

Technische Universität Graz
Dekanat für Maschinenbau
Institut für Fahrzeugsicherheit

Ableiten von Regelgrößen für In- Crash geregelte Fahrzeugrückhaltesysteme und Entwicklung eines Insassen- Ersatzmodells

Masterarbeit
von
Alen Omerovic, BSc.

Vorgelegt zur Erlangung des
akademischen Grades Diplomingenieur
der Studienrichtung Maschinenbau

Betreuer:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan
Dipl.-Ing. Dr.techn. Gregor Gstrein

Graz, 02.05.2017

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der ausgewiesenen Hilfsmittel angefertigt habe. Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach anderen gedruckten oder im Internet verfügbaren Werken entnommen sind, habe ich durch genaue Quellenangaben kenntlich gemacht.

Ort, Datum
Graz, 02.05.2017

Alen Omerovic, BSc.

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS.....	3
ZUSAMMENFASSUNG	4
ABSTRACT	5
1. EINLEITUNG	6
2. RÜCKHALTESYSTEME	8
2.1 Aufgaben der Rückhaltesysteme	8
2.2 Übersicht und Aufbau herkömmlicher Rückhaltesysteme	8
3. VERSUCHSKONFIGURATIONEN	11
3.1 Versuchskonfigurationen für den Frontalaufprall	11
3.2 Verletzungskriterien	13
4. STAND DER TECHNIK.....	14
4.1 Piezo LL.....	16
4.2 Magnetorheologische Fluide	17
4.3 Retraktor mit magnetorheologischen Fluid.....	18
4.4 Airbag System und Aktuatoren.....	19
4.5 Massenflussgeregeltes 3A- System	20
5. PARAMETERVARIATION & SENSITIVITÄTSANALYSE	23
5.1 Parametervariation und Darstellung der Verletzungskriterien.....	24
5.2 Sensitivitätsanalyse	27
5.3 Sensitivitätsmatrix.....	35
6. ERSATZMODELL	39
6.1 Modellgeometrie.....	40
6.2 Modelleigenschaften und Komponenten.....	41
6.3 Vereinfachte Darstellung von Fahrzeugkomponenten	47
6.3.1 Fahrzeuginnenraum	47
6.3.2 Gurtkomponente	51
6.3.3 Airbagkomponente	60
6.4 Euro NCAP & U.S.NCAP Puls	66
6.5 Validierung des Ersatzmodells mit dem FE Modell.....	67
6.5.1 Validierung 50%- Mann Ersatzmodell	68
6.5.2 Validierung 5%- Frau Modell.....	77
7. FAZIT	83
8. LITERATURVERZEICHNIS.....	84
9. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	86
10. TABELLENVERZEICHNIS	88
11. FORMELVERZEICHNIS	89
12. ANHANG	90
12.1 Ergebnisse der Parametervariation für den Hybrid 50% Mann	90
12.2 Ergebnisse aus der Parametervariation für den Hybrid 5% Frau Dummy	130

ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung der Fahrzeuge der letzten Jahre hat gezeigt, dass der Faktor Sicherheit im Fahrzeug eine bedeutende Rolle spielt. Es werden immer mehr Konzepte entwickelt die Unfälle vermeiden sollen, wie beispielsweise Notbremsassistenten, welche den Fahrer auf eine Unfallsituation aufmerksam machen und wenn notwendig auch selbst eingreifen, oder auch Systeme die während des Unfalls dafür sorgen, dass der Insasse so gut wie möglich geschützt wird, wie beispielsweise der Airbag. Diese Systeme werden in aktive Fahrzeugsicherheitssysteme, die sämtliche unfallvermeidenden Sicherheitssysteme beinhalten (z.B. ABS, ESP, usw.) und passive Fahrzeugsicherheitssysteme wie der Gurt oder Airbag, die das Verletzungsrisiko bei einem Unfall minimieren sollen, eingeteilt.

Im Rahmen dieses Projektes geht es darum, die bereits bestehenden passiven Systeme wie den Gurt oder den Airbag weiterzuentwickeln bzw. ein Reglerkonzept für die Sicherheitssysteme zu entwickeln bzw. in diese zu implementieren. Das Ziel besteht darin, mit Hilfe dieses Konzeptes das Verletzungsrisiko für den Insassen während eines Unfalls zu minimieren und unabhängig vom Insassen für bestmögliche Sicherheit zu sorgen. Bei der Entwicklung des Reglerkonzeptes steht in erster Linie der Sicherheitsfaktor im Vordergrund, wobei der wirtschaftliche Faktor nicht aus Acht gelassen werden darf. Die Entwicklung des Reglers soll dahingehend erfolgen, dass der Regler in verschiedene Fahrzeugklassen implementierbar ist ohne aufwändige konstruktive Änderungen bzw. Anpassungen durchführen zu müssen.

Als Basismodell für die Entwicklung des Reglerkonzeptes wird ein validiertes FE- Modell eines Oberklasse Fahrzeugs mit einem Hybrid III Insassenmodell für den 50% Mann und die 5% Frau verwendet. Dieses bildet alle im Fahrzeug notwendigen Systeme wie den Gurt oder den Airbag und die entsprechenden Belastungen auf den Insassen beim Crash ab. Anhand des Basismodells wird ein vereinfachtes FE- Insassenmodell inklusive Sitzkomponente abgeleitet, welches die Grundlage für eine weiterführende Arbeit zur Ableitung eines mathematischen Modells des Insassen und Reglers bildet. Das Ziel besteht darin, das Ersatzmodell soweit wie möglich zu vereinfachen bzw. die Anzahl der Freiheitsgrade bzw. Unbekannten so zu wählen, dass der mathematische Rechenaufwand des Reglerkonzeptes so gering wie möglich bleibt. Somit beschränkt sich die Regelung beispielsweise nur auf den Frontalcrash wobei Belastungen bzw. Bewegungen in Y- Richtung vernachlässigt werden.

Für eine mögliche Regelung muss dem System eine entsprechende Regelgröße oder Parameter bekannt sein. Die Eingrenzung bzw. die Wahl einer geeigneten Regelgröße erfolgt hier durch Parametervariation am Basismodell, für Parameter wie die Gurtkraft, die Gurtauszugsgeschwindigkeit oder auch den Airbagmassenstrom für unterschiedliche Werte bzw. Niveaus. Die Bewertung all dieser Ergebnisse erfolgt im weiteren Schritt in einer Sensitivitätsanalyse die einen möglichen Zusammenhang bzw. die Sensitivität zwischen den Regelgrößen und den Verletzungskriterien beim Aufprall darstellen soll. Dafür wird die Parametervariation einerseits für die Euro NCAP Konfiguration mit einem 50%-Mann Insassenmodell und andererseits für die USNCAP Konfiguration mit einem 5%-Frau Insassenmodell durchgeführt, um so den Einfluss der veränderlichen Parameter auf die Verletzungskriterien für zwei unterschiedliche Lastfälle vergleichend darzustellen.

ABSTRACT

Development in automotive sector in the recent years has shown that safety factor also plays an important role. More and more concepts are available to assist in avoiding of possible accident, such as break assist technology, which makes the driver aware of detected dangers and if necessary initiate measures for preventing accidents, or an air bag system that provides optimum occupant protection in a collision situation. These systems are divided into active vehicle safety systems, consisting of accident prevention safety systems (e.g. ABS, ESP, etc.), and passive vehicle safety systems (airbag or belt tensioner) that significantly minimize the risk of injury in the event of an accident.

In the framework of this project the matter is further development of existing passive systems, such as airbag and belt tensioner, i.e. development and implementation of controller concept. The objective is to ensure that using this concept minimizes the risk of injury for the passengers, and that independent from passenger provides the best possible safety. In the development of controller concept the focus lies on safety issues, whereby economic implications were taken into account as well. The development objective is that the concept can be implemented in different vehicle categories without having to carry out laborious constructive changes.

The finite element model of upper class vehicle with a Hybrid III occupant model for 50% male and 5% female was used as a basis for the development of controller concept. It considers all essential systems, such as airbag or belt tensioner with corresponding forces exerted on the occupants in a crash. Furthermore, basis model was used to extract simplified finite element model of an occupant inclusive seating component, which is used as a basis for further work on a definition of a mathematical model for passengers and controller. The aim is to provide equivalent model that is simplified as far as possible, determining the relevant number of degrees of freedom and number of unknowns in order to minimize computational effort. Therefore, the controller concept is limited to the frontal collision considering the forces and movement in y-direction negligible.

Subsequently, it is necessary to define appropriate controlled variable or parameter for controller. The choice of suitable controlled variable is made by parameter variation in the basis model for seat belt reaction forces, seat belt payout speed and air bag mass flow for different parameter values. Evaluation of the results is made by sensitivity analysis with an aim to identify influential parameters for potential correlation between controlled variable and injury criteria. For that purpose parameter variation was carried out for Euro-NCAP configuration with 50% male occupant model and for USNCAP configuration with 5% female occupant model for a comparative overview of different load cases regarding parameter influence on injury criteria.

1. EINLEITUNG

Die ständig wachsenden Anforderungen an die Sicherheitssysteme in einem Fahrzeug, erfordern eine Weiterentwicklung und Verbesserung dieser. Diese Systeme sollen dem Insassen während eines Crashes eine ideale Rückhaltung bieten, wobei die Belastungen seitens der Sicherheitssysteme auf den Insassen auf ein Mindestmaß zu reduzieren sind. Eines dieser Sicherheitssysteme ist der gesetzlich vorgeschriebene 3 Punkt Gurt, der neben dem Airbag als wichtigstes Rückhaltesystem in einem Fahrzeug implementiert ist. Das Zusammenspiel dieser Sicherheitskonzepte ermöglicht eine Rückhaltung des Insassen während eines Crashes. Unabhängig vom Insassen (groß, klein, schwer, leicht) soll eine entsprechende Rückhaltekraft seitens des Gurtes und des Airbags zur Verfügung gestellt werden. Dabei können durch die fehlende Anpassung der Rückhaltekraft an das Unfallgeschehen, Belastungsniveaus erreicht werden die entsprechende Verletzungen am Insassen als Folge haben. Durch Einsatz von Gurtkraftbegrenzern bzw. Straffer oder mehrstufige Zündung des Airbags soll die Belastungen auf den Insassen verringert und somit auch das Verletzungsrisiko minimiert werden.

Um das Verletzungsrisiko zu reduzieren und die steigenden Anforderungen an die Rückhaltesysteme zu erfüllen, werden adaptive Systeme eingesetzt, die die Belastungen auf den Insassen reduzieren sollen. Adaptive Konzepte ermöglichen eine Anpassung der Rückhaltekraft an die jeweilige Unfallsituation bzw. Schwere des Unfalls. Die Anpassungsfähigkeit des Systems bedeutet nicht nur eine Adaption an das Unfallgeschehen, sondern eine Klassifizierung des Insassen und die dementsprechende Erhöhung bzw. Reduktion der Kraft auf diesen. Bereits realisierte Konzepte ermöglichen die Anpassung der Belastung am Insassen durch Steuerung des Gurtkraftniveaus. Die dafür eingesetzten Gurtkraftbegrenzer ermöglichen zwar eine Abnahme der Gurtbelastung auf den Insassen durch Schalten von einem Kraftniveau auf ein niedrigeres, jedoch mit der Einschränkung einer begrenzten Anzahl an Stufen bzw. Niveaus [1]. Weiter bedeutet der Einsatz gesteuerter Systeme eine irreversible Reduktion der Kräfte, was bedeutet, dass diese bei Bedarf nicht wieder erhöht werden können. Auch Airbagsysteme sind durch mehrstufige Zündung der pyrotechnischen Einheit im Airbagmodul in ihrer Performance beeinflussbar. So kann die Rückhaltung durch den Airbag bei Bedarf auch für einen längeren Zeitraum als bei einstufiger Zündung bereitgestellt werden. Neben der Steuerung der Gasmasse besteht die Möglichkeit das eingeblasene Gas mittels Öffnungen (Vents) im Airbag wieder freizugeben. Dadurch kann die Aggressivität bzw. Härte des Airbags verringert werden, um hohe Beschleunigungen auf den Insassen beim Eintauchen zu vermeiden.

Das Ziel der geregelten Rückhaltesysteme besteht darin, diese Parameter aufeinander abzustimmen bzw. den optimalen Zeitpunkt und Performance der einzelnen Systeme zu definieren, um so die Belastungen auf ein Mindestmaß zu reduzieren.

So soll es auch möglich sein, Insassen mit unterschiedlicher Größe, Gewicht und Position im Fahrzeug und bei entsprechender Belastung durch die Fahrzeugverzögerung bestmöglich vor Verletzungen seitens der Rückhaltesysteme zu schützen. Dieses Ziel kann nur erreicht werden, wenn ein Zusammenspiel der Rückhaltesysteme Gurt und Airbag gegeben ist und notwendige Informationen über den Insassen wie z.B. Gewicht, Größe und Sitzposition vorliegen.

Deshalb ist neben den Rückhaltesystemen auch die Sensorik im Fahrzeug sehr wichtig, die die entsprechenden Informationen bzw. Daten liefert. Dabei werden Systeme im Fahrzeug verbaut, welche beispielsweise das Gewicht des Insassen durch Kraftmessdosen an der Sitzschiene bzw. durch Matten im Sitzpolster, die die Gewichtsverteilung des Insassen messen, eingesetzt [2] [3]. Damit aber die Rückhaltesysteme die vorgegebenen Bewegungen bzw. Manöver die vom Regler ausgegeben werden auch durchführen, ist der Einsatz von Aktuatoren bzw. Stellkomponenten notwendig, die bei Bedarf zum Beispiel ein bestimmtes Gurtkraftniveau einstellen [4]. Dabei bildet die Aktuatorik das mechanische Verbindungsglied zwischen Regler und Rückhaltesystem.

Der heutige Stand der Technik zeigt Ansätze für Aktuatoren bzw. Systeme zur Reduktion der Belastungen auf den Insassen seitens des Gurtes, die zwar die Belastungen seitens des Gurtes reduzieren, jedoch mit der Einschränkung, dass sie vor dem Unfallgeschehen ein Kraftniveau am Gurt vordefinieren, welches über die gesamte Crashdauer konstant bleibt [5]. Dies ermöglicht eine Anpassung der Rückhaltekraft am Insassen, ermöglicht aber keine Regelung dieser im Falle einer Änderung des Lastfalls im Unfallgeschehen. Somit besteht heutzutage das Bestreben nach Systemen die stufenlos sind und eine Änderung der Rückhaltekräfte im Crash ermöglichen, was bedeutet, dass im Falle hoher Belastungen auf den Insassen die Kraft reduziert werden kann.

Das Ziel dieser Arbeit besteht somit darin, mögliche Potenziale bestehender Systeme [4] [6] [7] im Hinblick auf Adaptivität aufzuzeigen und die dafür notwendigen Parameter abzuleiten. Um eine individuelle Anpassung der Sicherheitskonzepte an das Unfallgeschehen zu ermöglichen, ist die Erarbeitung möglicher Regelparameter notwendig. Das Ableiten von Regelgrößen erfolgt durch Parametervariation und anschließende Bewertung der normierten Größen mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse. Diese Analyse soll aufzeigen, welche Regelgröße den höchsten Einfluss auf das Verletzungsrisiko des Insassen hat und als Hilfestellung bei der Wahl eines möglichen Regelparameters dienen.

2. RÜCKHALTESYSTEME

2.1 Aufgaben der Rückhaltesysteme

Rückhaltesysteme sollen den Insassen in einem Fahrzeug Sicherheit bzw. Rückhalt in Unfallsituationen aber auch bei unnatürlichen Fahrmanövern, wie z. B. bei Vollbremsung oder beim Ausweichen, bieten. Das Ziel ist nicht nur den Insassen zurückzuhalten, sondern auch die Verletzungen die durch Rückhaltekräfte auf den Insassen entstehen, auf ein Mindestmaß zu reduzieren bzw. eine kontrollierte Vorverlagerung zu gewährleisten. Dabei soll der maximal zur Verfügung stehende Bauraum im Fahrzeug genutzt werden, wobei Kollisionen mit dem Innenraum zu vermeiden sind. Die jedem bekannten und wichtigsten Rückhaltesysteme im Fahrzeug sind der 3-Punkt Gurt und der Airbag, die den Menschen in den meisten Situationen vor Verletzungen schützen und die im nächsten Schritt auch näher besprochen werden.

2.2 Übersicht und Aufbau herkömmlicher Rückhaltesysteme

Wie bereits im Abschnitt 2.1 erwähnt, sind der 3-Punkt Gurt und der Airbag die wichtigsten Rückhaltesysteme im Kraftfahrzeug. Natürlich muss erwähnt werden, dass der 3-Punkt Gurt und der Airbag hier nur einen Überbegriff für Rückhaltesysteme im Fahrzeug bilden. Diese Systeme gibt es je nach Ausstattung und Preisklasse des Fahrzeugs in verschiedensten Ausführungen und technisch entwickelten Komponenten. Dazu zählen einfache Gurtsysteme wie der 3- Punkt Gurt, welcher gesetzlich in allen Fahrzeugen vorhanden sein muss, bis hin zu Systemen die mit Straffern oder auch Gurtkraftbegrenzern ausgestattet sind, welche durch werkstoffspezifische Eigenschaften (Torsionssteifigkeit) die Möglichkeit haben, das Gurtband freizugeben und so das Gurtkraftniveau zu senken, wie beispielsweise der Gurtkraftbegrenzer mit Torsionsstab im Aufroller. Zum System Airbag gibt es verschiedenste Ausführungen, die neben dem Frontairbag, der sich einerseits im Lenkrad auf der Fahrerseite und andererseits im Instrumentenpanel auf der Beifahrerseite befindet, im KFZ verbaut sind. Zusätzliche Airbag Systeme können im Fahrzeug beispielsweise auch in der Seitentür oder auch im Bereich der Seitenfenster als Schutzmaßnahmen integriert sein.

Einen Überblick über die verschiedensten Rückhaltesysteme in einem Fahrzeug, bietet die Abbildung 1. Darin sind mögliche Airbagvarianten im Fahrzeug dargestellt, die die verschiedenen Körperregionen des Insassen beim Unfall schützen. Neben dem Frontairbag der im Kopf als auch Brustbereich Schutz bietet, befindet sich im Bereich der Seitenfenster bzw. der Seitentüren der „window airbag“ und der Beckenairbag, die dem Insassen seitlichen Schutz bieten.



Abbildung 1: Rückhaltesystemkomponenten [8]

Allgemein besteht das Gurtsystem aus einem Gurtband, einem Gurtschloss bzw. einer Schlosszunge am Gurtband, Endbeschlägen und einem Umlenker bzw. Höhenversteller. Wie bereits erwähnt besteht die Möglichkeit des Einsatzes eines Gurtstraffers, welcher die Gurtlose im Bereich der Schulter und des Beckens verringert bzw. den Gurt am Insassen besser anliegen lässt. Um das Kraftniveau am Gurt zu reduzieren, kann das Gurtsystem mit einem Gurtkraftbegrenzer ausgestattet werden, um so den Insassen vor hohen Belastungen durch den Gurt zu schützen. Durch Einsatz von Sollbruchstellen am Gurtband bzw. durch Integration von Deformationselementen, kann das Gurtband freigegeben werden und somit der Vorverlagerungsweg des Insassen vergrößert und die damit verbundene Krafteinwirkung auf diesen verringert werden [9].

Betrachtet man die Abbildung 1 kann man sehen, dass es im Fahrzeug mehrere Airbagvarianten gibt, die verschiedene Körperregionen des Insassen beim Crash schützen sollen. Hier wird der Beifahrerairbag für den Frontalaufprall näher betrachtet und dessen Komponenten beschrieben. Der Beifahrerairbag besteht aus einem Hybridgasgenerator der mittels einer pyrotechnischen Einheit gezündet wird. Das zur Befüllung des Airbags notwendige Medium ist ein komprimiertes Gas in einem Druckbehälter, welcher beim Auslösen des Airbags geöffnet wird damit das Gas in den Luftsack strömen kann. Dabei muss eine Membran, die den Druckbehälter verschließt durch ein Treibgas geöffnet werden. Der aus Polyamidgewebe bestehende Luftsack wird somit aufgeblasen und kann ein Volumen von ca. 65 Liter erreichen. Zusätzlich kann der Luftsack mit Fangbändern ausgestattet sein, die das Kissen in einer optimalen Position zum Insassen verbleiben lassen [9].

Damit das einströmende Gas bzw. jener Teil des Volumens der durch das Eintauchen des Insassen in das Kissen verdrängt wird entweichen kann, sind zusätzlich zur Permeabilität des

Airbags, Öffnungen bzw. Vents vorgesehen. So soll die kinetische Energie des Insassen beim Eintauchen in den Airbag mit der Zeit abgebaut werden [9]. Mit der Möglichkeit einer Adaption der Gurtkraft mittels Gurtkraftbegrenzer und einer mehrstufigen Zündung des Gasgenerators bzw. Veränderung des Massenflusses, hat das Gurt- Airbag System ein großes Potenzial für eine adaptive Regelung und somit eine mögliche Reduktion der Belastungen auf den Insassen.

Das Ziel besteht darin, eine optimale Performance der Rückhaltesysteme je nach Bedarf zu abzurufen, um dem Insassen eine bestmögliche Rückhaltung zu bieten. Dies kann nur erreicht werden durch zahlreiche Experimente (Crashtests) bzw. durch numerische Verfahren (Simulationen) die im Vergleich zu den notwendigen Crashtests schneller Ergebnisse liefern. Grundsätzlich bestehen für die experimentellen bzw. numerischen Verfahren normierte Testkonfigurationen, mit denen die einzelnen Unfallereignisse (Frontal- bzw. Seitencrash, usw.) nachgebildet bzw. simuliert werden können. Je nach Anforderungen an die Rückhaltesysteme bzw. das Ziel diese zu optimieren, wird eine entsprechende Versuchskonfiguration verwendet.

Obwohl jede einzelne Versuchskonfiguration für die Sicherheit im KFZ eine bedeutende Rolle spielt und beispielsweise der Seitenaufprall auf Grund der fehlenden bzw. geringen Knautschzone im Gegensatz zum Frontalaufprall ein höheres Risiko für Verletzungen darstellt, liegt der Fokus dieser Arbeit am Frontalaufprall bzw. an jenen Rückhaltesystemen für den Beifahrer. Die Möglichkeit der Nutzung des maximalen Vorverlagerungsweges und die Adaption der Rückhaltekräfte seitens Gurt und Airbag, bietet auf Grund mangelnden Bauraumes im Fahrzeug die Rückhaltesysteme für den Seitencrash weniger Potenzial im Vergleich zum Frontalcrash.

Welche Experimente bzw. Versuchsverfahren für den Frontalcrash eingesetzt werden bzw. nach welchen Richtlinien bei der Durchführung vorgegangen wird, kann dem weiteren Verlauf der Arbeit entnommen werden.

3. VERSUCHSKONFIGURATIONEN

3.1 Versuchskonfigurationen für den Frontalaufprall

Egal ob aktive oder passive Sicherheit, die Anforderungen an die Fahrzeughersteller werden immer höhergestellt und die Prüfverfahren zur Sicherstellung der Mindestsicherheit immer strenger. Aus diesem Grund gibt es immer mehr Organisationen bzw. Automobilclubs wie beispielsweise den Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) die Neufahrzeuge unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten vergleichend untersuchen und die Ergebnisse veröffentlichen. Ziel dieser Aktion ist, die Fahrzeughersteller zu motivieren, das Sicherheitsniveau der Fahrzeuge soweit es technisch und wirtschaftlich möglich ist zu erhöhen. Diese Testverfahren bilden eine Gruppe von Verbraucherschutztests, deren Bewertung der Ergebnisse mittels Sterne- Skala erfolgt und entsprechend die Verletzungswahrscheinlichkeit des Insassen bei der jeweiligen Konfiguration darstellt. Nicht zu verwechseln sind diese Tests mit gesetzlich vorgeschriebenen Testkonfigurationen, die zwar ähnliche Randbedingungen für den Versuchsablauf haben, jedoch für die Zulassung eines KFZ relevant sind und somit nicht mittels Sternerating, sondern als bestanden oder nicht bestanden gewertet werden.

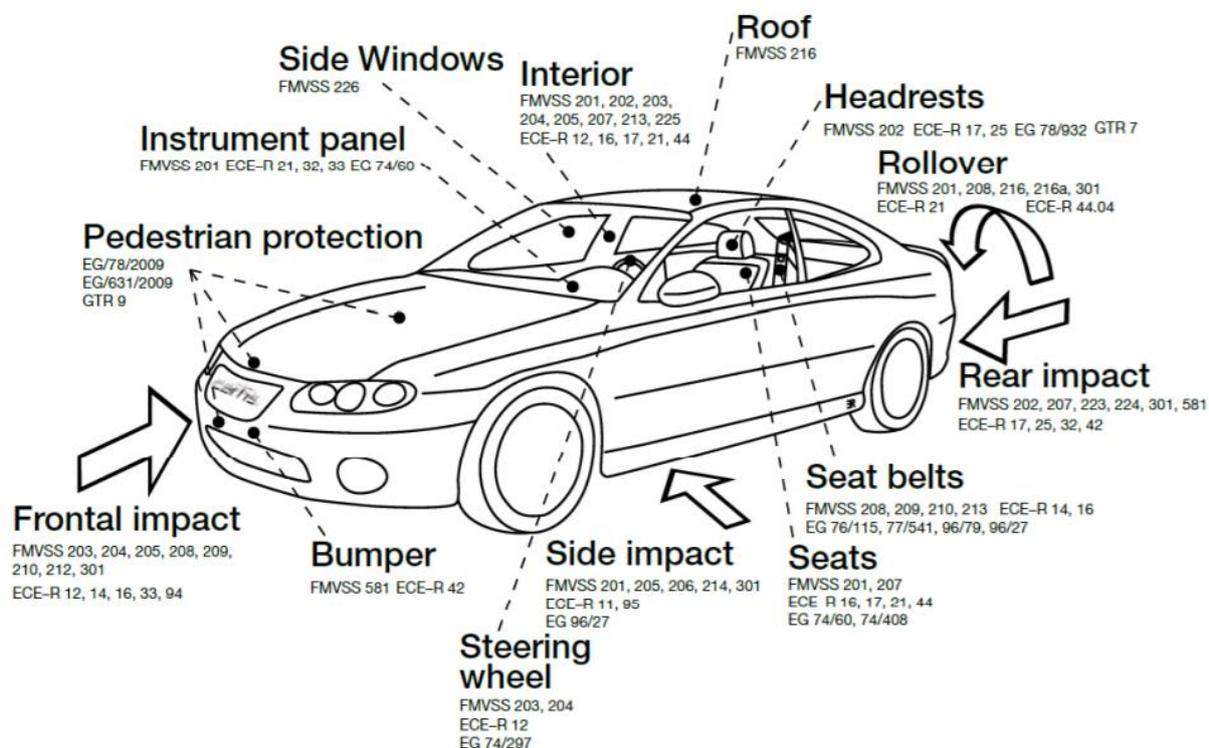


Abbildung 2: Crash- Vorschriften für USA & Europa [10]

Die Vielzahl an Versuchskonfigurationen zeigt, dass die Anforderungen an die Fahrzeughersteller sehr groß sind und die Sicherheit der Fahrzeuge dementsprechend einen hohen Stellenwert erreicht hat.

Zu den weitverbreitetsten Tests gehören die bereits erwähnten NCAP Versuche, wie Euro NCAP oder US NCAP die in Europa und Amerika eine führende Rolle einnehmen und als Verbraucherschutztests bekannt sind.

Zur Veranschaulichung des Ablaufs eines Tests und dessen festgelegte Randbedingungen für eine reproduzierbare Versuchsdurchführung, zeigt die Abbildung 3 für den Euro NCAP bzw. den US NCAP für den Frontalaufprall.

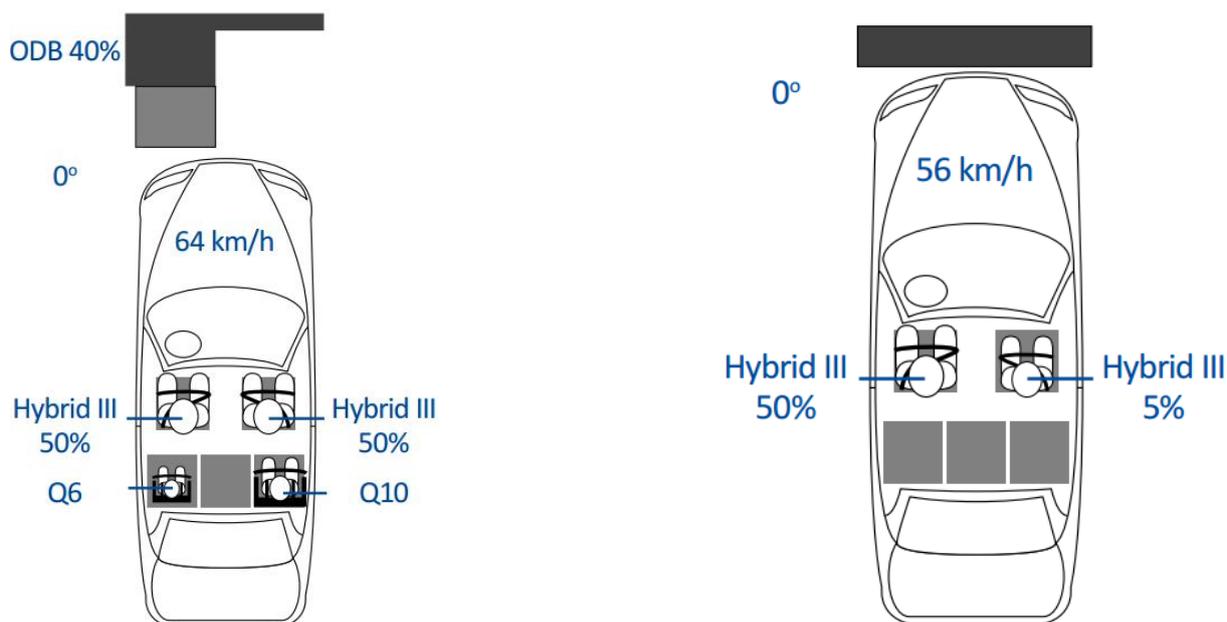


Abbildung 3: Vergleich Euro NCAP (links) & US NCAP (rechts) [16]

Randbedingungen wie die Geschwindigkeit, die Anzahl und die Art der Insassen bzw. die Beschaffenheit der Barriere (steif oder verformbar) werden an die jeweilige Region (Europa, USA) bzw. die Anforderungen angepasst. Die Tests sollen somit reproduzierbar und realitätsnah durchgeführt werden und im Nachhinein eine plausible Bewertung ermöglichen. Notwendige Größen wie Kräfte, Momente bzw. Deformationen werden am Dummy erfasst und in weiterer Folge für die Bewertung verwendet. Dabei werden die Belastungen je nach Körperregion mit festgelegten Referenzwerten verglichen und eine entsprechende Anzahl an Bewertungspunkten vergeben. Die für eine Bewertung definierten Kriterien stellen das Verletzungsrisiko für den Insassen dar und werden auch Verletzungskriterien bezeichnet. Jeder Bereich bzw. Teil des menschlichen Körpers wird einem Verletzungskriterium zugewiesen und ein entsprechendes Belastungsspektrum für diese Körperregion definiert. Verbraucherschutztests sollen dem Kunden somit einen Überblick über mögliche Verletzungsrisiken im Crashfall übermittelt werden und den Fahrzeugherstellern als Motivation zur Verbesserung der Sicherheitsmaßnahmen dienen.

3.2 Verletzungskriterien

Wie bereits erwähnt, geht es im Bereich der passiven Fahrzeugsicherheit darum, Maßnahmen zu treffen die die Unfallfolgen mindern und die Insassen in einem Fahrzeug vor schweren Verletzungen schützen. Durch verschiedenste Versuche bzw. Konfigurationen wie sie in Abschnitt 3.1 beschrieben sind und durch Vergleich der Belastungen auf den Insassen mit den Schutzkriterien, soll eine Bewertung des Verletzungsrisikos während eines Unfalls ermöglicht werden. Welche Körperregionen für die Bewertung des Verletzungsrisikos ausschlaggebend sind und welche Bereiche für die Belastungen definiert sind, ist in der Abbildung 4 dargestellt.

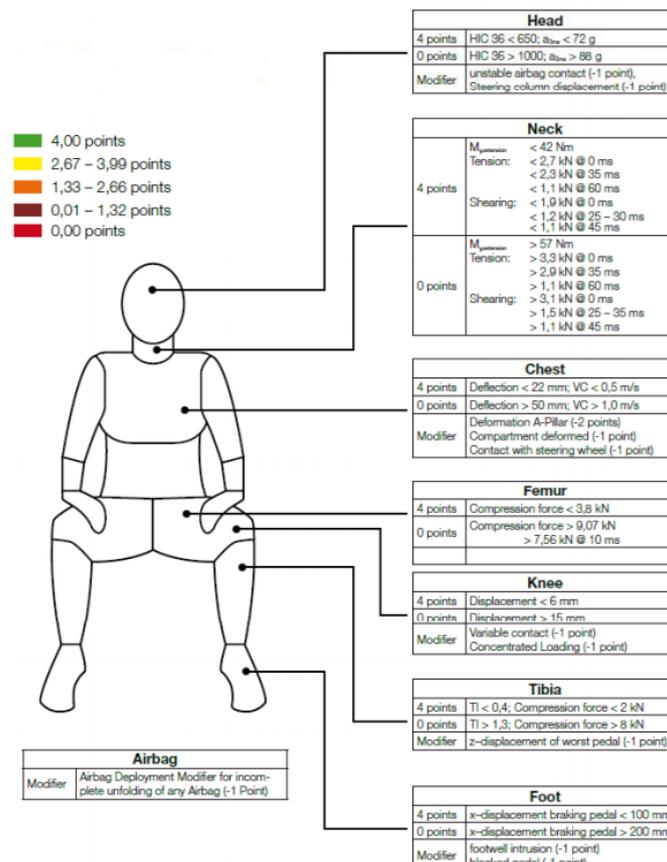


Abbildung 4: Schutzkriterien nach Euro NCAP Hybrid III 50% Male [10]

Die in der Abbildung 4 angeführten Schutzkriterien stammen aus dem Euro NCAP Verbraucherschutztest für den Frontalaufprall. Die definierten Belastungswerte entsprechen jenen für einen Hybrid III 50% Mann Dummy. Die Verteilung der Punkte bzw. Sterne basiert auf dem Vergleich der gemessenen Belastungen am Insassen und den definierten Bezugswerten. So kann für jede Körperregion das entsprechende Verletzungsrisiko ermittelt und in späterer Folge ein Gesamtrisiko abgeschätzt werden. Der maximal Wert von 4 Punkten bedeutet, dass die gemessene Belastung unterhalb der definierten Maximalbelastung liegt und somit ein geringeres Verletzungsrisiko für den Insassen besteht. Alle Werte darüber hinaus würden höhere Belastungen auf den Insassen und somit einen Abzug von Punkten, aber auch ein größeres Verletzungsrisiko für den Insassen bedeuten.

4. STAND DER TECHNIK

Wie bereits Anfangs erwähnt spielen einerseits der 3- Punkt Gurt und andererseits der Airbag, als Rückhaltesysteme im Fahrzeug eine bedeutende Rolle. Die Rückhaltung seitens dieser Systeme bedeutet nicht immer nur eine sichere und verletzungsfreie Rückhaltung, sondern kann je nach Unfallschwere zu hohen Belastungen am Insassen führen.

Aus diesem Grund besteht immer mehr das Bestreben Rückhaltesysteme einzusetzen, die sich auf das Unfallereignis bzw. die Schwere des Unfalls einstellen und entsprechend agieren. Diese Systeme werden als adaptiv bezeichnet und sollen in einem Unfall durch ihre Anpassungsfähigkeit das Verletzungsrisiko für den Insassen reduzieren. Der Stand der Technik zeigt einige Ansätze für derartige Systeme, wobei diese zwar eine Steuerung der Rückhaltekräfte ermöglichen aber keine Regelung dieser. Als Beispiel hierfür kann die Gurtkraft herangezogen werden, welche zwar von einem höheren auf ein niedrigeres Niveau reduziert, aber bei Bedarf nicht wieder erhöht werden kann. Außerdem besteht nicht die Möglichkeit einer stufenlosen Regelung der Kraft, sondern beschränkt sich auf eine oder zwei Stufen.

Die Arbeitsweise eines gesteuerten Systems, mit beschränkter Stufenzahl ist in der Abbildung 5 dargestellt.

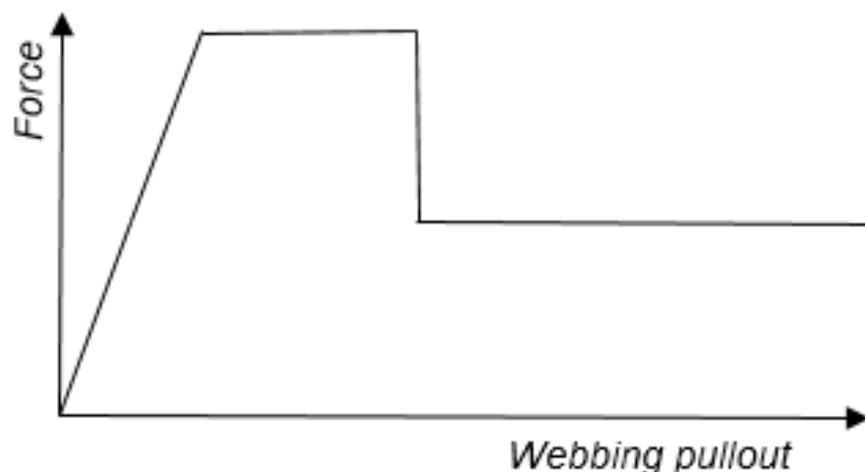


Abbildung 5: Stufig schaltbarer Kraftbegrenzer [1]

In der Abbildung 5 kann man sehen, dass ab einem gewissen Gurtaufzug die Kraft von einem höheren auf ein niedrigeres Niveau reduziert wird. Die Gurtkraft ist zwar steuerbar, jedoch nicht stufenlos, sondern von einem durch werkstoffspezifische Eigenschaften (Torsionsstab) begrenztes Kraftniveau auf ein niedrigeres schaltbar. Dabei ist die Torsionssteifigkeit des Stabes die zu überwindende Größe. Nachteil dieses Systems ist, dass dieser Vorgang nur einmalig und nicht reversibel ist.

Im Vergleich zum oben genannten System, unterscheiden sich stufenlos adaptive Systeme dahingehend, dass ein ständiger Vergleich zwischen der zu regelnden Größe, z.B. Gurtkraft und einer Führungsgröße stattfindet und auftretende Unterschiede somit angeglichen werden bzw. die Stellgröße dementsprechend adaptiert wird. Besondere Herausforderung liegt hier bei der Sensorik und Aktuatorik, die innerhalb von Millisekunden den momentanen Lastfall erkennen und die notwendigen Maßnahmen, wie beispielsweise die Adaption der Gurtkraft, treffen muss. Diese Art von Systemen konnte bis dato in den Fahrzeugen nicht verwirklicht werden, doch erste Ansätze dafür sind bekannt und werden im weiteren Verlauf näher beschrieben.

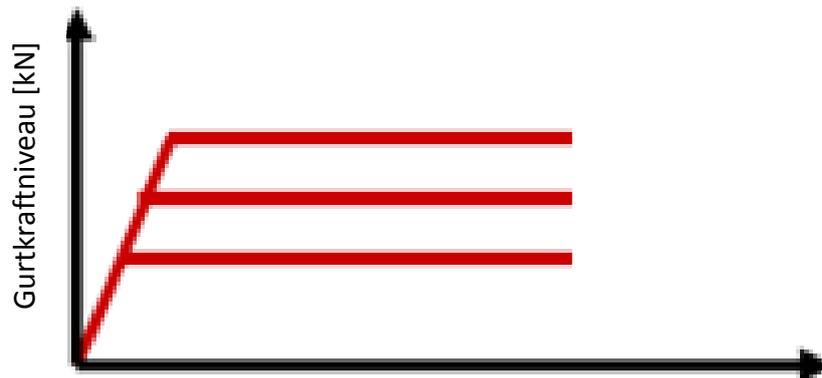


Abbildung 6: Mehrstufig gesteuerte Gurtkraft [5]

Betrachtet man nun die Graphik in Abbildung 6 so kann man erkennen, dass im Vergleich zum System aus Abbildung 5 eine mehrstufige Steuerung des Gurtkraftniveaus dargestellt ist. Hier wird aus dem Lastfall heraus ein bestimmtes Kraftniveau ermittelt und dem Rückhaltesystem vorgegeben. Das eingestellte Kraftniveau mag zwar dem momentanen Lastfall zu entsprechen, doch bei Änderung der Belastungen auf den Insassen ist keine Reduktion der Gurtkraft möglich. Die eingestellte Gurtkraft wird somit bis zum Ende des Unfallvorganges beibehalten, wodurch auch ein höheres Verletzungsrisiko für den Insassen besteht.

Als Beispiel die Adaption der Gurtkraft mittels Gurtkraftbegrenzer und der des Airbags durch Einsatz von ein- und zweistufigen Gasgeneratoren bzw. aktiven Vents sind mögliche Parameter für eine Regelung. Derartige Rückhaltesysteme müssen somit ein adaptives Verhalten bezüglich der Unfallschwere aufweisen.

Welche Technologien für eine adaptive Regelung möglicherweise in Fragen kommen und welche Potenziale diese Systeme mit sich bringen, wird im folgen Abschnitt näher beschrieben.

4.1 Piezo LL

Mit dem Ziel ein System ins Fahrzeug zu integrieren, mit dem eine stufenlos, adaptive Regelung der Gurtkraft möglich ist, hat die Firma Autoliv ein System entwickelt, das diese Anforderungen erfüllen soll. Nach Angaben der Firma ist eine In-Crash-Regelung mit einer „unendlichen“ Zahl an Gurtkraftniveaus möglich. Eine Änderung der Gurtkraft im Unfallgeschehen wird vom System erkannt und entsprechend angepasst. Somit sollen die Belastungen im Crash reduziert und das Verletzungsrisiko minimiert werden. Der Aufbau und die Arbeitsweise des Piezo-Kraftbegrenzers sind in der Abbildung 7 vereinfacht dargestellt.

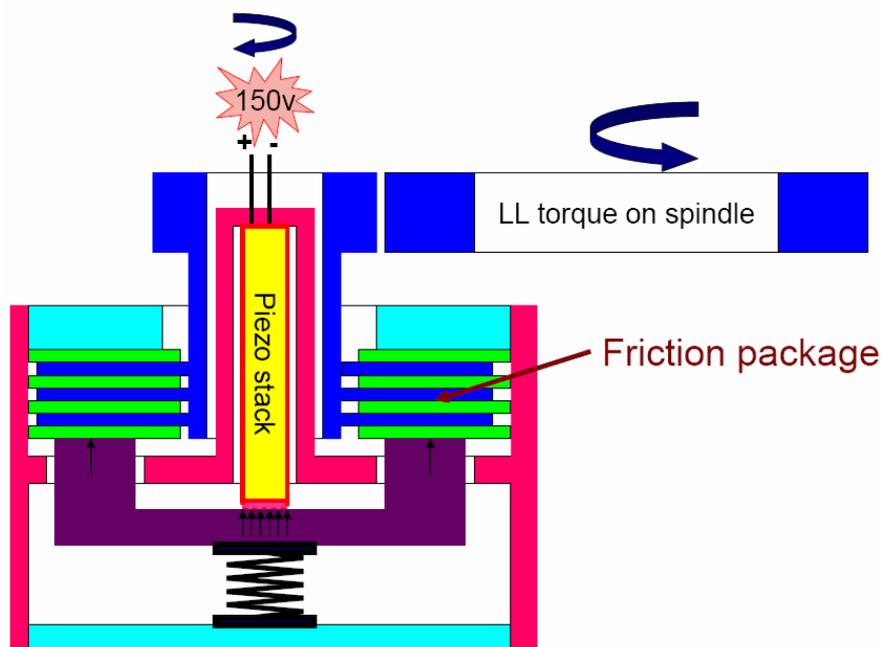


Abbildung 7: Piezo LL [4]

Die Regelung erfolgt mit Hilfe eines Piezoelementes, das sich beim Anbringen einer elektrischen Spannung verformt und je nach Bedarf den Gurt freigibt bzw. den Gurtauszug sperrt. Durch Längenänderung des Piezoelementes auf Grund der Spannung, drückt dieser gegen ein Federelement wie es in der Abbildung 7 ganz unten schwarz dargestellt ist. Das Federelement, das zuvor gegen eine Art Lamellenkupplung (Friction package) gedrückt hat und so den Gurtauszug verhindert hat, wird durch eine Federdruckkraft zusammengedrückt und ermöglicht somit eine Drehbewegung des Übertragungselementes (in der Abbildung blau dargestellt) an die Gurtrandrolle. Dieser Effekt leitet ein Drehmoment an der Gurtrandrolle ein und ermöglicht die Reduktion der Gurtkraft. Die am Gurtband mittels Sensor erfasste Gurtkraft wird an den Piezoverstärker weitergeleitet, neu bewertet und als neues Kraftniveau vom Piezo ausgegeben. Die für eine Regelung notwendigen Zusammenhänge für eine Kraftbegrenzung mit dem Piezoregler sind in der Abbildung 8 dargestellt.

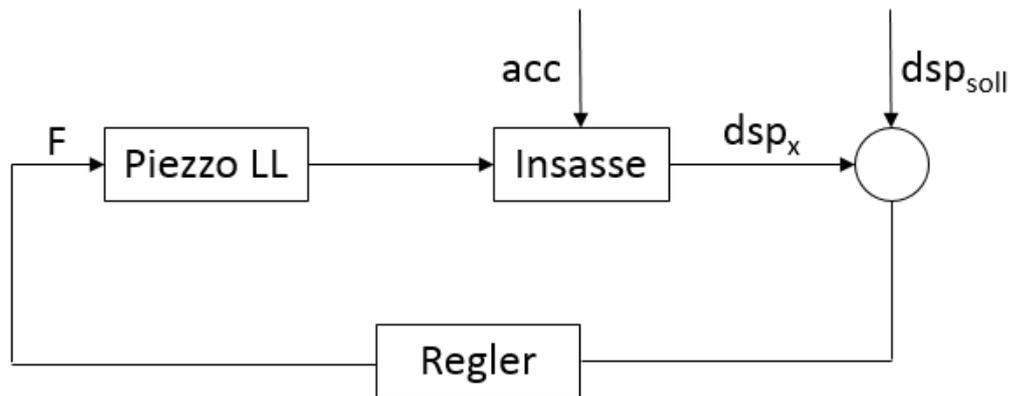


Abbildung 8: Möglicher Regelkreis des Piezo LL

Die im Bild dargestellte Kraft F entspricht jener die vom Regler bestimmt und vom Aktuator bereitgestellt wird. Das im Piezo neu definierte Kraftniveau am Gurtband wird somit an die Belastung am Insassen angepasst. Dafür werden Inputparameter wie die Beschleunigung oder der Vorverlagerungsweg des Insassen verwendet. Mit Hilfe dieses Systems sollen Kraftniveaus zwischen 2 – 6 kN mit einer Ansprechzeit von ca. 1ms geregelt werden können [4].

4.2 Magnetorheologische Fluide

Der magnetorheologische Effekt ist schon seit über 60 Jahren in der Anwendung auf dem Gebiet der Technik, bekannt. Besondere Bedeutung haben diese Flüssigkeiten vor allem wegen ihrer rheologischen Eigenschaften, die abhängig von einem magnetischen Feld veränderbar sind, bekommen. Vor allem für die Anwendung als Aktuator, könnten diese Fluide von Vorteil sein, da die Änderung der rheologischen Eigenschaften des Materials innerhalb von Millisekunden auftritt und dieser Vorgang bis zu einem Maximalwert, stufenlos und vollständig reversibel durchführbar ist. Wird die Flüssigkeit einem Magnetfeld ausgesetzt, bedeutet dies einen Anstieg der Viskosität und die Bildung einer Scherspannung, die mit der Stärke des angelegten Magnetfeldes größer wird. Diese Eigenschaften der MRF (Magnetorheologischen Fluide) erlauben eine vielseitige Einsetzbarkeit dieser. Mit Hilfe verschiedener Belastungsmodi können beispielsweise Stoßdämpfer- Kupplungs- oder auch Bremssysteme damit realisiert werden. In welcher Weise die Flüssigkeit wirksam sein kann, ist in der Abbildung 9 dargestellt.

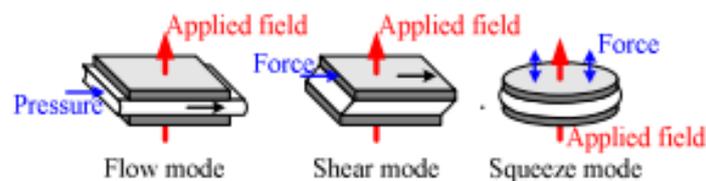


Abbildung 9: Betriebsmodi von MRF [7]

4.3 Retraktor mit magnetorheologischen Fluid

Ein mögliches Konzept zur Umsetzung eines geregelten Rückhaltesystems für den Gurt ist ein Retraktor mit magnetorheologischer Dämpfer- Wirkung. Der Aufbau dieses Konzeptes ist in Abbildung 10 vereinfacht dargestellt.

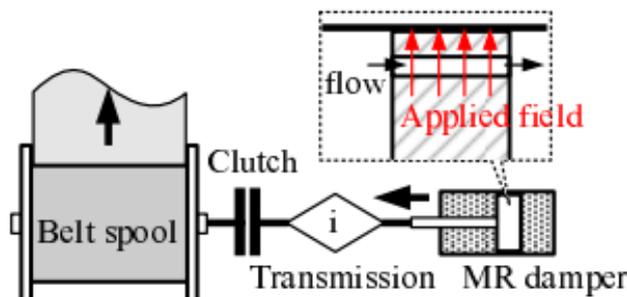


Abbildung 10: Retraktor mit MR- Dämpfer [7]

Basierend auf dem Flow Mode aus Abbildung 9 oder auch Ventilmodus genannt, besteht dieses Konzept aus einem Dämpfersystem, dessen Querschnitt in der Abbildung 10 hervorgehoben ist. In der Abbildung kann man erkennen, dass der Kolben mit Löchern versehen ist durch die das MRF durchströmen kann. Der Kolben ist mittels Gestänge mit einem Getriebe verbunden und dieses wiederum mit einer Kupplung, die direkt mit der Gurtspule des Fahrzeuges verbunden ist. Bei Belastung des Gurtes durch den Insassen während eines Unfalls, wird in der Kupplung ein Reibmoment gebildet, welches entgegen der Drehrichtung der Gurtspule wirkt und somit eine Gurtfreigabe verhindert. Mit Hilfe dieses Systems kann im Falle eines Unfalls in wenigen Millisekunden (leider keine genauen Angaben) eine Rückhaltekraft zur Verfügung gestellt werden. Dieser Vorteil kann nicht nur für die Bereitstellung der Rückhaltung, sondern auch für den umgekehrten Weg, also die Freigabe des Gurtes genutzt werden.

Ergänzend zum vorgestellten Konzept mit magnetorheologischen Fluiden, zeigt die Abbildung 11 das Potenzial der MRF, Kraftverläufe stufenlos und innerhalb von Millisekunden zu generieren.

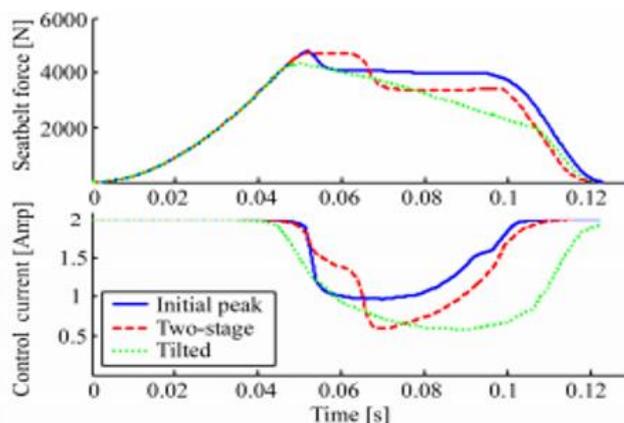


Abbildung 11: Mögliche Gurtkraftverläufe mit MF- LL [7]

Der kontinuierliche Eingriff des MF- LL in das Unfallgeschehen bewirkt eine Änderung des Gurtkraftniveaus in Echtzeit. Das bedeutet, dass die auftretende Gurtkraft nicht nur auf einem konstanten Niveau gehalten wird, sondern bei Bedarf mit der Zeit (Δt) auf ein niedrigeres geregelt werden kann, siehe Abbildung 11 rote Kennlinie. Dieses Verhalten zeigt die gute Anpassungsfähigkeit der MF- LL an den Insassen bzw. an den vorliegenden Lastfall.

4.4 Airbag System und Aktuatoren

Der Airbag ist neben dem Gurt ein zentraler Bestandteil der passiven Fahrzeugsicherheit. Analog zum Gurtsystem, werden auch an das Airbagsystem immer mehr Anforderungen gestellt und das Bestreben nach adaptiv geregelten Airbagsystemen immer größer. Um eine optimale Performance des RHS bei verschiedenen Insassenbelastungen gewährleisten zu können, sind regelbare Druckniveaus bzw. Massenströme im Airbag, das Ziel. Das Anpassen des Systems Airbag auf den Insassen sorgt für eine optimale Rückhaltung und Minimierung der Belastungen durch Beschleunigungskräfte im Kopf- und Brustbereich. Um eine geeignete Performance des Luftsacks zu gewährleisten, gibt es einige Ansätze dazu.

Allgemein haben Airbag- Systeme Öffnungen (Vents) durch die das Gas zusätzlich zu den Poren im Airbag Material entweichen kann. Diese Öffnungen sind direkt im Luftsackmaterial eingearbeitet und werden in „aktive“ und „passive“ Vents eingeteilt. Beim aktiven Lüften können je nach Bedarf während der Entfaltung des Airbags eine oder mehrere Lüftungen betätigt werden. Aktives Lüften bedarf der Betätigung eines Mechanismus oder zum Öffnen des Vents nach der Entfaltung des Airbags. Passives Lüften kann stattdessen zum Öffnen oder Schließen von einer oder mehreren Lüftungen während des Entfaltens des Airbags vorgesehen sein. Passives Lüften nutzt anstelle des Einsetzens einer gesteuerten Einheit, den physikalischen Zustand eines Airbag Kissens zum Öffnen oder Schließen der Vents, wie etwa jenen, die sich beim Treffen des Airbag Kissens auf einen Insassen öffnen, oder Zugseile im Inneren des Airbags, die Luftlöcher beim Entfalten des Airbagkissens öffnen oder schließen. Zusätzlich zu den Öffnungen durch die das Gas entweichen kann, kann eine Gasreduzierung direkt am Gasgenerator erfolgen. Dabei wird überschüssiges Gas im Gasgenerator an die Umgebung freigegeben und gelangt somit nicht in den Airbag.

Eine weitere Maßnahme zur Adaption der Airbag Performance ist das von TAKATA entwickelte Spray- Cooling, bei dem durch einen chemischen Vorgang der Innendruck im Airbag verändert wird. Dabei wird ein Gas- Flüssigkeitsgemisch in den Airbag eingeleitet, das das Gas im Airbag abkühlen lässt. Durch Absenken der Temperatur im Airbag, wird folglich der Druck verringert und eine weichere Performance des Airbags erreicht. Die zeitliche Steuerung dieser Prozesse lässt verschiedene Druckkennlinien im Airbag zu, die eine Anpassung der Rückhaltekraft seitens des Airbags an das Unfallgeschehen möglich macht [11].

4.5 Massenflussgeregeltes 3A- System

Die Möglichkeit der Änderung der Airbag Performance durch Regelung des Druckniveaus und des Massenstroms im Airbag, soll dem Insassen eine optimale und der Unfallsituation entsprechende Rückhaltung bieten bzw. das Verletzungsrisiko reduzieren. Das von Siemens Restraint Systems entwickelte 3A- System (Autonomous Adaptive Airbag System) soll diesen Anforderungen gerecht werden [6].

Der Fokus bei diesem Konzept liegt darin, die Entfaltungsgeschwindigkeit des Luftsacks an das jeweilige Unfallgeschehen anzupassen. Ein verfrühter bzw. zu später Kontakt des Insassen mit dem Airbag würde ein hohes Verletzungsrisiko mit sich bringen. Aufgrund der großen Dynamik bei der Entfaltung des Airbags zeigt sich die mechanische Sensierung der Luftsackfront als nicht ausreichend. Es kommt zum Einsatz der kontaktlosen Sensortechnik, wobei vier Transponder im Inneren des Airbags eingebaut werden, die ein Mikrowellensignal von Dopplerradarsensoren im Airbag Gehäuse reflektieren. Verändert sich die Oberflächenkontur des Airbags beispielsweise durch Kontakt mit dem Insassen, wird ein entsprechendes Signal ausgegeben bzw. reflektiert. Die Tests mit Standard- Airbags mit Reflektoren und Dopplerradarsensoren, werden mit Hochgeschwindigkeitskameras aufgenommen und die Airbag- Entfaltung beobachtet. Ein Vergleich der beobachteten Entfaltungsgeschwindigkeit und des gleichzeitig eingehenden Sensorsignals zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Geschwindigkeit der Luftsackfront und des dazugehörigen Sensorsignals.

Die Abbildung 12 zeigt den Vergleich der Entfaltungsgeschwindigkeit mit dem korrespondierenden Sensorsignal aus den Versuchen.

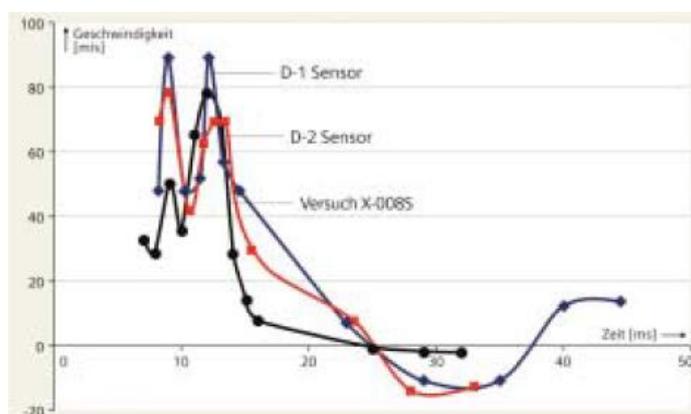


Abbildung 12: Versuchsergebnisse Entfaltungsgeschwindigkeit und Sensorsignal [6]

Die Signalerkennung im Millisekunden Bereich erweist sich vor allem für die In-Crash-Regelung als besonders wichtig, da während des Geschehens bzw. bei bereits bestehenden Kontakt des Insassen zum Airbag eine Maßnahme getroffen werden kann, um dem Insassen bestmöglichen Rückhalt zu bieten. Im Falle einer von der Norm abweichenden Sitzposition (Out of position) des Beifahrers oder einer Person geringerer Körpergröße besteht die Möglichkeit das Verletzungsrisiko zu reduzieren.

Das Arbeitsprinzip des 3A- Systems ist in der Abbildung 13 schematisch dargestellt.

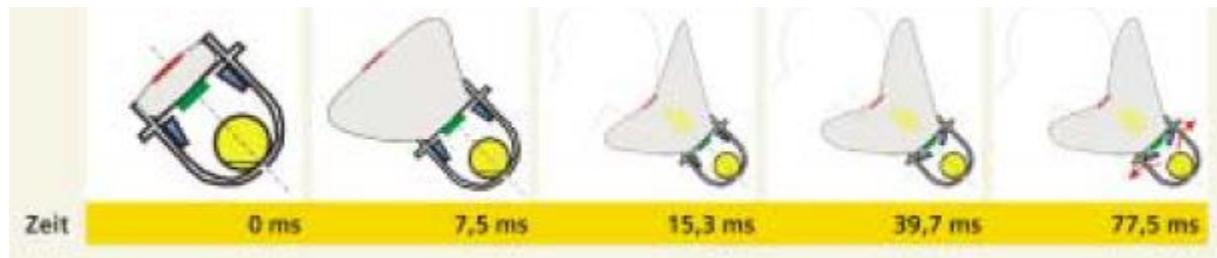


Abbildung 13: Prinzip Schema 3A- System [6]

Das Prinzip des 3A- Systems und seine Wirkung auf den Insassen im Vergleich zu einem Standard- System kann in einer Abfolge von Bildern aus einem Versuch beobachtet werden, siehe Abbildung 14.

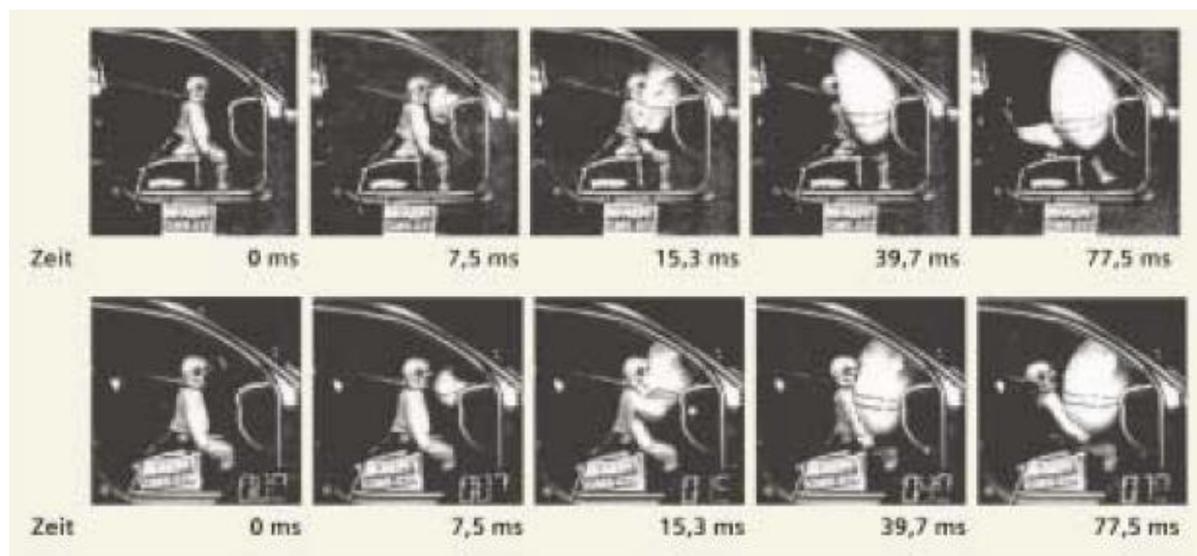


Abbildung 14: Dummy- Kinematik bei Standard & 3A- Airbag [6]

Der Unterschied des 3A- Systems zum Standard System ist schon etwa 15ms nach dem Zusammenstoß sichtbar, wo der Insasse das erste Mal Kontakt zum Airbag hat. Innerhalb der ersten 40ms (laut Hersteller) besteht die Möglichkeit bei Bedarf den Gasmassenstrom in den Airbag zu reduzieren, indem Ventilkappen im Modul geöffnet werden und Gas so austreten kann, siehe Abbildung 13 bei 39,7 ms. Bei diesem Vorgang können etwa 30% der Gas Masse abgelassen und die Aggressivität des Airbags somit abgebaut werden. Die geringere Aggressivität führt in Folge zu niedrigeren Beschleunigungen beim Eintauchen des Dummy in den Airbag. Dieser Effekt ist in der Abbildung 14 vergleichsweise für das 3A- System und das Standard System dargestellt.

Im Zuge der Untersuchungen und Vergleiche des 3A- Systems mit dem Standard- System in zahlreichen Tests, ergab sich eine drastische Reduktion der Kopfbeschleunigung bei Kinder-Dummies und somit des Kopfverletzungswertes HIC (Head Injury Criteria) als auch eine geringere Nackenüberstreckung bzw. Belastung der Halswirbelsäule [6].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der heutige Stand der Technik Ansätze zur Reduktion der Gurtkraft bietet. Der Einsatz von Piezo Aktuatoren bzw. die Adaption der Gurtkraft an das Unfallgeschehen mittels magnetorheologischen Fluiden, ermöglicht die Reduktion der Gurtbelastungen am Insassen. Die Variation der Gurtkraft in einem für den Insassen optimalen Bereich innerhalb von Millisekunden, zeigt das Potenzial diese Systeme auch in ein Reglerkonzept zu implementieren. Vergleichend mit dem Gurt, bietet auch der Airbag durch mehrstufige Zündungen des Gasgenerators oder das Ablassen von überschüssigem Gas mittels Vents, eine Anpassung der Airbagperformance an die Unfallsituation. Vor allem bei länger andauernden Unfällen, erweist sich die mehrstufige Zündung als optimal, die eine Bereitstellung des Airbags für einen längeren Zeitraum möglich macht. Mit Hilfe des Massenflussgeregelten 3A- Systems kann diese Performance des Airbags eingestellt werden, doch eine Regelung ist im Vergleich zu den Gurtaktuatoren nicht möglich. Das Airbagsystem ermöglicht somit keine reversible Adaption der Airbagrückhaltekraft auf den Insassen während eines Crashes.

Somit besteht das Bestreben, Konzepte zu entwickeln, die eine Regelung ermöglichen und die Rückhaltesysteme Gurt und Airbag miteinander vereinen. Dabei ist vor allem die Abstimmung dieser beiden Systeme aufeinander ein wichtiger Faktor. Denn nur so kann eine optimale Rückhaltung des Insassen und somit auch eine Reduktion des Verletzungsrisikos erfolgen.

5. PARAMETERVARIATION & SENSITIVITÄTSANALYSE

Wie in Kapitel 4 erwähnt, bieten die Rückhaltesysteme Gurt und Airbag die Möglichkeit, durch Änderung von Parametern die Gurt- und Airbagperformance zu beeinflussen, um so die Belastungen auf den Insassen zu reduzieren. Durch Anpassung des Gasmassenstroms mittels Mehrfachzündungen bzw. durch Veränderung des Gurtkraftniveaus, soll die Rückhaltekraft des Airbags bzw. des Gurtes an den Lastfall angepasst werden. Das Ziel besteht nun darin, diese Parameter für den Gurt und den Airbag zu definieren und eine Variation in einem gewählten Werterahmen durchzuführen. Die Bewertung und Gegenüberstellung der Parameter erfolgt im nächsten Schritt in einer Sensitivitätsanalyse, um den Einfluss der Parameter auf die Verletzungskriterien darzustellen. Eine Gegenüberstellung der gewählten Größen und die entsprechenden Wertebereiche für die Variation, können der Tabelle 1 entnommen werden.

Lastfall	US NCAP	Euro NCAP
Insasse	5% Frau	50% Mann
Gurtkraftniveau	1 – 5 kN Schrittweite: 0,5 kN	1 – 5 kN Schrittweite: 0,5 kN
TimeToFire- Airbag	7 - 25ms Schrittweite: 3ms	13 – 42ms Schrittweite: 5ms
Ventdurchmesser Airbag	30 – 50 mm Schrittweite: 5 mm	30 – 50 mm Schrittweite: 5 mm
Zeit Max. Airbag Befüllung	40 – 100ms Schrittweite: 10ms	60 – 130ms Schrittweite: 10ms
ActiveVent_OFF + Vent-Durchmesser	30 – 90 mm Schrittweite: 10 mm	Im Modell nicht verändert
Zeitpunkt Öffnung active Vent	13 – 38ms Schrittweite: 5ms	Im Modell nicht verändert
Konstante Gurtauszugsgeschwindigkeit	2 – 7 m/s Schrittweite: 1m/s	2 – 7 m/s Schrittweite: 1m/s

Tabelle 1: Parametermatrix

Aus der Tabelle 1 kann man entnehmen, dass die Parametervariation für zwei Konfigurationen durchgeführt wird. Einerseits für den US NCAP mit einem Hybrid III 5% Frau Dummy und andererseits für den Euro NCAP mit einem Hybrid III 50% Mann Dummy. Damit wird gezeigt, welchen Einfluss die Variation der gewählten Parameter bei unterschiedlichen Lastfällen auf die Insassenbelastung hat.

5.1 Parametervariation und Darstellung der Verletzungskriterien

Um einen Überblick zu verschaffen wie die Parametervariation durchgeführt wird bzw. welche Verletzungsgrößen berücksichtigt werden, wird die Variation der Gurtkraft für den Euro NCAP Lastfall mit dem 50% Mann Dummy herangezogen. Das in der Abbildung 15 dargestellte Modell zeigt den Teilaufbau eines Referenzfahrzeugs mit allen im realen Fahrzeug vorhandenen Komponenten wie Sitz, Gurt, Airbag usw.

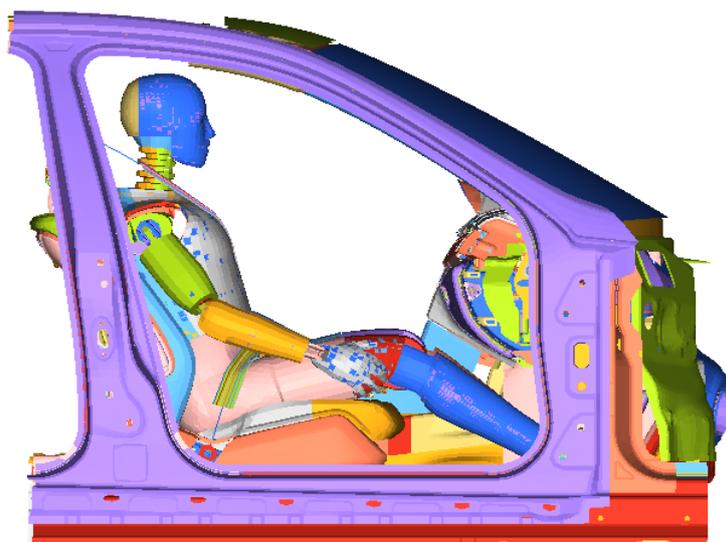


Abbildung 15: Euro NCAP mit 50%- Mann Dummy

Die Darstellung zeigt die Beifahrerseite mit dem Insassen, da die Abstimmung der Rückhaltekomponenten bzw. die Parametervariation für den Beifahrergurt und Airbag erfolgen soll. Analog zum Hybrid III 50% Mann Modell, wird auch für das Hybrid III 5% Frau Modell das gleiche FE- Modell des Fahrzeuges verwendet und ist dem Anhang beigefügt.

Für das Beispiel der Variation der konstanten Gurtkraft wird im Modell die vorhandene Kraft-Weg Charakteristik für den Gurtkraftbegrenzer, für niedrigere bzw. höhere Gurtkraftniveaus um die Basis, variiert. Die im Modell implementierte Kennlinie für den Gurt, entspricht der eines Retraktors mit Straff- Funktion. Der für die Parametervariation definierte Wertebereich für die konstante Gurtkraft ist so gewählt, dass der Insasse bei der Vorverlagerung nicht mit dem Innenraum des Fahrzeuges, wie beispielsweise dem Instrumentenpanel kollidiert. Die bei einem Kontakt zwischen Insasse und Fahrzeug auftretenden Belastungen sind für eine Bewertung unbrauchbar, da sie beim Insassen schwere Verletzungen hervorrufen würden und somit zu vermeiden sind. Zur Veranschaulichung ist das Ergebnis aus der Simulation der Gurtkraft für Brust (FB3) und Becken (FB6) für zwei unterschiedliche Kraftniveaus am Retraktor in Abbildung 16 dargestellt. Dabei wird vom Retraktor eine Gurtkraft von 2kN bzw. 5kN vorgegeben, die eine Belastung am Insassen hervorrufft und entsprechende Kraftniveaus am Gurt wirken lässt.

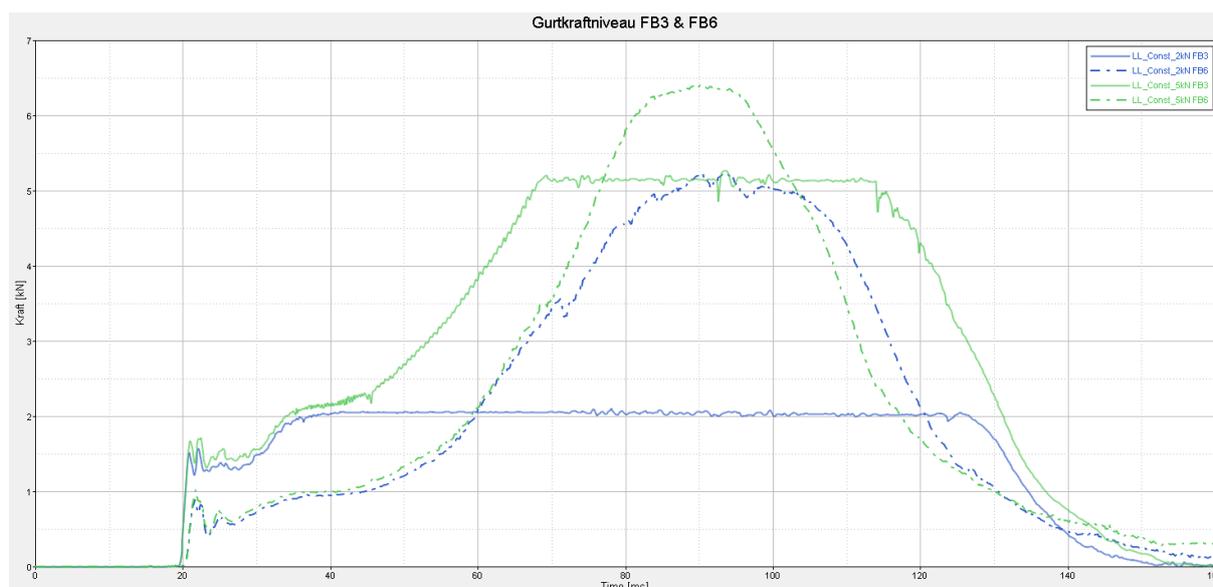


Abbildung 16: Gurtkraft für Brust und Becken für verschiedene Niveaus

Um nun die Auswirkungen der veränderlichen Parameter auf den Insassen bewerten zu können, werden am Insassen bzw. Dummy Belastungen wie Kräfte oder Momente gemessen die zu Verletzungen führen können. Diese wiederum werden auf die verschiedenen Körperregionen des Insassen verteilt und entsprechend bewertet. Die dafür festgelegten Kriterien werden als Verletzungskriterien bezeichnet und sind in der Tabelle 2 aufgelistet.

Verletzungskriterien
Kopfbeschleunigung
Nackenkraft F_z
Nackentmoment M_y
Brustbeschleunigung
Brusteindrückung
Beckenbeschleunigung
Oberschenkelkräfte Links/ Rechts

Tabelle 2: Verletzungskriterien

Die hier gewählten Verletzungskriterien sind analog zu jenen aus Abschnitt 3.2 und entsprechen den Verletzungskriterien für den Euro NCAP Frontalaufprall Verbraucherschutztest. Die für eine spätere Bewertung der Belastungen notwendigen Referenzwerte, sind identisch mit jenen aus Abbildung 4 und bilden die Basis für die Sensitivitätsanalyse.

Zur Veranschaulichung des Einflusses der Variation der konstanten Gurtkraft auf die Verletzungskriterien, ist in der folgenden Graphik die Brusteingdrückung für zwei verschiedene Kraftniveaus dargestellt. Die bei der Variation definierten Werte für das konstante Gurtkraftniveau am Retraktor entsprechen jenen aus Tabelle 1.

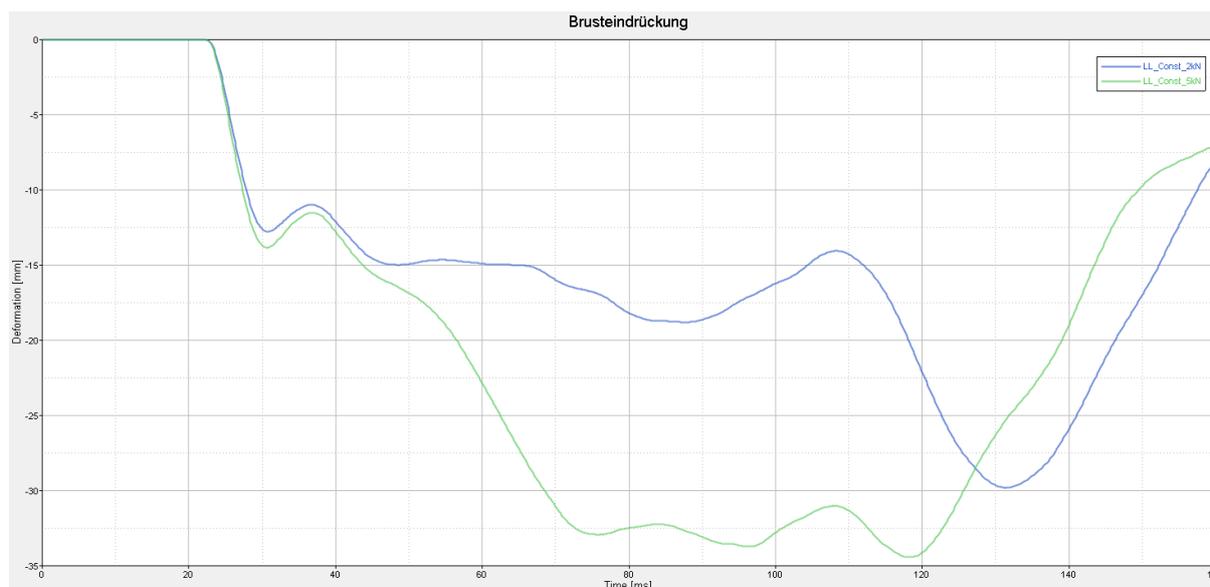


Abbildung 17: Brusteingdrückung in Abhängigkeit der konst. Gurtkraft

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Brusteingdrückung und dem veränderlichen Gurtkraftniveau. Der dargestellte Verlauf der Brustdeformation hat ein negatives Vorzeichen auf Grund der Deformation des Brustbereichs gegen die Vorverlagerungsrichtung des Insassen. Im Bereich von 110-140ms zeigt die Graphik für das Gurtkraftniveau von 2kN einen Anstieg der Brustdeformation. Die erhöhte Belastung resultiert aus einer geringen Rückhalte kraft des Gurtes, die zu einem größeren Vorverlagerungsweg des Insassen führt und zur Kollision der Brust mit den Oberschenkeln bzw. Knien.

Um aber eine Aussage bezüglich des Einflusses bzw. der Sensitivität der veränderlichen Parameter auf das Verletzungsrisiko treffen zu können, werden mit Hilfe der Belastungsgrößen wie Beschleunigungen, Kräfte und Momente und den dazugehörigen Zahlenwerten für die jeweilige Körperregion und Parameter, Sensivitätstrends gebildet und bewertet. Zusammenfassend werden alle Ergebnisse und Zusammenhänge in einer Matrix dargestellt und daraus ein möglicher Parameter für die Regelung abgeleitet.

5.2 Sensitivitätsanalyse

Das Ziel bei der Anwendung der Sensitivitätsanalyse besteht darin, den Einfluss der definierten Eingangsparameter auf die Verletzungskriterien graphisch darzustellen und als Empfehlung für die Wahl einer geeigneten Regel- bzw. Führungsgröße beizutragen.

Die hierfür verwendeten Größen sind einerseits die konstante Gurtkraft und andererseits die Brustdeformation als Verletzungskriterium, deren Eigenschaften in Relation gebracht werden. Dabei werden das bekannte Gurtkraftniveau und die analoge Brustdeformation aus der Simulation einander gegenübergestellt. Die entsprechenden Verläufe für die Brustdeformation in Abhängigkeit der vorgegebenen Gurtkraft sind der Abbildung 18 zu entnehmen.

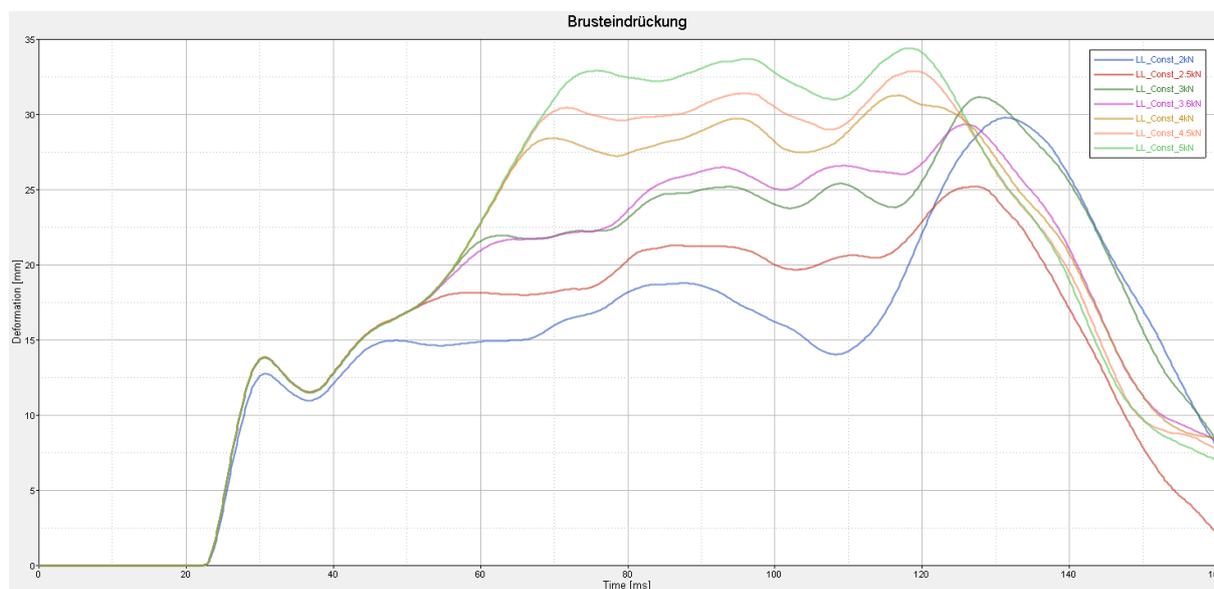


Abbildung 18: Brusteindrückung für versch. Gurtkraftniveaus

Damit nun ein Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen erkennbar wird, werden die Werte für Gurtkraft und Brustdeformation in ein Korrelationsdiagramm eingetragen. Die dabei entstehende Korrelationsgerade stellt den Trend zwischen den beiden Größen dar. Analog zur Korrelationsgeraden kann der Trend zweier Merkmale auch mittels einer Kurve höherer Ordnung dargestellt werden oder auch einen exponentiellen Verlauf aufweisen. Zur Beurteilung der Ergebnisse bzw. Ermittlung des Zusammenhangs zwischen möglichen Regelgrößen und Verletzungskriterien, wird in dieser Arbeit die lineare Anpassungsform der Korrelationsgeraden angewandt und ist willkürlich gewählt.

Welche Formen bzw. Trends eine Korrelationsgerade annehmen kann, ist in der Abbildung 19 dargestellt.

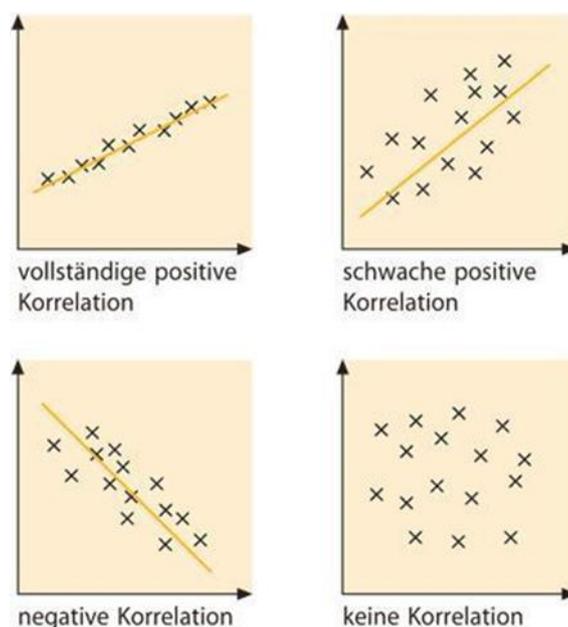


Abbildung 19: Formen der Korrelation [18]

Aus der Abbildung 19 kann man erkennen, dass die beiden Merkmale einerseits eine positiv steigende und andererseits eine negativ fallende Korrelationsgerade aufweisen können. Natürlich kann es auch vorkommen, dass die untersuchten Merkmale keinerlei Zusammenhang haben und somit keine Korrelation auftritt, siehe Abbildung 19 rechts unten.

Die für die Ermittlung der Korrelationsgeraden bzw. der Sensitivität benötigten Werte sind in der Tabelle 3 dargestellt und entsprechen den Maximalwerten für die Brusteingdrückung bei definiertem Gurtkraftniveau aus der Abbildung 18.

Gurtkraftniveau [kN]	Brusteingdrückung [mm]
2,0	30
2,5	25
3,0	31
3,6	29
4,0	31
4,5	33
5,0	34

Tabelle 3: Gurtkraft & Brusteingdrückung für Hybrid III 50% Mann Dummy

Um ein eindeutiges Ergebnis bezüglich der Sensitivität der beiden Merkmale, welche durch die Steigung der Korrelationsgeraden ausgedrückt werden kann zu erhalten, ist eine Normierung der Belastungswerte notwendig. Dabei werden alle Werte aus Tabelle 3 einer entsprechenden Bezugsgröße zugeordnet bzw. daraus ein prozentueller Wert für die Belastungsgröße ermittelt. So werden Abweichungen bei der Wahl des Wertebereichs bzw. der Schrittweiten für die einzelnen Parameter und Belastungen kompensiert und somit eine genauere Aussage getroffen werden.

Die für die Normierung der Ergebnisse verwendeten Bezugsgrößen sind laut der Schutzkriterien für den Euro NCAP Frontalaufprall definiert. Die hier gewählten Bezugsgrößen entsprechen jenen Grenzwerten aus dem Verbraucherschutztest, für die die maximale Punktzahl bei der Wertung vergeben wird. Auf Grund der Betrachtung des Euro NCAP Lastfalls und der dafür definierten Verletzungskriterien werden auch die Bezugsgrößen für diese Konfiguration gewählt. Dies soll eine einheitliche und nachvollziehbare Bewertung der Ergebnisse ermöglichen, wobei alternative Bewertungsschemen nicht auszuschließen sind.

Die im Euro NCAP Frontalaufprall definierten Grenzwerte für die verschiedenen Körperregionen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Verletzungskriterium	Bezugsgröße [...]
Kopfbeschleunigung	72 [g]
Nackenkraft F_z	1,1 [kN]
Nackenmoment M_y	42 [Nm]
Brustbeschleunigung	60 [g]
Beckenbeschleunigung	60 [g]
Brusteindrückung	22 [mm]
Oberschenkelkraft F_z Links/ Rechts	3,8 [kN]

Tabelle 4: Bezugswerte der Verletzungskriterien

Weiter muss festgehalten werden, dass neben den Belastungen bzw. Verletzungskriterien auch die Führungsgrößen zu normieren sind, umso eine präzisere Aussage über die Sensitivität machen zu können. Als Bezugsgrößen hierfür werden die Basiswerte der einzelnen Führungsgrößen verwendet und können der Tabelle 5 entnommen werden. Die Bezugsgrößen entsprechen jenen Werten aus dem Basis FE-Modell aus Abbildung 15, die als Inputgrößen für das Gurt- und Airbagsystem definiert sind.

Lastfall	US NCAP	Euro NCAP
Insasse	5% Frau	50% Mann
Gurtkraftniveau	1 – 5 kN Basiswert: 3,4 kN	1 – 5 kN Basiswert: 3,6 kN
TimeToFire- Airbag	7 – 25 ms Basiswert: 13 ms	13 – 42 ms Basiswert: 22 ms
Ventdurchmesser Airbag	30 – 50 mm Basiswert: 40 mm	30 – 50 mm Basiswert: 40 mm
Zeit Max. Airbag Befüllung	40 – 100 ms Basiswert: 65 ms	60 – 130 ms Basiswert: 96 ms
ActiveVent OFF + Vent-Durchmesser	30 – 90 mm Basiswert: 40 mm	Im Modell nicht verändert
Zeitpunkt Öffnung aktives Vent	13 – 38 ms Basiswert: 18 ms	Im Modell nicht verändert
Konstante Gurtauszugsgeschwindigkeit	2 – 7 m/s Basiswert: 6,5 m/s	2 – 7 m/s Basiswert: 9 m/s

Tabelle 5: Bezugswerte der Variationsparameter

Abhängig vom Parameter und dem Verletzungskriterium wird der entsprechende Basiswert gewählt und ein normierter Wert ermittelt. Die Berechnung des normierten Wertes für die Gurtkraft bzw. die Brustdeformation erfolgt mittels einfacher Prozentrechnung und kann folgendermaßen dargestellt werden.

$$\frac{\text{Simulationsergebnis}}{\text{Bezugsgröße}} \times 100\% \Rightarrow \text{normierter Wert}$$

Formel 1: Normierung der Variationsparameter

Somit ergibt sich für die Brustdeformation von 30 mm und der dazugehörigen Bezugsgröße aus Tabelle 4 mit 22 mm als Grenzwert, ein normierter Wert für die Brustdeformation von:

$$\frac{30 \text{ mm}}{22 \text{ mm}} \times 100\% \Rightarrow \text{normierter Wert} = 135 \%$$

Der entsprechende Wert für das normierte, konstante Gurtkraftniveau bei 2,0 kN Gurtkraft und dem Bezugswert aus Tabelle 5 mit 3,6 kN lautet demnach:

$$\frac{2,0 \text{ kN}}{3,6 \text{ kN}} \times 100\% \Rightarrow \text{normierter Wert} = 56 \%$$

Formel 2: Normierung der Belastungsgrößen

Alle weiteren normierten Werte sind in der Tabelle 6 aufgelistet und werden analog zum obigen Beispiel bestimmt.

Gurtkraftniveau [kN]	Normierte Gurtkraft [%]	Brusteindrückung [mm]	Normierte Brusteindrückung [%]
2,0	56	30	135
2,5	69	25	115
3,0	83	31	142
3,6	100	29	134
4,0	111	31	142
4,5	125	33	150
5,0	139	34	156

Tabelle 6: Normiertes Gurtkraftniveau und normierte Brusteindrückung für den Hybrid III 50% Mann Dummy

Damit nun ein Trend zwischen der Führungsgröße und dem Verletzungskriterium ersichtlich wird, wird anhand der normierten Werte ein Diagramm erstellt und die entsprechende Korrelationsgerade gebildet.

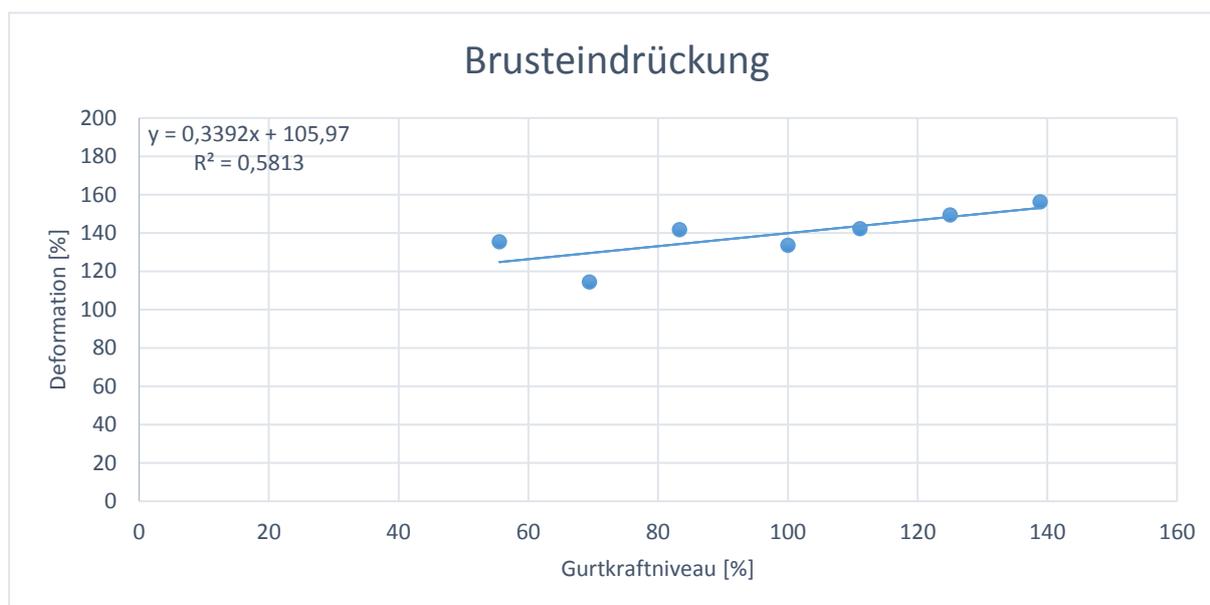


Abbildung 20: Normierte Brusteindrückung

Für die Korrelationsgerade ergibt sich somit eine Geradengleichung der Form:

$$Y = 0,3392x + 105,97$$

Formel 3: Steigung der Korrelationsgeraden

Die ermittelte Steigung der Geraden mit 0,3392 wird hier auf Grund der Normierung aller Werte in Prozent angegeben und somit die Sensitivität der Führungsgrößen bezüglich der Verletzungskriterien prozentuell ausgedrückt. Der Einsatz einfacher mathematischer Formeln bzw. Gleichungen ermöglicht die Berechnung der linearen Gleichung der Korrelationsgeraden für die Sensitivitätsanalyse, nach folgenden Schritten.

Schritt 1:

Bildung der Mittelwerts Koordinaten aus den Zahlenwerten in Tabelle 6.

$$X_m = \frac{56 + 69 + 83 + 100 + 111 + 125 + 139}{7} = 97,57\%$$

Formel 4: Mittelwerts Koordinate X_m

$$Y_m = \frac{135 + 115 + 142 + 134 + 142 + 150 + 156}{7} = 139,14\%$$

Formel 5: Mittelwerts Koordinate Y_m

Schritt 2:

Berechnung der Steigung für die Regressionsgerade.

$$a = \frac{\sum(X_i - X_m) \times (Y_i - Y_m)}{\sum(X_i - X_m)^2}$$

$$a = 0,3392$$

Formel 6: Steigung der Regressionsgeraden

Schritt 3:

Anwendung der allgemeinen Geradengleichung und Berechnung der Regressionsgerade.

$$Y - Y_m = a \times (X - X_m)$$

$$Y = 0,3392x + 105,97$$

Formel 7: Allgemeine Geradengleichung

Mit Hilfe der Geradengleichung kann nun der Zusammenhang der zwei Größen, Gurtkraft und Brusteingdrückung mathematisch beschrieben werden. Als letzter Schritt bleibt dann noch die Ermittlung des Korrelationsfaktors K bzw. des Bestimmtheitsmaßes R^2 .

Zur Berechnung des Faktors wird folgende, in der Statistik angewandte Formel verwendet.

$$K = \frac{\sum(X_i - X_m) \times (Y_i - Y)}{\sqrt{\sum(X_i - X_m)^2 \times \sum(Y_i - Y)^2}}$$

Formel 8: Korrelationsfaktor Berechnung

Für die oben genannten Merkmale, Gurtkraft und Brusteingdrückung mit den entsprechenden Zahlenwerten aus Tabelle 6 ergibt sich ein Korrelationsfaktor von:

$$K = 0,7624$$

Der Zusammenhang zwischen Bestimmtheitsmaß und Korrelationsfaktor ist somit definiert als:

$$K = \sqrt{R^2} = 0,7624$$

Formel 9: Zusammenhang zwischen Korrelationsfaktor K und Bestimmtheitsmaß R

Je stärker die Korrelation zweier Merkmale ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit eines bestehenden Zusammenhangs. Deshalb ist es sehr wichtig, neben der zuvor berechneten Korrelationsgerade die entsprechende Korrelationszahl zu bestimmen, umso die Stärke der Korrelation auszudrücken. Diese Kennzahl kann den Wert 1 für positive Steigung und den Wert -1 für negative Steigung der Korrelationsgeraden nicht übersteigen. Bei einem Korrelationsfaktor 0 besteht kein Zusammenhang zwischen den Merkmalen und somit auch keine Korrelationsgerade. Eine hohe Korrelation hingegen bedeutet, dass die beiden Merkmale einen Zusammenhang haben und sich somit alle Punkte in der Nähe der Korrelationsgeraden befinden. Doch wie stark sich die Änderung der Gurtkraft auf die Änderung der Belastungen am Insassen auswirkt, kann nur mittels der Steigung der Korrelationsgeraden ausgedrückt werden. Je größer die positive Steigung der Geraden ist, umso höher die Sensitivität, was bedeutet, dass die Belastungen am Insassen mit der Gurtkraft größer werden. In Kombination mit der Normierung der Werte bzw. eine Vereinheitlichung der Ergebnisse mit Hilfe der Bezugsgrößen, können Abweichungen in der Bandbreite für die möglichen Führungsgrößen und Verletzungskriterien kompensiert und genaueren Ergebnis erzielt werden.

5.3 Sensitivitätsmatrix

Das Ziel der Sensitivitätsanalyse ist eine geeignete Führungsgröße für ein Regler Konzept abzuleiten, die die größte Sensitivität bezüglich der Verletzungskriterien aufweist. Das im Abschnitt 5.2 an Hand der konstanten Gurtkraft und der Brusteindrückung beispielhaft erklärte Verfahren, eignet sich besonders gut, um dieses Ziel zu erreichen und als Hilfestellung bei der Wahl einer geeigneten Führungsgröße beizutragen. Diese Methode wird analog zur Gurtkraft und der Brusteindrückung für jede weitere Führungsgröße bzw. Verletzungskriterium angewandt. Die daraus resultierenden Korrelationen und Sensitivitäten zwischen den Merkmalen werden in einer Korrelations- bzw. Sensitivitätsmatrix zusammengefasst.

	Gurtkraftniveau	Time To Fire Airbag	Vent Durchmesser	Gas Massenstrom	TTF Active Vent Airbag	Konst. Gurtauszugs- geschw.	Active Vent OFF
Kopfbeschleunigung	0,970	0,782	0,447	0,109	-	0,935	-
Nackenkraft Fz	0,528	0,908	0,936	0,985	-	0,747	-
Nackenmoment My	0,389	0,865	0,933	0,972	-	0,956	-
Brusteindrückung	0,762	0,910	0,825	0,984	-	0,976	-
Brustbeschleunigung	0,394	0,860	0,433	0,578	-	0,929	-
Beckenbeschleunigung	0,821	0,162	0,866	0,538	-	0,979	-
Oberschenkelkraft Li	0,971	0,624	0,675	0,313	-	0,991	-
Oberschenkelkraft Re	0,993	0,673	0,191	0,869	-	0,801	-
Summe Σ	5,828	5,784	5,306	5,348	-	7,314	-

Tabelle 7: Korrelationsmatrix für das Hybrid III 50% Mann Insassenmodell

Die in Tabelle 7 dargestellten Werte entsprechen den Korrelationsfaktoren zwischen den Verletzungskriterien und den Führungsgrößen für das 50% Mann Insassenmodell. Damit eine Aussage getroffen werden kann, welcher Parameter die größte Korrelation bezüglich der Verletzungskriterien aufweist, wird aus den einzelnen Korrelationsfaktoren eine Summe gebildet, die die Stärke einer Korrelation ausdrücken soll. Somit ist ein Zusammenhang zwischen den Merkmalen schnell ersichtlich.

Damit nun neben der Beziehung zwischen den Merkmalen auch der Einfluss der Parametervariation auf die Verletzungskriterien klar wird, werden die ermittelten Werte für die Steigung der Korrelationsgeraden tabellarisch zusammengefasst.

	Gurtniveau	Time To Fire Airbag	Vent Durchmesser	Gas Massenstrom	TTF Active Vent Airbag	Konst. Gurtauszugs- geschwindigkeit	Active Vent OFF
Kopfbeschleunigung	0,328	0,074	0,033	0,018	-	2,860	-
Nackenkraft Fz	0,150	0,059	0,400	0,936	-	1,790	-
Nackenmoment My	0,339	0,344	0,438	0,096	-	9,400	-
Brusteindrückung	0,339	0,154	0,255	0,284	-	0,795	-
Brustbeschleunigung	0,067	0,039	0,040	0,040	-	0,544	-
Beckenbeschleunigung	0,101	0,005	0,080	0,019	-	0,154	-
Oberschenkelkraft Li	0,677	0,018	0,038	0,038	-	0,890	-
Oberschenkelkraft Re	0,327	0,019	0,019	0,072	-	0,123	-
Summe Σ	2,328	0,712	0,870	1,503	-	16,556	-

Tabelle 8: Sensitivitätsmatrix für das Hybrid III 50% Mann Insassenmodell

Wie bereits erwähnt, stellt die Steigung der Korrelationsgeraden die Sensitivität der Parameter bezüglich der Verletzungsgrößen dar. Die in Tabelle 8 zusammengefassten Werte entsprechen der Steigung der Korrelationsgeraden für jeweils ein Merkmalpaar. Berechnet aus den normierten Größen für die Belastungen bzw. die Parametervarianten, wird die Steigung in der Matrix in Prozent angegeben. Analog zu den Korrelationswerten wird am Ende der Sensitivitätsmatrix eine Summe der Steigungen gebildet. Die Darstellung der Sensitivität aus der Summe aller Werte für die Steigung, ermöglicht einen raschen Vergleich der möglichen Parameter und dient als Hilfestellung bei der Wahl einer geeigneten Größe für das Regler Konzept.

Für die in Tabelle 7 und Tabelle 8 dargestellten Parameter ohne Wertangabe ist keine Parametervariation möglich, da diese Größen im FE- Modell nicht variable bzw. implementiert sind. Aus der Variation des Zündzeitpunktes des aktiven Vents bzw. aus der Abschaltung des aktiven Vents, kann keine Aussage getroffen bzw. kann somit der Einfluss auf die Verletzungskriterien nicht dargestellt werden.

Vergleicht man nun die Korrelations- bzw. Sensitivitätsanalyse miteinander, so kann man feststellen, dass in beiden Darstellungen die Gurtgrößen in Bezug auf die Verletzungskriterien hervorstechen. Die Bereitstellung der benötigten Gurtkraft bzw. die Einstellung einer entsprechenden Gurtauszugsgeschwindigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt, zeigt einen hohen Einfluss auf die Belastungen bzw. die Verletzungsgrößen. Der Einfluss der Gurtkräfte ist besonders bei der Brusteindrückung, die eingangs als Beispiel für die Sensitivitätsberechnung verwendet wurde, sichtbar. Aus der Sensitivitätsanalyse kann man also erkennen, dass mit steigendem Gurtkraftniveau die Belastungen auf den Insassen im Bereich der Brust steigen und dementsprechend die Deformation zunimmt. Dies bedeutet auch, dass bei höheren Auszugsgeschwindigkeiten des Gurtes, die Belastungen auf die Brust reduziert werden können, da die Gurtkraft mit dem Auszugsweg abnimmt. Die Entlastung der Brust mittels Gurtkraftreduktion hat nicht nur Vorteile, sondern wirkt sich auf die Belastungen im Bereich des Kopfes negativ aus. Betrachtet man die Sensitivitätsanalyse so ist erkennbar, dass die Variation der konstanten Gurtauszugsgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die Kopfbeschleunigung bzw. die Nackenkräfte hat. Die hohen Steigungswerte für die Korrelationsgeraden im Kopfbereich resultieren aus zu hohen Gurtauszugsgeschwindigkeiten, die ermöglichen, dass der Insasse während der Vorverlagerung mit dem Fahrzeuginnenraum kollidiert. Aus diesem Grund sind die Belastungswerte für die Bewertung nicht relevant bzw. plausibel. Doch nicht nur der Kontakt des Insassen mit dem Innenraum würde einen Anstieg der Belastungen im Kopf- und Nackenbereich bedeuten, sondern auch der verfrühte Kontakt des Insassen mit dem Airbag. Hohe Gurtauszugsgeschwindigkeiten würden bedeuten, dass sich der Insasse früher im Schussbereich des Airbags befindet und durch die Entfaltungenergie des Airbags hohe Belastungen erfährt. Die erhöhten Belastungswerte für die Variation der konstanten Gurtauszugsgeschwindigkeit treten in diesem Fall jedoch auf Grund der Abschaltung des Airbags während des Crashes, auf. Damit soll die Wirkung der Änderung der Gurtgeschwindigkeit auf die Insassenbelastung abgebildet werden.

Aus den Ergebnissen der Korrelations- und Sensitivitätsanalyse kann man schließen, dass die Gurtkomponente somit ein hohes Potenzial in Bezug auf die Minimierung der Belastungen auf den Insassen, aufweist. Mit Hilfe des Airbags und der Möglichkeit einer Veränderung des Gasmassenstromes durch Mehrfachzündungen bzw. Reduktion der Gas Masse durch Entlüftungsöffnungen, besteht das Potenzial einer Rückhaltung des Insassen bei reduzierter Belastung. Dabei zeigt die Änderung des Gasmassenstromes im Airbag, in der Sensitivitätsanalyse einen höheren Einfluss bezüglich der Verletzungskriterien im Vergleich zu anderen Parametern.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der Korrelations- bzw. Sensitivitätsanalyse für den Hybrid III 50% Mann Insassen, wurde für die Wahl einer geeigneten Führungsgröße eine Parametervariation für den Hybrid III 5% Frau Insassen durchgeführt und die Ergebnisse in einer Korrelations- bzw. Sensitivitätsanalyse untersucht. Damit soll gezeigt werden, ob eine Variation der definierten Führungsgrößen bei einem anderen Insassen, ähnliche Korrelationen bzw. Sensitivitäten aufweist.

Analog zum Hybrid III 50% Mann Insassen, zeigt auch hier die Variation der konstanten Gurtauszugsgeschwindigkeit und die des konstanten Gurtkraftniveaus die höchste Sensitivität in Bezug auf die Verletzungskriterien. Die entsprechenden Werte für die Korrelation bzw. Sensitivität sind in einer Matrix zusammengefasst und dem Anhang beigelegt.

Mit Hilfe der Ergebnisse aus der Parametervariation und folglich der Sensitivitätsanalyse, soll abschließend eine Aussage über eine mögliche Führungsgröße für das Regler Konzept gemacht werden. An Hand der Zusammenhänge die sich aus der Bewertung der Ergebnisse ergeben und der vorgenommenen Einschränkungen, zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass das Gurtkraftniveau, die Gurtauszugsgeschwindigkeit und der Gasmassenstrom im Airbag das Potenzial haben, die Belastungen am Insassen anzupassen und als mögliche Parameter für ein Regler Konzept einsetzbar sind.

Als Empfehlung für die Regelung der Gurtkraft mittels eines Piezo Gurtkraftbegrenzers, erweist sich als Möglichkeit für eine Insassenrückhaltung mit reduzierter Belastung. Zur Einstellung verschiedener Gurtauszugsgeschwindigkeiten würde sich ein System mit einer Drehwinkelgebereinheit eignen, wobei Konzepte dieser Art noch unbekannt sind.

6. ERSATZMODELL

Analog zum FE- Modell, welches Anfangs als Basismodell für die Parametervariation und folglich für die Ableitung einer möglichen Regelgröße verwendet wurde, soll nun ein vereinfachtes Ersatzmodell für den Insassen daraus abgeleitet werden. Als Bezug wird das in Abbildung 21 dargestellte Fahrzeug- Insassenmodell einerseits für den Hybrid III 50% Mann und andererseits für den Hybrid III 5% Frau Insassen verwendet. Die Darstellung erfolgt hier beispielhaft am Modell für den Hybrid III 50% Mann Insassen.

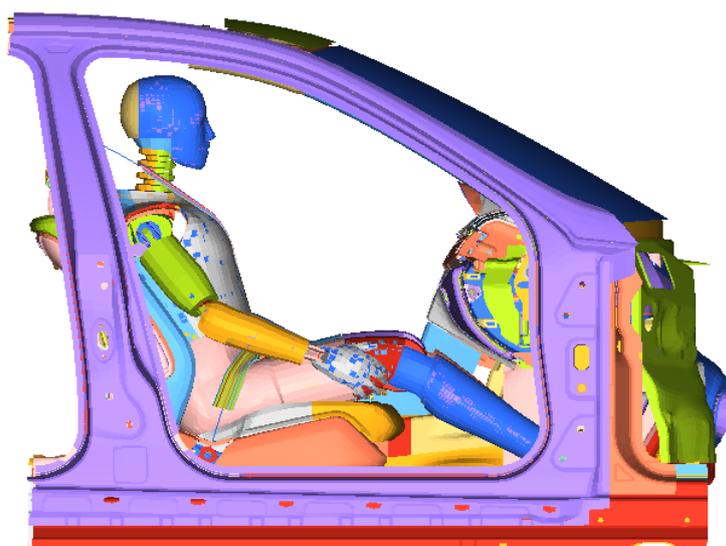


Abbildung 21: FE- Basismodell für den Hybrid III 50% Mann Dummy

Für das Ersatzmodell wird ein Mehrmassenmodell erstellt, dessen Bewegungen mittels abstrahierter Kräfte und Gelenke nachgestellt werden. Dabei werden Körperteile wie die Beine oder auch der Nacken durch Belastungskurven ersetzt bzw. Komponenten des Insassen und des Fahrzeugs mittels einfacher geometrischer Formen dargestellt. Durch geeignete Wahl der Freiheitsgrade bzw. durch Vereinfachungen, soll die Komplexität des Ersatzmodells minimal bleiben und somit auch der Rechenaufwand minimiert werden. Grund hierfür ist die Übertragung des Ersatzmodells in ein mathematisches Modell für die Reglerentwicklung in einer weiterführenden Arbeit von Kurt Alber „Adaptive Rückhaltesysteme: Entwicklung eines Reglerkonzeptes für Rückhaltesysteme mithilfe eines vereinfachten Insassenmodells“. Durch Vorgabe von Randbedingungen und Einschränkung der Bewegungsrichtungen des Ersatzmodells, kann die Anzahl der Unbekannten im mathematischen Modell geringgehalten und so der Rechenaufwand auf ein Mindestmaß reduziert werden. Die aus der Abstimmung des Ersatzmodells mit dem Basismodell ermittelten Belastungskurven, dienen in weiterer Folge als Inputparameter für das mathematische Modell und stellen beispielsweise Größen wie die Gurtkraft oder die Airbagbelastung dar.

Die Ableitung des Ersatzmodells wird im nächsten Schritt für den Hybrid III 50% Mann Insassen gezeigt, da die Vorgehensweise für das Hybrid III 5% Frau Insassenmodell analog ist.

6.1 Modellgeometrie

Wie bereits erläutert, wird das Ersatzmodell als Mehrkörpermodell aus einfachen Geometrien und Komponenten aufgebaut. Zur Vereinfachung wird nicht jeder einzelne Körperteil abgebildet, sondern mehrere Komponenten zu einem einzelnen Körper zusammengefasst. Das Mehrkörpermodell wird somit in die drei Hauptkomponenten Kopf, Brust und Becken eingeteilt und alle weiteren Körperteile wie der Hals, die Arme und Hände bzw. die Beine und Füße werden auf die drei Hauptgrößen verhältnismäßig aufgeteilt. Zur Verdeutlichung ist das vereinfachte Ersatzmodell in Abbildung 22 dem Basismodell gegenübergestellt.

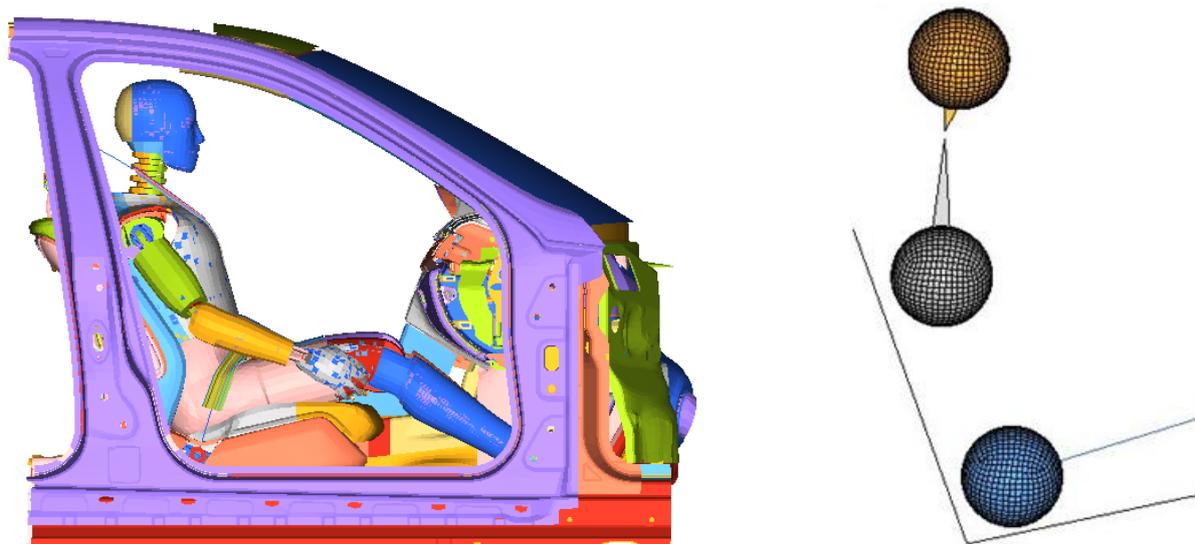


Abbildung 22: Basis & Ersatzmodell für den 50% Mann

Vereinfacht werden die drei Hauptkörper als Kugeln gleicher Radien aber unterschiedlicher Massen abgebildet. Die im Ersatzmodell dargestellten Geraden stellen den Fahrzeugsitz dar, der vereinfacht dünnen Flächen ohne Polster angenommen wird. Zur Abbildung des Halses der als Verbindung zwischen dem Kopf und der Brust wirkt, werden Dreieckselemente dargestellt, die sich um einen gemeinsamen Punkt drehen. Damit das Ersatzmodell nicht zu komplex wird, wird im Gegensatz zu FE Modell auf die Darstellung der einzelnen Halswirbel verzichtet, umso die Anzahl der Freiheitsgrade die für das mathematische Modell nicht relevant sind, einzuschränken. Für die Überlagerung des Ersatzmodells mit dem Basismodell ist die Positionierung der drei Hauptkörper entsprechend dem Basismodell von großer Bedeutung. Nur so ist es möglich jegliche Bewegungen bzw. Verhalten der beiden Modelle aufeinander abzustimmen bzw. entsprechend ähnliche Werte für Output-Größen zu erhalten. Deshalb wird der Schwerpunkt der jeweiligen Komponente Kopf, Brust und Becken des Ersatz Modells an Hand der Position des Beschleunigungssensors aus dem Basismodell positioniert. Die entsprechenden Koordinaten werden aus dem Basismodell abgelesen und auf das Ersatzmodell übertragen. In einem weiteren Schritt kann jeder einzelnen Komponente im Ersatzmodell eine entsprechende Masse zugeteilt werden, die aus Recherchen für den Hybrid III 50% Mann Insassen hervorgehen.

6.2 Modelleigenschaften und Komponenten

Nach der Konstruktion des Modells mittels CAD- Programm, wird das Ersatzmodell im FE Programm mittels Finite Elemente Werkzeugen vernetzt. In einem weiteren Schritt, werden jeder Komponente Materialeigenschaften wie die Dichte oder ein E- Modul zugewiesen. Die Wahl eines geeigneten Materials für die Komponenten erfolgt nach den Anforderungen an das Modell. Die notwendigen Materialkennwerte bzw. Codes sind aus einem bestehenden Manual (LS-DYNA) zu entnehmen. Für die drei Hauptkomponenten Kopf, Brust und Becken, wird hier beispielsweise das MATRIGID gewählt, welches durch seine Biegesteifigkeit bekannt ist. Das heißt, dass der jeweilige Körper bei Belastung von außen keine Verformung erfährt und somit unelastische Eigenschaften aufweist. Diese Vorgabe bewirkt eine Vereinfachung des Ersatzmodells, indem Parameteranpassungen für die Deformation des Körpers vernachlässigt werden können. So wird beispielsweise die Dichte des Körpers, wie hier mit $7.8500E-06$ [kg/mm³] oder das entsprechende E- Modul mit 210.0 [kN/mm²] angegeben. Für das Sitzkissen findet ein Material mit elastischen Eigenschaften Anwendung, dessen Steifigkeit durch Variation des E-Moduls angepasst wird.

Ergänzend zu den Materialeigenschaften die jede einzelne Komponente besitzt, müssen auch Eigenschaften wie Freiheitsgrade festgelegt werden. Damit soll erreicht werden, dass das Modell unter Einfluss einer Beschleunigung ein realitätsnahes Verhalten zeigt bzw. mit dem Basismodell überlagert. Dieses Verhalten kann durch Vorgabe von Randbedingungen bzw. Einschränkungen der Freiheitsgrade erreicht werden. Im Falle des Kopfes wird die translatorische Bewegung in Y- Richtung gesperrt, da hier der Frontalaufprall im Fokus steht und Bewegungen in Y- Richtung vernachlässigt werden. Alle weiteren translatorischen und rotatorischen Bewegungen können vom Modell durchgeführt werden. Damit sollen Bewegungen die bei der Abstimmung der beiden Modelle nicht relevant sind, vermieden bzw. im weiterer Folge die Komplexität des mathematischen Modells minimiert werden. Der Unterschied zwischen den Komponenten des Ersatzmodells, tritt in den Bedingungen für die Freiheitsgrade auf, welche entsprechend der Aufgaben bzw. Anforderungen an die jeweilige Komponente definiert werden.

Damit das Ersatzmodell ein ähnliches Verhalten bzw. Eigenschaften wie das Basismodell aufweist, sind neben der Zuweisung von Materialkennwerten und Freiheitsgraden für die Bewegung, weitere Modell spezifische Eigenschaften notwendig. Eine davon ist die Masse des Modells, die sich aus der Summe aller Massen der Komponenten ergibt.

Die aus Normen erhaltenen Daten über das Gewicht des Insassen bzw. seiner Körperkomponenten sind in der Tabelle 10 zusammengefasst. Die angeführten Gewichtsanteile für die einzelnen Körperteile entsprechen jenen des Hybrid III 50% Mann Modells [12].

Komponente	Gewicht [kg]
Kopf	4,54
Nacken	1,54
Oberer Torso	17,19
Unterer Torso	23,04
Arme und Hände L&R	8,54
Beine und Füße L&R	22,8
Gesamtmasse	77,7

Tabelle 10: Gewichtsverteilung am 50% Mann Dummy [12]

Da das Ersatzmodell aus drei Hauptkomponenten Kopf, Brust und Becken besteht, werden somit alle weiteren Körperteile auf die drei Hauptkörper verhältnismäßig aufgeteilt. Die Aufteilung der Massen aller Komponenten aus der Tabelle 10 auf die drei Hauptkomponenten erfolgt hier schätzungsweise und nach keinen festen Vorgaben.

Mit der Annahme, dass sich die Masse des Nackens, welcher als Verbindung zwischen Kopf und Brust besteht, jeweils zur Hälfte auf die beiden Komponenten aufteilt, ergibt sich ein Gesamtgewicht für den Kopf von 5,3kg. Weiter ergibt sich eine Gesamtmasse für die Brust von 26,5kg, welche als Summe der Masse des oberen Torsos, der Arme und Hände und der Hälfte der Masse des Nackens gebildet wird. Die verbliebenen Komponenten ergeben somit die Masse des Beckens, wobei die Masse der Beine und Füße nicht zu 100% dem Becken zugezählt wird. Mit der Annahme, dass ein Teil des Gewichts der Beine und Füße sich im Fußraum im Auto abstützt, werden nur 70% (0,7) der 22,8kg für das Becken verwendet. Aus diesem Grund ergibt sich für die Gesamtmasse des Ersatzmodells ein anderer Wert im Vergleich zum Basismodell. Da sich diese Werte aus Schätzungen ergeben, kann die Zuteilung der Gewichtsanteile zu den drei Hauptkomponenten möglicherweise alternativ erfolgen.

Welche Gewichtsanteile sich somit für den Kopf, die Brust und das Becken ergeben, ist der Tabelle 11 zu entnehmen.

Komponente	Gewicht [kg]
Kopf	$4,54+1,54/2= 5,3$
Brust	$17,19+8,54+1,54/2= 26,5$
Becken	$23,04+22,8*0,7= 39,0$
Gesamtmasse	70,8

Tabelle 11: Gewichtsverteilung für das 50% Mann Ersatzmodell

Analog zum 50% Mann Ersatzmodell wird auch die Masse für die drei Hauptkomponenten des 5% Frau Modells bestimmt. Die genauen Angaben bzw. Gewichtsanteile jeder einzelnen Körperregion sind aus bekannten Daten [12] entnommen und in der Tabelle 12 zusammengefasst.

Komponente	Gewicht [kg]
Kopf	3,73
Nacken	0,91
Oberer Torso	12,08
Unterer Torso	13,28
Arme und Hände L&R	4,75
Beine und Füße L&R	14,25
Gesamtmasse	49,0

Tabelle 12: Gewichtsverteilung am 5% Frau Dummy [12]

In welchem Verhältnis die restlichen Körperteile auf die drei Hauptkomponenten aufgeteilt werden und wie sich die Gesamtmasse des Ersatzmodells ergibt, ist in der Tabelle 13 zu sehen.

Komponente	Gewicht [kg]
Kopf	$3,73+0,91/2= 4,2$
Brust	$12,08+4,75+0,91/2= 17,3$
Becken	$13,28+14,25*0,7= 27,3$
Gesamtmasse	44,7

Tabelle 13: Gewichtszusammensetzung für das 5% Frau Ersatzmodell

Aus der Tabelle 13 ist ersichtlich, dass die Gewichtsverteilung für das 5% Frau Ersatzmodell analog zum 50% Mann Ersatzmodell durchgeführt wird und auf Grund der Annahme, dass sich ein Teil des Gewichts der Beine und Füße im Fußraum abstützt, entsprechend eine geringere Gesamtmasse für das Ersatzmodell ergibt.

Zusätzlich zu den Eigenschaften wie Material, Freiheitsgrade oder die Masse die jede Komponente für sich hat, sind Beziehungen bzw. Verbindungen zwischen den drei Hauptkörpern notwendig. Damit nicht jede Komponente entsprechend ihrer Freiheitsgrade Bewegungen vollzieht, ohne dabei auf die benachbarten Komponenten einzuwirken, sind Verbindungsglieder zwischen den Körpern notwendig, umso ein realistisches und dem Basismodell ähnliches Bewegungsverhalten des Ersatzsystems zu erreichen.

Eines der unumgänglichen Verbindungsglieder ist der Nacken, der eine Beziehung zwischen dem Kopf und der Brust bildet. Dieser macht eine Relativbewegung des Kopfes zur Brust möglich und wirkt somit als Drehgelenk zwischen den beiden Komponenten. Aus diesem Grund ist es notwendig diese Verbindung auch in das Ersatzmodell zu implementieren, um die Rotationsbewegung des Kopfes im Ersatzmodell nachzustellen. Abweichend vom Basismodell, dessen Nackenkomponente aus mehreren Halswirbeln und somit Gelenken aufgebaut ist, ist im Ersatzmodell nur ein Drehgelenk definiert. Dieses stellt den Drehpunkt für die im Ersatzmodell dargestellten Dreieckselemente dar, welche den Nacken abbilden. Alternativ dazu, könnten mehrere Drehpunkte definiert werden, die die Kinetik des Nackens beeinflussen. Damit wäre die Abbildung des Nackens und die der Bewegungen möglicherweise ähnlicher dem Basismodell, doch die Komplexität des Ersatzmodells würde zunehmen, da für jedes Gelenk eine eigene Kennlinie für die Bewegung definiert werden müsste.

Zur Veranschaulichung des Nackens im Ersatzmodell ist in der Abbildung 23 ein Ausschnitt aus dem Modell dargestellt.



Abbildung 23: Nackenmodell 50% Mann Ersatz Modell

Als Bindeglied zwischen den Dreieckselementen ermöglicht das Drehgelenk nur eine Rotationsbewegung um die Y- Achse des Modells. Somit sollen Bewegungen die für die Abstimmung der Nackenkinetik nicht relevant sind vermieden und so weitere Einflussparameter ausgegrenzt werden. Damit der Kopf entsprechend dem Basismodell realitätsnahe Bewegungen macht, werden dem Drehgelenk Eigenschaften zugewiesen. Durch Vorgabe einer Momenten- Drehwinkelkennlinie im Nackenbereich wird die Rotationsbewegung des Kopfes relativ zur Brust definiert. Als Annäherung für die optimale Momenten- Drehwinkelkennlinie für die Nackensteifigkeit im Ersatzmodell, wird eine Dummy Kalibrierung der Nackendynamik im Frontalcrash, verwendet.

Das zur Annäherung Verwendete Modell [13] für die Nackensteifigkeit ist in der Abbildung 24 dargestellt.

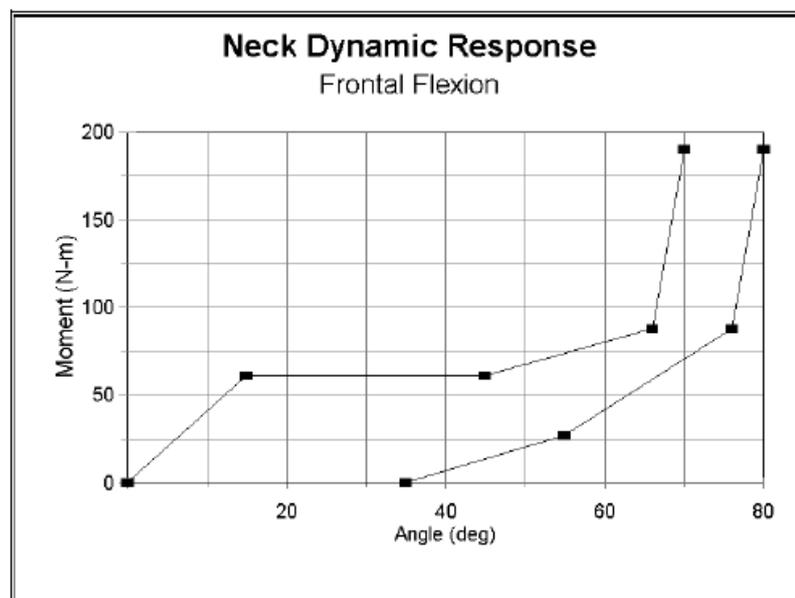


Abbildung 24: Momenten- Drehwinkelkennlinie Thor [13]

Damit bilden das Moment, gemessen am Gelenk am Hinterkopf des Dummys und der Drehwinkel des Kopfes, gemessen relativ zum Thorso, den Bereich für eine Nackenkennlinie. Da es sich um die Charakteristik der Nackendynamik für einen Dummy für den Frontalaufprall handelt, kann der dargestellte Bereich auf das Ersatzmodell übertragen werden. Mit Hilfe des aufgespannten Grenzbereichs durch die Korridore und entsprechender Annäherung, kann ein Steifigkeitsverlauf für den Nacken des Ersatzmodelles angenähert werden.

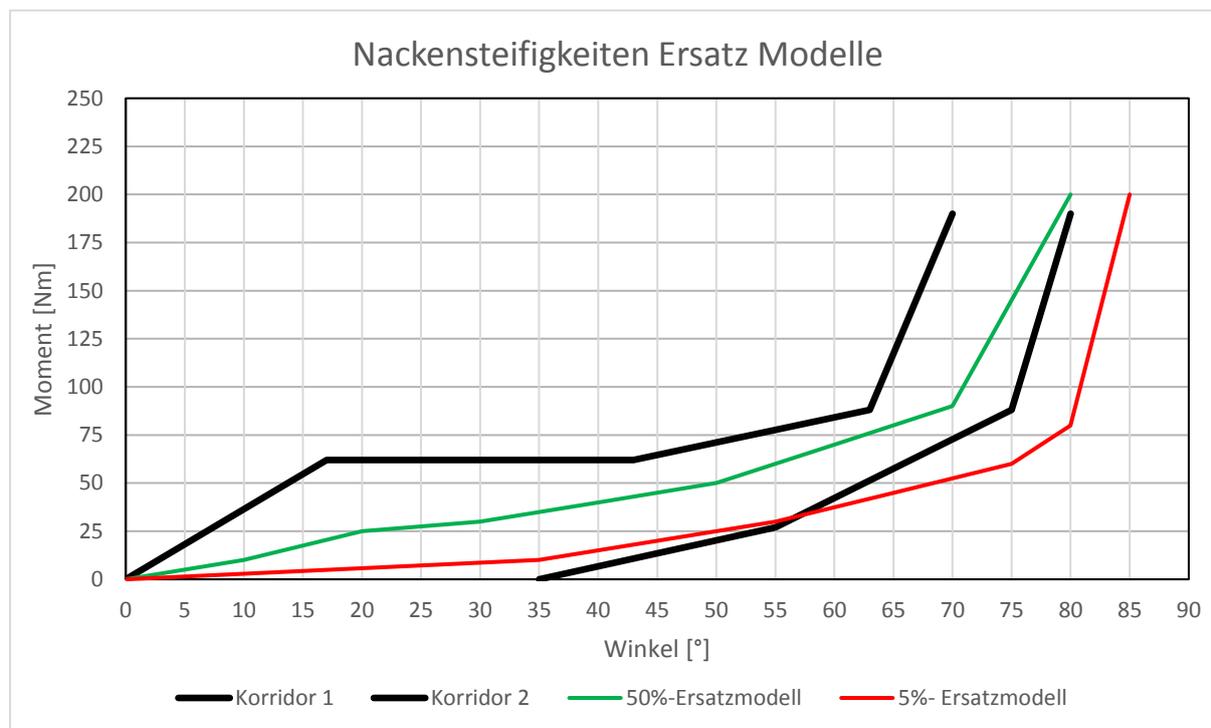


Abbildung 25: Momenten- Drehwinkelkennlinie für 50% Mann & 5% Frau Ersatzmodell

Durch Überlagerung des Ersatzmodells mit dem Basismodell und Vergleich der Trajektorie für den Kopf der beiden Modelle, wird ein Verlauf der Nackensteifigkeit entsprechend der Abbildung 25 für das Ersatzmodell angenähert. Dabei wird eine Kennlinie gewählt, die innerhalb des Korridors verläuft und mit dem Basismodell bestmöglich übereinstimmt. Zur Annäherung werden für beide Ersatzmodelle die definierten Korridore als Anhaltspunkt verwendet. Die hier definierten Kennlinien für die Nackensteifigkeit der beiden Ersatzmodelle, zeigen die Belastungsphase auf den Nacken im Frontalcrash. Ein Vergleich der Momenten-Winkelkennlinie der Ersatzmodelle zeigt, dass sich der gewählte Steifigkeitsverlauf für das 5% Frau Nackenmodell außerhalb der definierten Korridore befindet. Diese Abweichung ist auf die Abstimmung des 5% Frau Ersatzmodells mit dem Basismodell rückzuschließen, da eine Überlagerung und somit ein ähnliches Bewegungsverhalten der beiden Modelle im Vordergrund stehen und nicht die Biofidelität des Ersatzmodells.

Zusätzlich zur Beziehung zwischen dem Kopf und der Brust, welche durch ein Drehgelenk realisiert wurde, ist eine Verbindung zwischen der Brust und dem Becken ebenfalls notwendig. Einfachheit halber wird angenommen, dass diese Verbindung starr ist und somit Relativbewegungen zwischen der Brust und dem Becken, welche im FE Modell durch die

Lendenwirbel gegeben ist, ausgeschlossen werden. Analog zum Nackengelenk können dadurch zusätzliche Kennlinien, die eine Beziehung zwischen den Komponenten darstellen vernachlässigt werden und somit der Aufwand bei der Abstimmung mit dem Basismodell minimiert werden. Die Beziehung zwischen der Brust und dem Becken wird mittels einer Bedingung (CONSTRAINED_RIGID_BODY) im Modell realisiert. Diese Beziehung stellt somit die im realen Modell bestehende Wirbelsäule als Verbindung zwischen der Brust und dem Becken dar. Mit Hilfe der definierten Bedingungen, besteht nun eine Beziehung zwischen den drei Hauptkomponenten des Ersatz Modells.

6.3 Vereinfachte Darstellung von Fahrzeugkomponenten

Wie auch im Basis FE Modell, wo der Insasse mit dem Fahrzeug und dessen Innenraum eine Einheit bildet, ist auch im Ersatzmodell die Abbildung von Fahrzeugkomponenten notwendig. Somit werden Komponenten wie der Sitz, der Gurt, der Airbag oder auch das Instrumentenpanel analog zum FE Modell dargestellt und die entsprechende Beziehung zwischen dem Insassen und den Fahrzeuginnenraum.

6.3.1 Fahrzeuginnenraum

Wie auch im Basis FE Modell, wo der Insasse auf dem Sitz mittels Gurt mit dem Fahrzeug verbunden ist, ist die Darstellung der Sitzkomponente im Ersatzmodell ebenfalls notwendig. Der Autositz stellt nicht nur eine Verbindung zwischen dem Insassen und dem Fahrzeug dar, sondern hat auch Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Insassen bei der Vorverlagerung im Crash.

Die Abbildung 26 zeigt die im Ersatzmodell vereinfacht dargestellte Sitzkomponente.

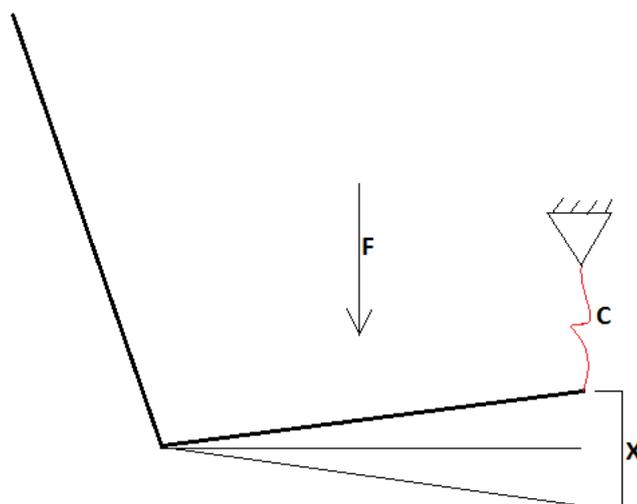


Abbildung 26: Sitzkomponente im Ersatzmodell

Der im Ersatzmodell integrierte Sitz besteht aus zwei dünnen Platten, die durch ein Drehgelenk miteinander verbunden sind. Vereinfacht wird angenommen, dass die Sitzlehne starr und in allen Freiheitsgraden gesperrt ist. Da die Sitzlehne an der Insassenbewegung keinen Einfluss hat, kann die Bewegung der Sitzlehne im Ersatzmodell vernachlässigt werden. Analog zur Sitzlehne, weist das Sitzkissen einerseits ein starres Verhalten auf, andererseits ist eine Rotation um die Y-Achse, verlaufend in die Bildfläche, möglich ist. Die Rotation um Y soll somit den Effekt des Eindrückens des Sitzkissens durch die Insassenbelastung beim Vorverlagern abbilden. Die dabei aufgebrachte Kraft entspricht der Masse und Beschleunigung des Insassen und ist in der Abbildung 26 mit „F“ gekennzeichnet. Die vom Insassen induzierte Kraft wirkt der Steifigkeit „C“ des Sitzes entgegen. Damit eine Steifigkeit des Sitzes im Ersatzmodell eingestellt werden kann, wird eine Federkomponente (ELEMENT_DISCRETE) am vorderen Ende des Sitzes platziert, die eine entsprechende Charakteristik aufweist. Mit Hilfe des Weges „X“ den das Sitzkissen bei Belastung verfährt und einer entsprechenden Kraft, kann eine bestimmte Steifigkeit des Sitzes eingestellt werden.

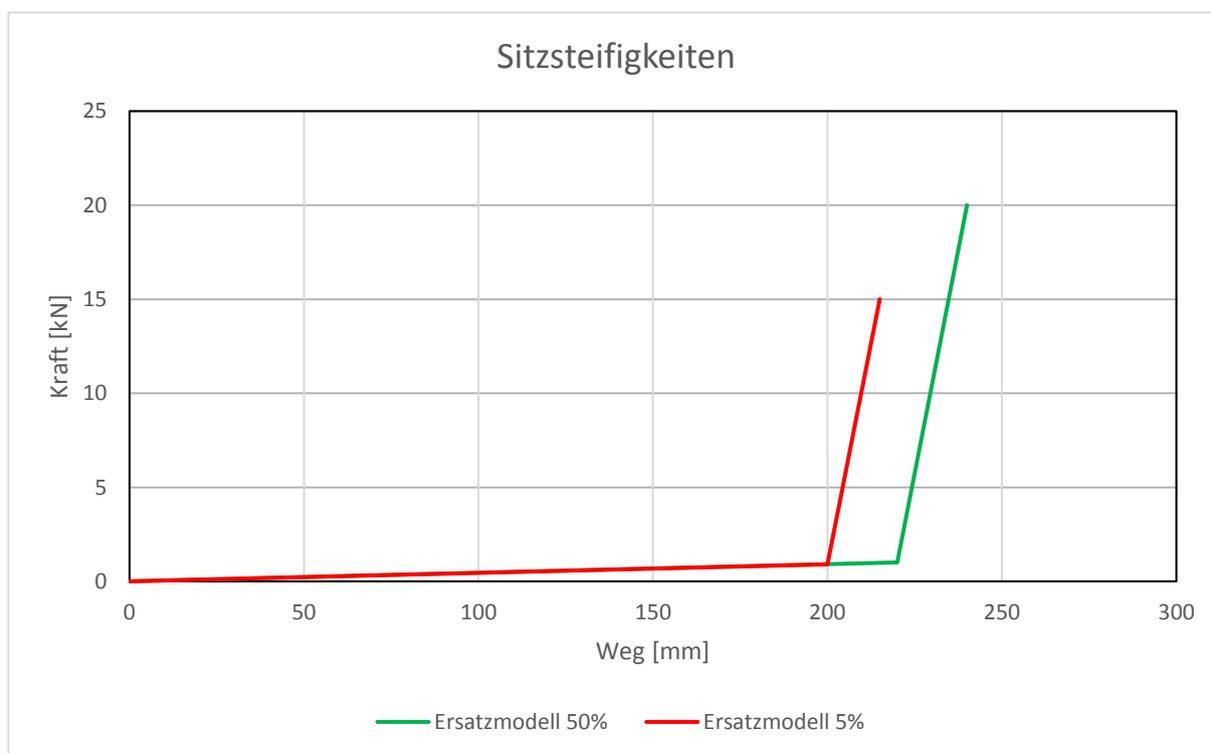


Abbildung 27: Sitzsteifigkeit für das 50% Mann & 5% Frau Ersatzmodell

Die in der Abbildung 27 dargestellten Verläufe für die Sitzsteifigkeit, weisen eine bilineare Charakteristik auf, mit der eine Annäherung des Bewegungsverhaltes des Ersatzmodells an das FE-Modell möglich ist. Der gezeigte Kurvenverlauf wird aus einem Abgleich des Ersatzmodells mit dem Basismodell ermittelt. Dabei werden durch Messung der Wegkomponente für die Sitzeindrückung im Basis FE Modell und Abschätzung der Kraft, Kraft-Weg Kurven für das Sitzkissen im Ersatzmodell entsprechend der Abbildung 27 abgeleitet.

Der Unterschied in der Kraft- Wegcharakteristik für den Sitz der beiden Ersatzmodelle, ergibt sich aus der unterschiedlichen Masse der beiden Insassen. Bei gleicher Kraft- Wegcharakteristik für beide Ersatzmodelle, erfährt die deutlich leichtere 5% Frau eine größere Gegenkraft der Sitzkomponente, die zum Abheben des Beckens vom Sitz führt. Dieser Effekt bewirkt wiederum, dass das Bewegungsverhalten des Ersatzmodells mit dem Basismodell nicht übereinstimmt. Aus diesem Grund, ergibt sich für die 5% Frau ein niedrigeres Kraftniveau bei einer geringeren Sitzeindrückung, im Vergleich zum 50% Mann.

Wie bereits erwähnt, kommt es beim Frontal Crash zu einer Vorverlagerung des Insassen, die in der Regel zum Kontakt zwischen dem Insassen und dem Fahrzeuginnenraum führt. Dabei kommt es beispielsweise zum Zusammenstoß der Knie des Insassen mit dem Instrumentenpanel des KFZ. Die dabei entstehenden Belastungen können zu Verletzungen der Beine des Insassen führen und haben auch Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Insassen.

Um eine Überlagerung des Ersatzmodells mit dem FE- Insassen Modell zu ermöglichen, ist eine Abbildung dieser Belastung seitens des Fahrzeuginnenraums im Ersatzmodell notwendig. Realisiert wird der Kontakt des Insassen mit dem IP (Instrumentenpanel) und die daraus resultierende Kraft mit Hilfe einer Druckfeder zwischen dem Becken des Ersatzmodells und einem räumlich fixierten Knoten, der das IP darstellt. Dieser entspricht der Position der Kontaktstelle des Knies mit dem IP im FE Modell. Im Gegensatz zum FE Modell bei dem die Kontaktkraft auf zwei Beine aufgeteilt wird, wirkt im Ersatzmodell nur eine punktuelle Kraft auf den Schwerpunkt des Beckens. Die Art und Weise der Realisierung der Kniekraft im Ersatzmodell ist in der Abbildung 28 dargestellt.

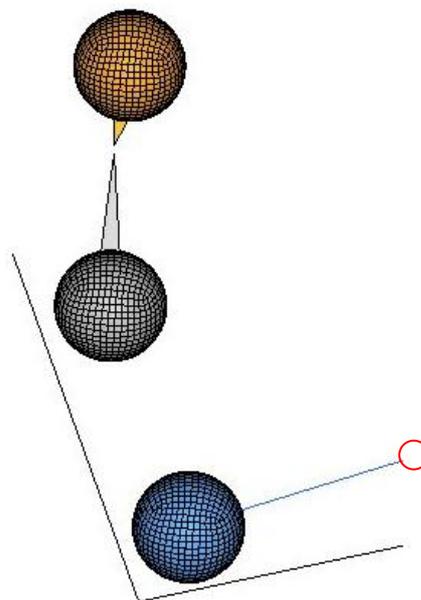


Abbildung 28: Knie- IP- Kontakt Ersatzmodell

Die in der Abbildung 28 blau eingezeichnete Linie stellt die Druckfeder dar. Mit Hilfe einer vorgegebenen Kraft- Weg Charakteristik für die Feder, soll die Belastung, hervorgerufen durch den Kontakt des Insassen mit dem Fahrzeuginnenraum auf das Ersatzmodell übertragen werden. Mit Hilfe von Simulationsergebnissen aus dem FE Insassenmodell kann eine vergleichbare Kraft- Weg Charakteristik abgeleitet und ins Ersatzmodell implementiert werden. Der Verlauf der Belastungsfunktion für die beiden Ersatzmodelle ist in der Abbildung 29 zu sehen.

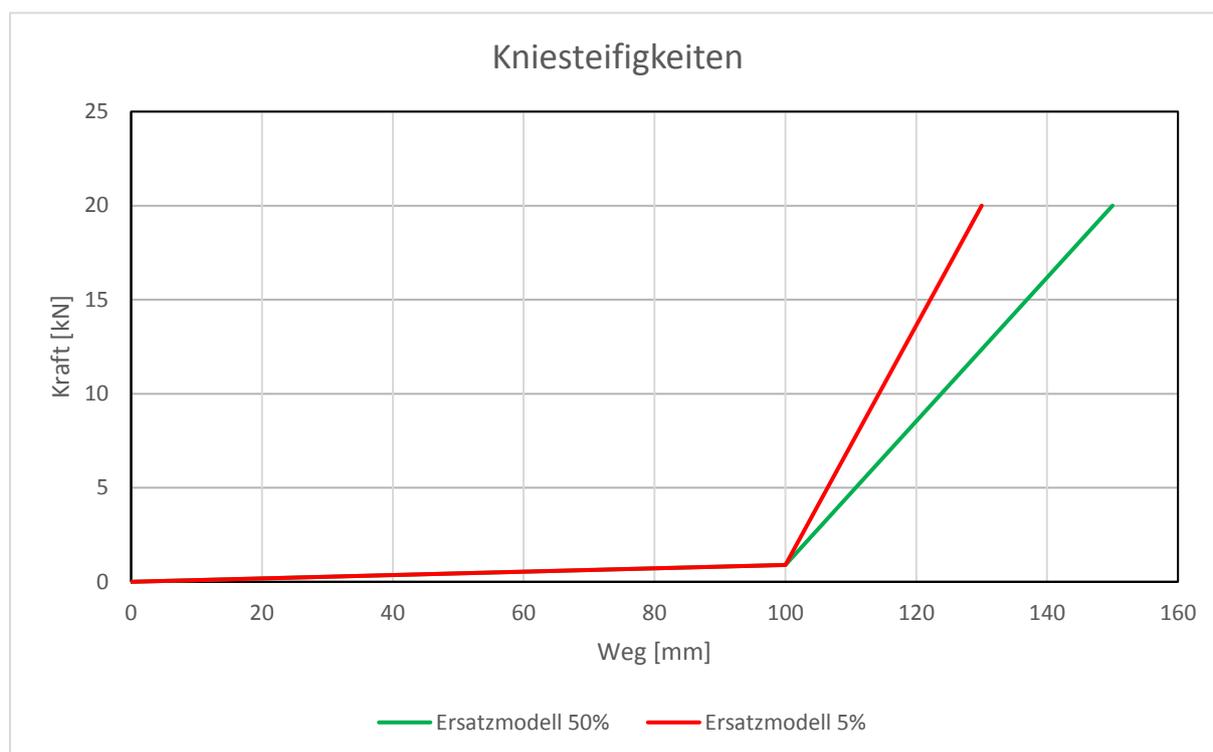


Abbildung 29: Kniesteifigkeitscharakteristik für das 50% Mann & 5% Frau Ersatzmodell

Analog zur Funktion für die Sitzsteifigkeit in Abbildung 27 wird ebenfalls für die Kraft- Weg Kurve der Kniesteifigkeit eine bilineare Funktion gewählt. Auf Grund der Beschaffenheit des Sitzes, die von Fahrzeug zu Fahrzeug verschieden ist, entsteht zwischen dem Insassen und dem Sitz eine Kraft, hervorgerufen durch Reibung. Diese ist abhängig vom Gewicht des Insassen größer bzw. kleiner und hat einen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Insassen. In der Anfangsphase der Vorverlagerung während eines Unfalls wirkt nur die Reibungskraft entgegen der Fortbewegungsrichtung des Insassen und bewirkt eine Rückhaltung des Insassen vor dem Kontakt mit dem Airbag bzw. dem Fahrzeuginnenraum. Erst nach einem bestimmten Weg, den der Insasse zurücklegt, kommt es zum Kontakt der Knie mit dem IP und zur zusätzlichen Rückhaltung des Beckens.

Betrachtet man die gewählte Kraft- Weg Kurve für die beiden Ersatzmodelle, so kann man erkennen, dass die Funktion im Bereich von 0-100mm Weg nur eine minimale Steigung hat. Dies entspricht jenem Weg, wo der Insasse noch keinen Kontakt zum IP hat und nur die Reibung des Sitzes rückhaltend wirkt. Da im Ersatzmodell die Reibung zwischen der Sitzoberfläche und dem Insassen nicht direkt berücksichtigt werden kann, wird sie als minimale Kraft in der Feder kompensiert. Damit soll erreicht werden, dass die Bewegung bis zum Kontakt mit dem IP, mit jener des FE Insassenmodells übereinstimmt. Der weitere Verlauf der Kraft- Weg Kurve für die Ersatzmodelle nimmt eine höhere Steigung an und beschreibt jenen Bereich, wo der Insasse Kontakt zum IP hat und somit hohe Kräfte auftreten. Die Abweichung der Kraft- Wegcharakteristik der beiden Ersatzmodelle, kann auf die unterschiedliche Sitzposition der Insassen rückgeführt werden. Die näher am IP sitzende 5% Frau legt bei der Vorverlagerung einen kürzeren Weg bei gleichem Kraftniveau zurück, im Vergleich zum 50% Mann, dessen Abstand zum IP größer ist.

6.3.2 Gurtkomponente

Damit der Kontakt des Insassen mit dem Fahrzeuginnenraum vermieden bzw. die Belastungen die bei einem Kontakt entstehen minimiert werden, bietet der Gurt und der Airbag dem Insassen Rückhaltung und beeinflusst somit sein Bewegungsverhalten beim Verlagern. Da im FE- Insassenmodell ebenfalls diese Rückhaltekomponenten integriert sind, ist eine Adaption des Ersatzmodells an das Basismodell diesbezüglich notwendig. Die Einführung der Gurtkraft im Ersatzsystem erfolgt mittels einer Belastungskurve. Damit die definierte Kraft auf den Insassen als gerichtete Gurtkraft einwirken kann, ist eine Vorgabe der Krafrichtung erforderlich.

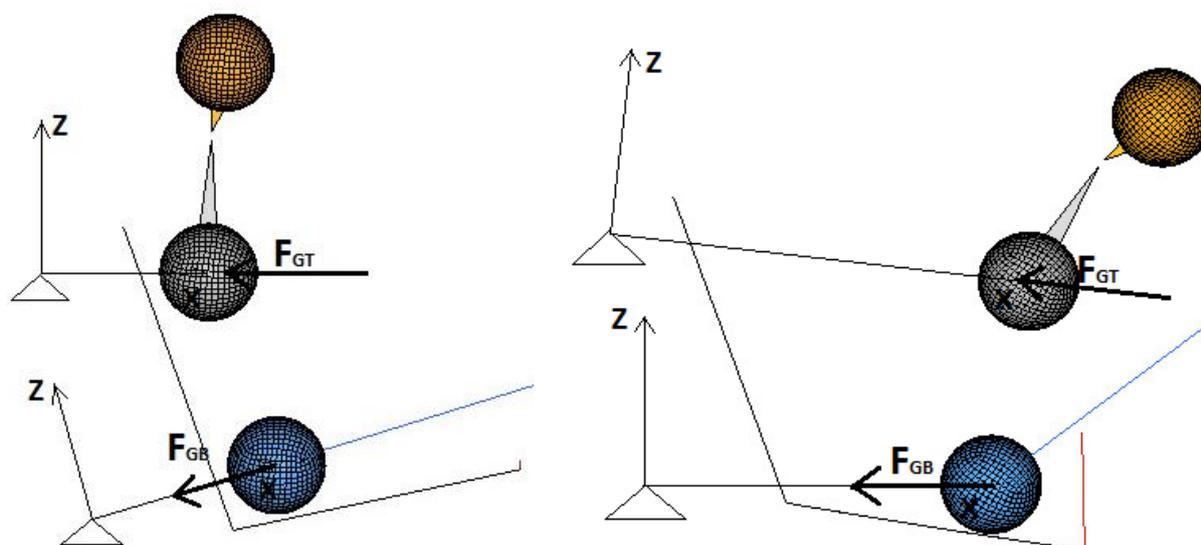


Abbildung 30: Brust- & Beckengurtkraft im Ersatzmodell

Die Richtung der Schulter- bzw. Beckengurtkraft wird wie in Abbildung 30 durch einen Kraftvektor definiert. Dabei wird ein Knoten im Raum gewählt, der örtlich fixiert ist und als Koordinatenursprung des dargestellten lokalen Koordinatensystems fungiert. Die Position des fixierten Knoten entspricht der Position des Endbeschlags für den Gurt im Basismodell. Besonders wichtig ist die Vorgabe der Krafrichtung für die Vorverlagerung des Insassen, da die Gurtkräfte Einfluss auf die Als Belastungskurve für die Gurtkräfte im Ersatzmodell wird eine Kraft- Wegcharakteristik gewählt, da die notwendige Kraft für die Rückhaltung entsprechend dem Vorverlagerungsweg bereitgestellt werden soll. Aus diesem Grund, wird zur Abschätzung der Gurtkraft über dem Weg eine aus dem Basismodell bekannte Kraft- Weg Charakteristik herangezogen die in der Abbildung 31 dargestellt ist.

Der in der Abbildung graphisch dargestellte Verlauf zeigt die Kraft- Weg Kurve aus dem Retraktor des FE Modells für das Hybrid III 50% Mann Modell. Ausgehend von dieser Kurve die sich aus der Gurtkraft und dem Auszugsweg des Gurtes bei der Vorverlagerung ergibt, wird durch Filter von Datenpunkten aus dem FE Modell eine Kraft- Weg Kurve für das Ersatzmodell abgeleitet.

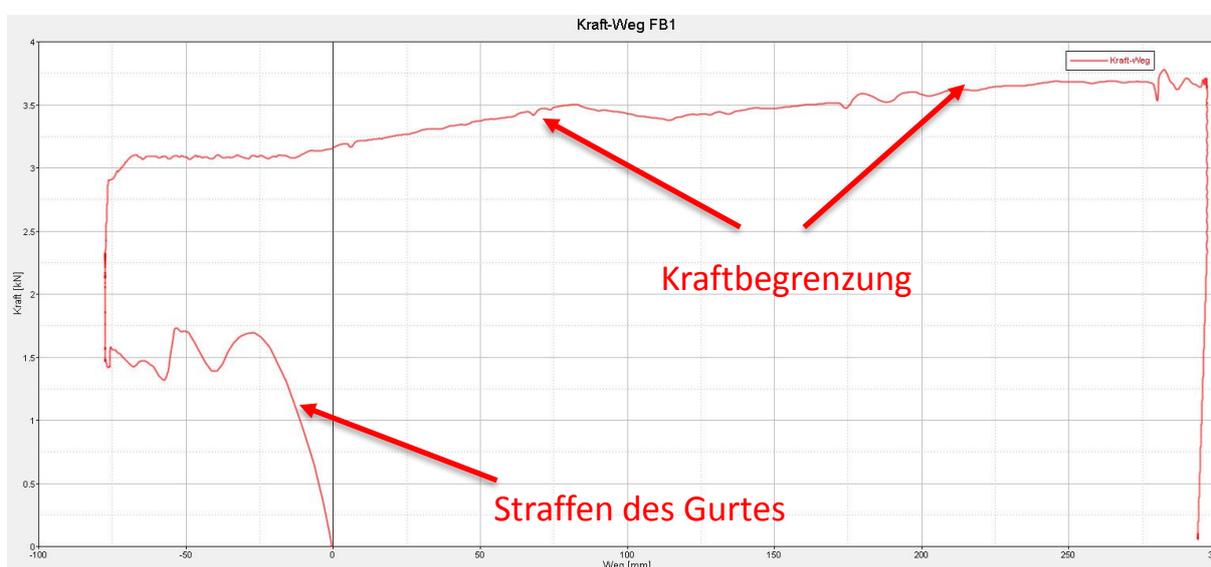


Abbildung 31: Kraft- Weg- Charakteristik des Retraktors im Hybrid III 50% Mann Basismodell

Der im Bereich 0-(-100mm) dargestellte Verlauf der Kraft- Weg Kurve zeigt die Phase der Straffung des Gurtbandes. Dadurch solle die Gurtlose minimiert und eine Rückhaltung des Insassen durch den Gurt so früh wie möglich stattfinden. Auf die Darstellung des Straffvorgangs im Ersatzmodell wird verzichtet, da dieser in der Startphase keinen Einfluss auf die Bewegung des Insassen hat und die Gurtlose im Ersatzmodell auch nicht vorhanden ist.

Das Ziel bei der Verwirklichung der Gurtkräfte im Ersatzmodell ist, die Rückführung aller Gurtkräfte auf die vom Retraktor bekannte Kraft FB_1 und den entsprechenden Gurtbandauszug, wie sie in der Abbildung 31 dargestellt sind. Zur Darstellung der Gurtkräfte die am Insassen wirken, werden diese in Gurtkraftkomponenten auf die einzelnen Bereiche des menschlichen Körpers aufgeteilt. Zur allgemeinen Erklärung sind die vorhandenen Kräfte an einem 3-Punkt- Gurt im Fahrzeug in der Abbildung 32 dargestellt.

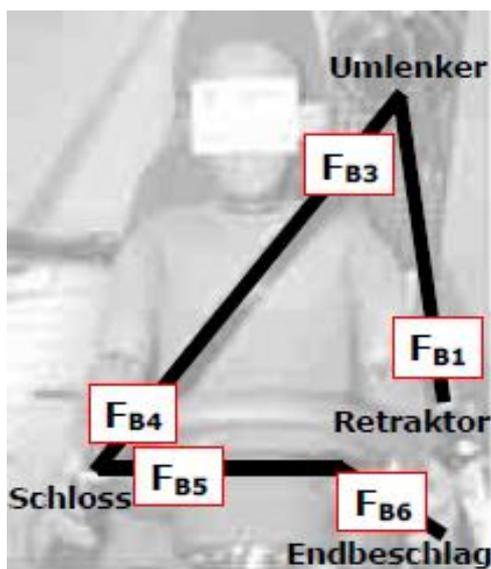


Abbildung 32: Gurtkraftkomponenten 3-Punkt-Gurt [18]

Aus der Abbildung 32 ist zu entnehmen, dass die vom Retraktor vorgegebene Kraft auf die Brust und das Becken verhältnismäßig aufgeteilt wird. Die dabei entstehenden Teilkräfte FB_1 - FB_6 stellen sich auf Grund von Umlenkung der Kraft im Umlenker als auch im Schloss bzw. durch Reibung an Bauteilen und am Insassen ein und haben ein entsprechendes Kraftniveau. Die Gesamtsumme aller Teilkräfte muss trotzdem der Kraft FB_1 des Straffers gleich sein. Damit nun eine geeignete Kraft- Weg Charakteristik für die Gurtkraft am Ersatzmodell ermittelt werden kann, wird ein vereinfachtes Modell des Insassen verwendet.

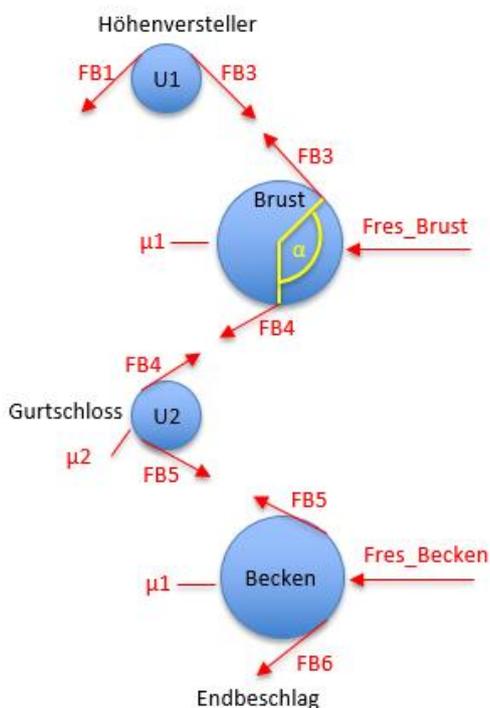


Abbildung 33: Vereinfachtes Insassen- Gurt- Modell des Ersatzmodells

Das vereinfachte Modell in der Abbildung 33 stellt den Insassen mit den dazugehörigen Gurtkomponenten dar. Hier werden neben den Umlenkpunkten U1&U2 die sich jeweils am Fahrzeug befinden, ebenfalls die Brust und das Becken als Umlenkrollen betrachtet. Die Annahme, dass sich der Gurt beim Ausziehen bzw. Straffen am Körper abwälzt, ermöglicht den Gebrauch eines Ansatzes aus der Statik, zur Berechnung von Seil Kräften an der Umlenkrolle.

Dieser Ansatz ergibt sich aus der Eytelwein- Gleichung [14] die wie folgt lautet:

$$F_2 = F_1 * e^{\mu * \alpha}$$

Formel 10: Eytelwein- Gleichung zur Berechnung von Seilkräften

Dabei beschreibt μ den Reibungskoeffizienten zwischen der Rolle und dem Seil bzw. Insassen und dem Gurt und α den Umschlingungswinkel des Gurtes um die jeweilige Umlenkung. Ausgehend von der bekannten Kraft- Weg Kurve für den Retraktor und somit bekannten Kraft F_{B1} , kann mit Hilfe der Eytelwein- Gleichung jede einzelne Kraftkomponente mit dem dazugehörigen Umschlingungswinkel und Reibung am Gurt berechnet werden. Die notwendigen Reibungskoeffizienten werden bei der Ermittlung der Gurtkräfte angepasst bzw. frei gewählt.

$$\mu_1 \dots\dots 0,2$$

$$\mu_2 \dots\dots 0,05$$

Die unterschiedlichen Reibungskoeffizienten resultieren aus Annahmen für die Materialeigenschaften für das Gurtschloss bzw. die Beschaffenheit der Kleidung des Insassen im Brustbereich. Dabei wird angenommen, dass die Kleidung eine höhere Reibung am Gurt verursacht als der Umschlingungsbereich des Gurtschlusses der aus Kunststoff gefertigt ist. Da für die Berechnung der Gurtkraftkomponenten der Umschlingungswinkel benötigt wird, wird dieser durch Messungen im Basismodell ermittelt. Ausgehend von der Ausgangsposition des Insassen verändert sich der Gurtwinkel mit der Vorverlagerung des Insassen und muss daher für willkürlich gewählte Positionen am Gurtband gemessen werden. Dabei werden Gurtbandwinkel zwischen den Kraftkomponenten F_{B3} & F_{B4} für die Brust, als auch zwischen den Kraftkomponenten F_{B5} & F_{B6} für das Becken gemessen. Durch Verlängerung der Gurtbandrichtung aus dem Höhenversteller als auch im Gurtschloss kann der Brustgurtwinkel im Schnittpunkt der Krafrichtungsvektoren gemessen werden. Analog dazu wird für die Bestimmung des Beckengurtwinkels, die Gurtbandrichtung im Gurtschloss als auch im Endbeschlag verlängert und der eingeschlossene Winkel im Schnittpunkt ermittelt.

Die notwendigen Daten ergeben sich aus der Simulation mit dem FE Modell und beinhalten auf Grund der willkürlich gewählten Messpositionen Abweichungen vom realen Modell.

Die Vorgangsweise bei der Messung des Gurtwinkels = Umschlingungswinkels für die Brust bzw. das Becken, ist in den folgenden Abbildungen ersichtlich.

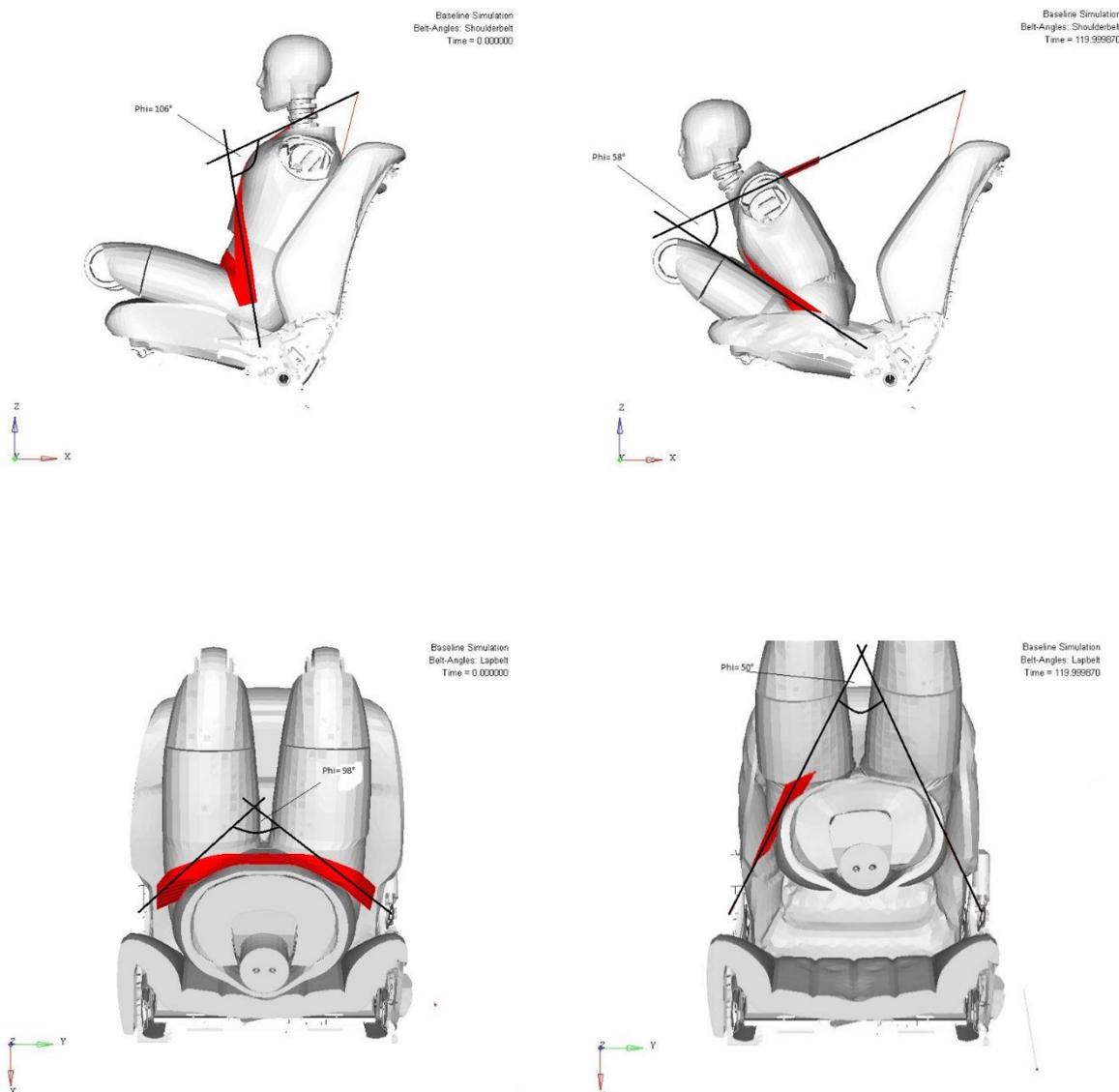
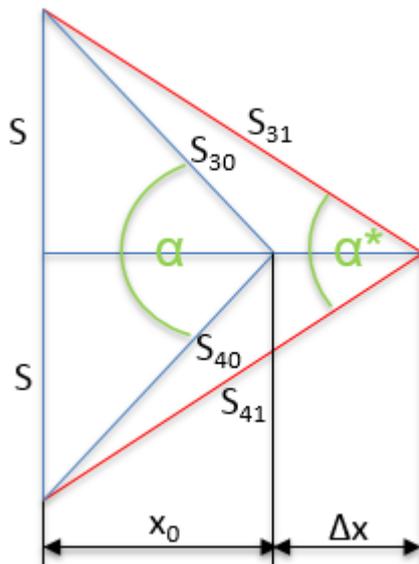


Abbildung 34: Schultergurt- Beckengurtwinkel

Die Abbildung 34 zeigt, dass der Gurtwinkel mit der Zeit und dem Vorverlagerungsweg abnimmt und sich das Gurtkraftniveau dementsprechend ändert. Um eine Aussage über den Zusammenhang zwischen der Gurtkraft und dem Vorverlagerungsweg machen zu können, soll unter Ausnützung der Trigonometrie die Änderung der Sitzposition des Insassen und die damit verbundene Kraft Ab- bzw. Zunahme in Relation gebracht werden. Der Zusammenhang der sich daraus ergibt, ist graphisch in der Abbildung 35 dargestellt.



x_0 ... Ausgangsposition (Sitzposition)
 Δx ... Vorverlagerungsweg
 S_{31}, S_{41} ... Brustgurtlänge nach Vorverlagerung
 S_{30}, S_{40} ... Brustgurtlänge vor Vorverlagerung
 $2S$... Länge zwischen Höhenversteller
 und Gurtschloss

Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Weg und Gurtkraft

Dieser Zusammenhang wird an Hand der Brust und der dazugehörigen Gurtkraftkomponenten rechnerisch gezeigt. Die Vorgehensweise für das Becken ist somit analog zur Brust und wird somit nicht näher beschrieben.

$$1.) \cos \frac{\alpha^*}{2} = \frac{x_0 + \Delta x}{S_{31}}$$

$$2.) x_0 = \cos \frac{\alpha}{2} * S_{30}$$

$$3.) S_{31} = \sqrt{S^2 + (x_0 + \Delta x)^2}$$

$$4.) S_{41} = \sqrt{S^2 + (x_0 + \Delta x)^2}$$

Formel 11: Zusammenhang zwischen Gurtweg und Kraft

Einfachheit halber wird die Schultergurtlänge $S_{30} + S_{40}$ aus dem FE- Modell gemessen und als bekannt angenommen. Die Gesamtschultergurtlänge nach der Vorverlagerung ergibt sich somit als Summe der Teillängen $S_{31} + S_{41}$, ebenso wie die Gesamtbeckengurtlänge als Summe der Teillängen $S_{51} + S_{61}$. Die dabei ermittelte Gurtbandlänge als Summe aller Teillängen für Brust und Becken, weicht umso stärker von der Realität ab, je weiter der Insasse sich vorverlagert, da der Fehler auf Grund der Annahmen immer größer wird. Durch Anpassung des Kraftniveaus soll die Abweichung der Gurtbandlänge kompensiert werden, umso das Bewegungsverhalten des Ersatzmodells an das Basismodell anzupassen.

Da im realen Modell die Brust und das Becken beim Vorverlagern verschiedene Wege zurücklegen aber nur ein Gurt dabei ausgezogen wird, muss auch hier ein Zusammenhang hergestellt werden. Als Anhaltspunkt werden Ergebnisse aus der Simulation des realen Modells verwendet, wo jeweils der Brust- bzw. Becken Weg für das Hybrid III 5% Frau bzw. das Hybrid III 50% Mann Modell gegenübergestellt werden.

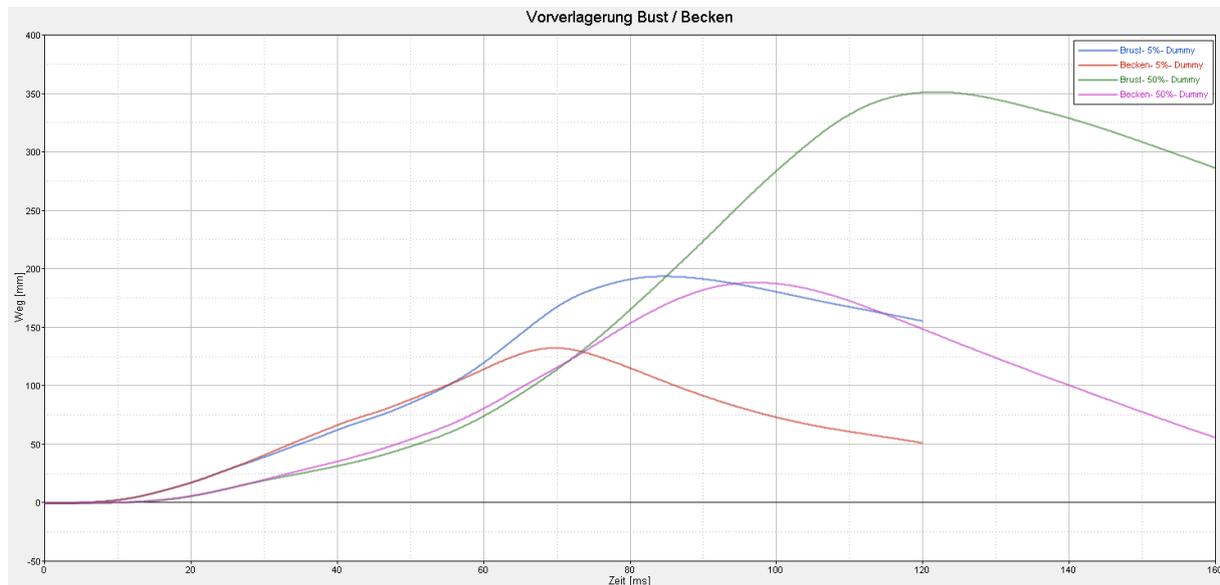


Abbildung 36: Verhältnis Vorverlagerungsweg Brust zu Becken Basismodell

Vergleicht man die Kurven der beiden Komponenten miteinander, so kann man erkennen, dass die Brust im Vergleich zum Becken fast den doppelten Weg zurücklegt und deshalb am Gurtauszug den größeren Anteil hat.

Annahme:

$$X_{\text{Brust}} = 2.0 * X_{\text{Becken}}$$

Formel 12: Zusammenhang zwischen Brust- und Beckenweg

Nachdem nun ein Zusammenhang zwischen den Gurtkraftkomponenten und dem Weg bekannt ist, gilt es die Kraft- Weg Charakteristik in das Ersatzmodell zu implementieren. Dazu wird eine resultierende Kraft für die Brust also auch für das Becken aus den jeweiligen Gurtkraftkomponenten für FB_3 & FB_4 bzw. FB_5 & FB_6 gebildet. Die resultierende Kraftkomponente und der dazugehörige Vorverlagerungsweg bilden eine Belastungskurve für das Ersatzmodell. Zur Veranschaulichung ist die resultierende Kraft für die Brust und das Becken in der Abbildung 37 graphisch dargestellt.

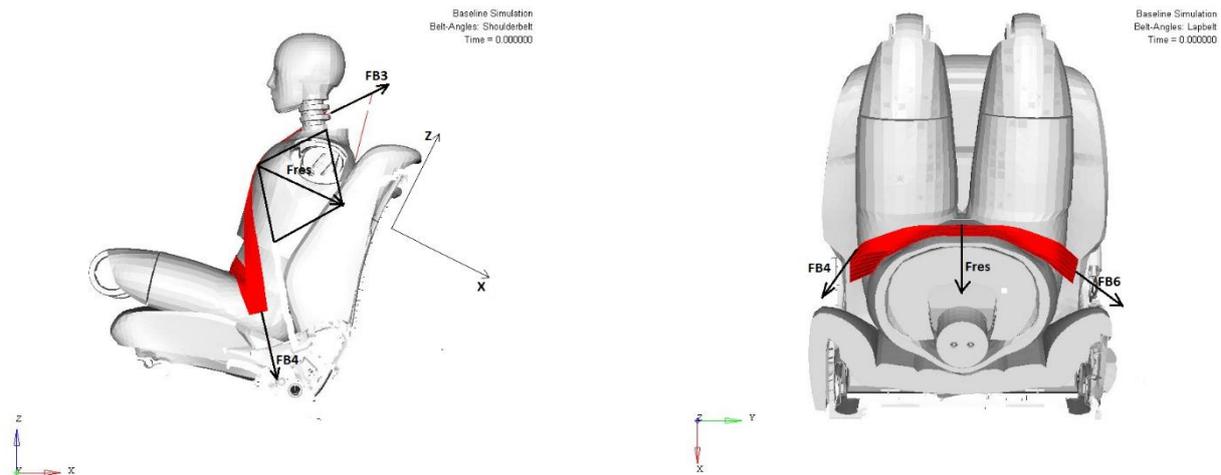


Abbildung 37: Resultierende Gurtkraft auf Brust und Becken am Basismodell

Für die Bildung der resultierenden Kraftkomponente für Brust und Becken wird ein mathematischer Zusammenhang als Hilfestellung verwendet und ist folgendermaßen definiert.

$$F_{res} = \sqrt{F_{B3}^2 + F_{B4}^2 - 2 \cdot F_{B3} \cdot F_{B4} \cdot \cos(\pi - \alpha)}$$

Formel 13: Cosinus Satz zur Berechnung der resultierenden Gurtkraft

Unter Ausnützung des Cosinus- Satz kann hier aus den einzelnen Gurtkraftkomponenten eine resultierende Kraft auf Brust und Becken rechnerisch ermittelt werden. Somit ergibt sich ebenfalls eine Größe in Abhängigkeit vom Weg, die als Belastungskurve für das Ersatzmodell verwendet werden kann. Zur Veranschaulichung des Verlaufs der resultierenden Kraft, sind die Kraft- Weg Kennlinien für Brust und Becken jeweils für das 5% Frau und 50% Mann Ersatzmodell graphisch in der Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellt.

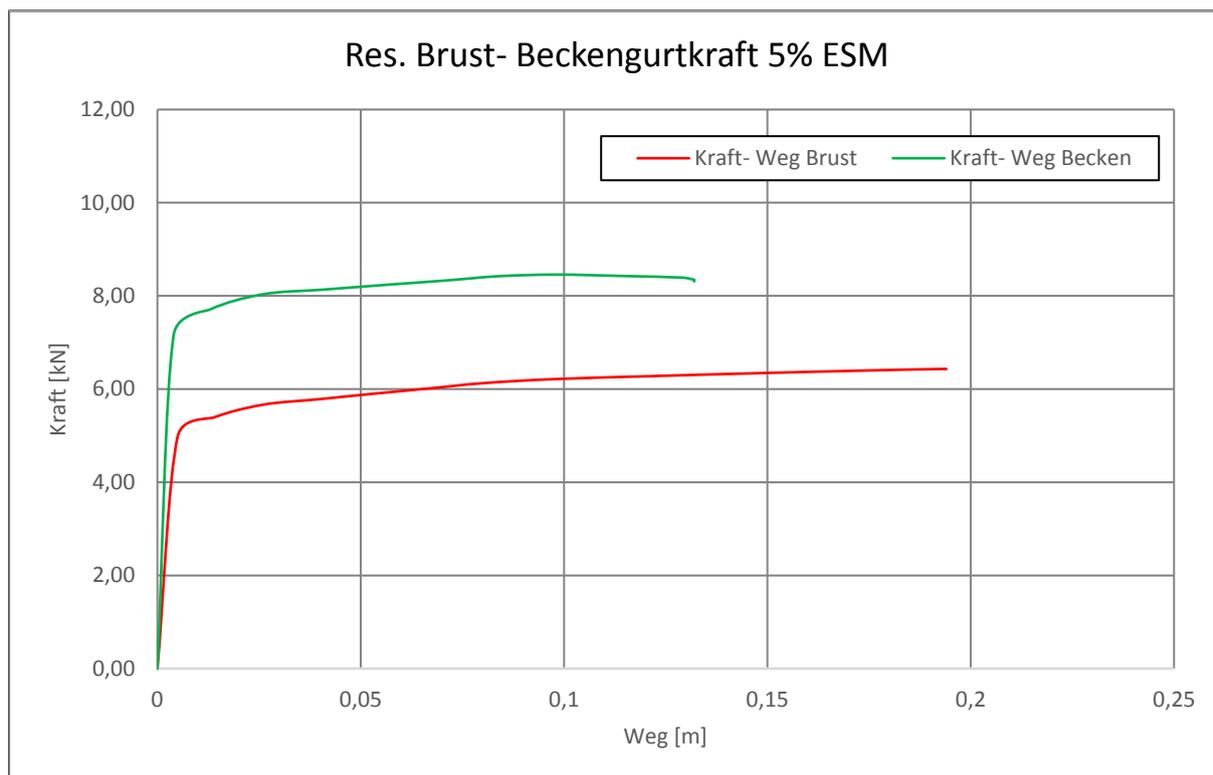


Abbildung 39: Resultierende Brust- Beckengurtkraft für das 5% Frau Ersatzmodell

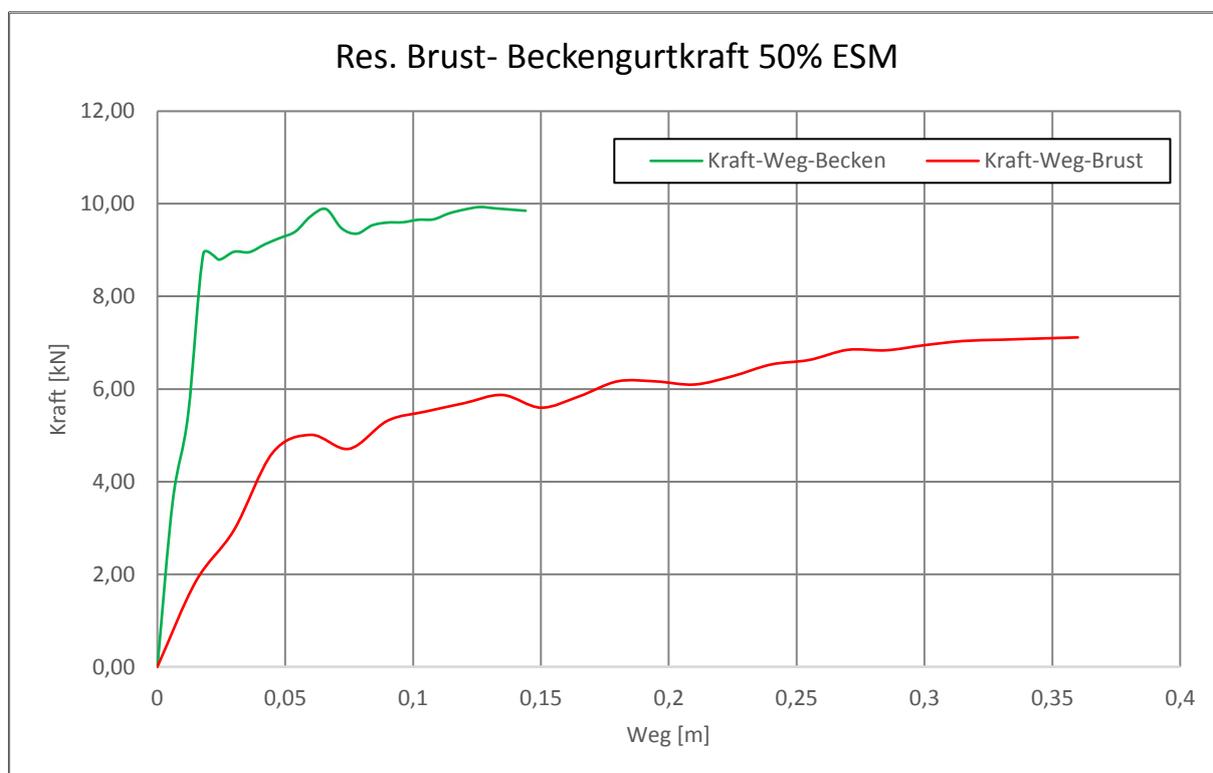


Abbildung 38: Resultierende Brust- Beckengurtkraft für das 50% Mann Ersatzmodell

6.3.3 Airbagkomponente

Analog zum Gurt, der dem Insassen Rückhaltung bietet und dessen Bewegung beim Crash beeinflusst, spielt auch die Airbagperformance bei der Vorverlagerung des Insassen eine wesentliche Rolle. Entsprechend dem Basismodell, dass Rückhaltung durch Gurt und Airbag erfolgt, muss auch im Ersatzmodell der Airbag dargestellt werden.

Das Ziel besteht darin, einen Airbag- Innendruck Verlauf abzuleiten der vom Weg und der Zeit abhängig ist, um in weiterer Folge eine Kraft zu generieren. Als Anhaltspunkt für die Abschätzung der Druckkurve im Ersatzmodell werden Ergebnisse aus dem Basismodell verwendet. Dabei werden definierte Werte für den Druck bzw. das Volumen aus dem Basismodell als Startwerte herangezogen, um eine Berechnung der Druckkennlinie für das Ersatzmodell zu ermöglichen. Vereinfacht wird der Airbag im Basismodell als thermodynamisches System angenommen.

Bei der Lösung der Problemstellung wird der Airbag als Behälter mit bekannten Eigenschaften aus der Simulation wie Druck, Volumen und Masse des Mediums betrachtet. Diese Eigenschaften stellen sich bei vollkommener Entfaltung des Luftsacks ein und werden als Startwerte für die weitere Berechnung herangezogen. Der entsprechende Verlauf dieser Größen bzw. die verwendeten Werte aus der Auswertung der Simulationsergebnisse des Basismodells sind in der Abbildung 40 dargestellt.

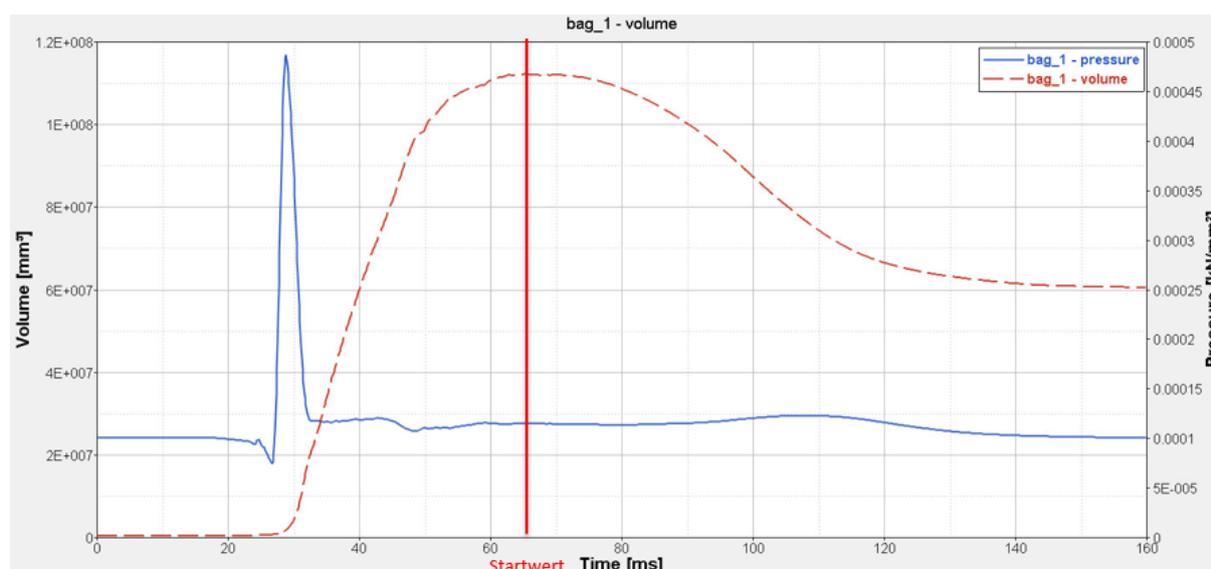


Abbildung 40: Druck- Volumenverlauf im Basismodell

Die Graphik in der Abbildung 40 zeigt den Verlauf des Drucks und des Volumens im Airbag von der Zündung bis zum Crashe über die Zeit. Der im Zeitraum zwischen 20ms und 40ms dargestellte Druckanstieg resultiert aus der Zündung des Airbags und der dabei freiwerdenden Energie bei der Entfaltung. Dieser Bereich wird bei der Abschätzung einer Druckkennlinie für das Ersatzmodell nicht berücksichtigt, da zu diesem Zeitpunkt noch kein Kontakt zwischen dem Insassen und dem Airbag vorherrscht und dieser somit keinen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Insassen hat. Der für die Ermittlung einer Druckkurve relevante Bereich liegt bei ca. 65ms und wird als Startwert für die Berechnung verwendet.

Zu diesem Zeitpunkt herrscht eine vollkommene Entfaltung des Airbags bei beinahe konstanten Werten für den Druck und das Volumen, wobei noch kein Kontakt des Insassen mit dem Airbag vorliegt.

Das während der Entfaltung des Airbags entweichende Gas, auf Grund der Permeabilität des Airbags und des Temperaturanstiegs bzw. Abfalls, werden bei der Berechnung des ausfließenden Massenstroms kompensiert. Nach Erreichen eines konstanten Niveaus für Druck und Volumen am Entfaltungsende, kann die Masse der Luft im Airbag mit Hilfe eines thermodynamischen Ansatzes berechnet und ebenfalls als Startwert für die weiterführende Berechnung verwendet werden. Dabei wird angenommen, dass das Medium im Airbag ein ideales Gas mit konstanten Stoffwerten ist, weshalb eine temperaturabhängige Änderung dieser nicht berücksichtigt wird.

Der gesamte Prozess bei der Ableitung einer Druckfunktion für das Ersatzmodell wird in zwei Prozesse unterteilt, wobei im ersten der Ausfluss des Gases vor dem Kontakt des Insassen mit dem Airbag und im zweiten die Kompression des Airbags beim Kontakt mit dem Insassen berücksichtigt wird. Im ersten Schritt wird von einem Startwert für Druck, Volumen und Masse ausgegangen und die Abnahme dieser Größen zu Folge eines Massestromaustritts auf Grund der Permeabilität bzw. über Ventöffnungen, berechnet. Dabei strömt die Luft zufolge Druckdifferenz zwischen Airbag Innendruck und Umgebung aus und verursacht eine Druckabnahme im Airbag. Der entsprechende Ansatz aus der Thermodynamik ergibt sich folgendermaßen.

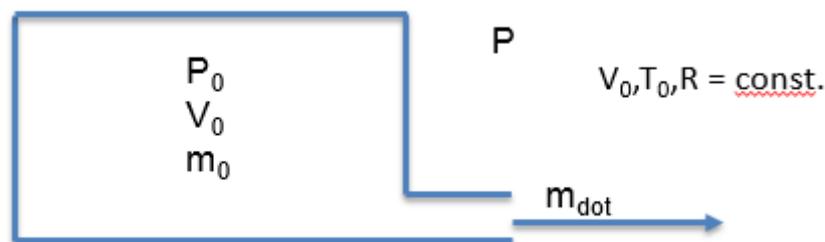


Abbildung 41: Thermodynamischer Ansatz für den Airbag im Ersatzmodell

Der hier dargestellte Behälter stellt den Airbag mit den Startwerten für Druck, Volumen und Masse dar. Mit Hilfe der Ausflussgleichung aus der Strömungsmechanik [15] kann der austretende Massenstrom aus dem Behälter berechnet werden.

$$\dot{m} = \frac{f}{v_0} \sqrt{2p_0 v_0} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]$$

Stoffwerte für Luft:
 $R = 287,1 \text{ J/kgK}$
 $\kappa = 1,4$

Formel 14: Ausflussgleichung aus der Strömungsmechanik

Zur Berechnung des Massenflusses werden Stoffwerte für die Luft angenommen. Aus der Differenz der Ausgangsmasse und der ausgeströmten Masse pro Zeiteinheit kann die tatsächliche verbliebene Masse im Airbag ermittelt und mit Hilfe der idealen Gasgleichung der vorherrschende Druck zu diesem Zeitpunkt berechnet werden.

$$m_1 = m_0 - \dot{m} * t$$

Formel 15: Massenberechnung zu einem Zeitpunkt t

$$\left. \begin{array}{l} p_0 V_0 = m_0 R T_0 \\ p_1 V_0 = m_1 R T_0 \end{array} \right\} p_1 = \frac{p_0 m_1}{m_0}$$

Formel 16: Ideale Gasgleichung der Thermodynamik [15]

Der berechnete Druck im Airbag zu einem bestimmten Zeitpunkt dient als Startwert für den nächsten Zeitschritt $t+\Delta t$. Die Druckabnahme zufolge der Ausströmung im Airbag wird für den gesamten Zeitraum vor dem Erstkontakt des Dummy mit dem Airbag, bis zum Crashende berücksichtigt bzw. fließt in die Berechnung mit ein.

Im Anschluss an den Ausströmvorgang und die damit verbundene Druckabnahme, erfolgt der Kontakt des Insassen mit dem Airbag zufolge der Vorverlagerung im Crash. Dieser Vorgang bewirkt ebenfalls eine Änderung des Drucks und des Volumens im Airbag und kann somit analog zum vorhergehenden Prozess mit Hilfe eines thermodynamischen Ansatzes beschrieben werden.

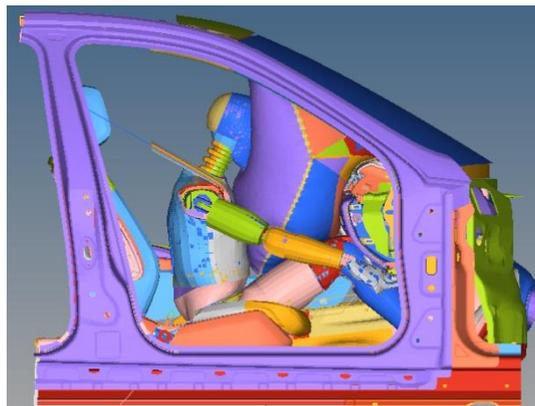


Abbildung 42: Kontakt Insasse mit Airbag

Die Abbildung 42 zeigt jenen Vorgang, bei dem der Insasse durch Vorverlagern in den Airbag eintaucht und diesen um einen gewissen Weg eindrückt. Die damit verbundene Volumenabnahme hat zu Folge, dass sich das Druckniveau im Airbag erhöht, wobei gleichzeitig Gasmasse aus dem Airbag austritt. In der Abbildung 40 ist dieser Effekt im Bereich von 80-120ms zu sehen. Um einen Zusammenhang zwischen der Verdrängung der Luft und dem Druckverlauf schaffen zu können, wird dieser Vorgang analog zur Ausströmung thermodynamisch betrachtet.

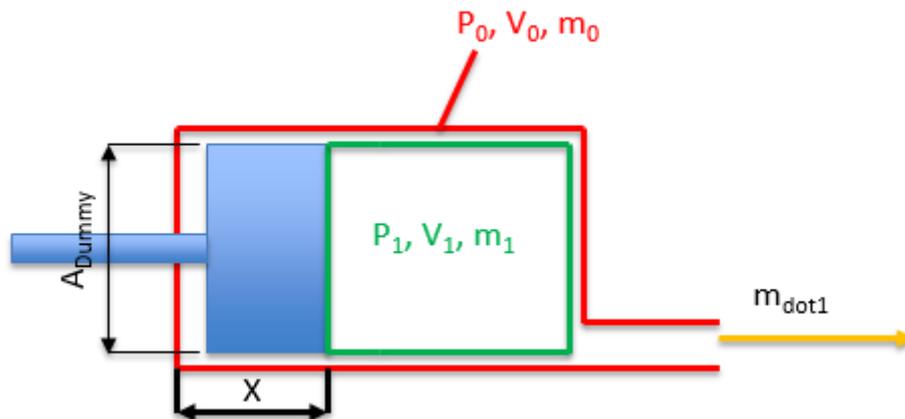


Abbildung 43: Thermodynamisches System der Airbagkompression im Ersatzmodell

Aus thermodynamischer Sicht, wird das Eindringen des Dummy Kopfes in den Airbag als Hub in einen Kolbenverdichter um einen Weg X beschrieben. Als Kolben dient der Kopf des Insassen der eine bekannte Querschnittsfläche (A_{Dummy}) besitzt, die aus dem Kopfdurchmesser berechnet wird. Der Airbag wirkt als Zylinder, dessen Volumen um den Wert ($A_{\text{Dummy}} \cdot X$) abnimmt. Das verbliebene Restvolumen V_1 des Airbags nach der Verdrängung X , kann ausgedrückt werden als:

$$V_1 = V_0 - A_{\text{Dummy}} \cdot X$$

Formel 17: Airbag Volumenberechnung nach der Kompression

Dabei ist V_0 das Startvolumen bei vollkommener Entfaltung und somit für den gesamten Rechengang konstant und X der vom Kopf resultierende Vorverlagerungsweg. Der daraus abgeleitete Druckanstieg infolge Volumenänderung kann mittels Isentropen Gleichung [15] aus der Thermodynamik berechnet werden.

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{V_0}{V_1}\right)^\kappa$$

Formel 18: Isentropengleichung der Thermodynamik

Mit Hilfe dieser Ansätze kann die Druckänderung infolge der Verdrängung durch den Insassen über den gesamten Vorverlagerungsweg ermittelt werden. Die Prozesse 1 & 2, also die Druckabnahme zufolge Massenausfluss und Druckzunahme zufolge Kompression durch den Dummy, führen zu einer Gesamtdruckänderung im Airbag, die zur Abschätzung eines Druckverlaufes im Airbag in Abhängigkeit von Zeit und Weg verwendet werden kann. Der aus den beiden Teilprozessen erhaltene Verlauf für Druck und Volumen bei selber Insassenbewegung kann der nachfolgenden Graphik entnommen werden und ist zum Abgleich dem des FE Modells gegenübergestellt.

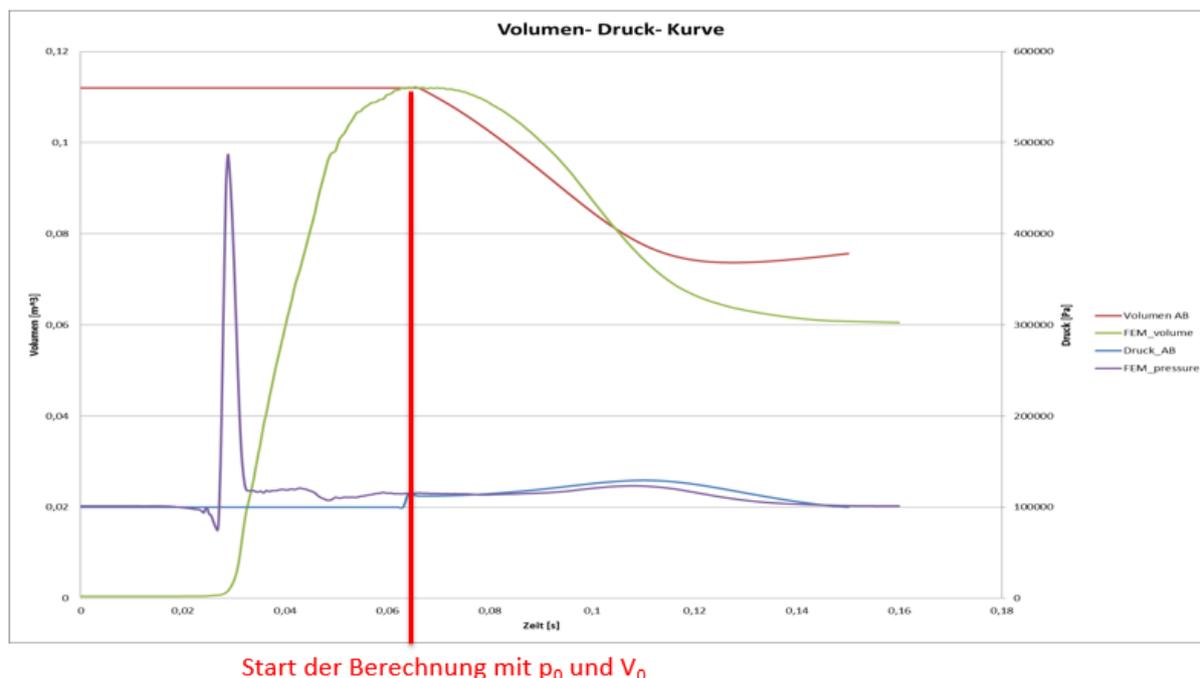


Abbildung 44: Vergleich Druck- Volumenverlauf FE Modell vs. Ersatzmodell

Die Überlagerung der Verläufe von FE Modell und Ersatzmodell zeigt einen ähnlichen Trend von Druck und Volumen und bestätigt somit die Anwendbarkeit des Verfahrens und der getroffenen Annahmen bei der Abschätzung. Weiter erlaubt es den Einsatz der erhaltenen Verläufe im Ersatzmodell als Belastung auf den Insassen. Der im Excel modellierte Airbag bzw. das verwendete Gleichungssystem wird im LsDyna gelöst. Der berechnete Druck wird in eine Kraft überführt, die über ein Federelement auf den Insassen wirkt.

Das für LsDyna benötigte Programm entspringt aus der Teilaufgabe einer weiterführenden Diplomarbeit von Felix Ressi, „Potentialanalyse von geregelten Fahrzeuginsassen-Rückhaltesystemen und Untersuchung hinsichtlich der Anforderungen an geeignete Aktuatoren“ und wird als fertiges Modell für den Airbag im Ersatzmodell implementiert. Die Vorgehensweise beim Aufbau des User Materials wird somit hier nicht näher beschrieben.

Die aus dem Programm hervorgehende Belastung auf den Insassen wirkt als Kraft auf den Kopf und die Brust und kann separat variiert werden. Dadurch kann die Anpassung der Airbagkraft auf den Kopf und die Brust entsprechend der Insassenbewegung erfolgen und als Abstimmungsparameter bei der Überlagerung der Modelle verwendet werden. Durch Variation der Parameter kann ein optimaler Druckverlauf und somit Krafteinfluss auf Kopf und Brust modelliert werden. Als Richtungsvorgabe für die Belastungskurve des Airbagmodells, dient ein Federelement zwischen einem beliebig gewählten Knotenpunkt im Raum und dem Schwerpunkt der jeweiligen Körperregion. Die Wahl des Knoten im Raum erfolgt an Hand der Position des Airbags in der Instrumententafel des Basismodells. Zur Veranschaulichung wird die Richtung der Kraftwirkung des Airbags auf den Kopf und die Brust als Kraftvektor angenommen und in der Abbildung 45 graphisch dargestellt.

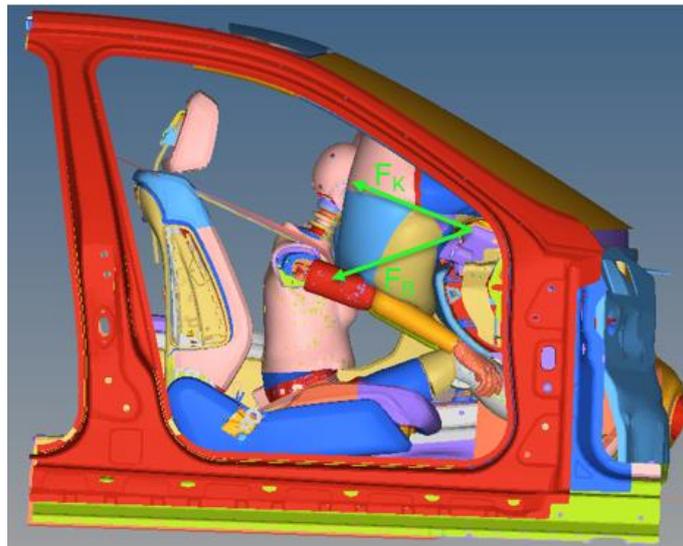


Abbildung 45: Kraftaufteilung vom Airbag auf Kopf und Brust im Basismodell

Da nun alle Belastungsgrößen und Komponenten im Ersatz Modell implementiert sind, wird das Ersatzmodell durch Überlagerung mit dem FE Modell und unter Berücksichtigung gewählter Annahmen validiert. Eine Überlagerung der Modelle zu verschiedenen Zeiten bzw. Vorverlagerungspositionen ist in der Abbildung 46 zu sehen.

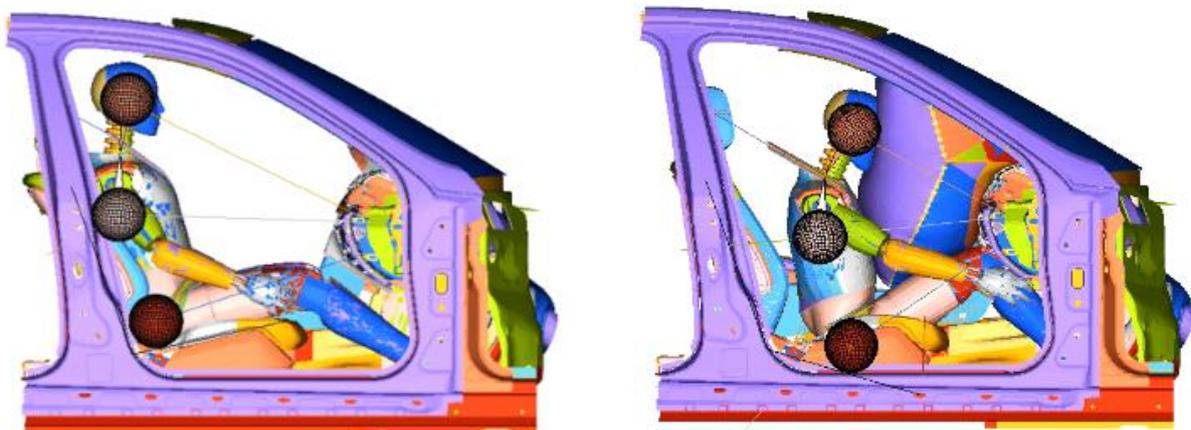


Abbildung 46: Modellüberlagerung bei t_0 und $t_0+85\text{ms}$ für das 50% Mann Modell

Bei der Validierung des Ersatzmodells wird die Vorverlagerungsphase durch Optimieren veränderlicher Parameter im Ersatzmodell an das Basismodell angenähert. Dabei werden Parameter wie beispielsweise die Gurt- bzw. Airbagkraft angepasst bzw. willkürlich angenommene Werte bei der Bestimmung dieser Größen verändert. Weiteres soll durch Optimierung der Nackensteifigkeit oder der Steifigkeit der Knie bzw. des Sitzes die bestmögliche Übereinstimmung der beiden Modelle erzielt werden.

6.4 Euro NCAP & U.S.NCAP Puls

Da nun wichtige Eigenschaften des Ersatzsystems bekannt sind, ist für die Bewegung bzw. Beschleunigung des Modells ein Puls notwendig. Bei der Überlagerung des Ersatzsystems mit dem Basismodell, soll eine einheitliche Bewegung der Modelle erkennbar sein. Um eine einheitliche Bewegungscharakteristik und dementsprechend gleiche Belastungen der beiden Modelle zu erreichen, wird das Ersatzmodell durch eine Beschleunigungskurve, abgeleitet aus dem Basis FE- Insassenmodell, belastet. Der Verlauf der Beschleunigung ist in der Abbildung 47 zu sehen.

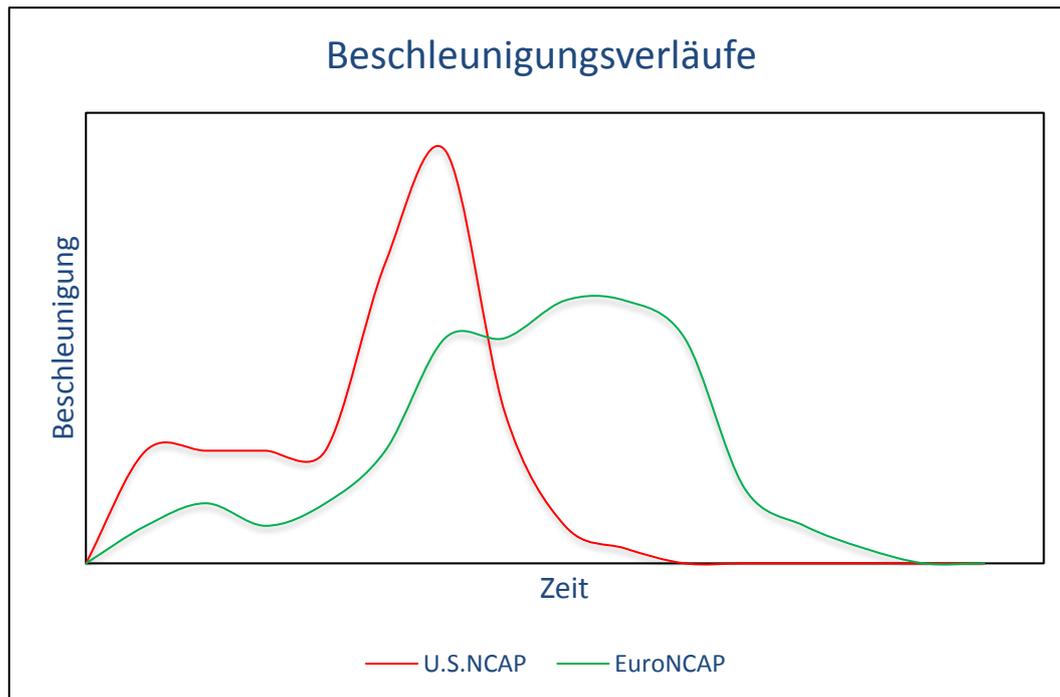


Abbildung 47: Euro NCAP & U.S.NCAP Puls

Die Beschleunigungsverläufe aus der Abbildung 47 entsprechen dem eines Euro NCAP & U.S.NCAP Pulses, mit dem das FE- Insassenmodell für den Hybrid III 50% Mann und den Hybrid III 5% Frau Insassen beaufschlagt wird. Ein Vergleich der Beschleunigungsverläufe zeigt, dass sich zeitliche Unterschiede ergeben und das Belastungsniveau des Hybrid III 5% Frau Pulses auch höher ist. Die dabei auftretenden Belastungen entstehen anhand der vorgegebenen Konfiguration bzw. Parameter für den Euro NCAP bzw. den U.S.NCAP Frontalcrash, wie sie in Abschnitt 3.1 dargestellt sind. Aufgrund dessen, können die beiden Ersatzmodelle des 50% Mannes und der 5% Frau nicht miteinander in Relation gebracht werden und können daher nur mit dem entsprechenden Basismodell überlagert werden. Die Anwendung des identischen Pulses für das Basis- als auch Ersatzmodell bildet somit die Grundlage für eine synchronisierte Bewegung der beiden Modelle in Abhängigkeit von den bereits definierten Freiheitsgraden und Einschränkungen. Der aufgebrachte Puls bzw. Beschleunigung und die einwirkenden Kräfte durch die Rückhaltekomponenten Gurt und Airbag bzw. möglicher Kontakt des Insassen mit dem Fahrzeuginnenraum bewirkt, dass der Insasse Belastungen erfährt und folglich entsprechende Bewegungen vollzieht.

6.5 Validierung des Ersatzmodells mit dem FE Modell

Bei der Modellierung eines Ersatzmodells für den Insassen ist der Einsatz von Ersatzsystemen zur Nachbildung von Kräften bzw. Belastungen als auch zur Abbildung von Komponenten notwendig. Aus den Annahmen und Vereinfachungen für die Belastungen seitens der Rückhaltesysteme und der Darstellung von Kontakten zwischen dem Insassen und dem KFZ mittels Federelementen, ergeben sich Abweichungen im Verhalten des ESM verglichen mit dem FEM, die mittels Validierung und Parameteranpassung im Ersatzmodell auf ein Mindestmaß reduziert werden müssen. Die Annäherung von Kräften, Momenten oder Steifigkeiten im Modell führt zur besseren Überlagerung der Modelle und kann mittels Vergleichsgrößen überprüft werden. Die zur Validierung notwendigen Vergleichsgrößen sind in der Tabelle 14 zusammengefasst. Die gewählten Vergleichsgrößen beziehen sich einerseits auf die Verletzungskriterien aus Abschnitt 3.2 und andererseits werden die Trajektorien der beiden Modelle verglichen, mit dem Ziel, die Kinematik des Ersatzmodells mit dem Basismodell in Einklang zu bringen. Die Darstellung der resultierenden Gurtkräfte auf die Brust und das Becken bzw. der Vergleich soll die Anwendbarkeit des Systems für die Gurtkraftberechnung im Ersatzmodell bestätigen und möglichen Unterschiede in den Niveaus aufzeigen.

Vergleichsgrößen
Trajektorien (Kopf, Brust, Becken)
Kopfbeschleunigung
Brustbeschleunigung
Beckenbeschleunigung
Nackenkraft F_z
Nackenmoment M_y
Oberschenkelkraft F_z
Resultierende Gurtkräfte Brust und Becken

Tabelle 14: Vergleichsgrößen für die Validierung des Ersatzmodells

6.5.1 Validierung 50%- Mann Ersatzmodell

Mit dem Ziel, die selbe Kinematik des Ersatzmodells und FE Modells darzustellen, werden Trajektorien und Belastungen auf den Insassen der beiden Modelle miteinander verglichen bzw. überlagert dargestellt.

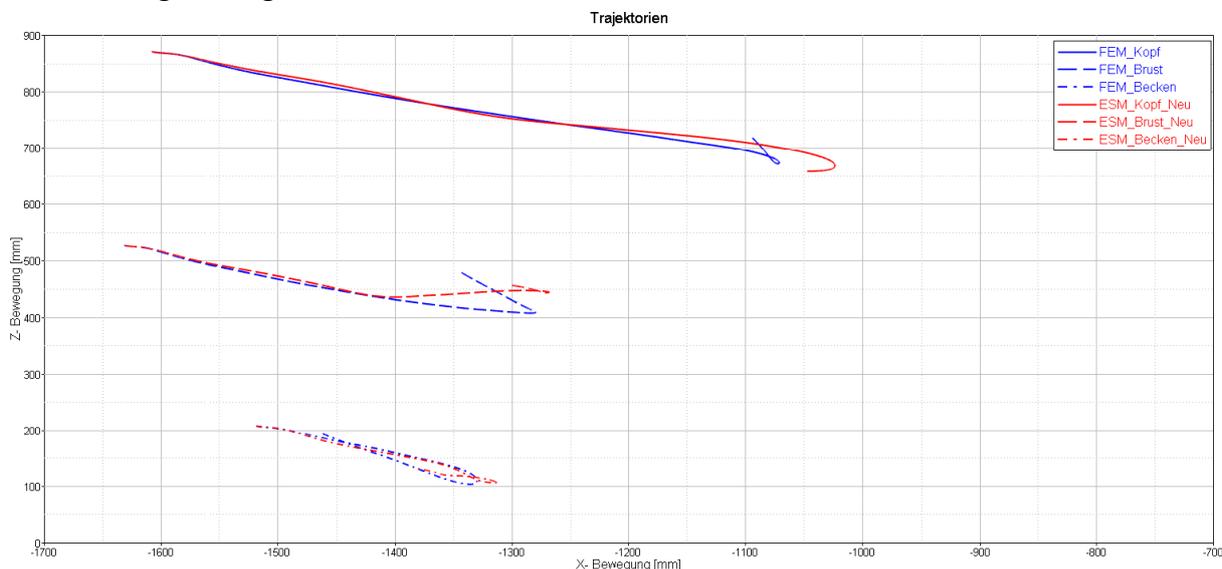


Abbildung 48: Vergleich Trajektorien Ersatzmodell vs. Basismodell

Ein Vergleich der Trajektorien der beiden Modelle zeigt, dass das Bewegungsverhalten des Ersatzsystems mit dem Basismodell gut übereinstimmt. Die geringen Abweichungen am Ende der Vorverlagerungsphase können aus der Abstimmung des Airbagmodells im Ersatzsystem resultieren. Auf Grund des weiteren Weges den der Kopf in X- Richtung zurücklegt und der Aufwärtsbewegung der Brust im Vergleich zum Basismodell, könnte auf die Airbagperformance rückgeschlossen werden.

Die Abbildung 49 zeigt einen Vergleich der Airbagperformance zwischen dem Ersatz- und Basismodell im Bereich wo der Insasse mit dem Airbag kollidiert, was zum Druckanstieg im Airbag führt. Der Verlauf des Airbagdrucks im Ersatzmodell zeigt, dass ein Druckmaximum erst zu einem späteren Zeitpunkt im Vergleich zum FE Modell auftritt. Die verzögerte Druckerhöhung bewirkt, dass auch die Bewegung des Ersatzmodells entsprechend beeinflusst wird und Abweichungen der Trajektorien die Folge sind.

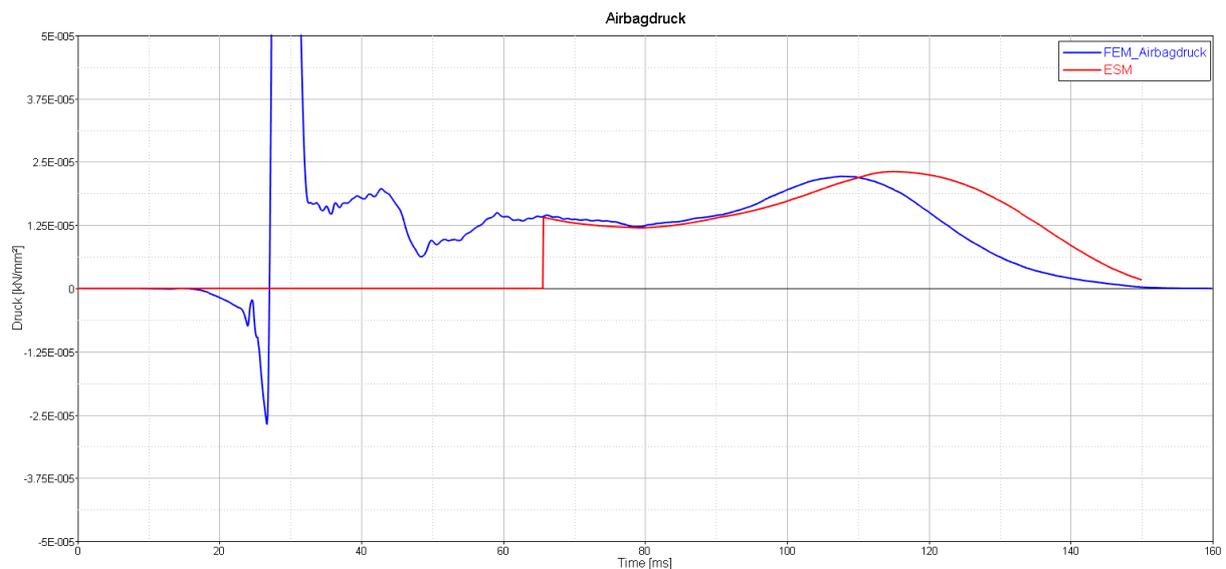


Abbildung 49: Airbagperformance des Ersatz- und Basismodells

Die Darstellung der resultierenden Gurtkräfte für die Brust und das Becken im FE- und Ersatzmodell, die bis zum Kontakt mit dem Airbag für die Rückhaltung des Insassen verantwortlich sind, ist in der Abbildung 50 zu sehen. Die aus den Schultergurtkräften FB3 und FB4 bzw. Beckengurtkräften FB5 und FB6 mittels Cosinus Satz gebildete resultierende Kraft auf Brust und Becken im Ersatzmodell, zeigt zwar Abweichungen des Kraftniveaus aber deutliche Ähnlichkeiten im Verlauf der Kräfte. Daraus kann geschlossen werden, dass die Unterschiede in den Vergleichsgrößen für das FE- und Ersatzmodell als Ergebnis aus den Abweichungen der Gurtkräfte bzw. aus den Unterschieden der Nackenkinematik hervorgehen.

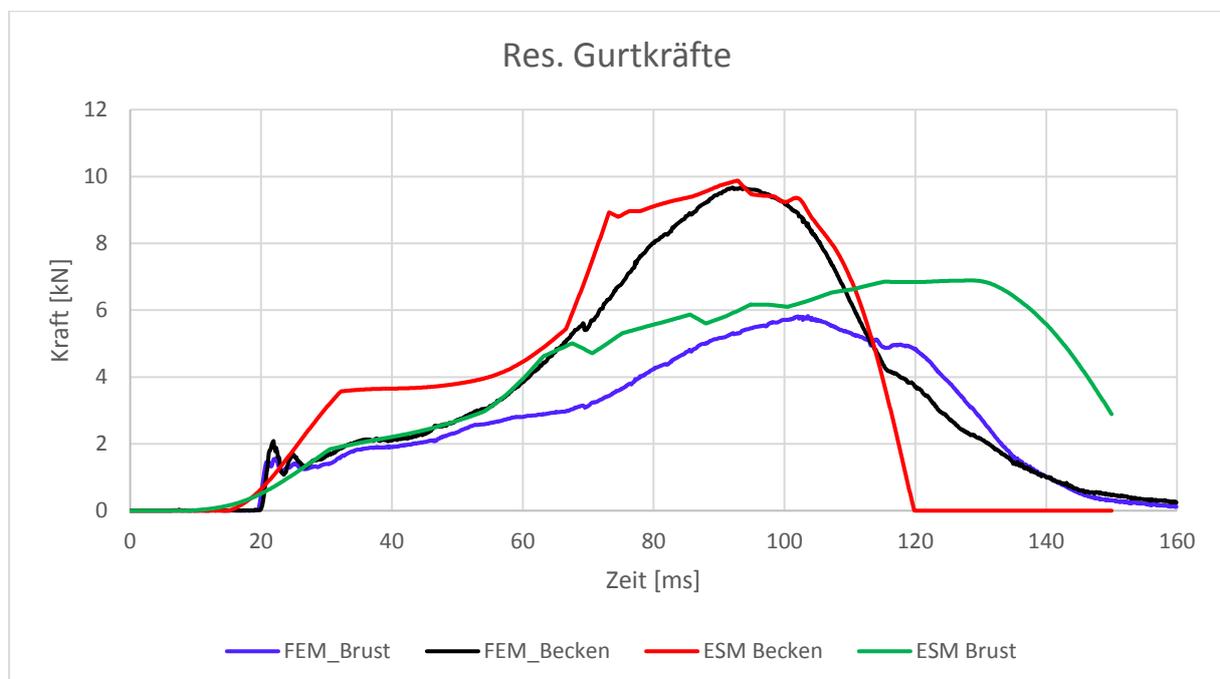


Abbildung 50: Resultierende Gurtkraft auf Brust und Becken im Ersatz- & Basismodell

Zur Veranschaulichung des Bewegungsverhaltens des 50% Ersatzmodells im Vergleich mit dem FE Modell, sind in den folgenden Abbildungen Ausschnitte für verschiedene Zeiten der Simulation zu sehen.

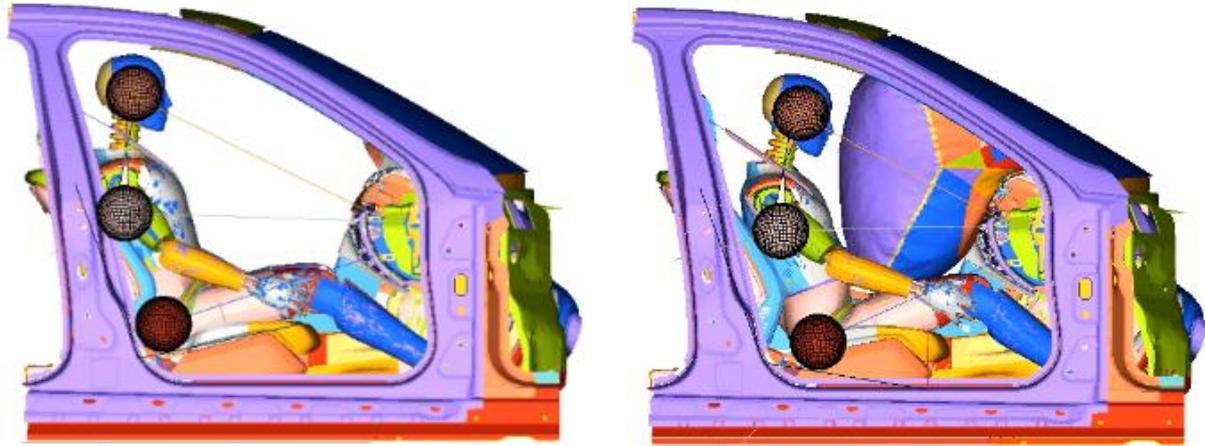


Abbildung 51: Überlagerung Ersatz- & FE Modell bei t_0 und bei $t_0 + 50ms$



Abbildung 52: Überlagerung Ersatz- & FE Modell bei $t_0+100ms$ und bei $t_0 + 150ms$

Die Abbildung 52 und Abbildung 52 zeigt die Überlagerung der Modelle bei verschiedenen Zeitpunkten nach Crashbeginn. Dabei ist zu sehen, dass die Kinematik der beiden Modelle bis ca. 100ms nach t_0 übereinstimmt, erst danach Unterschiede deutlich werden. Betrachtet man die Nackenbewegung des Ersatzmodells bei 150ms, ist ein Unterschied in der Bewegung zu erkennen. Diese Abweichung der Nackenbewegung kann auf das Nackenmoment und den dazugehörigen Verdrehwinkel rückgeführt werden. Somit ist eine Anpassung der Nackensteifigkeit notwendig, umso die Trajektorie des Kopfes an die des Basismodells anzugleichen.

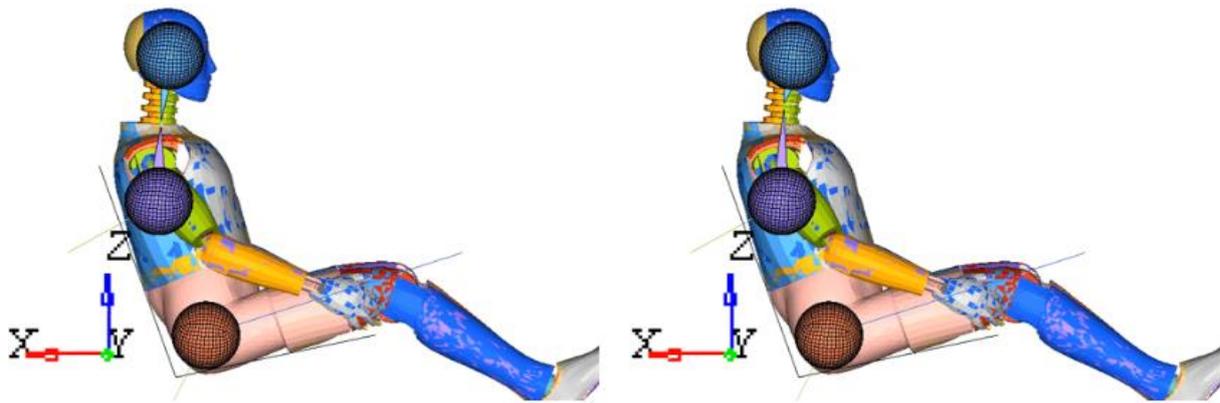


Abbildung 53: Optimierung Nackenkinematik des Ersatzmodells und Vergleich zwischen neu(links) & alt (rechst)

Durch Annäherung der Momenten- Winkelkennlinie des Nackens im Ersatzmodell kann die Kopfdynamik des Insassen verändert werden. Als Annäherung werden die in der Abbildung 24 dargestellten Korridore für die Nackendynamik im Frontalcrash verwendet. Innerhalb dieses Bereichs soll eine passende Momenten.- Winkelkennlinie definiert und somit die Nackensteifigkeit des Ersatzmodells verbessert werden. Doch nicht nur die Belastungskennlinie des Nackens hat einen Einfluss auf die Kopftrajektorie, sondern auch die Position des Drehgelenks im Nackenbereich, um den sich der Kopf dreht. Durch Verschiebung des Drehpunktes in Z- Richtung kann der Abstand und somit der Hebel zwischen dem Kopfschwerpunkt und dem Drehpunkt verändert werden.

Bei Anpassen des Drehpunktes für den Kopf, wird durch sperren aller Freiheitsgrade für Brust und Becken, alleinig die Kopfbewegung inklusive Nacken simuliert. Dabei werden alle Bewegungen der Brust und des Beckens verhindert umso den Bewegungseinfluss dieser Körperteile auf die Kopfbewegung auszuschließen. In der Abbildung 53 ist das Drehgelenk des Kopfes im Nackenbereich für zwei verschiedene Positionen dargestellt. Das linke Bild stellt die optimierte Position dar und zeigt, dass das Drehgelenk in Z nach unten verschoben ist und somit der Hebelarm des Kopfes bezüglich des Drehpunktes größer wird. Der Unterschied in der Bewegung des Kopfes bei optimierten Drehpunkt ist in der Abbildung 54 zu sehen.

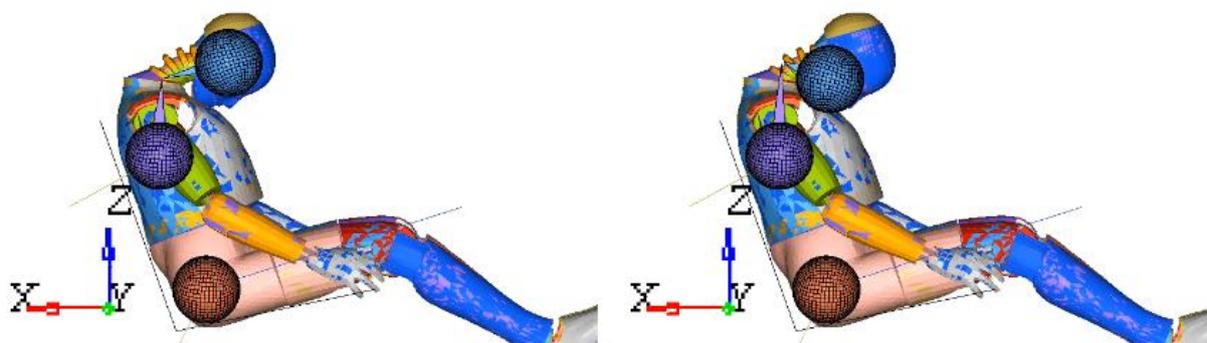


Abbildung 54: Optimierter Drehpunkt im Nacken und Vergleich zwischen neu (links) und alt (rechts) bei $t_0+100\text{ms}$

Ergänzend zur Abbildung 54 die die Bewegung des Kopfes bei optimierten (links) als auch nicht passenden Drehposition für den Kopf zeigt, kann Anhand der Trajektorie für den Kopf die richtige Position des Nackengelenks dargestellt werden.

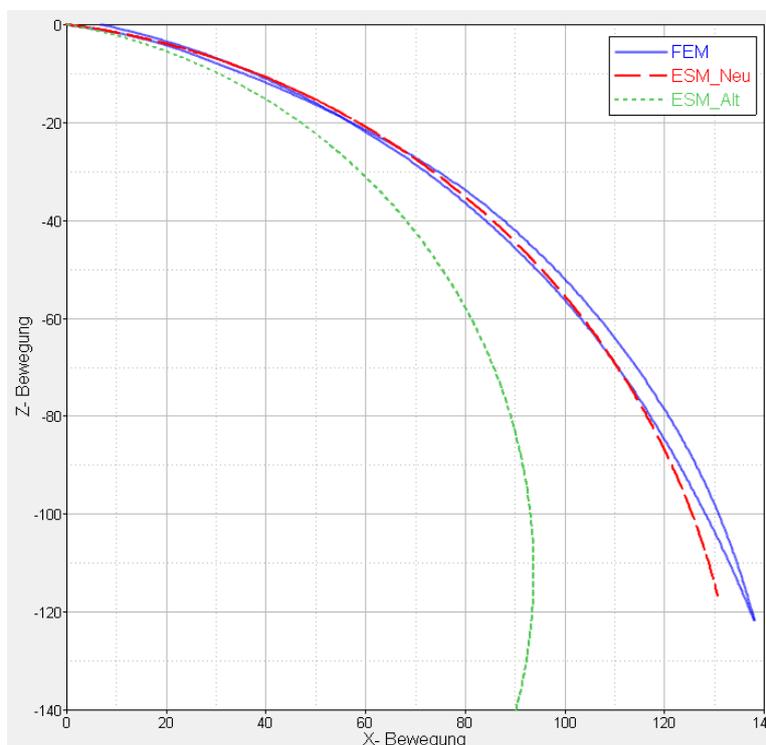


Abbildung 55: Kopftrajektorie nach der Optimierung der Position des Drehgelenks

Die Abbildung 55 zeigt den Verlauf der Kopftrajektorie für das optimierte Modell (neu) im Vergleich zum Modell, bei dem der Drehpunkt des Kopfes nicht optimal liegt (alt). Die geringfügigen Unterschiede in Verlauf können auf die Wahl eines einzigen Drehgelenks gestützt werden, da im realen Modell der Nacken aus mehreren Wirbeln und somit auch Gelenken besteht, die eine andere Bewegung des Nackens erlauben. Die Darstellung des Nackenmodells nur durch einen Drehpunkt, soll die Komplexität des Modells durch Vorgabe einer einzigen Belastungskennlinie minimieren. Ansonsten wäre eine Anpassung der Momenten- Winkelkennlinie für jedes einzelne Drehgelenk notwendig, was den Optimierungsaufwand für das Ersatzmodell erhöhen würde.

Obwohl der Fokus bei der Überlagerung des Ersatzmodells auf dem Vergleich der Trajektorien liegt und das Ziel ist, die selben Bewegungen des Ersatzmodells wie im FE Modell darzustellen, werden auch die Vergleichsgrößen wie beispielsweise die Kopf- oder Brustbeschleunigung verglichen. Die Darstellung der resultierenden Kopfbeschleunigung der beiden Modelle ist in der Abbildung 56 dargestellt.

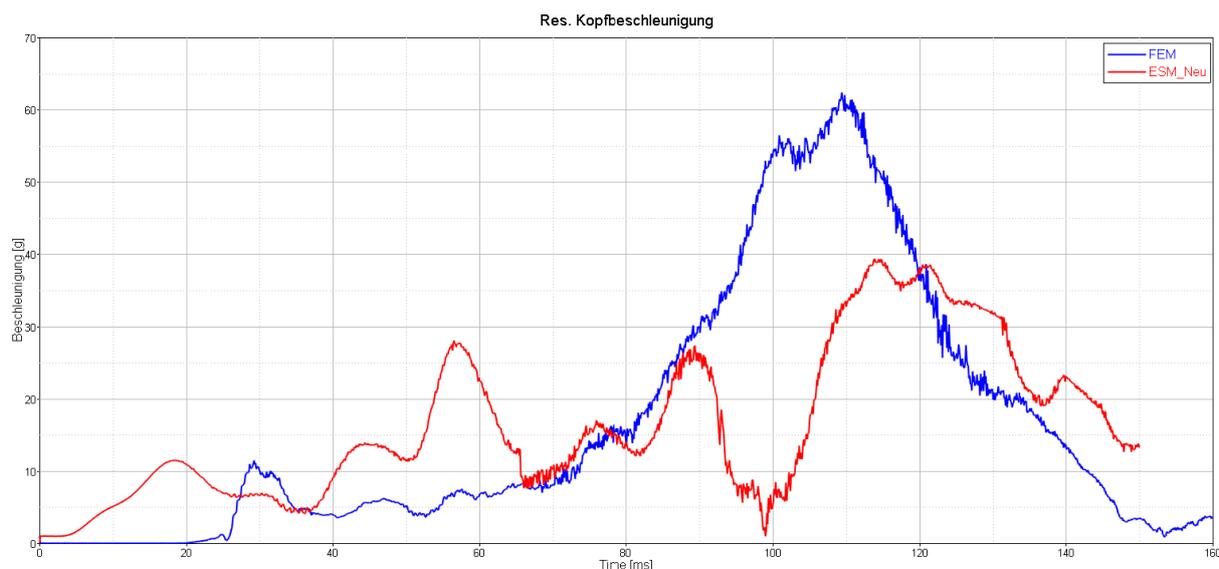


Abbildung 56: Resultierende Kopfbeschleunigung am Ersatz- und FE Modell

Die dargestellte resultierende Kopfbeschleunigung, setzt sich zusammen aus der X, Y, und Z Beschleunigung des Kopfes. Die Abweichung der Kopfbeschleunigung zwischen dem Ersatz- und FE Modell kann auf die Airbag- bzw. Gurt-Performance zurückgeführt werden bzw. auf das Zusammenspiel der beiden Rückhaltekomponenten. Obwohl die Trajektorien aus Abbildung 48 für Kopf, Burst und das Becken gut korrelieren, sind Abweichungen in den Belastungsgrößen sichtbar, die auf die getroffenen Vereinfachungen bzw. Annahmen rückzuführen sind. Die am Anfang wirkende Gurtkraft bewirkt im Zeitraum zwischen 0-60ms Kopfbeschleunigungen am Ersatzmodell die sich vom FE Modell unterscheiden. Das bedeutet, dass die Gurtkräfte in diesem Bereich möglicherweise zu hoch sind bzw. Sprünge im Verlauf aufweisen.

Ähnliche Abweichungen zeigen auch die Verläufe der Brust- und Beckenbeschleunigung beim Ersatzmodell, die ebenfalls auf die Gurt- und Airbagkräfte rückzuführen sind. Die vorhandenen Peaks innerhalb der ersten 60ms und die Unterschiede in der Beschleunigung ab 80ms resultieren aus hohen Gurtkräften als auch zeitlich verzögerten Airbagbelastungen im Vergleich zum FE Modell.

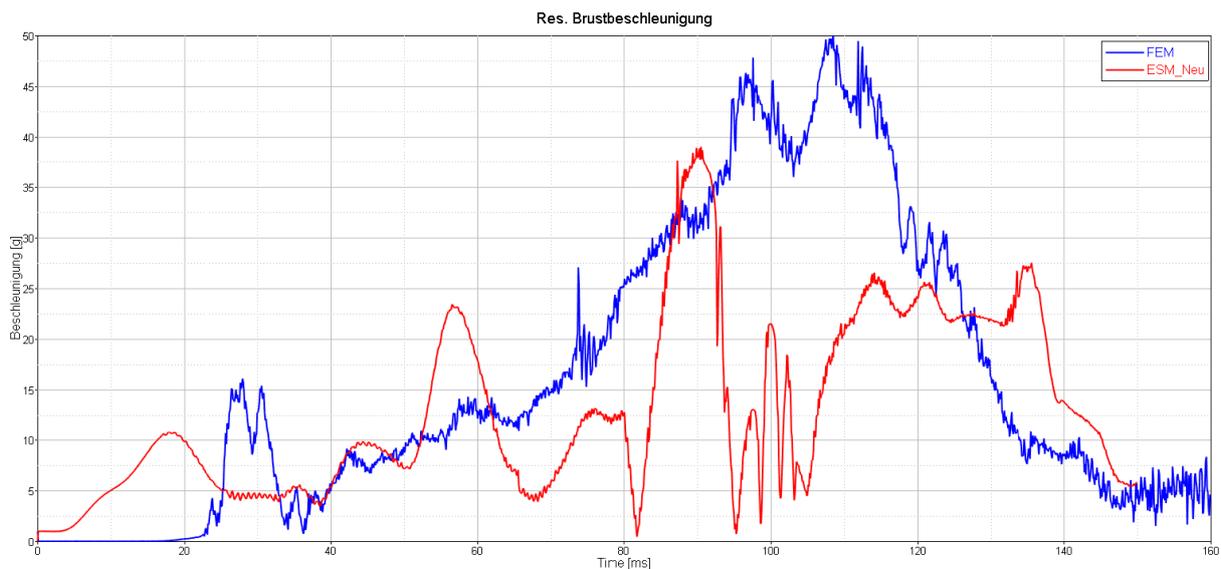


Abbildung 57: Resultierende Brustbeschleunigung am Ersatz- und FE Modell

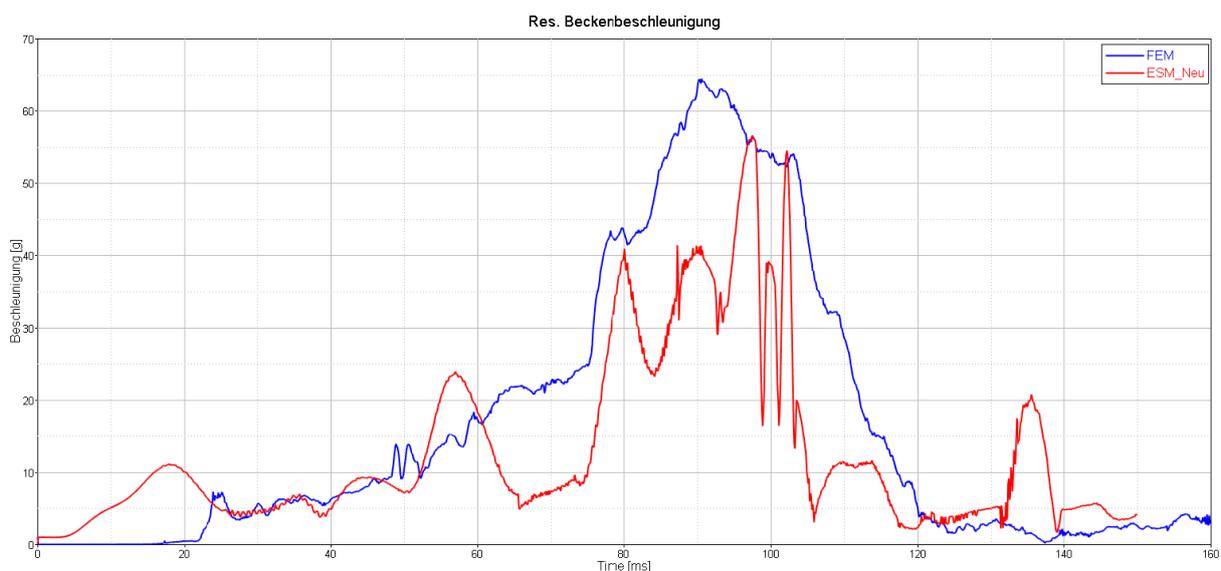
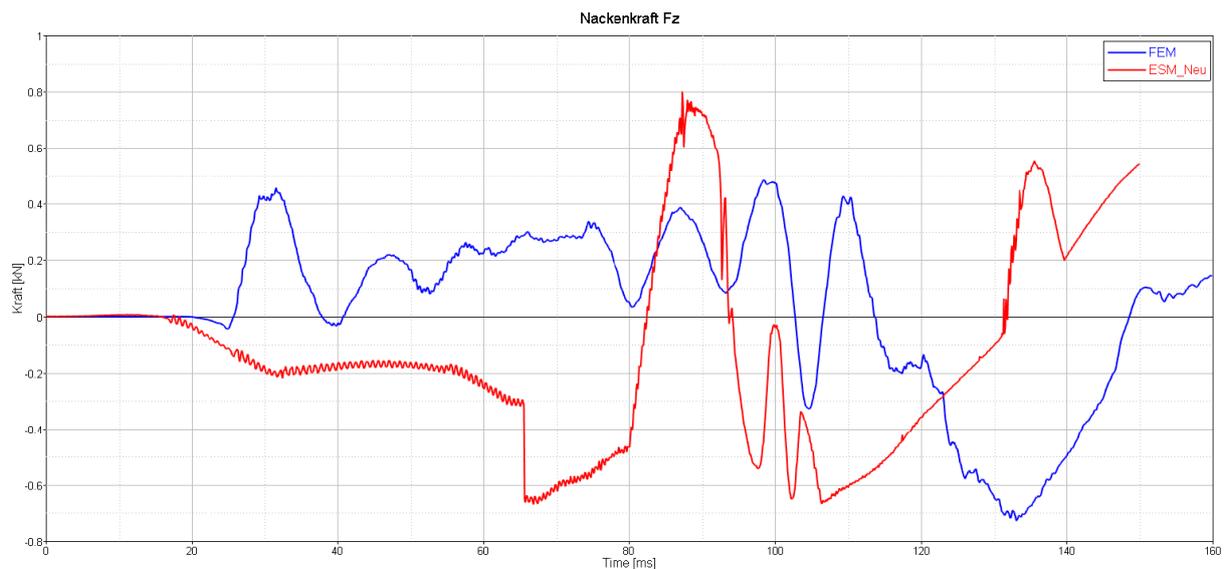
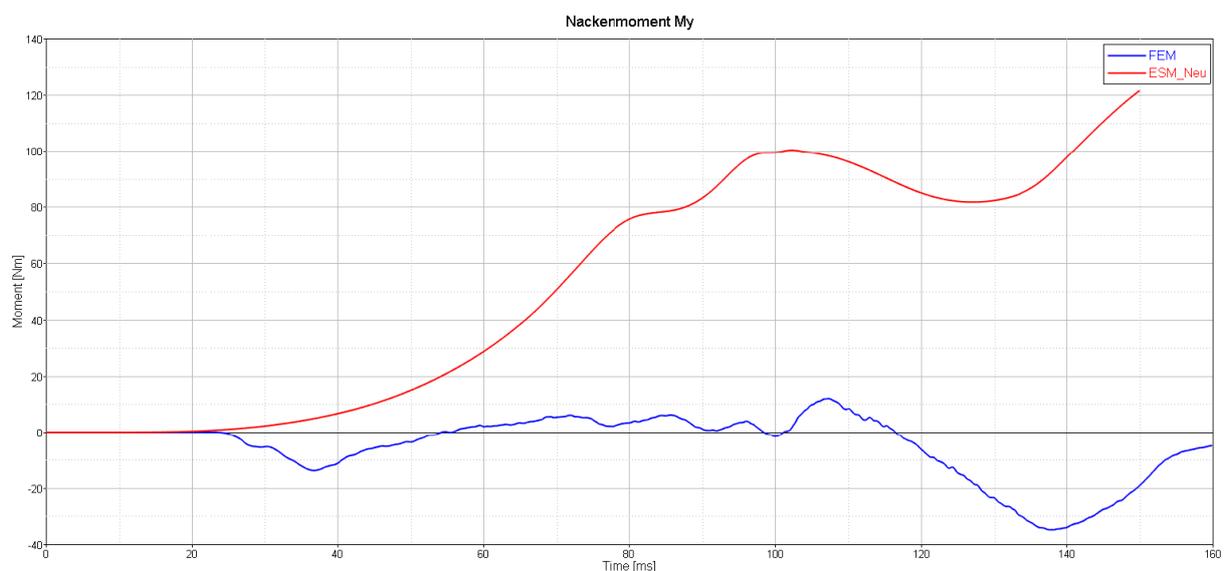


Abbildung 58: Resultierende Brustbeschleunigung am Ersatz- und FE Modell

Die Beckenbeschleunigung des Ersatzmodells zeigt einen ähnlichen Trend zur Beschleunigung des FE Modells im Verlauf, wobei der geringfügige Unterschied als Ergebnis der getroffenen Vereinfachungen und Annahmen für den Beckengurt und die Steifigkeit der Kniefeder rückzuführen ist.

Ergänzend zu den Beschleunigungen auf Kopf, Brust und Becken sind Belastungen des Nackens und der Beine vergleichend mit dem FE Modell darzustellen. Die entsprechenden Verläufe für die Nackenkraft bzw. das Nackenmoment sind in den folgenden Abbildungen zu sehen.

Abbildung 59: Nackenkraft F_z am Ersatz- und FE ModellAbbildung 60: Nackenment M_y am Ersatz- und FE Modell

Die dargestellten Verläufe der Nackenkraft F_z und dem Nackenment M_y des Ersatzmodells zeigen starke Abweichungen im Vergleich zum FE Modell. Dies kann damit erklärt werden, dass ein Drehgelenk für eine optimale Kopfbewegung nicht ausreichend ist, um in Folge ähnliche Belastungen wie beim FE Modell zu erreichen. Wie bereits erwähnt hat auch die Wahl der Nackenment- Winkelkennlinie einen Einfluss auf die Belastungen bzw. auch die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen für die Gurt- und Airbagkomponente im Ersatzmodell.

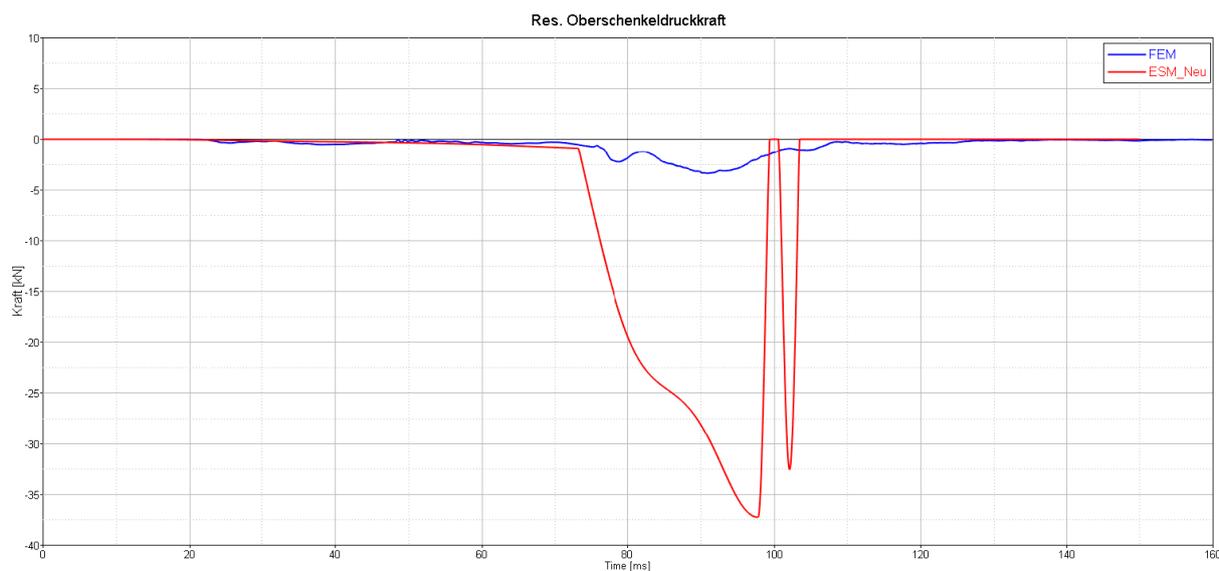


Abbildung 61: Oberschenkeldruckkraft am Ersatz- und FE Modell

Der Vergleich der Oberschenkelkraft von Ersatz- und FE Modell ergibt große Unterschiede im Kraftniveau. Der Verlauf der Kräfte im Zeitraum von 0-70ms zeigt einen ähnlichen Trend an, wobei im weiteren Verlauf große Abweichungen im Kraftniveau zu erkennen sind. Die hohe Oberschenkelbelastung kann einerseits auf die fehlende Fußabstützung des Insassen im Fußraum des KFZ und andererseits auf die fehlende Reibung zwischen dem Insassen und dem Sitz rückgeführt werden. Die Abstützung des Insassen während der Vorverlagerung am Boden, wird im Ersatzmodell nicht berücksichtigt und kann nicht alleine mit der Druckfedersteifigkeit zwischen Becken und IP bzw. der Beckengurtkraft kompensiert werden. Der fehlende Kontakt des Beckens mit der Sitzrampe, der im realen Modell zur Abnahme der Kraft in X- Richtung beim Vorverlagern führt, kann als Ursache für die hohen Oberschenkeldruckkräfte am Ersatzmodell herangezogen werden. Die bei ca. 100ms auftretende Entlastung der Oberschenkelkraft kann auf eine steile Entlastungskurve für die Kniestufigkeit oder eine minimale Rückwärtsbewegung des Beckens während der Vorverlagerung rückgeführt werden.

Der Vergleich der Trajektorien und Belastungsgrößen des Ersatzmodells mit dem FE Modell zeigt, dass trotz guter Überlagerung der Trajektorien bzw. Bewegungen, große Unterschiede in den Belastungen auftreten. Dabei wird der Einfluss der definierten Vereinfachungen und Annahme für die Belastungskurven bzw. Freiheitsgrade im Ersatzmodell, sichtbar. Der fehlende Kontakt des Insassen zum Sitz bzw. die wirkende Reibkraft, als auch die geringen Abweichungen der Gurt- und Airbagkräfte sind Gründe, warum beim Ersatzmodell die Belastungswerte teilweise viel höher sind als beim FE Modell. Obwohl die Belastungsgrößen bzw. die Verletzungskriterien für den Abgleich der beiden Modelle relevant sind, liegt der Fokus bei der Abstimmung des Ersatzmodells mit dem FE Modell auf den Trajektorien. Diese zeigen eine einheitliche Bewegung der beiden Modelle und sind im Gegensatz zu den Belastungswerten plausibel und aussagekräftig.

6.5.2 Validierung 5%- Frau Modell

Analog zum 50%- Mann Ersatz Modell, wird zur Veranschaulichung der Bewegungen, das 5%- Frau Ersatzmodell dem Hybrid III 5% Frau FE Modell überlagert und in den Abbildungen für verschiedene Zeiten veranschaulicht.



Abbildung 62: Überlagerung bei t_0 und bei $t_0 + 40\text{ms}$



Abbildung 63: Überlagerung bei $t_0 + 80\text{ms}$ und bei $t_0 + 120\text{ms}$

Die Überlagerung der Modelle zeigt, dass bis ca. 40ms nach Crashbeginn die Bewegungen des Ersatzmodells und jene des FE Modells ähnlich sind. Ab dem Zeitpunkt wo der Insasse mit dem Airbag Kontakt hat, kommt es zu Abweichungen in der Nackenkinematik als auch im Brustbereich. Das bedeutet, dass einerseits die Nackensteifigkeit und andererseits die Airbagkräfte diese Unterschiede hervorrufen bzw. die Belastungen auf den Insassen verändern.

Ein Vergleich der Trajektorien und Belastungen soll zeigen, wie groß die Unterschiede in den Belastungen und Bewegungen zwischen den Modellen sind.

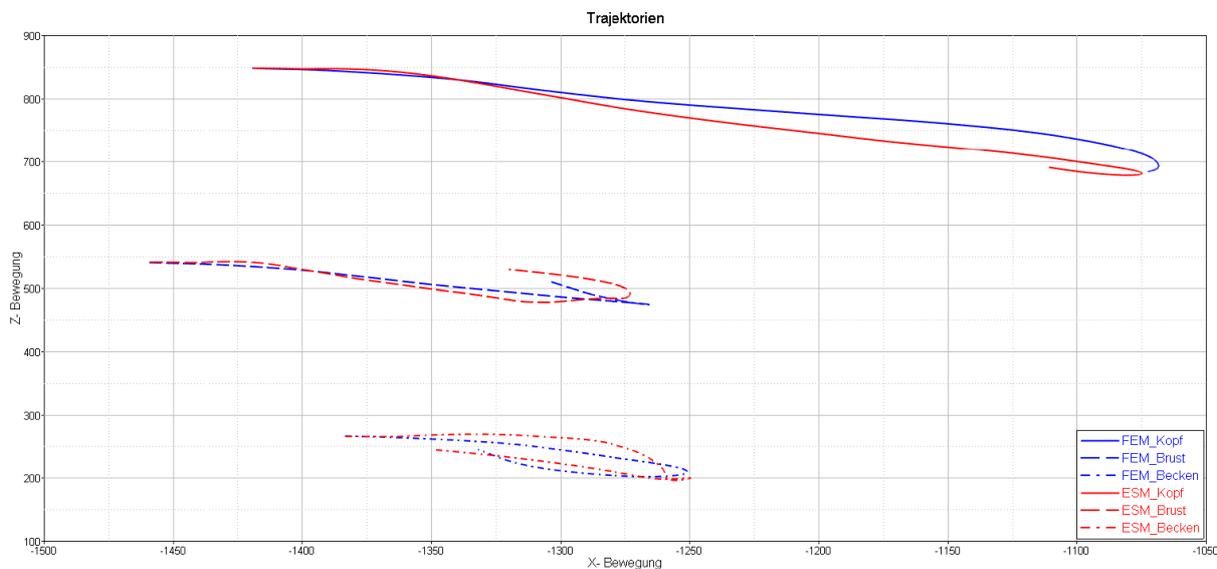


Abbildung 64: Trajektorien für das Ersatz- & FE Modell für Kopf, Brust und Becken

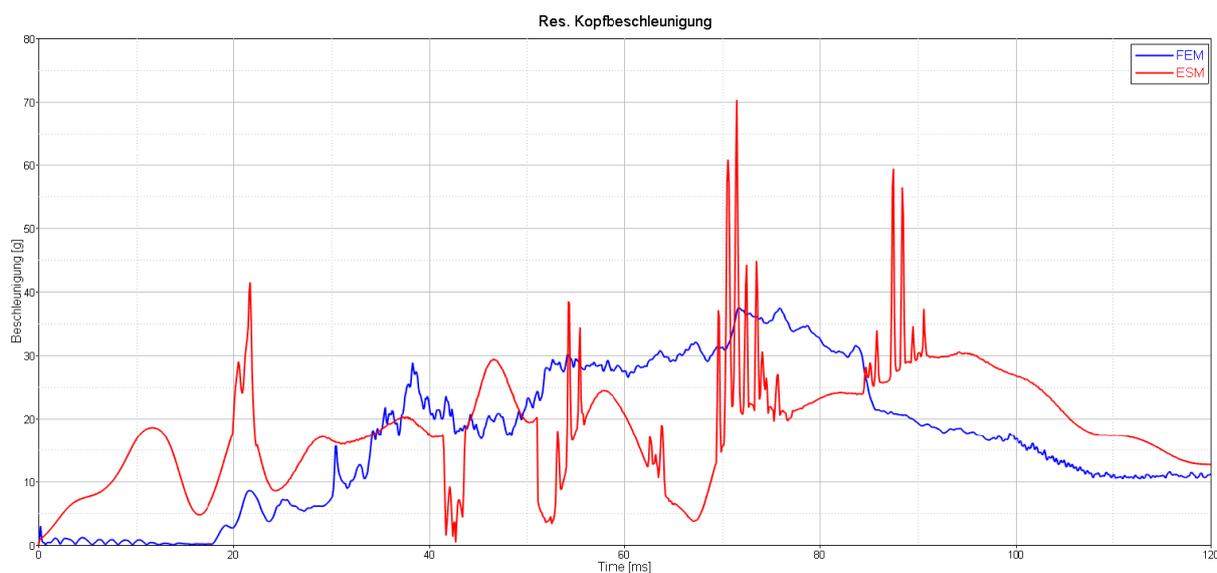


Abbildung 65: Resultierende Kopfbeschleunigung am Ersatz- & FE Modell

Die dargestellten Verläufe der resultierenden Kopfbeschleunigung in X- und Z- Richtung zeigen, dass die Belastungen am Ersatzmodell viel höher sind als am FE Modell. Dieser Effekt kann auf das Abheben des Beckens am Sitz, siehe Abbildung 63 rückgeschlossen werden. Dabei wird die Auf- und Abwärtsbewegung des Beckens, über die Verbindungen bzw. Beziehungen zwischen den Körperteilen auf den Kopf und die Brust übertragen.

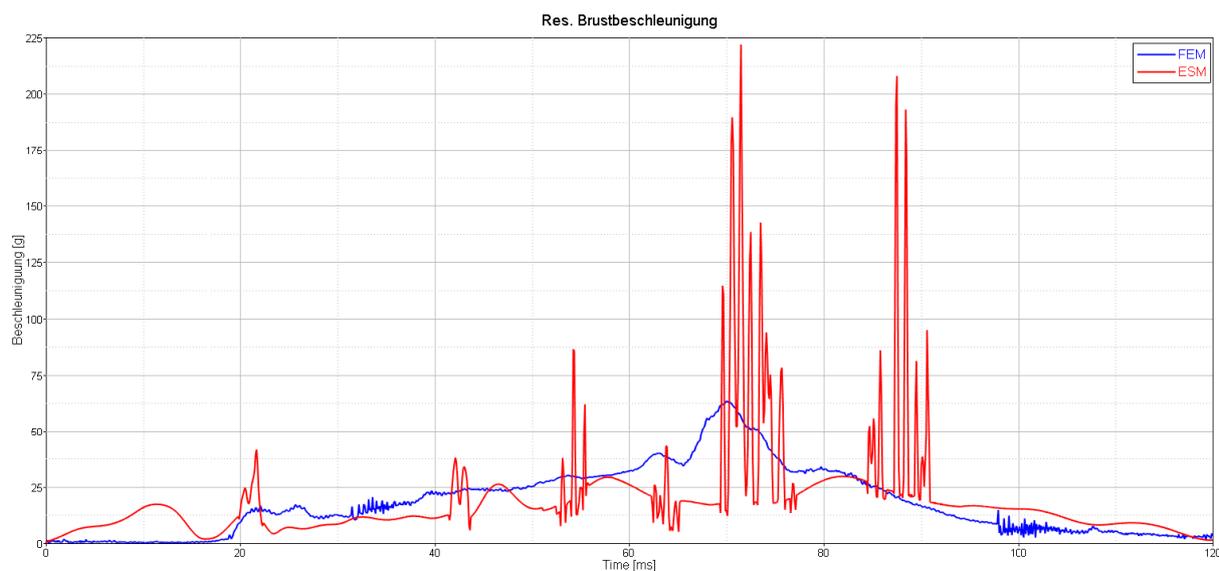


Abbildung 66: Resultierende Brustbeschleunigung am Ersatz- & FE Modell

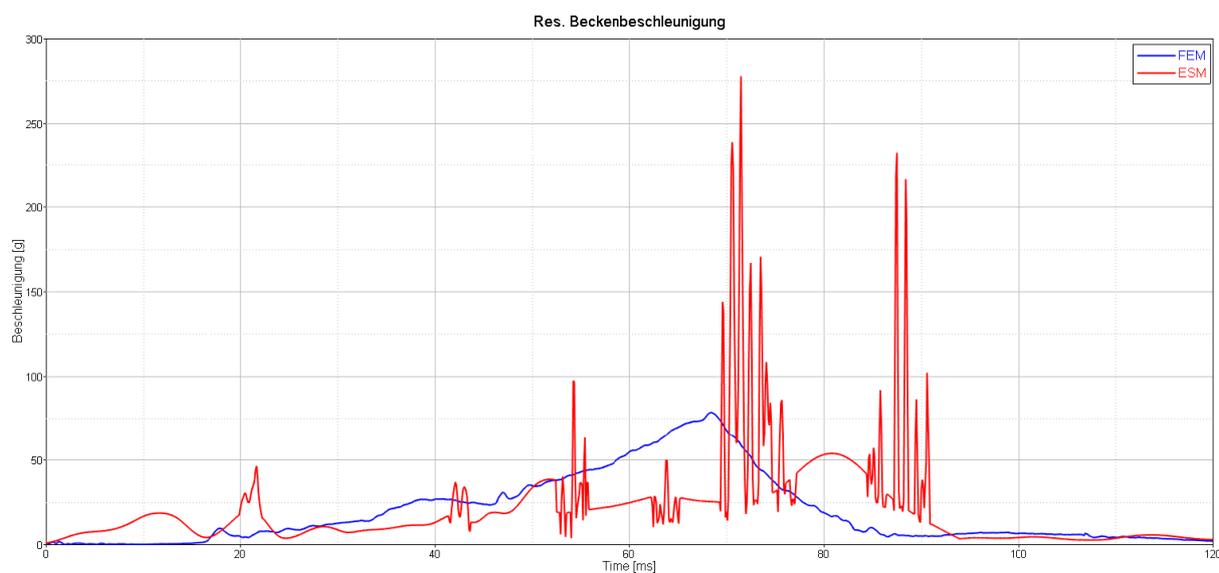
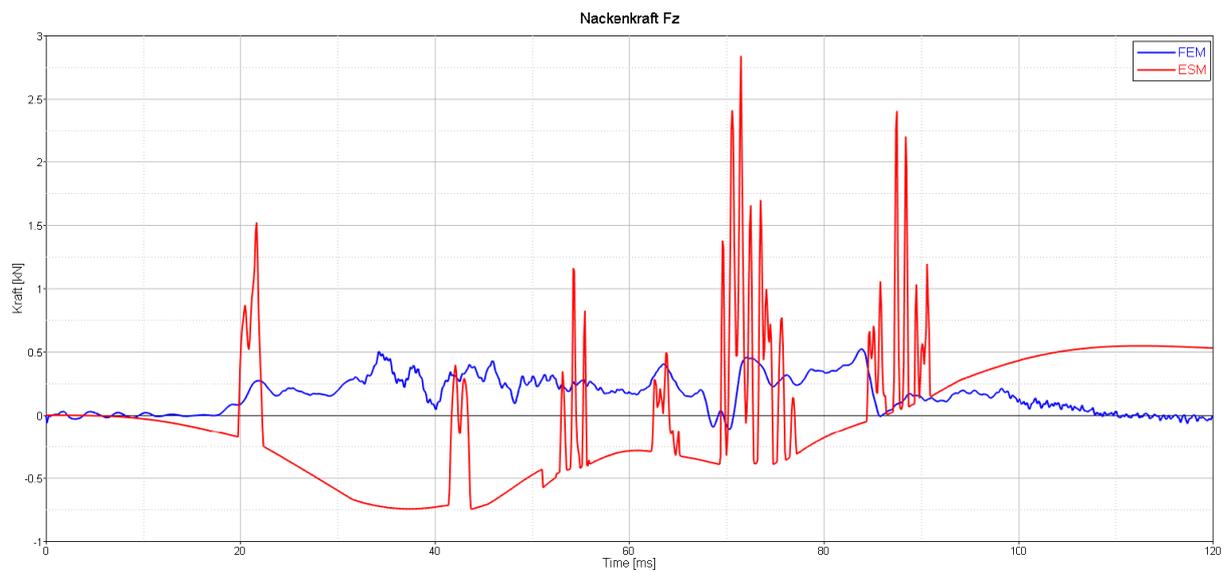
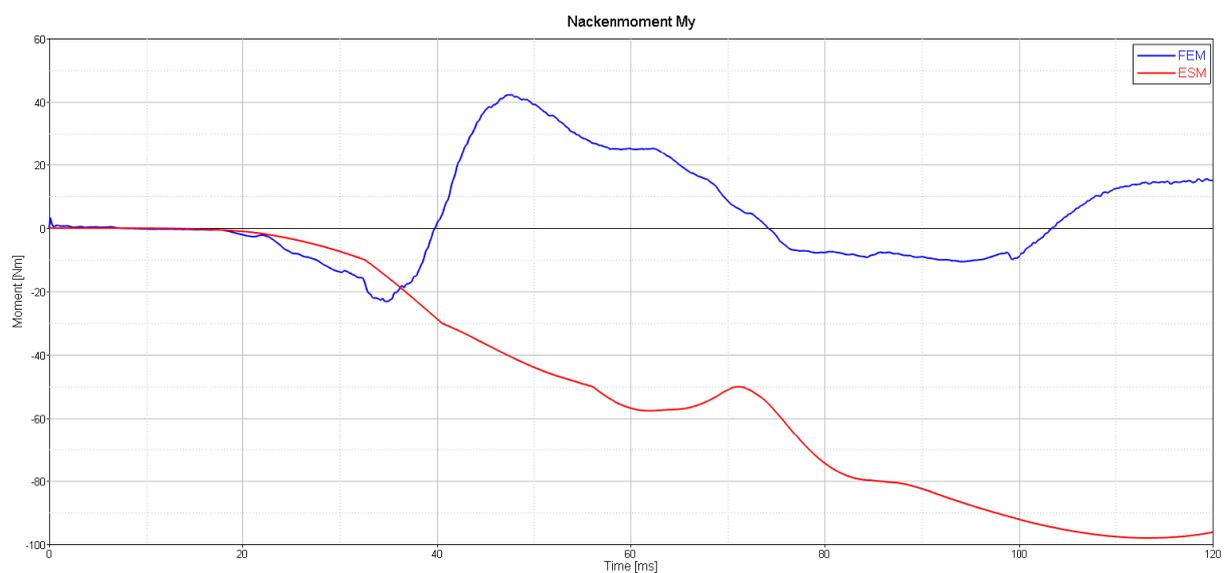


Abbildung 67: Resultierende Beckenbeschleunigung am Ersatz- & FE Modell

Die Auf- und Abwärtsbewegung des Beckens ist in der Abbildung 67 an Hand der Beckenbeschleunigung noch einmal dargestellt. Die dabei auftretenden Belastungen sind um ein Vielfaches höher als jene des FE Modells.

Abbildung 68: Nackenkraft F_z am Ersatz- & FE ModellAbbildung 69: Nackenment M_y am Ersatz- & FE Modell

Die aus der Nackenkraft und dem Nackenment resultierenden Unterschiede im Vergleich zum FE Modell, können auch beim 5% Frau Ersatzmodell auf die Nackensteifigkeit bzw. das einzelnen Drehgelenk rückgeführt werden.

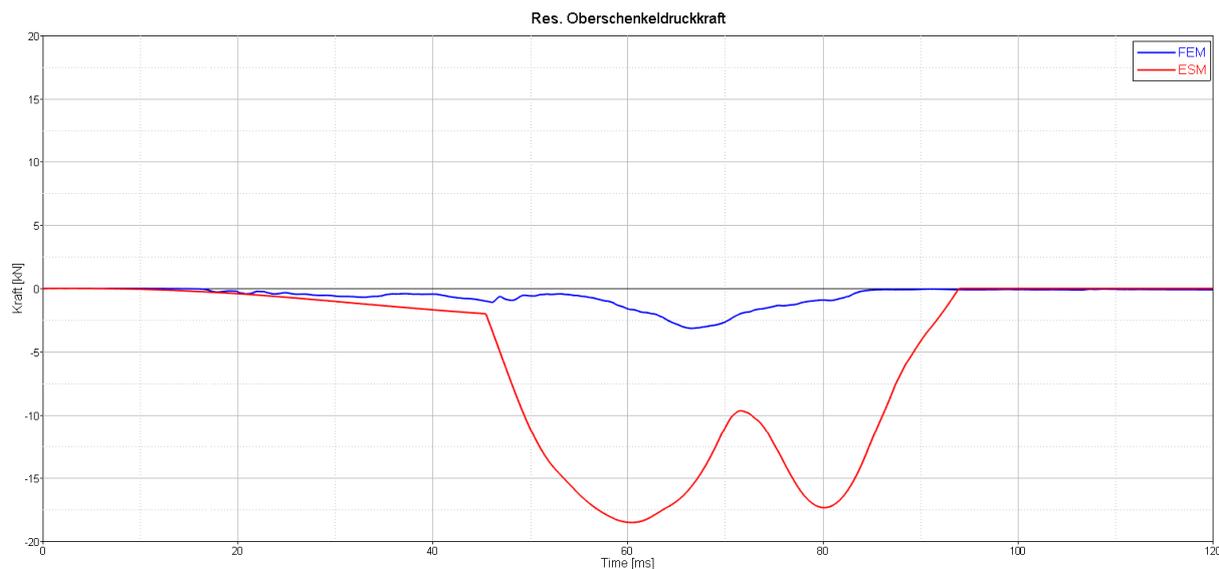


Abbildung 70: Resultierende Oberschenkeldruckkraft am Ersatz- & FE Modell

Die hohe Oberschenkelbelastung könnte aus der fehlenden Reibung zwischen dem Insassen und dem Sitz bzw. der vernachlässigten Fußabstützung im Fußraum resultieren. Ein weiterer Grund für die großen Unterschiede in der Oberschenkelkraft, könnten Abweichungen der Beckengurtkraft bezogen auf das reale Modell sein.

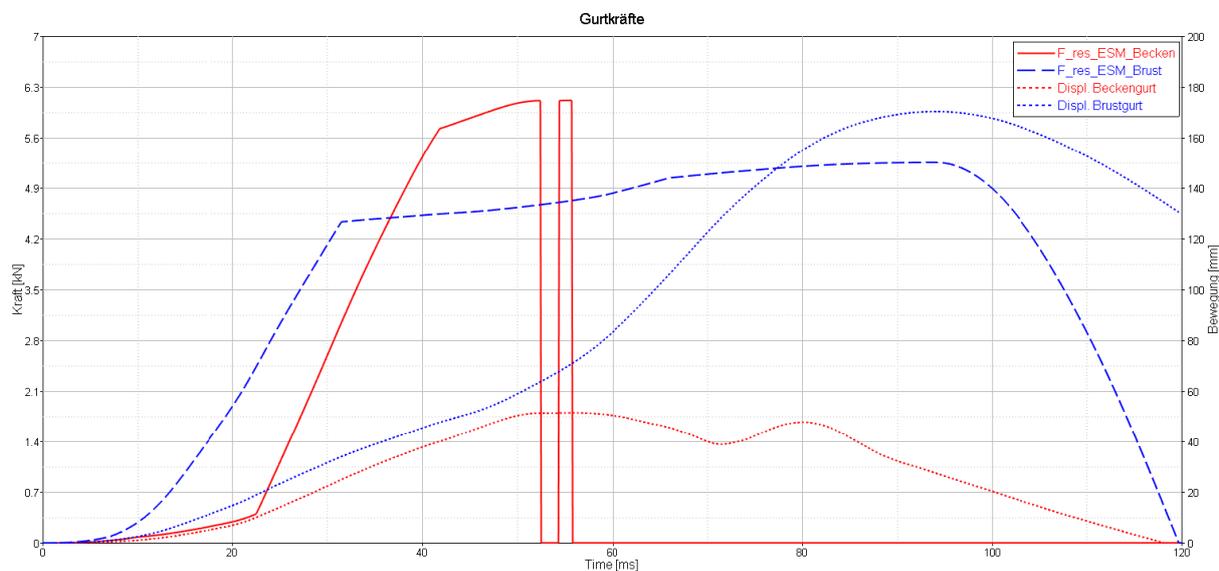


Abbildung 71: Resultierende Brust- und Beckengurtkraft am Ersatzmodell

Die in der Abbildung 71 dargestellte resultierende Brust und Beckengurtkraft und der entsprechende Gurtweg zeigen, dass die Beckengurtkraft bei ca.55ms auf null abfällt und wieder zunimmt. Dies kann auf die Entlastungskennlinie im Gurtsystem des Ersatzmodells oder eine geringfügige Rückwärtsbewegung des Beckens beim Vorverlagern geschlossen werden. Die Darstellung der resultierenden Gurtkräfte im FE Modell ist nicht möglich, da die

Gurtschlosskraft nicht im Modell gemessen wird und die Bildung der resultierenden Beckengurtkraft im FE Modell somit auch nicht möglich. Ein Vergleich der einzelnen Gurtkraftkomponenten für die Brust bzw. das Becken mit den resultierenden Gurtkräften am Ersatzmodell hat keine Aussagekraft und wird somit nicht dargestellt.

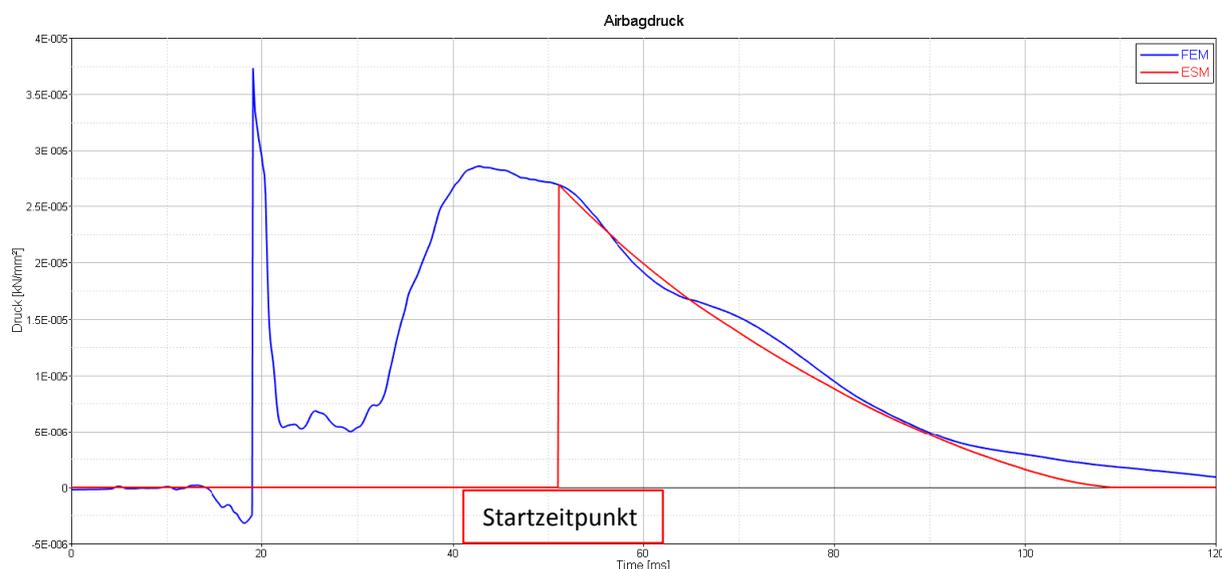


Abbildung 72: Airbaginnendruck am Ersatz- & FE Modell

Die Abbildung 72 zeigt den Verlauf der Airbagdrücke der beiden Modelle. Der Zeitraum von 0-50ms wird bei der Berechnung des Airbagmodells für das Ersatzsystem nicht berücksichtigt, da die Zündphase und die Entfaltung des Airbags für das vereinfachte Modell nicht relevant sind. Startzeitpunkt der Berechnung der Massenstromkennlinie für das Ersatzmodell ist jener Zeitpunkt, wo der einfließende Massenstrom kleiner als der ausfließende Massenstrom ist. Zu diesem Zeitpunkt ist die vollkommene Entfaltung des Airbags vollzogen und die Berechnung des Airbagdrucks zu Folge Massenausfluss ist somit möglich. Analog zum 50% Mann Ersatzmodell werden hierfür Startwerte für den Druck, das Volumen und die Gasmasse im Airbag aus dem FE- Modell verwendet. Die Berechnung des Airbagdrucks erfolgt in zwei Prozessen, dem Ausflussbedingten Druckabfall und dem Kompressionsgebundenen Druckanstieg.

Vergleicht man die Überlagerung des Ersatzmodells mit dem FE Modell in Abbildung 62 und Abbildung 63 und den entsprechenden Verlauf des Airbagdrucks in Abbildung 72 für das Ersatzmodell, ist ersichtlich, dass trotz ähnlichem Verlauf der Drücke, Unterschiede in der Bewegung der Modelle bestehen. Das bedeutet, dass die Kraft des Airbags trotz ähnlicher Druckverläufe am Ersatzmodell höher ist als beim FE Modell. Da die Kraft, aus dem Druck des Airbags und der Querschnittsfläche des Kopfes und der Brust des Insassen gebildet wird, können die Abweichungen aus der Annahmen für die projizierten Flächen der betroffenen Körperteile, resultieren. Daraus geht hervor, dass die projizierte Fläche des Kopfes und der Brust als möglicher Abstimmparameter bei der Überlagerung der beiden Modelle zu berücksichtigen ist.

7. FAZIT

Abschließend kann gesagt werden, dass das Bewegungsverhalten der Ersatzmodelle verglichen mit dem FE Modell trotz aller Vereinfachungen und Annahmen akzeptabel ist. Die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen zur Nachbildung von Belastungsgrößen und Komponenten im Ersatzmodell, sind willkürlich gewählt und schließen somit alternative Vorgehensweisen nicht aus. Die einfache Darstellung des Insassen und der Fahrzeugkomponenten bzw. die Ableitung von Belastungskurven ermöglicht die Implementierung des Ersatzmodells in ein mathematisches Modell in einer weiterführenden Diplomarbeit von Kurt Alber „Adaptive Rückhaltesysteme: Entwicklung eines Reglerkonzeptes für Rückhaltesysteme mithilfe eines vereinfachten Insassenmodells“. Durch Vorgabe von Freiheitsgraden bzw. sperren von Koordinatenrichtungen welche für die Reglerentwicklung nicht relevant sind, wird die Komplexität des mathematischen Modells in Grenzen gehalten und der Rechenaufwand verkürzt. Die abgeleiteten Belastungskennlinien für das Ersatzmodell, die von der Kraft und dem Weg bzw. der Zeit abhängig sind, dienen als Input für das mathematische Modell und beeinflussen entsprechend dessen Bewegungsverhalten.

Mit Hilfe eines gewählten Regelparameters und den bekannten Einflussgrößen aus dem Ersatzmodell, soll ein Reglerkonzept entstehen, welches die Rückhaltekräfte an die Unfallsituation anpasst und die Belastungen auf den Insassen minimiert. Die aus der Parametervariation hervorstehenden Parameter wie das konstante Gurtkraftniveau bzw. die konstante Gurtauszugsgeschwindigkeit, zeigen eine hohe Sensitivität bezüglich der Verletzungskriterien und somit ein Potenzial als mögliche Regelgrößen für den Regler.

Durch Einsatz geeigneter Aktuatorik die die notwendigen Rückhaltekräfte seitens des Gurtes und des Airbags im Millisekunden Bereich bereitstellt, soll eine bestmögliche Rückhaltung unabhängig vom Insassen ermöglichen. Ein geeigneter Regelparameter aus der Parametervariation und der entsprechende Aktuator ermöglicht die Adaption der Kräfte an das Unfallgeschehen und die Reduktion der Belastungen, die das Verletzungsrisiko für den Insassen minimieren. Neben dem Sicherheitsfaktor, spielen vor allem die Vielseitigkeit des Systems bzw. der wirtschaftliche Faktor eine bedeutende Rolle. Die Integration des Aktuators soll unabhängig vom Fahrzeugtyp bzw. Klasse ohne großen technischen bzw. finanziellen Aufwand möglich sein. Mit Hilfe eines Piezo Aktuators der die Gurtkraft in einem realen Belastungsbereich von 0-6kN innerhalb von Millisekunden bereitstellen kann, kann das Ziel einer adaptiven Regelung mit Reduktion der Gurtkräfte erreicht werden.

Die Wahl einer geeigneten Regelgröße bzw. der notwendigen Aktuatorik, erfolgt schlussendlich an Hand der gewählten Bewertungsverfahren in der Parametervariation bzw. aus dem Vergleich der beschriebenen Aktuatorysteme. Die durchgeführte Bewertung der veränderlichen Parameter mit der Sensitivitätsanalyse und die finale Bewertung der Ergebnisse durch Summenbildung, zeigt nur ein mögliches Verfahren zur Darstellung von Zusammenhängen zwischen zwei Merkmalen.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] TRW (kein Autor), „Adaptiver Gurtkraftbegrenzer,“ in *mündliche Mitteilung; nicht veröffentlicht*, 2007.
- [2] A. Dukart, U. Langer, K. Marxs, A. Stratmann und K. Wolf, „Gewichtsmessung zur gesicherten Auslösung des Beifahrerairbags- i Bolt,“ *ATZ*, 05/2004.
- [3] F. Kramer, „Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen,“ in *Biomechnik, Simulation, Sicherheit im Entwicklungsprozess*, Dresden, Deutschland, Springer 4. Auflage.
- [4] R. Lang, „Piezo Controllable LoadLimiter,“ in *mündliche Mitteilung; nicht veröffentlicht*, 05.12.2007.
- [5] Lütze S., „SBS Systems,“ TRW; *mündliche Mitteilung; nicht veröffentlicht*, 2007.
- [6] S. Zecha, „Adaptiver Frontairbag mit Transponder-Sensorik,“ *ATZ- Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 12/2003, 2003.
- [7] K. Z. Cong Wang, „Concept study of adaptive seatbelt load limiter using magnetorheological fluid; Paper 09-0081,“ in *ESV Konferenz*, Stuttgart, 2009.
- [8] Daimler AG, „<http://media.daimler.com>,“ Mercedes Benz; Ablagenummer: 09C307_04, 11 05 2009. [Online]. [Zugriff am 16 03 2016].
- [9] J. Wiesinger, „<http://www.kfztech.de/kfztechnik/sicherheit/airbag/gurte.htm>,“ 06 10 2013. [Online].
- [10] „http://web.iitd.ac.in/~achawla/public_html/736/11-Crash_Safety_practices.pdf,“ [Online]. [Zugriff am 06 03 2017].
- [11] TAKATA (kein Autor), „Spray Cooling Technology,“ in *mündliche Mitteilung; nicht veröffentlicht*, 04/2008.
- [12] Humanetics Innovative Solutions, „Humanetics Innovative Solutions,“ 2016. [Online]. Available: www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/frontal-impact/hybrid-iii-50m.
- [13] GESAC, „BIOMECHANICAL RESPONSE REQUIREMENTS OF THE THOR NHTSA ADVANCED FRONTAL DUMMY,“ General Engineering and Systems Analysis Company, Inc, 125 Orchard Drive, Boonsboro, MD 21713; Report No: GESAC-05-03, 03/2005.

- [14] Gross, Hauger, Schröder und Wall, Technische Mechanik 1, Springer 11. Auflage, 2011.
- [15] H. Eichseder und P. Sturm, "Thermodynamik 1 Vorlesungsskript", Graz, 2012.
- [16] „<https://www.safetywissen.com/#/requirement/>,“ [Online]. [Zugriff am 06 03 2017].
- [17] P. Theden und H. Colman, „<https://www.qz-online.de/>,“ Poket Power, 11 2013. [Online].
- [18] B. Eickhoff, „Analyse, Mechanismen und Reduktion gurtinduzierter Thoraxbelastungen im Frontalcrash,“ Hamburg, 2012; Dissertation.

9. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Rückhaltesystemkomponenten [8].....	9
Abbildung 2: Crash- Vorschriften für USA & Europa [10].....	11
Abbildung 3: Vergleich Euro NCAP (links) & US NCAP (rechts) [16].....	12
Abbildung 4: Schutzkriterien nach Euro NCAP Hybrid III 50% Male [10]	13
Abbildung 5: Stufig schaltbarer Kraftbegrenzer [1]	14
Abbildung 6: Mehrstufig gesteuerte Gurtkraft [5].....	15
Abbildung 7: Piezo LL [4]	16
Abbildung 8: Möglicher Regelkreis des Piezo LL	17
Abbildung 9: Betriebsmodi von MRF [7]	17
Abbildung 10: Retraktor mit MR- Dämpfer [7]	18
Abbildung 11: Mögliche Gurtkraftverläufe mit MF- LL [7]	18
Abbildung 12: Versuchsergebnisse Entfaltungsgeschwindigkeit und Sensorsignal [6].....	20
Abbildung 13: Prinzip Schema 3A- System [6]	21
Abbildung 14: Dummy- Kinematik bei Standard & 3A- Airbag [6]	21
Abbildung 15: Euro NCAP mit 50%- Mann Dummy	24
Abbildung 16: Gurtkraft für Brust und Becken für verschiedene Niveaus	25
Abbildung 17: Brusteindrückung in Abhängigkeit der konst. Gurtkraft.....	26
Abbildung 18: Brusteindrückung für versch. Gurtkraftniveaus	27
Abbildung 19: Formen der Korrelation [18].....	28
Abbildung 20: Normierte Brusteindrückung.....	32
Abbildung 21: FE- Basismodell für den Hybrid III 50% Mann Dummy	39
Abbildung 22: Basis & Ersatzmodell für den 50% Mann	40
Abbildung 23: Nackenmodell 50% Mann Ersatz Modell	45
Abbildung 24: Momenten- Drehwinkelkennlinie Thor [13]	45
Abbildung 25: Momenten- Drehwinkelkennlinie für 50% Mann & 5% Frau Ersatzmodell	46
Abbildung 26: Sitzkomponente im Ersatzmodell	47
Abbildung 27: Sitzsteifigkeit für das 50% Mann & 5% Frau Ersatzmodell	48
Abbildung 28: Knie- IP- Kontakt Ersatzmodell	49
Abbildung 29: KniestEIFigkeitscharakteristik für das 50% Mann & 5% Frau Ersatzmodell	50
Abbildung 30: Brust- & Beckengurtkraft im Ersatzmodell	51
Abbildung 31: Kraft- Weg- Charakteristik des Retraktors im Hybrid III 50% Mann Basismodell	52
Abbildung 32: Gurtkraftkomponenten 3-Punkt-Gurt [18]	53
Abbildung 33: Vereinfachtes Insassen- Gurt- Modell des Ersatzmodells.....	53
Abbildung 34: Schultergurt- Beckengurtwinkel	55
Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Weg und Gurtkraft.....	56
Abbildung 36: Verhältnis Vorverlagerungsweg Brust zu Becken Basismodell	57
Abbildung 37: Resultierende Gurtkraft auf Brust und Becken am Basismodell.....	58
Abbildung 38: Resultierende Brust- Beckengurtkraft für das 50% Mann Ersatzmodell	59
Abbildung 39: Resultierende Brust- Beckengurtkraft für das 5% Frau Ersatzmodell.....	59
Abbildung 40: Druck- Volumenverlauf im Basismodell.....	60
Abbildung 41: Thermodynamischer Ansatz für den Airbag im Ersatzmodell.....	61
Abbildung 42: Kontakt Insasse mit Airbag	62
Abbildung 43: Thermodynamisches System der Airbagkompression im Ersatzmodell	63
Abbildung 44: Vergleich Druck- Volumenverlauf FE Modell vs. Ersatzmodell	64
Abbildung 45: Kraftaufteilung vom Airbag auf Kopf und Brust im Basismodell	65
Abbildung 46: Modellüberlagerung bei t_0 und t_0+85ms für das 50% Mann Modell	65
Abbildung 47: Euro NCAP & U.S.NCAP Puls	66
Abbildung 48: Vergleich Trajektorien Ersatzmodell vs. Basismodell	68
Abbildung 49: Airbagperformance des Ersatz- und Basismodells.....	69
Abbildung 50: Resultierende Gurtkraft auf Brust und Becken im Ersatz- & Basismodell	69
Abbildung 51: Überlagerung Ersatz- & FE Modell bei t_0 und bei $t_0 + 50ms$	70

Abbildung 52: Überlagerung Ersatz- & FE Modell bei $t_0+100ms$ und bei $t_0 + 150ms$	70
Abbildung 53: Optimierung Nackenkinematik des Ersatzmodells und Vergleich zwischen neu(links) & alt (rechst)	71
Abbildung 54: Optimierter Drehpunkt im Nacken und Vergleich zwischen neu (links) und alt (rechts) bei $t_0+100ms$	71
Abbildung 55: Kopftrajektorie nach der Optimierung der Position des Drehgelenks.....	72
Abbildung 56: Resultierende Kopfbeschleunigung am Ersatz- und FE Modell	73
Abbildung 57: Resultierende Brustbeschleunigung am Ersatz- und FE Modell	74
Abbildung 58: Resultierende Brustbeschleunigung am Ersatz- und FE Modell	74
Abbildung 59: Nackenkraft F_z am Ersatz- und FE Modell	75
Abbildung 60: Nackenmoment M_y am Ersatz- und FE Modell	75
Abbildung 61: Oberschenkeldruckkraft am Ersatz- und FE Modell	76
Abbildung 62: Überlagerung bei t_0 und bei $t_0 + 40ms$	77
Abbildung 63: Überlagerung bei $t_0 +80ms$ und bei $t_0 + 120ms$	77
Abbildung 64: Trajektorien für das Ersatz- & FE Modell für Kopf, Brust und Becken	78
Abbildung 65: Resultierende Kopfbeschleunigung am Ersatz- & FE Modell.....	78
Abbildung 66: Resultierende Brustbeschleunigung am Ersatz- & FE Modell.....	79
Abbildung 67: Resultierende Beckenbeschleunigung am Ersatz- & FE Modell.....	79
Abbildung 68: Nackenkraft F_z am Ersatz- & FE Modell	80
Abbildung 69: Nackenmoment M_y am Ersatz- & FE Modell.....	80
Abbildung 70: Resultierende Oberschenkeldruckkraft am Ersatz- & FE Modell.....	81
Abbildung 71: Resultierende Brust- und Beckengurtkraft am Ersatzmodell	81
Abbildung 72: Airbaginnendruck am Ersatz- & FE Modell	82

10. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Parametermatrix	23
Tabelle 2: Verletzungskriterien	25
Tabelle 3: Gurtkraft & Brusteingdrückung für Hybrid III 50% Mann Dummy	28
Tabelle 4: Bezugswerte der Verletzungskriterien	29
Tabelle 5: Bezugswerte der Variationsparameter	30
Tabelle 6: Normiertes Gurtkraftniveau und normierte Brusteingdrückung für den Hybrid III 50% Mann Dummy	31
Tabelle 7: Korrelationsmatrix für das Hybrid III 50% Mann Insassenmodell	35
Tabelle 8: Sensitivitätsmatrix für das Hybrid III 50% Mann Insassenmodell.....	36
Tabelle 9: Korrelationsmatrix.....	36
Tabelle 10: Gewichtsverteilung am 50% Mann Dummy [12].....	42
Tabelle 11: Gewichtsverteilung für das 50% Mann Ersatzmodell.....	43
Tabelle 12: Gewichtsverteilung am 5% Frau Dummy [12].....	43
Tabelle 13: Gewichtszusammensetzung für das 5% Frau Ersatzmodell	44
Tabelle 14: Vergleichsgrößen für die Validierung des Ersatzmodells	67

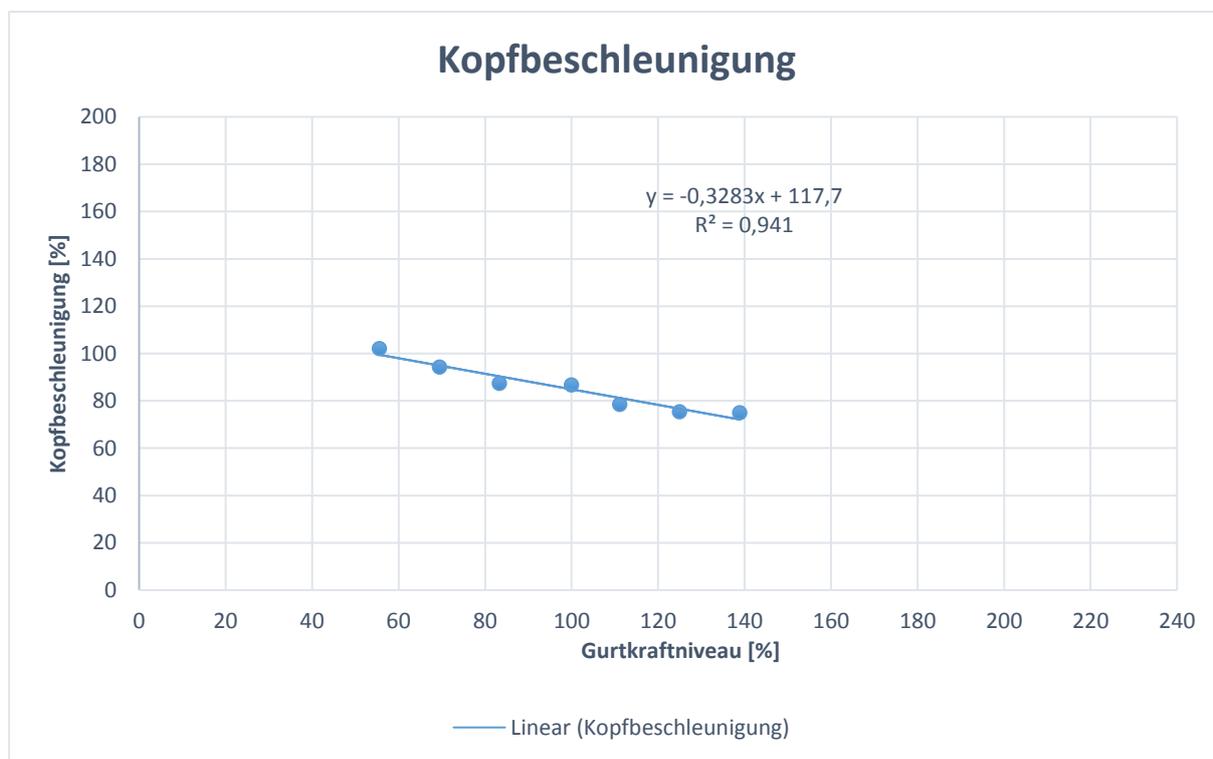
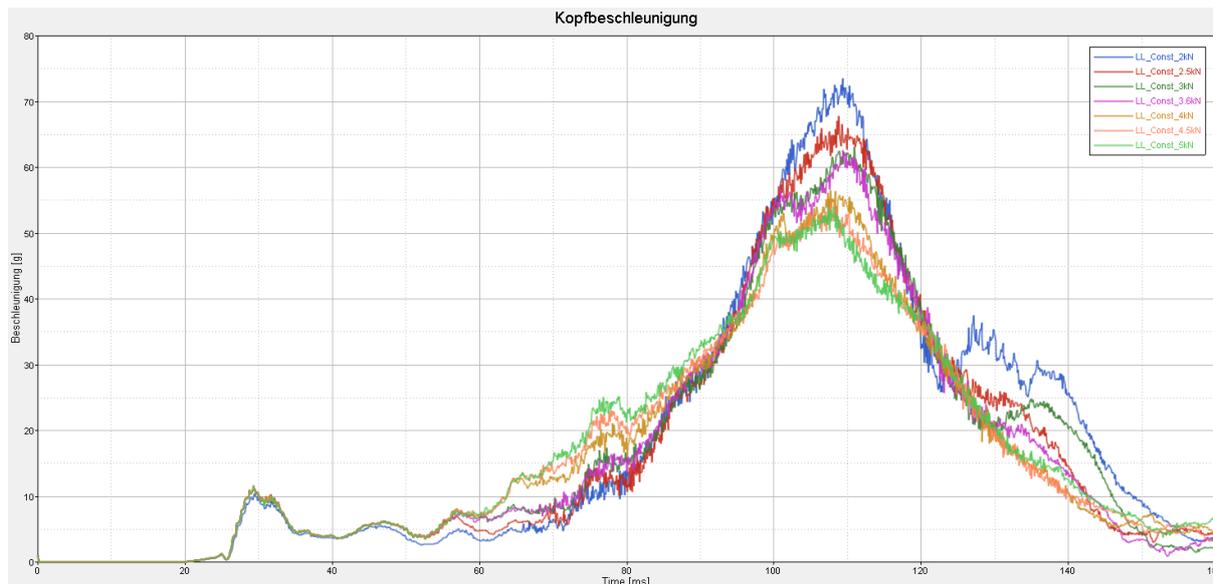
11. FORMELVERZEICHNIS

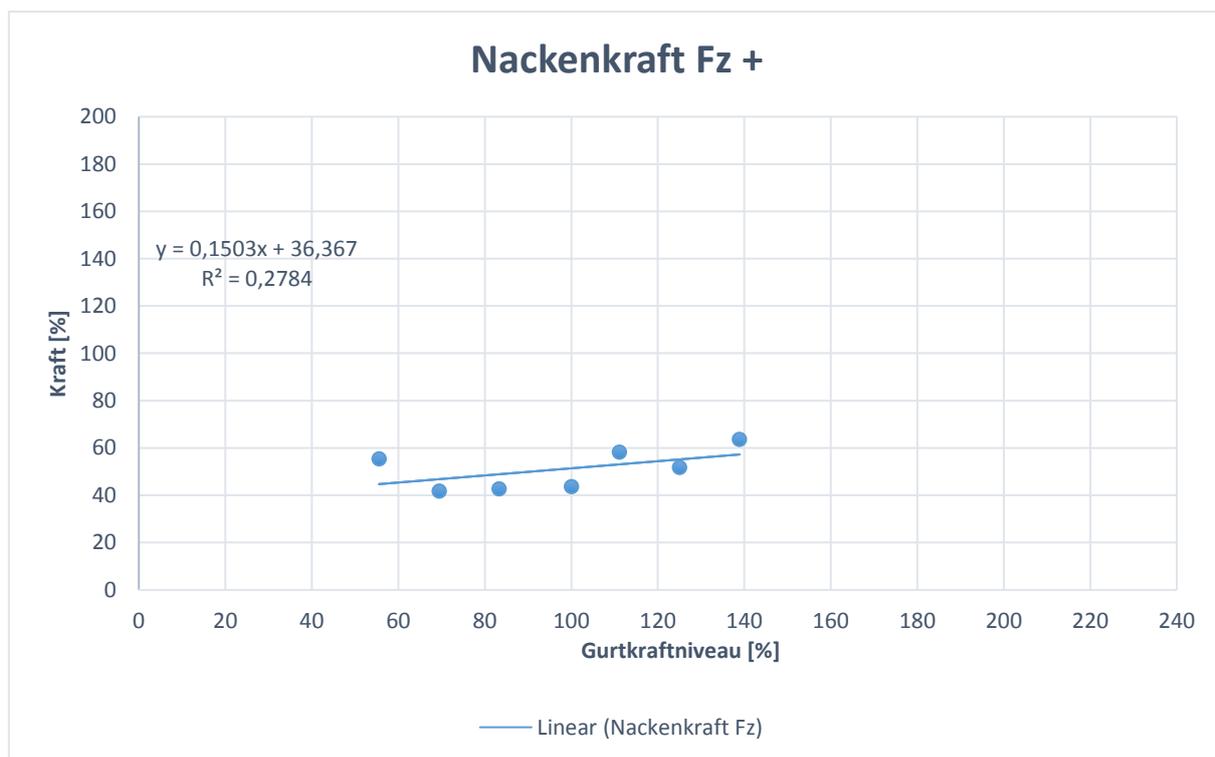
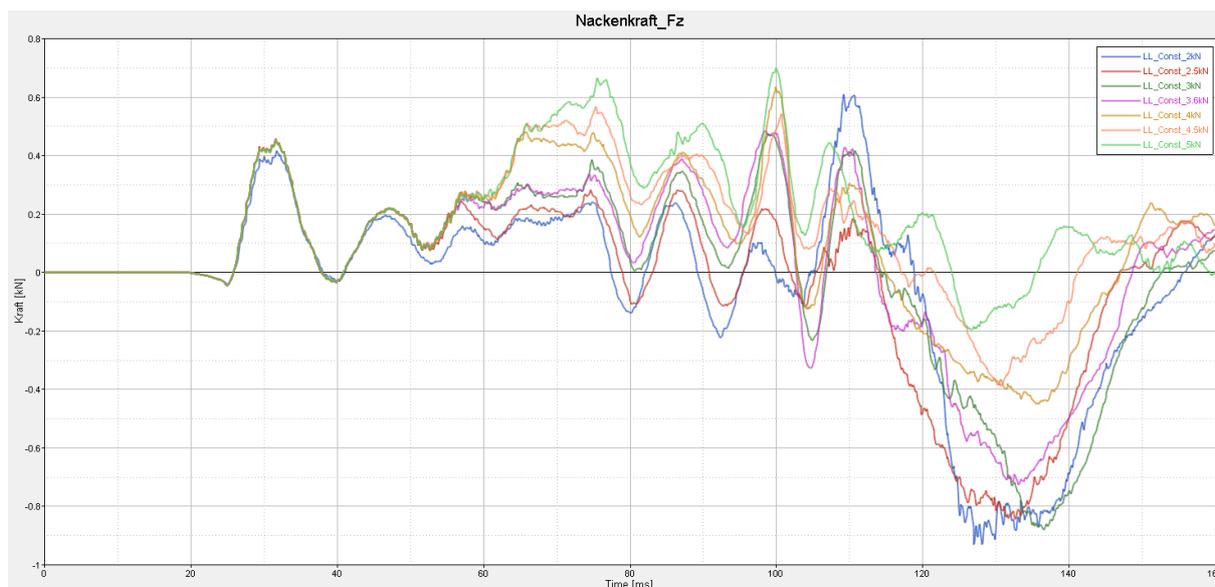
Formel 1: Normierung der Variationsparameter	30
Formel 2: Normierung der Belastungsgrößen.....	31
Formel 3: Steigung der Korrelationsgeraden	32
Formel 4: Mittelwerts Koordinate X_m	32
Formel 5: Mittelwerts Koordinate Y_m	32
Formel 6: Steigung der Regressionsgeraden.....	33
Formel 7: Allgemeine Geradengleichung.....	33
Formel 8: Korrelationsfaktor Berechnung	33
Formel 9: Zusammenhang zwischen Korrelationsfaktor K und Bestimmtheitsmaß R.....	33
Formel 10: Eytelwein- Gleichung zur Berechnung von Seilkräften	54
Formel 11: Zusammenhang zwischen Gurtweg und Kraft	56
Formel 12: Zusammenhang zwischen Brust- und Beckenweg.....	57
Formel 13: Cosinus Satz zur Berechnung der resultierenden Gurtkraft	58
Formel 14: Ausflussgleichung aus der Strömungsmechanik.....	61
Formel 15: Massenberechnung zu einem Zeitpunkt t	62
Formel 16: Ideale Gasgleichung der Thermodynamik	62
Formel 17: Airbag Volumenberechnung nach der Kompression	63
Formel 18: Isentropengleichung der Thermodynamik.....	63

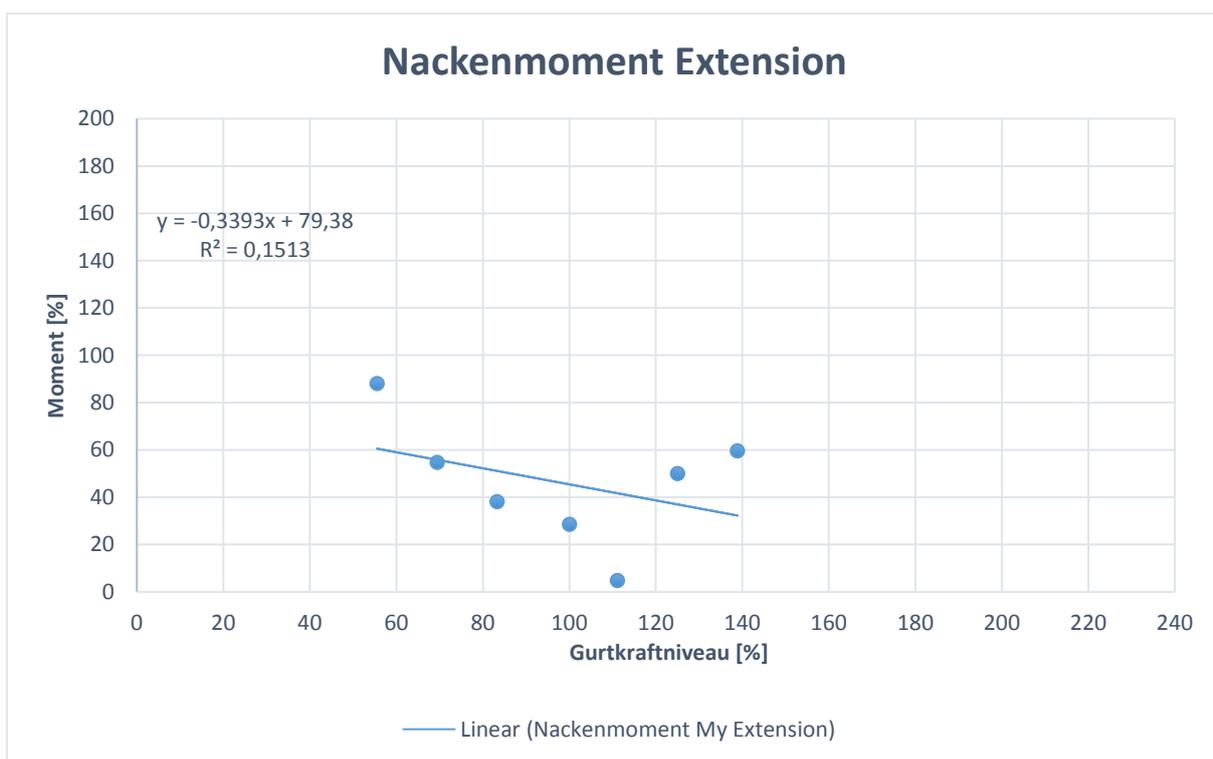
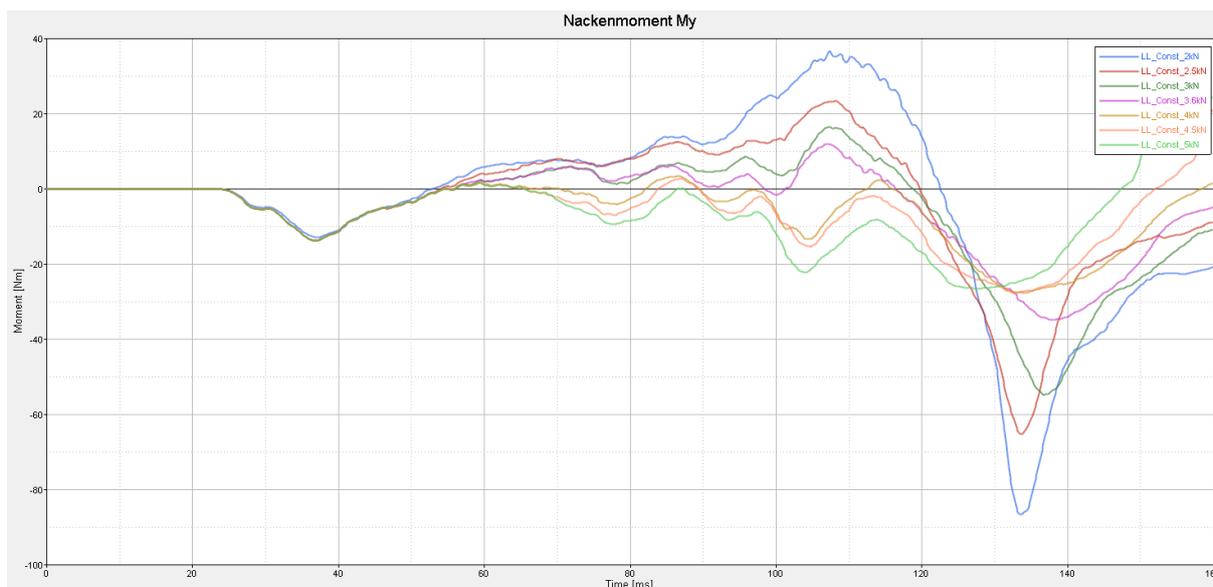
12. ANHANG

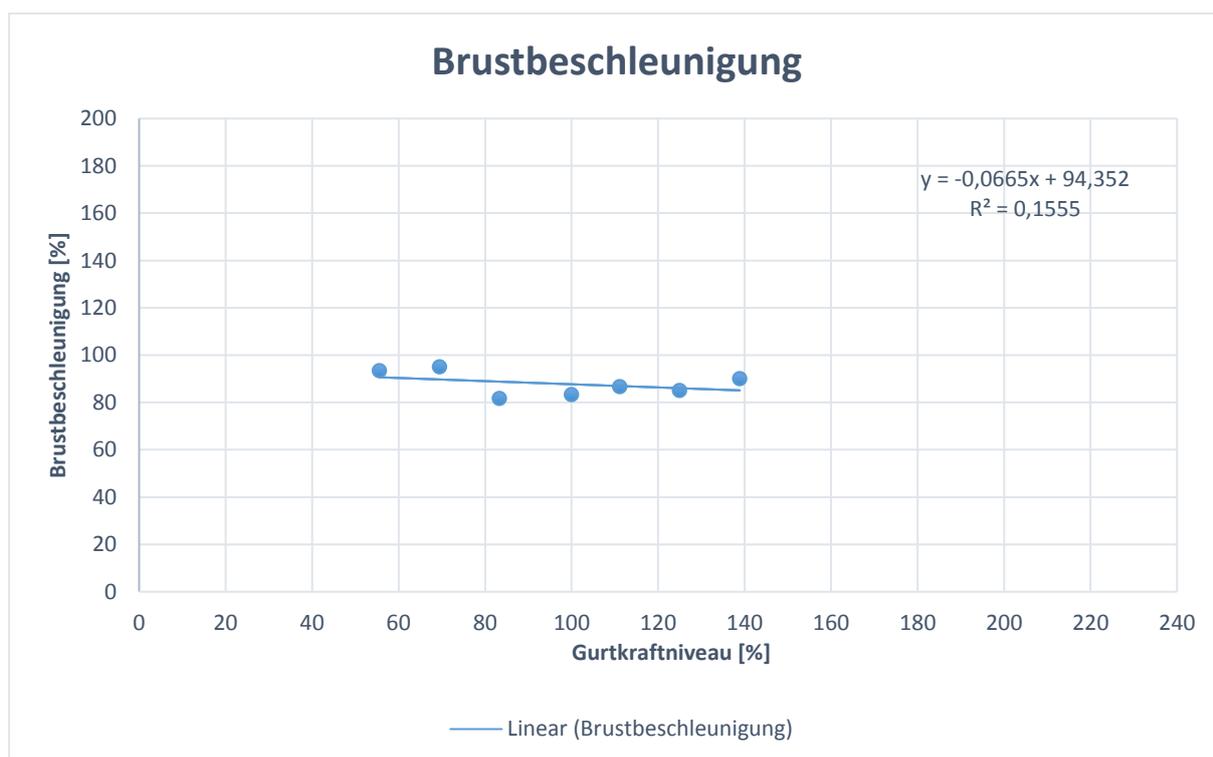
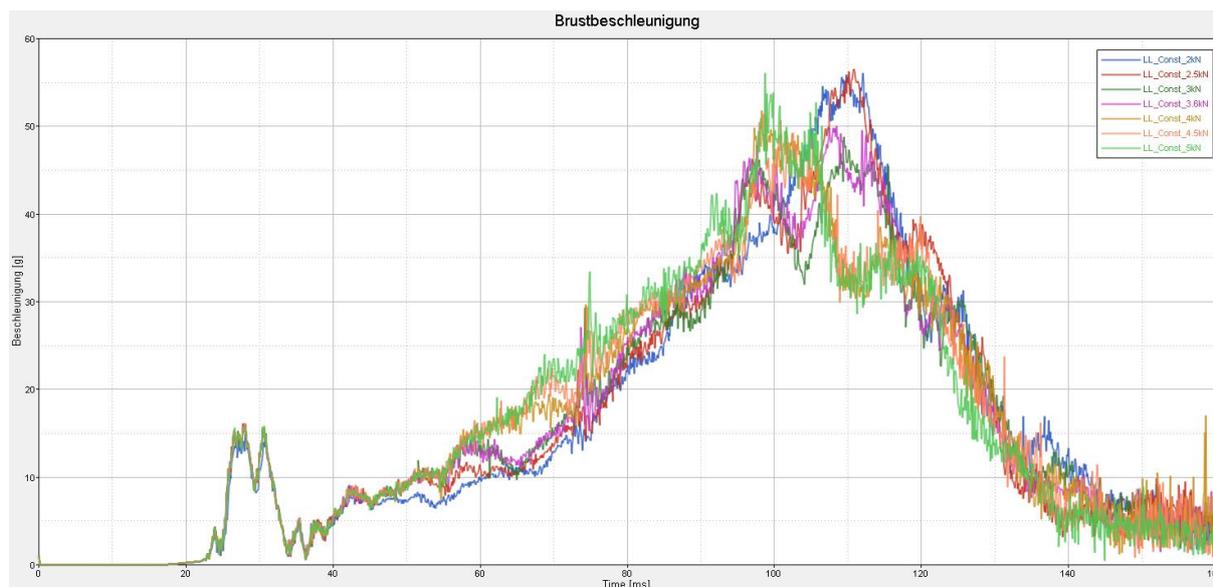
12.1 Ergebnisse der Parametervariation für den Hybrid 50% Mann

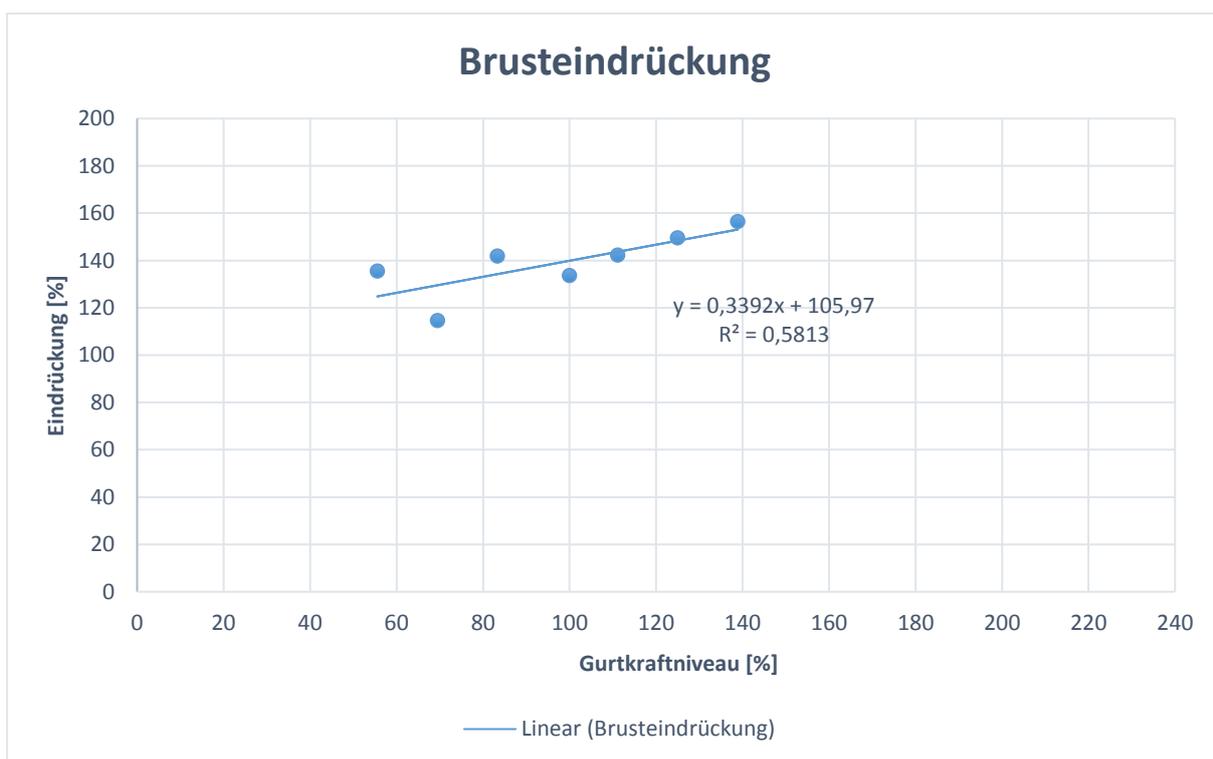
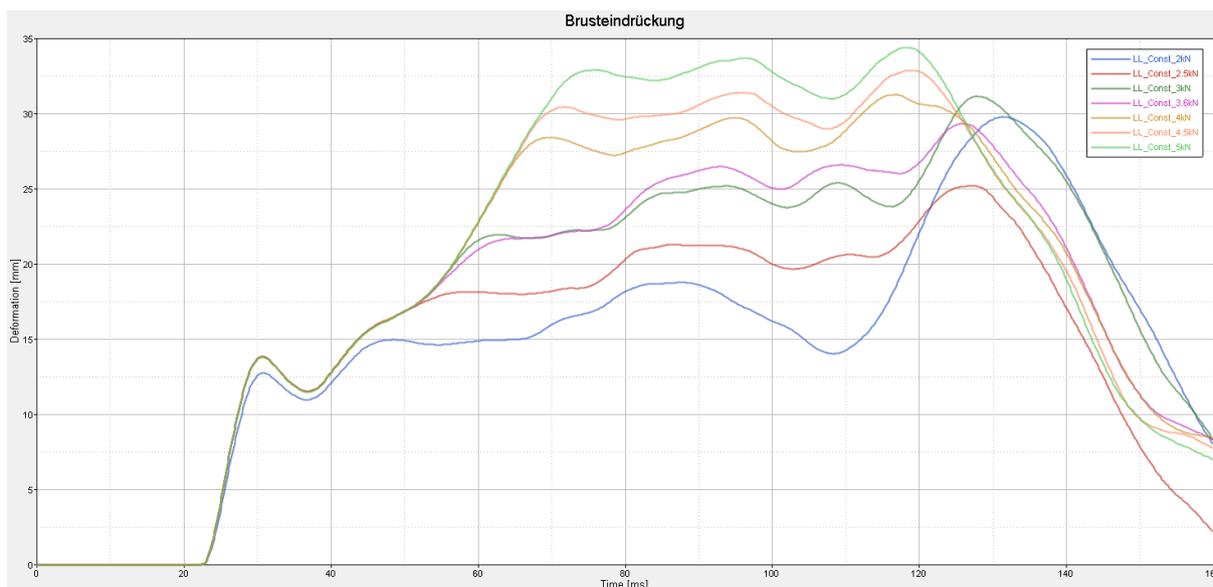
Variation der konstanten Gurtkraft im Bereich von 2-5kN und einer Schrittweite von 0,5kN

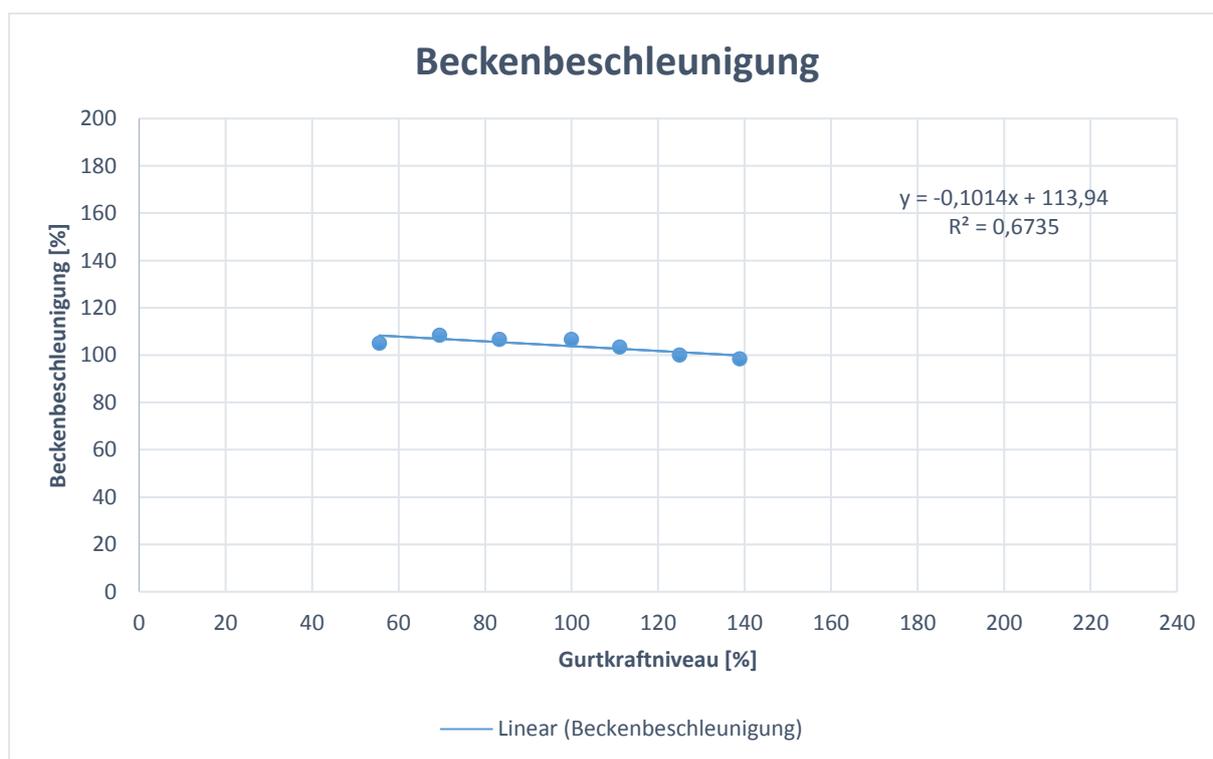
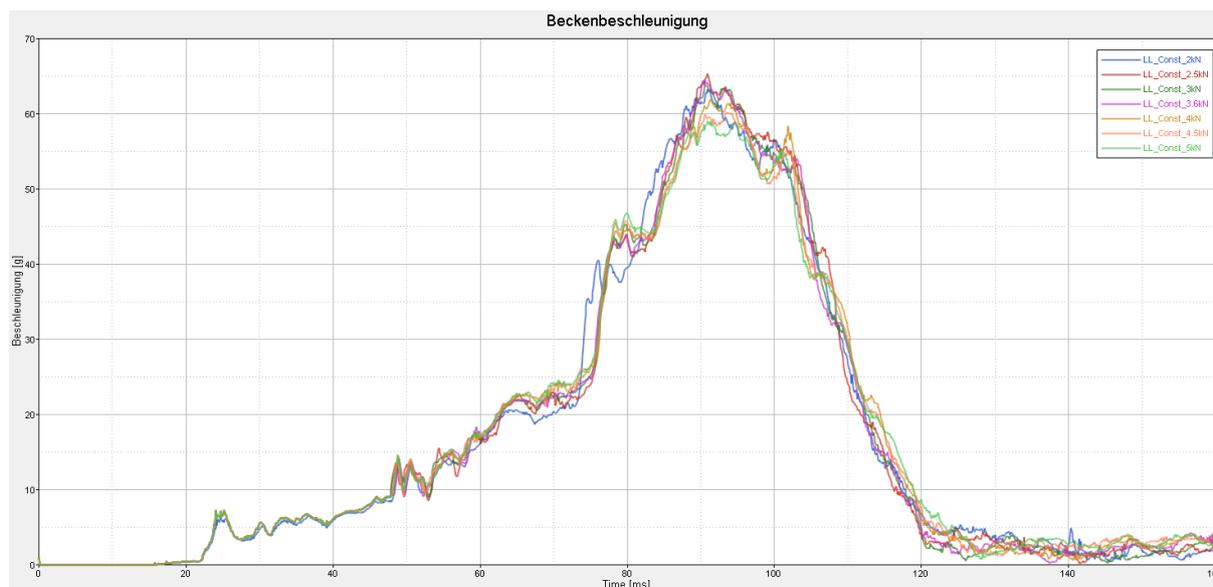


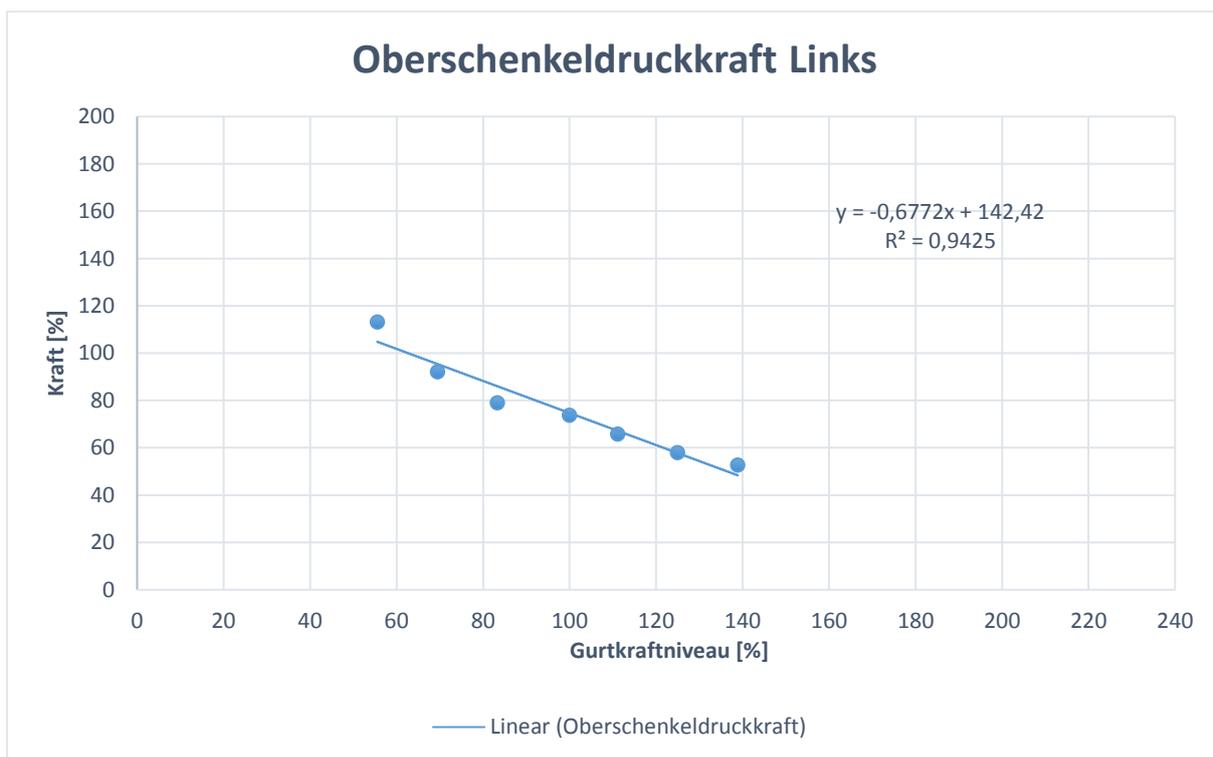
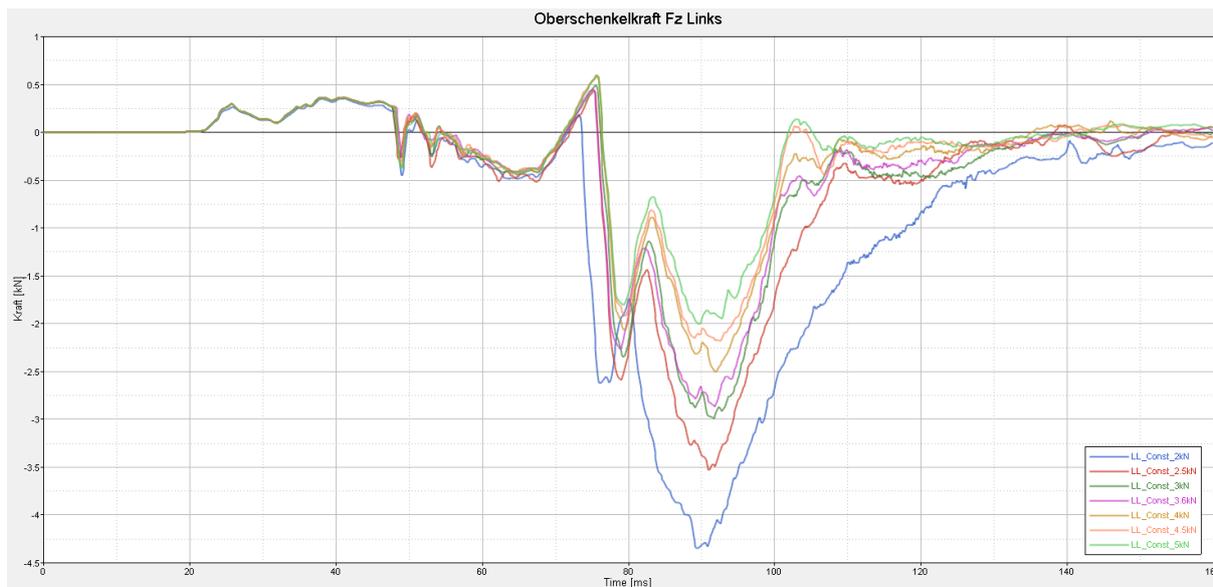


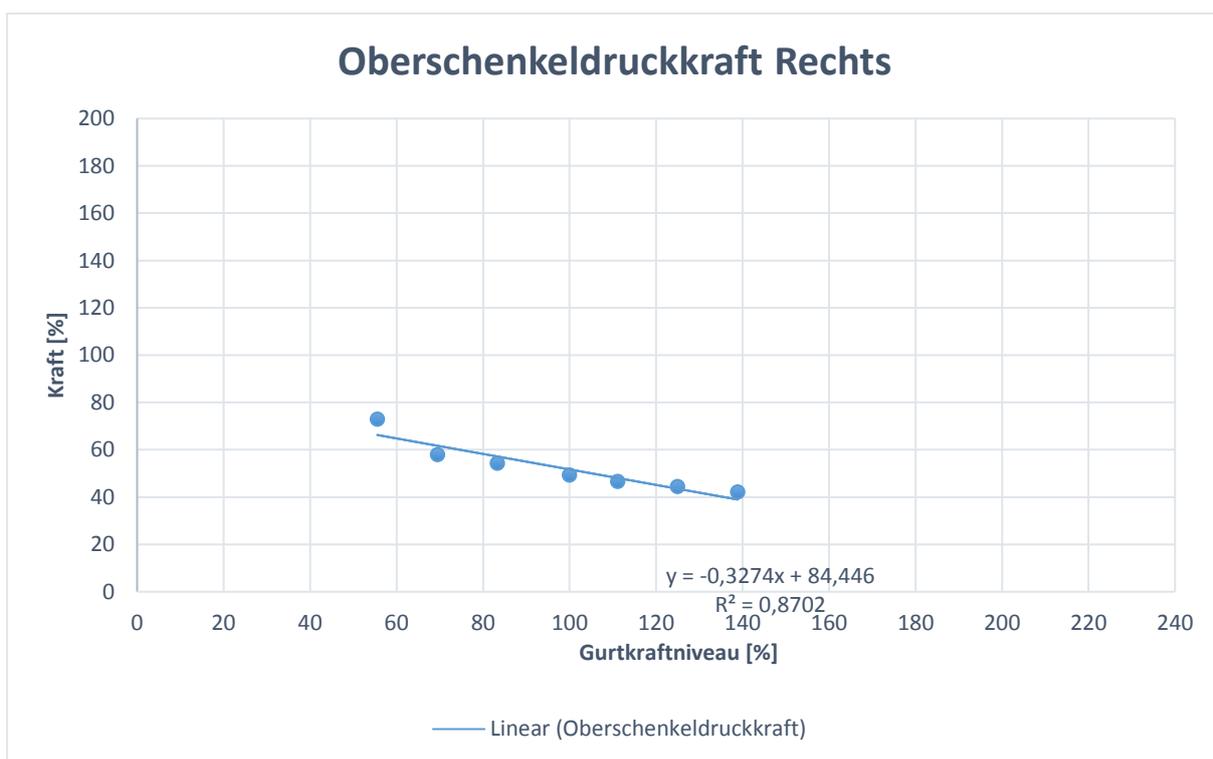
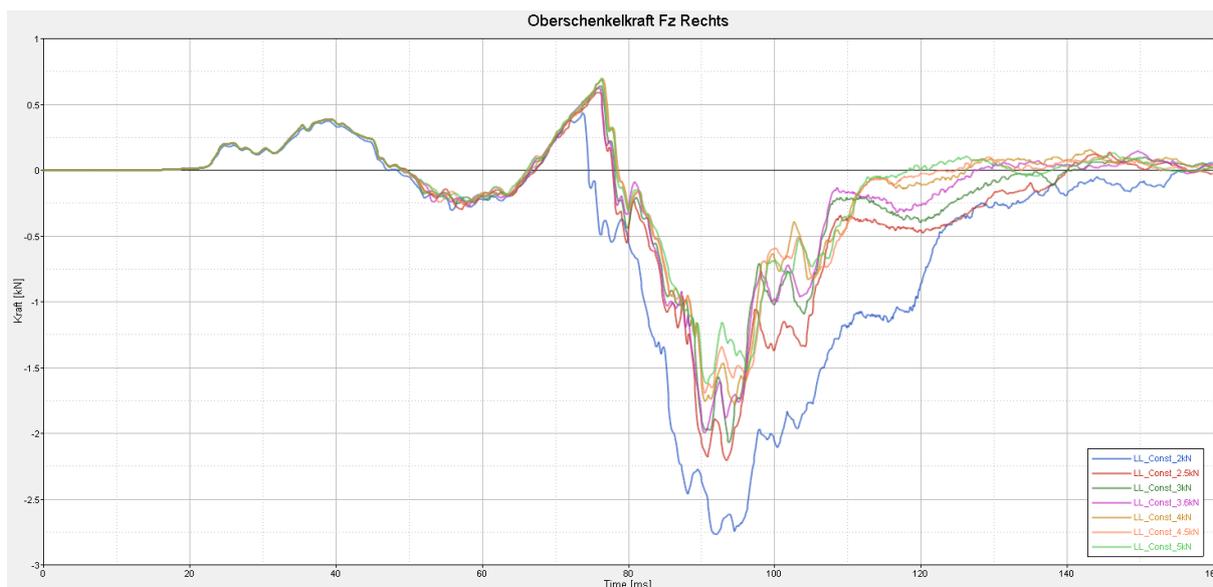




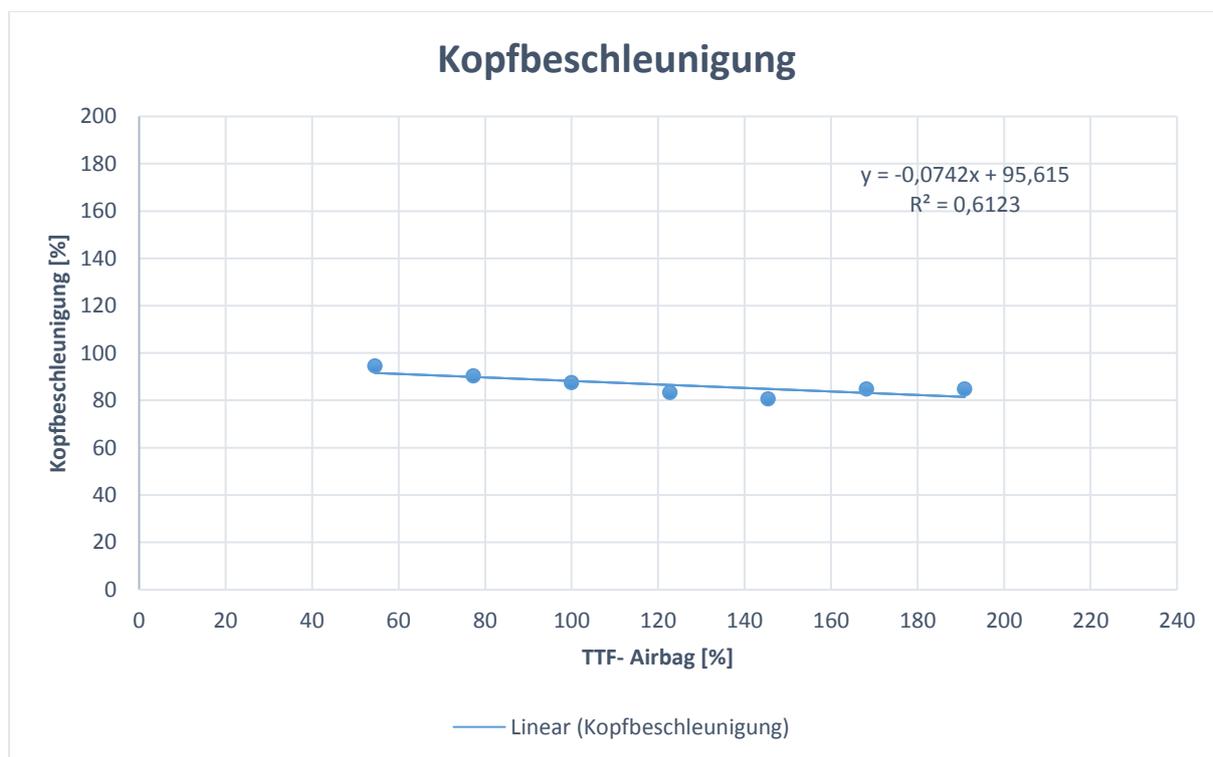
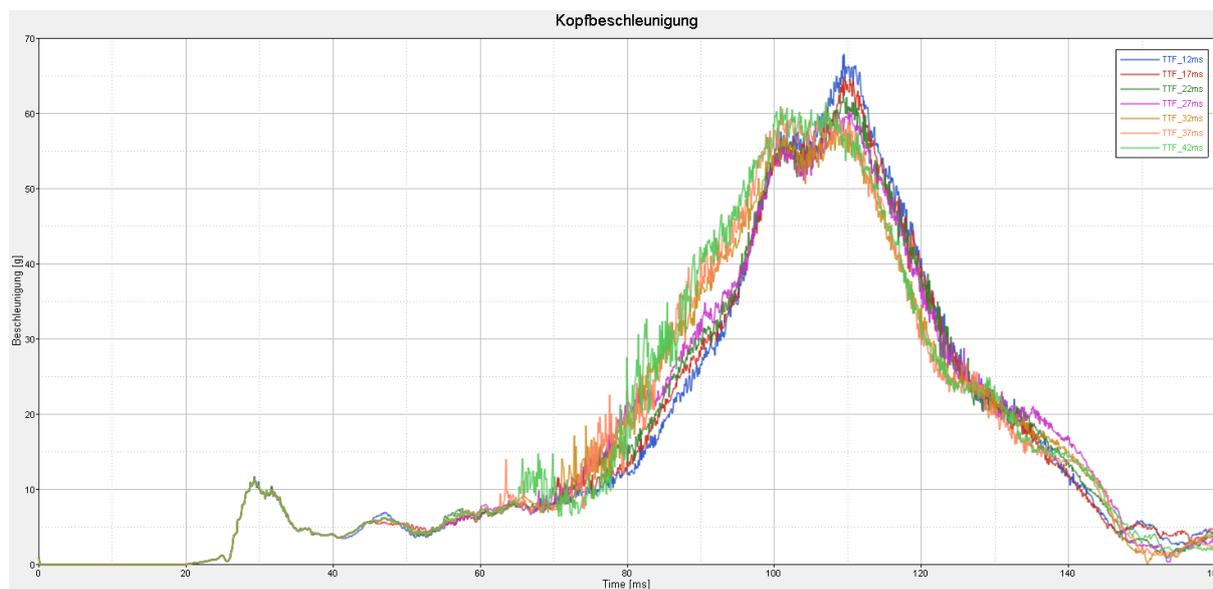


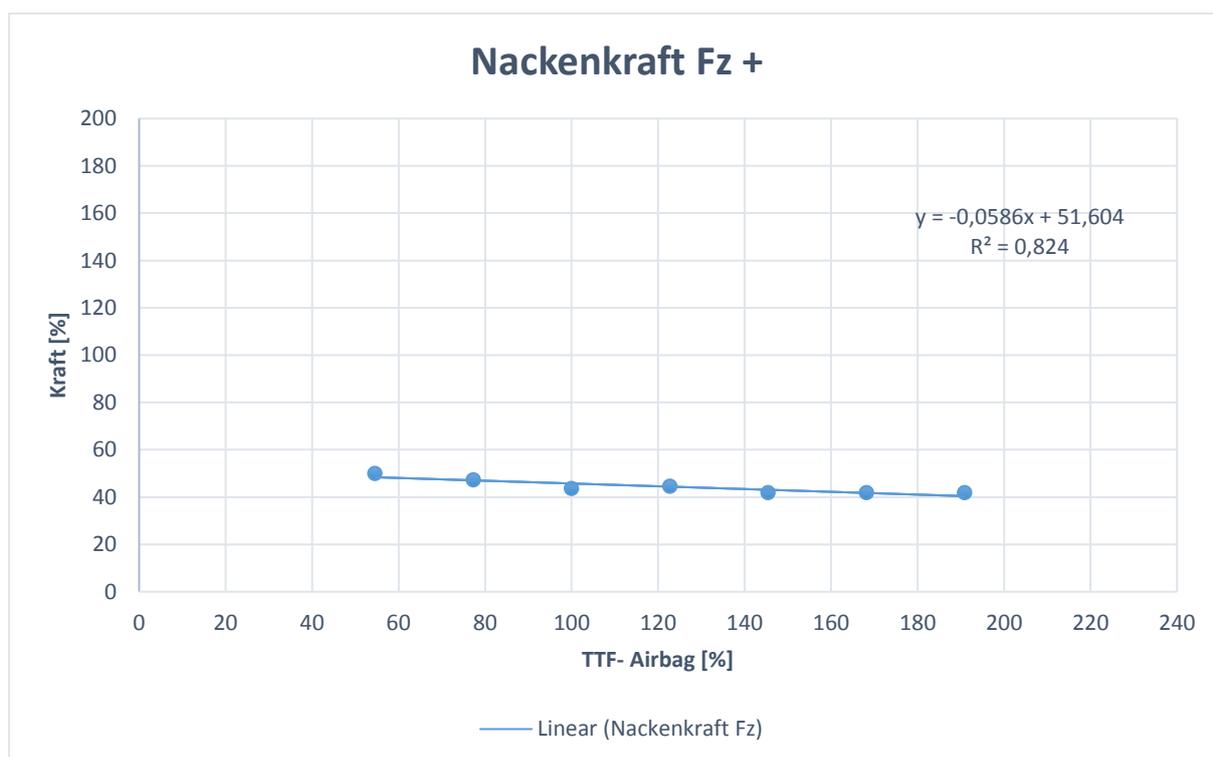
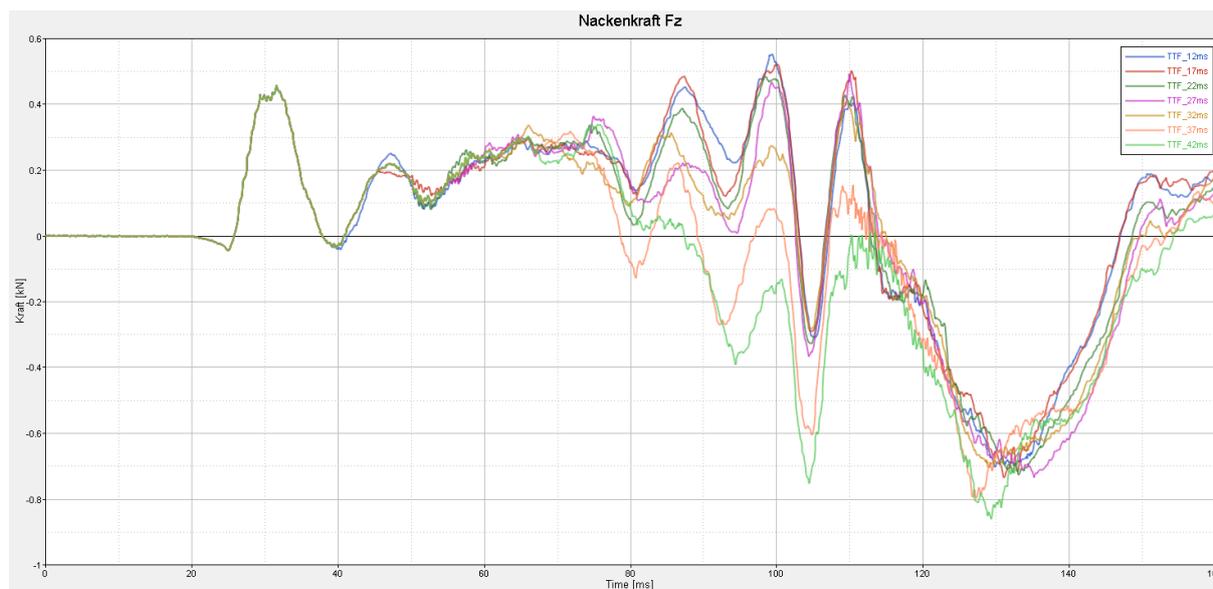


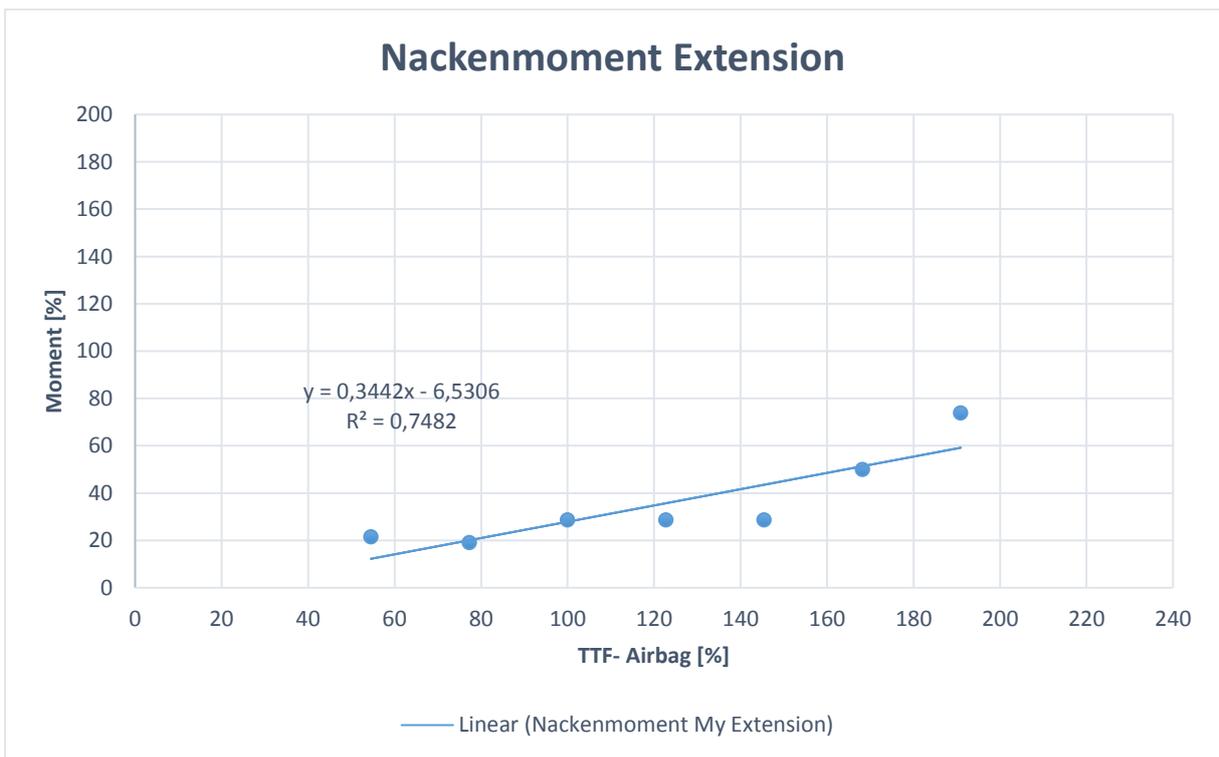
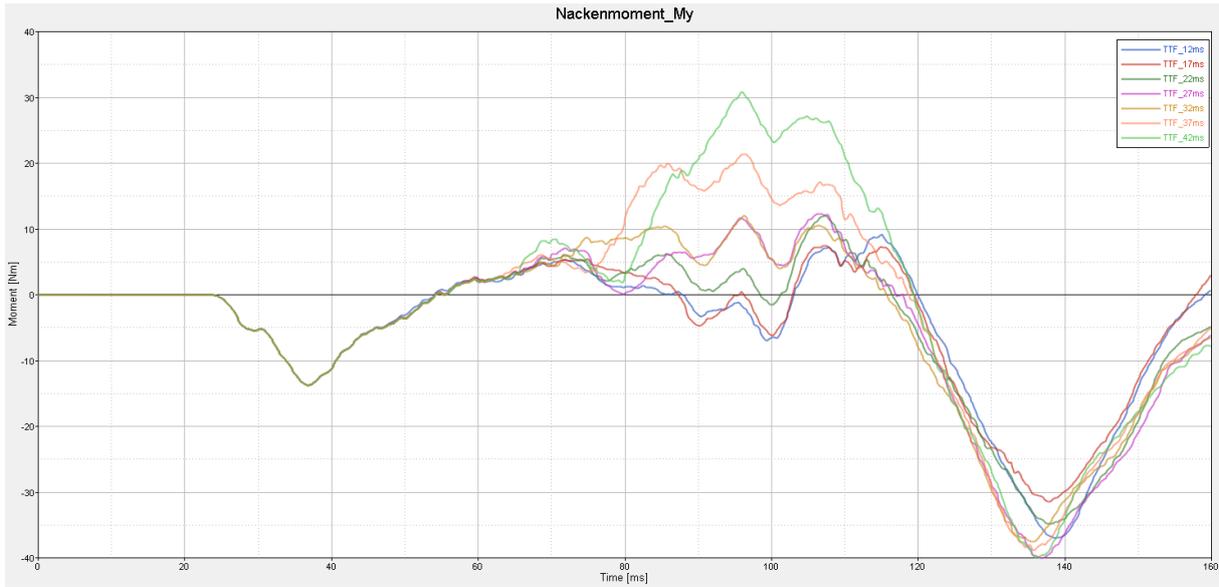


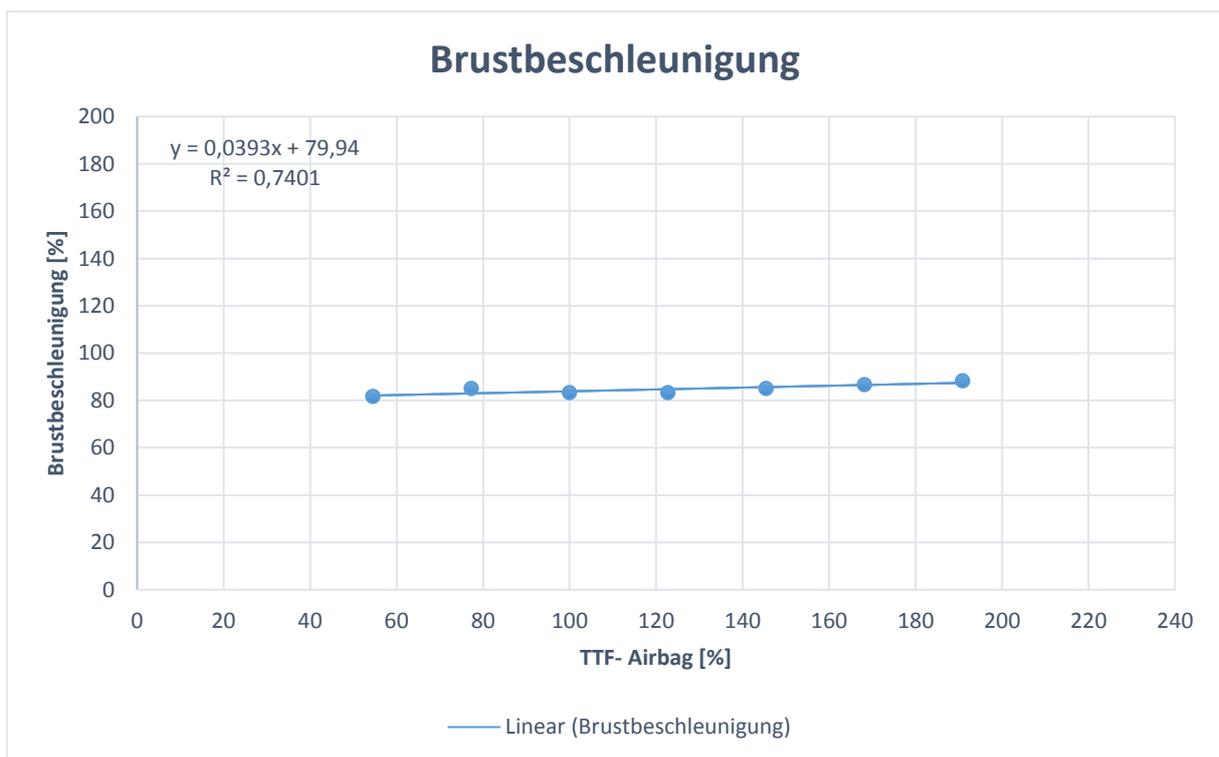
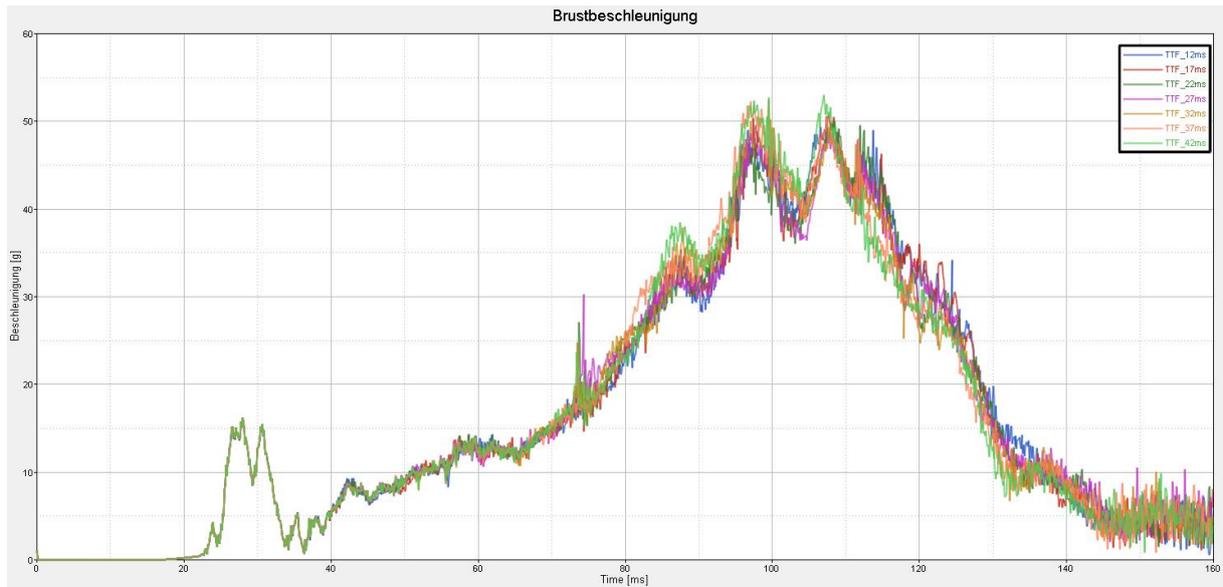


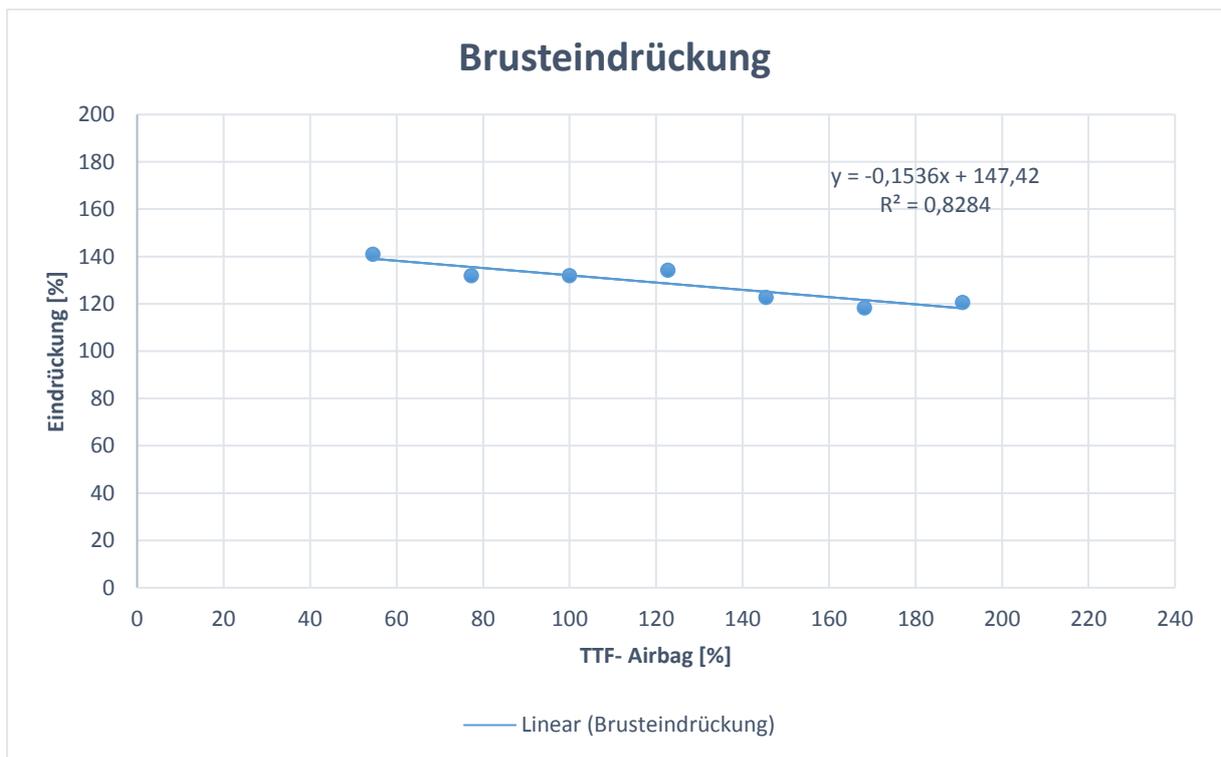
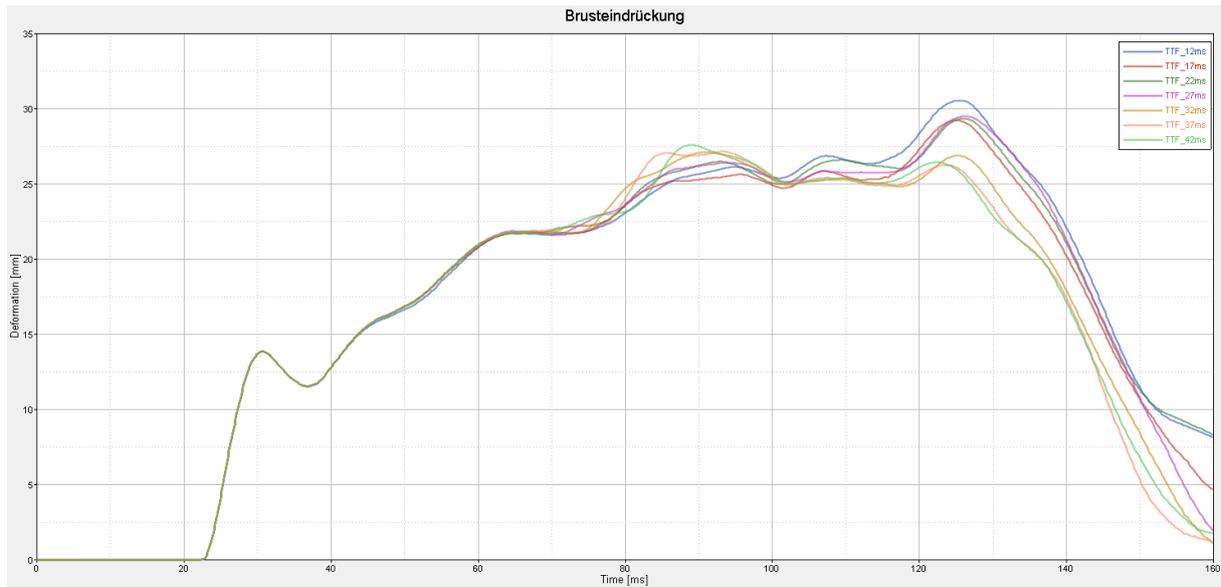
Variation der „TimeToFire“ Airbag im Bereich von 12-42ms und einer Schrittweite von 5ms

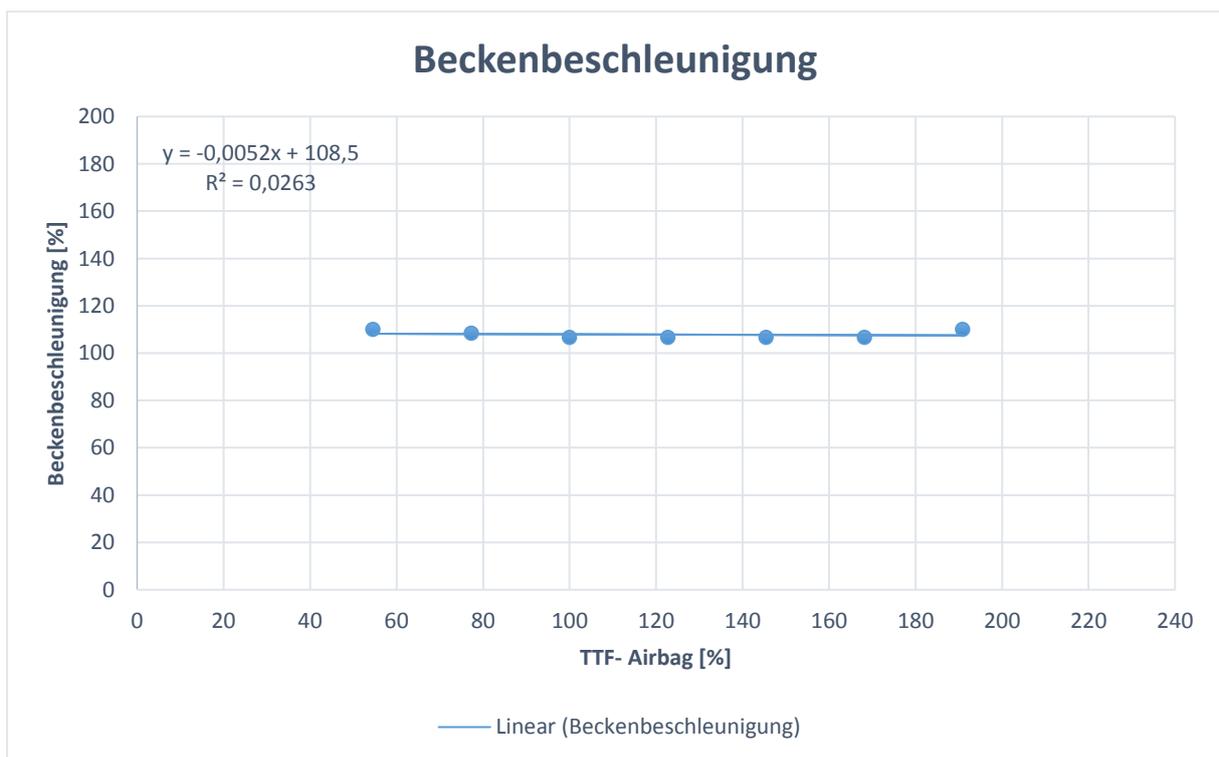
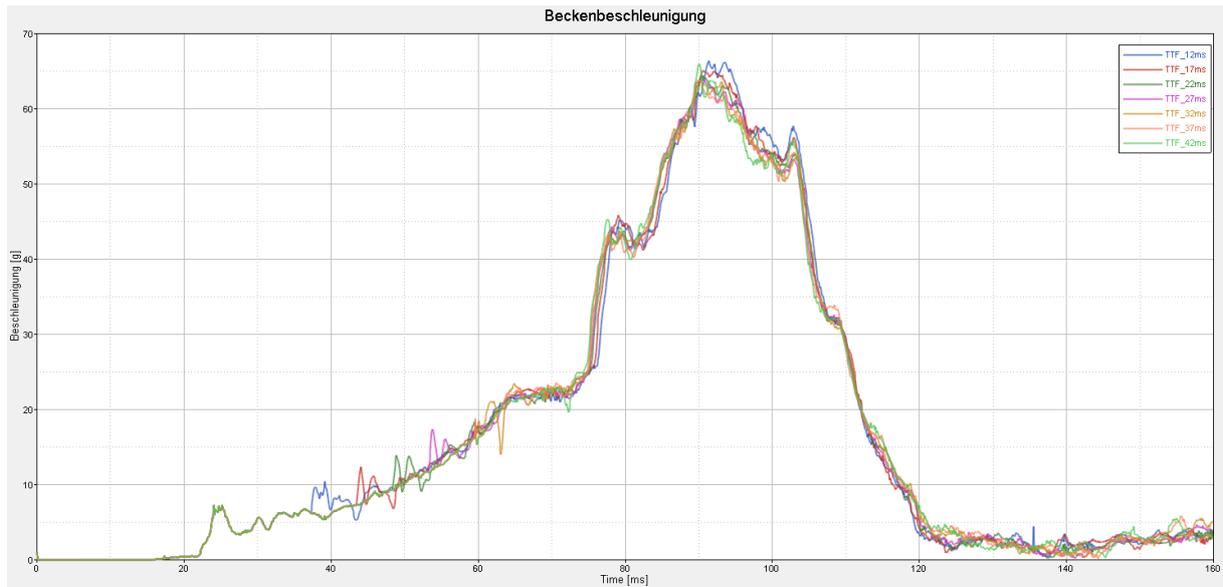


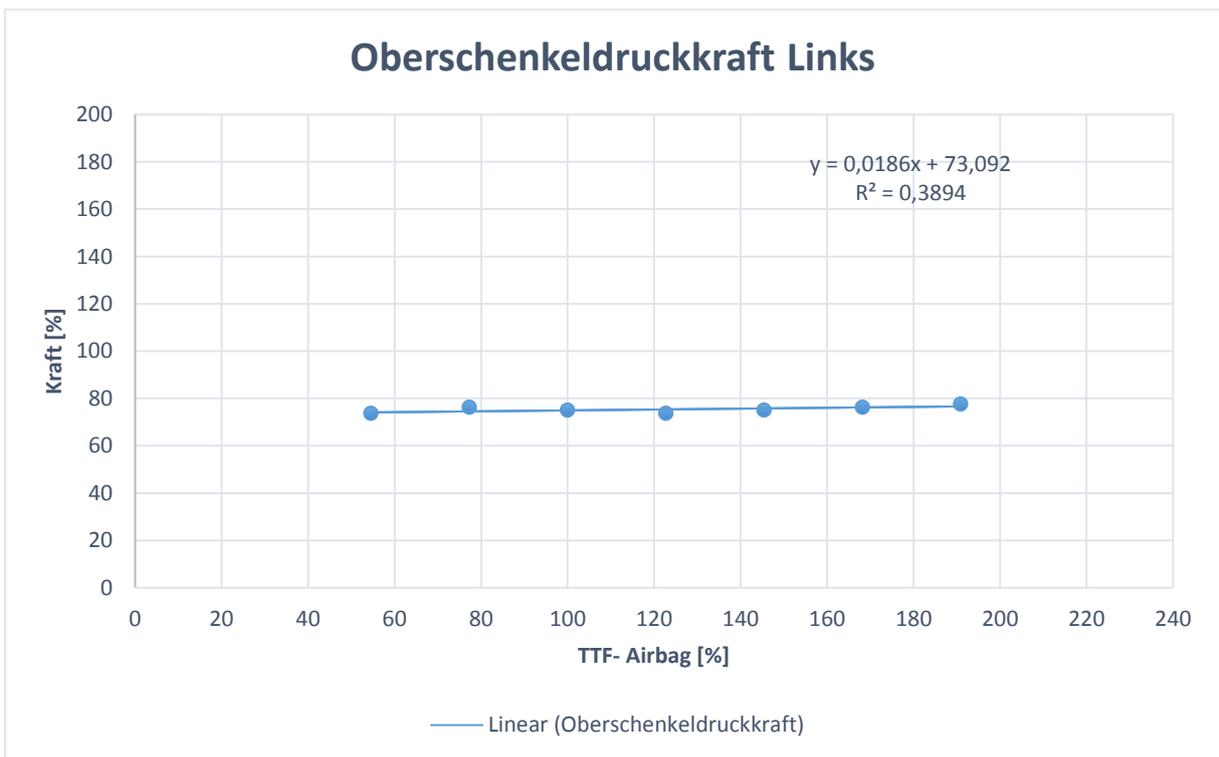
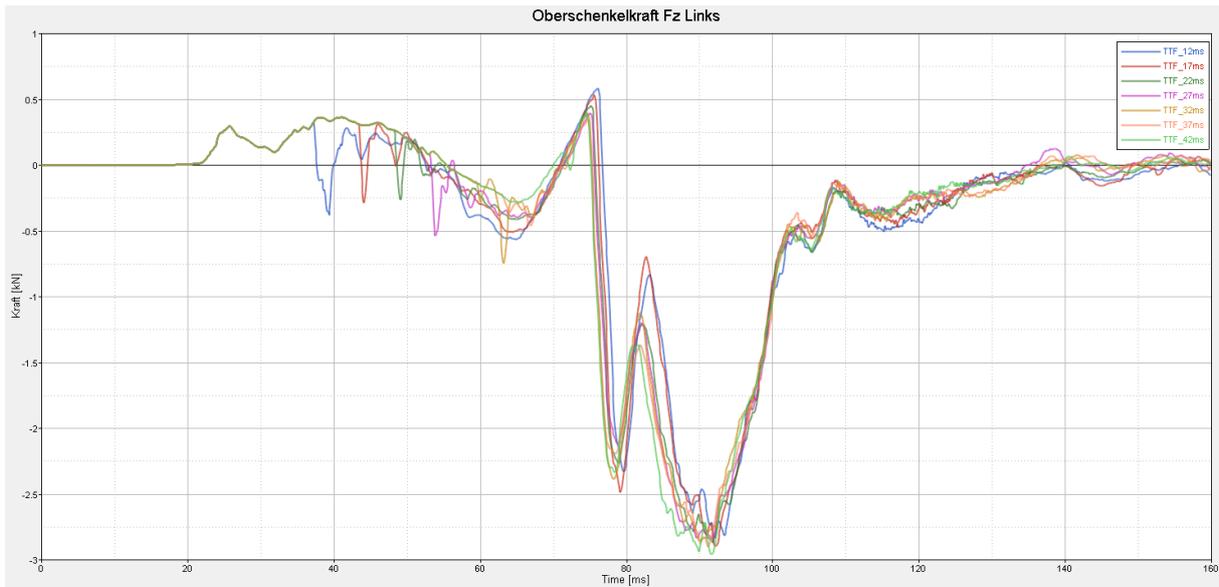


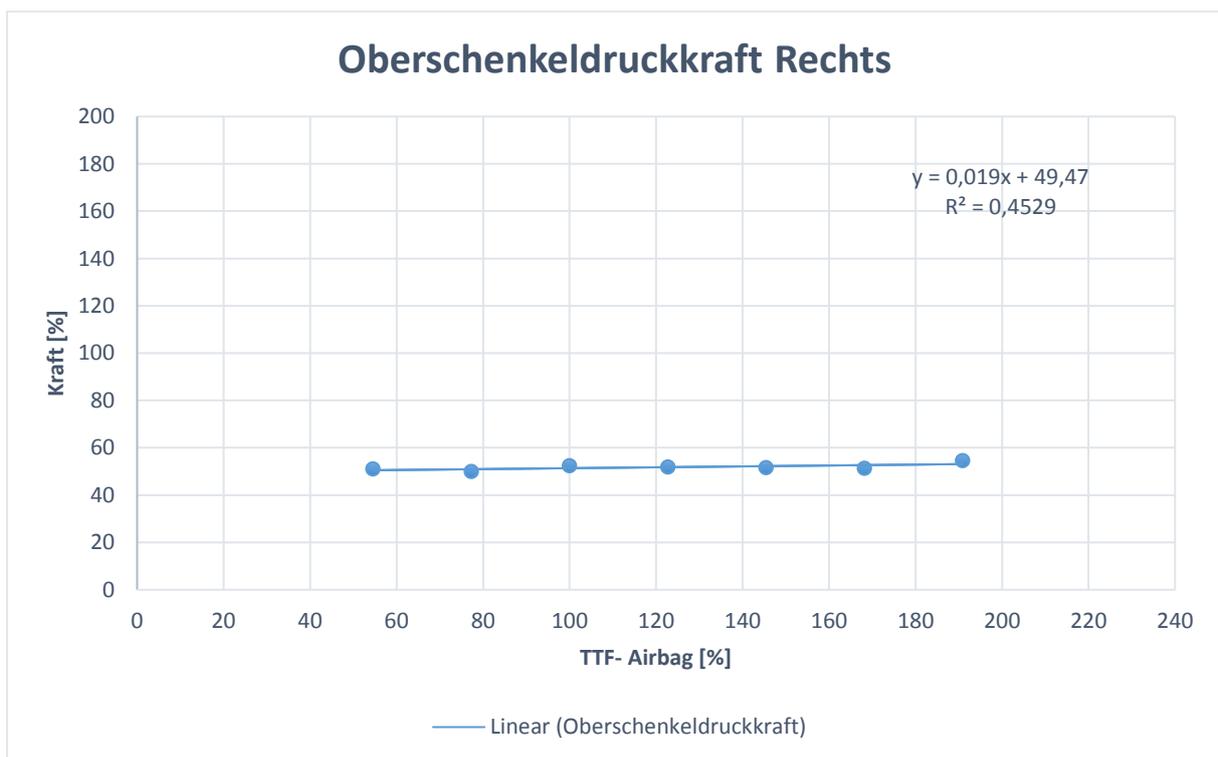
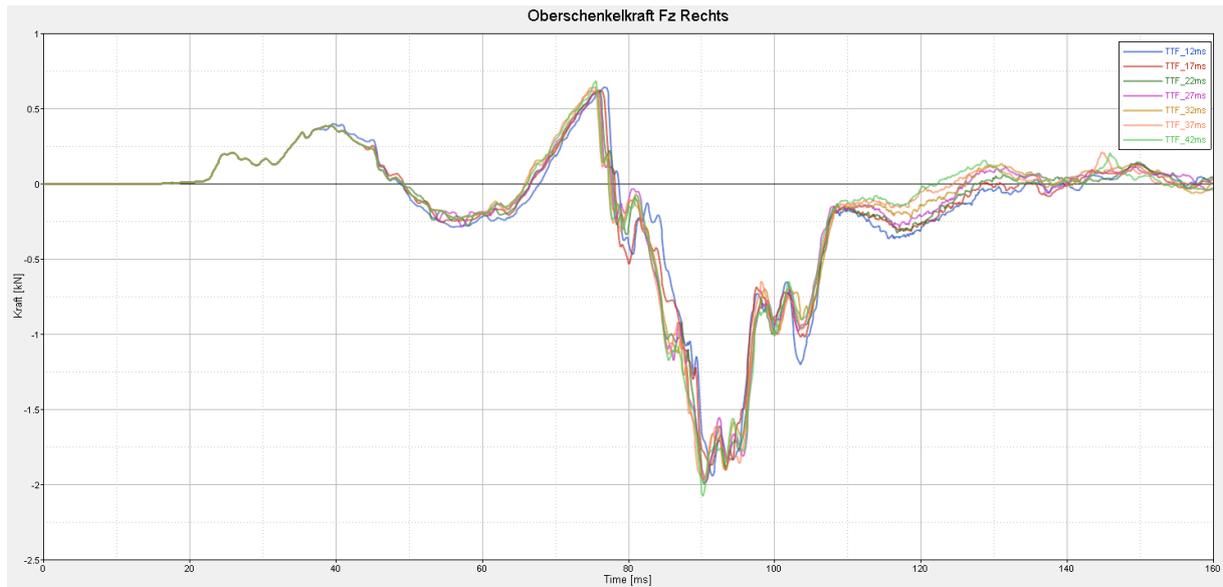




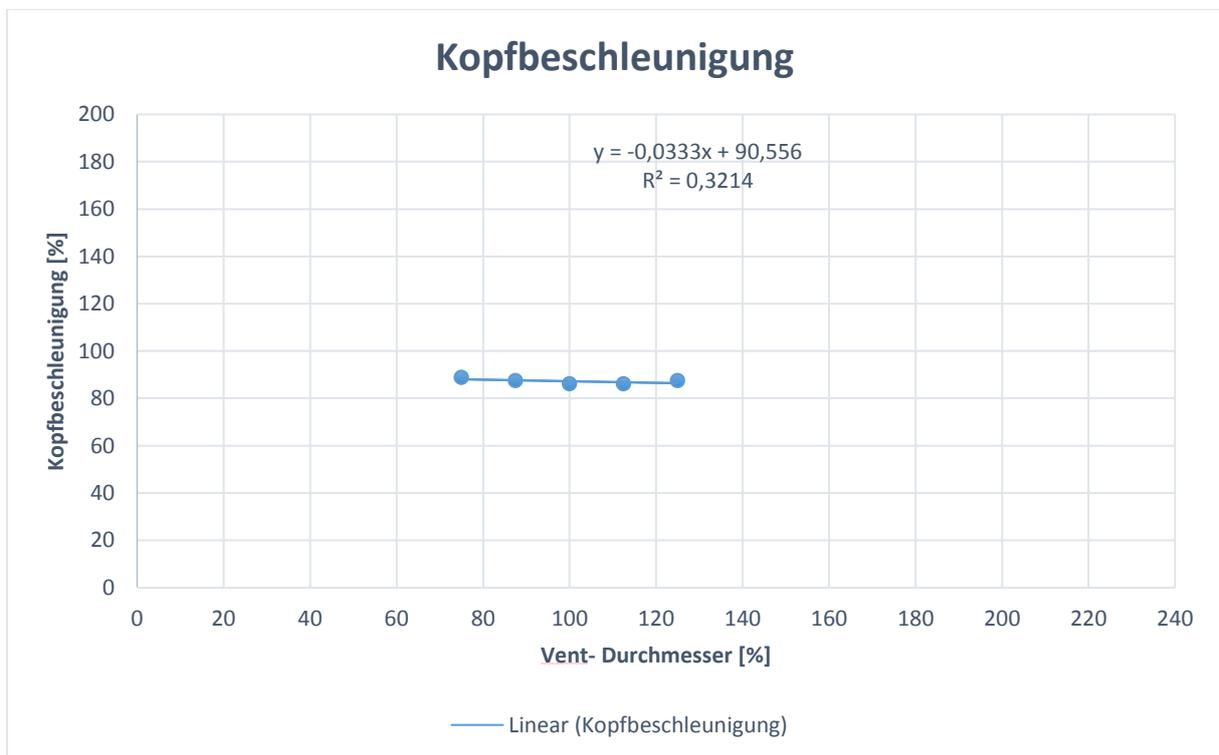
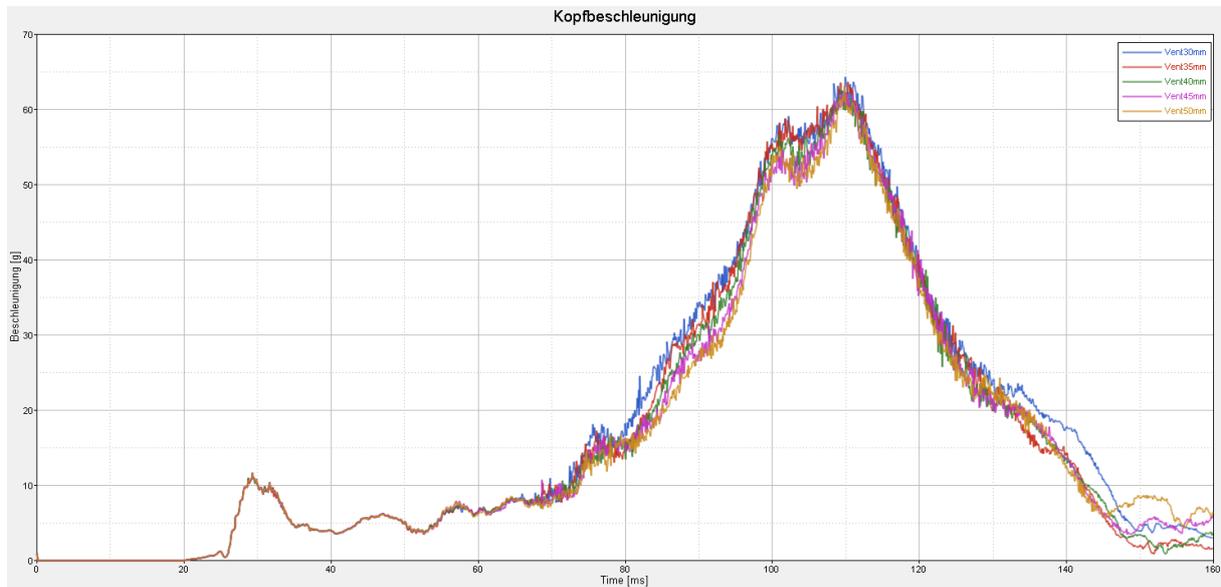


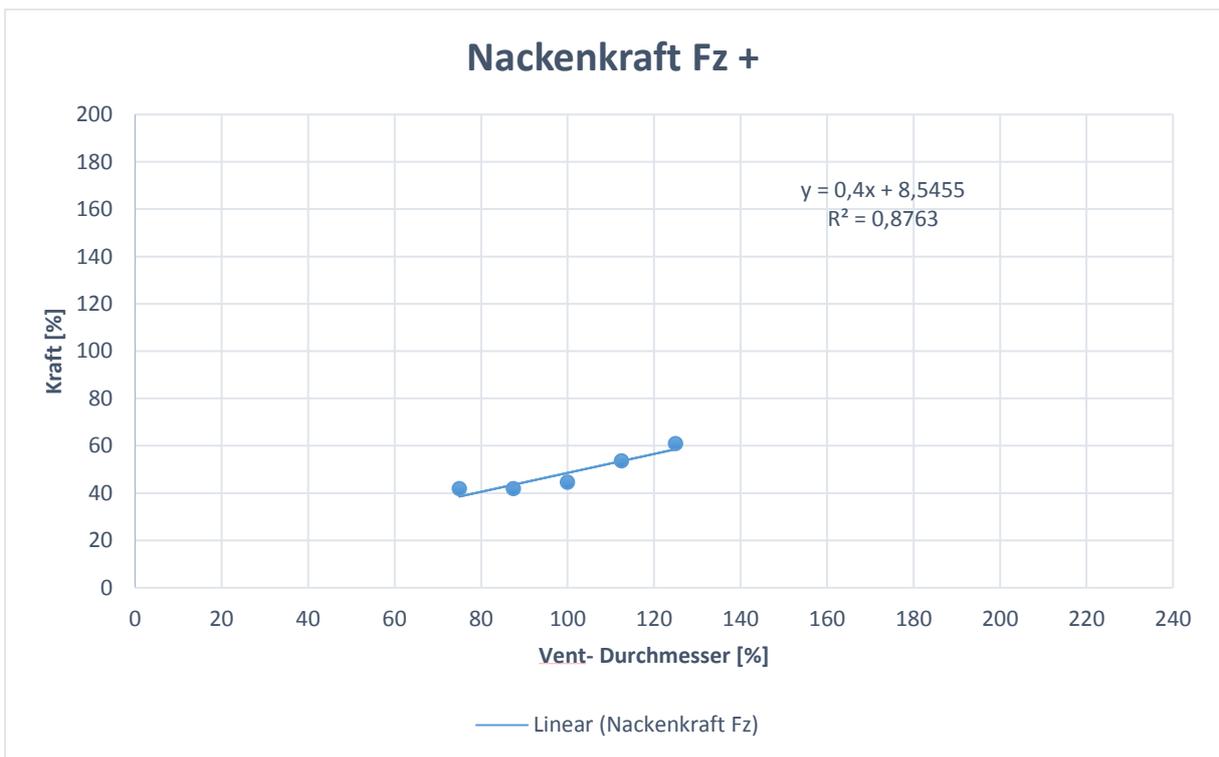
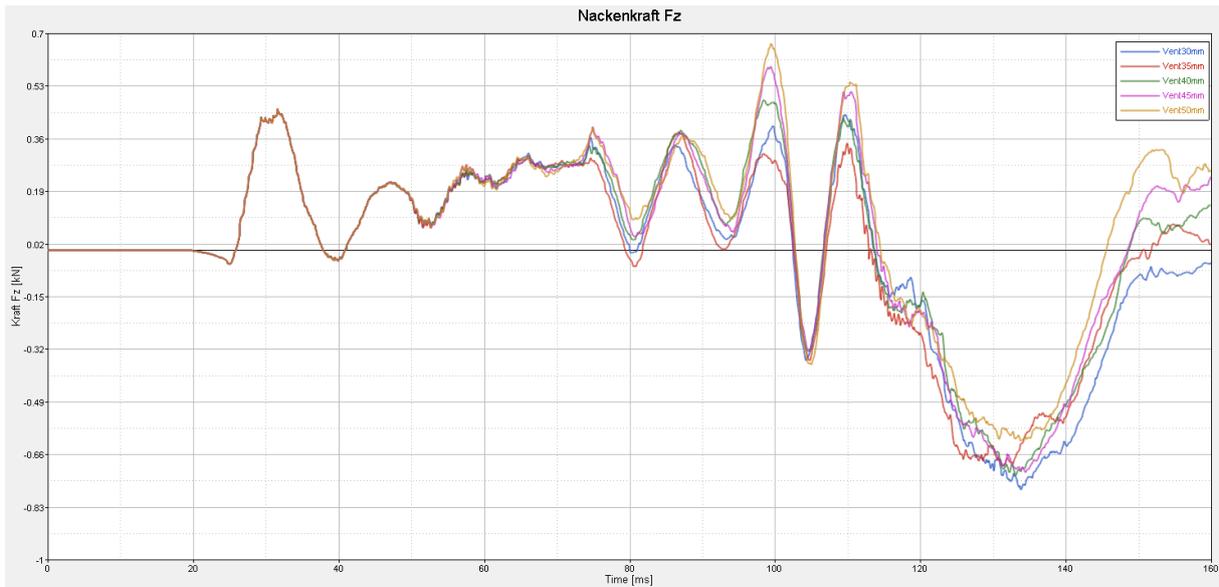


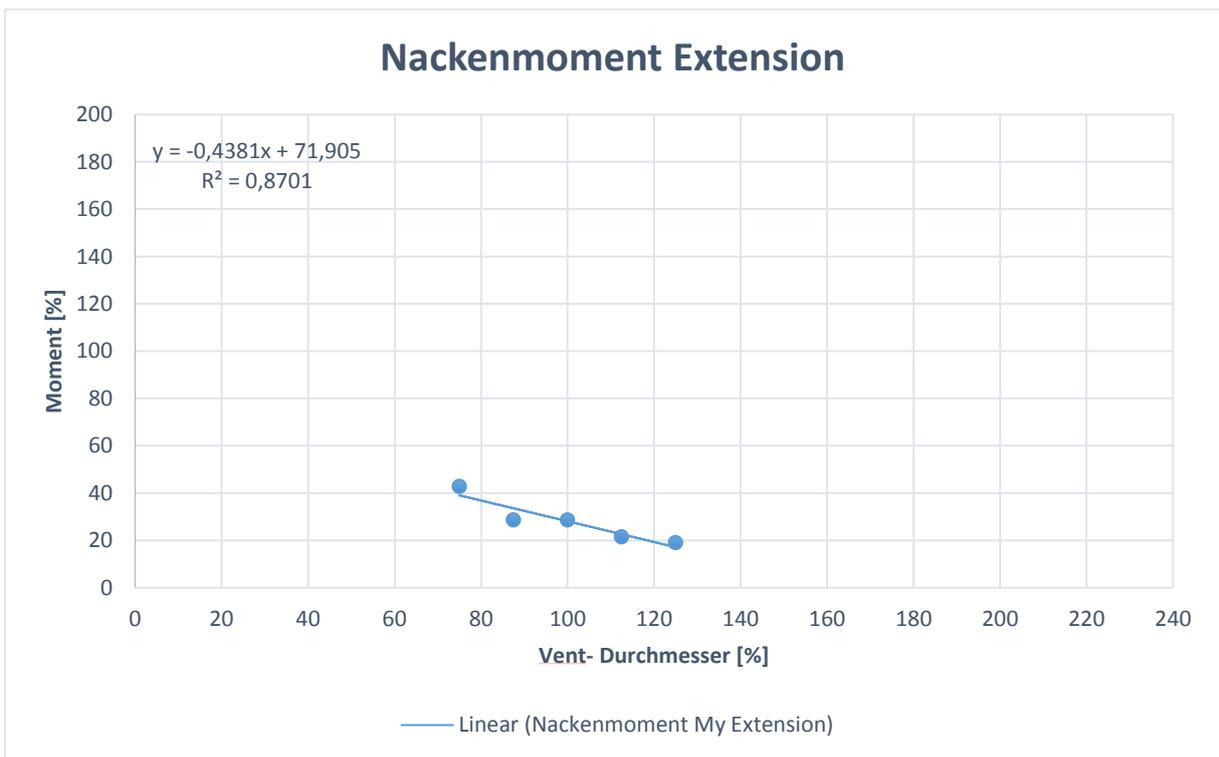
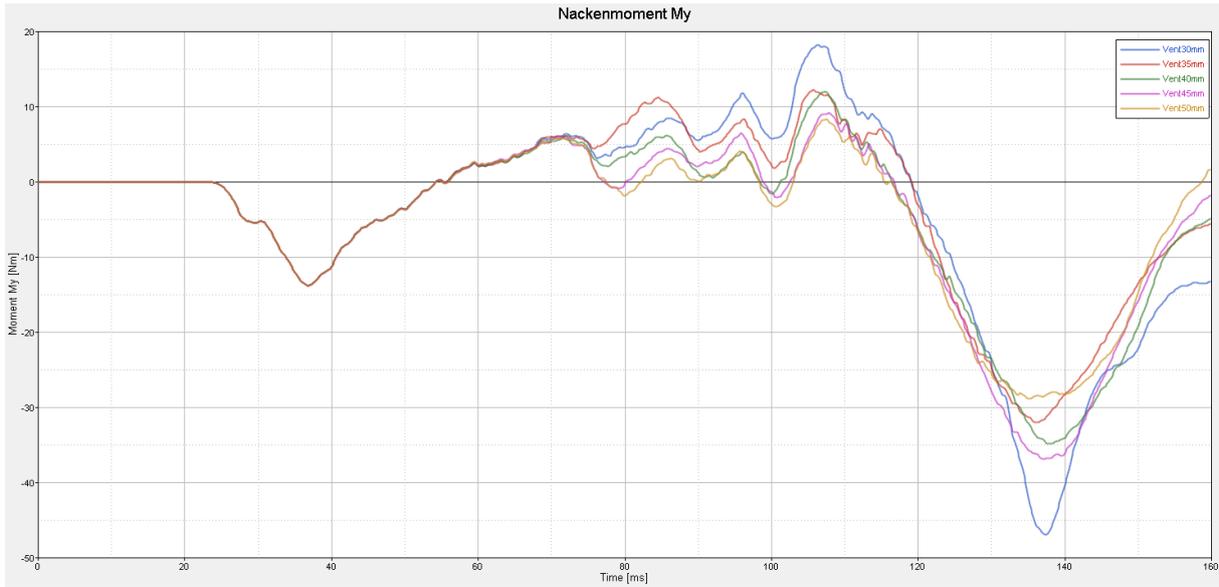


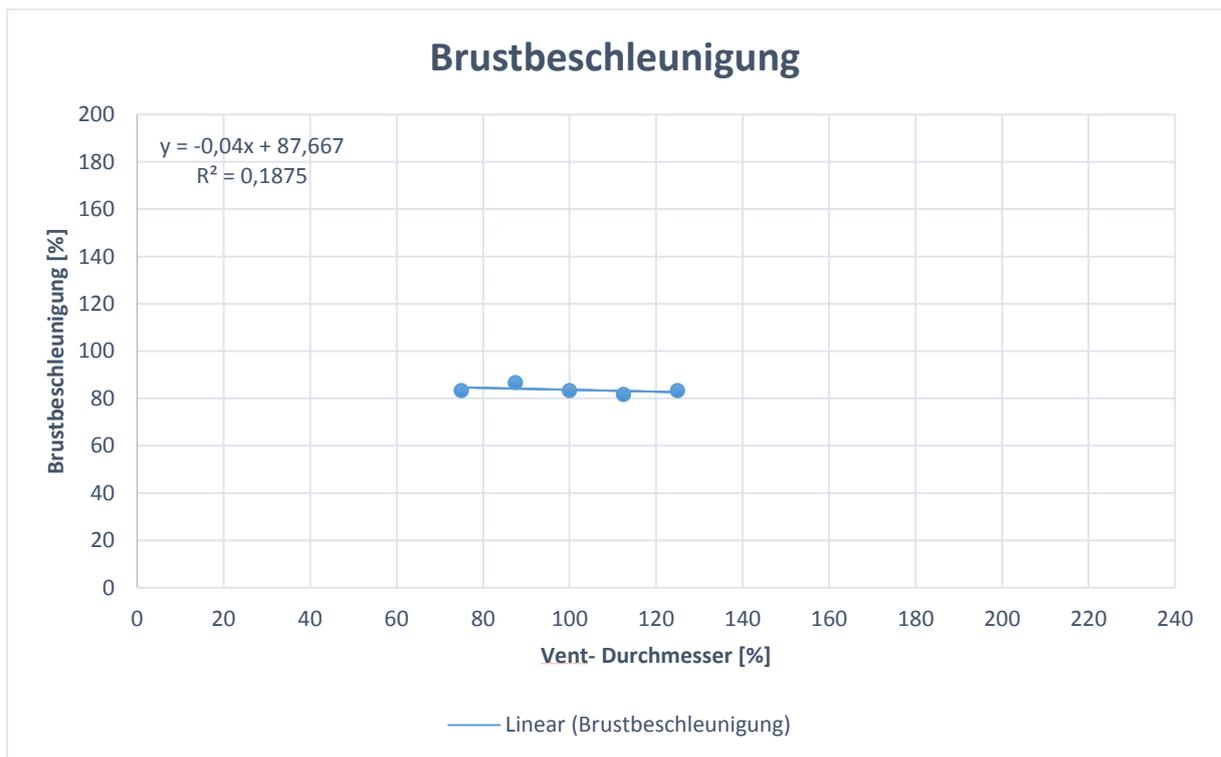
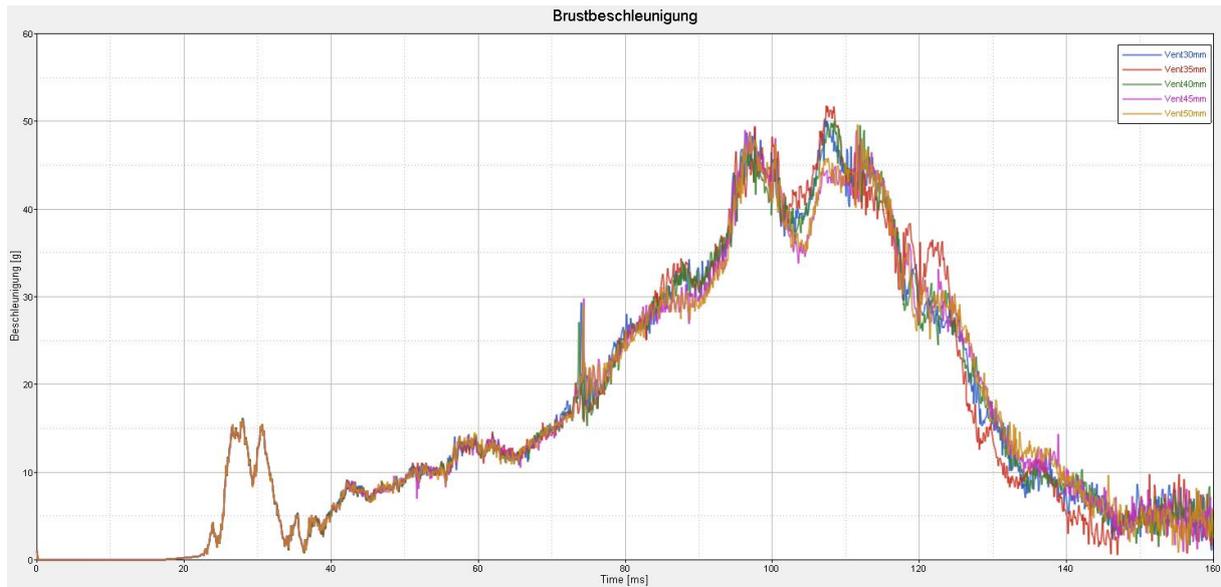


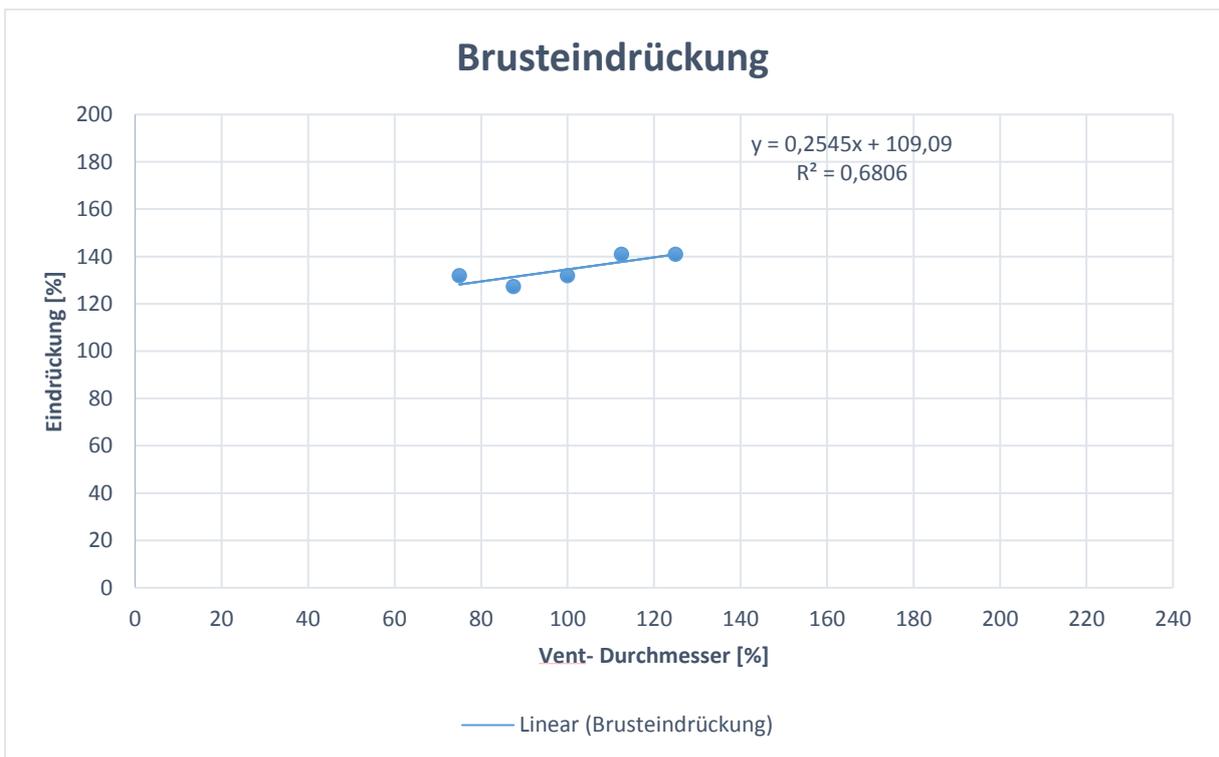
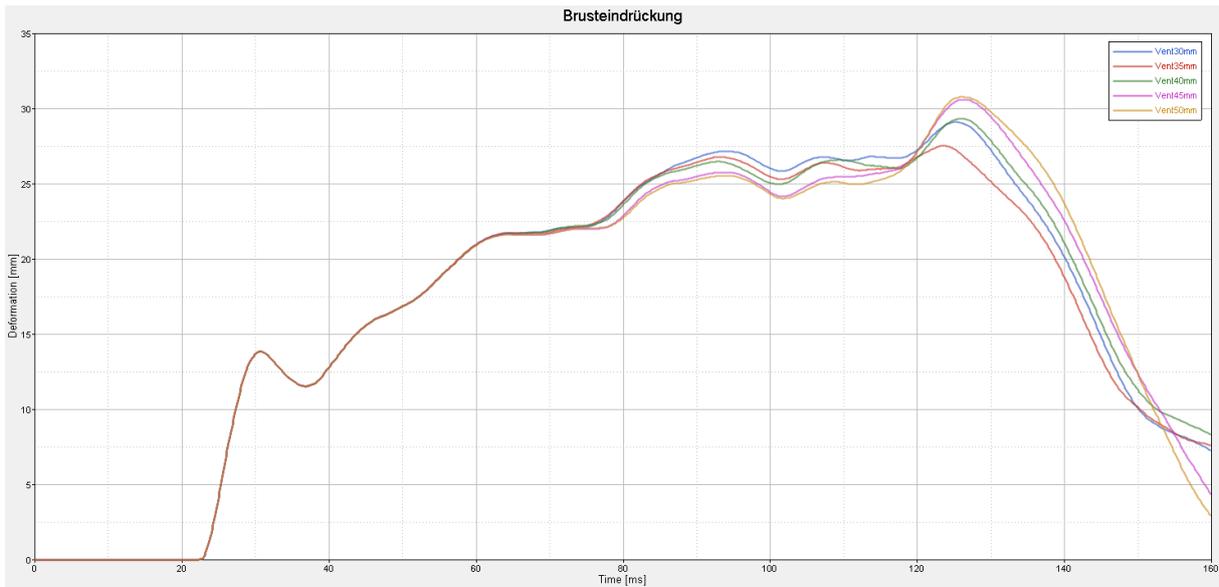
Variation des Ventdurchmessers im Bereich von 30-50mm und einer Schrittweite von 5mm

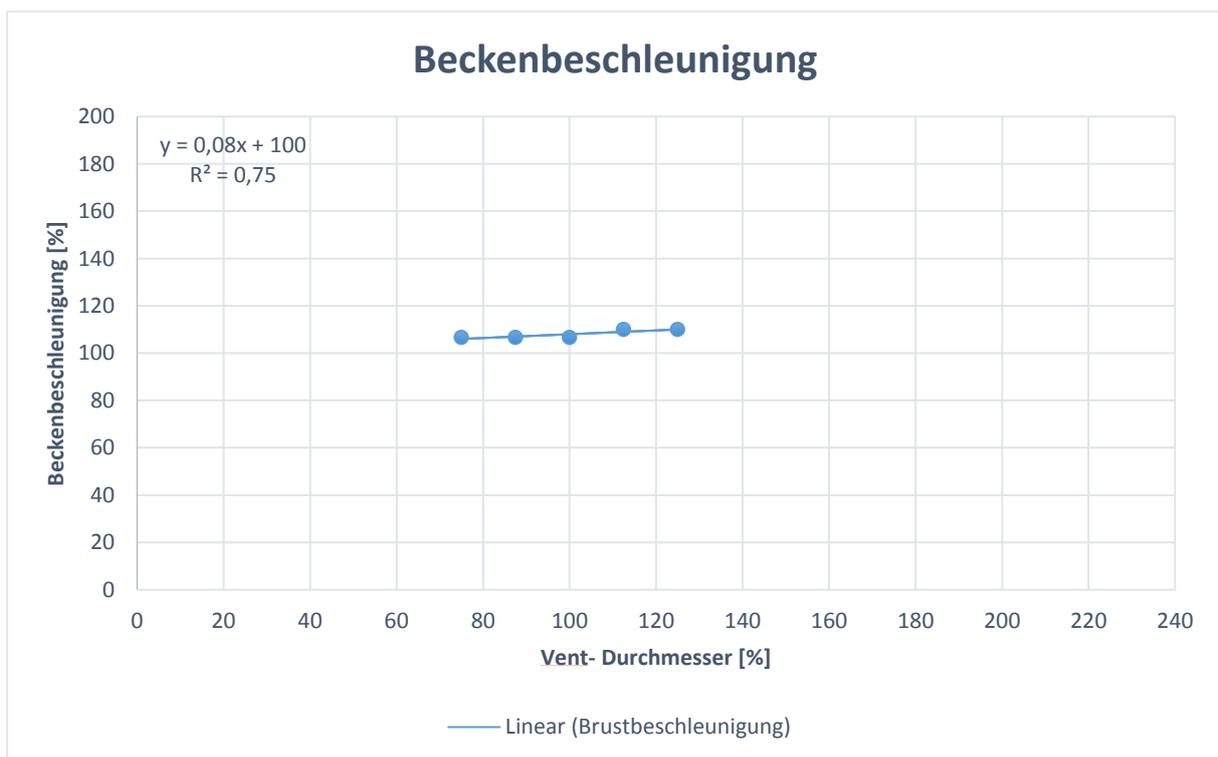
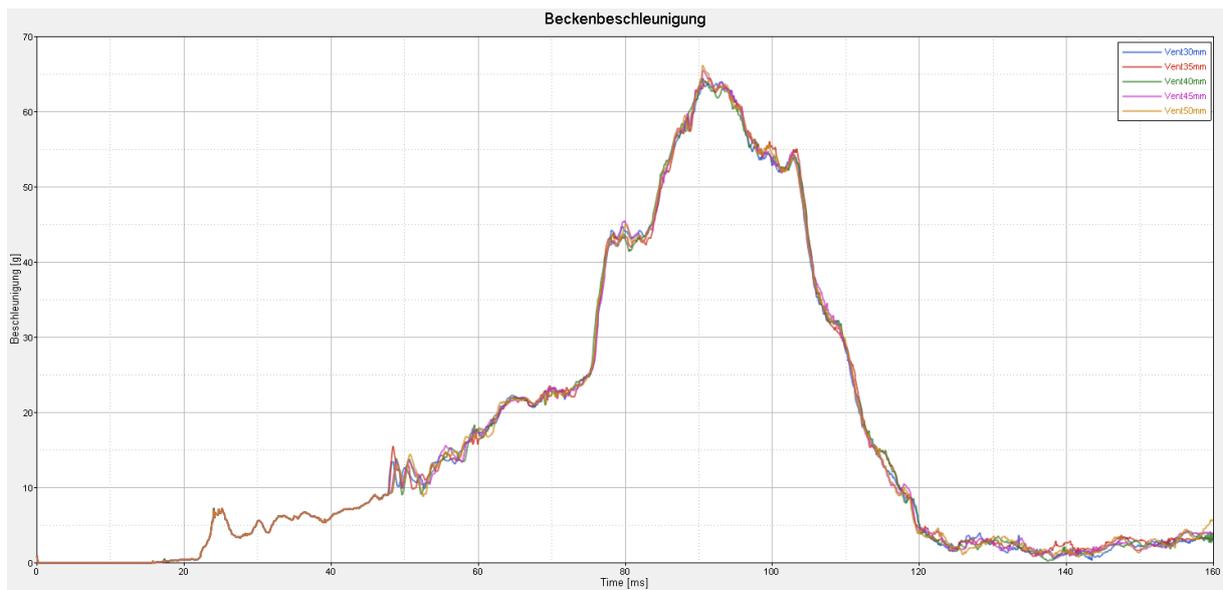


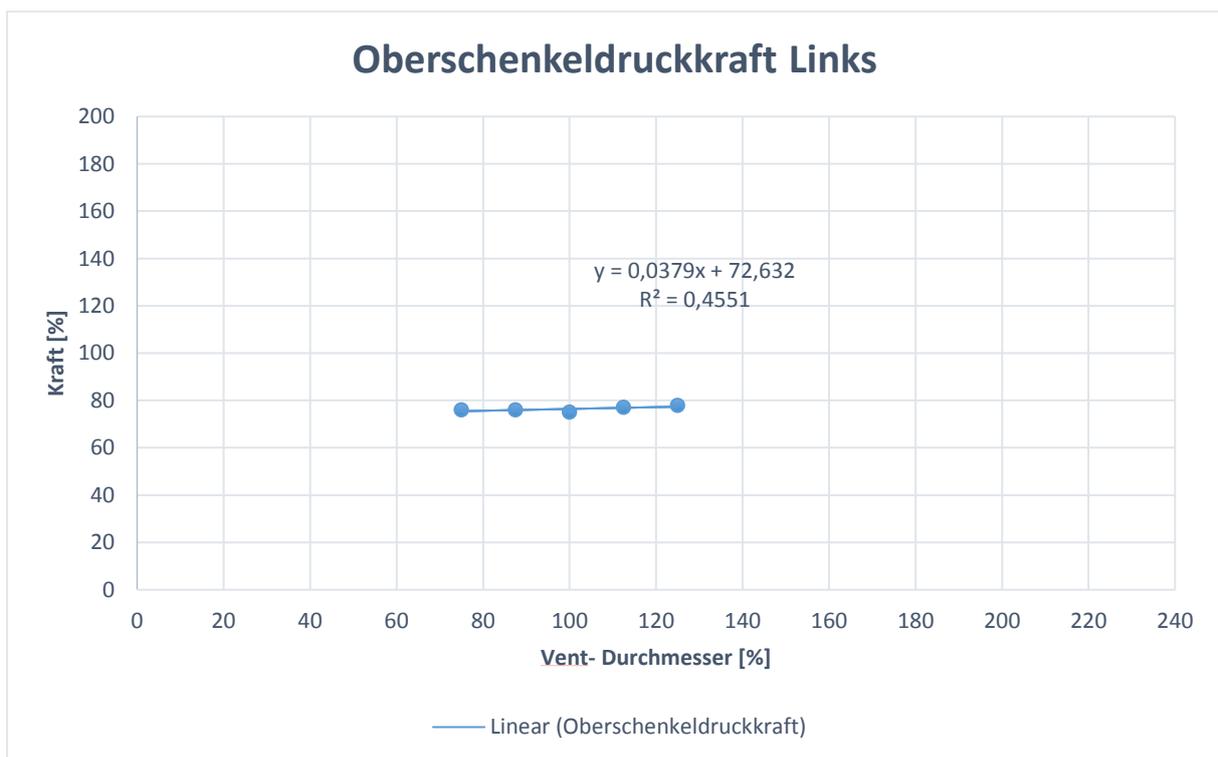
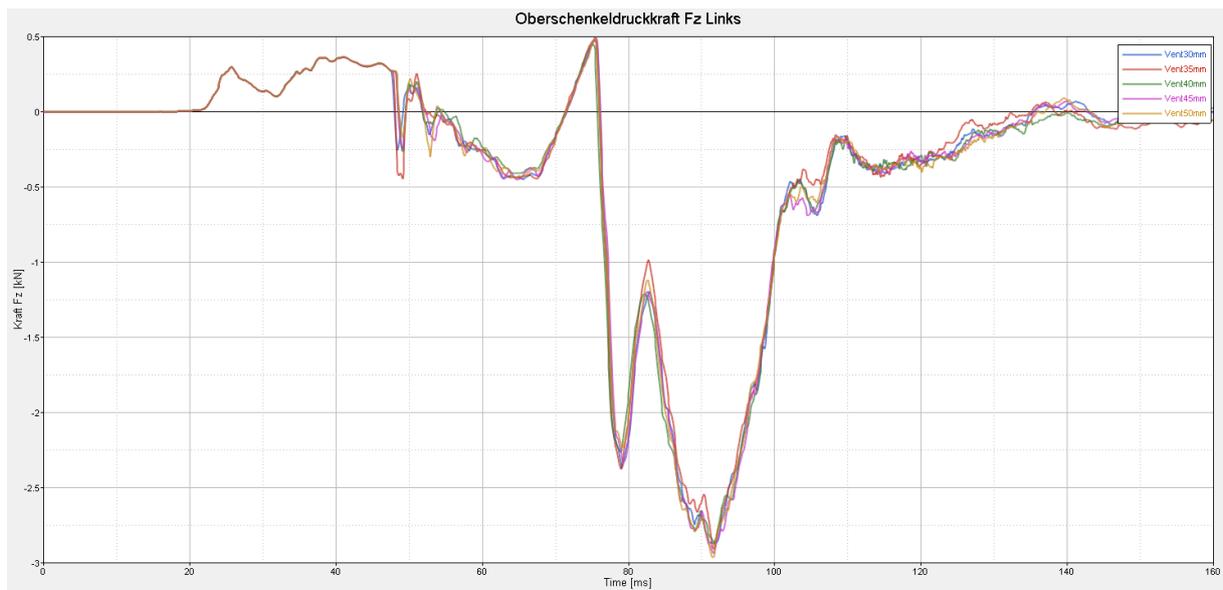


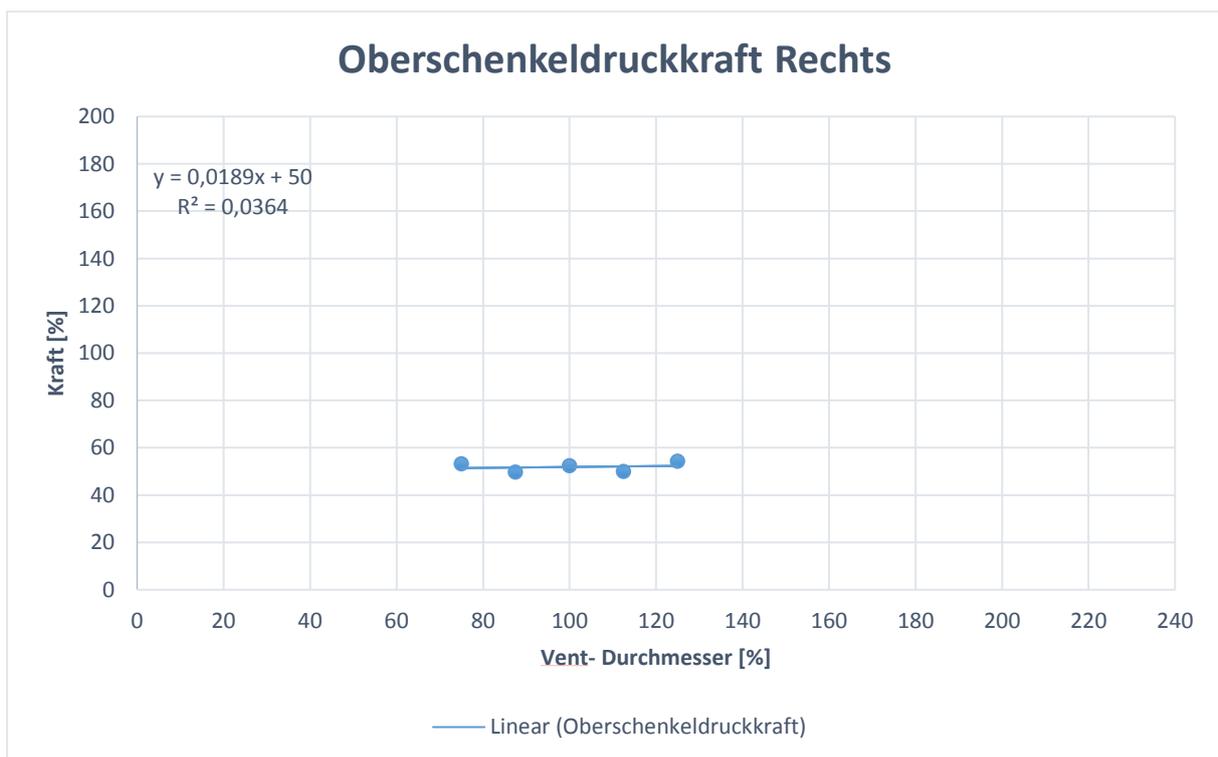
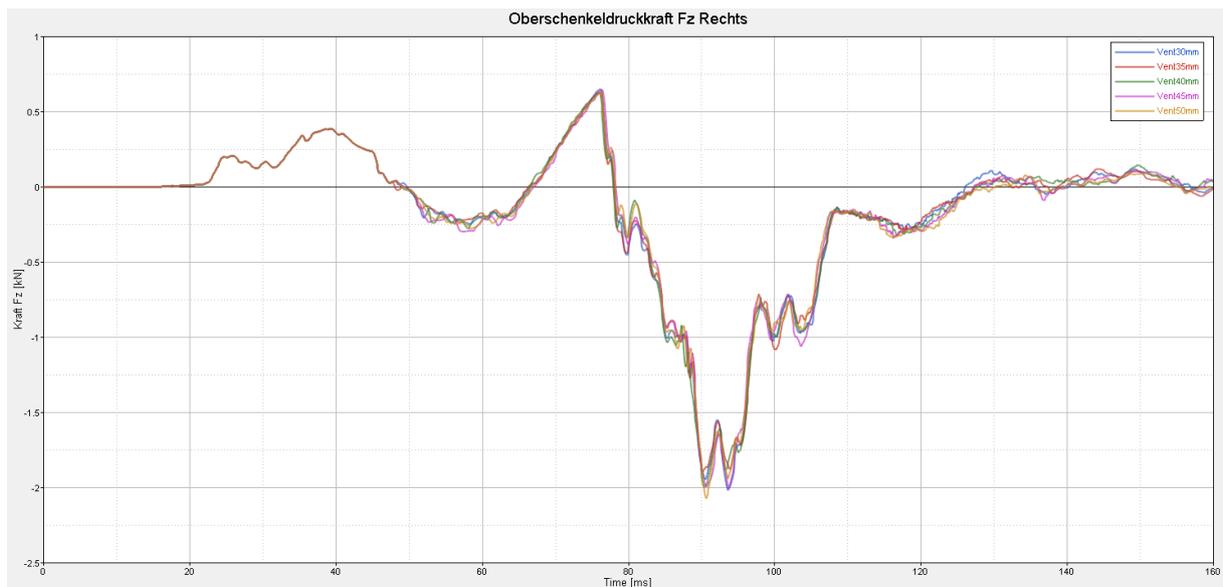




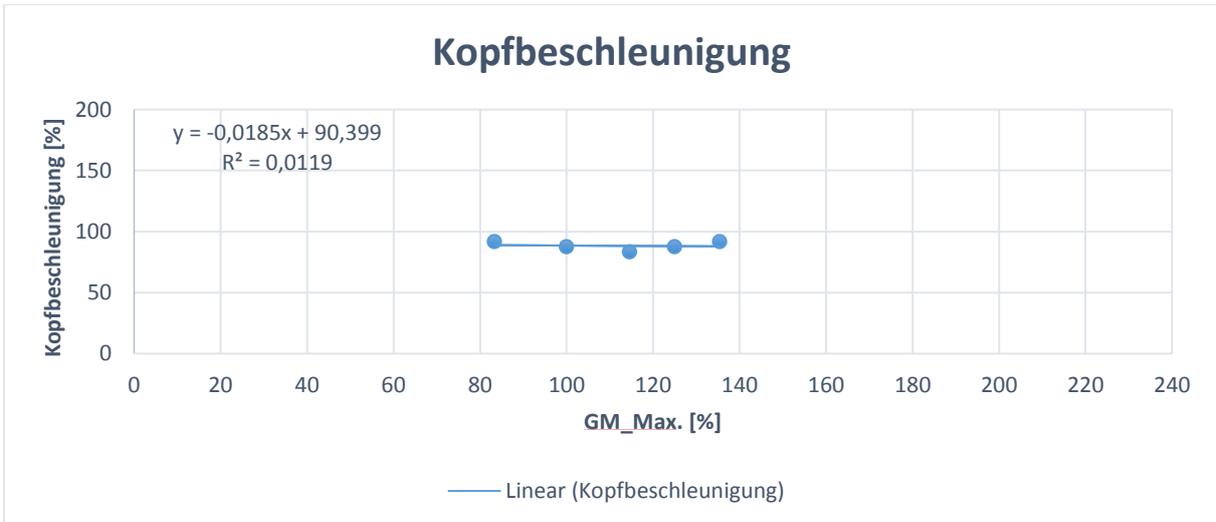
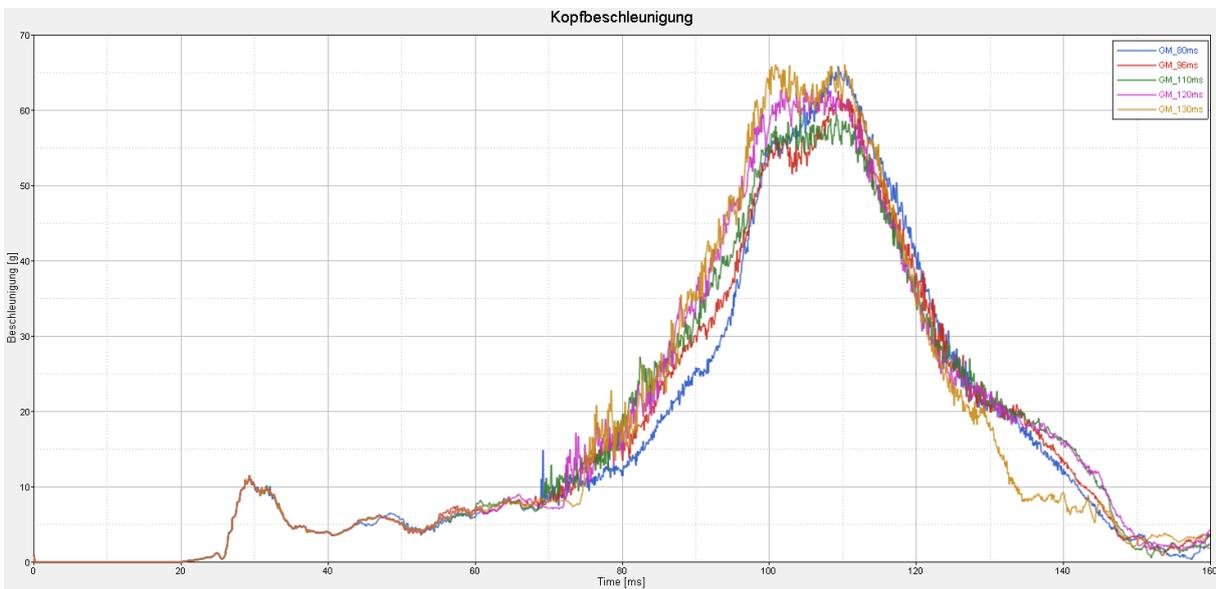
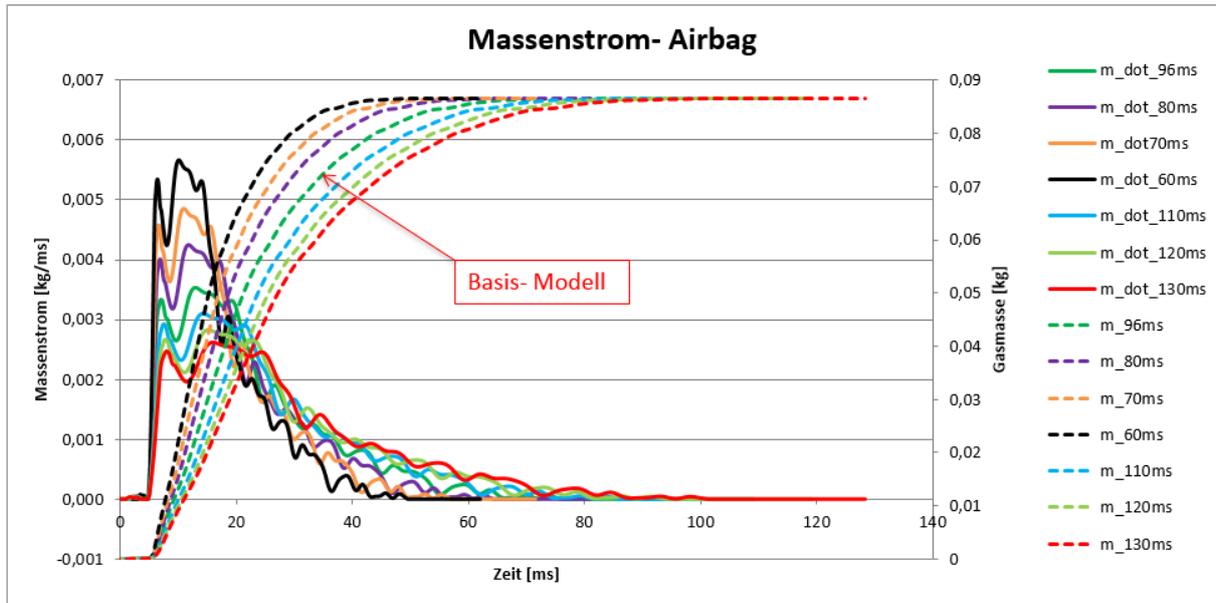


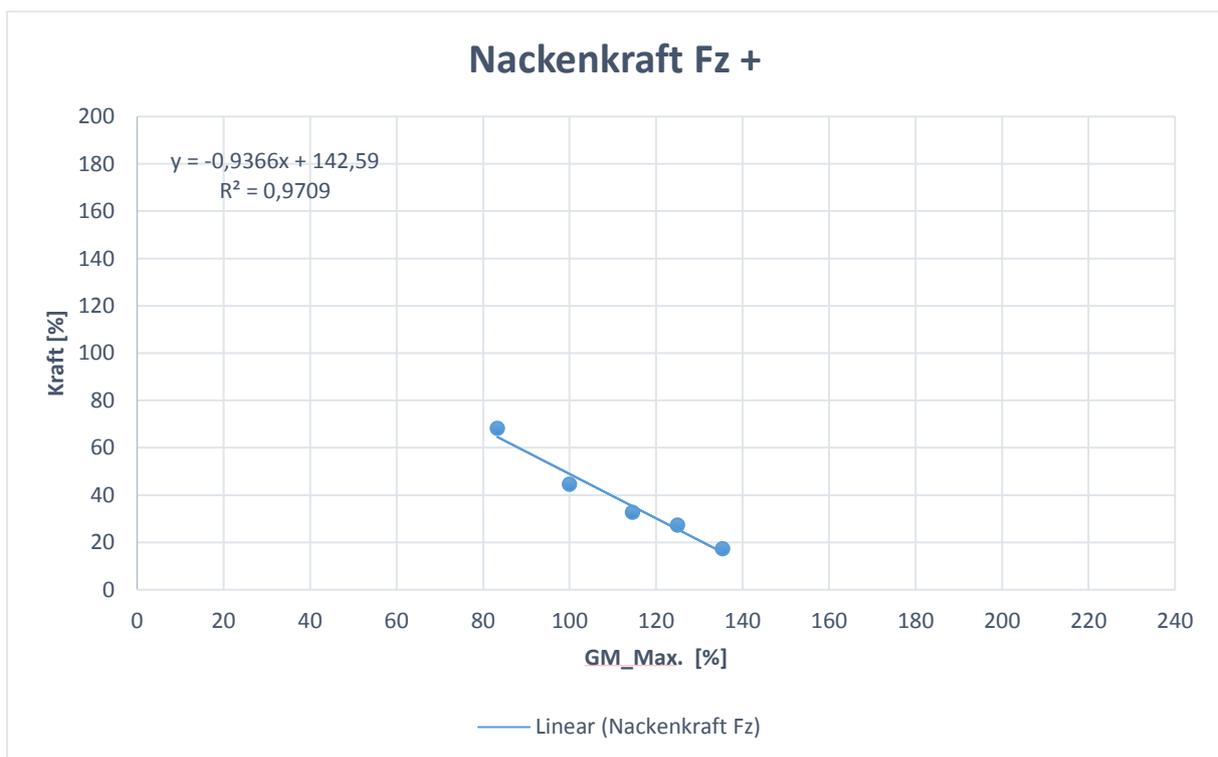
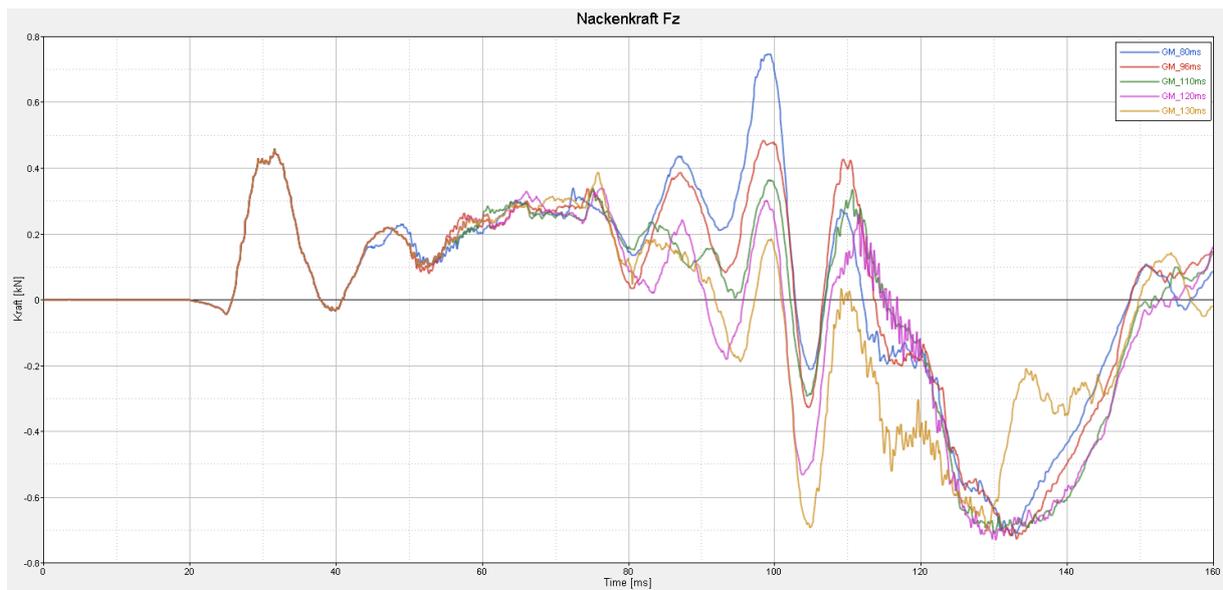


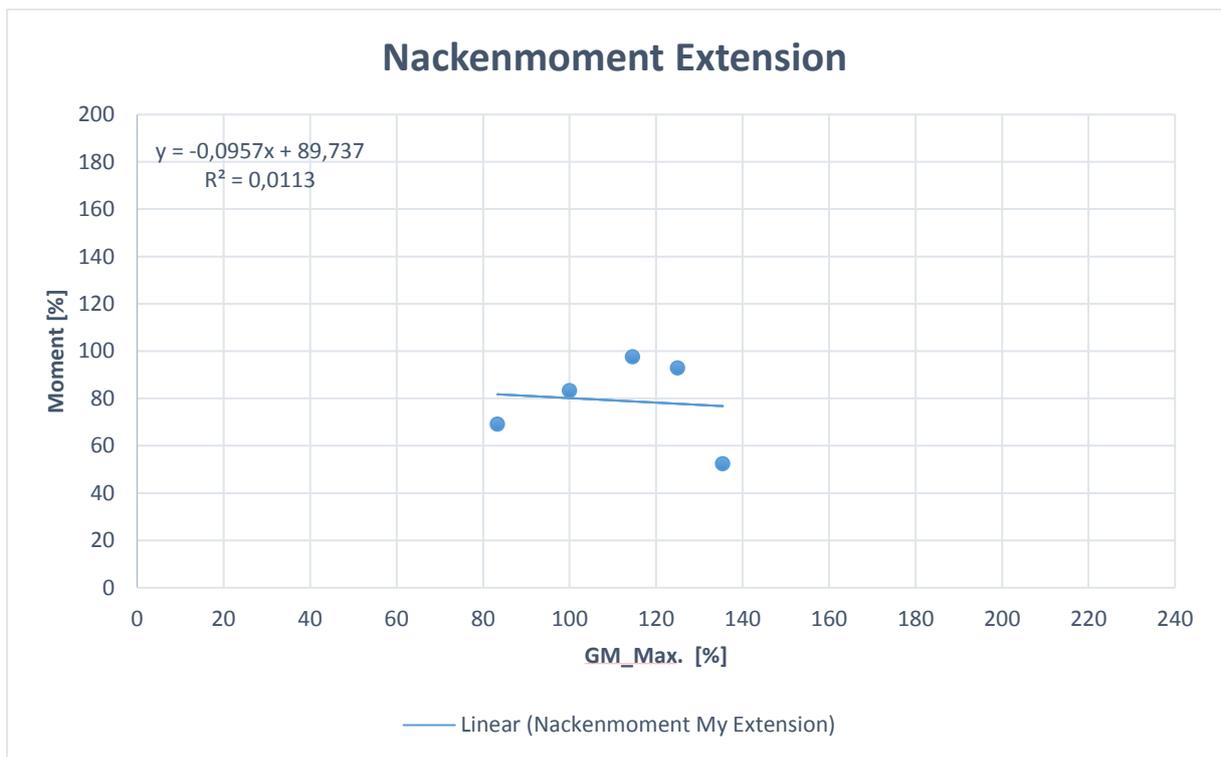
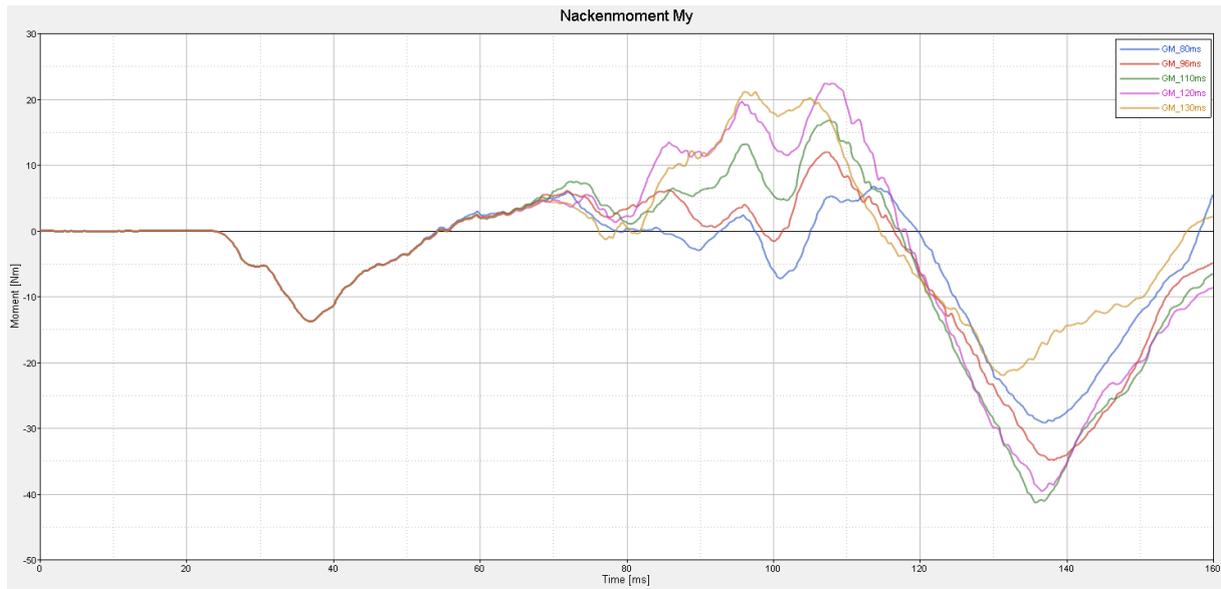


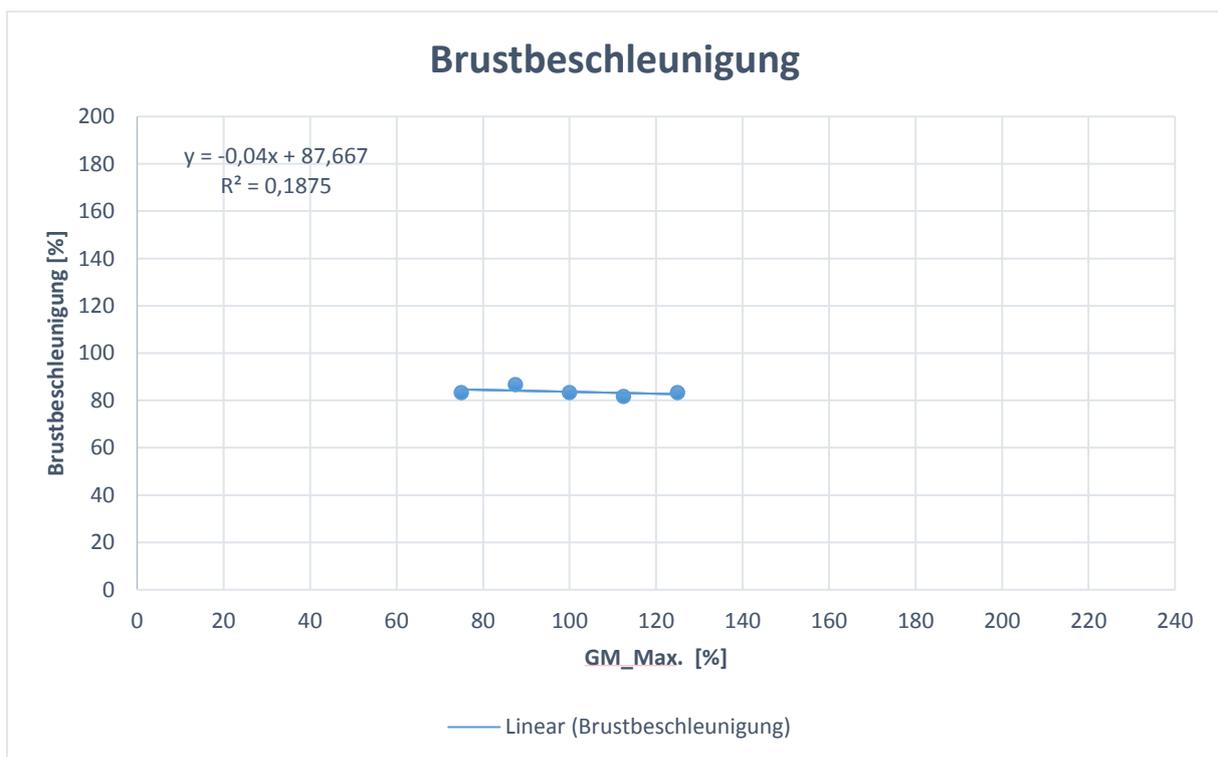
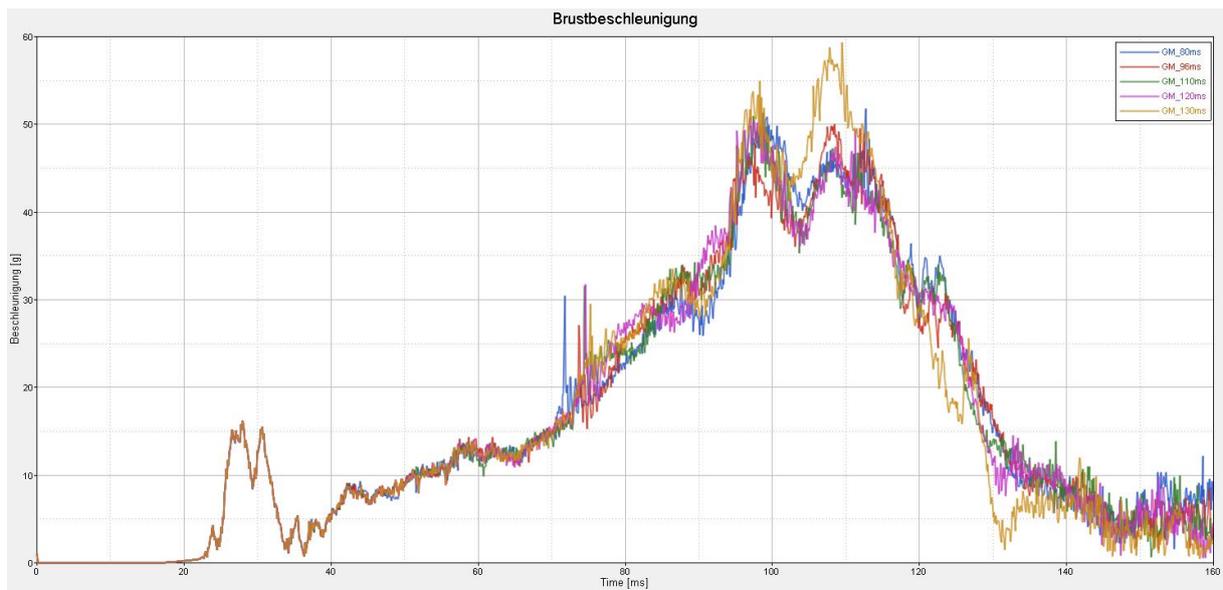


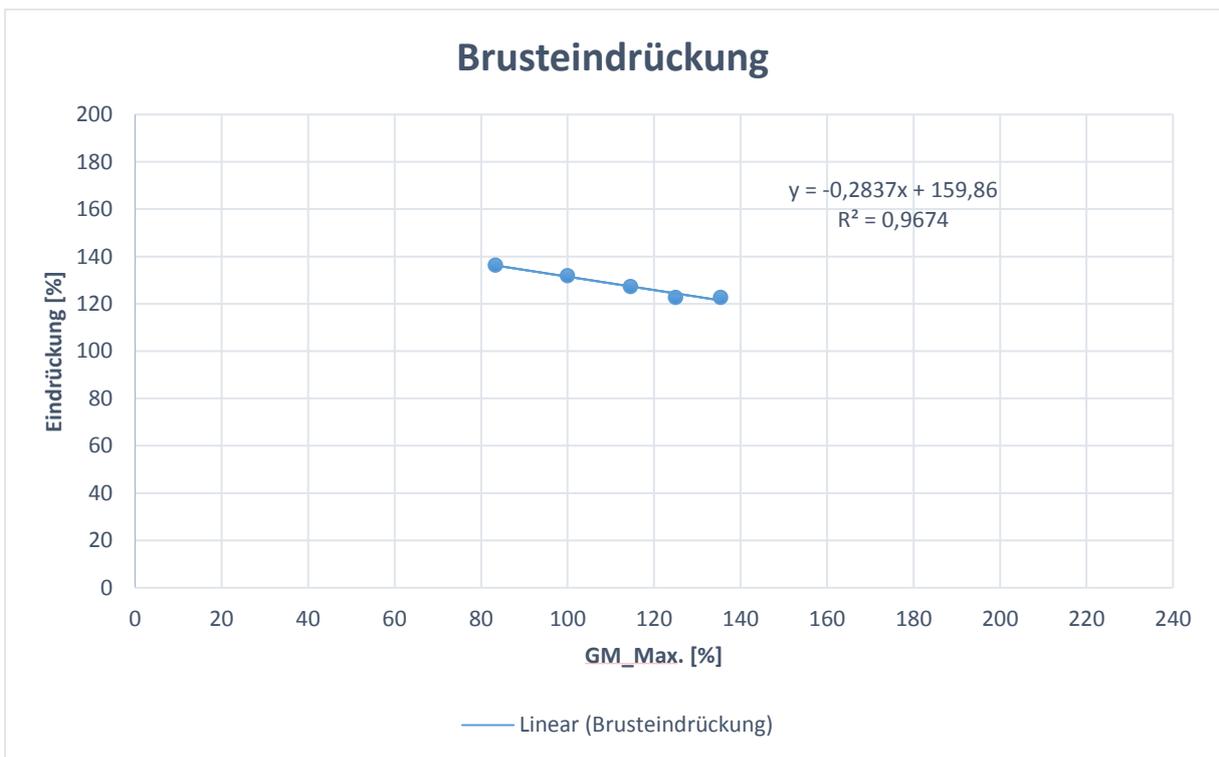
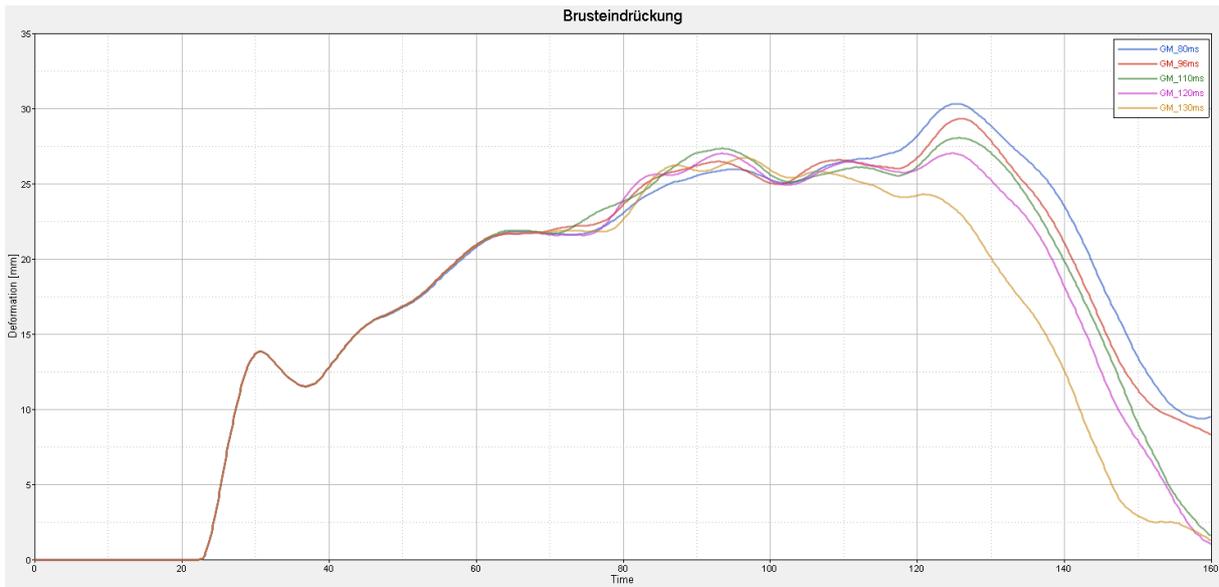
Variation des Zeitpunktes der max. Gasmasse im Bereich von 80-130ms und einer Schrittweite von 10ms

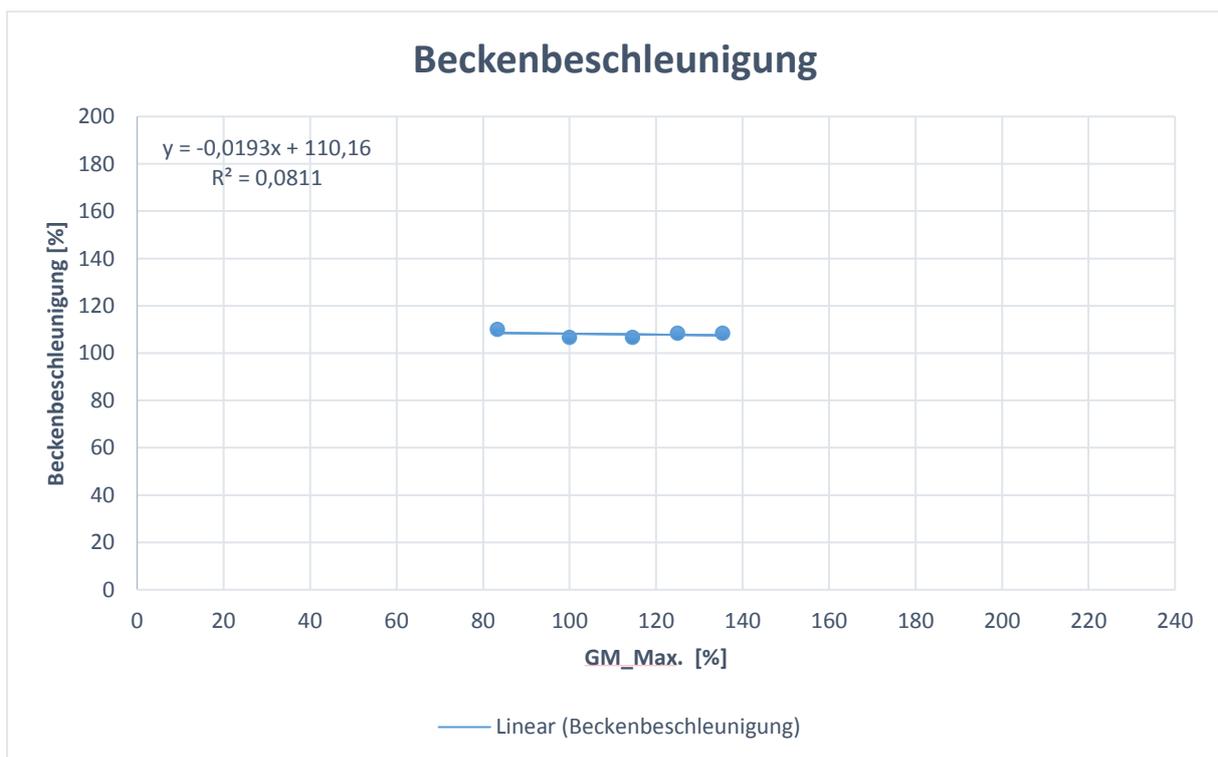
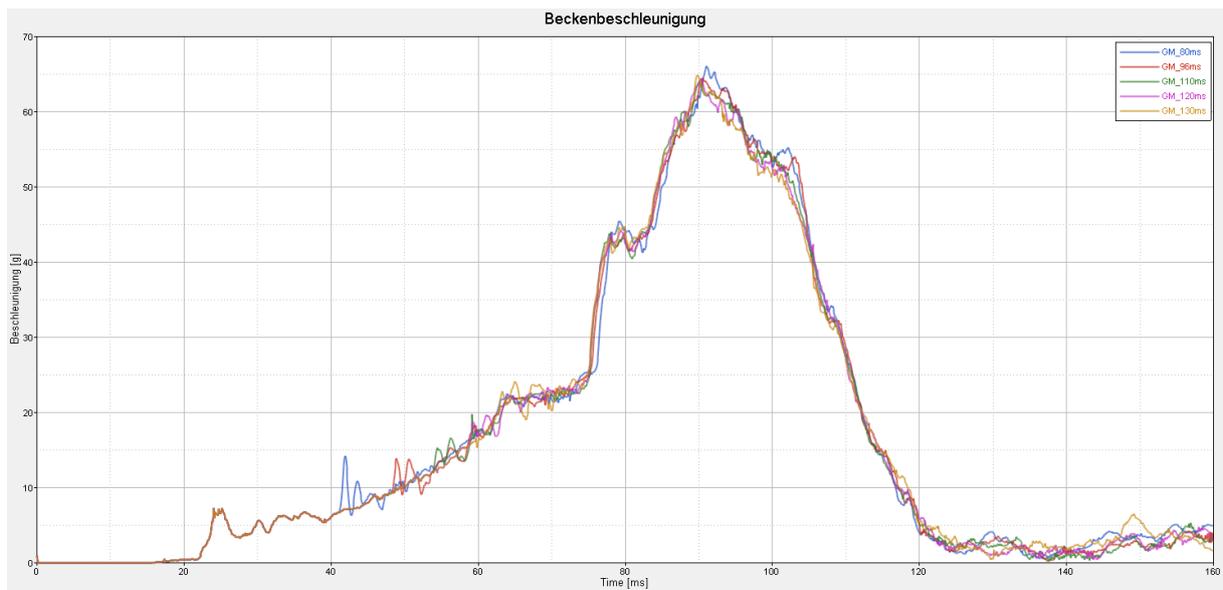


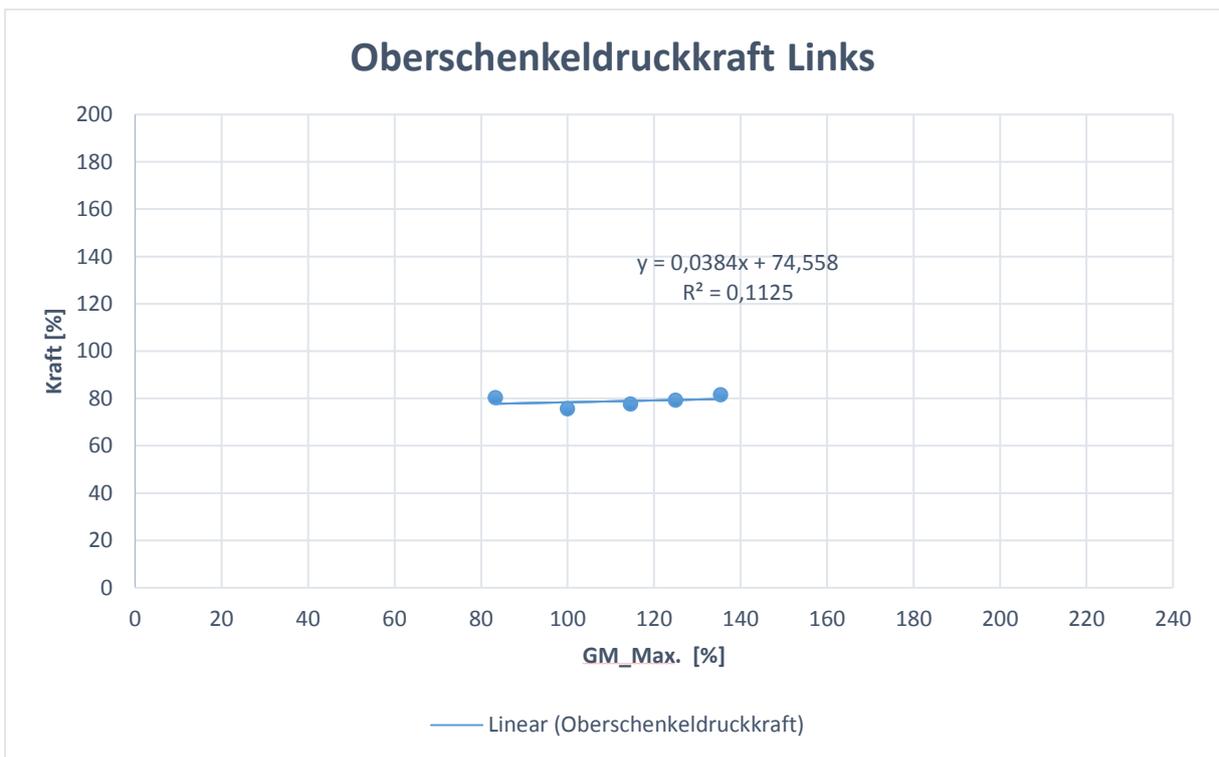
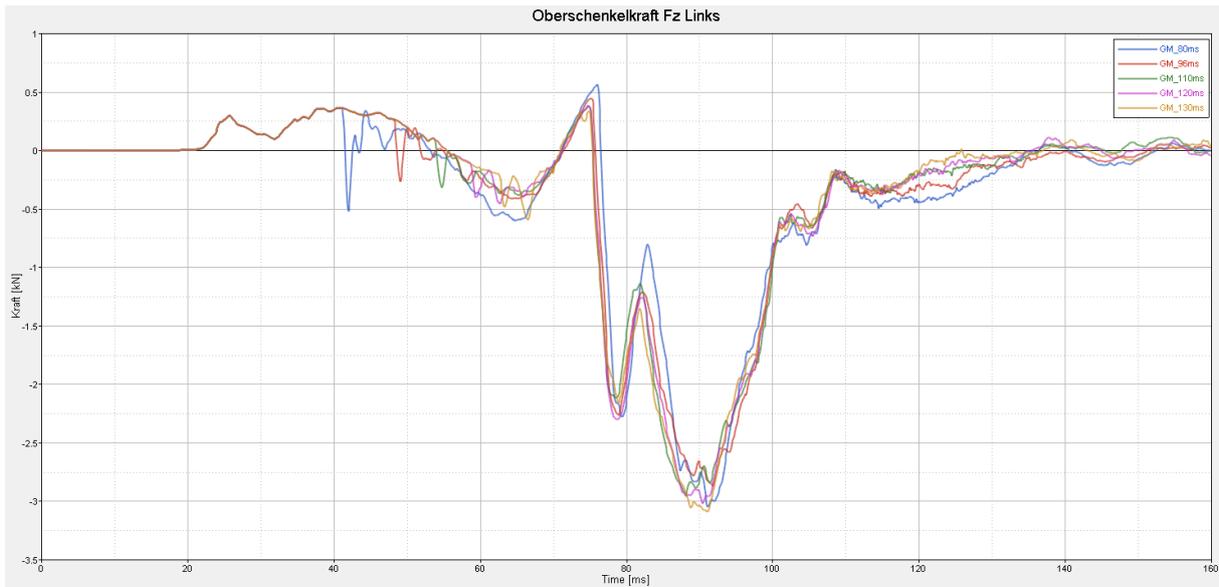


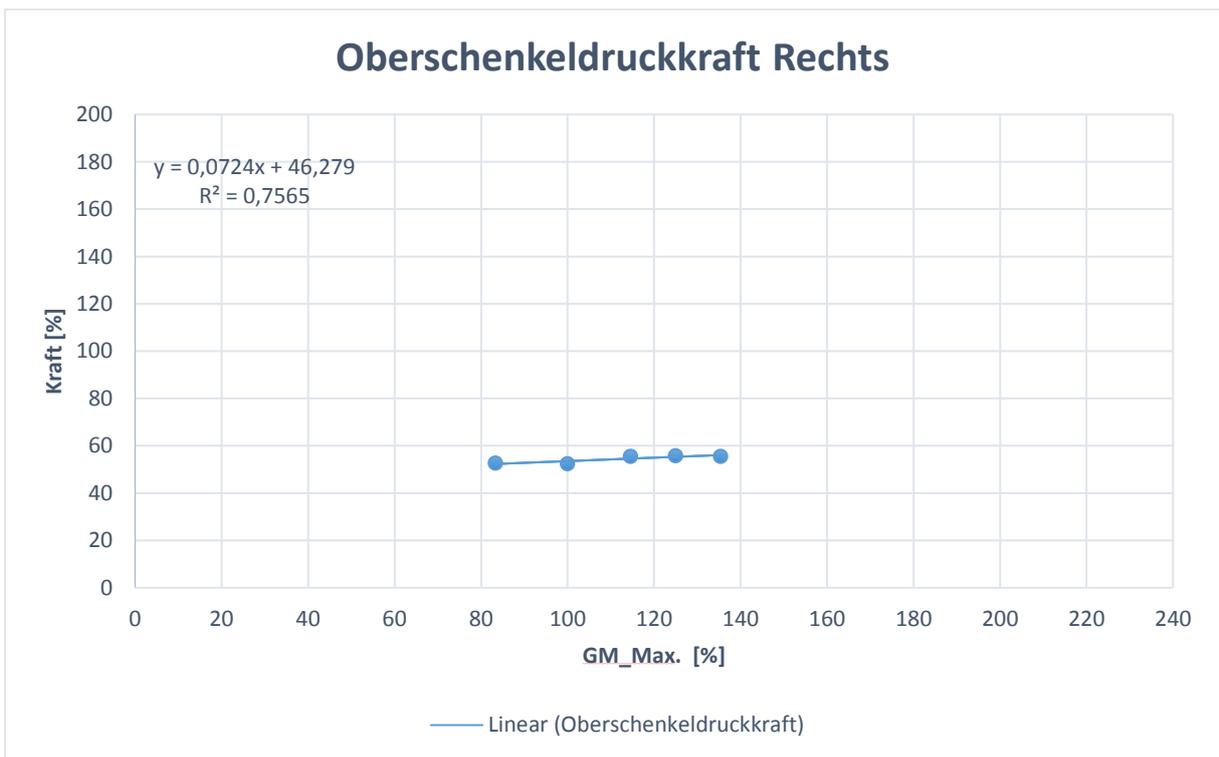
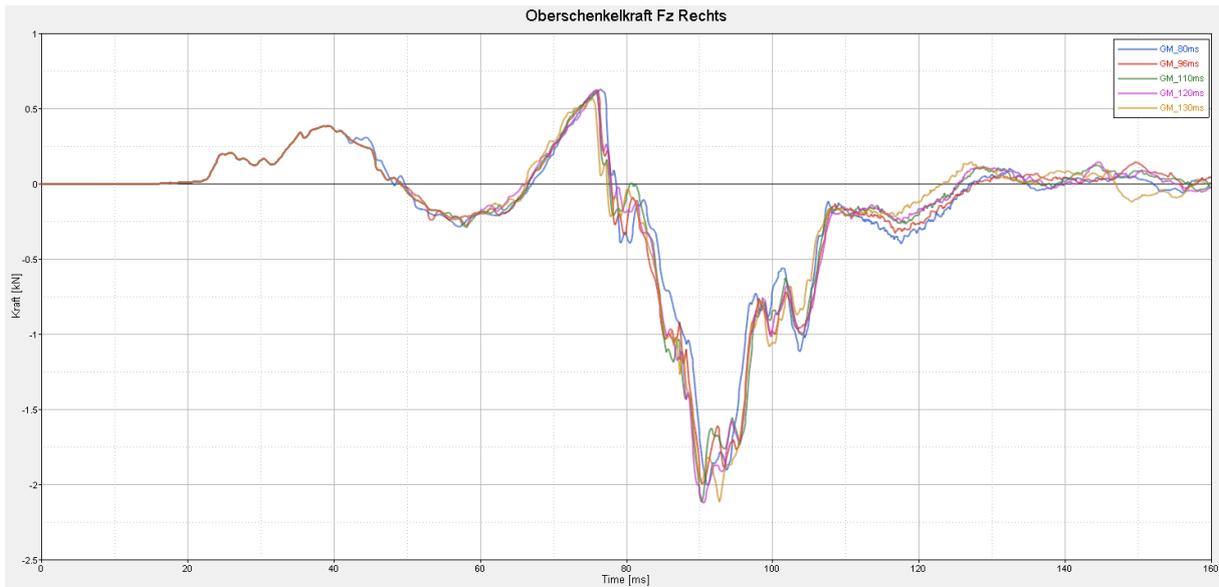


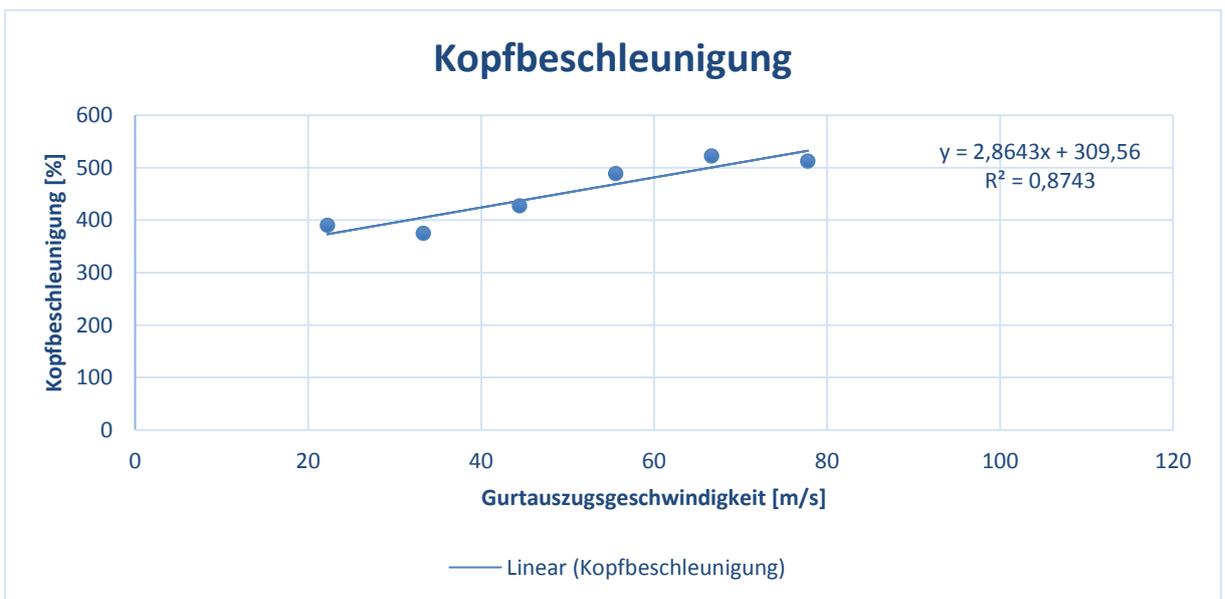
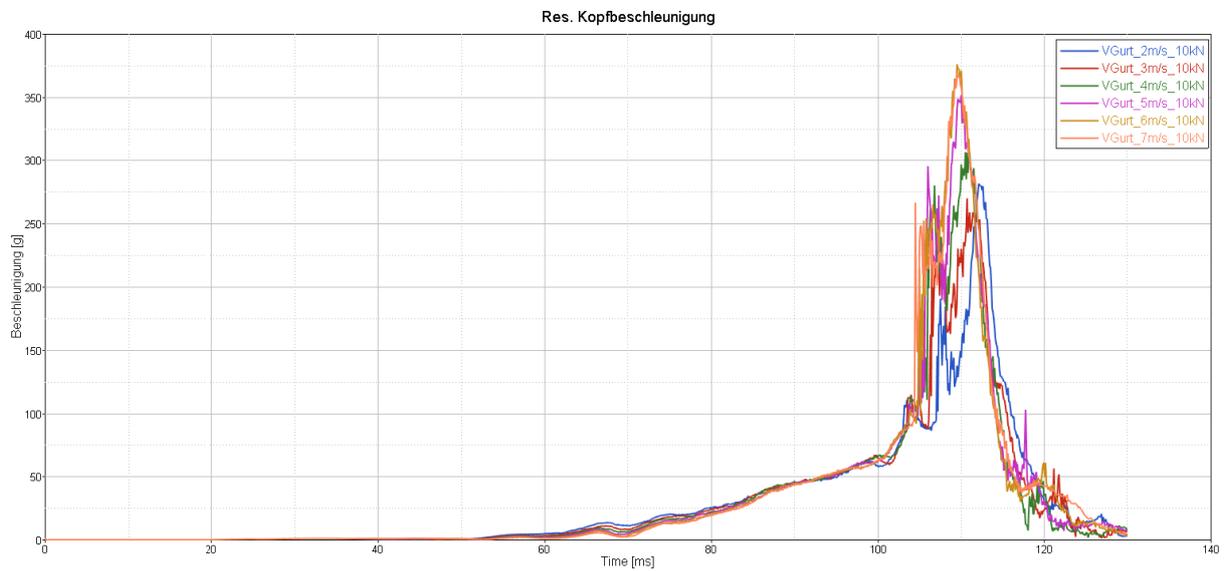
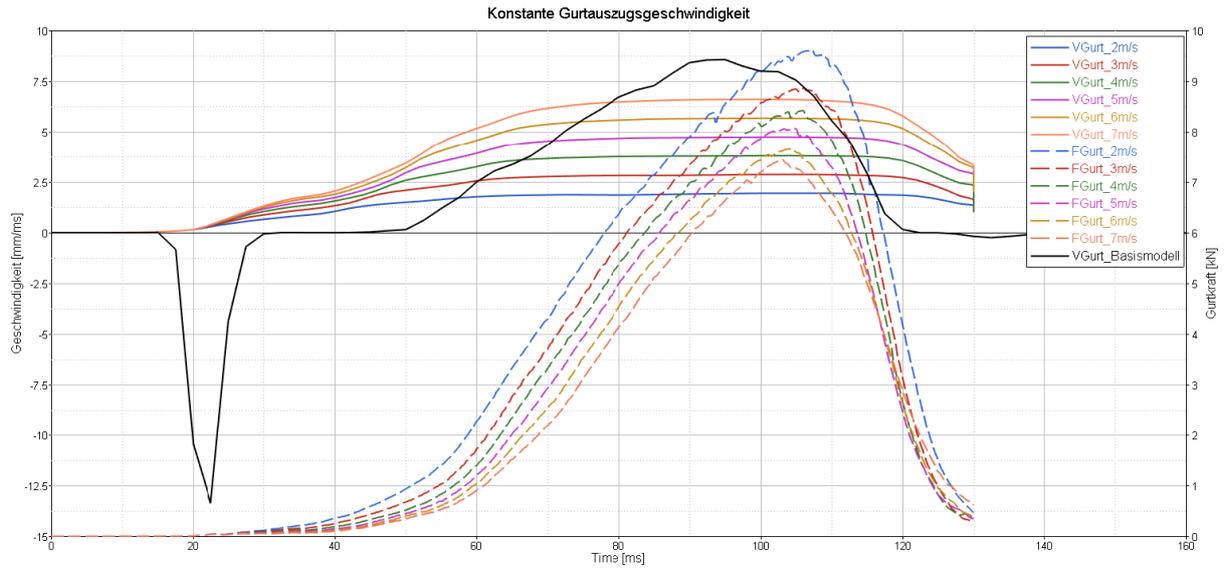


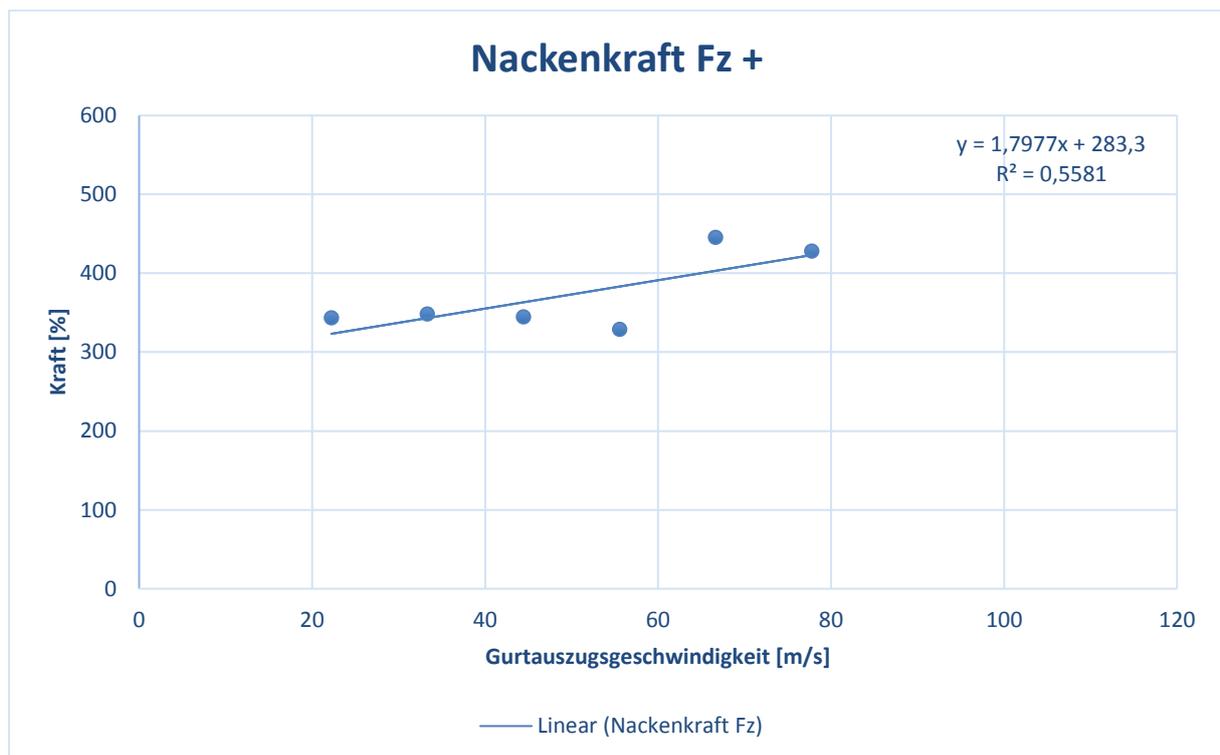
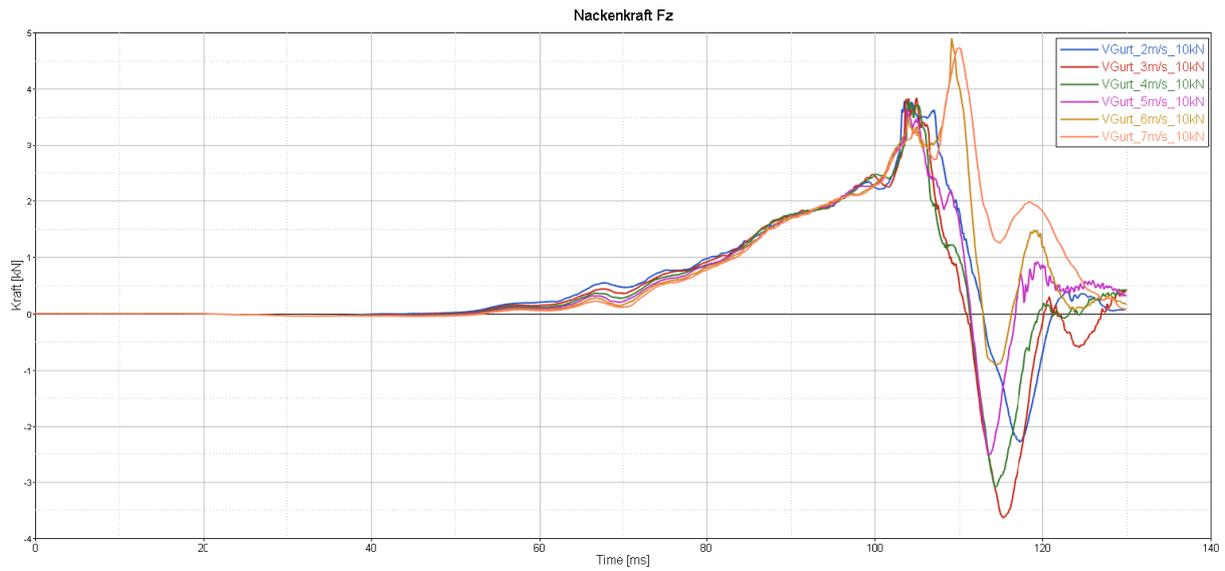


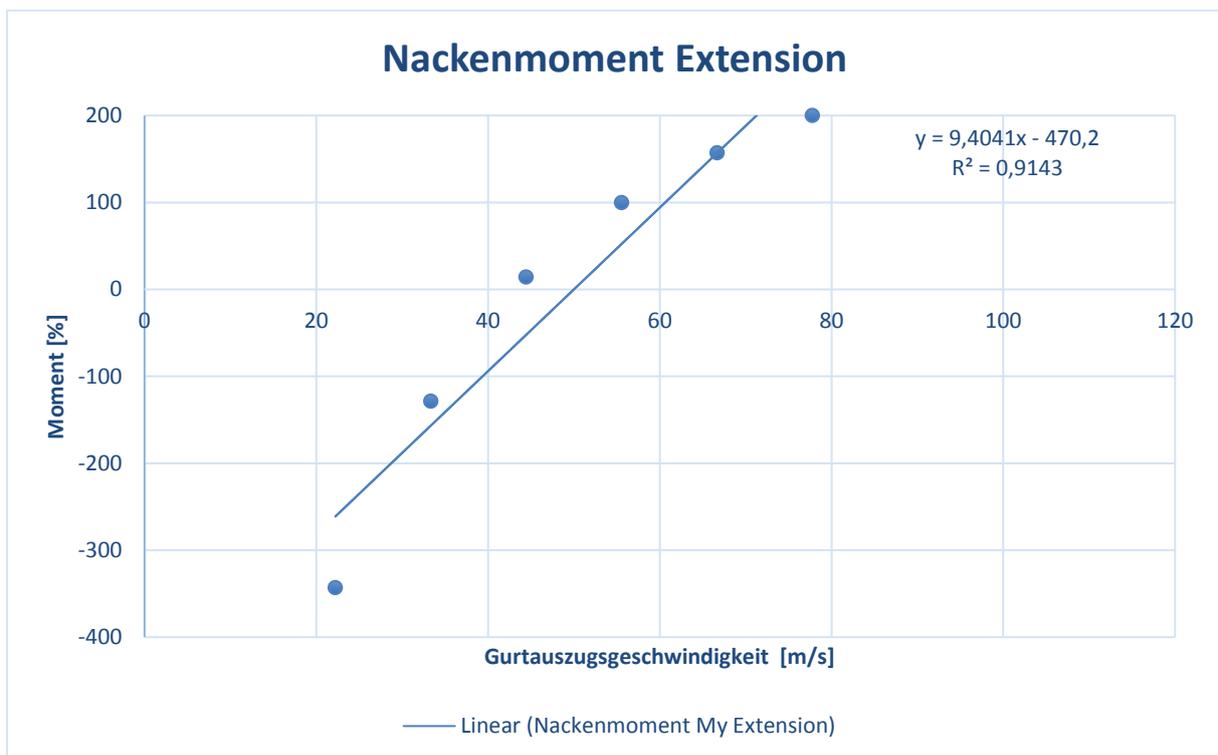
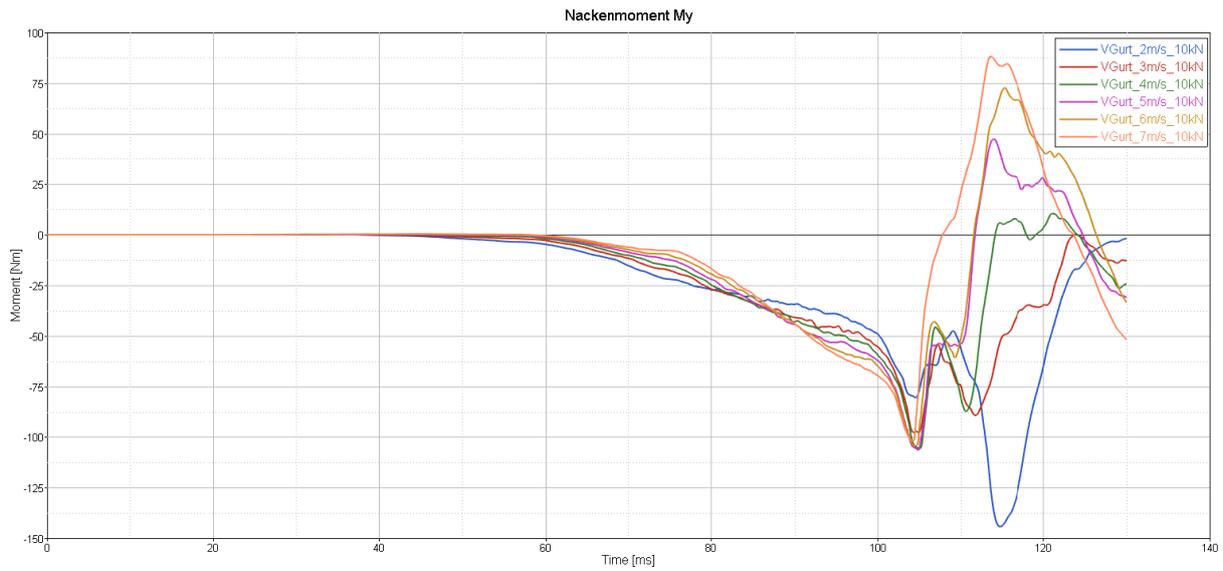


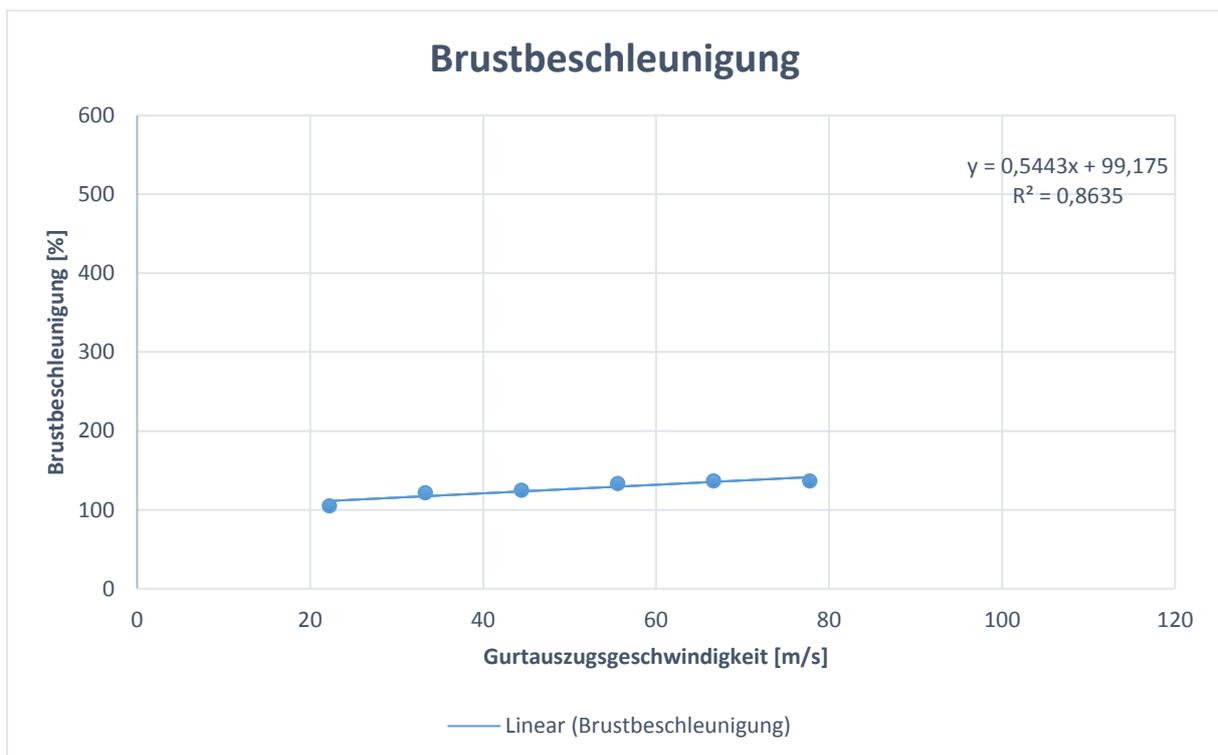
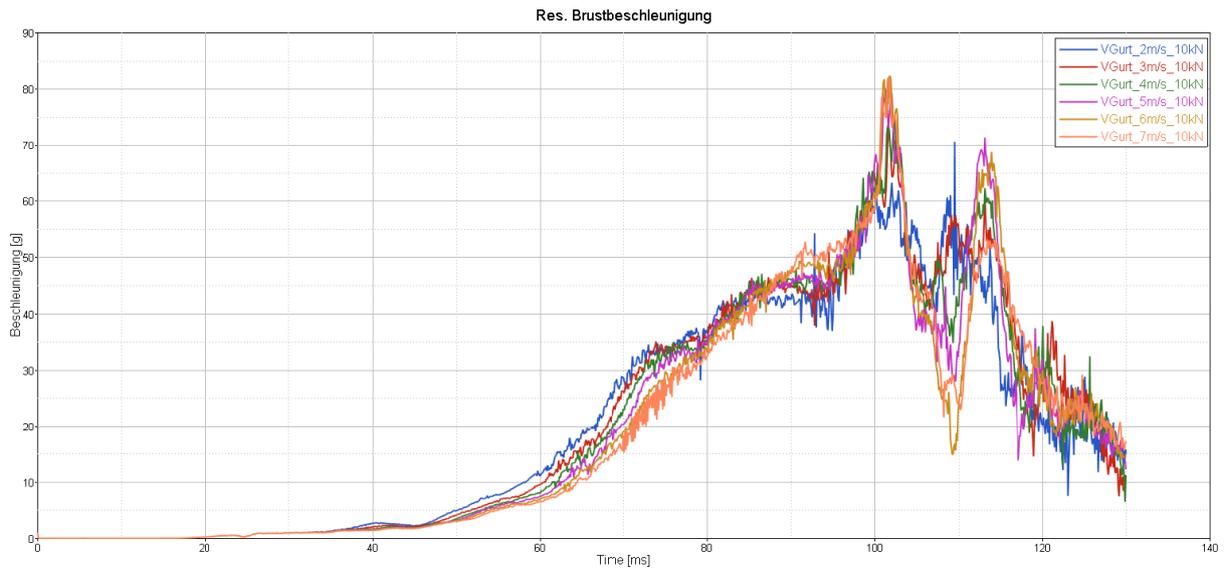


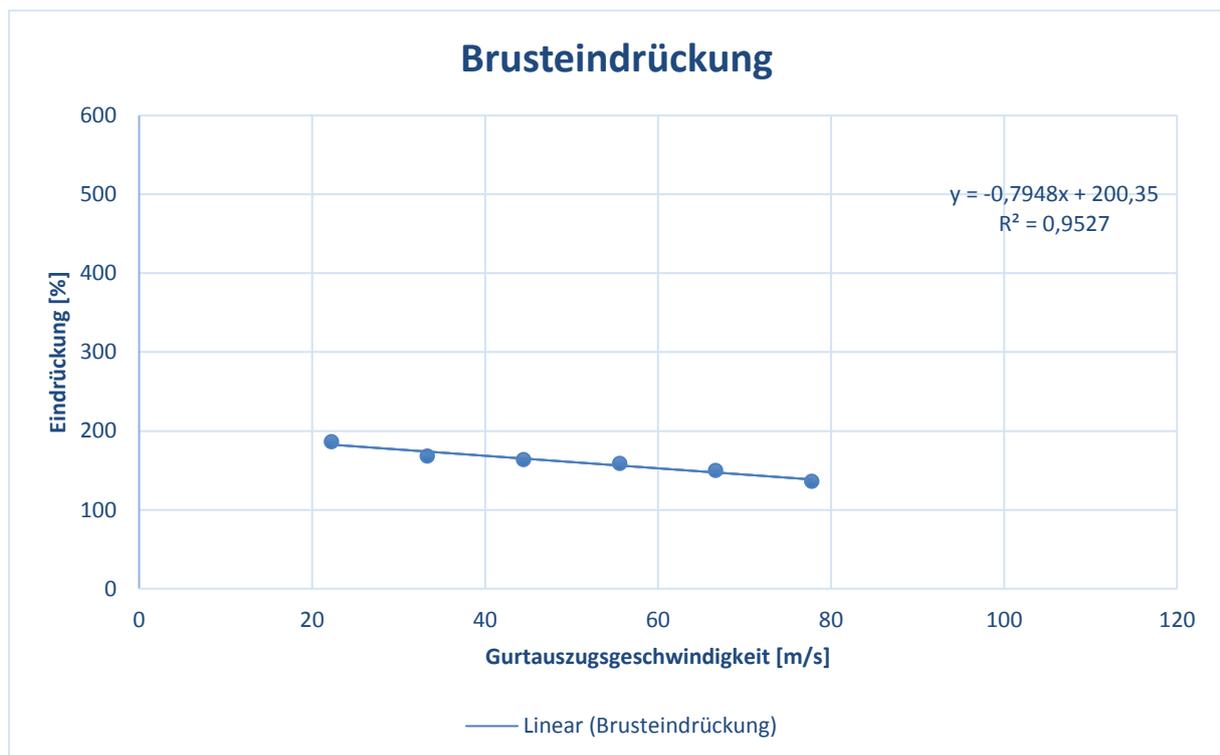
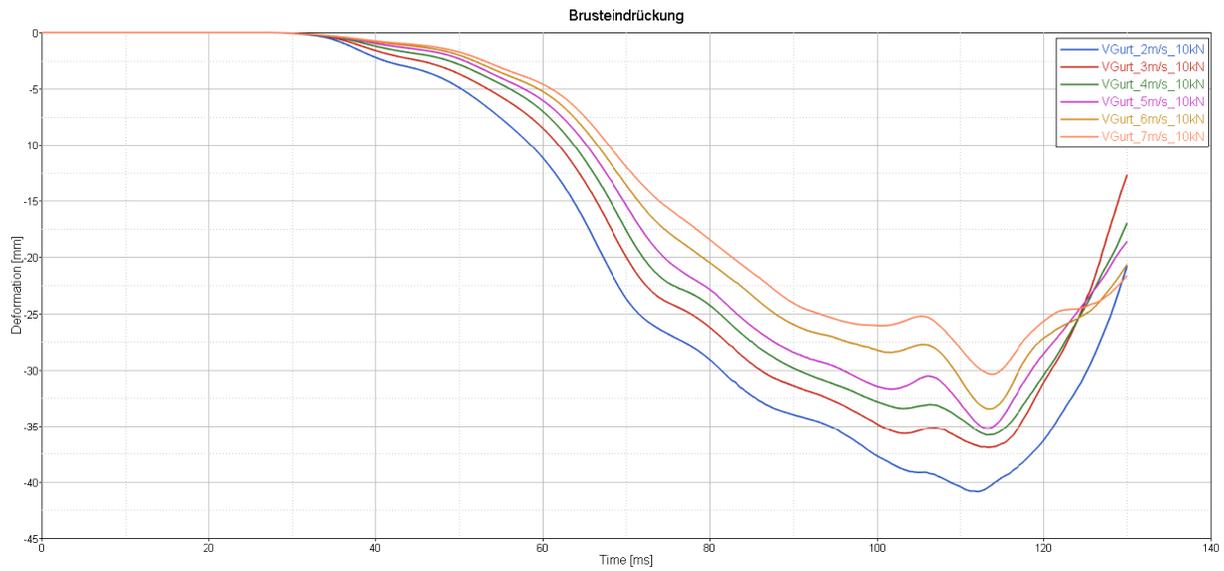


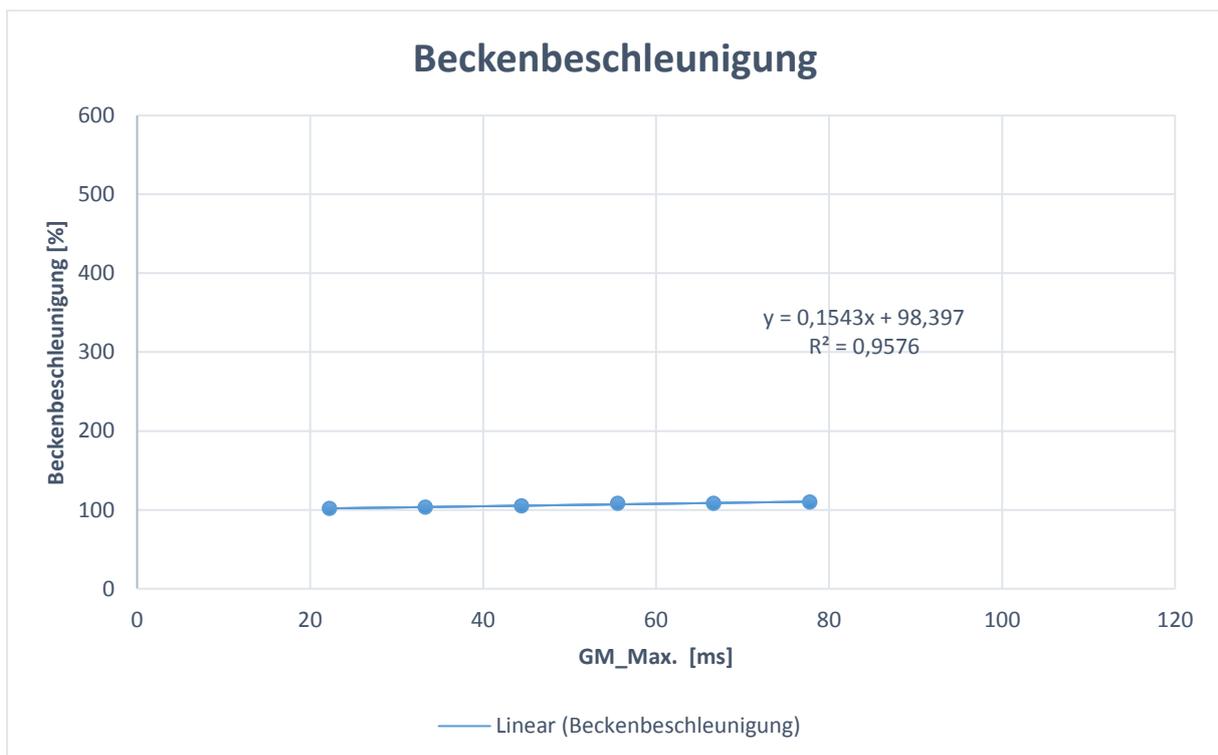
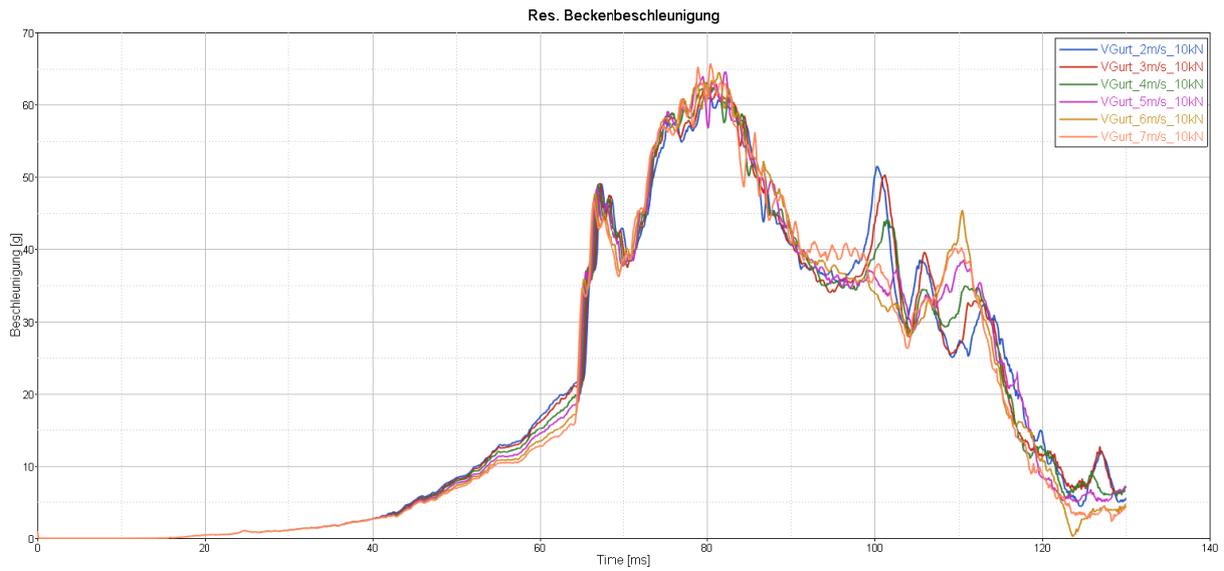


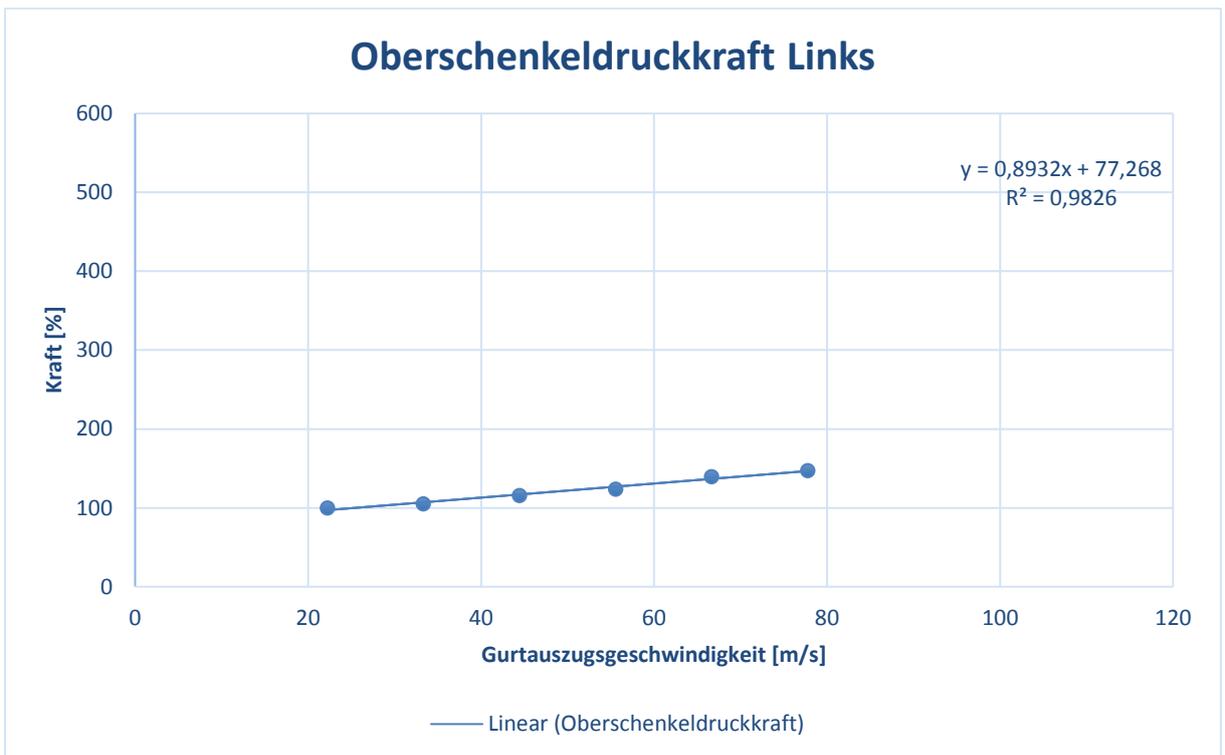
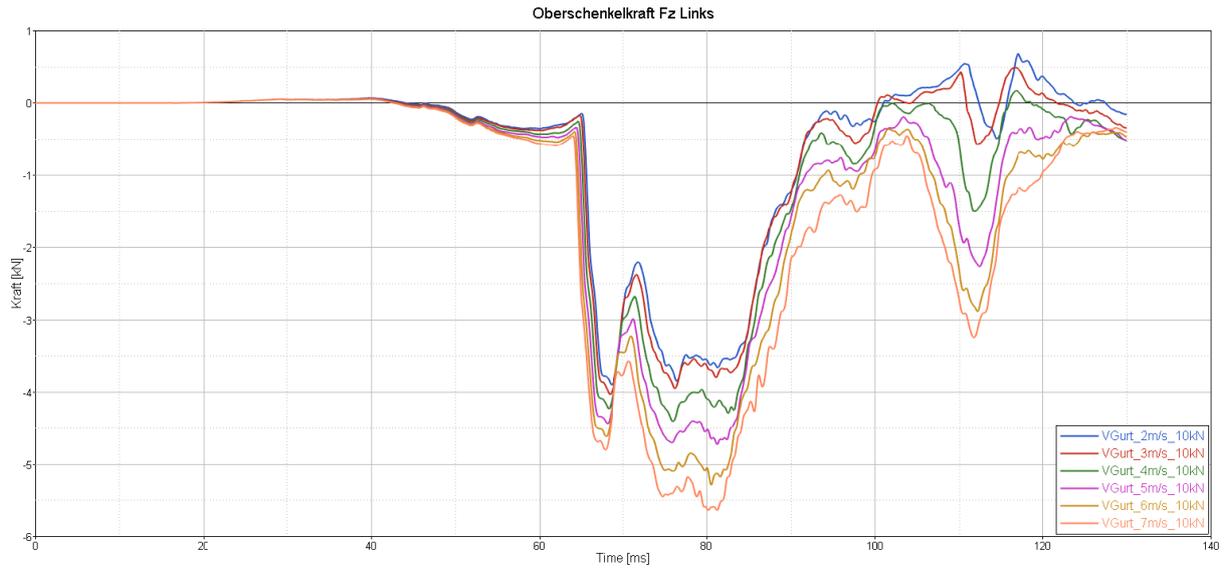


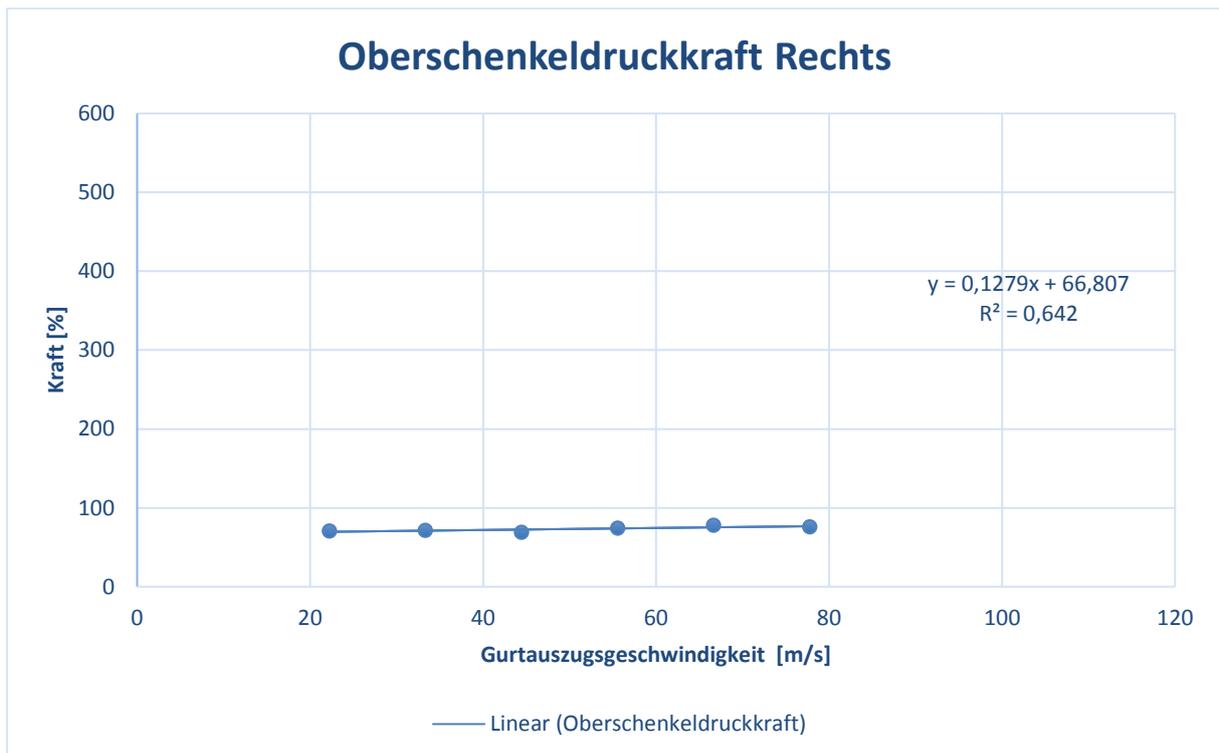
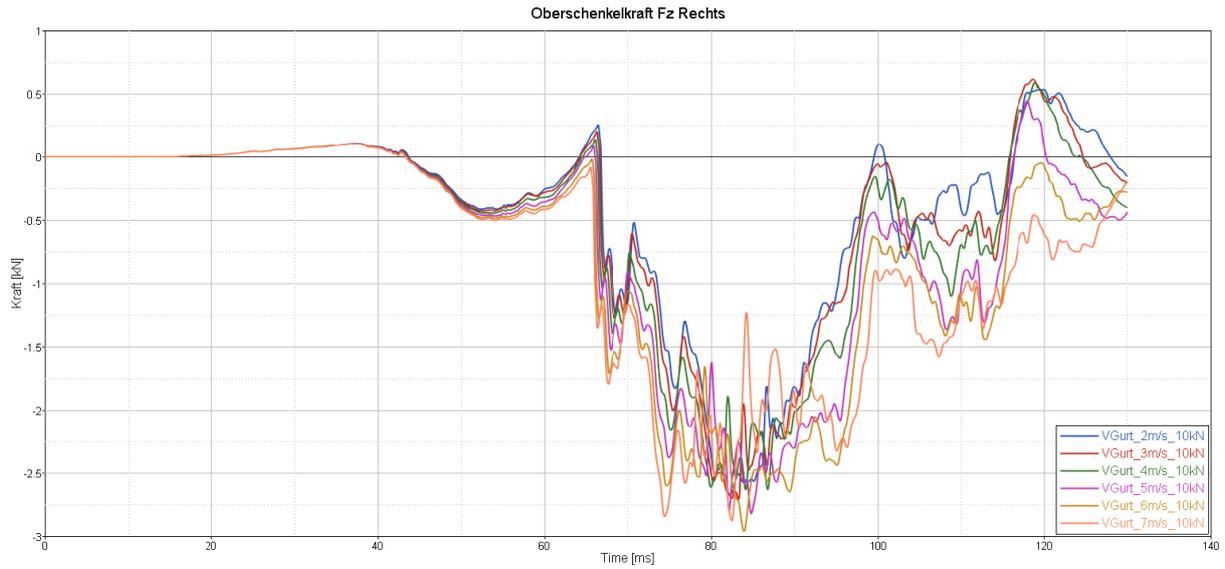






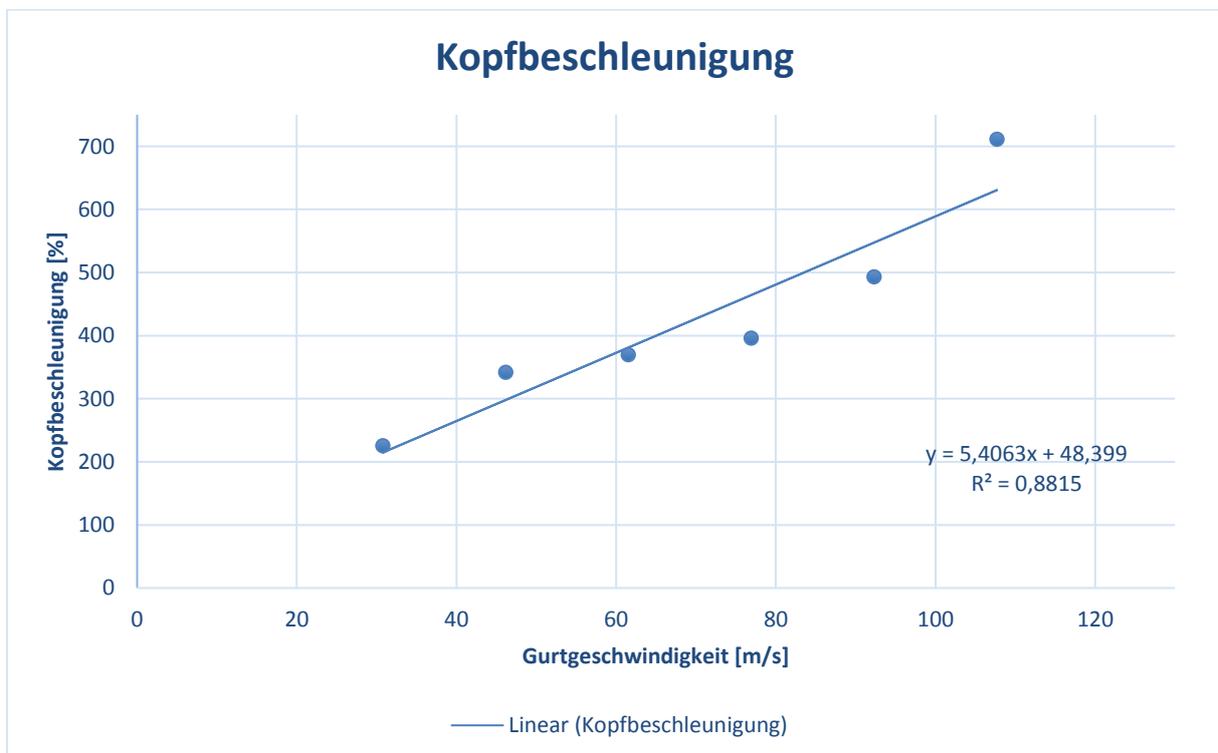
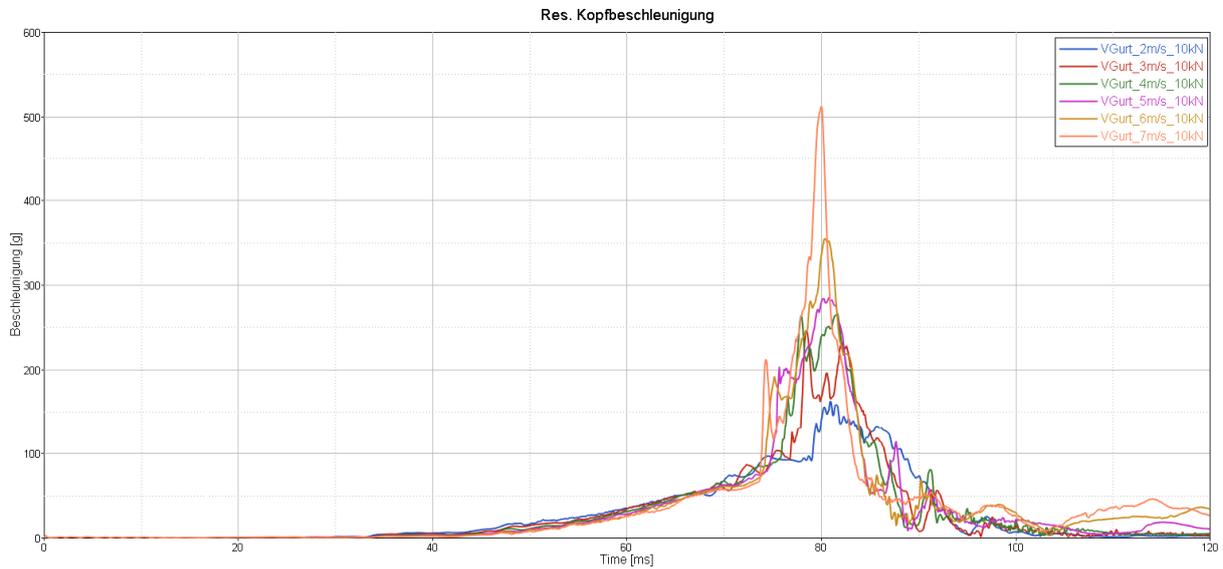


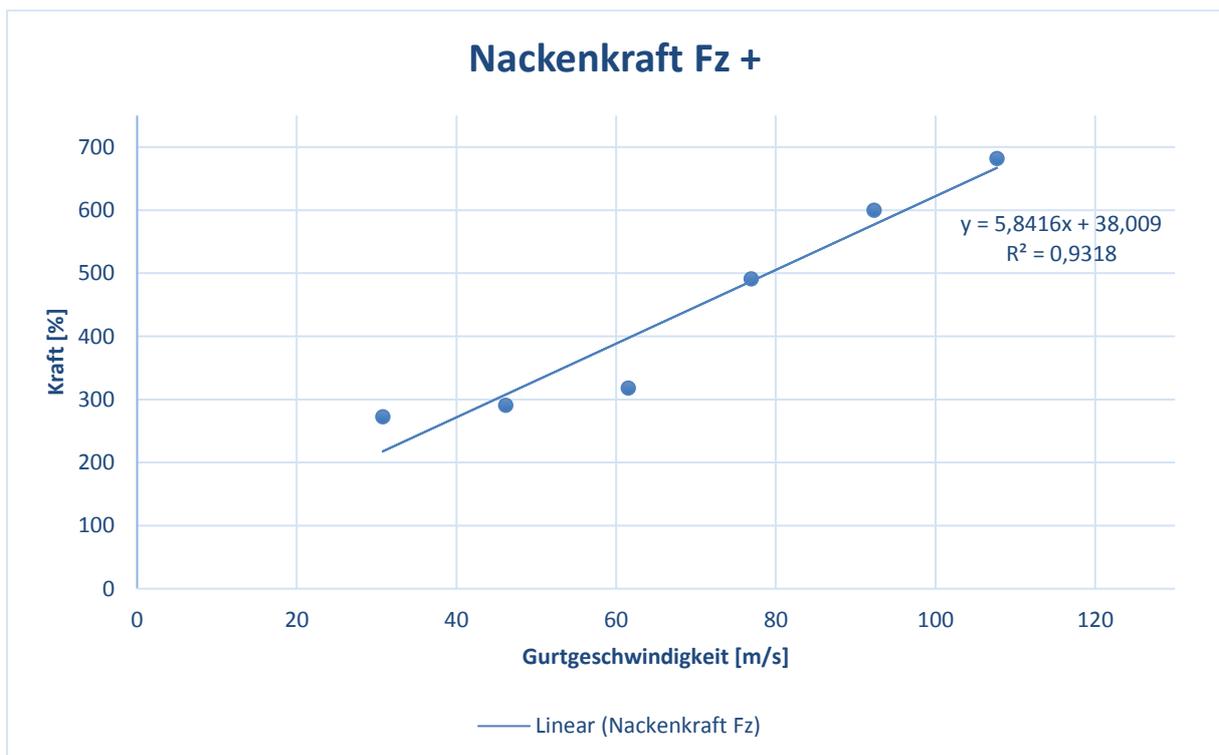
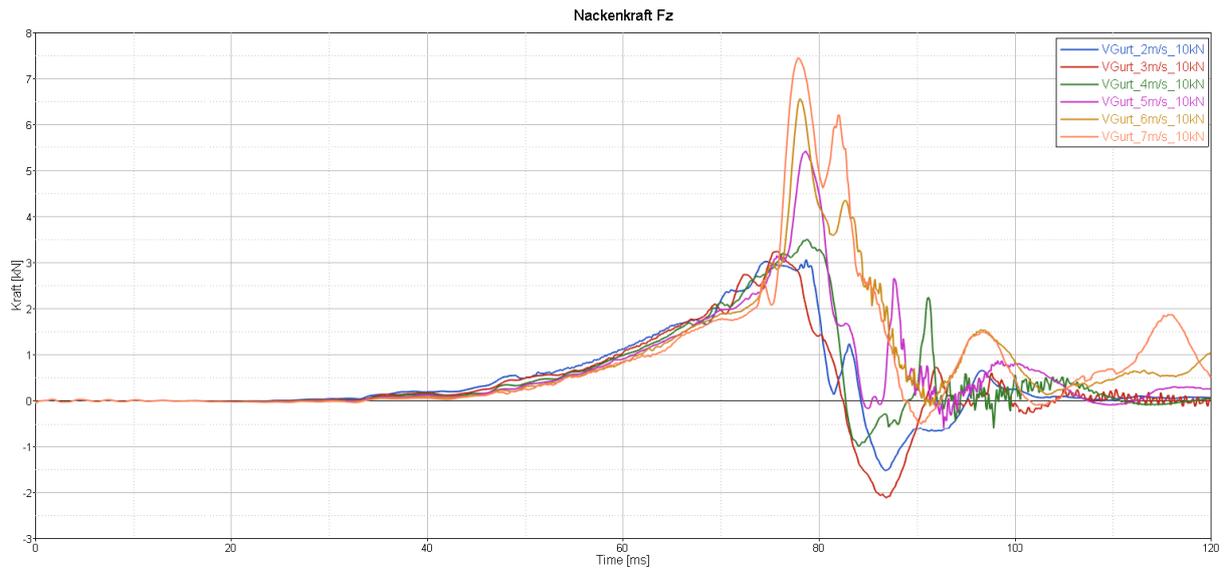


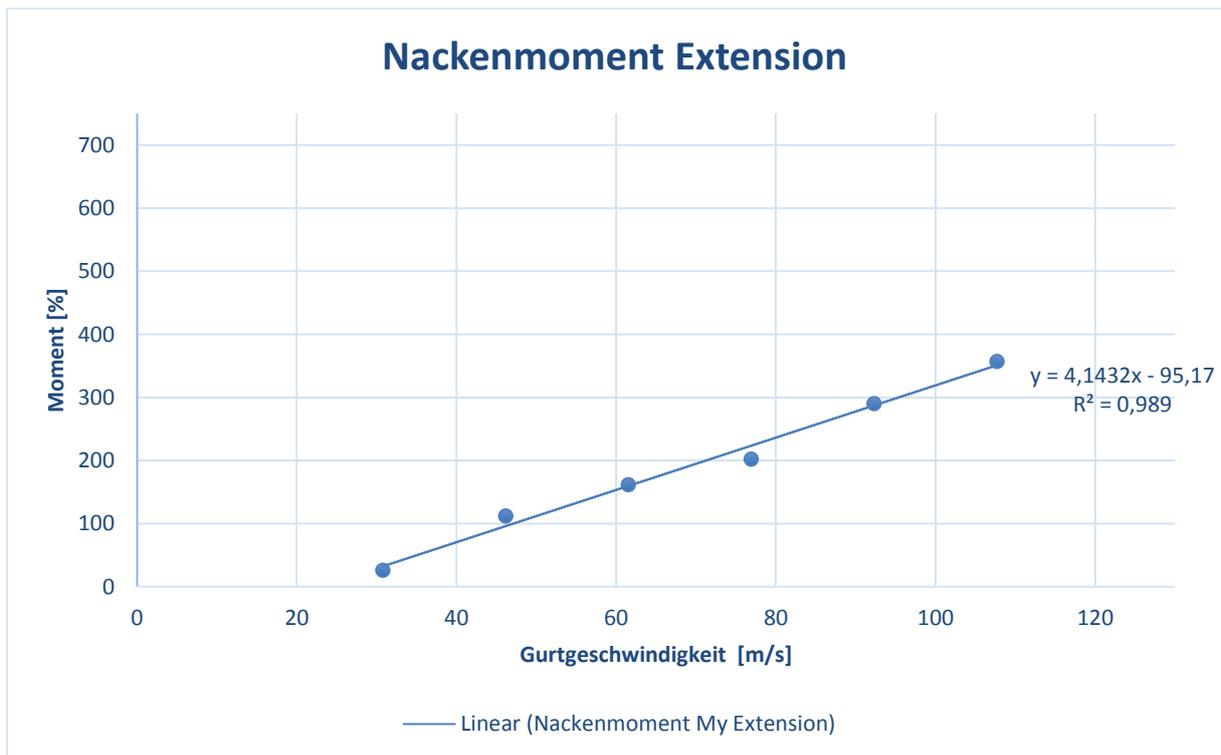
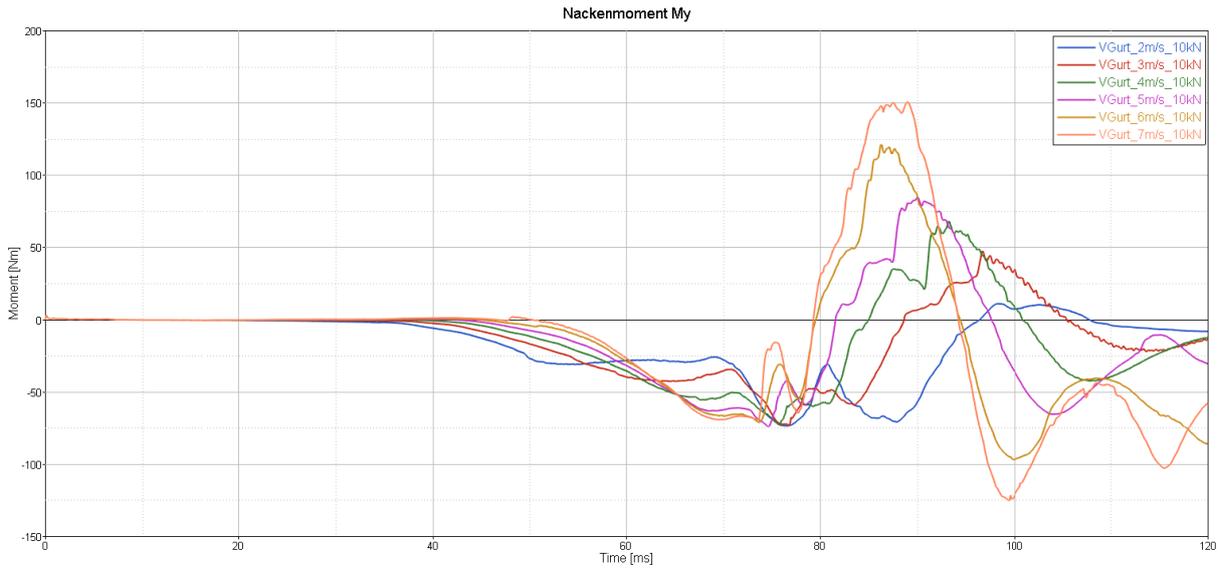


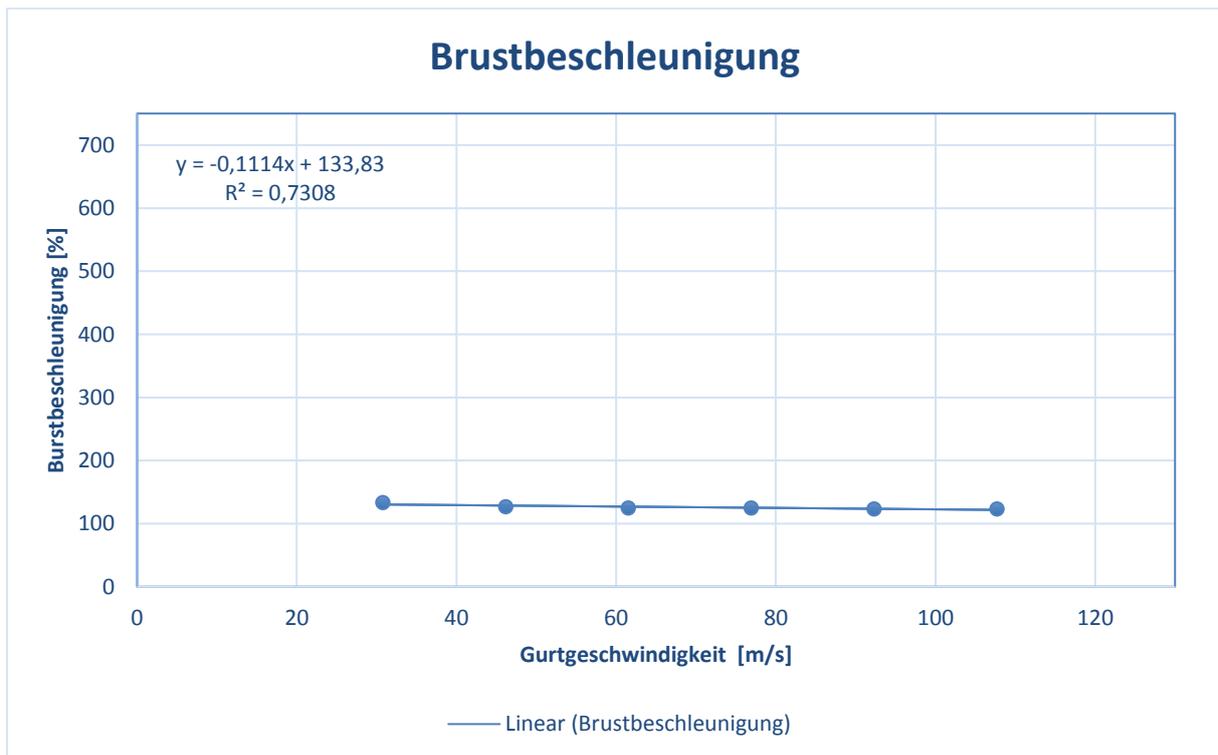
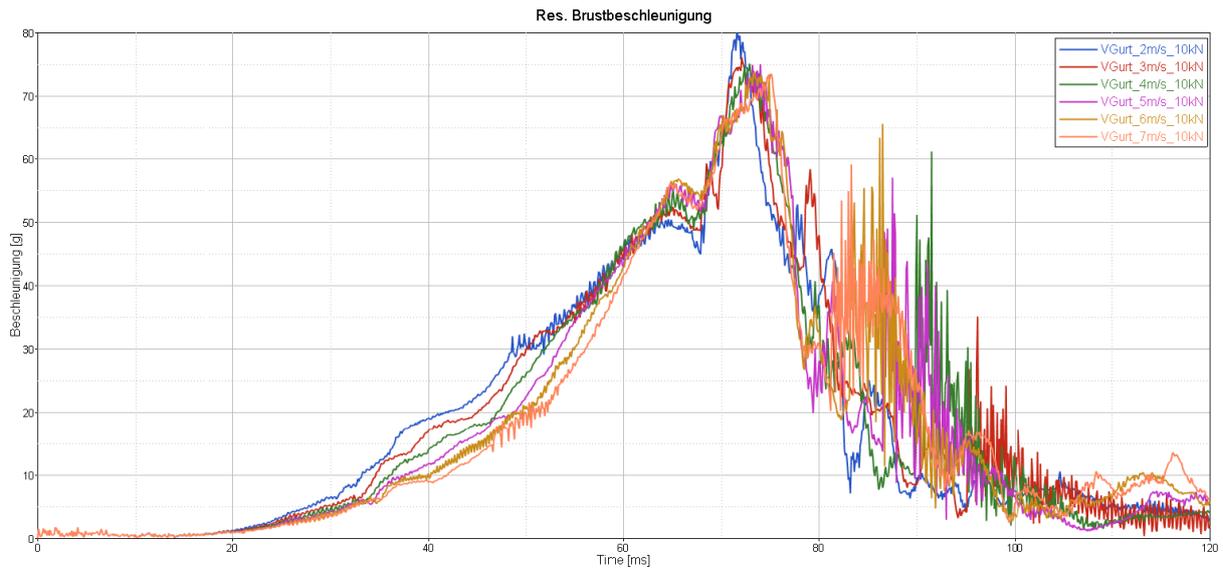
12.2 Ergebnisse aus der Parametervariation für den Hybrid 5% Frau Dummy

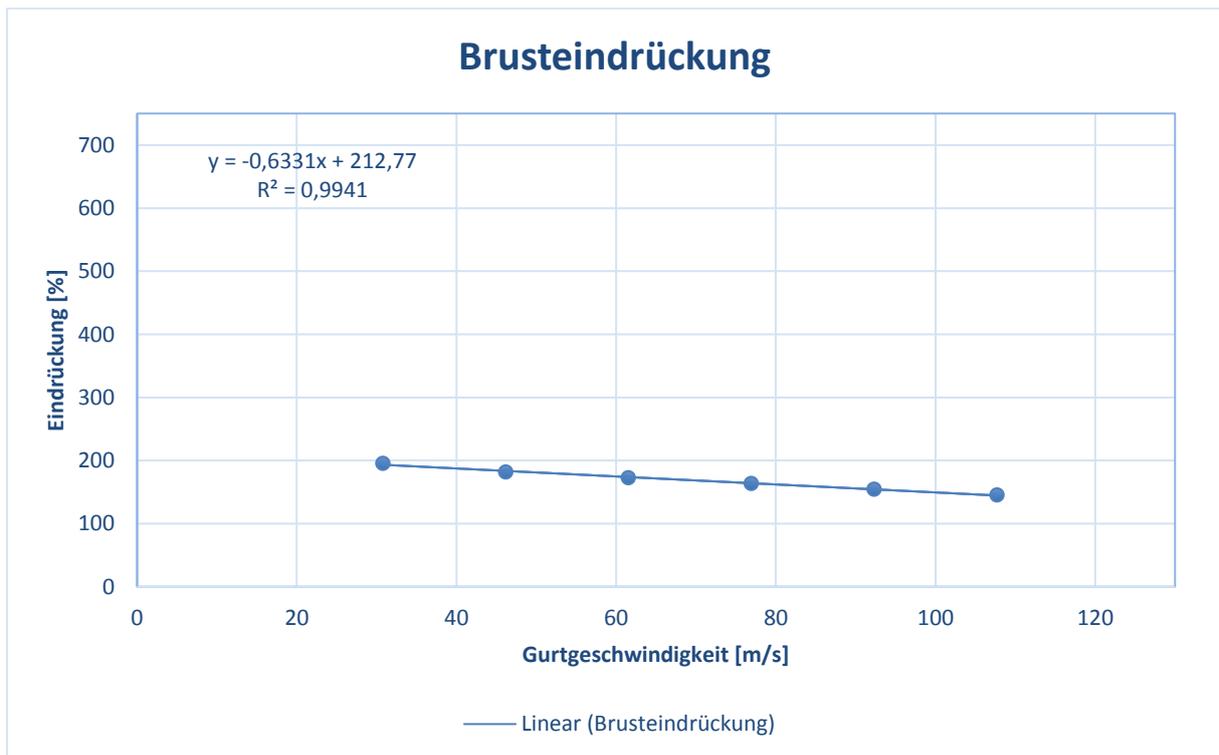
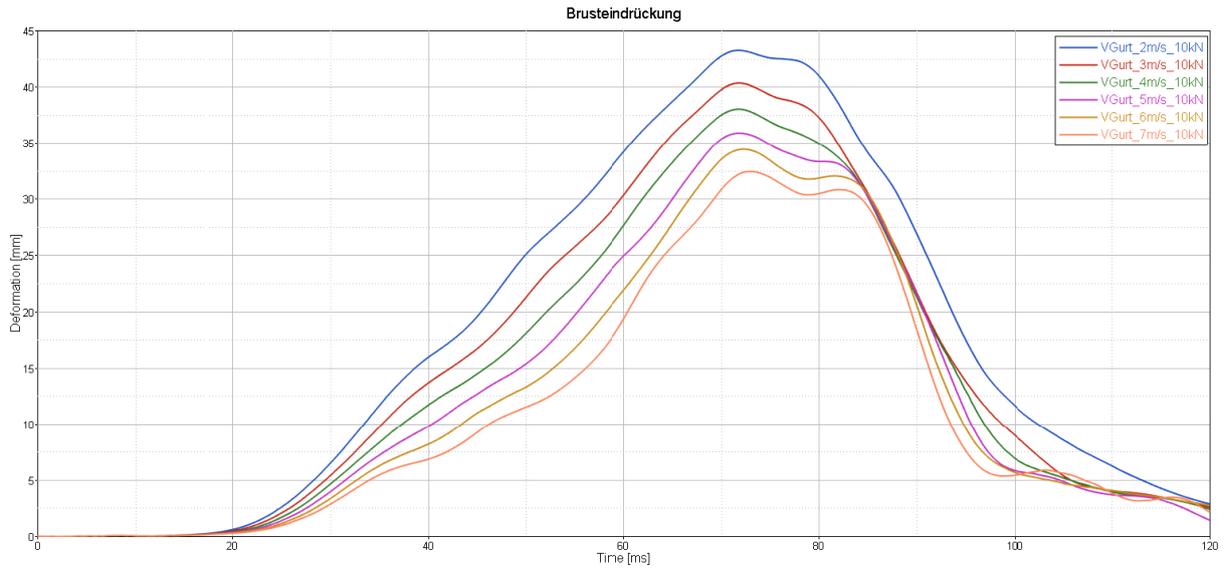
Variation der konstanten Gurtauszugsgeschwindigkeit im Bereich von 2-7ms und einer Schrittweite von 1ms

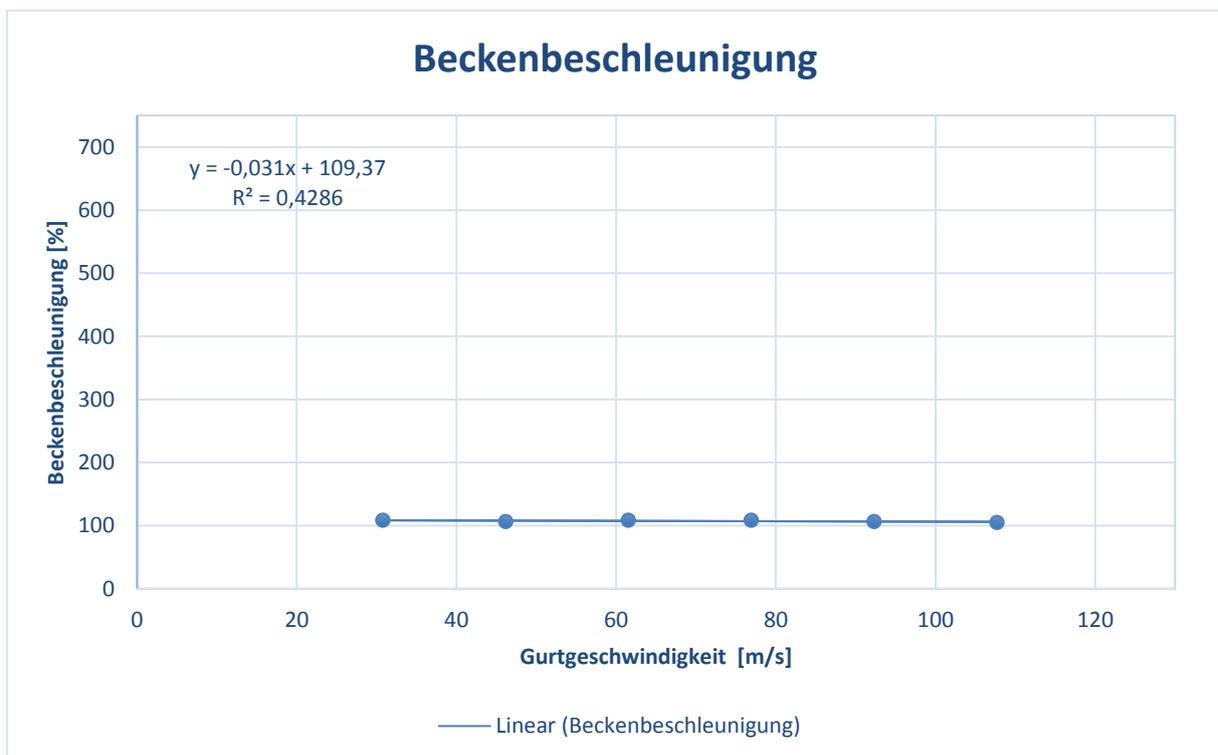
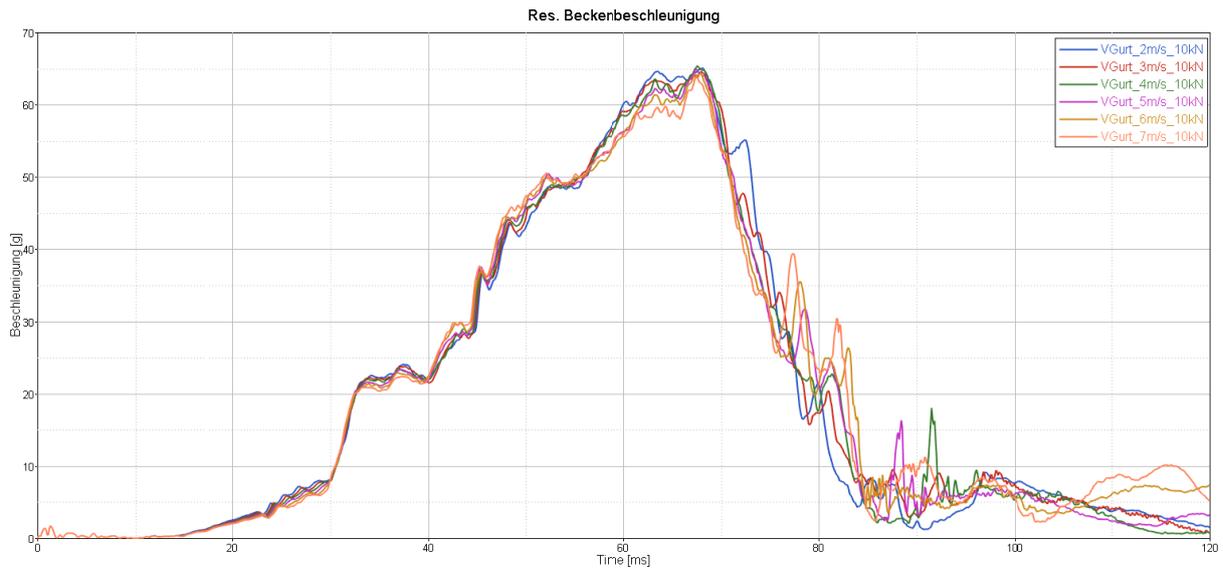


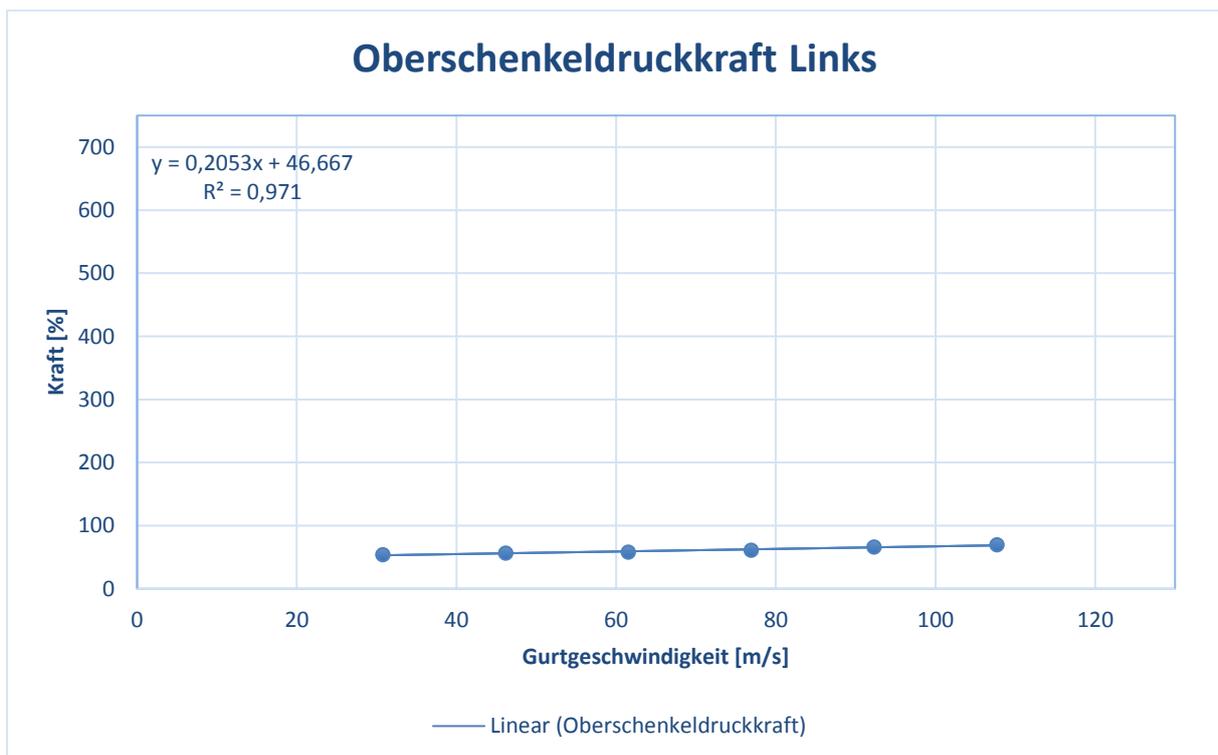
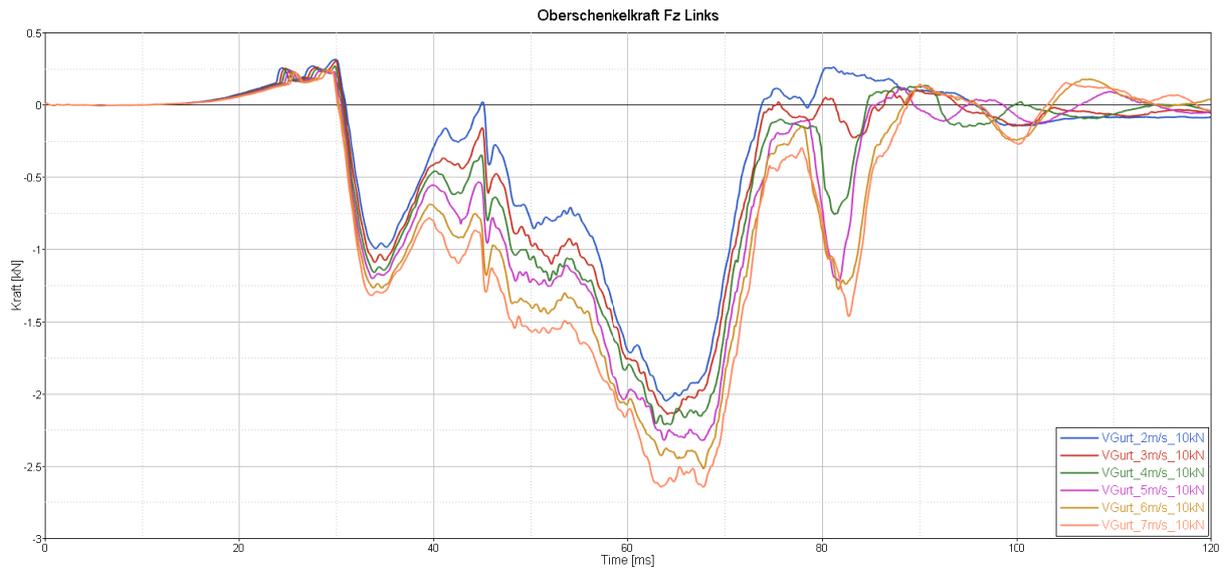


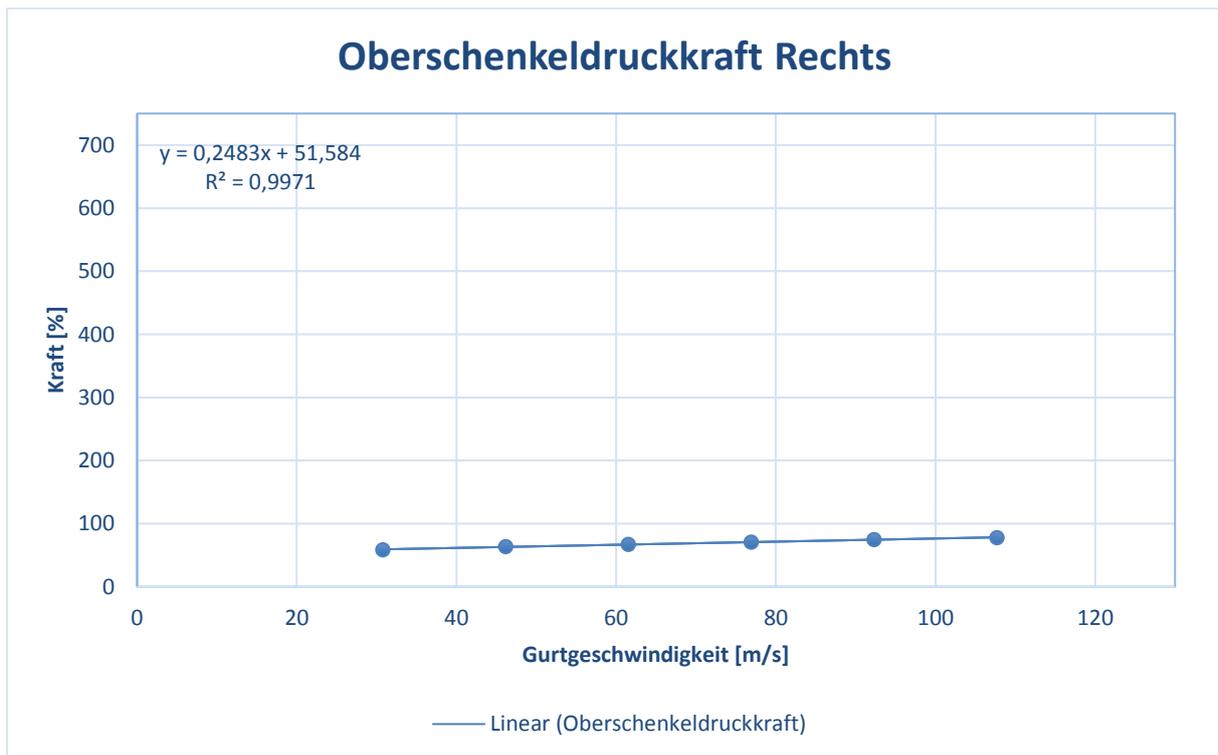
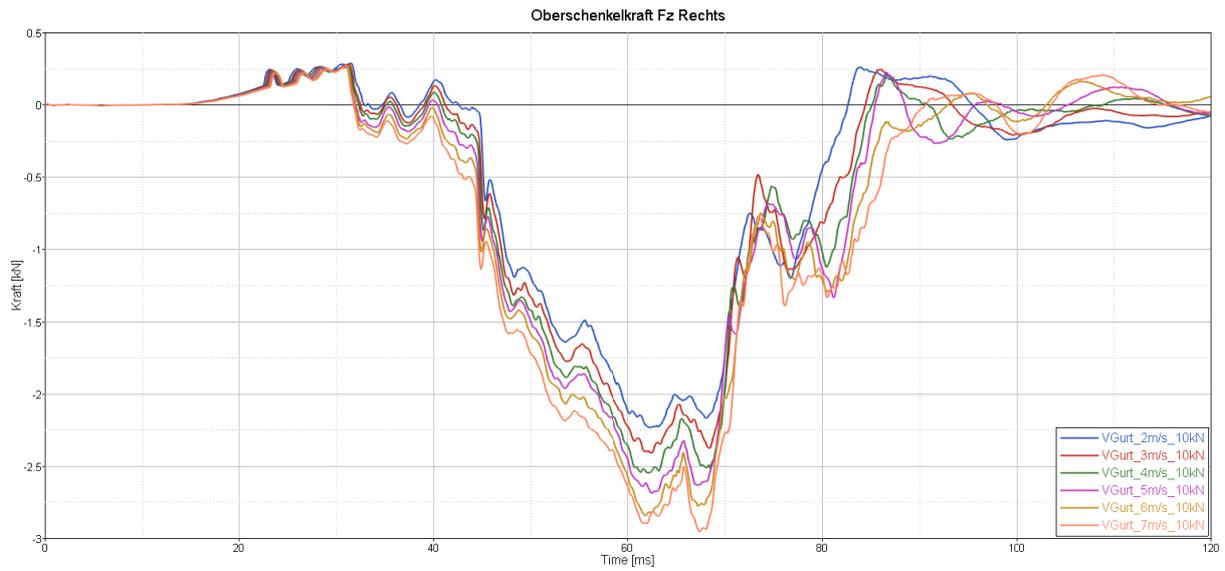




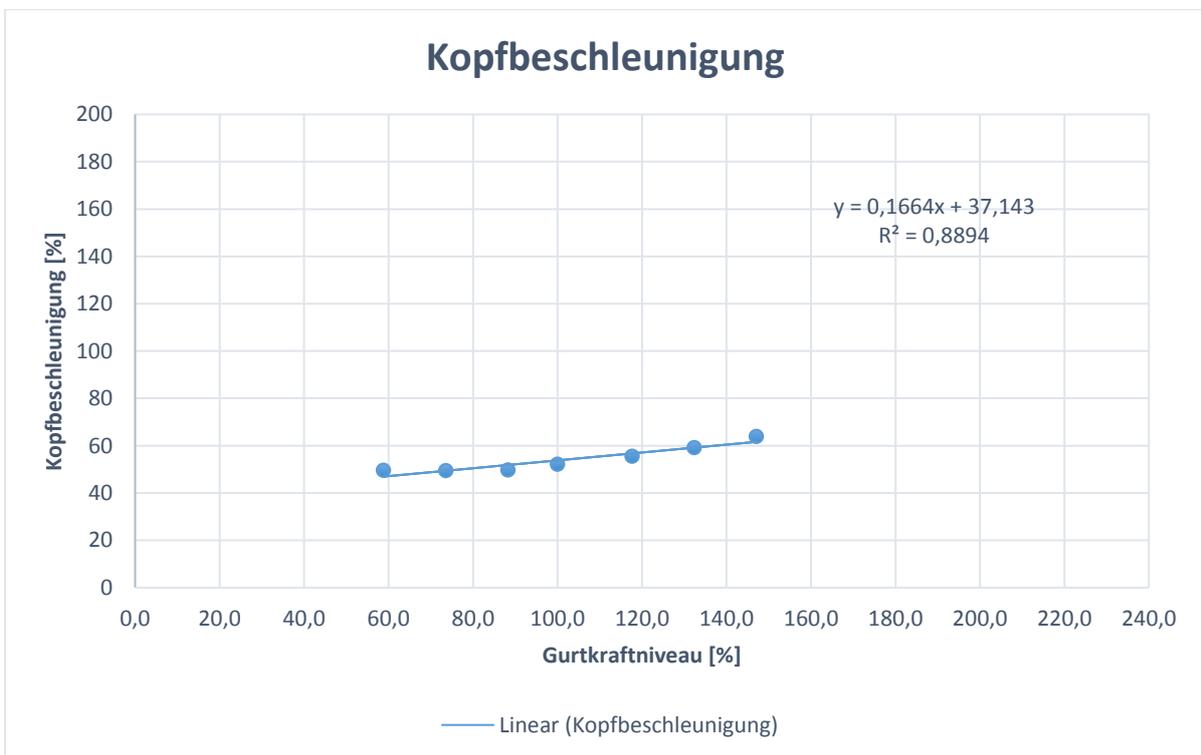
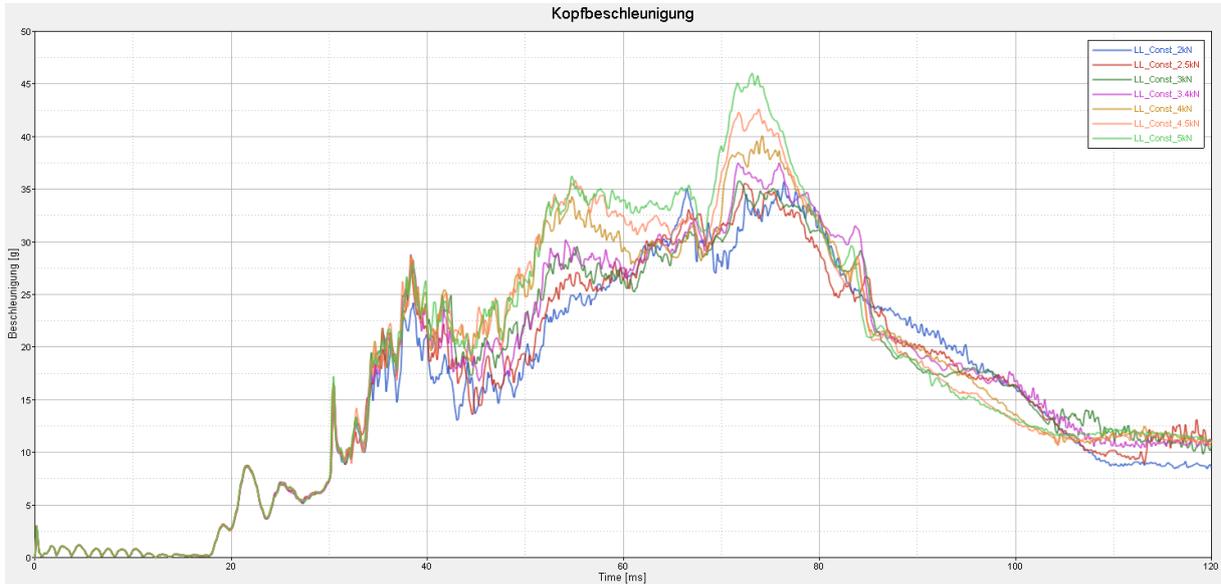


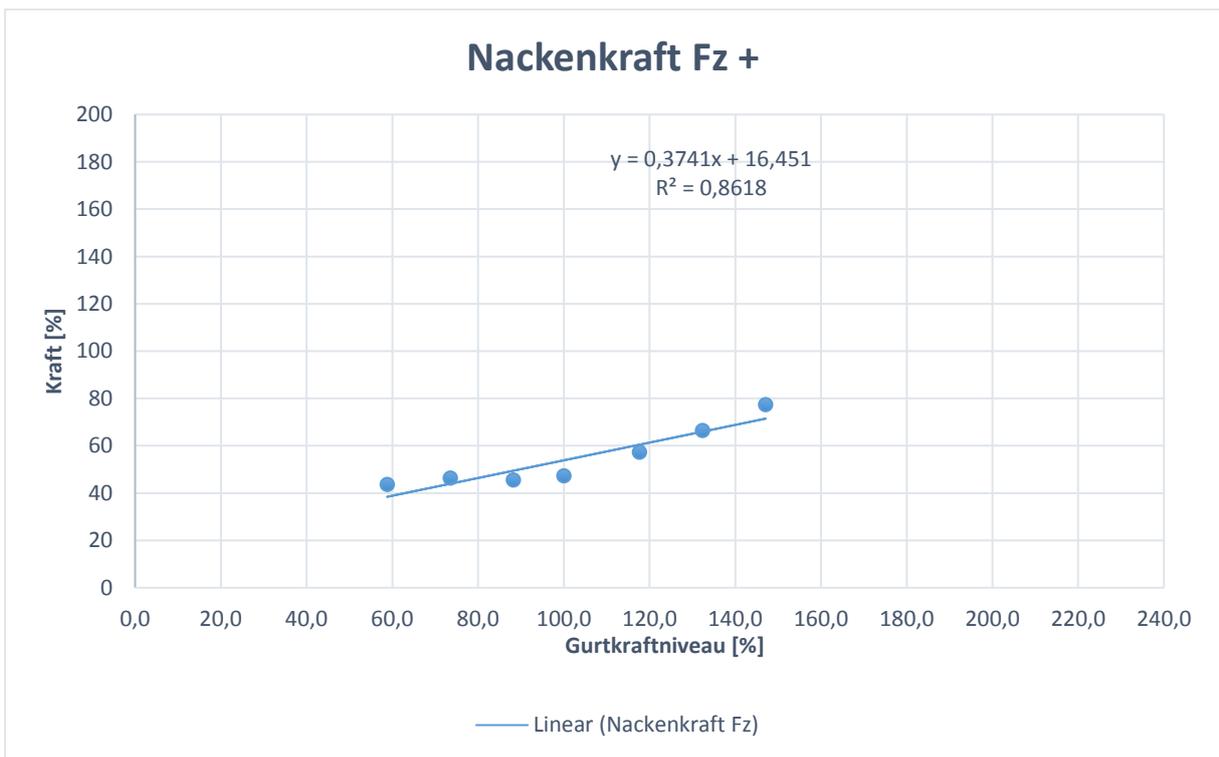
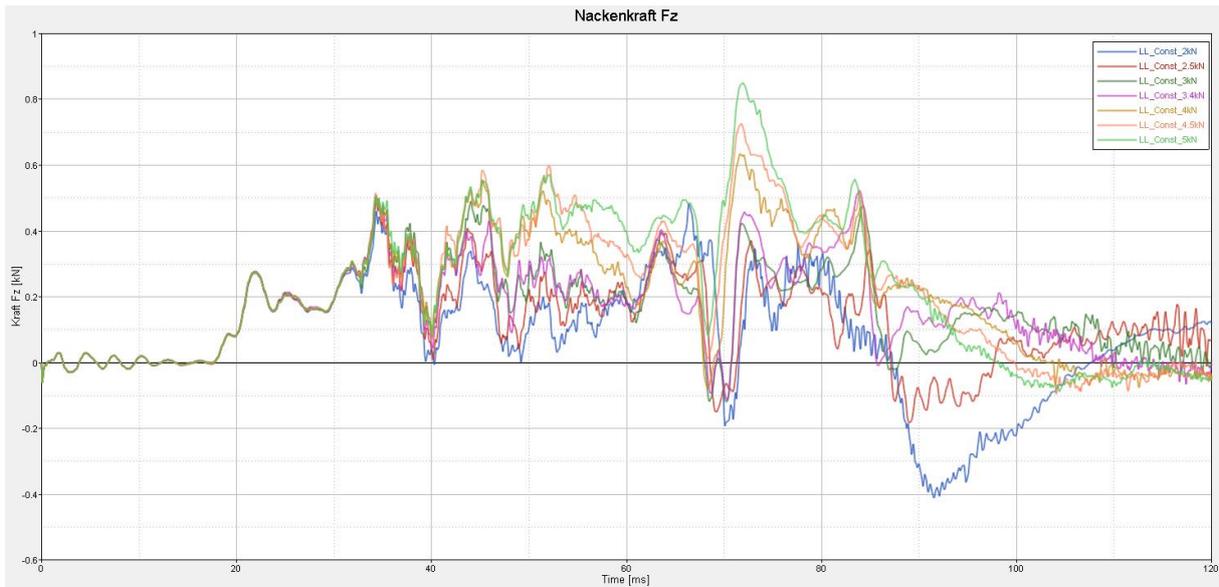


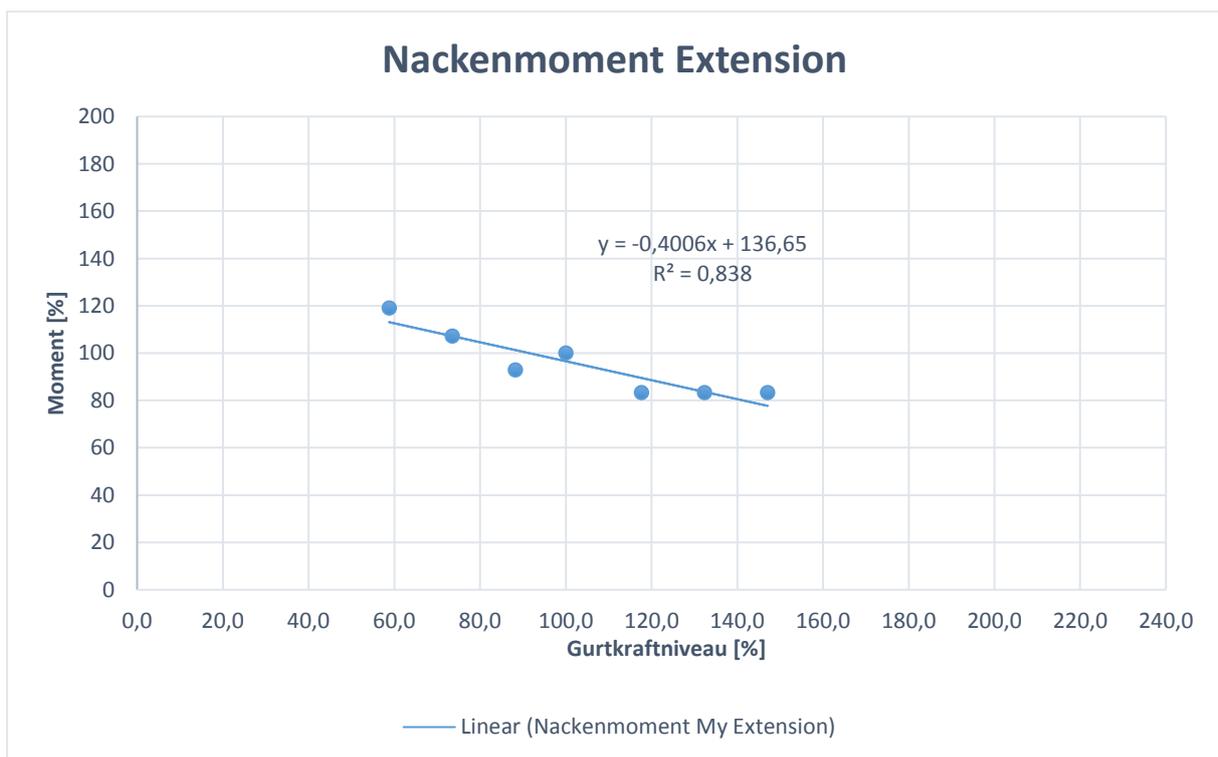
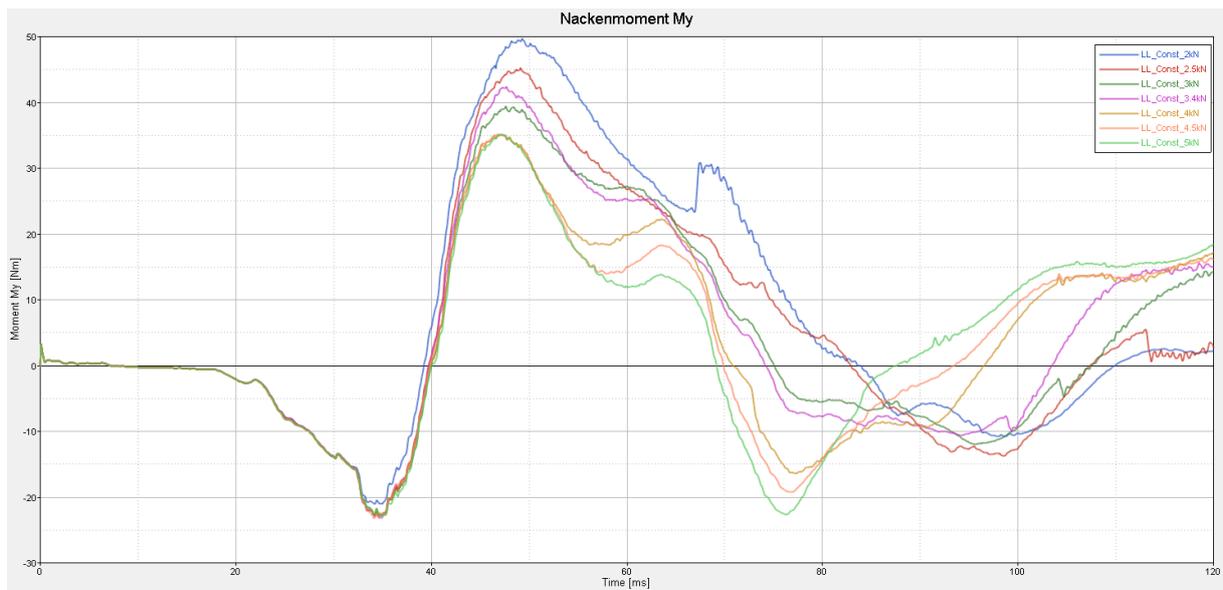


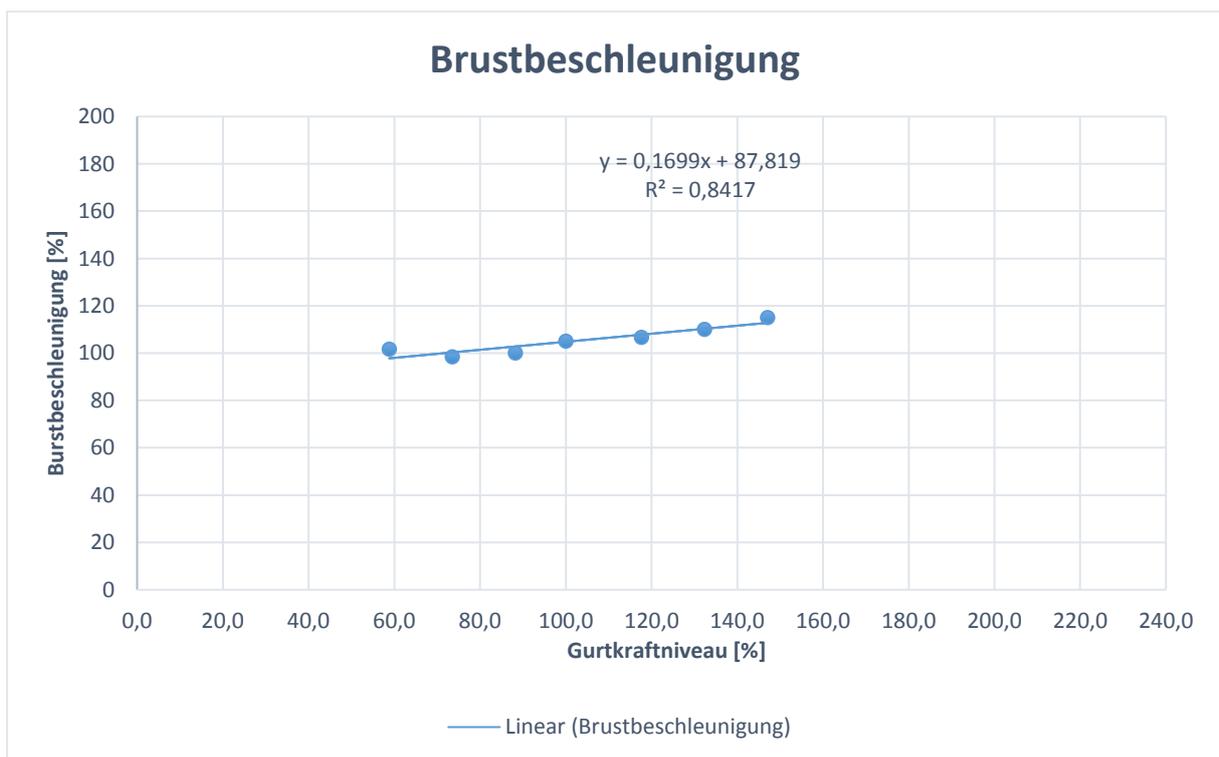
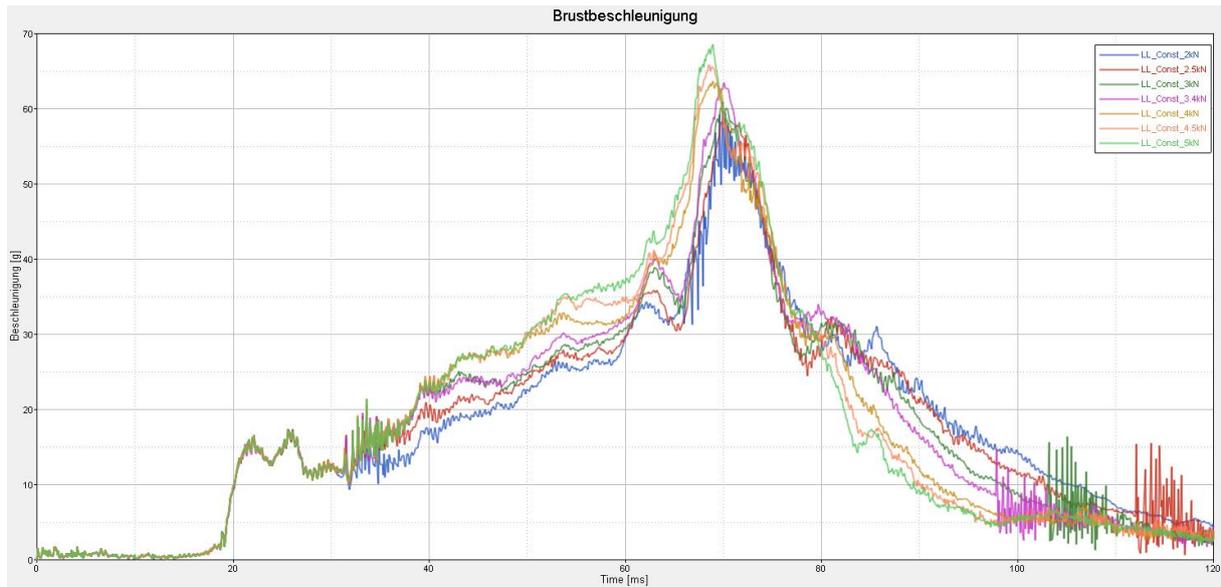


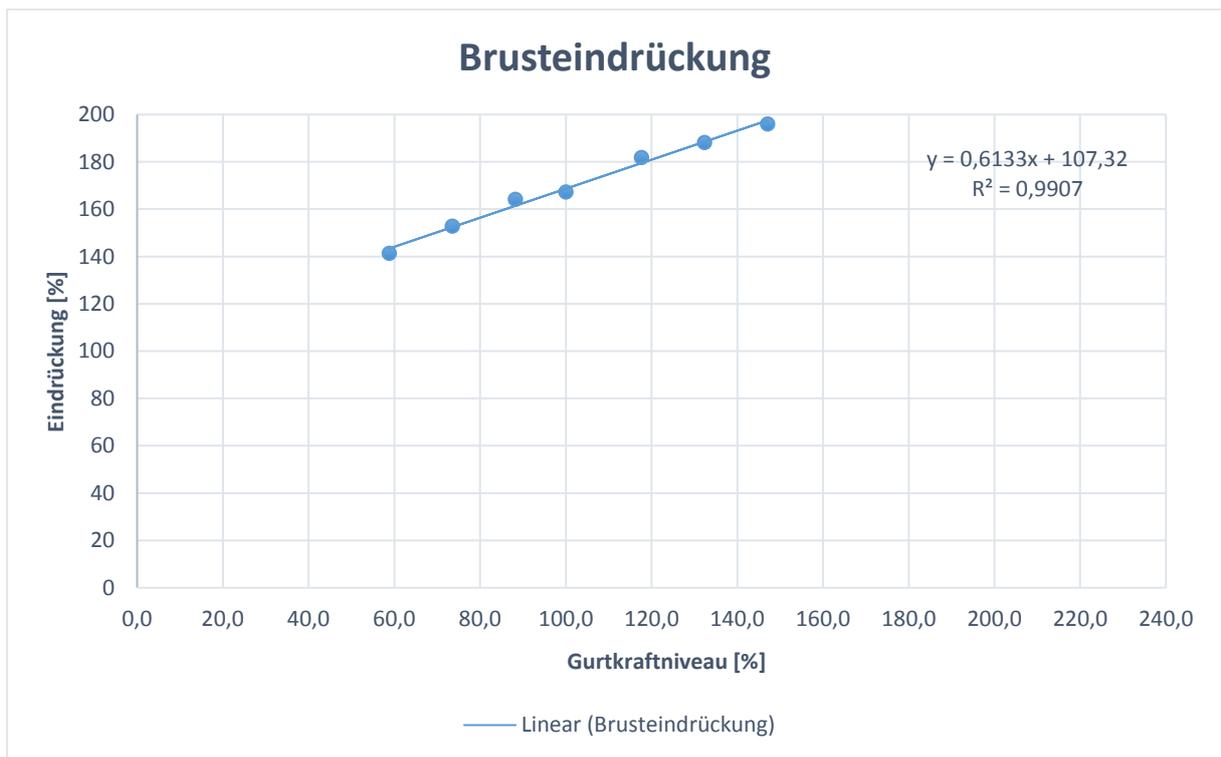
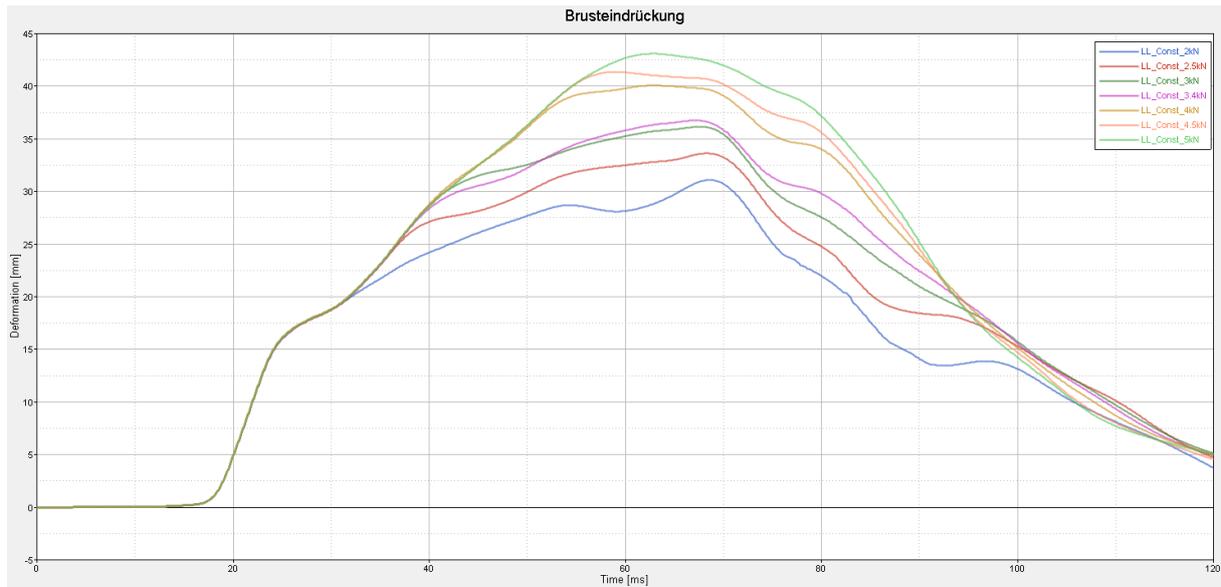
Variation der konstanten Gurtkraft im Bereich von 2-5kN und einer Schrittweite von 0,5kN

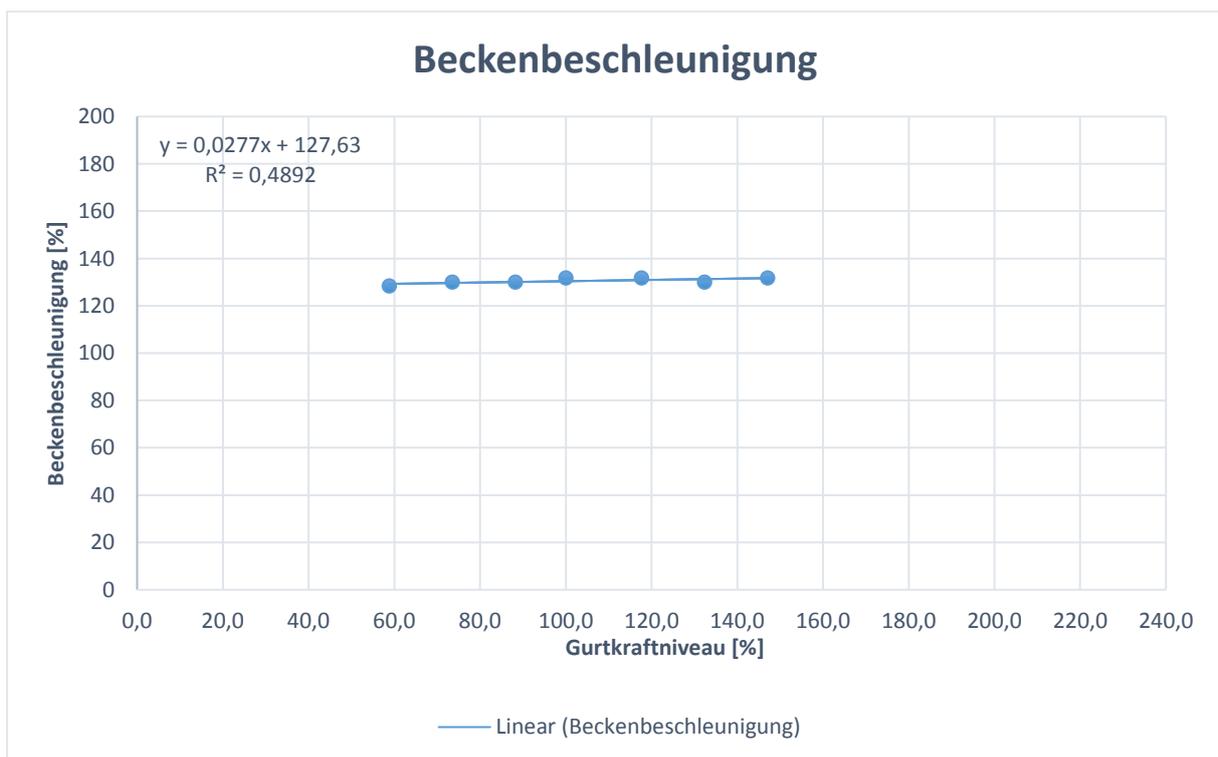
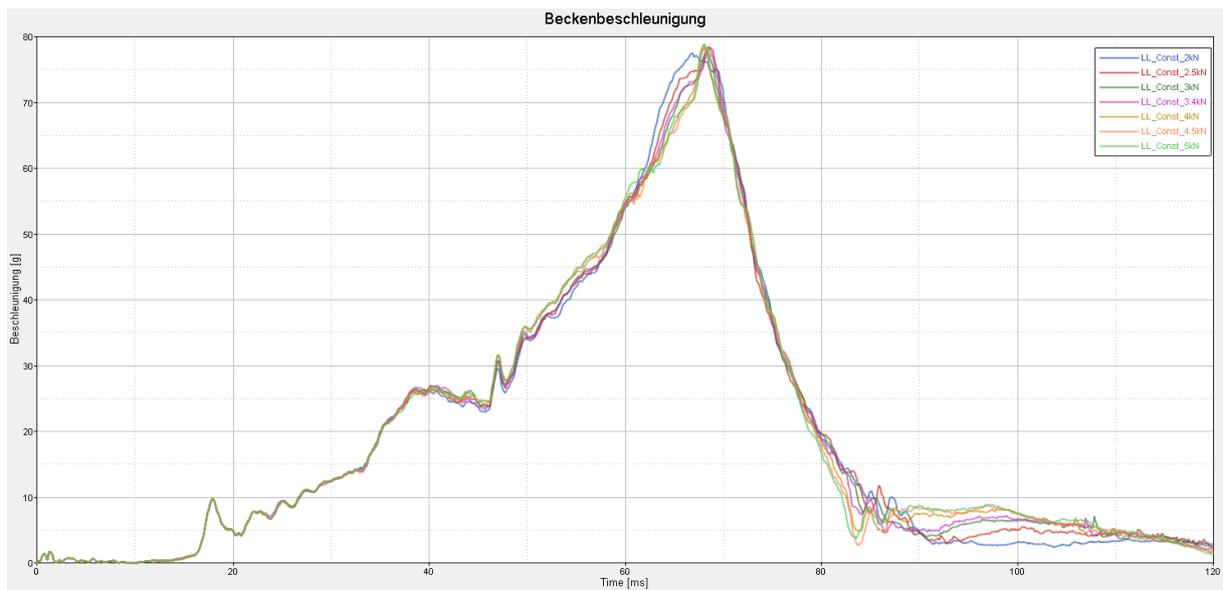


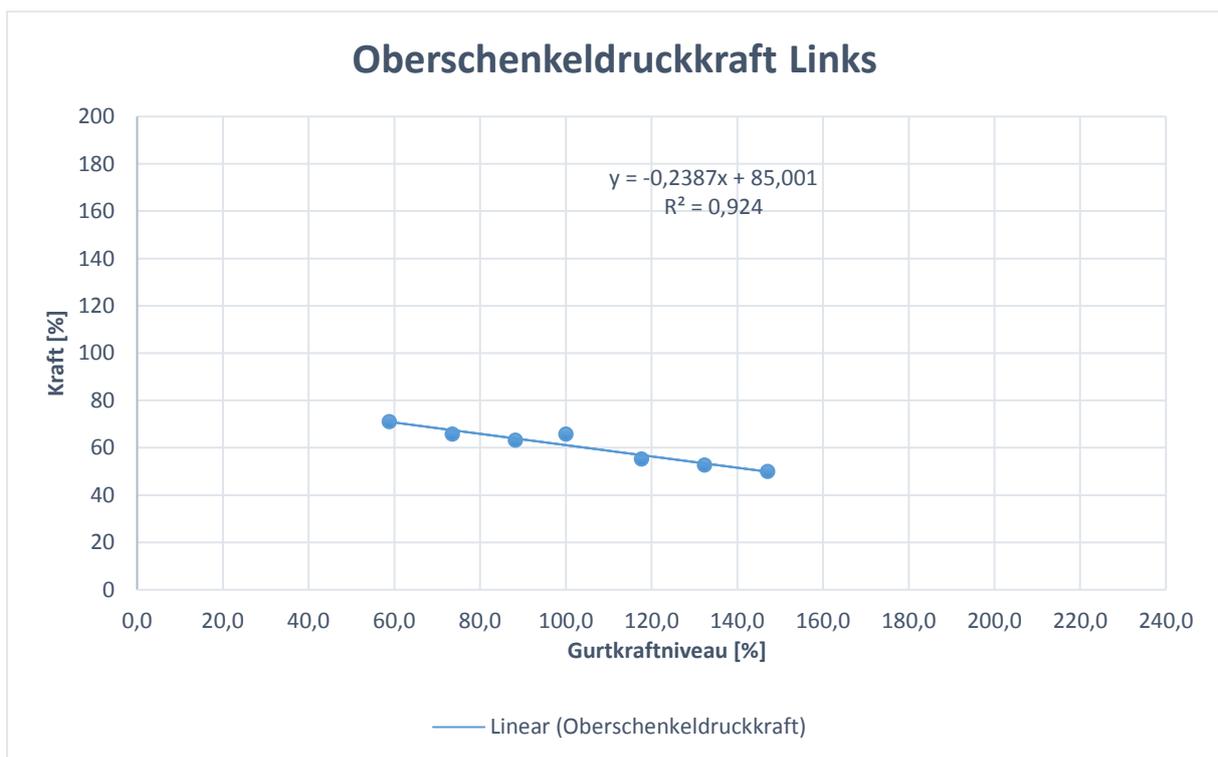
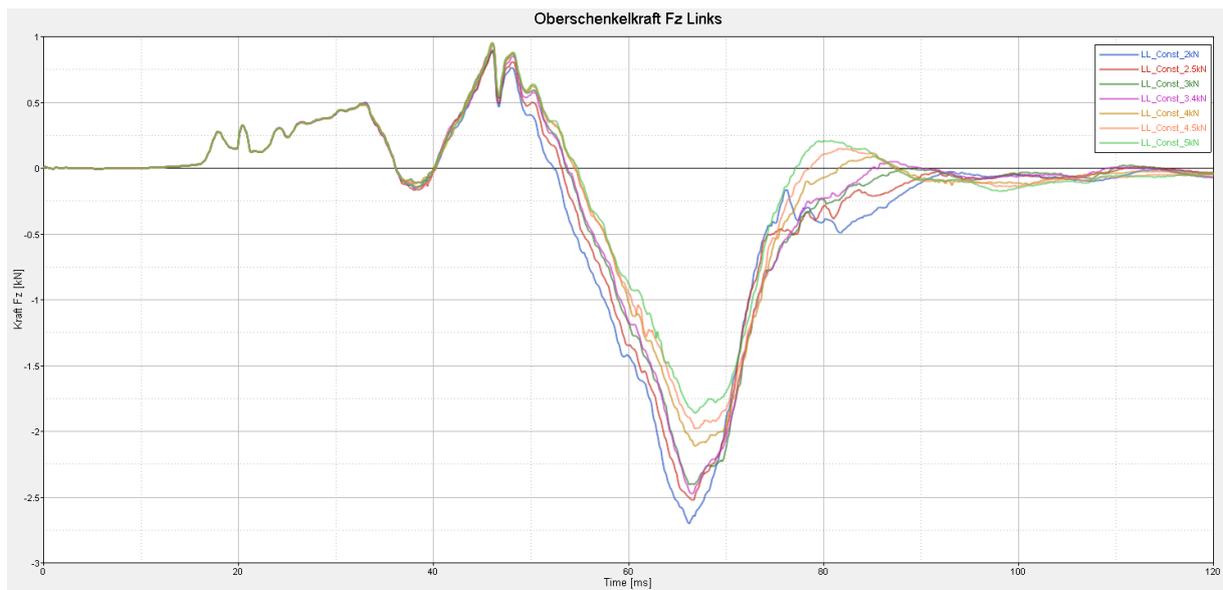


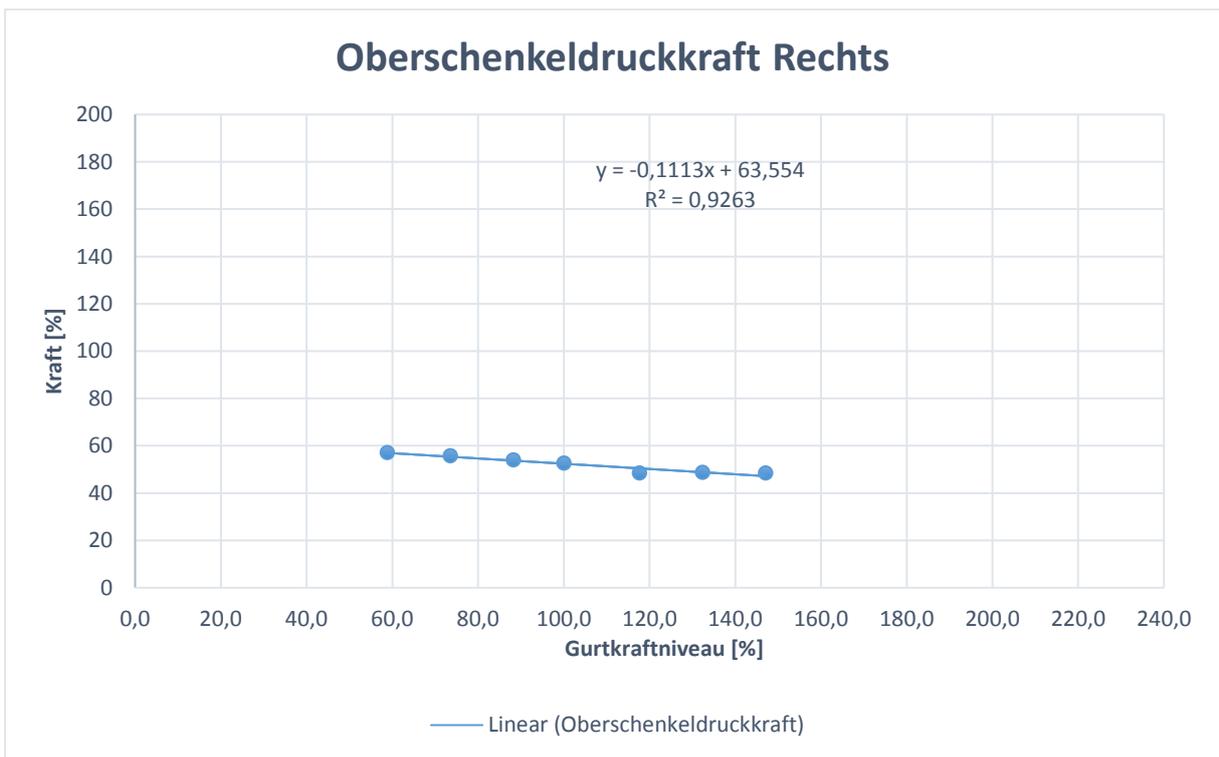
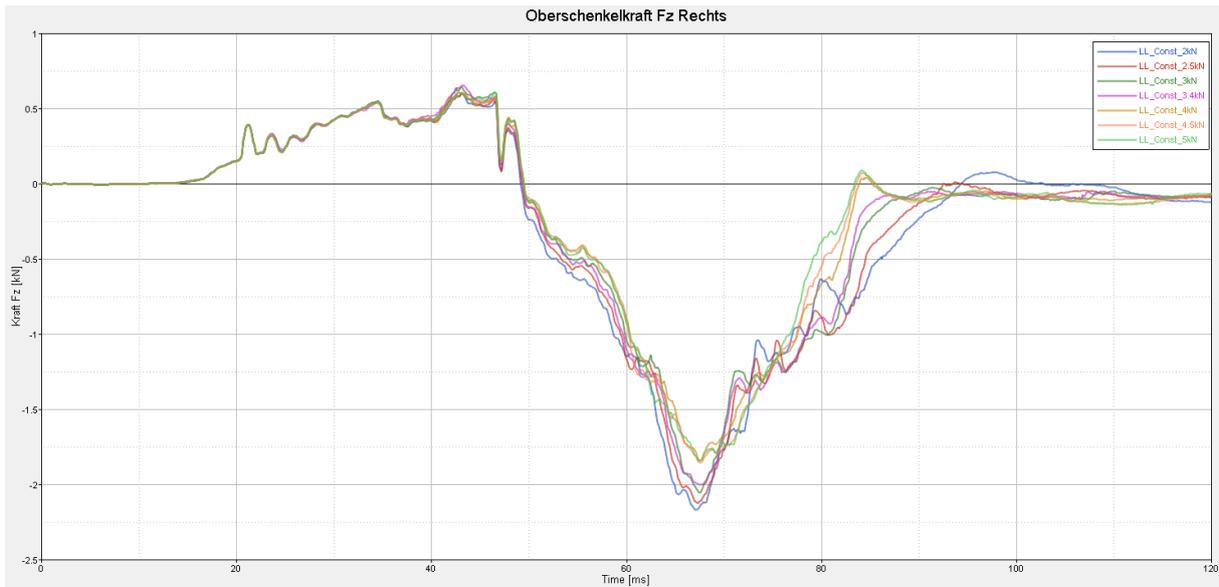




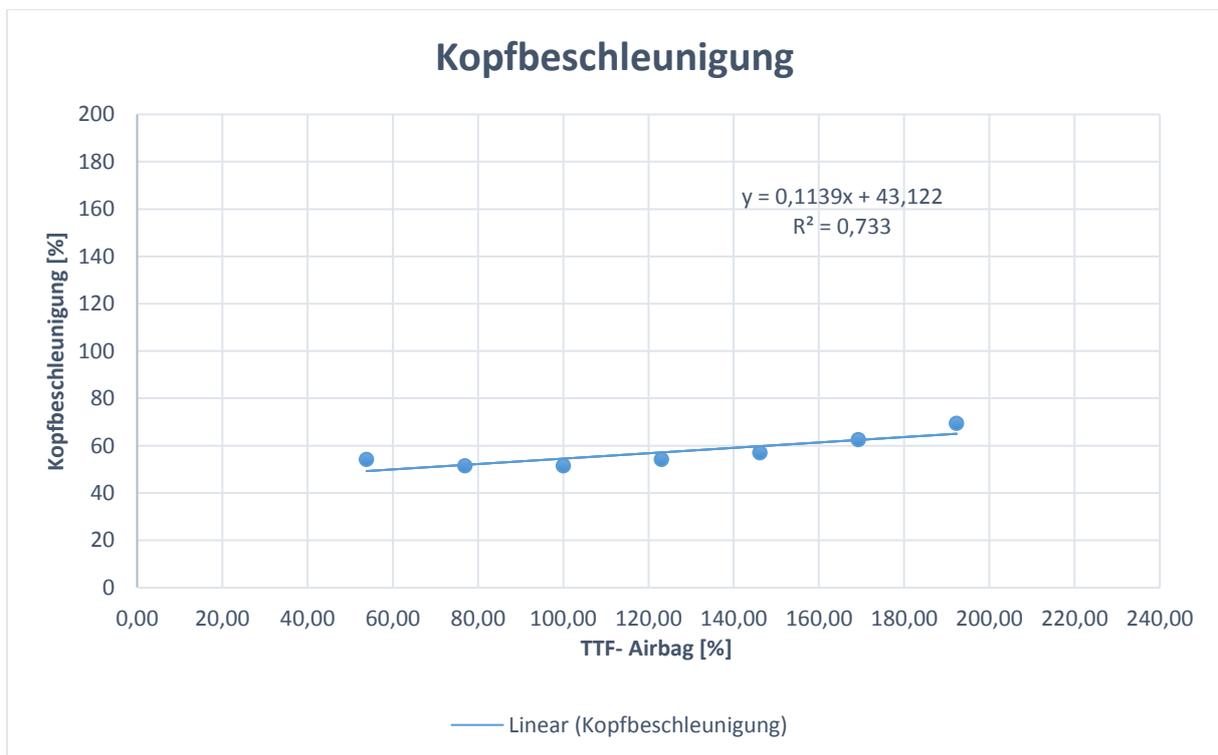
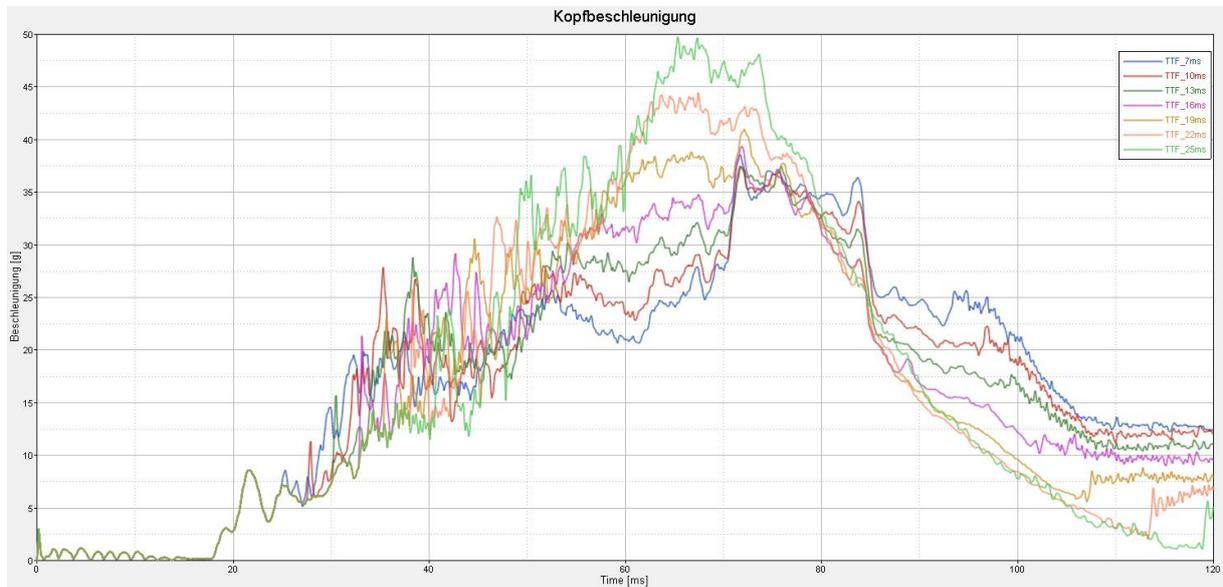


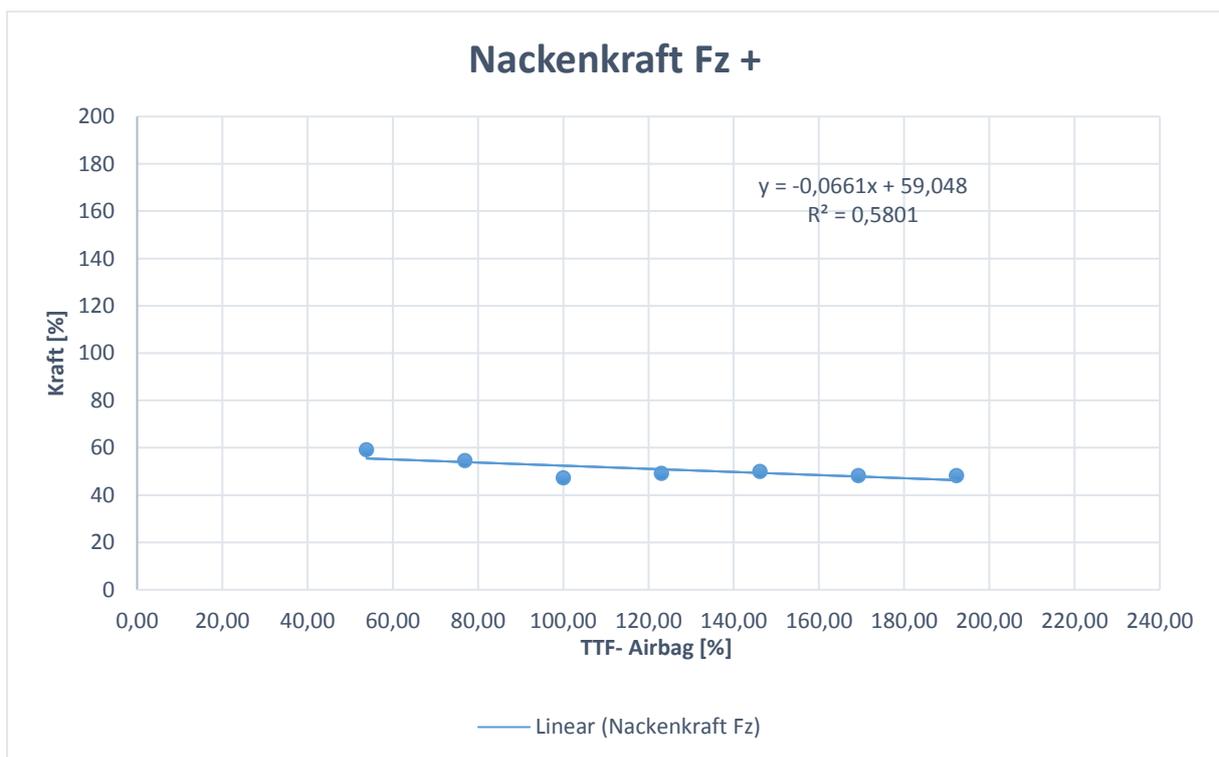
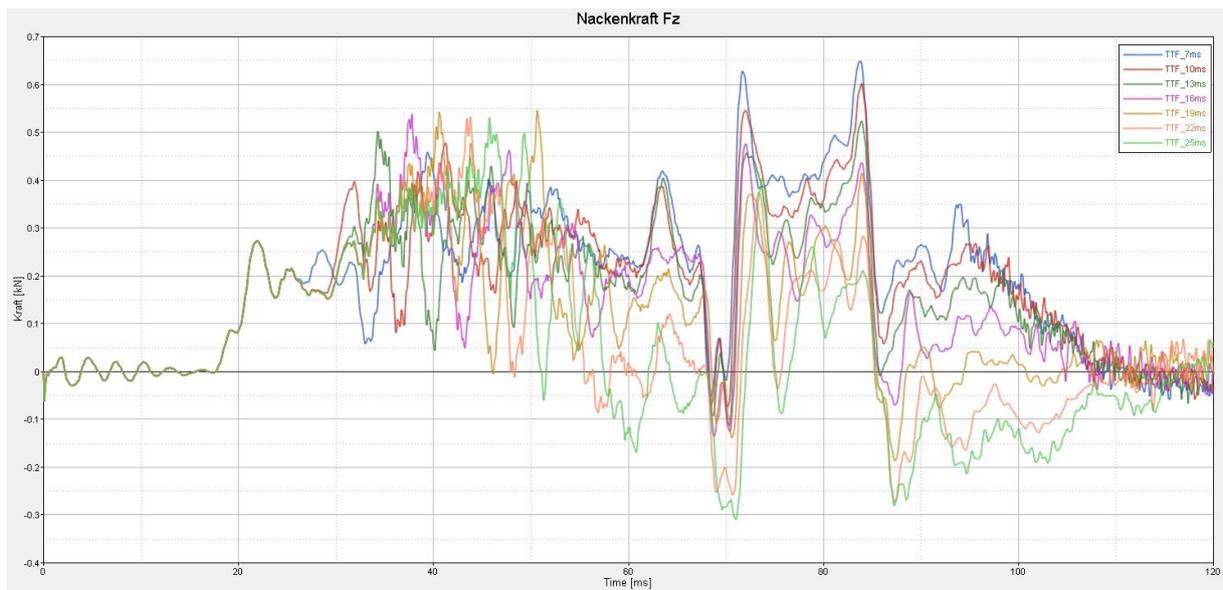


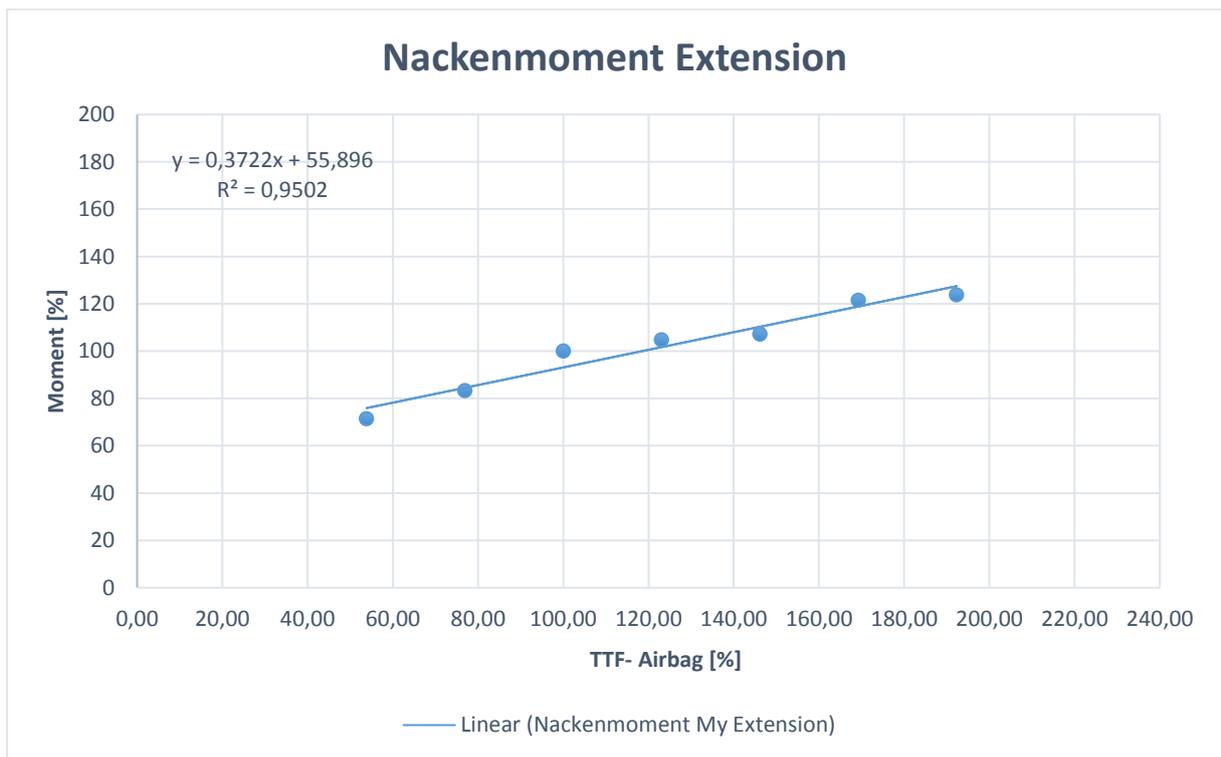
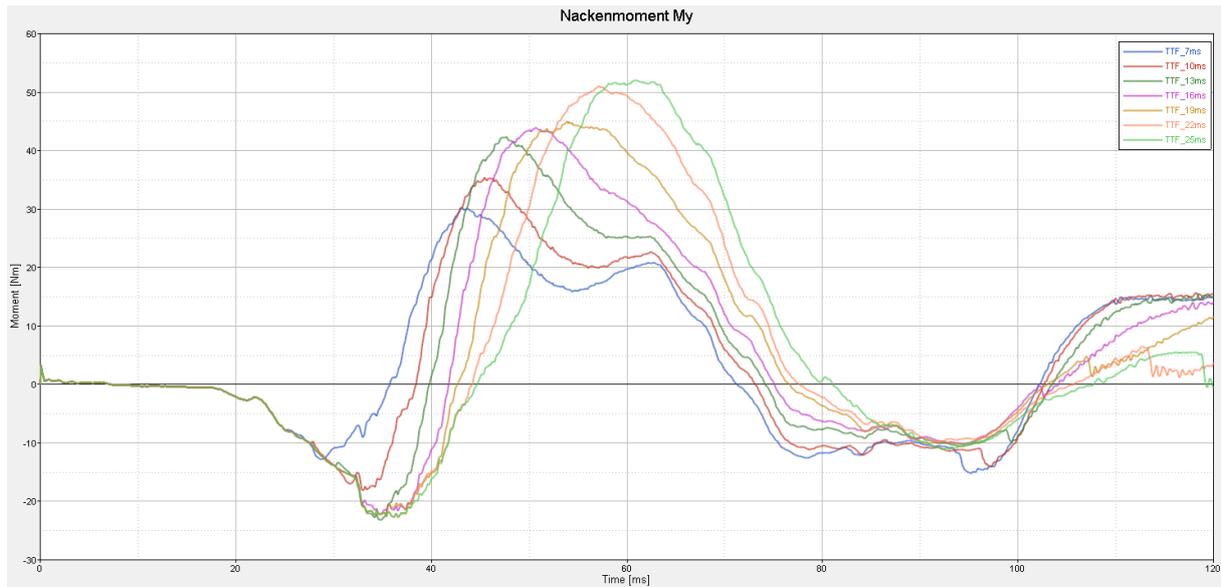


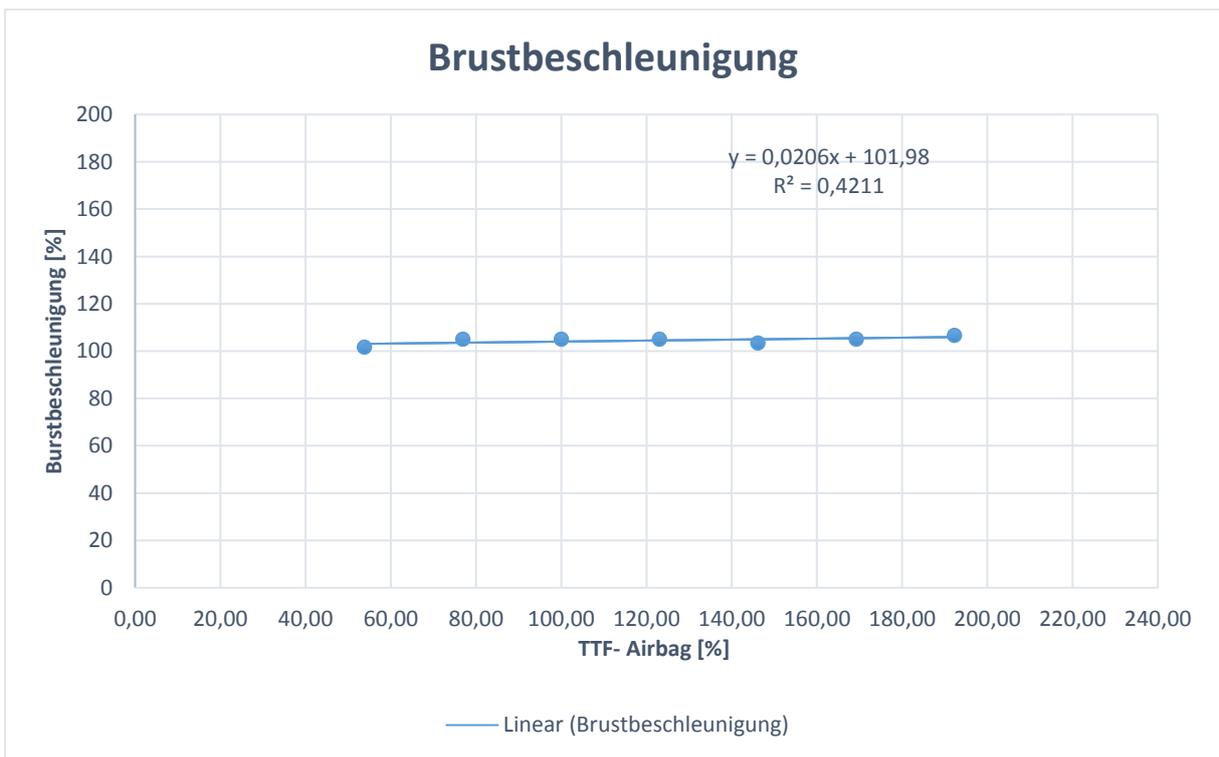
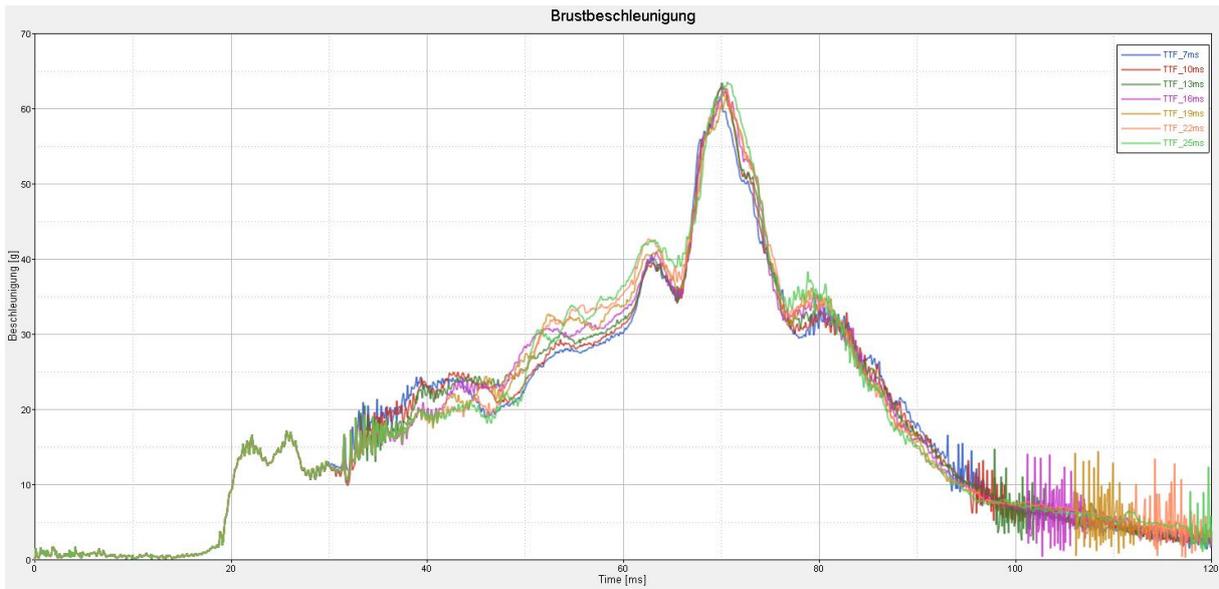


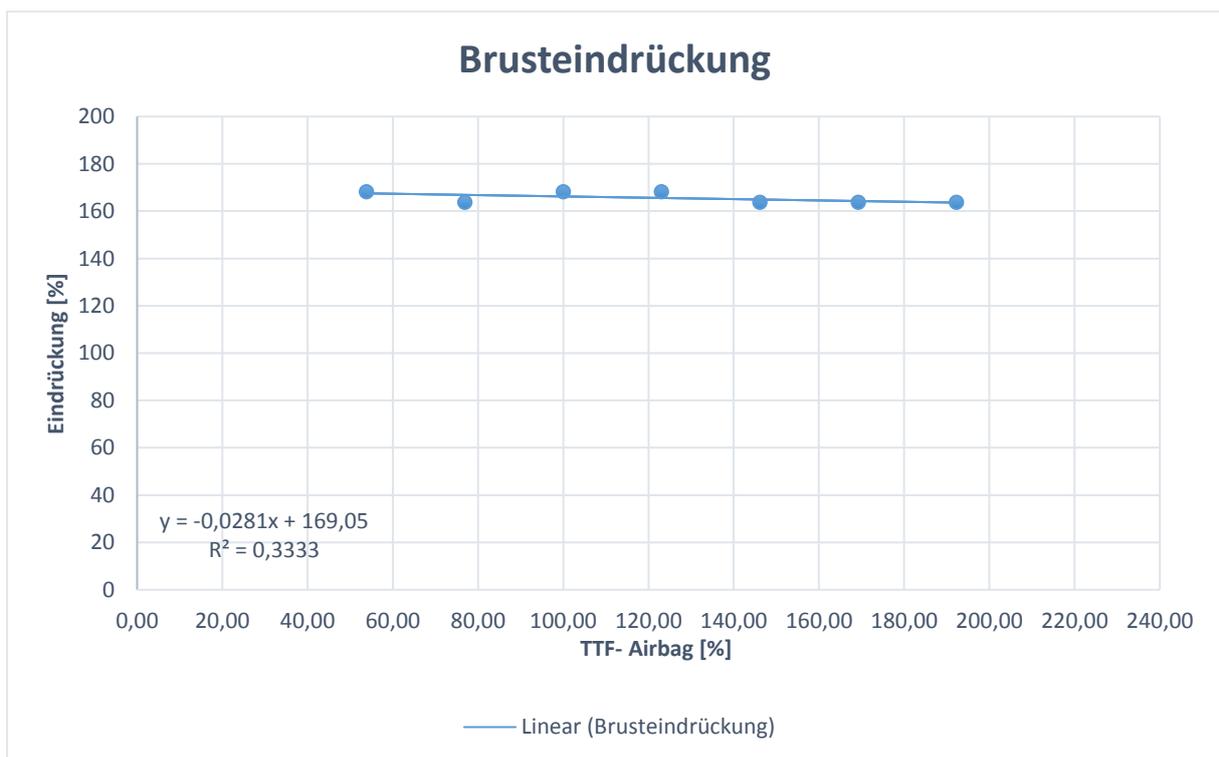
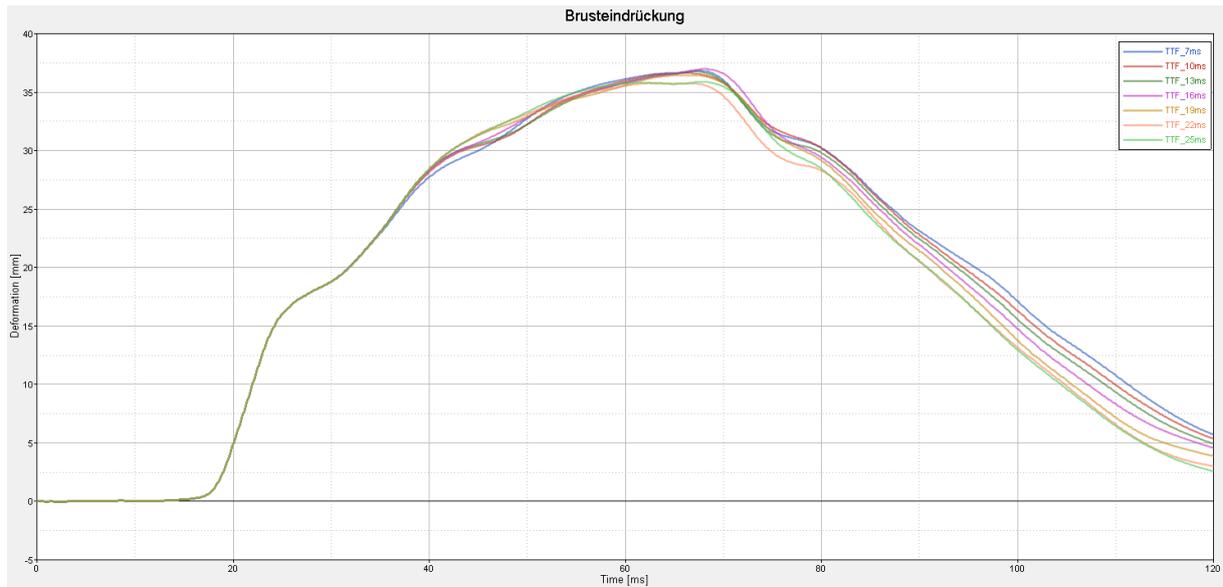
Variation der „TimeToFire“ Airbag im Bereich von 7-25ms und einer Schrittweite von 3ms

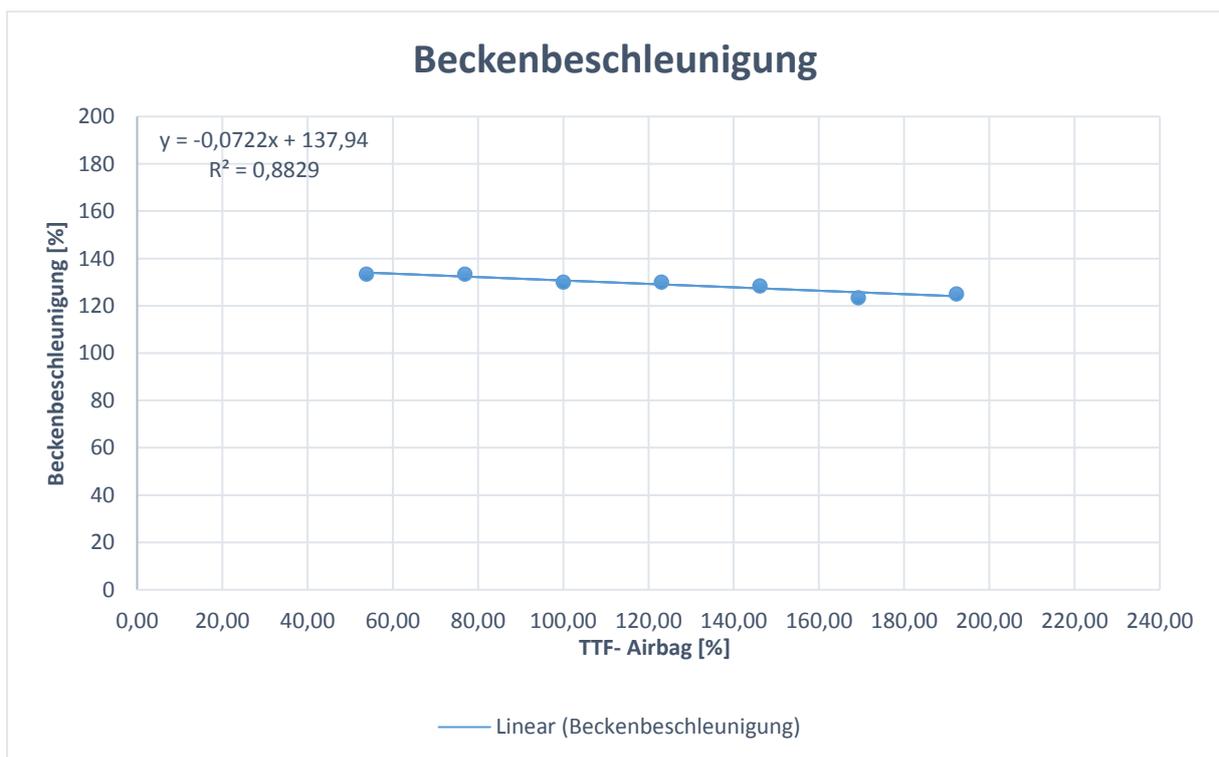
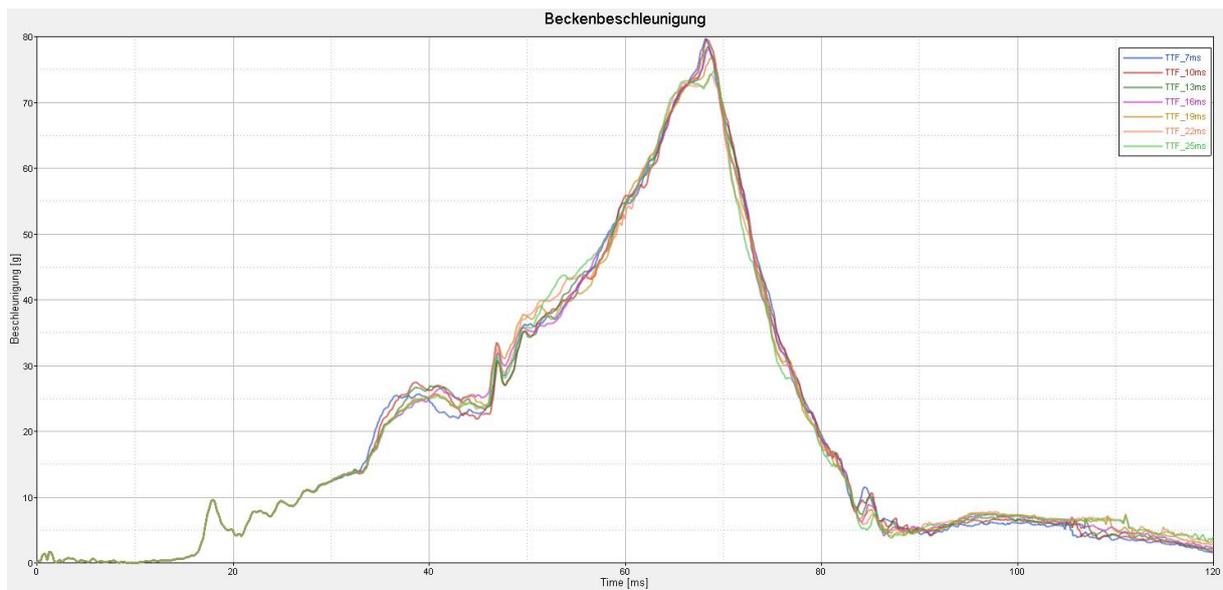


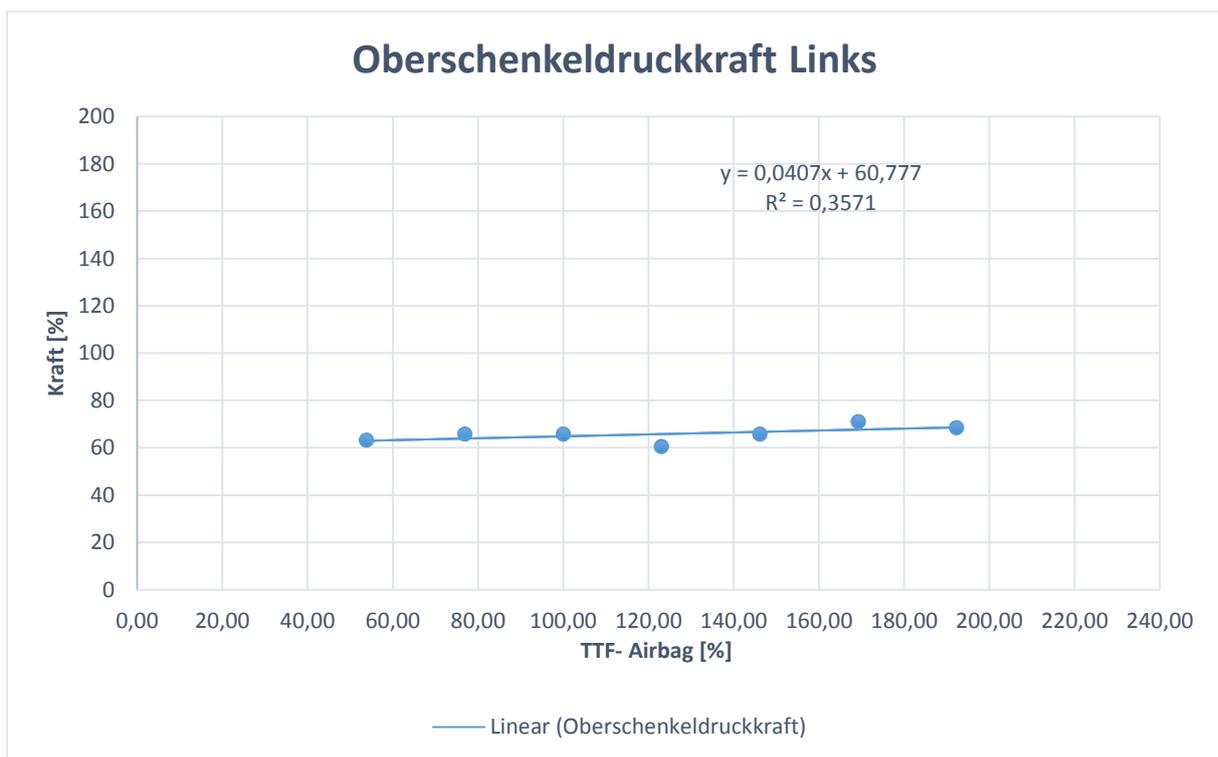
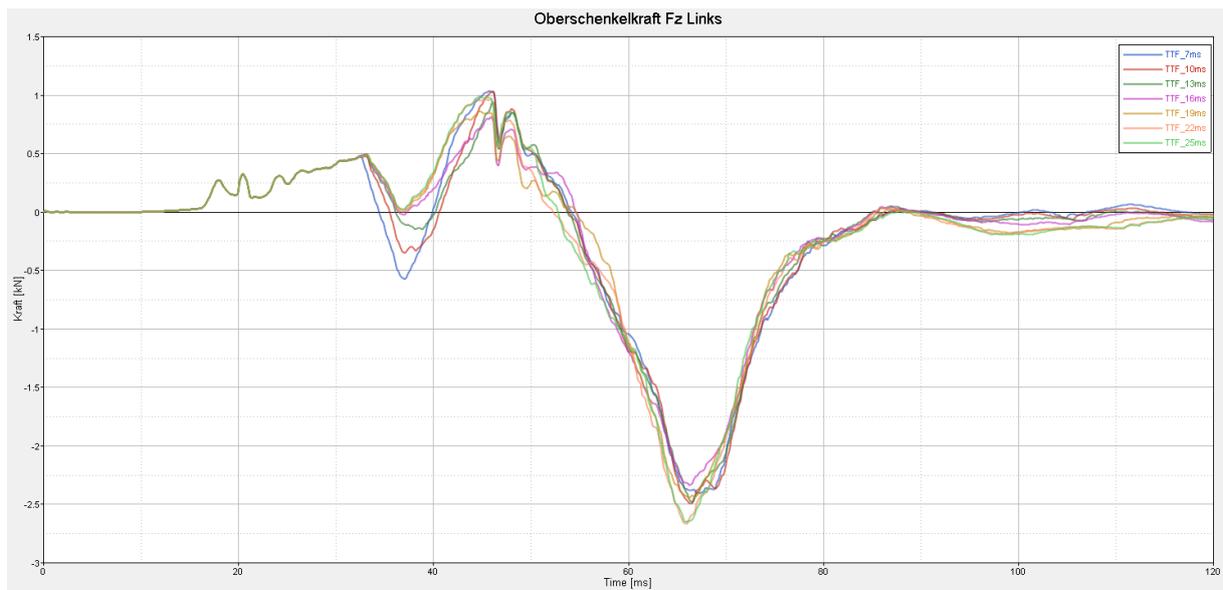


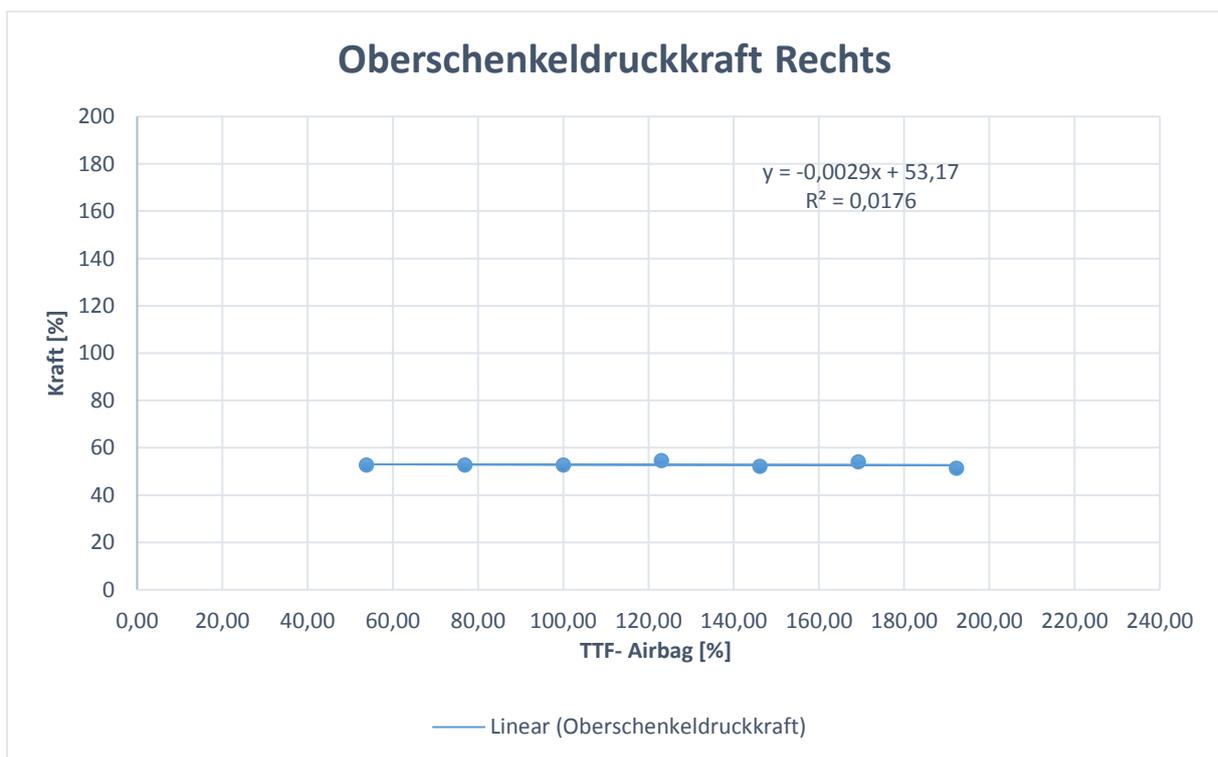
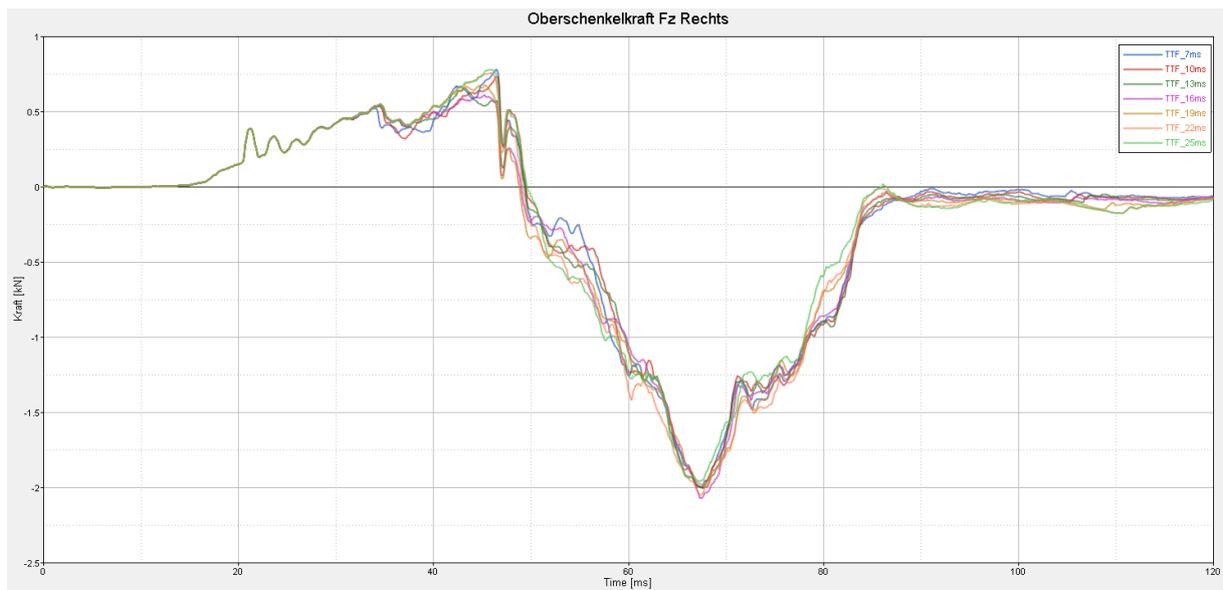




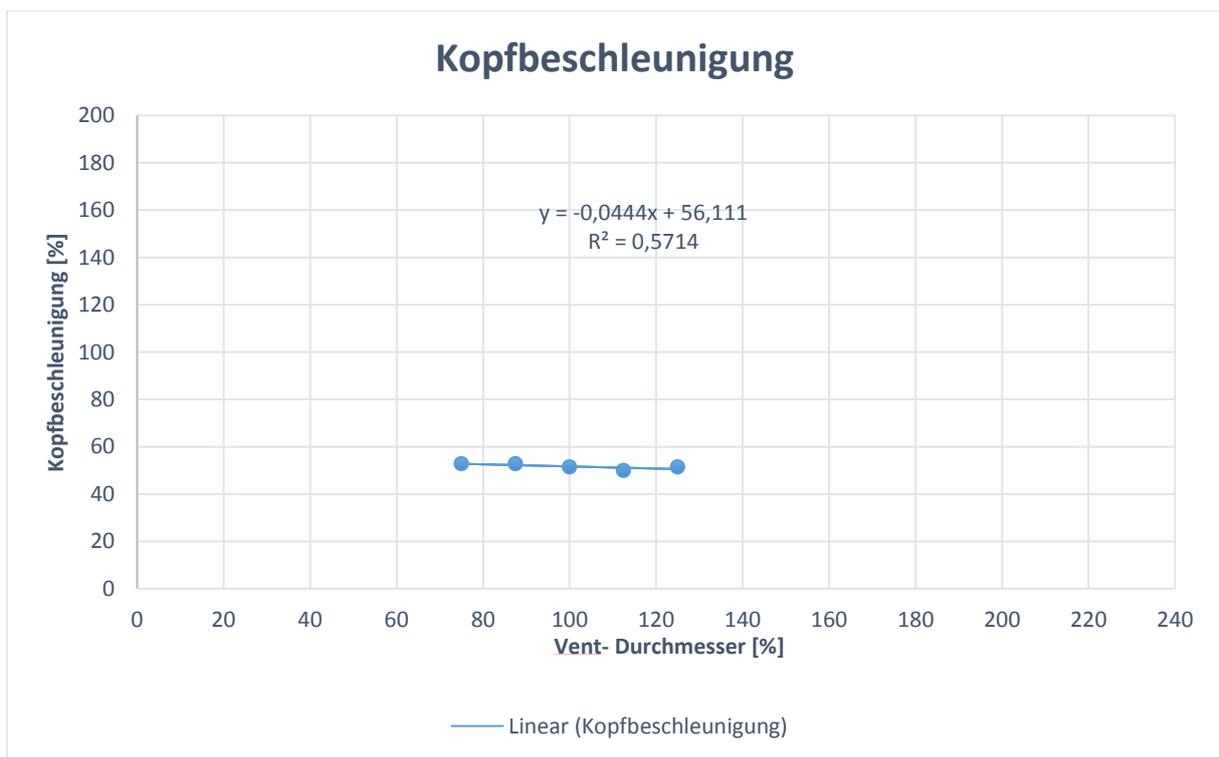
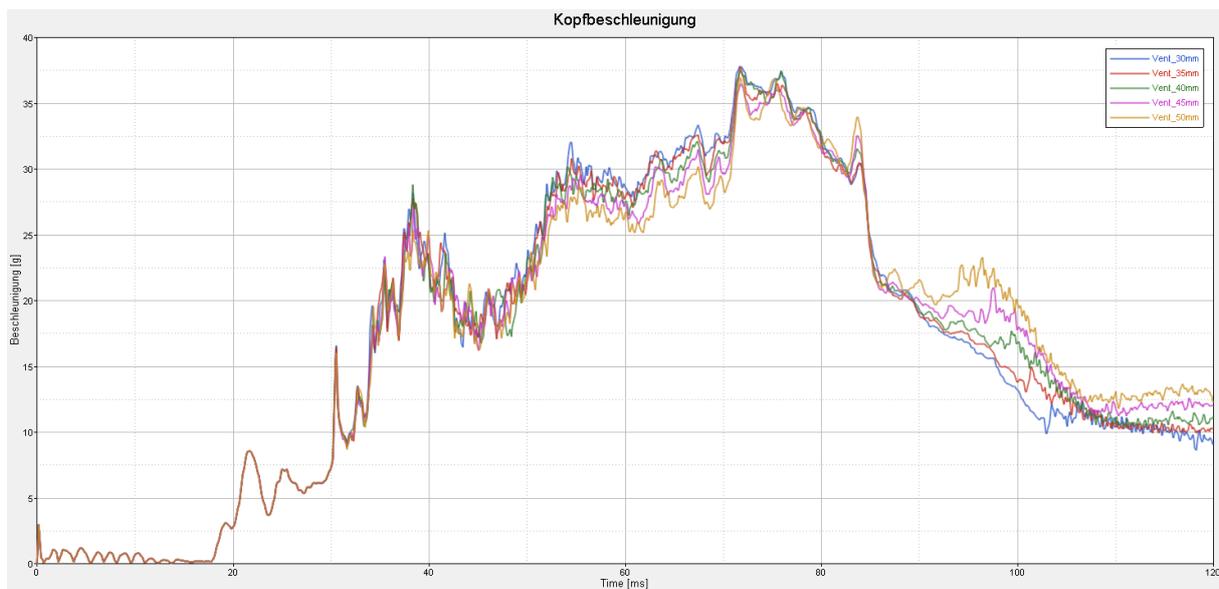


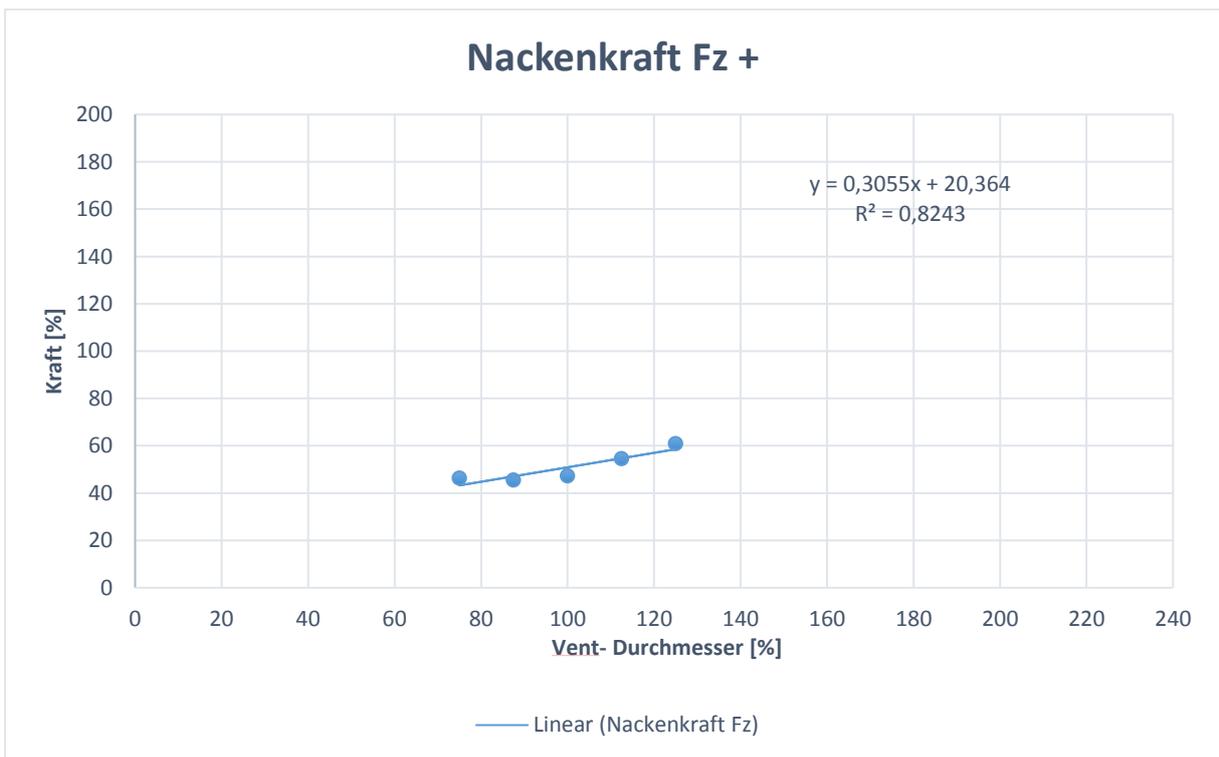
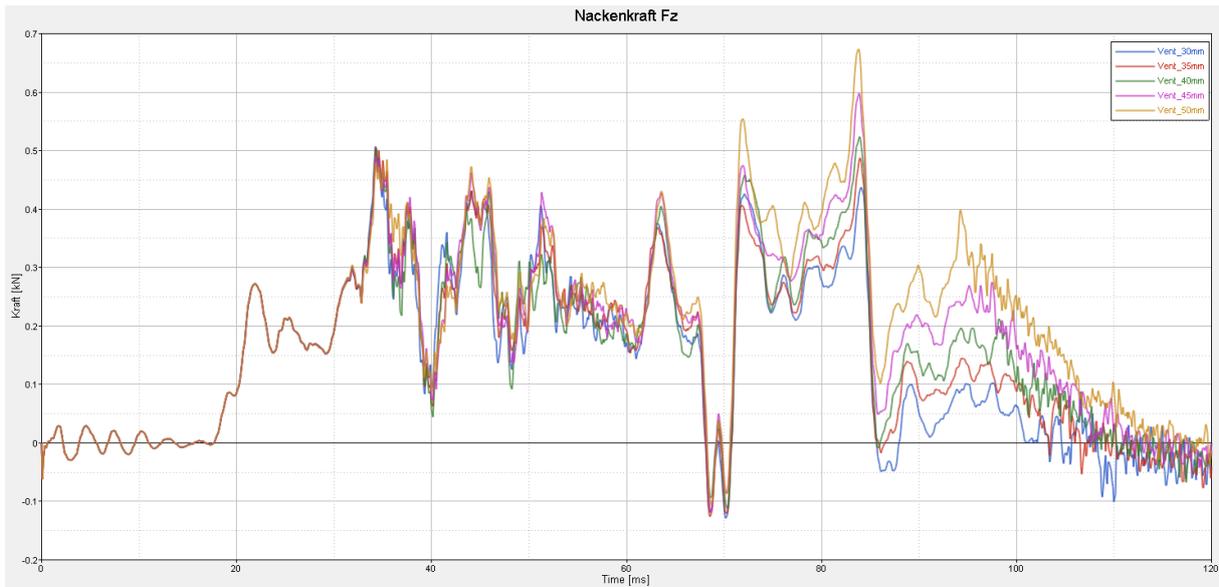


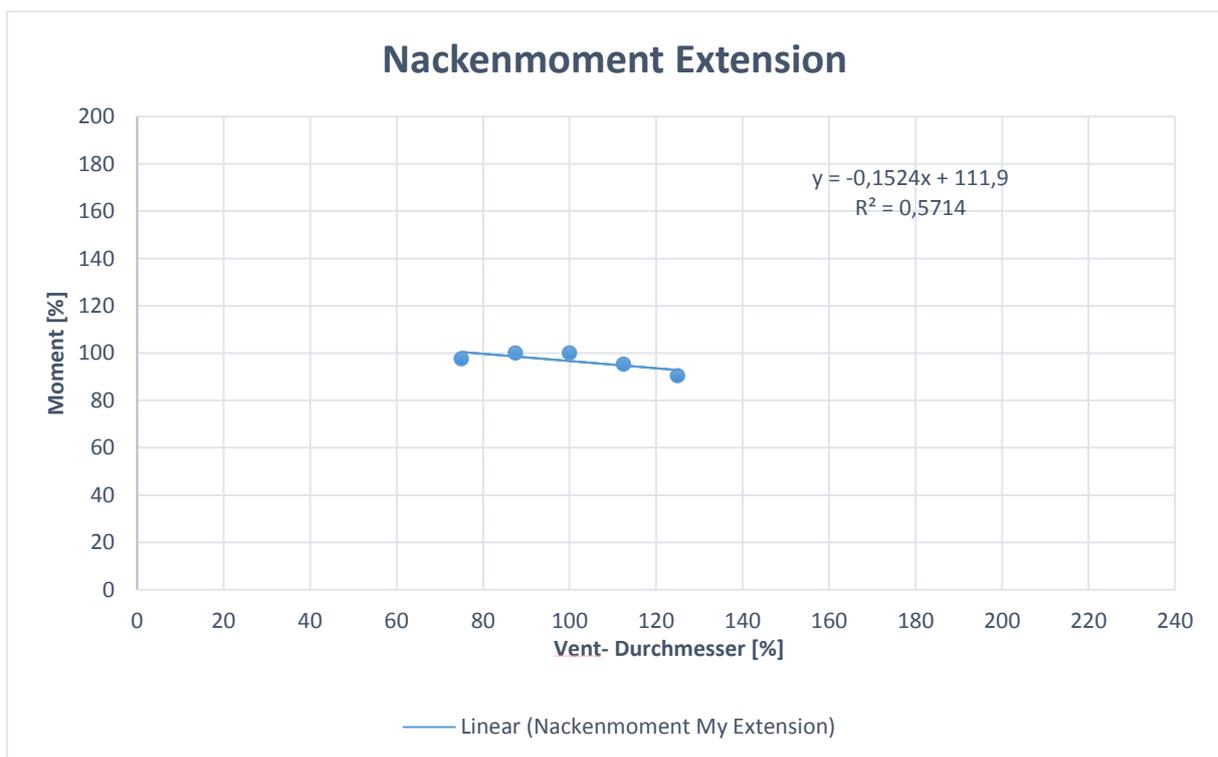
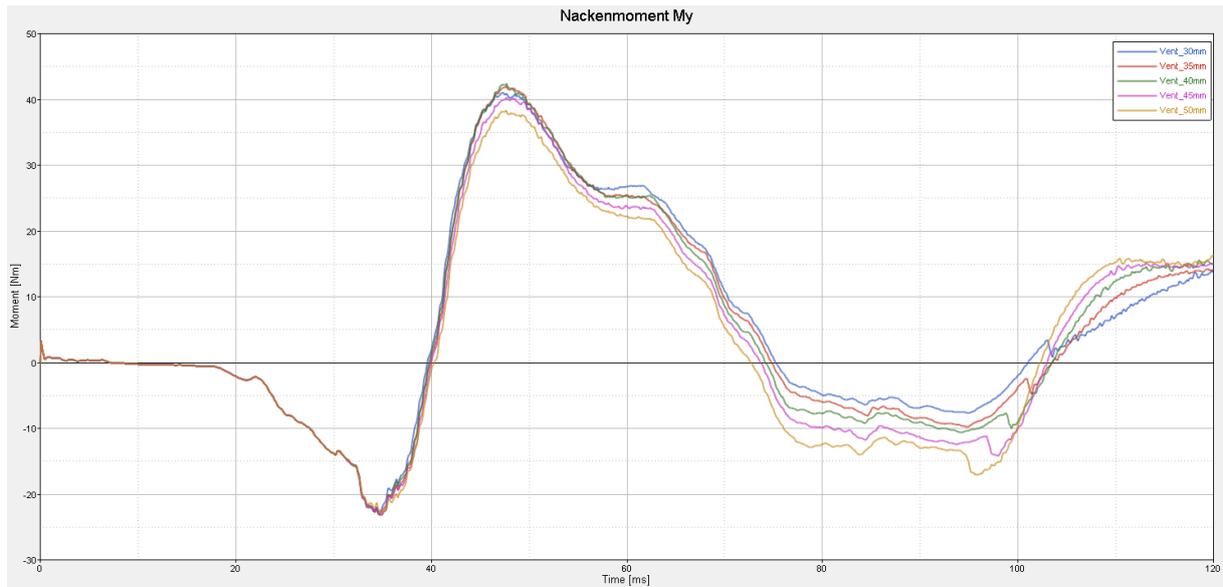


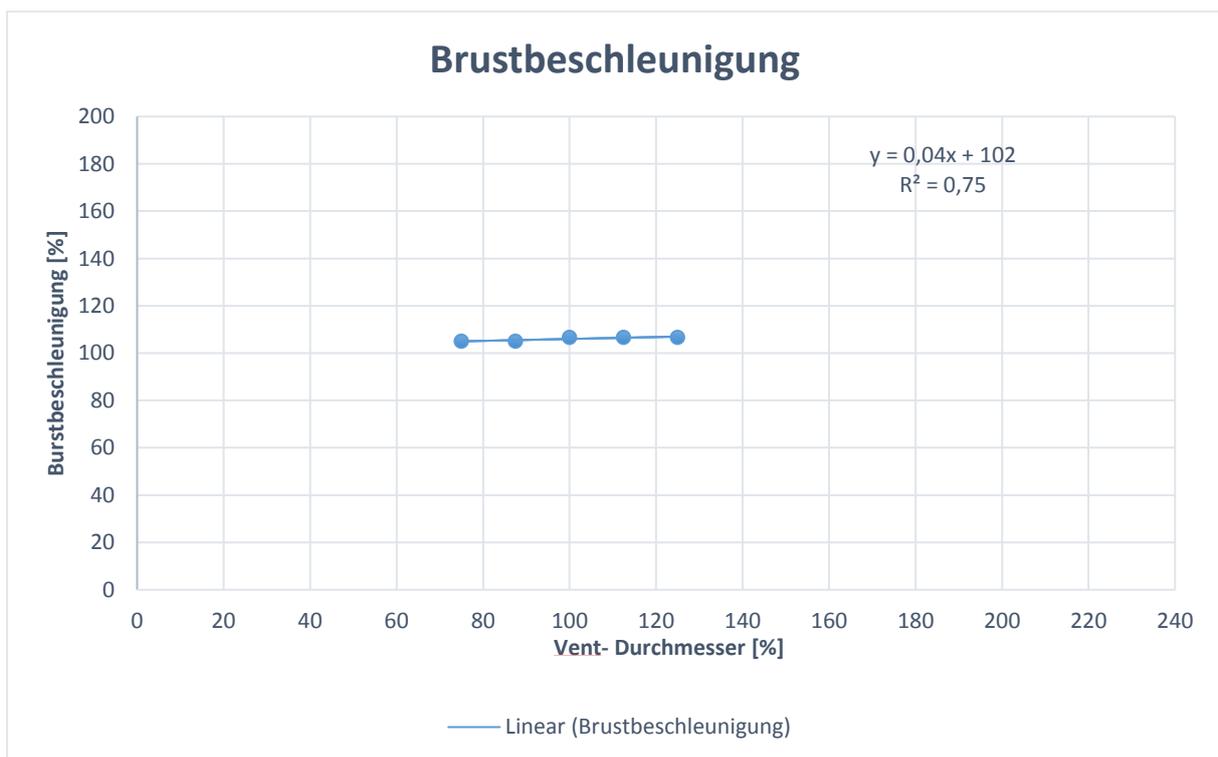
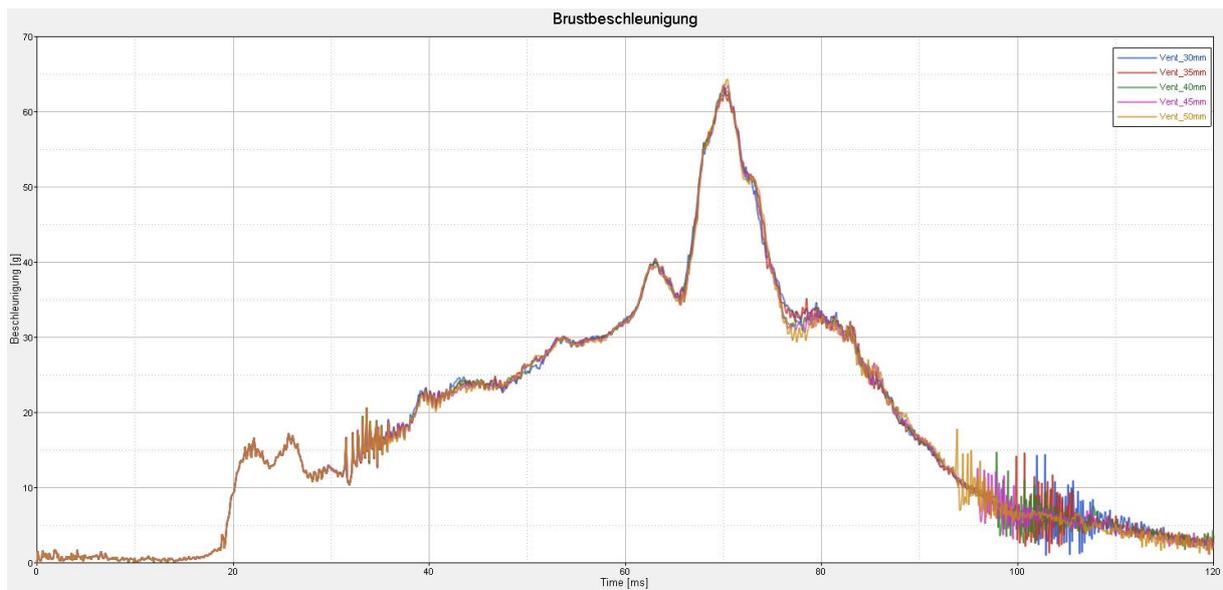


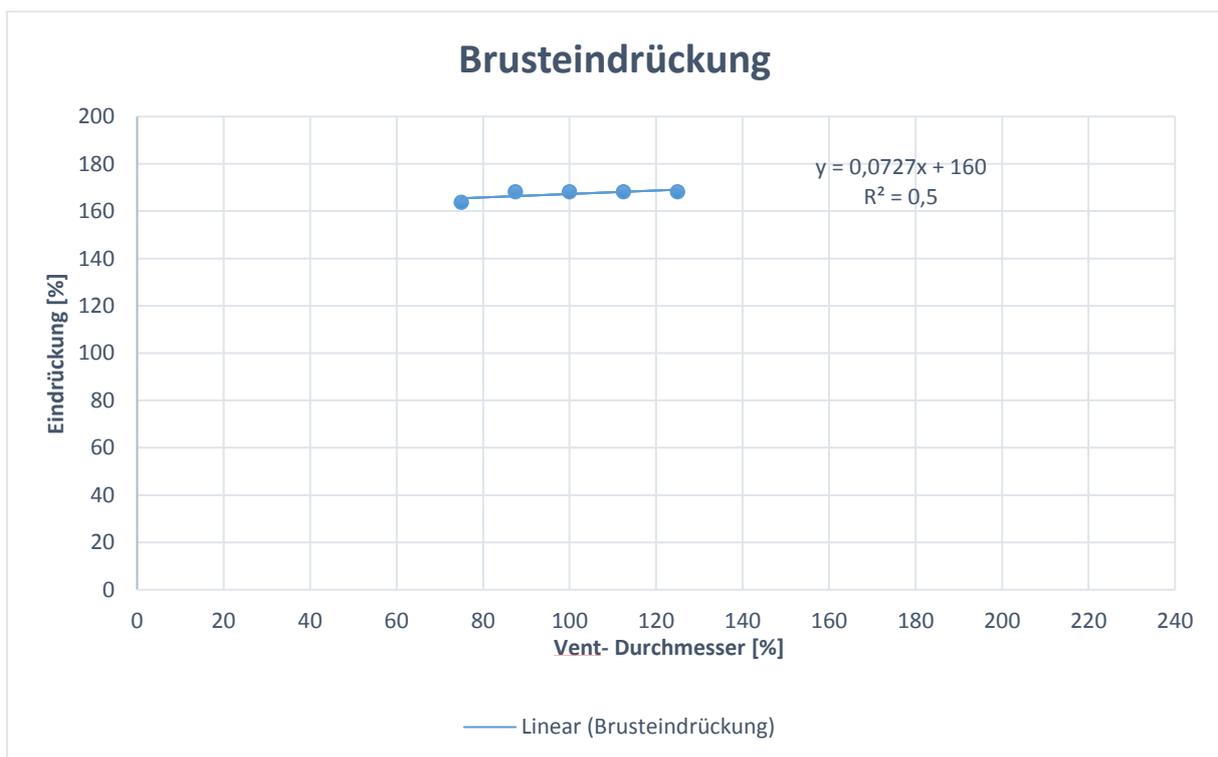
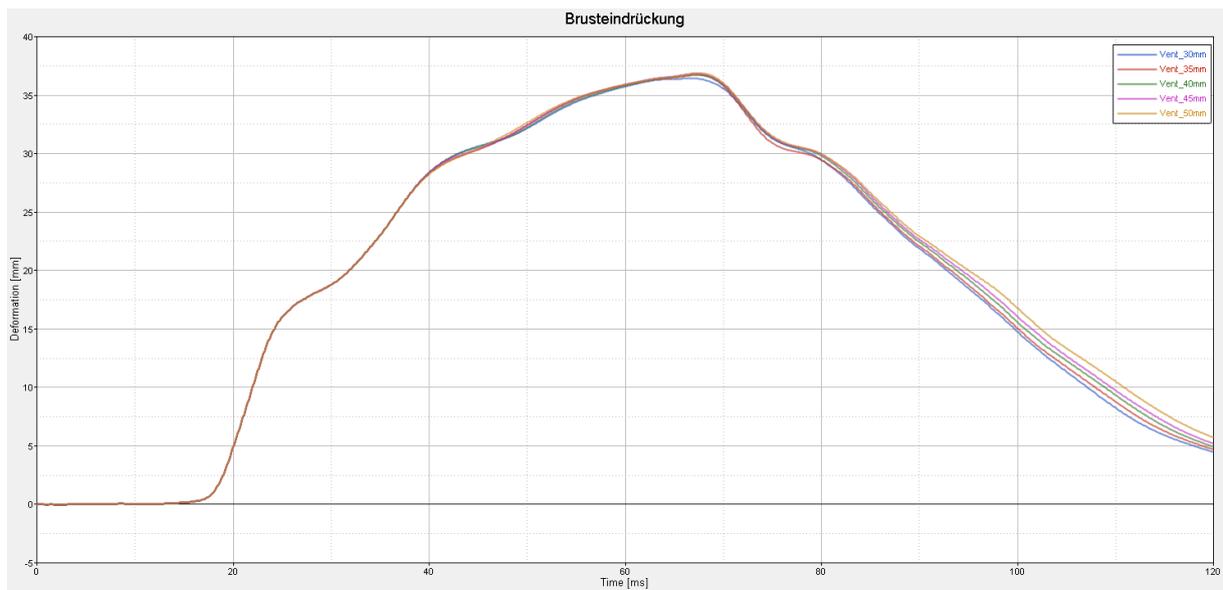
Variation des Ventdurchmessers im Bereich von 30-50mm und einer Schrittweite von 5mm

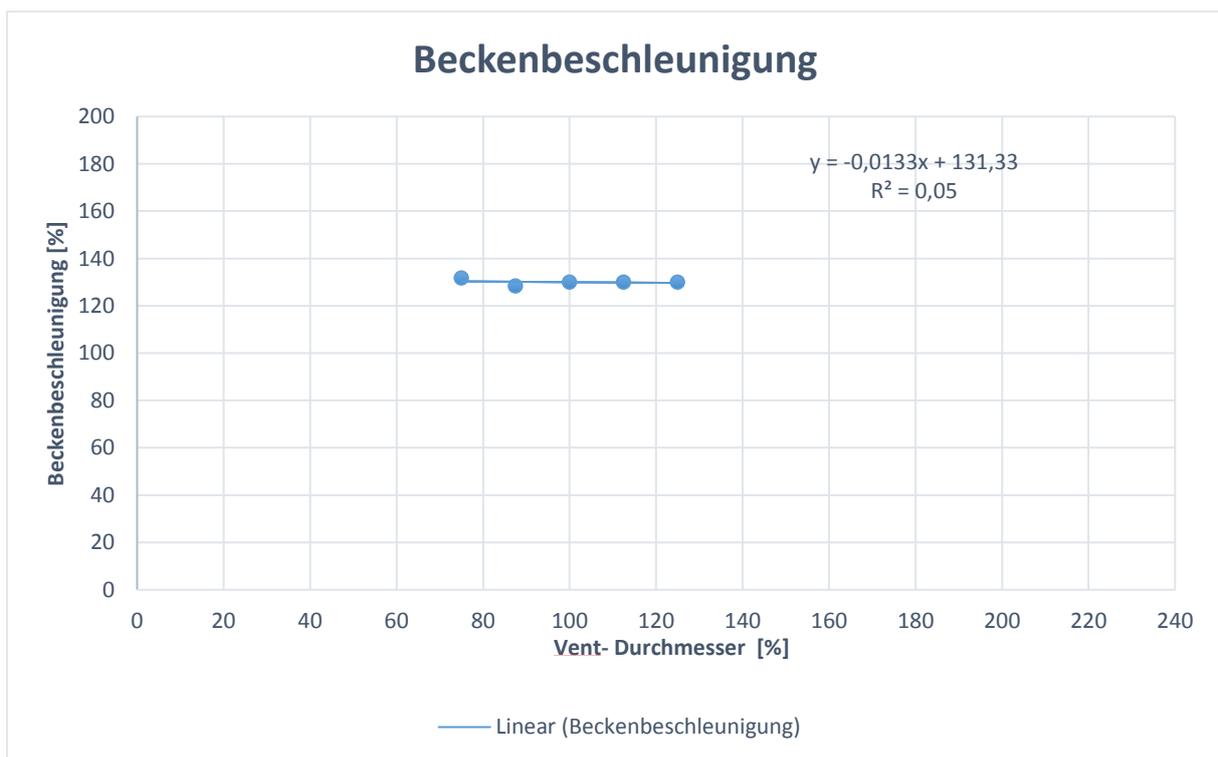
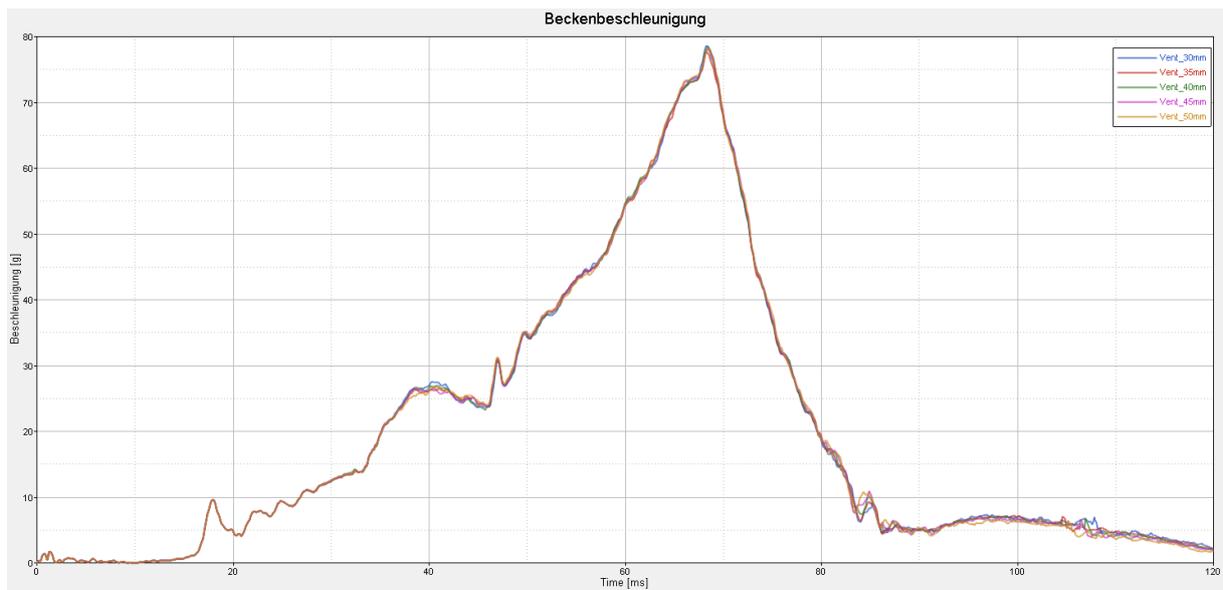


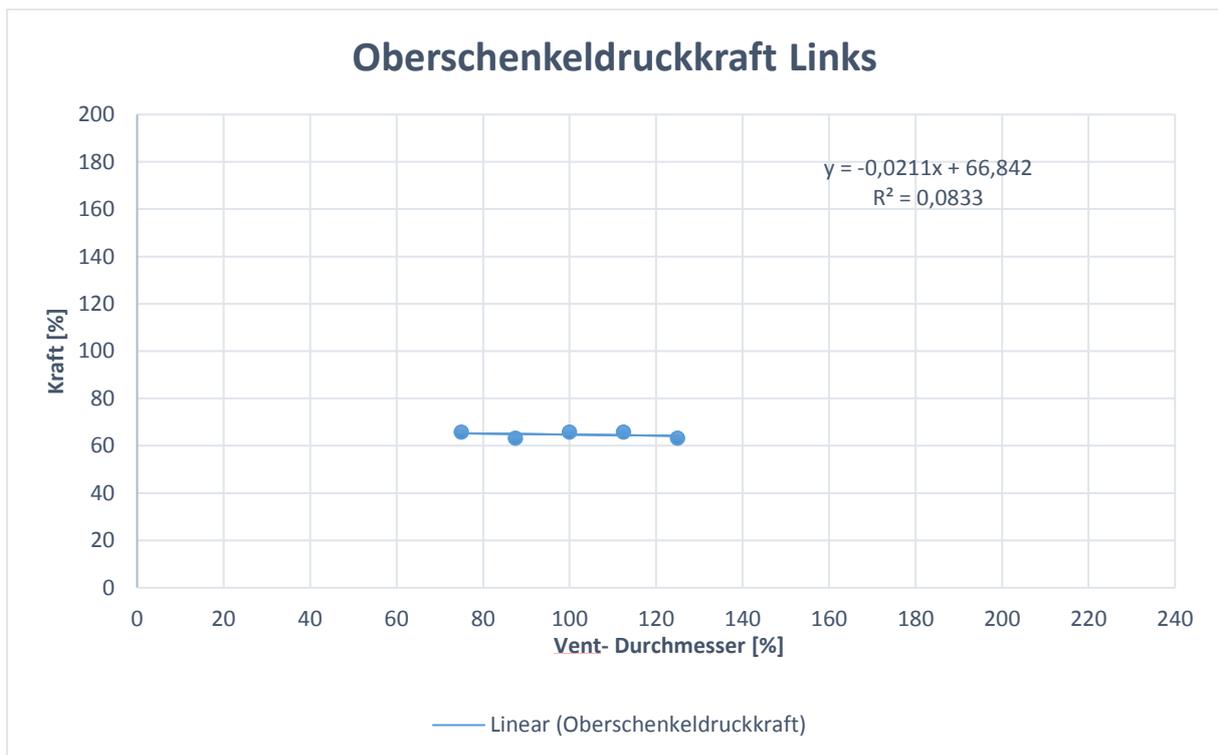
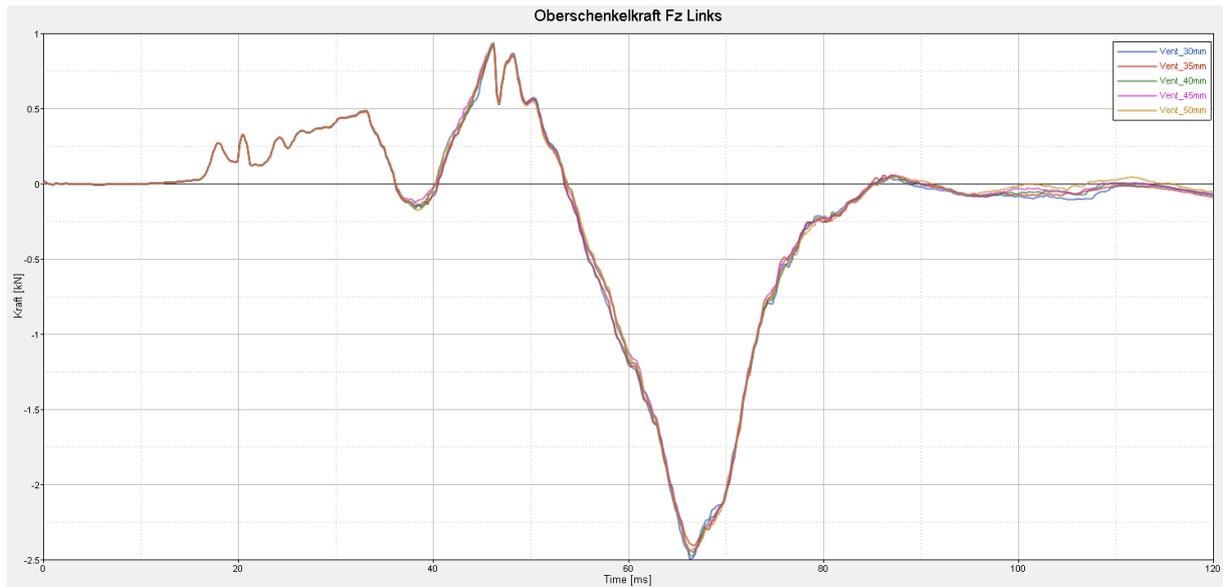


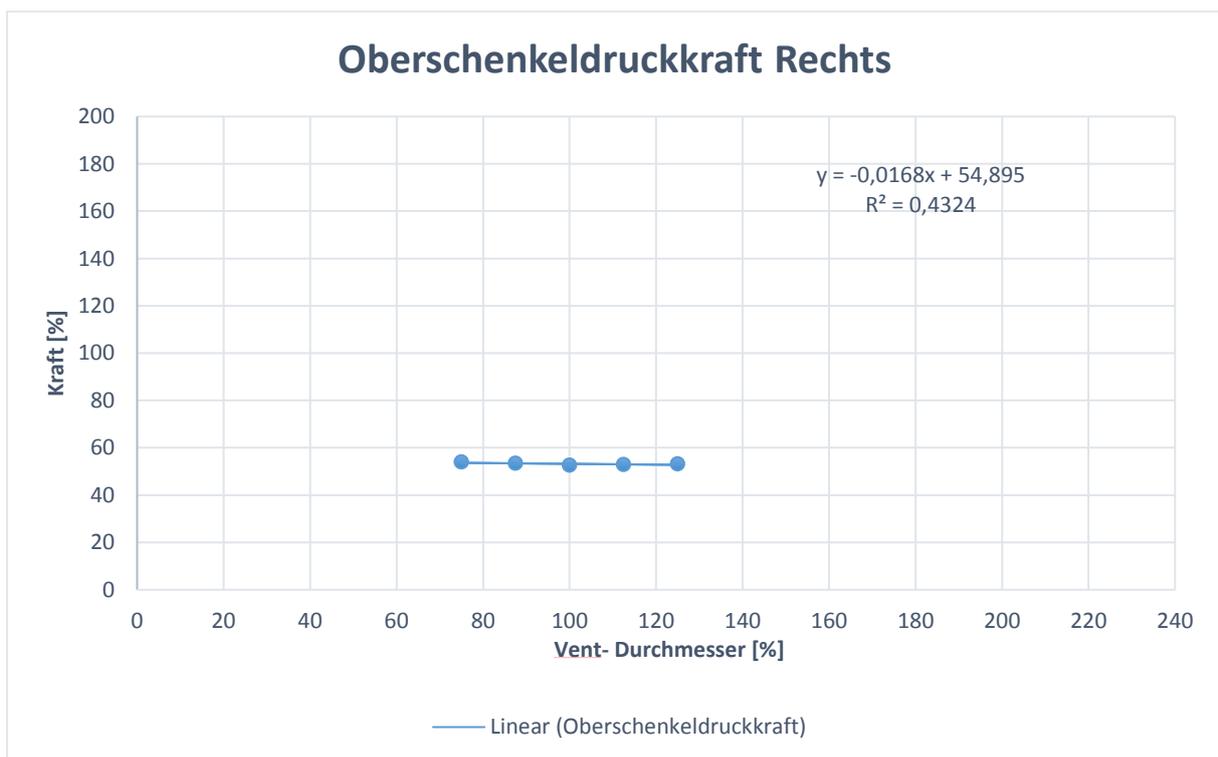
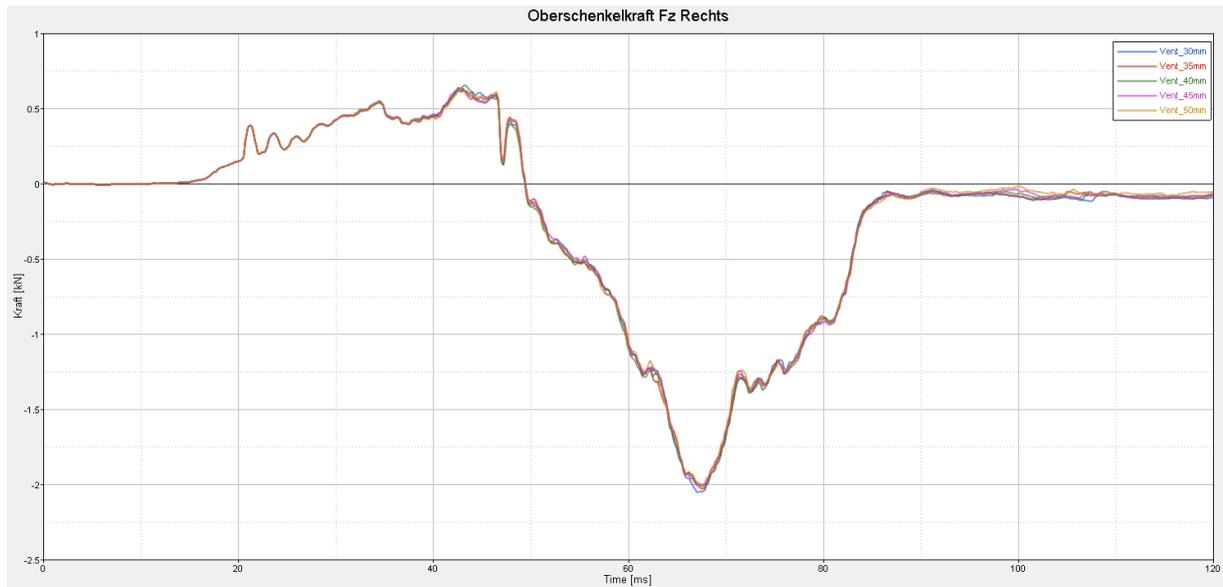




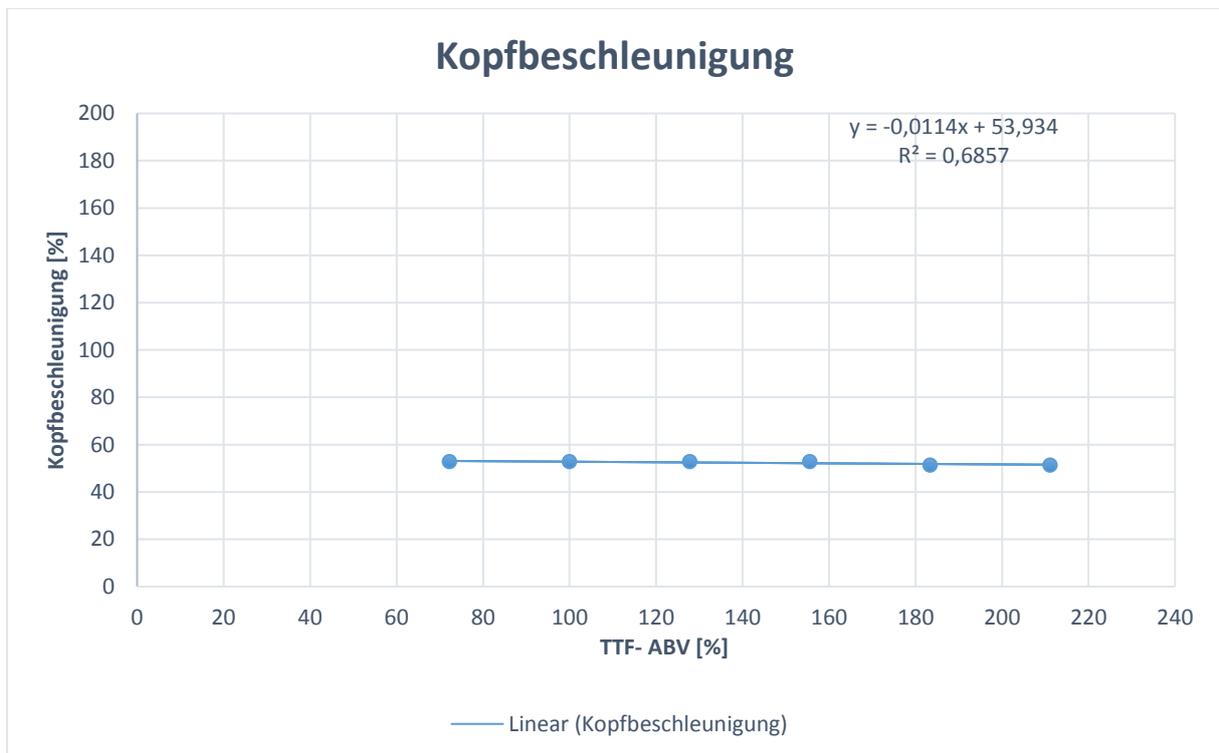
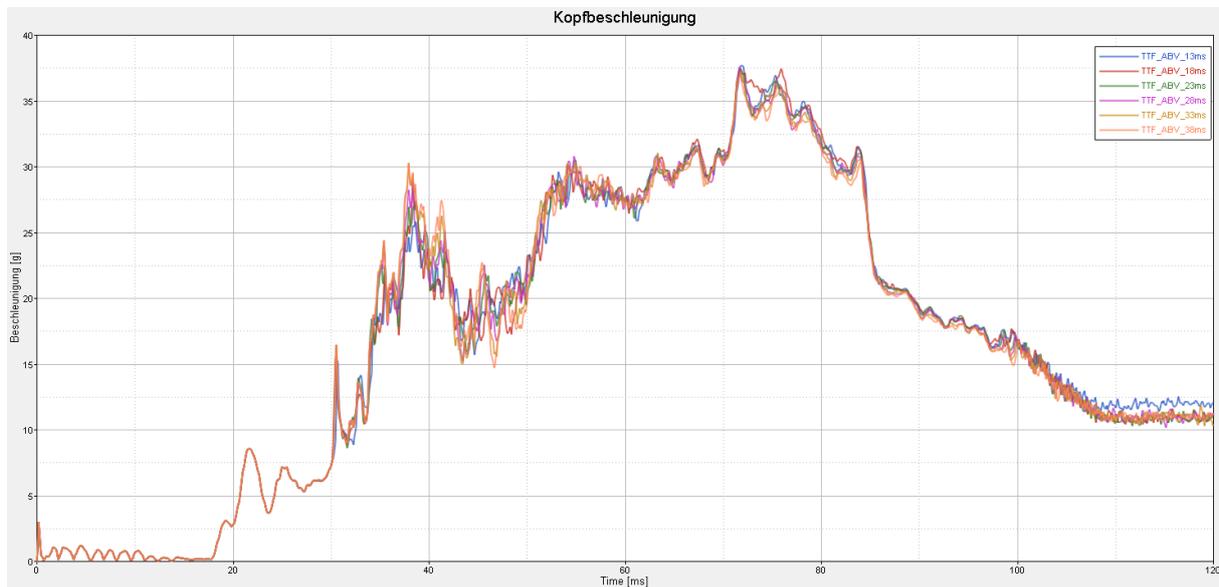


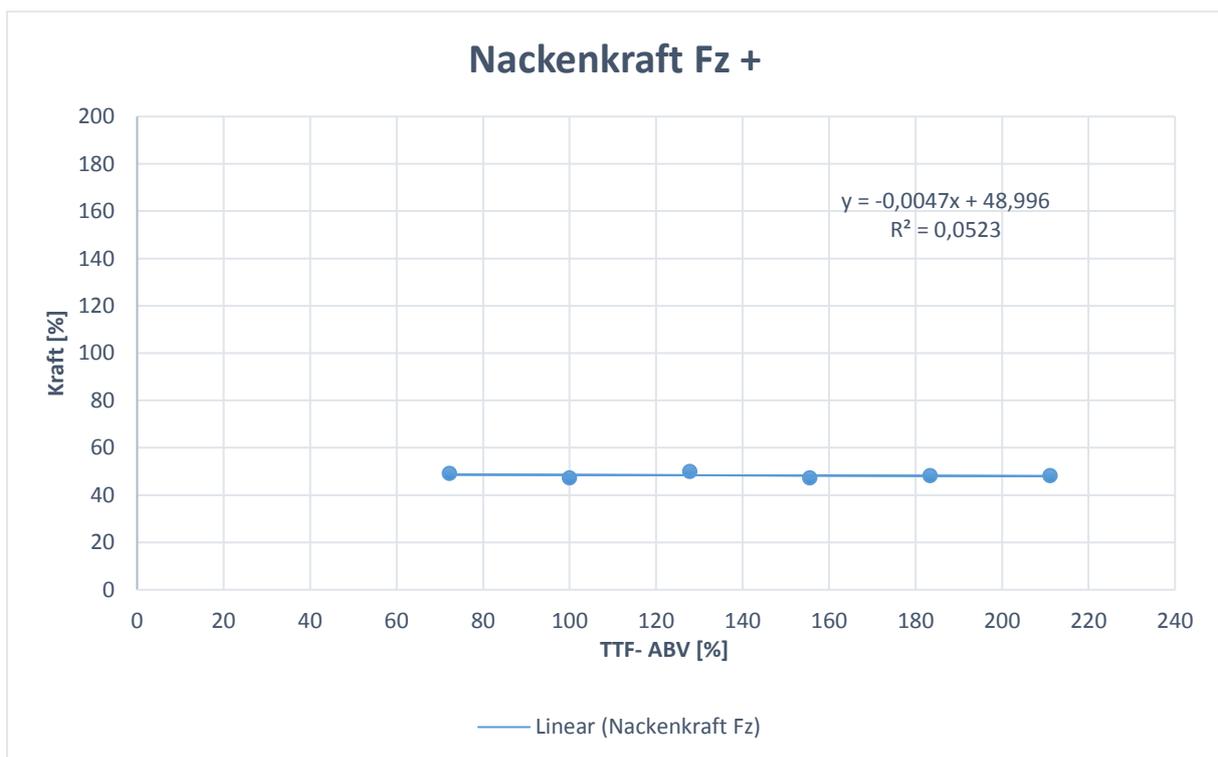
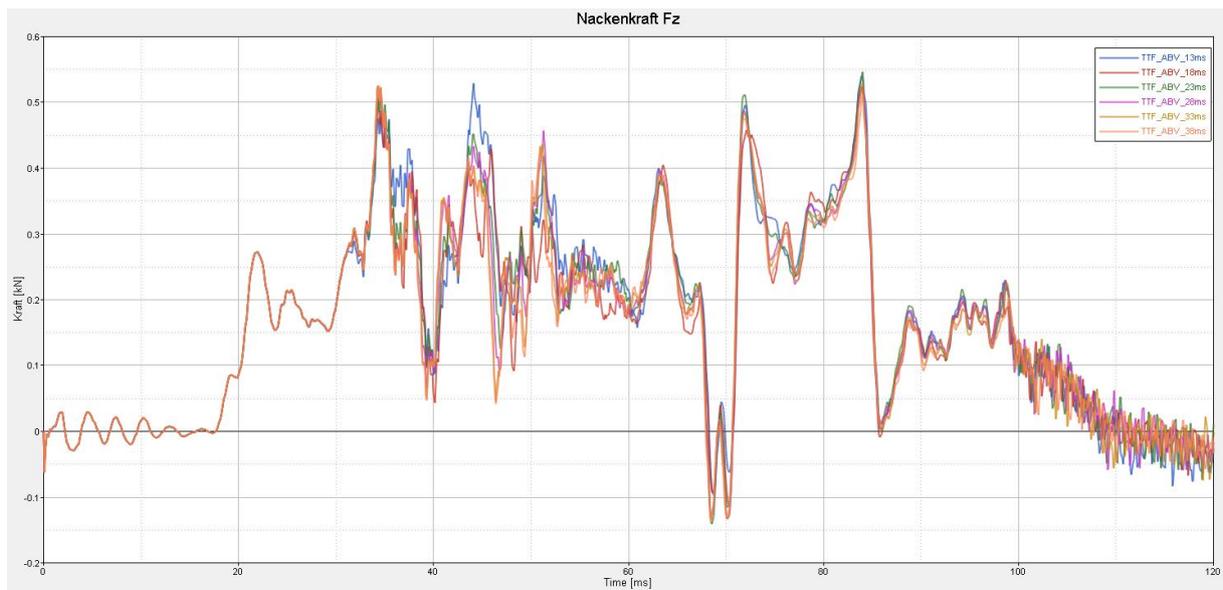


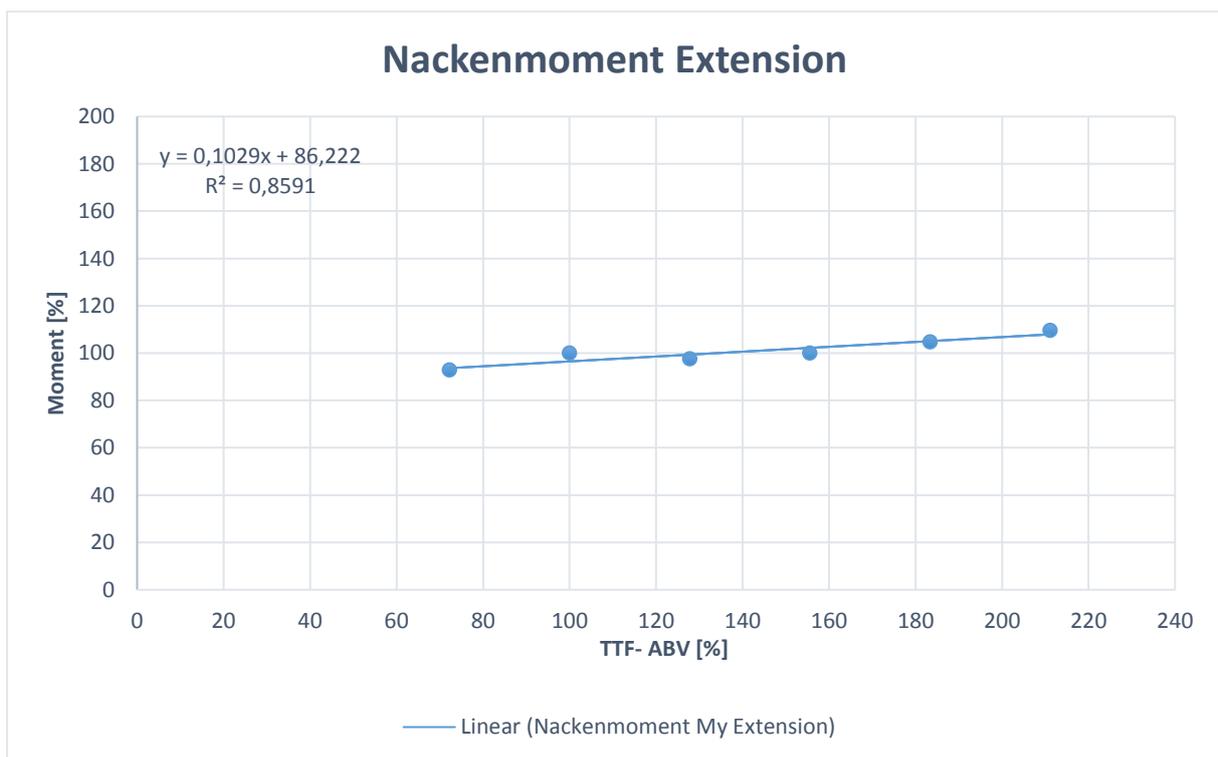
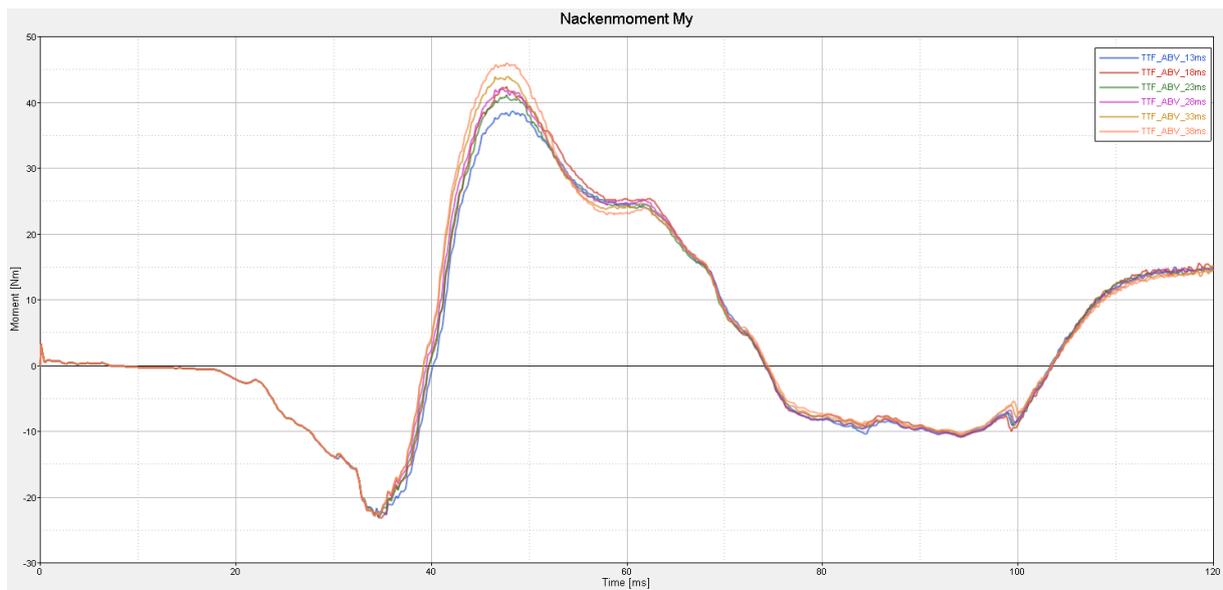


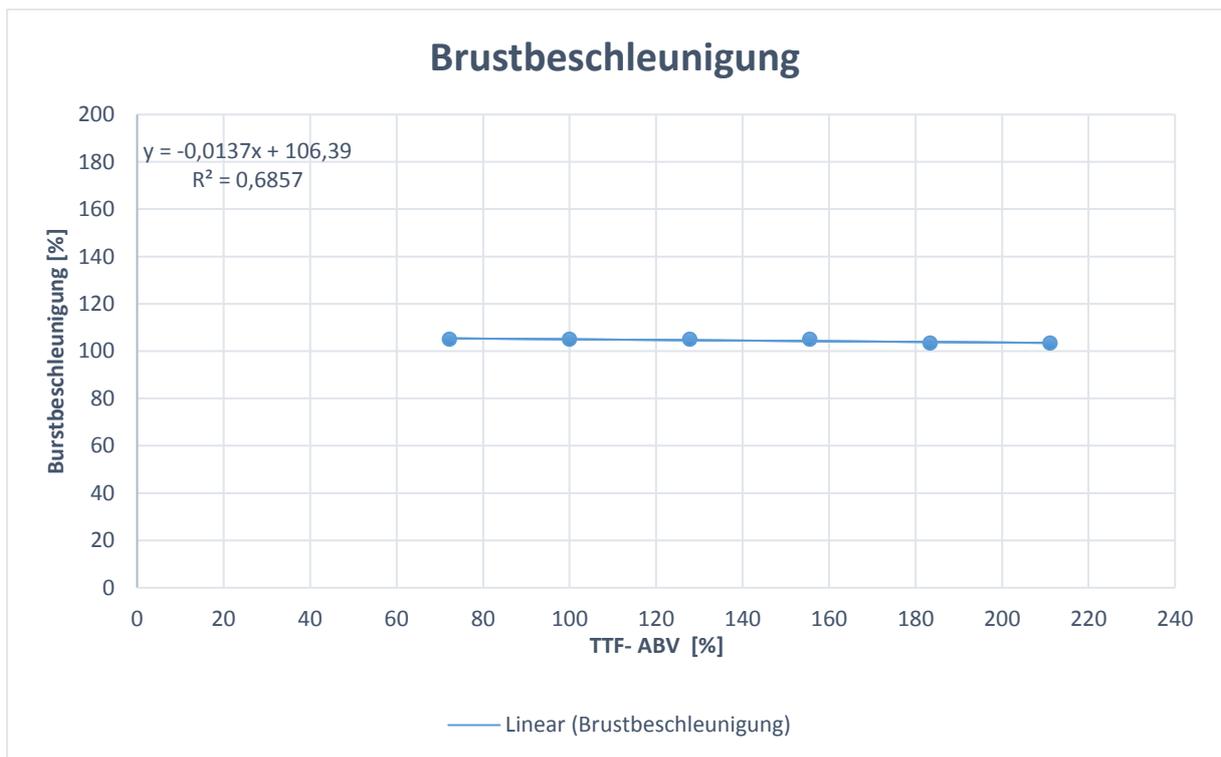
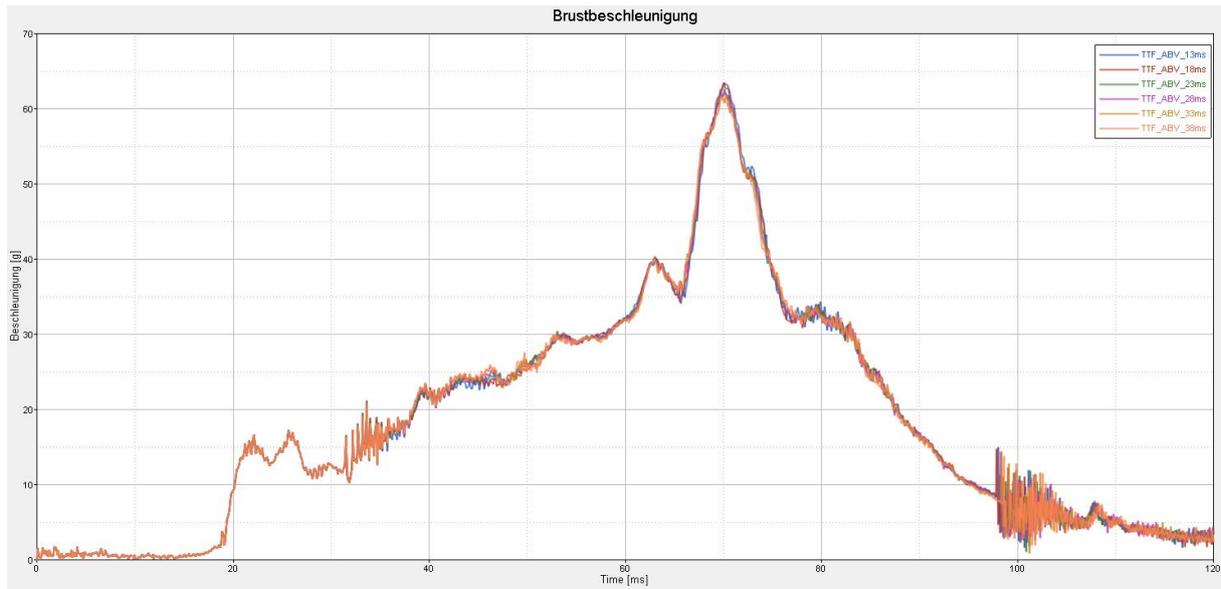


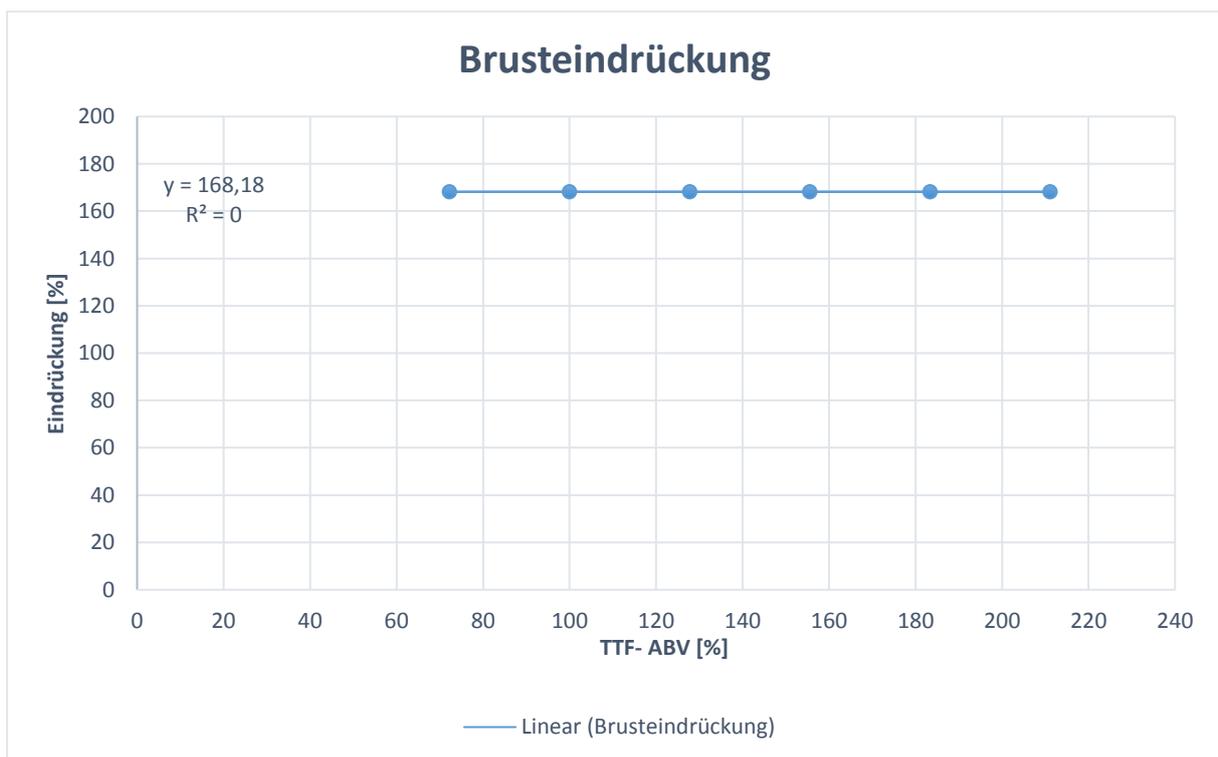
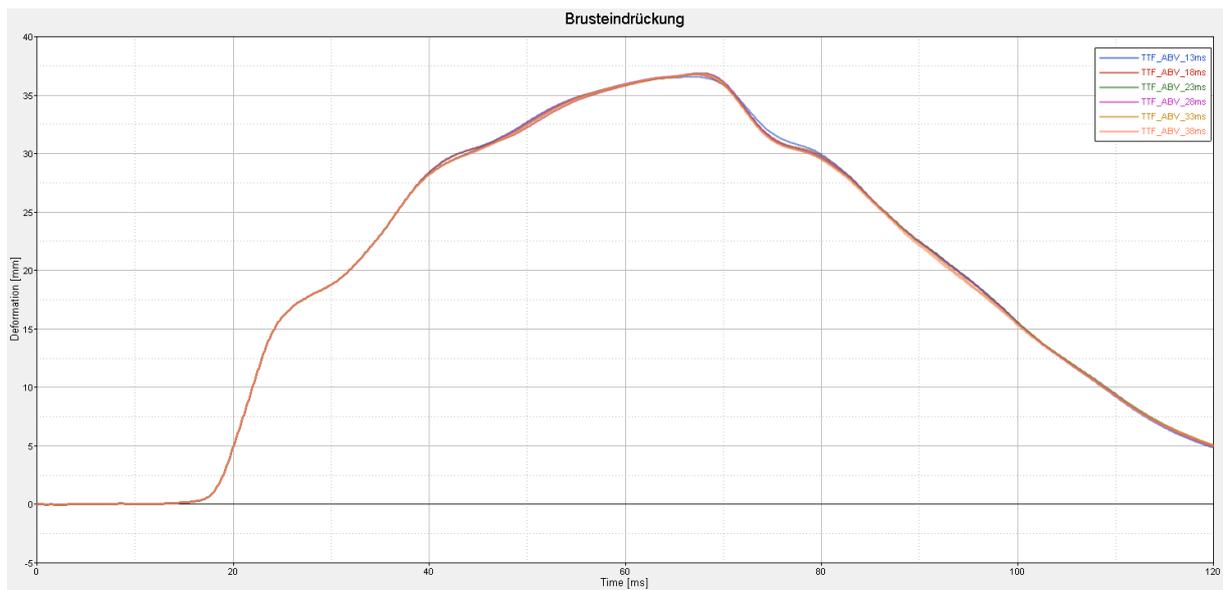
Variation des Zündzeitpunktes des aktiven Vent im Bereich von 13-38ms und einer Schrittweite von 5ms

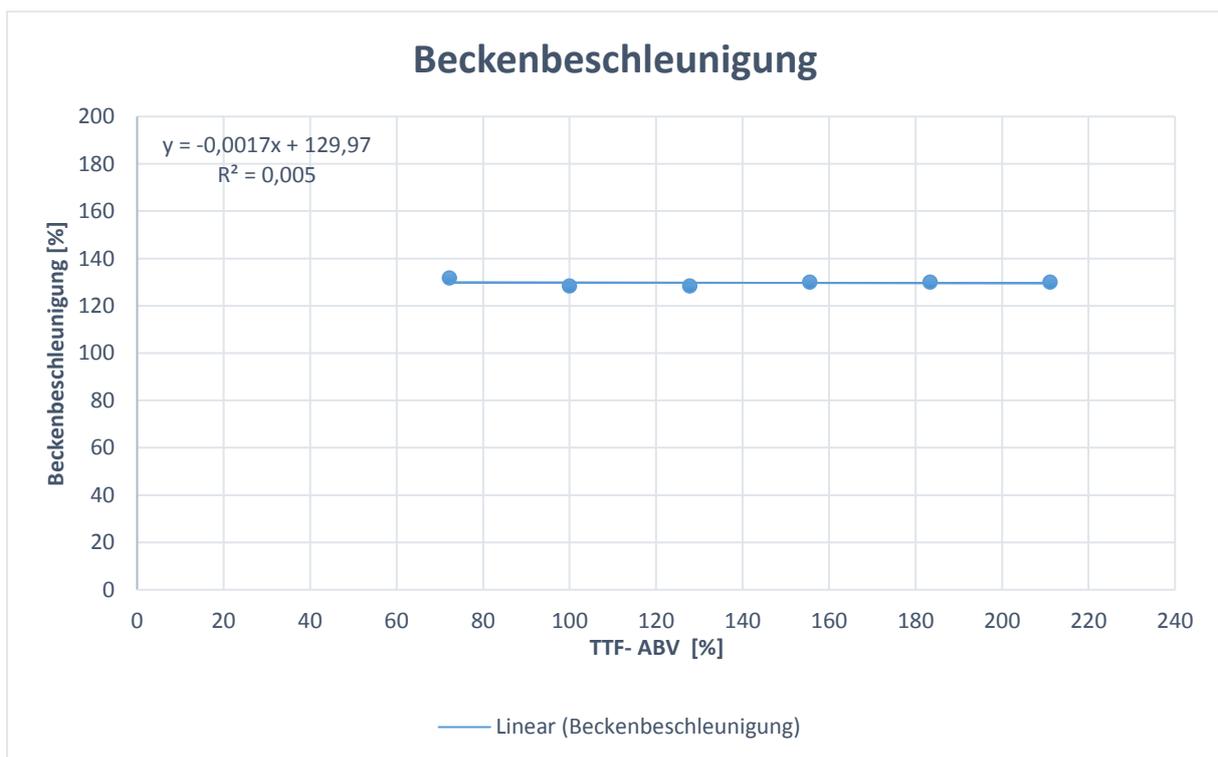
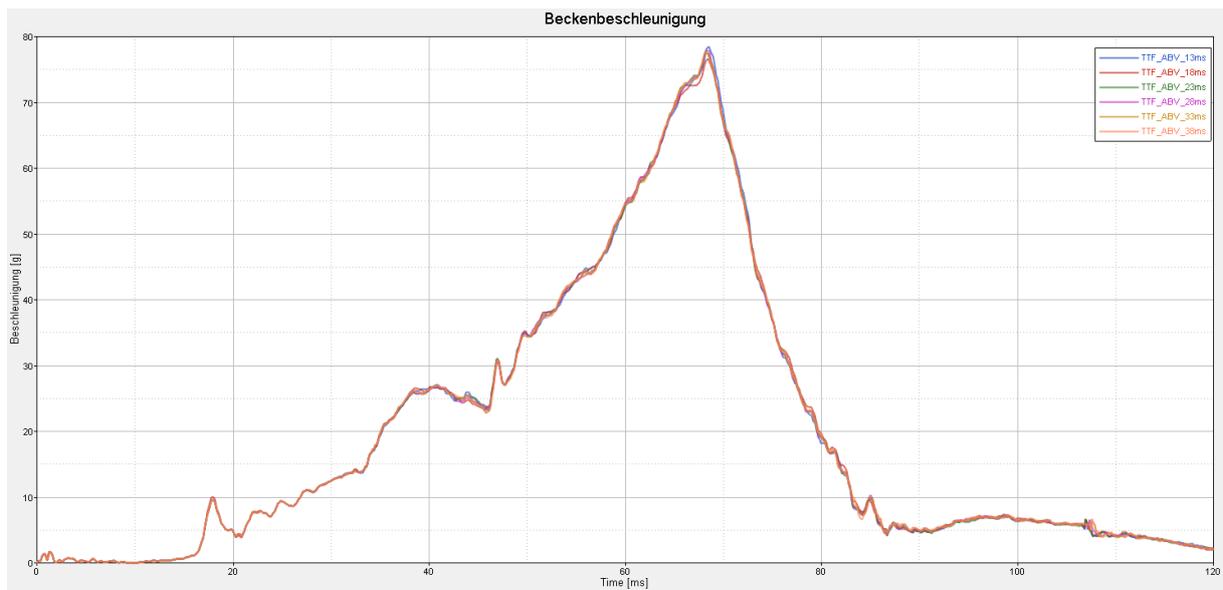


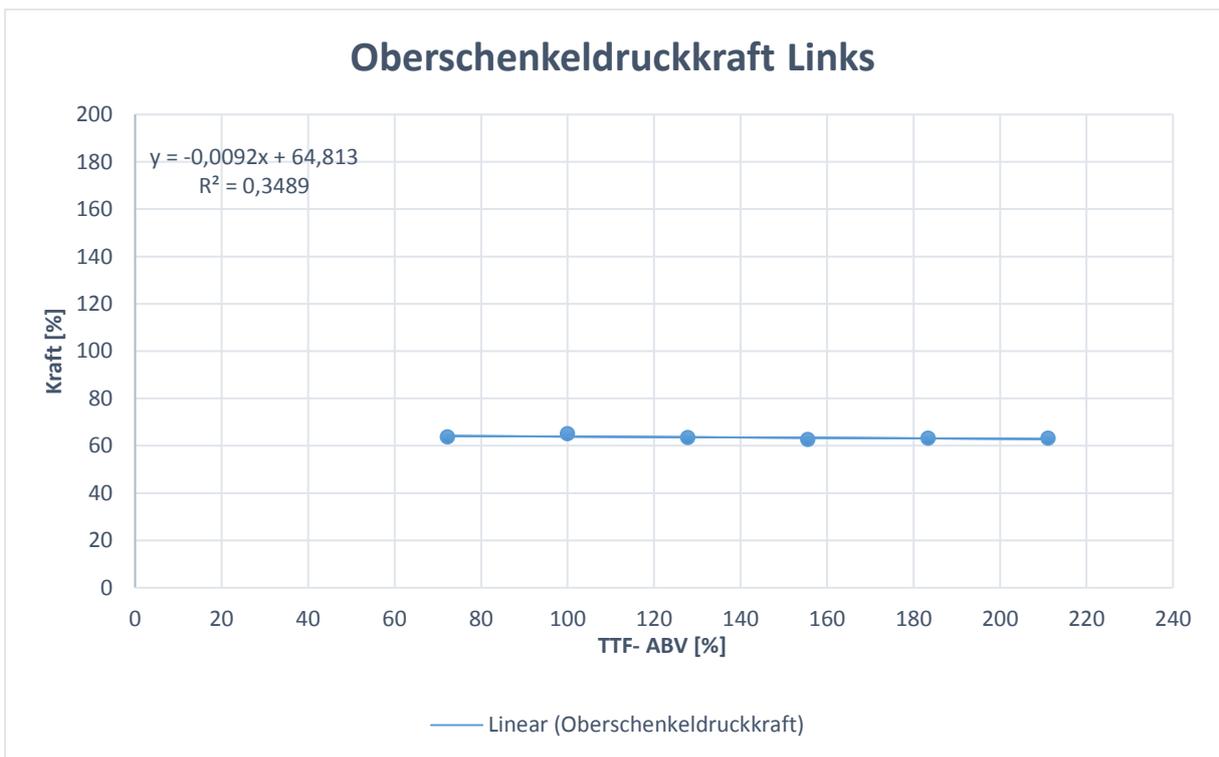
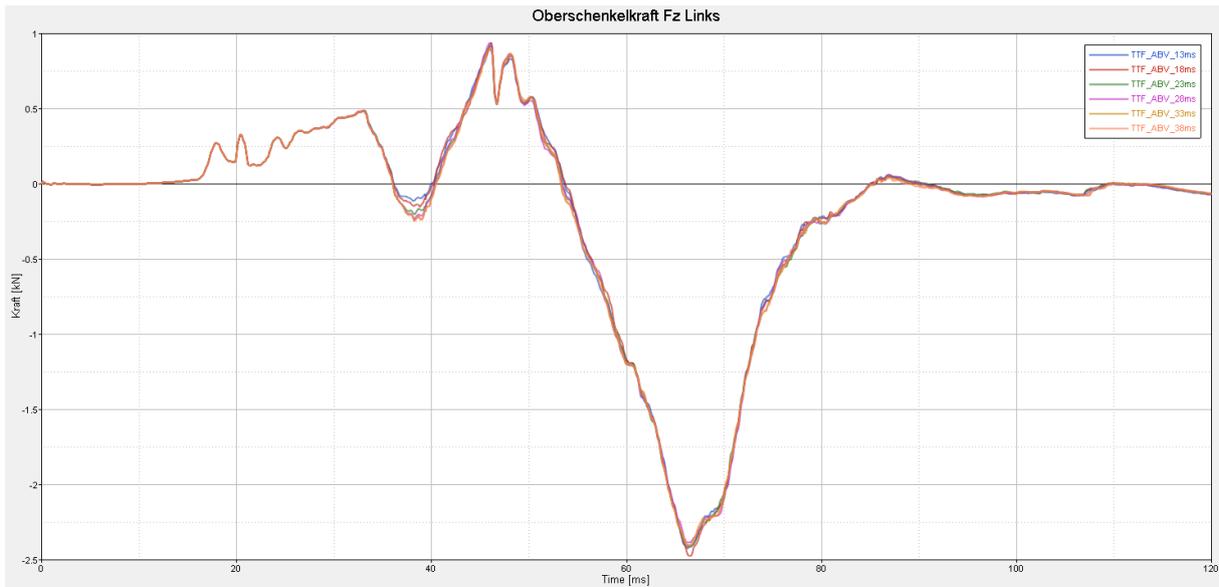


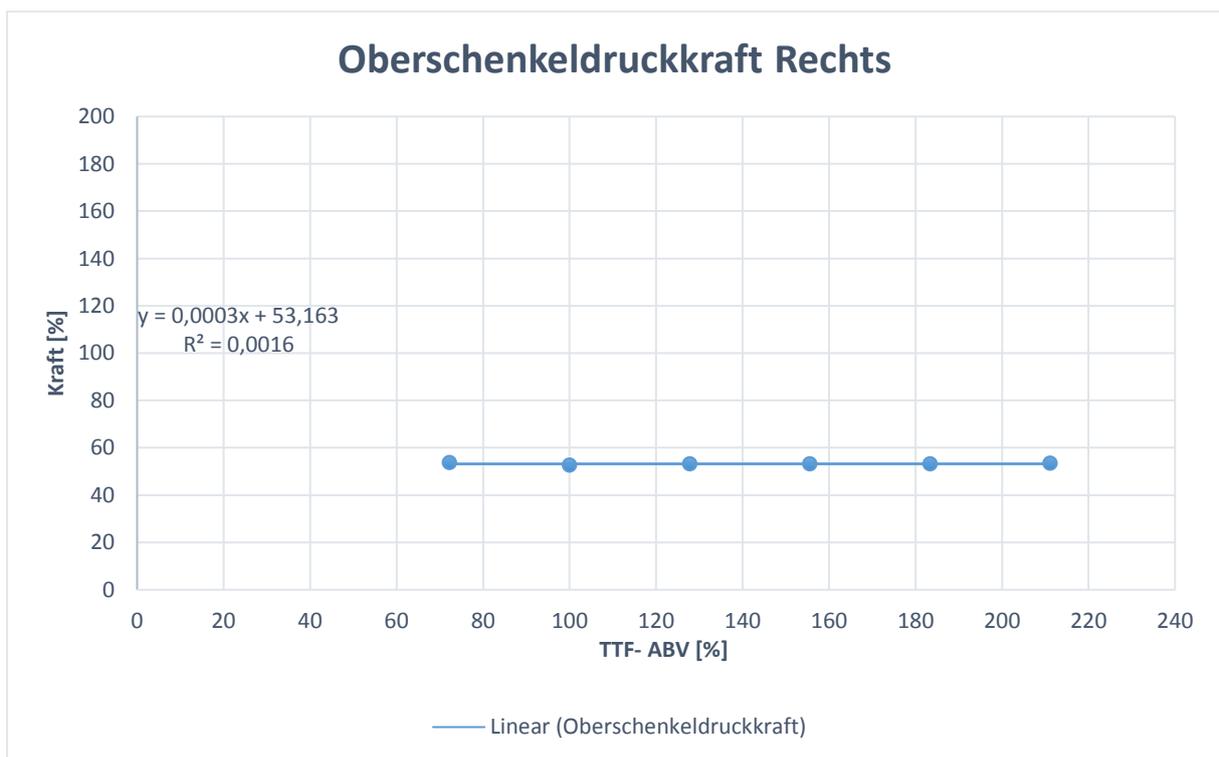
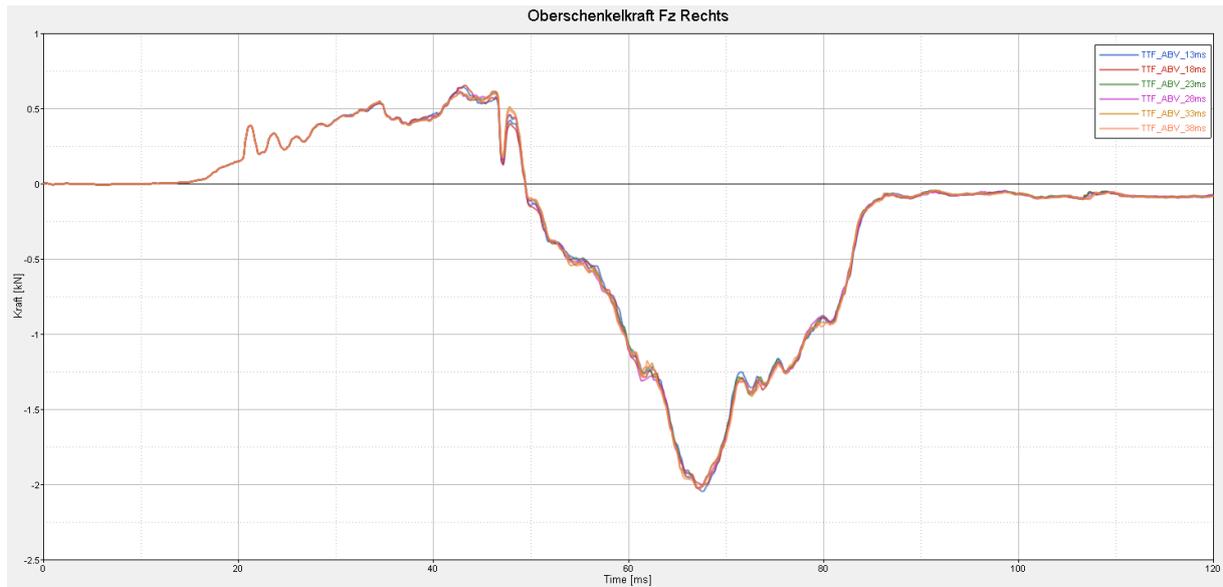




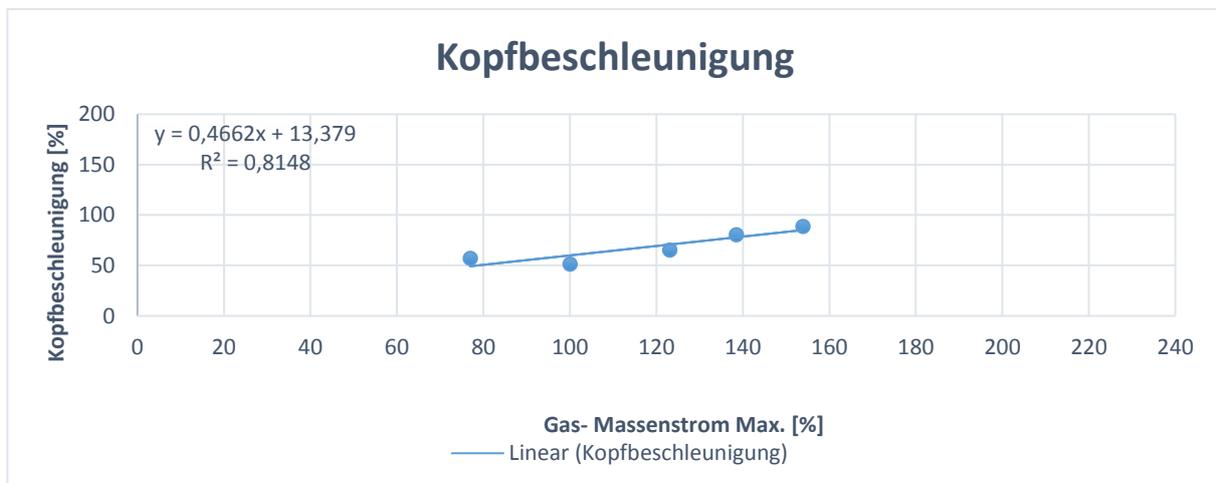
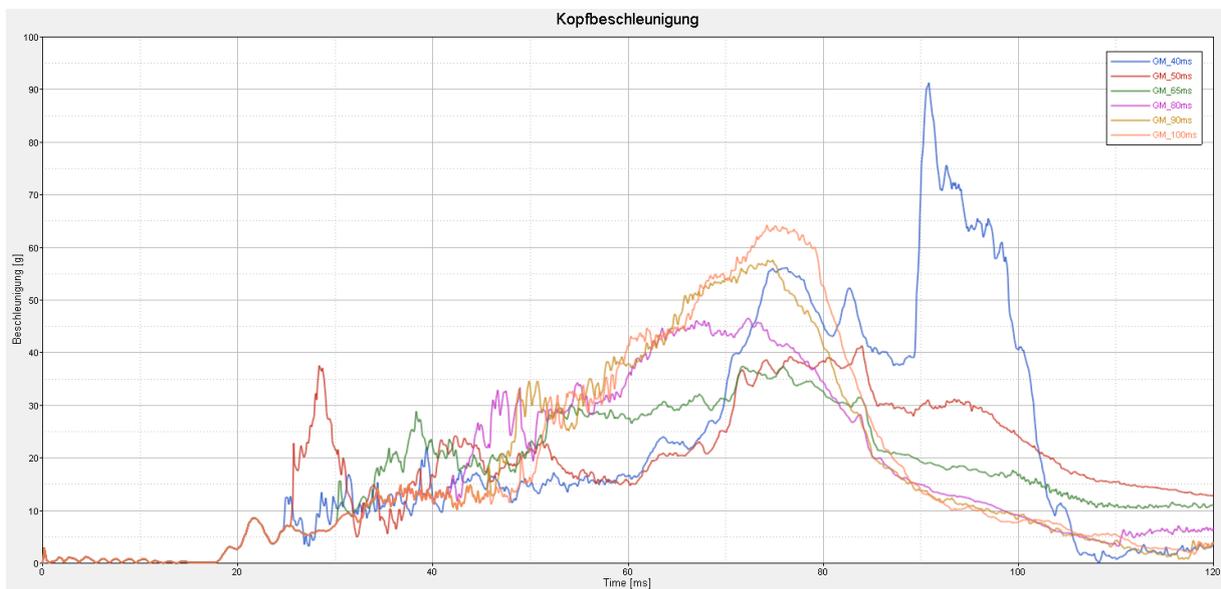
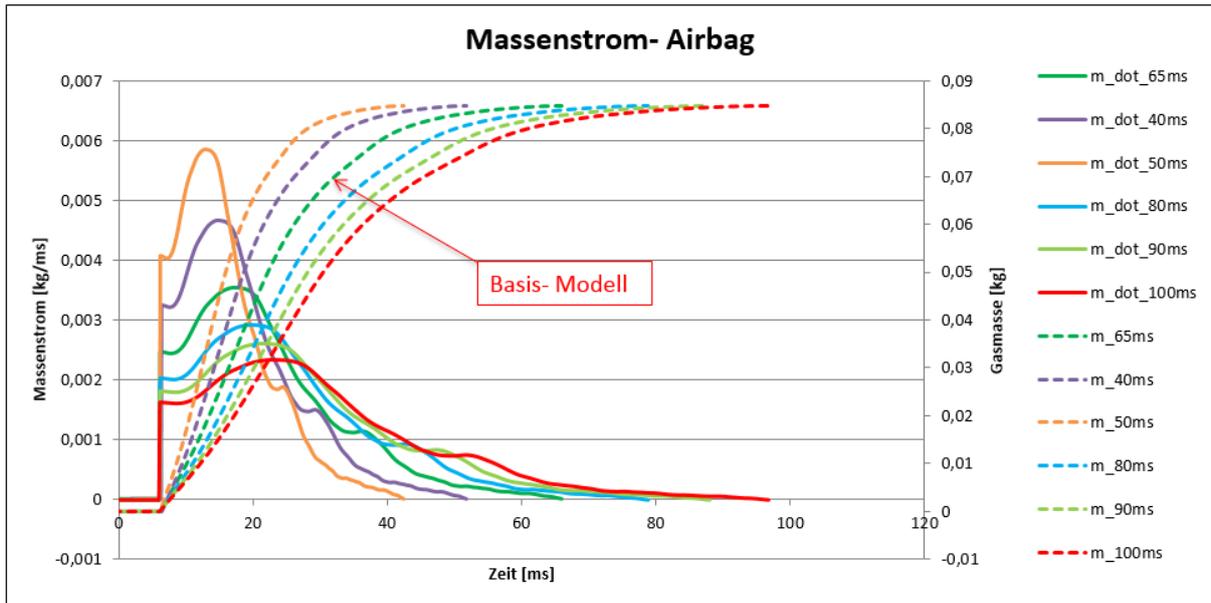


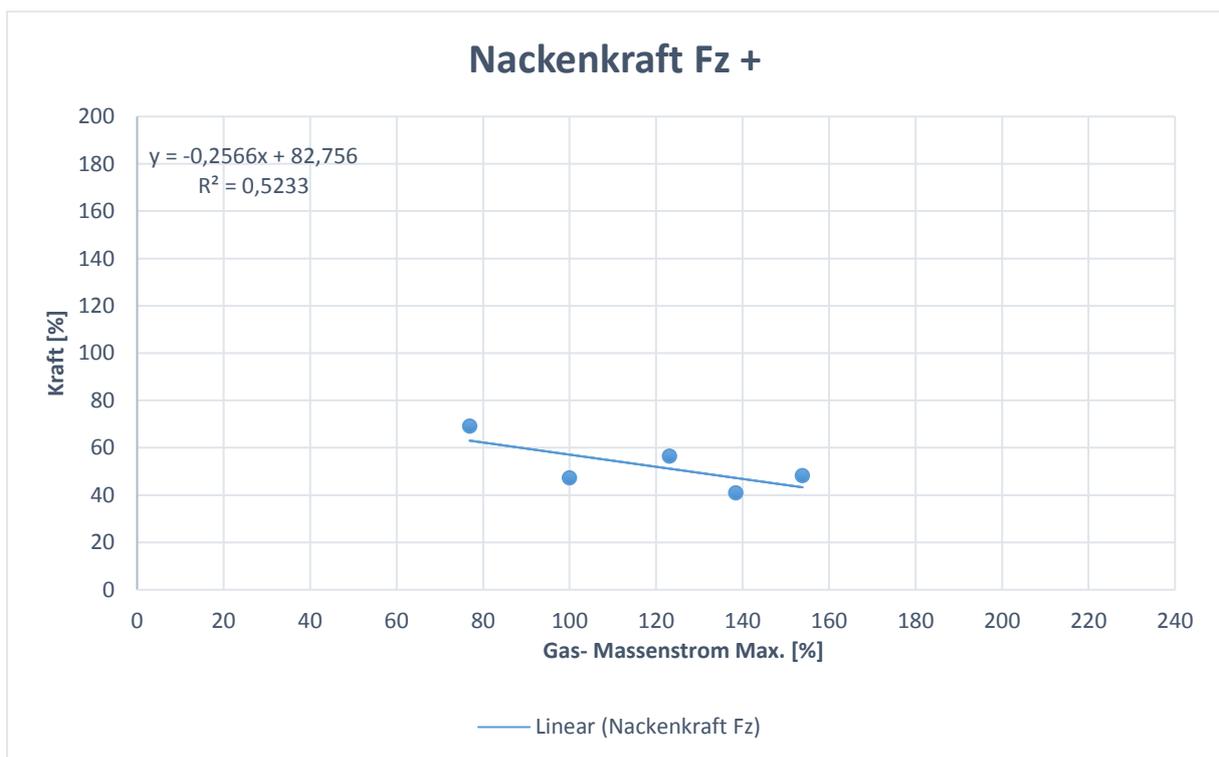
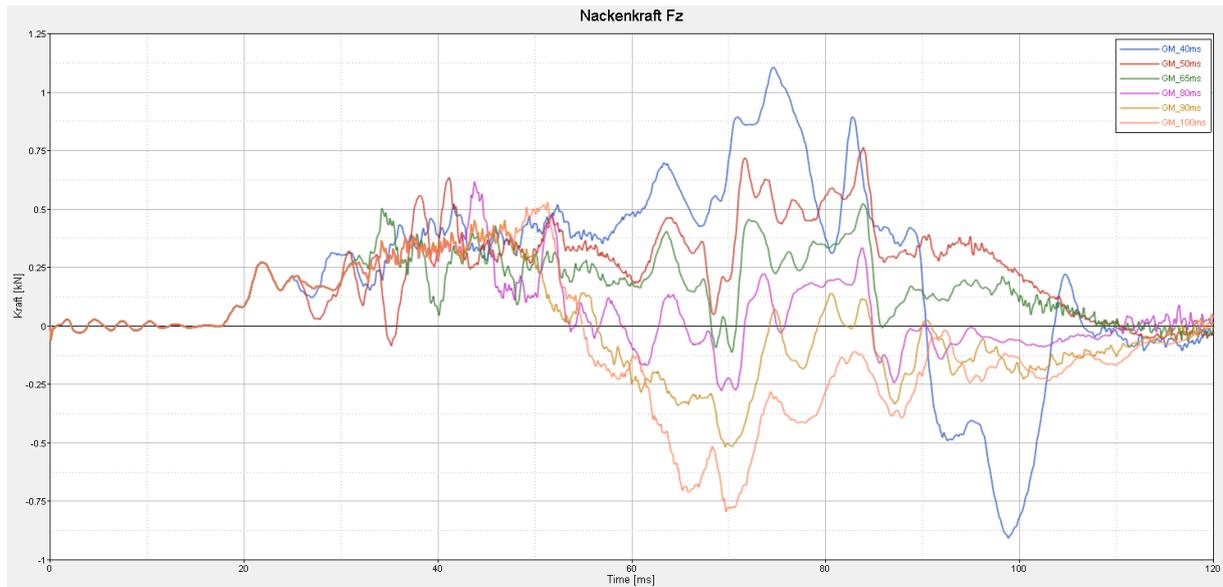


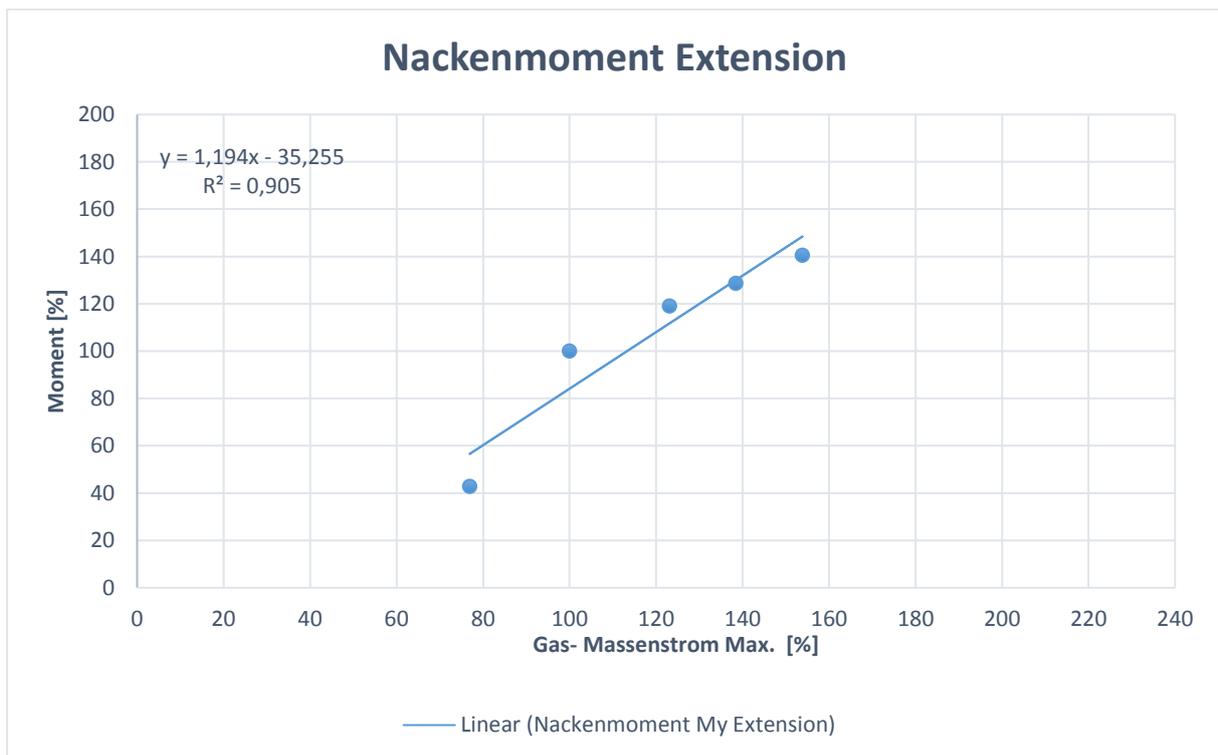
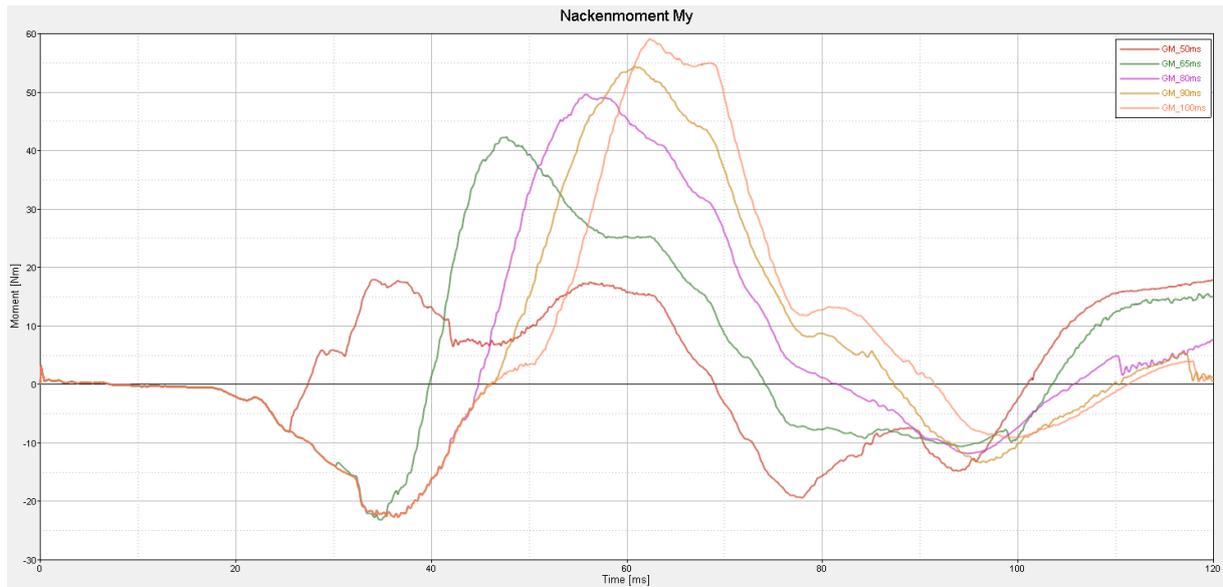


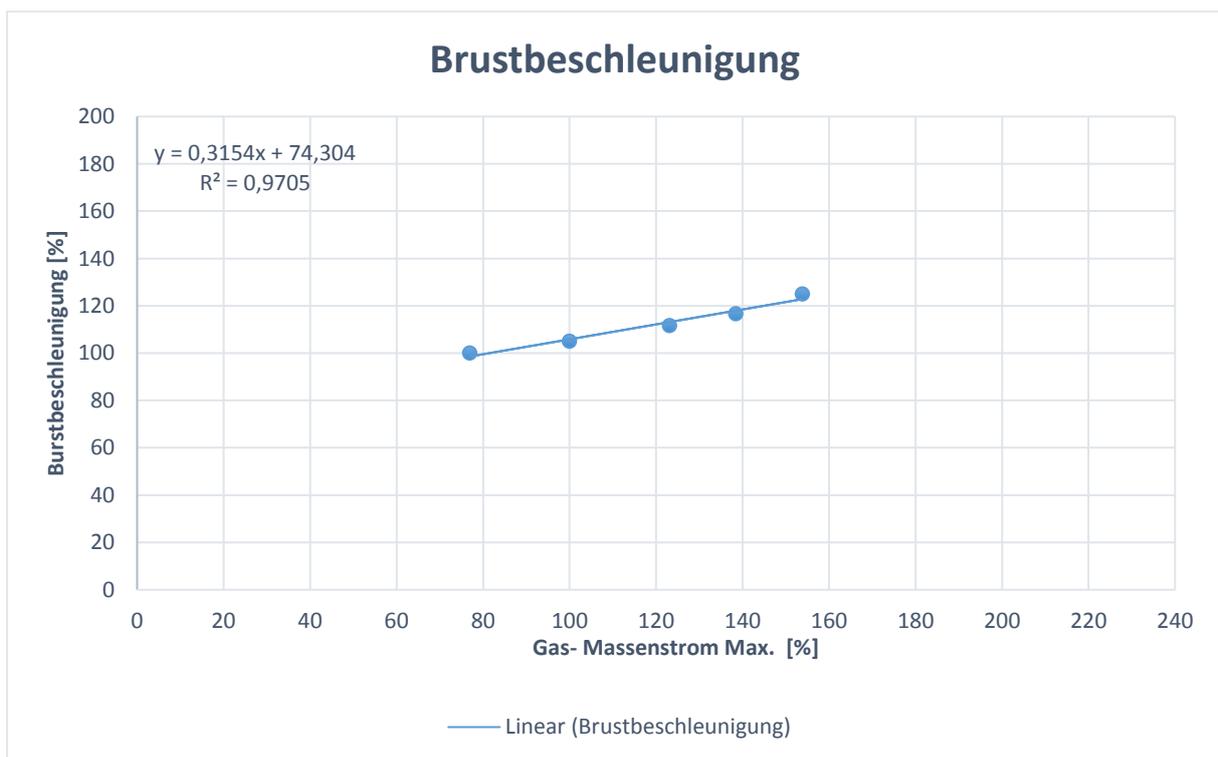
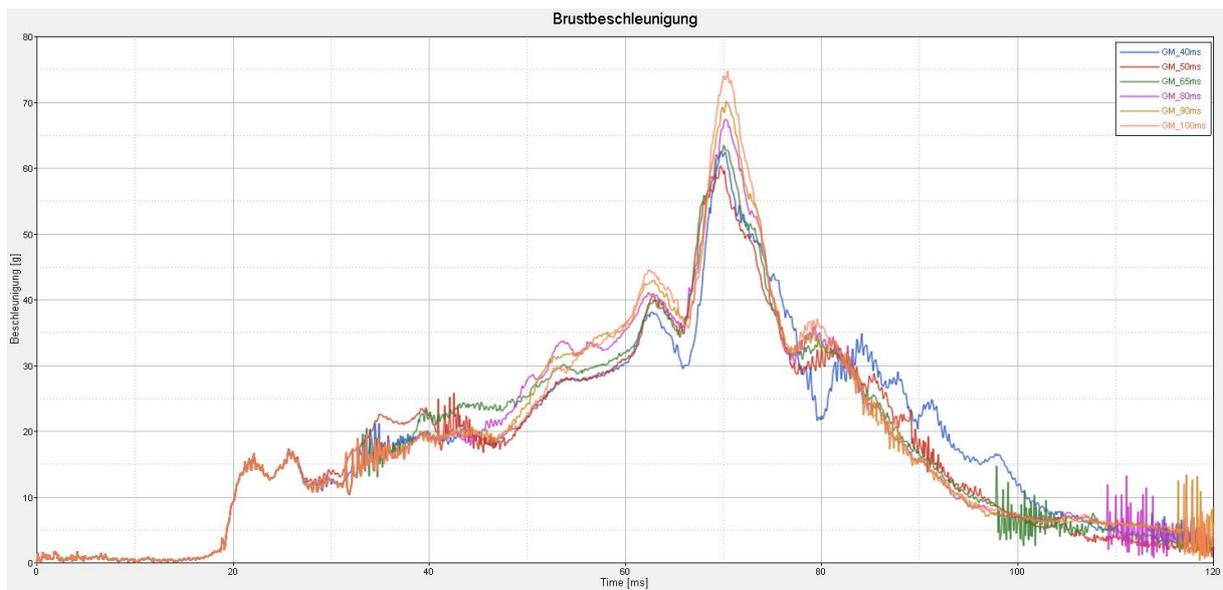


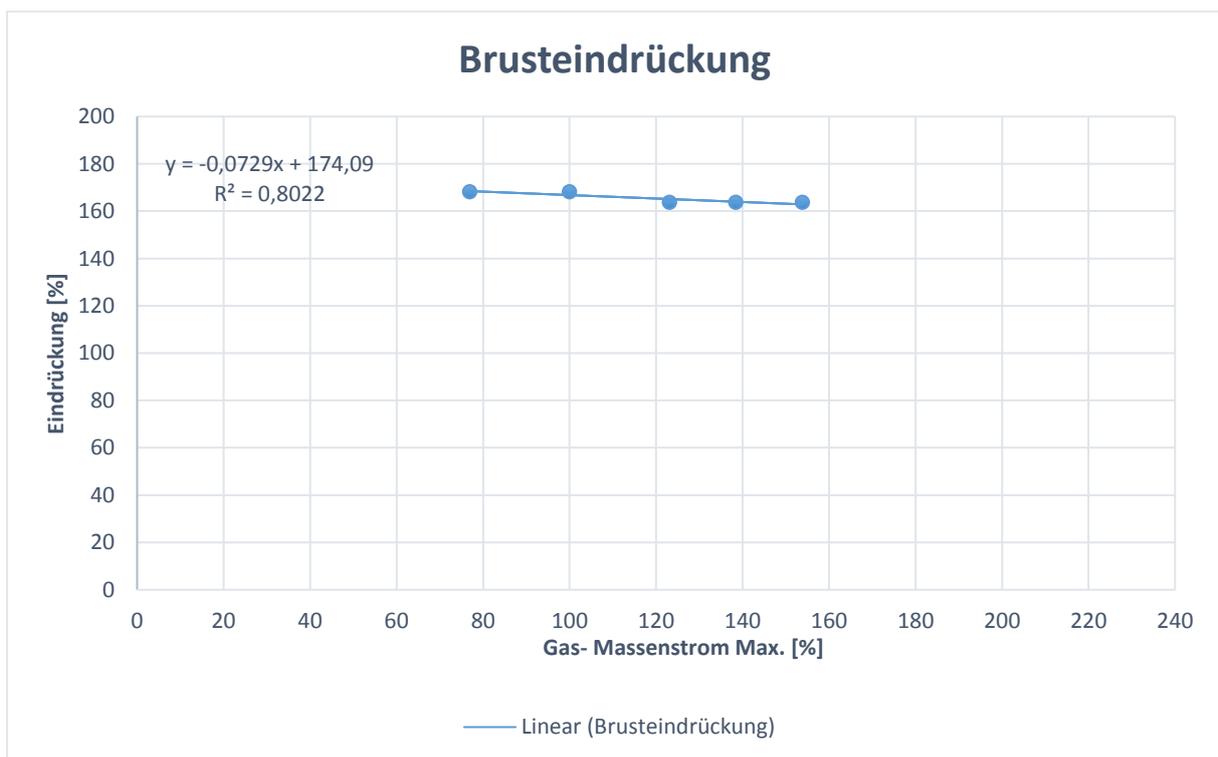
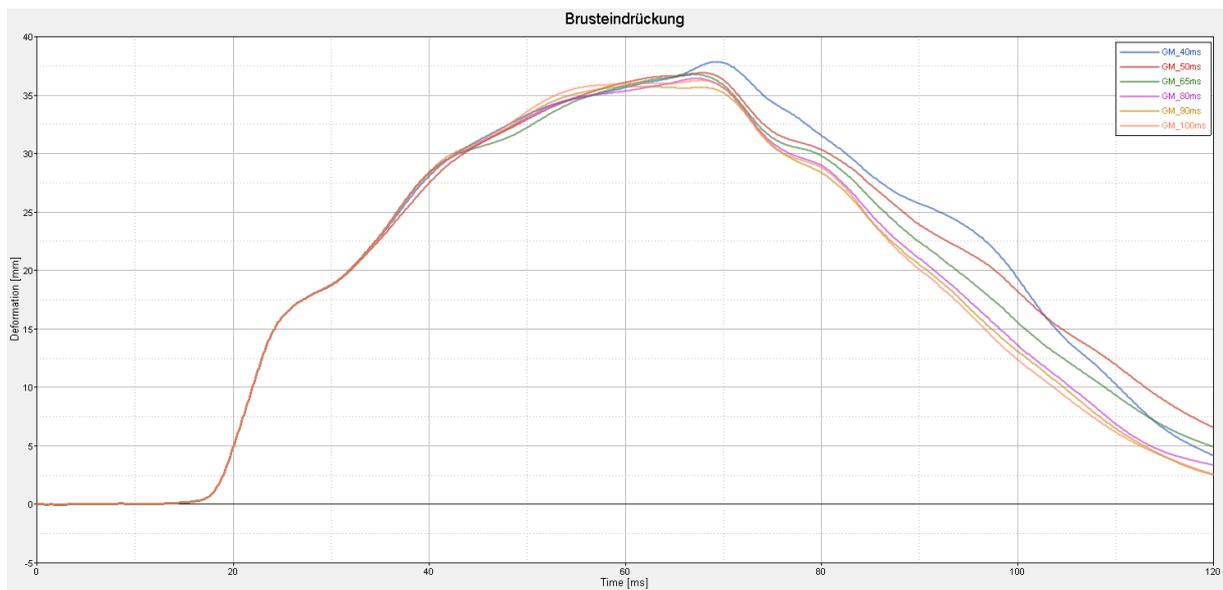
Variation des Zeitpunktes der max. Gasmasse im Airbag im Bereich von 40-100ms und einer Schrittweite von 10ms

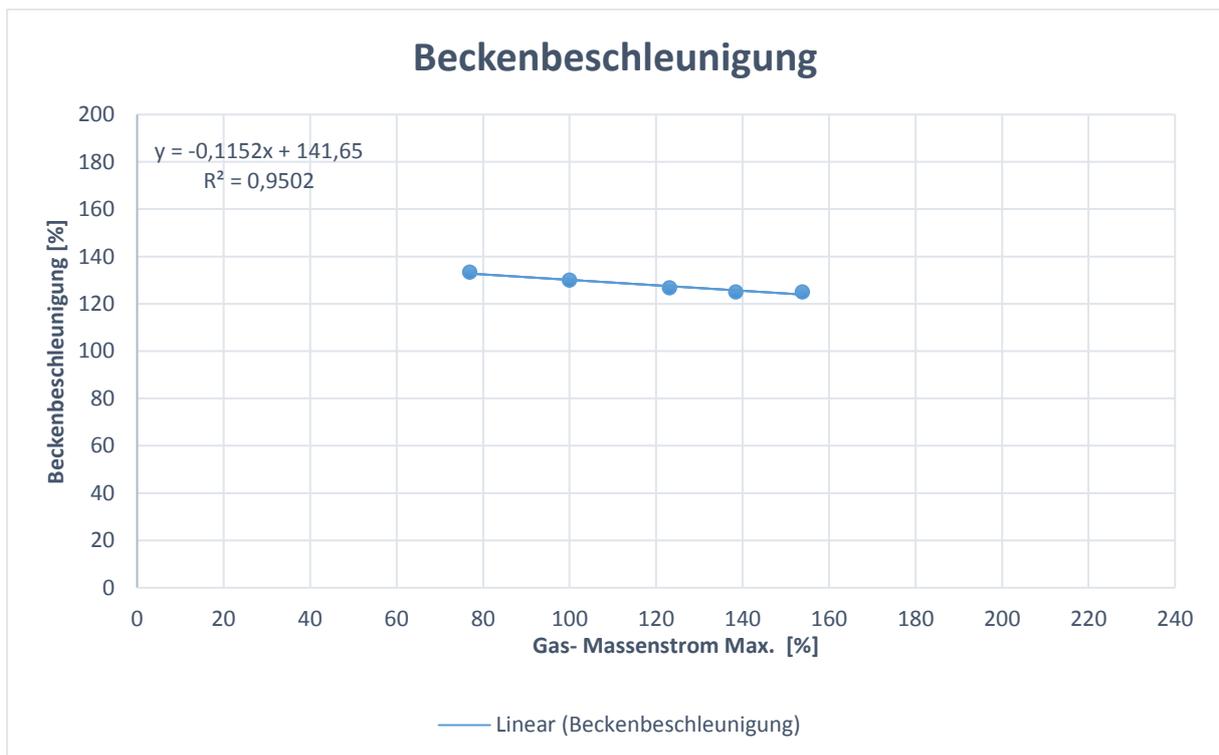
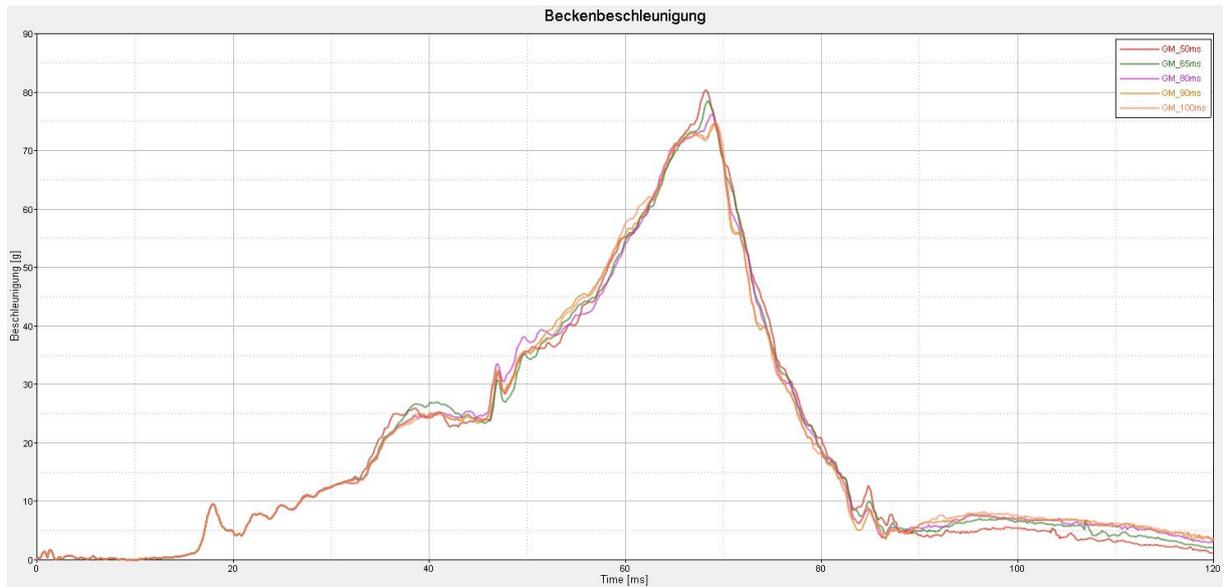


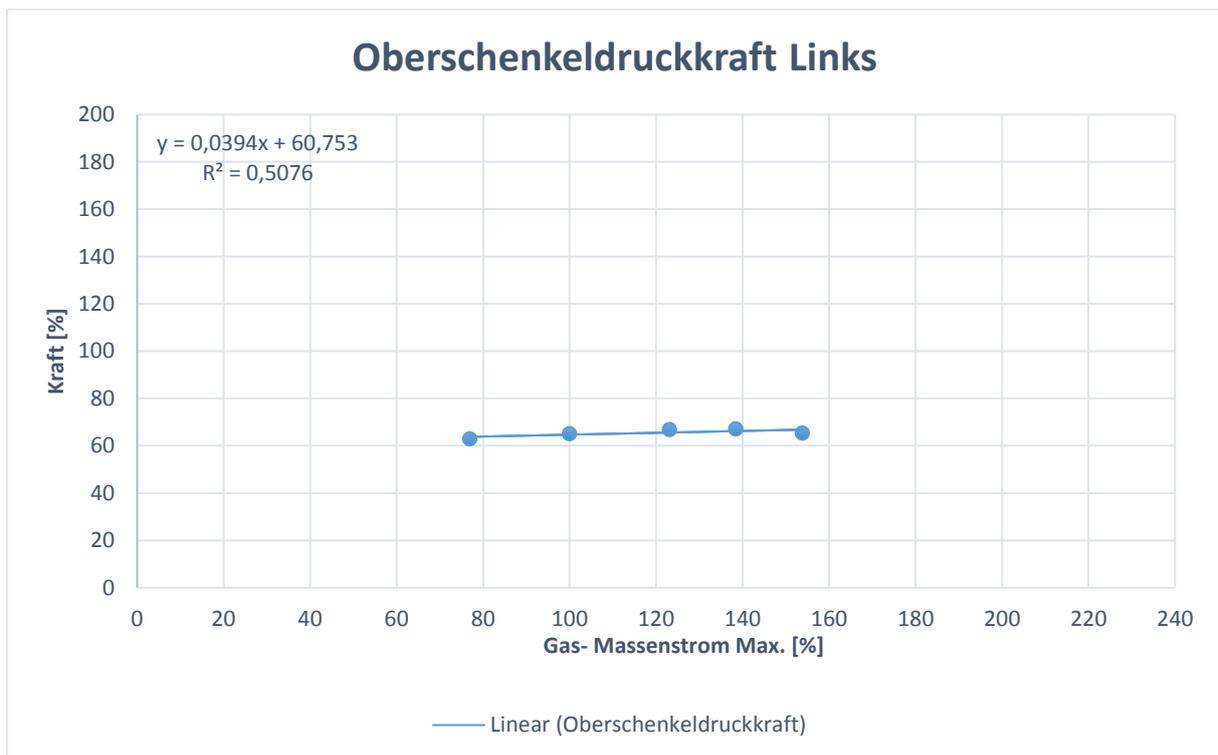
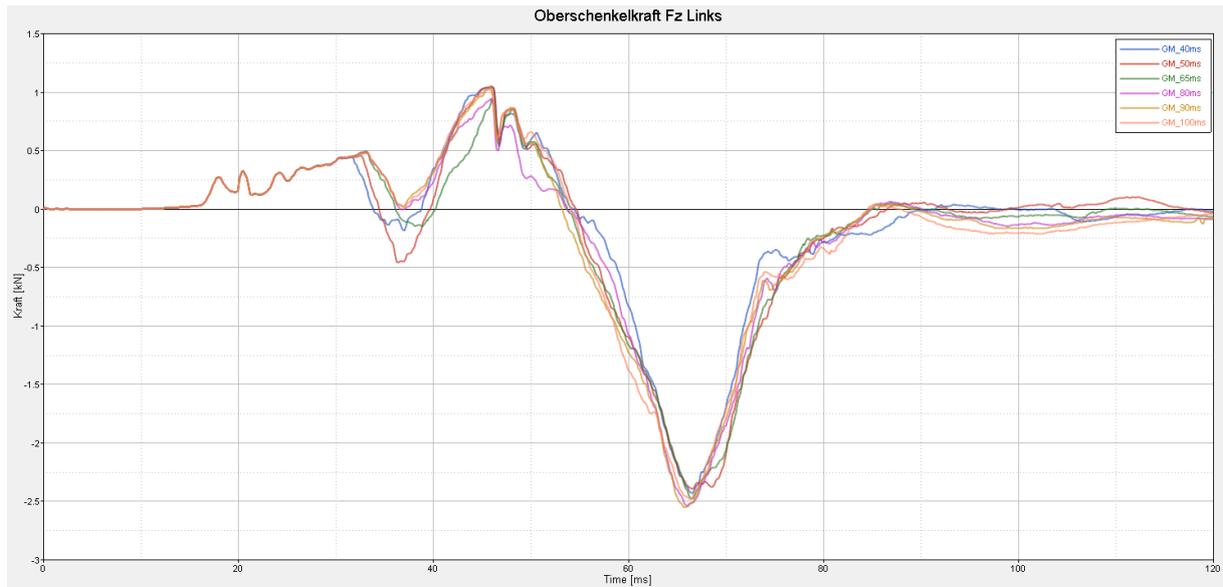


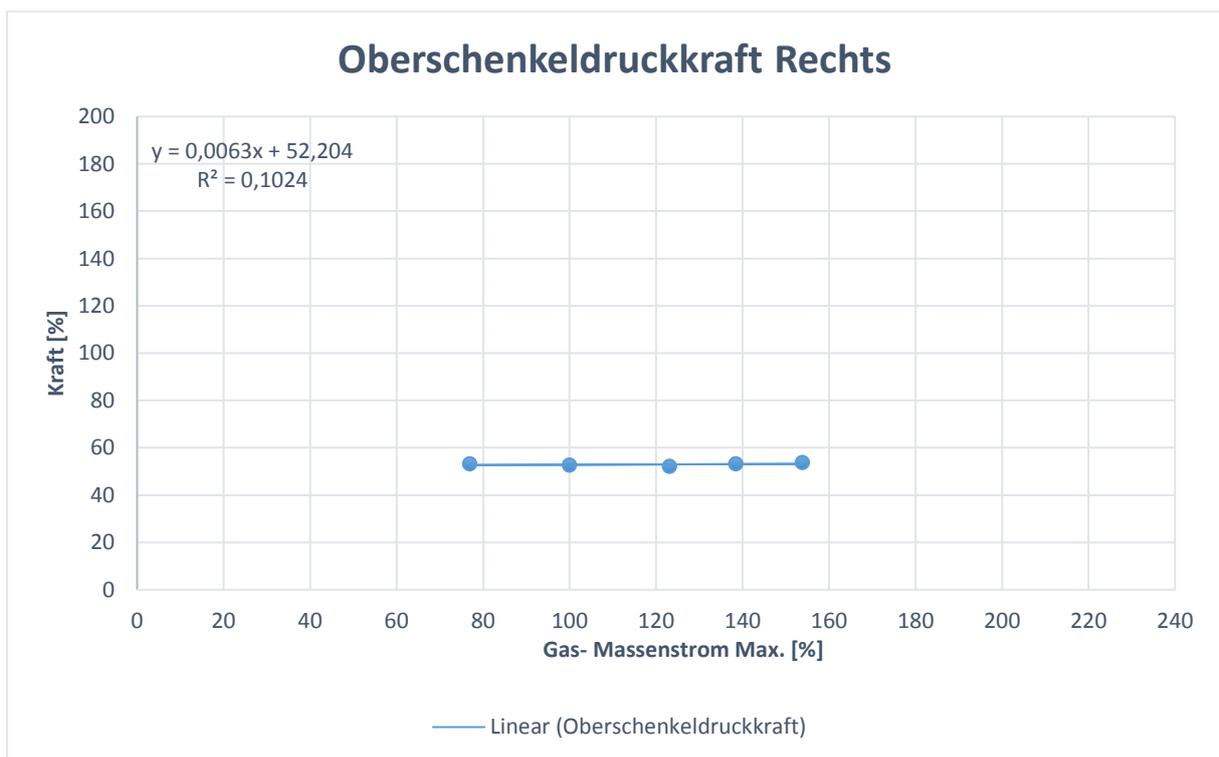
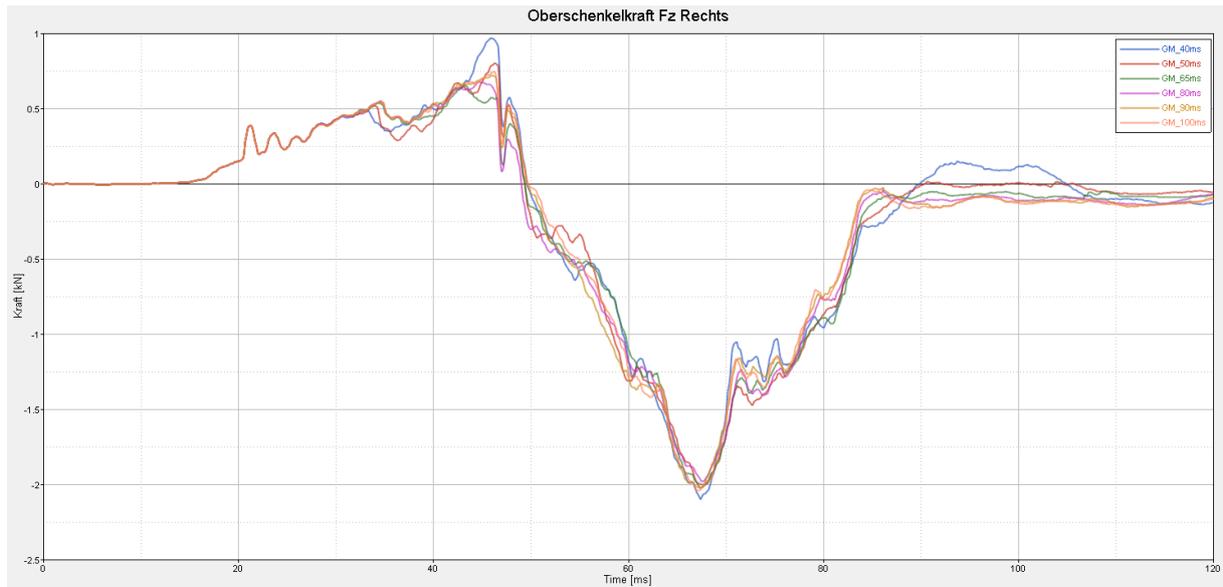




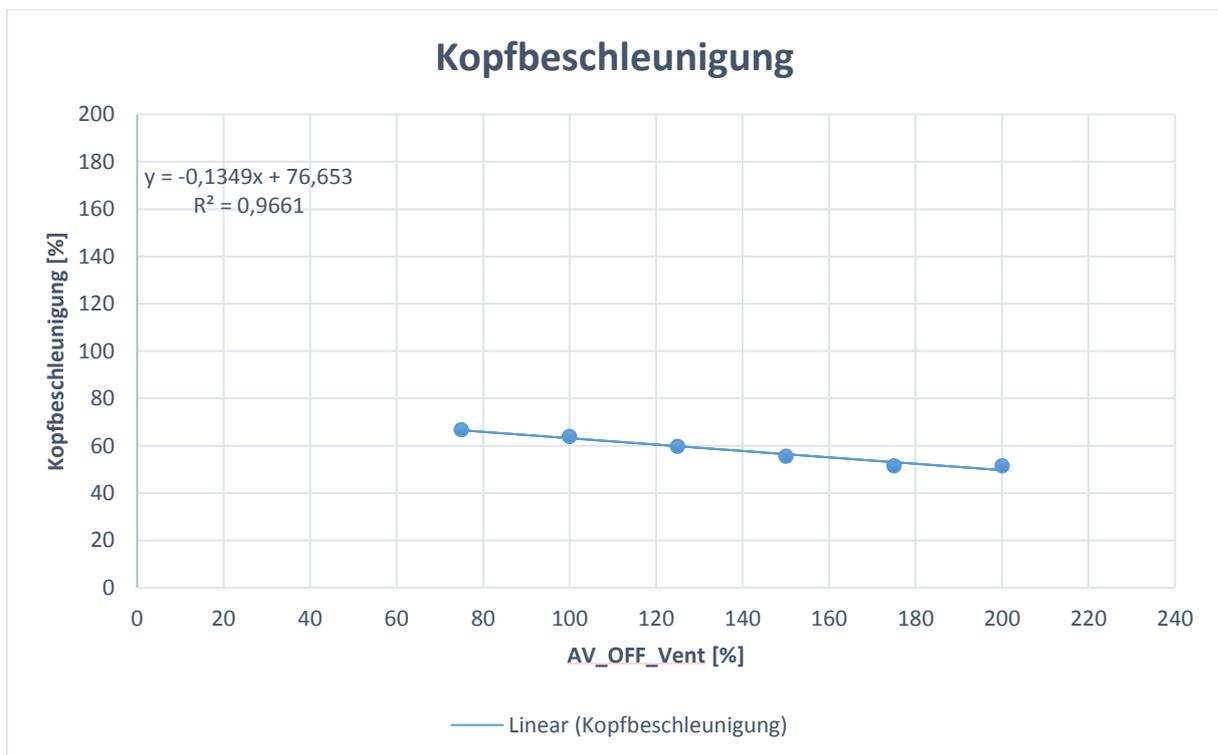
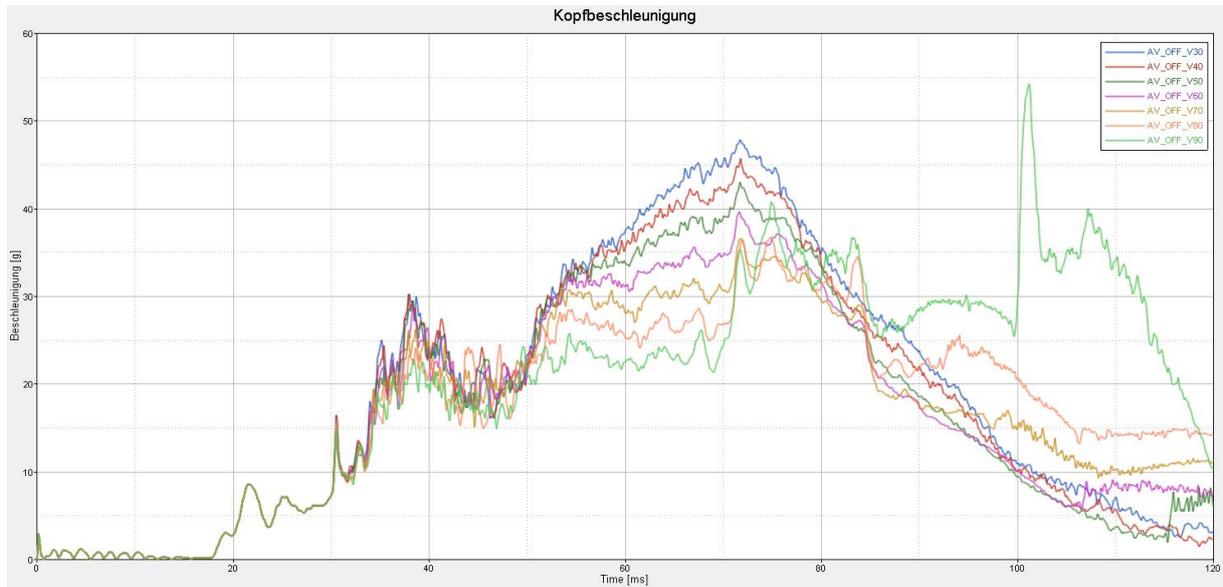


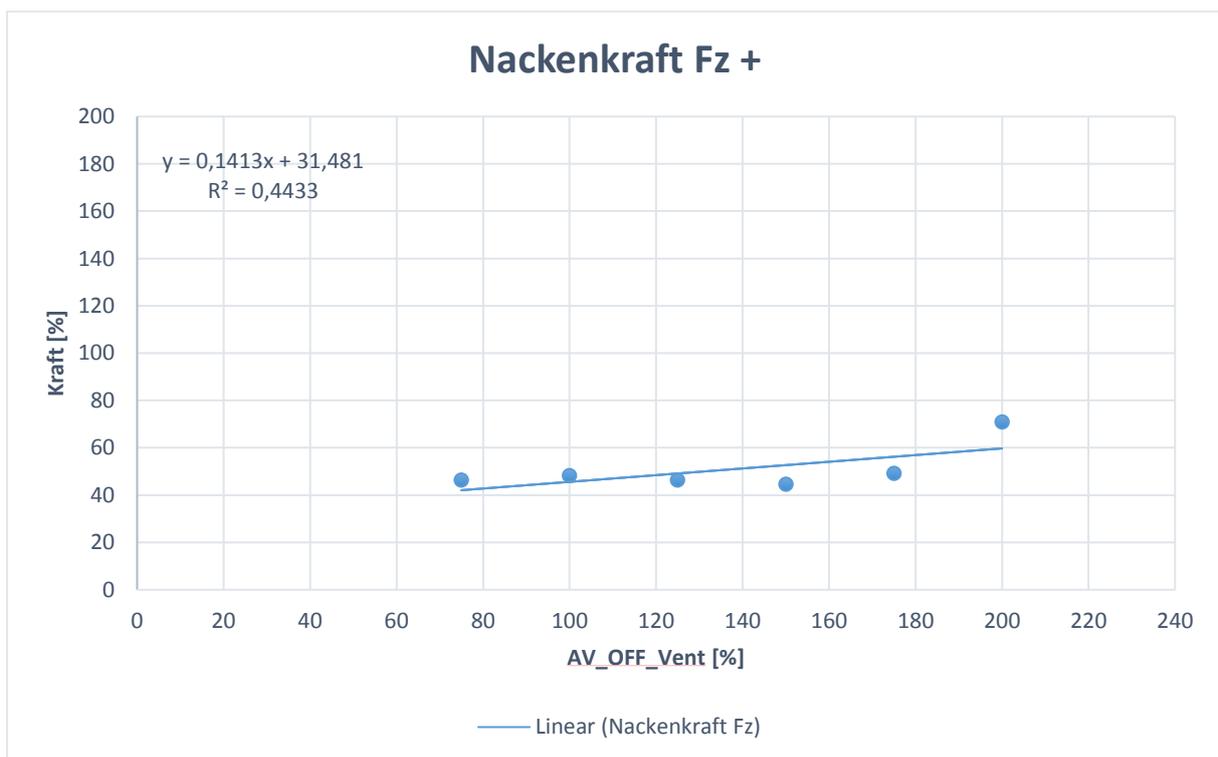
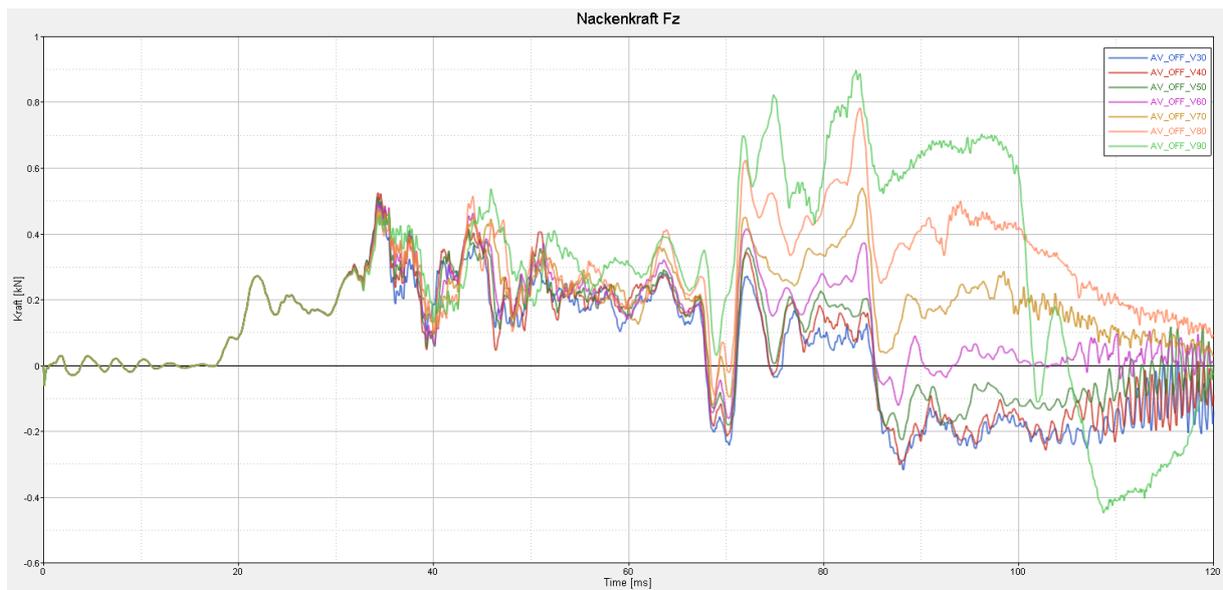


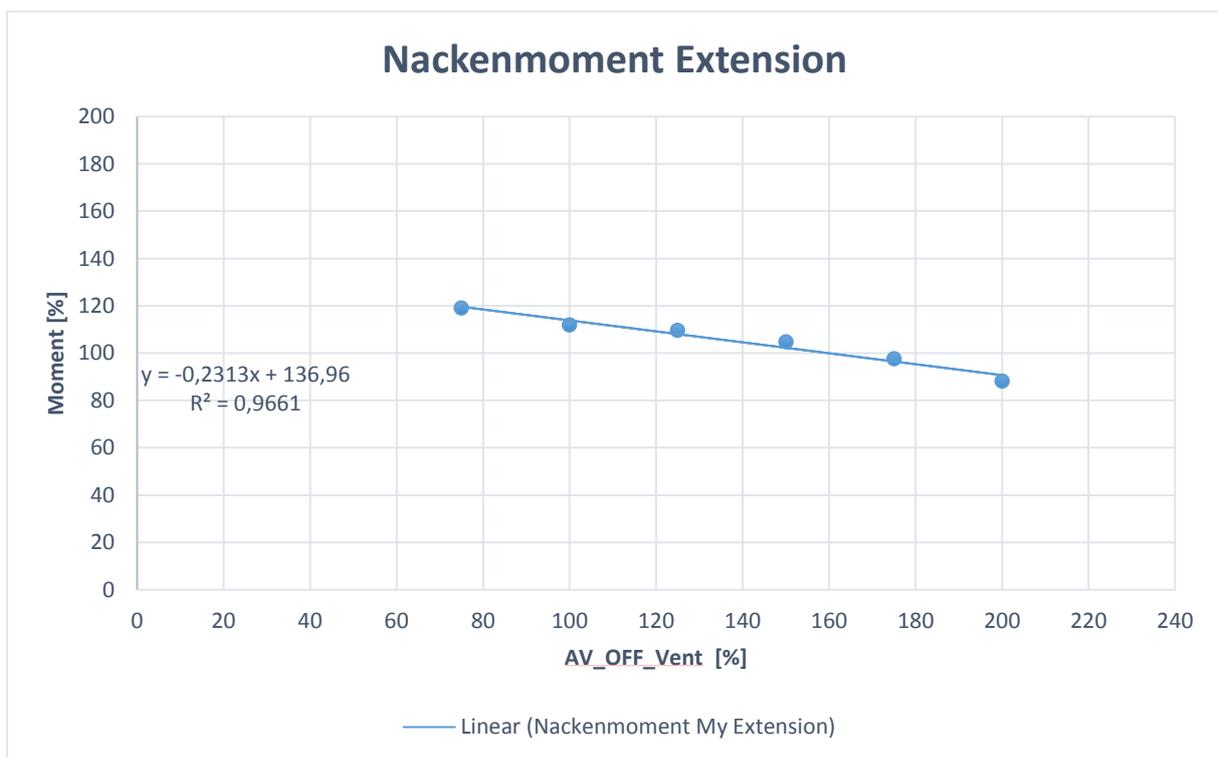
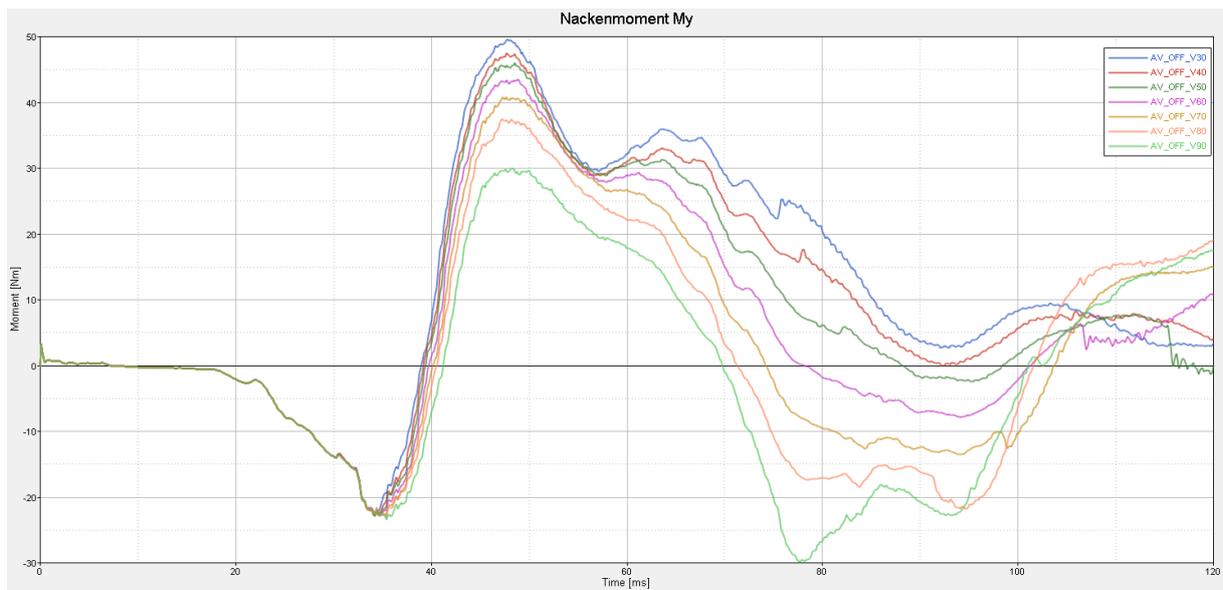


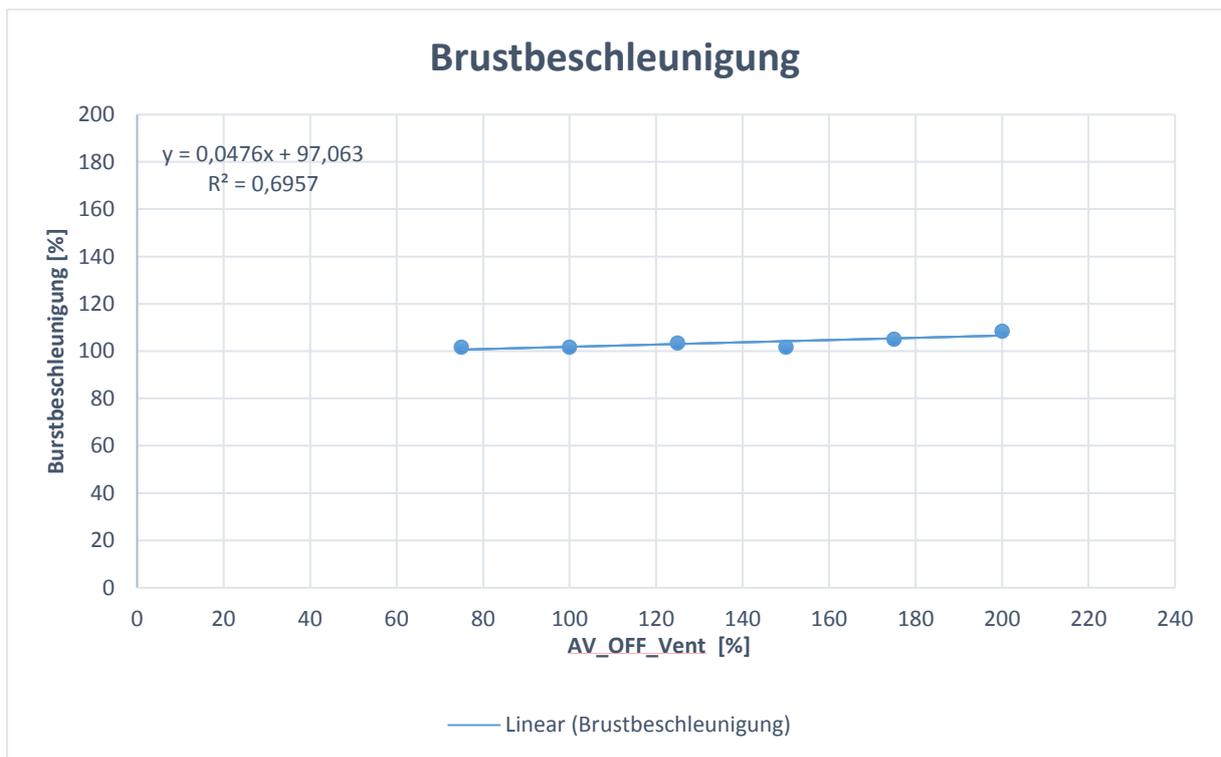
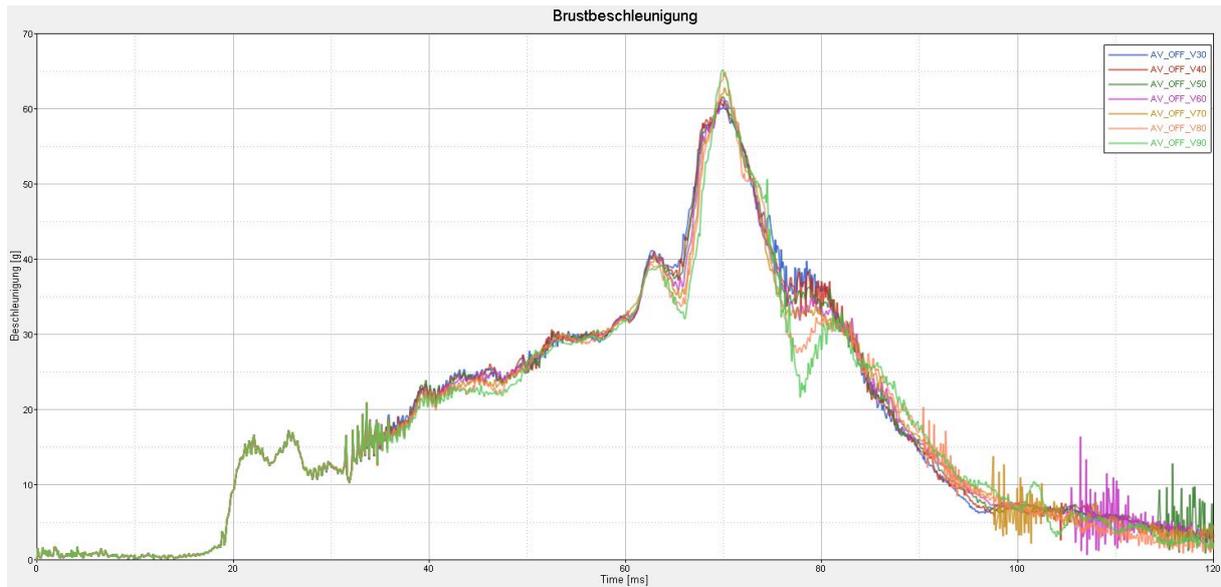


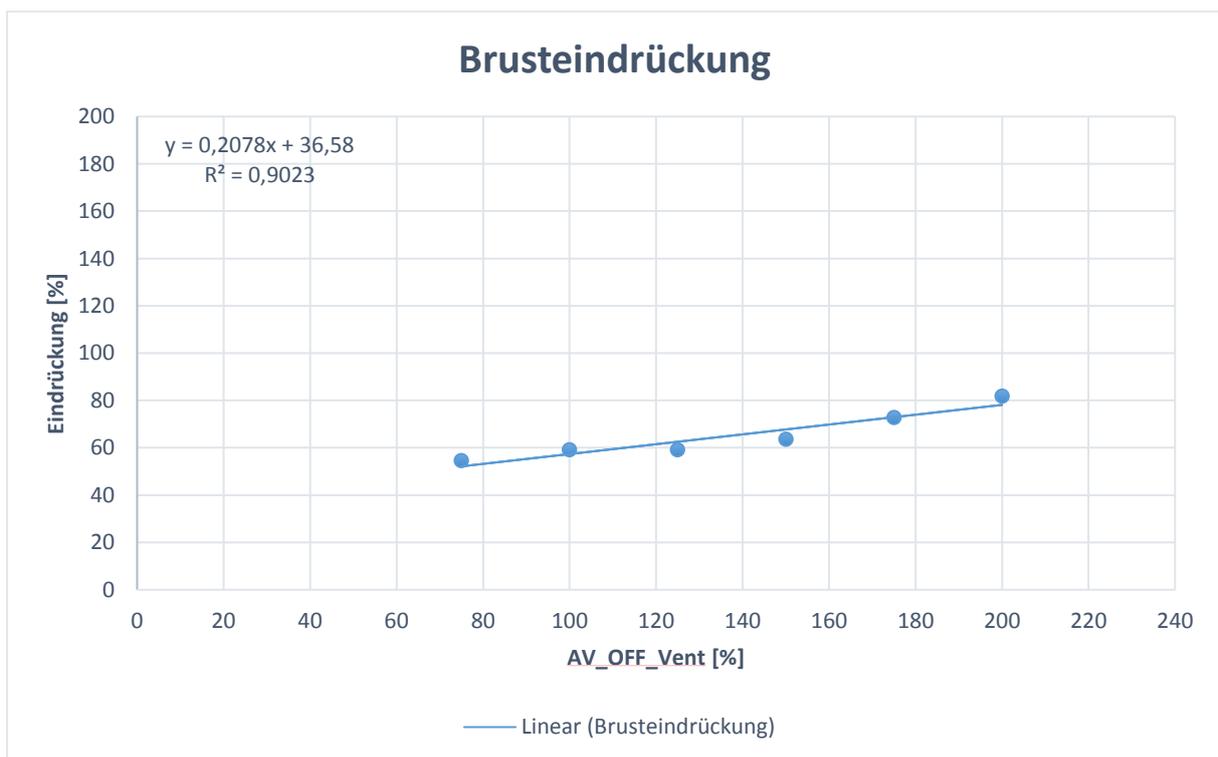
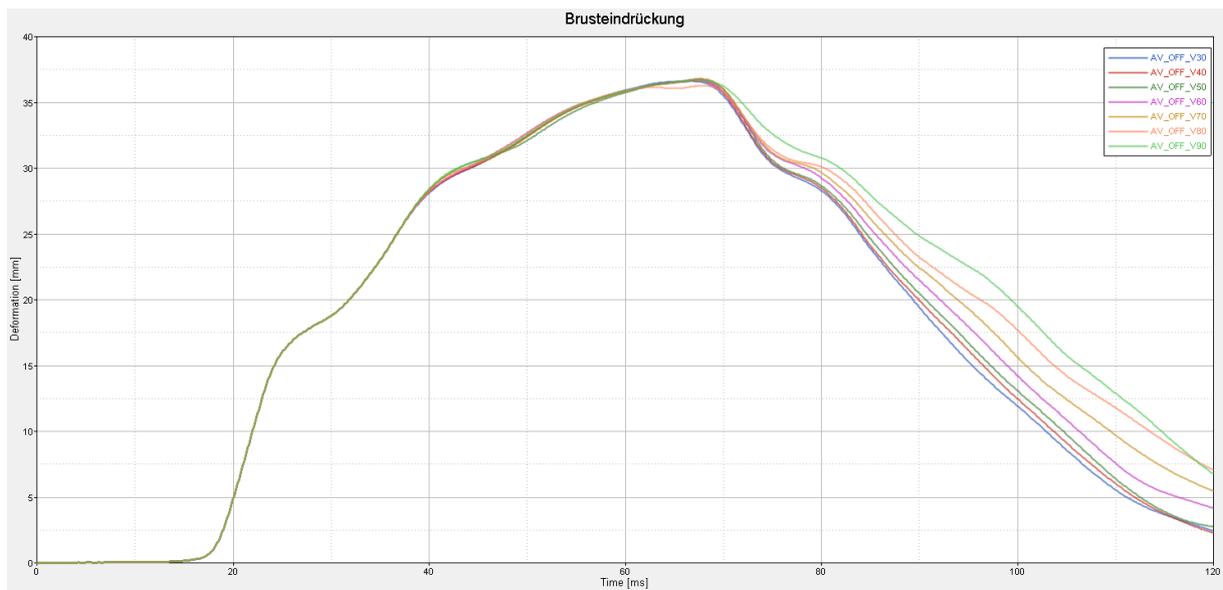
Variation des Ventdurchmessers bei geschlossenem aktiven Vent für den Bereich von 30-90mm und einer Schrittweite von 10mm

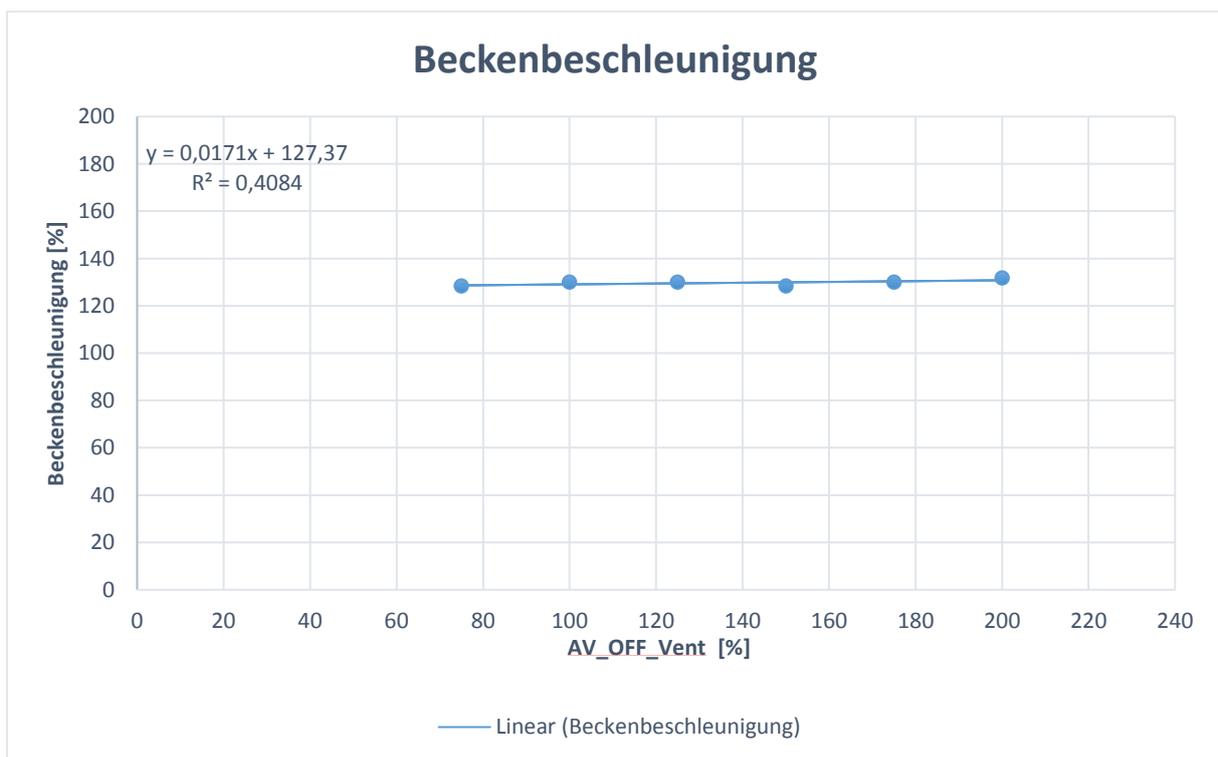
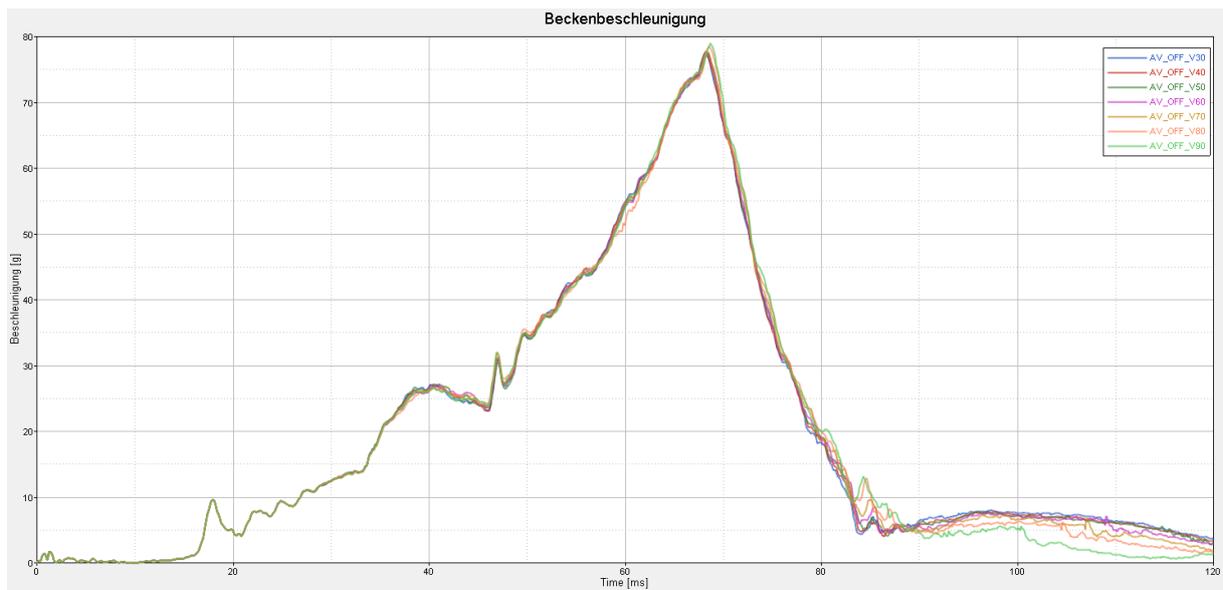


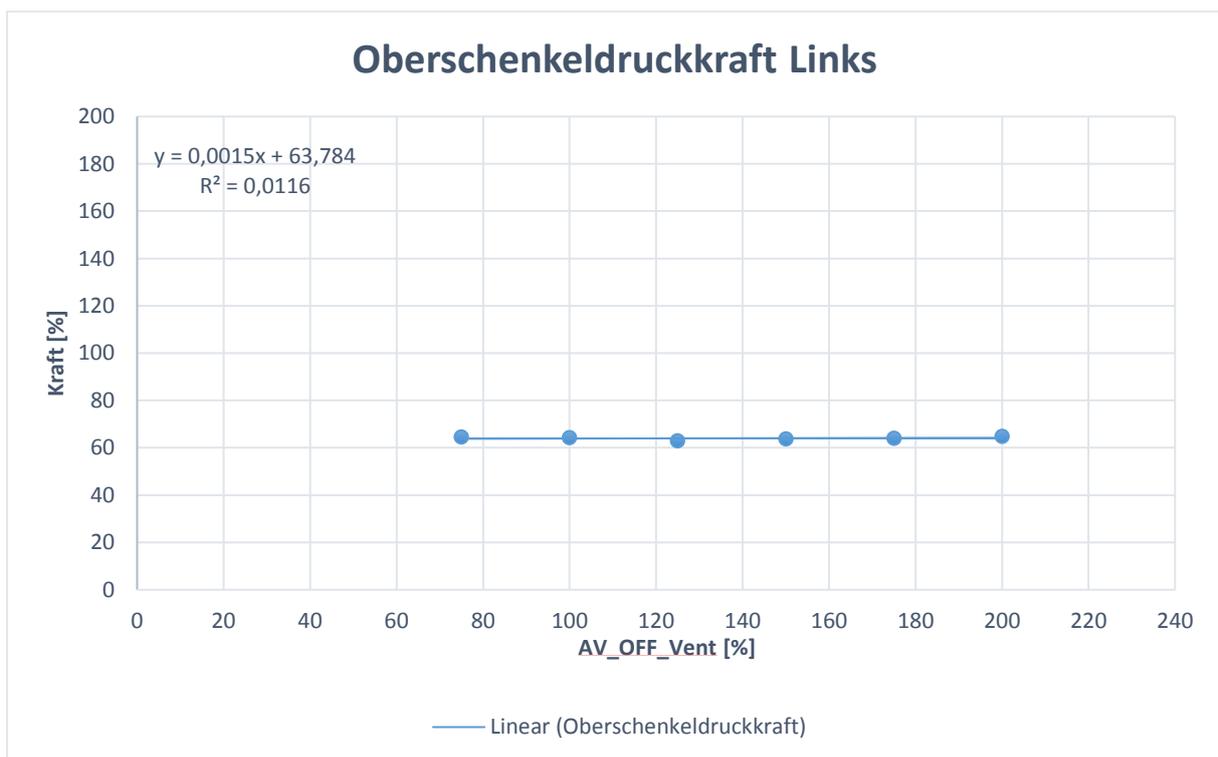
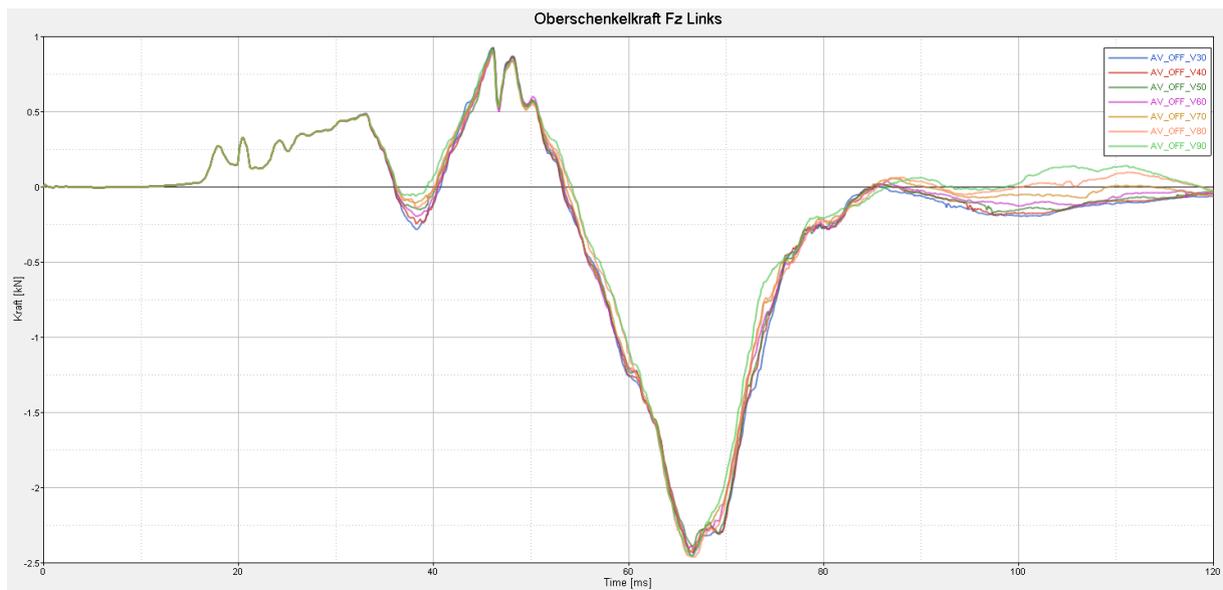


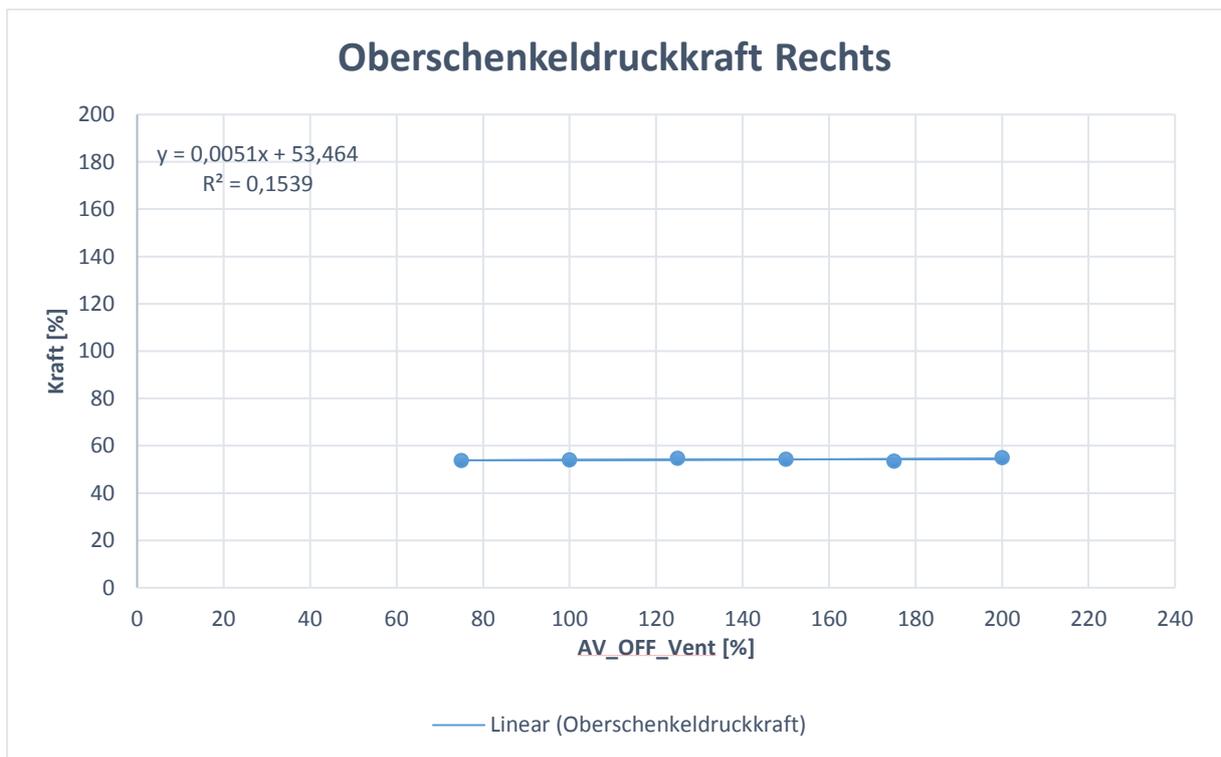
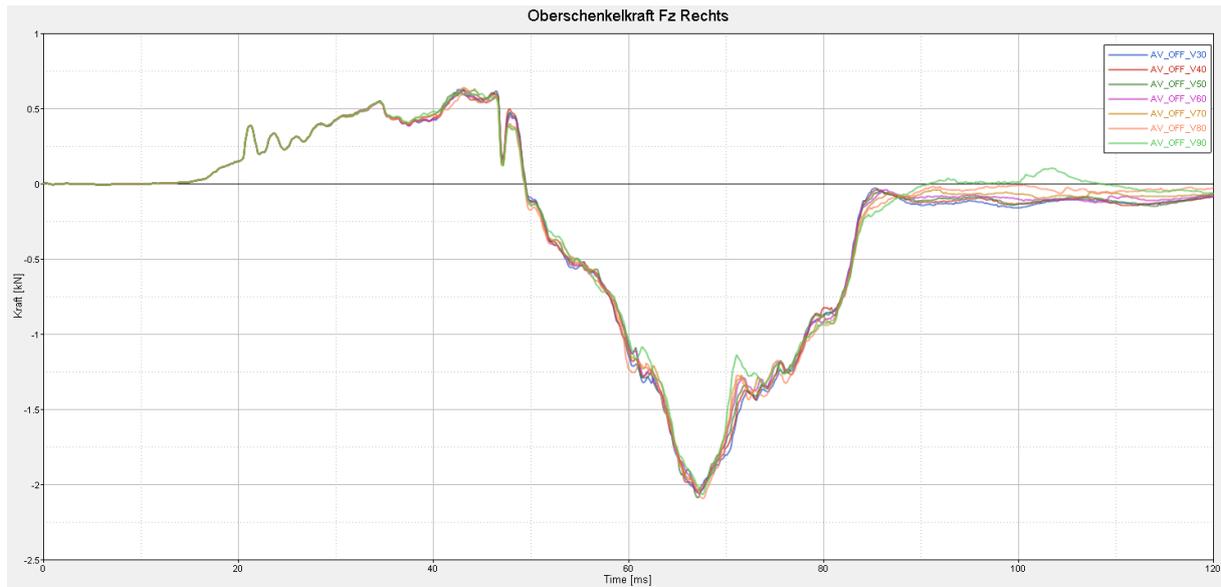






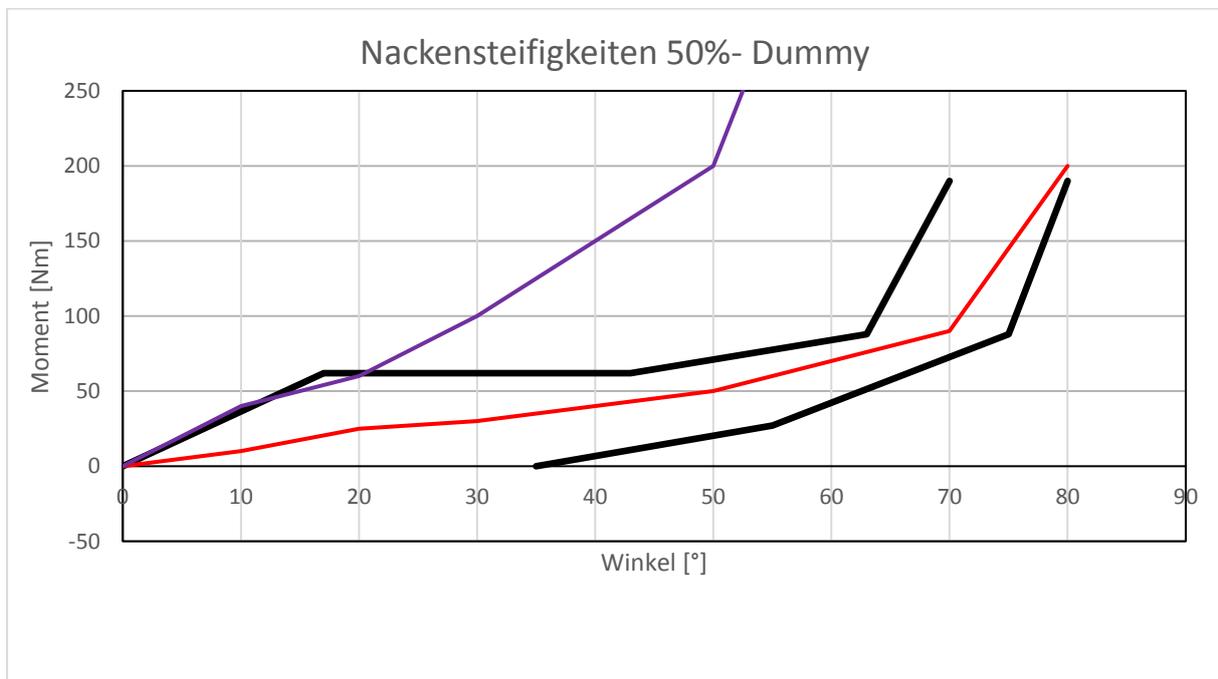
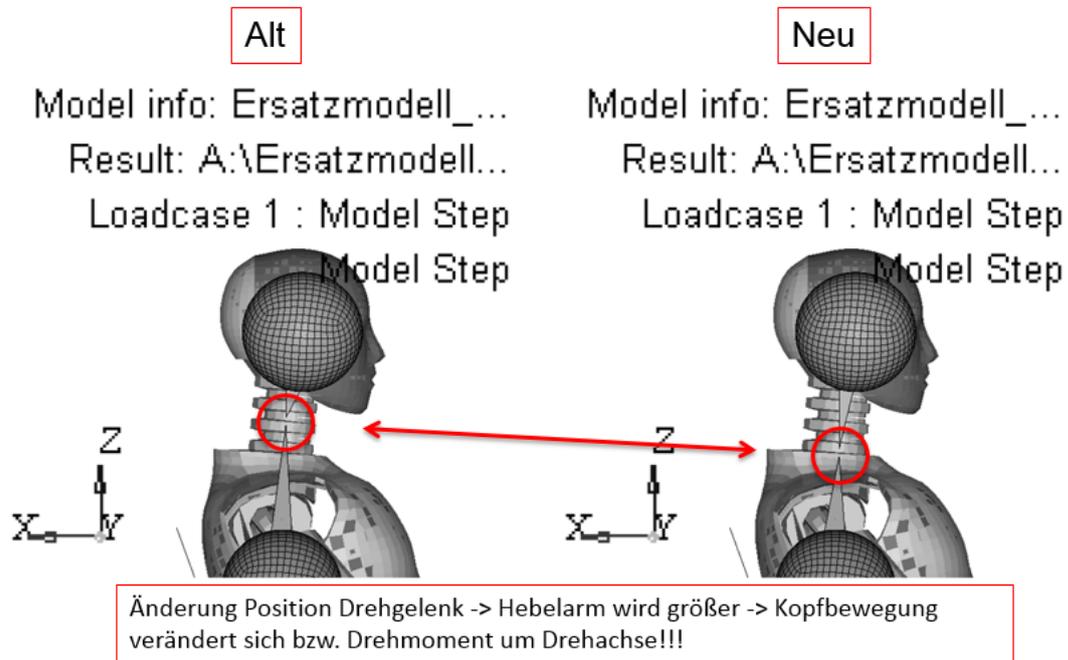




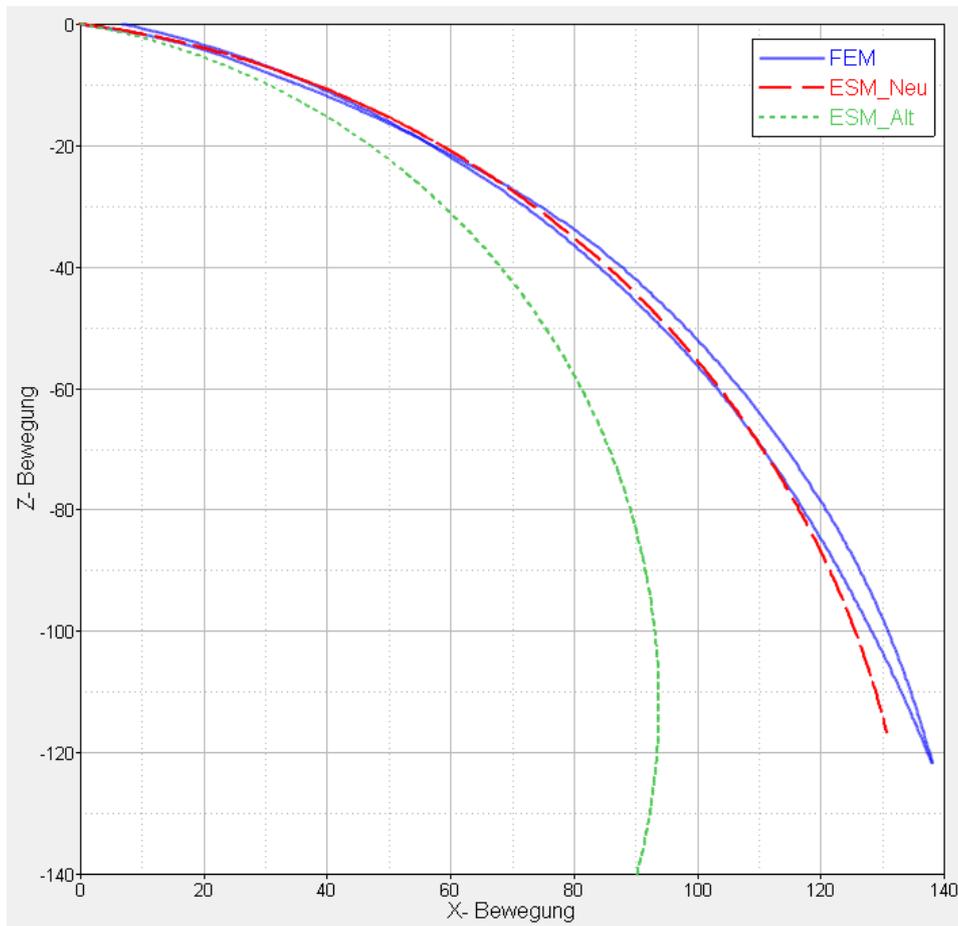


Nackenmodelloptimierung beim 50% Mann und 5% Frau Ersatzmodell

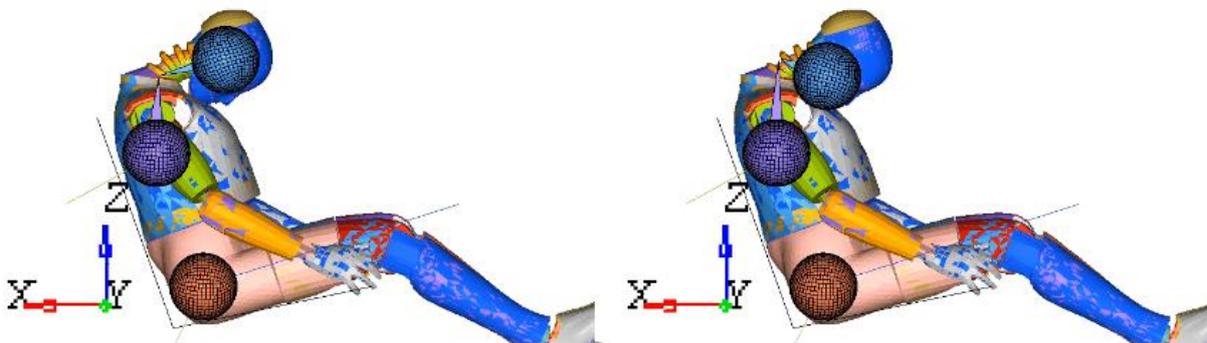
Anpassen der Drehgelenkposition im 50% Mann Ersatzmodell



Vergleich der Kopftrajektorien zwischen FE Modell und alten bzw. neuen Ersatzmodell

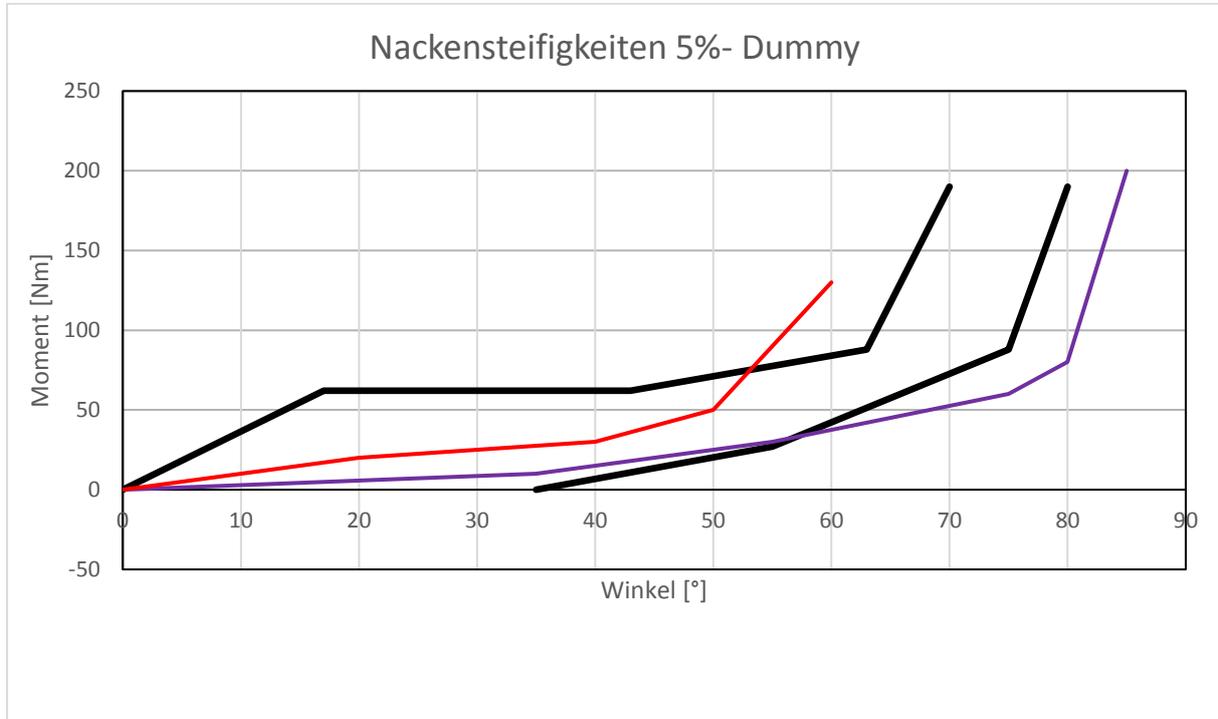


Überlagerung der Modelle bei optimiertem Nackenmodell (links) und altem (rechts) bei $t_0+100\text{ms}$



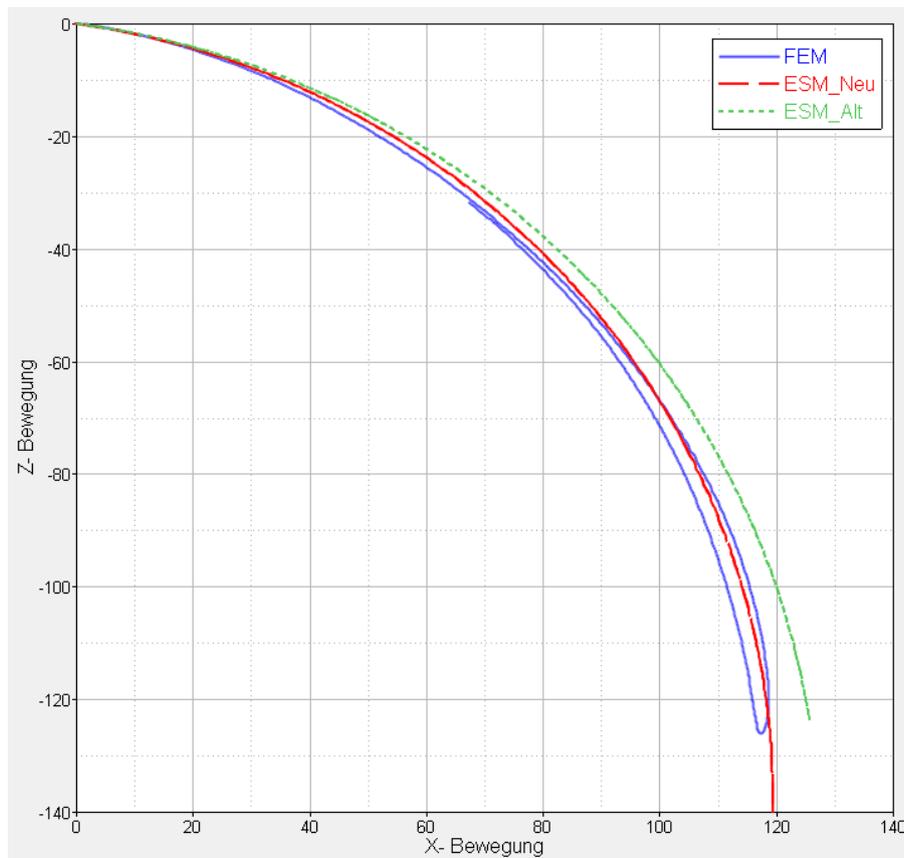
Anpassen der Nackensteifigkeit des 5% Frau Ersatzmodells

Darstellung der Nackenoptimierung mit Hilfe der gegebenen Korridore für das alte (rot) und neue (violett) Nackenmodell



Analog zum 50% Mann Ersatzmodell wird auch für das 5% Frau Ersatzmodell die Momenten-Winkelkennlinie im Nackengelenk angepasst. Weiteres wird der Drehpunkt bzw. die Position des Drehgelenks in Z- Richtung angepasst und so der Hebelarm zwischen dem Kopfschwerpunkt und dem Drehgelenk vergrößert bzw. verkleinert. Mit diesen Anpassungen soll die Kinematik des Nackens als auch die Kopftrajektorie an das FE Modell angenähert werden.

Vergleich der Trajektorien zwischen dem FE Modell und dem optimierten bzw. alten Nackenmodell



Überlagerung der Modelle bei optimiertem Nackenmodell (links) und altem (rechts) bei $t_0+88\text{ms}$

