



Patrick Michael Strasser, BSc

Bestimmung des Freiraumes bei der Bauraumuntersuchung von Schienenfahrzeugen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Alexander Ortner-Pichler
Institut für Technische Logistik

Dipl.-Ing. Johannes Hirtenlechner
Siemens AG Österreich

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Datum

Unterschrift

Kurzreferat

Für einen sicheren Betrieb von Schienenfahrzeugen müssen sowohl von der Infrastruktur, als auch vom Fahrzeughersteller normative Anforderungen erfüllt werden. Der Fahrzeughersteller bringt den Nachweis deren Erfüllung mit Hilfe einer Bauraumuntersuchung. Dabei wird der Freiraum zwischen Fahrzeug und Fahrzeugbegrenzung bestimmt. Die Fahrzeugbegrenzung ist jener Bauraum, der dem Fahrzeughersteller maximal zur Verfügung steht und ist normativ festgelegt. Damit wird ein kollisionsfreier Betrieb des Schienenfahrzeuges sichergestellt.

Diese Arbeit beinhaltet eine konzeptionelle Neuentwicklung einer anschaulichen und akkuraten Bauraumuntersuchung. Der Freiraum – das ist der Abstand zwischen Fahrzeug und Fahrzeugbegrenzung – wird im 3D CAD farblich an der Fahrzeuggeometrie visualisiert und dessen Wert anhand einer Farbskala abgelesen. Dazu wird die Fahrzeugbegrenzung spezifisch für das Fahrwerk nach DIN EN 15273 durch eine Matlab Anwendung automatisiert berechnet und in PTC Elements dargestellt. Zur Berechnung und Visualisierung des Freiraumes wurden verschiedene Methoden entwickelt.

Eine optimale Bauraumnutzung, sowie Ausschluss von Kollisionen des Schienenfahrzeuges in den immer intelligenter werdenden Bahnnetzen und eine lückenlose Erfüllung der normativen Anforderungen ist heutzutage für den Fahrzeughersteller essentiell wichtig. Oft wird im Zuge des komplexen Konstruktionsprozesses der Fokus anders gelegt und die Bauraumuntersuchung routinemäßig erledigt. Es besteht Verbesserungspotential bei der Freiraumbestimmung mit dem sich diese Masterarbeit befasst.

Das Ergebnis der Arbeit ist eine teilautomatisierte Freiraumbestimmung mit integrierter Einschränkungsberechnung nach Norm für den Konstruktionsprozess der Fahrwerke in PTC Elements. Die Siemens AG Österreich ist Auftragsgeber dieser Masterarbeit für deren Produkte die Lösung gesucht und gefunden wurde.

Abstract

To ensure safe operation of rail vehicles, infrastructure and railway manufacture have to satisfy normative regulations. The railway manufacture does that by doing clearance investigation. Whereas the clearance between the vehicle and the gauge has to be determined. The clearance is the available space of construction and is normatively regulated. Therefore, a steady operation of the rail vehicle is ensured.

This thesis contains a new development of a descriptive clearance investigation. The clearance – the distance between the vehicle and the gauge – is color-coded visualized at the surface of the vehicle's 3D CAD geometry and the value is obtained by a scale. Different methods were developed to calculate and visualize the clearance.

Optimized usage of space, as well as the exclusion of collisions of the rail vehicle in the increasingly intelligent infrastructure and a complete fulfillment of the normative requirements is essential for the vehicle manufacturer nowadays. Often in the course of the complex construction process, the focus is laid differently and the clearance investigation is routinely done. There is a potential for improvement in the clearance investigation whereby this master thesis deals with.

The result of the work is a partly automated clearance investigation with integrated limitation of the calculation according to the standard for the design process of the bogies in PTC Elements. Siemens AG Austria is the contractee of this master thesis and the solution was sought and found especially for their products.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Eidesstattliche Erklärung | 2 |
| Kurzreferat | 3 |
| Abstract | 4 |
| 1. Einleitung..... | 7 |
| 1.1. Ausgangssituation | 7 |
| 1.2. Zielsetzung | 7 |
| 1.3. Aufgabenstellung..... | 8 |
| 2. Technisches Umfeld | 9 |
| 2.1. Fahrwerk..... | 9 |
| 2.2. Bezugs- und Fahrzeugbegrenzungslinien..... | 11 |
| 2.3. Momentaner Prozess zur Freiraumbestimmung und -visualisierung | 13 |
| 3. Allgemeine Methodenentwicklung..... | 15 |
| 3.1. Allgemeiner Prozess..... | 15 |
| 3.2. Begrenzungsfläche und Analysegeometrie | 16 |
| 3.3. Bewertungskriterien der Methoden | 22 |
| 3.3.1. Quantitative Kriterien | 22 |
| 3.3.2. Qualitative Kriterien | 23 |
| 3.3.3. Gewichtung der Kriterien | 24 |
| 3.3.4. Knock Out Kriterium | 25 |
| 4. Methodenentwicklung am einfachen Testfall..... | 26 |
| 4.1. Testfall..... | 26 |
| 4.2. Übersicht der Methoden | 26 |
| 4.3. Methode 1 – Vergleiche alle Punkte zueinander (Matlab)..... | 27 |
| 4.4. Methode 2 – Gefilterte, relevante Punkte mit Kugelkoordinaten (Matlab) | 29 |
| 4.5. Methode 3 – Geometrievergleich (PTC Elements) | 31 |
| 4.6. Methode 4 – Benutzerdefinierte Analyse (PTC Elements)..... | 33 |
| 4.7. Methode 5 – Paarabstand (PTC Elements)..... | 34 |
| 4.8. Methode 6 – Volumendurchdringung (PTC Elements) | 35 |
| 4.9. Methode 7 – Abweichung zwischen Punkt und Fläche (PTC Elements)..... | 36 |
| 4.10. Methode 8 – 3D Messtechniksoftware (Powerinspect)..... | 37 |

| | |
|---|----|
| 4.11. Methodenbewertung..... | 39 |
| 4.11.1. Bewertung der Methoden bezüglich Knock Out Kriterium | 39 |
| 4.11.2. Bewertung der Methoden bezüglich quantitativer Kriterien..... | 41 |
| 4.11.3. Bewertung der Methoden bezüglich qualitativer Kriterien..... | 43 |
| 4.11.4. Zielertragsmatrix | 45 |
| 5. Konzeptionierung einer Teilautomatisation | 47 |
| 6. Exemplarische Methodenumsetzung..... | 49 |
| 6.1. Modellvorbereitung | 49 |
| 6.2. Ausgabe der Freiraumanalyse | 50 |
| 7. Zusammenfassung und Ausblick..... | 52 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 54 |
| Tabellenverzeichnis | 55 |
| Literaturverzeichnis | 56 |
| Anhang A | 57 |
| Anhang B | 77 |
| Anhang C | 78 |
| Anhang D | 82 |

1. Einleitung

1.1. Ausgangssituation

Die vorliegende Arbeit wurde als Industriearbeit der Siemens AG Österreich, vom Werk in Graz welches Fahrwerke für den modernen Schienenverkehr entwickelt und produziert, in Auftrag gegeben.

Bei der Zulassung der Fahrwerke müssen normative Anforderungen erfüllt werden. Für deren Erfüllung wird ein Nachweis erbracht, der auch als Einschränkungsnachweis bezeichnet wird. Mit 2D Einschränkungzeichnungen erbringt Siemens zurzeit den Nachweis. Motivation der Masterarbeit ist eine anschaulichere, dreidimensionale Ausführung des Einschränkungsnachweises, welche repräsentativer und anschaulicher ist als die bisher verwendeten 2D Einschränkungzeichnungen.

Die Konstruktion der Fahrwerke geschieht mit Hilfe der kommerziellen 3D CAD Software PTC Elements. Eine Bauraumuntersuchung mit Hilfe von PTC Elements sollte demnach unter anderen angedacht werden. Die 3D CAD Geometrie der Fahrwerkskomponenten bilden zusammen mit der Begrenzungsfläche die Ausgangssituation der Masterarbeit. Die Begrenzungsfläche – auch Fahrzeugbegrenzung genannt – ist normativ geregelt und entspricht dem Bauraum, der dem Fahrwerkshersteller maximal zur Verfügung steht.

1.2. Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die Berechnung und Visualisierung des Freiraumes an den für die Einschränkung relevanten Fahrwerksgeometrien. Als Freiraum wird der Abstand zwischen Fahrwerk und Begrenzungsfläche bezeichnet. Der Freiraum wird bei der Bauraumuntersuchung – auch Freiraumuntersuchung genannt – ermittelt und im Einschränkungsnachweis dargelegt. Fahrwerksgeometrien, die sich in der Nähe der Begrenzungsfläche befinden sind für die Einschränkung relevant. Ab einem Abstand der größer als 200mm ist müssen Geometrien nicht mehr berücksichtigt werden, wobei sich die Grenze fahrwerkspezifisch ändern kann. Die Visualisierung des Abstandwertes soll direkt am Fahrwerk anhand eines Farbverlaufes mit Skalierung erfolgen.

Außerdem soll die Stelle des minimalsten Freiraumes am Fahrwerk eindeutig erkennbar sein und dessen Wert ausgegeben werden. Anhand des Farbverlaufes lässt sich erkennen, dass die restlichen Bereiche weiter von der Fahrzeugbegrenzung entfernt sind und somit mehr Freiraum besitzen. Eine Manipulation der Farbskala ist optional gefordert, dabei kann der individuelle Benutzer die Minimal- und Maximalwerte, als auch die Farbstufung frei wählen.

1.3. Aufgabenstellung

Aufgabe der Masterarbeit ist eine Methodenentwicklung und -bewertung zur Freiraumbestimmung und -visualisierung am Fahrwerk. Die Methoden sollen mit Hilfe gängiger Bewertungswerkzeuge beurteilt werden und für die am besten geeignete Methode erfolgt eine detaillierte Ausarbeitung. Eine Teilautomatisierung der ausgewählten Methode soll konzeptioniert werden, wobei der Automatisierungsgrad nicht vorgegeben ist. Teilautomatisiert wird die Freiraumberechnung und -visualisierung. Es ist damit zu rechnen, dass operative Vor- und Nachbereitung des Anwenders am 3D CAD Modell des Fahrwerks durchzuführen sind. Die ausgewählte Methode wird exemplarisch am Siemens Fahrwerk SF100L umgesetzt. In Abbildung 1 ist repräsentativ Fahrwerk SF400 dargestellt, welches aus derselben Fahrwerksfamilie stammt, da sich Fahrwerk SF100L noch nicht im Siemens Produktportfolio findet.



Abbildung 1: Fahrwerk SF400 (Quelle: Siemens Produktportfolio)

In Kapitel 4.3 bis 4.10 werden die entwickelten Methoden vorgestellt, die Bewertung und Auswahl folgt in Kapitel 4.11. Konzepte zur Teilautomatisierung sind in Kapitel 5 zu finden und die Anwendung der Methode an einem Beispiel aus der Praxis beschreibt Kapitel 6.

2. Technisches Umfeld

Das Werk Graz der Siemens AG Österreich entwickelt und produziert Fahrwerke für den modernen Schienenverkehr. Als einer der führenden Fahrwerkshersteller beschäftigt der Standort in etwa 1000 Mitarbeiter mit einem jährlichen Output von ca. 3000 Fahrwerken. Innovative Ansätze gehören zu den Grundsätzen des Unternehmens, weshalb die vorliegende Masterarbeit in Auftrag gegeben wurde.

2.1. Fahrwerk

Im Fahrwerk¹ eines Schienenfahrzeuges werden mehrere Radsätze in einem Gestell, das sich unter dem Fahrzeug um die lotrechte Achse verdrehen und im Gleisbogen annähernd tangential einstellen kann, verbaut. Es werden entweder zwei oder drei Radsätze eingesetzt, je nachdem ob besondere Anforderungen an die Tragfähigkeit oder die Zugkraftübertragung bei Lokomotiven gestellt sind. [1]

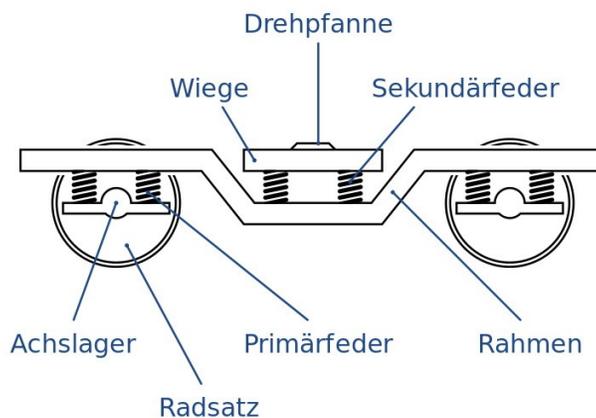


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Fahrwerks (externe Quelle: Partim (Username))

Die beiden gegenüberliegenden Räder sind starr durch eine Radsatzwelle miteinander verbunden und bilden eine Einheit, welche als Radsatz bezeichnet wird. Diese sind in den Radsatzlagergehäusen drehbar gelagert und geführt. Hierbei kann zwischen Säulen- und Schwingenführung unterschieden werden. Diese sind in Abbildung 3 gegenüber gestellt.

¹ Die Bezeichnungen Fahrwerk und Drehgestell werden synonym verwendet, in dieser Arbeit wird die Bezeichnung mit Fahrwerk vorgenommen.

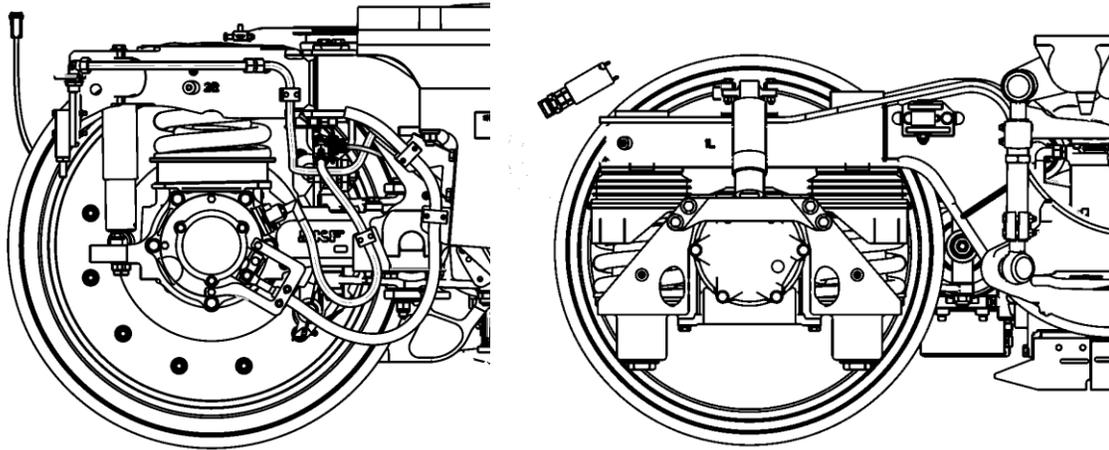


Abbildung 3: Gegenüberstellung Schwingen- Säulenführung (v.l.n.r.) (Quelle: Siemens intern)

Die Primärfederung zwischen Radsatzlagergehäuse und Rahmen federt Unebenheiten und Verwindungen des Gleises. Sie wird als Stahlschraubendruck- oder Gummischichtfeder ausgeführt. Zusätzlich kann ein Primärdämpfer angebracht werden. Darauf aufbauend befindet sich der Rahmen mit allen Anbauteilen. Der Rahmen selbst besteht aus Längs- und Querträgern, die in einer offenen oder geschlossenen Schweißkonstruktionsbauweise miteinander verbunden sind. Die Querträger können entweder innerhalb oder außerhalb der Radsätze angeordnet sein. Sind sie außerhalb angeordnet, so spricht man von einer geschlossenen Bauform. Sind die Querträger innerhalb der Radsätze angeordnet, so entsteht ein relativ verwindungsweicher Rahmen in offener Bauweise (auch als H – Rahmen bezeichnet). Folge dessen kann sich der Rahmen bei Gleisunebenheiten verwinden und anpassen. Der Rahmen samt Konsolen, Bremsscheiben und -zangen, Verrohrung, Elektromotor, usw. bilden die primärfederten Massen des Fahrwerks. Güterwagenfahrwerke besitzen meist nur eine Federstufe. Reisezugwagen für den Personenverkehr benötigen aus Komfortgründen noch eine zweite Federstufe. Die Sekundärfeder ist, wie in Abbildung 2 zu sehen, am Rahmen angeordnet. Diese kann als Stahlschraubendruck- oder Luftfeder ausgeführt sein. Die Luftfeder ermöglicht eine Niveauregulierung des Wagenkastens. Auf den Sekundärfedern ist die Wiege befestigt, wo der Wagenkasten aufgesetzt wird. Ist die Wiege als gasdichter Aluminiumguss ausgeführt, übernimmt diese zusätzlich den pneumatischen Ausgleich der beiden Luftfedern. Als eigentliche Verbindung zwischen Fahrwerk und Wagenkasten dient ein Drehzapfen, oder auch Drehpfanne genannt. Dieser übernimmt die Längskräfte des Schienenfahrzeugs. Ein Querdämpfer zwischen Drehzapfen und Rahmen dämpft laterale Bewegungen. Die Sekundärfedern werden mit einem Sekundärvertikaldämpfer ausgeführt um die Wankbewegungen des Wagenkastens zu reduzieren. Die Wankbewegungen, das sind Drehbewegungen um die Längsachse (Fahrtrichtung) gekoppelt mit Querbewegungen, werden von einem sogenannten Wanksystem mit Torsionsfedern aufgenommen. Ein Torsionsstab federt die Wankbewegungen des Wagenkastens und ist durch Zugdruckstangen angelenkt. Ebenfalls, zwischen Rahmen und Wagenkasten angebracht ist ein Schlingerndämpfer, der Drehbewegungen um die Hochachse niederfrequent dämpft.

Die Fahrwerkkomponenten lassen sich dreierlei kategorisieren. Die Radsätze mit Getriebe bilden die ungefederten Massen. Der Rahmen mit Anbauteilen stellen die primärgefederten Massen dar, wobei ein Großteil der Komponenten am Fahrwerk primärgefedert ist und die sekundärgefederten Massen bilden die Schnittstelle zum Wagenkasten. Elemente, die zwischen den Federstufen angebracht sind, werden als Koppellemente bezeichnet (z.B. Federn, Dämpfer, Radsatzlagergehäuse, usw.). Die Radsätze besitzen im Gleis ein Spurspiel, in dem das Schienenfahrzeug im Betrieb sich seitlich bewegt. Das Spurspiel erweitert sich im Laufe der Zeit als Folge von Verschleiß. Der Spurkranz des Rades begrenzt das Spurspiel. Übliche Werte für das Spurspiel sind minimal fünf Millimeter bei nominalem Spurspiel und 55mm bei maximal verschlissenen Zustand. Gegenüber den ungefederten Massen bewegt sich die primäre Stufe um die primären Federwege, die sekundäre Stufe noch zusätzlich um die sekundären Federwege. Zusätzlich zu den geradlinigen Bewegungen treten Drehbewegungen des Fahrwerks und des Wagenkastens um alle drei Raumachsen auf. Diese Drehbewegungen erscheinen gekoppelt mit geradlinigen Bewegungen. Das Fahrwerk kann als eine Serienschaltung zweier Federstufen abstrahiert werden. Durch die Bewegungen der Federstufen entsteht eine Hüllkurve, welche maßgebend für die weitere Freiraumanalyse ist.

2.2. Bezugs- und Fahrzeugbegrenzungslinien

Die Infrastruktur und der Fahrzeugbauer bzw. -betreiber legen unter gegenseitiger Abstimmung die zulässige Größe der Fahrzeuge fest. Die Bezugslinie ist für beide Parteien gültig und wird international in Regelwerken definiert. Ausgehend davon ergibt sich die für die Infrastruktur relevante Grenzlinie für feste Anlagen, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, und die Fahrzeugbegrenzungslinie, welche für den Fahrzeugbauer einzuhalten ist.

Bezugslinien unterscheiden sich von der jeweiligen Bahnanwendung und sind ebenfalls von der Spurweite des Gleises abhängig und auch regional unterschiedlich. Eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Bezugslinien zeigt Abbildung 4.

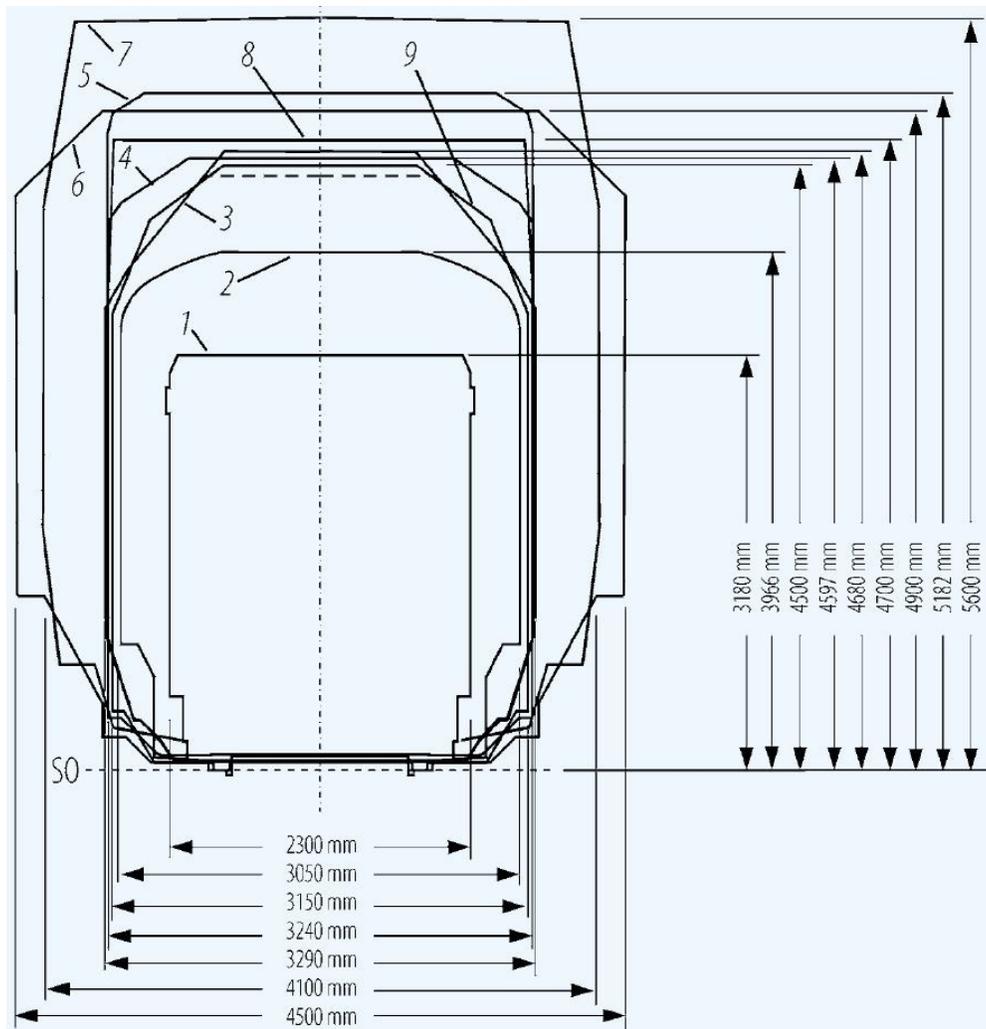


Abbildung 4: Bezugslinien (Bild 2 aus [2])

1 U-Bahn Berlin Kleinprofil (Normalspur), 2 Südafrikanische Profil für Kapsurbahnen Spoor-net, 3 Europäisches Profil G2, 4 plate B, 5 plate F, 4 und 5 amerikanische Umgrenzungsprofile, 6 Rheinbraun (Kohlenbahn in Deutschland), 7 Transmanche-Link (Ärmelkanaltunnel), 8 Europäisches GC-Profil, 9 Iran Railways [2]

In Österreich und Deutschland wird das Europäische Profil GI2 [3] für den Vollbahnbereich angewendet. Der untere Bereich des Profils wurde in vorliegender Masterarbeit verwendet.

Die Fahrzeugbegrenzungslinien sind ausgehend von der Bezugslinie, die um die Quer- und Vertikaleinschränkung reduzierten 2D Linien. Die Norm gibt in Formeln an, wie die Einschränkung zu berechnen ist. Diese Formeln sind für die Bestimmung der Fahrzeugbegrenzungslinien anzuwenden. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Gegenüberstellung der Bezugslinie mit der eingeschränkten Fahrzeugbegrenzungslinie für ungedeferte Massen. Während die Vertikaleinschränkung ein fester Wert ist, um welchen das Profil verschoben wird, ist die Lateraleinschränkung

von der Höhe über Schienenoberkante abhängig. Auf der Ordinate ist im Ursprung die Schienenoberkante.

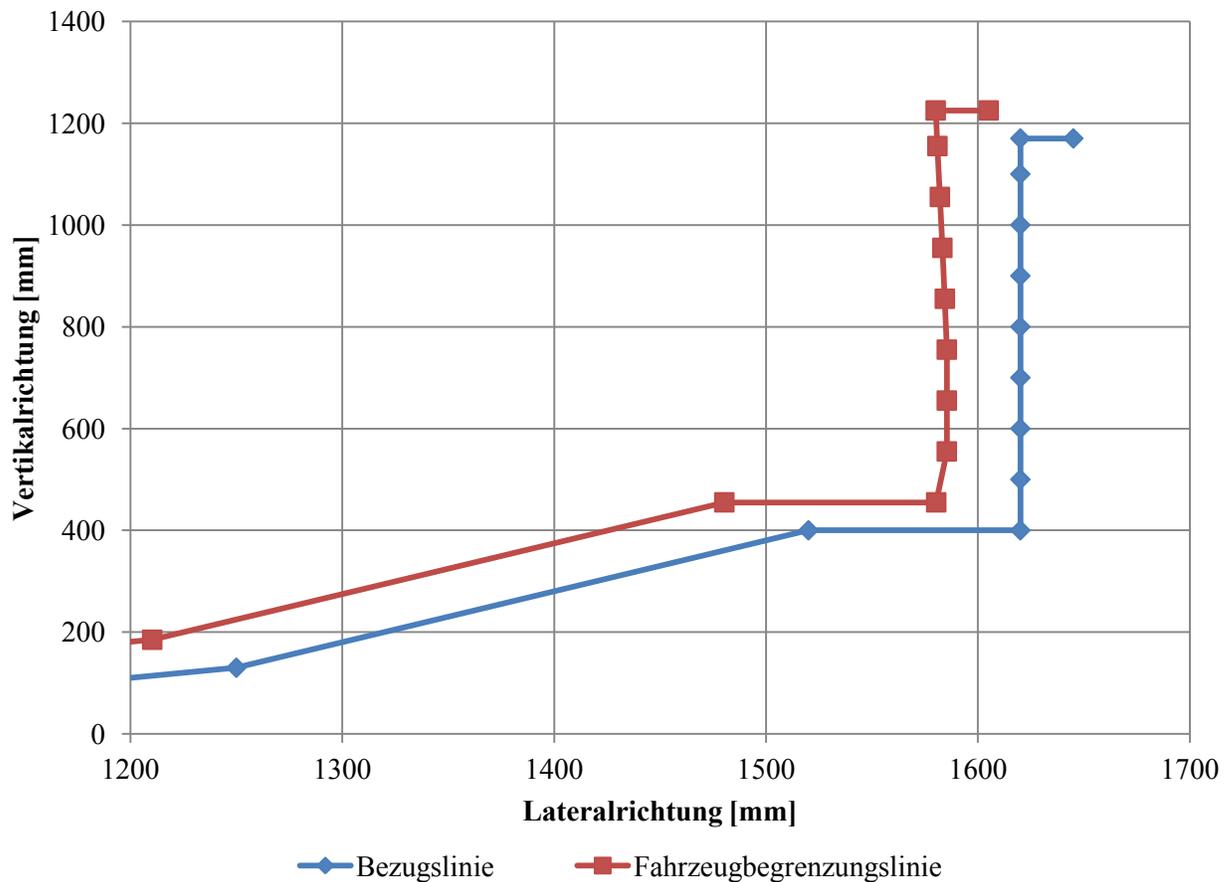


Abbildung 5: Gegenüberstellung Fahrzeugbegrenzungslinie und Bezugslinie

2.3. Momentaner Prozess zur Freiraumbestimmung und -visualisierung

Nach derzeitiger Vorgehensweise wird bei der Konstruktion der Fahrwerke die 2D Bezugslinie aus der Norm als Skizze in das 3D Fahrwerksmodell in PTC Elements eingefügt. Die Linie wird anschließend um feste Werte vertikal verschoben und lateral ebenfalls um einen festen Versatz verschmälert. Der Einfluss der Höhe über Schienenoberkante auf den Versatz bleibt bei der Lateraleinschränkung unberücksichtigt. Die Begrenzungslinie für ungefederte Massen ergibt sich durch vertikalen Versatz um Radverschleiß und lateralen Versatz um das (maximale) Spurspiel². Die Begrenzungslinie wird ebenfalls in PTC Elements als Skizze mit dem Fahrwerk angezeigt. Ein weiterer Versatz um die primären und sekundären Vertikal- und Querfederwege legt die Begrenzungslinien für primäre und sekundäre Massen fest. Insgesamt werden grundsätzlich vier Linien angezeigt, welche nach Tabelle 1 definiert sind. In Abbildung 6 ist die Begrenzungslinie

² Das maximale Spurspiel [7] errechnet sich aus der Hälfte der Differenz aus maximaler Spurweite des Gleises und minimalen Spurmaß des Radsatzes.

ungefederter Massen nach momentaner Vorgehensweise zusammen mit der Bezugslinie dargestellt. Wieder ist auf der Ordinate im Ursprung die Schienenoberkante. Im Vergleich mit Abbildung 5 wird der Einfluss der Höhe über Schienenoberkante auf den lateralen Versatz deutlich. Ab 400mm über Schienenoberkante sind die berechneten Punkte der Fahrzeugbegrenzung nach momentaner Vorgehensweise vertikal auf einer Geraden aufgefädelt, während in Abbildung 5 die berechneten Punkte in Richtung Bezugslinie ausgebaucht sind.

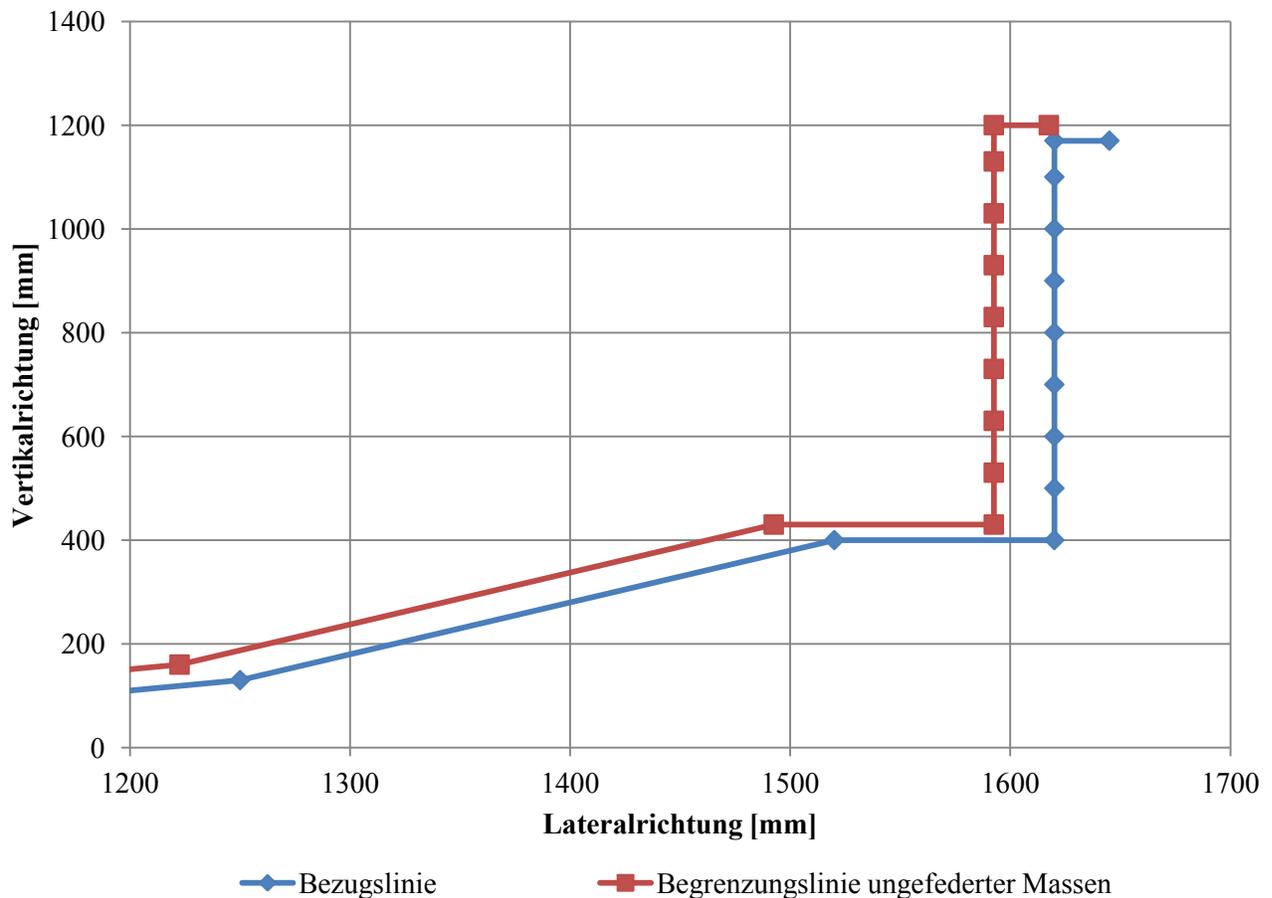


Abbildung 6: Begrenzungslinie ungefederter Massen mit Bezugslinie bei momentaner Vorgehensweise

Tabelle 1: Versatz der Bezugslinie bei momentaner Vorgehensweise

| | Lateraler Versatz | Vertikaler Versatz |
|--------------------------|---|---|
| Bezugslinie aus Norm | Bezug (Nullversatz) | Bezug (Nullversatz) |
| Ungefederte Massen | (Maximales) Spurspiel | Radverschleiß |
| Primärgefederte Massen | Spurspiel plus Querfederweg primär | Radverschleiß plus Vertikalfederweg primär |
| Sekundärgefederte Massen | Spurspiel plus Querfederweg primär plus Querfederweg sekundär | Radverschleiß plus Vertikalfederweg primär plus Vertikalfederweg sekundär |

Wird nun das Fahrwerk im Aufriss mit den projizierten Begrenzungslinien betrachtet, so kann mit Hilfe ein- und ausblenden von Fahrwerksbaugruppen festgestellt werden, ob diese innerhalb

der Begrenzungslinien liegen. Der Freiraum wird manuell mit dem Mess-KE aus PTC Elements ermittelt. Der Einschränkungsnachweis selbst wird mit 2D Einschränkungzeichnungen (Abbildung 7) erbracht. Diese stellen das Fahrwerk im kritischen Querschnitt zusammen mit der Begrenzungslinie dar. Der Freiraum wird in der Zeichnung bemaßt und dadurch nachgewiesen. Abbildung 7 zeigt die sekundäre Federstufe zusammen mit der entsprechenden Begrenzungslinie. Der Schlingerdämpfer ist hier das kritische Bauteil. In der Detailansicht wird ein Freiraum von 6,15mm nachgewiesen.

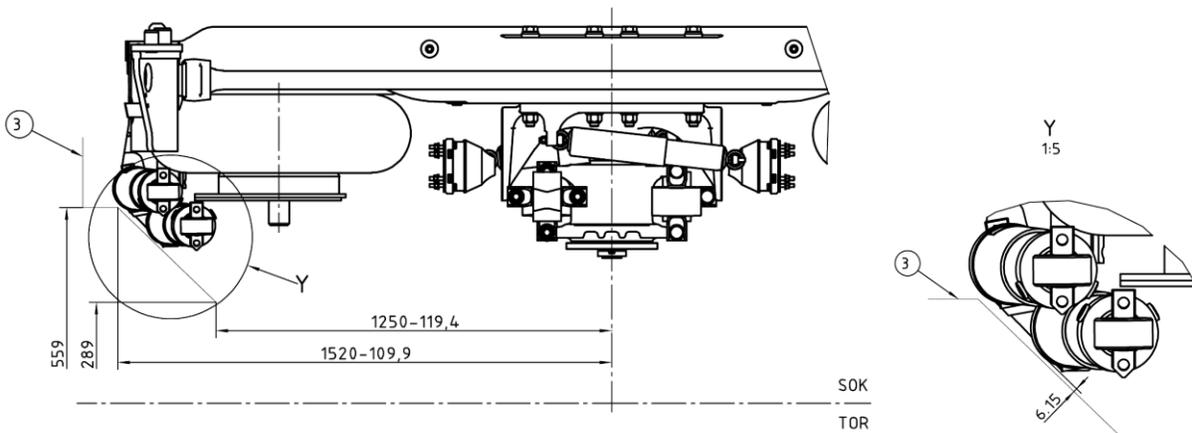


Abbildung 7: Auszug einer Einschränkungzeichnung (Quelle: Siemens intern)

3. Allgemeine Methodenentwicklung

3.1. Allgemeiner Prozess

Zur Berechnung des Abstandes, der in der Freiraumbestimmung benötigt wird, können verschiedene Methoden angewendet werden. Diese basieren entweder auf einer Abstandsberechnung zwischen Punkten im Raum oder auf einer Volumendurchdringung. Bei der erst genannten Methode werden Algorithmen verwendet, die im einfachsten Fall den räumlichen Abstand zweier Punkte berechnen. Ebenfalls werden Algorithmen angewendet, die den Abstand zwischen Punkt und Fläche im Raum darstellen. Bei der Volumendurchdringung wird entweder schrittweise aufgedickt bis eine Kollision festgestellt werden kann oder es werden Volumina miteinander verglichen und deren Abweichung stellt den zu ermittelnden Freiraum dar.

Der allgemeine Prozess (Eingabe – Manipulation – Ausgabe) ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Eingabe entspricht der in Kapitel 1.1 dargestellten Ausgangssituation. Innerhalb der einzelnen Methoden konvertiert der Anwender die in Kapitel 3.2 beschriebene Analysegeometrie in ein Format, das für die jeweilige Methode geeignet ist. Diese Tätigkeit wird in Abbildung 8 als Modellvorbereitung bezeichnet. Anschließend folgt die Freiraumanalyse. Hier wird der Abstand durch einen Algorithmus berechnet. Die Automatisierung der Methode soll zumindest diesen Teil der Methode abdecken. Das Optimum im Automatisierungsgrad wäre die Vollautomatisierung der Methode. Die automatisierten Schritte der Methode sollten jedoch vom Anwender be-

treut werden, um bei Meldungen des Computers entsprechende Aktionen setzen zu können. Wenn nötig, werden im letzten Schritt der Methode die Ergebnisse aufbereitet. Dieser Schritt entfällt wenn die Ergebnisaufbereitung automatisiert geschieht. Das Gleiche gilt für die Vorbereitung. Die Ausgabe sind Screenshots der Analyseergebnisse mit Farbskala abgespeichert im gewünschten Bildformat für den Einschränkungsnachweis.

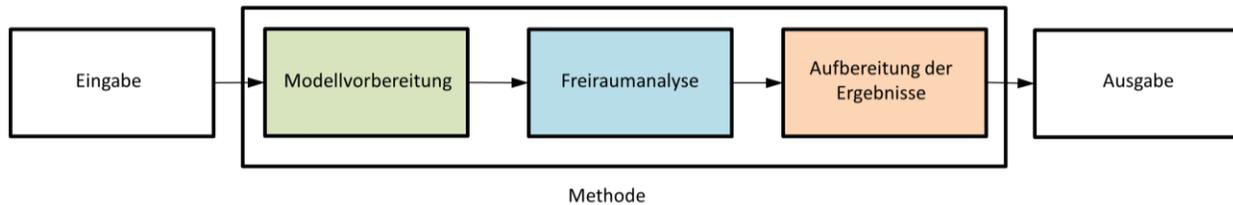


Abbildung 8: Allgemeiner Prozess

3.2. Begrenzungsfläche und Analysegeometrie

Für einen sicheren Betrieb des Schienenfahrzeuges muss die Einhaltung der Fahrzeugbegrenzung sichergestellt werden. Die Begrenzung ist um Federwege, Spurspiel, Toleranzen, Radverschleiß und Sicherheitsfaktoren gegenüber der Bezugslinie reduziert. Die Länge des Fahrzeuges führt zu einer weiteren lateralen Reduktion aufgrund der Gleisbogenkrümmung [2]. Einzüge und Einschnürungen außerhalb und innerhalb der Führungsquerschnitte müssen berücksichtigt und abgezogen werden. Wie Abbildung 9 zeigt, ergibt sich eine zu den Wagenkastenenden hin zugezogene und in Richtung Fahrzeugmitte hin eingezogene Begrenzung.

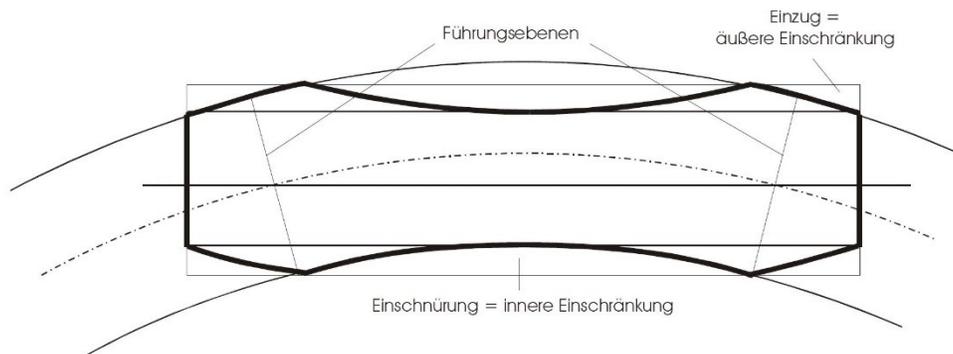


Abbildung 9: Einschränkung aufgrund Bogenkrümmung (Quelle: TU Graz Skriptum)

In Längsrichtung wird die Bezugslinie aus der Norm in jedem Querschnitt um die Einschränkung reduziert und es ergibt sich eine dreidimensionale Begrenzungsfläche. Diese Begrenzungsfläche entspricht den zur Verfügung stehenden Platz für das Fahrzeug in Nominalstellung. Das bedeutet, das Fahrzeug wird ungefedert und unverschlissen betrachtet.

Für die Erstellung der Fahrzeugbegrenzungsfläche in 3D CAD wurde die folgende Vorgehensweise für die Vollbahn³ entwickelt. Der Konstrukteur gibt die wesentlichen Fahrwerkparameter in eine Excel Eingabemaske ein und wählt die entsprechende Bezugslinie. Es sind fahrwerksspezifische Größen anzugeben, die in den Formeln nach [3] angegeben sind, Radsatzabstand, Drehzapfenabstand, Spurweite, Spurmaß, Radverschleiß, primäre und sekundäre Vertikal- und Querfederwege, um nur einige Parameter zu erwähnen. Anschließend wird eine Matlab Applikation ausgeführt, die die Berechnung der Fahrzeugbegrenzung durchführt. Der Matlab Code der auszuführenden Hauptdatei und die Funktion für die Erzeugung einer 3D Begrenzungsfläche (mit gleisbogenabhängigem Querspiel) ist in Anhang A zu finden. Die Matlab Applikation gibt als Ergebnis eine Textdatei (IBL-Datei) aus, welche im 3D CAD übernommen wird. Nach Einfügen der Textdatei erscheint die errechnete Fahrzeugbegrenzung dreidimensional als Sammelfläche in PTC Elements. In Abbildung 10 ist eine Begrenzungsfläche dargestellt, die mit der eben beschriebenen Methode erzeugt und in PTC Elements eingefügt wurde.

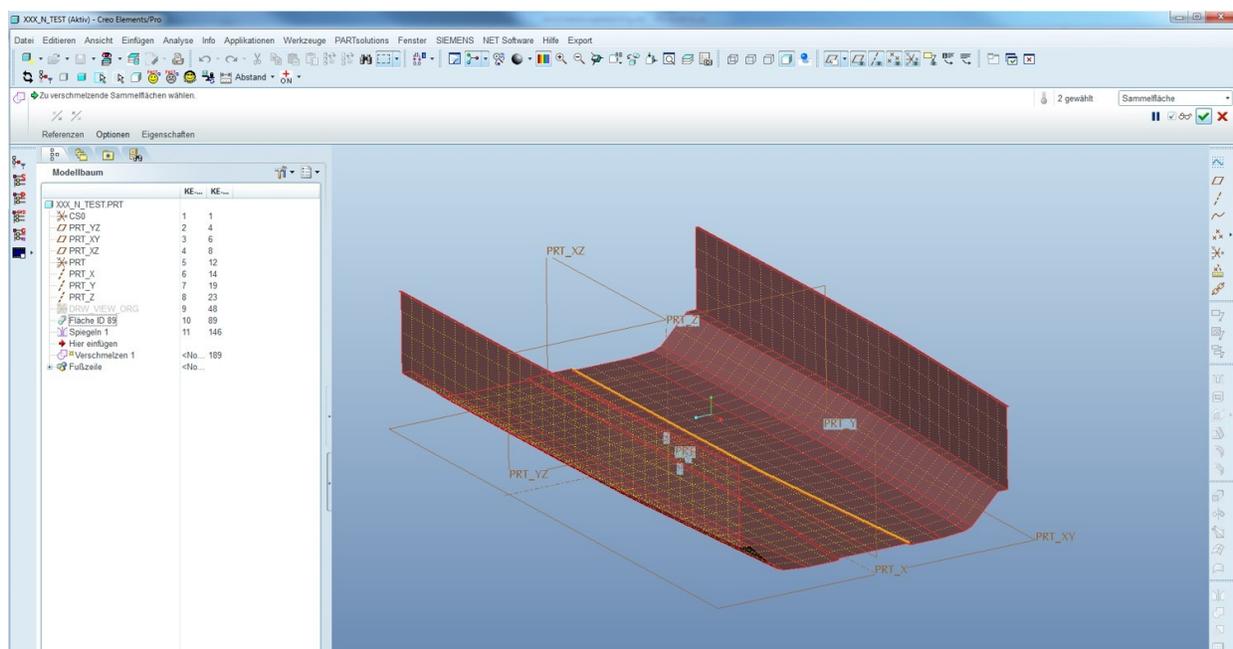


Abbildung 10: Fahrzeugbegrenzungsfläche in PTC Elements eingefügt

Das Fahrwerk besteht aus drei Federstufen. Für jede Federstufe ist eine Begrenzungsfläche zu generieren. Die Begrenzungsfläche jeder Federstufe ist der maximale Bauraum, welcher dem Fahrwerkshersteller bei der Konstruktion zur Verfügung steht, um Kollisionen mit den festen Anlagen der Infrastruktur, sowie dem Gegenverkehr im Betrieb auszuschließen und dem Gutachten für die Abnahme gerecht zu werden.

³ Es werden all jene Schienenfahrzeuge als Vollbahn bezeichnet, welche keine Straßen- und Überlandbahnen, Stadtbahnen, Metros oder Sonderbahnen sind. [7]

Für die Erstellung einer Freiraumanalyse ist es notwendig eine Analysegeometrie aus der Ausgangssituation (Abbildung 11) – das ist die 3D CAD Fahrwerksgeometrie mit Begrenzungsfläche – zu erzeugen. Die Erzeugung erfolgt entweder durch eine Schrumpfverpackung oder durch ein Bewegungsmodell. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, können sich die Federstufen innerhalb der vertikalen und lateralen Federwege zueinander bewegen und es kann eine Hüllkurve mit einem Bewegungsmodell erzeugt werden.

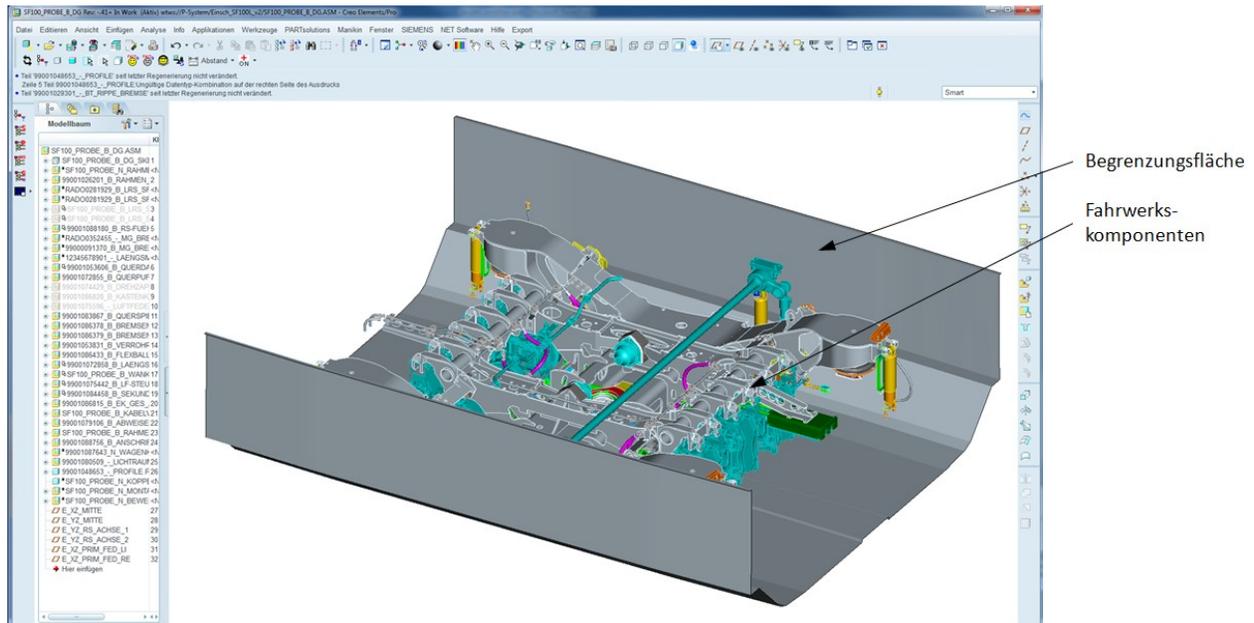


Abbildung 11: Ausgangssituation

PTC Elements bietet die Möglichkeit einer Schrumpfverpackung [4]. Um nur die für die Einschränkung relevanten Fahrwerksgeometrien zu analysieren wird zuerst ein Materialschnitt der Baugruppe durchgeführt. Dieser wird in PTC Elements mit einem Extrusionskörper im Baugruppenmodus ausgeführt. Der Materialschnitt wird im Abstand von ca. 200mm von der Begrenzungsfläche gelegt. Damit kann die Schrumpfverpackung nur auf die für die Einschränkung relevanten Geometrien angewendet werden. Bei der Schrumpfverpackung wird die Geometrie von einer triangulierten Fläche angenähert und im STL-Format abgespeichert. Es ergeben sich Abweichungen zwischen der Fahrwerksgeometrie und der triangulierten Fläche. Die maximale Geometrieabweichung hängt von der Qualitätsstufe ab, die bei der Erzeugung der Schrumpfverpackung einstellbar ist. Die Qualitätsstufen stehen im Zusammenhang mit der Anzahl der Dreiecke der Schrumpfverpackung, der Dateigröße (STL-Datei) und der maximalen Geometrieabweichung. Der Zusammenhang zwischen Dreiecksanzahl und Geometrieabweichung wird abstrakt in Abbildung 12 gezeigt. Der strichlierte Kreis symbolisiert die Idealgeometrie und das Drei- bzw. Sechseck eine triangulierte Schrumpfverpackung mit hoher und niedriger Dreieckszahl. Je höher die Dreiecksanzahl ist, desto geringer die Abweichungen und vice versa.

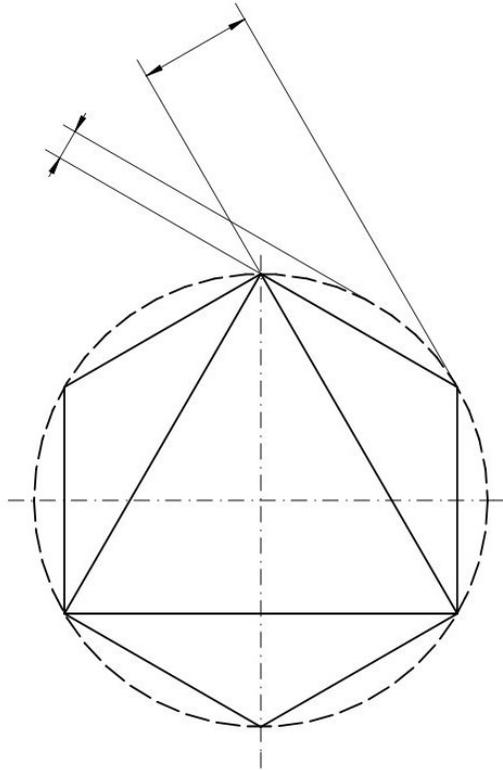


Abbildung 12: Abweichung von der Idealgeometrie

Es wurden Schrumpfverpackungen des Fahrwerks SF100L jeder Qualitätsstufe (eins bis zehn) erzeugt und als STL-Datei abgespeichert. Dabei wurde das komplette Fahrwerk für die Untersuchung verwendet, also nicht auf einzelne Federstufen reduziert. In Abbildung 13 ist das Fahrwerk in Rot dargestellt, welches von der Schrumpfverpackung (Blau) durchdrungen wird. Es ist ersichtlich, dass mit steigender Qualitätsstufe die Fahrwerksgeometrie immer besser durch die Schrumpfverpackung angenähert wird. Die Dateigröße der STL-Datei sowie die Anzahl der Dreiecke der triangulierten Fläche der Schrumpfverpackung wurden notiert. Ebenfalls wurde die jeweilige Schrumpfverpackung mit der Fahrwerksgeometrie, von der die Schrumpfverpackung erzeugt wurde, gemeinsam im CAD, wie in Abbildung 13 angezeigt und begutachtet. Die maximale Geometrieabweichung wurde manuell ermittelt und das Maß im CAD gemessen und notiert. Abbildung 14, Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die Zusammenhänge.

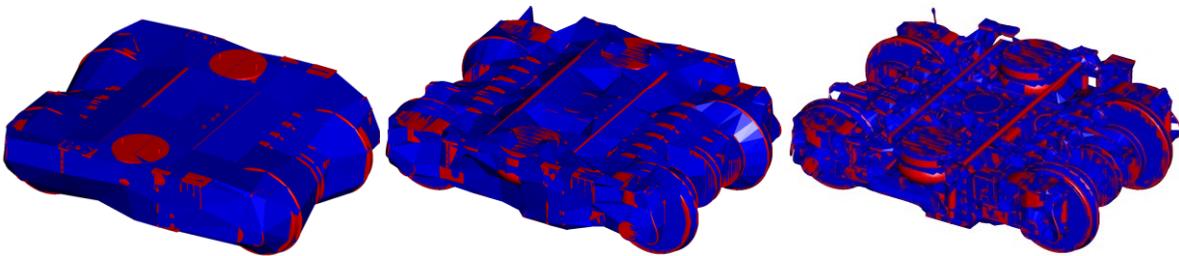


Abbildung 13: STL Export der Schrumpfverpackung bei Qualitätsstufe zwei, fünf und acht (v.l.n.r.)

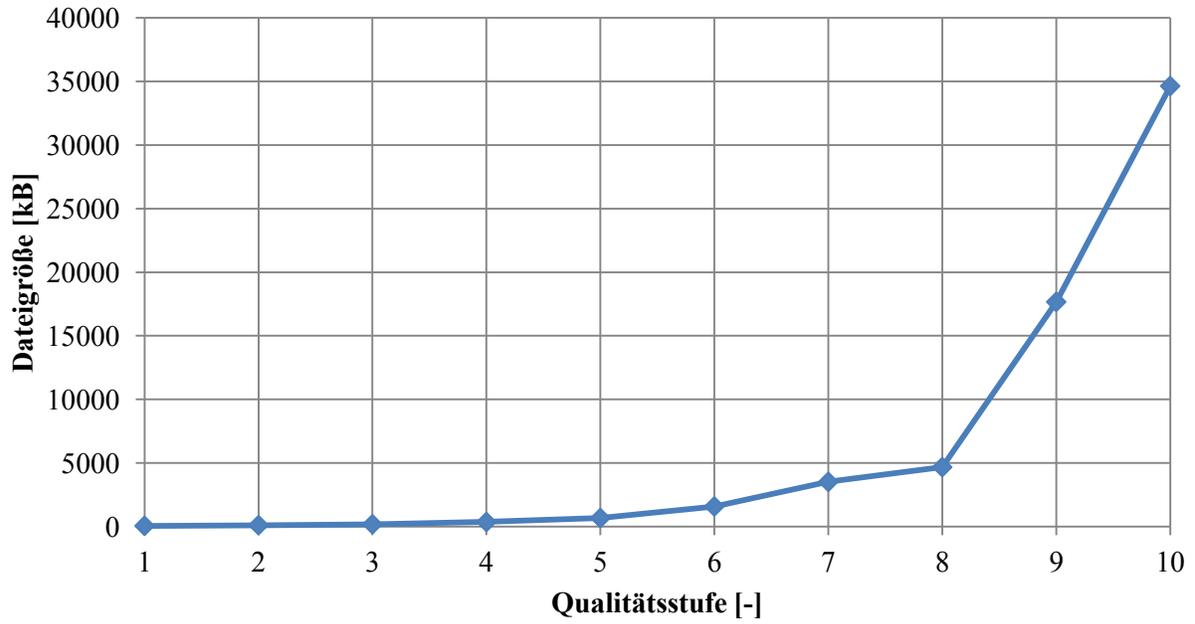


Abbildung 14: Verlauf der Dateigröße

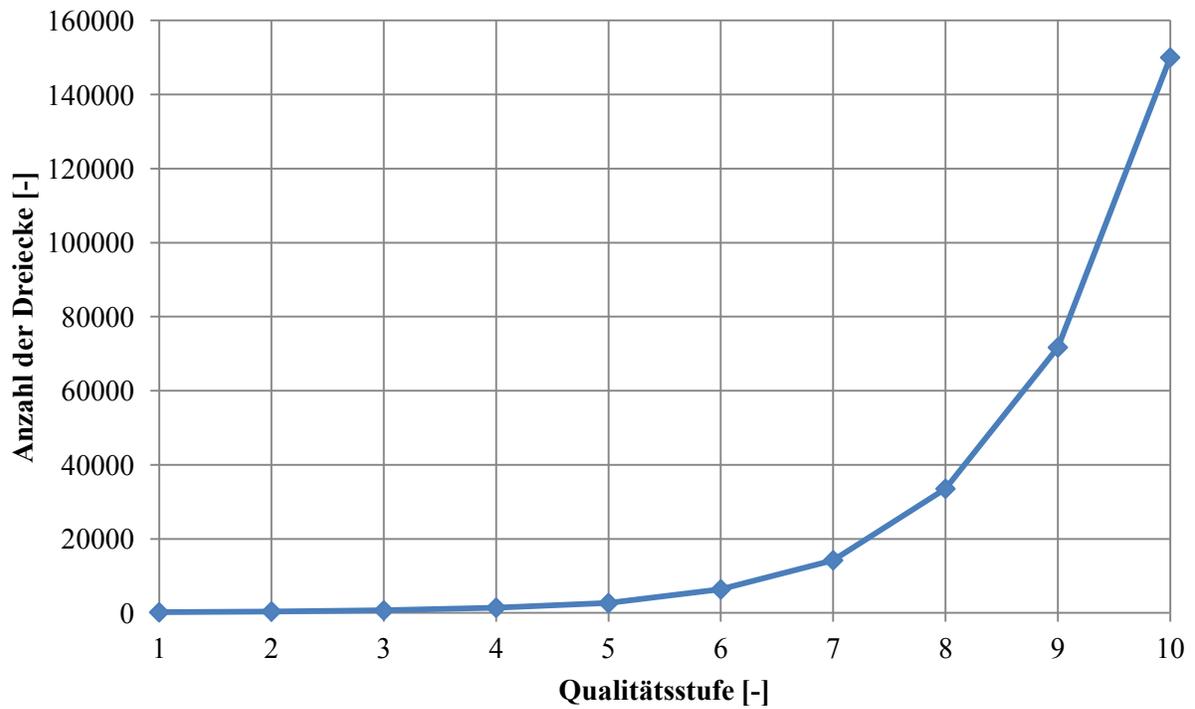


Abbildung 15: Verlauf der Dreiecksanzahl

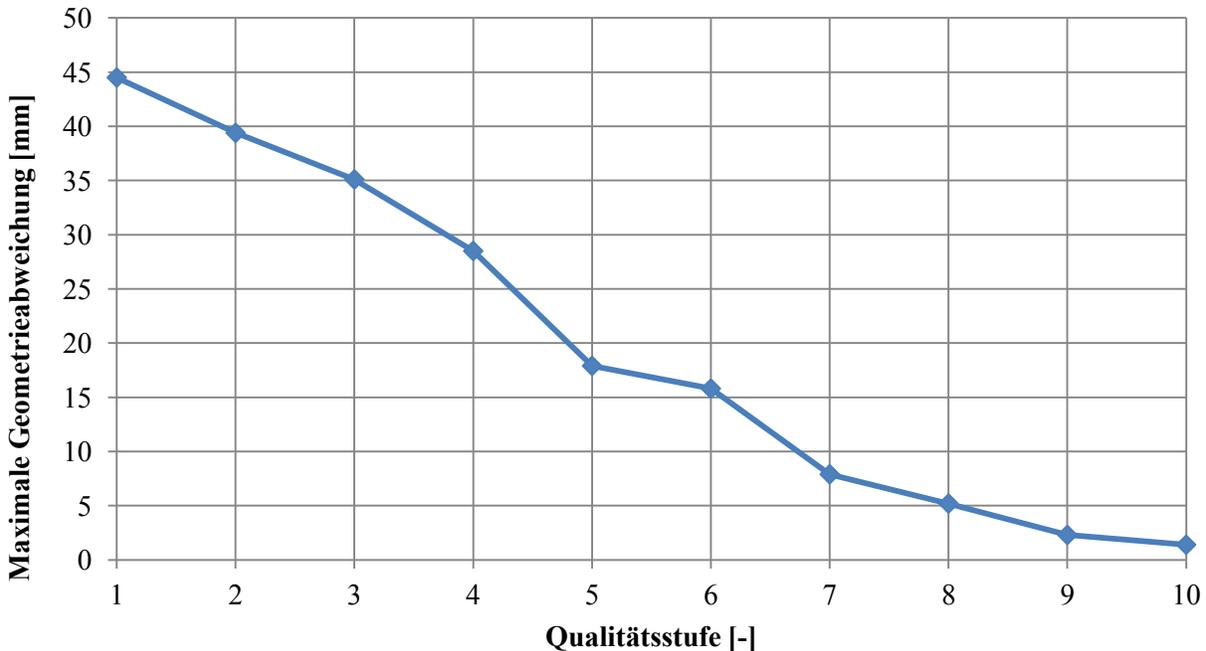


Abbildung 16: Verlauf der max. Geometrieabweichung

Die Dateigröße und die Dreiecksanzahl steigen exponentiell mit der Qualitätsstufe. Ab einer Qualitätsstufe von sieben ist ein Steilanstieg feststellbar. Die maximale Geometrieabweichung zwischen Schrumpfverpackung und Fahrwerksgeometrie fällt ab Qualitätsstufe sieben nur mehr um 15 Prozent. Daher ist eine Qualitätsstufe von sieben bei der Erzeugung der Schrumpfverpackung vorauszusetzen um repräsentative Analyseergebnisse zu erzeugen. Ein weiteres Anheben der Qualitätsstufe auf acht oder neun kann sinnvoll sein, um einzelne, kritische Konturen feiner abzubilden. Eine Qualitätsstufe von zehn ist aufgrund der hohen Dreiecksanzahl und Dateigröße und der damit verbunden Rechendauer zu vermeiden. Die Qualität der Analysegeometrie ist maßgeblich für die Qualität der Freiraumuntersuchung. Die Abweichungen der Analysegeometrie von der tatsächlichen 3D CAD Fahrwerksgeometrie durch Triangulieren werden direkt im berechneten Freiraum übernommen, da an der Analysegeometrie die Berechnung gestartet wird.

Alternativ kann eine Analysegeometrie mit Hilfe eines Bewegungsmodells erzeugt werden. Das ist immer dann anzuwenden, wenn Koppellelemente – das sind Komponenten zwischen den Federstufen (z.B. Dämpfer) – untersucht werden. Bei einem Bewegungsmodell werden Bewegungszustände, welche die zu untersuchende Komponente im Betrieb am Gleis einnehmen kann, eingestellt. Das Bewegungsmodell erzeugt dann eine Hüllkurve, die der Umhüllenden der Summe der Bewegungszustände der Komponenten entspricht. Die Hüllkurve besteht ebenfalls aus einer triangulierten Geometrie und unterliegt denselben Aspekten der Schrumpfverpackung.

Die Neuentwicklung der Freiraumbestimmung lässt sich mit dem momentanen Prozess wie folgt gegenüberstellen. Die Bogeneinschränkung nach Abbildung 9 bleibt bei der momentanen Vorgehensweise unberücksichtigt, da die Begrenzungslinien höchstens im Führungsquerschnitt gül-

tig sind. Der in Abbildung 8 neuentwickelte Prozess zur Bauraumuntersuchung ermöglicht eine Freiraumbetrachtung hin zur exakt nach Norm berechneten 3D Fahrzeugbegrenzungsfläche. Ebenfalls wird bei derzeitigem Vorgehen auf das Knowhow des Konstrukteurs vertraut, die kritischen Komponenten zu ermitteln. Die Neuentwicklung weist den Freiraum farblich visualisiert an der Fahrwerksgeometrie selbst nach und der Freiraum wird durch eine Farbskala quantifiziert. Im Einschränkungsnachweis selbst können 3D Analyseergebnisse zum Freiraumnachweis verwendet werden. Diese sind im Vergleich zu 2D Einschränkungsszeichnungen repräsentativer und übersichtlicher. In Tabelle 2 ist der momentane Prozess der neuentwickelten Bauraumuntersuchung gegenüber gestellt.

Tabelle 2: Gegenüberstellung des momentanen Prozesses zur Neuentwicklung

| Momentaner Prozess | Neuentwicklung |
|--|---|
| 2D Begrenzungslinien | 3D Begrenzungsflächen |
| Manuelle Ermittlung kritischer Komponenten und des Freiraumes durch den Konstrukteur | Berechnung des Freiraumes durch Algorithmen und Visualisierung kritischer Komponenten |
| 2D Einschränkungsszeichnungen als Nachweis | Analysebericht mit farbigen 3D Bildern |
| Aufwändig und zeitintensiv | (Teil-)Automatisierter Prozess |
| Fester Wert für Lateraleinschränkung | Lateraleinschränkung als Funktion der Höhe über Schienenoberkante, so wie in der Norm angegeben |

3.3. Bewertungskriterien der Methoden

3.3.1. Quantitative Kriterien

In der Prozessnotation der Methoden (Abbildung 8) wird die Eingabe durch die Methode manipuliert und liefert die Ausgabe. Die Methode setzt sich wiederum zusammen aus Modellvorbereitung, Freiraumanalyse und Aufbereitung der Ergebnisse. Diese Schritte der Methode beanspruchen unterschiedlichen Zeitaufwand, wie in Abbildung 17 zu sehen ist. Operativer Zeitaufwand durch den geschulten Anwender fällt bei der Modellvorbereitung und bei der Ergebnisaufbereitung an. Dagegen läuft die Freiraumanalyse (teil-) automatisiert ab. Teilautomatisiert deswegen, da der Anwender möglicherweise auf Meldungen des Rechners eingehen und die Analyse betreuen muss. Die Bestimmung des automatisierten Zeitaufwandes geschieht mit einer Stoppuhr bei der Ausführung der Analyse. Entsprechend werden die Bewertungskriterien operativer und (teil-) automatisierter Zeitaufwand definiert.

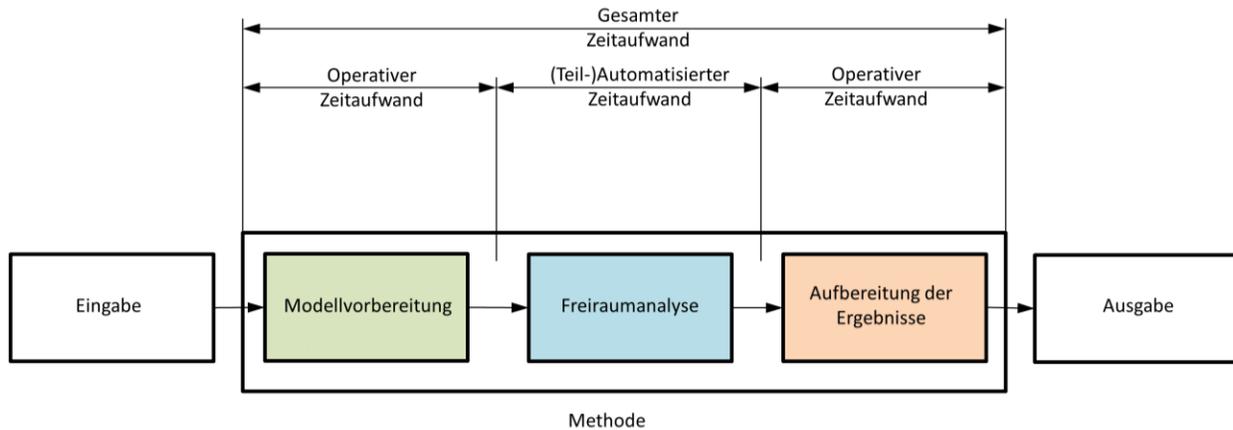


Abbildung 17: Allgemeiner Prozess mit operativen und automatisierten Zeitaufwand

Ein weiteres quantitatives Kriterium sind die Investitionskosten, die anfallen, wenn die Methode umgesetzt und die entsprechende Software neu angeschafft wird. Steht die Software bereits Siemens Graz zur Verfügung, erfolgt kein Investment und die Investitionskosten belaufen sich auf null. Zusammenfassend sind die quantitativen Bewertungskriterien aufgelistet.

- Operativer Zeitaufwand
- (Teil-) Automatisierter Zeitaufwand
- Investitionskosten

3.3.2. Qualitative Kriterien

Die Stabilität der Analyse ist ein qualitatives Bewertungskriterium. Hierbei wird die manuelle Betreuung des teilautomatisierten Anteils der Methode beurteilt. Die Freiraumanalyse ist durch den Anwender zu beaufsichtigen um auf möglich (Fehler-)Meldungen des Rechners reagieren zu können. Besteht die Gefahr, dass das Programm während der Ausführung einer Analyse abstürzt, so läuft die Methode instabil.

Die Qualität der Ausgabe beurteilt die Eignung der Methodenausgabe für den Einschränkungsnachweis. Kann die Ausgabe direkt als Screenshot in PTC Elements für den Einschränkungsnachweis übernommen werden, so ist die Ausgabe von hoher Qualität.

Abgesehen von den Bewertungskriterien, die sich auf die Methodenschritte beziehen ist die Softwareabhängigkeit ebenfalls ein Kriterium für die Beurteilung der Methoden. Unter Softwareabhängigkeit wird die Abhängigkeit der Methode von der verwendeten Software bezeichnet. Werden vorgefertigte Analysetools oder Programme zur Freiraumanalyse verwendet, so kann eine Analyse z.B. durch ein Softwareupdate impraktikabel gemacht werden. Die Freiraumanalyse hängt in diesem Fall sehr stark von der verwendeten Software ab. Wird die Analyse im Gegensatz dazu mit softwareunabhängigen Algorithmen durchgeführt, ist die Methode kaum vom Softwareanbieter abhängig. Zusammenfassend sind die qualitativen Kriterien aufgelistet.

- Stabilität der Analyse

- Qualität der Ausgabe
- Softwareabhängigkeit

3.3.3. Gewichtung der Kriterien

Die Gewichtung der Bewertungskriterien erfolgt durch sinngemäße Anwendung des Rangfolgeverfahrens oder Präferenzmatrixverfahrens [5], welches in Tabelle 3 dargestellt ist. Dabei wird jedes Kriterium mit jedem verglichen und das jeweils Wichtigere markiert. Bei gleicher Wichtigkeit erfolgt keine Markierung. Ist ein Kriterium wichtiger wird es mit 2 markiert, ist es weniger wichtig mit 0. Bei gleicher Wichtigkeit erfolgt die Bewertung mit 1. Die Bewertung muss um die Diagonale sinngemäß gespiegelt werden. Die Markierungen jedes Kriteriums werden aufsummiert und normiert. Damit ergeben sich die Gewichtungsfaktoren (oder kurz Gewichte) der einzelnen Kriterien.

Tabelle 3: Rangfolgeverfahren zur Bestimmung der Gewichte

| Zeile ist 2=wichtiger/1=gleich/0=weniger wichtig als Spalte | (Teil-)Automatisierter Zeitaufwand | Operativer Zeitaufwand | Investitionskosten | Stabilität der Freiraumanalyse | Qualität der Ausgabe | Softwareabhängigkeit | Summe | Gewicht in Prozent |
|--|------------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|-------|--------------------|
| (Teil-)Automatisierter Zeitaufwand | - | 0 | 2 | 1 | 1 | 2 | 6 | 20.0% |
| Operativer Zeitaufwand | 2 | - | 2 | 1 | 1 | 2 | 8 | 26.7% |
| Investitionskosten | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 2 | 2 | 6.7% |
| Stabilität der Freiraumanalyse | 1 | 1 | 2 | - | 1 | 1 | 6 | 20.0% |
| Qualität der Ausgabe | 1 | 1 | 2 | 1 | - | 1 | 6 | 20.0% |
| Softwareabhängigkeit | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | - | 2 | 6.7% |
| | | | | | | | | 100.0% |

Die Bewertung der Kriterien beinhaltet Expertenmeinung und wurde mit Siemens intern abgestimmt. Die Softwareabhängigkeit wurde aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit, dass Soft-

wareupdates durch den Anbieter die Analyse unmöglich machen als weniger wichtig beurteilt. Ebenfalls sind Investitionskosten relativ unwichtig gewichtet. Die Methoden zielen auf eine konzeptionelle Neuentwicklung der Bauraumuntersuchung ab. Dabei sollten die Möglichkeiten einer neuen Software durchaus beleuchtet werden und nicht an den vergleichsweise hohen Investitionskosten scheitern. Die Gewichtung der Kriterien ist in Abbildung 18 veranschaulicht.

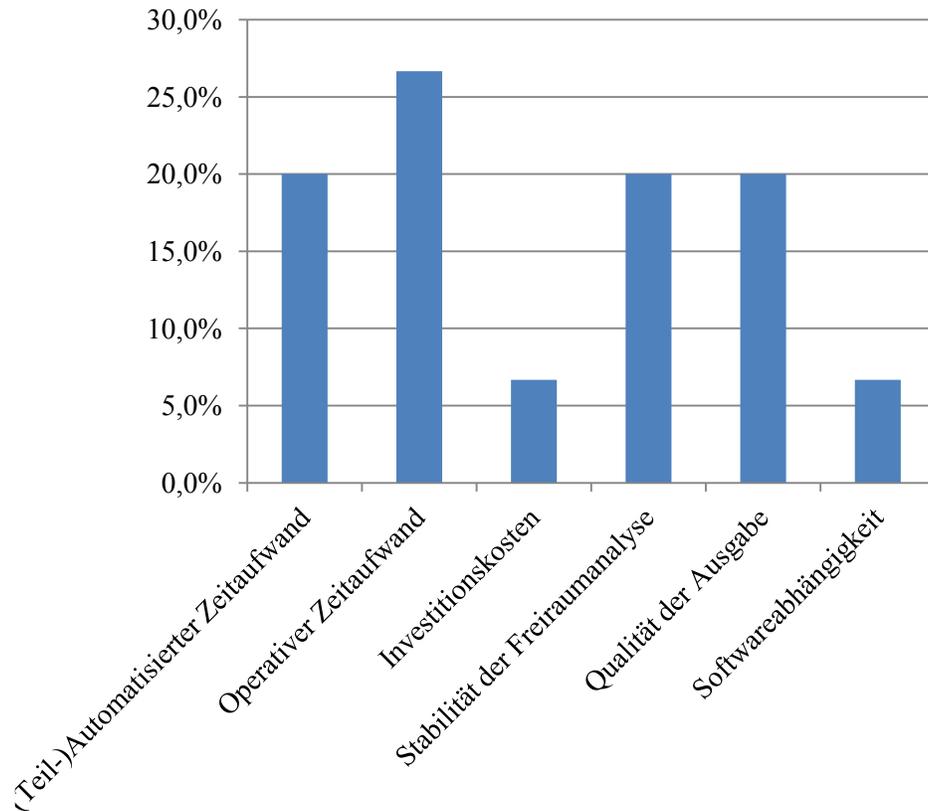


Abbildung 18: Gewichtung der Kriterien

3.3.4. Knock Out Kriterium

Hinsichtlich der Aufgabenstellung aus Kapitel 1.3 wird zusätzlich ein Knock Out Kriterium definiert. Die Methode muss die Aufgabenstellung erfüllen. Die Aufgabenstellung erfordert unter anderem eine Freiraumbestimmung und -visualisierung am Fahrwerk mit eindeutiger Erkennung des minimalen Freiraumes für die Bauraumuntersuchung. Die Eindeutigkeit kann mit einer Farbstufung der Abstandswerte an der Analysegeometrie erreicht werden. Ist die Ausgabe der Methode nicht für die Bauraumuntersuchung geeignet, so erfüllt die Methode nicht das in der Aufgabenstellung definierte Muss Kriterium und unterliegt dem Knock Out Kriterium.

4. Methodenentwicklung am einfachen Testfall

4.1. Testfall

Die Methodenentwicklung zur Freiraumbestimmung erfolgt anhand eines einfachen Testfalls. Dieser Testfall stellt eine stark vereinfachte Analysegeometrie dar. Dabei entspricht eine Kugel der Schrumpfvorpackung beziehungsweise der Hüllkurve. Die Kugel wird von einer extrudierten Fläche umgeben, welche die Begrenzungsfläche repräsentiert.

Der minimale Freiraum im Testfall beträgt 20mm und die Position ist eindeutig, wie Abbildung 19 zu entnehmen ist. Lateral ist ein Freiraum von 35mm vorhanden. Ein der extrudierten Fläche entsprechender Farbverlauf an der Kugel soll mit der Freiraumanalyse im Testfall methodisch entwickelt werden.

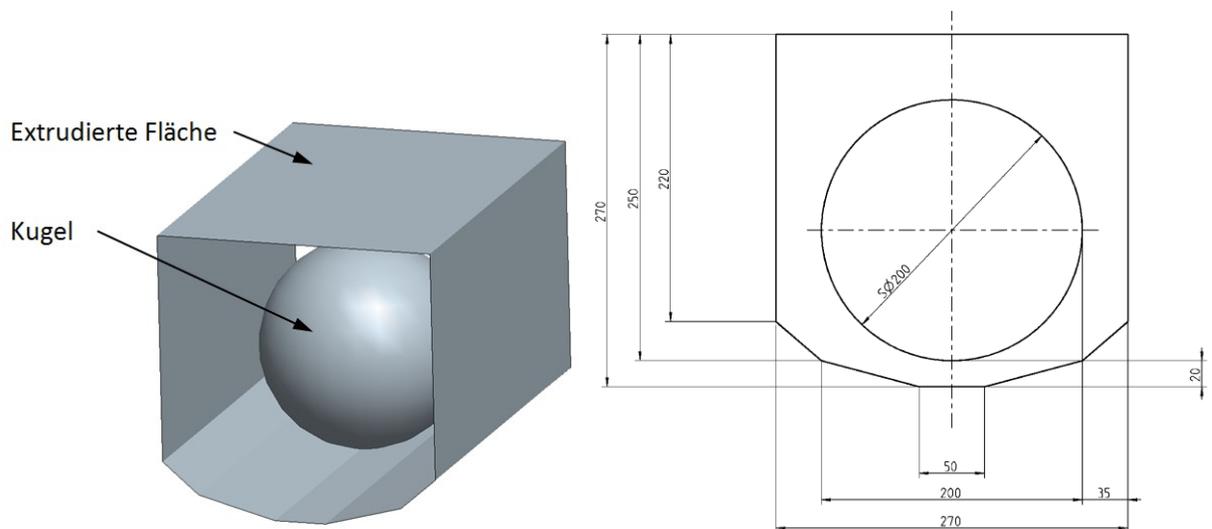


Abbildung 19: Testfall

4.2. Übersicht der Methoden

In Tabelle 4 sind die gefundenen Methoden dargestellt. Die Methoden werden systematisch in den Kapiteln 4.3 bis 4.10 erklärt. Es werden verschiedene, kommerzielle Softwarepakete für die Freiraumanalyse eingesetzt. Einerseits werden Analysen direkt in PTC Elements, womit auch die Konstruktion der Fahrwerke durchgeführt wird, entwickelt, andererseits wird auch mit Matlab und Powerinspect gearbeitet.

Tabelle 4: Übersicht der Methoden

| Nr. | Methodenbezeichnung | Software | Kurzbeschreibung |
|-----|---|--------------|--|
| 1 | Vergleiche alle Punkte zueinander | Matlab | Modellvorbereitung durch STL Export der Analysegeometrie; STL Import; Freiraumanalyse und 3D Plot in Matlab; Freiraumanalyse mit einfachem Algorithmus |
| 2 | Gefilterte, relevante Punkte mit Kugelkoordinaten | Matlab | Modellvorbereitung durch STL Export der Analysegeometrie; STL Import; Freiraumanalyse und 3D Plot in Matlab; Freiraumanalyse mit aufwändigerem Algorithmus |
| 3 | Geometrievergleich | PTC Elements | Gesamte Methode in PTC Elements; Freiraumanalyse mit Analysetool Teilevergleich [4] |
| 4 | Benutzerdefinierte Analyse | PTC Elements | Gesamte Methode in PTC Elements; Freiraumanalyse mit Analysetool Benutzerdefinierte Analyse [4] |
| 5 | Paarabstand | PTC Elements | Gesamte Methode in PTC Elements; Freiraumanalyse mit Analysetool Paarabstand [4] |
| 6 | Volumendurchdringung | PTC Elements | Gesamte Methode in PTC Elements; Freiraumanalyse mit Analysetool Volumendurchdringung [4] |
| 7 | Abweichung zwischen Punkt und Fläche | PTC Elements | Gesamte Methode in PTC Elements; Freiraumanalyse mit Analysetool Abweichung [4] |
| 8 | 3D Messtechniksoftware | Powerinspect | Modellvorbereitung durch STL Export der Analysegeometrie; STL Import; Freiraumanalyse und 3D Ausgabe in Powerinspect; extern durchgeführt von Fa. ITM ⁴ |

4.3. Methode 1 – Vergleiche alle Punkte zueinander (Matlab)

Die Methode wird mit Hilfe von Matlab durchgeführt. Der Workflow wird analog zur allgemeinen Prozessdarstellung aus Abbildung 8 dargestellt.

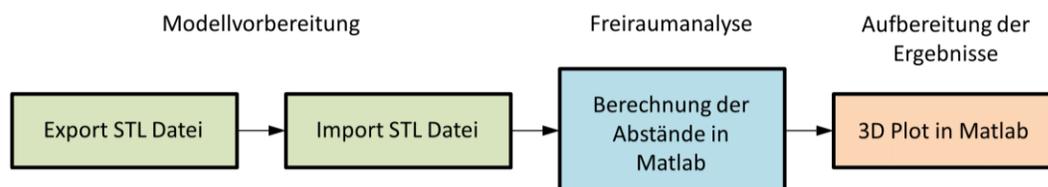


Abbildung 20: Workflow Methode 1

Modellvorbereitung:

Ein 3D CAD Export in Form einer Punktedatei ist sowohl für die Extrusion, als auch für die Kugel notwendig. Die 3D CAD Geometrien werden im STL-Format abgespeichert. Anschließend werden die Dateien in Matlab importiert, sodass ein Array mit x-, y-, z-Koordinaten aller Punkte

⁴Das Unternehmen Industrial Task Management (ITM) mit Firmensitz in Gleisdorf (Steiermark) beschäftigt sich mit 3D Messtechnik und verwendet dazu die Software Powerinspect. (<http://www.itm.co.at/>)

vorliegt. Es existieren zwei Arrays, wobei eines die Extrusion und ein zweites die Kugel repräsentieren.

Freiraumanalyse:

In Matlab durchlaufen zwei geschachtelte Schleifen die beiden Arrays, dabei wird jeweils der räumliche Abstand zweier Punkte berechnet. Nach dem Durchlauf der inneren Schleife wird aus allen Abstandswerten das Minimum bestimmt und gespeichert. Anschließend wird mit dem nächsten Punkt der Kugel analog fortgefahren. Nachfolgend ist die Freiraumanalyse in Matlab als Pseudocode dargestellt. Der gesamte Matlab Code befindet sich in Anhang B.

```
Import STL Datei Kugel
Import STL Datei Extrusion

for i = 1:AllePunkteKugel

    for j = 1:AllePunkteExtrusion
        Abstand(j) = 3DAbstand(Kugel(i), Extrusion(j));
    end

    MinimalAbstand(i) = min(Abstand(1:AllePunkteExtrusion));

end

3DPlot Kugel(MinimalAbstand);
```

Ausgabe der Freiraumanalyse:

Die Ausgabe erfolgt direkt in Matlab als 3D Plot der beiden Arrays und ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Punkte der Kugel sind mit den minimalen Abstandswerten zwischen Kugel und Extrusion eingefärbt. Die Farbskala kann beim Plot beliebig vom Benutzer ausgewählt und angegeben werden.

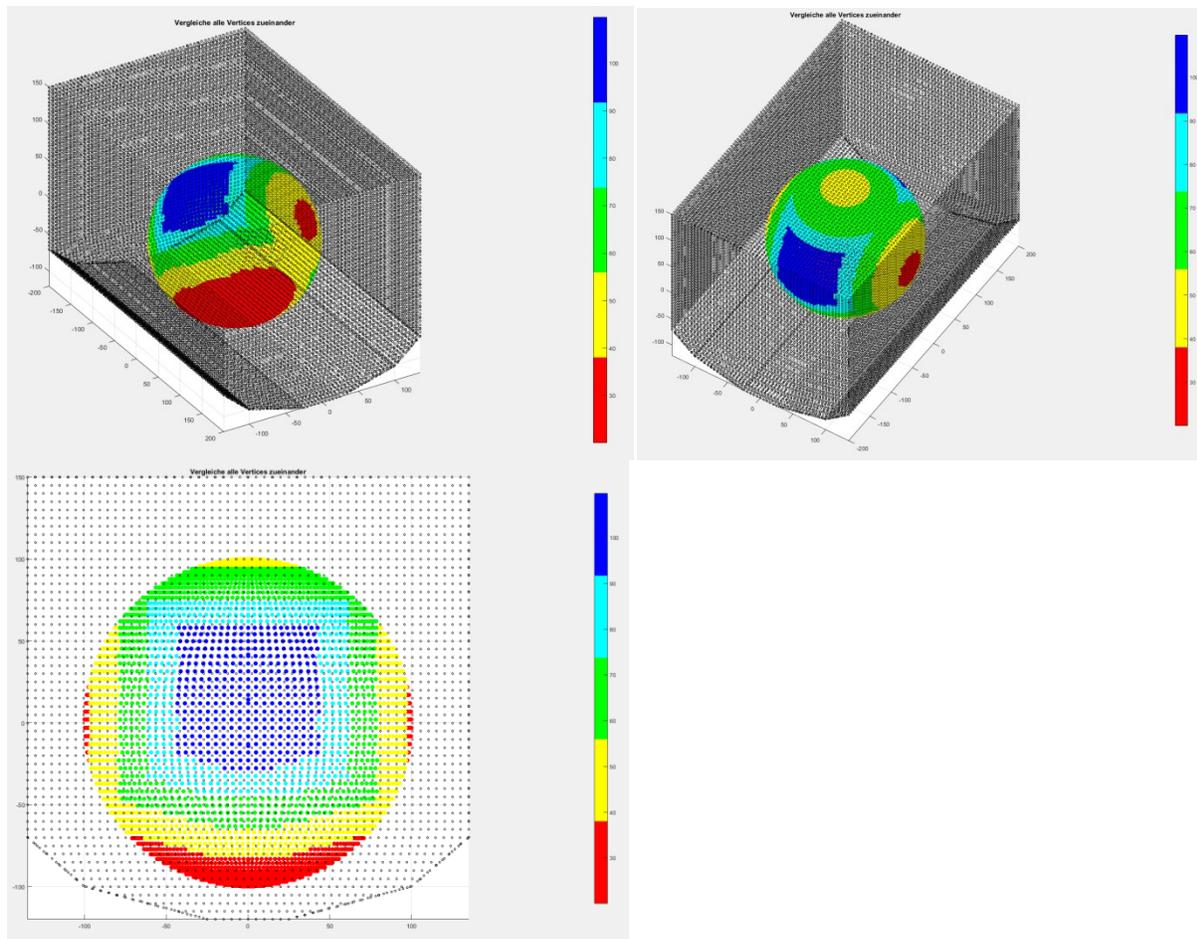


Abbildung 21: 3D Plot der Methode 1 in Matlab

4.4. Methode 2 – Gefilterte, relevante Punkte mit Kugelkoordinaten (Matlab)

Diese Methode wird analog zur Methode 1 in Kapitel 4.3 verwendet, wobei sich die Freiraumanalyse durch einen anderen Algorithmus unterscheidet. Die Modellvorbereitung und die Aufbereitung der Ergebnisse sind identisch.

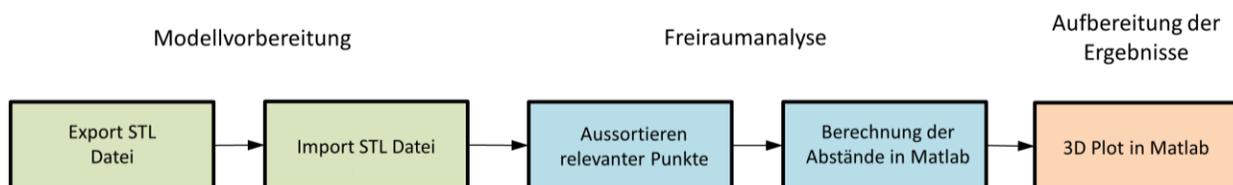


Abbildung 22: Workflow Methode 2

Freiraumanalyse:

Nach dem Datenimport von Kugel und Extrusion werden die kartesischen Koordinaten in den Arrays zuerst in Kugelkoordinaten umgerechnet. Ein Array der Kugel und eines der Extrusionsfläche werden in der Freiraumanalyse bearbeitet. Es folgt die Definition der Abmessungen

eines Volumens in Kugelkoordinaten. Dieses Volumen hat die Form eines Kugelsektors und gilt als Grenze aller Punkte des importierten Kugelarrays in Abhängigkeit des aktuellen Punktes der Extrusionsfläche in der Schleife und wird zum Aussortieren der Kugelpunkte verwendet.

Eine Schleife mit der Anzahl der Punkte der Extrusionsfläche wird durchlaufen. Abhängig vom aktuellen Punkt der Extrusionsfläche wird die Position des außerhalb der Schleife definierten Volumens festgelegt. Alle Punkte des Kugelarrays, die innerhalb des Volumens liegen werden aus dem Kugelarray gefiltert. Übrig bleibt ein gefiltertes Array mit allen relevanten Punkten der Kugel, die in der Nähe des aktuellen Punktes der Extrusion und somit innerhalb des Volumens liegen. Vom Punkt der Extrusionsfläche mit dessen Normalenvektor werden alle Normalabstände der relevanten (gefilterten) Kugelpunkte mit Hilfe der hesseschen Normalform (nach Ludwig Otto Hesse) [6] berechnet und anschließend daraus der Minimalabstand bestimmt. Ein weiteres Array, das der Dimension des Kugelarrays entspricht, wird außerhalb der Schleife mit den Werten Unendlich (engl.: infinity, inf.) initialisiert. In diesem Array werden die Minimalabstandswerte gespeichert. Bei jedem Schleifendurchlauf wird geprüft, ob der errechnete Minimalabstand kleiner ist, als der Wert im Abstandsarray. Ist das der Fall, wird der Minimalabstand gesetzt, sonst bleibt der bestehende Eintrag. Ist die Schleife durchlaufen dann ist das Abstandsarray mit den minimalen Normalabständen besetzt, die der Kugel mit einem Farbcode zugewiesen werden können. Es folgt der Pseudocode, der gesamte Matlab Code ist in Anhang C angegeben.

Import STL Datei Kugel

Import STL Datei Extrusion

Umrechnung Kugel kartesische Koordinaten in Kugelkoordinaten

Umrechnung Extrusion kartesische Koordinaten in Kugelkoordinaten

Volumen (in Kugelkoordinaten) definieren

AbstandKugel mit ,inf' initialisieren

for i = 1:AllePunkteExtrusion

AussortierenPunkteKugel

BerechnungAbstand HesseAlgorithmus

MinimalAbstand bestimmen

MinimalAbstand den Kugelpunkten zuordnen

Prüfung ob MinimalAbstand kleiner als bestehender Wert

end

3DPlot Kugel (MinimalAbstand)

Die Ausgabe der Freiraumanalyse ist analog zu Methode 1 in Kapitel 4.3 und in Abbildung 23 dargestellt.

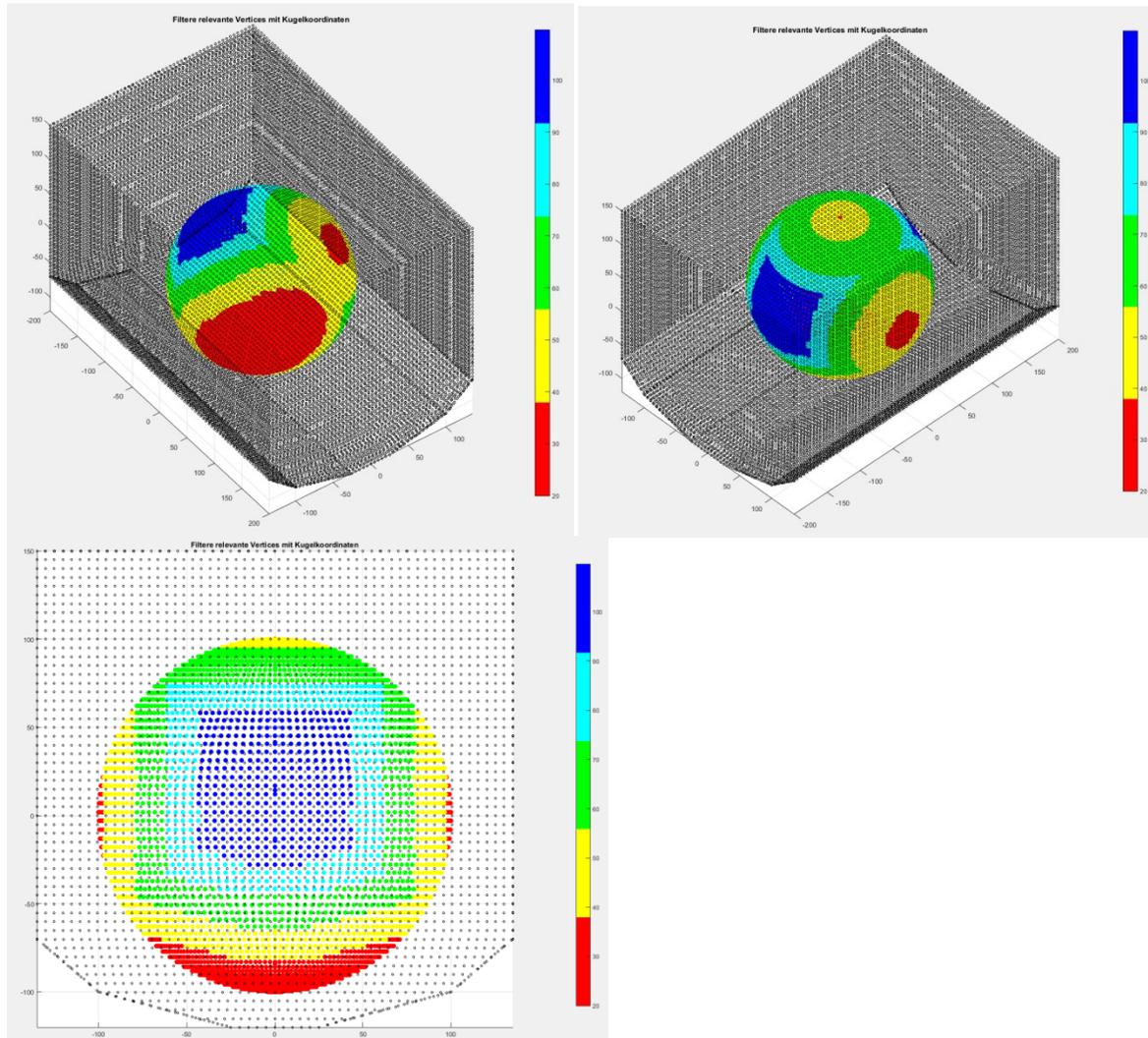


Abbildung 23: 3D Plot der Methode 2 in Matlab

4.5. Methode 3 – Geometrievergleich (PTC Elements)

Methode 3 verwendet das Analysetool Teilevergleich (nach Geometrie) [4] und wird in PTC Elements durchgeführt.

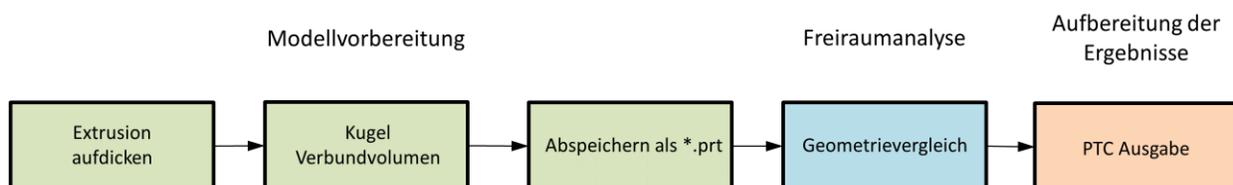


Abbildung 24: Workflow Geometrievergleich

Modellvorbereitung:

Die extrudierte Fläche wird um wenige Millimeter nach außen aufgedickt, sodass aus einer Fläche ein Volumen entsteht, wie in Abbildung 25 gezeigt. Durch die Aufdickung nach außen wird der Freiraum nicht beeinflusst. Auch die Kugel muss in Form einer Volumengeometrie vorliegen, ist das nicht der Fall, kann ein Volumen mit z.B. Verbundvolumen [4] erstellt werden. Anschließend werden sowohl Kugel als auch Extrusion in Form einer Teildatei (*.prt) abgespeichert.

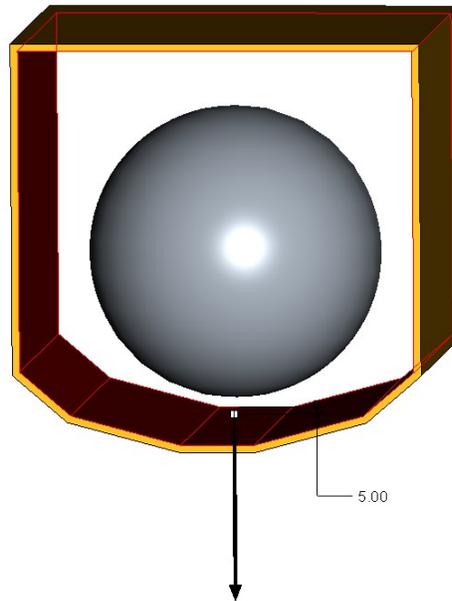


Abbildung 25: Modellvorbereitung Geometrievergleich

Freiraumanalyse:

Bei geöffneter Datei der Extrusion wird das Analysetool Teilevergleich (nach Geometrie) in PTC Elements gestartet. Der Anwender wird aufgefordert eine Vergleichsgeometrie zu wählen. Dazu wird in diesem Fall die Teildatei der Kugel gewählt. Der Anwender gibt im Dialogfenster einen Abstand an, in der Geometrien innerhalb des Abstandes in der Ausgabe farblich gekennzeichnet werden.

Ausgabe der Freiraumanalyse:

Die PTC Ausgabe des Geometrievergleichs des Testfalls ist in Abbildung 26 dargestellt und zeigt die Kugel eingefärbt. Bereiche in denen sich die beiden Geometrien durchdringen, werden rot dargestellt. Da sich im Testfall keine Geometrien überlappen, sind auch keine Bereiche rot markiert. Bereiche, die innerhalb eines angegebenen Abstandes liegen sind grün gezeigt. Der angegebene Abstand in Abbildung 26 ist gleich 30mm. Geometrien die weiter als der angegebene Abstand entfernt liegen werden blau eingefärbt.

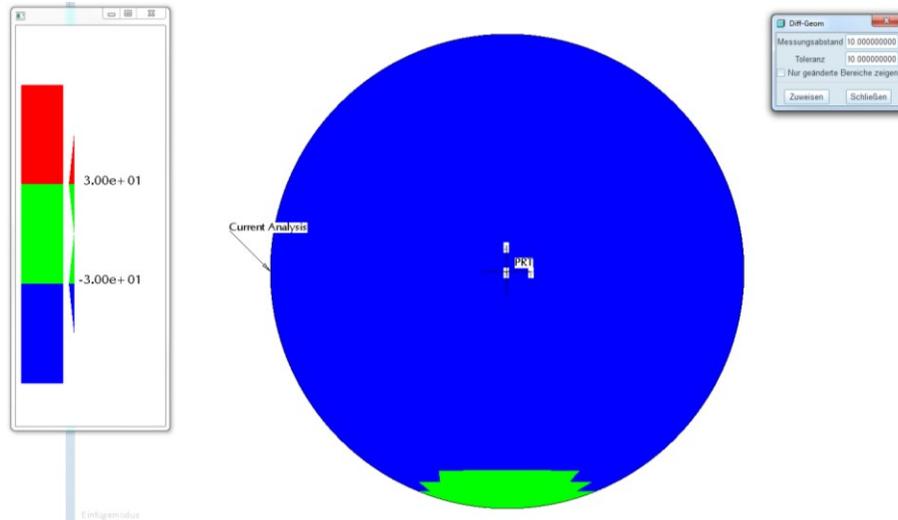


Abbildung 26: Ausgabe Geometrievergleich

4.6. Methode 4 – Benutzerdefinierte Analyse (PTC Elements)

Methode 4 verwendet das Analysetool Benutzerdefinierte Analyse [4] und wird ebenfalls in PTC Elements durchgeführt.

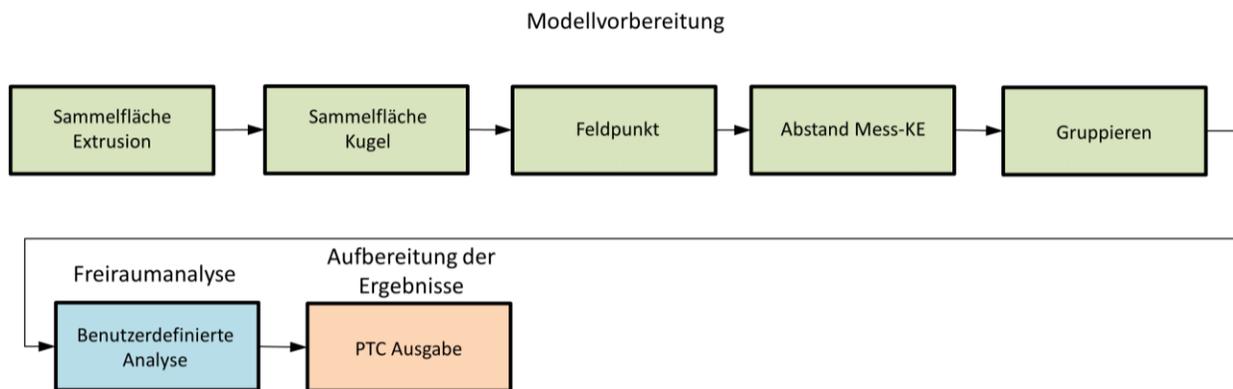


Abbildung 27: Workflow Benutzerdefinierte Analyse

Modellvorbereitung:

Extrusion und Kugel müssen als Sammelflächengeometrie in PTC Elements vorliegen. Im Gegensatz zu Methode 3, müssen hier die beiden Geometriepartner (Extrusion und Kugel) nicht als Volumina sondern als Sammelflächen erzeugt werden. Nun kann ein Feldpunkt auf die Sammelfläche der Kugel gesetzt werden. Wichtig dabei ist bei der Auswahl der Kugeloberfläche den Auswahlfilter auf Sammelfläche umzuschalten, sodass der Feldpunkt auf der Sammelfläche der Kugeloberfläche platziert wird. Nun wird ein Abstand Mess-KE zwischen Feldpunkt und Sammelfläche der Extrusion erzeugt. Wieder muss der Auswahlfilter vor der Auswahl der Sammelfläche der Extrusion auf Sammelfläche umgeschaltet werden. Im Modellbaum sind nun zwei

Konstruktionselemente (KE) vorhanden, der Feldpunkt und das Abstand Mess-KE. Diese beiden Konstruktionselemente werden nun im Modellbaum gruppiert.

Freiraumanalyse:

Die Freiraumanalyse wird mit Hilfe des Analysetools Benutzerdefinierte Analyse durchgeführt. Die Analyse verwendet die in der Modellvorbereitung erzeugte Gruppe. Für die Ausgabe kann vor dem Start der Analyse eine Farbstufung von bis zu 32 Farben optional gewählt werden. Ebenfalls sind Minimal- und Maximalwert der Farbskala frei wählbar.

Ausgabe der Freiraumanalyse:

Die PTC Ausgabe der Benutzerdefinierten Analyse zeigt den Freiraum farblich dargestellt an der Kugeloberfläche. Der Wert des Freiraums kann an einer Farbskala abgelesen werden. Im vorliegenden Fall wurde eine Farbstufung von 32 Farben gewählt.

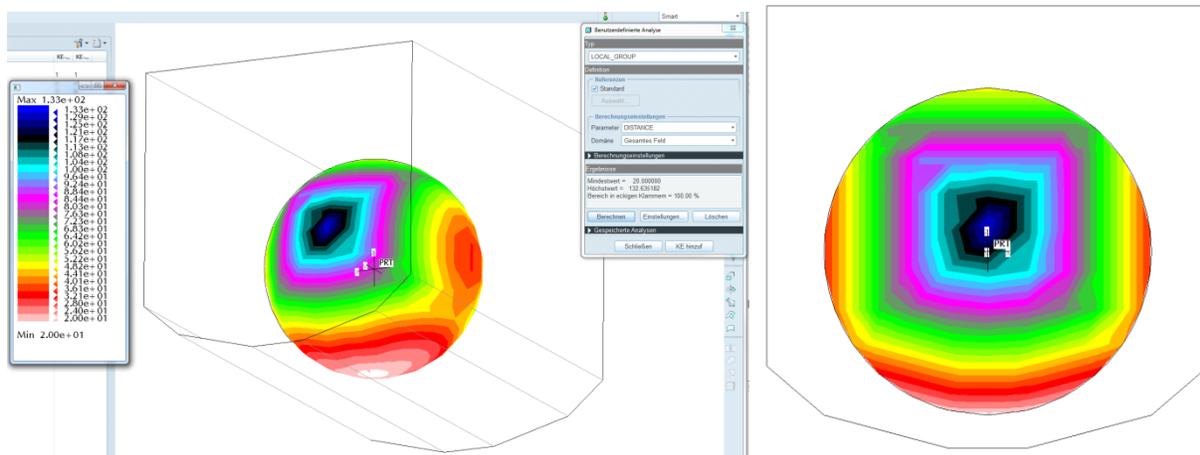


Abbildung 28: Ausgabe Benutzerdefinierte Analyse

4.7. Methode 5 – Paarabstand (PTC Elements)

Methode 5 verwendet das Analysetool Paarabstand [4] und wird, wie die bereits behandelten Methoden ebenfalls in PTC Elements durchgeführt.

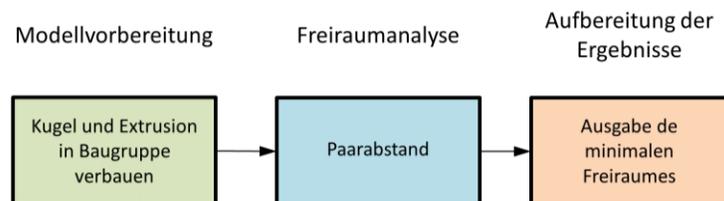


Abbildung 29: Workflow Paarabstand

Modellvorbereitung:

Kugel und Extrusion werden als Teile in einer Baugruppe verbaut. Im Baugruppenmodus ist das Analysetool Paarabstand für die Freiraumanalyse anzuwenden.

Freiraumanalyse:

Die Freiraumanalyse geschieht mit Hilfe dem Analysetool Paarabstand. Nach dem Start des Tools müssen Kugel und Extrusion angewählt werden, wobei der Auswahlfilter auf Teil zu setzen ist.

Ausgabe der Freiraumanalyse:

PTC Elements berechnet den Minimalabstand zwischen den beiden Teilen und gibt diesen aus. Dieser Minimalabstand entspricht dem minimalen Freiraum und wird nur an einem Punkt der Kugel ausgegeben und gekennzeichnet. Im Testfall beträgt der minimale Freiraum 20mm, die Ausgabe der Analyse ist in Abbildung 30 dargestellt.

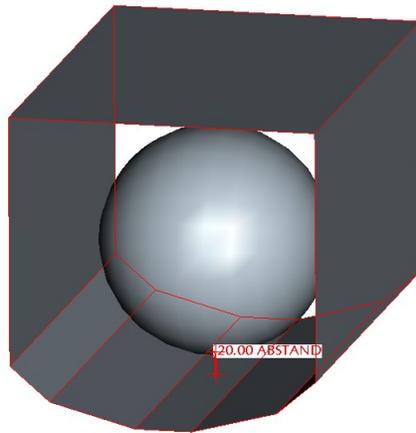


Abbildung 30: Ausgabe Paarabstand

4.8. Methode 6 – Volumendurchdringung (PTC Elements)

Methode 6 verwendet das Analysetool Volumendurchdringung [4] und wird in PTC Elements durchgeführt.

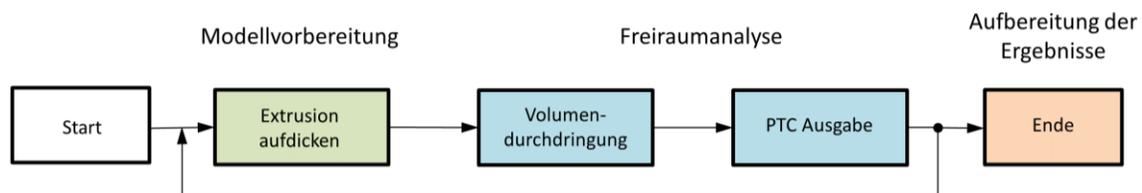


Abbildung 31: Workflow Volumendurchdringung

Modellvorbereitung:

Die Extrusion wird nach innen hin, also in Richtung Kugel hin aufgedickt und stellt das Volumen dar, welches von der Sammelfläche (Kugel) durchdrungen wird. Das Aufdicken erfolgt sukzessive in fest vorgegebenen Schritten. Nach jedem Aufdicken wird eine Freiraumanalyse durchgeführt.

Freiraumanalyse:

Die Freiraumanalyse wird in Form einer Durchdringungsprüfung durchgeführt. Dazu dient das Analysetool Volumendurchdringung in PTC Elements. Es werden Volumen und Sammelfläche auf deren Durchdringung überprüft und die Überlappungsbereiche im 3D CAD gekennzeichnet.

Ausgabe der Freiraumanalyse:

Mit sukzessiven Aufdicken in vorgegebene Schritte wird der Freiraum von Schritt zu Schritt verringert, bis sich Kugel und Extrusion überlappen. Ist das der Fall, werden die überlappenden Bereiche im 3D CAD als Skelettlinien hervorgehoben. Der ermittelte Betrag des Freiraums entspricht dem Maß der Aufdickung der Extrusion. In Abbildung 32 ist der Prozess bildlich dargestellt. Linkes Bild zeigt eine Aufdickung um neun Millimeter, mittleres Bild eine um 18mm. Im rechten Bild wurde um weitere neun Millimeter aufgedickt und es ist eine Volumendurchdringung sichtbar. Der somit ermittelte Freiraum entspricht dem Maß der Aufdickung und ist gleich 27mm. Dabei wird ein Fehler von 35 Prozent erzeugt, da der eigentliche Freiraum 20mm entspricht (siehe Abbildung 19).

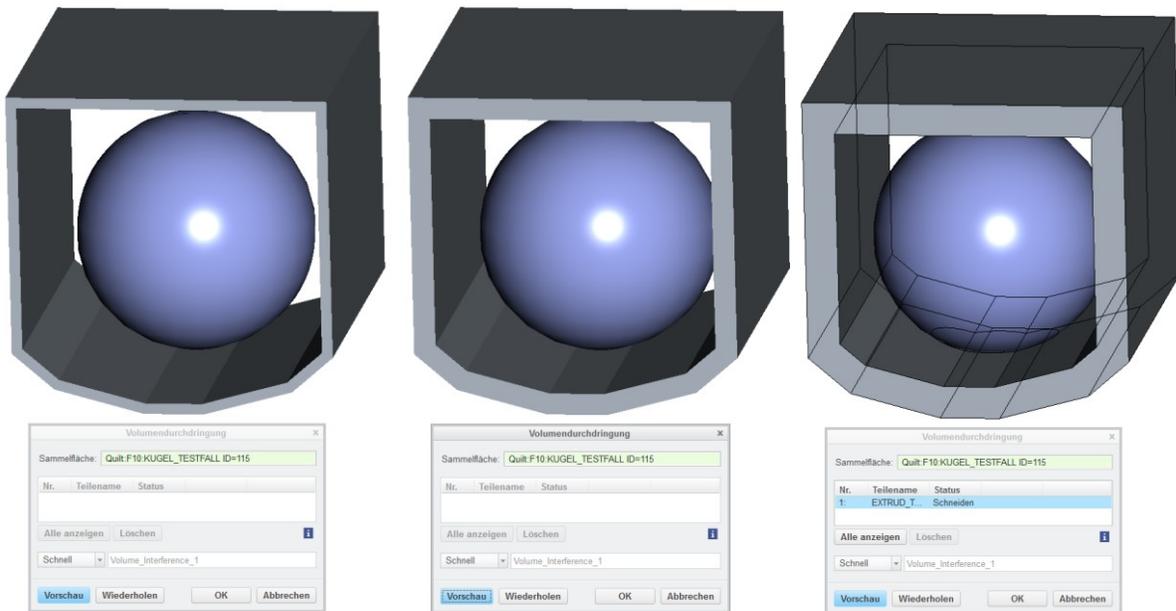


Abbildung 32: Ausgabe Volumendurchdringung

4.9. Methode 7 – Abweichung zwischen Punkt und Fläche (PTC Elements)

Methode 7 verwendet das Analysetool Abweichung [4] und wird in PTC Elements durchgeführt.



Abbildung 33: Workflow Abweichung

Modellvorbereitung:

Vorbereitend wird ein Punktemuster auf der Fläche der Extrusion erstellt. An diesen Punkten wird der Abstand zur Kugel berechnet. Im Testfall wurde ein Punkt auf die Fläche der Extrusion platziert und regelmäßig rechteckig gemustert.

Freiraumanalyse:

Zwischen dem Punktemuster und der Kugeloberfläche können nun mit Hilfe des Analysetools Abweichung die Abstandsberechnungen durchgeführt werden.

Ausgabe der Freiraumanalyse:

Es werden alle Abstände zwischen dem Punktemuster und der Kugeloberfläche ausgegeben, wobei diese Abstände nicht dem Freiraum entsprechen. Es wird der räumliche Abstand zweier Punkte ermittelt. Abbildung 34 zeigt die berechneten Abstände, die in weiterer Folge noch umgerechnet werden müssen um den Freiraum zu erhalten. Zusätzlich werden noch Minimal- und Maximalabstand explizit ausgegeben.

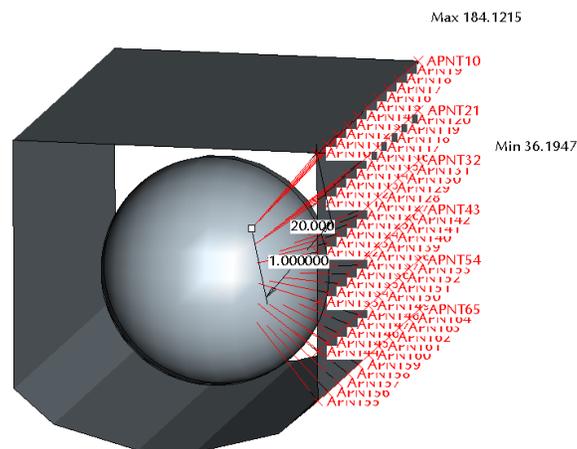


Abbildung 34: Ausgabe Abweichung

4.10. Methode 8 – 3D Messtechniksoftware (Powerinspect)

Für einen Soll/Ist Vergleich von Bauteilen oder Baugruppen werden diese zum Beispiel unter Anwendung von Lasermesstechnik abgetastet und vermessen. Eine Punktelwolke der Messwerte wird dann mit der nominellen 3D CAD Geometrie verglichen. Dazu wird die von Delcam her-

ausgegebene kommerzielle Software Powerinspect verwendet. Die Software analysiert die Abweichungen zwischen der aufgenommenen Punktwolke und der 3D CAD Geometrie.

Analog dazu wird Powerinspect für die Freiraumanalyse verwendet. Anstatt Messwerte und 3D CAD Geometrie werden Kugel und Extrusion miteinander verglichen. Die Abweichung, das ist der Freiraum, wird farblich an der Kugel dargestellt. Die Freiraumanalyse wurde extern vom Unternehmen Industrial Task Management (ITM) durchgeführt. ITM, mit Firmensitz in Gleisdorf (Steiermark), bietet unter anderem Dienstleistungen im Bereich 3D Messtechnik an. Die STL-Exportdateien aus PTC Elements wurden übergeben und die Freiraumanalyse von ITM durchgeführt.

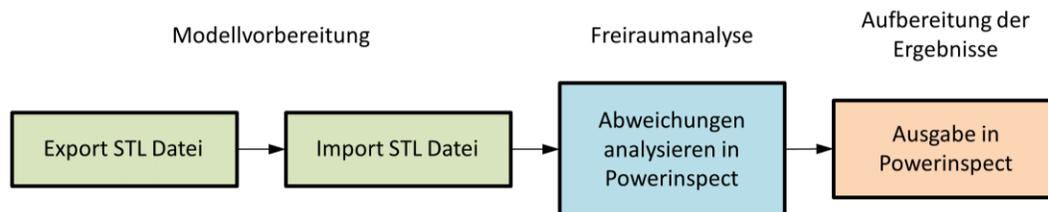


Abbildung 35: Workflow der Methode mit 3D Messtechnik

Modellvorbereitung:

Ein STL Export des Testfalls aus PTC Elements wird in Powerinspect importiert und die Freiraumanalyse aufgesetzt.

Freiraumanalyse und Ausgabe:

Die Software Powerinspect vergleicht in der Analyse die beiden Geometrien miteinander und visualisiert die Abweichungen an der Kugel. Die Abweichungen entsprechen dem Freiraum. In Abbildung 36 ist die Ausgabe in Powerinspect dargestellt. Diese Abbildung wurde von ITM erstellt und für diese Masterarbeit zur Verfügung gestellt. Es können Marker gesetzt, die den Wert der Abweichung (Freiraum) punktuell ausgeben oder der Minimalwert gewählt und dadurch angezeigt werden. Zusätzlich liefert die Ausgabe eine Statistik (Abbildung 36 unten) über die Abweichung der Geometrien. Diese ist für die 3D Messtechnik relevant, hat jedoch für die Freiraumanalyse untergeordnete Bedeutung.

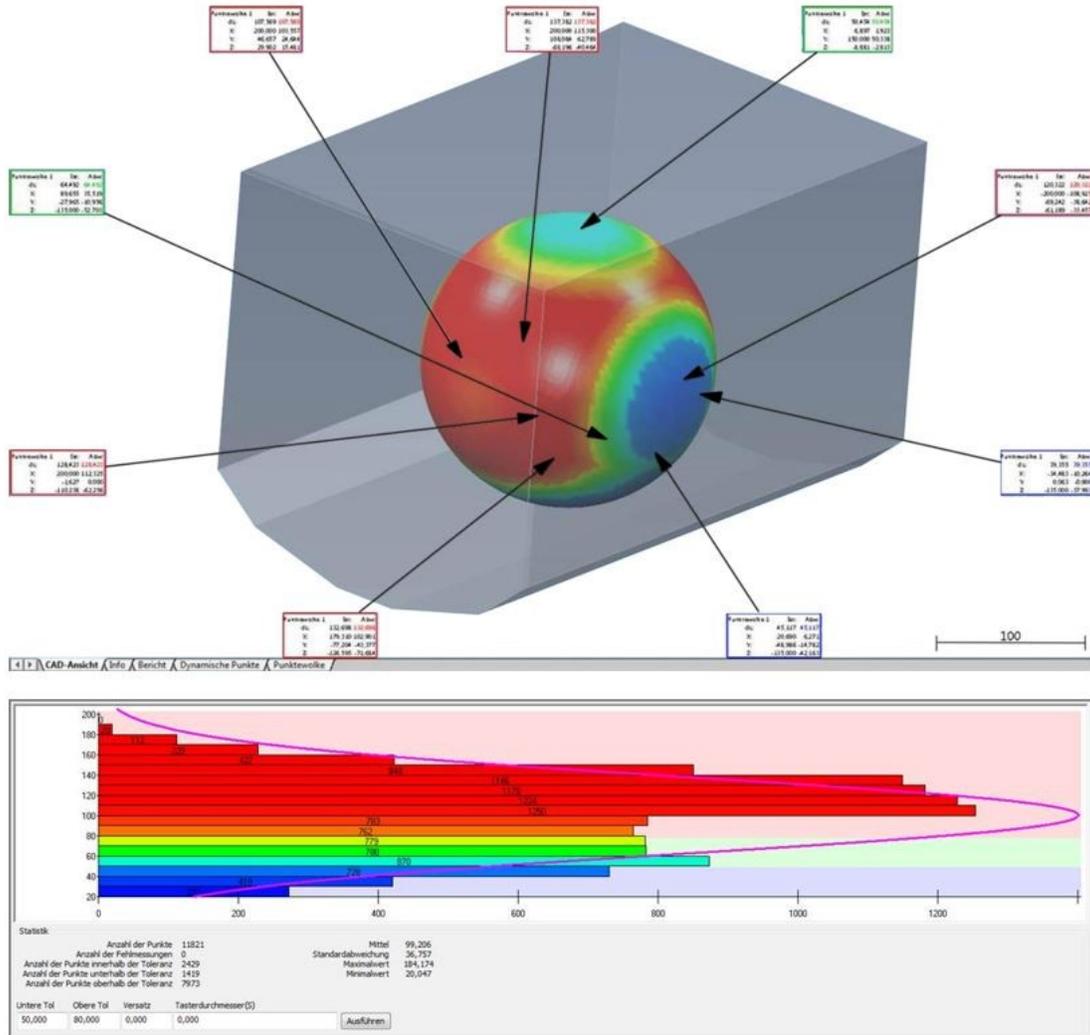


Abbildung 36: Ausgabe 3D Messtechniksoftware (Quelle: ITM)

4.11. Methodenbewertung

4.11.1. Bewertung der Methoden bezüglich Knock Out Kriterium

Die Methoden Geometrievergleich und Volumendurchdringung visualisieren Bereiche im vorgegebenen Abstand und entsprechen nicht den Anforderungen der Aufgabenstellung (siehe Kapitel 1.3). Die Methode Paarabstand markiert die Stelle des minimalsten Abstandes und gibt den Wert aus. Für den Einschränkungsnachweis ist jedoch ein Farbverlauf mit den Werten des Freiraumes gefordert um den Minimalfreiraum eindeutig nachweisen zu können. Die Methode Abweichung berechnet die Abstandswerte zwischen einem Punktemuster und einer Oberfläche, wobei die Abstandswerte nicht dem Freiraum entsprechen. Somit scheidet auch diese Methode durch das Knock Out Kriterium aus.

Die restlichen Methoden visualisieren den Freiraum an der Analysegeometrie mit einem Farbverlauf und entsprechen den Anforderungen der Aufgabenstellung. Diese Methoden werden im Weiteren nach quantitativen und qualitativen Kriterien bewertet.

Tabelle 5: Methoden bezüglich Knock Out Kriterium bewertet

| Nr. | Methode | Kurzbeschreibung der Methodenausgabe hinsichtlich Aufgabenstellung | Bewertung |
|-----|---|---|------------------------|
| 1 | Vergleiche alle Punkte zueinander | Freiraumvisualisierung der Analysegeometrie mit Farbstufung | Muss Kriterium erfüllt |
| 2 | Gefilterte, relevante Punkte mit Kugelkoordinaten | Freiraumvisualisierung der Analysegeometrie mit Farbstufung | Muss Kriterium erfüllt |
| 3 | Geometrievergleich | Visualisierung jener Bereiche der Analysegeometrie, die sich im vorgegebenen Abstand befinden | Knock Out |
| 4 | Benutzerdefinierte Analyse | Freiraumvisualisierung der Analysegeometrie mit Farbstufung | Muss Kriterium erfüllt |
| 5 | Paarabstand | Ausgabe des minimalen Freiraumes der Analysegeometrie | Knock Out |
| 6 | Volumendurchdringung | Visualisierung jener Bereiche der Analysegeometrie, die sich im vorgegebenen Abstand befinden | Knock Out |
| 7 | Abweichung zwischen Punkt und Fläche | Ausgabe der Abstandswerte zwischen Punktemuster und Oberfläche | Knock Out |
| 8 | 3D Messtechniksoftware | Freiraumvisualisierung der Analysegeometrie mit Farbstufung | Muss Kriterium erfüllt |

4.11.2. Bewertung der Methoden bezüglich quantitativer Kriterien

Für die Bewertung der Methoden wird eine Werteskala herangezogen, vergleiche Tabelle 6. Diese ist nach VDI 2225 und [5] entsprechend übernommen worden. Ein Punktebereich von null bis sechs wurde wegen der Bewertung der qualitativen Kriterien gewählt (siehe Kapitel 4.11.3).

Tabelle 6: Werteskala

| Für Bewertung entsprechend übernommen | | Richtlinie VDI 2225 | |
|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| Pkt. | Bedeutung | Pkt. | Bedeutung |
| 0 | absolut unbrauchbare Lösung | 0 | unbefriedigend |
| 1 | schwache Lösung | 1 | gerade noch tragbar |
| 2 | tragbare Lösung | | |
| 3 | ausreichende Lösung | 2 | ausreichend |
| 4 | befriedigende Lösung | | |
| 5 | gute Lösung | 3 | gut |
| 6 | sehr gute Lösung | 4 | sehr gut (ideal) |

Tabelle 7: Bewertung quantitativer Kriterien

| Verwendete Software | Matlab | | | | PTC Elements | | Powerinspect | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------|---|-----------|----------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| Methode | Vergleiche alle Punkte zueinander | | Gefilterte, relevante Punkte mit Kugelkoordinaten | | Benutzerdefinierte Analyse | | 3D Messtechniksoftware | |
| Bewertungskriterium | Wert | Bewertung | Wert | Bewertung | Wert | Bewertung | Wert | Bewertung |
| (Teil-) Automatisierter Zeitaufwand | 6,2 min | 2 | 26,8 min | 1 | 0,1 min | 5 | 0,1 min | 5 |
| Operativer Zeitaufwand | 60 min | 3 | 60 min | 3 | 60 min | 3 | 60 min | 3 |
| Investitionskosten | 0 € | 6 | 0 € | 6 | 0 € | 6 | 11000 € ⁵ | 2 |

⁵ Jährliche Lizenzkosten für die Standardversion Powerinspect

Der (teil-) automatisierte Aufwand wurde auf Zeit mittels einer Stoppuhr bei der Ausführung der Methode für den Testfall bestimmt. Der Zeitaufwand der Benutzerdefinierten Analyse und der 3D Messtechniksoftware für die Ausführung der Analyse am Testfall beläuft sich auf Bruchteilen von Sekunden. Jedoch ist der Zeitaufwand für Beispiele aus der Praxis erheblich höher, deshalb erfolgt keine ideale Bewertung. Die Methoden im Matlab benötigen mehrere Minuten für die Ausführung des Testfalls. Es hat sich gezeigt, dass der aufwändigere Algorithmus keine Verbesserung in der Laufzeitperformance bringt und deshalb auch weniger gut bewertet wurde.

Der operative Zeitaufwand entspricht jener Zeit, die der geschulte Anwender benötigt um die Analyse vorzubereiten und anschließend die Ergebnisse aufzubereiten. Dieser Zeitaufwand wurde geschätzt. Für alle vier Methoden wurde ein Zeitaufwand von 60 Minuten angenommen, da in etwa derselbe operative Arbeitsaufwand für die Vor- und Nachbereitung anfällt.

Die Investitionskosten sind Softwarekosten, die anfallen, um die Software für die Durchführung der Freiraumanalyse bereitzustellen. Die Software Matlab und PTC Elements werden bereits von Siemens verwendet und sind verfügbar. Die Software Powerinspect muss angeschafft werden, deshalb ist ein Investment nötig.

4.11.3. Bewertung der Methoden bezüglich qualitativer Kriterien

Die Bewertung der Methoden bezüglich qualitativer Kriterien erfolgt, ebenso wie die Gewichtung der Kriterien, mit Hilfe des Rangfolgeverfahrens [5]. Die Methoden werden bezüglich jedem qualitativen Kriterium miteinander verglichen und markiert. Ist die Methode besser zu bewerten, wird sie mit 2 markiert. Sind die Methoden bezüglich des Kriteriums gleich zu bewerten, so erfolgt eine Markierung mit 1 und bei weniger guten Bewertung mit 0. Es sind vier Methoden zu bewerten, somit können für jede Methode null bis sechs Punkte vergeben werden.

Die Stabilität der Freiraumanalyse beschreibt die Zuverlässigkeit mit der ein Analyseergebnis ohne Eingreifen des Anwenders ausgegeben wird. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die beiden Methoden in Matlab ein Ergebnis abhängig von der Analysegeometrie entweder liefern oder das Programm abstürzt. Der Testfall stellt eine einfache Analysegeometrie dar, wobei Analysegeometrien aus der Praxis komplizierter sind. Beim Testfall geben die Methoden in Matlab zuverlässig ein Ergebnis aus. Bei praxisbezogener Anwendung besteht durch die aufwändigeren Analysegeometrien die Unsicherheit, dass die beiden Methoden in Matlab eine Lösung ausgeben. Die Methoden in PTC Elements und Powerinspect hingegen liefern eine Lösung unabhängig von der Analysegeometrie. Der Zeitaufwand erhöht sich mit der Kompliziertheit der Geometrien zwar, jedoch wird eine Lösung bei aufwändigeren Analysegeometrien stabiler als bei den Matlabmethoden ausgegeben. Im Rangfolgeverfahren in Tabelle 8 bedeutet das daher eine bessere Bewertung für Benutzerdefinierte Analyse und 3D Messtechniksoftware im Vergleich zu den beiden Matlabmethoden. Zwischen Benutzerdefinierte Analyse und 3D Messtechniksoftware, sowie zwischen den Matlabmethoden erfolgt keine Bevorzugung und somit eine neutrale Bewertung.

Die Qualität der Ausgabe ist bei den beiden Methoden in Matlab und bei der 3D Messtechniksoftware in Tabelle 9 gleich bewertet. Alle drei Methoden ermöglichen eine Freiraumvisualisierung ausgegeben von der verwendeten Software. Deren Ausgabe besteht aus der mit den Abstandswerten eingefärbten Schrumpfverpackung der Analysegeometrie. Für den Einschränkungsnachweis fehlt der Schrumpfverpackung jedoch der Bezug zum Fahrwerk. Es ist zusätzlicher Aufwand erforderlich, die den Bezug zwischen Schrumpfverpackung und eigentlichem Fahrwerk für den Nachweis wieder herstellen. Die Benutzerdefinierte Analyse visualisiert den Freiraum direkt in PTC Elements. Dabei besteht die Möglichkeit, dass gemeinsam mit der eingefärbten Schrumpfverpackung (Ergebnis der Freiraumanalyse), die Skelettlinien der durch die Erzeugung der Schrumpfverpackung weggeschnitten Fahrwerkkomponenten angezeigt werden können. Wodurch der Zusammenhang zwischen Schrumpfverpackung und Fahrwerk wieder hergestellt und am Bildschirm visualisiert wird. Die Ausgabe der Benutzerdefinierte Analyse kann somit als Screenshot in den Einschränkungsnachweis übernommen werden und wird daher besser bewertet.

Das letzte zu behandelnde qualitative Kriterium ist die Softwareabhängigkeit. Hierbei schneiden die Matlabmethoden besser ab als die anderen beiden Methoden. Die Matlabmethoden führen die Freiraumanalyse mit softwareunabhängigen Algorithmen aus. Sie basieren auf den Regeln der Mathematik und sind mit Hilfe von Matlab implementiert worden. Deren Quellcode ist demnach unabhängig von Softwareupdates des Anbieters, welche eine Analyse impraktikabel machen könnten. Die Benutzerdefinierte Analyse und die 3D Messtechniksoftware sind hingegen von fremder Hand erzeugte Analysemethoden und sind abhängig von deren Softwareanbietern. Das führt zu einer weniger guten Bewertung in Tabelle 10 im Vergleich zu den beiden Methoden in Matlab.

Tabelle 8: Rangfolgeverfahren für Bewertungskriterium Stabilität

| Stabilität der Freiraumanalyse Zeile ist 2=besser/1=gleich/0=weniger gut als Spalte | Vergleiche alle Punkte zueinander | Gefilterte, relevante Punkte mit Kugelkoordinaten | Benutzerdefinierte Analyse | 3D Messtechniksoftware | Bewertung |
|--|-----------------------------------|---|----------------------------|------------------------|-----------|
| Vergleiche alle Punkte zueinander | - | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Gefilterte, relevante Punkte mit Kugelkoordinaten | 1 | - | 0 | 0 | 1 |
| Benutzerdefinierte Analyse | 2 | 2 | - | 1 | 5 |
| 3D Messtechniksoftware | 2 | 2 | 1 | - | 5 |

Tabelle 9: Rangfolgeverfahren für Bewertung Qualität

| Qualität der Ausgabe Zeile ist 2=besser/1=gleich/0=weniger gut als Spalte | Vergleiche alle Punkte zueinander | Gefilterte, relevante Punkte mit Kugelkoor- dinaten | Benutzerdefinierte Ana- lyse | 3D Messtechniksoftware | Bewertung |
|--|--------------------------------------|---|---------------------------------|------------------------|-----------|
| Vergleiche alle Punkte zueinander | - | 1 | 0 | 1 | 2 |
| Gefilterte, relevante Punkte mit Kugel- koordinaten | 1 | - | 0 | 1 | 2 |
| Benutzerdefinierte Analyse | 2 | 2 | - | 2 | 6 |
| 3D Messtechniksoftware | 1 | 1 | 0 | - | 2 |

Tabelle 10: Rangfolgeverfahren für Bewertung Softwareabhängigkeit

| Softwareabhängigkeit Zeile ist 2=besser/1=gleich/0=weniger gut als Spalte | Vergleiche alle Punkte zueinander | Gefilterte, relevante Punk- te mit Kugelkoordinaten | Benutzerdefinierte Analy- se | 3D Messtechniksoftware | Bewertung |
|--|--------------------------------------|--|---------------------------------|------------------------|-----------|
| Vergleiche alle Punkte zueinander | - | 1 | 2 | 2 | 5 |
| Gefilterte, relevante Punkte mit Kugel- koordinaten | 1 | - | 2 | 2 | 5 |
| Benutzerdefinierte Analyse | 0 | 0 | - | 1 | 1 |
| 3D Messtechniksoftware | 0 | 0 | 1 | - | 1 |

4.11.4. Zielertragsmatrix

Das Ergebnis einer Nutzwertanalyse (nach Zangemeister 1970) [5] wird in einer Zielertragsmatrix dargestellt. Es werden Nutzwerte für die Methoden ermittelt, eine Rangordnung erstellt und eine Auswahl getroffen. Die Nutzwerte ergeben sich als Summe der Teilnutzwerte der einzelnen Bewertungskriterien. Die Teilnutzwerte sind das Produkt aus Gewichtungsfaktor und Bewertung.

Tabelle 11: Zieltragsmatrix der Methodenbewertung

| Verwendete Software | | Matlab | | | | PTC Elements | | Powerinspect | |
|------------------------------------|---------|-----------------------------------|--------------|---|--------------|----------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Methode | | Vergleiche alle Punkte zueinander | | Gefilterte, relevante Punkte mit Kugelkoordinaten | | Benutzerdefinierte Analyse | | 3D Messtechniksoftware | |
| Bewertungskriterium | Gewicht | Bewertung | Teilnutzwert | Bewertung | Teilnutzwert | Bewertung | Teilnutzwert | Bewertung | Teilnutzwert |
| (Teil-)Automatisierter Zeitaufwand | 20.0 | 2 | 40.0 | 1 | 20.0 | 5 | 100.0 | 5 | 100.0 |
| Operativer Zeitaufwand | 26.7 | 3 | 80.0 | 3 | 80.0 | 3 | 80.0 | 3 | 80.0 |
| Investitionskosten | 6.7 | 6 | 40.0 | 6 | 40.0 | 6 | 40.0 | 2 | 13.3 |
| Stabilität der Freiraumanalyse | 20.0 | 1 | 20.0 | 1 | 20.0 | 5 | 100.0 | 5 | 100.0 |
| Qualität der Ausgabe | 20.0 | 2 | 40.0 | 2 | 40.0 | 6 | 120.0 | 2 | 40.0 |
| Softwareabhängigkeit | 6.7 | 5 | 33.3 | 5 | 33.3 | 1 | 6.7 | 1 | 6.7 |
| Summe Nutzwert | | 253.3 | | 233.3 | | 446.7 | | 340.0 | |
| Rang | | 3 | | 4 | | 1 | | 2 | |

Die Nutzwertanalyse zeigt, dass die Benutzerdefinierte Analyse in PTC Elements den größten Nutzwert besitzt und somit ausgewählt wird. Die Methoden in Matlab besitzen unter anderem deshalb einen geringeren Nutzwert, da die Softwareabhängigkeit als Kriterium relativ niedrig gewichtet wurde. Die Auswahl der Benutzerdefinierten Analyse wird auch deshalb getroffen, da die Bauraumuntersuchung in PTC Elements durchgeführt werden kann. Also in jener Software mit der auch die Konstruktion der Fahrwerke passiert. Der Anwender ist bereits mit der Software vertraut und kann die Bauraumuntersuchung in den Konstruktionsprozess integrieren.

5. Konzeptionierung einer Teilautomatisation

In vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass die am besten geeignete Methode die Benutzerdefinierte Analyse in PTC Elements ist. Der Workflow der Methode ist in Abbildung 27 gezeigt und stellt die Methode in drei Schritten dar. Die Modellvorbereitung und Freiraumanalyse wird nun teilautomatisiert. Die Teilautomatisation startet bei Vorliegen einer Analysegeometrie, die wie folgt erzeugt wird.

Das komplette Fahrwerk wird in 3D CAD mit PTC Elements angezeigt. Als ersten Schritt wird das Fahrwerk auf die zu analysierende Federstufe reduziert. Dabei werden die übrigen Federstufen und Komponenten unterdrückt. Die entsprechende 3D Begrenzungsfläche wird anschließend spezifisch für das Fahrwerk und Federstufe erzeugt und in PTC Elements eingefügt, vergleiche Kapitel 3.2, Abbildung 10. In der Baugruppe in PTC Elements erfolgt ein Materialschnitt mit der Extrudieren-Funktion [4] in einem Abstand von in etwa 200mm von der Begrenzungsfläche durch die Fahrwerkskomponenten der Federstufe. Dabei werden sämtliche Geometrien weggeschnitten, die für die Einschränkung nicht von Interesse sind. Von den übrigen Geometrien wird eine Schrumpfverpackung erzeugt. Diese Schrumpfverpackung ist eine triangulierte Geometrie und sie wird mit einem Verbundvolumen im Modellbaum angezeigt. Ein Unterdrücken dieses Verbundvolumens erzeugt aus der Schrumpfverpackung eine Sammelfläche. Die zweite Sammelfläche bildet die bereits eingefügte 3D Begrenzungslinie. Zusammen bilden sie die Analysegeometrie auf der die teilautomatisierte Freiraumanalyse folgt.

Die Teilautomatisation passiert in PTC Elements mit Hilfe eines Mapkeys [4]. Durch eine frei wählbare Tastenkombination (in diesem Fall „uda“ für User Defined Analysis) startet der Anwender den Mapkey in PTC Elements und es werden die aufgenommenen Befehle ausgeführt. Die automatisierten Prozessschritte, in Abbildung 37 dargestellt, sind die Platzierung eines Feldpunkts auf die Sammelfläche der Schrumpfverpackung, das Einfügen des Abstand Mess-Konstruktionselements, die Gruppierung der beiden Konstruktionselemente im Modellbaum und das Starten der Benutzerdefinierten Analyse. Der Hintergrund in PTC Elements soll vor dem Start des Mapkeys auf Weiß umgestellt werden. Ebenfalls soll eine Darstellung der, durch die Schrumpfverpackung weggeschnittenen Fahrwerksgeometrien als Skelettlinien gewählt werden. Das Analysetool Benutzerdefinierte Analyse wird vom Mapkey durch die Tastenkombination uda gestartet und die Analyse ausgeführt. Nach wenigen Minuten wird das Ergebnis inklusive

Farbskala am Bildschirm angezeigt. Nachfolgend sind die erwähnten Befehle des Mapkeys angeführt, der vollständige Code befindet sich in Anhang D.

Tabelle 12: Beschreibung spezifischer Mapkeyzeilen aus dem Code

| Auszug des Mapkeys | Beschreibung |
|--|---|
| mapkey uda @MAPKEY_NAMEMapkey zur Ausführung der Freiraumuntersuchung;\ | Tastenkombination zum Starten des Mapkeys |
| mapkey(continued) @MAPKEY_LABELBauraumuntersuchung;~ Command `ProCmdDatumPointField` ;\ | Platzieren des Feldpunktes |
| mapkey(continued) ~ Activate `main_dlg_cur` `page_Analysis_control_btn` 1;\ | Einfügen des Abstand Mess-KEs |
| mapkey(continued) ~ Command `ProCmdNmdTool` 1;~ Open `main_dlg_cur` `Sst bar.filter list`;\ | |
| mapkey(continued) ~ Select `main_dlg_cur` `PHTLeft.AssyTree` 2 `node15` `node14` 2;\ | Gruppieren der beiden KEs |
| mapkey(continued) ~ RButtonArm `main_dlg_cur` `PHTLeft.AssyTree` `node14`;\ | |
| mapkey(continued) ~ PopupOver `main_dlg_cur` `PM_PHTLeft.AssyTree` 1 `PHTLeft.AssyTree`;\ | |
| mapkey(continued) ~ Open `main_dlg_cur` `PM_PHTLeft.AssyTree`;\ | |
| mapkey(continued) ~ Close `main_dlg_cur` `PM_PHTLeft.AssyTree`;\ | |
| mapkey(continued) ~ Activate `uda` `Compute`; | Start der Benutzerdefinierten Analyse |

Es folgt nun die ingenieurmäßige Betrachtung jeder computerunterstützten 3D Analyse durch den Benutzer. Der Wert des minimalen Freiraumes wird an der Farbskala in Millimetern angegeben. Ist der Wert unplausibel (z. B. 1e-03) so lässt das auf eine Durchdringung der beiden Sammelflächen schließen. Die Fahrzeugbegrenzung wurde damit verletzt und das Fahrwerk entspricht nicht den normativen Anforderungen. Weiteres wird die Stelle des Minimalfreiraums am 3D Modell begutachtet und analysiert. Die Geometrieabweichung durch die Triangulierung der Schrumpfverpackung soll dabei berücksichtigt werden. Abschließend erfolgt die Erstellung repräsentativer Screenshots für den Einschränkungsnachweis.

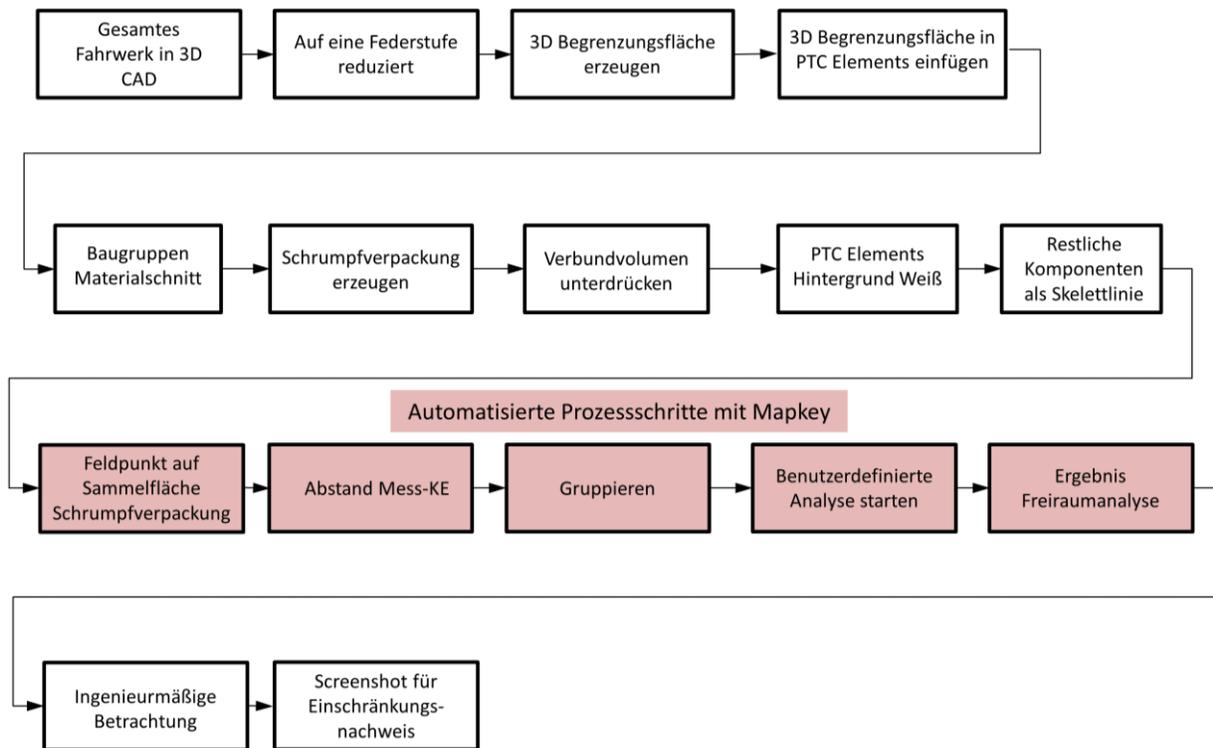


Abbildung 37: Prozessbild Konzeptionierung Teilautomatisation

6. Exemplarische Methodenumsetzung

Die Benutzerdefinierte Analyse wird für die Bestimmung des Freiraumes bei der Bauraumuntersuchung des Fahrwerks SF100L umgesetzt. Das Fahrwerk SF100L ist ein luftgefedertes Lauf-fahrwerk für Reisezugwagen. Mit seinem innovativen, verwindungsweichen Leichtbaurahmen in offener H-Bauweise werden neue Maßstäbe für Hochleistungsfahrwerke gesetzt. Das Fahrwerk wird sowohl für den Nah- als auch für den Fernverkehr eingesetzt. Das Fahrwerk SF100L ist der Fahrwerkfamilie SF400 im Siemens Produktportfolio ähnlich (siehe Abbildung 1).

Eine Freiraumanalyse ist getrennt für ungedederte, primär- und sekundärgedederte Massen des Fahrwerks durchzuführen. Im Folgenden wird eine Bauraumuntersuchung für die primäre Federstufe dargestellt.

6.1. Modellvorbereitung

Eine Modellvorbereitung ist notwendig um von der Ausgangssituation eine Analysegeometrie zu erzeugen. Die Ausgangssituation besteht aus der Baugruppe der primärgedederten Komponenten des Fahrwerks und der dazugehörigen Begrenzungsfläche. Zuerst wird ein Materialschnitt durch die Baugruppe gelegt um nur Geometrien, die für die Einschränkung relevant sind zu behandeln. Der Materialschnitt wird als Versatz der Begrenzungsfläche ausgeführt. Der Versatz beträgt

200mm in Richtung Fahrwerk. Anschließend folgt eine Schrumpfverpackung der übrigen (relevanten) Geometrien. Die Schrumpfverpackung und die Begrenzungsfläche bilden die für die Freiraumanalyse notwendige Analysegeometrie. Durch eine Tastenkombination wird ein Mapkey mit der teilautomatisierten Freiraumanalyse gestartet und nach einigen Minuten das Ergebnis am Bildschirm angezeigt.

6.2. Ausgabe der Freiraumanalyse

Der Freiraum wird, wie in Abbildung 38 ersichtlich, farblich an der Analysegeometrie visualisiert und der Wert kann der nebenstehenden Skala entnommen werden. Es ist die Position des geringsten Freiraums eindeutig erkennbar. Dieser liegt an der primären Anbindung des Sekundärvertikaldämpfers und hat einen Wert von 19mm. Alle übrigen Geometrien besitzen mehr Freiraum, wie der Farbverlauf zeigt. Um eine eindeutige Zuordnung des Analyseergebnisses am Fahrwerk zu gewährleisten werden die restlichen Geometrien der Federstufe, die durch den Materialschnitt weggeschnitten wurden, zusätzlich als Skelettlinien am Bildschirm angezeigt. Der Freigängigkeitsnachweis ist somit für die primäre Federstufe des Fahrwerks SF100L erbracht.

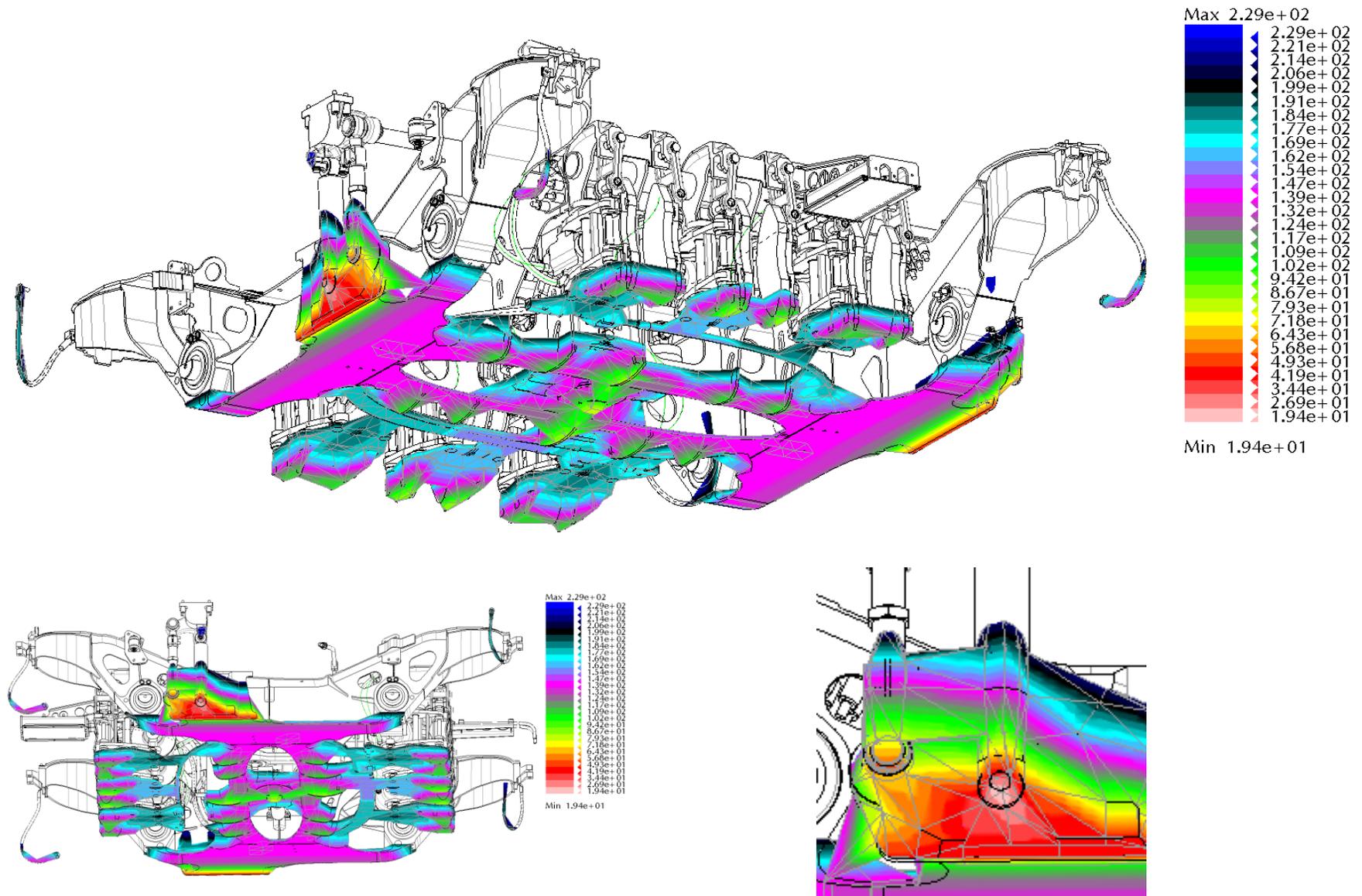


Abbildung 38: Bauraumuntersuchung primärgefederter Komponenten SF100L

7. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Arbeit, wie in Kapitel 1.2 definiert, ist eine praktikable Bestimmung des Freiraumes für den Einschränkungsnachweis der Fahrwerke. Der Freiraum gilt als bestimmt wenn dessen Werte berechnet und dessen Verteilung am Fahrwerk farblich visualisiert sind. Ebenfalls ist der minimale Freiraum explizit auszugeben und für die Bauraumuntersuchung eindeutig nachzuweisen. Dafür sind verschiedene Methoden anhand eines einfachen Testfalls entwickelt worden. Diese Methoden sind mit Hilfe einer Nutzwertanalyse bewertet worden. Als bestes Ergebnis kristallisierte sich die Methode der Benutzerdefinierten Analyse in PTC Elements heraus. Für die Methode wurde eine Teilautomatisation konzipiert und exemplarisch für eine Freiraumanalyse aus der Praxis angewendet.

Die Freiraumanalyse direkt in PTC Elements durchzuführen ist von Vorteil, da auch die Konstruktion der Fahrwerke mit dieser Software passiert. Somit ist bei der Durchführung der Bauraumuntersuchung keine Zweit- oder Drittsoftware notwendig. Auch die Teilautomatisation der Freiraumanalyse ist durch Anwendung eines Mapkeys in PTC Elements möglich. Ist der Mapkey einmal aufgenommen, kann dieser einfach vom Siemens Systemadministrator auf die Arbeitsplätze verteilt und somit den Anwendern zur Verfügung gestellt werden. Da für die Freiraumanalyse ausschließlich PTC Elements eingesetzt wird, sind die Anwender bereits mit der Software vertraut und können auf jahrzehntelanger Erfahrung im Umgang mit dem Programm aufbauen. Es sind keine aufwändigen Schulungsmaßnahmen nötig.

Diese Art der Bauraumuntersuchung ist eine Neuentwicklung. Gegenüber der bisherigen Nachweiserbringung der Freigängigkeit der Fahrwerke mit einer 2D Einschränkungsszeichnung, bietet die Benutzerdefinierte Analyse eine dreidimensionale Problembehandlung. Die Freigängigkeit kann anschaulich und eindeutig an den Fahrwerkskomponenten nachgewiesen werden. Anstatt Zeichnungen soll zukünftig ein Einschränkungsdokument für das Gutachten der Fahrwerke vorgelegt werden. Kern dieses Dokuments bilden die 3D Freiraumanalysen. Die Erstellung der Analysen soll in den Konstruktionsprozess integriert werden. Damit wird Zeitaufwand bei der Erstellung des Einschränkungsnachweises eingespart. Ebenfalls können mögliche Fehler vorab erkannt und eliminiert werden. Der Konstrukteur führt die in PTC Elements integrierte Freiraumanalyse parallel zur Konstruktion der Fahrwerke durch. Somit kann der Bauraum optimal genutzt werden. Das bringt nicht nur ein Zeitersparnis in der Konstruktion sondern auch eine Qualitätssteigerung durch optimale Bauraumnutzung.

Wie in Abbildung 39 dargestellt, besteht Potenzial die Teilautomatisation noch auszuweiten. Das Einfügen der Textdateien der 3D Begrenzungsflächen in PTC Elements könnte noch in den Mapkey mit aufgenommen und somit ebenfalls automatisiert werden. Auch die Definition des Baugruppenmaterialschnitts und dessen anschließende Erzeugung einer Schrumpferpackung haben Potential zur Automatisierung. Ist das geschafft, kann das Verbundvolumen im Modellbaum einfach automatisiert unterdrückt werden um die Schrumpferpackung als Sammelfläche

darzustellen. Den Hintergrund in PTC Elements auf Weiß umzustellen und die Darstellung der, durch die Erzeugung der Schrumpfverpackung weggeschnittenen Fahrwerkskomponenten einer Federstufe als Skelettlinie sind ebenfalls noch potentiell automatisierbar.

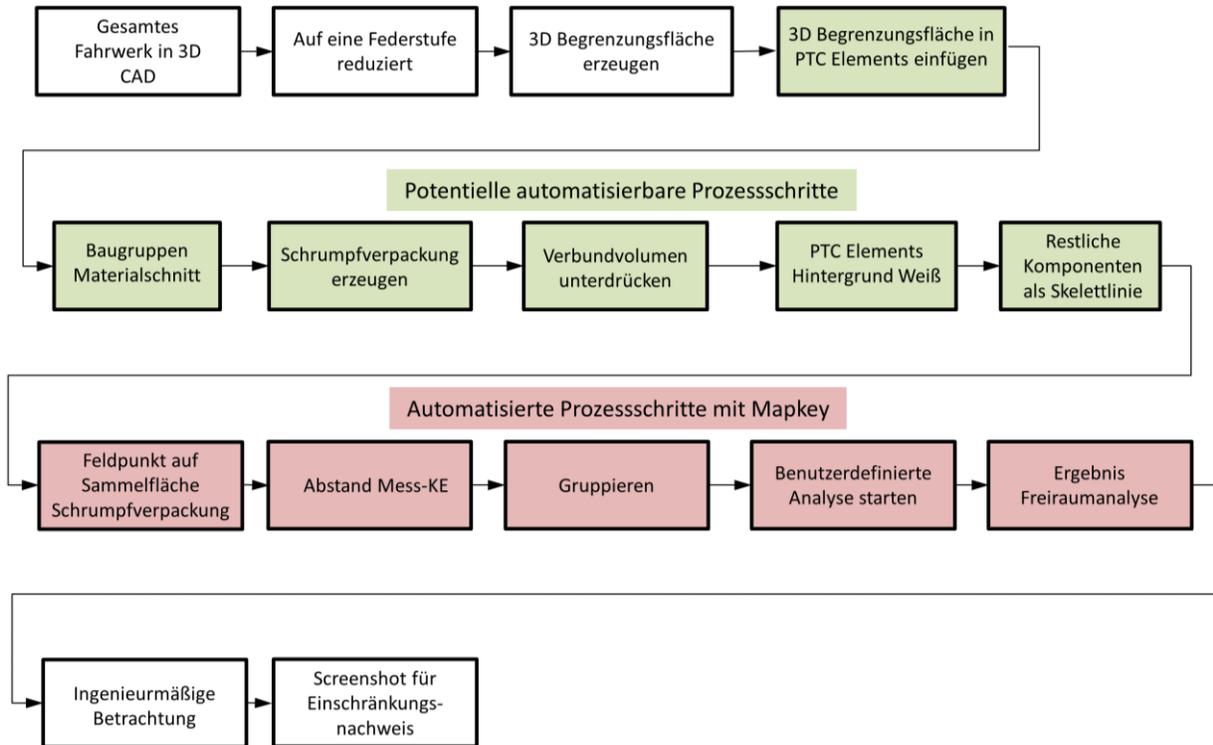


Abbildung 39: Potentielle automatisierbare Prozessschritte

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Fahrwerk SF400 (Quelle: Siemens Produktportfolio)..... | 8 |
| Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Fahrwerks (externe Quelle: Partim (Username))..... | 9 |
| Abbildung 3: Gegenüberstellung Schwingen- Säulenführung (v.l.n.r.) (Quelle: Siemens intern) | 10 |
| Abbildung 4: Bezugslinien (Bild 2 aus [2])..... | 12 |
| Abbildung 5: Gegenüberstellung Fahrzeugbegrenzungslinie und Bezugslinie | 13 |
| Abbildung 6: Begrenzungslinie ungefederter Massen mit Bezugslinie bei momentaner Vorgehensweise | 14 |
| Abbildung 7: Auszug einer Einschränkungsszeichnung (Quelle: Siemens intern)..... | 15 |
| Abbildung 8: Allgemeiner Prozess | 16 |
| Abbildung 9: Einschränkung aufgrund Bogenkrümmung (Quelle: TU Graz Skriptum) | 16 |
| Abbildung 10: Fahrzeugbegrenzungsfläche in PTC Elements eingefügt..... | 17 |
| Abbildung 11: Ausgangssituation..... | 18 |
| Abbildung 12: Abweichung von der Idealgeometrie..... | 19 |
| Abbildung 13: STL Export der Schrumpfverpackung bei Qualitätsstufe zwei, fünf und acht (v.l.n.r.) | 19 |
| Abbildung 14: Verlauf der Dateigröße | 20 |
| Abbildung 15: Verlauf der Dreiecksanzahl | 20 |
| Abbildung 16: Verlauf der max. Geometrieabweichung..... | 21 |
| Abbildung 17: Allgemeiner Prozess mit operativen und automatisierten Zeitaufwand | 23 |
| Abbildung 18: Gewichtung der Kriterien | 25 |
| Abbildung 19: Testfall | 26 |
| Abbildung 20: Workflow Methode 1..... | 27 |
| Abbildung 21: 3D Plot der Methode 1 in Matlab | 29 |
| Abbildung 22: Workflow Methode 2..... | 29 |
| Abbildung 23: 3D Plot der Methode 2 in Matlab | 31 |
| Abbildung 24: Workflow Geometrievergleich | 31 |
| Abbildung 25: Modellvorbereitung Geometrievergleich..... | 32 |
| Abbildung 26: Ausgabe Geometrievergleich..... | 33 |
| Abbildung 27: Workflow Benutzerdefinierte Analyse | 33 |
| Abbildung 28: Ausgabe Benutzerdefinierte Analyse | 34 |
| Abbildung 29: Workflow Paarabstand..... | 34 |
| Abbildung 30: Ausgabe Paarabstand..... | 35 |
| Abbildung 31: Workflow Volumendurchdringung | 35 |
| Abbildung 32: Ausgabe Volumendurchdringung..... | 36 |
| Abbildung 33: Workflow Abweichung | 37 |
| Abbildung 34: Ausgabe Abweichung..... | 37 |
| Abbildung 35: Workflow der Methode mit 3D Messtechnik | 38 |
| Abbildung 36: Ausgabe 3D Messtechniksoftware (Quelle: ITM)..... | 39 |
| Abbildung 37: Prozessbild Konzeptionierung Teilautomatisation..... | 49 |

Abbildung 38: Bauraumuntersuchung primärgefederter Komponenten SF100L..... 51
Abbildung 39: Potentielle automatisierbare Prozessschritte..... 53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versatz der Bezugslinie bei momentaner Vorgehensweise 14
Tabelle 2: Gegenüberstellung des momentanen Prozesses zur Neuentwicklung 22
Tabelle 3: Rangfolgeverfahren zur Bestimmung der Gewichte 24
Tabelle 4: Übersicht der Methoden..... 27
Tabelle 5: Methoden bezüglich Knock Out Kriterium bewertet 40
Tabelle 6: Werteskala 41
Tabelle 7: Bewertung quantitativer Kriterien 42
Tabelle 8: Rangfolgeverfahren für Bewertungskriterium Stabilität 44
Tabelle 9: Rangfolgeverfahren für Bewertung Qualität 45
Tabelle 10: Rangfolgeverfahren für Bewertung Softwareabhängigkeit..... 45
Tabelle 11: Zielertragsmatrix der Methodenbewertung 46
Tabelle 12: Beschreibung spezifischer Mapkeyzeilen aus dem Code 48

Literaturverzeichnis

- [1] K. G. Baur, Drehgestelle - Bogies, EK-Verlag, 2009.
- [2] F. J. Grote K.-H., Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau Kapitel Q2 Schienenfahrzeuge, Springer Verlag, 2014.
- [3] DIN EN 15273-2, Bahnanwendungen - Begrenzungslinien - Teil 2: Fahrzeugbegrenzungslinien; Deutsche Fassung EN 15273-2:2013, 2013.
- [4] „Creo Parametric Hilfe - Center,“ [Online]. Available: http://help.ptc.com/creo_hc/creo30_pma_hc/german/. [Zugriff am 15 Dezember 2016].
- [5] S. R. Rieg F., Handbuch Konstruktion, Hanser Verlag, 2012.
- [6] S. W. Scheid H., Elemente der Linearen Algebra und der Analysis, 2009.
- [7] G. Adler, Lexikon der Eisenbahn 8. Auflage, transpress-Verlag.

Anhang A

```
close all
clear variables
clc

%% Einschränkungsrechnung
% MAIN File - übergeordnetes Script, das auf die entsprechenden
% Funktionen zugreift
% Patrick Strasser
% 09.11.2015

%% Matrix mit anwenderspezifischen Parametern

filename_excel='einschraenkungsberechnung.xlsx';
sheetname_uebergabe='uebergabe_matlab';

A_param = xlsread(filename_excel,sheetname_uebergabe,'J1:O10');

%% Auswahl script - Analysetool vs. Darstellung

if A_param(8,6)==1 %DIN EN 15273-2 Hüllkurve erzeugen

    if A_param(4,5)==1 %DIN EN 15273-2 mit linearem Querspiel
        [for-
mel_Eprim,E_prim,A_prim,formel_Eradver,formel_Esek,E_sek,A_sek,stellung_prim,
stellung_radver,stellung_sek,typ,pkt_anz]=FZB_func4();

        elseif A_param(5,5)==2 %DIN EN 15273-2 mit gleisbogenabhängigem Querspiel
            [for-
mel_Eprim,E_prim,A_prim,formel_Eradver,formel_Esek,E_sek,A_sek,stellung_prim,
stellung_radver,stellung_sek,typ,pkt_anz]=FZB_func5();

            end

            %Infodatei fehlt noch!

        elseif A_param(6,5)==1 %Manuelle Eingabe
            [n,E]=FZB_func3();
            %Infodatei fehlt noch!

        else %Begrenzungslinien erzeugen
            if A_param(4,5)==1 %DIN EN 15273-2 mit linearem Querspiel

                [E,formel_Eprim,E_prim,A_prim,formel_Eradver,formel_Esek,E_sek,A_sek,n,stellu
ng_prim,stellung_radver,stellung_sek,typ]=FZB_func1();

                elseif A_param(5,5)==2 %DIN EN 15273-2 mit gleisbogenabhängigem Querspiel

                    [E,formel_Eprim,E_prim,A_prim,formel_Eradver,formel_Esek,E_sek,A_sek,n,stellu
ng_prim,stellung_radver,stellung_sek,typ]=FZB_func2();

                    end

                end

            end

        end

    end

end
```

```

end

%% Ausgabefile - INFO FILE

fileID=fopen('0X0_INFO_FILE.ibl','w');
fprintf(fileID,'Art des Drehgestells: %s\r\n',typ);
fprintf(fileID,'Berechnung      der      ungefederten      Ebene      im
%s\r\n\r\n',stellung_radver);
fprintf(fileID,'Verwendete      Formel      nach      EN      15273-2:2013
%s\r\n',formel_Eradver);
fprintf(fileID,'Berechnung      der      primär      gefederten      Ebene      im
%s\r\n\r\n',stellung_prim);
fprintf(fileID,'Verwendete Formel nach EN 15273-2:2013 %s\r\n',formel_Eprim);
fprintf(fileID,'Berechnung      der      sekundär      gefederten      Ebene      im
%s\r\n\r\n',stellung_sek);
fprintf(fileID,'Verwendete Formel nach EN 15273-2:2013 %s\r\n',formel_Esek);
% close all
% clear variables
% clc

%% Einschränkungsberechnung nach EN 15273-2 - Hüllkurve (sweep envelope) mit
bogenabhängigem Querspiel
% Erzeugt eine Hüllfläche die zur Beurteilung der Bauteilgeometrien
% herangezogen werden kann - Analysetool
% Patrick Strasser
% 26.04.2016

function [formel_Eprim,E_prim,A_prim,formel_Eradver,formel_Esek,E_sek,A_sek,stellung_prim,
stellung_radver,stellung_sek,typ,pkt_anz]=FZB_func5()

%% 1 Einlesen der Parameter aus EXCEL Eingabemaske und Definition sinnvoller
Werte
% Matrix mit anwenderspezifischen Parametern

filename_excel='einschraenkungsberechnung.xlsx';
sheetname_uebergabe='uebergabe_matlab';

A_param = xlsread(filename_excel,sheetname_uebergabe,'J1:O10');

% Matrix mit Punktwolke Bezugslinie
pkt_anz = A_param(9,6); %Anzahl der Zeilen im Bezugslinienvektor
pkt_anz_str = strcat('T',num2str(pkt_anz));
A_bezug_einl =
xlsread(filename_excel,sheetname_uebergabe,['S1',':',pkt_anz_str]);

% Matrix mit gleisbogenabhängiger Querspielbegrenzung
rad_anz=A_param(10,6); %Anzahl der Spalten im Querspielvektor
rad_anz_str=strcat('AB',num2str(rad_anz));
A_quer=xlsread(filename_excel,sheetname_uebergabe,['Z1',':',rad_anz_str]);

% Hüllkuve - Bereich und Schrittweite

```

```
schrittweite=A_param(10,1); %Schrittweite laut Eingabe in mm

% Bereichsgrenzen
if A_param(7,5)==1 && A_param(9,5)==1 %n_i && n_i
    bereich=abs(A_param(10,5)-A_param(8,5));
elseif A_param(7,5)==2 && A_param(9,5)==1 %n_a && n_i
    bereich=A_param(8,5)+A_param(10,5);
elseif A_param(7,5)==1 && A_param(9,5)==2 %n_i && n_a
    bereich=A_param(8,5)+A_param(10,5);
elseif A_param(7,5)==2 && A_param(9,5)==2 %n_a && n_a
    bereich=abs(A_param(10,5)-A_param(8,5));
end

stuetzstelle=round(bereich/schrittweite); %Ganzzahlige Stützstellen berechnen

% Ersten Querschnitt definieren

if A_param(7,5)==1 && A_param(9,5)==1 %n_i && n_i
    if A_param(8,5)>A_param(10,5)
        n_xsec=-A_param(8,5);
    else
        n_xsec=-A_param(10,5);
    end
elseif A_param(7,5)==2 && A_param(9,5)==1 %n_a && n_i
    n_xsec=-A_param(10,5);
elseif A_param(7,5)==1 && A_param(9,5)==2 %n_i && n_a
    n_xsec=-A_param(8,5);
elseif A_param(7,5)==2 && A_param(9,5)==2 %n_a && n_a
    if A_param(8,5)>A_param(10,5)
        n_xsec=A_param(10,5);
    else
        n_xsec=A_param(8,5);
    end
end

%% IBL Datei generieren

% Bezugslinie
if A_param(1,6)==1
    fileID_bez=fopen('0_bezug_huell.ibl','w');
    fprintf(fileID_bez,'Open pointwise\n');
end

% Radverschleiss - ungefederte Ebene
if A_param(2,6)==1
    fileID_radver=fopen('1_radver_huell.ibl','w');
    fprintf(fileID_radver,'Open pointwise\n');
end

% Primärgefedert
if A_param(3,6)==1
    fileID_prim=fopen('2_prim_huell.ibl','w');
    fprintf(fileID_prim,'Open pointwise\n');
end
```

```
% Sekundärgefedert
if A_param(4,6)==1
    fileID_sek=fopen('3_sek_huell.ibl','w');
    fprintf(fileID_sek,'Open pointwise\n');
end

% Primär- und Sekundärgefedert
if A_param(5,6)==1
    fileID_primsek=fopen('4_primsek_huell.ibl','w');
    fprintf(fileID_primsek,'Open pointwise\n');
end

for m=0:stuetzstelle

    % x Position festlegen

    A_bezug = [n_xsec*ones(pkt_anz,1), A_bezug_einl];

    % Vektor mit Werten in z Richtung - Höhe h
    h_lauf=A_bezug(:,3);

    % Art des Drehgestells
    if A_param(3,5)==1 %Triebdrehgestell und Güterwagen (ungefederte und pri-
    mär gefederte Ebene)

        typ='TDG';

        kontrollwert_niprim=ones(pkt_anz,1);
        kontrollwert_naprim=ones(pkt_anz,1);
        kontrollwert_nisek=ones(pkt_anz,1);
        kontrollwert_nasek=ones(pkt_anz,1);
        wert1_TDG=ones(pkt_anz,1);
        wert2_TDG=ones(pkt_anz,1);
        wert3_TDG=ones(pkt_anz,1);
        wert4_TDG=ones(pkt_anz,1);
        wert_ungef=ones(pkt_anz,1);
        wert_prim=ones(pkt_anz,1);

        for i=1:pkt_anz
            if h_lauf(i)<=400
                kontrollwert_niprim(i)=5; %Güterwagen
                kontrollwert_naprim(i)=5; %Güterwagen
                kontrollwert_nisek(i)=5;
                kontrollwert_nasek(i)=5;
                wert1_TDG(i)=25;
                wert2_TDG(i)=175;
                wert3_TDG(i)=215;
                wert4_TDG(i)=5;
                wert_ungef(i)=25;
                wert_prim(i)=25;

            elseif h_lauf(i)>400
                kontrollwert_niprim(i)=7.5; %Güterwagen
                kontrollwert_naprim(i)=7.5; %Güterwagen
                kontrollwert_nisek(i)=7.5;
```

```

        kontrollwert_nasek(i)=7.5;
        wert1_TDG(i)=30;
        wert2_TDG(i)=170;
        wert3_TDG(i)=210;
        wert4_TDG(i)=7.5;
        wert_ungef(i)=30;
        wert_prim(i)=30;
    end
end

elseif A_param(3,5)==2 %Laufdrehgestell

    typ='LDG';

    kontrollwert_niprim=ones(pkt_anz,1);
    kontrollwert_naprim=ones(pkt_anz,1);
    kontrollwert_nisek=ones(pkt_anz,1);
    kontrollwert_nasek=ones(pkt_anz,1);
    wert1_LDG=ones(pkt_anz,1);
    wert2_LDG=ones(pkt_anz,1);
    wert3_LDG=ones(pkt_anz,1);
    wert4_LDG=ones(pkt_anz,1);
    wert5_LDG=ones(pkt_anz,1);
    wert_ungef=ones(pkt_anz,1);
    wert_prim=ones(pkt_anz,1);

    for i=1:pkt_anz
        if h_lauf(i)<=400
            kontrollwert_niprim(i)=5; %Güterwagen
            kontrollwert_naprim(i)=5; %Güterwagen
            kontrollwert_nisek(i)=250*(A_param(4,1)-A_param(3,1))*10^-3-
2.5;
            kontrollwert_nasek(i)=250*(A_param(4,1)-A_param(3,1))*10^-
3*abs(n_xsec)/A_param(1,1)+5;
            % A_param(4,1)=l (Spurweite)
            % A_param(3,1)=d (Spurmass)
            % n_xsec=na
            % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
            wert1_LDG(i)=10;
            wert2_LDG(i)=25;
            wert3_LDG(i)=190;
            wert4_LDG(i)=215;
            wert5_LDG(i)=5;
            wert_ungef(i)=25;
            wert_prim(i)=25;

            elseif h_lauf(i)>400
                kontrollwert_niprim(i)=7.5; %Güterwagen
                kontrollwert_naprim(i)=7.5; %Güterwagen
                kontrollwert_nisek(i)=250*(A_param(4,1)-A_param(3,1))*10^-3;
                kontrollwert_nasek(i)=250*(A_param(4,1)-A_param(3,1))*10^-
3*abs(n_xsec)/A_param(1,1)+7.5;
                % A_param(4,1)=l (Spurweite)
                % A_param(3,1)=d (Spurmass)
                % n_xsec=na
                % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)

```

```

        wert1_LDG(i)=15;
        wert2_LDG(i)=30;
        wert3_LDG(i)=185;
        wert4_LDG(i)=210;
        wert5_LDG(i)=7.5;
        wert_ungef(i)=30;
        wert_prim(i)=30;

    end
end
end

%% 2.1 Begrenzungslinie nach Radverschleiss - ungefederte Ebene

A_radver = A_bezug;

% Einschränkung der ungefederten Ebene (Radverschleiss) nach EN 15273-2
% Abschnitt A.3.10.1 für Güterwagen
% Achtung! der Abstand der Führungsquerschnitte ist in unserem Fall der
Radsatzabstand
% p und nicht der Drehzapfenabstand a wie in der Norm angegeben

E_primradver=ones(pkt_anz,1);

for i=1:pkt_anz

    if abs(n_xsec)<=A_param(2,1)/2 %ni

        ni_prim=A_param(2,1)/2-abs(n_xsec);
        % Umrechnung von Drehzapfenquerschnitt auf Radsatzquerschnitt
        % (Radsatzquerschnitt ist die Führungsebene für ungefederte und
primär % gefederte Bauteile)
        % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
        % abs(n_xsec)=ni

        vglwert_niprim=(A_param(2,1)*ni_prim-ni_prim^2)*10^-6;
        % siehe Ungleichung unter A.3.10.1.1 aus EN 15273-2
        % Entscheidung ob Gleisbogen oder Gerade maßgebend ist
        % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)

        if vglwert_niprim<=kontrollwert_niprim(i) %Gerade ist maßgebend
            E_primradver(i)=(A_param(4,1)-A_param(3,1))/2-15;
            % Gleichung A.61 aus EN 15273-2
            % A_param(4,1)=l (Spurweite)
            % A_param(3,1)=d (Spurmass)
            stellung_radver='geraderGleis';
            formel_Eradver='A.61';

maßgebend elseif vglwert_niprim>kontrollwert_niprim(i) % Gleisbogen ist

            E_primradver(i)=(A_param(4,1)-A_param(3,1))/2-wert_ungef(i);
            % Gleichung A.62 aus EN 15273-2
            % A_param(4,1)=l (Spurweite)
            % A_param(3,1)=d (Spurmass)

```

```

        stellung_radver='Gleisbogen';
        formel_Eradver='A.62';
    end
end

if abs(n_xsec)>A_param(2,1)/2 %na

    na_prim=abs(n_xsec)-A_param(2,1)/2;
    % Umrechnung von Drehzapfenquerschnitt auf Radsatzquerschnitt
    % (Radsatzquerschnitt ist die Führungsebene für ungefederte und
primär    % gefederte Bauteile)
    % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
    % abs(n_xsec)=na

    vglwert_naprim=(A_param(2,1)*na_prim+na_prim^2)*10^-6;
    % siehe Ungleichung unter A.3.10.1.2 aus EN 15273-2
    % Entscheidung ob Gleisbogen oder Gerade maßgebend ist
    % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
    % abs(n_xsec)=na

    if vglwert_naprim<=kontrollwert_naprim(i) %Gerade ist maßgebend
        E_primradver(i)=(A_param(4,1)-A_param(3,1))/2-15;
        % Gleichung A.63 aus EN 15273-2
        % A_param(4,1)=l (Spurweite)
        % A_param(3,1)=d (Spurmass)
        stellung_radver='geraderGleis';
        formel_Eradver='A.63';

maßgebend    elseif vglwert_naprim>kontrollwert_naprim(i) % Gleisbogen ist

        E_primradver(i)=(A_param(4,1)-A_param(3,1))/2-wert_ungef(i);
        % Gleichung A.64 aus EN 15273-2
        % A_param(4,1)=l (Spurweite)
        % A_param(3,1)=d (Spurmass)
        stellung_radver='Gleisbogen';
        formel_Eradver='A.64';
    end
end

end

for i=1:pkt_anz
    A_radver(i,3)=A_radver(i,3)+A_param(1,2);
    % z Versatz
    % A_param(1,2)=deltaRm (Radverschleiss bis Nachstellung)

    if A_radver(i,2)<A_param(3,1)/2
        % A_param(3,1)=d (Spurmass)
        A_radver(i,2)=A_radver(i,2)+E_primradver(i);    %innerhalb des
        Spurmass wird der Wert addiert
        % y Versatz

    elseif A_radver(i,2)>A_param(3,1)/2
        % A_param(3,1)=d (Spurmass)

```

```

        A_radver(i,2)=A_radver(i,2)-E_primradver(i);    %ausserhalb des
Spurmass wird der Wert subtrahiert
        % y Versatz
    end
end

A_radver(1,2)=A_bezug(1,2); %Ersten Punkt mit Bezugslinie wieder gleich-
setzen in y Richtung - zwecks Kosmetik

%% 2.2 z Glied, welches ein Gleitstückspiel von 5mm oder kleiner berück-
sichtigt
% siehe Gleichung unter A.3.8.1.2 aus EN 15273-2

% Glied 21:  $s/10 \cdot (h-h_c)$ 
glied21=A_param(7,1)/10*(h_lauf-A_param(5,1));
% A_param(7,1)=s (Neigungskoeffizient)
% A_param(5,1)=hC (Wankpolhöhe)

% Glied 22:  $0,04 \cdot (h-0,5)$  [m]
glied22=0.04*(h_lauf-500);

% Glied 11:  $s/30 \cdot (h-h_c)$ 
glied11=A_param(7,1)/30*(h_lauf-A_param(5,1));
% A_param(7,1)=s (Neigungskoeffizient)
% A_param(5,1)=hC (Wankpolhöhe)

% Prüfung Glied 2:
glied2=ones(pkt_anz,1);
for i=1:pkt_anz
    if glied21(i)>0 && glied22(i)>0 && (glied21(i)-glied22(i))>0
        glied2(i)=glied21(i)-glied22(i);
    else
        glied2(i)=0;
    end
end

%Prüfung Glied 1:
glied1=ones(pkt_anz,1);
for i=1:pkt_anz
    if glied11(i)>0
        glied1(i)=glied11(i);
    else
        glied1(i)=0;
    end
end

%Prüfung Glied 3: Für primär gefederte Bauteile, welche nach A.2.10
%Einschränkungsgleichungen für Güterwagen eingeschränkt werden, darf das
%z Glied für Bauteile mit einer Höhe von weniger als 1,17m um 0,005m
%reduziert werden. Deshalb wird ein z Glied für die Primär- und ein z
Glied für die Sekundärebene definiert
glied3=ones(pkt_anz,1);
for i=1:pkt_anz
    if h_lauf(i)<1170
        glied3(i)=-5;
    end
end

```

```

        else
            glied3(i)=0;
        end
    end
end

%Summenprüfung für z Glied Primärebene:

z_cinprim=ones(pkt_anz,1);

for i=1:pkt_anz
    if (glied1(i)+glied2(i)+glied3(i))<0
        z_cinprim(i)=0;
    else
        z_cinprim(i)=glied1(i)+glied2(i)+glied3(i);
    end
end

%Summenprüfung für z Glied Sekundärebene:

z_cinsek=ones(pkt_anz,1);

for i=1:pkt_anz
    if (glied1(i)+glied2(i))<0
        z_cinsek(i)=0;
    else
        z_cinsek(i)=glied1(i)+glied2(i);
    end
end

%% 2.3 Begrenzungslinie primärgefedert

A_prim = A_bezug;

% Einschränkung der primär gefederten Ebene nach EN 15273-2 Abschnitt
A.3.10.1 für Güterwagen
% Achtung! der Abstand der Führungsquerschnitte ist in unserem Fall der
Radsatzabstand
% p und nicht der Drehzapfenabstand a wie in der Norm angegeben

E_prim=ones(pkt_anz,1);

for i=1:pkt_anz

    % Bereich ni
    if abs(n_xsec)<=A_param(2,1)/2 %ni

        ni_prim=A_param(2,1)/2-abs(n_xsec);
        % Umrechnung von Drehzapfenquerschnitt auf Radsatzquerschnitt
        % (Radsatzquerschnitt ist die Führungsebene für ungefederte und
primär      % gefederte Bauteile)
        % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
        % abs(n_xsec)=ni
    end
end

```

```

vglwert_niprim=(A_param(2,1)*ni_prim-ni_prim^2)*10^-6;
% siehe Ungleichung unter A.3.10.1.1 aus EN 15273-2
% Entscheidung ob Gleisbogen oder Gerade maßgebend ist
% A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)

if vglwert_niprim<=kontrollwert_niprim(i) %Gerade ist maßgebend
    E_prim(i)=(A_param(4,1)-A_param(3,1))/2+A_param(2,3)-15;
    % Gleichung A.61 aus EN 15273-2
    % A_param(4,1)=l (Spurweite)
    % A_param(3,1)=d (Spurmass)
    % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
    stellung_prim='geraderGleis';
    formel_Eprim='A.61';

elseif vglwert_niprim>kontrollwert_niprim(i) % Gleisbogen ist
maßgebend

    ni_prim=A_param(2,1)/2-abs(n_xsec);
    % Umrechnung von Drehzapfenquerschnitt auf Radsatzquerschnitt
    % (Radsatzquerschnitt ist die Führungsebene für ungefederte
und primär
    % gefederte Bauteile)
    % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
    % abs(n_xsec)=na

    E_prim(i)=1/500000*(A_param(2,1)*ni_prim-
ni_prim^2)+(A_param(4,1)-A_param(3,1))/2+A_param(2,3)-wert_prim(i);
    % Gleichung A.62 aus EN 15273-2
    % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
    % A_param(4,1)=l (Spurweite)
    % A_param(3,1)=d (Spurmass)
    % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
    stellung_prim='Gleisbogen';
    formel_Eprim='A.62';
end
end

% Bereich na
if abs(n_xsec)>A_param(2,1)/2 %na

    na_prim=abs(n_xsec)-A_param(2,1)/2;
    % Umrechnung von Drehzapfenquerschnitt auf Radsatzquerschnitt
    % (Radsatzquerschnitt ist die Führungsebene für ungefederte und
primär
    % gefederte Bauteile)
    % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
    % abs(n_xsec)=na

    vglwert_naprim=(A_param(2,1)*na_prim+na_prim^2)*10^-6;
    % siehe Ungleichung unter A.3.10.1.2 aus EN 15273-2
    % Entscheidung ob Gleisbogen oder Gerade maßgebend ist
    % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)

    if vglwert_naprim<=kontrollwert_naprim(i) %Gerade ist maßgebend

```

```

        E_prim(i)=(A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2+A_param(2,3)*(2*na_prim+A_param(2,1))/A_param(2,1)-15;
        % Gleichung A.63 aus EN 15273-2
        % A_param(4,1)=l (Spurweite)
        % A_param(3,1)=d (Spurmass)
        % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
        % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
        stellung_prim='geraderGleis';
        formel_Eprim='A.63';

        elseif vglwert_naprim>kontrollwert_naprim(i) % Gleisbogen ist
maßgebend

E_prim(i)=1/500000*(A_param(2,1)*na_prim+na_prim^2)+((A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2+A_param(2,3)*(2*na_prim+A_param(2,1))/A_param(2,1)-
wert_prim(i);
        % Gleichung A.64 aus EN 15273-2
        % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
        % A_param(4,1)=l (Spurweite)
        % A_param(3,1)=d (Spurmass)
        % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
        stellung_prim='Gleisbogen';
        formel_Eprim='A.64';
    end
end

end

for i=1:pkt_anz
    A_prim(i,3)=A_prim(i,3)+A_param(1,2)+A_param(1,3);
    % z Versatz
    % A_param(1,2)=deltaDm (Radverschleiss bis Nachstellung)
    % A_param(1,3)=z_p (Einfederung primär)
    if A_prim(i,2)<A_param(3,1)/2
        % A_param(3,1)=d (Spurmass)
        A_prim(i,2)=A_prim(i,2)+E_prim(i)+z_cinprim(i); %innerhalb des
Spurmass wird der Wert addiert
        % y Versatz
    elseif A_prim(i,2)>A_param(3,1)/2
        A_prim(i,2)=A_prim(i,2)-E_prim(i)-z_cinprim(i); %ausserhalb des
Spurmass wird der Wert subtrahiert
        % y Versatz
    end
end
end
A_prim(1,2)=A_bezug(1,2); %Ersten Punkt mit Bezugslinie wieder gleichset-
zen in y Richtung - zwecks Kosmetik

%% 2.4 Begrenzungslinie sekundärgefedert - hier wird das bogenabhängiges
Querspiel berücksichtigt

A_sek = A_bezug;

% Einschränkung der sekundär gefederten Ebene erfolgt nach Abschnitt
% A.3.9.1 für TDG und A.3.9.3 für LDG. Führungsquerschnitt ist der
% Drehzapfenquerschnitt

```

```

E_sek=ones(pkt_anz,1);

for i=1:pkt_anz

    % Bereich ni
    if n_xsec<=0 %ni

        vglwert_nisek=(A_param(1,1)*abs(n_xsec)-
abs(n_xsec)^2+A_param(2,1)^2/4-500000*(A_param(2,4)-A_param(3,4)))*10^-6;
        % siehe Ungleichung unter A.3.9.1.1.1 aus EN 15273-2
        % Entscheidung ob Gleisbogen oder Gerade maßgebend ist
        % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
        % abs(n_xsec)=ni
        % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
        % A_param(2,4)=w_unend (Querweg im geraden Gleis)
        % A_param(3,4)=w_i(250) (Querweg im 250m Gleisbogen)

        if vglwert_nisek<=kontrollwert_nisek(i) %Gerade ist maßgebend
            stellung_sek='geraderGleis';
            E_sek(i)=(A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2+A_param(2,3)+A_param(2,4)-15;
            % Gleichung A.32 aus EN 15273-2
            % A_param(4,1)=l (Spurweite)
            % A_param(3,1)=d (Spurmass)
            % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
            % A_param(2,4)=w (Querweg sekundär am geraden Gleis)
            if A_param(3,5)==1 %Triebdrehgestell
                formel_Esek='A.32';
            elseif A_param(3,5)==2 %Laufdrehgestell
                formel_Esek='A.51';
            end

            elseif vglwert_nisek>kontrollwert_nisek(i) % Gleisbogen ist maß-
gebend - hier sind die Gleichungen für gleisbogenabhängiges Querspiel imple-
mentiert

                stellung_sek='Gleisbogen';

                if A_param(3,5)==1 %Triebdrehgestell

                    % Maximalwertbestimmung des Klammersausdrucks
                    maxmatrix1_Ei=zeros(rad_anz,1);
                    maxmatrix2_Ei=zeros(rad_anz,1);

                    for j=1:rad_anz
                        if A_quer(j,1)>=250 %R>=250m

maxmatrix1_Ei(j)=1/(2*A_quer(j,1)*1000)*(A_param(1,1)*abs(n_xsec)-
abs(n_xsec)^2+A_param(2,1)^2/4-kontrollwert_nisek(i)*10^6)+A_quer(j,2);
                            % siehe Gleichung A.38 aus EN 15273-2
                            % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
                            % abs(n_xsec)=ni
                            % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
                            % A_quer(j,1)=R (Gleisbogenradius)

```

```

        % A_quer(j,2)=wi(R) (Gleisbogenabhängiges Quer-
spiel)

        elseif A_quer(j,1)<250    &&    A_quer(j,1)>=150
%150m<=R<250m
            maxmat-
rix2_Ei(j)=1/(2*A_quer(j,1)*1000)*(A_param(1,1)*abs(n_xsec)-
abs(n_xsec)^2+A_param(2,1)^2/4-100*10^6)+A_quer(j,2);
            % siehe Gleichung A.39 aus EN 15273-2
            % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
            % abs(n_xsec)=ni
            % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
            % A_quer(j,1)=R (Gleisbogenradius)
            % A_quer(j,2)=wi(R) (Gleisbogenabhängiges Quer-
spiel)
        end
    end

    maxwert1_Ei=max(maxmatrix1_Ei); %R>=250m
    maxwert2_Ei=max(maxmatrix2_Ei); %150m<=R<250m

    if maxwert1_Ei>maxwert2_Ei
        formel_Esek='A.38';
        E_sek(i)=maxwert1_Ei+(A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2+A_param(2,3)-15;
        % A_param(4,1)=l (Spurweite)
        % A_param(3,1)=d (Spurmass)
        % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
        %index_maxwert1_Ei=find(maxwert1_Ei,maxmatrix1_Ei);
        index_maxwert_Ei=find(maxwert1_Ei==maxmatrix1_Ei);
    else
        formel_Esek='A.39';
        E_sek(i)=maxwert2_Ei+(A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2+A_param(2,3)+wert2_TDG(i);
        % A_param(4,1)=l (Spurweite)
        % A_param(3,1)=d (Spurmass)
        % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
        index_maxwert_Ei=find(maxwert2_Ei==maxmatrix2_Ei);
    end

elseif A_param(3,5)==2 %Laufdrehgestell

    % Maximalwertbestimmung des Klammersausdrucks
    maxmatrix1_Ei=zeros(rad_anz,1);
    maxmatrix2_Ei=zeros(rad_anz,1);

    for j=1:rad_anz
        if A_quer(j,1)>=250 %R>=250m
maxmatrix1_Ei(j)=1/(2*A_quer(j,1)*1000)*(A_param(1,1)*abs(n_xsec)-
abs(n_xsec)^2+A_param(2,1)^2/4-kontrollwert_nisek(i)*10^6)+A_quer(j,2);
            % siehe Gleichung A.57 aus EN 15273-2
            % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
            % abs(n_xsec)=ni
            % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
            % A_quer(j,1)=R (Gleisbogenradius)

```

```

                                % A_quer(j,2)=wi(R) (Gleisbogenabhängiges Quer-
spiel)

                                elseif A_quer(j,1)<250    &&    A_quer(j,1)>=150
%150m<=R<250m
                                maxmat-
rix2_Ei(j)=1/(2*A_quer(j,1)*1000)*(A_param(1,1)*abs(n_xsec)-
abs(n_xsec)^2+A_param(2,1)^2/4-100*10^6)+A_quer(j,2);
                                % siehe Gleichung A.58 aus EN 15273-2
                                % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
                                % abs(n_xsec)=ni
                                % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
                                % A_quer(j,1)=R (Gleisbogenradius)
                                % A_quer(j,2)=wi(R) (Gleisbogenabhängiges Quer-
spiel)

                                end
                                end

                                maxwert1_Ei=max(maxmatrix1_Ei); %R>=250m
                                maxwert2_Ei=max(maxmatrix2_Ei); %150m<=R<250m

                                if maxwert1_Ei>maxwert2_Ei
                                    formel_Esek='A.57';
                                    E_sek(i)=maxwert1_Ei+A_param(2,3);
                                    % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
                                    index_maxwert_Ei=find(maxwert1_Ei==maxmatrix1_Ei);
                                else
                                    formel_Esek='A.58';
                                    E_sek(i)=maxwert2_Ei+A_param(2,3)+wert3_LDG(i);
                                    % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
                                    index_maxwert_Ei=find(maxwert2_Ei==maxmatrix2_Ei);
                                end
                                end
                                end

                                % Bereich na
                                elseif n_xsec>0 %na

                                    vglwert_nasek=(A_param(1,1)*abs(n_xsec)+abs(n_xsec)^2-
A_param(2,1)^2/4-500000*((A_param(2,4)-
A_param(3,4))*abs(n_xsec)/A_param(1,1)+(A_param(2,4)-
A_param(4,4))*(abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1)))*10^-6;
                                    % siehe Ungleichung unter A.3.9.1.1.2 bzw. A.3.9.3.1.2 aus EN
15273-2

                                    % Entscheidung ob Gleisbogen oder Gerade maßgebend ist
                                    % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
                                    % abs(n_xsec)=na
                                    % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
                                    % A_param(2,4)=w_unend (Querweg im geraden Gleis)
                                    % A_param(3,4)=w_i(250) (Querweg im 250m Gleisbogen)
                                    % A_param(4,4)=w_a(250) (Querweg im 250m Gleisbogen)

                                    if vglwert_nasek<=kontrollwert_nasek(i) %Gerade ist maßgebend

                                        stellung_sek='geraderGleis';

```

```

E_sek(i)=(A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2+A_param(2,3)+A_param(2,4))*(2*abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1)-15;
% Formel A.35 bzw. A.54 aus EN 15273-2
% A_param(4,1)=l (Spurweite)
% A_param(3,1)=d (Spurmass)
% A_param(2,3)=q (Querweg primär)
% A_param(2,4)=w (Querweg sekundär am geraden Gleis)
% A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
% abs(n_xsec)=na
if A_param(3,5)==1 %Triebdrehgestell
    formel_Esek='A.35';
elseif A_param(3,5)==2 %Laufdrehgestell
    formel_Esek='A.54';
end

elseif vglwert_nasek>kontrollwert_nasek(i) % Gleisbogen ist maßgebend - hier sind die Gleichungen für gleisbogenabhängiges Querspiel implementiert

stellung_sek='Gleisbogen';

if A_param(3,5)==1 %Triebdrehgestell

    %Maximalwertbestimmung der Klammerausdrücke
    maxmatrix1_Ea=zeros(rad_anz,1);
    maxmatrix2_Ea=zeros(rad_anz,1);

    for j=1:rad_anz
        if A_quer(j,1)>=250 %R>=250m
            maxmat-
rix1_Ea(j)=1/(2*A_quer(j,1)*1000)*(A_param(1,1)*abs(n_xsec)+abs(n_xsec)^2-
A_param(2,1)^2/4-
wert4_TDG(i)*10^6)+A_quer(j,2)*abs(n_xsec)/A_param(1,1)+A_quer(j,3)*(abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1);
            % siehe Gleichung A.40 aus EN 15273-2
            % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
            % abs(n_xsec)=na
            % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
            % A_quer(j,1)=R (Gleisbogenradius)
            % A_quer(j,2)=wi(R) (Gleisbogenabhängiges Querspiel)
            % A_quer(j,3)=wa(R) (Gleisbogenabhängiges Querspiel)

        elseif A_quer(j,1)<250 && A_quer(j,1)>=150
            %150m<=R<250m
            maxmat-
rix2_Ea(j)=1/(2*A_quer(j,1)*1000)*(A_param(1,1)*abs(n_xsec)+abs(n_xsec)^2-
A_param(2,1)^2/4-
120*10^6)+A_quer(j,2)*abs(n_xsec)/A_param(1,1)+A_quer(j,3)*(abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1);
            % siehe Gleichung A.41 aus EN 15273-2
            % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)

```

```

        % abs(n_xsec)=na
        % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
        % A_quer(j,1)=R (Gleisbogenradius)
        % A_quer(j,2)=wi(R) (Gleisbogenabhängiges Quer-
spiel)
        % A_quer(j,3)=wa(R) (Gleisbogenabhängiges Quer-
spiel)
    end
end

maxwert1_Ea=max(maxmatrix1_Ea); %R>=250m
maxwert2_Ea=max(maxmatrix2_Ea); %150m<=R<250m

if maxwert1_Ea>maxwert2_Ea
    formel_Esek='A.40';
    E_sek(i)=maxwert1_Ea+((A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2+A_param(2,3))*(2*abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1)-15;
    % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
    % abs(n_xsec)=na
    % A_param(4,1)=l (Spurweite)
    % A_param(3,1)=d (Spurmass)
    % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
    index_maxwert_Ea=find(maxwert1_Ea==maxmatrix1_Ea);
else
    formel_Esek='A.41';
    E_sek(i)=maxwert2_Ea+((A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2+A_param(2,3))*(2*abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1)+wert3
_TDG(i);
    % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
    % abs(n_xsec)=na
    % A_param(4,1)=l (Spurweite)
    % A_param(3,1)=d (Spurmass)
    % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
    index_maxwert_Ea=find(maxwert2_Ea==maxmatrix2_Ea);
end

elseif A_param(3,5)==2 %Laufdrehgestell

    % Maximalwertbestimmung des Klammersausdrucks
    maxmatrix1_Ea=zeros(rad_anz,1);
    maxmatrix2_Ea=zeros(rad_anz,1);

    for j=1:rad_anz
        if A_quer(j,1)>=250 %R>=250m
            maxmat-
rix1_Ea(j)=1/(2*A_quer(j,1)*1000)*(A_param(1,1)*abs(n_xsec)+abs(n_xsec)^2-
A_param(2,1)^2/4-
wert5_LDG(i)*10^6)+A_quer(j,2)*abs(n_xsec)/A_param(1,1)+A_quer(j,3)*(abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1);
            % siehe Gleichung A.59 aus EN 15273-2
            % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
            % abs(n_xsec)=na
            % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
            % A_quer(j,1)=R (Gleisbogenradius)
        end
    end
end

```

```

                                % A_quer(j,2)=wi(R) (Gleisbogenabhängiges Quer-
spiel)
                                % A_quer(j,3)=wa(R) (Gleisbogenabhängiges Quer-
spiel)

                                elseif A_quer(j,1)<250    &&    A_quer(j,1)>=150
%150m<=R<250m
                                maxmat-
rix2_Ea(j)=1/(2*A_quer(j,1)*1000)*(A_param(1,1)*abs(n_xsec)+abs(n_xsec)^2-
A_param(2,1)^2/4-
120*10^6)+A_quer(j,2)*abs(n_xsec)/A_param(1,1)+A_quer(j,3)*(abs(n_xsec)+A_par
am(1,1))/A_param(1,1);
                                % siehe Gleichung A.60 aus EN 15273-2
                                % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
                                % abs(n_xsec)=ni
                                % A_param(2,1)=p (Radsatzabstand)
                                % A_quer(j,1)=R (Gleisbogenradius)
                                % A_quer(j,2)=wi(R) (Gleisbogenabhängiges Quer-
spiel)
                                % A_quer(j,3)=wa(R) (Gleisbogenabhängiges Quer-
spiel)

                                end
                                end

                                maxwert1_Ea=max(maxmatrix1_Ea); %R>=250m
                                maxwert2_Ea=max(maxmatrix2_Ea); %150m<=R<250m

                                if maxwert1_Ea>maxwert2_Ea
                                    formel_Esek='A.59';
                                    E_sek(i)=maxwert1_Ea+(A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2*(abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1)+A_param(2,3)*(2*abs(n
_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1)-15;
                                    % A_param(4,1)=1
                                    % A_param(3,1)=d
                                    % abs(n_xsec)=na
                                    % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
                                    index_maxwert_Ea=find(maxwert1_Ea==maxmatrix1_Ea);
                                else
                                    formel_Esek='A.60';
                                    E_sek(i)=maxwert2_Ea+(A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2*(abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1)+A_param(2,3)*(2*abs(n
_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1)+wert4_LDG(i);
                                    % A_param(4,1)=1
                                    % A_param(3,1)=d
                                    % abs(n_xsec)=na
                                    % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
                                    index_maxwert_Ea=find(maxwert2_Ea==maxmatrix2_Ea);
                                end
                                end
                                end
                                end

                                for i=1:pkt_anz
                                    A_sek(i,3)=A_sek(i,3)+A_param(1,2)+A_param(1,3)+A_param(1,4);
                                    % z Versatz

```

```

% A_param(1,2)=deltaDm (Radverschleiss bis Nachstellung)
% A_param(1,3)=z_p (Einfederung primär)
% A_param(1,4)=z_s (Einfederung sekundär)
if A_sek(i,2)<A_param(3,1)/2
    % A_param(3,1)=d (Spurmass)
    A_sek(i,2)=A_sek(i,2)+E_sek(i)+z_cinsek(i); %innerhalb des
Spurmass wird der Wert addiert
    % y Versatz E_sek
elseif A_radver(i,2)>A_param(3,1)/2
    A_sek(i,2)=A_sek(i,2)-E_sek(i)-z_cinsek(i); %ausserhalb des Spur-
mass wird der Wert subtrahiert
    % y Versatz E_sek
end
end
A_sek(1,2)=A_bezug(1,2); %Ersten Punkt mit Bezugslinie wieder gleichset-
zen in y Richtung

%% 2.5 Begrenzungslinie primär- und sekundärgefedert

A_primsek = A_bezug;

% Für Bauteile, die sowohl mit der Primär- als auch mit der Sekundärebene
% verbunden sind - w.z.B. Schlingerdämpfer oder Wanksystem - wird folgen-
des Konzept angewendet.
% Die Begrenzungslinie wird in z Richtung wie die primäre Begrenzungsli-
nie
% versetzt, in y Richtung werden Querwege die die Sekundärfeder betreffen
% nicht berücksichtigt, weil das CAD Modell um diese sekundären
% Verschiebungen ausgelenkt dargestellt wird. Nun kann das 3D Modell mit
% der Begrenzungslinie auf Bauraumverletzung untersucht werden. Weil das
3D
% Modell nicht im eingefederten Zustand abgespeichert werden kann, werden
% zusätzlich noch Koordinatensysteme erstellt, die genau um die sekundä-
ren
% Einfederwege versetzt sind. Auf diese Koordinatensysteme kann das im
% Normalzustand dargestellte 3D Modell eingebaut werden und die
% Einschränkungzeichnung kann erstellt werden.

E_primsek=ones(pkt_anz,1);

for i=1:pkt_anz

    % Bereich ni
    if n_xsec<=0 %ni

        if vglwert_nisek<=kontrollwert_nisek(i) %Gerade ist maßgebend
            E_primsek(i)=E_sek(i)-A_param(2,4);
            % A_param(2,4)=w Querweg sekundär

        elseif vglwert_nisek>kontrollwert_nisek(i) % Gleisbogen ist maß-
gebend - Gleisbogenabhängiges Querspiel
            E_primsek(i)=E_sek(i)-A_quer(index_maxwert_Ei,2);
            % A_quer(:,2)=wi(R) (Gleisbogenabhängiges Querspiel)

        end
    end
end

```

```

    % Bereich na
    elseif n_xsec>0 %na

        if vglwert_nasek<=kontrollwert_nasek(i) %Gerade ist maßgebend
            E_primsek(i)=(A_param(4,1)-
A_param(3,1))/2+A_param(2,3)*(2*abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1)-15;
            % Formel A.35 aus EN 15273-2
            % A_param(4,1)=l (Spurweite)
            % A_param(3,1)=d (Spurmass)
            % A_param(2,3)=q (Querweg primär)
            % A_param(1,1)=a (Drehzapfenabstand)
            % abs(n_xsec)=na

            elseif vglwert_nasek>kontrollwert_nasek % Gleisbogen ist maßge-
bend - Gleisbogenabhängiges Querspiel
                E_primsek(i)=E_sek(i)-
A_quer(index_maxwert_Ea,2)*abs(n_xsec)/A_param(1,1)-
A_quer(index_maxwert_Ea,3)*(abs(n_xsec)+A_param(1,1))/A_param(1,1);
                % A_quer(:,2)=wi(R)
                % abs(n_xsec)=na
                % A_param(1,1)=a
                % A_quer(:,3)=wa(R)

            end
        end
    end

    for i=1:pkt_anz
        A_primsek(i,3)=A_primsek(i,3)+A_param(1,2)+A_param(1,3);
        % z Versatz
        % A_param(1,2)=deltaDm (Radverschleiss bis Nachstellung)
        % A_param(1,3)=z_p (Einfederung primär)

        if A_primsek(i,2)<A_param(3,1)/2
            % A_param(3,1)=d (Spurmass)
            A_primsek(i,2)=A_primsek(i,2)+E_primsek(i)+z_cinsek(i);
%innerhalb des Spurmass wird der Wert addiert
            % y Versatz
        elseif A_primsek(i,2)>A_param(3,1)/2
            A_primsek(i,2)=A_primsek(i,2)-E_primsek(i)-z_cinsek(i); %ausser-
halb des Spurmass wird der Wert subtrahiert
            % y Versatz
        end
    end

    A_primsek(1,2)=A_bezug(1,2); %Ersten Punkt mit Bezugslinie wieder gleich-
setzen in y Richtung - zwecks Kosmetik

%% 4 IBL Datei befüllen
% Bezugslinie
if A_param(1,6)==1
    fprintf(fileID_bez, 'begin section\n');
    for l=1:pkt_anz-1
        fprintf(fileID_bez, 'begin curve\n');
    end
end

```

```

        fprintf(fileID_bez, '1 %8.1f %8.1f %8.1f\r\n', A_bezug(1, :).');
        fprintf(fileID_bez, '2 %8.1f %8.1f %8.1f\r\n', A_bezug(1+1, :).');
    end
end

% Radverschleiss - ungefederte Ebene
if A_param(2,6)==1
    fprintf(fileID_radver, 'begin section\n');
    for l=1:pkt_anz-1
        fprintf(fileID_radver, 'begin curve\n');
        fprintf(fileID_radver, '1 %8.1f %8.1f %8.1f\r\n', A_radver(l, :).');
        fprintf(fileID_radver, '2 %8.1f %8.1f %8.1f\r\n', A_radver(l+1, :).');
    end
end

% Primärgefedert
if A_param(3,6)==1
    fprintf(fileID_prim, 'begin section\n');
    for l=1:pkt_anz-1
        fprintf(fileID_prim, 'begin curve\n');
        fprintf(fileID_prim, '1 %8.1f %8.1f %8.1f\r\n', A_prim(l, :).');
        fprintf(fileID_prim, '2 %8.1f %8.1f %8.1f\r\n', A_prim(l+1, :).');
    end
end

% Sekundärgefedert
if A_param(4,6)==1
    fprintf(fileID_sek, 'begin section\n');
    for l=1:pkt_anz-1
        fprintf(fileID_sek, 'begin curve\n');
        fprintf(fileID_sek, '1 %8.1f %8.1f %8.1f\r\n', A_sek(l, :).');
        fprintf(fileID_sek, '2 %8.1f %8.1f %8.1f\r\n', A_sek(l+1, :).');
    end
end

% Primär- und Sekundärgefedert
if A_param(5,6)==1
    fprintf(fileID_primsek, 'begin section\n');
    for l=1:pkt_anz-1
        fprintf(fileID_primsek, 'begin curve\n');
        fprintf(fileID_primsek, '1 %8.1f %8.1f %8.1f\r\n', A_primsek(l, :).');
        fprintf(fileID_primsek, '2 %8.1f %8.1f %8.1f\r\n', A_primsek(l+1, :).');
    end
end

% EXCEL Ausgabeseite

%     xpos_str=strcat('A', num2str(2+m*pkt_anz));
%
xlswrite(filename_ausgabe, n_xsec*ones(pkt_anz,1), sheetname_ausgabe, xpos_str);
%     Eprim_str=strcat('B', num2str(2+m*pkt_anz));
%     xlswrite(filename_ausgabe, E_prim, sheetname_ausgabe, Eprim_str);
%     Esek_str=strcat('C', num2str(2+m*pkt_anz));

```

```
    %     xlswrite(filename_ausgabe,E_sek,sheetname_ausgabe,Esek_str);

    n_xsec=n_xsec+schrittweite;

end
```

Anhang B

```
close all
clear variables
clc

%% STL Import des Hüllraummodells

MOD=importfile('xxx_-_kugel_stl.stl', 2, 1000000);

% Mehrfachpunkte aussortieren

MOD=unique(MOD','rows','stable');
MOD=MOD';

%% STL Import der Fahrzeugbegrenzung

PTS=importfile('xxx_-_fl_stl.stl', 2, 1000000);

% Mehrfachpunkte aussortieren

PTS=unique(PTS','rows','stable');
PTS=PTS';

%% Schleife - Vergleiche alle Punkte

profile on
[ d_MOD ] = POINTWISE_schleife( MOD, PTS );
profile off
profile viewer

%% Ausgabe

figure
scatter3(MOD(1,:),MOD(2,:),MOD(3,:),50,d_MOD,'filled')
hold on
colorbar
myMap=[1 0 0;
       1 1 0;
       0 1 0;
       0 1 1;
       0 0 1];
colormap(myMap)
axis equal
axis vis3d
scatter3(PTS(1,:),PTS(2,:),PTS(3,:),10,'k')
```

```
title('Vergleiche alle Vertices zueinander')
view(0,0)

%end script
function [ d_MOD ] = POINTWISE_schleife( MOD, PTS )
% Schleife - Vergleiche alle Punkte

d_XMOD=NaN(1,size(PTS,2));

d_MOD=NaN(1,size(MOD,2));

for ii=1:size(MOD,2)

    for jj=1:size(PTS,2)

        d_XMOD(jj)=norm(MOD(:,ii)-PTS(:,jj)); %Abstandsberechnung 3D Pythagoras

    end

    d_MOD(ii)=min(d_XMOD); %Bestimmung des Minimums

end

end
```

Anhang C

```
close all
clear variables
clc

%% STL Import des Hüllraummodells

MOD=importfile('xxx_-_kugel_stl.stl', 2, 1000000);

%% STL Import der Fahrzeugbegrenzungskurve

PTS=importfile('xxx_-_fl_stl.stl', 2, 1000000);

NOR=importfileNOR('xxx_-_fl_stl.stl',2,1000000);

%% Umrechnung in Kugelkoordinaten

% MOD_kko - Kugelkoordinaten des Modells
MOD_kko=AUSSORT_kugelkoordinaten(MOD);

% PTS_kko - Kugelkoordinaten der Fahrzeugbegrenzung
PTS_kko=AUSSORT_kugelkoordinaten(PTS);

%% Limits
```

```

limitazi=20; %deg
limitele=20; %deg
limitrng=10000; %mm

%% Schleife

profile on
[ d_MOD ] = AUSSORT_schleife( MOD, PTS, NOR, limitazi, limitele, limitrng,
MOD_kko, PTS_kko );
profile off
profile viewer

%% Ausgabe

% Mehrfachpunkte aussortieren

[MOD, PTS, d_MOD]=AUSSORT_mehrfach(MOD, PTS, d_MOD);

% Plot

figure
scatter3(MOD(1,:),MOD(2,:),MOD(3,:),50,d_MOD,'filled')
hold on
colorbar
myMap=[1 0 0;
        1 1 0;
        0 1 0;
        0 1 1;
        0 0 1];
colormap(myMap)
axis equal
axis vis3d
scatter3(PTS(1,:),PTS(2,:),PTS(3,:),10,'k')
view(0,0)
title('Filtere relevante Vertices mit Kugelkoordinaten')

%end script
function [ OUT ] = AUSSORT_kugelkoordinaten( IN )
%kugelkoordinaten calculates azimuth, elevation angle and range of scatter
%array

%   IN:           INPUT scatter array [3 x N]
%                 rows: x
%                 y
%                 z
%
%   OUT:          OUTPUT row array [3 x N]
%                 rows: OUT_azi (azimuth)
%                 OUT_ele (elevation)
%                 OUT_rng (range)

OUT_azi = NaN(1,size(IN,2));
OUT_ele = NaN(1,size(IN,2));
OUT_rng = NaN(1,size(IN,2));

```

```

for ii = 1 : size(IN,2)
    OUT_rng(ii) = norm(IN(:,ii),2);
    OUT_azi(ii) = atan2d(IN(2,ii), IN(1,ii));
    OUT_ele(ii) = asind(IN(3,ii)/OUT_rng(ii));
end

OUT=[OUT_azi;OUT_ele;OUT_rng];

end
function [ d_MOD ] = AUSSORT_schleife( MOD, PTS, NOR, limitazi, limitele,
limitrng, MOD_kko, PTS_kko )
% Schleife

d_MOD=NaN(1,size(MOD,2));

for ii=1:size(PTS,2)

    % Aussortieren

    [XMOD,
XMOD_nichtnull]=AUSSORT_vergleich(limitazi,limitele,limitrng,PTS_kko(1,ii),PT
S_kko(2,ii),PTS_kko(3,ii),MOD_kko, MOD);

    % Abstandsberechnung

    [d_XMOD ]=AUSSORT_abstand(XMOD, NOR, PTS, ii);

    % Zuordnen

    [d_MOD]=AUSSORT_zuordnen(d_MOD, d_XMOD, XMOD_nichtnull);

end

end
function [ XMOD, XMOD_nichtnull] = AUSSORT_vergleich ( limitazi,
limitele,limitrng, isazi, isele, isrng, MOD_kko, MOD)
%vergleich
% limit:      set region
% isvalue:    Wert des Punktes von Fahrzeugbegrenzung auf die aussortiert
wird
% model:      Kugelkoordinaten der Modellpunkte
% OUT:        Aussortierte Modellpunktewolke
% nonzeros:   Anzahl der Punkte des Modells deren Abstand berechnet wird

% is azimuth - Erstens, aussortieren nach Azimutwinkel

XMOD_log1=ones(1,length(MOD)); %initialisieren, Startwerte alle Eins,
werden in drei Schritten sequenziell auf Null gesetzt - Einträge die alle
drei Tests bestehen bleiben Eins gesetzt
XMOD_log1(abs(isazi-MOD_kko(1,:))>limitazi)=0;

% is elevation - Zweitens, aussortieren nach Höhenwinkel

```

```

XMOD_log2=XMOD_log1;
XMOD_log2(abs(isele-MOD_kko(2,:))>limitele)=0;

% is range - Drittens, aussortieren nach Abstand

XMOD_log3=XMOD_log2;
XMOD_log3(abs(isrng-MOD_kko(3,:))>limitrng)=0;

% Anwendung auf model

XMOD=(MOD.*[XMOD_log3; XMOD_log3; XMOD_log3]);

% Löschen von gleichen Punkten

[XMOD, XMOD_nichtnull] = unique(XMOD','rows','stable');
XMOD=XMOD';
XMOD_nichtnull=XMOD_nichtnull';

% Löschen des [0 0 0] Eintrags

XMOD(~XMOD)=NaN;
XMOD_nichtnull(~any(XMOD))=[];
XMOD(:,~any(XMOD))=[];

end
function [ d_XMOD ] = AUSSORT_abstand( XMOD, NOR, PTS, ii)
%Abstandsberechnung
% d_XMOD - Abstandswerte der ausselektierten Punkte
% d_MOD - Ergebnis, tatsächliche Abstandswerte aller MOD Punkte

d_XMOD=NaN(1,size(XMOD,2));

d=AUSSORT_scalarprod(NOR(:,ii),PTS(:,ii));

for jj=1:size(XMOD,2)

    d_XMOD(jj)=- (AUSSORT_scalarprod(NOR(:,ii),XMOD(:,jj))-d); %ACHTUNG, nicht
nicht fertig: Werte die außerhalb liegen werden negativ sein - nicht optimal
für plot glaube ich
    % Der Abstand d_XMOD ist vorzeichenbehaftet. Da der Normalenvektor
    % definitionsgemäß nach außen positiv definiert ist, liegen negative Wer-
te
    % innerhalb der Fahrzeugbegrenzung, positive außerhalb. Deshalb wird
    % hier ein Minus eingeführt, damit positive Abstandswerte innerhalb der
    % Fahrzeugbegrenzung vorliegen.

end

end
function [ dot ] = AUSSORT_scalarprod( vector1, vector2 )
%Calculates the dot product - scalar product

```

```

dot=vector1(:).'*vector2(:);
%dot=abs(dot);

end
function [ d_MOD ] = AUSSORT_zuordnen( d_MOD, d_XMOD, XMOD_nichtnull )
%Zuordnen der d_XMOD Punkte auf d_MOD wenn diese kleiner sind

for kk=1:size(XMOD_nichtnull,2)

    if isnan(d_MOD(XMOD_nichtnull(kk)))

        d_MOD(XMOD_nichtnull(kk))=d_XMOD(kk);

    elseif d_MOD(XMOD_nichtnull(kk))>d_XMOD(kk)

        d_MOD(XMOD_nichtnull(kk))=d_XMOD(kk);

    end

end

end

end
function [ MOD, PTS, d_MOD] = AUSSORT_mehrfach( MOD, PTS, d_MOD )
%Mehrfachpunkte aussortieren

[MOD, ind_MOD]=unique(MOD','rows','stable');
MOD=MOD';
ind_MOD=ind_MOD';

d_MOD=d_MOD(ind_MOD);

PTS=unique(PTS','rows','stable');
PTS=PTS';

end

```

Anhang D

```

mapkey uda @MAPKEY_NAMEMapkey zur Ausführung der Freiraumuntersuchung;\
mapkey(continued) @MAPKEY_LABELBauraumuntersuchung;~ Command
`ProCmdDatumPointField` ;\
mapkey(continued) ~ Open `main_dlg_cur` `Sst_bar.filter_list`;\
mapkey(continued) ~ Close `main_dlg_cur` `Sst_bar.filter_list`;\
mapkey(continued) ~ Select `main_dlg_cur` `Sst_bar.filter_list` 1 `4`;\
mapkey(continued) ~ Command `ProCmdSelFilterSet` 11;\
mapkey(continued) @MANUAL_PAUSESchumpfverpackung anwählen und
\n"Wiederaufnehmen" klicken;\
mapkey(continued) ~ Activate `Odui_Dlg_00` `stdbtn_1`;\
mapkey(continued) ~ Activate `main_dlg_cur` `page_Analysis_control_btn` 1;\
mapkey(continued) ~ Command `ProCmdNmdTool` 1;~ Open `main_dlg_cur`
`Sst_bar.filter_list`;\
mapkey(continued) ~ Close `main_dlg_cur` `Sst_bar.filter_list`;\

```

```

mapkey(continued) ~ Select `main_dlg_cur` `Sst_bar.filter_list` 1 `12`; \
mapkey(continued) ~ Command `ProCmdSelFilterSet` 11; \
mapkey(continued) @MANUAL_PAUSEFahrzeugbegrenzung und Feldpunkt anwählen
\nund \
mapkey(continued) "Wiederaufnehmen" klicken; \
mapkey(continued) ~ Trigger `nmd_1` `nmd_report_tbl` 2 `5 row` `0 column`; \
mapkey(continued) ~ Trigger `nmd_1` `nmd_report_tbl` 2 `` ``; \
mapkey(continued) ~ Trigger `nmd_1` `nmd_report_tbl` 2 `` ``; \
mapkey(continued) ~ Trigger `nmd_1` `nmd_report_tbl` 2 `5 row` `3 column`; \
mapkey(continued) ~ Trigger `nmd_1` `nmd_report_tbl` 2 `1 row` `3 column`; \
mapkey(continued) ~ Trigger `nmd_1` `nmd_report_tbl` 2 `` ``; \
mapkey(continued) ~ Trigger `nmd_1` `nmd_setup_tbl` 2 `1` `ChkBtn`; \
mapkey(continued) ~ Trigger `nmd_1` `nmd_setup_tbl` 2 `` ``; ~ Activate
`nmd_1` `nmd_save_pb`; \
mapkey(continued) ~ Activate `nmd_save_dlg` `nmd_done_pb`; ~ Activate `UI Mes-
sage Dialog` `ok`; \
mapkey(continued) ~ Trigger `nmd_1` `nmd_report_tbl` 2 `` ``; ~ Activate
`nmd_1` `nmd_exit_pb`; \
mapkey(continued) ~ Select `main_dlg_cur` `PHTLeft.AssyTree` 2 `node15`
`node14` 2; \
mapkey(continued) ~ RButtonArm `main_dlg_cur` `PHTLeft.AssyTree` `node14`; \
mapkey(continued) ~ PopupOver `main_dlg_cur` `PM_PHTLeft.AssyTree` 1
`PHTLeft.AssyTree`; \
mapkey(continued) ~ Open `main_dlg_cur` `PM_PHTLeft.AssyTree`; \
mapkey(continued) ~ Close `main_dlg_cur` `PM_PHTLeft.AssyTree`; \
mapkey(continued) ~ Command `ProCmdpshLocalGrp@PopupMenuTree` ; ~ Command
`ProCmdDToolsUDM` ; \
mapkey(continued) ~ Activate `uda` `Compute`;

```