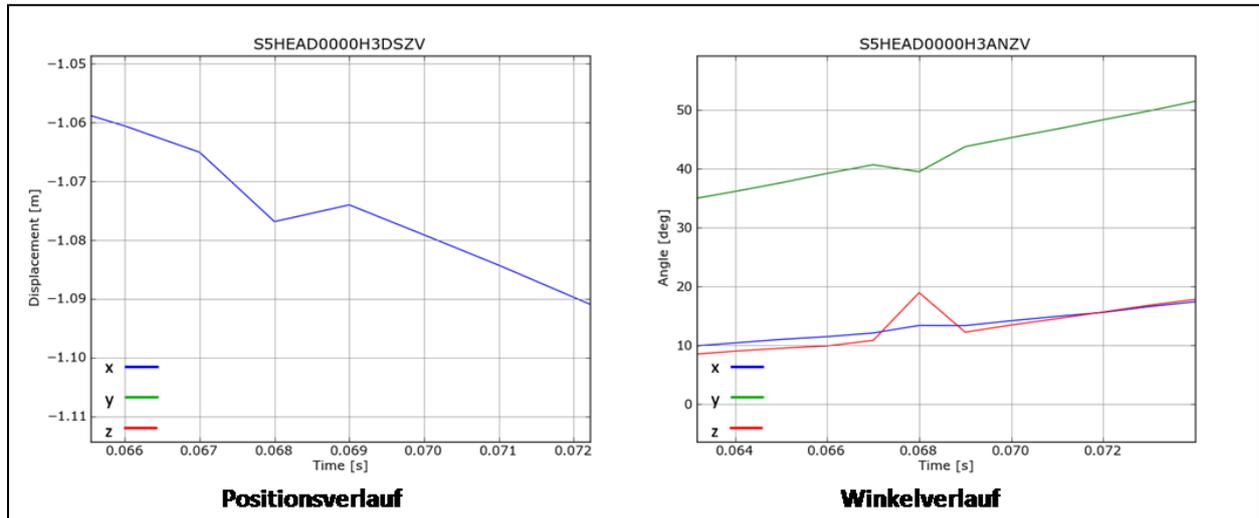


Abbildung 6.11: Vergrößerung des Bereichs der Sprünge im Videopositions- und Winkelverlauf beim Schlittenversuch

Bei einer Vergrößerung der betroffenen Bereiche sind die nicht „physikalischen“ Sprünge besser ersichtlicher. Der Einfluss solcher Sprünge ist am besten im Positionsverlauf erkennbar. Der Sprung in x-Richtung beträgt etwa 1 cm. Bei einer geforderten maximalen Positionsabweichung zwischen der aus der Optimierung berechneten Kurve und der Videokurve von etwa 5 mm lässt ein solcher Sprung keine zufriedenstellenden Ergebnisse zu. Ein solcher in der Wirklichkeit nicht vorkommender Sprung führt in weiterer Folge bei der Optimierung zu viel zu großen Abweichungen, da der Optimierer solche lokal auftretenden Sprünge nicht ausgleichen kann. Daher müssen die Bereiche solcher Sprünge aus den Videodaten entfernt werden. Dies geschieht in dem vorher erwähnten Default File. Der Einfluss von Sprüngen in der Videokurve ist im nächsten Punkt, der Vorvermessung, besser zu erkennen.

Vorvermessung

Beim Schlittenversuch wurden die Initialwinkel des Dummykopfes AI und der Timeoffset, der Zeitversatz zwischen elektrischer Messtechnik und Filmtechnik, gemessen. Die Initialwinkel wurden mit zwei verschiedenen Verfahren gemessen, einerseits mittel DPS Einmessung (Dummy Positioning System) und zusätzlich wurden die Startwinkel aus der 3D-Filmanalyse bestimmt. Der Unterschied der Initialwinkel ist jedoch nur marginal. Die Bestimmung des Zeitoffsets wird über einen Synchronometer realisiert, der genau beim T0-Signal startet.

Zusätzlich zu diesen Parametern werden noch die Sensorabstände berücksichtigt. Alle gemessenen und bekannten Parameter werden in das Parameter-File eingetragen und die Bahnkurve berechnet. Die nächste Abbildung zeigt die Positionsabweichung, die Sprünge in der Videokurve wurden nicht entfernt.

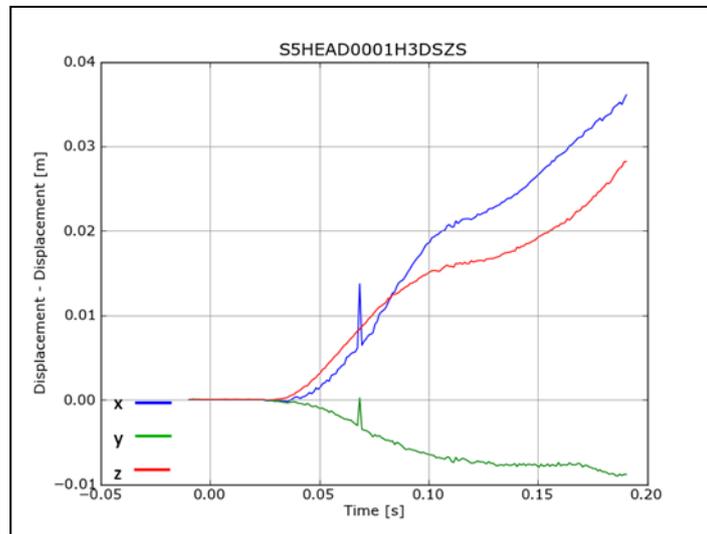


Abbildung 6.12: Positionsabweichung Vorvermessung (Schlittenversuch)

Nach der Berechnung mit den Daten aus der Vorvermessung ergeben sich Positionsabweichungen von etwa 3.5 cm. Gut zu erkennen sind die Auswirkungen der Videosprünge im Bereich von 0.07 s. Es ergeben sich zusätzliche Abweichungen von 1 cm in diesem Zeitbereich.

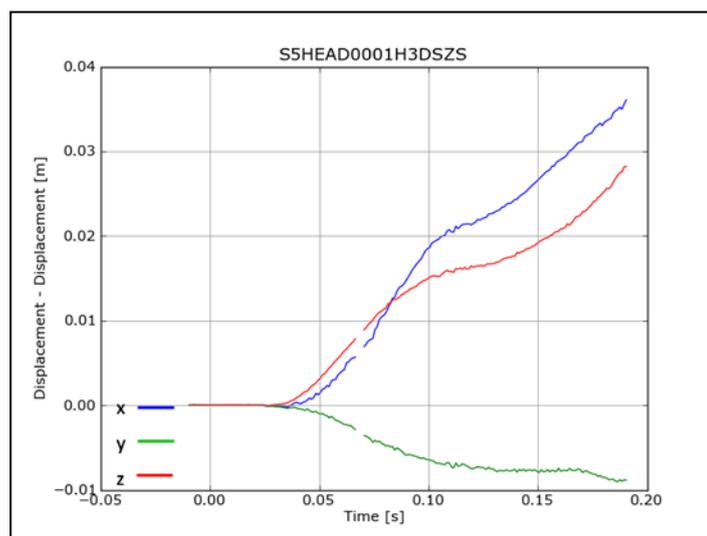
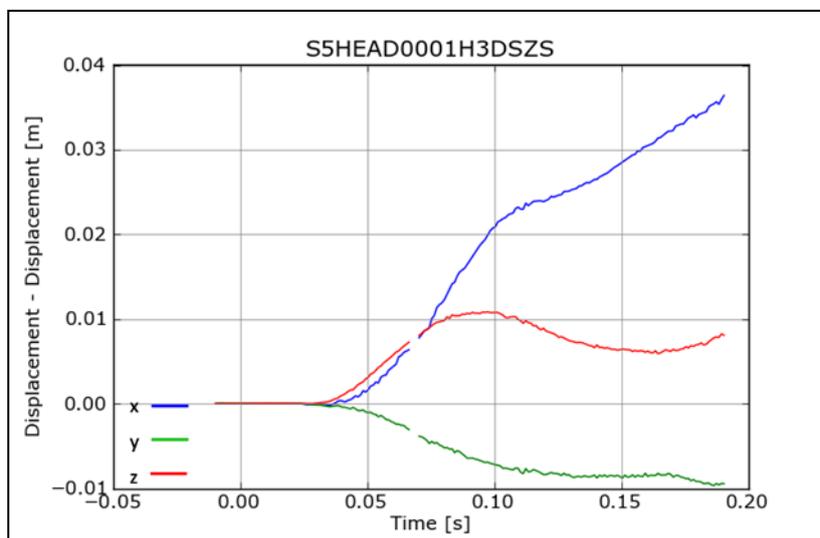


Abbildung 6.13: Positionsabweichung Vorvermessung ohne Sprung in der Videokurve (Schlittenversuch)

Abbildung 6.13 zeigt die Positionsabweichung nachdem die Sprünge in den Videodaten entfernt wurden. Auch beim Schlittenversuch liefert die Berechnung mit den Daten aus der Vorvermessung noch kein zufriedenstellendes Ergebnis der Positionsabweichung. Daher muss in weiterer Folge eine Optimierung durchgeführt werden.

Optimierung der messbaren Startparameter

Da die Berechnung mit den Daten aus der Vorvermessung keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert, ist der nächste Schritt in der Bestimmung der Dummykopfk kinematik die Optimierung der gemessenen Parameter. Gemessen und somit in weiterer Folge auch optimiert wurden die Initialwinkel des Dummykopfes um alle drei raumfesten Koordinatenachsen. Das Resultat der Optimierung ist in Abbildung 6.14 zu sehen.



6.14: Positionsabweichung nach der Optimierung mit den gemessenen Parametern

Nach der Optimierung mit den drei Initialwinkeln ergeben sich Positionsabweichungen von etwa 3.5 cm was kaum Verbesserung im Vergleich mit der Berechnung der Bahnkurve mit den Daten aus der Vorvermessung ist. Die einzige Verbesserung der Positionsabweichung erfolgt in z-Richtung. Hier verringert sich die Abweichung der berechneten Kurve mit den elektrischen Messdaten zur Videokurve um zirka 2 cm hinsichtlich der Vorvermessung. Die Werte der Parameter nach der Optimierung sind in der nachstehenden Tabelle ersichtlich, wobei die optimierten mit den gemessenen Werten verglichen wurden.

Initialwinkel (gemessen)		Initialwinkel (optimiert)	
AIX	0.4 [°]	AIX	0.1 [°]
AIY	20.6 [°]	AIY	19.9 [°]
AIZ	5.2 [°]	AIZ	5.1 [°]

Tabelle 6-4: Parameterwerte vor und nach der Optimierung AI beim Schlittenversuch

Die Parameter ändern sich nach der Optimierung nur wenig. Die Winkel um die x- und die z-Achse verändern sich nur um 0.1° (z-Achse) und 0.3° (x-Achse). Die größte Veränderung der Parameter findet um die y-Achse statt (0.7°), was laut Signalanalyse die Hauptrotationsachse ist.

Zusätzliche Optimierung der Sensorfehler

Nach der Optimierung mit den Startwinkeln ergeben sich nur sehr geringe Verbesserungen in den Positionsabweichungen. Die darauffolgende logische Schlussfolgerung ist jene, dass eine weitere Optimierung unabdingbar ist. Neben den Initialwinkeln erfolgt die Optimierung ergänzend mit den Offsetfehlern und den Skalierungsfehlern der Beschleunigungssensoren und des Winkelgeschwindigkeitssensors. Daraus resultiert eine Optimierung des Schlittenversuchs mit 15 Parametern. Nach der Optimierung mit den zusätzlichen Sensorfehlern verringern sich die maximalen Positionsabweichungen von 3.5 cm bei der Optimierung mit den Startparametern auf lediglich 5 mm. Es kommt also zu einer großen Verbesserung der verglichenen Bahnkurven. Den genauen Verlauf der Abweichungen ist in der Abbildung 6.15 abgebildet.

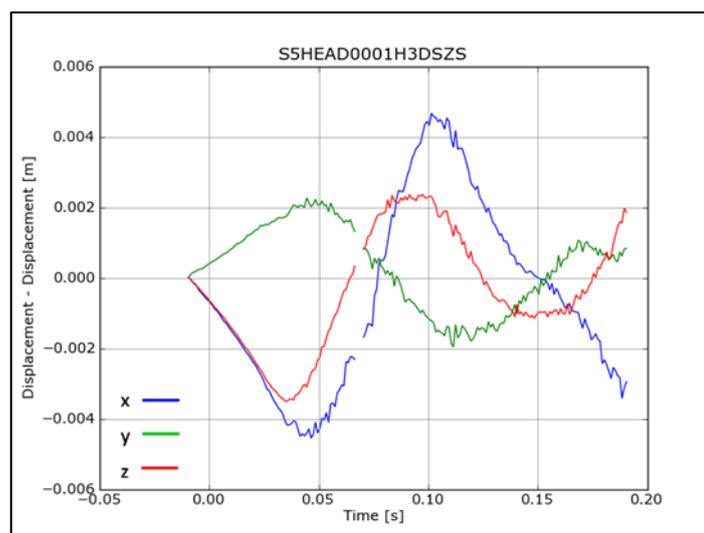


Abbildung 6.15: Positionsabweichung nach der Optimierung mit zusätzlichen Sensorfehlern beim Schlittenversuch

Im Verlauf der Positionsabweichungen ist auffällig, dass sich diese nach der Optimierung näherungsweise „sinusförmig“ verhält. Das deutet darauf hin, dass sie einer gewissen Systematik unterliegt, die bei der Optimierung nicht berücksichtigt wurde. Diese Systematik wird im Folgenden als Restsystematik bezeichnet, und in späteren Kapiteln noch genauer behandelt.

Initialwinkel		Skalierung AC-Sensor		Skalierung AV-Sensor	
AIX	1.69 [°]	SACX	99.51 [%]	SAVX	97.00 [%]
AIY	22.10 [°]	SACY	103.00 [%]	SAVY	101.13 [%]
AIZ	5.77 [°]	SACZ	100.38 [%]	SAVZ	103.00 [%]
		Offset AC-Sensor		Offset AV-Sensor	
		OACX	-0.32 [m/s ²]	OAVX	-8.74 [°/s]
		OACY	-0.38 [m/s ²]	OAVY	10.00 [°/s]
		OACZ	0.93 [m/s ²]	OAVZ	0.08 [°/s]

Tabelle 6-5: Parameterwerte Optimierung AI, SAC, SAV, OAC, OAV beim Schlittenversuch

Nach der Optimierung laufen einige Parameter an die Grenzen, drei der sechs Skalierungsfaktoren und der Offset des Gyrosensors in y-Richtung. Auch die Startwinkel verändern sich im Gegensatz zur vorigen Optimierung mit den gemessenen Startparametern. Gemessen wurden Initialwinkel von 0.4° um die x-Achse, 20.6° um y- und 5.2° um die z-Achse mit Hilfe der 3D Filmanalyse. Damit ergeben sich Differenzen zur Optimierung von nur 0.6° um die z-Achse, jedoch große Unterschiede von 1.3° (x-Achse) und 1.5° (y-Achse).

Ergebniszusammenfassung der gesamten Versuchsreihe

Beim Schlittenversuch handelt es sich nicht nur um einen einzelnen Versuch sondern um eine ganze Versuchsreihe von vier Versuchen mit identischer Versuchsdurchführung und gleicher Sensorik. Analysiert wurden alle vier Versuche. Dieser Abschnitt zeigt eine Ergebniszusammenfassung der Optimierung der vier Versuche. In weiterer Folge werden die Schlittenversuche mit TEST201101 bis TEST201104 bezeichnet. Im vorigen Abschnitt wurde der dritte Versuch der Versuchsreihe, also TEST201103 näher analysiert.

Nach der Optimierung mit AI (Initialwinkel des Dummykopfes), SAC (Skalierung Beschleunigungssensor), SAV (Skalierung Gyrosensor), OAC (Offset Beschleunigungssensor und OAV (Offset Gyrosensor) ergeben sich die besten Ergebnisse. Diese Parameter werden wiederum als Standardparameter bezeichnet.

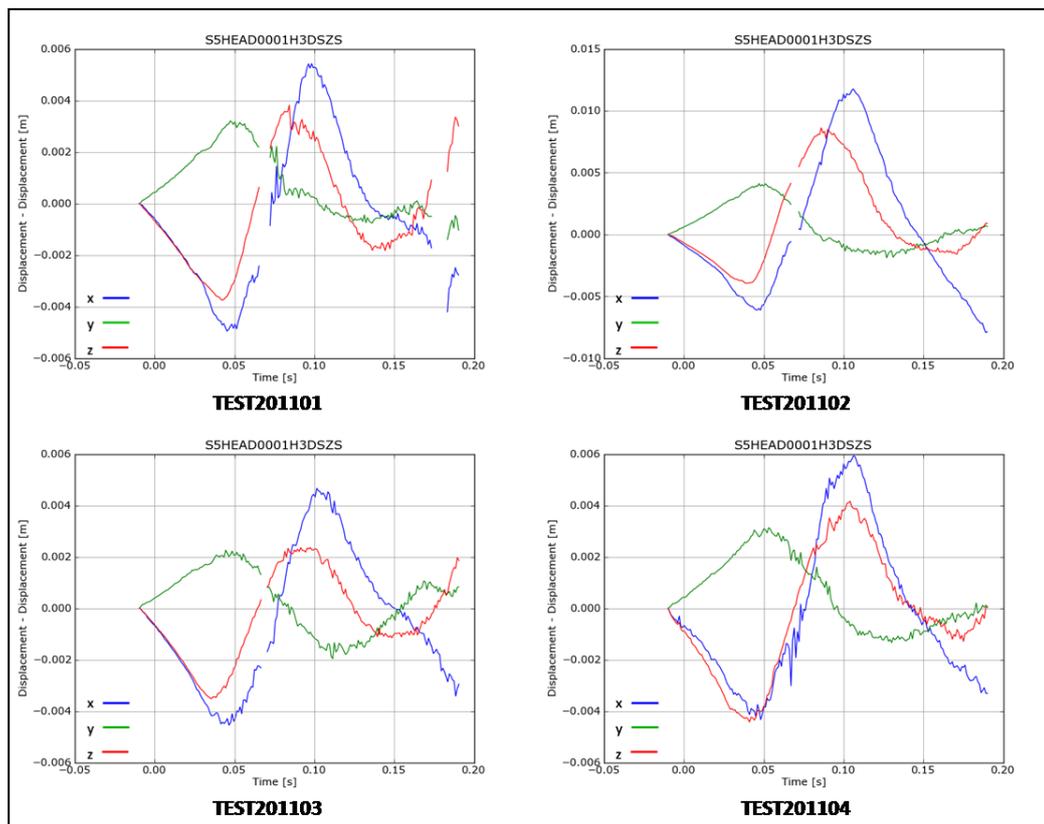


Abbildung 6.16: Positionsabweichungen TEST201101-04 nach der Optimierung mit den Standardparametern

Bei allen vier Versuchen ergeben sich in etwa identische Bahnkurven, wobei lediglich die maximalen Abweichungen etwas variieren. Auffällig sind die sinusähnlichen Restsystematiken, die sich nach der Optimierung ergeben. Die um die Nulllinie schwankenden Positionsabweichungen wiederholen sich bei allen vier Versuchen. Die Unterschiede in den Positionsabweichungen der vier Versuche sind in der folgenden Tabelle übersichtlich festgehalten.

Versuch	maximale Abweichung	optimierte Parameter
TEST201101	5 mm	AI, SAC, SAV, OAC, OAV
TEST201102	12 mm	AI, SAC, SAV, OAC, OAV
TEST201103	5 mm	AI, SAC, SAV, OAC, OAV
TEST201104	6 mm	AI, SAC, SAV, OAC, OAV

Tabelle 6-6: Maximale Positionsabweichungen TEST201101-04 nach der Optimierung mit den Standardparametern

Während sich bei den Versuchen TEST201101, TEST201103 und TEST201104 die in etwa gleichen Abweichungen ergeben, sticht TEST201102 mit einer Abweichung von 12 mm negativ hervor. Begründung für die größere Abweichung bei TEST201102 könnte die fehlende Messung von OT sein, da der Synchronometer bei diesem Versuch in den Fehlermodus gegangen ist und

somit der Zeitversatz nicht angezeigt wurde. Für die Optimierung wurde der Parameter OT (Offset Time) auf null gesetzt. Es wurde versucht den Parameter zu optimieren, dieser läuft jedoch an die voreingestellten Grenzen was an der Plausibilität des optimierten Parameters zweifeln lässt. Zusammenfassend lässt sich aber über die Schlittenversuchsreihe sagen, dass die Analyse der Versuche mittels der Optimierung zu guten Ergebnissen für die Dummykopfk kinematik führt.

Was jedoch bei der Optimierung der kompletten Versuchsreihe auffällig war, ist die Tatsache, dass sich bestimmte Kurvenverläufe immer wieder ähneln. Genauer gesagt, dass sich bestimmte Restsystematiken in den Kurven wiederholen. Es stellt sich die Frage, ob für bestimmte Kurvenverläufe auch immer die gleichen Parameter verantwortlich sind und ob ein spezieller Parametersatz für die sinusähnlichen Abweichungsverläufe ausschlaggebend ist. Zur Untersuchung dieses Phänomens wurden dieselben Versuche mit verschiedenen Parametersätzen optimiert und die Plots der Positionsabweichungen aller vier Versuche hinsichtlich eventuell auftretender Zusammenhänge verglichen. Untersucht wurden die Parametersätze des Offsets des Beschleunigungs- und Gyrosensors und die Skalierungen beider Sensorarten, sowie die Startgeschwindigkeit (VA).

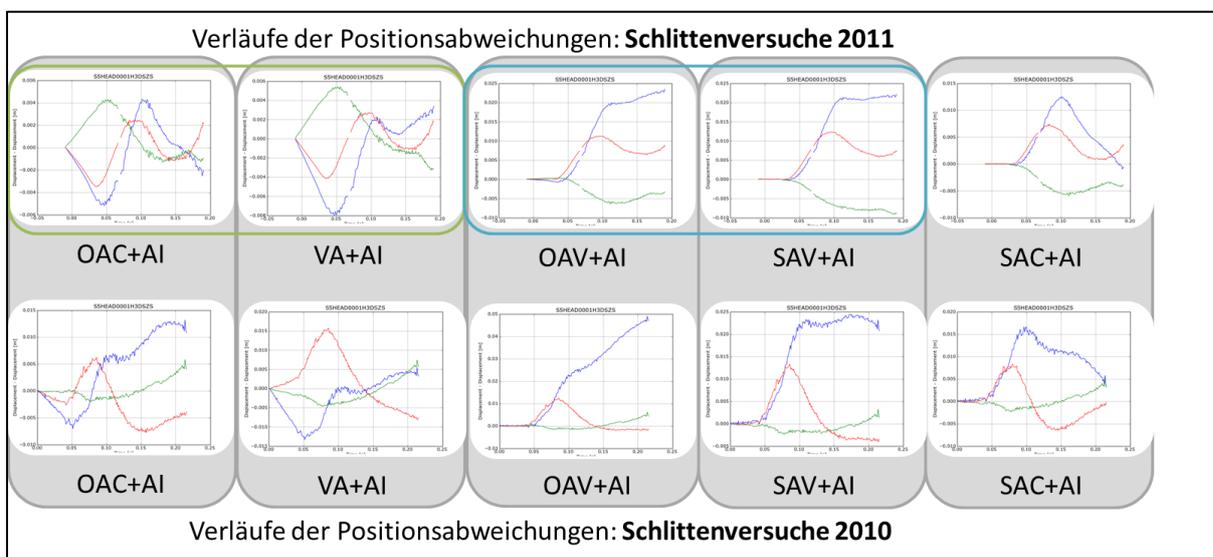


Abbildung 6.17: Kategorisierung der Parameter aufgrund der aus der Optimierung resultierenden Restsystematiken

Werden die Bahnen nur mit den Daten aus der Vorvermessung kalkuliert, ergeben sich für die gesamte Versuchsreihe spezifische Verläufe der Bahnkurven, wobei die Abweichung zuerst ziemlich gering zu sein scheint und mit fortlaufender Versuchszeit ansteigen. Diese Verläufe wiederholen sich auch nach der Optimierung mit den Offsets und der Skalierung des Gyrosensors. Die betrachteten Verläufe beziehen sich auf die Verläufe der Schlittenversuche

2011. Die gleiche Untersuchung wurde für die Schlittenversuche 2010 durchgeführt, wobei der Unterschied dieser beiden Versuchsreihen die verwendete Sensorik ist. Bei den Schlittenversuchen 2011 wurde ein neues Sensorpack, bestehend aus einem Gyrosensor und drei Beschleunigungssensoren verwendet. Beide Sensorpacks weisen ähnliche, nicht aber gleiche Restsystematiken auf. In weiterer Folge wird nur die neue Sensorik, bzw. die Schlittenversuche 2011 betrachtet.

Die zwei interessantesten und signifikantesten Verläufe sind in der nächsten Abbildung ersichtlich.

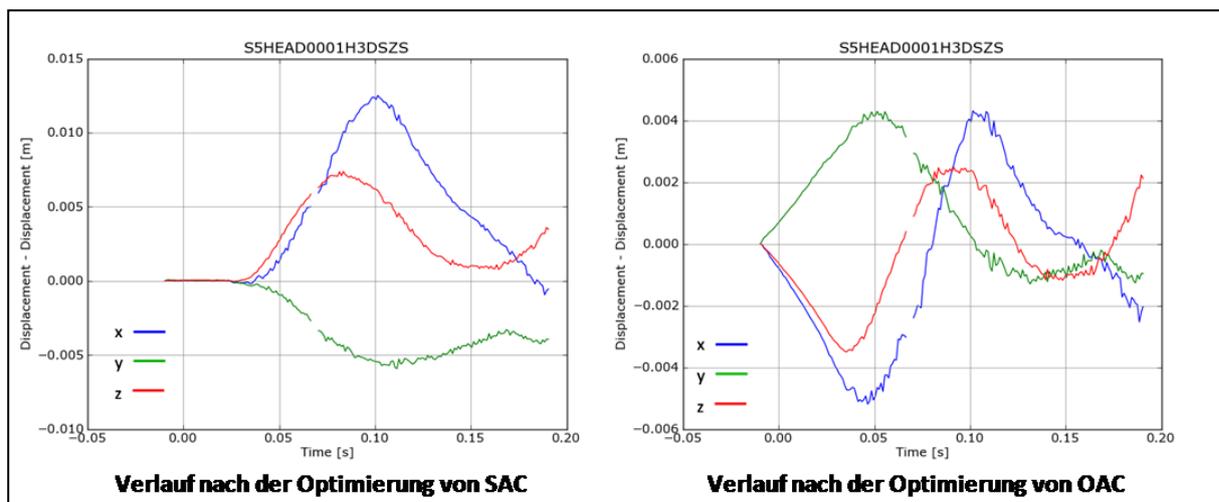


Abbildung 6.18: Analyse der Restsystematiken

Nach der Optimierung mit der Skalierung des Beschleunigungssensors zeigen sich parametertypische Kurvenverläufe, die jedoch noch nicht ganz mit den vorher erwähnten übereinstimmen. Grund für den typischen Peak in x- und z-Richtung bei der Optimierung der Skalierungsfaktoren könnte sein, dass zu dem Zeitpunkt des Peaks auch die Beschleunigung in etwa maximal ist und der Skalierungsfehler mit steigender Belastung des Sensors steigen könnte. Der Zusammenhang zwischen den elektrischen Messsignalen und der aus der Optimierung resultierenden Restsystematik zeigt sich bei den Durchgeführten Untersuchungen nur bei der Optimierung mit den Skalierungen der Beschleunigungssensoren.

Erstmals bei der Optimierung mit OAC zeigen sich die vorher erwähnten typischen, stark systematischen sinusähnlichen Verläufe. Dieser Parametersatz scheint für die markante Systematik der optimierten Bahnkurve verantwortlich zu sein. Es stellt sich die Frage warum dieser Parameter nach der Optimierung einen solch auffälligen Kurvenverlauf erzeugt. Eine mögliche Ursache könnte ein weiterer, noch nicht im CDA integrierter Sensorfehler oder nicht mitoptimierter Parameter sein, der von OAC kompensiert bzw. „mitgeschleppt“ wird.

6.3 Analyse der optimierten Parameter auf Plausibilität

Aus der Optimierung resultieren oft Parameterwerte die an die im CDA voreingestellten Grenzen laufen. Diese Parameterwerte müssen hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft werden. Eine Möglichkeit diese Plausibilität von Parameterwerten nach der Optimierung nachzuweisen ist die Sensitivitätsanalyse.

Werte die wenig sensitiv sind können bei der Optimierung an die Grenzen laufen, da eine große Änderung der Parameter nur einen geringen Einfluss auf die Bahnkurve bzw. auf das Optimierungsergebnis hat. Somit lässt sich überprüfen, ob die Werte die an die voreingestellten Grenzen laufen und somit eigentlich unphysikalische Ergebnisse liefern trotzdem hingenommen werden können, da sie für das Ergebnis nicht relevant sind.

Dazu werden in der folgenden Tabelle die Parameterwerte aller vier Schlittenversuche dargestellt. Es sind jene Werte die sich aus der Optimierung ergeben.

Parameter	Unit	TEST201101	TEST201102	TEST201103	TEST201104
Scale ACX	[%]	100.39	100.36	99.69	99.60
Scale ACY	[%]	103.00	103.00	103.00	103.00
Scale ACZ	[%]	100.47	101.33	100.33	100.66
Scale AVX	[%]	97.00	97.00	97.00	97.00
Scale AVY	[%]	100.65	101.33	101.06	100.53
Scale AVZ	[%]	103.00	103.00	103.00	103.00
Offset ACX	[m/s ²]	-0.28	-0.46	-0.29	-0.03
Offset ACY	[m/s ²]	-0.39	-0.52	-0.37	-0.44
Offset ACZ	[m/s ²]	0.92	1.00	0.96	1.00
Offset AVX	[°/s]	-10.00	-10.00	-9.69	-10.00
Offset AVY	[°/s]	10.00	10.00	10.00	10.00
Offset AVZ	[°/s]	-0.53	2.49	-1.09	-1.90

Tabelle 6-7: Parameterwerte nach der Standardoptimierung

Die rot markierten Werte sind jene, die an die im CDA festgelegten Grenzen laufen. Besonders auffällig sind die Skalierungen immer die gleichen Parameter, SACY, SAVX und SAVZ sowie die Offsets des Gyrosensors (OAV) vermehrt an die Grenzen laufen.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der vier Schlittenversuche sind in der folgenden Tabelle abgebildet. Die grün gekennzeichneten Zellen symbolisieren sensitive Parameter (Sensitivität < 1), die gelben den Übergangsbereich zwischen sensitiv und nicht sensitiv (Sensitivität zwischen 1 und 3) und die roten Zellen die nicht sensitiven Parameter

(Sensitivität>1). Bestimmt wurden die Werte auf die gleiche Weise, wie sie in dem Kapitel „Definition Sensitivität“ erklärt wurde.

Parameter	Unit	TEST201101	TEST201102	TEST201103	TEST201104
Scale ACX	[%]	0.46	0.57	0.46	0.54
Scale ACY	[%]	2.10	1.36	1.37	1.90
Scale ACZ	[%]	0.33	0.37	0.34	0.35
Scale AVX	[%]	20.79	14.38	14.08	17.20
Scale AVY	[%]	0.50	0.61	0.55	0.63
Scale AVZ	[%]	35.67	3.03	6.60	16.60
Offset ACX	[m/s ²]	0.40	0.43	0.40	0.43
Offset ACY	[m/s ²]	0.55	0.60	0.55	0.60
Offset ACZ	[m/s ²]	0.60	0.65	0.60	0.65
Offset AVX	[°/s]	45.20	40.90	37.00	35.20
Offset AVY	[°/s]	10.70	12.30	10.40	11.90
Offset AVZ	[°/s]	10.20	11.60	10.00	11.40

Tabelle 6-8: Bestimmung der sensitiven Parameter bei der Schlittenversuchsreihe

Die Parameter SACY, SAVX, SAVZ und OAV, die bei der Optimierung mit 15 Parametern an die Limits laufen, erweisen sich laut Sensitivitätsanalyse als wenig sensitiv. Die sensitiven Parameter, mit Ausnahme der Offsets der Beschleunigungssensoren, laufen nicht an die Grenzen. Daher können die Ergebnisse der Optimierung als plausibel angesehen werden, zumindest was die erwähnten Parameter betrifft.

6.4 Sensitivitätsanalyse ODB Versuch

Ziel dieser Untersuchung soll das Bestimmen der sensitiven Parameter mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse sein. In weiterer Folge soll die Optimierung nur mit den sensitiven Parametern durchgeführt werden.

Die Bestimmung der dimensionslosen Sensitivität erfolgt auf dieselbe Weise wie im Kapitel 5.3 beschrieben. Die Werte aus der Sensitivitätsanalyse werden durch die möglichen Sensorgenauigkeiten dividiert. Das Ergebnis dieser Division ist die dimensionslose Größe der Sensitivität der Parameter. Liegen diese unter dem Wert 1 so kann der Parameter als sensitiv gewertet werden.

			Sens.- Analyse	Genauig- keit				Sens.- Analyse	Genauig- keit	Sensitivität
	Parameter	Unit			Sensitivität	Parameter	Unit			
AC-Sensor	Offset ACX	m/s ²	0.18	0.30	0.60	Scale ACX	%	0.20	1.00	0.20
	Offset ACY	m/s ²	0.18	0.20	0.90	Scale ACY	%	0.94	1.00	0.94
	Offset ACZ	m/s ²	0.18	0.20	0.90	Scale ACZ	%	1.62	1.00	1.62
	Alpha ACX	deg	0.55	0.50	1.10					
	Alpha ACY	deg	0.69	0.50	1.38					
	Alpha ACZ	deg	0.12	0.50	0.24					
AV-Sensor	Offset AVX	deg/s	4.95	0.10	49.50	Scale AVX	%	2.76	1.00	2.76
	Offset AVY	deg/s	0.98	0.10	9.80	Scale AVY	%	0.96	1.00	0.96
	Offset AVZ	deg/s	1.02	0.10	10.20	Scale AVZ	%	1.68	1.00	1.68
	Alpha AVX	deg	1.78	0.50	3.56					
	Alpha AVY	deg	0.55	0.50	1.10					
	Alpha AVZ	deg	1.12	0.50	2.24					
allg. Parameter	Offset AV AIX	deg	1.96	0.50	3.92	ACX Sensor X	mm	1.10	1.00	1.10
	Offset AV AIY	deg	0.12	0.50	0.24	ACY Sensor Y	mm	3.90	1.00	3.90
	Offset AV AIZ	deg	0.12	0.50	0.24	ACZ Sensor Z	mm	1.20	1.00	1.20

Sensitivität		
	kleiner 1mm	sensitiv
	1 bis 3mm	Übergangsbereich
	größer 3mm	nicht sensitiv

Tabelle 6-9: Bestimmen der sensitiven Parameter (ODB Versuch)

Bei dem untersuchten ODB Versuch ergeben sich die Offsets der Beschleunigungssensoren in allen drei Richtungen sowie deren Skalierungen in x- und y-Richtung als sensitiv. Bei den Parametern des Gyrosensors ist nur die Skalierung um die y-Achse sensitiv (siehe Tabelle 6-9). Des Weiteren zählen noch die Initialwinkel um die y- und die z-Achse zu den sensitiven

Parametern. Die Schiefwinkeligkeit des Beschleunigungssensors in z-Richtung ist zwar sensitiv, wird aber bei der Optimierung nicht berücksichtigt, da bei der Optimierung der Schiefwinkeligkeiten immer wieder Probleme in der Berechnung auftreten.

6.5 Sensitivitätsanalyse Schlittenversuch

Analog zum OBD Versuch wird auch bei dem analysierten Schlittenversuch die Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Ergebnis der Berechnung im CDA ist auch hier wieder das Log-File, welches die errechneten Parameterwerte enthält.

	Parameter	Unit	Sens.-	Genauig-				Sens.-	Genauig-	
			Analyse	keit	Sensitivität	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität
AC-Sensor	Offset ACX	m/s^2	0.12	0.30	0.40	Scale ACX	%	0.46	1.00	0.46
	Offset ACY	m/s^2	0.11	0.20	0.55	Scale ACY	%	1.37	1.00	1.37
	Offset ACZ	m/s^2	0.12	0.20	0.60	Scale ACZ	%	0.34	1.00	0.34
	Alpha ACX	deg	0.86	0.50	1.72					
	Alpha ACY	deg	0.18	0.50	0.36					
	Alpha ACZ	deg	0.26	0.50	0.52					
AV-Sensor	Offset AVX	deg/s	3.70	0.10	37.00	Scale AVX	%	14.08	1.00	14.08
	Offset AVY	deg/s	1.04	0.10	10.40	Scale AVY	%	0.55	1.00	0.55
	Offset AVZ	deg/s	1.00	0.10	10.00	Scale AVZ	%	6.60	1.00	6.60
	Alpha AVX	deg	1.21	0.50	2.42					
	Alpha AVY	deg	7.11	0.50	14.22					
	Alpha AVZ	deg	1.77	0.50	3.54					
allg. Parameter	Offset AV AIX	deg	0.45	0.50	0.90	ACX Sensor X	mm	1.30	1.00	1.30
	Offset AV AIY	deg	0.18	0.50	0.36	ACY Sensor Y	mm	9.00	1.00	9.00
	Offset AV AIZ	deg	0.19	0.50	0.38	ACZ Sensor Z	mm	1.30	1.00	1.30

Sensitivität		
	kleiner 1mm	sensitiv
	1 bis 3mm	Übergangsbereich
	größer 3mm	nicht sensitiv

Tabelle 6-10: Bestimmen der sensitiven Parameter (Schlittenversuch)

Bei der Sensitivitätsanalyse (siehe Tabelle 6-10) des Schlittenversuchs zeigen sich Unterschiede zum Fahrzeugversuch. Bei den Beschleunigungssensoren sind wieder alle drei Offsets und die Skalierungen in x- und z-Richtung sensitiv. Ebenso ist die Skalierung um die y-Achse beim Gyrosensor sensitiv. Bei den Initialwinkeln erweist sich zusätzlich zu den Parametern Offset AV

AIY und Offset AV AIZ auch der Parameter Offset AV AIX, also der Initialwinkel am die x-Achse, als sensitiv. Auch beim Schlittenversuch werden die Parameter Alpha AC bei der Optimierung nicht berücksichtigt. Beim Schlittenversuch ergeben sich die folgenden neun sensitiven Parameter aus der Sensitivitätsanalyse, die auch bei der Optimierung berücksichtigt werden sollten: Offset ACX, ACY und ACZ, Scale ACX und ACZ, Scale AVY sowie Offset AV AIX, AIY und AIZ.

6.6 Vergleich der Standardoptimierung und der Optimierung mit den sensitivsten Parametern

Ein Ziel der Sensitivitätsanalyse ist die Reduktion der Optimierungsparameter. Die Standardoptimierung bei den Fahrzeugversuchen umfasst 19 beziehungsweise 18 Parameter wenn der Offset Time nicht mitberücksichtigt wird, bei den Schlittenversuchen sind es 15 Parameter, da die Startgeschwindigkeit bei den Schlittenversuchen wegfällt. Durch die Sensitivitätsanalyse sollen es weniger Optimierungsparameter werden, wobei das Ergebnis nicht schlechter werden soll. Der Grundgedanke der Reduktion der Optimierungsparameter ist jener, dass nur die sensitiven Parameter in die Optimierung miteinfließen. In den folgenden beiden Unterkapiteln werden die Optimierungen mit den sensitiven Parametern jeweils für den analysierten ODB Versuch und den betrachteten Schlittenversuch durchgeführt und die Ergebnisse der Optimierung mit jenen der Standardoptimierung verglichen. Optimal wären Ergebnisse bei denen sich die Positionsabweichungen nach der Optimierung bei beiden Verfahren nicht merklich unterschieden würden.

6.6.1 Optimierung ODB Versuch mit den sensitivsten Parametern

Im Kapitel 6.4 wurden die sensitiven Parameter für den ODB Versuch bestimmt. Eine Zusammenfassung der Parameter ist in der unten angeführten Tabelle (Tabelle 6-11) ersichtlich.

Optimierungsparameter					
Standardoptimierung			Optimierung mit sensitivsten Parametern		
Offset AV AIX	Offset AV AIY	Offset AV AIZ		Offset AV AIY	Offset AV AIZ
Offset VAX	Offset VAY	Offset VAZ	Offset VAX	Offset VAY	Offset VAZ
Scale ACX	Scale ACY	Scale ACZ	Scale ACX	Scale ACY	
Offset ACX	Offset ACY	Offset ACZ	Offset ACX	Offset ACY	Offset ACZ
Scale AVX	Scale AVY	Scale AVZ		Scale AVY	
Offset AVX	Offset AVY	Offset AVZ			
Offset Time					

Tabelle 6-11: Parametervergleich Standardoptimierung - sensitive Parameter (ODB Versuch)

In der linken Spalte sind die 19 Parameter der Standardoptimierung angeführt. Nach der Sensitivitätsanalyse erweisen sich 11 Parameter als sensitiv, die in der rechten Spalte aufgezählt werden und eine Reduktion um 7 Parameter bedeutet. Die Frage die sich stellt, ist, ob sich durch die Reduktion der nichtsensitiven Parameter auch das Optimierungsergebnis ändert.

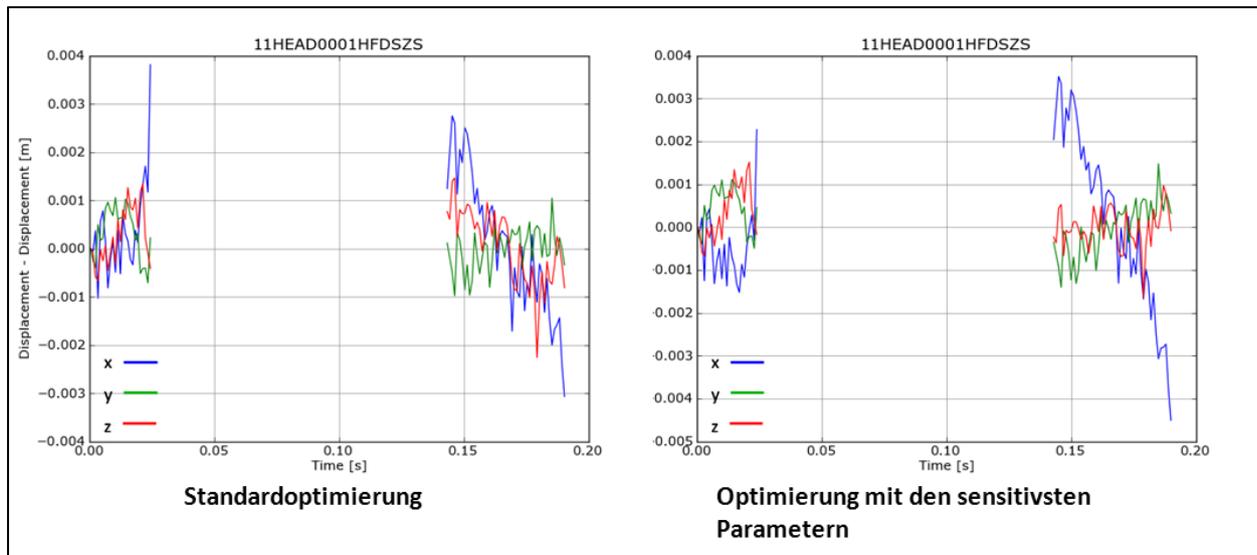


Abbildung 6.19: Vergleich: Optimierung mit den sensitivsten Parametern (ODB)

Abbildung 6.19 zeigt das Optimierungsergebnis beider Optimierungen. Die rechte Graphik zeigt die Positionsabweichungen nach der Optimierung mit den sensitivsten Parametern, die linke Graphik zeigt jene der Standardoptimierung. Auffällige Unterschiede zwischen den beiden Positionsabweichungen zeigen sich nur in x- Richtung (blau). Während die Positionsabweichung der Standardoptimierung in x-Richtung bei ca. 0.02 s ihr Maximum von etwa 4 mm aufweist, ergibt sich bei der Optimierung mit den sensitiven Parametern zu diesem Zeitpunkt eine Positionsabweichung von nur 2 mm. Gegen Ende der Versuchsaufzeichnung ist die Positionsabweichung der Optimierung mit den sensitiven Parametern aber mit zirka 4.5 mm um 1.5 mm als jene der Standardoptimierung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die maximalen Positionsabweichungen bei beiden Optimierungsverfahren in etwa gleich bleibt. Es verändern sich lediglich die Zeitpunkte zu denen die größten Abweichungen auftreten. Ein weiterer wesentlicher Punkt im Vergleich der beiden Optimierungsverfahren ist der Unterschied der Parameterwerte die sich aus der Optimierung ergeben. Die Parameterwerte nach der Optimierung mit den sensitivsten Parametern sind in der Tabelle 6-12 eingetragen. Bei der Optimierung mit den Standardparametern sind die Parameter SACY (Skalierung des Beschleunigungssensors in y-Richtung) und der Parameter OACZ (Offset des Beschleunigungssensors in z-Richtung) an die vorgegebenen Grenzen gelaufen (siehe Kapitel 6.1.2). Diese sind bei den Skalierungen 97% bzw. 103% und bei den Offsets der Beschleunigung -1m/s^2 bzw. 1m/s^2 .

Parameterwerte nach der Optimierung mit den sensitivsten Parametern					
Initialwinkel		Skalierung AC-Sensor		Skalierung AV-Sensor	
AIX	[°]	SACX	99.66 [%]	SAVX	[%]
AIY	0.74 [°]	SACY	100.36 [%]	SAVY	99.79 [%]
AIZ	-2.25 [°]	SACZ	[%]	SAVZ	[%]
Startgeschwindigkeit		Offset AC-Sensor		Offset AV-Sensor	
VAX	15.72 [m/s]	OACX	-0.08 [m/s ²]	OAVX	[°/s]
VAY	0.05 [m/s]	OACY	0.01 [m/s ²]	OAVY	[°/s]
VAZ	-0.16 [m/s]	OACZ	-0.21 [m/s ²]	OAVZ	[°/s]
Parameterwerte nach der Standardoptimierung					
Initialwinkel		Skalierung AC-Sensor		Skalierung AV-Sensor	
AIX	0.89 [°]	SACX	99.60 [%]	SAVX	99.68 [%]
AIY	2.13 [°]	SACY	97.00 [%]	SAVY	100.28 [%]
AIZ	-1.82 [°]	SACZ	98.50 [%]	SAVZ	99.17 [%]
Startgeschwindigkeit		Offset AC-Sensor		Offset AV-Sensor	
VAX	15.81 [m/s]	OACX	-0.43 [m/s ²]	OAVX	-2.84 [°/s]
VAY	0.09 [m/s]	OACY	0.90 [m/s ²]	OAVY	7.78 [°/s]
VAZ	-0.10 [m/s]	OACZ	1.00 [m/s ²]	OAVZ	3.40 [°/s]
Timeoffset					
OT	0.4 [ms]				

Tabelle 6-12: Parameterwerte Optimierung mit den sensitivsten Parametern beim ODB Versuch

Nach der Optimierung mit den sensitivsten Parametern läuft kein Parameter an die Grenzen, weder der Parameter SACY, noch der Parameter OACZ. Somit erscheinen die Parameterwerte nach der Optimierung mit den sensitivsten Parametern als plausibler.

Die Positionsabweichungen der Standardoptimierung und der Optimierung mit den sensitivsten Parametern bleib also zusammenfassend betragsmäßig gleich. Die Optimierung mit den sensitivsten Parametern bringt jedoch zusätzlich zur Reduktion der Parameter und einer damit verbundenen Reduktion der Rechenzeit den Vorteil, dass weniger Parameter an die im CDA vordefinierten Grenzen laufen.

6.6.2 Optimierung Schlittenversuch mit den sensitivsten Parametern

Gleich wie schon beim ODB Versuch wurde auch für den analysierten Schlittenversuch ein Vergleich der beiden Optimierungsverfahren durchgeführt. Die im Kapitel 6.5 bestimmten sensitiven Parameter und in weiterer Folge zur Optimierung herangezogenen Parameter, werden in Tabelle 6-13 dargestellt. Auch hier handelt es sich um den dritten Versuch der Schlittenversuchsreihe (TEST201103).

Optimierungsparameter					
Standardoptimierung			Optimierung mit sensitivsten Parametern		
Offset AV AIX	Offset AV AIY	Offset AV AIZ	Offset AV AIX	Offset AV AIY	Offset AV AIZ
Scale ACX	Scale ACY	Scale ACZ	Scale ACX		Scale ACZ
Offset ACX	Offset ACY	Offset ACZ	Offset ACX	Offset ACY	Offset ACZ
Scale AVX	Scale AVY	Scale AVZ		Scale AVY	
Offset AVX	Offset AVY	Offset AVZ			

Tabelle 6-13: Parametervergleich Standardoptimierung - sensitive Parameter (Schlittenversuch)

Die Standardoptimierung der Schlittenversuche erfolgt mit den Parametern Offset AV AI (Initialwinkeln des Dummykopfes), Scale und Offset AC (Skalierungen und Offsets der Beschleunigungssensoren) und den Parametern Scale und Offset AV (Skalierungen und Offsets des Gyrosensors). Sie erfolgt also mit insgesamt 15 Parametern. Nach der Sensitivitätsanalyse ergeben sich 9 sensitive Parameter. Das bedeutet eine Reduktion um 6 Parameter. Die Parameter Scale ACY, Scale AVX, Scale AVZ und alle drei Offsets AV sind laut Sensitivitätsanalyse nicht sensitiv.

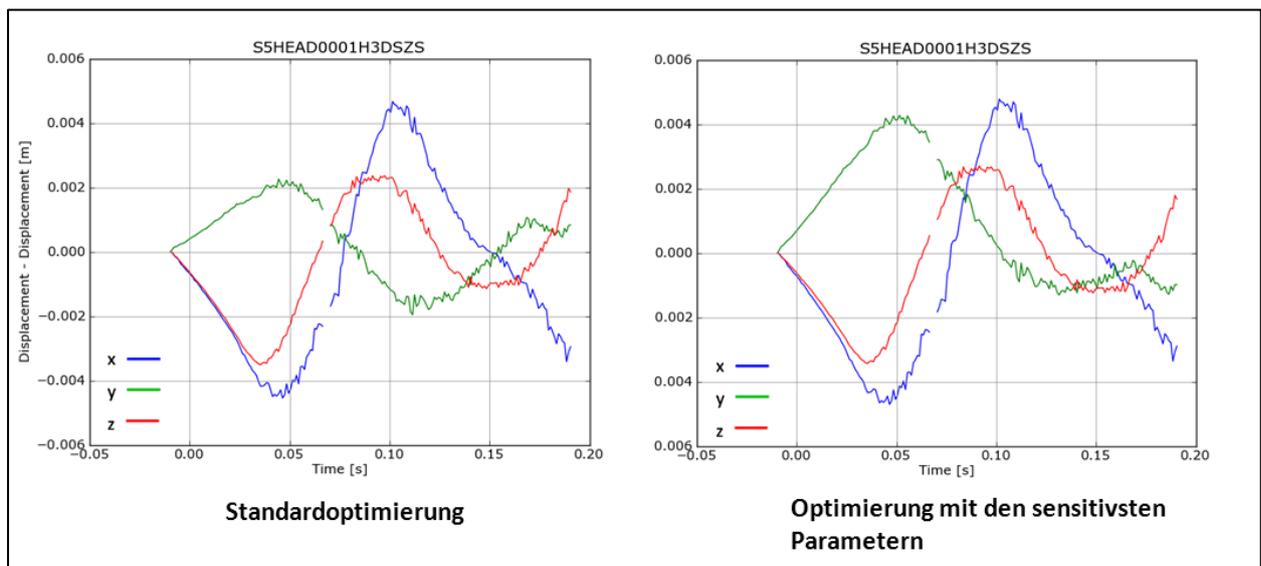


Abbildung 6.20: Vergleich: Optimierung mit den sensitivsten Parametern (Schlitten)

Die größte Positionsabweichung tritt in x-Richtung bei 0,1 s auf. Sie beträgt in beiden Optimierungsvarianten etwa 5 mm. Der einzige Unterschied hinsichtlich der beiden Optimierungsverfahren liegt in der Positionsabweichung in y-Richtung. Sie ist bei der Standardoptimierung um 2 mm geringer (bei 0,05 s), überschreitet den maximalen Wert der gesamten Positionsabweichungen jedoch nicht. Somit kann der Betrag der beiden maximalen Positionsabweichungen als gleichwertig angesehen werden. Die beiden unterschiedlichen Optimierungsverfahren, also die Standardoptimierung und die Optimierung mit den

sensitivsten Parametern können zumindest hinsichtlich der maximalen Positionsabweichungen als äquivalent betrachtet werden.

Parameterwerte nach der Optimierung mit den sensitivsten Parametern					
Initialwinkel		Skalierung AC-Sensor		Skalierung AV-Sensor	
AIX	0.06 [°]	SACX	99.96 [%]	SAVX	- [%]
AIY	20.61 [°]	SACY	- [%]	SAVY	99.60 [%]
AIZ	5.85 [°]	SACZ	100.19 [%]	SAVZ	- [%]
		Offset AC-Sensor		Offset AV-Sensor	
		OACX	-0.43 [m/s ²]	OAVX	- [°/s]
		OACY	-0.81 [m/s ²]	OAVY	- [°/s]
		OACZ	0.94 [m/s ²]	OAVZ	- [°/s]
Parameterwerte nach der Standardoptimierung					
Initialwinkel		Skalierung AC-Sensor		Skalierung AV-Sensor	
AIX	1.69 [°]	SACX	99.51 [%]	SAVX	97.00 [%]
AIY	22.10 [°]	SACY	103.00 [%]	SAVY	101.13 [%]
AIZ	5.77 [°]	SACZ	100.38 [%]	SAVZ	103.00 [%]
		Offset AC-Sensor		Offset AV-Sensor	
		OACX	-0.32 [m/s ²]	OAVX	-8.74 [°/s]
		OACY	-0.38 [m/s ²]	OAVY	10.00 [°/s]
		OACZ	0.93 [m/s ²]	OAVZ	0.08 [°/s]

Tabelle 6-14: Parameterwerte Optimierung mit den sensitivsten Parametern beim Schlittenersuch

Als nächstes erfolgt der Vergleich der Parameterwerte. Nach der Optimierung mit den Standardparametern laufen gleich vier Parameter an die gewählten Optimierungsgrenzen. Es sind dies die Parameter SACY (103%), SAVX (97%), SAVZ (103%) und OAVY (10°/s). Die Parameterwerte die sich aus der Optimierung mit den sensitivsten Parametern ergeben, sind in Tabelle 6-14 dargestellt. Keiner der Parameter läuft an die voreingestellten Grenzen, was einen wesentliche Verbesserung der Plausibilität der Parameter bedeutet.

Wie auch in Kapitel 6.2.2 wurden die Untersuchungen für alle vier Schlittenversuche durchgeführt, wobei es sich bei dem oben angeführten Schlittenversuch wieder um den Versuch TEST201103 handelt. Die Ergebnisse aller Versuche, also auch die des ODB Fahrzeugversuches sind in der untenstehenden Tabelle angeführt.

Versuch	Optimierungsverfahren	maximale Abweichung	Anzahl Opt.-parameter	Parameter am Limit
ODB Fahrzeugversuch	Standardoptimierung	4mm	19	2
	sensitive Parameter	4.5mm	11	0
Schlitten TEST201101	Standardoptimierung	5mm	15	5
	sensitive Parameter	5mm	8	0
Schlitten TEST201102	Standardoptimierung	12mm	15	6
	sensitive Parameter	11mm	8	2
Schlitten TEST201103	Standardoptimierung	5mm	15	4
	sensitive Parameter	5mm	9	0
Schlitten TEST201104	Standardoptimierung	6mm	15	6
	sensitive Parameter	6mm	8	1

Tabelle 6-15: Übersicht Ergebnisse Optimierung mit den sensitivsten Parametern

Das Optimieren mit den Parametern aus der Sensitivitätsanalyse ermöglicht eine Reduktion der Optimierungsparameter bei in etwa gleichbleibender maximaler Positionsabweichung. Bei den analysierten Versuchen kommt es bei keinem einzigen Versuch zu einer Verschlechterung der berechneten Bahnkurve, bei TEST201102 verbessert sich die Positionsabweichung sogar. Die Parameter lassen sich dadurch um mehr als ein Drittel reduzieren, was dazu noch den Vorteil bringt, dass sich die Parameter verringern, die an die gesetzten Grenzen laufen. Durch die Optimierung mit den sensitiven Parametern ändert sich jedoch nichts an den Kurvenverläufen, die Restsystematiken bleiben erhalten. Auffallend war, dass die Rechenzeit bei der Optimierung mit den sensitivsten Parametern im Vergleich zur Standardoptimierung deutlich gesunken ist.

6.7 Untersuchung der Optimierungsreihenfolge

Bei der Durchführung einer Optimierung im CDA muss neben den zu optimierenden Parametern auch die Reihenfolge der Parameter angegeben werden. Ziel dieser Untersuchung soll es sein, den Einfluss der Optimierungsreihenfolge auf das Ergebnis herauszufinden.

Zur Analyse der Optimierungsreihenfolge wurden als erstes die zu optimierenden Parameter festgelegt. Dies sind die vorher erwähnten Standardparameter ohne die Startgeschwindigkeit: Initialwinkel des Dummykopfes (AI), Offsets und Skalierungen der Beschleunigungssensoren (OAC bzw. SAC) sowie Offsets und Skalierungen des Gyrosensors (OAV bzw. SAV).

Bei der ersten Optimierung wurden die Parameter in folgender Reihenfolge angegeben, zuerst AI, dann SAC und SAV und zum Schluss die beiden Offsets OAC und OAV. Die Optimierung dieser Parameter ergibt eine Bahnkurve die in etwa 4.5 mm von der Videokurve abweicht. Die Verläufe der Abweichungen sind im linken Bild der Abbildung 6.21 dargestellt.

Nach der Optimierung mit der oben angeführten Reihenfolge wurde diese variiert. Nach den Initialwinkeln wurden als erstes die Parameter des Beschleunigungssensors (OAC, SAC) und danach jene des Gyrosensors optimiert (siehe rechtes Bild Abbildung 6.21). Auch hier ergeben sich nach der Optimierung eine maximal Abweichung von etwa 4.5 mm. Die Verläufe der Abweichungen lassen ebenfalls keine markanten Unterschiede zur Optimierung mit unterschiedlicher Reihenfolge erkennen.

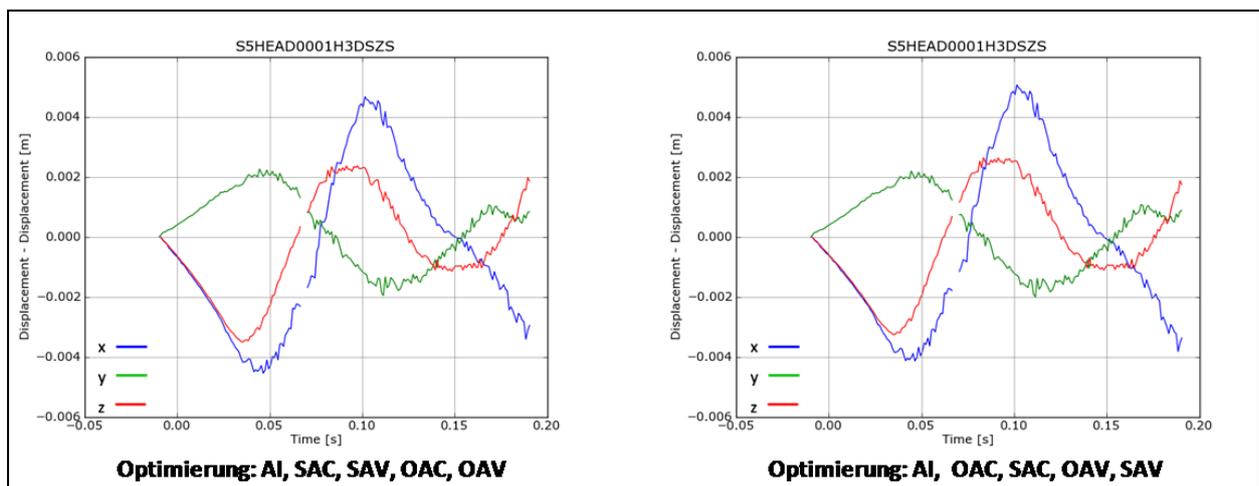


Abbildung 6.21: Einfluss der Optimierungsreihenfolge

Die Änderung der Optimierungsreihenfolge ändert die Verläufe der Abweichungen nicht, bzw. nur wenig. Diese Einflussuntersuchung wurde mit weiteren Versuchen durchgeführt wobei das Ergebnis immer das gleiche ist. Die maximalen Abweichungen, sowie die Kurvenverläufe der

Abweichungen ändern sich bei unterschiedlicher Reihenfolge der Optimierungsparameter nicht merklich. Deshalb muss die Optimierungsreihenfolge bei weiteren Untersuchungen nicht beachtet werden.

6.8 Auswertbarkeit von Passivversuchen

Als Passivversuche werden Fahrzeugversuche bezeichnet, bei denen die Dummies nicht angeschnallt sind. Daher ist es bei einer solchen Versuchsdurchführung oft der Fall, dass der Dummy den Airbag nach dem Eintritt nicht mehr verlässt. Deshalb sind in den meisten Fällen auch nur Videodaten bis zum Eintritt in den Airbag, also vor dem Airbagfenster, vorhanden. Das bedeutet der Bereich für den die Optimierung durchgeführt werden kann ist sehr gering und liegt in etwa nur bei 70 ms.

Aufgrund dessen stellt sich die Frage, ob Passivversuche mit dem vorliegenden Optimierungsansatz wegen eben diesem kurzen Sichtbereich überhaupt auswertbar sind, oder ob die Ergebnisse der Optimierung akzeptable Bahnkurven ergeben, die auch für den Bereich in dem der Dummy nicht sichtbar ist präzise bestimmt werden können.

Um diese Untersuchungen durchführen zu können werden Aktivversuche verwendet, bei denen der Dummy angeschnallt ist und daher nach dem Austritt aus dem Airbag Videodaten vorhanden sind. Bei diesen Versuchen wird nur der vordere Bereich optimiert, die Daten nach dem Airbagfenster werden der Berechnung „vorenthalten“. Das bedeutet es wird nur der Bereich vor dem Eintritt in den Airbag optimiert, wodurch annähernd ein Passivversuch simuliert wird. Danach kann mit den Parameterwerten aus der Optimierung die gesamte Bahnkurve berechnet werden und die Positionsabweichungen nach dem Airbagfenster untersucht werden. Sind diese Abweichungen nach dem Airbagfenster nur gering, so sind mit dem vorhanden Optimierungsansatz auch Passivversuche auswertbar, weicht die berechnete Bahnkurve nach dem Airbagfenster jedoch stark von der Videokurve ab, so kann man diese Versuchsart aktuell nicht auswerten.

Um bessere Vergleiche ziehen zu können, wird die Untersuchung für jeweils acht Versuche durchgeführt. Bei allen Versuchen handelt es sich um ODB 40% Fahrzeugversuche die mit demselben Fahrzeugtyp durchgeführt worden sind.

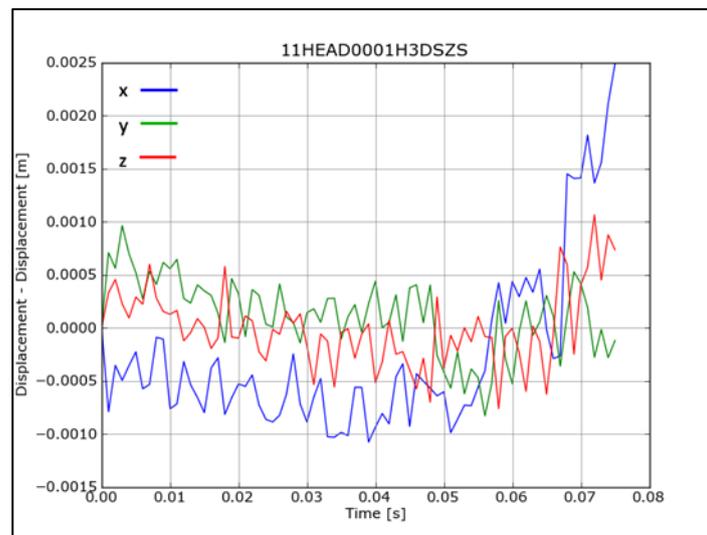


Abbildung 6.22: Positionsabweichung nach Optimierung des Bereiches vor dem Airbagfenster

Abbildung 6.22 zeigt das Ergebnis der Optimierung des Bereiches vor dem Airbagfenster. Allerdings ist das nur ein Bereich von 0.07 s. Optimiert wurden die sensitivsten Parameter. Die maximalen Positionsabweichungen nach der Optimierung des vorderen Bereiches betragen nur 2.5 mm, wobei die maximale Positionsabweichung in x-Richtung erfolgt. Würde es sich bei diesem Versuch wirklich um einen Passivversuch handeln so wäre das Optimierungsergebnis mit dieser maximalen Positionsabweichung von 2.5 mm sehr gut, wobei angemerkt werden muss, dass in diesem zeitlichen Bereich noch keine großen Beschleunigungen und Drehraten auftreten.

AIX	1.63	[°]	SACX	103.00	[%]	SAVX		[%]
AIY	0.37	[°]	SACY	103.00	[%]	SAVY	103.00	[%]
AIZ	0.27	[°]	SACZ	103.00	[%]	SAVZ		[%]
VAX	17.83	[m/s]	OACX	-1.00	[m/s ²]	OAVX		[°/s]
VAY		[m/s]	OACY	-0.36	[m/s ²]	OAVY		[°/s]
VAZ	-0.15	[m/s]	OAXZ	0.10	[m/s ²]	OAVZ		[°/s]

Tabelle 6-16: Parameterwerte nach Optimierung des Bereiches vor dem Airbagfenster

Die Tabelle zeigt die Parameterwerte nach der Optimierung des vorderen Bereiches. Viele der Parameter laufen aufgrund des kurzen Optimierungsbereiches an die Grenzen.

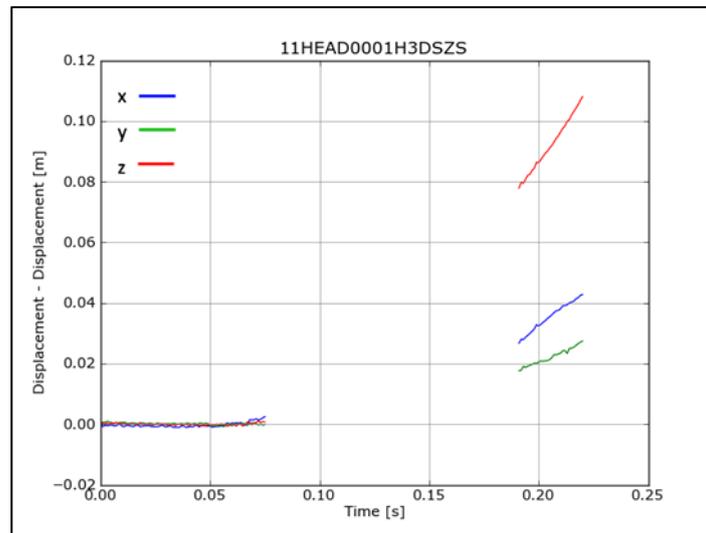


Abbildung 6.23: Positionsabweichung der gesamten Kurve mit den Parametern der Optimierung (Daten nur vor dem Airbagfenster)

Werden die Parameterwerte aus der Optimierung des vorderen Bereichs genutzt und damit die gesamte Bahnkurve berechnet so kommt es im Bereich nach dem Airbagfenster zu maximalen Positionsabweichungen von etwa 110 mm. Der Bereich vor dem Airbagfenster passt sehr gut. Wird jedoch der Bereich nach dem Airbagfenster betrachtet, der nicht optimiert wurde, so zeigen sich in diesem Bereich sehr hohe Abweichungen.

Dieselbe Vorgehensweise wie auch bei der Überprüfung der Auswertbarkeit der Passivversuch wird auch bei der Untersuchung verwendet, wie lang der Bereich nach dem Airbagfenster sein muss um vernünftige Optimierungsergebnisse zu bekommen. Zu diesem Zweck wird der Bereich vor dem Airbagfenster und zusätzlich ein Bereich nach dem Airbagfenster von 10 ms optimiert und anschließend mit der Berechnung der gesamten Kurve verglichen.

Interessant ist bei dieser Untersuchung, ob ein kleiner Bereich von nur 10 ms das Ergebnis der vorherigen Untersuchung verbessern kann.

Die nächste Abbildung zeigt die Positionsabweichungen nach der Optimierung. Optimiert wurde der Bereich vor dem Airbagfenster und wie schon vorher erwähnt ein Bereich von 10 ms nach dem Airbagfenster.

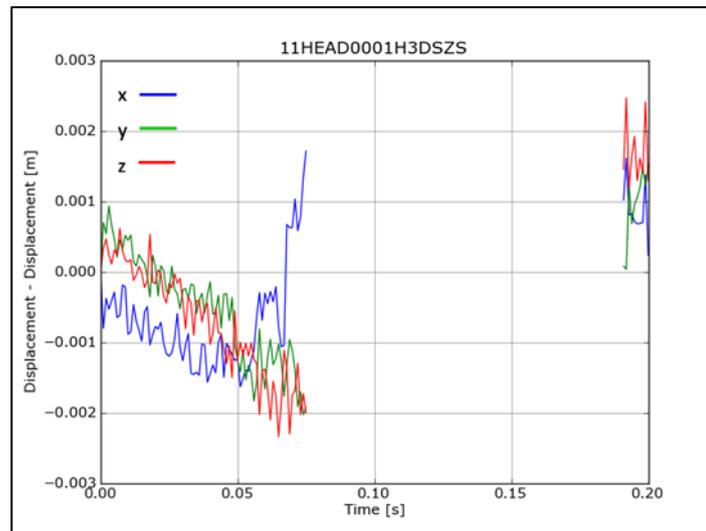


Abbildung 6.24: Positionsabweichung nach Optimierung des Bereiches vor dem Airbagfenster mit 10ms danach

Nach der Optimierung weichen die Positionen der berechneten Kurve um 2.5 mm von der Videokurve ab, das Ergebnis ist also auch bei der Optimierung mit einem zusätzlichen Bereich von 10 ms nach dem Airbagfenster sehr zufriedenstellend. Es kann keine Aussage über die Positionsabweichungen getroffen werden, da in diesem Bereich keinen Videodaten vorhanden sind.

AIX	1.69	[°]	SACX	102.41	[%]	SAVX		[%]
AIY	0.31	[°]	SACY	97.00	[%]	SAVY	97.00	[%]
AIZ	0.48	[°]	SACZ	103.00	[%]	SAVZ		[%]
VAX	17.82	[m/s]	OACX	-1.00	[m/s ²]	OAVX		[°/s]
VAY		[m/s]	OACY	0.14	[m/s ²]	OAVY		[°/s]
VAZ	-0.11	[m/s]	OAXZ	1.00	[m/s ²]	OAVZ		[°/s]

Tabelle 6-17: Parameterwerte nach Optimierung des Bereiches vor dem Airbagfenster mit 10ms danach

Bei der Betrachtung der Parameter fällt auf, dass wieder viele Parameterwerte an die vorgegebenen Grenzen laufen. Mit diesen optimierten Parameterwerten werden wieder die gesamten Positionsabweichungen, also mit den ganzen Daten nach dem Airbagfenster größer als 10 ms, berechnet.

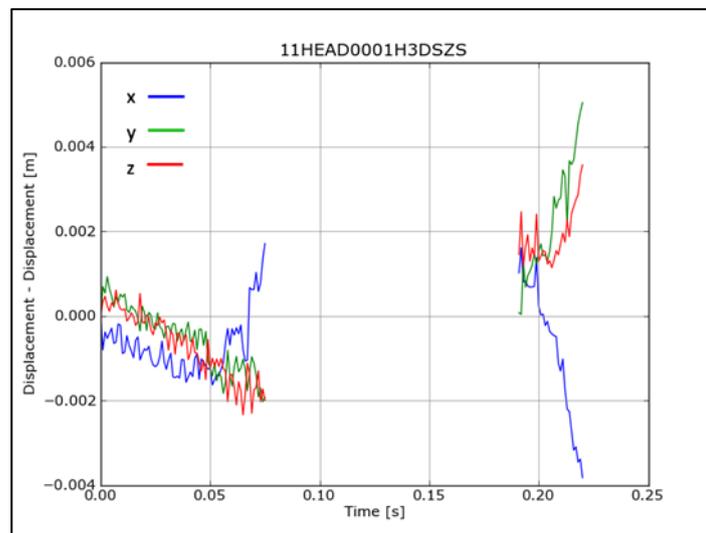


Abbildung 6.25: Positionsabweichung der gesamten Kurve mit den Parametern der Optimierung (Daten vor und 10ms nach dem Airbagfenster)

Nach der Berechnung ergeben sich Positionsabweichungen von 5 mm, was noch immer einem sehr guten Ergebnis entspricht. Damit sind die Positionsabweichungen doppelt so groß als vorher bei der Optimierung. Wie bereits erwähnt wurde die Untersuchung mit insgesamt acht Versuchen durchgeführt, wobei der oben gezeigte die Ergebnisse aller Acht widerspiegelt. Ein Überblick über die Ergebnisse aller acht Versuche ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Versuche	Opt. gesamte Kurve [mm]	Opt. Bereich vor Airbagfenster [mm]	Berechnung ganze Kurve [mm]	Differenz [mm]	Opt. vor Airbagfenster und 10ms nachher [mm]	Berechnung ganze Kurve [mm]	Differenz [mm]
TEST200909_11	4.5	7	52	45	12	16	4
TEST200909_13	6	8	51	43	9	12	3
TEST200914_11	5	1.5	42	40.5	3.5	7	3.5
TEST200914_13	5.5	2	63	61	3	6.5	3.5
TEST201020_11	2.5	2.5	110	107.5	2.5	5	2.5
TEST201020_13	4.5	2.5	160	157.5	7	10	3
TEST201021_11	6	3.5	61	57.5	5	27	22
TEST201021_13	5.5	4	80	76	3	9	6

Tabelle 6-18: Zusammenfassung der Auswertbarkeit von Passivversuchen

In der Tabelle sind die Positionsabweichungen aller acht Versuche nach der Optimierung des gesamten Bereichs abgebildet. Bei dem gezeigten Versuch handelte es sich um den Versuch TEST201020_11 bei dem die maximalen Positionsabweichungen nach der Optimierung des gesamten Bereichs 4.5 mm betragen. In der Spalte Differenz wird der Wert angegeben um den sich die maximalen Positionsabweichungen der Optimierung und der Berechnung der gesamten Bahnkurve mit den Werten aus der Optimierung unterscheiden.

Wird nur der Bereich vor dem Airbagfenster optimiert, sind die Positionsabweichungen die sich nach der Optimierung ergeben um durchschnittlich 73.5 mm größer als jene der gesamten Kurve bei der noch zusätzlich der Bereich nach dem Airbagfenster betrachtet wird. Daraus kann geschlossen werden, dass der Bereich vor dem Airbagfenster für die Optimierung nicht ausreicht, um anschließend auf die restliche Kurve schließen zu können. Das bedeutet schlussendlich, dass eine Auswertung von Passivversuchen mit dem vorhandenen Optimierungsansatz derzeit nicht möglich ist.

6.9 Ergebniszusammenfassung

Die Durchführung der Optimierung wurde anhand von zwei Versuchen erklärt. Einerseits ist das ein ODB 40% Fahrzeugversuch, andererseits ein Schlittenversuch, beziehungsweise eine Schlittenversuchsreihe.

Der Ablauf der Standardoptimierung kann in vier Schritte unterteilt werden. Es sind dies die Signalanalyse, die Berechnung der Bahnkurve, die Optimierung mit den messbaren Startparametern und schlussendlich die Optimierung mit zusätzlichen Sensorfehlern. Die besten Ergebnisse werden mit der Optimierung mit den Standardparametern, das heißt der Optimierung mit zusätzlichen ausgewählten Sensorfehlern, erzielt.

Beim ODB Versuch ergeben sich nach der Optimierung Positionsabweichungen von 4 mm beim Vergleich der berechneten optimierten Bahnkurve zur Bahnkurve aus der Filmanalyse, beim Schlittenversuch sind es 5 mm.

Bei der Analyse der Schlittenversuchsreihe ergeben sich immer wieder dieselben Restsystematiken, die auf die Optimierung mit speziellen Parametern zurückzuführen sind.

Werden die optimierten Parameterwerte des Schlittenversuchs auf Plausibilität hin analysiert, so sind es die nicht sensitiven Parameter, die an die im CDA voreingestellten Grenzen laufen. Eine Überprüfung der Parameterwerte mit den Ergebnissen aus der Sensitivitätsanalyse ist damit zulässig.

Die Durchführung der Sensitivitätsanalyse liefert die Parameter für die Optimierung und erlaubt eine Reduktion der Optimierungsparameter im Vergleich zur Standardoptimierung, wobei sich das Ergebnis, also die Positionsabweichungen, nicht merklich verändern.

Bei der Untersuchung der Optimierungsreihenfolge ergibt sich, dass die Reihenfolge der optimierten Parameter keinen Einfluss auf das Optimierungsergebnis hat.

Die Auswertbarkeit von Passivversuchen, das bedeutet die Dummies sind bei der Versuchsdurchführung nicht angeschnallt, ist mit dem vorhanden Optimierungsansatz nicht

gegeben. Da der Dummy nach dem Eintritt in den Airbag diesen nicht mehr verlässt, ist der Bereich in dem die Signale zur Optimierung vorhanden sind zu kurz. Für diese Versuchskonstellation müsste eine neue Verfahrensvariante entwickelt werden um die geforderten Genauigkeiten zu erreichen.

Die letzte Untersuchung, die aufgrund der Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden kann, nämlich die Clusterung der Versuche anhand ihrer sensitiven Parameter erfolgt im nächsten Kapitel.

7 Automatisierung der Versuchsauswertung im CDA

Das letzte gesetzte Ziel der Sensitivitätsanalyse ist die Clusterung der unterschiedlichen Versuche hinsichtlich ihrer sensitiven Parameter. Die Idee dahinter ist, dass verschiedene Versuchsdurchführungen auch unterschiedlich sensitive Parameter aufweisen. Wäre das der Fall so könnten diese sensitiven Parameter aus einem großen Datenpool ermittelt und der Einfluss der sensitiven Parameter auf die Optimierung untersucht werden. Dadurch würden für bestimmte Versuchsarten immer dieselben, schon vorher bekannten Optimierungsparameter verwendet werden.

7.1 Durchführen der Clusterung

Um die Clusterung überhaupt durchführen zu können wird eine Vielzahl an Versuchen mit möglichst unterschiedlicher Versuchsdurchführung benötigt. Es reicht natürlich nicht aus, die Clusterung basierend auf nur einem Versuch durchzuführen.

Das heißt, dass die Sensitivitätsanalysen unterschiedlicher Versuchsdurchführungen auch unterschiedliche sensitive Parameter liefern. Dabei sollten sich die sensitiven Parameter innerhalb einer speziellen Versuchsdurchführung idealerweise nicht unterscheiden. Aus dieser Clusterung soll hervorgehen, welche Optimierungsparameter speziell für die einzelnen Versuchsdurchführungen hergenommen werden müssen. Dabei soll bei gleichbleibendem Optimierungsergebnis eine möglichst einfache Versuchsauswertung ermöglicht werden, die zusätzlich noch eine Zeitersparnis bringen soll. Bei dieser Vorgehensweise soll allein die Versuchsdurchführung Aufschluss über die benötigten Optimierungsparameter geben.

Ziel und Vorgehensweise

Die Ziele der Clusterung wurden vorher schon erklärt, die Versuchsauswertung mit dem CDA soll vereinfacht werden, ohne das Ergebnis zu beeinflussen beziehungsweise dieses zu verschlechtern.

Der Ablauf der Clusterung wird in der nächsten Abbildung dargestellt und in weiterer Folge näher beschrieben.

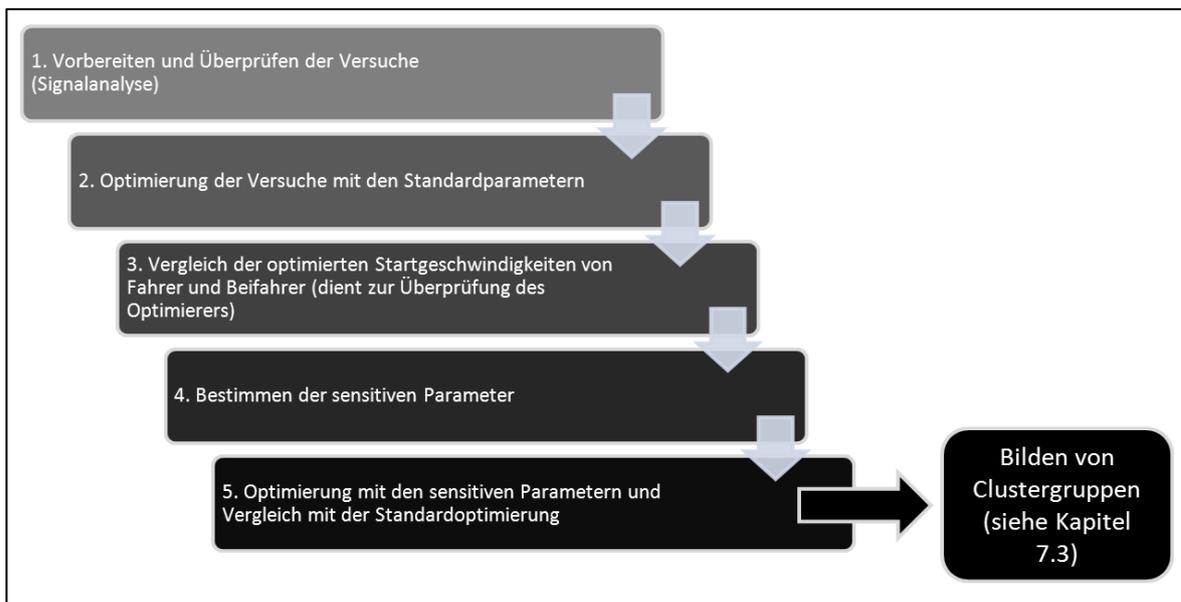


Abbildung 7.1: Ablauf der Clusterung

Vorbereiten und Überprüfen der Versuche (Signalanalyse)

Um die Clusterung durchzuführen wurden als erstes die Versuche vorbereitet. Das bedeutet, es wurde die Signalanalyse durchgeführt in der in erster Linie die elektrischen Messsignale überprüft wurden um mögliche nicht „funktionierende“ Versuche auszusortieren. Nicht funktionierende Versuche könnten das Bilden von Versuchsgruppen erschweren, da sie untypische Kurvenverläufe aufweisen könnten. Zusätzlich wurden auch Versuche aussortiert bei denen die Sensoren an die Grenzen ihres Messbereichs liefen. Des Weiteren wurden die Trajektorien der Videoanalyse analysiert, um mögliche Sprünge zu entfernen, wie dies auch schon im Kapitel 6 beschrieben wurden.

Optimierung der Versuche mit den Standardparametern

Nachdem die Signalanalyse durchgeführt worden ist, wurde jeder Versuch mit den Standardparametern optimiert um wieder Versuche aussortieren zu können, sollte die Optimierung keine befriedigenden Ergebnisse.

Vergleich der optimierten Startgeschwindigkeiten von Fahrer und Beifahrer

Konnte die Standardoptimierung durchgeführt werden, und wurde der Crashversuch mit Fahrer und Beifahrer, als zwei Dummies durchgeführt, so wurde zusätzlich noch der optimierte Wert der Startgeschwindigkeit beider Dummies verglichen, der in etwa gleich sein sollte. Diese Untersuchung dient zu Überprüfung des Optimierers an sich, um zu überprüfen, ob der Optimierer gleiche Optimierungsergebnisse liefert und nicht lokale Minima detektiert. Da auf die Standardoptimierung nicht näher eingegangen wird, soll vorgezogen festgehalten werden,

dass sich die Startgeschwindigkeiten bei keinem einzigen Versuch wesentlich unterscheiden. Der Unterschied liegt immer unter 0.2 m/s. Das ist in der Größenordnung der Genauigkeit mit der die Startgeschwindigkeit gemessen werden kann. Die Messung der Startgeschwindigkeit erfolgt auch hier mit einer kalibrierten Lichtschranke. Der Optimierer funktioniert also sehr gut und konvergiert aller Wahrscheinlichkeit nach nicht in lokalen Minima, zumindest was die Startgeschwindigkeiten betrifft. Es kommt außerdem zu keinen großen Unterschieden zwischen gemessen und optimierten Startgeschwindigkeiten, was wieder für den Optimierer spricht.

Auf die Standardoptimierung folgend wurde die Sensitivitätsanalyse durchgeführt, auf deren Ergebnis die Clusterung aufbaut. Die sensitiven Parameter sollten für gleiche Versuchsdurchführungen gleich bleiben.

Nach der Clusterung folgt der Vergleich der beiden unterschiedlichen Optimierungsverfahren. Einerseits wurde der Versuch mit den Standardparametern optimiert, andererseits mit den Parametern aus der Clusterung, die den sensitiven Parametern entsprechen.

Der Ablauf der Signalanalyse wird im letzten Kapitel 7.6 „Beschreibung der Versuchsauswertung mit den Erkenntnissen aus der Clusterung“ näher erklärt. In diesem Kapitel wird der allgemeine Ablauf der Versuchsauswertung mit der Clusterung noch einmal kurz beschrieben. Ebenso wird in weiterer Folge nicht näher auf die Standardoptimierung eingegangen, da der Ablauf dieses Optimierungsverfahrens bereits im Kapitel 6 näher beschrieben wurde.

Durchführen der Sensitivitätsanalyse und Bestimmen der sensitiven Parameter

Um die verschiedenen Versuche überhaupt Clustern zu können, muss für jeden Versuch die Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse müssen die sensitiven Parameter bestimmt werden. Dies geschieht auf dieselbe Weise wie auch schon im Kapitel 6.4 und 6.5. Zur Bestimmung der dimensionslosen Sensitivität wird die durch die Sensitivitätsanalyse mit dem Abbruchkriterium „Distance less than 0.005m at every point“ ermittelte Sensorgenauigkeit durch die mögliche Sensorgenauigkeit dividiert. Ist der Wert der Sensitivität größer als Eins so kann dieser Parameter als nicht sensitiv gewertet werden und wird in der Optimierung nicht berücksichtigt. Liegt er unter Eins so ist dieser Parameter sensitiv, was bei gleicher Versuchsdurchführung immer dieselben Parameter sein sollten.

Vergleich Optimierung mit den sensitivsten Parametern – Standardoptimierung

Nachdem individuell für jeden Versuch die sensitiven Parameter bestimmt worden sind, werden diese Parameter für die Optimierung verwendet. Die Optimierung mit den Standardparametern und die Optimierung mit den Parametern aus der Sensitivitätsanalyse

bzw. mit den sensitiven Parametern muss verglichen werden, um mögliche Unterschiede hinsichtlich der Positionsabweichungen herauszufinden.

7.2 Übersicht der analysierten Versuche

Wie schon vorher erwähnt, wurde die Clusterung nicht nur mit einem einzigen Vergleichsversuch, sondern mit einer Vielzahl an Vergleichsversuchen durchgeführt. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die analysierten Versuche. Des Weiteren werden die einzelnen Bezeichnungen der unterschiedlichen Versuchsdurchführungen kurz beschrieben.

Abbildung 7.2 zeigt ein Organigramm der analysierten Versuch, sowie deren Bezeichnung und Anzahl.

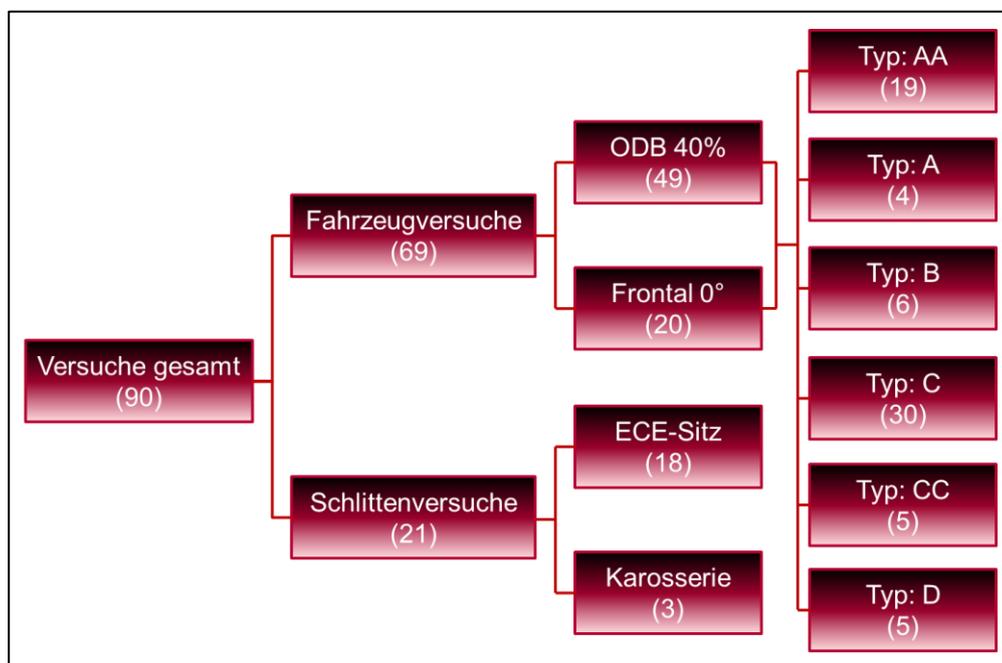


Abbildung 7.2: Übersicht der für die Clusterung analysierten Versuche

Für die Einteilung der unterschiedlichen Versuchsdurchführungen in Clustergruppen, die sich hinsichtlich ihrer sensitiven Parameter unterscheiden und die zur Optimierung verwendet werden wurden insgesamt 90 Crashversuche analysiert. Von allen 90 Versuchen wurde die Signalanalyse, die Optimierung mit den Standardparametern, die Sensitivitätsanalyse mit der Bestimmung der sensitiven Parameter und letztlich die Clusteroptimierung durchgeführt. Unter den 90 Versuchen waren 69 Fahrzeugversuche die sich wiederum in 49 ODB und 20 Frontal 0° Versuche unterteilen lassen. Typ: AA bis Typ: D beschreibt die jeweiligen Fahrzeugtypen. Jeder unterschiedliche Buchstabe steht für einen bestimmten Fahrzeugtyp, die Reihenfolge der Buchstabe steht aber in keiner Verbindung mit der Größe, der Masse oder der Bauart des

Fahrzeugs. Von den 90 analysierten Versuchen waren 21 Schlittenversuche. Es wurden zwei Arten von Schlittenversuchen untersucht. Einerseits waren das Schlittenversuche mit genormtem ECE-Sitz bei dem nur ein Gurtsystem als Rückhaltesystem dient, andererseits Schlittenversuche mit dem Aufbau des Unterteils der Karosserie eines bestimmten Fahrzeugtyps, wo zusätzlich zum Gurt auch ein Airbag zu Einsatz gekommen ist. Eine genauere Übersicht der „funktionierenden“ Versuche enthält die nachstehende Tabelle.

Lfd. Nr	Versuch	Typ	Art		Lfd. Nr	Versuch	Typ	Art	
1	TEST200901	C	Frontal 0°	SP1	32	TEST201009	C	ODB 40%	SP1
2	TEST200902	B	ODB 40%	SP1	33	TEST201009	C	ODB 40%	SP3
3	TEST200902	B	ODB 40%	SP3	34	TEST201010	AA	ODB 40%	SP1
4	TEST200903	C	Frontal 0°	SP1	35	TEST201010	AA	ODB 40%	SP3
5	TEST200903	C	Frontal 0°	SP3	36	TEST201011	Schlitten	ECE-Sitz	SP5
6	TEST200905	B	ODB 40%	SP1	37	TEST201012	Schlitten	ECE-Sitz	SP5
7	TEST200905	B	ODB 40%	SP3	38	TEST201013	Schlitten	ECE-Sitz	SP5
8	TEST200906	D	ODB 40%	SP1	39	TEST201014	Schlitten	ECE-Sitz	SP5
9	TEST200906	D	ODB 40%	SP3	40	TEST201015	Schlitten	ECE-Sitz	SP5
10	TEST200907	C	Frontal 0°	SP1	41	TEST201016	Schlitten	ECE-Sitz	SP5
11	TEST200907	C	Frontal 0°	SP3	42	TEST201017	CC	ODB 40%	SP1
12	TEST200908	A	Frontal 0°	SP1	43	TEST201017	CC	ODB 40%	SP3
13	TEST200908	A	Frontal 0°	SP3	44	TEST201018	AA	ODB 40%	SP1
14	TEST200909	C	ODB 40%	SP1	45	TEST201018	AA	ODB 40%	SP3
15	TEST200909	C	ODB 40%	SP3	46	TEST201019	AA	ODB 40%	SP1
16	TEST200910	B	ODB 40%	SP1	47	TEST201020	C	ODB 40%	SP1
17	TEST200910	B	ODB 40%	SP3	48	TEST201020	C	ODB 40%	SP3
18	TEST200911	D	ODB 40%	SP1	49	TEST201021	C	ODB 40%	SP1
19	TEST200911	D	ODB 40%	SP3	50	TEST201021	C	ODB 40%	SP3
20	TEST200913	C	ODB 40%	SP3	51	TEST201023	D	Frontal 0°	SP1
21	TEST200914	C	ODB 40%	SP1	52	TEST201026	C	ODB 40%	SP1
22	TEST200914	C	ODB 40%	SP3	53	TEST201026	C	ODB 40%	SP3
23	TEST200915	C	ODB 40%	SP3	54	TEST201028	AA	ODB 40%	SP1
24	TEST200916	A	Frontal 0°	SP1	55	TEST201028	AA	ODB 40%	SP3
25	TEST200916	A	Frontal 0°	SP3	56	TEST201029	CC	Frontal 0°	SP1
26	TEST201001	C	Frontal 0°	SP3	57	TEST201029	CC	Frontal 0°	SP1
27	TEST201002	C	Frontal 0°	SP1	58	TEST201030	Schlitten	ECE-Sitz	SP5
28	TEST201002	C	Frontal 0°	SP3	59	TEST201031	Schlitten	ECE-Sitz	SP5
29	TEST201005	Schlitten	ECE-Sitz	SP5	60	TEST201032	Schlitten	ECE-Sitz	SP5
30	TEST201006	Schlitten	ECE-Sitz	SP5	61	TEST201033	Schlitten	ECE-Sitz	SP5
31	TEST201007	Schlitten	ECE-Sitz	SP5	62	TEST201034	Schlitten	ECE-Sitz	SP5

Tabelle 7-1: Detaillierter Überblick über die funktionierenden und analysierten Versuche 2009, 2010

Grün markierte Versuche sind ODB 40% Versuche, die auch den größten Teil der analysierten Versuche ausmachen, weiß die Frontal 0° Versuche, orange die Schlittenversuch mit ECE-Sitz und blau die Schlittenversuche mit Karosserieaufbau.

Lfd. Nr	Versuch	Typ	Art		Lfd. Nr	Versuch	Typ	Art	
63	TEST201101	Schlitten	ECE-Sitz	SP5	77	TEST201110	C	ODB 40%	SP1
64	TEST201102	Schlitten	ECE-Sitz	SP5	78	TEST201110	C	ODB 40%	SP3
65	TEST201103	Schlitten	ECE-Sitz	SP5	79	TEST201112	AA	ODB 40%	SP1
66	TEST201104	Schlitten	ECE-Sitz	SP5	80	TEST201112	AA	ODB 40%	SP3
67	TEST201105	AA	ODB 40%	SP1	81	TEST201113	AA	ODB 40%	SP1
68	TEST201105	AA	ODB 40%	SP3	82	TEST201113	AA	ODB 40%	SP3
69	TEST201106	AA	ODB 40%	SP1	83	TEST201114	Schlitten	Karosserie	SP1
70	TEST201106	AA	ODB 40%	SP3	84	TEST201115	Schlitten	Karosserie	SP1
71	TEST201107	C	Frontal 0°	SP1	85	TEST201116	Schlitten	Karosserie	SP1
72	TEST201107	C	Frontal 0°	SP3	86	TEST201117	AA	ODB 40%	SP1
73	TEST201108	C	ODB 40%	SP1	87	TEST201117	AA	ODB 40%	SP3
74	TEST201108	C	ODB 40%	SP3	88	TEST201118	CC	Frontal 0°	SP3
75	TEST201109	C	ODB 40%	SP1	89	TEST201119	AA	Frontal 0°	SP1
76	TEST201109	C	ODB 40%	SP3	90	TEST201119	AA	Frontal 0°	SP3

Tabelle 7-2: Detaillierter Überblick über die funktionierenden und analysierten Versuche 2011

26 Versuche wurden bei der Einteilung der Versuch in Clustergruppen nicht berücksichtigt. Die jeweiligen Gründe sind in der linken Spalte unter Bemerkung angeführt.

Lfd. Nr	Versuch	Typ	Art		Bemerkung
1	TEST200904	D	Frontal 30°	SP1	keine Referenz
2	TEST200904	D	Frontal 30°	SP3	keine Referenz
3	TEST200912	A	Frontal 0°	SP1	Signale
4	TEST200912	A	Frontal 0°	SP3	Signale
5	TEST200912	Toyota	Frontal 0°	SP1	Fremdfahrzeug
6	TEST200912	Toyota	Frontal 0°	SP3	Fremdfahrzeug
7	TEST200918	A	ODB 40%	SP3	Signale
8	TEST200918	A	ODB 40%	SP4	Signale
9	TEST200919	C	Frontal 30°	SP1	passiv
10	TEST200919	C	Frontal 30°	SP3	passiv
11	TEST200920	C	Frontal 0°	SP1	passiv
12	TEST200920	C	Frontal 0°	SP3	passiv
13	TEST200921	C	Frontal 30°	SP1	passiv
14	TEST200921	C	Frontal 30°	SP3	passiv
15	TEST201001	C	Frontal 0°	SP1	Signale
16	TEST201003	U	Frontal 30°	SP1	passiv
17	TEST201004	Schlitten	Frontalsimulation	S5	Signale
18	TEST201008	C	ODB 40%	SP1	Fehlermeldung CDA
19	TEST201008	C	ODB 40%	SP3	Fehlermeldung CDA
20	TEST201022	CC	Frontal 0°	SP1	passiv
21	TEST201022	CC	Frontal 0°	SP3	passiv
22	TEST201023	U	Frontal 0°	SP1	Fahrzeug
23	TEST201024	CC	Frontal 0°	SP1	passiv
24	TEST201024	CC	Frontal 0°	SP3	passiv
25	TEST201027	AA	ODB 40%	SP1	Signale
26	TEST201027	AA	ODB 40%	SP3	Signale

Tabelle 7-3: Detaillierter Überblick über die nicht analysierten Versuche

7.3 Beschreibung der unterschiedlichen Clustergruppen

Nachdem für alle 90 Versuche die Sensitivitätsanalyse durchgeführt wurde, ist der nächste Schritt das Bilden von Clustergruppen, die sich anhand ihrer sensitiven Parameter unterscheiden. Durch den Vergleich der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sollen Gemeinsamkeiten und Zusammenhänge der verschiedenen Versuchsdurchführungen gefunden werden, um daraus versuchstypische Optimierungsparameter zu bestimmen.

Bei der Bestimmung der sensitiven Parameter wurden diese je nach ihrer Sensitivität in drei Gruppen eingeteilt, jeweils in nicht sensitive Parameter, sensitive Parameter und Parameter die sich in einem Übergangsbereich zwischen sensitiv und nichtsensitiv befinden. Um die versuchsspezifischen Parameter definieren zu können, müssen diese über eine Vielzahl an Versuchen bestimmt werden.

Parameter	Unit	Sensitivität		
		TEST200902_11	TEST201119_13	TEST201007
Offset ACX	m/s ²	0.40	0.70	0.40
Offset ACY	m/s ²	0.60	1.05	0.55
Offset ACZ	m/s ²	0.60	1.05	0.60
Offset AVX	deg/s	28.00	129.40	33.60
Offset AVY	deg/s	5.80	12.90	9.10
Offset AVZ	deg/s	5.70	12.80	8.80
Offset AV AIX	deg	1.30	6.84	0.86
Offset AV AIY	deg	0.18	0.30	0.34
Offset AV AIZ	deg	0.20	0.30	0.34
Scale ACX	%	0.18	0.26	0.35
Scale ACY	%	0.55	6.01	1.42
Scale ACZ	%	0.33	0.91	0.26
Scale AVX	%	1.41	18.52	6.99
Scale AVY	%	0.36	0.91	0.34
Scale AVZ	%	0.96	7.32	25.07

Tabelle 7-4: Sensitive Parameter unterschiedlicher Versuchsdurchführungen

Tabelle 7-4 zeigt die Sensitivität von drei Versuche, die sich in ihrer Versuchsdurchführung unterscheiden. In dieser Tabelle lässt sich erkennen, dass unterschiedliche Versuchsdurchführungen unterschiedliche sensitive Parameter aufweisen.

Die Versuche wurden in Gruppen eingeteilt und anschließend überprüft, ob die eingeteilten Gruppen auch mit der Versuchsdurchführung übereinstimmen. Ein gewisser Graubereich waren jedoch die Parameter die im Übergangsbereich liegen. Deshalb wurde, um nicht ungewollt auf einen wichtigen Optimierungsparameter zu vergessen, im Zweifelsfall Parameter im Übergangsbereich in die Clustergruppe mitaufgenommen. Das bedeutet, wenn ein Parameter über alle Versuche gesehen einmal sensitiv ist, bei allen anderen Analysen im

Übergangsbereich, so wird dieser Parameter für die gesamte Versuchsgruppe übernommen. Ausreißer wurden im Gegensatz zu dem Übergangsbereich bei der Clusterung jedoch toleriert. Ist ein Parameter eindeutig nicht sensitiv oder eindeutig sensitiv und nur ein einziger Versuch der ganzen Versuchsreihe weicht vom Standard ab, so wird dieser Einfluss nicht berücksichtigt. Das Endziel der Clusterung ist die Bestimmung von versuchsspezifischen Parametern.

Nach der Untersuchung aller Versuche und dem Vergleich ihrer unterschiedlichen Sensitivitäten hat sich ergeben, dass sich die Versuchsdurchführung allgemein in drei Unterpunkte unterteilt werden kann.

1. Die Versuchsart
2. Die Versuchsmethode
3. Der Fahrzeugtyp

Jeder Unterpunkt legt bestimmte, für die Versuchsdurchführung spezifische sensitive Parameter bzw. die Optimierungsparameter der Clusteroptimierung fest.

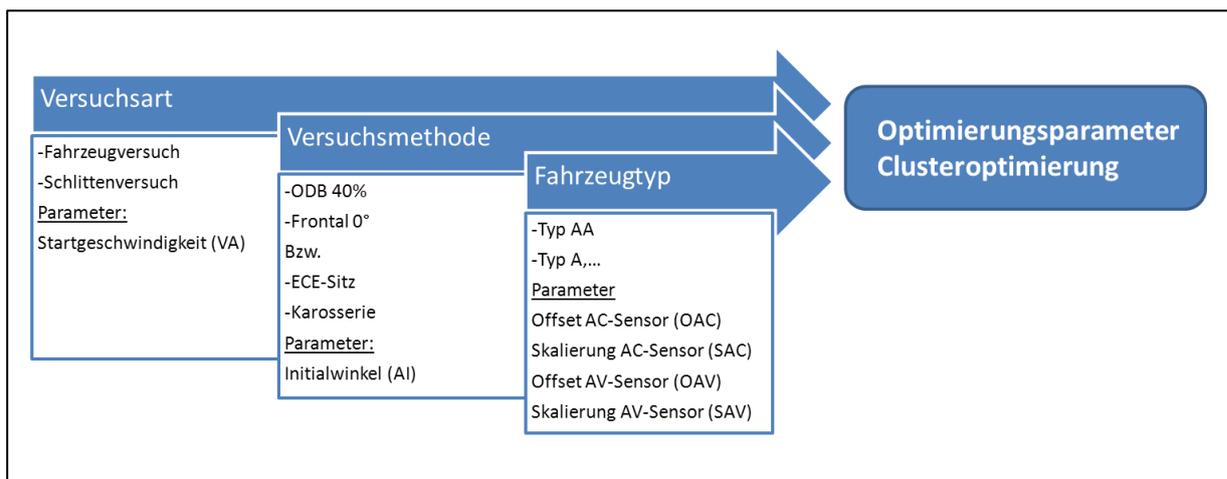


Abbildung 7.3: Bestimmung der Parameter zur Clusteroptimierung

Die Summe der Parameter aus den einzelnen Clustergruppen (Versuchsart, -methode, Fahrzeugtyp) ergeben die Optimierungsparameter der Clusteroptimierung.

Die einzelnen sich ergebenden Clustergruppen werden im weiteren Abschnitt näher beschrieben.

Clustergruppe: Versuchsmethode (ODB 40% - Frontal 0°)

Der erste Unterschied hinsichtlich ihrer sensitiven Parameter kann bei der Versuchsart zwischen dem ODB 40% Versuch und dem Frontal 0° Versuch getroffen werden. Bei dem Frontal 0° Versuch ist das Hindernis eine starre Wand die unter einem Winkel von 0° vom

Fahrzeug getroffen wird. Die Zahl der analysierten ODB und Frontal 0° Versuche beläuft sich auf 69 Versuche, wobei davon 49 ODB Versuche und 20 Frontal 0° Versuche waren.

Bei dieser Versuchsgruppe kommt es vorwiegend zu Unterschieden hinsichtlich der Sensitivität der Initialwinkel der Dummyköpfe, wobei sich der Parameter AI (Angle Initial) auch bei unterschiedlichen Fahrzeugtypen gleich verhält.

Die nächste Tabelle zeigt das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse aller 49 ODB Versuch. Die Werte aus der Sensitivitätsanalyse werden gemittelt und anschließende die Sensitivität bzw. die sensitiven Parameter bestimmt.

ODB 40%			Sens.-	Genauig-	∅
	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität
allg. Parameter	Offset AV AIX	deg	0.75	0.50	1.49
	Offset AV AIY	deg	0.11	0.50	0.22
	Offset AV AIZ	deg	0.11	0.50	0.23

Tabelle 7-5: Clustergruppe ODB 40%

Bei dem ODB Versuch erweisen sich die Initialwinkel um alle drei Achsen (AIX, AIY, AIZ) als sensitiv, müssen also mitoptimiert werden.

Im Gegensatz dazu zeigt die nächste Tabelle die sensitiven Parameter aller Frontalversuchs, die wiederum aus den gemittelten Werten der Sensitivitätsanalyse bestimmt werden.

Frontal 0°			Sens.-	Genauig-	∅
	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität
allg. Parameter	Offset AV AIX	deg	1.50	0.50	3.01
	Offset AV AIY	deg	0.12	0.50	0.24
	Offset AV AIZ	deg	0.13	0.50	0.25

Tabelle 7-6: Clustergruppe Frontal 0°

Bei dem Frontalversuch ist der Initialwinkel um die x-Achse bei allen 20 Versuchen nicht sensitiv, kann also bei der Optimierung weggelassen werden. Es ergeben sich zwei Parameter für die Optimierung, die Initialwinkel des Dummykopfes um die y- und um die z-Achse (AIY, AIZ).

Clustergruppe: Versuchsmethode (ECE-Sitz - Karosserieaufbau beim Schlittenversuch)

Die nächsten Clustergruppen sind jene der unterschiedlichen Versuchsart bei dem Schlittenversuch. Der Schlittenversuch kann entweder mit einem ECE-Sitz durchgeführt werden, als auch mit einem Karosserieaufbau. Interessant war hier die Überprüfung, ob sich

der Schlittenversuch mit einem Karosserieaufbau eher wie ein Schlittenversuch oder wie ein Fahrzeugversuch verhält.

Wie auch schon vorher beim ODB und Frontalversuch unterscheiden sich diese beiden unterschiedlichen Versuchsdurchführungen nur hinsichtlich der Initialwinkel der Dummyköpfe.

ECE-Sitz			Sens.-	Genauig-	Ø
	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität
allg. Parameter	Offset AV AIX	deg	0.70	0.50	1.40
	Offset AV AIY	deg	0.19	0.50	0.37
	Offset AV AIZ	deg	0.19	0.50	0.38

Tabelle 7-7: Clustergruppe ECE-Sitz

Beim Schlittenversuch mit ECE-Sitz sind, wie auch schon beim ODB Versuch, alle drei Initialwinkel sensitiv.

Karosserieaufbau			Sens.-	Genauig-	Ø
	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität
allg. Parameter	Offset AV AIX	deg	2.28	0.50	4.56
	Offset AV AIY	deg	0.14	0.50	0.27
	Offset AV AIZ	deg	0.14	0.50	0.27

Tabelle 7-8: Clustergruppe Schlittenversuch mit Karosserieaufbau

Wird der Schlittenversuch mit dem Aufbau einer Karosserie durchgeführt so ist der Initialwinkel um die x-Achse im Gegensatz zu den anderen beiden Parametern nicht sensitiv, wie es auch schon bei dem Frontalversuch der Fall war.

Die beiden unterschiedlichen Versuchsdurchführungen zeigen Gemeinsamkeiten mit den vorher angeführten Fahrzeugversuchen. Eine mögliche Erklärung dieses Phänomens liegt in den unterschiedlichen Rückhaltesystemen der Schlittenversuche. Bei der Versuchsdurchführung mit dem ECE-Sitz wurde als Rückhaltesystem nur ein Gurt verwendet. Dadurch wirkt bei der Beschleunigung des Schlittens auf den Dummy eine zusätzliche Rotation, erzeugt durch den Gurt. Ebenso geschieht das bei dem ODB Fahrzeugversuch durch die außermittig angeordnete deformierbare Barriere. Diese zusätzlich aufgebrachte Rotation spiegelt sich in der Sensitivität von gewissen Parametern wieder, genauer im Parameter des Initialwinkels um die x-Achse. Bei zusätzlicher Rotation durch die Versuchsdurchführung wird dieser Parameter sensitiv. Im Gegensatz dazu wird bei dem Schlittenversuch mit Karosserieaufbau ein Airbag-Gurt Rückhaltesystem verwendet. Durch den Airbag wird der Dummykopf nicht so stark um die Fahrzeugachsen was sich in der unterschiedlichen Sensitivität der Initialwinkel zeigt, gleich wie

auch schon beim Frontal 0° Fahrzeugversuch. Die Gemeinsamkeiten zwischen dem ODB Fahrzeugversuch und dem Schlittenversuch mit ECE-Sitz beziehungsweise zwischen dem Frontal 0° Fahrzeugversuch und dem Schlittenversuch mit Karosserieaufbau ist also auch in den sensitiven Parametern wiederzufinden.

Clustergruppe: Fahrzeugtyp Schlittenversuch

Die nächsten vier Clustergruppen unterscheiden sich hinsichtlich der Sensorfehler, es sind dies die Offsets und Skalierungen der Beschleunigungssensoren sowie den Offsets und den Skalierungen des Gyrosensors. Schlittenversuche bei denen es zu keiner Deformation kommt, scheinen sich anders zu verhalten als die analysierten Fahrzeugversuche. Des Weiteren muss gerade bei Schlittenversuchen beachtet werden, dass die Startgeschwindigkeit keine Rolle spielt und deshalb auch nicht mitoptimiert wird. Des Weiteren kommt es bei Schlittenversuchen zu 1D-Bewegungen im Gegensatz zu den Fahrzeugversuchen (3D-Bewegung).

Zur Analyse der Schlittenversuche wurden 21 Versuche herangezogen. Das Ergebnis der sensitiven Parameter aller Versuche wird in der folgenden Tabelle gezeigt.

Schlitten			Sens.-	Genauig-	Ø			Sens.-	Genauig-	Ø
	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität
AC-Sensor	Offset ACX	m/s^2	0.12	0.30	0.41	Scale ACX	%	0.38	1.00	0.38
	Offset ACY	m/s^2	0.12	0.20	0.58	Scale ACY	%	3.11	1.00	3.11
	Offset ACZ	m/s^2	0.12	0.20	0.62	Scale ACZ	%	0.36	1.00	0.36
AV-Sensor	Offset AVX	deg/s	7.18	0.10	71.83	Scale AVX	%	16.52	1.00	16.52
	Offset AVY	deg/s	1.00	0.10	9.99	Scale AVY	%	0.44	1.00	0.44
	Offset AVZ	deg/s	0.97	0.10	9.66	Scale AVZ	%	19.61	1.00	19.61

Tabelle 7-9: Clustergruppe Schlittenversuch

Aus der Tabelle zeigen sich die Parameter OACX, OACY, OACZ, sowie SACX, SACZ und SAVY als sensitiv.

Clustergruppe: Fahrzeugtyp AA, A

Nachdem alle Gruppen die mit den Schlittenversuchen zusammenhängen abgehandelt worden sind, folgt jetzt die Einteilung der unterschiedlichen Fahrzeugtypen hinsichtlich ihrer sensitiven Parameter. Bei den Fahrzeugversuchen muss auch beachtet werden, dass die Startgeschwindigkeit in der Optimierung berücksichtigt werden muss.

Zur Analyse der Fahrzeugversuche mit dem Fahrzeugtyp AA und A standen insgesamt 23 Versuche zur Verfügung. Die optimierungsspezifischen Parameter dieser Clustergruppe sind die Offsets der drei Beschleunigungssensoren (OACX, OACY, OACZ), die Skalierungen der x- und z-

Beschleunigungssensoren (SACX, SACZ) und die Skalierung des Gyrosensors um die γ -Achse (SAVY), was auch in der Tabelle 7-10 zu sehen ist.

Typ AA, A			Sens.- Analyse	Genauig- keit	Ø			Sens.- Analyse	Genauig- keit	Ø Sensitivität
Parameter	Unit	Sensitivität			Parameter	Unit				
AC-Sensor	Offset ACX	m/s ²	0.15	0.30	0.50	Scale ACX	%	0.22	1.00	0.22
	Offset ACY	m/s ²	0.14	0.20	0.71	Scale ACY	%	9.06	1.00	9.06
	Offset ACZ	m/s ²	0.15	0.20	0.75	Scale ACZ	%	0.49	1.00	0.49
AV-Sensor	Offset AVX	deg/s	5.12	0.10	51.22	Scale AVX	%	12.18	1.00	12.18
	Offset AVY	deg/s	0.79	0.10	7.89	Scale AVY	%	0.45	1.00	0.45
	Offset AVZ	deg/s	0.97	0.10	9.70	Scale AVZ	%	5.82	1.00	5.82

Tabelle 7-10: Clustergruppe Fahrzeugtyp AA, A

Die sensitiven Parameter sind auch hier anhand der grünen Färbung der Felder zu erkennen und bei dem oben angeführten Versuch eindeutig. Das heißt, kein Parameter liegt im Übergangsbereich und somit kann eindeutig zwischen sensitiv und nicht sensitiv unterschieden werden.

Clustergruppe: Fahrzeugtyp B

Der am schwierigsten zu kategorisierende Fahrzeugtyp ist Fahrzeugtyp B, da es bei dieser Clustergruppe zu vielen verschiedenen Ergebnissen der Sensitivitätsanalysen kommt. Fahrzeugtyp B ist ein gutes Beispiel, dass der Parameter im Zweifelsfall in die Optimierung miteinfließt. Die nächste Tabelle zeigt das Ergebnis der gemittelten Sensitivitäten aller 6 Versuche.

Typ B			Sens.- Analyse	Genauig- keit	Ø			Sens.- Analyse	Genauig- keit	Ø Sensitivität
Parameter	Unit	Sensitivität			Parameter	Unit				
AC-Sensor	Offset ACX	m/s ²	0.14	0.30	0.46	Scale ACX	%	0.21	1.00	0.21
	Offset ACY	m/s ²	0.13	0.20	0.66	Scale ACY	%	5.10	1.00	5.10
	Offset ACZ	m/s ²	0.14	0.20	0.68	Scale ACZ	%	0.44	1.00	0.44
AV-Sensor	Offset AVX	deg/s	4.92	0.10	49.15	Scale AVX	%	5.95	1.00	5.95
	Offset AVY	deg/s	0.72	0.10	7.22	Scale AVY	%	0.46	1.00	0.46
	Offset AVZ	deg/s	0.71	0.10	7.08	Scale AVZ	%	2.50	1.00	2.50

Tabelle 7-11: Clustergruppe Fahrzeugtyp B (gemittelt)

Betrachtet man die gemittelten Sensitivitäten aller Versuche so müsste die Skalierung des Beschleunigungssensors in γ -Richtung (Scale ACY) nicht berücksichtigt werden, da dieser bei den gemittelten Sensitivitäten eindeutig nicht sensitiv ist. Die nächste Tabelle zeigt die Sensitivitäten eines Versuchs die von den gemittelten Sensitivitäten abweichen.

TEST200902_11			Sens.-	Genauig-				Sens.-	Genauig-	
	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität
AC-Sensor	Offset ACX	m/s ²	0.12	0.30	0.40	Scale ACX	%	0.18	1.00	0.18
	Offset ACY	m/s ²	0.12	0.20	0.60	Scale ACY	%	0.55	1.00	0.55
	Offset ACZ	m/s ²	0.12	0.20	0.60	Scale ACZ	%	0.33	1.00	0.33
AV-Sensor	Offset AVX	deg/s	2.80	0.10	28.00	Scale AVX	%	1.41	1.00	1.41
	Offset AVY	deg/s	0.58	0.10	5.80	Scale AVY	%	0.36	1.00	0.36
	Offset AVZ	deg/s	0.57	0.10	5.70	Scale AVZ	%	0.96	1.00	0.96

Tabelle 7-12: Clustergruppe Fahrzeugtyp B

Bei diesem Versuch ist die Skalierung des Beschleunigungssensors eindeutig sensitiv im Gegensatz zum Ergebnis der gemittelten Sensitivitäten. Daher werden Fahrzeugtyp B zusätzlich zu den schon beim Fahrzeugtyp AA, und A sensitiven Parametern noch die Parameter SACY und SAVZ sensitiv als sensitiv gewertet und in der Optimierung berücksichtigt.

Clustergruppe: Fahrzeugtyp C, CC, D

Die letzte Clustergruppe, die sich aus der Einteilung der unterschiedlichen Versuchsdurchführung hinsichtlich der sensitiven Parameter ergeben hat, ist jener der Fahrzeugtypen C, CC und D.

Typ C, CC, D			Sens.-	Genauig-	∅			Sens.-	Genauig-	∅
	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität	Parameter	Unit	Analyse	keit	Sensitivität
AC-Sensor	Offset ACX	m/s ²	0.14	0.30	0.47	Scale ACX	%	0.19	1.00	0.19
	Offset ACY	m/s ²	0.13	0.20	0.67	Scale ACY	%	2.68	1.00	2.68
	Offset ACZ	m/s ²	0.14	0.20	0.70	Scale ACZ	%	0.50	1.00	0.50
AV-Sensor	Offset AVX	deg/s	3.96	0.10	39.61	Scale AVX	%	6.69	1.00	6.69
	Offset AVY	deg/s	0.73	0.10	7.31	Scale AVY	%	0.49	1.00	0.49
	Offset AVZ	deg/s	0.78	0.10	7.80	Scale AVZ	%	5.65	1.00	5.65

Tabelle 7-13: Clustergruppe Fahrzeugtyp C, CC, D

Bei dieser Clustergruppe sind die drei Offsets und die drei Skalierungen der Beschleunigungssensoren und die Skalierung des Gyrosensors um die y-Achse sensitiv. Diese sieben Parameter müssen zusätzlich zu den Startgeschwindigkeiten und den Initialwinkeln der Dummyköpfe, die sich aus der Versuchsart ergeben, optimiert werden.

Um die Ergebnisse der Einteilung der Clustergruppen schnell und effizient nützen zu können, wurde ein Tool zur Bestimmung der Optimierungsparameter erstellt, welches im folgenden Kapitel beschrieben wird.

7.4 Tool zur Bestimmung der Optimierungsparameter

Die gesammelten Ergebnisse der Untersuchung der Clusterung dienen als Grundlage eines Excel-Tools zur Bestimmung der Optimierungsparameter. Die Clusterung beziehungsweise die Einteilung der Clustergruppen liefert die sensitiven Parameter in Abhängigkeit der unterschiedlichen Versuchsdurchführungen, die in weiterer Folge für die Optimierung verwendet werden. Durch das Optimierungsparameterbestimmungstool soll die Durchführung der Versuchsauswertung beschleunigt und erleichtert werden.

Die Grundidee hinter dem Programm ist, dass die unterschiedlichen Arten der Versuchsdurchführung in ein Eingabefenster eingegeben werden und nach korrekter Eingabe die Optimierungsparameter der jeweiligen Versuchsdurchführung festgelegt werden.

Eine Übersicht über den Ablauf der Bestimmung der Optimierungsparameter mit dem Optimierungsparameterbestimmungstool ist in der nachstehenden Graphik dargestellt.

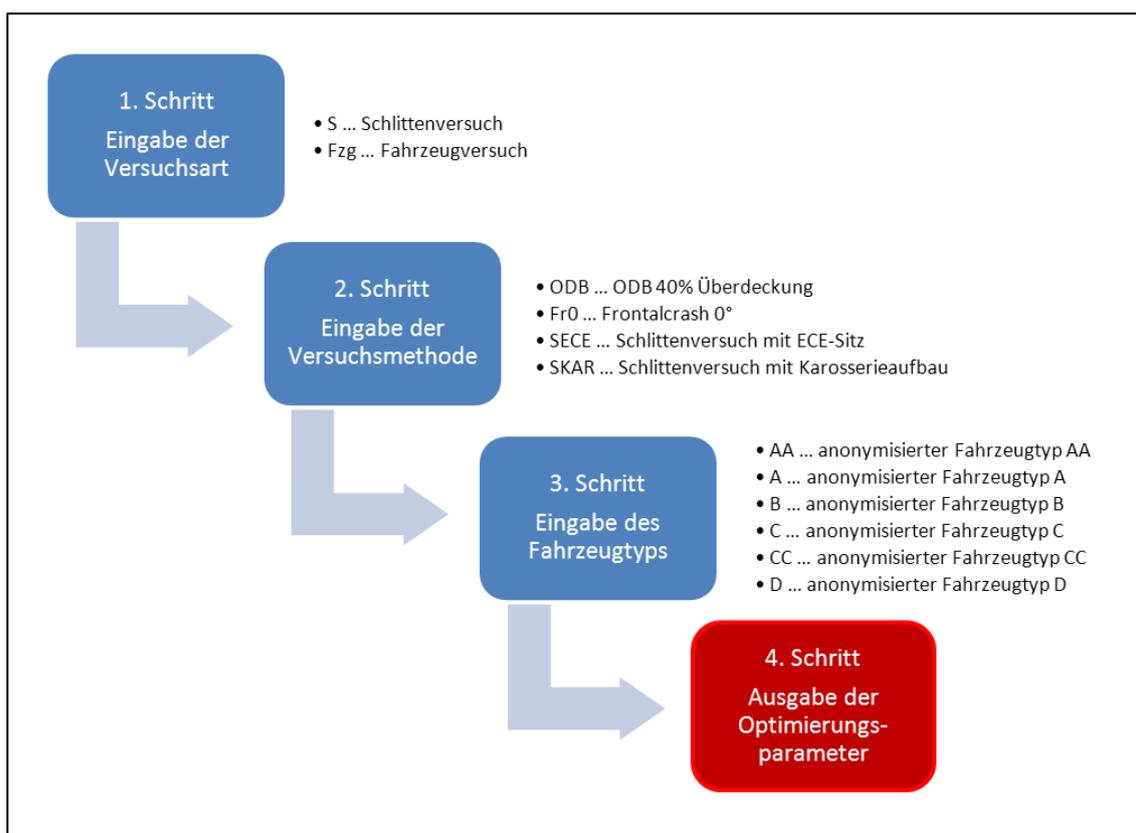


Abbildung 7.4: Ablauf des Parameterbestimmungstools (OPA)

Der Ablauf des Parameterbestimmungstools kann in vier Schritte unterteilt werden. Der erste Schritt beinhaltet die Eingabe der Versuchsart. Danach folgt im zweiten Schritt die Eingabe der Versuchsmethode, gefolgt von der Eingabe des Fahrzeugtyps, falls es sich bei dem Versuch um

einen Fahrzeugversuch handelt. Die Ausgabe der Optimierungsparameter erfolgt dann im vierten und letzten Schritt.

	Versuchsart	Versuchsmethode	Fahrzeugtyp	Optimierungsparameter							
Eingabe:	Fzg	ODB	C	AIX	AIY	AIZ	VAX	VAY	VAZ		
	Eingabe korrekt	Eingabe korrekt	Eingabe korrekt								
	S	ODB	AA	OACX	OACY	OACZ	SACX	SACY	SACZ		
	...Schlittenversuch	...ODB 40%	...Fzg. AA								
	Fzg	Fr0	A	OAVX	OAVY	OAVZ	SAVX	SAVY	SAVZ		
	...Fahrzeugversuch	...Frontal 0°	...Fzg. A								
		SECE	B								
		...Schlitten + ECE-Sitz	...Fzg. B								
		SKAR	C								
		...Schlitten + Karosserie	...Fzg. C								
			CC								
			...Fzg. CC								
			D								
			...Fzg. D								
				<div style="background-color: black; width: 100%; height: 10px; margin-bottom: 2px;"></div> ...Parameter muss optimiert werden							
				<div style="background-color: red; width: 100%; height: 10px; margin-bottom: 2px;"></div> ...Parameter muss nicht optimiert werden							

Abbildung 7.5: Bedienoberfläche des Optimierungsparameterbestimmungstools

Abbildung 7.5 zeigt die Eingabe- sowie die Ausgabeoberfläche des Parameterbestimmungstools. Die Eingabe erfolgt im dafür vorgesehenen Feld unter der Beschreibung der Eingabe. In einem Drop Down Menü kann zwischen der Abkürzung gewählt werden. Eine weitere Eingabemöglichkeit ist die Eingabe per Hand über die Tastatur. Ist die Eingabe korrekt so färben sich die Felder grün und das Feld unter der Eingabe bestätigt die Eingabe indem „Eingabe korrekt“ erscheint. Nachdem die korrekte Eingabe in allen drei dafür vorgesehenen Feldern erfolgt ist, können die Optimierungsparameter aus dem Ausgabefenster entnommen werden.

Die Parameter, die optimiert werden müssen sind schwarz unterlegt, während sich die Parameter die nicht optimiert werden müssen rot färben. Bei dem aufgeführten Beispiel, also dem ODB 40% Fahrzeugversuch mit dem Fahrzeugtyp C sind dies die Parameter AIX, AIY, AIZ die sich aus der Wahl der Versuchsmethode, in dem angeführten Fall der ODB Versuch, ergeben. VAX und VAZ (Fahrzeugversuch) und OACX, OACY, OACZ, SACX, SACY, SACZ und SAVY sind die Parameter, die sich durch den Fahrzeugtypen C ergeben. Die Optimierung muss also mit 12 Parametern erfolgen die auf einfache Weise mit dem Optimierungsparameterbestimmungstool bestimmt wurden.

7.5 Vergleich Standardoptimierung – Clusteroptimierung

Durch die Clusteroptimierung ist es möglich, im Gegensatz zur Standardoptimierung, die Parameter für die Optimierung schnell und zielgerichtet zu finden was eine erhebliche Erleichterung der Anwendung des Programms CDA mit sich bringt. Ein wichtiger Punkt bei der Einführung eines neuen Auswerteverfahrens ist jedoch, dass sich die Ergebnisse des neuen Verfahrens im Vergleich zum vorher verwendeten nicht verschlechtern, teilweise sogar verbessern. Daher werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Optimierung beider Verfahren, also der Clusteroptimierung und der Standardoptimierung verglichen. Verglichen werden die Positionsabweichungen, die sich nach der Optimierung mit den beiden Verfahren ergeben und die Parameterwerte nach der Optimierung, besonders im Hinblick auf ihre Plausibilität. Außerdem wird die benötigten Rechenzeiten beider Verfahren, genauer die Zeitersparnis der Clusteroptimierung, resultierend aus der Reduktion der Parameter untersucht.

7.5.1 Untersuchung der Positionsabweichungen

Bei der Untersuchung der Positionsabweichungen wurden bei allen 90 analysierten Versuchen die maximalen Abweichungen betrachtet und die Unterschiede zwischen Clusteroptimierung und Standardoptimierung ermittelt. Dabei wurden die unterschiedlichen Positionsabweichungen zwischen den beiden Verfahren in drei Gruppen unterteilt:

1. Gruppe Grün: Differenz der Positionsabweichung $< 1\text{mm}$
2. Gruppe Gelb: Differenz der Positionsabweichung zwischen 1mm und 2mm
3. Gruppe Rot: Differenz der Positionsabweichung $> 2\text{mm}$

Stellvertretend für alle Versuche sind in der nachstehenden Tabelle die unterschiedlichen Positionsabweichungen für einige Versuche dargestellt.

Versuch	Durchführung	Clusteroptimierung	Standardoptimierung
TEST200901_11	Frontal, C	14 mm	14 mm
TEST200911_13	ODB; D	4 mm	4 mm
TEST200907_13	Frontal, C	9 mm	7 mm
TEST200913_13	ODB, C	4.5 mm	5 mm
TEST201001_13	Frontal, C	6 mm	6 mm
TEST200905_13	ODB; B	6 mm	6 mm
TEST201030_S5	Schlitten	9.5 mm	9 mm
TEST200916_11	Frontal; A	5 mm	5 mm
TEST200902_11	ODB; B	8 mm	5 mm
TEST201017_13	ODB; CC	5 mm	6 mm
TEST201010_11	ODB; AA	3 mm	2 mm
...			
Ø - Differenz der Positionsabweichungen			0.45 mm

Tabelle 7-14: Vergleich Positionsabweichungen Clusteroptimierung – Standardoptimierung

Bei der Betrachtung der Positionsabweichungen aller 90 Versuche fällt auf, dass sich im Durchschnitt Unterschiede zwischen der Clusteroptimierung in Relation zu der Standardoptimierung von nur 0.45 mm ergeben. Die Genauigkeit der Messung der Positionsabweichungen liegt bei 0.5 mm. Das bedeutet die Positionsabweichungen wurden auf ca. 0.5 mm genau bestimmt, womit der errechnete Durchschnitt unter diesem Wert liegt. Insgesamt liegen 95% aller Differenzen unter 2 mm. Das Ergebnis bedeutet, dass sich die Clusteroptimierung von der Standardoptimierung im Hinblick auf die Positionsabweichungen kaum bis gar nicht unterscheidet.

Allgemein liegen 85% der Positionsabweichungen aller 90 Versuche nach der Clusteroptimierung unter 10 mm, 36% sogar unter 5 mm.

7.5.2 Analyse der optimierten Parameterwerte

Ein weiterer sehr wichtiger Punkt sind die optimierten Parameterwerte. Auch hier wurden die Werte nach der Optimierung mit den Standardparametern und den Clusterparametern verglichen. Dies geschieht auf zwei Arten. Beim ersten Vergleich werden die optimierten Parameterwerte der Initialwinkel des Dummykopfes mit den gemessenen Werten verglichen. Der zweite Vergleich bezieht sich auf die optimierten Parameter die an die im CDA festgelegten Grenzen laufen.

Die erste Untersuchung bezieht sich auf den Vergleich der Initialwinkel, da diese Parameter die einzigen neben der Startgeschwindigkeit sind, die einen gemessenen Wert als Referenz aufweisen können. Diese gemessenen Initialwinkel kommen aus der Filmanalyse und können

auf etwa 0.5° bis 1° genau gemessen werden, abhängig vom Versuchsaufbau (siehe Kapitel 3.4.1). Bei der Betrachtung des Offsets oder der Skalierungen, die auch für die Optimierung verwendet werden, ist ein solcher Vergleich nicht möglich. Besonders interessant ist bei den Initialwinkeln jener um die y-Achse, da die Rotation um die y-Achse die Hauptrotationrichtung darstellt.

Stellvertretend für die anderen Versuche, die bei der Clusterung verwendet wurden, wird der Versuch TEST201032 genauer analysiert, wobei anzumerken ist, dass folgende Untersuchung nicht nur mit diesem Versuch sondern mit mehreren Versuchen durchgeführt worden ist. Die Ergebnisse dieses Versuchs decken sich mit allen anderen Versuchen die ebenso analysiert wurden.

Die aus der Filmanalyse bestimmten Initialwinkel betragen:

$$AIX_{\text{gemessen}}: 2.4^\circ$$

$$AIY_{\text{gemessen}}: 16.6^\circ$$

$$AIZ_{\text{gemessen}}: 4.7^\circ$$

Bei dem Versuch TEST201032 handelt es sich um einen Schlittenversuch mit ECE-Sitz. Daher werden die Startgeschwindigkeiten nicht mitoptimiert. Die Clusteroptimierung erfolgt mit den Initialwinkeln AIX, AIY, AIZ, den Offsets der Beschleunigungssensoren OACX, OACY, OACZ, den Skalierungen SACX, SACZ und SAVY. Daraus ergibt sich eine Optimierung mit 9 Parametern. Die Parameterwerte der Optimierung sind in der nachstehenden Tabelle dargestellt.

AIX	2.09	[°]	SACX	103.00	[%]	SAVX		[%]
AIY	16.45	[°]	SACY		[%]	SAVY	98.58	[%]
AIZ	5.70	[°]	SACZ	99.31	[%]	SAVZ		[%]
VAX		[m/s]	OACX	-1.00	[m/s ²]	OAVX		[°/s]
VAY		[m/s]	OACY	-0.14	[m/s ²]	OAVY		[°/s]
VAZ		[m/s]	OAXZ	-0.75	[m/s ²]	OAVZ		[°/s]

Tabelle 7-15: Parameterwerte Clusteroptimierung TEST201032

Nach der Optimierung mit den Clusterparametern laufen zwei Parameter (rot) an die Grenzen. Es sind dies die Parameter SACX (Skalierung in x-Richtung) und OACX (Offset in x-Richtung). Rot gekennzeichnete Felder symbolisieren Parameter, die im Gegensatz zur Standardoptimierung bei der Clusteroptimierung nicht verwendet werden. Die Abweichungen zwischen den optimierten und den gemessenen Werten für die Initialwinkel um die x- und die y-Achse sind

nur gering. Lediglich der Initialwinkel um die z-Achse weicht um ein Grad vom Messwert ab, was innerhalb der Messgenauigkeit von liegt, die 1° beträgt.

Im Vergleich dazu zeigt die nächste Tabelle die Parameterwerte mit den Standardparametern. Es sind diese die Initialwinkel, die Offsets und Skalierungen der Beschleunigungssensoren und die Offsets und Skalierungen des Gyrosensors, jeweils in allen drei Richtungen. Die Standardoptimierung wird also mit 15 Parametern durchgeführt.

AIX	3.69	[°]	SACX	102.90	[%]	SAVX	97.00	[%]
AIY	18.15	[°]	SACY	97.00	[%]	SAVY	99.57	[%]
AIZ	4.63	[°]	SACZ	98.87	[%]	SAVZ	102.96	[%]
VAX		[m/s]	OACX	-1.00	[m/s ²]	OAVX	-10.00	[°/s]
VAY		[m/s]	OACY	0.04	[m/s ²]	OAVY	10.00	[°/s]
VAZ		[m/s]	OAXZ	-0.96	[m/s ²]	OAVZ	-3.30	[°/s]

Tabelle 7-16: Parameterwerte Standardoptimierung TEST201032

Bei der Optimierung mit den Standardparametern laufen gleich 5 Parameter an die Grenzen. Dies sind 3 Parameter mehr als zuvor bei der Clusteroptimierung. Bei der genaueren Betrachtung der Initialwinkel fällt auf, dass die Winkel um die x- und die y-Achse relativ weit vom gemessenen Wert abweichen. Der Initialwinkel um die x-Achse weicht um 1.3° vom Messwert ab, der Initialwinkel um die y-Achse sogar um 1.6°. Beide Werte liegen über der möglichen Messgenauigkeit der Filmanalyse und somit auch über dem tolerierbaren Bereich. Nur der optimierte Wert des Initialwinkels um die z-Achse stimmt gut mit der Messung überein.

Dadurch, dass die Initialwinkel bei der Clusteroptimierung besser mit den gemessenen Initialwinkeln übereinstimmen erscheinen die Parameter aus der Clusteroptimierung als plausibler.

Die zweite und vorher schon kurz erwähnte Untersuchung bezieht sich auf die Parameter die an die im CDA voreingestellten Grenzen laufen. Der Vergleich, wieviele Parameter an die Grenzen laufen wurde mit allen 90 Versuchen durchgeführt. Wie auch schon bei dem Versuch TEST201032 laufen nach der Clusteroptimierung im Schnitt 2 Parameter an die Grenzen, bei der Standardoptimierung sind es gleich 5 Parameter. Aus der Clusteroptimierung resultiert also eine Reduktion der Parameter die an die Grenzen laufen um 60%. Dadurch erscheinen die Parameterwerte auch bei dieser Untersuchung als plausibler und die Clusteroptimierung bringt eine wesentliche Verbesserung dieses Kriteriums.

7.5.3 Vergleich der Rechenzeiten

Als dritter und letzter Vergleich zwischen der neuen Clusteroptimierung und der Standardoptimierung dient die Rechenzeit der Optimierung. Zum Vergleich der Rechenzeit wurden beide Optimierungsverfahren zeitgleich gestartet und anschließend die Rechenzeit untersucht. Die Berechnungszeit kann aus dem .log File entnommen werden.

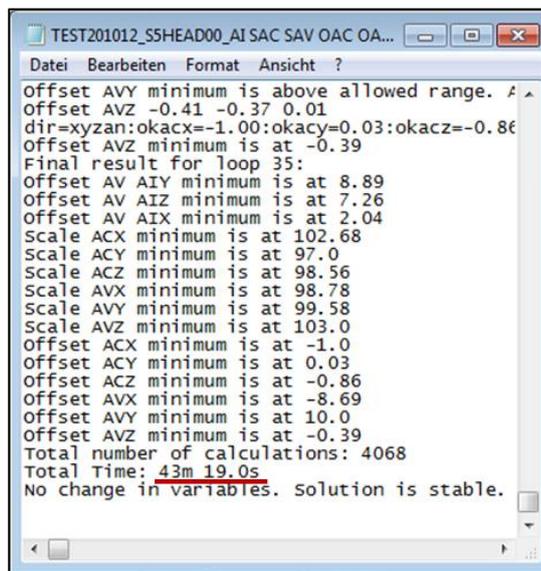


Abbildung 7.6: Berechnungszeit der Optimierung

Somit kann die Dauer der Berechnung für jeden Versuch genau bestimmt werden. Bei dem Vergleich der Rechenzeit wurden 6 Versuche untersucht. Dabei wurde darauf geachtet möglichst unterschiedliche Versuchsdurchführungen in dem Vergleich zu verwenden.

Versuch	Durchführung	Clusteroptimierung	Standardoptimierung	Reduzierung Rechenzeit
TEST201009_11	ODB,C	13min 58s	37min 16s	62.5%
TEST200916_11	Frontal, A	8min 19s	20min 01s	58.5%
TEST200910_11	ODB,B	11min 00s	22min 09s	50.3%
TEST201014	Schlitten	4min 18s	16min 04s	73.2%
TEST200907_11	Frontal, C	12min 36s	45min 04s	72.0%
TEST201032	Schlitten	7min 49s	14min 31s	46.2%
∅	-	9min 40s	25min 50s	60.5%

Tabelle 7-17: Vergleich der Rechenzeit Clusteroptimierung – Standardoptimierung

In der Tabelle sind die Rechenzeiten der unterschiedlichen Optimierungsverfahren dargestellt. Durchschnittlich dauert die Clusteroptimierung etwa 10 Minuten. Die Berechnung mit den Standardparametern dauert im Schnitt 26 Minuten. Die Zeitangaben sind natürlich abhängig vom verwendeten Rechner. Die Clusteroptimierung ermöglicht durch die Optimierung mit weniger Parametern eine Reduktion der Rechenzeit um etwa 60% (16 Minuten), was eine

deutliche Reduzierung des notwendigen Zeitaufwandes ist. Dies ist gerade im Hinblick auf den Einsatz in den Serienprozess von großem Vorteil.

7.6 Versuchsauswertung mit den Erkenntnissen aus der Clusterung

Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse der Clusterung zusammengefasst. Als erstes wird der Ablauf der Auswertung mit dem CDA mit den Erkenntnissen der Diplomarbeit erläutert. Schlussendlich werden die Vorteile der Clusteroptimierung im Vergleich zur Standardoptimierung angeführt.

7.6.1 Ablauf der Versuchsauswertung

Generell sind mehrere Optimierungsschritte nötig um zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen.

Der in dieser Arbeit entwickelte Arbeitsablauf nach den gewonnenen Erkenntnissen aus der Clusterung ist in der Abbildung 7.7 dargestellt.

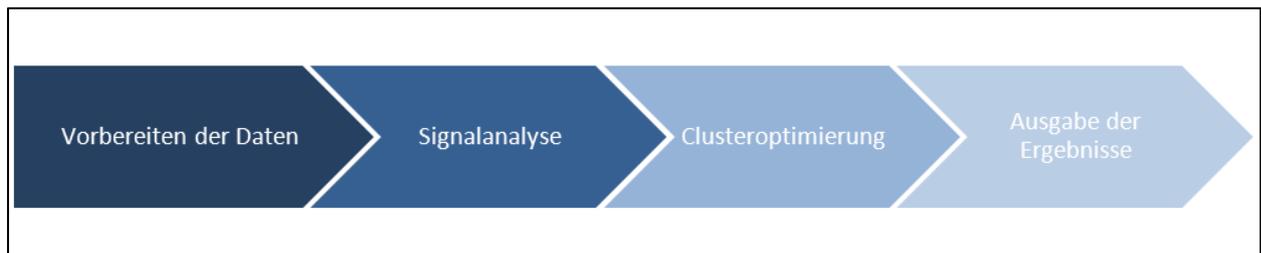


Abbildung 7.7: Ablauf der Versuchsauswertung mit den Erkenntnissen aus der Clusterung

Der erste Schritt im Ablauf der Versuchsauswertung mit dem CDA ist das Vorbereiten der Daten. Das bedeutet das Anlegen der .par- und .def-Files. Anschließend folgt die Signalanalyse. Bei der Signalanalyse wird die Bahnkurve mit den Defaultparametern, das bedeutet mit den Parametern vor der Optimierung, durchgeführt. Liegt die maximale Positionsabweichung über einem Erfahrungswert von ca. 20 cm so müssen die Ausgangssignale der Sensoren auf mögliche Anomalien überprüft werden. Das können unter anderem verpolte Signale sein, das heißt die Vorzeichen der Messsignale sind vertauscht. Des Weiteren werden die Maximalwerte der Sensoren untersucht um zu überprüfen, dass diese nicht im Grenzbereich der Sensoren liegen. Ebenso gehört die Analyse der Videokurven zur Signalanalyse um eventuelle Sprünge im Verlauf der Kurven zu erkennen und diese bei Bedarf zu eliminieren. Nach der Signalanalyse erfolgt die Optimierung mit den versuchsspezifischen Parametern aus der Clusterung. Ausgegeben wird schlussendlich die optimierte Bahnkurve.

7.6.2 Zusammenfassung der Vorteile der Clusteroptimierung

Zusammenfassend kann zur Clusteroptimierung gesagt werden, dass die Einteilung der unterschiedlichen Versuche hinsichtlich ihrer Versuchsdurchführung nach ihrer Sensitivität sehr gut funktioniert.

Das Verwenden der sensitiven Parameter für die Optimierung erlaubt bei der Clusteroptimierung bei allen Versuchsgruppen eine Reduktion der Parameter um 37%, also um mehr als ein Drittel im Vergleich zur Standardoptimierung.

Der Unterschied zwischen Clusteroptimierung und Standardoptimierung in Bezug auf die Positionsabweichung ist minimal und liegt im Durchschnitt bei 0.45 mm bezogen auf die Standardoptimierung, wobei 95% der Differenz unter 2 mm liegt. Generell liegen 85% der Positionsabweichungen nach der Clusteroptimierung unter 10 mm.

Die Analyse der Parameterwerte nach der Optimierung zeigt, dass die Werte nach der Clusteroptimierung plausibler erscheinen, da einerseits die Initialwinkel nach der Clusteroptimierung besser mit den gemessenen Werten übereinstimmen, andererseits ca. 60% weniger Parameter nach der Optimierung an die im CDA vorgegebenen Grenze laufen.

Die Durchführung der Optimierung mit den Parametern aus der Clusterung führt zu einer zusätzlichen Reduktion der Rechenzeit um 60%.

Die Clusteroptimierung mit den versuchsspezifischen Optimierungsparametern bringt zusammenfassend wesentliche Vorteile, ohne dabei erwähnenswerte Nachteile aufzuweisen und ist daher sehr gut zum Einsatz in den Serienprozess geeignet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Sensitivitätsanalyse ist ein effektives und zielführendes Hilfsmittel zur Weiterentwicklung der simulationsbasierenden Versuchsauswertung. Neben der Bestimmung der sensitiven Parameter zur Reduktion der Anzahl der Optimierungsparameter, der Bestimmung der benötigten Sensorgenauigkeiten und der Analyse der optimierten Parameterwerte auf Plausibilität ist die Einteilung bzw. Clusterung von unterschiedlichen Versuchsdurchführungen hinsichtlich ihrer sensitiven Parameter zur Definition von versuchsspezifischen Parameter der hervorstechendste Vorteil. Die Clusterung mit der daraus resultierenden Clusteroptimierung, bringt neben der einfachen Anwendbarkeit und der Verbesserung der Plausibilität der Parameterwerte eine enorme Zeitersparnis bei der Versuchsauswertung.

Größtes Hauptaugenmerk der nächsten Schritte in der Weiterentwicklung des Verfahrens im Hinblick auf Automatisierung und Vereinfachung der Anwendung. Die Bestimmung der Optimierungsparameter sollte nicht mit einem externen Programm erfolgen, sondern sollte direkt im CDA möglich sein. Auch die zeitaufwändige Vorbereitung von neuen Versuchen zur Auswertung und Optimierung mit dem CDA sollte in das Programm integriert werden. So könnten etwa Arbeitspunkte wie das Anlegen der .def und .par Files direkt im CDA erfolgen, genauso wie die Signalanalyse automatisiert werden könnte.

In der Diplomarbeit wurde kurz auf die aus der Optimierung resultierenden Restsystematiken der Positionsabweichungen eingegangen. Untersuchungen, welche die Ursachen dieser signifikanten Verläufe herausfinden sollten, führen zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen. Eine weiterführende Untersuchung dieser Restsystematiken wäre ein weiterer Schritt in der Verbesserung der simulationsbasierenden Versuchsauswertung zur Bestimmung der Kopftrajektorie.

Die simulationsbasierende Versuchsauswertung (SimbaV) oder Datenfusion ist ein Verfahren, welches sehr viele Vorteile bringt um die Kopftrajektorie zu jedem Zeitpunkt der Versuchsdurchführung zu bestimmen und trägt somit in weiterer Folge erheblich zur Verbesserung des Fahrzeugentwicklungsprozesses bei.

9 Literaturverzeichnis

Kramer F., 2009: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, 3. Überarbeitete Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden

Kramer O., 2009: Computational Intelligence, Springer Verlag Berlin, Heidelberg

Luhmann T., 2010: Nahbereichsphotogrammetrie, 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin und Offenbach

Parthier R., 2008: Messtechnik, 4.Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden

Reif K., 2010: Sensoren im Kraftfahrzeug, 1.Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden

Schmidt J., Klüver C., Klüver J., 2010: Programmierung naturanaloger Verfahren, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden

Siebertz K., van Bebber D., Hochkirchen T., 2010: Statistische Versuchsplanung, Springer Verlag, Heidelberg

Ten Hompel M., Schmidt T., 2010: Warehouse Management, 4.Auflage, Springer Verlag, Heidelberg

Trautmann T., 2009: Grundlagen der Fahrzeugmechatronik, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden

Walz G., 2011: Mathematik für Fachhochschule, Duale Hochschule und Berufsakademie, Spektrum Verlag, Heidelberg

Weicker K., 2007: Evolutionäre Algorithmen, 2.Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden

10 Internetquellenverzeichnis

ITM Uni Stuttgart 2011: Institut für Technische und Numerische Mechanik Universität Stuttgart
Homepage, <http://www.itm.uni-stuttgart.de/courses/madyn/Merkblaetter/pdf/M08.pdf>,
28.04.2011

FMS Uni Rostock 2011: Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik Universität Rostock
Homepage, <http://www.fms.uni-rostock.de/itm/vemoso/kardan.htm>, 28.04.2011

Uni Kassel 2011: Universität Kassel Homepage, http://www.uni-kassel.de/fb5/sport/forschung/forschung_ab3/bum_dyn.htm, 05.05.2011

RSF Uni Greifswald 2011: Rechts- und Staatswissenschaftliche Fakultät Ernst- Moritz-Arndt-
Universität Greifswald, http://www.rsf.uni-greifswald.de/fileadmin/mediapool/lehrstuehle/flessa/ET_OR-Lexikon.pdf, 18.05.2011

EuroNCAP 2011: EuroNCAP Homepage,
<http://de.euroncap.com/de/results/vw/golf/2009/354.aspx>, 11.08.2011

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Crash Test [EuroNCAP 2011]	2
Abbildung 1.2: Unterschiedliche Koordinatensystem am Dummykopf	3
Abbildung 1.3: Unterschied globales, lokales Koordinatensystem	4
Abbildung 1.4: Kardan-Winkel [ITM Uni Stuttgart 2011]	5
Abbildung 1.5: Schematischer Sensorausgang der Winkelgeschwindigkeit	6
Abbildung 1.6: Bestimmung der Trajektorie	7
Abbildung 1.7: g-Abgleich	9
Abbildung 1.8: Schematische Darstellung der Anordnung von Gyro- und Beschleunigungssensor	10
Abbildung 1.9: Auswirkung der unterschiedlichen Koordinatenachsen im zweidimensionalen Raum	10
Abbildung 1.10: Prinzip eines Sensors [Trautmann 2009, S.93]	12
Abbildung 1.11: Wegmessender Beschleunigungssensor [Reif 2010, S.75]	12
Abbildung 1.12: Dehnmessstreifen [Uni Kassel 2011]	14
Abbildung 1.13: Wheatstone`sche Brückenschaltung [Reif 2010, S.134]	14
Abbildung 1.14: Zusammenhänge bei der Drehbewegung [Reif 2010, S.73]	15
Abbildung 1.15: Messung der Coriolisbeschleunigung (Prinzip)	15
Abbildung 1.16: a) Aufbau und b) Struktur eines Drehratensensors [Reif 2010,S. 130]	16
Abbildung 2.1: Beschreibung CDA (Crash Data Analysis)	17
Abbildung 2.2: Erklärung OT	22
Abbildung 2.3: Erklärung VP	23
Abbildung 2.4: Auswirkung Offset-Fehler [Parthier 2008, S.80]	24
Abbildung 2.5: Auswirkung Skalierungsfehler [Parthier 2008, S.81]	25
Abbildung 2.6: Einfluss der Initiallage	25
Abbildung 2.7: Auswirkung von nicht orthogonalen Messachsen	26

Abbildung 2.8: Schiefwinkelige Messachsen	27
Abbildung 3.1: Globales und lokales Optimum	28
Abbildung 3.2: Ablauf "aktuelles Optimierungsverfahren"	32
Abbildung 3.3: Genauigkeit der Filmanalyse	33
Abbildung 3.4: Ausgleichsparabel für verschieden Parameterbereiche und Schrittweiten	34
Abbildung 3.5: Abweichung der neu berechneten Werte von den Startwerten in einem Loop ..	35
Abbildung 3.6: Ausgabe der stabilen Lösung im Optimierungsverfahren.....	36
Abbildung 4.1: Globale Sensitivitätsanalyse [Siebertz, van Bebber, Hochkirchen 2010, S.247] ..	38
Abbildung 4.2: Ablauf der Sensitivitätsanalyse	38
Abbildung 4.3: Abbruchkriterium: Displacement of 0.005m at t=0.2s	41
Abbildung 4.4: Abbruchkriterium: Distance less than 0.005m at every point	41
Abbildung 4.5: Abbruchkriterium: Sum of squared distances less than 0.005	42
Abbildung 5.1: Schema der Sensitivitätsanalyse	44
Abbildung 5.2: Durchführung der Sensitivitätsanalyse	45
Abbildung 5.3: Kalibrierprotokoll eines Beschleunigungssensors.....	49
Abbildung 5.4: Ausgabe des Ergebnisses einer Sensitivitätsanalyse im CDA.....	53
Abbildung 6.1: Bedienungsoberfläche der Optimierungsfunktion.....	58
Abbildung 6.2: Ablauf bei der Durchführung einer Optimierung.....	60
Abbildung 6.3: Signalanalyse des Videopositions- und Winkelverlaufs beim ODB Versuch.....	61
Abbildung 6.4: Positionsabweichung Vorvermessung (ODB Versuch).....	61
Abbildung 6.5: Positionsabweichung nach der Optimierung mit den messbaren Startparametern	62
Abbildung 6.6: Positionsabweichung nach der Optimierung mit zusätzlichen Sensorfehlern beim ODB Versuch	63
Abbildung 6.7: Beschleunigungsschlitten mit hydraulischem Antrieb [Kramer 2009, S.332].....	66
Abbildung 6.8: Verzögerungsschlitten mit Verzögerungseinrichtung [Kramer 2009, S.333].....	67

Abbildung 6.9: Signalanalyse des Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitsverlaufs beim Schlittenversuch.....	68
Abbildung 6.10: Signalanalyse des Videopositions- und Winkelverlaufs beim Schlittenversuch	68
Abbildung 6.11: Vergrößerung des Bereichs der Sprünge im Videopositions- und Winkelverlauf beim Schlittenversuch.....	69
Abbildung 6.12: Positionsabweichung Vorvermessung (Schlittenversuch)	70
Abbildung 6.13: Positionsabweichung Vorvermessung ohne Sprung in der Videokurve (Schlittenversuch)	70
6.14: Positionsabweichung nach der Optimierung mit den gemessenen Parametern.....	71
Abbildung 6.15: Positionsabweichung nach der Optimierung mit zusätzlichen Sensorfehlern beim Schlittenversuch.....	72
Abbildung 6.16: Positionsabweichungen TEST201101-04 nach der Optimierung mit den Standardparametern	74
Abbildung 6.17: Kategorisierung der Parameter aufgrund der aus der Optimierung resultierenden Restsystematiken	75
Abbildung 6.18: Analyse der Restsystematiken	76
Abbildung 6.19: Vergleich: Optimierung mit den sensitivsten Parametern (ODB).....	83
Abbildung 6.20: Vergleich: Optimierung mit den sensitivsten Parametern (Schlitten)	85
Abbildung 6.21: Einfluss der Optimierungsreihenfolge.....	88
Abbildung 6.22: Positionsabweichung nach Optimierung des Bereiches vor dem Airbagfenster	90
Abbildung 6.23: Positionsabweichung der gesamten Kurve mit den Parametern der Optimierung (Daten nur vor dem Airbagfenster).....	91
Abbildung 6.24: Positionsabweichung nach Optimierung des Bereiches vor dem Airbagfenster mit 10ms danach.....	92
Abbildung 6.25: Positionsabweichung der gesamten Kurve mit den Parametern der Optimierung (Daten vor und 10ms nach dem Airbagfenster).....	93
Abbildung 7.1: Ablauf der Clusterung.....	97
Abbildung 7.2: Übersicht der für die Clusterung analysierten Versuche	99

Abbildung 7.3: Bestimmung der Parameter zur Clusteroptimierung.....	103
Abbildung 7.4: Ablauf des Parameterbestimmungstools (OPA)	109
Abbildung 7.5: Bedienoberfläche des Optimierungparameterbestimmungstools	110
Abbildung 7.6: Berechnungszeit der Optimierung	115
Abbildung 7.7: Ablauf der Versuchsauswertung mit den Erkenntnissen aus der Clusterung....	116

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Offset.....	18
Tabelle 2-2: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Skalierung.....	19
Tabelle 2-3: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Schiefstellung	20
Tabelle 2-4: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Abstand der Sensoren.....	20
Tabelle 2-5: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Schiefwinkeligkeit	21
Tabelle 2-6: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Querempfindlichkeit	22
Tabelle 2-7: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Zeitversatz	23
Tabelle 2-8: Bezeichnung Sensorfehler im CDA: Verschiebung des Koordinatenursprungs.....	23
Tabelle 4-1: Vergleich der unterschiedlichen Verfahren zur Sensitivitätsbestimmung	43
Tabelle 5-1: Mögliche Sensorgenauigkeit OAC.....	48
Tabelle 5-2: Mögliche Sensorgenauigkeit OAV.....	48
Tabelle 5-3: Mögliche Sensorgenauigkeit SAC.....	49
Tabelle 5-4: Mögliche Sensorgenauigkeit SAV	49
Tabelle 5-5: Mögliche Sensorgenauigkeit Alpha AC	50
Tabelle 5-6: Sensorgenauigkeit Alpha AV	50
Tabelle 5-7: Sensorgenauigkeit AC Sensor	51
Tabelle 5-8: Sensorgenauigkeit Offset AV AI	51
Tabelle 5-9: Zusammenfassung der möglichen Sensorgenauigkeiten	52
Tabelle 5-10: Benötigte Sensorgenauigkeiten OAC.....	54
Tabelle 5-11: Benötigte Sensorgenauigkeiten SAC.....	54
Tabelle 5-12: Benötigte Sensorgenauigkeiten Alpha AC	54
Tabelle 5-13: Benötigte Sensorgenauigkeiten OAV	55
Tabelle 5-14: Benötigte Sensorgenauigkeiten SAV.....	55
Tabelle 5-15: Benötigte Sensorgenauigkeiten Alpha AV	55
Tabelle 5-16: Benötigte Genauigkeiten AC Sensor	56

Tabelle 5-17: Benötigte Genauigkeiten AI	56
Tabelle 6-1: Versuchsmethoden zu Frontkollisionen [Kramer 2009, S. 327]	59
Tabelle 6-2: Parameterwerte nach Optimierung AI, VA, OT beim ODB Versuch	63
Tabelle 6-3: Parameterwerte Optimierung AI, VA, SAC, SAV, OAC, OAV, OT beim ODB Versuch	64
Tabelle 6-4: Parameterwerte vor und nach der Optimierung AI beim Schlittenversuch.....	72
Tabelle 6-5: Parameterwerte Optimierung AI, SAC, SAV, OAC, OAV beim Schlittenversuch.....	73
Tabelle 6-6: Maximale Positionsabweichungen TEST201101-04 nach der Optimierung mit den Standardparametern	74
Tabelle 6-7: Parameterwerte nach der Standardoptimierung	77
Tabelle 6-8: Bestimmung der sensitiven Parameter bei der Schlittenversuchsreihe	78
Tabelle 6-9: Bestimmen der sensitiven Parameter (ODB Versuch).....	79
Tabelle 6-10: Bestimmen der sensitiven Parameter (Schlittenversuch)	80
Tabelle 6-11: Parametervergleich Standardoptimierung - sensitive Parameter (ODB Versuch) .	82
Tabelle 6-12: Parameterwerte Optimierung mit den sensitivsten Parametern beim ODB Versuch	84
Tabelle 6-13: Parametervergleich Standardoptimierung - sensitive Parameter (Schlittenversuch)	85
Tabelle 6-14: Parameterwerte Optimierung mit den sensitivsten Parametern beim Schlittenersuch	86
Tabelle 6-15: Übersicht Ergebnisse Optimierung mit den sensitivsten Parametern	87
Tabelle 6-16: Parameterwerte nach Optimierung des Bereiches vor dem Airbagfenster	90
Tabelle 6-17: Parameterwerte nach Optimierung des Bereiches vor dem Airbagfenster mit 10ms danach	92
Tabelle 6-18: Zusammenfassung der Auswertbarkeit von Passivversuchen.....	93
Tabelle 7-1: Detaillierter Überblick über die funktionierenden und analysierten Versuche 2009, 2010	100
Tabelle 7-2: Detaillierter Überblick über die funktionierenden und analysierten Versuche 2011	101

Tabelle 7-3: Detaillierter Überblick über die nicht analysierten Versuche	101
Tabelle 7-4: Sensitive Parameter unterschiedlicher Versuchsdurchführungen	102
Tabelle 7-5: Clustergruppe ODB 40%.....	104
Tabelle 7-6: Clustergruppe Frontal 0°	104
Tabelle 7-7: Clustergruppe ECE-Sitz.....	105
Tabelle 7-8: Clustergruppe Schlittenversuch mit Karosserieaufbau	105
Tabelle 7-9: Clustergruppe Schlittenversuch.....	106
Tabelle 7-10: Clustergruppe Fahrzeugtyp AA, A.....	107
Tabelle 7-11: Clustergruppe Fahrzeugtyp B (gemittelt)	107
Tabelle 7-12: Clustergruppe Fahrzeugtyp B.....	108
Tabelle 7-13: Clustergruppe Fahrzeugtyp C, CC, D	108
Tabelle 7-14: Vergleich Positionsabweichungen Clusteroptimierung – Standardoptimierung .	112
Tabelle 7-15: Parameterwerte Clusteroptimierung TEST201032.....	113
Tabelle 7-16: Parameterwerte Standardoptimierung TEST201032	114
Tabelle 7-17: Vergleich der Rechenzeit Clusteroptimierung – Standardoptimierung	115

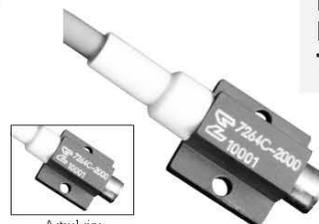
13 Anhang

Piezoresistive Accelerometer

**ENDEVCO
MODEL
7264C**

Model 7264C

- Mechanical Overtravel Stops
- Small Size, Rugged
- 500 g and 2000 g Full Scale Ranges
- DC Response - Long Duration Transients
- Crash and Shock Testing

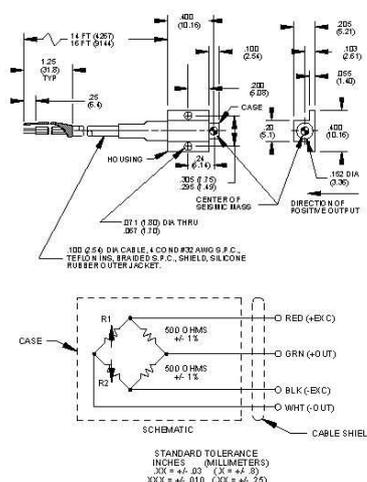


DESCRIPTION

The ENDEVCO® Model 7264C is a very low mass piezoresistive accelerometer weighing only 1 gram. This accelerometer is designed for crash testing, flutter testing, rough road testing and similar applications that require minimal mass loading and a broad frequency response. This accelerometer meets SAEJ211 specifications for anthropomorphic dummy instrumentation. It is a direct replacement for the Endevco Model 7264-2000 in that the location of the center of seismic mass is the same.

The Model 7264C utilizes an advanced micromachined sensor which includes integral mechanical stops. This monolithic sensor offers improved ruggedness, stability and reliability over previous designs. The Model 7264C has minimum damping, thereby producing no phase shift over the useful frequency range. With a frequency response extending down to dc or steady state acceleration, this accelerometer is ideal for measuring long duration transient shocks.

This accelerometer has a full bridge circuit with fixed resistors for shunt calibration. Full scale output is 400 mV with 10Vdc excitation. It is also available with less than 1% transverse sensitivity ("T" option) and less than ±25 mV zero measurand output ("Z" option).



Endevco Model 136 DC Differential Voltage Amplifier, Model 4430A Bridge Conditioner, or OASIS 2000 Computer-Controlled System are recommended as signal conditioner and power supply.

U.S. Patents 4,498,229 and 4,605,919 apply.

SPECIFICATIONS

CERTIFIED PERFORMANCE: All values are typical at 75°F (+24°C), 100 Hz and 10 Vdc excitation unless otherwise specified. Calibration data, traceable to the National Institute of Standards (NIST), is supplied.

	Units	7264C-500	7264C-2000
RANGE	g	±500	±2000
SENSITIVITY (at 100 Hz & 10g)	mV/g Typ (Min)	0.80 (0.50)	0.20 (0.15)
FREQUENCY RESPONSE			
±2%	Hz	0 to 3000	0 to 2000
±5%	Hz	0 to 4000	0 to 5000
±1dB	Hz	0 to 4000	0 to 7000
MOUNTED RESONANCE FREQUENCY	Hz	17 000	26 000
DAMPING RATIO			0.05
NON-LINEARITY			
(% of reading, to full range)	% Max		±1
REPEATABILITY			
(after full scale shock)	equiv. g		0.2



**ENDEVCO
MODEL
7264C**

Piezoresistive Accelerometer

SPECIFICATIONS—continued
PERFORMANCE CHARACTERISTICS—continued

	Units	7264C-500	7264C-2000
TRANSVERSE SENSITIVITY [1]	% Max	3	3
ZERO MEASURAND OUTPUT [2]	mV Max	±50	±50
THERMAL ZERO SHIFT			
From 0°F to +150°F (-18°C to +66°C)	mV Typ	±10	±10
	mV Max	±25	±25
THERMAL SENSITIVITY SHIFT			
From 0°F to +150°F (-18°C to +66°C)	%/F Typ	- 0.06	- 0.06
From 65°F to +95°F (+18°C to +29°C)	%/C Typ	- 0.10	- 0.10
WARM-UP TIME	%	1.0	1.0
	ms Max	1, 15 µ sec typical	1, 15 µ sec typical
BASE STRAIN SENSITIVITY (Per ISA 37.2 @ 250 µ strain)			
	Equiv. g's	< 0.1	< 0.1
MECHANICAL OVERTRAVEL STOPS			
	g's	1500 g typical, 750 g minimum	5000 g typical, 2500 g minimum

ELECTRICAL

EXCITATION [3]	10.0 Vdc
INPUT RESISTANCE [4]	300 to 900 ohms
OUTPUT RESISTANCE [4]	400 to 1600 ohms
FIXED RESISTORS	500 ohms ±1%
INSULATION RESISTANCE	100 megohms minimum at 50 Vdc; leads to case and shield; shield is connected to case but isolated from housing

PHYSICAL

CASE, MATERIAL	Green Anodized aluminum alloy
ELECTRICAL, CONNECTIONS	Integral cable, four conductor No. 32 AWG Teflon® insulated leads, braided shield, silicone jacket (-1 red, -2 white, -3 blue - cable color)
MOUNTING/TORQUE	Holes for two 0-90 mounting screws/3 lbf-in (0.3 Nm)
WEIGHT	1 gram (cable weighs 9 grams/meter)

ENVIRONMENTAL

ACCELERATION LIMITS (in any direction)			
Static		5000 g	10 000 g
Sinusoidal Vibration		1000 g pk below 3kHz	1000 g pk below 5kHz
Shock (half-sine pulse duration)		5000 g, 300 µsec or longer	10 000 g, 200 µsec or longer
TEMPERATURE			
Operating		0°F to +150°F (-18°C to +66°C)	
Storage		-65°F to +250°F (-54°C to +121°C)	
HUMIDITY		Unit is epoxy sealed	
ALTITUDE		Unaffected	

CALIBRATION DATA SUPPLIED

SENSITIVITY (at 100 Hz and 10 g pk)	mV/g
FREQUENCY RESPONSE	20 Hz to 3000 Hz, % deviation reference 100 Hz; dB plot continued from 3000 to 30 000 Hz for 7264B-500; 20 Hz to 5000 Hz, % deviation reference 100 Hz; dB plot continued from 5000 to 30 000 Hz for 7264B -2000
ZERO MEASURAND OUTPUT	mV
MAXIMUM TRANSVERSE SENSITIVITY	% of sensitivity
INPUT AND OUTPUT RESISTANCE	Ohms

ACCESSORIES

EHM35	(1) ALLEN WRENCH
EHW196	(2) SIZE-0 FLAT WASHERS
EH492	(2) 0-80 X 3/16 INCH SOCKET HEAD CAP SCREWS

OPTIONAL ACCESSORIES

24328	4 CONDUCTOR SHIELDED CABLE
7593	TRIAXIAL MOUNTING BLOCK

NOTES

- 1% transverse sensitivity available as "T" option.
- ±25 mV zero measurand output available as "Z" option
- Lower excitation voltages may be used but should be specified

- at time of order to obtain best calibration.
4. Measured at approximately 1 Vdc. Bridge resistance increases with applied voltage due to heat dissipation in the strain gage elements.
 5. The safety sleeve should be kept on unit when not in use to prevent possible handling damage.
 6. Maintain high levels of precision and accuracy using Endevco's factory calibration services. Call Endevco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turnaround time for these services as well as for quotations on our standard products.

NOTE: Tighter specifications available on special order.

Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.

ENDEVCO CORPORATION, 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA 92675 USA (800) 982-6732 (949) 493-8181 fax: (949) 861-7231
www.endevco.com Email: applications@endevco.com

1102 REV A

IES 3103-xxx 3-Axis Gyro Sensor



PRELIMINARY SHORTFORM DATA

Three axis small and light-weight gyro sensors with measuring ranges of 150 °/s, 300 °/s, 600 °/s, 1200 °/s, 2400 °/s, 3600 °/s and 4800 °/s suitable for various measurements in the crash test industry.

- **Dimensions** 28 x 28 x 15 mm³
- **Mass** only 22 grams
- **Measuring ranges** from +/- 150 °/s to +/- 4800 °/s
- **DC-Response**
- **CFC 600 Frequency response** (option)
- **Compatible with common crash test DAU's**
- **Shunt test supported**
- **Denton-ID-Module inside**



IES Ingenieurbüro für Elektronikentwicklung und Spezialgerätebau

Postanschrift
Osterholzweg 26
D-38110 Braunschweig

FON +49 5307 911130
FAX +49 5307 911131

Bankverbindung Postbank Hannover
BLZ 250 100 30, Konto 905 693 302
USTID Nr. DE 177335140

www.radenton.com

Specifications

Metrics	
Dimensions	28 x 28 x 15 mm ³
Weight	22 grams plus cable
Cable	6 m long, black PUR, open wire ends
Mounting screws	max. diameter 3.2 mm (use M3)
Accel. mount	6 holes UNF 0-80 (2 mm depth) for 3 accels 7264B or 7264C
Drill plan, dimensions in mm.	

Environment	
Temperature range	0 ... 60 °C
Acceleration	1000 g shock survival in any direction

Electrical Interface				
Power supply	Default 10 ... 15 V, approx. 30 mA (total for 3 channels) Option 5V, approx. 370 mW total (1) Option 2V5, approx. 450 mW total (1)			
Typical sensitivity	Sensitivity is independent of supply voltage and should not be evaluated from the shunt response (which is supply dependent).			
Zero output signal	max. +/- 100 mV			
Cable colours		X-Axis	Y-Axis	Z-Axis
	+ Supply	brown	beige	dark green
	- Supply or GND	orange	white	lilac
	+ Signal output	red	black	blue
	- Signal output	yellow	pink	light grey
	Shunt input	transparent	light green	dark grey
	Cable screen	Not connected to case.		

Measurement Performance	
Temperature drift of zero output signal	1 mV/K
Temperature drift of sensitivity	0.05 %/K
Linear acceleration effect	0.2 %/s/g
Cross sensitivity	max. 3 %
Nonlinearity	0.5 % FS

Range	Typ. Sensitivity	Bandwidth	Noise	CFC600-option
150 °/s	10 mV/°/s	100 Hz	0.5 °/s rms	-
300 °/s	5 mV/°/s	100 Hz	0.6 °/s rms	-
600 °/s	2.5 mV/°/s	100 Hz	0.6 °/s rms	+
1200 °/s	1.25 mV/°/s	180 Hz	0.8 °/s rms	+
2400 °/s	0.6 mV/°/s	280 Hz	4 °/s rms	
3600 °/s	0.42 mV/°/s	400 Hz	4 °/s rms	
4800 °/s	0.3 mV/°/s	400 Hz	4 °/s rms	

Ordering information: IES 3103-xxx [supply option] [CFC600 option]

xxx denotes the +/- full scale measuring range: 150 °/s, 300 °/s, 600 °/s, 1200 °/s, 2400 °/s, 3600 °/s, 4800 °/s

(1) Supply options 5V, 2V5 only available without internal ID-Module. Use external ID-Modules if required.

Information is provided without warranty and is subject to change without notice. We reserve the right to make changes whenever necessary to improve to the product. Revision 2006-01