

BACHELOR THESIS
Elisabeth Heinze

Simulation von Kontaktflächen zwischen einer Beatmungsmaske und einem Gesicht

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informatik

Faculty of Engineering and Computer Science
Department Computer Science

Elisabeth Heinze

Simulation von Kontaktflächen zwischen einer Beatmungsmaske und einem Gesicht

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Informatik Technischer Systeme*
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Thomas Lehmann
Zweitgutachter: Prof. Dr. Thomas Netzel

Eingereicht am: 10. Februar 2023

Elisabeth Heinze

Thema der Arbeit

Simulation von Kontaktflächen zwischen einer Beatmungsmaske und einem Gesicht

Stichworte

Simulation, Masse-Feder-Dämpfer System, Kollision

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit mit dem Thema Kollision zwischen Beatmungsmaske und einem Gesicht beschäftigt sich mit Masse-Feder-Dämpfer Systeme, welche miteinander kollidieren. Dabei findet eine Kollisionsdetektion wie auch eine konsistente Kollisionskraft Bestimmung statt.

Elisabeth Heinze

Title of Thesis

Simulation of contact surfaces between a ventilation mask and a face

Keywords

Simulation, Mass-spring-damper system, collision

Abstract

This work on the subject of collision between a ventilation mask and a face deals with mass-spring-damper systems that collide with each other. A collision detection as well as a consistent determination of the collision force takes place

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
1 Beatmungsmasken	1
1.1 Anforderungen	1
1.1.1 Dichtigkeit	1
1.1.2 Beatmungsqualität	2
1.1.3 Haltbarkeit	2
1.1.4 Ästhetische Aspekte	2
1.2 Individuelle Beatmungsmasken	3
1.3 Konfektion Beatmungsmasken	3
1.4 Maske Gesicht Simulation	4
2 Modell	5
2.1 Masse-Feder-Dämpfer System	5
2.1.1 Masse	6
2.1.2 Feder	6
2.1.3 Dämpfer	7
2.2 Tetraeder Netze	7
2.3 Gesicht als Masse-Feder-Dämpfer System	8
2.3.1 Knochen	8
2.4 Beatmungsmaske als Masse-Feder-Dämpfer System	9
2.4.1 Festes Endstück	9
3 Simulation	10
3.1 Iterationsschritt	10
3.2 Integrationsverfahren	11
3.2.1 Explizite Euler Integration	11
3.2.2 Fehlerakkumulation bei Expliziter Euler Integration	11
3.2.3 Vor und Nachteile bei Expliziter Euler Integration	12

3.3	Kollisionsdetektion	13
3.3.1	Näherungsweise Kollisionsdetektion mittels Heightmap	13
3.3.2	Kollisionsdetektion bei Selbstkollision	14
3.3.3	Exakte Kollisionspositionsbestimmung mittels Ray-Tracing	15
3.4	Kollisionsantwort	15
3.4.1	Kollisionskraft	15
3.4.2	Konsistente Kollisionskraft	17
4	Validierung und Verifikation	24
4.1	3-D Testmodelle	24
4.2	Verifikation	24
4.2.1	Kollisionsuntersuchung zwischen zwei starren Körpern	25
4.2.2	Kollisionsuntersuchung zwischen einem starren Körper und einem verformbaren Körper	25
4.2.3	Kollisionsuntersuchung zwischen zwei verformbaren Körpern	26
5	Durchführung zur Kollisionsuntersuchung einer Beatmungsmaske	30
5.1	Ergebnis	30
5.2	Verifizierung der Eignung des Modells zur Kollisionsuntersuchung einer Beatmungsmaske	31
6	Fazit	36
	Literaturverzeichnis	38
A	Anhang	40
	Selbstständigkeitserklärung	41

Abbildungsverzeichnis

3.1	Kollision mit zwei Massepunkten	16
3.2	Breitendurchlauf Masseobjekte	20
3.3	Kollisionsrichtung und Kollisionstiefe ein Durchlauf	21
3.4	Kollisionsrichtung und Kollisionstiefe zwei Durchläufe	22
4.1	Kollisionsuntersuchung zwischen zwei starren Körpern	26
4.2	Kollisionsuntersuchung zwischen einem starren Körper und einem verformbaren Körper nach 10 Iterationsschritten	27
4.3	Kollisionsuntersuchung zwischen einem starren Körper und einem verformbaren Körper nach 20 Iterationsschritten	28
4.4	Kollisionsuntersuchung zwischen zwei verformbaren Körpern	29
5.1	Gesichtshülle von der Seite	30
5.2	Gesichtshülle von Vorne	31
5.3	Beatmungsmaske von Vorne	32
5.4	Beatmungsmaske von der Seite	33
5.5	Kollisionsuntersuchung Gesicht und Beatmungsmaske Vorher	34
5.6	Kollisionsuntersuchung Gesicht und Beatmungsmaske Nachher	35

1 Beatmungsmasken

Beatmungsmasken sind ein wichtiges Hilfsmittel bei der Anästhesie, Intensivmedizin und Notfallmedizin, um Patienten zu beatmen oder bei der Atmung zu unterstützen. In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, was für Anforderungen eine Beatmungsmaske besitzen sollte.

Im Folgenden wird von Beatmungsmasken gesprochen, hierbei werden nicht invasive nasale Beatmungsmasken gemeint. Nicht invasive nasale Beatmungsmasken sind Beatmungsmasken, welche nur um die Nase herum aufgesetzt werden und somit nicht den Mund mit umrahmen.

1.1 Anforderungen

Über Beatmungsmasken werden Patienten Sauerstoff wie auch in der Anästhesie betäubende Gase zugeführt. Dabei muss sichergestellt werden, dass die korrekte Menge an Gas dem Patienten hinzugefügt wird. Im weiteren Verlauf wird darauf eingegangen, wie dies bewerkstelligt wird. In [10, 33] wird beschrieben, welche vier Anforderungen eine nasale Beatmungsmaske erfüllen muss.

1.1.1 Dichtheit

Die erste Anforderung ist, dass keine Undichtigkeiten auftreten dürfen, da sonst die Beatmungsqualität beeinträchtigt wird. Wenn die Beatmungsmaske nicht dicht auf dem Gesicht aufliegt, kann das Gas, welches dem Patienten zugeführt werden sollte, austreten. Somit kann nicht der korrekte Druck gewährleistet werden. Eine Beatmungsmaske liegt dicht auf dem Gesicht auf, wenn durch die Auflagefläche zwischen dem Gesicht und der Beatmungsmaske kein Gas austreten kann. Sollte der Zwischenraum nicht dicht sein, kann die dem Patienten zugefügte Gasmenge nicht korrekt eingestellt werden. Dabei haben sowohl zu viel als auch zu wenig Sauerstoff schwerwiegende Folgen für den Patienten.

Wenn die Menge an Sauerstoff zu gering ist, erfüllt die Beatmungsmaske nicht seinen Zweck und der Patient wird nicht mit genügend Sauerstoff versorgt. Im Gegensatz dazu wird bei zu viel Druck, Sauerstoff mit in den Magen gedrückt, das zur Folge Magenüberblähung hätte, welche zur Aspiration [8, 39] von Mageninhalten führen kann und somit auch zu Erstickung herbeiführen kann.

1.1.2 Beatmungsqualität

Eine Beatmungsmaske darf keine Druckstellen auf dem Gesicht des Patienten hinterlassen, auch nach kontinuierlichem Gebrauch über mehrere Tage. Hierbei muss trotz der Dichtheit der Maske sichergestellt werden, dass die Beatmungsmaske keine Druckstellen hinterlässt. Beatmungsmasken werden mithilfe von Bändern an dem Gesicht befestigt. Da diese Bänder festgemacht werden, wirkt auf die Beatmungsmaske eine Kraft, welche diese an das Gesicht drückt. Um möglichst keine Druckstellen zu bekommen, sollte somit eine Beatmungsmaske gewählt werden, welche möglichst wenig Kraft benötigt, damit diese dicht auf dem Gesicht aufliegt.

1.1.3 Haltbarkeit

Eine Beatmungsmaske sollte für längere Zeit haltbar sein. Eine Haltbarkeit von mindestens 6 Monaten sollte gewährleistet werden. [8]

1.1.4 Ästhetische Aspekte

Ästhetische Aspekte müssen berücksichtigt werden. Eine unansehnliche Beatmungsmaske verhindert die Akzeptanz und kann daher Ursache für ein Versagen der Behandlung sein. Ein Teil des Innenraumes einer Beatmungsmaske wird Totraum genannt. Die Atemwege eines Menschen besitzen ebenfalls einen Totraum, welcher 2 ml/kg des Körpergewichts [13, 117] entspricht und durch den Totraum der Beatmungsmaske vergrößert wird. Der Totraum nimmt nicht am Austausch von Sauerstoff und Kohlendioxid teil und sollte somit möglichst gering gehalten werden. Um diesen gering zu halten, sollte eine möglichst kleine Maske gewählt werden. Da es keine einheitliche menschliche Gesichtsform und Größen gibt, müssen Beatmungsmasken auch in verschiedenen Formen und Größen variieren. Somit benötigt ein Säugling eine wesentlich kleinere Beatmungsmaske als ein Erwachsener und selbst unter erwachsenen Menschen werden verschieden Maskenformen benötigt, um

eine möglichst gute Beatmung zu gewährleisten. Es empfiehlt sich somit individuelle Beatmungsmasken für Patienten zu benutzen. [10, 33]

1.2 Individuelle Beatmungsmasken

Wenn Konfektionsbeatmungsmasken Schwachstellen aufweisen, dann werden individuelle Beatmungsmasken angefertigt. Schwachstellen können aufkommen, wenn die Patienten bestimmte Krankheitsbilder aufweisen, Adipositas haben, Gesichtsanomalien aufweisen oder nach Operationen im Gesichtsbereich eine individuelle Beatmungsmaske benötigen. Individuelle Beatmungsmasken werden auch benötigt, wenn der Patient die Beatmungsmaske für längere Zeit trägt und diese komfortabler sein soll. Akut- und Dauermasken können innerhalb von einer halben Stunde hergestellt werden [10, 33]. Um die Beatmungsmasken an die individuelle Gesichtsform anpassen zu können, werden Abformungen aus medizinischen Silikon genommen oder das Gesicht wird mit einem Gesichtsscanner abgescannt, um einen digitalen Abdruck zu bekommen. Im Anschluss wird mithilfe eines 3-D-Druckers eine individuelle Beatmungsmaske hergestellt [1]. Durch diese Methodik kann schon beim Drucken der Beatmungsmaske sichergestellt werden, dass alle Anforderungen erfüllt werden, welche eine Beatmungsmaske erfüllen sollte.

1.3 Konfektion Beatmungsmasken

Konfektionsbeatmungsmasken besitzen im Gegensatz zu individuellen Beatmungsmasken eine Form, welche möglichst zu einem durchschnittlichen menschlichen Gesicht zugeschnitten sind. Im Gegensatz zu den individuellen Masken müssen diese nicht vor Ort hergestellt werden und sind sofort einsetzbar und somit ein sehr wichtiges Werkzeug für die Notfallmedizin. Außerdem können die Konfektionsbeatmungsmasken durch ihre allgemeine Form wiederverwendet werden. Da menschliche Gesichter sich sehr in Form und Größe unterscheiden, existieren auch viele verschiedene Versionen der Konfektionsbeatmungsmasken. Konfektionsbeatmungsmasken erfüllen nicht immer alle vier Anforderungen an Beatmungsmasken. Die Anforderung an die Haltbarkeit und an die Ästhetik können leicht bei der Produktion berücksichtigt werden, während die Anforderung an die Dichtigkeit und an die Beatmungsqualität nicht immer erfüllt werden. Hierbei kommt es auf die Form des Gesichtes und die Form der benutzten Beatmungsmaske an, ob die zwei Anforderungen erfüllt werden.

1.4 Maske Gesicht Simulation

Konfektionsbeatmungsmasken besitzen durch ihre allgemeinen Formen den Vorteil, dass diese einem Großteil an Menschen passen. Jedoch existieren verschiedenen Arten von Konfektionsbeatmungsmasken, welche in unterschiedliche Weise die Anforderungen, welche eine Beatmungsmaske erfüllen sollte, erfüllen. Hierbei besteht die Problematik darin, die Beatmungsmaske zu finden, welche mittels des geringsten Kraftaufwandes dicht auf dem Gesicht aufliegt. Um dies feststellen zu können, eignet sich eine Simulation, welche das Zusammendrücken von einem Gesicht und einer Maske simuliert. Nach dem Zusammendrücken kann festgestellt werden, ob die Beatmungsmaske dicht auf dem Gesicht aufliegt.

Das Gesicht und die Beatmungsmaske sind beide verformbare Körper, somit müssen in der Simulation die beiden Körper bei einer Kollision sich entsprechend verformen. Hierbei wird der Volumenerhalt der beiden Körper vernachlässigt. Bevor überprüft werden kann, ob die Beatmungsmaske dicht auf dem Gesicht aufliegt, müssen zuerst die beiden Körper aneinandergedrückt werden. Danach wird die Gesamtkraft, welche auf das Gesicht wirkt, bestimmt wie auch weitere relevante Kräfte. Die Kräfte werden genutzt, um die Simulation zu validieren und dran die Funktionstüchtigkeit der Beatmungsmaske ermitteln zu können. Bei der Kollision stellt sich die Problematik, dass beide der Körper verformbar sind. Somit wird eine Simulation benötigt, welche es ermöglicht, zwei verformbare Körper kollidieren zu lassen. Eine weitere Problematik stellt sich dabei, dass die verformbaren Eigenschaften des jeweiligen Körpers eingehalten werden müssen. So darf ein Gesicht in der Simulation nicht so weit verformt werden, dass ein Knochen verformt wird. Eine weitere Problematik stellt sich darin, dass beide Körper kollidieren und somit eine geeignete Kollisionserfassung gefunden werden muss, welche einen geringen zeitlichen Aufwand hat, aber möglichst exakt funktioniert.

2 Modell

Das Gesicht und die Beatmungsmaske sind beide verformbare Körper, welche miteinander kollidieren sollen. Um diese Kollision realisieren zu können, müssen dies simuliert werden. Bei der Simulation von Gewebe wurde schon vermehrt die Masse-Feder-Dämpfer Simulation verwendet. Hierbei gibt es mehrere Simulationen, welche die Operation an Organen simulieren soll, welche teils oder ganz mit dem Masse-Feder-Dämpfer Simulation simuliert worden. In den Texten [11], [7] und [9] werden für die Simulation von weichem Gewebe Masse-Feder-Dämpfer Systeme verwendet. Dies wird getan, da die Masse-Feder-Dämpfer Simulation realistische und schnelle Simulationen ermöglicht.

2.1 Masse-Feder-Dämpfer System

Masse-Feder-Dämpfer Systeme (MFS) sind ein weit verbreitetes Verfahren, um Simulationen von flexiblen Körpern zu realisieren. Insbesondere in der Computergrafik werden MFS oft verwendet. MFS sind weit verbreitet, da diese auf leicht verständlichen physikalischen Konzepten basieren, leicht implementierbar sind, der Rechenaufwand relative gering ist und das Konzept direkt auf verschiedene Probleme anwendbar ist [11, 24].

Das Verfahren basiert auf dem Hookeschen Gesetz, welches die wirkende Kraft auf einen Körper proportional zu der Verformung dieses Körpers beschreibt.

Hierbei sind Massenpunkte mit Federn miteinander verbunden. Parallel zu den Federn sind Dämpfer, welche das Aufschwingen des Systems verhindern sollen. Dadurch, dass nun die Massenpunkte mit den Federn verbunden sind, kann ein beliebiger, nicht starrer Körper erschaffen werden.

2.1.1 Masse

Ein Massepunkt ist ein Punkt, welcher sich im dreidimensionalen Raum befindet und einen Teil eines ganzen Objektes repräsentiert. Ein Objekt besteht aus mindesten einem Massepunkt [11, 25]. Ein Massepunkt besitzt mehrere Eigenschaften, welche diesen definiert, dabei besitzen die Massepunkte eine ID. Zu diesen Eigenschaften gehört auch das Gewicht des Massepunktes. Summiert man, die Gewichte der einzelnen Massepunkte wie in Formel 2.1 auf, kann das Gesamtgewicht eines Masseobjektes berechnet werden. N beschreibt die Anzahl an Massepunkte.

$$\sum_{i=1}^N m_i = m_{gesamt} \quad (2.1)$$

Oft ist bei vielen Körpern nur das Gesamtgewicht bekannt und nicht die Gewichte der einzelnen Massepunkte. Um das Gewicht eines Massepunktes ungefähr ausrechnen zu können, wird das Gesamtgewicht m_{gesamt} durch die Anzahl der Massepunkte gerechnet. Eine weitere Eigenschaft ist die Position im Koordinatensystem, an dem sich der Massepunkt befindet. Ein MFS zeichnet sich besonders dadurch aus, das die Körper verformbar sind und um diese Verformbarkeit erschaffen zu können, besitzt der Massepunkt eine Kraft F , welche auf diesen wirkt, wie auch Geschwindigkeit v , mit welche die neue Position nach einem Zeitintervall δt bestimmt werden kann. Die Kraft, welche auf einen Massepunkt wirkt, besteht aus der Summe der Kräfte der einzelnen Federn S , externen Kräften und der Gravitationskraft. Im Folgenden wird die Gravitationskraft als 0 angenommen.

$$F_i = F^g + F_i^{coll} + \sum_{(i,j) \in S} F_s^{i,j} + F_d^{i,j} \quad (2.2)$$

2.1.2 Feder

Federn verbinden zwei Massepunkte. Dabei befindet sich jeweils ein Massepunkt an jedem Ende der Feder. Die Entfernung zwischen dem Massepunkten beschreibt die momentane Länge der Feder. Die Länge einer Feder, welche die Feder bei der Initialisierung der Simulation hat, ist die initiale Federlänge. Die initiale Federlänge wird für die Berechnung der

Längenänderung Δl der Feder benötigt, mit welcher die Federkraft berechnet wird, welche momentan auf die Feder wirkt. Die Federkonstante k_s wird mit der Längenänderung multipliziert.

$$\vec{F}_s = k_s \cdot \Delta l \quad (2.3)$$

Die Federkraft F_s , welche Anteile in alle Koordinatenrichtungen hat, wird mithilfe des Richtungsvektors der Feder bestimmt. Die Massepunkte m_i und m_j haben die Positionen x_i und x_j welche für die Berechnung der momentanen Länge und somit auch der Längenänderung benötigt werden. Der Richtungsvektor wird mit der Federkraft multipliziert, um die einzelnen Federkräfte in den Koordinatenrichtungen zu bestimmen. Die negative Federkraft entspricht der Federkraft der entgegengesetzten Richtung. [15, 8]

$$r_{ij}^{\vec{}} = \frac{\vec{x}_j - \vec{x}_i}{\|\vec{x}_j - \vec{x}_i\|} \quad (2.4)$$

$$\vec{F}_s^{ij} = k_s r_{ij}^{\vec{}} (\|\vec{x}_j - \vec{x}_i\| - l_0) \quad (2.5)$$

$$\vec{F}_s^{ji} = -\vec{F}_s^{ij} \quad (2.6)$$

2.1.3 Dämpfer

Der Dämpfer liegt parallel zu einer Feder und kann somit als Teil der Feder betrachtet werden. Dämpfer werden in einer FMS benötigt, um aufschwingen von Federn zu verhindern. Wie auch bei der Berechnung der Federkraft wird eine Dämpfungskonstante k_d benötigt. [15, 8]

$$\vec{F}_d^{ij} = k_d ((\vec{v}_j - \vec{v}_i) \cdot r_{ij}^{\vec{}}) r_{ij}^{\vec{}} \quad (2.7)$$

$$\vec{F}_d^{ji} = -\vec{F}_d^{ij} \quad (2.8)$$

2.2 Tetraeder Netze

Ein Körper besteht aus mehreren Massepunkten, welche mithilfe von Federn miteinander verbunden sind. Durch die Verbindungen der einzelnen Massepunkte entsteht ein

Gitternetz. Gitternetze existieren in vielen Varianten. Eine dieser Varianten ist das Tetraedernetz. Hierbei sind die Massepunkte so miteinander verbunden, dass der Körper ein Verbund von mehreren Tetraedern ist. Durch diesen Verbund aus Dreiecksstrukturen wird ein stabiler Körper erschaffen. Dies ist bei einem Quadernetz nicht gegeben.

2.3 Gesicht als Masse-Feder-Dämpfer System

Das Gesicht liegt als OBJ-Datei vor, welche von [5] entnommen wurde. Die Gesichtsdatei ist ein männliches Gesicht, welches von vorne gezeigt wird. Der hintere Teil des Kopfes ist nicht vorhanden. Das Gesicht selbst besteht aus Dreiecken. Außerdem ist die Gesichtsdatei hohl. Dadurch dass diese Datei hohl ist, muss erst ein Tetraeder Netz in das Gesicht eingefügt werden. Die Gesichtsdatei besitzt 119989 Massepunkte. Da iterativ für jeden dieser Massepunkte alle Berechnungen durchgeführt werden müssen, wird die Laufzeit des Programms zu hoch, weshalb die Anzahl der Massepunkte reduziert werden muss. Um diese Anzahl zu reduzieren, wurde Blender [3] benutzt. Mit dem Decimate Modifier in Blender wurde die Anzahl an Massepunkten auf das 0.003 fache reduziert. Da die Datei immer noch nur eine Hülle ist, muss diese gefüllt werden. Hierfür wird ein quadratisches Tetraedernetz in der Größe des Gesichtes hergestellt. Daraufhin werden alle Elemente entfernt, welche an der x oder z-Achse herausgehen, wie auch alle Elemente entfernt, die in der y-Achse durch die Hülle des Gesichtes durchgehen. Die an der x oder z-Achse herausgehenden Elemente werden mit einer Höhenkarte herausgefiltert. Dabei werden die Elemente herausgefiltert bei dem auf der Höhenkarte kein Höheneintrag ist. Die restlichen verbleibenden Massepunkte werden mit der Gesichtshülle verbunden. Dafür muss für jedes Dreieck auf der Gesichtshülle ein Massepunkt gefunden werden, welcher am nächsten zu dem Dreieck liegt. Diese Dreiecke und Massepunkt werden mittels eines Tetraeders miteinander verbunden. Dasselbe Verfahren wird für alle Dreiecke, die zum vorderen Teil des Gesichtsnetzes gehört, wiederholt. Hierbei werden aber Massepunkte auf der Hülle gesucht, mit denen das Dreieck verbunden wird.

2.3.1 Knochen

Ein Gesicht besteht aus mehreren Bestandteilen, hierbei ist das weiche Gewebe die obere Schicht. Unter dem Gewebe befindet sich der Schädelknochen. Im Gegensatz zudem

Gewebe ist diese starr und lässt sich nicht eindrücken. Dementsprechend muss das Masseobjekt des Gesichtes angepasst werden. Hierfür werden die Massepunkte, welche unter einem Schwellenwert unter der Höhenkarte liegen, starr gemacht. Dieser Schwellenwert ist die Gewebedicke. Im Gesicht ist das Gewebe je nach Position verschieden dick. Die Gewebedicke ist individuell für jeden Menschen. Im Folgenden wird als Gewebedicke 1 cm angenommen. Dieser Wert ist ein ungefähres Mittelmaß der Gewebedicken, welche um die Nase herumliegen. Der Wert hierfür stammt aus [12]. Hier wurde für ein ähnliches Gesicht die jeweiligen echten Gewebedicken mit den Messwerten von einem Computertomografen verglichen.

2.4 Beatmungsmaske als Masse-Feder-Dämpfer System

Wie auch bei der Gesichtsdatei ist das Dreiecksnetz von der Maske hohl und hinten offen. Im Gegensatz zu der Gesichtsdatei sind in der Maskendatei Löcher enthalten. Diese Löcher wurden mit dem Mesh FillInteractiveHole Tool von Freecad gefüllt. Freecad ist ein Open-Source 3-D parametrischer Modellierer. Das Dreiecksnetz von der Maske wurde gefüllt wie das Dreiecksnetz von dem Gesicht.[4]

2.4.1 Festes Endstück

Der hintere Teil einer Beatmungsmaske ist ein festes Endstück, an welchen Schlauche angeschlossen werden können. Um dies zu simulieren, können die hinteren Federn eine höhere Federkonstante bekommen als die anderen Federn. Dies sorgt dafür, dass der hintere Teil sich weniger bewegen kann. Oder das Netz kann sich weiter nach hinten ausstrecken. Da die hinteren Massen keine Kollisionen haben wird es zu keiner Verformung kommen.

3 Simulation

MFS ist ein iteratives Simulationsverfahren. Hierbei wird ein Δt definiert, welche den Zeitabstand zwischen zwei Iterationsschritten darstellt. In einem Iterationsschritt wird der Zustand des System nach dem Vergehen von Δt bestimmt. Dies wird iterative wiederholt bis ein gewünschter Zustand erreicht wurde oder die Anzahl an Iterationsschritten ein festgelegtes Limit überschritten hat. Der Zeitabstand Δt definiert somit die Genauigkeit der Simulation. Wählt man den Zeitabstand kleiner, dann wird die Simulation genauer. Jedoch werden dann auch mehr Iterationsschritte benötigt, was einen größeren Zeitaufwand darstellt.

3.1 Iterationsschritt

In einem Integrationsschritt werden die Positionen der einzelnen Massepunkte geupdated. Damit in jeden Iterationsschritt alle Massepunkte mit denselben Daten arbeitet, werden die Positionen temporär gespeichert und erst nachdem alle Berechnungen in einen Iterationsschritt durchgeführt wurden, werden die Positionen überschrieben. Die Positionen der Massepunkte werden mithilfe eines Integrationsverfahrens bestimmt. Die neue Position des Massepunktes hängt dabei von der momentanen Kraft ab, welche auf den Massepunkt wirkt. Auf den Massepunkt wirken sowohl die Kräfte der Feder und Dämpfer als auch die Kräfte der Kollision. Die Kollisionskräfte müssen wie auch bei den Federkräften und Dämpferkräften iterative bestimmt werden. Hierfür wird in jedem Iterationsschritt festgestellt, welche Kollisionen stattgefunden haben und aus den Kollisionen werden Kollisionskräfte bestimmt. Diese iterative Verfahren werden wiederholt, bis das System nach einem Iterationsschritt keine großen Veränderungen mehr aufweist oder ein Threshold überschritten wird, welche durch eine maximale Iterationsanzahl definiert ist. Da ein Zeitschritt relative zeitaufwendig ist wird in dieser Simulation nur auf den Threshold überprüft.

3.2 Integrationsverfahren

Mithilfe der Integrationsverfahren wird pro Iterationsschritt die Position der Massepunkte neu bestimmt. Dabei werden diese Positionen ungefähr bestimmt, so dass es je nach Integrationsverfahren ein bestimmter hoher Fehler zu der Position dazu akkumuliert wird. Dieser Fehler hat Einfluss auf die Positionen der Massepunkte und sollte somit möglichst klein gehalten werden.

3.2.1 Explizite Euler Integration

Das explizite Euler Verfahren ist ein einfaches Verfahren zur numerischen Lösung eines Anfangswertproblems. Hierbei wird die neue Geschwindigkeit bestimmt indem die alte Geschwindigkeit mit der Geschwindigkeitsveränderung addiert wird. Die Position wird analog genauso berechnet. Die Kraft welche für die Berechnung der Geschwindigkeit benutzt wird, ist die Kraft, welche auf den Massepunkt wirkt. [15, 9]

$$v_i(\delta t + t) = v_i(t) + \Delta t \cdot \frac{f_i}{m_i} \quad (3.1)$$

$$x_i(\delta t + t) = x_i(t) + \Delta t \cdot v_i \quad (3.2)$$

Die Simplität der Lösung sorgt für ein einfaches umsetzen der Formeln und schnelle Iterationsschritte. Jedoch wird das Verfahren bei zu hohen Schrittgrößen schnell ungenau. Bei zu hoch gewählten Δt wird zusätzliche, nicht existierende Energie erzeugt. Diese Energie kann dazu führen, dass es zum Overshooting bei den Federn kommt. [15, 10]

3.2.2 Fehlerakkumulation bei Expliziter Euler Integration

Bei der expliziten Euler Integration werden die Positionswerte x zu den wirklichen Werten nur angenähert berechnet. Dadurch entsteht ein Fehler, welcher das MFS zum Aufschwingen bringen kann.

$$x(t) = x_0 e^{-kt} \quad (3.3)$$

$$x^{t+1} = x^t + \Delta t(-kx^t) \quad (3.4)$$

$$\text{Falls } \Delta t > \frac{1}{k} : x^{t+1}(1 - k\Delta t) \quad \text{und} \quad (1 - k\Delta t) < 0 \quad (3.5)$$

$$\text{Falls } \Delta t > \frac{2}{k} : x^t \rightarrow \infty \quad (3.6)$$

Die exakte Lösung der Differenzialgleichung ist in Formel 3.3 aufgelistet. Die Lösung der Differenzialgleichung mittels expliziter Euler Integration ist in Formel 3.4 zu sehen. Der Fehler, welcher bei der expliziten Euler Integration entsteht, kann durch die Wahl von Δt verändert werden. Wählt man ein Δt größer als der Kehrwert von k dann wird x^t oszillieren um 0 herum. Wenn man Glück hat, dann wird der Wert irgendwann gegen 0 gehen. Wenn man ein Δt wählt, was größer ist als der doppelte Kehrwert von k dann wird x^t gegen unendlich streben. Dies zeigt sich in der Simulation durch das vermeidliche wahllose komplette Wegspringen von Massepunkten an eine andere Position, welche in der Richtung liegt, in der die Beschleunigung liegt. Um dieses Verhalten zu vermeiden, sollten Δt und alle k 's dementsprechend gewählt werden. [15, 10]

3.2.3 Vor und Nachteile bei Expliziter Euler Integration

Die explizite Euler Integration ist durch ihre geringe Komplexität leicht zu implementieren. Außerdem hat diese eine schnelle Ausführung pro Zeitschritt. Ein Nachteil ist, dass nur für sehr kleine Schrittweiten im typischen Bereich von $\Delta t \approx 10^{-4}$ bis 10^{-3} stabil sind. Wenn höhere Δt gewählt werden, dann müssen auch die Federkonstanten dementsprechend niedriger gewählt werden. Wählt man größere Schrittweiten, dann wird zusätzliche Energie im System erzeugt, welche dazu führt, dass die Masseobjekte explodieren. Auch wenn ein passendes Δt gewählt wird, sammelt sich ein Fehler an.

Trotz dieser Schwachstellen ist das Verfahren für diese Problematik gut geeignet. Da auch bei der Kollisionsantwort ein kleiner Iterationsschritt vorteilhaft ist und somit für die Simulation diese dementsprechend gewählt wird. Außerdem ist der Vorteil durch die schnelle Berechnung je Iteration vorteilhaft, da die meisten Masseobjekte viele Massepunkte haben und somit jede Zeiteinsparung die Simulation beschleunigt. [15, 10]

3.3 Kollisionsdetektion

Bei der Neupositionierung von einem Massepunkt kann es vorkommen, dass die Massepunkte in den Körper eines anderen Masseobjektes eindringen oder dass der Massepunkt mit seinem eigenen Körper kollidiert. Um dem entgegenzuwirken, gibt es Kollisionskräfte, welche im nächsten Iterationsschritt die Massepunkte aus dem eingedrungenen Körper wieder herausdrücken sollen, beziehungsweise den Massepunkt bei der Selbstkollision wieder in eine Position bewegen soll, bei der keine Selbstkollision stattfindet. In dieser Simulation wird nicht auf Selbstkollisionen überprüft, da dies denn Zeitaufwand erhöht obwohl die Wahrscheinlichkeit einer Selbstkollision sehr gering ist wenn alle Parameter richtig gewählt werden. Außerdem werden nur Kollisionen von Massepunkten mit Körpern betrachtet und nicht zum Beispiel Kollisionen von Federn mit anderen Federn.

3.3.1 Näherungsweise Kollisionsdetektion mittels Heightmap

Sowohl die Beatmungsmaske als auch das Gesicht sind Körper, welche beide in Kollisionsrichtung als Höhenkarte dargestellt werden können. Nur die Nasenflügel sind Bereiche, an denen keine eindeutige Höhenkarte erstellt werden kann. Da jedoch an diesem Bereich bei Aufsetzen einer Beatmungsmaske keine Kollision stattfinden sollte, wird die Genauigkeit in dem Bereich in der Höhenkarte vernachlässigt. Um eine Höhenkarte zu erstellen, werden Hüllenmassepunkte genommen und die Werte werden in eine Höhenkarte übertragen. Die restlichen Werte aus der Höhenkarte werden mittels Ray-Tracing erstellt. Hierfür wird für die jeweilige Höhenkartenposition ein Strahl von dem einen Ende der y-Achse ausgestrahlt. Der Strahl wird entweder von der Position bei $y = 0$ ausgestrahlt oder wenn das Massenobjekt in die andere Richtung zeigt, dann ist der y-Wert, der maximale Wert, den eine Y-Koordinate annehmen kann. Der Strahl prallt daraufhin auf einen Punkt, auf dem der Hüllendreieck ab. Der Ray-Tracing Algorithmus gibt einem die Entfernung an, an welcher der Strahl ein Dreieck trifft. Da der Strahl an dem jeweiligen Ende der y-Achse losgeschickt wird, kann der Rückgabewert des Ray-Tracing Algorithmus als Höhenwert eingetragen werden.

Mit den generierten Höhenkarten wird überprüft, ob ein Massepunkt in das andere Objekt eindringt. Dabei wird überprüft, ob in der Y-Koordinate kleiner beziehungsweise größer ist als der jeweilige Wert in der Höhenkarte. Dabei ist relevant, von welcher Seite die Höhenkarte betrachtet wird. Dieses Verfahren ermöglicht ein möglichst zeitsparendes

Verfahren zur Kollisionsfindung. Das Erstellen der Höhenkarte selbst ist im 3-dimensionalen Raum relative zeitaufwendig, weshalb ein Bereich spezifische Höhenkarte genutzt wird. Hierbei wird nur für den Bereich eine Höhenkarte erstellt, indem eine Kollision möglich ist. Somit muss nur für die Bereiche, indem sich Massepunkte vor anderem Objekt befinden, eine Höhenkarte erstellt werden. Jedoch weist das überprüfen nach den dafür benötigten Grenzwerten ein zu höher Zeitaufwand auf, weshalb für das gesamte Massenobjekt eine Höhenkarte erstellt wird.

3.3.2 Kollisionsdetektion bei Selbstkollision

Es gibt zwei Arten der Selbstkollisionen. Bei den zwei Arten wird dabei unterschieden, ob der betrachtete Massepunkt ein Massepunkt ist, welcher zu der Hülle des eigenen Körpers gehört oder nicht. Im Fall, das er nicht dazu gehört, findet die Kollision mit sich selbst dann statt, wenn der Massepunkt außerhalb des geometrischen Körpers ist, welcher um ihn herum durch Federn und Massepunkte gebildet wird. Dieser geometrische Körper wird durch die Massepunkte beschrieben, welche jeweils über die Federn mit den gerade betrachteten Massepunkte verbunden sind. Diese verbundenen Massepunkte sind selbst über Federn miteinander verbunden und bilden somit einen Körper. Diesen Körper darf das betrachtete Massepunkte nicht verlassen, ansonsten gibt es eine selbst Kollision. Im Fall, das der Massepunkt zu der Hülle gehört, gehört der Massepunkt selbst mit zum Körper den er nicht verlassen darf. In diesem Fall müssen auch Kollisionen mit anderen Teilen des Massenobjektes überprüft werden.

Die Selbstkollision kann vernachlässigt werden, um die Laufzeitdauer zu verkürzen, jedoch könnte es bei zu großen Positionssprüngen dazu kommen, dass das Objekt in sich selbst zusammenfällt, da bei Kollisionen mit andern Objekten das betrachtete Objekt sich zusammendrückt und somit es auch zusammenfallen kann. Das Zusammenfallen in sich selbst wird theoretisch dadurch verhindert, dass der Körper sich als Teraedernetz aufgebaut ist jedoch kann es vorkommen das, wenn die Federkraft der Federn kleiner ist, als die zurückfedernde Kraft der Kollisionen, dass dann eine Selbstkollision geschieht. Dem kann man entgegengesetzten, in dem die jeweilige Federkonstante bei Kollisionen anpasst wird.

3.3.3 Exakte Kollisionspositionsbestimmung mittels Ray-Tracing

Die Kollisionspositionen sind mittels der Höhenkarte nur angenähert bestimmt. Um diese exakt zu bestimmen, wird Ray-Tracing benutzt. Hierbei wird bestimmt, in welcher Entfernung ein Strahl mit einem Dreieck kollidiert. Hierbei ist in der Simulation relevant, dass der Punkt bestimmt wird, bei dem eine Feder ein Masseobjekt schneidet, mit dem dieses kollidiert. Dafür wird die Feder als Strahl angesehen. Da das kollidierende Dreieck noch nicht bekannt ist, wird auf Kollision überprüft bei allen Dreiecken, welche in der Nähe sind von der Feder. Das verwendete Ray-Tracing Verfahren ist der Möller-Trumbore Algorithmus. Der Algorithmus ist nach den Erfindern Tomas Möller und Ben Trumbore benannt. Der Algorithmus zeichnet sich durch seine Schnelligkeit aus. Bei diesem Algorithmus wird zuerst das Produkt aus der Normalen des Dreiecks und der Richtung des Strahls berechnet. Wenn diese Null ist, dann sind der Strahl und das Dreieck parallel und somit ist eine Kollision nicht möglich. Anschließend wird mithilfe der Cramerschen Regel die Entfernung zu dem Dreieck bestimmt.

3.4 Kollisionsantwort

Während eines Iterationsschrittes können bis zu der Anzahl an Massepunkte, welche ein Körper enthält, an Kollisionen geschehen. Für jeder der Kollisionen wird eine Kollisionskraft bestimmt. Diese Kollisionskraft wird zu den andern Kräften, welche auf ein Massepunkt wirken, dazu addiert. Durch das Addieren wirkt eine weitere Kraft auf den Massepunkt, welche im nächsten Iterationsschritt den Massepunkt aus dem andern Masseobjekt wieder heraus drückt.

3.4.1 Kollisionskraft

Die Kollisionskraft sorgt dafür, dass der Massepunkt wieder aus dem eingedrungenen Körper wieder austritt und somit keine Kollision mehr besteht. Dabei wirkt die Kollisionskraft in die Richtung, in welcher der Massepunkt wieder herausgeschoben werden soll. Der einfache Ansatz ist, dass die Richtung genommen wird, bei welche der Massepunkt die kleinste Strecke überwinden muss, um wieder aus dem eingedrungenen Körper auszutreten. Bei diesem Ansatz kann es zu dem Szenario kommen, dass zwei Massepunkte aus Körper A mit Körper B kollidieren. Beide Massepunkte befinden sich jeweils an einer

anderen Kante von Körper B und haben als kürzesten Richtung jeweils entgegengesetzte Richtungen. Da jedoch beide Massepunkte zu Körper A gehören, wird diese dazu führen, dass die Kollisionsrichtungen der beiden Massepunkte den Körper A in zwei Richtungen ziehen und somit je nachdem welche Kraft von den Massepunkten stärker ist, der Massepunkt mit der kleineren entgegenwirkenden Kraft nur tiefer in den Körper B eintritt oder beider sich gegenseitig auspendeln. Das führt dazu, dass die Kollision nicht korrekt behoben werden kann. Um dies zu korrigieren, wird eine konstante Kollisionsrichtung benötigt, welche die zwei Massepunkte in eine angepasste Richtung bewegt. [15]

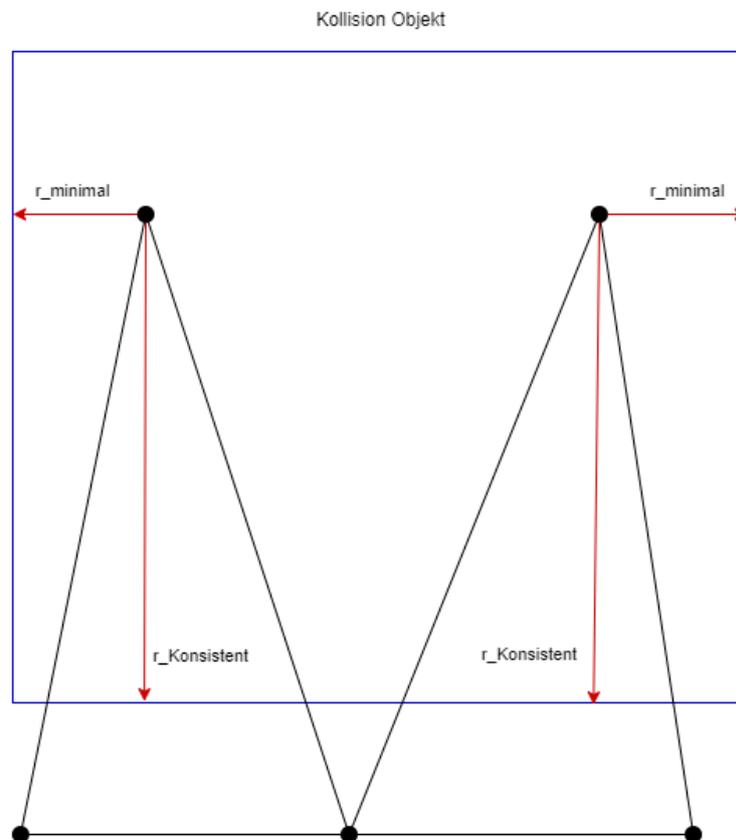


Abbildung 3.1: Kollision mit zwei Massepunkten

In der Grafik 3.1 ist das Problem noch mal veranschaulicht. Dabei ist zu erkennen, dass die zwei kollidierenden Massepunkte, sich, wenn sie sich den kürzesten Weg nach draußen suchen, ihr zugehöriges Masseobjekt, auseinander drücken würden. Bei der konsistenten Kollisionskraft bekommen diese einheitliche Kollisionskräfte. Dabei ist zu vermerken, dass hierbei unter den Massepunkten des Masseobjektes noch weitere Massepunkte sind, welche mit den Massepunkten auf dem Bild verbunden sind und diese nicht eingezeich-

net sind, damit die Grafik übersichtlich bleibt. Wenn man jedoch davon ausgeht, dass die fünf Massepunkte das gesamte Masseobjekt repräsentieren, dann wäre das Verhalten, welches geschieht, wenn der kürzeste Weg nach draußen gewählt wird, nicht falsch, da nach mehreren Iterationsschritten das Masseobjekt sich ohnehin das Masseobject auseinander drücken würde. Jedoch würde auch mit der konsistenten Kollisionskraft in dem Szenario dasselbe Ergebnis erzielt werden. Die Stärke der Kollisionskraft hängt davon ab, wie tief der Massepunkt eingedrungen ist. Somit ist die Eindringtiefe notwendig, um diese Kollisionskraft zu regulieren. Die Eindringtiefe ist der Abstand zwischen dem eingedrungenen Massepunkt und dem Austrittspunkt. Der Austrittspunkt ist der Punkt, an dem der Massepunkt den eingedrungenen Körper verlässt, wenn der Massepunkt in Richtung der Kollisionskraft bewegt wird.

Für die endgültige Berechnung der Kollisionskraft wird das Prinzip des Hookeschen Gesetzes genutzt. Dabei wird die Eindringtiefe $d(\text{Masse})$ als Längenveränderung betrachtet. Eine Feder versucht sich entgegen der Längenveränderung zurückzubewegen und somit seine initiale Länge und seine Ruhelage anzunehmen. Bei der Kollision geschieht dasselbe Prinzip, hierbei wird die Kollisionskraft $r(\text{Masse})$ und deren Tiefe $d(\text{Masse})$ als Feder betrachtet, welche sich wieder zusammen stauchen will, um in seine Ruhelage zu gelangen. [2]

$$v_{\text{relative}} = v_{\text{Kollisionskoerper}} - v_{\text{masse}} \quad (3.7)$$

$$F_{\text{Kollision}} = -k_{\text{Kollision}} \cdot d(\text{Masse}) - c_{\text{Kollision}} \cdot (r(\text{Masse}) \cdot v_{\text{relative}}) \quad (3.8)$$

Die relative Geschwindigkeit beider Objekte zueinander fließt in die Kollisionskraft mit ein. Hierbei wird für die Geschwindigkeit des kollidierenden Körpers $v_{\text{Kollisionskoerper}}$ die Geschwindigkeit alle Massepunkte des Körpers aufaddiert und durch die Anzahl an Massepunkte im Körper geteilt. Diese Geschwindigkeit wird mit der Richtung der Kollisionskraft berechnet, damit diese Geschwindigkeit in Richtung der Kollisionskraft zeigt.

3.4.2 Konsistente Kollisionskraft

Für die Berechnung der Kollisionskraft wird eine Richtung $r(\text{Masse})$ und eine Eindringtiefe $d(\text{Masse})$ benötigt. Da in einem Iterationsschritt mit hoher Wahrscheinlichkeit mehrere

Massepunkte gleichzeitig kollidieren werden, ist eine konsistente Kollisionskraft notwendig. Diese konsistente Kollisionskraft kann mithilfe von mehreren Methoden bewerkstelligt werden. Eine der Möglichkeiten ist, Kollisionen als einzelne zu betrachten. Hierbei wird festgestellt, wann in dem Iterationsschritt die erste Kollision stattgefunden hat. Mithilfe des Zeitpunktes, an dem der Massepunkt in den anderen Körper eingedrungen ist, wird für den Massepunkt der Impuls berechnet, welcher benötigt wird, um die Kollision zu beheben. Dies wird ausführlicher in Continuous Penalty Forces [14] beschrieben. Ein anderer Ansatz ist der, dass für alle kollidierenden Massepunkte, welche in einem Iterationsschritt kollidieren, die Kollisionskräfte voneinander abhängig sind und somit den Körper, zu dem diese gehören, in eine einheitliche Richtung schieben.

Das Simulationsverfahren MFS ist iterative, indem ein Zeitintervall Δt jeden Iterationsschritt stattfindet. So kleiner das Δt gewählt wird, desto weniger Kollisionen finden in einem Iterationsschritt statt, jedoch werden mehr Iterationsschritte benötigt. Bei konsistenten Kollisionskraftverfahren, bei denen die erste Kollision gefunden werden muss, eignet sich ein Δt , bei dem möglichst wenige Kollisionen stattfinden. Das Δt kann hierbei über dem Simulationsverlauf sich dynamisch verändern, damit das Kriterium von möglichst wenig Kollision erfüllt wird. Dieses Verfahren erhöht den Zeitaufwand, da sich in jeden Zeitschritt neu ertastet werden muss, wie groß diese sein kann. Wenn keine Annahmen über die Größe des Intervalls vorher getroffen werden kann, eignet sich ein Verfahren, bei dem in einem Iterationsschritt beliebig viele Kollisionen stattfinden können und der Iterationsschritt gleich groß bleiben kann und trotzdem keine inkonsistenten Kollisionskräfte entstehen.

Einheitliche Iterationsschritte

Um konsistente Kollisionskräfte bestimmen zu können, werden die normierte Kollisionsrichtung und die Kollisionstiefe benötigt. Im ersten Schritt werden diese zwei Werte für die Massepunkte bestimmt, welche direkt an der Kante des Masseobjektes liegen, mit dem kollidiert, wird. Diese Massepunkte sind über mindestens eine Feder mit einem Massepunkt verbunden, der nicht kollidiert ist. Für jeden dieser verbindenden Federn wird der Schnittpunkt mit dem Masseobjekt bestimmt, mit dem kollidiert wird. Dieser Schnittpunkt wird mithilfe des Möller-Trumbore Algorithmus bestimmt. Nachdem der Schnittpunkt bestimmt wurde, wird die Normale für diesen Schnittpunkt bestimmt. Bei dem Möller-Trumbore Algorithmus wird der Kollisionspunkt zwischen einem Strahl und einem Dreieck bestimmt. Das Dreieck, welche mit der Feder kollidiert, kann gefunden

werden, indem alle Dreiecke, welche im selben Bereich sind wie die Feder mithilfe des Möller-Trumbore Algorithmus, auf die eine Kollision untersucht werden. Für das Dreieck, bei dem eine Kollision stattgefunden hat, wird die Normale berechnet. Um die Eindringtiefe bestimmen zu können, wird eine gewichtete Summe genutzt, bei der die Eindringtiefe approximiert berechnet wird. Ein Massepunkt kann mit mehreren Federn verbunden sein, welche sich mit dem kollidierenden Masseobjekt schneiden. x_i ist der Schnittpunkt mit dem Masseobjekt für eine verbundene Feder i und n_i ist die normale des Schnittpunktes. Der Punkt im Koordinatensystem an dem sich der Massepunkt befindet, heißt p .

$$d(masse) = \frac{\sum_{i=1}^k \omega(x_i, p)(x_i - p) \cdot n_i}{\sum_{i=1}^k \omega(x_i, p)} \quad (3.9)$$

$$\omega(x_i, p) = \frac{1}{\|x_i - p\|} \quad (3.10)$$

Die Richtung der Kollisionskraft wird ebenfalls approximiert berechnet. Diese Eindringtiefe und die Richtung werden im jeweiligen Massepunkt gespeichert, damit diese im weiteren verwendet werden kann. Nachdem die Richtung und Tiefe, für die Massepunkte berechnet wurde, welche Federn haben, die sich mit dem Objekt schneiden, wird die Richtung und Tiefe für die anderen kollidierenden Massepunkte bestimmt.

$$r(mass) = \frac{\sum_{i=1}^k \omega(x_i, p)n_i}{\sum_{i=1}^k \omega(x_i, p)} \quad (3.11)$$

$$d(\text{mass}) = \frac{\sum_{i=1}^k \omega(p_i, p) ((p_i - p) \cdot r(p_i) + d(p_i))}{\sum_{i=1}^k \omega(x_i, p)} \quad (3.12)$$

$$r(\text{mass}) = \frac{\sum_{i=1}^k \omega(p_i, p) r(p_i)}{\sum_{i=1}^k \omega(p_i, p)} \quad (3.13)$$

Um die Richtung und die Eindringtiefe konsistent zu wählen, hängen diese von den Richtungen und Eindringtiefen der mit den verbundenen Massepunkten ab. Um die Richtung und Eindringtiefe zu berechnen, wird ein Breitendurchlauf durch die Liste an nicht besuchten kollidierenden Massepunkten gemacht. Bei den Massepunkten bei denen es noch keine Berechnung der Richtung und Tiefe gab wird die Eindringtiefe und Richtung mithilfe der Eindringtiefe und Richtung der bereits besuchten Massepunkten berechnet. Hierbei ist p_i ein bereits besuchter Massepunkt. Durch die Abhängigkeit der Richtung und Eindringtiefe der bereits berechneten Massepunkte hängt die Richtung und Eindringtiefe von den hinteren Massepunkten von den Richtungen und Eindringtiefen der davor liegenden Massepunkte ab. Die Richtung und Eindringtiefe können anschließend für die Berechnung der Kollisionskraft benutzt werden. Bei dem Breitendurchlauf gibt es zwei mögliche

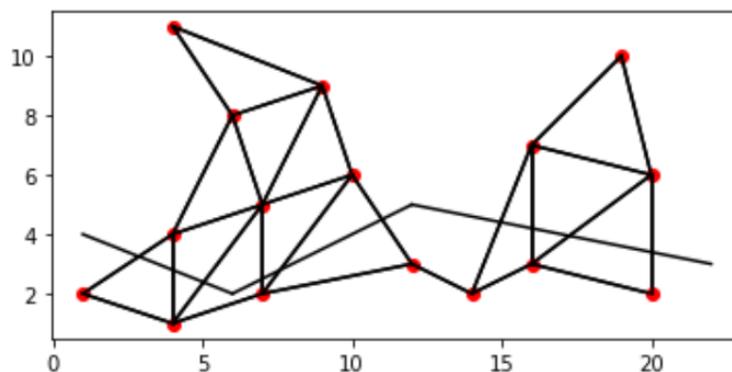


Abbildung 3.2: Breitendurchlauf Masseobjekte

Ablaufe. Wenn die eingedrungenen Massepunkte in mehrere Bereiche unterteilt sind, wie in Grafik 3.2 zu sehen ist, dann kann zwischen den zwei Abläufen Unterschieden werden. Der erste Ablauf ist, dass man beim Breitendurchlauf am Anfang in die Liste der schon

besuchten Punkte alle Punkte hinzugefügt werden, welche eine Feder haben, welche sich mit der Kante des anderen Masseobjektes schneidet. Dadurch würde in dem Breiten-durchlauf alle Elemente durchlaufen werden. Der zweite Ablauf ist, dass man unterteilt zwischen den zwei Kollisionsgruppen und zwei Breiten-durchläufe durchgeführt werden. Dadurch würden die Kollisionsrichtung und Kollisionstiefe der Massepunkte, welche keine Feder haben, welche die Kante des andern Masseobjektes schneiden, nur abhängig von der Kollisionsrichtung und Kollisionstiefe der Massepunkte, mit denen sie direkt verbunden sind. Der erste Ablauf ist in Grafik 3.3 zu sehen. Hierbei sind die Grünen Punkte,

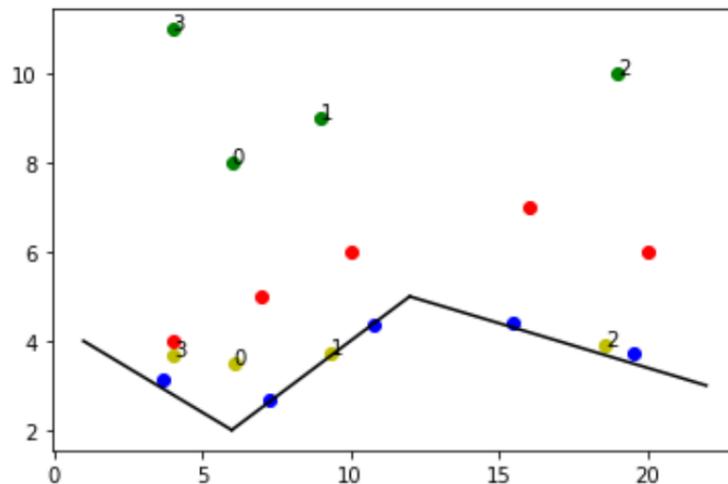


Abbildung 3.3: Kollisionsrichtung und Kollisionstiefe ein Durchlauf

die Massepunkte, die nicht mittels einer Feder das andere Masseobjekt schneidet. Die roten Punkte sind die Massepunkte, welche sich mittels einer Feder sich mit dem andern Masseobjekt schneiden. Die blauen Punkte sind die berechneten Austrittspunkte, welche mittels der Kollisionsrichtung und Kollisionstiefe für die Massepunkte berechnet wurden, welche Federn haben, die sich mit dem andern Masseobjekt schneiden. Die gelben Punkte sind die Austrittspunkte der Massepunkte, welche keine Federn haben, welche das andere Masseobjekt schneiden. Dabei verweist die Nummer auf den dazugehörigen Massepunkt. In der Grafik ist zu erkennen, dass die Austrittspunkte der Massenpunkt, welche Federn haben, die sich mit dem andern Masseobjekt schneiden, sehr gut positioniert sind. Das ist daraus zu erklären, dass bei der Berechnung der Kollisionsrichtung und Kollisionstiefe von diesen Massepunkten nur die Richtung und Entfernung zu den Schnittpunkten zwischen den Federn und dem andern Masseobjekt relevant sind. Dadurch kann, egal was für ein Breiten-durchlauf gewählt wurde, bei diesen Punkten ohnehin die exakte Position

bestimmt werden. Bei den Massepunkten, welche keine Federn haben, welche sich direkt mit dem andern Masseobjekt schneiden, liegen die Punkte nicht optimal. Die berechneten Austrittspunkte liegen in richtiger Richtung aber die Kollisionstiefe ist nicht komplett korrekt. Dies ist jedoch kein Problem, da diese ausreichend groß genug sind, damit die Kollisionskraft passend berechnet werden kann für den Iterationsschritt. In der Grafik

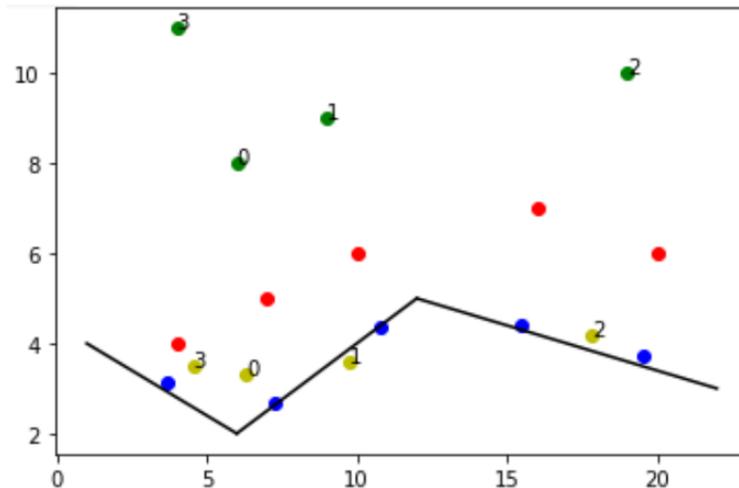


Abbildung 3.4: Kollisionsrichtung und Kollisionstiefe zwei Durchläufe

3.4, ist zu sehen, wie die Austrittspunkte aussehen, wenn der Breitendurchlauf zweimal durchgeführt. Das erste Mal bei den Massepunkten 0, 1 und 3. Und beim zweiten Durchlauf mit dem Massepunkt 2. Das Farbschema dieser Grafik ist analog zu der vorigen Grafik zu betrachten. Im Gegensatz zu der vorigen Grafik liegt der Austrittspunkt von Massepunkt 2 gerader nach unten und hat keinen Linksdrall. Das ist dadurch zu erklären, dass dieser Massepunkt 2 in diesem Durchlauf nur Abhängigkeiten, bei den darunterliegenden Massepunkten und deren Kollisionstiefe und Kollisionsrichtung hat. Es ist zu erkennen, dass die Punkte optimaler positioniert sind in diesem Beispiel. Jedoch bedeutet das mehrfache Durchlaufen des Breitendurchlaufes einen größeren Aufwand. Dieser extra Aufwand, welcher durch das Suchen der jeweiligen zusammengehörigen Kollisionsgruppen entsteht, ist nicht unerheblich in der Simulation. Bei einem MFS ist es optimal, wenn möglichst viele Zeitschritte mit kleinen Zeitintervallen durchgeführt werden. Jedoch ist jeder Iterationsschritt zeitintensiv, was zur Folge hat, dass diese nicht unendlich groß gewählt werden können. Somit ist trotz des besseren Ergebnisses in diesem Szenario der Ablauf Nr.1 empfehlenswerter, da dieser Ablauf ausreichend gut genug Ergebnisse liefert und der Zeitaufwand kleiner ist. Außerdem ist noch festzuhalten, dass Szenarien vorkommen können, in denen aufgrund der mehreren Breitendurchläufen Szenarien wie

in Grafik 3.1 passieren können. Nur das die Massen in der Grafik 3.1 Ansammlungen von Massenobjekten sind welche zusammenhängen. Dadurch schließt sich der mehrfache Breitendurchlauf komplett aus, da durch diese Probleme entstehen können, welche durch den Breitendurchlauf verhindert werden sollten.

4 Validierung und Verifikation

Die Simulation wird mittels simpler geometrischer Formen validiert und verifiziert. Hierfür werden drei Szenarien analysiert. Das erste Szenario ist, dass beider Körper starr sind und somit die Federn in den beiden Objekten eine hohe Federkonstante haben. Das zweite Szenario ist, dass einer der beiden Körper starr ist und somit eine hohe Federkonstante hat und der anderer Körper eine Federkonstante bekommt, welche niedriger ist. Das letzte Szenario ist, dass beide Objekte Federn haben, welche niedrigere Federkonstante haben.

4.1 3-D Testmodelle

Die simplen geometrischen Objekte, welche miteinander kollidieren sollen, werden mit Gmsh erstellt. Gmsh ist ein Open-Source-Programm, welches 3-D-Finite-Elemente-Netze generiert. Gmsh ist ein Programm, mit dem geometrische Formen erschaffen werden können oder es bereits existierende Dateien importiert werden können. Für die erschaffenen oder importierten Objekte können 1-D, 2-D oder 3-D Tetraeder Netze erschaffen werden. [6] Die Tetraeder Netze sind je nach Form stabiler und instabiler konstruiert. Hierbei ist zu vermerken, dass ein Quader ein weniger stabil aufgebautes Netz hat als eine Kugel. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Tetraeder, welche das Netz aufspannen, dichter aneinander liegen und somit ein komprimiertes Tetraeder Netze aufspannen.

4.2 Verifikation

Bei der Verifikation werden ein Masseobjekt an ein anderes Masseobjekt gedrückt. Die Mesh Dateien, welche mit Gmsh erschaffen wurden, werden eingelesen und zu Masseobjekten umgeformt. Das Dateiformat Mesh eignet sich hierfür besonders gut, da in diesem

die einzelnen Koordinaten, Punkte, die Verbindungen dazwischen, die Dreiecke und die Tetraeder einzeln aufgelistet.

4.2.1 Kollisionsuntersuchung zwischen zwei starren Körpern

Bei der Kollision von zwei starren Körpern muss für die zwei Masseobjekte passende Federkonstanten gewählt werden. Die Federkonstante muss möglichst hoch gewählt werden. Wenn die Federkonstante zu groß gewählt wird, dann explodiert die Simulation. Somit muss eine Federkonstante gewählt werden, welche kleiner als $\frac{1}{\Delta t}$ ist. Δt wurde als 0.2 Sekunden festgelegt. Somit darf die Federkonstante höchstens 5 N/m hoch sein. Für beide Masseobjekte wurde die Federkonstante 5 N/m festgelegt. Die Federkonstante der Kollisionskraftberechnung ist 1 N/m. Die Körper, die untersucht werden, sind ein Quader und eine Sphäre. Hierbei wird die Sphäre von der Erdbeschleunigung nach unten gezogen. Dabei ist die y-Achse die Achse, in der die Gravitationskraft wirkt. Die Sphäre ist 917 g schwer und der Quader ist 100 g schwer. In der Abbildung 4.1 ist die Kollision nach 10 Zeitschritten zu sehen. Es ist zu erkennen, dass beide Masseobjekte starr geblieben sind. Die roten Striche sind Federn, welche zu dem vorderen teils des Objektes gehören. Während die blauen die restlichen Federn sind. Die grünen Striche sind die Normalen der vorderen Dreiecke des jeweiligen Objektes. Jedoch schiebt sich trotzdem die Sphäre in den Quader ein, dies kann durch das Erhöhen der Federkonstante verhindert werden. Jedoch ist dies mit einem Zeitschritt von 0.2 Sekunden nicht möglich. Trotzdem ist zu erkennen, dass die Körper in Graph 4.1 weniger hineingeschoben werden als Körper mit einer kleineren Federkonstante. Dies ist auch im nächsten Abschnitt zu sehen.

4.2.2 Kollisionsuntersuchung zwischen einem starren Körper und einem verformbaren Körper

Bei der Kollision von einem starren Körper mit einem verformbaren könne die Federkonstante von 5 N/m beibehalten werden. Wie auch bei der Verifikation davor findet eine Kollision zwischen einem Quader und einer Sphäre statt. Die Sphäre ist hierbei der starre Körper. Der verformbare Körper ist der Quader, dieser bekommt eine Federkonstante von 0.2 N/m. Δt und die Kollisionskonstante bleiben gleich. In der Grafik 4.2 ist zu sehen, dass sich der Quader verformt hat, während die Sphäre gleich geblieben ist. Das Bild zeigt die Simulation nach 10 Iterationsschritten. Führt man dies fort, dann schiebt sich das

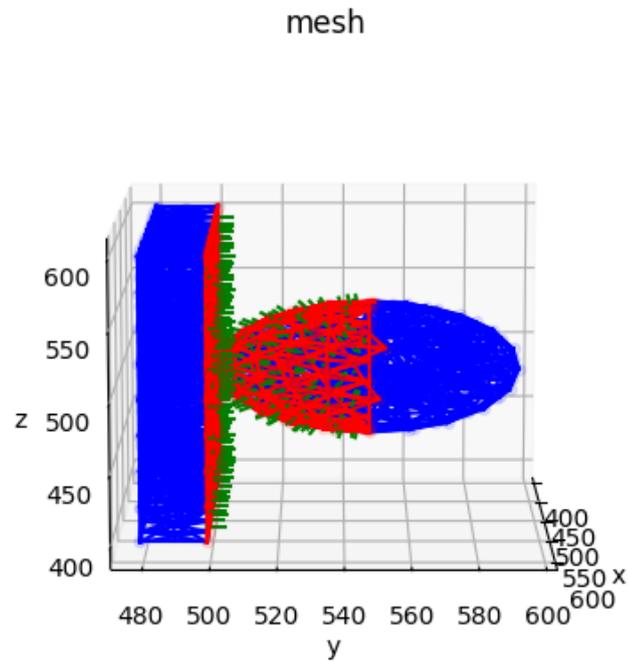


Abbildung 4.1: Kollisionsuntersuchung zwischen zwei starren Körpern

Objekt, wie in Grafik 4.3 zu sehen ist, weiter hinein. Dabei ist das der Iterationsschritt Nr. 20.

4.2.3 Kollisionsuntersuchung zwischen zwei verformbaren Körpern

Bei der Kollision von zwei verformbaren Körpern kann die Federkonstante von 0.2 N/m beibehalten werden. Wie auch bei der Verifikationen davor findet eine Kollision zwischen einem Quader und einer Sphäre statt. Δt und die Kollisionskonstante bleiben wieder gleich. In der Grafik 4.4 ist zu erkennen, dass beider Körper sich leicht verformen. Dabei verformt sich der Quader mehr, was daran liegt, dass die Masse der Sphäre größer ist und der Aufbau der Sphäre stabiler ist.

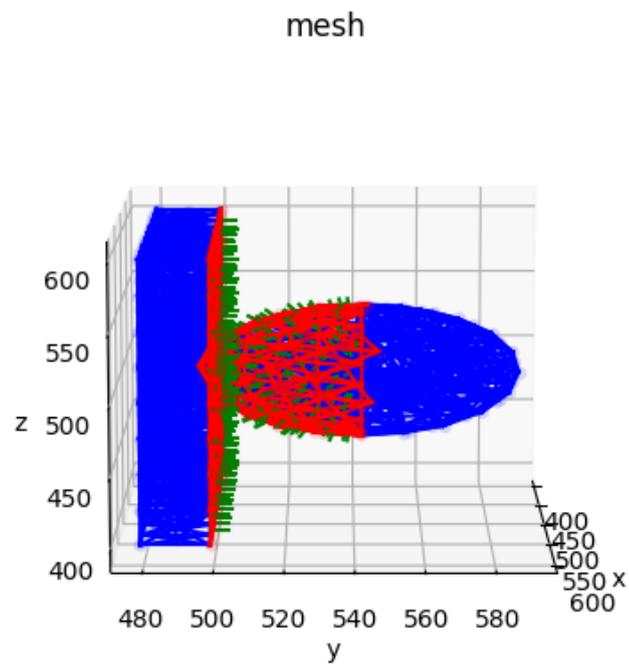


Abbildung 4.2: Kollisionsuntersuchung zwischen einem starren Körper und einem verformbaren Körper nach 10 Iterationsschritten

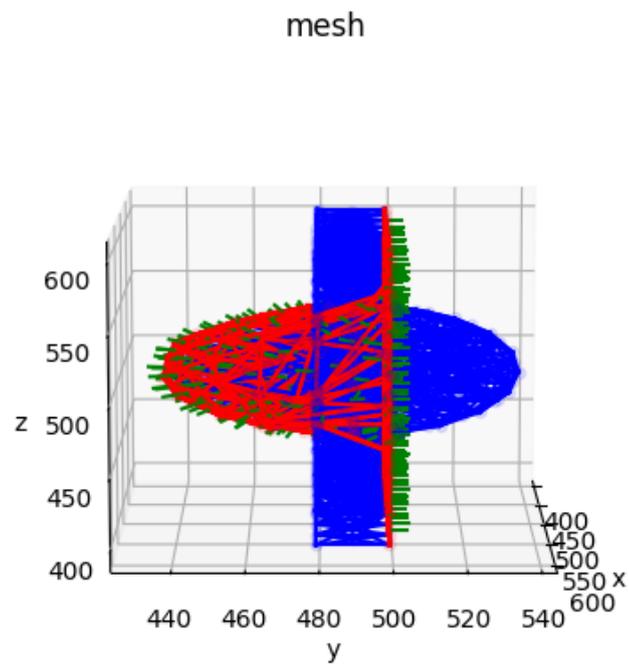


Abbildung 4.3: Kollisionsuntersuchung zwischen einem starren Körper und einem verformbaren Körper nach 20 Iterationsschritten

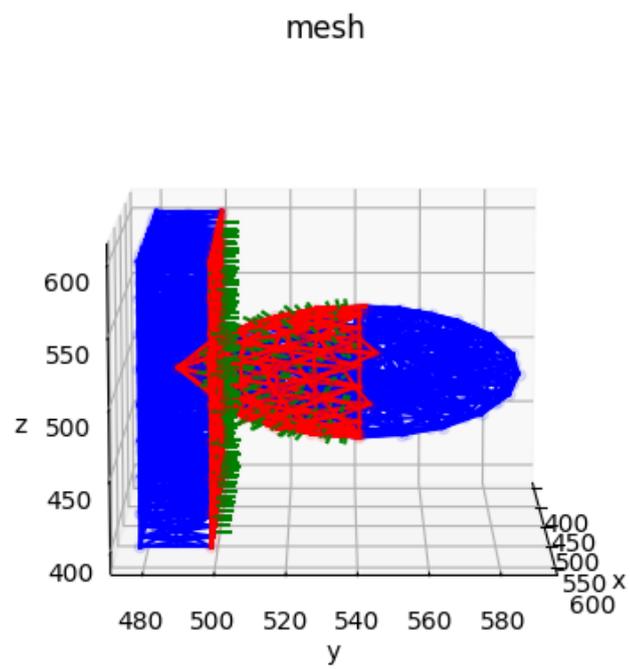


Abbildung 4.4: Kollisionsuntersuchung zwischen zwei verformbaren Körpern

5 Durchführung zur Kollisionsuntersuchung einer Beatmungsmaske

Die Kollision einer Beatmungsmaske und eines Gesichtes soll durchgeführt. Dabei ist das Gesicht an seinen hinteren Massenpunkten stationär befestigt und die Maske wird mit einer gewissen Kraft an das Gesicht gedrückt.

5.1 Ergebnis

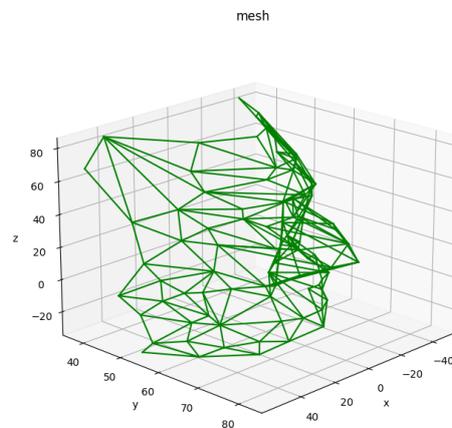


Abbildung 5.1: Gesichtshülle von der Seite

In den Grafiken 5.1 und 5.2 ist die Hülle des Gesichtes zu erkennen. Hierbei ist zu vermerken, dass die Federn alle unterschiedlich lang sind. Bei einem optimalen Masseobjekt sind

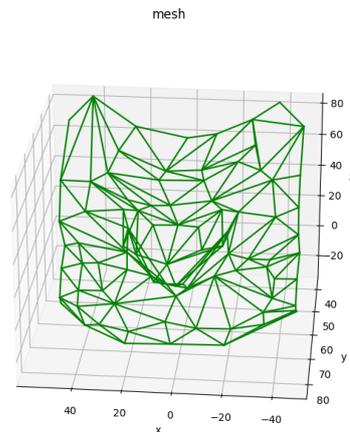


Abbildung 5.2: Gesichtshülle von Vorne

die Federn ungefähr gleich groß, jedoch geht dies in diesem Versuch nicht, da versucht wurde, das Gesicht mit möglichst wenig Massepunkten darzustellen. In den Grafiken 5.3 und 5.4 ist die Hülle der Beatmungsmaske zu erkennen. Wie auch bei dem Gesicht sind die Federn alle unterschiedlich groß. Genauso wie bei dem Gesicht liegt das dran, dass die originale Beatmungsmaskendatei zu viele Massepunkte hatte, sodass ein Iterationsschritt einen zu großen Zeitaufwand gehabt hätte.

5.2 Verifizierung der Eignung des Modells zur Kollisionsuntersuchung einer Beatmungsmaske

In der Grafik 5.5 sind das Gesicht und die Beatmungsmaske im Ganzen zu sehen. Dabei sind beide Objekte um 2 cm voneinander entfernt.

In der nächsten Grafik 5.6 wurde die Beatmungsmaske um 40 N in die negative y-Achse gedrückt. 40 N sind relativ hoch, jedoch bewegt sich die Beatmungsmaske bei einer geringeren Krafteinwirkung nicht ausreichend genug, sodass kein Ergebnis über die Simulation erzielt werden kann. Sowohl die Beatmungsmaske als auch das Gesicht haben im weichen Bereich eine Federkonstante von 0.8 N/m. Die Kollisionskonstante beträgt 1 N/m und

mesh

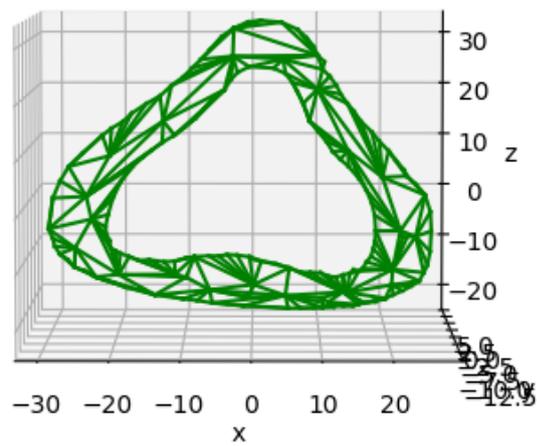


Abbildung 5.3: Beatmungsmaske von Vorne

die Schriftgröße ist 0,2 Sekunden groß. Es ist in denn Grafiken sehen, wie die Maske gegen das Gesicht gedrückt wird.

mesh

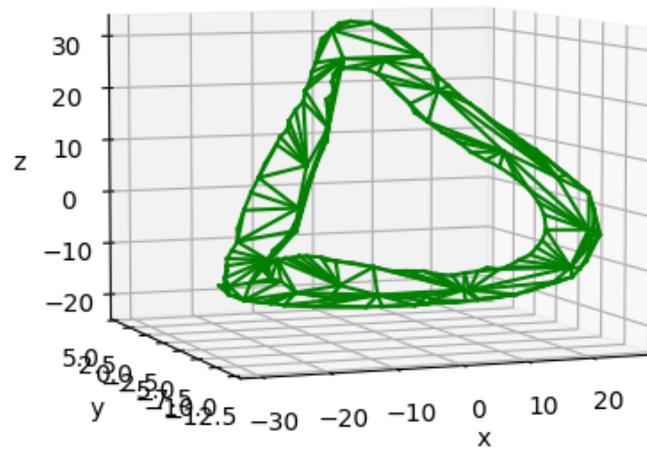


Abbildung 5.4: Beatmungsmaske von der Seite

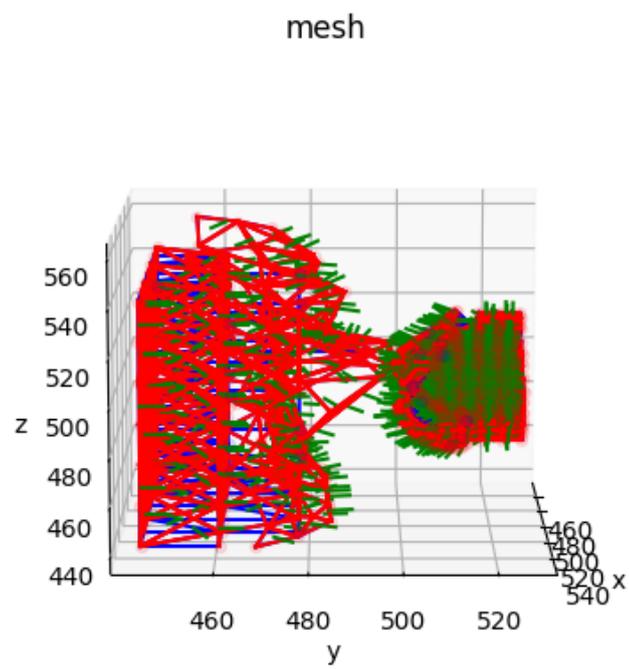


Abbildung 5.5: Kollisionsuntersuchung Gesicht und Beatmungsmaske Vorher

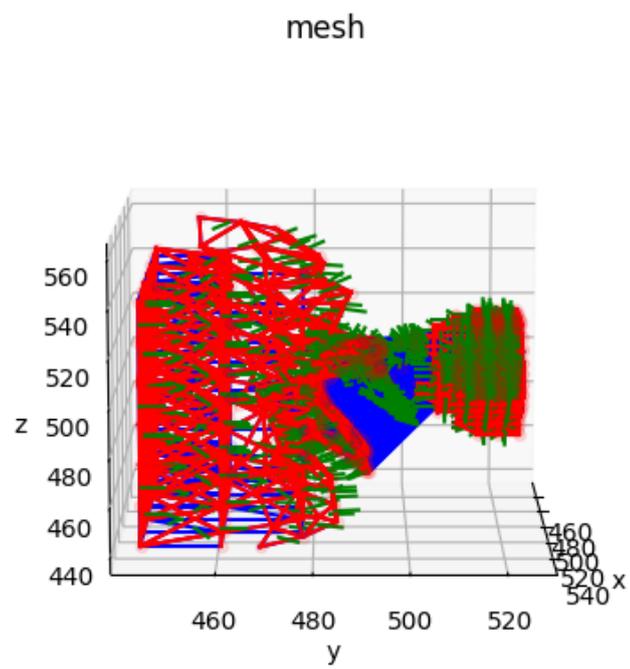


Abbildung 5.6: Kollisionsuntersuchung Gesicht und Beatmungsmaske Nachher

6 Fazit

Die Simulation mit dem MFS hat sowohl viele Vorteile als auch einige Nachteile. Ein Vorteil ist, dass man relative leicht mittels zweier Meshes eine Simulation durchführen kann und bei dieser relativ viele Variablen beeinflussbar sind. Jedoch muss für alle dieser Variablen ein passender Wert gefunden werden, welcher die korrekten Eigenschaften erfüllt. Dazu ist auch noch zu sagen, dass ein MFS dazu ausgelegt ist, möglichst viele Iterationsschritte mit einer sehr kleinen Schrittgröße zu brechen. In dieser Simulation ist diese nicht möglich, da sowohl die für den Versuch genutzte Hardware keine ausreichend genuge Rechenleistung hat und die Simulationssoftware nicht ausreichend genug optimiert ist. Wenn jedoch optimale Bedingungen erfüllt sind, dann kann man mit feineren Meshen die Simulation in kleineren Zeitschritten durchführen, was zu einem besseren Ergebnisse und einem kleineren Fehleranteil in der Berechnung führen würde.

Der Sinn dieser Arbeit war es, eine Simulation zu erschaffen, mit der festgestellt werden kann, welche Beatmungsmaske am wenigsten Kraft benötigt beim Aufdrücken, damit diese dicht auf dem Gesicht aufliegt. Mit dieser expliziten Simulation ist das nicht möglich, da ein Iterationsschritt schon mehrere Minuten zur Berechnung braucht, sodass der ganze einmalige Simulationsdurchlauf mit zehn Zeitschritten bis zu einer Stunde benötigt. Somit ist es zwar möglich, eine Beatmungsmaske an ein Gesicht zu drücken, jedoch ist es nicht möglich, dies iterativ zu wiederholen, bis die minimale Kraft bestimmt wurde, bis die Maske dicht auf dem Gesicht aufliegt. Dies liegt besonders daran, dass bei kleineren Kräften mehr Zeitschritte benötigt werden, damit die Maske auf dem Gesicht aufliegt. Der hohe Zeitaufwand ist durch die Kollisionsdetektion zu erklären. Wenn diese optimiert wird, ist es möglich, diese Simulation für ihren vorgesehenen Zweck zu benutzen.

Im Ganzen ist zusammenzufassen, dass sich MFS für die Simulation von Kontaktflächen zwischen einer Beatmungsmaske und einem Gesicht eignet, da diese Simulationsart einem die Simulation ermöglicht, bei dem die Körper an unterschiedlichen Orten verschieden verformbar sind und im Optimalfall ein Iterationsschritt schnell ist.

Um in der Zukunft die minimalen Kraft, die für die Dichtigkeit benötigt wird, bestimmen

zu können, muss die Simulation zeitlich optimiert werden. Außerdem müssen verschiedene Integrationsverfahren analysiert werden, da bei der Eulerschen Integration ein zu hoher Fehleranteil in die Position bei einer hohen Schrittgröße mit einfließt. Zudem muss ein Verfahren entwickelt werden, mit dem festgestellt werden kann, wie groß die Federkonstanten und die andern Werte sind, welche für die Berechnung benötigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] : *Individuelle Beatmungsmasken.* – URL <https://www.epithesen.de/produkte/individuelle-beatmungsmasken/>
- [2] Physics Tutorial 6: Collision Response.
- [3] : *Blender.* 2022. – URL <https://www.blender.org/>
- [4] : *FreeCad.* 2022. – URL <https://www.freecad.org/>
- [5] : *bellus3d.* 2023. – URL <https://www.bellus3d.com/developers/download/>
- [6] GEUZAINÉ, Christophe ; REMACLE, Jean-Francois: *Gmsh.* November 2022. – URL <https://gmsh.info/>
- [7] GOLEC, Karolina: *Hybrid 3D Mass Spring System for Soft Tissue Simulation*, Université de Lyon, Dissertation, 2018
- [8] LANG, Hartmut: *Beatmung für Einsteiger.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2020. – URL <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-59294-6.pdf>. – ISBN 978-3-662-59293-9
- [9] NEUMANN, Dipl.-Ing. J.: *Verfahren zur ad hoc-Modellierung und -Simulation räumlicher Feder-Masse-Systeme für den Einsatz in Virtual Reality-basierten Handhabungssimulationen*, Technischen Universität Berlin, Dissertation, 2009
- [10] PADITZ, E.: *Nasale Maskenbeatmung im Kindes- und Erwachsenenalter.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997. – URL <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-60853-7>. – ISBN 978-3-642-60853-7
- [11] SCHILL, Markus A.: *Biomechanical Soft Tissue Modeling – Techniques, Implementation and Applications*, Universität Mannheim, Dissertation, 2001

- [12] SCHILLING, Amy L.: *A Test of the Accuracy of Facial Tissue Thickness Measurements Taken from Computed Tomography*, University of Tennessee, Diplomarbeit, 1997. – URL https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/4206
- [13] SCHRAMM, Uwe Hecker Dr. C.: *Praxis des Intensivtransports*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – URL <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-21614-5.pdf>. – ISBN 13 978-3-642-21613-8
- [14] TANG, Min ; MANOCHA, Dinesh ; OTADUY, Miguel A. ; TONG, Ruofeng: Continuous Penalty Forces. In: *ACM Trans. Graph.* 31 (2012), July, S. 107:1–107:9
- [15] ZACHMANN, G.: *Virtuelle Realität Feder-Masse-Systeme*. 2011. – Forschungsbericht

A Anhang

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original