
BACHELORARBEIT

Frau
Olivia Sina Gräupner

**Möglichkeiten und Grenzen der
blender-internen Physik Engine
zur Simulation von
Schussverläufen**

2020

BACHELORARBEIT

Möglichkeiten und Grenzen der blender-internen Physik Engine zur Simulation von Schussverläufen

Autorin:

Olivia Sina Gräupner

Studiengang:

Allgemeine und Digitale Forensik

Seminargruppe:

FO17w4-B

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde

Zweitprüfer:

M. Sc. Sven Becker

Mittweida, August 2020

BACHELOR THESIS

Possibilities and limitations of the blender internal physics engine for the simulation of shot sequences

Author:

Olivia Sina Gräupner

Study Programme:

General & Digital Forensic Science

Seminar Group:

FO17w4-B

First Referee:

Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde

Second Referee:

M. Sc. Sven Becker

Mittweida, August 2020

Bibliografische Angaben

Gräupner, Olivia Sina: Möglichkeiten und Grenzen der blender-internen Physik Engine zur Simulation von Schussverläufen, 75 Seiten, 22 Abbildungen, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften

Bachelorarbeit, 2020

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Referat

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Problematik der digitalen Tatortrekonstruktion anhand der Simulation des Flugbahnverlaufs eines Geschosses. Um eine wirklichkeitsgetreue Realisierung dieser Flugbahn vornehmen zu können, werden die physikalischen Gesetzmäßigkeiten sowie die äußeren Einflüsse erläutert. Diese Kenntnisse werden in Verbindung mit dem softwaretechnischen Grundwissen verwendet, um geeignete Parameterkombinationen auf ihre Tauglichkeit zu testen. Im Mittelpunkt steht demnach die schrittweise Parametrisierung des Flugbahnverlaufs mithilfe der Open-Source-Software Blender. Die hierbei entstehenden Möglichkeiten und Grenzen einer solchen Rekonstruktion werden differenziert betrachtet.

Abstract

The following work deals with the problem of digital crime scene reconstruction based on the simulation of the trajectory of a projectile. To be able to make a realistic realization of this trajectory, the physical laws as well as the external influences are explained. This knowledge is used in conjunction with the expertise of software technology to test appropriate parameter combinations for their efficiency. Therefore the focus is on the step-by-step parameterization of the trajectory using the open-source software Blender. The resulting possibilities and limitations of such a reconstruction are considered in a differentiated way.

I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielstellung	2
1.3 Historischer Hintergrund	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Tatortrekonstruktion	5
2.2 Simulation und Modellierung	6
2.3 Grundlagen der Ballistik	7
2.3.1 Innenballistik	8
2.3.2 Abgangsballistik	8
2.3.3 Außenballistik	9
Einführung	9
Allgemeine Beschreibung der Flugbahn	9
Auf das Geschoss einwirkende physikalische Kräfte	10
Flugbahn im Vakuum	12
Flugbahn in der Luft	13
Atmosphärische Bedingungen	15
2.3.4 Endballistik und das Verhalten abprallender Geschosse	16
2.4 Software Blender	17
2.4.1 Grundlagenfunktionen in Blender	17
2.4.2 Animation, Keyframing und Rendering	19
Animation	19
Keyframing	19
Rendering	21
2.4.3 Game Engine und Ragdolls	22
2.4.4 Aufbau und Funktionsweise der Bullet Physik Engine	23
2.4.5 Aufbau der Force Fields Physik	24
2.4.6 Aufbau der Rigid Body Physik	26
2.4.7 Vorstellung ausgewählter Add-ons	27
2.5 Finite Element Analyse	28
3 Methoden	31
3.1 Allgemeine Verfahrensweise	31
3.2 Theoretische Simulation der Problemstellung	32
3.3 Beschreibung eines realen Beschussexperiments	32

3.4	Unterteilung der digitalen Flugbahnrekonstruktion	33
3.4.1	Modellierung des grundlegenden Versuchsaufbaus	33
	Parametrisierung des Geschosses als 3D-Modell	33
	Aufbau der Versuchsszene	34
3.4.2	Anwendung der Keyframe Animation	34
3.4.3	Anwendung des Impulse Add-ons	35
3.4.4	Anwendung des Projectile Add-ons	36
3.5	Umsetzung physikalischer und atmosphärischer Bedingungen - der Force Fields	
	Modifier	38
	Wind	38
	Curve Guide	38
	Force	39
3.6	Zusammenfügen der Teilprobleme	39
4	Ergebnisse	41
4.1	Beschreibung eines realen Beschessexperiments	41
4.1.1	Vorbetrachtungen	41
4.1.2	Ideale Flugbahnrekonstruktion	42
4.1.3	Physikalische Flugbahnrekonstruktion	43
4.1.4	Glock 17	45
4.2	Parametrisierung der Flugbahn	46
4.2.1	Modellierung des grundlegenden Versuchsaufbaus	46
4.2.2	Anwendung der Keyframe Animation	47
4.2.3	Anwendung des Impulse Add-ons	48
4.2.4	Anwendung des Projectile Add-ons	49
4.3	Umsetzung physikalischer und atmosphärischer Bedingungen – Der Force Fields	
	Modifier	50
	Wind	51
	Curve Guide	51
5	Diskussion	53
5.1	Simulation	53
5.2	Grenzen der realen Flugbahnrekonstruktion	53
5.2.1	Vorbetrachtungen	53
5.2.2	Innenballistik	54
5.2.3	Außenballistik	54
	Schusswinkel	54
	Höhenfehler	54
	Luftwiderstandsbeiwert	55
	Geschossstabilisierung	56
	Instabile Geschosse	56
	Atmosphäre	57
5.3	Möglichkeiten und Grenzen computergesteuerter Beschessexperimente	57
5.3.1	Finite Element Analyse	57
5.3.2	Modellierung der Patrone als 3D-Modell	58
5.3.3	Anwendung der Keyframe Animation	58

5.3.4	Anwendung des Impulse Add-ons	59
5.3.5	Anwendung des Projectile Add-ons	60
5.3.6	Möglichkeiten und Grenzen der Umsetzung physikalischer Kräfte	61
	Innenballistik und Abgangsbalistik	61
	Außenballistik	62
	Endballistik	62
5.3.7	Möglichkeiten und Grenzen der Umsetzung atmosphärischer Bedingungen	63
6	Fazit	65
7	Ausblick	67
	Literaturverzeichnis	69
	Selbstständigkeitserklärung	75

II. Abbildungsverzeichnis

1.1 Das Diagramm zeigt die Straftaten der Kategorie „Schussabgaben“ unterteilt in die einzelnen Deliktbereiche aus dem Jahr 2018. [37]	1
2.1 Der Arbeitsablauf einer Simulation wird durch die Simulationspipeline verdeutlicht, die sich aus den voneinander abhängigen Schritten Modellierung, Berechnung, Implementierung, Visualisation, Validierung und Einbettung zusammensetzt. Das iterative Durchlaufen der Pipeline ermöglicht das den optimalen Erfolg der Simulation. [5] . .	6
2.2 Die Abbildung zeigt den Graphen einer Funktion bei der die Flughöhe y in Metern in Abhängigkeit zur zurückgelegten Distanz x in Metern angegeben ist. [25]	9
2.3 Die Abbildung zeigt den Graphen einer Funktion, bei der die Flughöhe $y [m]$ in Abhängigkeit zur zurückgelegten Distanz $x [m]$ angegeben ist. [25]	12
2.4 Die Grafik stellt den exemplarischen Verlauf des Luftwiderstandsbeiwerts c_w vom Munitionstyp GP 90 in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit $v [\frac{m}{s}]$ dar. [25]	13
2.5 Die Tabelle zeigt die meteorologischen Daten Luftdruck [mb], Temperatur [$^{\circ}C$], Temperatur [K], Luftdichte [$\frac{kg}{m^3}$] und Gravitation [$\frac{m}{s^2}$] der ICAO-Standardatmosphäre in Abhängigkeit zu einer Bezugshöhe $[m]$ an. [15]	15
2.6 Die Abbildung zeigt die Standardansicht der Arbeitsszene beim Starten von Blender. Die <i>Workspaces</i> sind zur besseren Visualisierung farbig abgebildet. Der <i>3D Viewport</i> ist gelb, der <i>Outliner</i> grün, der <i>Properties Editor</i> blau und die <i>Timeline</i> rot hinterlegt. [29]	17
2.7 Der blender-interne Screenshot visualisiert das Erstellen eines <i>Keyframes</i> anhand der Option <i>LocRotScale</i> . Die Felder der Werte für <i>Location</i> , <i>Rotation</i> und <i>Scale</i> färben sich entsprechend der Vorgaben gelb und in der <i>Timeline</i> wird eine gelbe Markierung des <i>Keyframes</i> gesetzt. [4]	20
2.8 Die Abbildung verdeutlicht die Visualisierung der Kraftfelder <i>Force</i> (links) und <i>Wind</i> (Mitte) und <i>Curve Guides</i> (rechts) des <i>Force Fields Modifier</i> . [28]	26
2.9 Die Abbildung stellt die Struktur einer Fräsmaschine mithilfe von finiten Elementen dar. Teil A zeigt hierbei die eigentliche Struktur der Maschine in Form einer Arbeitsskizze. Teil B veranschaulicht die Idealisierung dieser Struktur durch finite Elemente. [23] . .	28

3.1 Die Grafik verdeutlicht die vereinfachten Arbeitsschritte von der realen Experimentbeschreibung zur Erstellung einer finalen Flugbahn in Blender.	31
3.2 Die Abbildung zeigt die Einstellungsmöglichkeiten des <i>Impulse Add-ons</i> bezüglich der Anfangsgeschwindigkeit und dem Zielpunkt der Bewegung.	35
4.1 Der blender-interne Screenshot zeigt den Versuchsaufbau, der als Grundlage für die nachfolgenden Betrachtungen dienen soll. In dem rotfarbenen Rahmen befindet sich eine Nahaufnahme der Waffe. Die Patrone ist hierbei innerhalb des Waffenlaufs platziert.	46
4.2 Der blender-interne Screenshot zeigt die manuell generierten <i>Keyframes</i> innerhalb der <i>Timeline</i> sowie Modifikationen der <i>Object Properties</i> der Patrone bei der Simulationserstellung einer sehr einfachen Flugbahn.	47
4.3 Die Abbildung verdeutlicht die <i>Velocity Settings</i> des <i>Impulse Add-ons</i> . In der <i>Timeline</i> sind die <i>Keyframes</i> der Animation in Form von senkrechten Linien zu sehen.	48
4.4 Der Screenshot zeigt die <i>Goal Settings</i> des <i>Impulse Add-ons</i> . Der Ursprung des orangefarbenen Kreuzes stellt den Zielpunkt der Flugbahn dar.	49
4.5 Der blender-interne Screenshot zeigt die Flugbahn eines Geschosses anhand der weiß gefärbten Trajektorie. Das orangefarbene Kreuz stellt hierbei den Ursprung des Emitters dar.	50
4.6 Der blender-interne Screenshot zeigt den Einfluss des Windes, welcher orthogonal zur Flugrichtung auf das Geschoss wirkt. Das Verschieben des gelben Pfeils reguliert die Stärke der Krafteinwirkung.	51
4.7 Die Abbildung beschreibt den Kurvenverlauf einer <i>Bezier Curve</i> unter Verwendung des <i>Particle Systems</i> in Kombination mit dem <i>Force Fields Modifier Curve Guide</i> . Die rotfarbene Umrandung zeigt die Position der Patrone, die als emittierendes Objekt aus der Waffenöffnung austritt.	52
4.8 Die Aufnahme aus der Software Blender veranschaulicht den nicht existierenden Einfluss der <i>Wind</i> Kraft auf die Versuchsszene. Zur verbesserten Visualisierung der Geschossposition ist der rot umrandete Ausschnitt vergrößert dargestellt.	52

-
- 5.1 Die Abbildung zeigt den Vergleich der Funktionsgraphen einer kurzen Flugbahn (links) zu einer langen Flugbahn (rechts) des Geschosses GP 90. Hierbei steht die Flughöhe $[m]$ in Abhängigkeit zur Flugdistanz $[m]$. Innerhalb der beiden Diagramme werden die Funktionen der Flugbahn im Vakuum (ausgefüllte Vierecke) und in der Luft (leere Vierecke) gegenübergestellt. [25] 55
- 5.2 Der blender-interne Screenshot zeigt das zerbrochene 3D-Modell einer Art Wand mithilfe der Nutzung des *Cell Fracture Add-ons*. Zur Visualisierung wurden die Seitenflächen im Gegensatz zur blauen Oberfläche violett gefärbt. [41] 63

III. Tabellenverzeichnis

4.1 Die Tabelle beinhaltet physikalische Beispielwerte für den Geschosstyp 9 mm Luger. Dieses Kaliber gilt als Referenz für eine exemplarische Nutzung von Waffen und Mu- nition im Zuge einer Flugbahnrekonstruktion. [15] [2] [36]	45
--	----

IV. Abkürzungsverzeichnis

BSDF	Bidirectional Scattering Distribution Function
C.I.P.	Commission internationale permanente pour l'épreuve des armes à feu portatives
CAD	Computer-Aided-Design
CGI	Computer Generated Imagery
FEA	Finite Element Analyse
FEM	Finite Element Methode
FZ	Formelzeichen
GP90	Gewehrpatrone 90
ICAO	International Civil Aviation Organization
VFX	Visual Effects

1 Einleitung

„[Das] Gefährdungspotenzial [der Opfer ist bei Schusswaffengebrauch] angesichts drohender Schäden für Leib und Leben der Betroffenen hoch – insbesondere mit Blick auf potenzielle Amoktaten oder Terroranschläge. [37] “

1.1 Motivation

Bezogen auf das Bundeslagebild 2018 des Bundeskriminalamtes zur Waffenkriminalität ist die Schusswaffenverwendung im Vergleich zum Vorjahr mit 0,2 % des gesamten Straftatbestandes vergleichsweise gering. Jedoch weist der Deliktbereich Straftaten gegen das Leben anhand Abbildung 1.1 109 Fälle von Schussabgaben auf. Davon endeten insgesamt 42 Fälle von Mord, Totschlag und Tötung auf Verlangen für den Betroffenen tödlich. [37] Diese Fallzahlen bestätigen das eingangs erwähnte Gefährdungspotenzial bei der Verwendung von Schusswaffen.

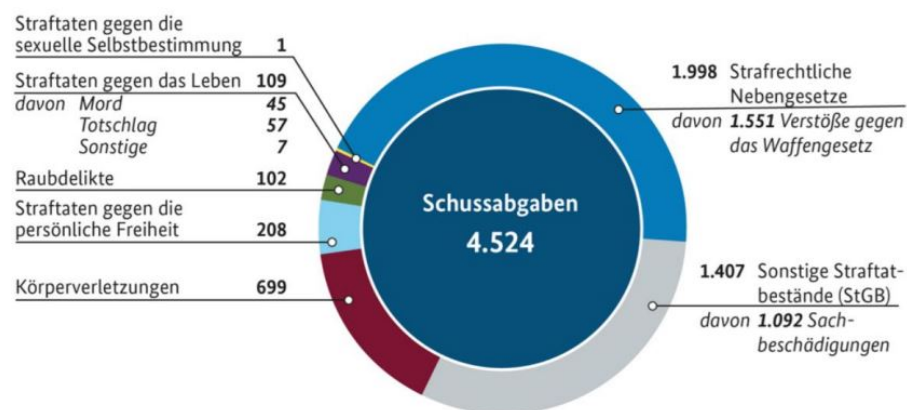


Abbildung 1.1: Das Diagramm zeigt die Straftaten der Kategorie „Schussabgaben“ unterteilt in die einzelnen Deliktbereiche aus dem Jahr 2018. [37]

Obwohl die Anzahl der Straftaten mit Schusswaffengebrauch in Deutschland einen abnehmenden Trend aufweist, bleibt die Anzahl im Betrachtungszeitraum von 2009 bis 2018 erschreckend hoch. Die hierbei ab dem Jahr 2012 vorgenommene Deliktunterteilung in Bedrohung mithilfe einer Schusswaffe und das Schießen mit einer Schusswaffe weist eine annähernd konstante Gleichverteilung auf. Insgesamt betrachtet sind jedoch weniger Drohungen zu verzeichnen. Aktuell liegt im Jahr 2018 die Anzahl der Straftaten bei denen mit einer Waffe gedroht wurde bei 3.819 Vorfällen. Im Vergleich dazu waren es im Jahr 2012 noch 5.696 Fälle. Analog zu den Drohungen weisen die Straftaten bei denen mit einer Waffe geschossen wurde im Jahr 2018 4.524 und 2012 5.132 Straftaten auf. Daraus ableitend kann festgehalten werden, dass die verzeichneten Schussdelikte weniger stark zurückgehen als die Straftaten mit Bedrohungen. [39]

1.2 Zielstellung

Werden die Straftaten der vergangenen Jahre betrachtet, so ist eindeutig festzustellen, dass eine Rekonstruktion des Schussverlaufs zu einer verminderten Anzahl an Verstorbenen beitragen kann. Um hierbei eine abschreckende Wirkung zu erzielen, sollen immer mehr Straftaten diesbezüglich aufgeklärt und Straftäter vor Gericht verurteilt werden. Die somit einhergehende Verringerung der Opferzahlen unterstützt die weitergehende Forschung im Bereich der digitalen Tatortrekonstruktion. Jedoch nicht jedes Verbrechen kann und sollte auf diese Weise rekonstruiert werden. Der hohe Zeitaufwand und die einhergehenden programm- sowie bedientechnischen Ressourcen sind begrenzt. Daher wird die digitale Tatortrekonstruktion nur bei schweren Verbrechen auf Anfrage angewendet.

Durch die vermehrte Verwendung von Kurzwaffen in Europa ist das Bedrohungspotential im Vergleich zu schweren Kurzwaffen gestiegen. Aufgrund dieser signifikanten Wahrscheinlichkeit wird die Waffe Glock 17 mit dem Geschoss 9 mm Luger exemplarisch für den Großteil der nachfolgenden Beispiele herangezogen. [15] Zusätzlich dient der Munitionstyp GP 90 (Gewehrpatrone 90) zu theoretischen Anschauungszwecken der Flugbahn in Vakuum und Luft.

Da die exakte Berechnung einer physikalisch korrekten Flugbahn mathematisch komplex ist, werden nur einfache Teilrechnungen durchgeführt. Die genaue Berechnung aller Parameter ist demnach nicht Teil dieser Arbeit. Manuelle Berechnungen unterstützen die Computersimulation im Hinblick auf die korrekte Rekonstruktion der Flugbahn von Geschossen. Der zentrale Augenmerk liegt hierbei aber auf der computertechnischen Umsetzung der Problemstellung in der Open-Source Software Blender. Hierbei werden verschiedene Ansätze zur Annäherung an eine Geschossbahn geschrieben und diskutiert. Dies geschieht unter anderem mithilfe von zusätzlichen *Add-ons*, die mit der Software kompatibel sind. Weiterhin werden äußere Einflüsse sowie deren digitale Umsetzung betrachtet, die zu einer Abweichung von der idealen Flugbahn führen. Zur Modellierung wird vorrangig die Version 2.83.0 verwendet. Verbesserungen zukünftiger Versionen werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

1.3 Historischer Hintergrund

Um die nachfolgenden Ausführungen der Arbeit in vollem Umfang erfassen zu können, wird die historische Entwicklung im Bereich der Ballistik beschrieben. Anschließend folgt die Beschreibung des aktuellen Forschungsstandes in Bezug auf den Schusswaffengebrauch.

Die aufkommende Verwendung von mechanischen Feuerwaffen resultierte im Verlauf des 18. Jahrhunderts in innovativen Untersuchungen im Bereich der Ballistik. Insbesondere die Physik und die Messtechnik waren maßgeblich daran beteiligt das Forschungsgebiet der Ballistik zu etablieren. Infolge systematischer Untersuchungen wurde die Beschleunigung des Geschosses innerhalb des Rohres sowie die Verzögerung während der Flugbahn differenziert. Ausgehend von dieser Unterteilung entstanden vier Teilgebiete der Ballistik. Die Innenballistik beschreibt die Optimierung der Beschleunigung und der daraus folgenden Geschwindigkeit des Geschosses innerhalb des Rohrs. Hierfür wird die Zusammensetzung und die resultierende Wirkungsweise der Treibmittel analysiert. Demnach werden besonders die chemischen und physikalischen Ereignisse vor Verlassen des Rohres betrachtet. Orientierend an dieser Einteilung beschäftigt sich die Abgangsbalistik mit den Vorgängen des Geschosses kurz vor, während und nach dem Verlassen der Mündung. Aufgrund der komplexen Bewegungsabläufe beschreibt die Außenballistik die physikalischen Gegebenheiten während der Flugbahn des Projektils. Hierbei wird besonderer Wert auf die äußeren Einflüsse und den resultierenden Verlauf der Flugbahn gelegt. Die Endballistik umschreibt das Verhalten des Geschosses beim Auftreffen und Abprallen an einem Objekt mit verschiedenster materieller Beschaffenheit. [15]

Laut dem Bundeslagebild Waffenkriminalität 2018 verzeichnet die aktuelle Entwicklung der Schusswaffenverwendung Handelsaktivitäten mit Waffen, die der Europäischen Union aus dem Westbalkan zugeführt werden. Deutschland ist hierbei sowohl das Ziel als auch eine Transitzone. Die illegale Beschaffung von Waffen breitet sich mit rasender Geschwindigkeit auf das Internet und somit das Darknet aus. Weiterhin werden zugelassene Dekorations- und Schreckschusswaffen zunehmend und professionell zu funktionsfähigen Schusswaffen umgebaut. [37] Diese Entwicklungen zeigen deutlich, dass in Deutschland ein hohes Aufkommen an Schusswaffen besteht. Das zieht zwangsläufig eine vermehrte Strafverfolgung bei dieser Art von Delikten nach sich. Die digitale Rekonstruktion dient demnach als Unterstützung der Strafverfolgung durch Staatsanwaltschaft und Gericht.

2 Theoretische Grundlagen

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen, die dafür notwendig sind, sich mit der eingangs beschriebenen Problemstellung auseinanderzusetzen. Hierbei wird der Fachbereich Ballistik vorgestellt, der grundlegende Ablauf einer Simulation anhand ballistischer Beispiele erklärt und eine Beschreibung der Modellbildung vorgenommen. Weiterhin werden physikalische Kräfte aufgezeigt, die während des Verlaufs der Flugbahn auf ein Geschoss einwirken. Infolgedessen wird eine Einteilung des Schussverlaufs in vier Stadien vorgenommen: die Innenballistik, die Abgangsbalistik, die Außenballistik sowie die Endballistik. Der Augenmerk liegt hierbei insbesondere auf der Außenballistik, wobei physikalische Prozesse sowie einfließende Umgebungsvariablen beschrieben werden. Abschließend werden Visualisierungsmöglichkeiten einer Schussbahnrekonstruktion dargestellt. Hierfür wird die Funktionalität der Open-Source-Software Blender mit der integrierten Bullet Physik Engine näher betrachtet.

2.1 Tatortrekonstruktion

Bei der Tatortrekonstruktion kann von einer hinreichend großen Menge an referenzierter Hintergrundinformationen über den Tatablauf auf die Geschehnisse während der Tat geschlossen werden. Das Ziel einer solchen Rekonstruktion besteht demnach darin, das Geschehene so exakt wie möglich nachzuvollziehen und zu analysieren, um ein vollständiges Bild des begangenen Verbrechens zu erhalten. Die Grundlage hierfür bilden terrestrische Tatortaufnahmen sowie ergänzende Skizzen. Weiterhin ist es erforderlich die verwendete Waffe sowie den exakten Auftreffort aller Geschossteile zu finden. Es existieren verschiedene Verfahrensweisen zur Rekonstruktion von Tatorten. Klassische Verfahren, wie das Handaufmaß oder das Skizzieren des Tatorts, erfordern in den meisten Fällen viel Arbeitszeit, die sich über mehrere Stunden erstrecken kann. Eine effiziente Alternative stellt die digitale Vermessung des Tatorts dar. Hierfür kommen häufig die Photogrammetrie sowie der Laserscan zum Einsatz. Die verwendete Rekonstruktionsmethode bestimmt wie die Software in Kombination mit diversen Plugins werden kann. Um die gewonnenen Daten basierend auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten fachgerecht auswerten zu können, wird eine computergestützte 3D-Darstellung verwendet. Die Anwendung der Open-Source-Software Blender ermöglicht das flexible und kostenfreie Erstellen von dreidimensionalen Modellen. Innerhalb von vergleichsweise kurzen Zeitspannen können Altfälle aufgearbeitet werden. Der große Vorteil besteht darin, dass nicht mehr vorhandene Bereiche des Tatortes anhand von beispielsweise Grundrissen und Tatortskizzen digital rekonstruiert und jederzeit editiert werden können. Neben 3D-Modellen können Simulationen rekonstruiert werden. Diese Vorgehensweise kann analog auf die forensische Ballistik übertragen werden. [16]

2.2 Simulation und Modellierung

Eine Simulation dient im engeren Sinne der Nachbildung eines definierten realitätsnahen Szenarios, welches ein Geschehen in der Wirklichkeit beschreibt. Der hierfür dargestellte Gesamtkomplex wird mithilfe von Berechnungen durchgeführt und es entsteht ein rechnergestützter Ablauf. Deren eigentliche Berechnung wird im engeren Sinne als abstrakte Problembehandlung verstanden. Im Idealfall werden Experimente, entsprechend den Gegebenheiten der realen Umgebung, durchgeführt. Da viele Experimente im Bereich der Anwendungsgebiete Physik, Chemie und Mechanik jedoch technisch unmöglich bzw. teilweise auch moralisch unerwünscht sind, werden digitalisierte Versuche am Computer vorgenommen. Beispielsweise kann eine Straftat mit Schusswaffengebrauch nicht mithilfe einer Messreihe experimentell simuliert werden, da das testweise Schießen auf Lebewesen moralisch nicht zu vertreten ist. Eine solche Messreihe wäre nicht verhältnismäßig. Zu den Hauptzielen einer Simulation gehört demnach das Nachvollziehen eines bekannten Szenarios, um ein fundiertes Verständnis der Wirklichkeit zu erfahren. Weiterhin kann die Optimierung eines solchen Szenarios eine verbesserte Simulation herbeiführen. Jedoch sollte folgende Feststellung immer im Hinterkopf behalten werden: „Simulationen ergänzen [die] theoretische Analyse und Experiment, sie ersetzen sie jedoch keinesfalls.“ [5]

Der Komplex aus Simulationsprozessen erfordert ein wiederholtes Durchlaufen sogenannter Feedbackschleifen, siehe 2.1, um ein validiertes Ergebnis zu erhalten. [5]

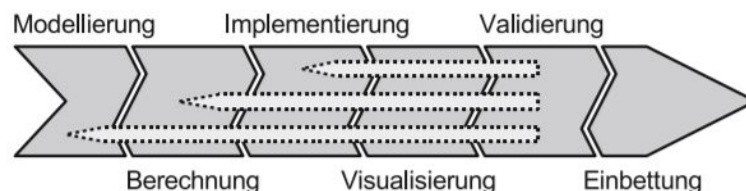


Abbildung 2.1: Der Arbeitsablauf einer Simulation wird durch die Simulationspipeline verdeutlicht, die sich aus den voneinander abhängigen Schritten Modellierung, Berechnung, Implementierung, Visualisation, Validierung und Einbettung zusammensetzt. Das iterative Durchlaufen der Pipeline ermöglicht das den optimalen Erfolg der Simulation. [5]

Der Workflow beginnt mit der **Modellierung**, wobei ein reduziertes Modell als Grundlage für die formale Beschreibung eines repräsentativen Ausschnitts dient. Ein Modell stellt hierbei ein „vereinfachendes Abbild einer partiellen Realität“ dar. Sie bedient sich mathematischer und informatischer Methoden zur formalen Beschreibung der Wirklichkeit. Im zweiten Schritt, der **Berechnung** bzw. Simulation im engeren Sinne, wird das ausgearbeitete Modell aufbereitet. Anschließend werden Konzepte zur Erstellung von Algorithmen umgesetzt, die der Lösung des Modells dienen. Die eigentliche **Implementierung** der Berechnungsalgorithmen folgt dann mithilfe der Verwendung bzw.

Erstellung einer geeigneten Software. Um das Modell **visualisieren** zu können werden infolge einer Datenexploration Erkenntnisse des Simulationsverlaufs interpretiert. Im nachfolgenden Schritt, der **Validierung**, wird geprüft, ob die Ergebnisdaten verlässlich sind. Hierbei werden unterschiedliche Modelle mit dem Eigenen abgeglichen, um Fehlerquellen zu reduzieren und das Modell gleichzeitig zu optimieren. Demnach werden die Simulationsergebnisse mit den Gegebenheiten der Wirklichkeit abgeglichen, um möglicherweise auftretende Abweichungen des erwarteten Verhaltens identifizieren und analysieren zu können. [5] Letztendlich muss die erstellte Simulation bei der **Einbettung** in einen Kontext integriert werden. Dies wird mithilfe der Erstellung von Testumgebungen, der Definition von Schnittstellen sowie dem Software Engineering realisiert. [5] Nachfolgend wird orientierend an der Simulationspipeline getestet, ob eine blendergestützte Simulation von Schussverläufen möglich ist. Hierfür sind vor allem die Modellbildung, die eigentliche Simulation sowie die Validierung bedeutsam für den Erfolg des Prozesses. [5]

2.3 Grundlagen der Ballistik

Nachfolgend soll der grundlegende Ablauf eines realen Beschussexperimentes beschrieben werden. Hierzu werden die Gesetzmäßigkeiten der Ballistik herangezogen. Die Ballistik ist ein Teilgebiet der Kinematik. Sie beschreibt die zentrale Bahnbewegung eines Körpers im Raum. Spezifische Eigenschaften des Objekts sowie die räumliche Ausdehnung des zurückgelegten Weges werden hierbei vernachlässigt. Die nachfolgenden Definitionen sind allgemeingültig, beziehen sich im Hinblick auf die Ballistik jedoch auf ein rotierendes System. Um die im Folgenden verwendeten physikalischen Kräfte eindeutig zu identifizieren, werden diese anhand ballistischer Beispiele sowie unter Einbezug atmosphärischer Bedingungen zu Beginn beschrieben. [15]

Die forensische Ballistik beschäftigt sich als Teilgebiet der Forensik mit der Rekonstruktion von Schussverläufen. Hierbei ist das Wissen über die Zusammensetzung des Pulvers, die Entwicklung des Schusses sowie den Geschossabgang erforderlich, um auf kurzen Wegstrecken die Distanz des Schusses sowie die verwendete Schusshand bestimmen zu können. Dazu wird unter anderem eine Schmauchspurenanalyse vorgenommen. [15]

Die Ballistik findet neben der Rekonstruktion von Schussverläufen klassisch Anwendung in der Wehrtechnik. Weiterhin weisen Sportarten, bei denen ein Schlag, Stoß oder Wurf von Objekten sowie eine Überwindung von Distanz in der Luft stattfindet, ebenfalls ballistische Charakteristika auf. Hierzu zählen beispielsweise die Sportarten Golf, Tennis, Basketball, Fußball sowie jegliche Wurfdisziplinen der Leichtathletik. Am Beispiel des Fußballs wählt der Spieler den günstigsten Auftreffwinkel am Ball aus, um eine ideale Flugweite oder eine Eigenrotation des Balls zu erzeugen. [15]

2.3.1 Innenballistik

Zu Beginn werden die Explosivstoffe in fester Form hinter das Geschoss eingeführt. Oft sind diese auch innerhalb der Patrone verbaut. Die Zündung der Treibmittel geschieht mechanisch in Form eines Schlagbolzens, der Reibungswärme zum Entzünden der Explosivstoffe erzeugt. Das Anzünden dieser Treibmittel führt zu deren Zersetzung. Hierbei wird Energie in Form von Wärme freigesetzt, die das rasche Ansteigen der Temperatur innerhalb des Rohres verursacht. Weiterhin werden bei der Verbrennung Gase freigesetzt, die einen immensen Druck erzeugen. Durch den explosionsartig ansteigenden Druck wird das Geschoss in Bewegung versetzt und somit beschleunigt. [18] Dieser Vorgang beruht auf den Gesetzen der Fluidodynamik. Wird ein Körper durch ein gasförmiges Medium, beispielsweise Luft, bewegt, entstehen Reibungsvorgänge, die mit thermodynamischen Prozessen in Verbindung stehen. [15]

Treibmittel von Waffen mit langen Rohren weisen heutzutage eine verringerte Geschwindigkeit beim Abbrennen auf, wodurch sie eine schiebende Wirkung auf das Geschoss ausüben. Die Treibmittel sollen demnach auf kleinstem Raum und in kürzester Zeit eine möglichst große Freisetzung von Energie generieren. Diese Energie entsteht durch die Wärme, die bei der Reaktion chemischer Verbindungen freigesetzt wird. Der bei der Verbrennung benötigte Sauerstoff ist in Form von Stickstoffverbindungen im Treibmittel vorhanden. Zu den bekannten Treibmitteln und Sprengstoffen gehören Nitroglyzerin, Nitrocellulose und das in der Vergangenheit weit verbreitete Schwarzpulver. [18]

2.3.2 Abgangsballistik

Überwindet der bei der Verbrennung entstehende Druck im Rohr den Widerstand des ruhenden Geschosses, beginnt die Bewegung bzw. Beschleunigung des Geschosses innerhalb des Rohres. Die entstandenen Pulvergase können nun beim Verlassen der Geschützöffnung entweichen. Wird das gleiche Treibmittel mit identischen Mengenverhältnissen verwendet, erhöht sich die Mündungsgeschwindigkeit, wenn eine Verlängerung des Rohrs stattfindet. Dieses Phänomen tritt bei der Verwendung verschiedener Waffenarten sowie Kaliber auf. Beim Verlassen der Mündung setzt ebenfalls die Rotation des Geschosses um die Längsachse durch den Widerstand sowie die wechselnden Druckverhältnisse der Luft ein. Weiterhin übt das Geschütz eine rückstoßende Wirkung beim Abfeuern aus. [18]

2.3.3 Außenballistik

Einführung Die generelle Flugbahn ist durch Start- und Randbedingungen bestimmt. Zu den Startbedingungen gehören die Mündungsgeschwindigkeit v_0 und der Schusswinkel s_w zum Zeitpunkt $t = 0$. Zu den Randbedingungen zählen die Atmosphäre sowie die Geschossmasse und -form. Die Randbedingung der Atmosphäre kann durch den Schützen nicht gesteuert werden. Im Voraus kann jedoch die Mündungsgeschwindigkeit durch die Wahl der geeigneten Ladung beeinflusst werden. Die Variation der gewünschten Winkleinstellungen in Bezug auf die Erdoberfläche an der Rohrneigung kann den Schusswinkel s_w beeinflussen. Dieser ist abhängig vom zu treffenden Ziel. Mithilfe des Visiers besitzen Waffen ein Zielmittel, welches das direkte Ausrichten und Erfassen auf das Zielobjekt erlaubt. Zum Zielen muss daher eine Flugbahn erzeugt werden, welche die Bedingung zum Treffen des Zielpunktes erfüllt. Im Normalfall wird die Flugbahn in Bezug auf eine waagerechte Mündungslinie berechnet. Das Ziel befindet sich demnach auf Mündungshöhe des Geschützes. [26]

Allgemeine Beschreibung der Flugbahn Die generelle Flugbahn ist charakterisiert durch die Entwicklung der Flughöhe y in Bezug auf die fortschreitende Distanz x . Die waagerechte Linie der x -Achse entspricht hierbei der Mündungsebene. In Abhängigkeit zur fortgeschrittenen Zeit t wird die Entwicklung von Flughöhe y und Flugdistanz x betrachtet. Der Zeitpunkt t_0 beschreibt den Mündungsabgang. [25]

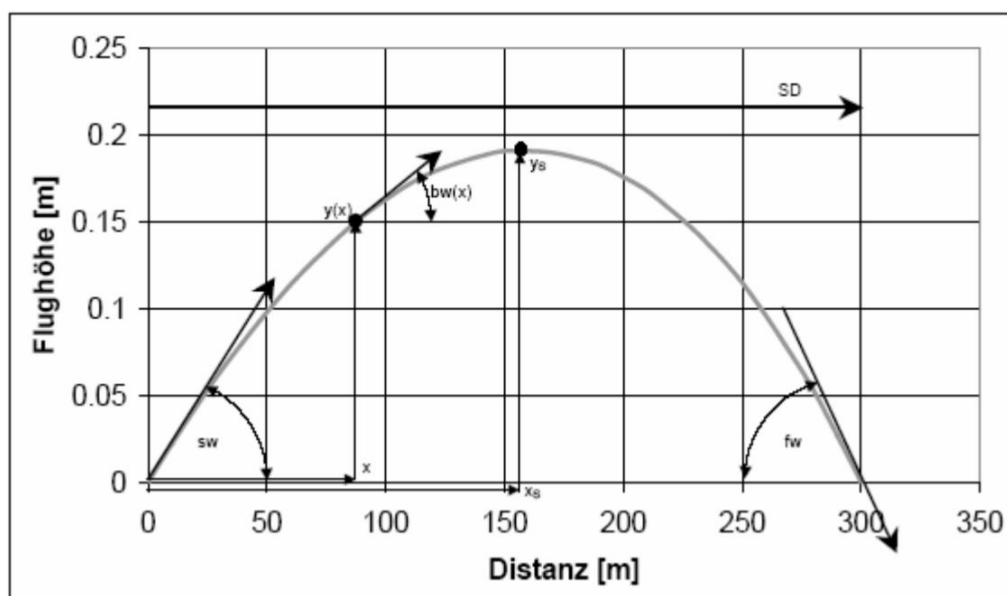


Abbildung 2.2: Die Abbildung zeigt den Graphen einer Funktion bei der die Flughöhe y in Metern in Abhängigkeit zur zurückgelegten Distanz x in Metern angegeben ist. [25]

In 2.2 wird eine exemplarische Flugbahn dargestellt. In diesem Beispiel wird eine Schussdistanz von 300 m zurückgelegt. s_w und f_w bezeichnen den Schusswinkel bzw. den Fallwinkel des Geschosses beim Abschuss bzw. bei der Landung des Geschosses am

Zielort. Die Ortsfunktion $y(x)$ kann zu jedem Zeitpunkt eindeutig bestimmt werden, da zu einem definierten Zeitpunkt nur ein einziger Ort existiert. Der Punkt $S(x_s/y_s)$ markiert den Scheitelpunkt der Funktion. An dieser Stelle ist der Bahnwinkel $b_w(x_s) = 0$. In einem beliebigen Punkt $P(x/y)$ besitzt das Geschoss eine Geschwindigkeit von $v(x)$ und eine Bewegungsrichtung, die durch den sogenannten Bahnwinkel (Elevation) bestimmt wird. Der Bahnwinkel $b_w(0)$ zum Zeitpunkt $(0/y)$ ist identisch zu dem Schusswinkel s_w . Die Mündungsgeschwindigkeit v_0 und der Bahnwinkel $b_w(0)$ sind als die Startbedingungen der Flugbahnfunktion definiert. [25]

Auf das Geschoss einwirkende physikalische Kräfte Um die außenballistischen Vorgänge vollends erfassen zu können, ist eine Beschreibung der einwirkenden physikalischen Kräfte notwendig. Diese äußeren Umwelteinflüsse verändern die Flugbahn des Geschosses maßgebend und werden demnach genauestens untersucht.

Die Geschwindigkeit v definiert sich aus der Wegänderung pro Zeit. Sie wird als die wichtigste Kennzahl der Kinematik verstanden und besitzt eine vektorielle Ausprägung. Kleinwaffen als erzeugendes System können Projektile in Form von Kurz- oder Langwaffengeschosse beinhalten. Kurzwaffengeschosse können Geschwindigkeiten von bis zu 250 bis 400 $\frac{m}{s}$ erreichen. Im Gegensatz dazu werden bei Langwaffengeschosse Geschwindigkeiten von 600 bis 1000 $\frac{m}{s}$ verzeichnet. [15] Vergleichend zu realen Verhältnissen bewegen sich die bei der Außenballistik vorkommenden Geschwindigkeiten deutlich oberhalb der Schallgeschwindigkeit. [18] Diese beträgt in der Luft bei 20° 344 $\frac{m}{s}$. [3] Generell kann festgehalten werden, dass je höher Geschwindigkeit des Geschosses ist, desto höher ist auch die zurückgelegte Strecke des Projektils bezogen auf die gesamte Flugbahn.

Findet eine Zunahme der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit statt, spricht man von Beschleunigung a bzw. bei einer Verringerung der Geschwindigkeit von Verzögerung der Bewegung eines Körpers. Die Geschwindigkeit als vektorielle Maßzahl sorgt neben einer Betragsänderung ebenfalls für eine Beschleunigung, wenn eine Richtungsänderung stattfindet. Demnach ist sie auf die Wirkung der Erde zurückzuführen. Vergleichend hierzu beschleunigt ein Gewehrsgeschoss mit $-400 \frac{m}{s^2}$ in der Luft.

Die Winkelgeschwindigkeit ω beschreibt eine Rotationsbewegung entlang einer gekrümmten Bahnkurve. Ein Pistolengeschoss einer 9 mm Luger besitzt beispielsweise eine repräsentative Winkelgeschwindigkeit von 8800 $\frac{rad}{s}$. Anhand dieser kann die Drehfrequenz der Nutation berechnet werden. Sie setzt sich aus der Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde zusammen.

Die Zentrifugalbeschleunigung a_{zp} beschreibt die Beschleunigung eines Körpers auf einer Kreisbahn, die bei einer gleichbleibenden Geschwindigkeit v den Richtungsvektor fortdauernd ändert. Diese Änderung verhält sich orthogonal zum Geschwindigkeitsvektor und erzeugt eine zunehmende Beschleunigung. Sie ist der Zentripetalbeschleunigung entgegengesetzt und wirkt senkrecht zur Erdachse. Bei der Berechnung wird demnach die geografische Breite einbezogen. Dahingegen wird bei der Flugbahn eine

Änderung des Breitengrades sowie die Flughöhe des Geschosses vernachlässigt. Auf die Oberfläche der Erde wirkt die Gravitationsbeschleunigung. Die definierte Standard-Erdbeschleunigung beträgt

$$g_n = 9,80665 \frac{m}{s^2} \quad (2.1)$$

Sie ist aus der Massenanziehung sowie der oben beschriebenen Zentrifugalbeschleunigung zusammengesetzt. g_0 steht daraus folgend ebenfalls in Abhängigkeit zu dem geografischen Breitengrad der Erde, da eine Abnahme der Gravitationsbeschleunigung vom Äquator zu den Polen erfolgt.

Die konstante Bewegung eines Körpers vom Zentrum zur Peripherie verursacht eine Zunahme der tangentialen Geschwindigkeit und wird Coriolisbeschleunigung a_c genannt. Diese Kraft wirkt orthogonal zur Bewegungsrichtung der Längsachse eines Körpers. Da eine ständige Rotation eines Körpers, in diesem Falle eines Geschosses, stattfindet, ändert sich die Richtung der Krafteinwirkung während der Flugbahn konstant. [15]

Für die folgenden beiden physikalischen Kräfte wird das Geschoss als Massepunkt angenommen. Der Luftwiderstand resultiert aus der Verteilung des Drucks an der Geschosssoberfläche. Dieser sogenannte wirkliche Widerstand F_w steht somit in Abhängigkeit zu dem Widerstandsbeiwert c_w , der Luftdichte ρ , der Geschossgeschwindigkeit v und deren Bezugsfläche A_0 . Die Strömungsgeschwindigkeit sowie die äußerliche Form des Geschosses beeinflussen die Druckverteilung an der betroffenen Fläche des Körpers. Neben dem Luftwiderstand beeinflusst das Gewicht des Geschosses maßgeblich den Bewegungsverlauf des Körpers. Wird die Flugbahn in aufsteigenden und absteigenden Ast unterteilt, so wird im aufsteigenden Ast die Geschwindigkeit des Geschosses durch den Luftwiderstand verringert. Im Gegensatz dazu verursacht ein hohes Geschossgewicht eine Beschleunigung im absteigenden Ast und wirkt somit gegen den natürlichen Luftwiderstand. Ändert sich die Richtung der Zentralkraft kontinuierlich, krümmt sich die Flugbahn des Geschosses. [15]

Unter der Voraussetzung des Massemodells und unabhängig der Flughöhe y , d.h. einer konstanten Erdbeschleunigung g sowie einer konstanten Luftdichte ρ , lässt sich die Hauptgleichung der Außenballistik formulieren. Sie stellt den Bahnwinkel als Funktion F_w in Abhängigkeit zur Geschossgeschwindigkeit v dar.

$$\frac{d}{d\Theta} (v \cdot \cos\Theta) = \frac{F_w(v)}{m \cdot g} \cdot v \quad [m/s] \quad (2.2)$$

Flugbahn im Vakuum Das physikalische Vakuum-Modell arbeitet auf Grundlage der Gesetzmäßigkeiten der Newtonschen Mechanik, d.h. die Kraft ist gleich der Masse multipliziert mit der Beschleunigung des Objekts. Die einwirkende Kraft des Luftwiderstandes auf das Geschoss wird nicht berücksichtigt, wobei die Gravitation auf die Geschoss-masse von Bedeutung bleibt. Die Gravitation wirkt in Richtung des Erdmittelpunkts und verursacht somit die Krümmung der Flugbahn. Im Vakuum würde sich das Geschoss ansonsten konstant anhand der Funktion 2.3 fortbewegen. [25]

$$f(x) = v_0 \cdot t \quad (2.3)$$

In Abbildung 2.3 entspricht der Koordinatenursprung der Geschossmündung. Die Grafik zeigt die Überlagerung der ursprünglichen Geschossbewegung mit der Gravitation der Erde. [25]

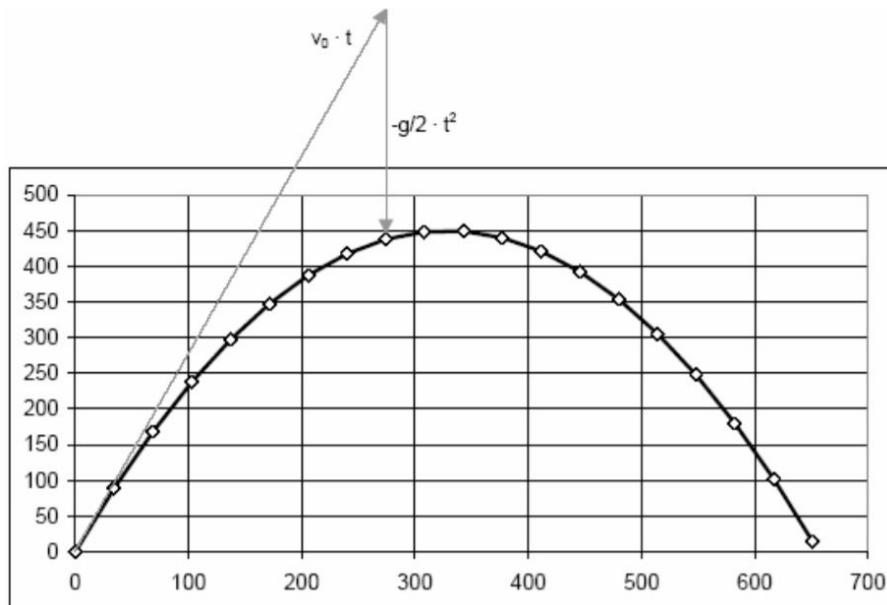


Abbildung 2.3: Die Abbildung zeigt den Graphen einer Funktion, bei der die Flughöhe y [m] in Abhängigkeit zur zurückgelegten Distanz x [m] angegeben ist. [25]

Die nachfolgende Gleichung 2.4 beschreibt die typisch parabelförmige Flugbahn der Abbildung 2.3. Hierbei werden lediglich die unbekannten Variablen der Mündungsgeschwindigkeit und des Schusswinkels in Bogenmaß benötigt, um die Flughöhe y in Abhängigkeit zu allen Distanzen x zu berechnen. [25]

$$y(x) = x \cdot \tan s_w - \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 s_w} \quad (2.4)$$

Da bei Pistolenschüssen kleine Winkel auftreten, kann die Formel bei Schusswinkeln $s_w > 1^\circ$ wie in Gleichung 2.5 dargestellt vereinfacht werden. [25]

$$y(x) = x \cdot s_w - \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot v_0^2} \quad (2.5)$$

Flugbahn in der Luft Bei der Flugbahn in der Luft ergänzt der auf das Geschoss einwirkende Luftwiderstand neben der Gravitation die Modellgleichung des Vakuum-Modells zum Geschossflug. Die Bewegungsrichtung des Luftwiderstandes F_w ist der Bewegungsrichtung der Geschossmasse m entgegengesetzt. Die Beschleunigung des Geschosses kann mithilfe der folgenden Gleichung 2.6 ermittelt werden. Die dafür benötigten Parameter werden nachfolgend erläutert. [25]

$$a_w = \frac{c_w(v)}{q} \cdot \frac{\rho(y)}{2 \cdot v^2} \quad (2.6)$$

Der Luftwiderstandsbeiwert c_w ist abhängig von der aktuellen Geschossgeschwindigkeit v . Die konkreten Zusammenhänge werden anhand der Abbildung 2.4 erläutert. [25]

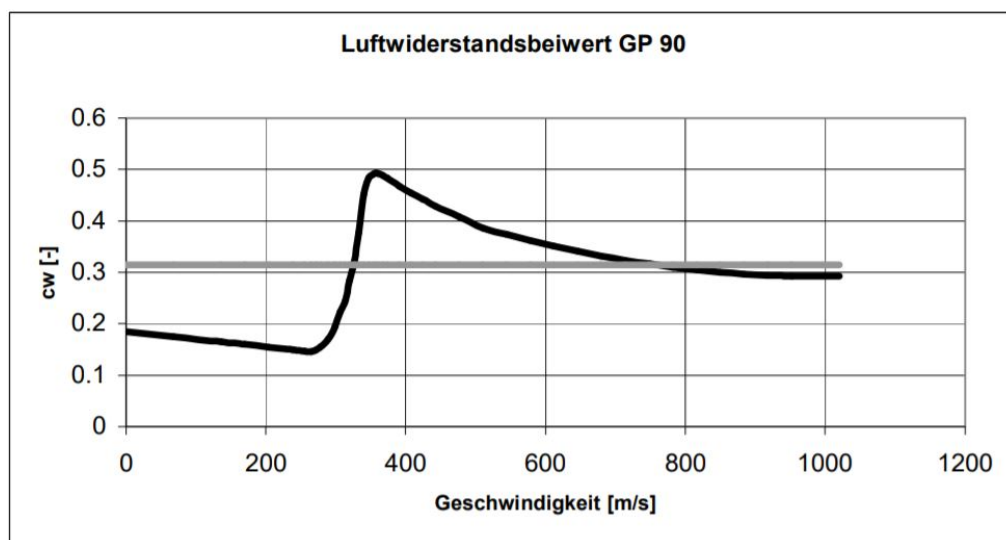


Abbildung 2.4: Die Grafik stellt den exemplarischen Verlauf des Luftwiderstandsbeiwerts c_w vom Munitionstyp GP 90 in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit $v \left[\frac{m}{s} \right]$ dar. [25]

Besonders auffällig ist der starke Anstieg des Luftwiderstandsbeiwerts im Bereich der Schallgeschwindigkeit. Am Beispiel der GP 90 nähert sich der Wert anschließend mit größer werdender Geschwindigkeit der 0,3 an und verläuft konstant auf dieser Ebene. In Abhängigkeit zur Geschossform weist dieser Wert deutliche Schwankungen auf. q bezeichnet in der Gleichung 2.6 die Querschnittbelastung der Geschossmasse zur Querschnittfläche. Die Dichte ρ steht in Abhängigkeit zur Flughöhe y . Die konstante Erdanziehungskraft bewirkt eine ständig wechselnde Beschleunigung durch den Luftwiderstand in Abhängigkeit zum Ort und der Geschossgeschwindigkeit v . Diese Komplexität der Funktion wird weiterhin durch den Luftwiderstandsbeiwert c_w verstärkt. Da die Bahnkurve $c_w(v)$ wie in Abbildung 2.4 dargestellt eine mehrfache Krümmung aufweist, ist eine einfache Integration der Bewegungsgleichung für die korrekte Berechnung nicht mehr ausreichend. Die Berechnung muss auf einen Computer mit hoher Rechenleistung umleitet werden. [25]

Der Luftwiderstand stellt das Hauptproblem bei der Berechnung der Flugbahn dar. Bei der Geschossbewegung durch die Luft wird diese verdrängt. Da die Trägheit der Luft eine eigene Masse besitzt, wird die Bewegung begrenzt und kann nicht uneingeschränkt fortgesetzt werden. Die Luft besitzt die Eigenschaft der Kompression, wodurch das schnelle Geschoss eine Druckwelle verursacht. Die Geschwindigkeit mit der sich diese Welle ausbreitet, wird als Schallgeschwindigkeit definiert. Zur Verdeutlichung der folgenden Zusammenhänge wird die dimensionslose Geschwindigkeit als sogenannte „Machzahl M “ definiert. Diese ist durch „das Verhältnis der Geschwindigkeit v eines Körpers zur herrschenden Schallgeschwindigkeit a “ charakterisiert. Geschosse, die mit Unterschallgeschwindigkeit fliegen, werden als subsonisch ($M < 1$) bezeichnet. Die entstehende Druckwelle ist somit schneller als das eigentliche Geschoss und kann demnach eher von einem Beobachter wahrgenommen werden. Mit zunehmender Geschwindigkeit vergrößert sich auch der Widerstand der Luft, da eine enorme Verdichtung der Luft erfolgt. Fliegt ein Geschoss mit Schallgeschwindigkeit $344 \frac{m}{s}$, d.h. $v = a$, so beträgt die Machzahl $M = 1$ und die Geschossbewegung wird als transsonisch beschrieben. Im zunehmenden Flugverlauf erfolgt eine Verdichtung der Wellenfronten, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt als Schallmauer überlagern. Wird die Geschosseschwindigkeit nun größer als die Schallgeschwindigkeit, ist das Geschoss schneller als die Wellenfronten und der Luftwiderstand sinkt, da sich das Geschoss in ruhender Luft befindet. Dieser Zustand wird als supersonisch, $M > 1$, beschrieben. Ein außenstehender Beobachter würde den Überschallknall erst nach dem Vorbeifliegenden des Geschosses wahrnehmen können. Die eben erworbenen Erkenntnisse verdeutlichen die ausgeprägte Abhängigkeit des Luftwiderstandsbeiwertes von der Geschosseschwindigkeit beim Flugverlauf. Demnach wird bei $M = 1$ das Maximum des Luftwiderstandsbeiwertes erwartet. Abbildung 2.4 bestätigt diesen charakteristischen c_w -Verlauf. [25]

Atmosphärische Bedingungen Die markierten Werte der ICAO-Standardatmosphäre in Tabelle 2.5 dienen im Folgenden als Ausgangspunkt für die meteorologischen Bedingungen bezüglich der Rekonstruktion von Geschossbahnen. Pro 100 *m* Höhenzunahme verweist die ICAO-Standardatmosphäre eine lineare Zunahme der Temperatur von 0,65 *K* bis zur Tropopause in 11 *km* Höhe. [32]

geopot. Höhe [m]	Luftdruck [mb]	Temperatur [°C]	Temperatur [K]	Luftdichte [kg/m ³]	g(y) [m/s ²]
0	1013.25	15.00	288.15	1.225	9.8067
250	983.6	13.40	286.53	1.196	9.8059
500	954.6	11.80	284.90	1.167	9.8051
750	926.3	10.10	283.28	1.139	9.8043
1000	898.7	8.50	281.65	1.112	9.8036
1250	877.2	7.20	280.35	1.090	9.8028
1500	856.0	5.90	279.05	1.069	9.8020
1750	835.2	4.60	277.75	1.048	9.8013
2000	795.0	2.00	275.15	1.006	9.8005

Abbildung 2.5: Die Tabelle zeigt die meteorologischen Daten Luftdruck [mb], Temperatur [°C], Temperatur [K], Luftdichte [$\frac{kg}{m^3}$] und Gravitation [$\frac{m}{s^2}$] der ICAO-Standardatmosphäre in Abhängigkeit zu einer Bezugshöhe [*m*] an. [15]

Da der Zustand der wirklichen Atmosphäre zum Tatzeitpunkt häufig nicht bekannt ist, werden für ballistische Berechnungen die Gegebenheiten der Normalatmosphäre verwendet. Der Einfluss des Temperaturprofils ist umso größer, je weiter die zurückgelegte Flugdistanz ist. Zu den maßgebenden Eigenschaften der Materie gehört die Dichte ρ , die bei fluiddynamischen Prozessen miteinzubeziehen ist. Die Berechnung der aktuellen Luftdichte anhand der Bezugshöhe sowie dem Luftdruck erhöht die Genauigkeit von Schätzungen der Flugbahn und des Auftreffpunkts. [15]

Unter Voraussetzung der neutralen thermischen Sichtung ist eine logarithmische Zunahme der Windgeschwindigkeit in Bodennähe bis 100 *m* zu verzeichnen. Vom ballistischen Standpunkt aus wirkt dieser bodennahe Wind abhängig von der Flugzeit auf das Geschoss. Der durch den Staudruck entstehende Luftwiderstand beeinflusst die Relativgeschwindigkeit der Luft in Bezug auf das Geschoss. Mit anderen Worten besitzt der Wind einen entscheidenden Einfluss auf die Berechnung der Flugbahn. Die Relativgeschwindigkeit v_{rel} ergibt sich aus der Geschossgeschwindigkeit v abzüglich der Windgeschwindigkeit v_W . [15]

$$v_{rel} = v - v_W \quad (2.7)$$

2.3.4 Endballistik und das Verhalten abprallender Geschosse

Die Endballistik beschäftigt sich damit die Wirkungsweise des Geschosses am Auftreffpunkt zu beschreiben, solange bis der Ruhezustand eingetreten ist. Hierbei wird anhand des getroffenen Mediums in Festkörper und Flüssigkeiten unterschieden. [18]

Bezogen auf Festkörper kann allgemein hervorgehoben werden: Je höher die Geschwindigkeit des Geschosses ist, desto höher ist die Tiefe des Eindringens in das Objekt. Beim Auftreffen eines Geschosses auf einen Körper wird die Geschossenergie in Form von Wärme abgesondert und gegebenenfalls vom Körper aufgenommen. Diese kann neben der plastischen Verformung des Aufpralls eine permanente Veränderung des Erscheinungsbildes erzeugen. Beim Eindringen des Geschosses in Festkörper entsteht ebenfalls eine Verformung des Projektils. Diese ist abhängig von den Materialeigenschaften des Untergrundes. [18]

Das Auftreffen des Geschosses auf Flüssigkeiten ermöglicht die Übertragung der Geschossenergie auf das flüssige Medium. Hierbei wird die Flüssigkeit in Form von kleinsten Spritzern verdrängt, bis die entstehende Reibung das Geschoss zum Stillstand bringt. Danach ist die Geschossbewegung der Viskosität sowie der Gravitation ausgesetzt. Das orthogonale Eindringen des Geschosses in eine Flüssigkeit oder eine feuchte Masse verursacht eine symmetrische Druckverteilung, die in der Realität jedoch in den seltensten Fällen gegeben ist. Im Normalfall erfolgt eine Zunahme des Drucks entlang der Normalkomponente der eingedrungenen Oberfläche. Das Geschoss wird im weiteren Verlauf im Inneren des Körpers von der Oberfläche abgedrängt. Ist der Einschusswinkel sehr gering, bewegt sich das Geschoss wieder aus dem Körper heraus. [18]

Neben dem Auftreffmedium spielt die Anzahl der Geschosse eine erhebliche Rolle. Die Verwendung von Schrotpatronen oder Artilleriegeschossen, die eine Vielzahl von Patronen innerhalb kürzester Zeit abfeuern können, verursacht eine Streuung der auftreffenden Geschossteile. Dadurch wird eine Rekonstruktion des Ursprungsortes der Schussabgabe erschwert. [18]

2.4 Software Blender

Das Kapitel 2.4 „Software Blender“ beschäftigt sich mit den blender-spezifischen Modellierungs- und Simulationsmöglichkeiten und stellt diese anhand ausgewählter Parameterkombinationen und *Add-ons* vor.

2.4.1 Grundlagenfunktionen in Blender

Blender bietet als frei verfügbare Software mit offenem Quellcode eine Vielzahl an Erstellungsmöglichkeiten von dreidimensionalen Visualisierungen. Hierbei wird die Software von fast allen modernen Hardwareplattformen unterstützt. Die erhöhte technische Komplexität von Blender kann unabhängig von dem verwendeten Quellcode Bilder, dreidimensionale Animationen sowie VFX-Szenen (*Visual Effect* Szenen) ermöglichen. [30] Die Funktionsweise der Software basiert auf der Skriptsprache Python, welche die Möglichkeiten des Modellierens und Animierens erweitern kann. Blender ermöglicht weiterhin das Bearbeiten und Schneiden von Videosequenzen. [42]

Die zahlreichen Arbeitsbereiche in Blender, auch **Workspaces** genannt, können, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, flexibel nach den Bedürfnissen des Benutzers angepasst werden. Sie befinden sich in der oberen Leiste des Ansichtsfensters. Zu den standardmäßig sichtbaren Arbeitsflächen, die eine Vorschau der modellierten Szene generieren, gehören der *3D Viewport*, der *Outliner*, der *Properties Editor* sowie die *Timeline*. [29]

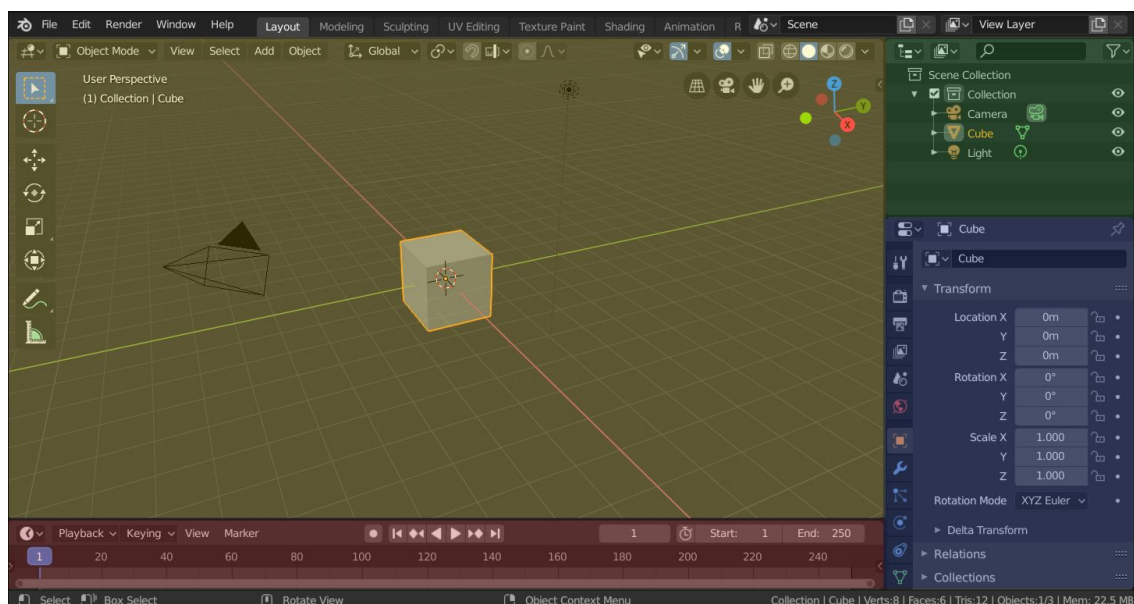


Abbildung 2.6: Die Abbildung zeigt die Standardansicht der Arbeitsszene beim Starten von Blender. Die *Workspaces* sind zur besseren Visualisierung farbig abgebildet. Der *3D Viewport* ist gelb, der *Outliner* grün, der *Properties Editor* blau und die *Timeline* rot hinterlegt. [29]

Modifier sind Operatoren, die die Geometrie eines Objektes beeinflussen. Sie besitzen die Eigenschaft Effekte automatisiert umzusetzen und vereinfachen somit die Modellierung von Objekten. Dies geschieht ohne Beeinflussung der grundlegenden Objektgeometrie. Um *Modifier* hinzuzufügen muss im *Properties Editor* die Registerkarte *Modifier Properties* ausgewählt werden. Grundsätzlich wird zwischen den *Modifier* Arten *Modify*, *Generate*, *Deform* und *Simulate* unterschieden. [28]

Speziell wird die Modellierung in Blender mithilfe von Polygonnetzen vorgenommen. Diese sogenannten **Meshes** dienen dem *Sculpting* von dreidimensionalen Objekten. *Keyframes* können basierend auf einem Skript oder der zugrundeliegenden Physik animiert werden. Neben dreidimensionalen Formen können ebenfalls Partikelsysteme realisiert werden. [42]

Particles sind eine Vielzahl an Einzelementen, die aus einem Objekt bestehend von *Meshes* ausgesendet werden. Jedes einzelne Partikel kann beispielsweise als Lichtpunkt oder Punkt eines *Meshes* in verbundener oder dynamischer Form auftreten. Hierbei werden sie durch eine Vielzahl an physikalischen Einflüssen und Kräften verändert. Dynamische Partikel können als komplexe Konstrukte Flüssigkeiten, Rauch, Feuer und Texturen, wie beispielsweise Kleidung, Fell oder Pflanzen sowie ähnliche Erscheinungen simulieren. Sie werden in Haar und Emitter Partikel unterschieden. Haare werden hierbei als Stränge gerendert, wobei die Emitter Partikel eines Objektes aussenden. Die komplexe Verhaltensweise der Teilchen wird unter den *Particle Properties* definiert. [11]

Measure kann als interaktives Werkzeug der *Toolbar* Entfernungen und Winkel messen. Dies geschieht mit Hilfslinien, die zwischen zwei *Vertices* aufgespannt werden können. Diese Hilfslinien dienen als Lineal und geben die Messstrecke zwischen den beiden Bezugspunkten an. Sie können nach Belieben verschoben werden. Durch das Auswählen und Verschieben des Mittelpunkts, kann das Lineal in einen Winkelmesser umgewandelt werden. Das Tool verbessert demnach die Genauigkeit bei der Modellierung von Objekten. [28]

2.4.2 Animation, Keyframing und Rendering

Die nachfolgenden Abschnitte beziehen sich auf die Funktionsweise der blender-internen Animationsmöglichkeiten unter Verwendung von *Keyframes*, *F-Curves* sowie dem *Rendering* bei Betrachtung der Bildberechnung und der Echtzeitgrafik.

Animation „Animation ist die Bewegung eines Objekts im dreidimensionalen Raum.“ Um eine Animation unter der aktuellen Version von Blender vorzunehmen, wird der *Animation* und *Rendering Workspace* verwendet. [11] Bei einer einfachen Pfadanimation erfolgt der Verlauf einer Bewegung anhand von definierten Kurven. Bewegungen können neben einfachen Effekten auch als Simulation berechnet werden. Die physikalischen Parameter einer Szene können hierbei durch das *Keyframing* kontrolliert werden. Die Computergrafik ermöglicht anschließend auf Grundlage von mathematischen Formeln das Visualisieren der Szene. Diese blender-internen Visualisierungsmöglichkeiten erlauben mit geringem Aufwand das Realisieren von animierten Positionen, die Orientierung im Raum sowie die verschiedenen Größen und Farben von Objekten darzustellen. [42] Die Erklärung von essentiellen Fachbegriffen erleichtert im Folgenden das Verständnis für die Animationserstellung in Blender.

Keyframing Einfach ausgedrückt sind *Frames* (dt. Rahmen) einzelne Standbilder, die Schritte auf dem Zeitstrahl definieren. Die Anzahl der *Frames* pro Sekunde ist die Anzahl der Standbilder, die innerhalb einer Szene schrittweise pro Sekunde gezeigt werden. Eine Sequenz aus *Frames* erschafft ein bewegtes Bild. *Keyframes* sind die wichtigsten Schlüsselszenen in einem bewegten Bild und dienen als Grundlage der Animation. Ein *Keyframe* ist somit ein *Frame*, bei welchem eine Veränderung der *Timeline* auftritt. Sie können für eine Animation manuell durch den menschlichen Animator gesetzt werden. *Keyframes* werden an den Stellen gesetzt, wo sich die Hauptpositionierung der Charaktere befindet. Innerhalb einer digitalen Animation können die sogenannten *Interframes* zwischen den definierten *Keyframes* interpoliert werden. Hierzu sind mindestens zwei *Keyframes* notwendig. Der Computer berechnet die Zwischenwerte mathematisch, sodass ein gleichmäßiger und flüssiger Bewegungsablauf zwischen den *Keyframes* entsteht. Dieses Verfahren wird auch als ***Tweening*** bezeichnet. [11] [42] [4]

Bei dem Gebrauch von mehreren *Keyframes* wird ebenfalls eine ***F-Curve*** erstellt. Eine sogenannte F-Kurve realisiert grundlegend die Interpolation zwischen zwei animierten Zuständen oder Eigenschaften von Objekten. [28] Diese kann generierte Animationen bearbeiten und verringert das redundante Erstellen von *Keyframes*. Um ein anschauliches Beispiel anzubringen, wird hierbei auf das Prinzip des sogenannten „Daumenkinos“ verwiesen. Bei einer solchen zweidimensional animierten Darstellung werden Einzelbilder innerhalb kürzester Zeit abgespielt. Diese sind mit den *Keyframes* gleichzusetzen. *Motion Tweens* sind animierte Bewegungen von zumeist geometrischen Formen,

die sich in Größe und Ausdehnung ändern. Durch die Verbindung von zwei getrennten *Keyframes* entstehen *Motion Tweens*, die die Vorgehensweise einer *F-Curve* verdeutlichen. [11]

Keyframing in Blender arbeitet funktionstechnisch für Objekte, Knochen sowie Werte gleich. Zur Manipulation von *Keyframes* existieren drei *Keyframe* Editoren: der *Graph Editor*, das *Dope Sheet* und die *Timeline*. Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich auf die Standardansicht der *Timeline* innerhalb des *Workspace*. [4] *Keyframes* können in verschiedenen Weisen eingefügt werden. Zunächst kann bei der Auswahl eines Objektes über Rechtsklick das *Object Context Menu* geöffnet werden. Hierbei existiert die Option *Insert Keyframe*, die das *Insert Keyframe Menu* öffnet. Diese Option wird durch den *Shortcut I* repräsentiert. Weiterhin kann mit Rechtsklick auf einen Wert im *Properties Panel* geschaut werden, ob die *Insert Keyframe* Option besteht. Wird diese Option genutzt, kann der Wert als *Keyframe* verwendet werden. Hierbei färbt sich das Feld des Wertes gelb. Im aktuellen *Frame* der *Timeline* wird standardmäßig ein *Keyframe* erstellt und in Form einer gelben Raute visualisiert. Konkret kann mit der in Abbildung 2.7 dargestellten Option *Insert Keyframe* → *LocRotScale* ein *Keyframe* für alle drei *Transformation Panels* eingefügt werden. [4]

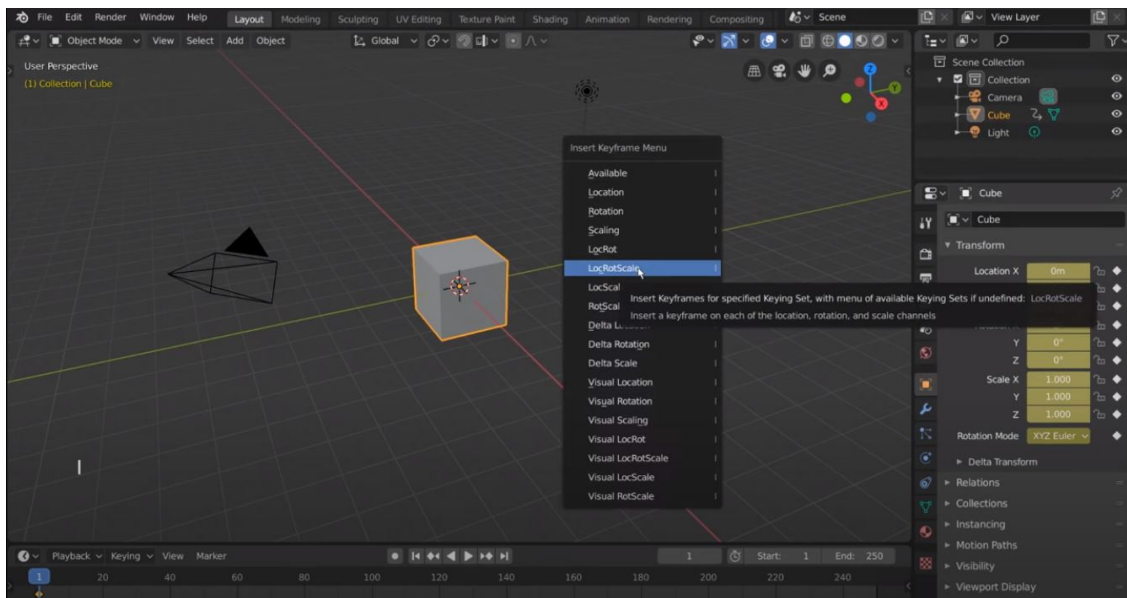


Abbildung 2.7: Der blender-interne Screenshot visualisiert das Erstellen eines *Keyframes* anhand der Option *LocRotScale*. Die Felder der Werte für *Location*, *Rotation* und *Scale* färben sich entsprechend der Vorgaben gelb und in der *Timeline* wird eine gelbe Markierung des *Keyframes* gesetzt. [4]

In der *Timeline* können mithilfe des Features *Auto Keying* automatisch generierte Änderungen an dem Objekt der dreidimensionalen Szene oder Transformationen von Werten als *Keyframes* gespeichert werden. Bei der Bewegung des Objekts werden die Werte im *Dope Sheet* überschrieben und das *Keyframe* aktualisiert sich. Um verschiedene

physikalische Transformationen des Objekts zu realisieren, müssen mehrere *Keyframes* gesetzt werden. Hierfür wird innerhalb der *Timeline* das aktuelle *Frame* manuell verändert. Bei diesem Prozess passiert das *Tweening* automatisch und die Simulation kann mithilfe des *Play Buttons* gestartet werden. [4]

Rendering Das Berechnen von Bildern und Animationen aus dreidimensionalen Datensätzen wird als *Rendering* gekennzeichnet. [42] Der *Rendering Workspace* dient dem Prozess zur Umwandlung einer 3D-Szene in ein zweidimensionales Abbild. Blender beinhaltet hierfür drei *Rendering Engines* mit verschiedenen Stärken. [11] Die neue *Workbench-Render-Engine* unterstützt die Darstellung im Ansichtsfenster hinsichtlich des Szenenlayouts und der Modellierung. [31]

Der auf den Gesetzen der Physik basierende *Cycles Renderer* kann aus den erstellten Rohdaten fotorealistische Endprodukte berechnen. Die Qualität der Übertragung ist abhängig von der Kameraeinstellung, dem vorhandenen Licht und den verwendeten Materialien. Diese Aspekte sind bis auf wenige Features sowohl in *Eevee* als auch in *Cycles* gleich. Die Renderer sind in diverse Ebenen, die sogenannten *Layers*, und Durchgänge, den *Passes*, aufgeteilt. Sie ermöglichen das kontrollierte Kombinieren von Ebenen mit echtem Filmmaterial. Für alle *Rendering Engines* unterstützt Blender die interaktive *3D Viewport* Anwendung. Im Zuge der finalen Animationswiedergabe ermöglicht es die schnelle und einfache Integration von Lichtverhältnissen und Schattierung. [11]

Die Bildverarbeitung basiert auf dem *Cycles Renderer*. Dieser verwendet moderne physikalische Verfahrensweisen zur Berechnung von *Interframes*. Durch das schnelle Abspielen der Bilder nacheinander, wird der Eindruck einer fließenden Bewegung vermittelt. Für das menschliche Auge reichen 20 Bilder pro Sekunde aus, um einen Bewegungsfluss der Animation zu erreichen. Da die Rechenleistung moderner Grafikkarten aktuell immer weiter verbessert wird, verwendet Blender die Echtzeitgrafik, um eine verbesserte Qualität bei der Bildberechnung zu generieren. Hierfür werden mit steigender Tendenz mindestens 25 Bilder pro Sekunde für eine flüssige Animation verwendet. Diese Echtzeitgrafik wird ebenfalls in der blender-internen *Game Engine* benutzt. Sie ermöglicht im Allgemeinen eine universelle Erstellung von komplexen Simulationen und Spielen. [42]

Neben der *Workbench Render Engine* und dem *Cycles Rendering* ist mit Version 2.8 ein neuer Renderer namens *Eevee* implementiert worden. *Eevee* basiert auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und ermöglicht das *Rendering* in Echtzeit. Es realisiert beispielsweise die Messung von Volumen, erstellt Reflexionen und Lichtbrechungen sowie die Schärfentiefe und Bewegungsunschärfe bei Kameras. Diese Funktionalitäten erweitern das reale Erstellen von Simulationen enorm. [28]

2.4.3 Game Engine und Ragdolls

Game Engines stellen in Form einer Software die Grundlage für das komplexe Konstrukt eines Videospiele dar. Sie definieren die technischen Rahmenbedingungen und dienen der Steuerung des Spielverlaufs. Somit gewährleisten sie eine immer größer werdende Vielfalt in der Visualisierung des Spielablaufs. Weiterhin werden *Game Engines* auch als Entwicklungsumgebungen verwendet, die die benötigten Werkzeuge für das Designen und Programmieren eines Spiels liefert. Hierbei bestehen meist vorgefertigte Bestandteile, die der Entwickler nach den eigenen Vorstellungen kombinieren kann. Die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten bieten vielfältige Vorteile bei der Erstellung eines eigenen Spiels. Zu den Bestandteilen von digitalen Spielen gehören die *Grafik Engine*, die *Physik Engine*, das Soundsystem, die Zustandsspeicherung, die Steuerung sowie der Netzwerk-Code, die Datenverwaltung und das *Skripting*. *Grafik Engines* definieren eine möglichst realistische Bildschirmdarstellung des Spiels. Dazu gehören unter anderem *Shader*, Effekte, Texturen sowie Text und 3D-Modelle. Das Physiksystem, auch *Physik Engine* genannt, erzeugt ein wirklichkeitsgetreues Verhalten von fotorealistischen Körpern und Objekten im Spielgeschehen. Externe Grafikkarten sorgen hierbei dafür, dass eine Hardwareunterstützung in Form einer erhöhten Rechenleistung gewährleistet wird. Zu den bekanntesten und verbreitetsten Vertretern der *Game Engines* gehören die Frostbite Engine von Electronic Arts, die Unreal Engine von Epic Games und CryEngine von Crytek. [17]

Ragdoll ist abgeleitet vom englischen *ragdoll* (dt. Lumpenpuppe) und ist als eine der häufigsten Funktionen in heutigen Actionspielen bekannt. Eine **Ragdoll Engine** beschreibt Algorithmen innerhalb einer *Game Engine*, die das Bewegungsverhalten von menschlichen Körpern innerhalb der Spielewelt simulieren. Als *Output* wird die Animation einer Echtzeitbewegung implementiert, ohne dass das Verhalten animierter Charaktere mithilfe von Skripten vorbestimmt ist. Die *Ragdoll Engine* ist ein Teil der Software-internen *Physik Engine* und wird mithilfe physikalischer Gesetzmäßigkeiten simuliert. Des Weiteren wird anhand des vorhandenen Körpers ein passendes Skelett berechnet, das nach Bedarf bei beispielsweise Knochenbrüchen mathematisch adaptiert sowie konfiguriert werden kann. Häufig wird auch das Bewegungsverhalten passiver Objekte beschrieben. Beispielhaft hierfür ist, wenn ein Objekt mit hoher Geschwindigkeit eine Wand durchbricht und die Teile der Wand durch den physikalischen Impuls davonfliegen. [24] [1]

2.4.4 Aufbau und Funktionsweise der Bullet Physik Engine

Physikalische Gesetzmäßigkeiten veranschaulichen die Phänomene der echten Welt. Sie kreieren eine Variation von statischen und dynamischen Effekten. Es existieren neun Typen der blender-internen *Physik Engine*: *Force Fields*, *Collision*, *Cloth*, *Dynamic Paint*, *Soft Body*, *Fluid*, *Smoke*, *Rigid Body* und *Rigid Body Constraint*. Da jeder Typ weitere Untergliederungen mit eigenen Einstellungsmöglichkeiten beinhaltet, werden nur die Haupttypen vorgestellt und anhand von Beispielen verdeutlicht. Anschließend werden die beiden *Modifier Force Fields* und *Rigid Body* aufgrund ihrer besonderen Relevanz inklusive geeigneter Parameter vorgestellt. [11]

Die Physik der Kraftfelder, auch ***Force Fields Physics*** genannt, beeinflusst die Simulation beispielsweise durch das Hinzufügen einer zusätzlichen Bewegung. Objekte der Art *Particles*, *Soft Body*, *Rigid Body* und *Cloth* können durch die *Force Fields* Physik beeinflusst werden, wobei diese automatisch einen Effekt auf alle Objekte der Szene ausüben. Die Einstellungsvariation dieser Physik hängt vom vorhandenen Objekttyp ab. Die formtechnische Ausprägung des Objekts beeinflusst die Richtungsberechnung der wirkenden Kraft. Es stehen hierbei 13 Optionen zur Verfügung: *Force (default)*, *Wind*, *Vortex*, *Magnetic*, *Harmonic*, *Charge*, Lennard-Jones, *Texture*, *CurveGuide*, *Boid*, *Turbulence*, *Drag* und *Smoke Flow*. Es existieren sowohl Typen mit den gleichen Einstellungen als auch Typen, die nur geringe Unterscheidungsmerkmale aufweisen. [11]

Generell wird bei der ***Collision Physics*** zwischen Kollisionen verschiedener Objekte und innere Kollisionen unterschieden. Das Hauptziel bei der Berechnung von Kollisionen ist die Bestimmung der *Vertices* (dt. Eckpunkte) eines *Soft Bodies*. Sind zu wenige Eckpunkte vorhanden, kann nur eine sehr geringe Anzahl an Kollisionen berechnet werden. Um eine Verbesserung der Berechnung zu erringen, werden die *Edges* (dt. Kanten) und *Faces* (dt. Flächen) mit einbezogen. [11]

Die Simulation von Stoffen, auch als ***Cloth Physics*** bekannt, ist im Bereich der Computer Generated Imagery (CGI) einer der schwierigsten Aspekte. Diese wirklichkeitsgetreue Konstruktion wird trotz seiner komplexen internen Struktur und den Interaktionen mit der Umwelt häufig unterschätzt. Neben einfachen Stoffen ermöglicht Blender ebenfalls die Simulation von beispielsweise Kleidung, Flaggen und Bannern. Durch externe und gleichzeitig bewegende Objekte und Kräfte findet eine Interaktion der Stoffe statt. Beispielhaft ist hierfür eine sich im Wind bewegende Fahne. Bei diesem Vorgang entsteht ein aerodynamisches Modell zwischen den interagierenden Objekten. *Cloths* können entweder als offenes oder geschlossenes *Mesh* auftreten. Es wird angenommen, dass die Stoffe die gleiche Dichte oder Masse pro Quadrateinheit besitzen. [11]

Das Physiksystem ***Dynamic Paint Physics*** verwandelt Objekte beispielsweise in bemalte Leinwände und Pinsel. Hierbei können Vertex Farben, Bildsequenzen oder Verschiebungen erzeugt werden. Beispiele für diesen *Modifier* sind realistische Fußspuren

im Schnee oder das Verhalten von Regentropfen auf nassem Untergrund. [11]

Die **Soft Body Physics** dient der Simulation verformbarer Objekte, wobei hauptsächlich sekundäre Bewegungen der Animation zum Zwecke der Anschaulichkeit hinzugefügt werden. Demnach werden bereits animierte Objekte mit einwirkenden Kräften versehen. Äußere Kräfte, wie Gravitation und Kraftfelder, wirken bei diesem Vorgang auf die Körperform ein. Innere Kräfte halten ergänzend dazu das Objekt zusammen. Beide Arten werden durch die *Soft Body Physics* realisiert. [11]

Fluid Physics dient der Simulation von Flüssigkeiten, insbesondere den Eigenschaften von Wasser. Innerhalb einer animierten Szene können bestimmte Objekte für eine Flüssigkeitssimulation markiert werden. Diese Objekte stellen direkt Flüssigkeiten oder deren Hindernisse dar. Zur Ermöglichung einer derartigen Animation wird eine Domäne als Schauplatz der Handlung definiert. Parameter, wie beispielsweise Viskosität oder Gravitation, können global in der Domäne eingestellt werden. Es werden sieben Typen von *Fluid Physics* Simulationen unterschieden: *Domain*, *Fluid*, *Obstacle*, *Inflow*, *Outflow*, *Control* und *Particle*. [11]

Als Teilbereich der *Fluid Physics* veranschaulicht die **Smoke Physics** jegliche Art von festen, flüssigen und gasförmigen Partikeln in der Luft. Diese treten häufig in Form von Raucherscheinungen auf. Die Textur besteht aus animierten Voxeln, die für das *Rendering* verwendet werden. Sie können hierbei Dichte und Wärme, aber auch die Geschwindigkeit von Flüssigkeiten und Partikeln verdeutlichen. Unterschieden werden *Domain*, *Flow* und *Collision* Simulationen. [11]

Rigid Body Physics simuliert die Bewegung solider Objekte, wobei die Position und Ausrichtung der Körper beeinflusst wird. *Rigid Bodies* stellen hierbei nicht verformbare Festkörper dar, deren Interaktion untereinander sowie mit Kraftfeldern simuliert werden kann. Im Gegensatz zu den anderen Simulationsarten findet hier eine enge Zusammenarbeit mit dem Animationssystem statt. Genauer gesagt stehen normale Objekte in einer Eltern-Kind-Relation zueinander, unterliegen Beschränkungen der Animation und den zugehörigen Treibern. [11]

2.4.5 Aufbau der Force Fields Physik

Mithilfe des *Force Fields Modifiers* können *Rigid Bodies* in ihrer Bewegung beeinflusst werden. Nachfolgend werden ausgewählte Parameter, die potentiell zur Rekonstruktion einer Flugbahn beitragen können, näher vorgestellt.

Im Allgemeinen dient der *Force Fields Modifier* zur Beeinflussung von Simulationen, da zu der momentanen Szene eine Bewegung ergänzt wird. *Force Fields* Kräfte können sich auf bestimmte Objekte, wie beispielsweise *Particles*, *Soft Bodies*, *Rigid Bodies* und *Cloth Objects* auswirken. Dieser Einfluss überträgt sich auf alle Objekte der Szene. Im *Field Weight Panel* kann der Einfluss auf bestimmte Objektsysteme verringert bzw. ver-

größert werden. Weiterhin ist zu beachten, dass sich interagierende Objekte innerhalb des kartesischen Koordinatensystems eine Ebene teilen müssen, damit die gesetzten Effekte eine Wirkung entfalten. Jedoch können Kraftfelder auch unabhängig von den Szeneobjekten existieren. Mit *Add* → *Force Fields* kann schließlich ein einzelnes Kraftfeld mit Wirkung auf ein ausgewähltes Objekt erstellt werden. Anschließend werden für die Problemstellung geeignete Konfigurationsmöglichkeiten von standardmäßig vorhandenen Parametern verschiedener Felder näher betrachtet. [28]

- *Shape* definiert die zu berechnende Kraftrichtung des Effektors.
- *Strength* definiert die Stärke der Krafteinwirkung in positiver oder negativer Richtung.
- *Flow* definiert wie schnell die Effektorbeschleunigung in eine konstante Luftströmungsgeschwindigkeit umgewandelt werden kann. Ist diese ungleich null, so steht sie in Abhängigkeit zur Partikelgeschwindigkeit.
- *Affect Location* beeinflusst den Ort der Partikel.
- *Affect Rotation* beeinflusst die Rotation der Partikel.
- *Tube* definiert bei einem röhrenförmigen Kraftfeld deren Radialkraft.

Von den insgesamt 13 existierenden *Modifier* Typen, die ein Kraftfeld simulieren können, haben die *Modifier Force*, *Wind* und *Curve Guide* eine gesonderte Bedeutung für die nachfolgende Rekonstruktion. In Abbildung 2.8 werden die drei Formen der Kraftfelder dargestellt.

Force als einfaches Kraftfeld generiert eine dauerhafte Krafteinwirkung auf den Objektsprung in positiver oder negativer Wirkungsrichtung. Die Teilchen, die den Newtonschen Gesetzen unterliegen, werden von einem positiven Feld abgestoßen. [28] Anhand Abbildung 2.8 ist erkennbar, dass das Kraftfeld durch konzentrische Kreise vom Mittelpunkt der Kraftwirkung zur Peripherie visualisiert wird. Je kleiner der Kreis desto näher ist er dem Zentrum und desto mehr Krafteinwirkung besitzt er in Bezug auf seine Umgebung.

Der Typ **Wind** generiert eine konstante Krafteinwirkung in eine bestimmte Richtung. Diese verläuft entlang der *z*-Achse des Zielobjekts und wird mithilfe eines Pfeils sichtbar gemacht. Die Stärke der Krafteinwirkung wird mithilfe von umgebenden, gleichgroßen, konzentrischen Kreisen um den Richtungspfeil dargestellt. Je größer der Abstand der Kreise zueinander ist, desto mehr Windkraft wirkt auf den Körper ein. [11]

Bei dem **Curve Guide Force Field** werden die Partikel dazu gezwungen einem vordefinierten Pfad zu folgen. Dieser wird durch ein *Curve Object* definiert. Sie dienen der Erstellung komplexer und gleichzeitig kontrollierter Animationen. *Curve Guides* beeinflussen alle Partikel des gleichen *Layers* unabhängig zum Abstand der Kurve. Dieser Mindestabstand kann durch die Option *Minimum Distance* reguliert werden. Da bei einer Flugbahnrekonstruktion das Geschoss direkt entlang der Kurve verlaufen soll, wird

dieser Parameter auf null gesetzt. Abbildung 2.8 zeigt auf der rechten Seite eine Kurve, deren Anfang und Ende durch jeweils einen Kreis gekennzeichnet ist. Zur Veranschaulichung verläuft parallel dazu ein Objekt, welches eine Vielzahl an Emittlern aussendet, die dem Pfad der Kurve folgen. [28]

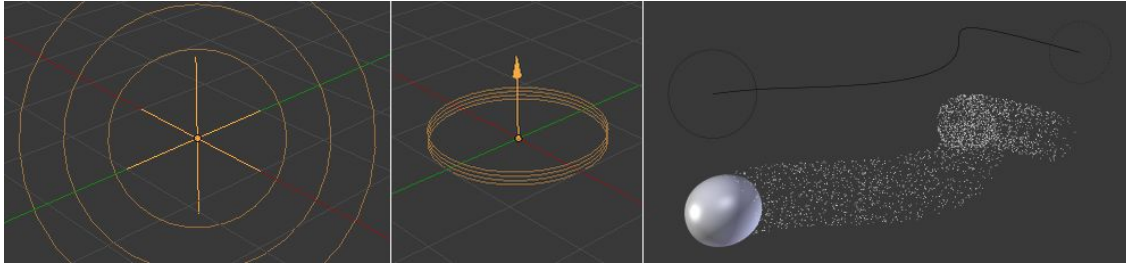


Abbildung 2.8: Die Abbildung verdeutlicht die Visualisierung der Kraftfelder *Force* (links) und *Wind* (Mitte) und *Curve Guides* (rechts) des *Force Fields Modifier*. [28]

2.4.6 Aufbau der Rigid Body Physik

Neben der grundlegenden Unterteilung in *Rigid* und *Soft Bodies* können die Körper eine statische oder dynamische Ausprägung haben. Aktive Körper werden dynamisch simuliert, während passive Körper statisch bleiben. Beispielsweise kann das Verhalten von Haaren, Gras, Regen, Rauch, Nebel oder Kleidung simuliert werden. Um diese Effekte einfach und schnell zu testen, kann über das Menü unter *Objects* die Einstellung *Quick Effects* ausgewählt werden. Es führt grundlegende Simulationen auf dem ausgewählten Objekt aus. Um jedoch ein detailliertes Abbild der Wirklichkeit zu schaffen, muss zunächst ein *Rigid Body* erstellt werden. Anschließend können die Eigenschaften seiner definiert werden. Die Umgebungsvariablen werden im nächsten Schritt ausgewählt und mögliche Beschränkungen aufgezeigt. [28]

Nachfolgend werden die Eigenschaften von *Rigid Bodies* genauer betrachtet. Hierbei werden die Optionen des *Panels Rigid Body* unter *Physics* näher beschrieben. Für das finale *Rendering* wird eine physikalische Simulation von Partikeln durchgeführt, um ein optimiertes Ergebnis zu erlangen. Hierfür kann eine Auswahl des Physik Typs zwischen *None*, *Newtonian*, *Keyed*, *Fluids* und *Boids* vorgenommen werden. Der Parameter *Mass* gibt die Masse der Gesamtheit aller Partikel an. Unter *Forces* kann die Brownsche Molekularbewegung spezifiziert werden, indem eine zufällige Bewegung der Teilchen generiert wird. Diese kann mit den Optionen *Drag* und *Damp* weiter angepasst werden. [11]

2.4.7 Vorstellung ausgewählter Add-ons

Add-ons sind Python-basierte Softwareerweiterungen, die das Programm um neue Funktionen ergänzen ohne Änderungen an dem eigentlichen Hauptprogramm vorzunehmen. [42]

Das *Add-on Impulse* ist der Vorgänger von *Projectile*. Aufgrund der Neuerungen in *Projectile* wurde die Weiterentwicklung und somit Verbesserung von *Impulse* durch den Entwickler Nathan Craddock eingestellt. Da die Funktionsweise jedoch nicht vollständig identisch ist, wird das *Add-on* im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt.

Impulse definiert die anfängliche Geschwindigkeit von Objekten, um diese schnell und einfach in Bewegung versetzen zu können. Mit dem Ziel einen hohen manuellen Aufwand zu vermeiden, können wirklichkeitsgetreue Geschwindigkeiten von Körpern simuliert werden ohne jedes *Keyframe* einzeln modellieren zu müssen. Das *Add-on* verfügt zusätzlich über die Funktion einen Ort festzulegen, der als Zielpunkt der Bewegung dient. Nachdem mit *Add Object* ein aktiver *Rigid Body* hinzugefügt wurde, kann zwischen den Optionen *Initial Velocity* sowie *Goal* unterschieden werden. Die Veränderung der *x*-, *y*- und *z*-Richtung der Geschwindigkeitseinstellung ermöglicht die Bewegung des Objekts anhand der gewählten Größe. Mit *Goal* kann ein Zielpunkt gesetzt werden, den das Objekt nach dem Start der Simulation ansteuert. Die manuelle Rotation des Zielpunkts verursacht weiterhin das Rotieren des Objektes beim Durchfliegen, obwohl vorher keine derartige Einstellung definiert wurde. Um die Simulation zu starten, müssen die Einstellungen mit *Initialize Velocity* aktiviert werden. [8]

Das seit Version 2.8 vorgestellte *Projectile Add-on* gilt als offizieller Nachfolger von *Impulse* und kann ab Blender 2.7 aufwärts verwendet werden. *Projectile* kann zusammenfassend initialisierte Geschwindigkeiten für ein in der Szene platziertes Objekt festlegen. Hierzu werden kurze sowie einfache Animationen erstellt, die im Normalfall eine Vielzahl an Zwischenschritten erfordern. Nachfolgend werden signifikante Merkmale vorgestellt, die die Vorteile der Anwendung unterstreichen. [38]

Die Verfolgung der Flugbahnen durch Trajektorien vermittelt eine Vorstellung der Objektinteraktion mit der umgebenden Szene. [7] Trajektorien stellen im Bereich der Physik Bahnkurven dar, entlang derer sich ein Körper in Form eines Massepunkts bewegt. [10] Das *Add-on* ermöglicht weiterhin das komplette *Keyframing*. Es erstellt demnach alle Rahmenbedingungen der Szene, wodurch nur die Geschwindigkeit eingestellt werden muss. Da jeder Emitter unabhängig voneinander konfiguriert wird, können jederzeit Änderungen vorgenommen werden. Die Anwendung ist bezüglich der verwendeten Einheiten kompatibel mit den Dateien des *.blend* Formats. Die Verwendung wirklichkeitsgetreuer Einheiten ermöglicht außerdem die exakte Berechnung der Geschosseschwindigkeiten. [7]

2.5 Finite Element Analyse

Der nachfolgende Exkurs dient der Übertragung von Teilproblemen der Flugbahnrekonstruktion auf eine gehobene wissenschaftliche Ebene. Im Diskussionsteil ist zu prüfen, ob die Anwendung der Methode für die Problematik von Vorteil ist. Hierzu wird sie zunächst anhand eines Anwendungsbeispiels vorgestellt.

Die Hauptidee hinter der Finite Element Methode (FEM) bzw. Finite Element Analyse (FEA) ist es, komplexe Problemstellungen mithilfe von einfachen Problemen zu ersetzen. [23] Jede Art von Simulation stellt eine Vereinfachung der realen Welt dar und bedarf einer umfangreichen Analyse. [21] Mathematische Methoden berechnen hierbei annähernd korrekte Lösungen, um so nah wie möglich an die exakte Lösung des praktischen Problems zu gelangen. Es wird angenommen, dass der Lösungsbereich aus einer Menge an kleinen, miteinander verbundenen Teilregionen besteht. Diese werden Elemente genannt. Die FEM repräsentiert demnach eine komplexe geometrische Struktur, die sich aus vielen Einzelementen zusammensetzt. [23]

Der Anwendungsbereich der FEM ist breit gefächert. Die wohl häufigste Verwendung befindet sich im Bereich des Ingenieurwesens. [23] Zur Veranschaulichung werden virtuelle Bauteile sowie deren Verformungen und Interaktionen unter Krafteinwirkung berechnet. Abbildung 2.9 zeigt ein hierfür repräsentatives Beispiel aus dem Bereich der Ingenieurwissenschaften. Im nächsten Schritt kann diese Geometrie aus bestehenden CAD-Programmen (Computer-Aided-Design) übernommen und angepasst werden. [21]

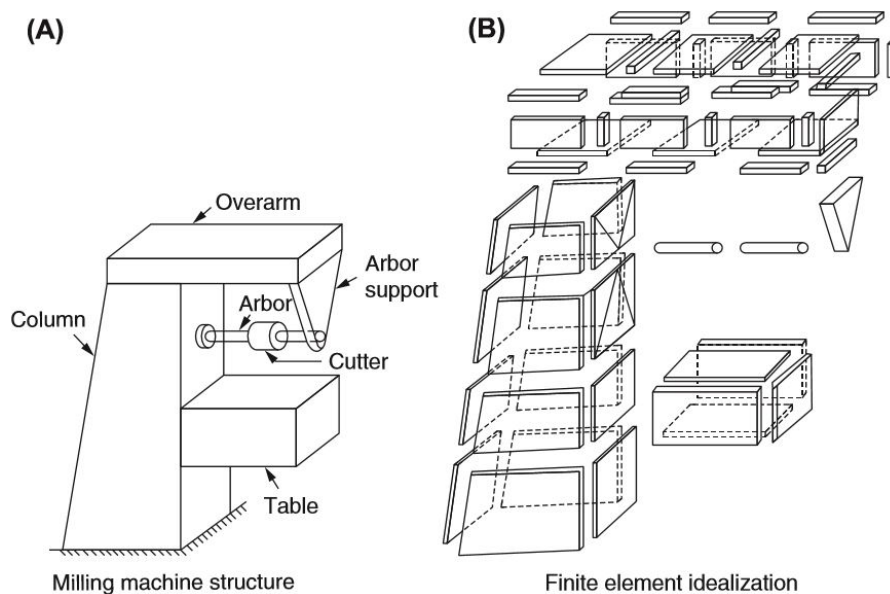


Abbildung 2.9: Die Abbildung stellt die Struktur einer Fräsmaschine mithilfe von finiten Elementen dar. Teil A zeigt hierbei die eigentliche Struktur der Maschine in Form einer Arbeitsskizze. Teil B veranschaulicht die Idealisierung dieser Struktur durch finite Elemente. [23]

Praktische Anwendung findet die Methode auch bei der Wärmeleitung, Fluidodynamik und bei Magnetfeldern. [23] Der Vorteil besteht hierbei in der frühzeitigen Erkennung und Vermeidung möglicher Fehlerquellen. Daraus resultiert ein enormer Profit bezüglich der Entwicklungszeit und den entstehenden Kosten bei der Verarbeitung. [21]

Aus mathematischer Sicht betrachtet, werden hierfür numerische Lösungen von gewöhnlichen und partiellen Differenzialgleichungen ermittelt. Die sogenannten Elemente sind weiterhin durch sogenannte *Nodes* oder *Node Points* miteinander verbunden. Die tatsächliche Variation der *Force Field* Variablen ist eingangs nicht bekannt. Variablen, wie beispielsweise Temperatur, Druck und Geschwindigkeit, werden daher innerhalb von einem finiten Element mithilfe einer mathematischen Annäherungsfunktion beschrieben. [23] Neben der mechanischen Verformung wird besonders auf das Wechselspiel zwischen Festkörpern (*Rigid Bodies*) und Flüssigkeiten (*Fluids*) unter Einwirkung physikalischer Kräfte Wert gelegt. [21]

Die Finite Element Analyse beginnt mit dem **Import** von Datensätzen, die das virtuelle Objekt zweidimensional oder dreidimensional charakterisieren. Es wird zwischen dem direkten und indirekten Import unterschieden. Ersteres generiert eine Hüllform mithilfe von CAD, die durch finite Elemente annähernd nachgebildet wird. Im Gegensatz dazu dienen bei der indirekten Variante Knotenpunkte sowie eine Koinzidenzliste als Referenz des Objektes. Das nachfolgende **Pre-Processing** beinhaltet das Zerlegen der Objekte in kleine Einzelteile, die finiten Elemente. Hierbei findet die Vernetzung der finiten Elemente, das sogenannte *Meshing* statt. In diesem Schritt wird weiterhin das Material des Werkstoffes festgelegt und bestimmte Randbedingungen definiert. Anschließend wird das FEM dem **Solver** übergeben, das eine Vielzahl an mathematischen Gleichungen löst. Hierbei werden einzelne Knotenpunkte verschoben. Im nächsten Iterationsschritt können dann Verzerrungen sowie Spannungen und Kräfte auf die Knoten ermittelt werden. Das **Post-Processing** dient der visuellen Aufbereitung der Berechnungsergebnisse. Anhand einer solchen Grafik können grundlegende Aussagen über die Haltbarkeit des Bauteils, die Genauigkeit sowie eventuelle Veränderungen der Knotenpunkte getroffen werden. Die Aufbereitung ist hierbei stark abhängig von den eingegebenen Daten. Im letzten Schritt, dem **Export** der Daten, werden die Ergebnisse der Simulation standardmäßig von Tabellenkalkulationsprogrammen ausgewertet und interpretiert. Die daraus folgenden Erkenntnisse können abschließend in einem Bericht oder für einen 3D-Drucker exportiert werden. [21]

3 Methoden

3.1 Allgemeine Verfahrensweise

Nachfolgend wird die schrittweise Parametrisierung der eingangs geschilderten Problemstellung auf Grundlage aller bisher erhobenen Informationen durchgeführt. Im Hinblick auf die Lösung der Gesamtsystemproblematik wird der in Abbildung 3.1 dargestellte Arbeitsprozess, in Teilschritte untergliedert, die mithilfe geeigneter Software umgesetzt werden können.

Zu Beginn erfolgt die theoretische Simulation der Problemstellung anhand der Simulationsschritte von Bungartz et al. Anschließend wird die Flugbahn in ihre Grundbestandteile gegliedert. Hierfür wird das Geschoss zunächst anhand eines realen Vorbildes als 3D-Modell dargestellt. Im Zuge dessen wird getestet, ob es als *Ragdoll* für Kollisionen verwendet werden kann. Die Realisierung von Kollisionen dient im nächsten Schritt als Grundlage für die Umsetzung des *Impulse Add-ons*. Anschließend liegt der Fokus auf der Parametrisierung der eigentlichen Flugbahn. Diese kann unter Zuhilfenahme zweier blender-interner *Add-ons* geschehen. Beide Vorgehensweisen werden nachfolgend beschrieben und im Anschlusskapitel miteinander verglichen. Die Umsetzung der physikalischen Krafteinwirkung kann hierbei durch das *Impulse Add-on* sowie das *Projectile Add-on* beschrieben werden. Neben den Standardeinflüssen auf die Geschossbahn können in Blender atmosphärische Einflüsse realisiert werden. Dies geschieht vorrangig durch die Verwendung des *Force Fields Modifiers*. Am Ende werden alle Einzelschritte zu einem Gesamtbild zusammengefügt und diskutiert. Die Veränderung der Flugbahn durch den Höhenfehler wird in der Umsetzung mit Blender nicht beachtet. Eine Ausführung dieser Problematik folgt im Kapitel 5.2.3. Die konkreten Arbeitsschritte beim Aufbau des in Abbildung 3.1 visualisierten *Workflows* werden im Folgenden detailliert erläutert.

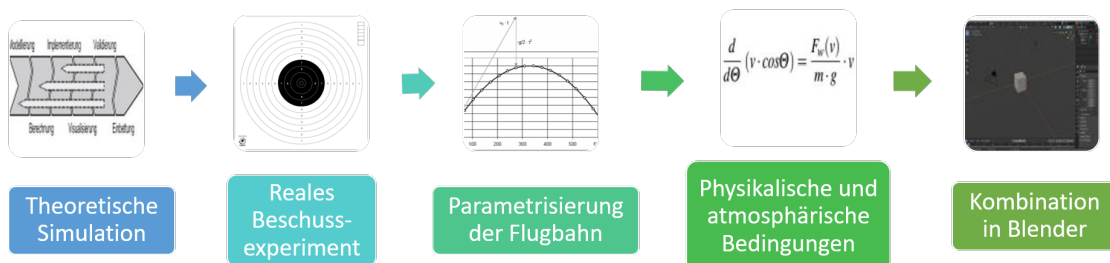


Abbildung 3.1: Die Grafik verdeutlicht die vereinfachten Arbeitsschritte von der realen Experimentbeschreibung zur Erstellung einer finalen Flugbahn in Blender.

3.2 Theoretische Simulation der Problemstellung

Anhand der in Kapitel 2.2 „Simulation und Modellierung“ beschriebenen Simulationspipeline wird der grundlegende Ablauf einer Flugbahn Simulation beschrieben. Im ersten Schritt, der Modellierung, werden mathematische sowie physikalische Formeln zur formalen Beschreibung von Teilabschnitten verwendet. Hierzu wird das Modell einer Flugbahn in die Teilabschnitte Flug im Vakuum und Flug in der Luft unterschieden. Die beiden Hauptgliederungspunkte können anschließend erneut in die Berechnung der einzelnen Parameter unterteilt werden. Somit entsteht ein vereinfachtes Abbild der wirklichkeitsgetreuen Problemstellung. Der nachfolgende Berechnungsschritt führt die Überlegungen des ersten Schrittes aus, indem Algorithmen zur Lösung erstellt werden. Anschließend werden die untergliederten Berechnungen bei der Implementierung mithilfe geeigneter Software gelöst. Hierbei können die Gleichungen der Flugbahn im Vakuum manuell ermittelt werden. Da die Berechnung der Flugbahn in der Luft bezüglich der iterativen Integration zu komplex ist, wird auf eine exakte Berechnung verzichtet. Mithilfe von Trajektorien übernimmt die Software Blender einen Teil der Flugbahnberechnung. Dem Bereich der Visualisierung wird mithilfe von Blender eine große Bedeutung beigemessen. Durch die Variation und Kombination der verschiedenen Einstellungsparameter wird der Einfluss auf die Flugbahn verdeutlicht. Um die erhaltenen Erkenntnisse zu validieren, werden mögliche Fehlerquellen der Simulation differenziert betrachtet. Auf eine konkrete Einbettung der Versuchsergebnisse wird vorläufig verzichtet.

3.3 Beschreibung eines realen Beschussexperiments

Um die digitale Rekonstruktion zu unterstützen, werden zunächst ausgewählte physikalische Parameter manuell berechnet. Diese beschreiben ein Beschussexperiment unter realen Bedingungen. Das Ziel hierbei ist es, Aussagen über die Validierung des Versuchsergebnisses zu treffen sowie eine angepasste Fehleranalyse durchzuführen. Sie geben demnach Aufschluss, ob die erworbenen Erkenntnisse in der realen Welt anwendbar sind und ob diese der gerichtsfesten Argumentation standhalten können. Weiterhin liegt der Fokus auf der Herkunftsbestimmung des Geschosses. Konkret werden hierzu die Grenzdistanz D sowie die Flugdistanz y berechnet. Dies geschieht unter Verwendung der exemplarischen Werte einer 9 mm Luger des Geschützes Glock 17. Die physikalischen Parameter werden zur Berechnung in einer Übersicht zusammengestellt. Anhand dieser wird das Verhalten des Geschosses unter Betrachtung physikalischer Einflüsse während der Flugbahn beschrieben. Auf Grundlage der vorangegangenen Betrachtungen wird die ideale Flugbahnrekonstruktion charakterisiert.

3.4 Unterteilung der digitalen Flugbahnrekonstruktion

Für die Umsetzung der physikalischen Krafteinwirkung in der Software Blender wird zunächst die grundlegende Modellierung der Versuchsszene beschrieben. Anschließend werden vier Vorgehensweisen zur Simulationserstellung vorgestellt. Dies geschieht unter Anwendung der Kenntnisse zum *Keyframing* aus dem Abschnitt 2.4.2. Weiterhin werden die blender-internen *Add-ons Impulse* und *Projectile* sowie der *Force Fields Modifier Curve Guide* verwendet.

3.4.1 Modellierung des grundlegenden Versuchsaufbaus

Die gemeinsame Konfiguration der Versuchsszene dient als Basis für die nachfolgenden Betrachtungen. Der allgemeine Versuchsaufbau wird beginnend mit der Parametrisierung einer dreidimensionalen Patrone beschrieben.

Parametrisierung des Geschosses als 3D-Modell Nachfolgend wird mithilfe der Anwendung der *Ragdoll Engine* die Modellierung einer *Ragdoll* beschrieben. Es wird hierbei getestet, ob sich diese Methodik gleichermaßen in vereinfachter Form auf das Geschoss übertragen lässt und welche Methode als Alternative verwendet werden kann. Die Modellierung einer *Ragdoll* geschieht unter Zuhilfenahme der Optionen *Rigid Bodies* und *Rigid Body Constraint* des *Physics Panels*. Als Grundlage dienen geometrische Formen, die je nach Bedarf platziert werden. Mithilfe von Skalierungs-, Duplizierungs- und Rotationsschritten können die Objekte so definiert werden, dass ein Körper aus mehreren Einzelteilen entsteht. Damit die einzelnen Körperteile ein zusammengefügtes Objekt ergeben, wird jeweils eine *Plain Axis* (*Add* → *Empty* → *Plain Axis*) mittig in die Zwischenräume der Körperteile platziert. Nachdem der *Rigid Body Constraint* Parameter von *Fixed* zu *Point* gewechselt und das Häkchen bei *Disable Collisions* entfernt wurde, wird zusätzlich ein *Constraint* in jeden Zwischenraum eingefügt. Die eigentliche Verbindung der Objektteile geschieht zunächst unter Auswahl zweier Einzelteile. Mit dem Pinsel der *Objects* Einstellungen werden für *First* und *Second* jeweils die angrenzenden zwei Körperteile ausgewählt. Wichtig ist es keine Verbindung zu vergessen. Die Reihenfolge der Verbindungen sowie der Auswahl der Körperteile spielt hierfür keine Rolle. Das Ausführen der Simulation in der *Timeline* verdeutlicht die Bewegungen der generierten *Ragdoll*. [19]

Für die Erstellung einer dreidimensional modellierten Patrone wird sich an den Richtlinien der Internationalen Kommission zur Prüfung von Handfeuerwaffen und Munition (C.I.P., frz. Commission internationale permanente pour l'épreuve des armes à feu portatives) sowie den in Abschnitt 4.1 „Beschreibung eines realen Beschussexperiments“ ermittelten Parametern orientiert. Die hierbei verwendeten Maßgaben dienen als Grundlage für die Modellierung der Patrone. [33]

Im Zuge deren Realisierung wird ein Zylinder (*Add* → *UV Sphere*) eingefügt. Dieser wird anschließend in einem Wechsel von Extrudierungs- und Skalierungsschritten geformt. Mithilfe der Aufräumoption (*Mesh* → *Clean Up* → *Merge by Distance*) werden redundante *Faces*, *Edges* und *Vertices* miteinander verbunden. Um die Patrone zusätzlich etwas metallischer zu gestalten, kann im *Shading Panel* der Parameter *Image Texture* hinzugefügt werden. Hierbei wird der Wert für *Metallic* im *Principled BSDF Panel* (Bidirectional Scattering Distribution Function) erhöht.

Um das Kollisionsverhalten so real wie möglich darzustellen, muss der Objektmittelpunkt der dreidimensionalen Patrone am Ende der Modellierung neu ausgerichtet werden. Der Ursprungspunkt der Modellierung entspricht nicht mehr dem Mittelpunkt des Objekts. Mit der Parameterkombination *Objekt* → *Set Origin* → *Origin to Center of Mass (Volume)* kann der Mittelpunkt anhand des Massezentrums im *Object Mode* ausgerichtet werden. Hierbei wird das Zentrum anhand des Objektvolumens berechnet. [40]

Aufbau der Versuchsszene In Form einer kurzen Einführung wird das konkrete Vorgehen beim schrittweisen Aufbau einer Flugbahn Animation beschrieben. Um die eingangs erwähnten *Add-ons* verwenden zu können, muss die gezippte *Add-on*-Datei der Plattform GitHub lokal gespeichert werden. In den *User Preferences* können *Add-ons* dauerhaft installiert werden. Um die Einstellungsmöglichkeiten von *Projectile* sehen zu können, wird es im *N-Panel* unter *Tools* mit einem gesetzten Häkchen aktiviert.

Als Untergrund der Beispielsimulation dient eine *Plane*, die in *x*- und *y*-Richtung skaliert wird. Um eine Eingrenzung des Schussbereichs vorzunehmen, werden die Kanten der Plane in *z*-Richtung extrudiert und es entsteht eine Art Versuchsraum. Zur maßstabgetreuen Umsetzung wird das *Measure Tool* verwendet. In den *Rigid Body* Einstellungen wird die *Plane* anschließend als *Passive* klassifiziert, wodurch sie innerhalb der Simulation keine aktive Rolle einnimmt. Um die Simulationsumgebung realistischer zu gestalten, wird das 3D-Modell einer Pistole des Typs 45 ACP Smith And Wesson¹ in das aktuelle Projekt importiert. Die Waffe wird so platziert, dass die Mündungslinie orthogonal zu der Wand verläuft. Mit dem *Grep*-Befehl wird sie dann in positiver *z*-Richtung bei 1,5 m angebracht. Der Pistolenlauf befindet sich demnach auf der Höhe von 1,56 m. Anhand der in Abschnitt 3.4.1 dargestellten Vorgehensweise zur Modellierung des Geschosses, wird das 3D-Modell der Patrone in die Szene eingefügt. Hierbei ist die Platzierung des Projektils innerhalb des Pistolenlaufs von großer Bedeutung.

3.4.2 Anwendung der Keyframe Animation

In der *Timeline* wird zum Zeitpunkt von *Frame 1* der Versuchsaufbau aus Abbildung 4.1 rekonstruiert. Dieser dient als Ausgangspunkt für die Simulation. Mit dem Einfügen (*Insert Keyframe*) einer *Location* wird die aktuelle Position der Patrone als *Keyframe* gespeichert. Diese befindet sich zu Beginn bei einer Höhe von $z = 1,56 \text{ m}$ und einer *x*-

¹ <https://free3d.com/de/3d-model/45-acp-smith-and-wesson-13999.html>

Komponente von $x = -0,1 \text{ m}$. Eine Ablenkung in y -Richtung besteht hierbei nicht, kann aber anhand vorgegebener Fallbeispiele eingefügt werden. Um eine einfache Simulation zu realisieren, wird bei *Frame 40* zunächst nur die x -Komponente der Geschossposition verändert. Hierbei legt das Geschoss einen Weg von $x = 10,1 \text{ m}$ zurück und trifft in gleicher Höhe auf die gegenüberliegende Wand. In diesem Versuchsaufbau ist lediglich die Patrone der aktive Part. Sowohl die Waffe als auch die als Untergrund dienende *Plane* bleiben passiv. Bei den *Physics Properties* ist es wichtig, dass die Geschossmasse von $0,00804 \text{ kg}$ animiert und dynamisch ist. Um den Einfluss meteorologischer Bedingungen zu testen, wird das *Force Field Wind* in die Szene eingefügt. Hierbei besitzt es eine Kraft von 50.000 und der Parameter *Shape* wird als *Plane* definiert. Die Kraft des Feldes wirkt hierbei auf gleicher Höhe orthogonal zur Flugrichtung des Geschosses.

3.4.3 Anwendung des Impulse Add-ons

Da das *Add-on* veraltet ist, findet größtenteils eine theoretische Analyse der Funktionsweise statt. Lediglich die Grundfunktionen werden unter der Version 2.79b getestet. Die Abbildung 3.2 zeigt hierbei die Konfigurationsmöglichkeiten des *Initial Velocity* und *Goal Panels* zur Unterstützung der nachfolgenden Ausführungen. Diese orientieren sich an den Beispielkonfigurationen der eingangs beschriebenen Versuchsszene. Da die *Add-ons Impulse* und *Projectile* inhaltlich zusammengehören, wurde die aktuelle Version von *Impulse* vom Entwickler zu *Projectile* umbenannt. Zur eindeutigen Trennung der beiden *Add-ons* wird nachfolgend der alte Name *Impulse* beibehalten.

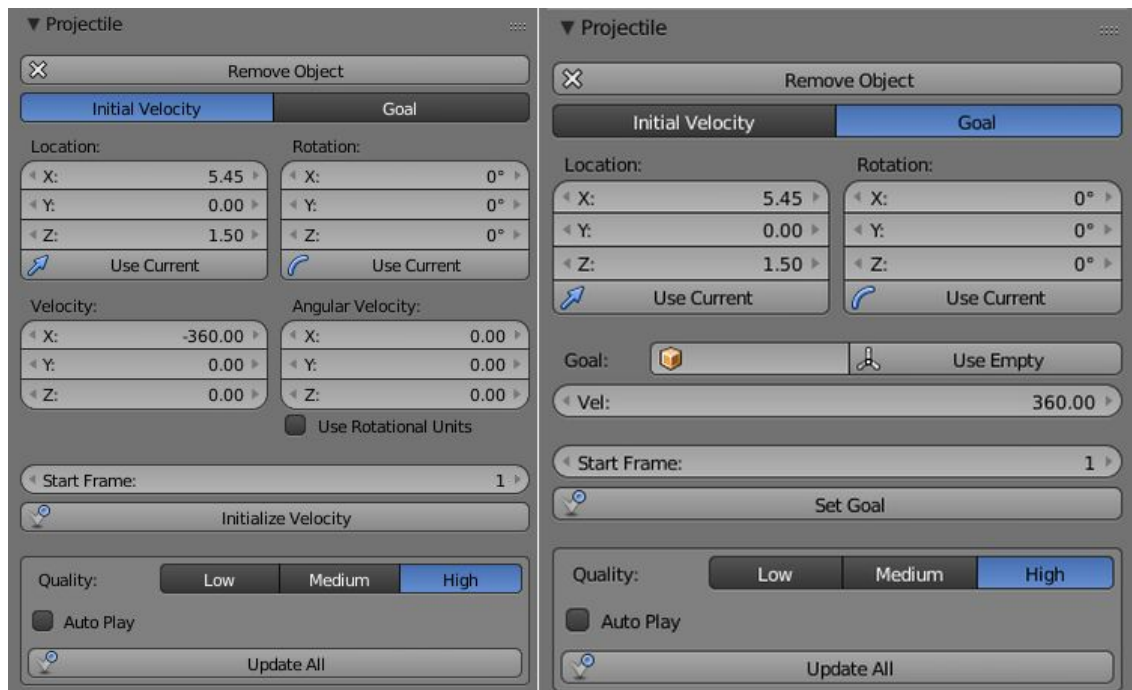


Abbildung 3.2: Die Abbildung zeigt die Einstellungsmöglichkeiten des *Impulse Add-ons* bezüglich der Anfangsgeschwindigkeit und dem Zielpunkt der Bewegung.

Am Beispiel von Videospielen, bei denen ein Geschoss auf einen menschlichen Körper trifft und diesen zurückstößt, soll der von der Waffe ausgehende Impuls beim Auftreffen auf das Geschoss simuliert werden. Dieser Impuls resultiert in einer Geschossbewegung, die als Annäherung an eine wirklichkeitsgetreue Flugbahn angesehen wird. Das Ziel hierbei ist es, das Abdrücken der Waffe so real wie möglich zu gestalten, um den Gegebenheiten der Wirklichkeit zu entsprechen.

Zu Beginn wird die Waffe sowie die Patrone als aktive Objekte mit einer individuellen Masse definiert. Weiterhin wird bei beiden der *Collision Modifier* aktiviert. Im *Object Mode* wird das aktive 3D-Modell der Waffe ausgewählt und mithilfe des *Impulse Add-on Panels* unter *Add Object* als Emitter festgelegt. Der Start der Simulation wird unter *Start Frame* auf 1 definiert. Anschließend werden die Geschwindigkeitsparameter unter *Initial Velocity* bestimmt. Die Waffe befindet sich hierbei auf einer Höhe von $1,5\text{ m}$, wobei der Pistolenlauf bei exakt $1,56\text{ m}$ liegt. Da der Beschleunigungsweg der Waffe entlang der horizontalen Ebene verläuft, bleibt die manuelle Einstellung der Abweichungen von x - und z -Achse unter *Velocity* zunächst unberücksichtigt. Die Geschossgeschwindigkeit in y -Richtung beträgt $360\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Ohne den Einfluss von Gravitation gleicht dieses Verhalten dem Flug im Vakuum. Eine Rotation der Waffe unter *Angular Velocity* findet nicht statt. Somit erhalten alle Koordinatenachsen einen Wert von null. Wurde die Grundgeschwindigkeit eindeutig definiert, kann über die Option *Goal* das Ziel der Flugbahn bestimmt werden. Im *Goal Mode* kann ein bestehendes oder ein sogenanntes leeres Objekt (*Use Empty*) gewählt werden, wodurch ein Zielpunkt eingefügt wird. In der Höhe des Pistolenlaufs wurde bei einer Entfernung von 1 m das Geschoss platziert. Die *Location* des Zielpunkts befindet sich 10 cm vor der Patrone. Um eine Drehung des Geschosses um seine Längsachse zu erzeugen, können unter *Rotation* diverse Winkelkombinationen eingestellt werden. Die gewählten Parametereinstellungen werden dann mit *Set Goal* bestätigt und der Zielpunkt wird anhand der manuellen Vorgaben erstellt. Im letzten Schritt werden alle vorangegangenen Konfigurationen inklusive der Qualitätseinstellung vom Wert *High* mit *Update All* aktualisiert und durch *Initialize Velocity* ausgeführt.

3.4.4 Anwendung des Projectile Add-ons

Die Grundlage der Simulation eines Schussverlaufs stellt im dritten Abschnitt die Verwendung des *Projectile Add-ons* dar.

Sind die 3D-Modelle der Objekte nach Vorgabe des Versuchsaufbaus in Abschnitt 3.4.1 korrekt im umgebenden Raum platziert, kommt das *Projectile Add-on* zum Einsatz. Im *Object Mode* wird die Patrone im *3D Viewport* ausgewählt und mithilfe der Option *New Emitter* als Emitter definiert. In der *Scene Collection* des *Outliners* entsteht neben der *Standard Collection* die *Projectile Instances*, welche die Einstellungen der Instanzen der Patrone sowie deren Animation und verwendeten *Modifier* speichert. Im *Outliner* in der *Standard Collection* kann unter dem *Properties Editor Scene Properties* die Gravitation eingestellt werden. Standardmäßig ist in z -Richtung der Wert von $-9,81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ eingetragen.

gen. In diesem Editor ist ebenfalls die *Rigid Body World* aktiviert. Zunächst werden keine Änderungen der vorhandenen Einstellungen vorgenommen. Der Editor *Object Properties* speichert die Position, Größenverhältnisse sowie Rotation des ausgewählten Objekts. Da beim Einfügen des Emitters (*Patrone_instance*) das Geschoss auf das 10-fache vergrößert und um 90° in z -Richtung gedreht wird, kann unter *Scale* x , y und z ein Wert von 0,100 eingetragen werden. Weiterhin wird bei *Rotation* in der y -Komponente ein Wert von 90° eingefügt. Der *Physics Properties* Editor zeigt die aktivierten Physik Konfigurationen des ausgewählten Objektes an. Für die *Plane* des Untergrunds sind die *Modifier Collision* und *Rigid Body* aktiv. Hierfür wird der *Rigid Body Type* auf *Passive* gesetzt und unter *Collisions* die Option *Shape* auf *Mesh* und *Source* auf *Base* umgestellt. Die *Margin* unter *Sensitivity* erhält den Wert von 0,221 m. Anschließend werden die Physik Einstellungen des Emitters betrachtet. Hierbei sind ebenfalls die *Modifier Collision* und *Rigid Body* aktiviert. Im Gegensatz zu dem Untergrund ist der *Rigid Body Type* auf *Active* eingestellt. Weiterhin kann die Geschossmasse (*Mass*) unter *Settings* anhand der Tabelle 4.1 auf 0,00804 kg festgelegt werden. Die *Collisions* Einstellungen entsprechen denen des Untergrundes.

Anschließend erfolgt das Anpassen der Grundeinstellungen des *Projectile Add-ons*, auch *Initial Settings* genannt. Praktischerweise kann hierbei die Startposition des verwendeten Körpers verändert werden. Zu Beginn der Projektileinstellungen (*Projectile Settings*) kann die Qualität der Berechnungen unter *Quality* angepasst werden, wodurch sich automatisch das Ansichtsfenster aktualisiert. [38] Bei einer solchen Simulation können über die Option *Number* mehrere Instanzen definiert werden, wobei der Standardwert der Anzahl bei eins liegt. Die Lebensdauer dieser Instanzen beschreibt, wie lange eine solche bestehen bleibt. Für das Versuchsbeispiel wird der Parameter *Lifetime* auf null gesetzt, damit das Geschoss während der Simulation erhalten bleibt. Das *Feature* zur Limitierung der Lebenszeit des Emitters wird somit deaktiviert. [7] Zunächst kann unter *Velocity* die Geschwindigkeit des emittierenden Objekts definiert werden. Bei Veränderung dieser Modalität entsteht eine Trajektorie, die den Richtungsverlauf der Flugbahn bestimmt. Diese können unter *Draw Trajectories* nach Belieben zur Szene hinzugefügt oder entfernt werden. Bezüglich der Geschwindigkeitsregulation wird zwischen dem sphärischen und kartesischen Koordinatensystem unterschieden. Die nachfolgenden Werte beziehen sich auf die Auswahl *Spherical Coordinates*. Mit *Incline* wird die Neigung der Trajektorie bestimmt. Der Horizontalwinkel, *Azimuth*, beschreibt die horizontale Ablenkung des Geschosses in Bezug auf das Zielobjekt. Der Parameter *Angular Velocity* bestimmt den Grad der Rotation des emittierenden Objekts. Mit *Execute All* werden abschließend alle Änderungen übernommen und die Animation kann über die *Timeline* oder die *Spacebar* ausgeführt werden. [38]

3.5 Umsetzung physikalischer und atmosphärischer Bedingungen - der Force Fields Modifier

Die Umsetzung der atmosphärischen Bedingungen in Blender kann mithilfe des *Force Fields Modifier* realisiert werden. Hierbei werden besonders die Konfigurationsmöglichkeiten der Kraftfelder *Wind*, *Curve Guide* und *Force* betrachtet.

Wind Mithilfe von *Add* → *Force Field* → *Wind* kann der Windvektor in die aktuelle Szene importiert werden. Es erscheint ein Pfeil, der in die Wirkungsrichtung der Kraft zeigt. Der Vektorpfeil kann mit dem *Shortcut R* rotiert und mit *G* bewegt werden. In den *Force Field* Einstellungen des *Physics Tab* kann die Intensität des Windes unter *Strength* erhöht werden. [27]

Um eine einfache Windsimulation zu generieren, wird nach dem Hinzufügen des Windvektors die Stärke der einwirkenden Kraft unter *Strength* bei *Frame 20* auf den Anfangswert von 0 festgelegt. Mithilfe des *Shortcuts I* können diese Einstellungen zu einem *Keyframe* zusammengefasst werden. Um anschließend der Simulation Wind hinzuzufügen wird in *Frame 50* die Windstärke auf 500 gesetzt und ebenfalls als *Keyframe* gespeichert. Hierbei werden weiterhin die Parameter *Flow* und *Noise Amount* auf 10 erhöht. Unter *Scene* → *Rigid Body World* → *Settings* werden die Parameter *Steps per Seconds* und *Solver Iterations* angehoben, um die Genauigkeit der Simulation zu verbessern. Sowohl in den *Cache* Einstellungen dieses *Panels*, als auch in der *Timeline* wird das *Endframe* auf 200 definiert. Abschließend werden alle Konfigurationen in dem *Scene Panel* mithilfe *Bake all Dynamics* zusammengeführt. [22] Das Kraftfeld des Windes wird nachfolgend immer im rechten Winkel zur Flugbahn des Geschosses wirken, um eine größtmögliche Abweichung von der Wirkungsrichtung des Geschosses zu erzielen.

Curve Guide Zu Beginn der *Force Fields* Simulation wird ein *Particle System* zu einem Objekt hinzugefügt, dass im Folgenden als Emitter Partikel aussendet. Dieses Objekt ist ein gefüllter *Circle*, der vor der Öffnung der Schusswaffe platziert wurde. Es dient demnach als Startpunkt der Flugbahn. Zunächst wird die *Emission Number* auf eins gesetzt und die Lebenszeit (*Lifetime*) bei den *Particle Properties* auf 200 erhöht. Zur Simulation der Geschossrotation wird unter *Rotation* → *Orientation Axis* der Parameter *Object X* eingestellt. Dieser generiert eine Rotation des emittierenden Objektes anhand seiner *x*-Achse. Unter *Physics* → *Mass* wird wiederum die Geschossmasse von 0,00804 kg eingetragen. Schließlich muss das Geschoss als emittierendes Objekt definiert werden. Dies geschieht mithilfe der Parameterkonfiguration *Render* → *Render As* → *Object*. Im sich öffnenden *Object Panel* wird bei *Instance Object* das 3D-Modell der Patrone angegeben. Der Parameter *Field Weights* kann zusätzlich die Stärke von physikalischen Einflüssen auf das *Particle System* definieren. Mit *Add* → *Curve* →

Bezier wird anschließend eine *Bezier* Kurve eingefügt. Im Editiermodus können weiterhin Punkte auf dem Pfad hinzugefügt (*Subdivide*) werden, um eine beliebige Menge an Kurven zu erzeugen. Diese können wiederum anhand der Gegebenheiten der Flugbahn modelliert werden. Das geschieht in einer Kombination aus Skalierungs-, Rotations- und Extrudierungsschritten. Der fertige Pfad wird in unmittelbarer Nähe zum Objekt platziert und die Simulation kann gestartet werden. [6]

Force Bei Bedarf kann das Kraftfeld *Force* zu der Kurvensimulation hinzugefügt werden. Hierbei werden die *Force Fields Settings* dahingehen geändert, dass die Form (*Shape*) den Wert *Curve* erhält. Weiterhin wird die Partikelgeschwindigkeit mithilfe des Parameters *Strength* erhöht. *Flow* reguliert wie nah die Partikel an der Kurve fliegen. Die Kurve verhält sich demnach ähnlich wie ein Magnet, der die Partikel auf ihrem Pfad anzieht. [28]

3.6 Zusammenfügen der Teilprobleme

Im letzten Arbeitsschritt werden die Teilabschnitte der physikalischen Flugbahnrekonstruktion zusammengesetzt und die Gesamtwirkung aller Einflüsse auf die Außenballistik betrachtet. Besonders hervorzuheben sind hierbei die vier verschiedenen Ansätze eine grundlegende Flugbahnrekonstruktion zu simulieren: die standardmäßige Verwendung der *Keyframing Animation*, die Anwendung des *Impulse Add-ons*, die Anwendung des *Projectile Add-ons* sowie die Verwendung von *Curve Guides*. Dies geschieht unter Betrachtung der verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten physikalischer und atmosphärischer Einflüsse und wird in Kapitel 5 ausführlich diskutiert.

4 Ergebnisse

Anhand der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Methodik werden anschließend die Ergebnisse der blender-internen Recherche vorgestellt. Dies geschieht mithilfe von Screenshots, die das Resultat visualisieren.

4.1 Beschreibung eines realen Beschussexperiments

Zu Beginn der Beschreibung eines Beschussexperiments, dass den realen Gegebenheiten entsprechen soll, werden auf die Voraussetzungen einer solchen Simulation eingegangen. Anschließend folgt die Beschreibung einer idealen Flugbahnrekonstruktion, anhand derer die physikalischen Gegebenheiten einer Flugbahn erläutert werden. Zuletzt wird die Glock 17 sowie deren Geschosstyp vorgestellt, um die genauen Maße für die digitale Rekonstruktion zusammenfassend darzustellen.

4.1.1 Vorbetrachtungen

Bei der Realisierung eines Beschussexperiments müssen Einschränkungen bezüglich des verwendeten Geschützes sowie der vorhandenen Umgebungsvariablen getroffen werden. Diese werden definiert, um eine Vereinfachung der nachfolgenden Simulation in Blender vorzunehmen und einen Vergleich mit der realen Welt zu ermöglichen.

Ausgangspunkt für die realitätsgetreue Simulation der Flugbahn von Geschossen ist die halbautomatische Handfeuerwaffe Glock 17 mit einer Kapazität von 17 Patronen. Mit dem geladenen, zweireihigen Magazin weist die Glock 17 ein vergleichsweise geringes Gewicht von 915 g auf. Aufgrund der idealen ballistischen Leistung und dem moderaten Rückstoß wird die Pistole häufig von Einsatzkräften der Polizei sowie von Sportschützen verwendet. [2] [36] Sie besitzt das weltweit am meisten verbreitete Kaliber 9 mm Luger. Das Geschoss gehört zu den Verbundkerngeschossen und erreicht durch den geringen Masseverlust eine enorme Tiefenwirkung. Eine Patrone des repräsentativen Herstellers Speer Gold Dot besitzt ein Geschossgewicht von 124 gr, das umgerechnet 8,0351 g entspricht. [14] Beim Abfeuern der Waffe entsteht eine durchschnittliche Mündungsgeschwindigkeit v_0 von $360 \frac{m}{s}$. Die Gesamtlänge der Patrone beträgt 29,69 mm. Das Patronenlager besitzt eine Länge von 19,15 mm sowie eine Breite von 9,96 mm. [33]

4.1.2 Ideale Flugbahnrekonstruktion

Für eine ideale Rekonstruktion der Flugbahn eines Geschosses werden physikalische Berechnungen mit der computergesteuerten Simulation verknüpft. Die grundlegende Voraussetzung hierbei ist das Vorhandensein einer hinreichend großen Menge an Hintergrundwissen der Umstände. Dazu zählen meteorologische Bedingungen sowie Art und Beschaffenheit aller am Schuss beteiligten Objekte. Weiterhin ist das Wissen über die Lage des Start- und Endpunktes entscheidend für die wirklichkeitsgetreue Wiedergabe des Geschehens. In Form einer Datenbank werden zunächst alle Maßgaben des Tatorts gesammelt. Diese dienen der detailgetreuen Erstellung der Simulationsumgebung. Wurde eine solche Umgebung entsprechend der Realität implementiert, kommt es zur Betrachtung der eigentlichen Geschossbewegung. Hierbei liegt der Fokus auf den physikalischen Kräften, die beim Abdrücken der Waffe initiiert werden. Das Wissen über äußere meteorologische Einflüsse gibt Auskunft über die Ablenkung des Geschosses von der ursprünglichen Geschossbahn und somit den Auffindeort der Patrone. Durch eine genauere Betrachtung des Tatorts kann ebenfalls eine Ablenkung des Geschosses durch materielle Hindernisse stattfinden. Diese müssen ebenfalls in die Simulationsumgebung integriert werden.

Die Software Blender eignet sich hierbei besonders für den Aufbau eines solchen Simulationsraumes. Das Interagieren der Objekte miteinander stellt für Blender keine Herausforderung dar. Im Gegensatz dazu können vor allem die Prozesse der Innenballistik sowie physikalische Eigenschaften des Materials schlecht bis gar nicht umgesetzt werden. Exemplarisch hierfür ist, dass die Software Blender nur die charakteristischen Eigenschaften von Materialien simuliert. Insbesondere Details, wie beispielsweise der Luftwiderstandsbeiwert, werden außen vor gelassen. Diese tragen jedoch immens zum Gesamtbild und dem charakteristischen Verhalten der Objekte und Materialien bei. Ein großer Nachteil ist weiterhin, dass diese Details häufig nicht der Wirklichkeit entsprechend implementiert werden können. *Features*, wie beispielsweise *Shader*, erzeugen nur Bildeffekte, die keinen Einfluss auf das Verhalten innerhalb der Simulationsszene haben. [42]

4.1.3 Physikalische Flugbahnrekonstruktion

Grundlegende Kenntnisse über das außenballistische Flugverhalten stabiler Geschosse ermöglichen die Herkunftsbestimmung von Projektilen nach dem Abschuss und können Hinweise über deren Ausgangspunkt geben. Da signifikante Unterschiede in der Herangehensweise bei der Flugbahnrekonstruktion bestehen, wird bezogen auf den zurückgelegten Flugweg des Geschosses in die Überwindung von kurzen und langen Distanzen unterschieden. Da bei kurzen Schussdistanzen das Projektil nur durch die Gravitation abgelenkt wird, kann als Annäherung an den zurückgelegten Weg des Geschosses eine Gerade approximiert werden. Dadurch bestimmt lediglich die Flugdauer, welche Vorgehensweise zur Berechnung Anwendung findet. Nachfolgend wird davon ausgegangen, dass eine Fallhöhe von 1 cm eine Flugzeit von 0,0452 s ergibt. Somit errechnet sich die Grenzdistanz D wie folgt.

$$D = 0,0452 \text{ s} \cdot v_0 \quad (4.1)$$

Für die Verwendung einer Kurzwaffe mit dem Geschoss 9 mm Luger ergibt sich unter Annahme einer geradlinigen Flugbahn eine Grenzdistanz von rund 16 m.

$$D = 0,0452 \text{ s} \cdot 360 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 16,272 \text{ m} \quad (4.2)$$

Zur Veranschaulichung werden die Gleichungen zur Berechnung der Flugdistanz im Vakuum, siehe 2.4 und 2.5, mit den Werten einer Glock 17 und dem zugehörigen Geschosstyp 9 mm Luger notiert. Das hierbei ermittelte Ergebnis, stimmt annähernd überein und kann für die Flugdistanzberechnung in Abhängigkeit verschiedener Flughöhen verwendet werden. [25]

$$y(10 \text{ m}) = 10 \text{ m} \cdot \tan 0,1 - \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (10 \text{ m})^2}{2 \cdot \left(360 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot \cos^2 0,1} = 0,9995 \text{ m} \quad (4.3)$$

$$y(10 \text{ m}) = 10 \text{ m} \cdot 0,1 - \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (10 \text{ m})^2}{2 \cdot \left(360 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} = 0,9962 \text{ m} \quad (4.4)$$

Bei der Beschreibung von langen Schussdistanzen müssen zunächst Parameter vom Ereignisort zur Berechnung der Flugbahn ermittelt werden. Da die Daten teilweise unbekannt sind und auf geschätzten Angaben beruhen, sind Abweichungen bei der Bestimmung des Ausgangspunkts einzubeziehen. Zu den projektilbezogenen Daten, die am Tatort identifiziert werden müssen, gehören der Durchmesser und die Masse des Geschosses, deren Formgebung sowie gegebenenfalls vorhandene Deformationen. Aus diesen Angaben kann man das Kaliber bestimmen und erste Aussagen über eine Kollision mit anderen Körpern treffen. Neben den Geschossdaten gibt der Bahnwinkel Aus-

kunft über Richtungsbeziehungen in einem beliebigen Punkt einer Tangente auf der Flugbahn. Im Idealfall können am Tatort zwei Bezugspunkte ermittelt werden, die Aufschluss über die Schussrichtung in Bezug zur räumlichen Umgebung geben. Hierfür eignen sich ebenfalls ein vorhandener Schusskanal sowie ein Schussloch in Form einer Ellipse. Im Gegensatz dazu treten bei menschlichen Opfern und Objekten in Bewegung Schwierigkeiten bei der Rekonstruktion auf. Obwohl in den meisten Fällen ein Schussverlauf identifiziert werden kann, sind keine validen Hinweise auf die Körperhaltung des Opfers zum Zeitpunkt des Eintretens des Projektils vorhanden. Weiterhin kann die Auftreffgeschwindigkeit des Geschosses nur als Erfahrungswert auf Grundlage des Fallwinkels, der Distanz, der Geschwindigkeitsprognose am Ende sowie den am Tatort vorgefundenen Spuren geschätzt werden. Aus den vorhandenen Parametern kann der ungefähre Flugweg des Geschosses ermittelt werden. Anhand dieser Angaben können Hindernisse in der Umgebung Hinweise auf eine denkbare Ablenkung innerhalb des Schussverlaufs geben. [15]

Neben den Daten vom Tatort ergänzen der Luftwiderstandsbeiwert c_w , die Mündungsgeschwindigkeit v_0 , meteorologische Daten sowie die Topografie der Umgebung die Rekonstruktion der Flugbahn. Da viele Projektilen bei dem Schuss verformt werden, ist es unbedingt notwendig eine korrekte Identifizierung des Tatmittels vorzunehmen. Bei verbreiteten Geschosstypen ist der c_w -Verlauf im Allgemeinen einsehbar. Ist eine Bestimmung von c_w nicht möglich, wird ein Projektil mit einem annähernd gleichen Schlankheitsgrad zur Berechnung verwendet. Da die Tatwaffe im Normalfall nicht zugänglich ist, wird standardmäßig die nominale Mündungsgeschwindigkeit benutzt. Hierbei müssen die Bauweise und Abnutzungserscheinungen des Rohrs und der Munition beachtet werden. Besteht jedoch der Zugang zur Tatwaffe inklusive der verwendeten Munition, kann eine Messreihe detailliertere Angaben zur Mündungsgeschwindigkeit liefern. Die zum Tatzeitpunkt vorherrschenden meteorologischen Gegebenheiten geben Aufschluss über den Luftwiderstand sowie die momentane Luftdichte. Dafür werden konkrete Daten zum Luftdruck, der Temperatur und die vektorisierte Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Höhenlage benötigt. Neben den meteorologischen Datensätzen wird topografisches Kartenmaterial sowie Visualisierungen in Form von dreidimensionalen Daten recherchiert. Die Topographie hat trotz gleichbleibender Geschossdaten, Mündungsgeschwindigkeit, Höhe über Normalnull und dem Auftreffwinkel einen enormen Einfluss auf die Flugdistanz des Geschosses. Hierbei sorgt vor allem der Seitenwinkel für die unterschiedliche Lokalisation der Schussabgabe und somit auch für deutliche Abweichungen bei der Schussdistanz selbst. [15]

Die anschließende Flugbahnberechnung stützt sich auf diverse Computerprogramme, die aufbauend auf dem Massepunktmodell des Geschosses die Position, die Geschwindigkeit, die Flugzeit, die Energie und den Bahnwinkel eines Geschosses berechnen. [15]

4.1.4 Glock 17

Aus den zuvor ermittelten und beschriebenen Werten werden die physikalischen Parameter zur Flugbahnrekonstruktion einer 9 mm Luger in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Der Vollständigkeit halber werden atmosphärische Daten ebenfalls berücksichtigt. Die Beispielwerte der Tabelle dienen als Ausgangspunkt für die Erstellungsmöglichkeiten der Parameter in Blender. Neben der eigentlichen physikalischen Kraft werden das zugehörige Formelzeichen (FZ) sowie der Wert und die Einheit angegeben.

Physikalische Kraft	FZ	9 mm Luger	Einheit
Kaliber	d	9	[mm]
Geschossmasse (gesamt)	m	8,0351	[g]
Mündungsgeschwindigkeit	v_0	360	[m/s]
Winkelgeschwindigkeit	ω	8800	[rad/s]
Drehzahl	ν	1400	[l/s]
Umfangsgeschwindigkeit	ν	40	[m/s]
Querschnittsbelastung	q	0,1258	[g/mm ²]
Gravitation	g	9,80665	[m/s ²]
Temperatur	θ	20	[°C]
Luftdichte	ρ	1,2041	[kg/m ³]

Tabelle 4.1: Die Tabelle beinhaltet physikalische Beispielwerte für den Geschosstyp 9 mm Luger. Dieses Kaliber gilt als Referenz für eine exemplarische Nutzung von Waffen und Munition im Zuge einer Flugbahnrekonstruktion. [15] [2] [36]

4.2 Parametrisierung der Flugbahn

Dieses Kapitel zeigt anhand des methodischen Vorgehens in Abschnitt 3.4 die Einteilung der Flugbahn in Einzelschritte zur einfacheren Betrachtung. Die Beschreibung beginnt mit der Modellierung des Versuchsaufbaus. Anschließend werden die Ergebnisse der *Keyframe* Animation, der Verwendung des *Impulse Add-ons* sowie des *Projectile Add-ons* beschrieben. Zuletzt liegt der Augenmerk auf dem *Force Fields Modifier*, der physikalische sowie atmosphärische Bedingungen realisieren kann.

4.2.1 Modellierung des grundlegenden Versuchsaufbaus

Die als Untergrund dienende *Plane* enthält eine Ausdehnung in x -Richtung von 12 m , in y -Richtung von 5 m und in z -Richtung von 2 m . Um den Kontrast zur Waffe und dem Projektil zu erhöhen, wurde die Farbgebung des Hintergrundes in weiß gewählt. Die Waffe befindet sich 2 m entfernt von der linken Wand in einer Höhe von 1,5 m .

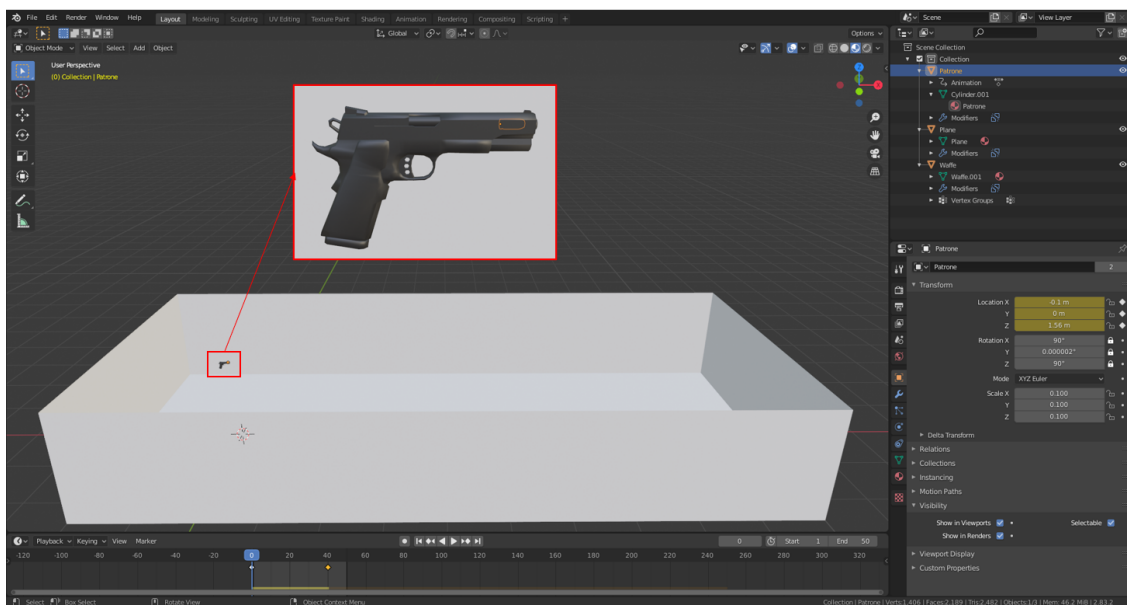


Abbildung 4.1: Der blender-interne Screenshot zeigt den Versuchsaufbau, der als Grundlage für die nachfolgenden Betrachtungen dienen soll. In dem rotfarbenen Rahmen befindet sich eine Nahaufnahme der Waffe. Die Patrone ist hierbei innerhalb des Waffenlaufs platziert.

Die erfolgreiche Modellierung der dreidimensionalen Szene wird in der Abbildung 4.1 verdeutlicht. Anhand dieser kann die orangefarbene Umrandung der Patrone innerhalb des Pistolenlaufs identifiziert werden. Sowohl die Waffe als auch die Patrone werden im *Rigid Body Panel* als *Active* klassifiziert. Dies ermöglicht es den beiden Objekten mit ihrer Umgebung zu interagieren.

4.2.2 Anwendung der Keyframe Animation

Wie eingangs beschrieben, beschäftigt sich die Ballistik mit der zentralen Bahnbewegung im Raum. Hierfür ist eine klare Abgrenzung zu treffen, welche Simulationen zu einer Bahnbewegung gehören und welche außerhalb des Definitionsbereichs liegen. Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, wird die generelle Flugbahn durch die Entwicklung der Flughöhe y in Abhängigkeit zur fortschreitenden Distanz x charakterisiert. Da bei dem *Keyframing*, vergleichend zu Abbildung 4.2, von *Frame 1* zu *Frame 40* eine Distanz zurückgelegt wird, kann die *Keyframing* Methode als einfachste Flugbahnbeschreibung verwendet werden.

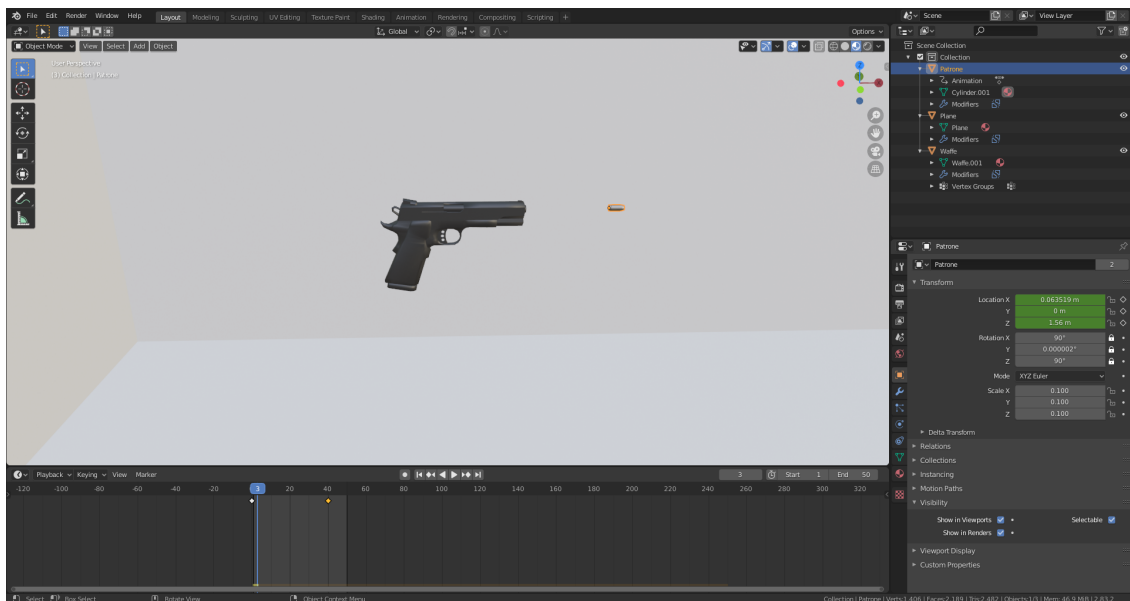


Abbildung 4.2: Der blender-interne Screenshot zeigt die manuell generierten *Keyframes* innerhalb der *Timeline* sowie Modifikationen der *Object Properties* der *Patrone* bei der Simulationserstellung einer sehr einfachen Flugbahn.

Innerhalb der Software Blender ist darauf zu achten, dass die Flughöhe im kartesischen Koordinatensystem der z -Komponente und die Flugdistanz der y -Komponente entspricht. In dem beschriebenen Versuchsaufbau besitzt der Schusswinkel s_w eine Größe von 90° . In *Frame 1* befindet sich die *Patrone* in der Startposition, wie sie in Abschnitt 3.4.1 beschrieben ist. An dieser Stelle wird ein *Keyframe* eingefügt. Das *Keyframe* äußert sich in Abbildung 4.2 durch eine orangefarbene Raute im entsprechenden *Frame* der *Timeline*. Anschließend wird in der *Timeline* an die Stelle des *Frame 40* gesprungen. Dieser stellt den Endpunkt der Simulation dar. Auffällig ist weiterhin, dass beim Hinzufügen eines *Force Fields* keine Veränderung der Geschossbahn stattfindet.

4.2.3 Anwendung des Impulse Add-ons

Die Analyse des *Impulse Add-ons* ergibt folgende Erkenntnisse. Das 3D-Modell der Waffe dient nachfolgend als Emitterobjekt. Mit einer konstanten Geschwindigkeit von $360 \frac{m}{s}$ fliegt diese bei einem Abschusswinkel von 90° auf das zuvor definierte Zielobjekt zu. Die Entfernung von der Waffe zu dem Zielpunkt beträgt $0,9 m$. Das Ziel der Flugbahn stellt hierbei die dreidimensional modellierte Patrone dar, die sich auf gleicher Ebene wie der Pistolenlauf der Waffe befindet. Mit dem Ausführen aller Konfigurationen entstehen *Keyframes* innerhalb der *Timeline*, die die aktuelle Geschwindigkeit definieren. Durch die anschließende Kollision beider Objekte entsteht eine Impulsübertragung von der Waffe auf das Geschoss. Diese resultiert in einer annähernd wirklichkeitsgetreuen Flugbahn. Die Abbildungen 4.3 und 4.4 zeigen die Grundeinstellungen des *Impulse Add-ons* bei der Rekonstruktion einer Geschossflugbahn.

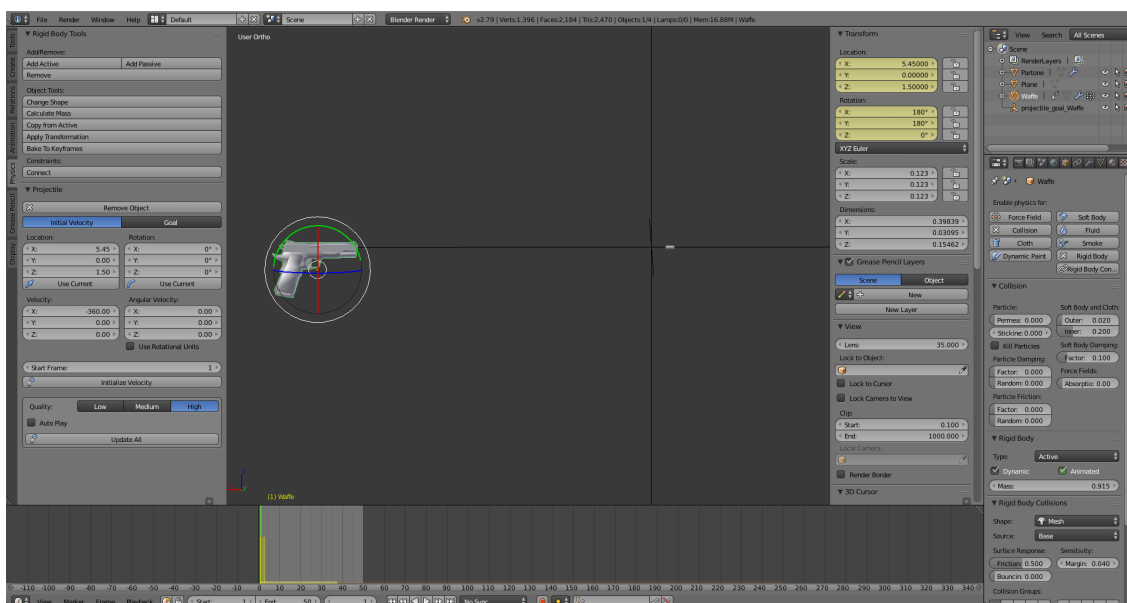


Abbildung 4.3: Die Abbildung verdeutlicht die *Velocity Settings* des *Impulse Add-ons*. In der *Timeline* sind die *Keyframes* der Animation in Form von senkrechten Linien zu sehen.

Mit einer Mündungsgeschwindigkeit von $10 \frac{m}{s}$ funktioniert das Versuchsexperiment im Groben wie eingangs beschrieben. Hierbei wird nur die *Initial Velocity* Einstellung der Abbildung 4.3 verwendet. Für höhere Geschwindigkeiten ist der Abstand zwischen den *Frames* zu groß, die Bewegung kann nicht Schritt für Schritt nachempfunden werden, da vor allem in den ersten Sekunden die Geschossbewegung zu schnell abläuft.

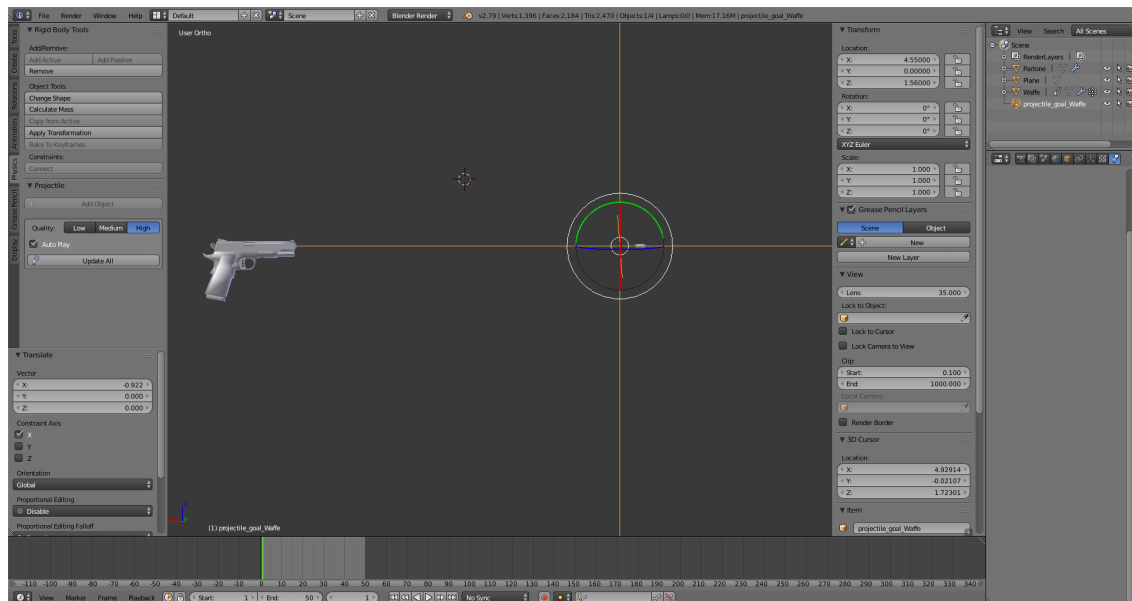


Abbildung 4.4: Der Screenshot zeigt die *Goal Settings* des *Impulse Add-ons*. Der Ursprung des orangefarbenen Kreuzes stellt den Zielpunkt der Flugbahn dar.

4.2.4 Anwendung des Projectile Add-ons

Von Bedeutung für die Simulation ist, dass die *Rigid Body Margin* der *Physic Properties* für Kollisionen einen Wert größer als 0 m besitzt. Die *Margin* verbessert als Kollisionsspielraum die Leitung sowie Stabilität von *Rigid Bodies*. Der Parameter ist ein Grenzwert bezüglich der Entfernung. Er gibt an bei welcher Entfernung zur Oberfläche die Objekte mit dieser kollidieren. [28] Bei der Parameterkombination *Sensitivity* $\rightarrow$ *Margin* wird demnach der Grenzwert zur Oberfläche festgelegt, bei der Kollisionen noch berücksichtigt werden. Diese Angabe erfolgt in Metern. In dem Versuchsbeispiel wurde bei den aktiven Objekten, Patrone und Waffe, der Standardwert von $0,04\text{ m}$ beibehalten. Die *Plane* erhält einen Wert von $0,221\text{ m}$, da unter dem Einfluss von Gravitation Objekte die Plane trotz aktiviertem *Collision Modifier* durchbrechen. Bei der Verwendung von *Projectile* kann dieser Wert je nach gewählter Geschwindigkeit angepasst werden. Jedoch darf der Wert nicht zu klein gewählt werden, da sonst eine Kollision verhindert wird.

Der gesetzte Parameter *Animated* bewirkt bei den *Physics Properties*, dass die Waffe an Ort und Stelle bleibt und nicht den Einflüssen der Gravitation ausgesetzt ist. Für die Patrone darf dieser Parameter nicht gesetzt werden. Um den Einfluss der Gravitation zuzulassen, wird der Parameter *Dynamic* aktiviert. Für aktive Festkörper kann mithilfe des Parameters *Damping* eine Dämpfung der Lineargeschwindigkeit (*Translation*) sowie der Winkelgeschwindigkeit (*Rotation*) erfolgen. [28]

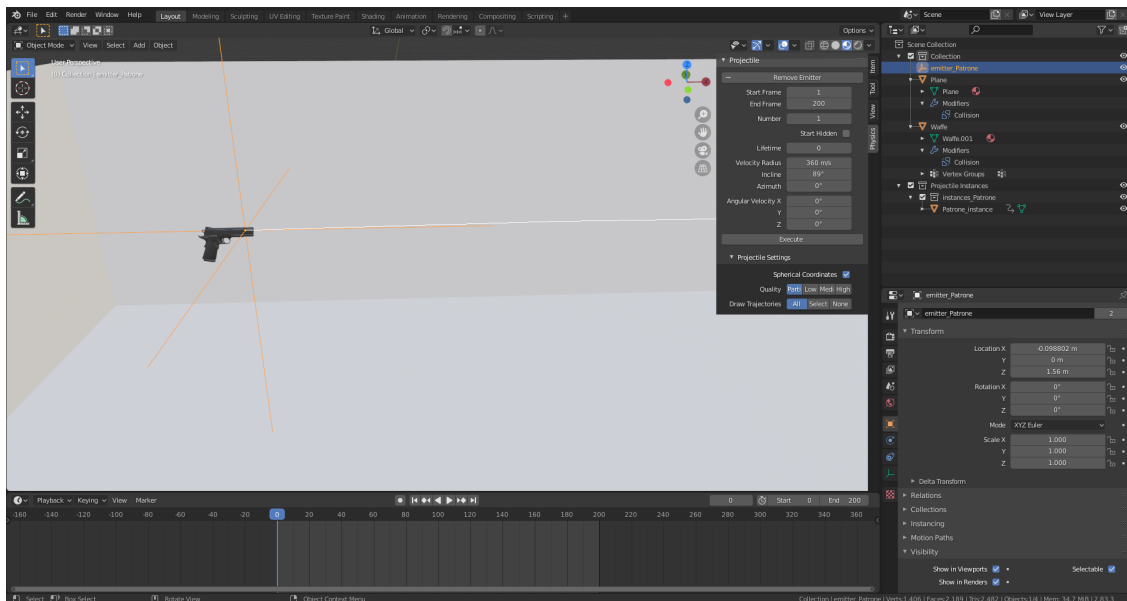


Abbildung 4.5: Der blender-interne Screenshot zeigt die Flugbahn eines Geschosses anhand der weiß gefärbten Trajektorie. Das orangefarbene Kreuz stellt hierbei den Ursprung des Emitters dar.

Abbildung 4.5 zeigt anschließend die zuvor beschriebenen Ausprägungen der Parameterkombinationen. Als Emitter (lat. *emittere* „ausschicken“) [9] wird der Startpunkt beschrieben, bei welchem das ausgewählte Objekt entlang einer definierten Flugbahn, der Trajektorie, ausgesendet wird. Das fliegende Objekt, hier das Geschoss, besteht immer aus Festkörpern (*Rigid Bodies*). [38]

Durch das Aktivieren der *Collisions* Einstellungen beider Objekte kollidiert das aktive Geschoss beim Starten der Simulation mit dem passiven Untergrund. Die Mündungsgeschwindigkeit des emittierenden Objekts beträgt $360 \frac{m}{s}$. Für den Winkel *Incline* wird der Wert 89° verwendet. Dieser Winkel entspricht den realen Gegebenheiten am ehes-ten.

4.3 Umsetzung physikalischer und atmosphärischer Bedingungen – Der Force Fields Modifier

Die ICAO-Standardatmosphäre dient als Referenz für meteorologische Bedingungen. Die geografische Breite ist somit der Ausgangspunkt für die Bestimmung der nachfolgenden Einflüsse. Aufgrund ihrer Komplexität konnten die Bedingungen des Luftdrucks, der Luftdichte sowie der Temperatur nach realen Gegebenheiten nicht in angemessener Zeit realisiert werden. Im *Outliner* kann unter *Collection* → *Properties Editor* → *Scene Properties* die Gravitation eingestellt werden. Standardmäßig ist in *z*-Richtung der Wert von $-9,81 \frac{m}{s^2}$ eingetragen. Dieser Wert wird in dieser Weise belassen.

Bei der Umsetzung von physikalischen Gegebenheiten in Blender werden die Einstellungsmöglichkeiten der *Physic Engine* Parameter differenziert betrachtet.

Wind Zu Beginn wird der Parameter mit dem vermeintlich größten Einfluss auf die Geschossbahn betrachtet. Wind hat in der Realität vor allem bei längeren Flugbahnen eine gravierende Auswirkung auf den Auftreffort des Geschosses.

Abbildung 4.6 zeigt im Gegensatz zu den wirklichen Verhältnissen den fehlenden Einfluss der Windkraft auf den Geschossweg bei der Anwendung des *Projectile Add-ons*. Die Einwirkung des *Force Fields Modifiers* verhält sich atypisch zu der erwarteten Abweichung des Geschosses, da lediglich das dem Zentrum der Windkraft am nächsten gelegene *Frame* beeinflusst wird. Hierbei ist die genaue physikalische Wirkungsweise der Kraft unklar. Analog findet auch bei größeren Windstärken keine stärkere Ablenkung in *y*-Richtung statt.

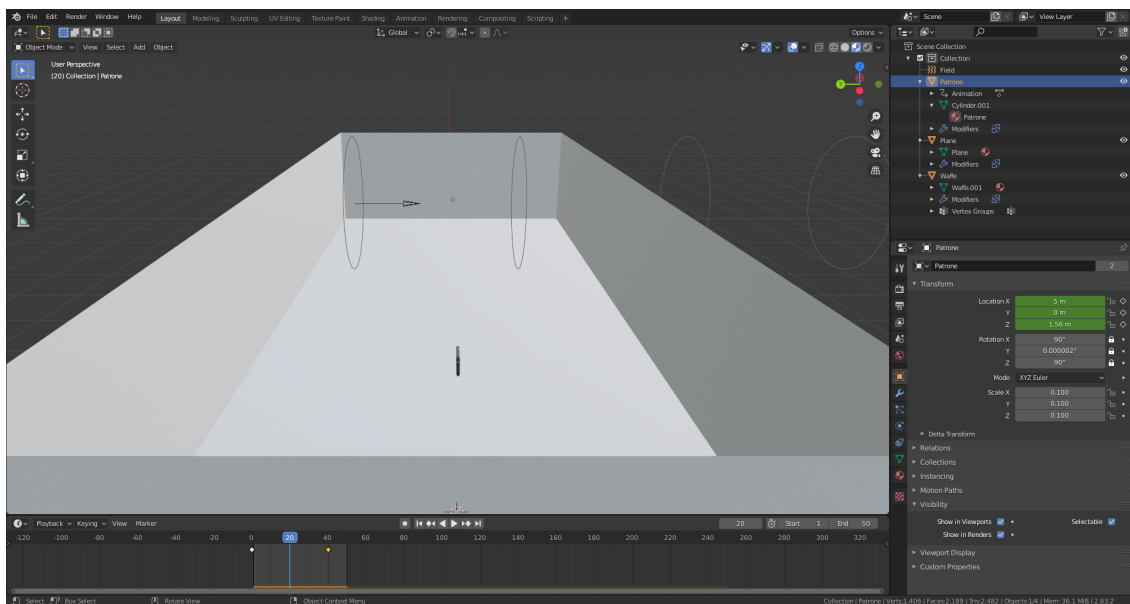


Abbildung 4.6: Der blender-interne Screenshot zeigt den Einfluss des Windes, welcher orthogonal zur Flugrichtung auf das Geschoss wirkt. Das Verschieben des gelben Pfeils reguliert die Stärke der Krafteinwirkung.

Curve Guide Das *Curve Guide Force Field* dient ähnlich zu den Trajektorien der manuellen Erstellung einer Flugbahn anhand definierter Kurven. Hierbei sendet ein Objekt, die Waffe, einen Emitter in Form der Patrone aus. Dieser folgt dem vorgegebenen Pfad bis zum Ende. Abbildung 4.7 zeigt hierbei die Ausprägung einer *Bezier Curve* anhand der eingangs beschriebenen Testumgebung. Die drei rotfarbenen Geraden stellen Tangenten am jeweiligen Mittelpunkt der Kurve dar. Sie geben die Richtung des Kurvenverlaufs vor. Eine Kollision mit der umgebenden Wand ist nicht möglich.

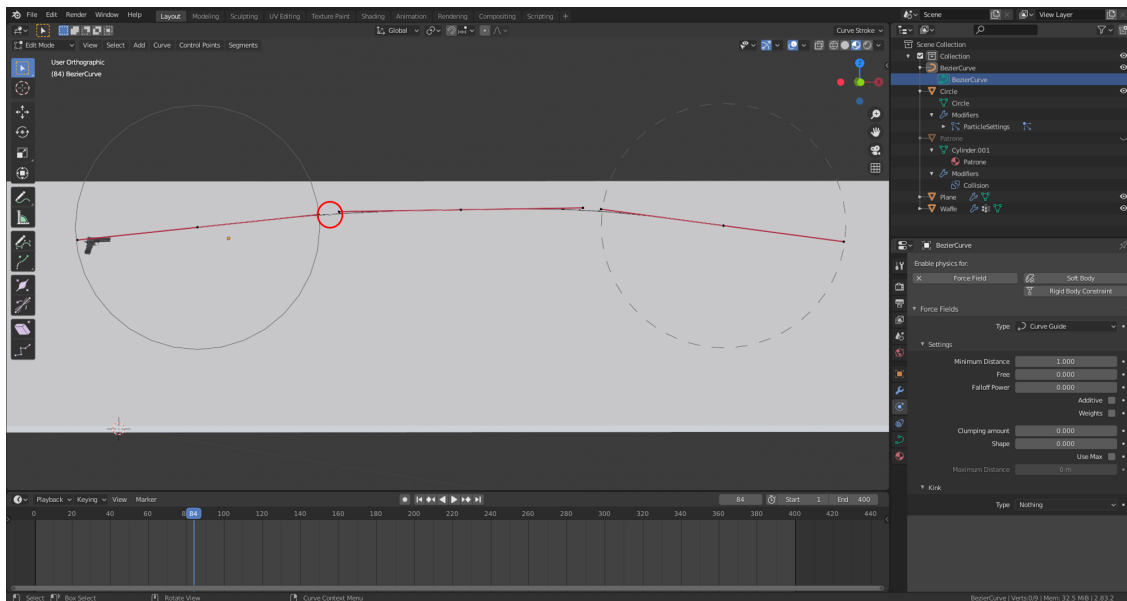


Abbildung 4.7: Die Abbildung beschreibt den Kurvenverlauf einer *Bezier Curve* unter Verwendung des *Particle Systems* in Kombination mit dem *Force Fields Modifier Curve Guide*. Die rotfarbene Umrandung zeigt die Position der Patrone, die als emittierendes Objekt aus der Waffenöffnung austritt.

Anhand der Abbildung 4.8 wird verdeutlicht, dass der *Force Fields Modifier Wind* bei der Verwendung von *Curve Guides* keinen Einfluss auf die Flugbahn des Geschosses besitzt. Trotz einer Windstärke von 25.000 ist keine Abweichung von der *Bezier Curve* vorhanden.

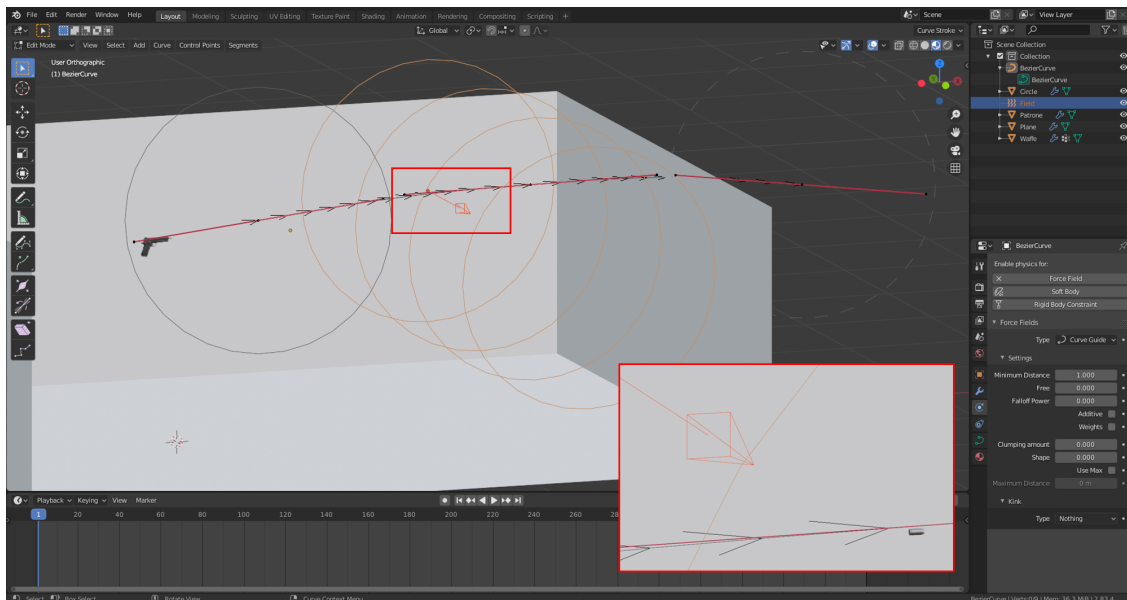


Abbildung 4.8: Die Aufnahme aus der Software Blender veranschaulicht den nicht existierenden Einfluss der *Wind* Kraft auf die Versuchsszene. Zur verbesserten Visualisierung der Geschossposition ist der rot umrandete Ausschnitt vergrößert dargestellt.

5 Diskussion

Die im vorangegangenen Kapitel erhobenen Ergebnisse zum außenballistischen Verhalten von Geschossen werden im Folgenden detailliert und kritisch ausgewertet. Die dabei entstehenden Erkenntnisse werden unter Betrachtung ausgewählter sowie repräsentativer Eventualitäten diskutiert. Zusätzlich werden grundlegende Erkenntnisse der Innen-, Abgangs- sowie Endballistik vorgestellt.

5.1 Simulation

Zur Validierung der Ergebnisse würde eine hinreichend große Versuchsreihe an Schüssen unter den gleichen äußeren Bedingungen durchgeführt werden. Anschließend wird der Mittelwert aller gemessenen Ergebnisse gebildet, um Resultate mit einer möglichst hohen Genauigkeit zu erzielen. Neben geringen zufälligen Abweichungen treten ebenfalls systematische Fehler mit ähnlichem Charakter auf, die die Qualität des Versuchsergebnisses verschlechtern. Variierende Fehler innerhalb der Schussreihe zeichnen sich beispielsweise durch die Schwankungen der Anfangsgeschwindigkeit, der Masse des Geschosses, der Trägheitsmomente und der Schwerpunktlage aus. Weiterhin werden Fehler beim Abgang des Geschosses verzeichnet, die durch Schwingungen des Rohres verursacht werden. Spontan auftretende meteorologische Bedingungen, wie beispielsweise Windböen, verfälschen das Ergebnis zusätzlich. Zu den systematischen Fehlern gehört die falsche Regelung der Winkeleinstellungen sowie der Anfangsgeschwindigkeit. Ungenaue meteorologische Messungen und Abstraktionsfehler bei der Approximation auf Normalbedingungen beeinflussen das Ergebnis außerdem. [12]

5.2 Grenzen der realen Flugbahnrekonstruktion

Im Zuge der Beschreibung von Grenzen einer realen Flugbahnrekonstruktion werden einleitend grundlegende Beschränkungen aufgezeigt. Es folgt die Betrachtung ausgewählter ballistischer Teilgebiete mit Augenmerk auf kennzeichnende Parameter der Außenballistik.

5.2.1 Vorbetrachtungen

Waffen sind enorm schwankenden Temperaturbedingungen ausgesetzt. Daher ist die korrekte Verarbeitung beim Bau der Pistole von besonderer Bedeutung. Schon die kleinsten Verarbeitungsfehler an Waffenteilen können bei geringer Verwendung zum Verlust der Funktionstüchtigkeit führen. Wenige Schüsse reichen demnach aus, um

Fehler in Bauteilen aufzudecken und die ideale Schusswirkung zu verfälschen. Diese geht mit nicht berechenbarem Geschwindigkeitsverlust sowie dem vollständigen Defekt der Waffe einher. [2] Die verwendeten Angaben bezüglich des Geschosses beziehen sich auf die Normen des Herstellers Speer Gold Dot. Die Angaben des Geschossgewichtes beruhen vorrangig auf Mittelwerten bei der Produktion. Aufgrund von geringen Produktionsfehlern kann dieser Wert jedoch um Hundertstel vom angegebenen Wert abweichen und somit minimale Änderungen an der Flugbahn erzeugen. [14]

5.2.2 Innenballistik

Wärmeverluste innerhalb des Rohres können zu einer Verminderung von Druck und Temperatur führen. Diese werden durch die Beschaffenheit der Wände sowie die Beschleunigung des Geschosses ausgelöst. Die Funktionsweise der innenballistischen Prozesse werden weiterhin durch die Bauweise des Rohres beschränkt. Insbesondere sind hierbei die Baulänge sowie das Gewicht entscheidend für die Funktionalität und das Gelingen des eben beschriebenen Ablaufs. Durch die vermehrte Verwendung der Schusswaffen entstehen innerhalb des Rohres minimale Verunreinigungen durch die festen Rückstände des Treibmittels. Häufen sich diese an können sie zur Verzögerung und ebenfalls zu Abweichungen beim Schussverlauf führen. [18]

5.2.3 Außenballistik

Schusswinkel Die genaue Regulierung des Schusswinkels s_w ist bei Handfeuerwaffen spontan nicht realisierbar. Zu den technischen Hindernissen gehören die instabile Waffenhaltung sowie der kaum messbar kleine Schusswinkel, weshalb Visiere zum Ausgleich verwendet werden. Normalerweise befindet sich das zu treffende Ziel auf Höhe der Geschützöffnung und es resultiert eine annähernd waagerechte Mündungslinie. Im Gegensatz dazu entstehen bei geneigten Schüssen ab einem Lagewinkel von 15° deutliche Höhenfehler. Diese treten bei großen Schusswinkeln, beispielsweise im Gebirge oder urbanem Gelände wie Hochhäuser, langsamen Geschossen und großen Distanzen auf. [26]

Höhenfehler Die Genauigkeit des mathematischen Modells ist maßgebend für deren praktischen Nutzen. Um die Genauigkeit der vorgestellten Gleichung nun zu validieren, wird mithilfe der hoch präzisen Software k-ballistics 3.11 von Beat P. Kneubuehl die Flugbahn im Vakuum vergleichend zur Flugbahn in der Luft betrachtet. Diese Betrachtung erfolgt zunächst bezogen auf kurze Flugbahnen und wird dann auf lange Flugbahnen erweitert. Als Beispiel wird der Munitionstyp GP 90 verwendet. Dieser ist als leichtes und dadurch schnelles Geschoss charakterisiert. [25]

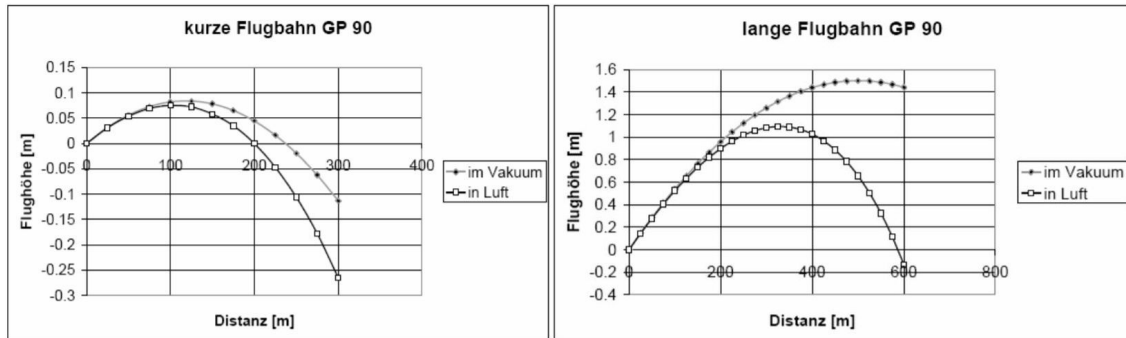


Abbildung 5.1: Die Abbildung zeigt den Vergleich der Funktionsgraphen einer kurzen Flugbahn (links) zu einer langen Flugbahn (rechts) des Geschosses GP 90. Hierbei steht die Flughöhe [m] in Abhängigkeit zur Flugdistanz [m]. Innerhalb der beiden Diagramme werden die Funktionen der Flugbahn im Vakuum (ausgefüllte Vierecke) und in der Luft (leere Vierecke) gegenübergestellt. [25]

Wie in dem linken Diagramm der Abbildung 5.1 dargestellt, beträgt die Differenz der Flughöhe beider Kurven bei 200 m Flugdistanz nur 5 cm. Ab dieser Distanz aufwärts wird der Höhenfehler jedoch so groß, dass das Vakuum-Modell nicht mehr repräsentativ für die Darstellung der korrekten Flugbahn ist. Besonders bei weiten Schussdistanzen kann die Vernachlässigung des Luftwiderstandes nicht mehr ohne gravierende Fehler erfolgen. Am Beispiel der GP 90 in dem rechten Diagramm der Abbildung 5.1 sind ab 200 m Flugdistanz große Unterschiede der beiden Flugbahnen in Abhängigkeit zur Flugdistanz erkennbar. Für die exakte Berechnung der Flugbahnparameter ist die Abweichung beider Funktionskurven zu signifikant. [25]

Zusammenfassend kann demnach festgestellt werden: Je schwerer und langsamer das Geschoss ist, desto geringer ist der Höhenfehler bei der kurzen Flugbahn im Vakuum und in der Luft ausgeprägt. Aus der zweiten Prämisse folgt weiterhin: Je größer die Flugzeit des Geschosses ist, desto größer ist die Einwirkung des Luftwiderstandes auf das fliegende Geschoss und desto deutlicher ist die Krümmung der Flugbahn ausgeprägt. [25]

Luftwiderstandsbeiwert Der Luftwiderstandsbeiwert c_w ist neben dem Geschosstyp ebenfalls von der abgefeuerten Waffe abhängig. Hierbei hat besonders die Dralllänge einen Einfluss auf das Flugverhalten des Geschosses, da dieser den Grad der Präzision und der Nutation, d.h. der Schwankung des Geschosses entlang der Flugbahn, verändert. [20] Als Dralllänge wird die zurückgelegte Strecke eines Geschosses beschrieben, in der sich das Geschoss einmal um die eigene Achse gedreht hat. [35] Aus empirischen Studien geht hervor: Je größer die Dralllänge eines Geschosses ist, desto deutlicher ist das Phänomen der Abweichung vom publizierten Wert ausgeprägt. Die vom Hersteller veröffentlichten oder empirisch ermittelten c_w -Werte sind daher nicht in jedem Fall allgemeingültig und bedürfen einer eingehenden Prüfung bzw. Evaluation vor ihrer Verwendung. Das Phänomen der Drallabhängigkeit lässt sich durch die ungünstige Paarung von Geschoss und Waffe erklären. Bei einer solchen Konstellation wirkt

der Luftwiderstand an der Seite des grenzstabilen Geschosses und verursacht somit geringe Abweichungen zu der stabilen Fluglage. [25]

Zur Vereinfachung wurde das Geschoss als Massepunkt dargestellt. Durch das Hinzufügen der Querschnittbelastung sowie des Luftwiderstandes wird die benötigte Rechenleistung sowie der Speicherbedarf immens erhöht. Eine Erhöhung der Rechenkapazität von Computern kann die Berechnung der numerischen Integration beschleunigen und somit verbessern. [25]

Geschossstabilisierung Der Unterschied zwischen kugel- und zylinderförmigen Geschossen erzeugt bei der Rekonstruktion des Schussverlaufs einen großen Unterschied. Ist das Geschoss ähnlich einer Kugel treten Seitenabweichungen durch die Schräglage der Drehachse ein. Diese entstehen durch den Luftwiderstand und resultiert in der Verzögerung des Kugelgeschosses. Abweichungen vom ursprünglichen Ziel und der Schussweise sind hierbei typische Folgen. [18]

Um die Flugbahn der Geschosse zu stabilisieren, wurden im Laufe der Entstehungsgeschichte von Waffen Langgeschosse verwendet, die dem Luftwiderstand und den wechselnden Druckverhältnissen standhalten können und ruhiger in der Luft fliegen. Diese Langgeschosse besitzen einen zylinderförmigen Körper, der sich am vorderen Ende zuspitzt. Die zurückgehenden Abweichungen von der Flugbahntangente ermöglichten eine erhöhte Trefferquote sowie eine verbesserte Flugweite, da sich das Geschoss im Gegensatz zur Kugel innerhalb der Flugbahn nicht überschlägt. [18]

Instabile Geschosse Nachfolgend wird das Verhalten von instabilen Geschossen kurz dargestellt. Instabile Geschosse weisen einen Anstellwinkel von über 15° auf. Dieses Phänomen wird durch eine nicht ausreichende gyroskopische Stabilität oder eine kurzzeitige Einwirkung auf den Drehmomentstoß verursacht. Eine Stabilisierung des Geschosses ist bei ausreichend Drall möglich. Bei kurzen Schussdistanzen wird zur Approximation eine Gerade als Flugbahn angenommen. Hierbei sind die grundsätzlichen Gegebenheiten bei dem Abprall eines Projektils einzubeziehen. Ist der entsprechende Abprallwinkel in Abhängigkeit zum getroffenen Objekt vorhanden, kann die Rekonstruktion des Auftreffwinkels sowie der Schussgeraden ohne bedeutende Probleme vorgenommen werden. Im Gegensatz dazu ist bei mittleren oder langen Schussdistanzen eine solche Rekonstruktion langwieriger. Hierbei erzeugen vor allem Fehleinschätzungen der Querschnittbelastung sowie der Luftwiderstandsbeiwert große Abweichungen von den realen Verhältnissen. Wenn das Geschoss die ganze Flugdistanz über instabil fliegt, erschwert es die Rekonstruktion zusätzlich. Als Ergebnis kann letztendlich nur ein ungefährer Distanzbereich für den Standort des Schützen angegeben werden. [15]

Atmosphäre Die Unterscheidung des Temperaturprofils der wirklichen Atmosphäre von der Normalatmosphäre ist wesentlich für die Einschätzung der resultierenden Abweichungen. Inversionswetterlagen sorgen im Winter für große Unregelmäßigkeiten zu normalen Bedingungen. Dieses Phänomen hat jedoch kaum Auswirkungen auf Flachbahnwaffen, da der Luftdruck und die Temperatur auf Mündungshöhe gemessen werden. [15] Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch die unvorhersehbaren meteorologischen Verhältnisse während der Schussabgabe die Flugbahn nicht vollständig durch eine digitale Simulation ersetzt werden kann. [25]

5.3 Möglichkeiten und Grenzen computergesteuerter Beschussexperimente

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit blender-internen Möglichkeiten zur Umsetzung von realen Beschussexperimenten. Hierbei werden die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Parameter hinsichtlich ihrer Funktionalität bewertet. Zu Beginn wird auf den Nutzen der *Finite Element Analyse* eingegangen. Die Grenzen von computergesteuerten Beschussexperimenten beginnen anschließend bei den wechselnden Einflüssen von Umweltfaktoren bis hin zu programmtechnischen Umsetzung. Konkret wird auf die Anwendung der *Keyframe Animation*, des *Impulse Add-ons*, des *Projectile Add-ons* sowie der Verwendung des *Force Fields Modifiers* eingegangen. Hierbei werden insbesondere Fehlerquellen beschrieben, die eine ideale Umsetzung einer Simulation erschweren oder verhindern.

5.3.1 Finite Element Analyse

Die Finite Element Analyse dient als Standard bei der Erstellung von validierten 3D-Modellen und genießt daher innerhalb der Naturwissenschaften große Anerkennung. Um das Konzept der FEA nun auf die digitale Rekonstruktion eines Beschussexperiments übertragen zu können, werden innerhalb der Software Blender Funktionen getestet, die sich an den wissenschaftlichen Standard der Methode annähern. Demnach soll eine Übertragung der aktuellen FEA Ansätze auf eine Schusssimulation stattfinden. Diese kann zukünftig ebenfalls auf resultierende Verletzungsbilder angewendet werden. Zusätzlich dient der gehobene wissenschaftliche Standard einer FEA zur Unterstützung der Aussagekraft eines forensischen Gutachtens vor Gericht.

5.3.2 Modellierung der Patrone als 3D-Modell

Da das Geschoss als Einzelkörper keine Gelenke besitzt, die einzelne Körperteile miteinander verbinden, ist die Modellierung einer stark vereinfachten Version einer *Ragdoll* nicht möglich. Die Patrone besteht aus einem massiven Einzelteil, das keiner Unterteilung bedarf. Als alternative Methode, um eine Kollision mit anderen Objekten zu ermöglichen, wird der *Collision Modifier* verwendet. Dieser kann Kollisionen der Patrone mit Hindernissen auf deren Flugweg realisieren. Wichtig hierbei ist, dass das Geschoss in den *Physics* Einstellungen auf *Active* gesetzt wird. Der kollidierende Körper hingegen wird als *Passive* deklariert.

5.3.3 Anwendung der Keyframe Animation

Obwohl die Parameter der Masse und der Gravitation des Geschosses eindeutig definiert werden können, ist die exakte Implementierung der Geschossgeschwindigkeit nicht möglich. Diese kann lediglich durch den Abstand der *Keyframes* bestimmt werden. Je näher die definierten *Keyframes* innerhalb der *Timeline* beieinander liegen, desto schneller läuft die Simulation ab und das Geschoss trifft auf ein Hindernis. Das nachträgliche Einfügen von Kraftfeldern beeinflusst die Simulation der Geschossbewegung nicht. Besitzt das Geschoss eine sehr hohe Mündungsgeschwindigkeit v_0 und eine geringe Distanz y , entspricht die Flugbahn annähernd einer Geraden, die auf der Höhe der Mündungslinie verläuft. Der Schusswinkel s_w beim *Keyframing* entspricht 90° und kann nicht verändert werden. Der Höhenunterschied innerhalb der Bahnkurve kann durch das manuelle Einfügen von zusätzlichen *Keyframes* visualisiert werden. Da die in Abschnitt 2.3.3 definierten, grundlegenden Startbedingungen der Mündungsgeschwindigkeit v_0 sowie des Bahnwinkels $b_w(0)$ nicht konfiguriert werden können, ist die Methode des normalen *Keyframings* für eine wirklichkeitsgetreue Nachbildung der Realität nicht geeignet. Erst wenn alle umgebenden Parameter und Einflüsse bekannt sind, kann der Flugverlauf nachgebildet werden. Neue Erkenntnisse zugunsten einer Rekonstruktion liefert diese Methode nicht.

5.3.4 Anwendung des Impulse Add-ons

Im Vergleich zu der Methode des *Keyframings* gestaltet sich die Erstellung einer Flugbahnrekonstruktion mit *Impulse* in mancher Hinsicht unkomplizierter. Das Einfügen eines konkreten Zielpunktes ist bei einer detailgetreuen Rekonstruktion einfacher zu realisieren. Somit kann von jedem beliebigen Startpunkt aus das Ziel getroffen werden. Dieses Konzept wäre zwar ebenfalls bei dem normalen *Keyframing* möglich, ist jedoch sehr zeitaufwändig. Ähnlich wie bei der vorangegangenen Methode kollidiert das Geschoss mit einem Hindernis, in diesem Versuchsaufbau die Patrone. Durch das empirische Variieren der Auftreffwinkel bei der Kollision kann der Auffindeort des Geschosses bestimmt werden. Voraussetzung hierbei ist jedoch, dass grundlegende Kenntnisse über die Art der Waffe, deren Geschossgeschwindigkeit sowie die Kollisionsstelle vorhanden sind.

Da das *Add-on Impulse* nicht weitergehend optimiert wird, weist es gravierende Fehler auf, die bei der Umsetzung einer Rekonstruktion unerwünscht sind. Während der Bewegung auf der Flugbahn kann das animierte Objekt nicht mit äußerer Physik interagieren bis es den Zielpunkt erreicht hat. Danach bewegt es sich anhand der konfigurierten *Rigid Body Physic*. Zur realen Simulation von Kollisionen muss der Zielpunkt demnach vor den kollidierenden Körper gesetzt werden. Bei großen Geschwindigkeiten müsste der Wert für die *Frames per Seconds* erhöht werden, damit die Physikeinstellungen der Simulation weniger fehlerhaft sind, also weniger *Bugs* aufweisen. Demnach wird bei *Quality* die Option *High* ausgewählt. [8]

Ein weiteres Problem bei der Rekonstruktion stellt die Gravitation während des Kollisionsweges dar. Idealerweise würde die Waffe mit der Mündungsgeschwindigkeit geradlinig mit der Patrone kollidieren und anschließend jegliche Bewegung einstellen. Jedoch folgt das 3D-Modell der Waffe nach der Kollision der Geschossbewegung und beeinflusst deren Verlauf. Da bei den Geschwindigkeitseinstellungen unter *Velocity* die *x*-, *y*- und *z*-Komponenten ausgewählt werden können, kann eine horizontale Abweichung simuliert werden. Diese muss jedoch im Voraus bekannt sein.

Da die Beeinflussung des Geschosses während der Flugbahn bei *Impulse* in Blender nicht unterstützt wird, ist es für eine wirklichkeitsgetreue Rekonstruktion nicht geeignet. Jedoch können einfache Ortsbestimmungen durchgeführt werden. Mithilfe einer Testreihe und empirischem Vorgehen kann ausgehend vom Auftreffpunkt sowie Geschwindigkeit der Patrone auf den Ursprungsort des Schusses geschlossen werden. Weiterhin muss ähnlich zu dem *Keyframing* der Start- und Zielpunkt der Flugbahn bekannt sein. Bei realen Delikten sind diese Angaben nicht immer gegeben.

5.3.5 Anwendung des Projectile Add-ons

Nach dem Hinzufügen des Emitters wird die Patrone allein durch die Schwerkraft beeinflusst. Die Trajektorie zeigt demnach auf dem kürzesten Weg zur Oberfläche des Bodens. Erst das Hinzufügen des Geschwindigkeitsvektors und der Neigung führt zu einem typischen Flugbahnverlauf.

Der in Kapitel 3.4.1 beschriebene Versuchsaufbau ermöglicht keine Kollision von Objekten, die eine sehr hohe Geschwindigkeit besitzen. Bei Objektgeschwindigkeiten über $50 \frac{m}{s}$ wird die als Untergrund dienende *Plane* durchbrochen und eine vollständige Kollision verhindert. Dies ist bei einer Mündungsgeschwindigkeit von $360 \frac{m}{s}$ der Fall. Jedoch kann durch die feingliedrige Unterteilung des *Meshes* bei der Wahl des *Shape* der Aufprall des Objektes realitätsnaher animiert werden. Die Auswahl von *Base* bei *Source* verursacht, dass während der Simulation keine Verformung des Objektes stattfindet, da nur das Basis *Mesh* des Objektes involviert ist. [28] Die *Field Absorption* der *Collision* Einstellungen wird für alle Gegenstände bei null belassen, damit Kräfte auch durch das Kollisionsobjekt hindurch wirken können.

Durch das gesetzte Häkchen bei *Animated* der *Physic Properties* von aktiven Objekten wird simuliert, dass der Täter kurz nach dem Schuss die Waffe auf Mündungsebene behält, um die normale Flugbahn möglichst nicht zu beeinflussen. Der Parameter *Dynamic* bewirkt bei der Patrone, dass deren späterer Emitter der Gravitation ausgesetzt ist. Um eine Bewegungsdämpfung von aktiven Festkörpern zu veranlassen, müssen genaue Angaben zum Luftwiderstand und der Bewegungsgeschwindigkeit sowie -rotation vorhanden sein. Weiterhin ist die Einstellung der Dämpfungsstärke unklar, da der Parameter keine konkreten Einheiten verwendet. Eine vorangegangene Testreihe kann hierbei Aufschluss über deren genauen Einfluss geben. [28]

Problematisch bei der Veränderung der Parameterkombinationen ist, dass das nachträgliche Korrigieren unter *Transform* im *Properties Panel* beim Ausführen von *Execute* rückgängig gemacht wird. Das heißt die *Physics* Einstellungen des Emitters werden zurückgesetzt. Demnach müssen manuell alle Konfigurationen erneut erfolgen.

Da die *Spherical Coordinates* der *Projectile* Einstellungen intuitiver in der Verwendung sind, wurden sie für die vorangegangenen Betrachtungen verwendet. Sind differenziertere Angaben über die Geschwindigkeit des Geschosses vorhanden, kann die *x*-, *y*- und *z*-Komponente der Geschwindigkeit (*Velocity*) bestimmt werden. Hierbei entspricht der *x*-Wert der eigentlichen Geschossgeschwindigkeit, der *y*-Wert dem *Incline* Winkel und die *z*-Komponente dem *Azimuth* Winkel. Diese Angaben werden mit der Einheit $\frac{m}{s}$ angegeben. Der *Incline* Winkel von 89° entspricht einem möglichst realitätsnahem Abschusswinkel. Ein Winkel von 90° würde parallel zur Mündungslinie verlaufen. Je höher der Winkel der *Angular Velocity* gewählt werden, desto schneller dreht sich das Objekt. Die Untergliederung in *x*-, *y*- und *z*-Komponenten bezüglich des zu betrachtenden Körpers ermöglicht das Anpassen der Rotationsgeschwindigkeit in gewählter Richtung.

Wird die Waffe beim Schießen durch den Schützen bewegt, kann durch die Positionsänderung des Emitters ein solches Verhalten simuliert werden. Die Bewegung der Waffe hat eine große Auswirkung auf den anschließenden Schussverlauf und muss für eine wirklichkeitsgetreue Simulation genauestens dokumentiert worden sein.

Zusammenfassend betrachtet ähneln sich die Funktionsweisen der *Add-ons Impulse* und *Projectile* stark. Im Gegensatz zu dem *Impulse Add-on* weist *Projectile*, wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben, vielversprechende Ansätze zur Umsetzung einer Flugbahnrekonstruktion auf. Zunächst wird der Verlauf der Flugbahn durch eine Trajektorie dargestellt. Diese dient in Form der Schätzung des Flugbahnpfades als grobe Orientierung. Weiterhin übernimmt *Projectile* das gesamte *Keyframing* in automatisierter Weise. Die leichte Verwendung durch intuitive Steuerelemente wird dadurch noch verstärkt. [7] Vergleichbar mit den vorangegangenen Methoden können die Masse der Objekte, die Gravitation sowie Kollisionen mit Hindernissen implementiert werden. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass das Kollisionsverhalten durch kleinste Fehler innerhalb der Modellierung nicht der realen Verhaltensweise entspricht und somit von ihr abweicht. Die genauen Fehlerquellen sowie die resultierende Kollision bedürfen einer umfangreichen Analyse, die nicht Teil dieser Arbeit ist.

5.3.6 Möglichkeiten und Grenzen der Umsetzung physikalischer Kräfte

Nachfolgend wird mit Fokus auf die Außenballistik die blender-internen Möglichkeiten und damit einhergehenden Grenzen der Digitalisierung von Flugbahnen aufgezeigt. Für die restlichen Abschnitte der Ballistik werden sowohl Erfolg versprechende Ideen als auch Beschränkungen für eine wirklichkeitsgetreue Umsetzung beschrieben.

Innenballistik und Abgangsballistik Die chemischen Gegebenheiten innerhalb des Pistolenlaufs können in Blender nicht realitätsgetreu umgesetzt werden. Demnach kann keine Unterscheidung des verwendeten Treibmittels in Bezug zum Waffentyp vorgenommen werden. Es kann lediglich die Zündung der Treibmittel und die einhergehende Explosion visualisiert werden. Dies kann mithilfe des *Explode Modifier* umgesetzt werden. Für eine gerichts feste Verwertung ist dieser Aspekt jedoch irrelevant. Im Bereich der Abgangsballistik kann die rückstoßende Wirkung beim Abfeuern der Waffe nur schwer implementiert werden. Da die Haltung der Waffe durch den Menschen sowie sein resultierendes Verhalten ohne Hintergrundmaterial in Form von Videoaufzeichnungen nicht dargestellt werden kann, ist eine Digitalisierung kaum möglich. Deshalb wurde der Waffe als passives Objekt bei der Anwendung des *Projectile Add-ons* ein statisches Verhalten zugewiesen. Weiterhin kann die innere Beschleunigung der Patrone in Verbindung mit den Abnutzungserscheinungen der Waffe nicht realitätsgetreu imitiert werden. Jeder Schuss unterscheidet sich auch unter gleichen Bedingungen minimal von

dem vorherigen, sodass keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden können. Zusammenfassend lässt demnach einzig und allein der Geschossverlauf innerhalb der Außenballistik Rückschlüsse auf das innen- und abgangsbalistische Verhalten zu.

Außenballistik Die Startbedingungen einer generellen Flugbahn, die Mündungsgeschwindigkeit v_0 und der Schusswinkel s_w können mithilfe des Blender *Add-ons Projectile* problemlos implementiert werden. Die Geschossgeschwindigkeit kann neben *Projectile* auch in *Impulse* sowie den Partikeleinstellungen definiert werden. Dies gilt ebenso für die Geschossmasse m sowie die Gravitation g . Der *Projectile* Parameter *Incline* implementiert den Neigungswinkel beim Abschießen des Projektils. Die Einstellung der Geschossgeschwindigkeit, des Schusswinkels und das Platzieren von kollidierenden Hindernissen bestimmen die Flughöhe y sowie die Flugdistanz x . Sie stellen demnach vor allem in der Umgebung des *Projectile Add-ons* keine Herausforderung dar. Im Gegensatz dazu ist die Implementierung der exakten Geschossrotation eine schwierige Angelegenheit. Sie wird nach dem Verlassen der Geschützöffnung durch die Winkelgeschwindigkeit ω verursacht. Zwar kann mit *Angular Velocity* in *Projectile* und bei den *Curve Guide* Einstellungen eine konstante Rotation generiert werden. Da die genaue Winkelgeschwindigkeit des Projektils jedoch unter atmosphärischen Bedingungen ständig seinen Wert ändert, ist der Parameter nicht gänzlich für die Problematik geeignet. Dies gilt ebenfalls für die daraus entstehende Drehfrequenz des Projektils. Bestehende Winkel wie der Fallwinkel f_w des Geschosses und der Bahnwinkel $b_w(0)$ können annähernd durch Trajektorien beeinflusst werden. Bei Bedarf kann bei der Verwendung von *Curve Guides* eine exakte Abmessung der Winkel geschehen. Dies wird mithilfe des *Measure* Werkzeugs des *Toolshelf* realisiert. Da die Zeit in Blender anhand der vergangenen *Frames* in der *Timeline* gemessen wird, ist eine Realisierung von Beschleunigungen nicht möglich. Dies betrifft die Zentrifugalbeschleunigung a_{zp} sowie die Coriolisbeschleunigung a_c . Zwar könnte für Beschleunigungen der *Force Modifier* verwendet werden, da aber eine konstante Richtungsänderung der Kraft stattfindet, ist dieser Ansatz nicht sinnvoll. Das Hauptproblem physikalischer Berechnungen stellt der Luftwiderstand F_w dar. Insbesondere das Durchbrechen der Schallmauer kann in Blender nicht simuliert werden. Weiterhin besitzen Projektile eine charakteristische Formgebung, die sich deutlich auf den Luftwiderstandsbeiwert c_w auswirkt. Dieser hat in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit v einen großen Einfluss auf die Geschossbewegung. Da dieser Wert nicht rechnerisch, sondern empirisch bestimmt wird, ist er für viele Geschosstypen unbekannt. Diese Tatsache verstärkt die Komplexität der mathematischen Beschreibung einer Flugbahnkurve ungemein.

Endballistik Das endballistische Verhalten bei Auftreffen der Kugel auf ein Hindernis kann durch die Finite Element Analyse beschrieben werden. Hierzu muss in Kombination zu Blender eine Software, wie beispielsweise FreeCAD, verwendet werden, die eine solche Analyse ermöglicht und gleichzeitig mit Blender kompatibel ist.

Weiterhin kann das Zersplittern verschiedenster Materialien beim Durchbrechen des Geschosses durch das *Cell Fracture Add-on* beschrieben werden. Zur Anschauung wird dieses Verhalten in Abbildung 5.2 dargestellt.

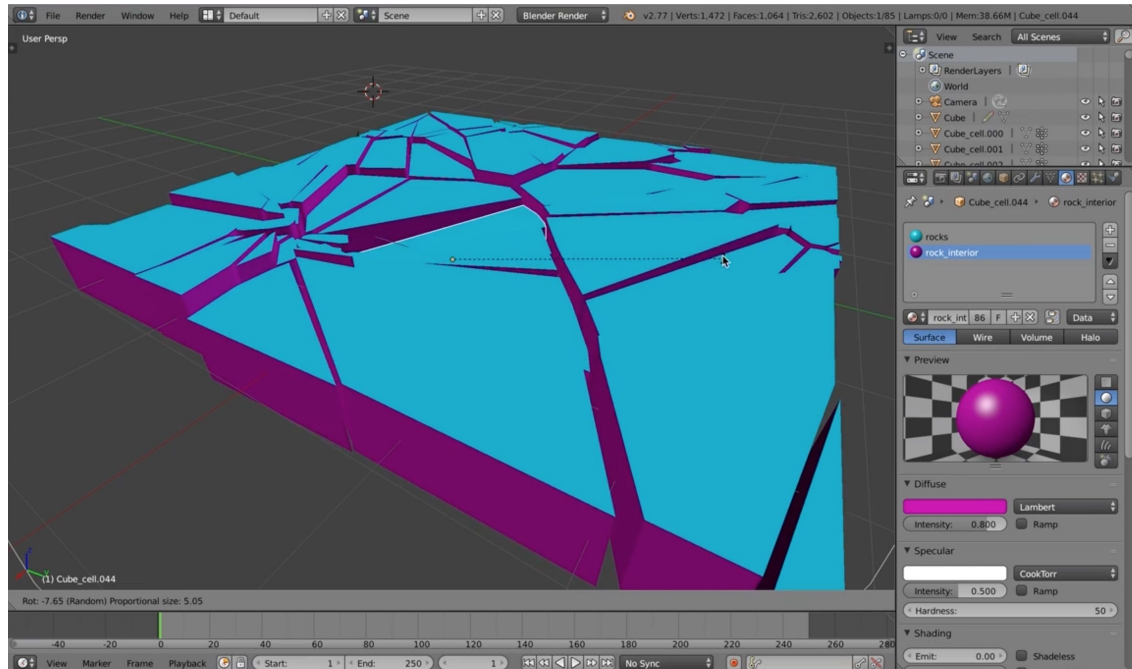


Abbildung 5.2: Der blender-interne Screenshot zeigt das zerbrochene 3D-Modell einer Art Wand mithilfe der Nutzung des *Cell Fracture Add-ons*. Zur Visualisierung wurden die Seitenflächen im Gegensatz zur blauen Oberfläche violett gefärbt. [41]

5.3.7 Möglichkeiten und Grenzen der Umsetzung atmosphärischer Bedingungen

Anhand der Standardatmosphäre können bei fehlendem Hintergrundmaterial zu den Tatumständen Orientierungsdaten übernommen werden. Diese stehen in Abhängigkeit zur geografischen Höhe. Vor allem bei langen Flugbahnen kann ein gravierender Höhenunterschied bestehen. Der dabei entstehende Auftreffort des Geschosses resultiert in einem größeren Umkreis. Dieser muss bei digitalen Rekonstruktionen beachtet werden. [15]

Die einfache Erstellung von wirklichkeitsgetreuem Luftdruck und Luftdichte ist in Blender nicht möglich. Mit der Einführung von Blender 2.8 erhält die Simulation von *Cloth* Objekten eine Art inneren Luftdruck, der das Modellieren von Stoffen, wie beispielsweise Kissen oder Ballons, ermöglicht. Konkret kann über die Option *Cloth Springs* eine Festigkeit des Stoffes definiert werden, der sich ähnlich einer *Soft Body* Simulation verhält. Hierbei wird zusätzlich die stofftypische Charakterisierung in die Simulation

einbezogen. [13] Dieser innere Luftdruck von Stoffen ist jedoch nicht für die Rekonstruktion einer Flugbahn geeignet. Mithilfe von zwei verschiedenen Partikelsystemen könnte ein scheinbarer Luftdruck realisiert werden. Dieses Vorgehen ist jedoch sehr komplex. Weiterhin ist die Realisierung von Luft als gasförmiger Stoff über den *Smoke Physics Modifier* möglich. In Blender können daher nur Phänomene simuliert werden, die eine bestimmte Temperatur suggerieren, beispielsweise die Wärme von Feuer. Die eigentliche Temperatur von Objekten kann nicht konfiguriert werden. [28]

Blender ermöglicht grundsätzlich das Simulieren von Wind in eine definierte Richtung. Jedoch ist die genaue Regulierung der Geschwindigkeit nicht möglich. Lediglich der Parameter *Strength* gestattet die Einstellung der Windstärke. Je größer der Wert ist, desto stärker ist die Krafteinwirkung. Da der Parameter keine Einheit als Referenzwert besitzt, kann die exakte Relativgeschwindigkeit des Geschosses nicht berechnet werden. Aufgrund der hohen Geschossgeschwindigkeit üben Windböen im Gesamtzusammenhang betrachtet einen sehr geringen Einfluss auf den Verlauf der Flugbahn aus. [15]

Da der Einfluss vor allem bei dem *Projectile Add-on* sehr gering ist, kann er vernachlässigt werden. Für das *Impulse Add-on* ist die Benutzung des *Wind Force Fields* nicht zu empfehlen, da es den geradlinigen Kollisionsweg der Waffe sowie den Geschossweg negativ beeinflusst. Die hierbei entstehende Bewegung ist nicht mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten vereinbar. Zwischen zwei benachbarten *Frames* springt das Geschoss zu einem Ort entgegengesetzt der Bewegungsrichtung und anschließend wieder zurück. In abgeschwächter Form ist diese Reaktion auf den Wind auch in *Projectile* aufzufinden. Ein solches Verhalten ist nur durch Anpassungsfehler der *Bullet Physics Engine* zu erklären.

Die Verwendung des *Force Fields Modifier Curve Guide* ist für einfache Flugbahnbewegungen geeignet. Die Patrone in der Ausprägung eines Emitters verläuft hierbei streng entlang der modellierten Bahnkurve. Die Anwendung des Kraftfeldes ermöglicht Kollisionen mit der Umgebung. Jedoch entspricht das Verhalten der Patrone nicht dem erwarteten physikalischen Verhalten eines abprallenden Körpers. Bei der Modellierung ist darauf zu achten, dass der Emitter nach Verlassen der *Bezier Curve* verschwindet. Daher muss das kollidierende Objekt vor dem Ende der Kurve platziert werden. Ein großer Nachteil bei der Rekonstruktion mithilfe dieser Methode ist, dass die gesamte Flugkurve manuell erstellt werden muss. Dies erfordert neben einem umfangreichen Hintergrundwissen zur Tat einen enormen Zeitaufwand. Im Normalfall werden anstatt eines Einzelobjekts mehrere Partikel ausgesendet. Anwendung findet diese Methode daher häufig bei der Simulation von roten Blutkörperchen in einem Blutgefäß oder bei der vordefinierten Bewegung von Achterbahnen. [28]

Der *Force Fields Modifier Wind* sowie alle anderen Arten von Kraftfeldern haben keinen Einfluss auf die Methode des *Curve Guides*.

6 Fazit

Zusammenfassend kann nach genauester Analyse aller vorliegenden Erkenntnisse zu dem Schluss gekommen werden, dass die blender-interne *Bullet Physic Engine* in ihrem nativen Zustand eine wirklichkeitsgetreue und vollständige Rekonstruktion eines Schussverlaufs nicht vornehmen kann. Einfachste Beschussexperimente von kurzen Flugbahnen und ohne gravierende äußere Einflüsse lassen sich zuverlässig darstellen. Dies geschieht unter Zuhilfenahme der *Keyframing Animation*, dem *Curve Guide Modifier* sowie den *Add-ons Impulse* und *Projectile*. Je komplexer jedoch der Versuchsaufbau wird, desto ungenauer kann eine Rekonstruktion stattfinden und es treten vermehrt Probleme bei der Modellierung auf.

Die Anwendung des *Keyframings* eignet sich besonders für Situationen bei denen der Startpunkt und das genaue Kollisionsziel der Flugbahn bekannt sind. Das *Impulse Add-on* ist aufgrund der fehlenden regelmäßigen Aktualisierung nicht für eine Rekonstruktion geeignet. Einfache Flugbahnen können jedoch durch das Definieren eines Zielpunkts simuliert werden. Die Vorgehensweise bei der Verwendung von *Curve Guides* ist nur bedingt für eine Flugbahnrekonstruktion verwendbar, da mit dieser Methode ein hoher manueller Zeitaufwand verbunden ist. Das *Projectile Add-on* kommt anhand der vorangegangenen Ausführungen am ehesten für eine Flugbahnrekonstruktion in Frage. Jedoch sollte seine Funktionalität mit zusätzlichen *Features* und Verbesserungen zukünftiger Versionen ergänzt werden. Zu den Problemen der Modellierung zählt das wirklichkeitsgetreue Kollisionsverhalten des Geschosses mit Hindernissen diverser Ausprägung. Weiterhin haben atmosphärische Bedingungen, die durch die *Force Fields Modifier* repräsentiert werden, keine natürliche Wirkung auf den Flugbahnverlauf. Dies geschieht auf Grundlage von Umsetzungs- und Implementierungsfehlern. Eine Verwendung der äußeren Einflüsse innerhalb einer gerichtsverwertbaren Rekonstruktion findet daher nicht statt.

Die Verwendung des *Projectile Add-ons* ist demnach für die Flugbahnrekonstruktion am erfolgversprechendsten. Hierbei kann die Flugbahn von äußeren Einflüssen bestimmt werden, welche bei den anderen Methoden nur bedingt einwirken können. Vor allem atmosphärische Einflüsse sowie der Luftwiderstandsbeiwert und der Höhenfehler erschweren die Rekonstruktion von langen Flugbahnen erheblich. Durch die immerwährende Entwicklung und der einhergehenden Verbesserung der programmtechnischen Bestandteile ist eine zukünftige Eignung der Flugbahnrekonstruktion weiterhin möglich.

Schlussfolgernd bauen alle Vorgehensweisen auf dem Vorhandensein von fundiertem Hintergrundwissen auf und können durch physikalische Parameterberechnungen ergänzt werden. Die Durchführung der Rekonstruktion einer Geschossflugbahn bleibt je-

doch ein komplexes Vorhaben, das auch zukünftig nur in ausgewählten Strafverfahren Anwendung finden wird.

7 Ausblick

Analog zur Vorgehensweise bei der Bestimmung der Herkunft von Projektilen und deren Abschussort können Parallelen zur Blutspurenanalyse gezogen werden. Chronologisch folgt bei ballistischen Betrachtungen nach der Flugbahn das Auftreffen des Projektils auf ein Objekt. Ist dieses Objekt ein menschlicher Körper, so folgen die Blutspritzer dem physikalischen Prinzip eines schrägen Wurfs und somit auch den Gesetzmäßigkeiten einer Flugbahnrekonstruktion. Anhand des Blutspritzmusters kann dann der Auftreffwinkel des Geschosses auf den Körper sowie die genaue Position des Opfers bestimmt werden. Diese Rekonstruktion kann ebenfalls auf Grundlage der Simulationspipeline und den darauf folgenden digitalisierten Schritten geschehen. Die daraus resultierenden Erkenntnisse können eine Flugbahnrekonstruktion ergänzen. [15]

Wird die Anwendung des endballistischen Verhaltens betrachtet, tritt das Potential des *Cell Fracture Add-ons* deutlich hervor. Beispielsweise kann somit die Charakterisierung von bestimmten Kollisionsmaterialien festgelegt werden. Weiterhin wird der Auftreffort des Geschosses mithilfe von fundiertem Wissen bezüglich der Endballistik eingegrenzt.

Das Hauptziel der FEA besteht in der „vollständige[n] virtuelle[n] Produktentwicklung“. Hierfür sollen Entwicklungszeiten und Herstellerkosten durch ein „effizientes Datenmanagement“ reduziert werden. Im Gegensatz zum realen Versuchsaufbau gewinnt die numerische und somit digitale Simulation zunehmend an Bedeutung. Maßgebend hierfür ist der „ressourcenschonende Materialeinsatz“. Auf Grundlage der Erschaffung einer Mikrowelt wird der Gesamtzusammenhang innerhalb der Makrowelt erfasst. Um die Genauigkeit der FEA hinsichtlich dieser Zielstellung zu verbessern, sind erweiterte Entwicklungen von Finite Element Modellen notwendig. In Zukunft erfolgt demnach ein deutlich verstärkter Einsatz der Methode. Neben der vorrangigen Anwendung in der Ingenieurstechnik entwickelt sich die FEA zunehmend im Bereich der Gesundheitsforschung, der Simulation von Umweltkatastrophen sowie der Terrorbekämpfung. Die Methode etabliert sich demnach zunehmend in allen naturwissenschaftlichen Branchen. [34]

Die Software Blender untersteht einer immerwährenden Entwicklung und Verbesserung. Mit der Einführung des Renderers *Eevee* werden zukünftig beispielsweise neue Möglichkeiten der Physik Simulation geschaffen. Diese werden außerdem durch die Verbesserung der Prozessor Leistung unterstützt. Sie ermöglicht die Erstellung realistischer Animationen bis hin zur idealen Echtzeitsimulation. Die Umsetzung der programmtechnischen Verbesserungen kann somit eine exaktere Rekonstruktion ermöglichen. Je genauer die digitale Simulation, desto aussagekräftiger kann ein forensischer Sachverständiger vor Gericht sein Gutachten verteidigen. Das Ziel einer solchen digitalisierten Simulation bleibt demnach das Streben nach Wissen und Wahrheit.

Literaturverzeichnis

- [1] ALLBECK, Jan M. ; FALOUTSOS, Petros: *Lecture notes in computer science*. Bd. 7060: *Motion in games: 4th international conference, MIG 2011, Edinburgh, UK, November 13 - 15, 2011 ; proceedings*. Berlin : Springer, 2011. <http://dx.doi.org/\url{10.1007/978-3-642-25090-3}>. <http://dx.doi.org/\url{10.1007/978-3-642-25090-3}>. – ISBN 9783642250897
- [2] ARDOVINI, Bruno ; ALL4SHOOTERS.COM (Hrsg.): *Beretta 92, Colt 1911, Glock 17: Vergleichstest von 3 Pistolen*. [\url{https://www.all4shooters.com/de/shooting/kurzwaffen/beretta-92-colt-1911-glock-17-vergleichstest/}](https://www.all4shooters.com/de/shooting/kurzwaffen/beretta-92-colt-1911-glock-17-vergleichstest/). Version: 13.10.2014
- [3] BECKER, Frank-Michael: *Formelsammlung: Formeln, Tabellen, Daten ; Mathematik, Physik, Astronomie, Chemie, Biologie, Informatik ; [bis zum Abitur*. 2. Aufl. Berlin : Duden Paetec Schulbuchverl., 2013. – ISBN 978–3–89818–700–8
- [4] BLENDER ; YOUTUBE (Hrsg.): *Keyframes - Blender 2.80 Fundamentals*. [\url{https://www.youtube.com/watch?v=SZJswvw9wEs}](https://www.youtube.com/watch?v=SZJswvw9wEs). Version: 30.07.2019
- [5] BUNGARTZ, Hans-Joachim (Hrsg.) ; ZIMMER, Stefan (Hrsg.) ; BUCHHOLZ, Martin (Hrsg.) ; PFLÜGER, Dirk (Hrsg.): *Modellbildung und Simulation: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 2., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg and Springer Spektrum, 2013 (eXamen.press). <http://dx.doi.org/\url{10.1007/978-3-642-37656-6}>. <http://dx.doi.org/\url{10.1007/978-3-642-37656-6}>. – ISBN 978–3–642–37655–9
- [6] CG TOP TIPS ; YOUTUBE (Hrsg.): *Particles Follow a Path in Blender 2.8x*. [\url{https://www.youtube.com/watch?v=Y7VkCgADrG0}](https://www.youtube.com/watch?v=Y7VkCgADrG0). Version: 04.03.2020
- [7] CRADDOCK, Nathan ; GITHUB (Hrsg.): *Projectile: An artist-friendly tool for throwing stuff around inside Blender*. [\url{https://github.com/natecraddock/projectile}](https://github.com/natecraddock/projectile). Version: 08.01.2020
- [8] CRADDOCK, Nathan ; BLENDERNATION (Hrsg.): *Add-on: Impulse - Initial Velocities for Rigidbody Objects*. [\url{https://www.blendernation.com/2016/06/25/add-impulse-initial-velocities-rigidbody-objects/}](https://www.blendernation.com/2016/06/25/add-impulse-initial-velocities-rigidbody-objects/). Version: 25.06.2016

- [9] DUDEN ; DUDEN (Hrsg.): *Wörterbuch: Emitter, der*. \url{https://www.duden.de/rechtschreibung/Emitter}. Version:2020
- [10] FUFÄEV, Alexander: *Was ist eine Trajektorie in der Physik?* \url{https://universaldenker.de/theorien/184}
- [11] GUEVARRA, Ezra Thess M.: *Modeling and Animation Using Blender: Blender 2.80: the rise of Eevee*. Berkeley, CA : Apress, 2020. <http://dx.doi.org/\url{10.1007/978-1-4842-5340-3}>. <http://dx.doi.org/\url{10.1007/978-1-4842-5340-3}>. – ISBN 978–1–4842–5339–7
- [12] HAUCK, Günter: *Äußere Ballistik: Eine Einführung in die Theorie der Geschößbewegung*. 1. Auflage. Berlin : Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik, 1972
- [13] HOFMANN, Gottfried ; HEISE.DE (Hrsg.): *3D-Software Blender 2.82 – Wasser, Feuer und Rauch simulieren: Feuer und Rauch generalüberholt*. \url{https://www.heise.de/newsticker/meldung/3D-Software-Blender-2-82-Wasser-Feuer-und-Rauch-simulieren-4661622.html}. Version:15.02.2020
- [14] HÖLTMANN, Felix ; DAS ONLINEMAGAZIN JAGDPRAXIS FÜR WAFFEN, OPTIK UND AUSTRÜSTUNG (Hrsg.): *Vergleichstest: Fangschusspatronen 9mm Luger*. \url{https://jagdpraxis.de/produkttests/waffen-munition/vergleichstest-fangschusspatronen-9mm-luger}. Version:19.10.2018
- [15] KNEUBUEHL, Beat P.: *Ballistik: Theorie und Praxis*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018. <http://dx.doi.org/\url{10.1007/978-3-662-58300-5}>. <http://dx.doi.org/\url{10.1007/978-3-662-58300-5}>. – ISBN 978–3–662–58299–2
- [16] LABUDDE, Dirk ; SPRANGER, Michael: *Forensik in der digitalen Welt: Moderne Methoden der forensischen Fallarbeit in der digitalen und digitalisierten realen Welt*. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 2017. <http://dx.doi.org/\url{10.1007/978-3-662-53801-2}>. <http://dx.doi.org/\url{10.1007/978-3-662-53801-2}>. – ISBN 9783662538012
- [17] LORBER, Martin ; ELECTRONIC ARTS (Hrsg.): *Blog für digitale Spielkultur: Spiele-Engines: Eine Übersicht*. \url{https://spielkultur.ea.de/allgemein/spiele-engines-eine-uebersicht/}. Version:09.09.2017
- [18] LORENZ, Hans: *Ballistik: Die mechanischen und thermischen Grundlagen der Lehre vom Schuß*. [S.l.] : Oldenbourg Wissenschaftsverlag and DE GRUYTER OLDENBOURG, 1942. [http://dx.doi.org/\url{10.1515/}](http://dx.doi.org/\url{10.1515/)

- 9783486774900}. <http://dx.doi.org/\url{10.1515/9783486774900}>. – ISBN 978–3486774894
- [19] MAJESTIC SKIES ; YOUTUBE (Hrsg.): *Create a RAGDOLL in under 10 MINUTES! Blender 2.8 Easy Tutorial*. \url{https://www.youtube.com/watch?v=AtaG8EqN_nw}. Version:07.08.2019
- [20] MOHLER, Maren ; UNIVERSITÄT GÖTTINGEN (Hrsg.): *Kreiselbewegung: Die Nutation*. \url{https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3871}. Version:01.07.2019
- [21] NÜTZEL, Florian ; RUDOLPH, Frank ; FRISCH, Michael ; WEHMANN, Christoph ; HELDEN.DE fem (Hrsg.): *Einführung in die Finite-Elemente-Analyse*. \url{https://fem-helden.de/einfuehrung-in-die-fea/}. Version:14.07.2020
- [22] OLAV3D TUTORIALS ; YOUTUBE (Hrsg.): *[2.81] Blender Tutorial: Wind in Physics Simulations*. \url{https://www.youtube.com/watch?v=XBcpBm9DIHA}. Version:28.11.2019
- [23] RAO, Singiresu S.: *The Finite Element Method in Engineering*. Sixth edition. Kidlington and Cambridge : Elsevier Butterworth-Heinemann an imprint of elsevier, 2018. <http://dx.doi.org/\url{10.1016/C2016-0-01493-6}>. <http://dx.doi.org/\url{10.1016/C2016-0-01493-6}>. – ISBN 978–0–12–811768–2
- [24] SCHELL, Jesse: *The art of game design: A book of lenses*. Amsterdam : Morgan Kaufmann/Elsevier, 2008 \url{https://books.google.de/books?id=LP5x0YMjQKQC&lpg=PP1&hl=de&pg=PA408#v=onepage&q&f=false}. – ISBN 9780080919171
- [25] TSCHANNEN, Marcel: Aussenballistik: Messtechnik und mathematische Modelle. In: *Schweizer Waffenmagazin* (06/2005). \url{http://www.vsms.org/Forum/Seite_26/051226_Artikel_Aussenballistik_Berechnung.pdf}
- [26] TSCHANNEN, Marcel: Aussenballistik: Flugbahn und Ziellinie. In: *Schweizer Waffenmagazin* (2006/2007). \url{http://www.vsms.org/Forum/Seite_26/26-070104_Artikel_Flugbahn_und_Visierlinie.pdf}
- [27] TUTSBYKAI ; YOUTUBE (Hrsg.): *Blender 2.8 Tutorial - How to create a flag w/ wind physics*. \url{https://www.youtube.com/watch?v=6cEswicA60Y}. Version:29.03.2019
- [28] UNBEKANNT ; BLENDER FOUNDATION (Hrsg.): *Blender 2.83 Manual*. \url{https://docs.blender.org/manual/de/latest/}

- [29] UNBEKANNT ; BLENDER FOUNDATION (Hrsg.): *Blender 2.83 Manual: Workspaces*.
 \url{https://docs.blender.org/manual/en/latest/interface/window_system/workspaces.html}
- [30] UNBEKANNT ; BLENDER FOUNDATION (Hrsg.): *Blender 2.90 - Manual: Introduction*. \url{https://docs.blender.org/manual/de/dev/getting_started/about/introduction.html}
- [31] UNBEKANNT ; BLENDER FOUNDATION (Hrsg.): *A Fresh Start*. \url{https://www.blender.org/download/releases/2-80/}
- [32] UNBEKANNT ; DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.): *ICAO-Standardatmosphäre (ISA)*. \url{https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Standardatmosphaere_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3}
- [33] UNBEKANNT ; C.I.P. (Hrsg.): *9 mm Luger*. \url{http://www.cip-bobp.org/homologation/uploads/tdcc/tab-iv/tabivcal-de-page28.pdf}.
 Version:06.10.2017
- [34] UNBEKANNT ; EUROPEAN SCHOOL OF COMPUTER AIDED ENGINEERING TECHNOLOGY (Hrsg.): *Die Finite Elemente Methode: Vierzig Jahre in der Produktentwicklung: Nutzen der FEM und Ausblick*. \url{http://efem.esocaet.com/file.php/1/KAP-CADFEM.pdf}. Version:10-2009
- [35] UNBEKANNT ; WAFFEN-ONLINE (Hrsg.): *Drall*. \url{https://wiki.waffen-online.de/index.php/Drall#:~:text=Bei%20allen%20Begriffsdefinitionen%20geht%20man,von%20der%20Laufmittelachse%20in%20Grad.} Version:14.02.2005
- [36] UNBEKANNT ; WAFFEN.DE acp (Hrsg.): *glock_2010.pdf: Glock 17*.
 \url{https://www.acp-waffen.de/downloads/Produktinformationen/Glock/Glock%20Downloads/glock_2010.pdf}. Version:2010
- [37] UNBEKANNT ; BUNDESKRIMINALAMT (Hrsg.): *Waffenkriminalität: Bundeslagebild 2018*. \url{https://www.bka.de/DE/AktuelleInformationen/StatistikenLagebilder/Lagebilder/Waffenkriminalitaet/waffenkriminalitaet_node.html}. Version:2018
- [38] UNBEKANNT: *Blender Addons: Projectile Addon*. \url{https://blender-addons.org/projectile-addon/}. Version:22.06.2019
- [39] UNBEKANNT ; STATISTA RESEARCH DEPARTMENT (Hrsg.): *Straftaten mit Schusswaffengebrauch in Deutschland bis 2018*. \url{https://de.statista.com/statistik/daten/studie/350846/umfrage/}

straftaten-mit-schusswaffengebrauch-in-deutschland/#:~:text=Die%
20Statistik%20zeigt%20die%20Anzahl,mit%20Schusswaffengebrauch%
20in%20Deutschland%20registriert.} Version:25.07.2019

- [40] UNBEKANNT ; STACK EXCHANGE (Hrsg.): *How to recenter an object's origin?* \url{https://blender.stackexchange.com/questions/14294/how-to-recenter-an-objects-origin#:~:text=Press%20Shift%20%2B%20Ctrl%20%2B%20Alt%20%2B,the%20Tools%20tab%2C%20subsection%20Edit.} Version:27.08.2019

- [41] VURLOD, Benjamin ; VIMEO LLC (Hrsg.): *Modeling Broken Element Using Cell Fracture in Blender.* \url{https://www.iamag.co/modeling-broken-element-using-cell-fracture-in-blender/}.
Version:2016

- [42] WARTMANN, Carsten: *Das Blender-Buch: 3D-Grafik und Animation mit Blender.* 5. Aufl. s.l. : dpunkt, 2014. – ISBN 978–3864900518

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Mittweida, 20. August 2020