

Bachelorarbeit

“Digitalisierung und Modellierung eines historischen Uhrwerks einer astronomischen Uhr”

Eingereicht am 26.03.2012

von

Christine Möschner | Matrikelnummer: 8201427

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. M.-C. Wanner

Universität Rostock

Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Lehrstuhl Fertigungstechnik

Albert-Einstein-Straße 30

18059 Rostock

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. O. Grewe

Universität Rostock

Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Lehrstuhl Fertigungstechnik

Albert-Einstein-Straße 30

18059 Rostock

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung	1
2 Die astronomische Uhr	2
2.1 Historie	2
2.2 Aufbau und Funktion der Uhrwerke	5
2.2.1 Allgemein	5
2.2.2 Das Haupt- und Zeigerwerk	6
3 Durchführung.....	10
3.1 Die Aufnahme der Messwerte	10
3.2 Die Umsetzung in 3D	16
3.2.1 Konstruktion der Einzelteile.....	16
3.2.2 Zusammenbau des Modells	25
3.2.3 Das Modell	30
3.3 Mechanismus und Animation.....	33
4 Auswertung.....	37
4.1 Vergleich von Modell und Original	37
4.2 Der Mechanismus.....	39
5 Zusammenfassung	41
6 Schlussfolgerung und Ausblick.....	42
Literaturverzeichnis	43
Eidesstattliche Erklärung	1
Anhang	A-1



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Frontansicht der astronomischen Uhr in der Marienkirche zu Rostock	5
Abbildung 2: Blockschema des Gesamtuhrwerkes ([SCH12])	6
Abbildung 3: Schema des Haupt- und Zeigerwerkes [(SCH12)].....	7
Abbildung 4: Kurbel mit Triebstockrad	8
Abbildung 5: gefederte Verhakung der Seiltrommel mit dem Stundenrad	8
Abbildung 6: Skizze eines Zahns des Ankerrades	11
Abbildung 7: Volltrieb im Zeigerwerk	11
Abbildung 8: Skizze und Maße des Hakenankers 1	12
Abbildung 9: Skizze und Maße des Hakenankers 2	13
Abbildung 10: Bemaßungsskizze für die Wellenbuchsen mit rundem Querschnitt.....	14
Abbildung 11: Bemaßungsskizze für die Wellenbuchsen mit quadratischem Querschnitt	14
Abbildung 12: Modell von Zahnrad 13.....	17
Abbildung 13: Modell eines Laternentriebes	17
Abbildung 14: Punktwolke aus den errechneten Koordinaten.....	19
Abbildung 15: durch die Punkte verlaufenden Kurven.....	19
Abbildung 16: Durch Berandungsverbund erstandene Flächen	20
Abbildung 17: Aufdicken der Sammelfläche.....	20
Abbildung 18: Korrektur der Top-Ebene	21
Abbildung 19: Skizze für die Vermessung des unteren Teils des Pendels	22
Abbildung 20: Pendelkopf mit Führungskeilen.....	22
Abbildung 21: Pendelaufhängung	22
Abbildung 22: Modell eines Rahmenteils.....	23
Abbildung 23: Zurechtschneiden der Verhakung von Welle D und der Seiltrommel	24
Abbildung 24: Skizze der kleineren Feder für die Verhakung der Seiltrommel	25
Abbildung 25: Verhakung mit eingebauten Federn (groß = blau, klein = rot)	25
Abbildung 26: Baugruppe Welle C.....	26
Abbildung 27: Baugruppe Seiltrommel.....	27
Abbildung 28: Baugruppe Rahmen.....	28
Abbildung 29: Baugruppe Pendel	28
Abbildung 30: Baugruppe Zeigerwerk	29
Abbildung 31: Gesamtes Modell	31
Abbildung 32: Schema zum Aufbau des Modells	32



Abbildung 33: Winkel-Zeit-Diagramm für die Bewegung der Verhakung, Kurbelgeschwindigkeit $180^\circ/\text{s}$	35
Abbildung 34: Abgleich des Hakenankers von Modell (grün) und Foto	38
Abbildung 35: Durchdringungen (orange) von Zahnrad 14 und 15 nach ca. 750 Sekunden .	39
Abbildung 36: Überschneidungen (rot) von Hakenanker und Ankerrad	39
Abbildung 37: Schema des Haupt- und Zeigerwerks mit Nummerierung der Zahnräder und Triebe (rot) sowie der einzelnen Wellen W (blau variiert)	A-1
Abbildung 38: Skizze des Hauptrahmens, vorne.....	A-5
Abbildung 39: Skizze des Hauptrahmens, hinten.....	A-5
Abbildung 40: Skizze des Hauptrahmens, Seite (recht)	A-6



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grundmaße des Rahmens um das Hauptuhrwerk.....	15
Tabelle 2: Wälzkreisdurchmesser für die Getriebedefinition.....	33
Tabelle 3: Start- und Endzeiten der Analyse	36
Tabelle 4: skalierte Punktkoordinaten des Hakenankers	A-2
Tabelle 5: Wertetabelle für die Bewegung des Stundenschlagauslösers	A-3
Tabelle 6: Wertetabelle für die Bewegung des Kalenderwerkauslösers	A-4
Tabelle 7: Materialwerte für die Rahmenstreben	A-6
Tabelle 8: Wellenabstände, Änderungen orange markiert.....	A-7



Abkürzungsverzeichnis

- d Wellendurchmesser
- s Sekunde
- ° Grad eines Winkels



1 Einleitung

Als eines der Wahrzeichen der Hansestadt Rostock birgt die St.-Marien-Kirche in ihrem Innern ein Zeugnis historischer Kunst und Wissenschaft des 15. Jahrhunderts. Im Chorumgang gleich hinter dem Hauptaltar im Osten der Kirche steht eine elf Meter hohe astronomische Uhr. Sie gehört zu einer Familie von astronomischen Uhren, die zur Hansezeit in den Kirchen vieler wichtiger Städte entlang der Ostseeküste zwischen 1379 und 1472 erbaut wurden. Zu den Städten gehören unter anderem Doberan, Wismar, Lübeck, Münster und Danzig. Die Rostocker Uhr ist jedoch die einzige Monumentaluhr in ganz Europa, die in ihrem Äußeren sowie in ihren Uhrwerken ursprünglich erhalten ist und bis heute präzise läuft. ([SCH04])

Die Rostocker Uhr ist die kleine Schwester der Danziger Uhr, die von 1463 bis 1470 ebenfalls von Hans Düringer in der dortigen Marienkirche gebaut wurde. Kein anderes Uhrenpaar ähnelt sich so sehr wie diese beiden Uhren. Sie gleichen sich in Größe und vielen anderen Maßen sowie in der künstlerischen und ikonographischen Gestaltung. ([SCH04], S. 27 f.)

Um dieses einmalige Erbe zu schützen und es für die Nachwelt erhalten zu können, möchte der Förderverein Stiftung St. Marienkirche die Uhr zum Weltkulturerbe erklären lassen. Im Zuge dessen hat das Frauenhofer Institut die Aufgabe übernommen, die innere und äußere Struktur der Uhr digital zu erfassen und dreidimensionale Modelle davon zu erstellen. Diese Modelle sollen zum einen Präsentationszwecken dienen, die im Rahmen von Veranstaltungen rund um das Weltkulturerbe durchgeführt werden sollen. Zum anderen ist es durch die detailgetreue Modellierung in Zukunft einfacher, beschädigte Teile zu restaurieren oder Ersatzteile nach Vorbild der Originale zu fertigen.

In dieser Arbeit geht es um die Uhrwerke, wobei besonderes Augenmerk auf das Haupt- und Zeigerwerk der Uhr gelegt wurde. Diese Uhrwerke verdienen besondere Betrachtung, da sie das Herz der Uhr darstellen und vom Hauptwerk aus alle anderen Uhrwerke gesteuert werden. Bemerkenswert ist ebenso, dass die komplex erscheinenden Uhrwerke auf einfachen mechanischen Prinzipien basieren und doch weisen sie eine hohe Genauigkeit auf.



2 Die astronomische Uhr

Als im 14. Jahrhundert sich das Weltbild änderte und die Gesellschaft begann sich an der Zeit zu orientieren, wurde eine neuartige Uhr entwickelt. Sie war für alle zugänglich und wurde bevorzugt an Rathäusern oder in Kirchen erbaut, wo sich zu der Zeit das meiste gesellschaftliche Leben abspielte. Auf ihr konnte man nicht nur die gewöhnliche Uhrzeit ablesen, sondern auch die Lage von Sonne und Mond in ihren Tierkreiszeichen sowie die Mondphasen, die in kunstvollen Verzierungen und Bildern darstellt wurden. Diese astronomischen Uhren sollten jedoch nicht nur zur Veranschaulichung der zu dieser Zeit neuerforschten Himmelsbewegungen dienen, sondern den Betrachter auch zum Nachdenken über die Zeit animieren. In Kirchen wie der Rostocker Marienkirche waren sie ein Symbol für die Vergänglichkeit der Zeit.

2.1 Historie

([SCH04], S.26-30)

Die Rechnungsbücher der Hansestadt Rostock schrieben für das Jahr 1379/80 Ausgaben für eine Uhr und ihr Uhrgehäuse im Wert von 212 ½ Mark Rostockisch fest. Da dies für damalige Verhältnisse eine horrenden Summe war und die Ausgaben ca. 6% der Jahresausgaben der Stadt ausmachten, muss es sich um eine bedeutende Anschaffung gehandelt haben. Es wird davon ausgegangen, dass es sich um eine große Vorgängeruhr der astronomischen Uhr handelte. Der genaue Standort dieser Uhr ist nicht beschrieben worden. Da in anderen Hansestädten zu dieser Zeit solche Uhren in den Hauptpfarrkirchen bzw. Domen ihren Platz fanden und die Marienkirche die bedeutendste Rostocker Kirche war, geht man von ihr als Standort der ersten Großuhr aus.

Nach 1379 fehlen jedoch weitere Informationen über die Uhr. Es ist zu vermuten, dass beim Umbau der Kirche von einer Hallenkirche in eine Basilika die Uhr größtenteils beschädigt bzw. zerstört wurde. Danach stand für die nächsten Jahrzehnte die Fertigstellung der Umbauarbeiten am Kirchengebäude im Vordergrund.



Erst 1470 wurde Meister Hans Düringer beauftragt, eine gleichartige, aber noch prächtigere astronomische Uhr nach Danziger Vorbild in der Rostocker Marienkirche zu erbauen. Die beiden Städte verbanden zu dieser Zeit vielfältige politische, kulturelle und wirtschaftliche Interessen. Zur Fertigstellung der Uhr erließ der Schweriner Bischof 1472 einen 40-tägigen Ablass für jeden, der für die Uhr spendet. Kurze Zeit danach wurde der Bau vollendet.

Um die Danziger zu übertreffen, wurde die Uhrenscheibe zusätzlich mit einem Ring mit Monatsbildern, einem zweiten Tierkreisring im Kalenderraum und Gelehrtenbildnissen ausgestattet. Ebenso war die Nähe zum Altarraum ausgenutzt worden, um eine nach Westen gerichtete Nebenuhr, die man vom Kirchenschiff aus über dem damals niedrigeren Altar sehen konnte, zu installieren. Die oberste Etage des Uhrengehäuses sowie die Nebenuhr war zu diesem Zweck zusätzlich dekorativ gestaltet und wahrscheinlich sogar mit bewegten Figuren versehen worden.

Während der Reformation und den folgenden tiefgreifenden Wandlungen in der Religion verfielen die beiden Uhren zunehmend bis 1620 ihr Wert wiedererkannt und einige Umbau- und Modernisierungsarbeiten vorgenommen wurden. Die Nebenuhr wurde an die Westwand des Kirchenschiffes verschoben, das 24-Stunden-Ziffernblatt durch eines mit nur 12 Stunden und einem neuartigen Viertelstundenring ausgetauscht und neue Uhrwerke wurden gefertigt und angebracht.

1641/43 war es Zeit für eine umfassende Restaurierung der Fassade und der Uhrwerke. In dieser Zeit bekam die Uhr von Lorentz Borchart einen eigenen Stundenschlag und Musikautomaten. Im Zuge dessen entfernte Borchart ein ungenutztes Stundenschlagwerk, das verbunden über Seilverbindungen von der Stundenglocke auf dem Turm ausgelöst wurde, und verkleinerte den ursprünglichen Eisenrahmen um das Hauptwerk. Äußerlich wurde die Uhr dem damaligen Spätrenaissancestil angepasst, der bis heute noch erhalten und in Abbildung 1 zu sehen ist.



Danach war die Uhr zwei großen Gefahren ausgesetzt: 1835 und während des 2. Weltkrieges. Die erste Gefahr bestand durch Gewölberestaurierungsarbeiten um 1835, wobei wenig Rücksicht auf die Uhr genommen wurde und durch Schutt die Glocken des Musikwerkes zu Bruch gingen. Erst 1885, acht Jahre nach Ablauf der Kalenderscheibe, waren die finanziellen und fachlichen Mittel vorhanden, um die Uhr wieder aufzubauen.

Der Zerstörung während des 2. Weltkrieges entging die Uhr, indem sie Anfang 1943 eingemauert und einbetoniert wurde und dadurch 1951 weitestgehend unbeschadet freigelegt werden konnte.

1974 bis 1977 wurden die gesamten Uhrwerke und ihre Zeiger das letzte Mal von Wolfgang Gummelt gründlich überholt und restauriert.

Seitdem läuft die Uhr dank der guten Pflege wieder.



2.2 Aufbau und Funktion der Uhrwerke



Abbildung 1: Frontansicht der astronomischen Uhr in der Marienkirche zu Rostock

2.2.1 Allgemein

Das Gesamtwerk, wie in Abbildung 2 dargestellt, besteht aus 6 Einzeluhrwerken. Bis auf das Zeigerwerk, das durch das Hauptwerk mit angetrieben wird, haben alle einen eigenen Gewichtsantrieb.



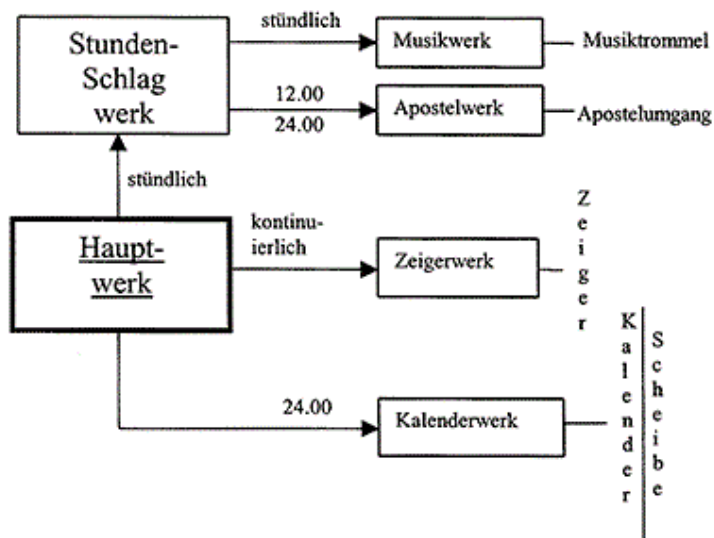


Abbildung 2: Blockschema des Gesamtuhrwerkes ([SCH12])

Das Herz der Uhr ist das Hauptwerk, auch Zeitwerk genannt. Eine Welle verbindet es auf einer Ebene mit dem Zeigerwerk. Diese Einheit bewegt die Zeiger und die Scheiben auf der Vorderseite der Uhr. Stündlich löst das Hauptwerk das Stundenschlagwerk auf der obersten Ebene aus, was wiederum eine Melodie erklingen lässt. Diese wird über das Musikwerk und die Musiktrommel erzeugt. Um jeweils 12 und 24 Uhr erscheinen oben auf dem Apostelungang, angetrieben vom Apostelwerk und ausgelöst vom Stundenschlagwerk, die 6 Apostel und treten vor Jesus, um sich segnen zu lassen. Danach treten sie durch eine Pforte in den Himmel ein. Vor Judas, der nicht gesegnet wird, fällt sie jedoch zu und er muss draußen stehen bleiben.

Um Mitternacht, wenn sich das 24-h-Rad des Hauptwerkes einmal um 360° gedreht hat, wird die Kalenderscheibe um einen Tag bzw. um einen Zahn des Kalenderwerkes weitergestellt.

2.2.2 Das Haupt- und Zeigerwerk

Der Aufbau des Haupt- und Zeigerwerkes ist in Abbildung 3 dargestellt und wird anhand des Schemas erläutert.



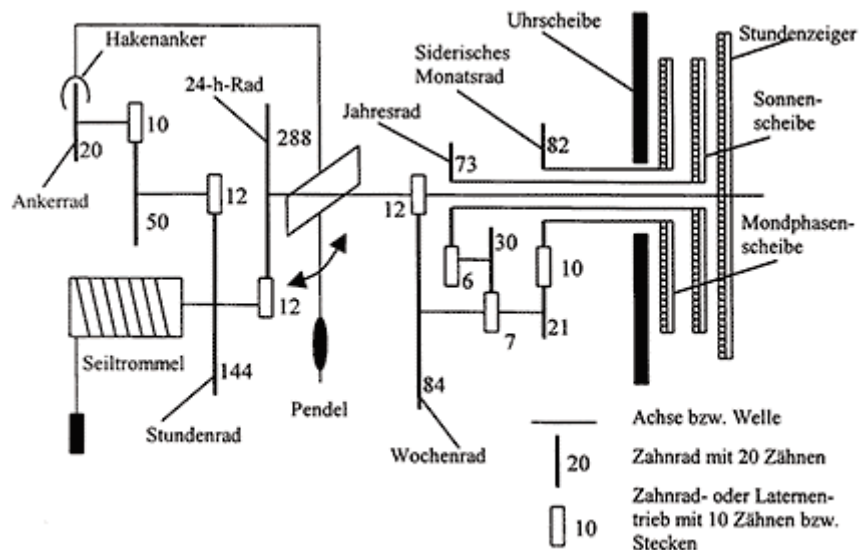


Abbildung 3: Schema des Haupt- und Zeigerwerkes [(SCH12)]

Antrieb und Ursache für alle Bewegungen im Getriebe der Werke ist das 62 Kilogramm schwere Gewicht, das mittels der Seiltrommel und über Rollen um bis zu 16 Meter gehoben und durch die Schwerkraft wieder nach unten gezogen wird.

Während die Uhr läuft, rollt sich das Seil, das auf der Seiltrommel aufgerollt ist, wieder ab und das Gewicht nähert sich dem Boden. Zum Aufziehen wird die Uhr angehalten und eine Kurbel mit einem Laterntrieb wie in Abbildung 4 in das Zahnrad der Seiltrommel eingehakt und das Seil wieder aufgerollt. Damit sich dabei das Stundenrad und alle damit verbundenen Zahnräder nicht mitdrehen können, ist auf der dem Stundenrad zugewandten Seite der Seiltrommel eine gefederte Verhakung, wie in Abbildung 5 gezeigt, angebracht, die sich bei der entgegengesetzten Drehung der Trommel über die Verstrebungen des Stundenrades hinwegbewegt ohne es anzutreiben.





Abbildung 4: Kurbel mit Triebstockrad

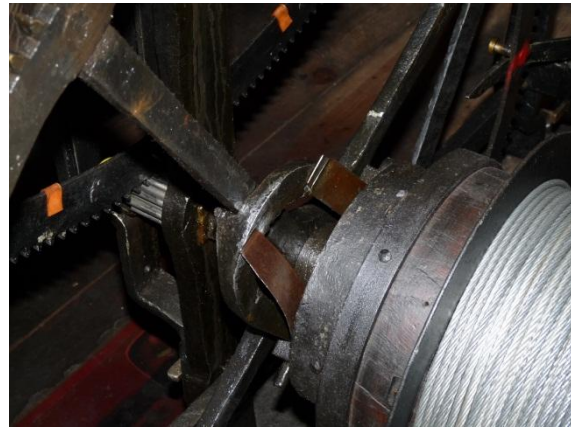


Abbildung 5: gefederte Verhakung der Seiltrommel mit dem Stundenrad

Durch die aufgeprägte Kraft des nach unten ziehenden Gewichts werden die Zahnräder dazu gezwungen sich zu drehen. Aus diesem Grund hört das, den Takt angegebende, Pendel ebenfalls nicht auf zu schwingen. Das Pendel ist in Länge und Gewicht zeitlich genau abgestimmt, da der Pendeltakt für die korrekte Zeitangabe der Uhr ausschlaggebend ist. Das Pendel, das eine Schwingung in drei Sekunden durchführt, überträgt diese Bewegung auf einen Hakenanker. Dieser wiederum greift in ein Ankerrad mit 20 Zähnen, welches eine volle Umdrehung in einer Minute durchläuft.

Diese Pendel-Haken-Hemmung stammt von 1710 und ersetzte die ursprüngliche Spindel-Waag-Hemmung, was die Zeitangabe genauer gemacht hat.

([SCH04], S. 24)

Eine Besonderheit mechanischer Uhrwerke ist die Übertragung der Rotationsbewegung mittels Trieben. Ihre zwei existierenden Bauformen sind auch in der astronomischen Uhr vertreten. Zum einen gibt es Laternentriebe, oder auch Triebstockräder genannt, die aus zwei parallelen kreisrunden Scheiben bestehen, die mit einer Anzahl von kreisförmig angeordneten Stecken miteinander verbunden sind (Siehe Abbildung 4). Über solche Laternentriebe wird als nächstes ein 50-zähniges Rad angetrieben, das 5 Minuten für eine Umdrehung braucht, und anschließend das Stundenrad. Darauf ist ein kleiner Stift angebracht, der über eine Hebelvorrichtung und ein Stahlseil den Stundenschlag auslöst. Auf der gleichen Welle ist außerhalb des Rahmens noch ein kleines Zahnrad mit 10 Zähnen angebracht, das die Bewegung auf das 24-h-Rad überträgt.



Dieses Zahnrad sitzt auf der Welle, die den Stundenzeiger außen auf der Front bewegt. Bei der Uhr handelt es sich um eine „ganze Uhr“, was bedeutet, dass der Zeiger die 24 Stunden eines ganzen Tages in einer Umdrehung überstreicht. Die Zeit kann an dem doppelseitigen Zeiger an beiden Enden im Stundenring abgelesen werden, einmal gekennzeichnet durch eine Hand und einmal durch einen Stern. Dies lässt sich auf der Frontansicht in Abbildung 1 nachvollziehen.

Über die Hauptwelle (auch Zeigerwelle genannt) ist das Hauptuhrwerk mit dem Zeigerwerk verbunden. Mittels eines Laternentriebes mit 12 Stecken wird die Wellenbewegung auf das Wochenrad übertragen. Von der Welle, auf dem das Wochenrad sitzt, wird zum einen über drei weitere Triebe und Zahnräder die Bewegung des Jahresrades ausgelöst und zum anderen, das Siderische Monatsrad in Bewegung gesetzt. Für diese werden die Übersetzungen durch ein Zahnrad und eine Laterne benötigt.

Das Jahresrad bewegt die Sonnenscheibe im Rhythmus der Umrundung der Sonne durch die Erde. Die angebrachte kleinere Version der Sonne an der Sonnenscheibe deutet auf ihr aktuelles Tierkreiszeichen auf der Uhrscheibe. Die darunter liegende Mondphasenscheibe wird von der Welle des Siderischen Mondrades angetrieben. Auf ihr sind ein helles und ein dunkles Mondgesicht durch den Ausschnitt in der Sonnenscheibe zu sehen, je nachdem, in welcher Phase sich der Mond gerade befindet. Der zusätzlich angebrachte Mondzeiger der Scheibe deutet genau wie der Sonnenzeiger auf den Tierkreisring.

Die Wellen für die beiden Scheiben und den Stundenzeiger bewegen sich ineinander. Das heißt, dass die Wellenabschnitte, die dem Rhythmus von Sonne und Mond bewegen, als Hohlwellen um die des Zeigers rotieren.



3 Durchführung

Zuerst werden die beide Uhrwerke der Monumentaluhr vermessen. Diese werden größtenteils während des laufenden Betriebes der Uhr durchgeführt. Die gemessenen Werte werden in Skizzen und handschriftlichen Notizen festgehalten. Die darauffolgende Übertragung in Excel-Tabellen gibt den Aufzeichnungen Struktur und Ordnung. Anschließend werden die einzelnen Bauteile der Uhrwerke auf dem Computer mit Hilfe von Pro/Engineer in 3D modelliert und zusammengesetzt. Als Abschluss wird das erstellte Modell animiert.

3.1 Die Aufnahme der Messwerte

Die Messungen werden mit folgenden Messgeräten vorgenommen:

- Stahllineale mit einen Meter und 50 Zentimeter Länge
- Zollstock
- Messschieber, analog und digital

Zur Strukturierung der Aufzeichnungen wird ein Benennungsschema, wie es in Abbildung 37 (siehe Anhang) dargestellt ist, entwickelt.

Von den Zahnrädern sind die folgenden Maße und Informationen zu erfassen:

- Abstand zwischen Außenkreis und Welle
- Wellendurchmesser
- Form der Wellennabe
- Zahnhöhe
- Zahnbreite am Fußkreisdurchmesser
- Materialstärke am Fußkreisdurchmesser
- Maße der Verstrebenungen



Aus den ersten beiden Maßen wird der Außendurchmesser errechnet, da sich dieser nicht direkt messen lässt. Um die Zahnform später nachmodellieren zu können, werden Nahaufnahmen der Zähne jedes einzelnen Zahnrades gemacht. Die Zähne des Ankerrades haben eine spezielle Form und sind demzufolge durch andere Maße charakterisiert, die in der Skizze in Abbildung 6 zu sehen sind.



Abbildung 6: Skizze eines Zahns des Ankerrades



Abbildung 7: Volltrieb im Zeigerwerk

Die Zahnräder mit den Nummern 5, 7, und 11 sind Volltriebe (siehe Abbildung 7). Sie werden im Zeigerwerk und zur Übersetzung vom Stundenrad auf das 24-Stundenrad verwendet. Diese Bauteile sind durch die nachfolgenden Maße definiert:

- Wellendurchmesser
- Zahnbreite
- Außendurchmesser
- Länge des Triebes

An den Laternentrieben, deren Aufbau in Kapitel 2.2.2. beschrieben ist, werden folgende Maße erfasst:

- Scheibenabstand
- Durchmesser
- Materialstärke der Scheiben
- Durchmesser der Stecken



Da sich die Zahnräder und Antriebe mit zunehmender Nähe zum Anker und Pendel immer schneller bewegen, müssen die Messungen bei angehaltenem Uhrwerk durchgeführt werden. Angehalten werden die beiden Uhrwerke nur zum Aufziehen. Die folgenden vier Arbeitsschritte müssen dabei jedes Mal eingehalten werden:

1. Anhalten des Pendels in seiner Bewegung
2. neu Einstellen der Uhrzeit am Hauptwerk
3. Aufrollen des Seils des Hauptgewichtes
4. in Bewegung setzen des Pendels zur nächsten vollen Stunde

In der Zeit, in der das Werk steht, ist es möglich, das Ankerrad, den Laternentrieb Nummer 14 und den Hakenanker sowie das komplette Pendel zu vermessen.

Um Referenzmaße für die Modellierung des Hakenankers zu erhalten, wird dieser, wie in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt, vermessen. Die Krümmung des Ankers kann jedoch nicht mit den gegebenen Mitteln ausgemessen werden.

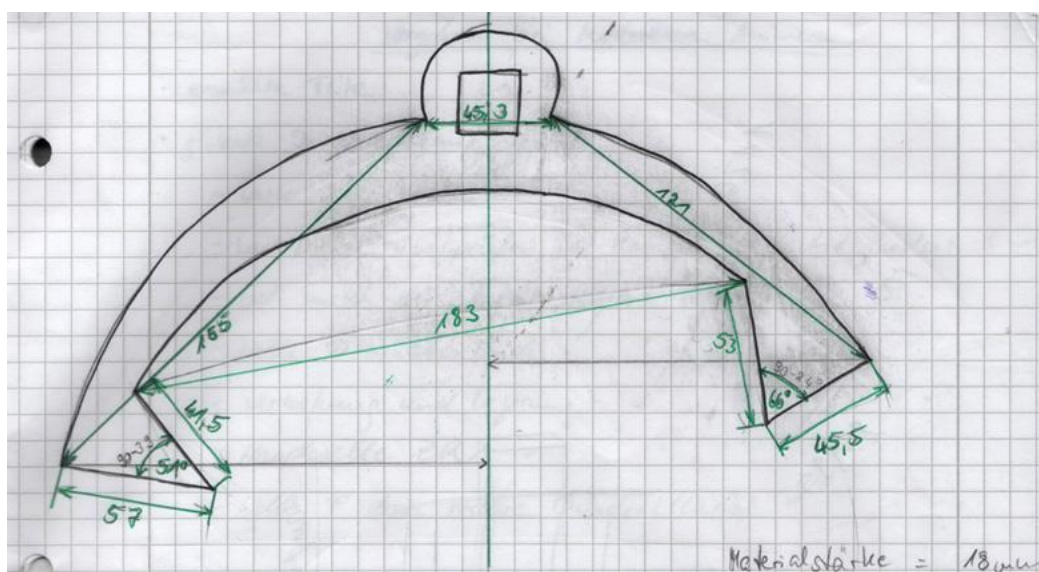


Abbildung 8: Skizze und Maße des Hakenankers 1



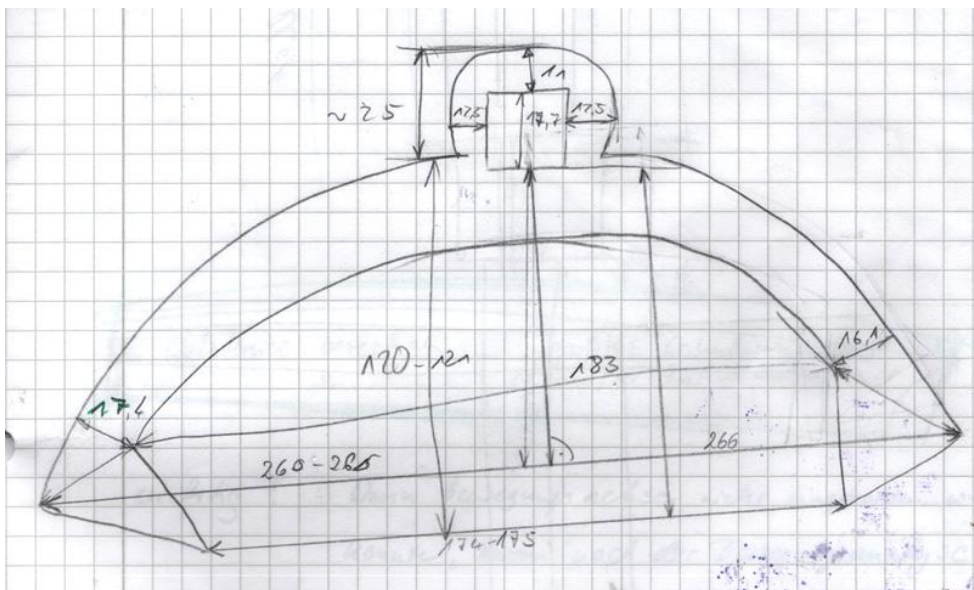


Abbildung 9: Skizze und Maße des Hakenankers 2

Das Pendel wird in seiner Länge abschnittsweise vermessen. Dabei ist aufgefallen, dass das Pendelgewicht auf die Pendelstange geschoben wird und deren Lage einstellbar ist. Es wird durch eine Mutter und eine Scheibe nach oben geschraubt. Das Gewinde wird durch seinen Außendurchmesser identifiziert. Durch die starken Öl- und Abriebansammlungen kann die Kontur der Pendelaufhängung nur näherungsweise bestimmt und ausgemessen werden.

Die Länge der Wellen wird ebenfalls abschnittsweise, von einem Wellenabsatz zum nächsten, ausgemessen. Der jeweilige Durchmesser und seine Form muss ebenfalls ermittelt oder abgeschätzt werden. Die Abstände zwischen den jeweilig zusammengehörenden Wellenachsen werden aus den Wellendurchmessern und den Abständen zwischen ihnen errechnet.

Die Lagerung der Wellen besteht aus quadratischen bzw. runden Buchsen, in deren Löchern sich die Wellen drehen. Ihre Geometrie ist sehr einfach und kann durch die in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellten Parameter definiert werden.



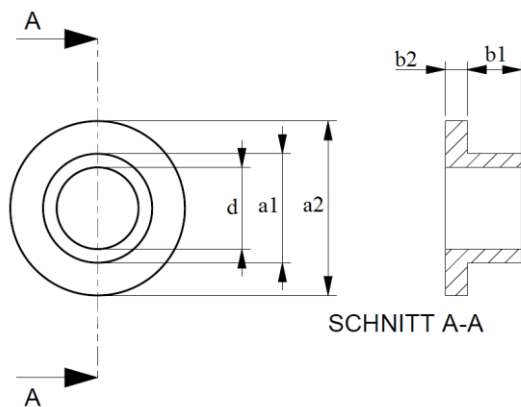


Abbildung 10: Bemaßungsskizze für die Wellenbuchsen mit rundem Querschnitt

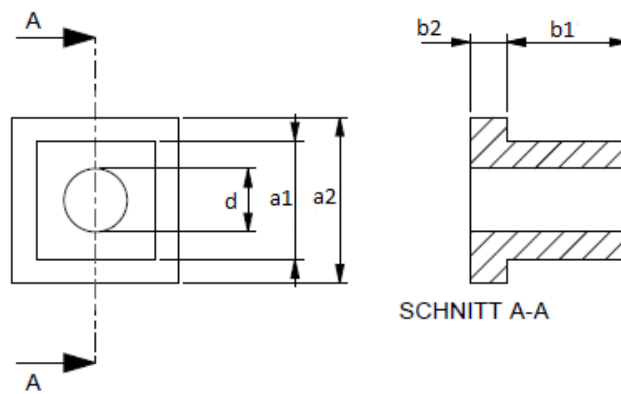


Abbildung 11: Bemaßungsskizze für die Wellenbuchsen mit quadratischem Querschnitt

Da die Verbindung von Pendel und Ankerwelle eine nicht direkt messbare Krümmung im Raum aufweist, werden ersatzweise die Maße für folgenden Geometrien erfasst:

- Befestigung an der Welle
- Materialwerte des Verbindungsblechs
- Abstände von der Position auf der Welle zum Pendel und zum Rahmen in allen drei Richtungen

Die Einzelteile der Seiltrommel und die Auslösungsvorrichtungen für Kalender- und Stundenschlagwerk werden bezogen auf den Rahmen vermessen und positioniert. Für die Auslöser sind die nachfolgenden Größen zu erfassen:

- Lage
- Materialstärke
- Durchmesser
- annähernder Verlauf der Auslöser

Das Extrazahnrad der Seiltrommel, das zum Aufziehen des Uhrwerks notwendig ist, wird wie die anderen Zahnräder ausgemessen und zusätzlich die Anzahl der Zähne mit angegeben.

Für den Rahmen um das Hauptwerk sowie die Halterung vom Zeigerwerk werden vereinfacht Skizzen der einzelnen Streben und ihrer Lage zueinander erstellt. Die einzelnen Streben werden jeweils mit Nummern und diese mit Maßen für Stärke und Breite der Bleche versehen (siehe Abbildung 38 bis Abbildung 39 und Tabelle 7). Die Hauptabmessungen des Rahmens sind in Tabelle 1 ersichtlich.



Tabelle 1: Grundmaße des Rahmens um das Hauptuhrwerk

Höhe	1605 mm
Breite	1440 mm
Tiefe (innen)	703 mm
Tiefe (außen)	721 mm

Anschließend werden die Position und Lage der einzelnen Bauteile, Baugruppen und Rahmenteile zueinander bestimmt und in Skizzen oder Notizen festgehalten.



3.2 Die Umsetzung in 3D

Als Konstruktionsprogramm für die 3D-Modellierung der Uhrwerke wurde Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 von PTC genutzt. Die manuelle Umsetzung von Bauteilen in einem 3D-Konstruktionsprogramm beginnt mit der Modellierung der einzelnen Komponenten, die später zu einer ganzen Baugruppe zusammengesetzt werden. Die Animation der Bewegungsabläufe in den Uhrwerken, die die Funktionsweise verdeutlichen soll, wird ebenso in Pro/ENGINEER erstellt.

3.2.1 Konstruktion der Einzelteile

Die Zahnräder werden als jeweils neues Teil in Pro/Engineer erstellt. Als erstes wird auf der Frontebene eine Skizze erstellt, die den Fuß- und Kopfkreisdurchmesser mit dem Ursprung als Mittelpunkt festlegt. Danach wird auf der gleichen Ebene der Außenring des Zahnrades zu beiden Seiten der Skizzenebene gleichmäßig extrudiert, wobei der Fußkreis der ersten Skizze als Referenz genommen wird. Die Zähne werden ebenfalls mit Hilfe einer Extrusion erzeugt. Die Höhe des Zahnes wird durch die in der ersten Skizze festgelegten Fuß- und Kopfkreisdurchmesser festgelegt. Für die Form der Kontur wird sich an den erstellten Fotos orientiert. Dazu kann in der Skizze, je nach Art der Zahnform, mit Splines oder Kreissegmenten gearbeitet werden. Mit Hilfe des *Muster-Tools* lässt sich der extrudierte Zahn anschließend in benötigter Anzahl radial um die Mittelachse vervielfachen.

Danach folgt die Erstellung der Wellennabe und der Streben. Die Nabe wird zunächst als Zylinder oder Quader auf der Frontebene ebenfalls symmetrisch zur Zeichenebene erstellt. Dann wird der gerade Teil der Verstrebung erstellt, der von der Nabe aus extrudiert wird, bis die Endfläche einen Abstand von ca. zwei bis drei Zentimeter zum Außenring aufweist. Von dort aus wird der letzte Querschnitt in einer Biegung gezogen und an den Außenring angelehnt. Die ist in Abbildung 12 rot markiert. Beide Schritte werden wieder mittels *Muster* vier Mal in 45°-Abständen vervielfacht. In manchen Fällen gibt es nur den gerade Teil, der gezogen wird bis die Strebe den Außenring um ein paar Millimeter durchdringt. Als letzter Schritt bei der Erstellung der Zahnräder wird der Platz für die Welle mittels *Extrusion* → *Material entfernen* aus der Nabe herausgeschnitten und die Nabe zwischen den Streben abgerundet.



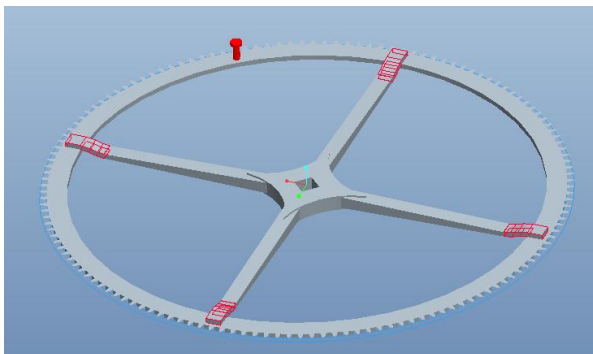


Abbildung 12: Modell von Zahnrad 13

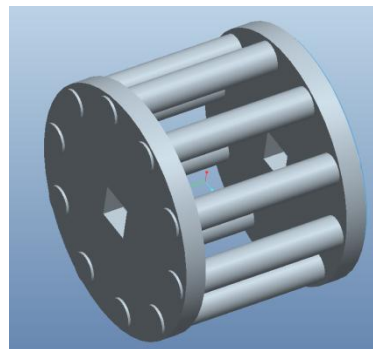


Abbildung 13: Modell eines Laternentriebes

Die Modellierung der Laternentriebe, dargestellt in Abbildung 13, beginnt mit dem Extrudieren einer der beiden Scheiben. Danach wird auf einer der Kreisflächen der Innendurchmesser skizziert, an dem die Stecken tangential nach innen gerichtet angeordnet werden. Um das geringe Überstehen der Stecken auf der Außenseite zu erreichen, wird parallel zur Kreisfläche eine Ebene in einem Abstand von ein bis zwei Millimetern erstellt. Von dort aus wird ein Stecken an den Innendurchmesser tangential angelehnt, durch die Scheibe extrudiert und später in einem Achsmuster vervielfacht. Als vorletzter Schritt wird noch einmal eine Ebene parallel zur Scheibenfläche erstellt, an der die erste Scheibe gespiegelt werden kann. Den Abschluss bildet wiederum das Freischneiden des Platzes für die Welle durch eine Extrusion eines Kreises oder Quadrates.

Die Volltriebe, wie das in Abbildung 7 Dargestellte, werden genau wie die Zähne der Zahnräder gefertigt, mit dem Unterschied dass sie von der Ebene aus nur in eine Richtung extrudiert werden müssen. Eine zusätzliche Nabe oder Verstrebungen besitzt diese Triebart nicht.

Da es sich bei den meisten Wellen um solche handelt, die nur am Anfang und Ende für die Lagerung und Rotation zylindrische Abschnitte besitzen und sonst quadratisch sind, wird jeder Absatz einzeln und jeweils auf der Endfläche des vorherigen Abschnitts extrudiert. Bei Wellen, die zwei oder mehrere aufeinanderfolgende zylindrische Stufen besitzen, können diese in einem Schritt durch Rotation eines Stufenschnitts um die Wellenachse erstellt werden. Zum Schluss wird die Gesamtlänge überprüft und mit dem zur Verfügung stehenden Platz zwischen den Streben abgeglichen.



Da es sich bei den Buchsen um einfache Bauteile handelt, die sich nur in ihren 5 Grundmaßen unterscheiden, lässt sich die Arbeit vereinfachen, indem die unterschiedlichen Varianten in eine Familientabelle eingetragen werden. Dazu wird zunächst ein Beispielteil gemäß den Skizzen in Abbildung 10 und Abbildung 11 erstellt. Für die Familientabelle wurde jedes Maß mit einer Variablen versehen und jedem neuen Teil die entsprechenden Werte dafür zugeordnet. Bei der späteren Montage der Teil kann die jeweils benötigte Variante gewählt werden.

Mit den ermittelten Maßen des Hakenankers von der Messung am Originalteil lässt sich kein funktionsfähiges Modell erstellen. Daher wird ein Frontalfoto des Hakenankers verwendet, um die Kontur der Ankerkrümmung und die Ausrichtung der Haken funktionsgerecht modellieren zu können.

Da Pro/ENGINEER keine Möglichkeit bietet, ein Foto oder Bild als Hintergrund in einer Skizze zu verwenden, wird dies in Blender 2.62 durchgeführt. Es werden entlang der Kontur des Ankers im Foto Punkte festgelegt und diese Kontur zu einem Volumen extrudiert. Dieses Volumen wird anschließend als eine Wavefront-Datei (*.obj) exportiert und kann in Pro/ENGINEER importiert werden. Dieses Dateiformat importiert jedoch nur Facetten und kann daher nicht als Bauteil verwendet werden. Allerdings können die Eckpunkte der Facetten als neue Bezugspunkte definiert und deren Koordinaten hinsichtlich neu eingefügter Bauteilebenen bestimmt werden. Da das importierte Modell nicht in der Originalgröße eingefügt werden kann, wird ein Skalierungsfaktor von 176 verwendet, um die Koordinaten zu korrigieren. Die Original- und errechneten Werte sind in Tabelle 4 (siehe Anhang) aufgeführt. Die maßstabsgetreuen Koordinaten der Punkte werden daraufhin in ein neues Teil eingelesen.



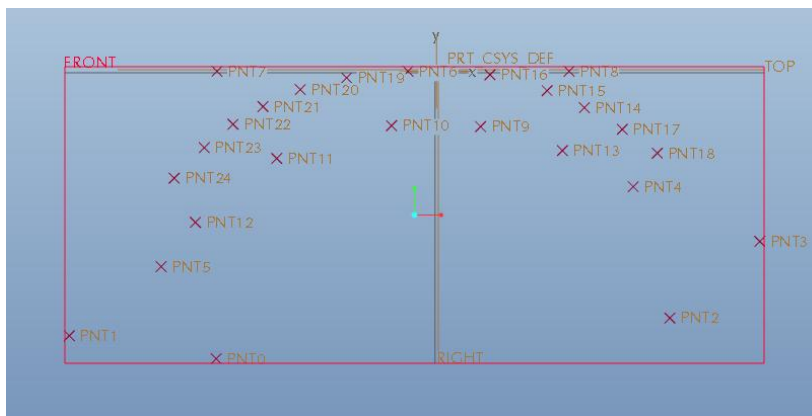


Abbildung 14: Punktwolke aus den errechneten Koordinaten

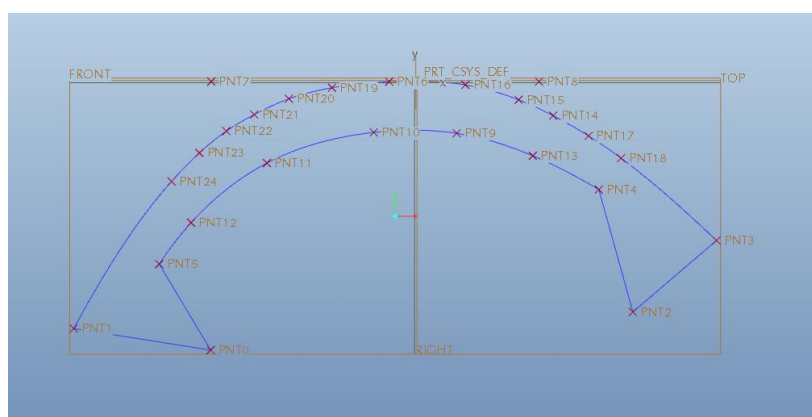


Abbildung 15: durch die Punkte verlaufenden Kurven

Die Punkte, die in Abbildung 14 dargestellt sind, dienen als Grundlage für die Modellierung des Hakenankers. Sie werden zunächst durch Kurven miteinander verbunden (siehe Abbildung 15) und im Anschluss werden in Verwendung des Berandungsverbandes zwischen den Kurven Flächen erzeugt (siehe Abbildung 16). Die drei Flächen müssen danach zu einer Fläche verschmolzen werden und können hiernach zu einem Volumen aufgedickt werden. Das aufgedickte Modell ist Abbildung 17 zu sehen.



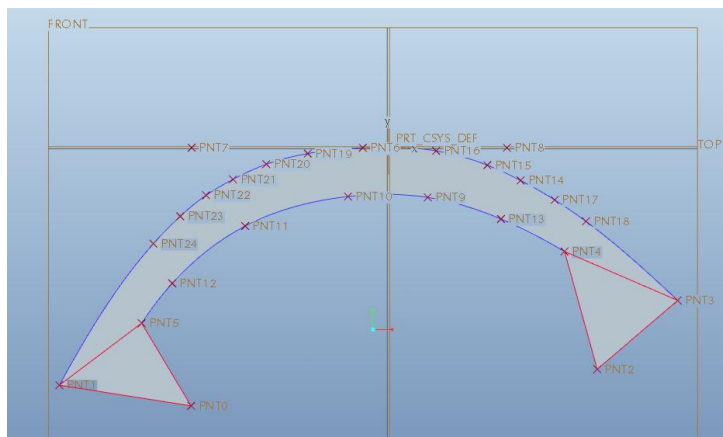


Abbildung 16: Durch Berandungsverbund erstandene Flächen

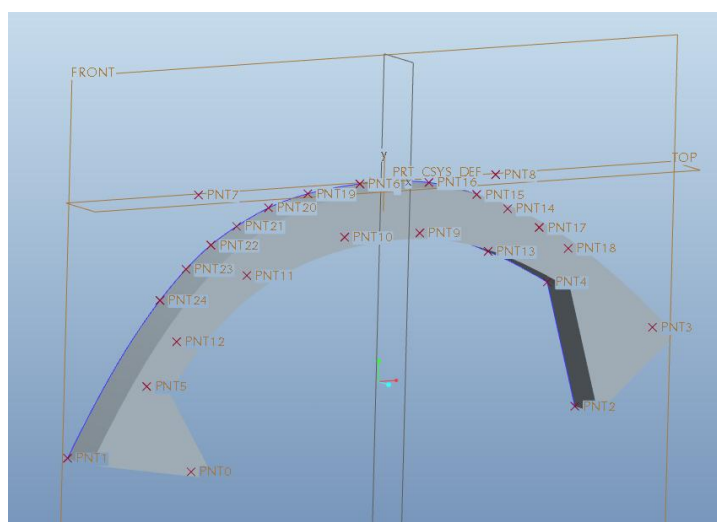


Abbildung 17: Aufdicken der Sammelfläche

Die Halterung für die Welle wird als Extrusion angebracht. Um die richtige Ausgangslage des Hakenankers auf der Welle einrichten zu können, muss im Anschluss eine Korrektur der Top-Ebene vorgenommen und die Nabe für die Welle an dieser ausgerichtet werden (siehe Abbildung 18).



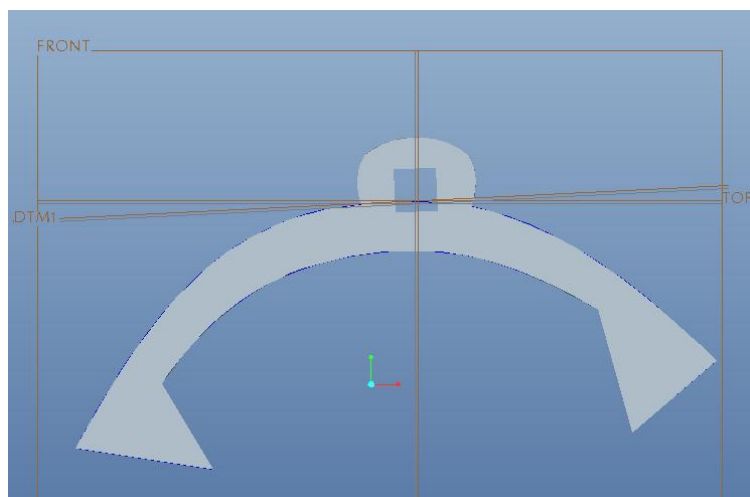


Abbildung 18: Korrektur der Top-Ebene

Die Pendelstange besteht aus zwei Hälften, die sich um die Hauptwelle schließen, um die Bewegung des Pendels nicht zu stören. Diese beiden Klammerhälften werden als Extrusionsteil gefertigt. Die Kontur der Klammerhälften wird mit Hilfe der Skizze in Abbildung 19 erstellt und mit den entsprechenden Maßen versehen. Die zwei Löcher, durch die die beiden Hälften mit Schrauben und Muttern verbunden sind, werden in die Zeichnung mit eingefügt. Um zwei identisch zueinander passende Klammerhälften zu erhalten und Aufwand zu sparen, wird die Klammerhälfte verdoppelt. Die Extrusionsskizze einer der Hälften wird durch den Anschluss der Pendelstange bis zur Aufhängung erweitert. Zwischendurch ist diese durch die eigenständige Extrusion der Verbindungsführung von Pendel und Hauptwerk unterbrochen. Zur Aufhängung des Pendels werden rechts und links des Kopfes Führungskeile für die Pendelbewegung angebracht, die in Abbildung 20 dargestellt sind. Die Verbreiterung des Materials im oberen Teil wird durch *Ziehen* → *Körper* → *Schnitte verwenden* realisiert. An das untere Ende der Klammer wird das Gewinde für das Pendelgewicht angebracht. Das Gewinde kann über *Einfügen* → *Kosmetik* → *Gewinde* oder manuell im Modell erstellt werden.



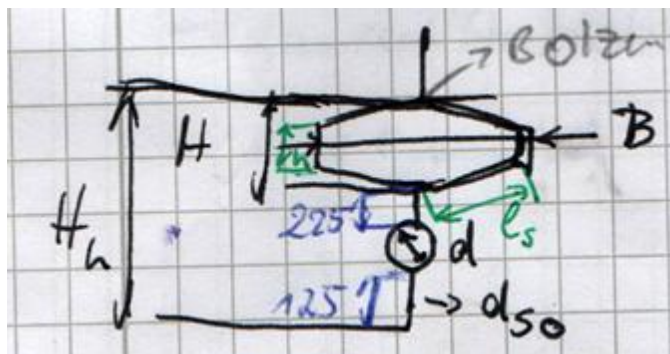


Abbildung 19: Skizze für die Vermessung des unteren Teils des Pendels

Bei der Pendelaufhängung, die an der Decke angebracht ist, wird zunächst auf der Front-Ebene symmetrisch zu den anderen Ebenen die Grundplatte mit den Löchern erzeugt. Dann wird parallel zur Querebene (Right-Ebene) eine weitere Ebene hinzugefügt, um dort den einen Haken nach Maß zu modellieren und anschließend an der Mittelebene zu spiegeln. Als letztes wird eine Achse dort konstruiert, wo sich die Keile der Pendelstange und die Aufhängung berühren. Dies ist die Bewegungsachse des Pendels. Ein Bild des Modells wird in Abbildung 21 gezeigt.

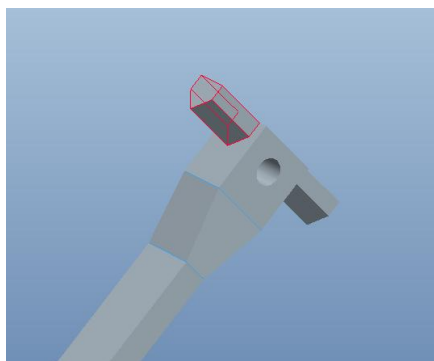


Abbildung 20: Pendelkopf mit Führungskeilen

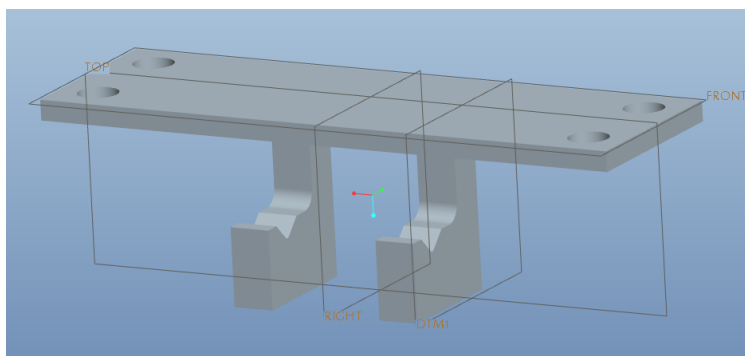


Abbildung 21: Pendelaufhängung

Das Gewicht wurde mittels Rotation des elliptischen Querschnitts um die Mittelachse erstellt und im Anschluss durch das Entfernen des Materials für den vorgesehenen Platz für die Pendelstange vollendet.



Die Einzelteile der beiden Rahmen für Haupt- und Zeigerwerk werden durch Extrusion gefertigt. An den Enden sind jeweils Stecken oder Löcher für die Steckverbindung der einzelnen Rahmenteile vorgesehen (siehe Abbildung 22). Die jeweiligen Längen der Einzelteile für den Hauptrahmen ergeben sich aus deren Hauptmaßen und der Lage zueinander. Die Materialwerte der Bleche entsprechen denen der in der Skizze festgehaltenen Maßen. In die zwei Streben, in denen die Buchsen eingelassen sind und die die Wellen tragen, werden die vorgesehenen Löcher und damit die jeweiligen Achsabstände zwischen den Wellenachsen definiert. Zusätzlich bekommt die vordere der beiden Streben eine nach innen gerichtete Öse, an der die Halterung für die Aufziehkurbel angebracht wird. Die Kurbelaufgabe wird frei konstruiert und mittels Extrusionen erstellt.

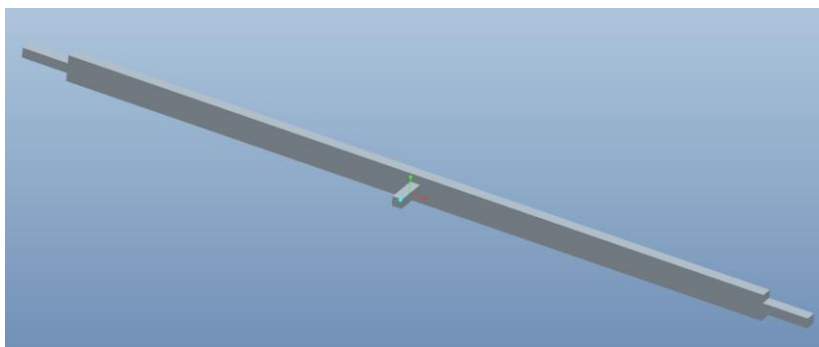


Abbildung 22: Modell eines Rahmenteils

Die Holztrommel der Seiltrommel wird als eine Rotation um die Wellenachse konstruiert. In der Skizze wird das Profil zur Rotationsachse hin mit einem Abstand dazu dargestellt. Die Schutzringe lassen sich auf die gleiche Weise erstellen. Ihnen werden vier Löcher im 90°-Muster eingestanz, die Platzhalter für Bolzen darstellen. Die gleiche Methode findet auch bei den Begrenzungen der Seilführung Anwendung. Die äußere, zusätzliche Welle, die das Holz vor Reibung mit der inneren Welle schützt, wird als eine Einheit mit der Halterung für die Verhakung mit dem Stundenrad modelliert. Dabei wird die Welle zunächst als Vollprofil entlang der Wellenachse extrudiert und erst nach der Extrusion des Querbalkens für die Halterung durch Material entfernen zur Hohlwelle gemacht. Die erste Öse für die Verhakung auf der einen Seite wird an der Mittelebene gespiegelt. Die Löcher werden hinterher durch wegschneidende Extrusion von der einen Außenfläche bis zur anderen erzeugt.



Bei der Verhakung wird zuerst der Bogen zu beiden Seiten der Mittelebene extrudiert und anschließend der Keil auf einer Fläche, die zuvor tangential zum Bogen am höchsten Punkt angebracht wurde, skizziert und in Richtung Mittelpunkt gezogen. Die überstehenden Teile des Keiles lassen sich wieder wegschneiden, indem das Material entlang der Bogenkontur entfernt wird. Dieses Vorgehen lässt sich an Abbildung 23 nachvollziehen.

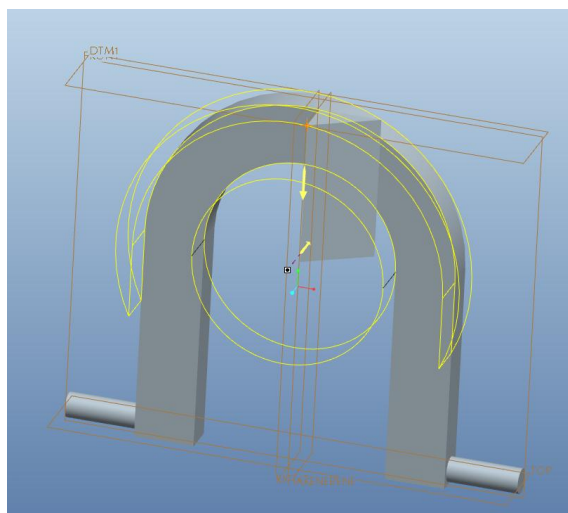


Abbildung 23: Zurechtschneiden der Verhakung von Welle D und der Seiltrommel

Da es sich bei den Federn um sehr schmale Körper mit einer relativ komplexen Kontur handelt, bietet es sich an, zunächst eine Fläche davon zu konstruieren und diese im Anschluss aufzudicken, wie es auch für die Hakenanker realisiert worden ist. Die Fläche lässt sich erstellen, indem der Kantenverlauf skizziert wird, wie Abbildung 24 zeigt. Um die Passgenauigkeit der Federn im Modell gewährleisten zu können, werden die Maße hierfür von den schon vorhandenen Bauteilen und Baugruppen abgeleitet. Die Skizze des Kantenverlaufes wird an der Mittelebene gespiegelt. Mittels *Berandungsverbund* werden die beiden Kantenlinien miteinander verknüpft und bilden so eine gebogene Fläche. Um ein Volumenkörper daraus zu machen, wird die Verbundfläche um einen Millimeter aufgedickt. Anschließend werden die Bohrlöcher für Bolzen eingefügt. Um die Federbreite nach oben hin schmaler werden zu lassen, wird zum Teil rechts und links jeweils etwas weggeschnitten. Die beiden Federn sind in Abbildung 25 dargestellt.



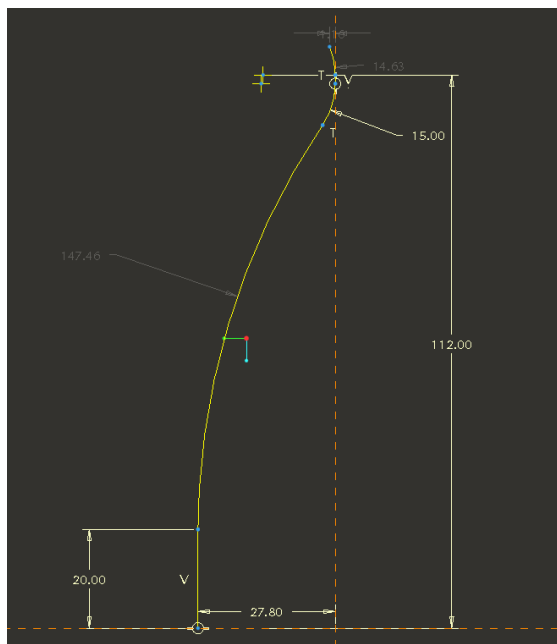


Abbildung 24: Skizze der kleineren Feder für die Verhakung der Seiltrommel

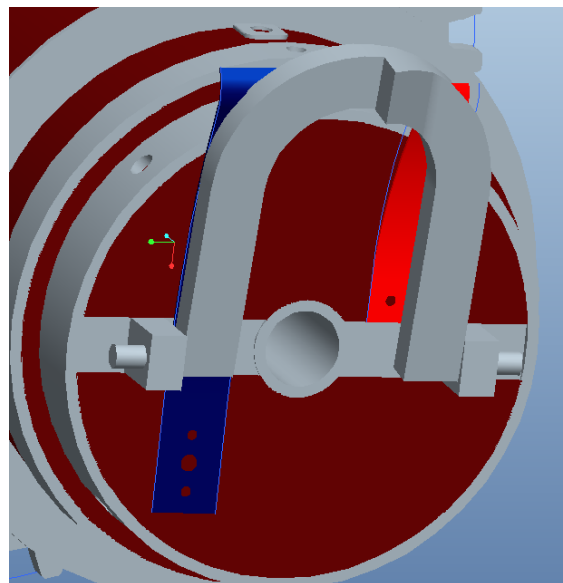


Abbildung 25: Verhakung mit eingebauten Federn (groß = blau, klein = rot)

3.2.2 Zusammenbau des Modells

Bei der Montage der Einzelteile werden zunächst kleinere Funktionseinheiten geschaffen, die dann mit den restlichen Bauteilen in eine gesamte Baugruppe eingefügt werden.

Die ersten Einheiten bilden die Wellen. Dabei wird in einer neuen Baugruppe zunächst eine erzeugte Welle in der Standardorientierung eingefügt. Auf ihr werden die einzelnen Komponenten wie die Zahnräder, Hülsen und Laternentriebe als starre Elemente angeordnet. Hierzu wird die Mittelachse der Komponente an der von der Welle ausgerichtet, deren Verschiebung durch *Gegen- oder Ausrichten* von zwei Flächen, die sich berühren sollen, festgelegt und deren Verdrehung zur Welle oder den Baugruppenebenen definiert. Die zwei Hohlwellen der Hauptwelle, die das siderische Mondrad und das Jahresrad tragen, werden jeweils als einzelne Wellen behandelt und zusammengebaut. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 26 zu sehen.



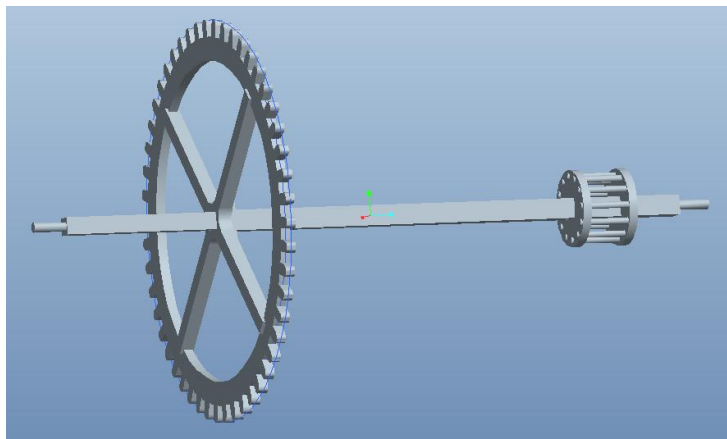


Abbildung 26: Baugruppe Welle C

Ähnlich wird mit der Seiltrommel verfahren (siehe Abbildung 27). Um eine spätere Mechanismusanalyse korrekt durchführen zu können, wird die Seiltrommel als eine einzelne Baugruppe unabhängig von der Welle, auf der auch diese sich bewegt, erstellt. Als Standardbauteil wird die Schutzwelle in die neue Baugruppe eingebettet. Daran wird die Holztrommel genau wie die Zahnräder auf der Welle als starre Komponente befestigt. Auf dem Holz werden im Anschluss die beiden Metallringe und die Begrenzungen für die Seilführung starr befestigt, wobei die Orientierung der beiden jeweiligen Achsen zueinander ausschlaggebend ist. Das Zahnrad, das zum Aufziehen des Uhrwerkes dient, wird ebenso an der Mittelachse ausgerichtet. Die Verdrehung wird durch *Ausrichten* und *Zusammenfallen* der senkrechten Achsen von Baugruppe und Komponente verhindert. Als vorletzte Komponente wird die Verhakung in die dafür vorgesehene Halterung eingebaut. Dieses Mal soll sich die Komponente in ihrer Lagerung drehen können und wird daher als *Drehgelenk* definiert. Dafür sind die Bestimmung der Achsverschiebung und die Verschiebung der Komponente zur Lagerung von Nöten. Als letztes werden die beiden Federn, die zur Verhakung gehören, eingefügt.



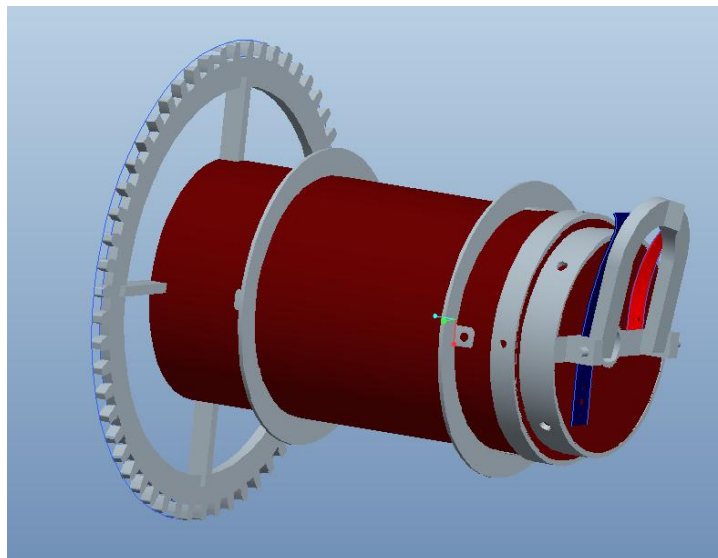


Abbildung 27: Baugruppe Seiltrommel

In einer dritten Baugruppe wird der Rahmen des Hauptwerks zusammengebaut, dargestellt in Abbildung 28. Dabei werden alle einzelnen Stege als starre Komponenten eingefügt. Als Erstes werden in die zwei mittigen Rahmenteile in jeweils extra erzeugten Baugruppen die Buchsen in die dafür vorgesehenen Löcher starr eingebaut. Dann wird der vordere Rahmen der beiden in eine neue Baugruppe gefügt. Dieser wird mit dem Fuß auf die *Top-Ebene* gesetzt und die nach innen gerichtete Seite an einer der Front-Ebene parallelen Ebene ausgerichtet. Die Frontebene dient hierbei als Symmetrieebene zwischen der Vorder- und Rückseite des Rahmens. Diese beiden haben einen Abstand zueinander, der der inneren Tiefe aus

Tabelle 1 entspricht. Dann folgt die Anordnung der Querstreben, die an den angebrachten Stecken und Löchern ausgerichtet werden. Von außen werden dann jeweils die seitlichen Querstreben und anschließend die Eckpfeiler gegengesetzt. In den seitlichen Ecken werden die zur Versteifung dienenden 45°-Streben einbaut, bei denen die Achsen der zwei Löcher jeweils zueinander ausgerichtet werden und die Innenfläche der schrägen Strebe auf die Außenfläche der Eckpfeiler gelegt wird. Die Auflage der Kurbel des Uhrwerkes wird leicht angewinkelt und starr in der Fassung des Steckens eingebaut sowie die Führung der Kurbel und des Steckstiftes, die an der Auflage ausgerichtet werden. Orientiert an der Auflagefläche kann die Kurbellagerung auf deren Top-Ebene platziert werden.



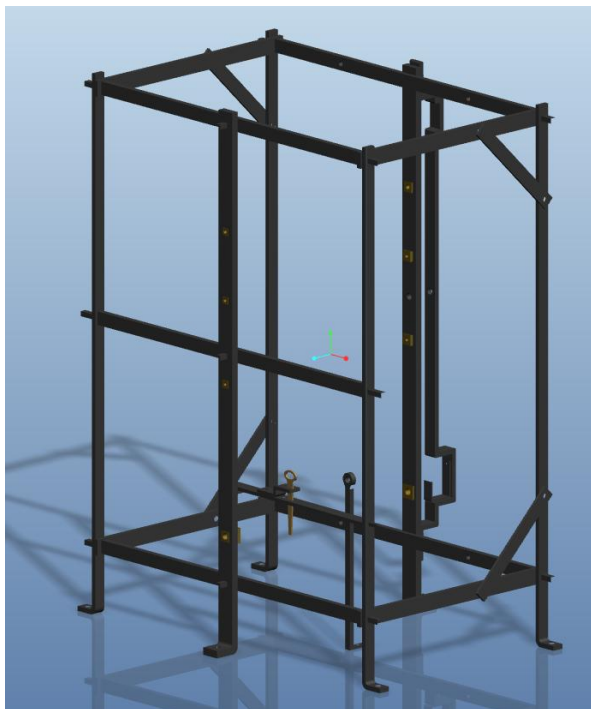


Abbildung 28: Baugruppe Rahmen



Abbildung 29: Baugruppe Pendel

Das Pendel stellt eine weitere Baugruppe dar. Die Aufhängung, die über dem Uhrwerk an der Decke befestigt ist, wird an den Baugruppen standardgemäß orientiert. Daran wird die verlängerte Hälfte der Pendelstange angebracht und als Drehgelenk definiert, da sich diese oben in der Aufhängung drehen soll. Alle weiteren Teile, wie die zweite Hälfte, das Pendelgewicht und deren Halterung, werden danach an der Pendelstange starr befestigt und daran eingestellt.

Ebenso wie die Wellen wird auch die Kurbel zum Aufziehen zu einer Baugruppe zusammengefasst. Außer der Welle und des Triebes muss hierbei ergänzend die frei konstruierte Kurbelstange mit dem Griff an die Welle angefügt werden.



Das Zeigerwerk ist eine übergeordnete Baugruppe (siehe Abbildung 30). Die Frontebene der neuen Baugruppe wird zur Rückwand der Uhrscheiben, an der der hintere Rahmenteil des Zeigerwerkes angebracht wird. Die Right-Ebene definiert die Mittelebene. An diesem Rahmenstück wird der vordere Teil fest angebracht, um den Raum für die Wellen zu definieren. In den vorgesehenen Löchern werden die runden Buchsen fest platziert und anschließend als Lagerung für die Wellen genutzt. Die Wellen werden als Drehgelenke definiert, um ihre Rotation möglich zu machen. Die Welle G, die die einzelne Laterne mit der Nummer 2 trägt, wird mit dem Trieb zuvor in einer anderen Baugruppe in einer kleinen zusätzlichen Fassung drehbar gelagert. Dieser zusätzliche Rahmen wird nun an den Achsen der vorgesehenen Löcher an der hinteren Strebe des Gesamtrahmens orientiert und eingebaut.



Abbildung 30: Baugruppe Zeigerwerk



In der Gesamtbaugruppe wird der Rahmen des Hauptwerkes als Standard- und Ausgangskomponente eingefügt. Darin werden zuerst die einzelnen Wellen des Hauptwerkes als Drehgelenke eingefügt. Auf der Welle D wird wiederum die Baugruppe der Seiltrommel drehbar gelagert, weil diese sich unabhängig von der Welle bewegt. Nach den Wellen folgen die Einzelteile der Kalenderauslösung, die direkt in den Rahmen eingebaut werden können. Der Hebel der Auslösung wird drehbar auf seiner Welle gelagert. Auf der Hauptwelle, die nach außen hin in die hintere Strebe eingebaut wird, werden die beiden einzelnen Hohlwellen unabhängig von der Drehbewegung der Hauptwelle oder der anderen Hohlwelle platziert. Für das Einfügen des Pendels wird eine Ebene erzeugt, die die Lage der Decke zum Boden repräsentiert. An dieser Ebene wird die Pendelaufhängung mit den ermittelten Abständen zur Rückseite des Hauptrahmens und zur Mittelebene der Baugruppe positioniert. Das Zeigerwerk wird an einer, der Innenwand der Uhr angepassten Ebene angebracht. Als letztes wird die Auslösung für den Stundenschlag am Hauptrahmen befestigt, die als eine zusätzliche Baugruppe vordefiniert wurde und deren Hebel sich ebenfalls auf einer Achse drehen lässt. Die Bewegung beider Auslöser wird jedoch eingeschränkt durch eine maximale und minimale Verdrehung von der Nulllage. Die Kurbel zum Aufziehen der Uhr lässt sich wahlweise in die dafür vorgesehene Halterung einsetzen.

3.2.3 Das Modell

Abbildung 31 zeigt das gesamte Modell. Es ist hierarchisch aufgebaut beginnend mit den einzelnen Komponenten aufsteigend bis zur Gesamtbaugruppe. In der Abbildung sind die Zahnräder, Wellen und Triebe nach ihrer Funktionseinheit eingefärbt. Die grüne Welle ist die Haupt- bzw. Zeigerwelle. Sie treibt den Doppelzeiger auf der Uhr an. Die Zahnräder, die die Bewegung der Sonnenscheibe übersetzen, sind goldgelb dargestellt. Die Mondscheibe und deren Zahnräder sind weiß.



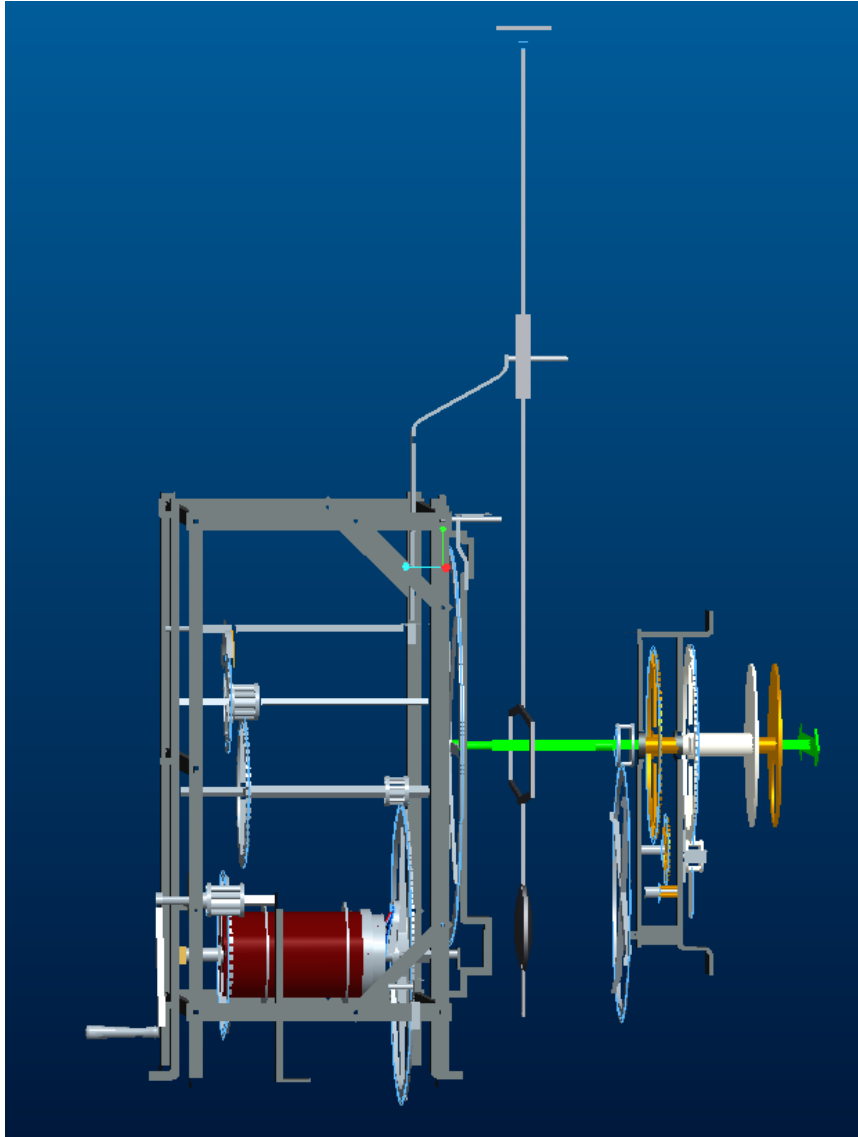


Abbildung 31: Gesamtes Modell

Der Aufbau lässt sich nach der Beschreibung im vorherigen Kapitel nochmal im Schema von Abbildung 32 nachvollziehen.



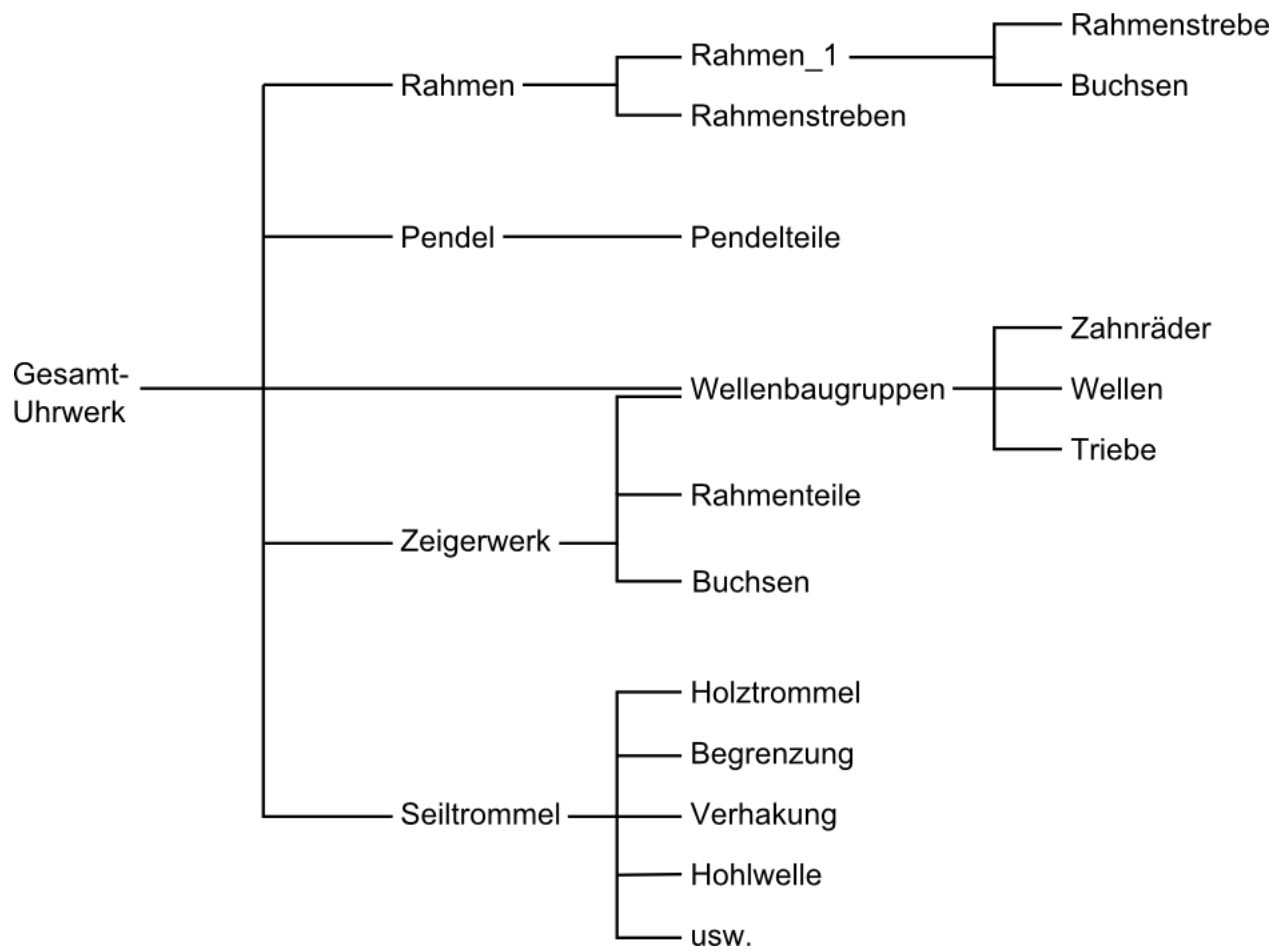


Abbildung 32: Schema zum Aufbau des Modells



3.3 Mechanismus und Animation

Um die Funktionsweise des Getriebes visuell darstellen und zeigen zu können, werden die Mechanismen und Bewegungsabläufe entwickelt.

Über die Applikation *Mechanismus* gelangt man im Pro/ENGINEER zu den notwendigen Tools.

Da es sich bei dem Uhrwerk um ein Getriebe handelt, kann das Tool *Getriebe* verwendet werden. Bei der Definition eines Getriebes müssen nacheinander die zwei zueinander gehörenden Wellenachsen ausgewählt werden, auf denen sich die jeweils ineinander greifenden Zahnräder befinden. Die erste Getriebeachse definiert die antreibende Welle und die zweite Achse die angetriebene Welle. Den beiden Getrieben werden dann jeweils die Wälzkreisdurchmesser der Zahnräder zugeordnet, wie sie in Tabelle 2 aufgeführt sind.

Tabelle 2: Wälzkreisdurchmesser für die Getriebedefinition

Getriebepaar (GP)	Triebnummer	Wälzkreisdurchmesser [mm]
GP1	15	412,95
	14	83,8
GP2	13	836,2
	12	67,1
GP3	11	48,3
	10	1107,74
GP4	9	713
	8	103,4
GP5	7	42,4
	6	539,6
GP6	5	45,2
	4	189,2
GP7	3	132,25
	2	68,9
GP8	2	68,9
	1	547,5
GP9	Kurbelwelle	71,7
	Seiltrommel- zahnrad	453,5



Während der Bewegung greifen die Zähne ineinander und müssen daher zunächst von allen im Ausgangszustand vorhandenen Durchdringungen und Überschneidungen befreit werden. Dazu wird die Ausgangslage der Wellen und Zahnräder so eingerichtet, dass sich die Zähne berühren. Dies wird in der jeweiligen Definition der Baugruppenkomponenten unter dem Zusatzpunkt *Rotationsachse* festgelegt, indem man zwei Ebenen wählt und einen entsprechenden Verdrehungswinkel zwischen ihnen festlegt. Dabei ist darauf zu achten, dass dieser auch als Regenerationswert definiert wird.

Die Bewegung des Getriebes wird von Servomotoren initiiert.

Der erste Servomotor treibt das Pendel an, das eine Schwingung ausführt. Dazu wird die Rotationsachse in der Pendelaufhängung ausgewählt und im Profil die Geschwindigkeit als eine Kosinus-Funktion festgelegt. Die Parameter dafür sind wie folgt:

- Amplitude $A = 4,145^\circ$
- Schwingungsdauer $T = 3 \text{ s}$.

Um diese Bewegung auf Welle A mit dem Hakenanker zu übertragen, muss die Definition dieser Welle geändert werden. Diese bekommt zusätzlich zu der Definition als Drehgelenk eine zweite Platzierungsbedingung. Die neue Bedingung wird als eine Führung eines Punktes auf einer Linie definiert. Die sorgt dafür, dass sich der Stab der Verbindung von Welle und Pendel innerhalb der Führung mit dem Pendel mitbewegt. Auf der Achse des Stabes wird der Punkt auf Höhe der Führung und die Linie auf der Mittelachse der Pendelstange innerhalb der Umklammerung erzeugt. Aufgrund dieser Bedingung ist es möglich, dass der Stab sich drehen kann und trotzdem in der Führung bleibt.

Da sich die reale Bewegungsübertragung vom Hakenanker auf das Ankerrad durch die gegebenen Referenzen nicht direkt in den Mechanismus einbauen lässt, muss auf der Welle B ein neuer Servomotor eingefügt werden. Er treibt die Welle mit einer konstanten Geschwindigkeit von 6 Grad pro Minute an.



Ein dritter Servomotor wird an der kleinen Welle des Stundenschlagauslösers definiert, der seitlich am Rahmen angebracht ist. Der Auslöser wird, sobald der Stift am Stundenrad von oben auf den Hebel drückt, nach unten gedreht und schnippt, nachdem der Stift den Hebel nicht mehr berührt, in seine Ausgangslage zurück. Da dies sich jedoch nicht mit einem 3D-Kontakt und der Definition der Gravitation umsetzen lässt, muss die Bewegung des Hebels einzeln angetrieben werden. Da sich deren Geschwindigkeit und deren Berührungspunkt mit dem Stift während der Interaktion ändern, wird die Position des Hebels über der Zeit in einer Tabelle beschrieben, die in Tabelle 5 (siehe Anhang) dargestellt ist.

Ebenso wird die Bewegung der zweiten Auslösung für das Betätigen des Kalenderwerkes mit Hilfe einer Tabelle umgesetzt. Dies ist jedoch simpler, da der Stift beim ersten Berühren und beim Loslassen etwa an derselben Stelle den Hebel berührt. Es wird davon ausgegangen, dass der Drehwinkel konstant zunimmt und nach dem Loslassen wieder nach unten in die Ausgangslage in wenigen Sekunden schnippt, das heißt, dass der Drehwinkel am Ende vom Maximum wieder auf null fällt. Diese Daten sind in Tabelle 6 einsehbar.

Da sich die Bewegung, die die Verhakung beim Aufziehen vollführt, abermals nicht mit gegebenen Tools umsetzen lässt, muss noch einmal ein Servomotor definiert werden. Die Bewegung kehrt immer wieder. In Abbildung 33 ist ein Teil des Winkel-Zeit-Diagramms zusehen, dass für eine Kurbelgeschwindigkeit von $180\text{ }^\circ/\text{s}$ zutrifft.

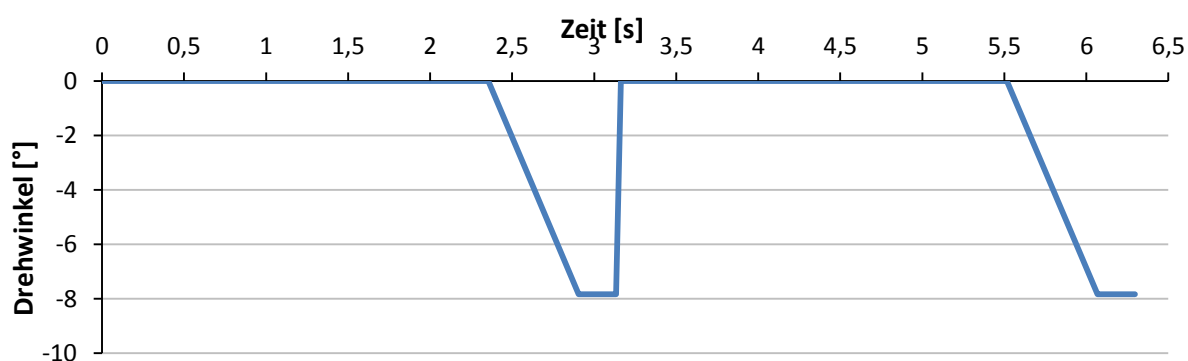


Abbildung 33: Winkel-Zeit-Diagramm für die Bewegung der Verhakung, Kurbelgeschwindigkeit $180\text{ }^\circ/\text{s}$



Die festgelegten Mechanismen werden mit Hilfe von Analysen überprüft. Dafür wird die Start- und Endzeit der gesamten Untersuchung eingegeben und die relevanten Servomotoren bestimmt. Denen wird jeweils ihre Start- und Endzeit zugeordnet, wie es in der nachfolgenden Tabelle 3 steht. Dabei wird immer von der Ausgangslage ausgegangen.

Tabelle 3: Start- und Endzeiten der Analyse

Motor	Startzeit [s]	Endzeit [s]
Pendel	Start	Ende
Welle B	Start	Ende
Stundenschlagauslösung	599,4	811
Kalenderauslösung	30152,7	34882,7
Aufziehen	Start	Ende

Von den Analysen werden außerdem die Filme abgeleitet, die die Funktionsweise einzelner Teile zeigen und auf der beiliegenden CD zu finden sind.



4 Auswertung

In diesem Kapitel erfolgt ein Vergleich zwischen den originalen Uhrwerken und dem erstellten Modell. Der Vergleich wird teilweise mit Photographien, Skizzen und Bildern unterstützt. Weiterhin wird die Realitätsnähe des Mechanismus diskutiert.

4.1 Vergleich von Modell und Original

Das 3D-Modell spiegelt grundlegend den Aufbau und die Funktion des Haupt- und Zeigerwerkes der astronomischen Uhr wieder. Alle funktionsrelevanten Komponenten, wie Zahnräder, Triebe, Wellen und die Seiltrommel, sind funktionsgerecht abgebildet.

Um den Fokus nicht von den betriebsrelevanten Komponenten zu nehmen und das Modell übersichtlich zu gestalten, wurden Schrauben, Muttern, Keile und andere Arten der Befestigung nicht modelliert. Aussparungen und Löcher sind jedoch an den betreffenden Stellen für Schrauben und Stifte als Platzhalter vorgesehen.

Ebenso sind die Einzelteile sowie der Zusammenbau des Rahmens um das Hauptwerk vereinfacht und deren Maße zum Teil vereinheitlicht worden. Die Änderungen der Maße können in Tabelle 7 eingesehen werden. Um die Funktion trotzdem gewährleisten zu können, ist die Länge des Kalenderauslösers dem entsprechend angepasst worden. Da in der angenäherten Form des Rahmens die Modellierung der hinteren Versteifungen, die im 45-Gradwinkel zu den anderen Streben stehen, nicht möglich ist, sind diese ebenfalls nicht im Modell dargestellt worden.

Die Form des Hakenankers ist mit Hilfe eines Fotos modelliert worden. Die Lage der Punkte, die auf dem Foto entlang der Bildkontur platziert wurden, ist abgeschätzt. Ebenso ist die Konturlinie, die durch Verbindung der Punkte durch Spline-Kurven erstellt wurde, nur angenähert. Es entspricht daher dem Foto, aber nicht zwangsweise dem Original. In Abbildung 34 ist der Abgleich von Foto und Modell zu sehen. Die Lage der Wellenachse und der Aufhängung ist angenommen worden und weicht daher von der des realen Bauteils ab.



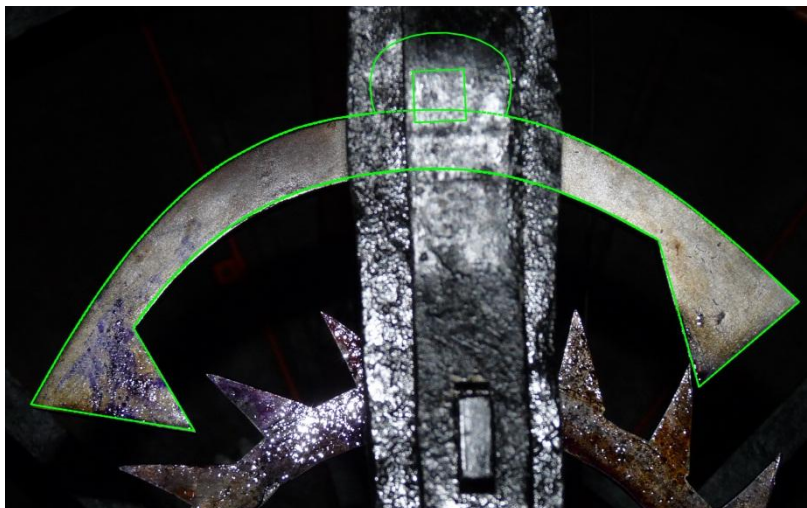


Abbildung 34: Abgleich des Hakenankers von Modell (grün) und Foto

Um das Ineinandergreifen der Zähne realisieren zu können, sind die Wellenabstände zum Teil angepasst worden und weichen gering von den gemessenen ab. Die Änderungen sind in Tabelle 8 zu finden.

Die Federn, die die Verhakung von Seiltrommel und Welle D an das Stundenrad drücken, sind nach dem Vorbild der Originale und in Anlehnung an das schon erstellte Modell erstellt worden. Daher unterscheiden sich ihre Maße und Lagen von den Ursprünglichen.

Die Lage der beiden Auslösestifte ist frei festgelegt worden. Demnach ist ihre Lage zueinander nicht korrekt. Das hat zur Folge, dass zu der Zeit, wenn der Kalender ausgelöst wird, es keinen gleichzeitig ausgelösten 24-Uhr-Stundenschlag geben kann.



4.2 Der Mechanismus

Im Mechanismus ist die Funktionsweise der Getriebe so definiert worden, dass diese im Groben den Bewegungen im Uhrwerk entspricht.

Die Ausrichtung der Zahnräder zueinander hat geholfen, Überschneidungen im Ausgangszustand und weitestgehend auch in den Analysen zu vermeiden. Wenn sich die Zahnräder jedoch längere Zeit drehen, kommt es aufgrund der kleinen Ungenauigkeiten beim Messen, Modellieren und Ausrichten zu Durchdringungen wie in Abbildung 35 sichtbar ist.

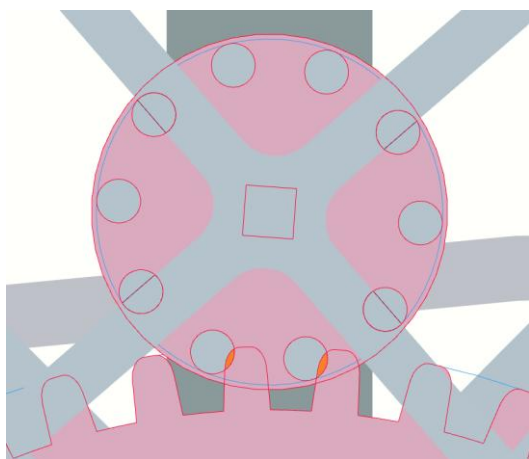


Abbildung 35: Durchdringungen (orange) von Zahnrad 14 und 15 nach ca. 750 Sekunden

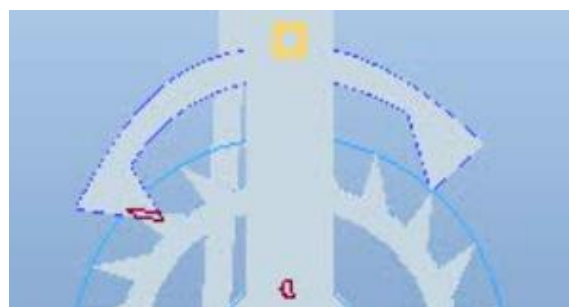


Abbildung 36: Überschneidungen (rot) von Hakenanker und Ankerrad

Bei der Bewegung von Welle A und B treten ebenfalls geringe Überschneidungen von Hakenanker und Ankerrad auf (siehe Abbildung 36). Dies ist dem angenäherten Bewegungsangleich geschuldet. Normalerweise bewegt sich die Welle B nicht mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit, sondern passt sich dem Hakenanker an und hat daher kurze Phasen, in denen sie entgegengesetzt rotiert.

Da kein 3D-Kontakt erstellt werden konnte, wurden die beiden Blattfedern für die Verhakung von Welle D und der Seiltrommel nicht als Federn definiert. Infolge dessen bewegen sie sich auch nicht, wenn die Uhr aufgezogen wird und die Verhakung sich den Streben anpasst. Aus diesem Grund sind die beiden Federn im Modell, das die Kurbel zum Aufziehen des Uhrwerkes und deren Mechanismus beinhaltet, ausgeblendet.



Ebenso fehlt es den Bewegungen der Auslöser an Genauigkeit. Dies ist kommt dadurch zu Stande, dass die physikalischen Begebenheiten nicht in das Modell integriert werden konnten und die Bewegungen durch Kurven angeglichen werden mussten.

Die Filme, die von den Analysen der Mechanismen abgeleitet wurden und auf der beiliegenden CD zu finden sind, haben eine Laufzeit, die von der Analyse- und Originalzeit abweicht. Dies ist in Pro/ENGINEER verankert und kann nicht angepasst werden. Die eigentlichen Laufzeiten sind in den Titeln der Videos angegeben.



5 Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurde die Aufgabe bearbeitet, den Ist-Zustand des Haupt- und Zeigeruhrwerkes der astronomischen Uhr in der Rostocker Marienkirche zu erfassen und diese anschließend in 3D zu modellieren.

Als Erstes sind die Maße der einzelnen Komponenten und der Rahmen der Uhrwerke erfasst und notiert worden. Die Messungen wurden per Hand mit Hilfe von Stahllinealen und Messschiebern durchgeführt.

Der zweite Schritt der Arbeit bestand in der Modellierung der Uhrwerke in Pro/ENGINEER. Zu Anfang wurden die Einzelteile erstellt, wobei besonders die Zahnradzähne und die Pendel-Haken-Hemmung so genau wie möglich modelliert wurden. Da die Form der restlichen Bauteile nicht ausschlaggebend für die korrekte Funktion des Uhrwerkes ist, konnten diese zum Teil vereinfacht werden.

Einzelnen Komponenten wurden im Anschluss an die Modellierung zu Unterbaugruppen zusammengefasst. Auf den Wellen wurden die Zahnräder und Triebe starr befestigt und die Rahmenteile der Hauptwerkfassung wurden zusammengesetzt. Bei dem Pendel musste darauf geachtet werden, dass die Pendelstange sich in ihrer Führung bewegen lässt und sich die an ihr befestigten Bauteile mitbewegen. Alles zusammen wurde in eine Oberbaugruppe eingefügt. Wichtig ist dabei, die Wellen und alle anderen Bauteile ihrem Bewegungsverhalten entsprechend zu definieren.

Der Mechanismus, der hinter den ganzen Bewegungen der Uhrwerke steckt, wurde im Anschluss an das Zusammenbauen definiert.

Als Letztes wurden Modell und Originaluhrwerk einem Vergleich unterzogen. Dieser hat gezeigt, dass das Modell alle für die Funktion wichtigen Bauteile enthält und diese in ihrer Form und Größe annähernd dem Realen entsprechen. Kleine Abweichungen und Durchdringungen sind dennoch vorhanden. Ebenso konnten die realen Ursachen und Bewegungen nicht immer realistisch dargestellt werden.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass durch das erstellte Modell der Aufbau und die Funktionsweise des Haupt- und Zeigerwerkes erfasst und dargestellt werden konnte.



6 Schlussfolgerung und Ausblick

Trotz der möglichst genauen Vermessung der Teile mit den vorhandenen Hilfsmitteln birgt die Methode mit Lineal und Messschieber an sich große Ungenauigkeiten und Messfehler. Ebenso konnten viele Maße nur abgeschätzt bzw. angenommen werden, da sie mit den Messinstrumenten nicht erreichbar sind. Dies hat die Genauigkeit noch weiter eingeschränkt.

Um Ungenauigkeiten zu verringern und Bauteile realitätsnaher gestalten zu können, müsste bei weiteren Betrachtungen einerseits eine genauere Methode für das Messen herangezogen werden, wie zum Beispiel das Erfassen mittels Streifenlichtprojektor oder anderen digitalen Scanverfahren. Zum anderen sollte das komplette Uhrwerk auseinander genommen werden, um alle Einzelheiten identifizieren und ausmessen zu können.

Um den Mechanismus und die Funktion wirklich realistisch darstellen zu können, muss ein anderes Programm als Pro/ENGINEER herangezogen werden. Zusätzlich sind Struktur- und Dynamikanalyse notwendig, um die Bewegungsbedingungen genauestens beschreiben zu können.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Modell als eine erste Aufnahme und Darstellung des Herzens der astronomischen Uhr, eine einfache Erklärungsmöglichkeit für die Funktion und den Aufbau liefert. Um später Ersatzteile nach diesem Vorbild fertigen und Reparaturen einfacher durchführen zu können, müssen jedoch detailliertere Messungen und Modellierungen durchgeführt werden.



Literaturverzeichnis

- [SCH04] Schukowski, M., 2004, aktualisierter Nachdruck 2011. *Die astronomische Uhr der St.-Marien-Kirche zu Rostock*. Rostock: s.n.
- [SCH12] Schukowski, M., kein Datum *Die Astronomische Uhr der St.-Marien-Kirche zu Rostock*. [Online]
Available at: www.astronomischeuhr.de/files/aufbau4.htm
[Zugriff am Januar 2012].



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Christine Möschner, die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter zur Hilfenahme der angegebenen Literatur- und Internetquellen verfasst zu haben. Diese Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form wurde noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort und Datum

Christine Möschner

Anhang

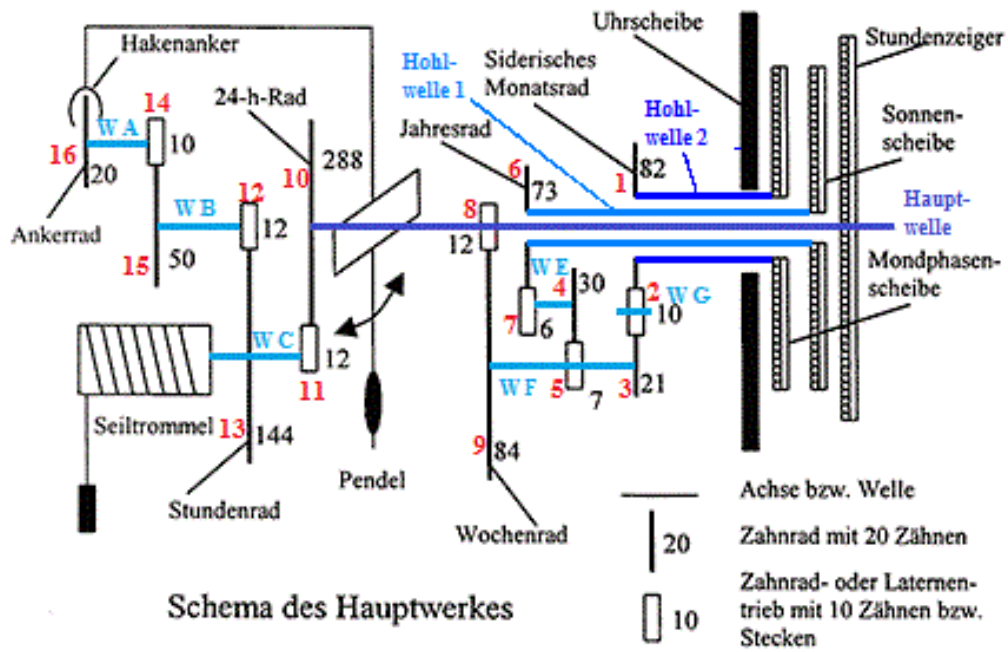


Abbildung 37: Schema des Haupt- und Zeigerwerkes mit Nummerierung der Zahnräder und Triebe (rot) sowie der einzelnen Wellen W (blau variiert)



Tabelle 4: skalierte Punktkoordinaten des Hakenankers

Punkt-Nr.	x	y	z
0	-84,82848	-110,92928	0
1	-141,43008	-102,04656	0
2	89,76	-95,20368	0
3	124,34576	-65,63744	0
4	75,69056	-44,5808	0
5	-106,084	-75,4248	0
6	-10,99472	0	0
7	-84,57856	0	0
8	50,93968	0	0
9	16,91712	-21,3576	0
10	-17,35536	-20,96512	0
11	-61,57008	-33,65296	0
12	-92,89808	-58,2824	0
13	48,39472	-30,62048	0
14	56,8128	-14,0536	0
15	42,50752	-7,48704	0
16	20,5304	-1,33936	0
17	71,45952	-22,4136	0
18	84,89888	-31,6272	0
19	-34,672	-2,5168	0
20	-52,46208	-7,09456	0
21	-66,85184	-13,63472	0
22	-78,364	-20,43712	0
23	-89,48192	-29,46416	0
24	-101,0152	-41,22624	0



Tabelle 5: Wertetabelle für die Bewegung des Stundenschlagauslösers

Zeit [s]	Drehwinkel [°]
0	0
7,6761	1,4
10,6761	2
13,6761	2,55
16,6761	3,2
19,6761	3,9
22,6761	4,4
25,6761	5
43,6761	8
46,6761	8,5
49,6761	9,08
52,6761	9,55
55,6761	10,11
58,6761	10,5
63,6761	11,3
68,6761	12
73,6761	12,72
78,6761	13,36
83,6761	14,08
88,6761	14,8
96,6761	15,6
104,6761	16,8
112,6761	17,8
152,6761	22,8
209,3641	28,8
209,6761	0



Tabelle 6: Wertetabelle für die Bewegung des Kalenderwerkauflösers

Zeit [s]	Drehwinkel [°]
0	0
4728	54
4730	0



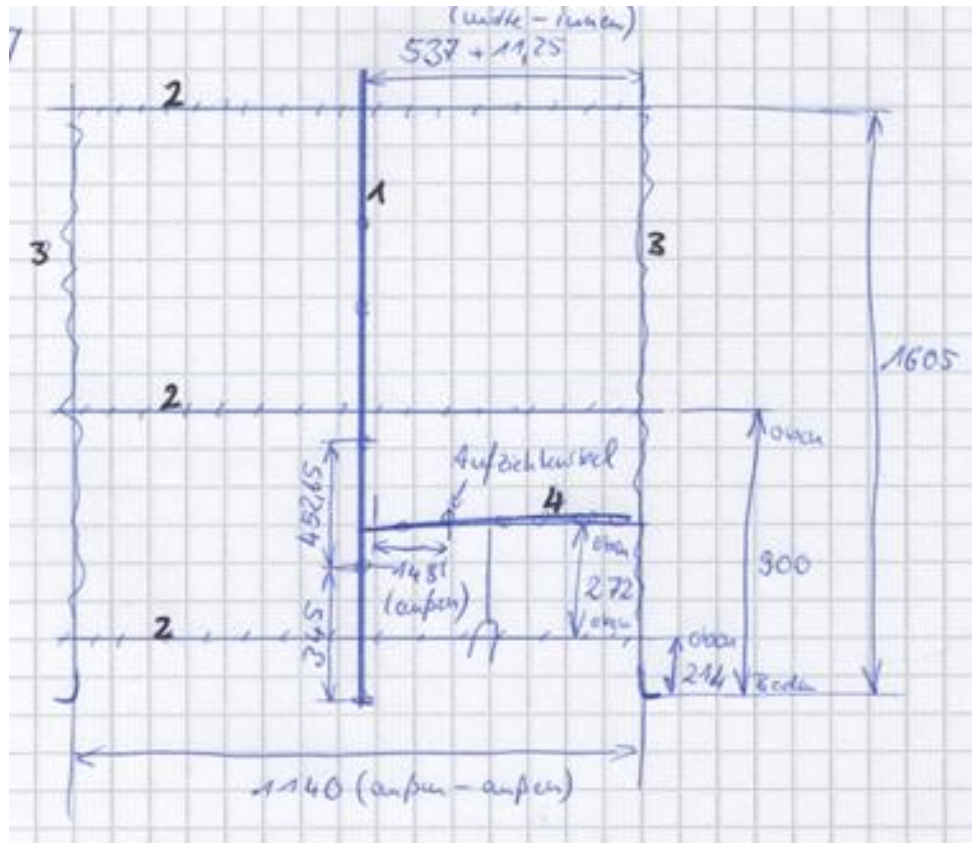


Abbildung 38: Skizze des Hauptrahmens, vorne

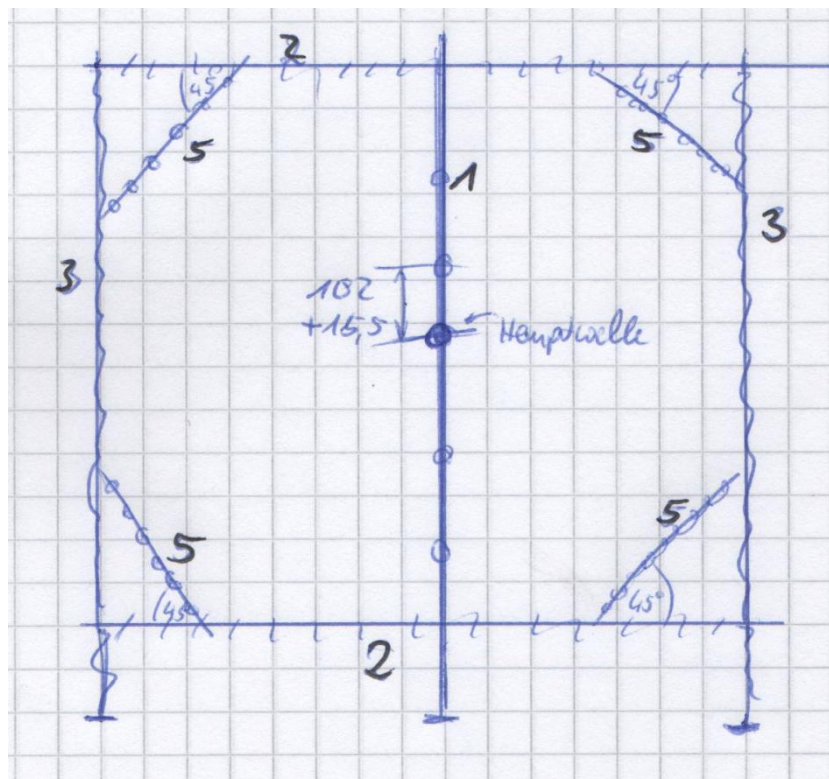


Abbildung 39: Skizze des Hauptrahmens, hinten



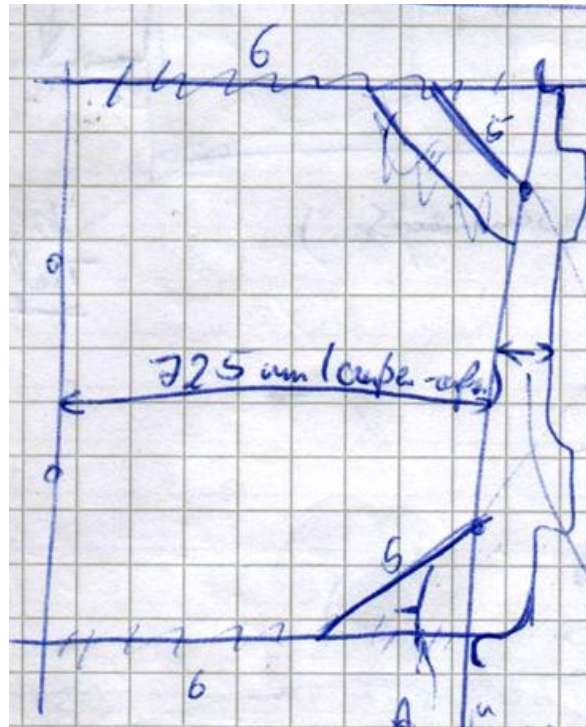


Abbildung 40: Skizze des Hauptrahmens, Seite (recht)

Tabelle 7: Materialwerte für die Rahmenstreben

orangemarkierte Werte wurden vereinheitlicht, Nr. 2 vorne = Nr. 2 hinten

Ansicht	Nr.	Materialstärke	Breite
vorne	1	22	57
	2	18	40
	3	14	36
	4	10,5	50
hinten	1	22	56
	2	18,5	41,5
	3	17	48,5
	5	8	40,5
Seite (rechts)	6	15,3	46,88
	7	15	41,5



Tabelle 8: Wellenabstände, Änderungen orange markiert

Wellenachsen	Abstand – gemessen [mm]	Abstand aus Modell [mm] (Anpassung)
WA - WB	203,775	203,775
WB - WC	248,37	248,37
WC -WD	451,65	451,65
WD - Hauptwelle	577,4	578,02
WD - Aufstellfläche	345	345
WE - Hauptwelle	287,85	291
WF - Hauptwelle	-	408,2
WE - WF	117,2	117,2
WF - WG	-	100
WG - Hauptwelle	-	308,2

