

UNIVERSITÄT ROSTOCK
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Fertigungstechnik



**Erstellung eines 3D-Modells der
Astronomischen Uhr in St. Marien zu Rostock
basierend auf Daten von terrestrischem
Laserscanning**

Projektarbeit

Eingereicht von: Martin Rohs
Studiengang: Maschinenbau (Diplom)
Referent: Prof. Dr.-Ing. Martin C. Wanner
Betreuer: Dipl.-Ing. Olaf Grewe

Zusammenfassung

Die Arbeit befasst sich mit allen wichtigen Schritten zur Herstellung eines mit der CAD-Software Pro-Engineer modellierten Objektes vom Innenraum der Astronomischen Uhr der St. Marienkirche zu Rostock. Zunächst wird auf den Aufbau der Astrouhr näher eingegangen, wo die einzelnen Bauteile beschrieben und alle Funktionalitäten erklärt werden. Nach einer anschließenden kurzen Einführung in das terrestrische Laserscanning und einer Auflistung und Beschreibung aller verwendeten Hard- und Softwarekomponenten wird die Datenerfassung beschrieben, die u.a. mit dem Laserscanner Z+F IMAGER 5010 und der Motorkamera Z+F M-Cam erfolgte. Danach wird auf die Datenaufbereitung detailliert eingegangen, wo u.a. die Registrierung, die Filterung, die Colorierung und die Polygonobjektherstellung mit Hilfe der Scandatenverarbeitungsprogramme „Z+F Laser-Control“ und „Geomagic Studio 2012“ erklärt werden. Zum Abschluss werden die einzelnen modellierten Bauteile vorgestellt und deren Herstellung in Pro-E kurz und knapp erläutert.



Fraunhofer - Anwendungszentrum
Großstrukturen in der Produktionstechnik
Albert-Einstein-Str. 30
18059 Rostock

Aufgabenstellung

Erstellung eines 3D-Modells der Astronomischen Uhr in St. Marien zu Rostock basierend auf Daten von terrestrischem Laserscanning

Das Ziel der Projektarbeit ist es gemeinsam mit dem Kandidat Ronny Rohs ein 3D-Modell der Astronomischen Uhr der St. Marienkirche in Rostock zu erstellen. Hierfür ist die historische Kirchenglocke durch terrestrisches Laserscanning mit dem System Z+F 5010 zu erfassen. Die im weiteren Prozess entstehende farbige Punktwolke bildet die Grundlage für die geometrische Formgebung und colorierte Oberflächengestaltung des 3D-Modells.

Die anstehenden Arbeiten sind folgendermaßen verteilt:

- Durchführung der Laserscanning (M. Rohs / R. Rohs)
- Erstellung und Bearbeitung der farbigen Punktwolke (M. Rohs / R. Rohs)
- 3D-Modellierung des Innenraumes mit der Software Pro-Engineer (M. Rohs)
- 3D-Modellierung der Außenfassade mit der Software Pro-Engineer (R. Rohs)

Es sind alle wichtigen Arbeitsschritte darzustellen und dabei auf eintretende Besonderheiten genauer einzugehen.

Abgabe der Projektarbeit: 31.08.2012

Arbeitsumfang: 500 h

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, Martin Rohs, die vorliegende Projektarbeit „Erstellung eines 3D-Modells der Astronomischen Uhr in St. Marien zu Rostock basierend auf Daten von terrestrischem Laserscanning“ selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Rostock, 31.08.2012

(Martin Rohs)

Sperrvermerk

Die Inhaltsangaben dieser Projektarbeit sind vertraulich und dürfen nicht, ohne formelle Genehmigung des Fraunhofer Anwendungszentrums für Großstrukturen in der Produktionstechnik, an dritte Personen weitergegeben werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufbau der Astronomischen Uhr	2
2.1	Der Aufsatz	2
2.2	Die Uhrscheibe	3
2.2.1	Die Uhrzeit	3
2.2.2	Der Monat und das Tierkreiszeichen	4
2.2.3	Die Mondphase	5
2.2.4	Der Sebes-Scheibe	6
2.2.5	Die Planeten-Scheibe	7
2.3	Das Kalendarium	7
2.4	Die Uhrwerke	13
2.4.1	Das Hauptwerk	14
2.4.2	Das Zeigerwerk	15
2.4.3	Das Kalenderwerk	16
2.4.4	Das Stundenschlagwerk	17
2.4.5	Das Musikwerk	18
2.4.6	Das Apostelwerk	19
3	Terrestrisches Laserscanning	20
3.1	Prinzip des terrestrischen Laserscannings	20
3.2	Bauarten von terrestrischen Laserscannern	20
3.3	Entfernungsmessung von terrestrischen Laserscannern	21
3.3.1	Phasendifferenzverfahren	21
3.3.2	Impulsverfahren	23
4	Angewandte Hard- und Software	24
4.1	Z+F IMAGER 5010	24
4.2	Z+F M-Cam	25

4.3	Nikon D40 mit Zubehör	26
4.4	Sokkia NET2A	26
4.5	Z+F Laser-Control	27
4.6	PTGui	27
4.7	Geomagic Studio 2012	28
4.8	Pro-Engineer Wildfire 5.0	28
5	Datenerfassung	29
5.1	Objektvermessung mit Laserscanner	29
5.2	Objektvermessung mit Tachymeter	32
5.3	Herstellung von Fotos mit Z+F M-Cam	32
5.4	Herstellung von Fotos mit Nikon D40	33
6	Datenaufbereitung	34
6.1	Registrierung mit Z+F Laser-Control	34
6.2	Filterung mit Z+F Laser-Control	36
6.3	Stitching und Colorierung mittels Fotos der Z+F M-Cam	38
6.4	Stitching und Colorierung mittels Fotos der Nikon D40	39
6.4.1	Stitching mit PTGui	39
6.4.2	Colorierung mit Z+F Laser-Control	41
6.5	Beschneidung mit Geomagic Studio	43
6.6	Herstellung eines Polygonobjektes mit Geomagic Studio	45
6.7	Herstellung von Schnittkurven mit Geomagic Studio	46
6.8	Distanzmessung in Geomagic Studio	46
7	Datenmodellierung	47
7.1	Doppelpfeiler mit Bogenelement	47
7.2	Grundplatte und Altarwand	48
7.3	Weitere Bauteile	48
7.4	Ergebnis der Datenmodellierung	50

8 Fazit	51
Abkürzungsverzeichnis	52
Abbildungsverzeichnis	53
Tabellenverzeichnis	55
Literaturverzeichnis	56
Anhang	58

1 Einleitung

Im Jahr 2011 trat der Förderverein „Stiftung St.-Marien-Kirche zu Rostock“ an das Fraunhofer AGP in Rostock mit der Idee heran, ein 3D-Modell der Astronomischen Uhr zu Rostock zu erstellen. Hieraus resultierte die vorliegende Projektarbeit, die sich mit dem Vermessen durch terrestrisches Laserscanning und der 3D-Modellierung der Astrouhr beschäftigt.

Die Astronomische Uhr der St. Marienkirche steht im Chorumgang hinter dem Hauptaltar und ist ca. elf Meter hoch (siehe Abb. 1). Sie ist die älteste noch funktionierende Astronomische Uhr der Welt.



Abb. 1: Die Astronomische Uhr der Rostocker St. Marienkirche (nach [Sch10], Cover)

2 Aufbau der Astronomischen Uhr

Die nachfolgenden Informationen zum Aufbau der Astronomischen Uhr wurden vorwiegend aus dem Buch [Sch10] und der Informationsbroschüre [Sch11] von Prof. Dr. Manfred Schukowski entnommen.

2.1 Der Aufsatz

Den Mittelpunkt des Aufsatzes, der sich oberhalb der Uhrscheibe befindet, bildet die Figur des Jesus Christus, die über einem halbrunden Balkon "schwebt" (siehe Abb. 2). Mittags um 12.00 Uhr und mitternachts um 24.00 Uhr öffnet sich die große Tür rechts neben der Christus-Figur und nacheinander treten die sechs Apostel-Figuren des Petrus, Johannes, Jakobus der Jüngere, Jakobus der Ältere, Paulus und des Judas vor Jesus Christus, umrunden den Erlöser, drehen sich ihm zu, werden von ihm gesegnet und verlassen die Bühne durch die linke große Tür (siehe Abb. 3). Nur Judas wendet sich nicht dem Erlöser zu, wird nicht vom ihm gesegnet, und die linke große Tür schlägt vor ihm zu. Judas muss als einziger vor der Himmelspforte bis zum nächsten Figurenrundgang warten (siehe Abb. 2). Während des Figurenumlaufs werden außerdem zwei weitere kleinere Türen links und rechts von den großen Türen, wo die Apostel hindurchtreten, geöffnet, und es werden zwei engelsartige Geschöpfe sichtbar (siehe Abb. 3).



Abb. 2: Der Aufsatz der Astronomischen Uhr ([Sch11], S. 6)

Links und rechts vom Apostelumlaufbalkon stehen jeweils unter einem reichlich verzierten Säulenbogen die Figuren von sechs weiteren Aposteln. Vier von ihnen sind an der Stirn- und zwei von ihnen an der Seitenfläche des Aufsatzes fest positioniert.

Auf dem obersten Gesims des Aufsatzes steht mittig ein dreietagiger Turm, der „Kleine Laterne“ genannt wird. Links und rechts von dieser Laterne stehen vier Engelsfiguren auf Podesten sowie zwei reichlich verzierte, dreiecksförmige Holzplatten mit Engelsfiguren an der Spitze und Adam und Eva im Zentrum.



Abb. 3: Der Figurenring der sechs Apostel ([Sch10], S. 48)

2.2 Die Uhrscheibe

Zwischen Aufsatz und Kalendarium befindet sich die quadratische Uhrscheibe, die einen Flächeninhalt von circa 16 m^2 hat (siehe Abb.4). Die dreieckähnlichen Flächen (Zwickeln) an jeder Ecke der Uhrscheibe sind besetzt mit Evangelistenfiguren, die für die vier Evangelien Matthäus, Markus, Lukas und Johannes stehen. Der Engel oben links symbolisiert Matthäus, der Löwe mit Flügeln unten links Markus, der geflügelte Stier unten rechts Lukas und der Adler oben rechts Johannes.

2.2.1 Die Uhrzeit

Eines der wichtigsten Uhrscheibenfunktionen ist das Anzeigen der aktuellen Uhrzeit. Hierfür besitzt die Uhrscheibe einen 24-Stunden-Kreis (2 x 12 Stunden), der aus römischen Zahlen in gotischer Schrift von I bis XII besteht. Die Uhr selbst besitzt nur einen Stundenzeiger, aber keinen Minutenzeiger, da dieser zu jener Zeit noch nicht üblich war. Der Stundenzeiger dreht sich innerhalb von 24 Stunden einmal ganz rechts herum und ist ein sogenannter Doppelzeiger.

Um die Uhrzeit ablesen zu können, betrachtet man nur den oberen Teil des 24-Stunden-Kreises, d.h. nur die oberen 13 Stunden von VI (ganz links) bis VI (ganz

rechts). Befindet sich die goldene Hand mit dem ausgestreckten Zeigefinger, die an einem Ende des Stundenzeigers befestigt ist, im oberen Teil des 24-Stunden-Kreises, ist es gerade Tageszeit, d.h. man kann eine Tagesuhrzeit zwischen 6.00 Uhr morgens (bei VI ganz links) und 18.00 Uhr abends (bei VI ganz rechts) ablesen. Befindet sich dagegen der goldene Stern, der am anderen Ende des Stundenzeigers angebracht ist, im oberen Teil des 24-Stunden-Kreises, ist es gerade Nachtzeit, d.h. man kann eine Nachtuhrzeit zwischen 18.00 Uhr abends (bei VI ganz links) und 6.00 Uhr morgens (bei VI ganz rechts) ablesen.



Abb. 4: Die Uhrscheibe der Astronomischen Uhr ([Sch11], S. 6)

In der Abb. 4 befindet sich der Zeigefinger im oberen Teil des 24-Stunden-Kreises auf die Zahl XI zeigend, welches bedeutet, dass es gerade Tageszeit und zwar 11.00 Uhr vormittags ist.

2.2.2 Der Monat und das Tierkreiszeichen

Eine weitere Funktion der Uhrscheibe ist das Anzeigen des aktuellen Monats und des gerade herrschenden Tierkreiszeichens (Sternbildes). Dazu verfügt die Uhrscheibe über einen Tierkreiszeichenring. Unten rechts beginnt das Zeichen des

Wassermanns. Ihm folgen im Gegenuhrzeigersinn die Zeichen von Fische, Widder, Stier, Zwillinge, Krebs, Löwe, Jungfrau, Waage, Skorpion, Schütze und Steinbock. An dem Tierkreiszeichenring schließt sich nach innen der Monatsbilderring an. Unten rechts beginnt das Bild vom Monat Januar. Ihm folgen im Gegenuhrzeigersinn die weiteren Monatsbilder. Die typischen Darstellungen der einzelnen Monate sind folgende:

Januar:	Ein edler Mann diniert.
Februar:	Ein Mann wärmt sich am Feuer.
März:	Ein Mann pflanzt zwei Bäume.
April:	Eine Frau gräbt um.
Mai:	Ein Bauer sät.
Juni:	Ein Mann mäht Gras mit einer Sense.
Juli:	Eine Bäuerin schneidet Getreide mit einer Sichel.
August:	Ein Bauer drischt Korn.
September:	Ein Winzer erntet Reben.
Oktober:	Ein Mann pflückt Äpfel.
November:	Ein Mann hackt Holz.
Dezember:	Ein Mann schlachtet ein Schwein.

Als Zeiger dient hier ein mit einem Sonnensymbol verzierter Stab, der am Rand einer kreisförmigen Kupferscheibe mit kreisrundem Ausschnitt befestigt ist. Diese sich im Zentrum der Uhrscheibe befindende Kupferscheibe wird Sonnenscheibe genannt und ist mit einem Drachen und zahlreichen Sternen bemalt. Die Sonnenscheibe dreht sich innerhalb von 12 Monaten einmal ganz links herum.

In der Abb. 5 befindet sich der Sonnenzeiger auf dem Monatsbild „Juni“ und dem Tierkreiszeichen „Zwillinge“.

2.2.3 Die Mondphase

Die historische Uhr zeigt auch die aktuelle Mondphase an. Hierzu hat die Uhrscheibe eine kreisförmige Kupferscheibe, die unter der Sonnenscheibe angeordnet ist. Auf dieser sogenannten Mondphasenscheibe sind sowohl ein schwarzes Neumond- als auch ein gelbes Vollmondgesicht abgebildet. Die Mondphasenscheibe dreht sich in

27,32 Tagen (= 1 siderischer Monat) einmal ganz links herum. Sie dreht sich damit wesentlich schneller als die darüber liegende Sonnenscheibe. Auch die Mondphasenscheibe besitzt wie die Sonnenscheibe am Rand einen Zeiger, der jedoch anstatt des Sonnensymbols ein Mondsymboll trägt. Wenn Neumondzeit ist, stehen Sonnen- und Mondzeiger übereinander. Zur Zeit des Vollmondes stehen beide Zeiger entgegengesetzt. Im Zusammenspiel mit dem kreisförmigen Ausschnitt der Sonnenscheibe können die folgenden Mondphasen dargestellt werden:

1. Neumond
2. Zunehmende Mondsichel
3. Zunehmender Halbmond
4. Zunehmender Mond
5. Vollmond
6. Abnehmender Mond
7. Abnehmender Halbmond
8. Abnehmende Mondsichel

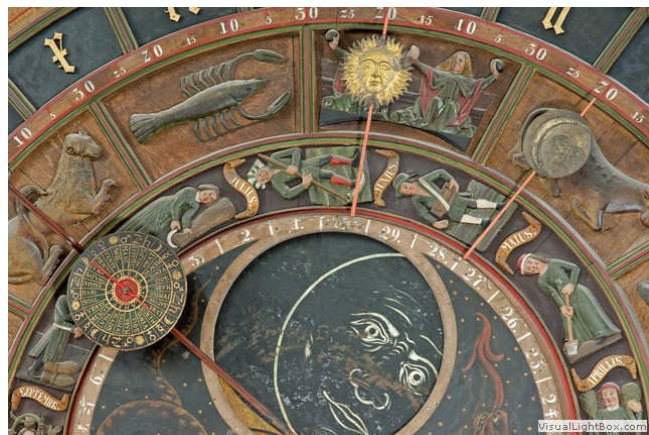


Abb. 5: Der Sonnen- und Mondzeiger ([AstroUhr1])

In der Abb. 5 ist zu sehen, dass in nicht allzu ferner Zukunft „Neumond“ sein wird. Somit ist auf dem Bild die Mondphase „Abnehmende Mondsichel“ dargestellt.

2.2.4 Die Sebes-Scheibe

Auf der einen Seite des Stundenzeigers befindet sich eine kleine drehbar gelagerte Scheibe mit dem Portrait des früheren Rostocker Senators Zacharias Sebes (1601 – 1650) (siehe Abb. 6). Am Rande dieser Scheibe ist ein breiter Ziffernring mit den arabischen Zahlen 1 bis 24 zu erkennen, der an einem kleinen goldenen Handzeiger, der auf dem Stundenzeiger befestigt ist, vorbeiläuft. Die Sebes-Scheibe ist eine sogenannte Schwerkraftuhr, bei dem der Antrieb durch das Eigengewicht der Scheibe selbst erfolgt und somit eine weitere kleinere Uhr auf der eigentlichen Großuhr selbst.



Abb. 6: Die Sebes-Scheibe
([Sch11], S. 14)

2.2.5 Die Planeten-Scheibe

Auf der anderen Seite des Stundenzeigers befindet sich eine kleine astrologische Scheibe, die anzeigt, welcher Planet gerade die aktuelle Stunde regiert (siehe Abb. 7). Auf der Scheibe sind jeweils viermal außen die Symbole und innen die Namen der sieben Planeten (Sonne, Mars, Jupiter, Saturn, Mond, Merkur, Venus) abgebildet, die die Erde als Mittelpunkt des Weltalls nach dem Weltbild des Astronoms Claudius Ptolemäus (ca. 100 bis 180 n. Chr.)



Abb. 7: Die Planeten-Scheibe
(nach [AstroUhr1])

umkreisen. Sowohl die Symbole als auch die Namen der Planeten laufen an einem roten Doppelzeiger vorbei. Die Planeten-Scheibe ist wie die Sebes-Scheibe eine Schwerkraftuhr, jedoch mit dem Unterschied, dass zusätzlich ein Getriebe zwischengeschaltet ist, damit sich die Planeten-Scheibe nicht um 360° sondern nur um 309° pro Tag dreht.

2.3 Das Kalendarium

Unterhalb der Uhrscheibe befindet sich das Kalendarium (siehe Abb. 8) mit dem Kalenderraum in der Mitte. Vor den beiden Kalendarium-Frontflächen links und rechts vom Kalenderraum sind jeweils zwei Säulen platziert, die einen Teil der darüber liegenden Uhrscheibe abstützen. Beide Doppelsäulen stehen jeweils auf Podesten, die durch eine dünne Wand, welche den unteren Bereich des Kalenderraumes abschirmt, verbunden sind. Den Abschluss bildet der reichlich verzierte Zaun, der zum Schutz der Uhr vor dem Kalendarium aufgestellt wurde.

Im Zentrum des Kalendariums befindet sich die quadratische Tierkreiszeichenscheibe, die einen Flächeninhalt von ca. 9 m^2 hat und ca. einen Meter nach hinten versetzt ist (siehe Abb. 9). Die dreieckähnlichen Flächen (Zwickeln) an jeder Ecke der Tierkreiszeichenscheibe sind mit Figuren von Astronomen besetzt, deren Identitäten bis heute unbekannt sind. Auf der Tierkreiszeichenscheibe kann man außerdem einen Tierkreiszeichenring erkennen. Unten links beginnt das Zeichen des Wassermanns. Ihm folgen im Uhrzeigersinn die Zeichen von Fische, Widder, Stier,

Zwillinge, Krebs, Löwe, Jungfrau, Waage, Skorpion, Schütze und Steinbock. An dem Tierkreiszeichenring schließt sich nach innen die bewegliche kreisförmige Kalenderscheibe an. Hier findet man ebenfalls einen Sonnenzeiger, der am Rand der Kalenderscheibe befestigt ist und auf das aktuelle Tierkreiszeichen zeigt.



Abb. 8: Das Kalendarium der Astronomischen Uhr ([AstroUhr2])

Nachfolgend wird die Bedeutung der dreizehn Ringe (siehe Abb. 10) näher erläutert, die sich sowohl auf der Kalenderscheibe als auch auf einem an der Kalenderscheibe befestigten Übergangsblech befinden, welches den Spalt zwischen dem fest stehenden Tierkreiszeichenring und der beweglichen Kalenderscheibe bedeckt.

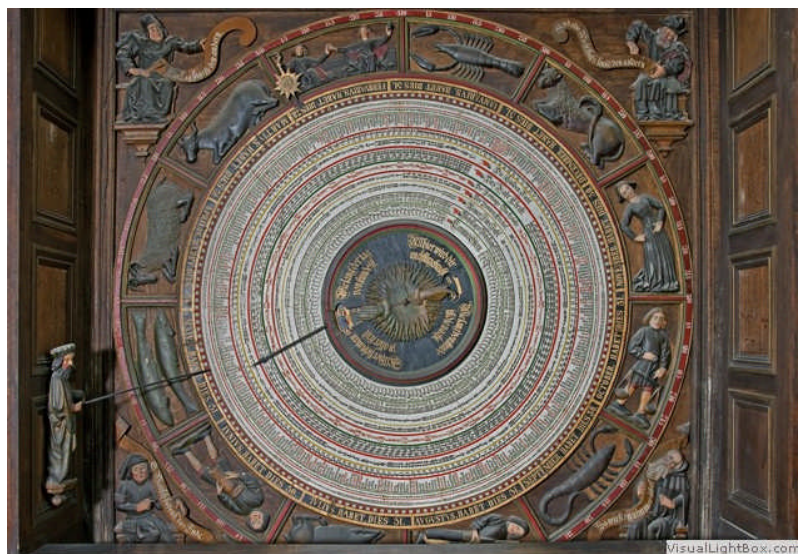


Abb. 9: Der Kalenderraum ([AstroUhr2])



Abb. 10: Die 13 Ringe ([AstroUhr2])

1. Ring

Auf dem ersten Ring, der zum Übergangsblech gehört, sind die Namen der zwölf Monate mit Anzahl der Tage pro Monat in lateinischer Sprache zu sehen. Oben beginnt der Januar-Schriftzug „JANUARIUS, HABET DIES 31“. Ihm folgen im Gegenuhrzeigersinn die weiteren Monatsschriftzüge. Die Schriftzüge der einzelnen Monate sind folgende:

„JANUARIUS, HABET DIES 31“	(„Januar, der 31 Tage hat“)
„FEBRUARIUS, HABET DIES 28“	(„Februar, der 28 Tage hat“)
„MARTIUS, HABET DIES 31“	(„März, der 31 Tage hat“)
„APRILIS, HABET DIES 30“	(„April, der 30 Tage hat“)
„MAIUS, HABET DIES 31“	(„Mai, der 31 Tage hat“)
„IUNIUS, HABET DIES 30“	(„Juni, der 30 Tage hat“)
„IULIUS, HABET DIES 31“	(„Juli, der 31 Tage hat“)
„AUGUSTUS, HABET DIES 31“	(„August, der 31 Tage hat“)
„SEPTEMBER, HABET DIES 30“	(„September, der 30 Tage hat“)
„OCTOBER, HABET DIES 31“	(„Oktober, der 31 Tage hat“)
„NOVEMBER, HABET DIES 30“	(„November, der 30 Tage hat“)
„DECEMBER, HABET DIES 31“	(„Dezember, der 31 Tage hat“)

2. Ring

Es folgt der zweite Ring, der aus 366 abwechselnd roten und weißen Abschnitten besteht. Jedes Segment steht hier für einen Tag des Jahres. Um den charakteristischen Farbwechsel Rot-Weiß für 365 Tage beibehalten zu können, wurde den fünf Tagen vom 24. bis 28. März drei rote und drei weiße Segmente zugeordnet, also insgesamt 6 Segmente, wo eigentlich nur fünf Segmente hingehören. Auch dieser zweite Ring gehört noch zum Übergangsblech.

3. Ring

Im dritten Ring stehen die Daten eines jeden Monats. Einen 29. Januar findet man auf dem Ring nicht. Es war damals günstiger alle vier Jahre nach dem 28. Februar das Kalenderwerk auszuklinken, anstatt eine kompliziertere und damit teurere Mechanik einzubauen, die den 366. Tag eines jeden Schaltjahres berücksichtigt. Der Stock des Kalendermanns zeigt auf das aktuelle Tagesdatum. Der dritte Ring gehört bereits zur Kalenderscheibe.

4. Ring

Im vierten Ring stehen die sieben Tagesbuchstaben von A bis G. Der 1. Januar beginnt dabei mit dem Buchstaben A, der 2. Januar mit dem Buchstaben B und so weiter. Am 8. Januar beginnt man wieder mit dem Buchstaben A. Wenn zwei Daten denselben Tagesbuchstaben besitzen, haben sie auch denselben Wochentag.

5. Ring

Der fünfte Ring enthält die Namen von Tages-Heiligen (z.B. der Tag des Heiligen Nicolaus am 6. Dezember) oder Namen von Festtagen (z.B. der Siebenschläfertag am 27. Juni). Bedeutende Namen wurden dabei in roter Schrift hervorgehoben.

6. Ring

Auf dem sechsten Ring stehen die Sonnenaufgangszeiten für jeweils zwei Tage. Nur der Silvestertag hat eine eigene Sonnenaufgangszeit (8.26) bekommen. Die Zeiten sind in Rostocker Ortszeit angegeben, denn damals gab es noch keine Zeitzonen. Der Zeigerstab einer im Zentrum der Kalenderscheibe angebrachten kleinen

Scheibenabdeckung mit zwei Öffnungen ist auf die aktuelle Sonnenaufgangszeit gerichtet (siehe Abb. 11). Auf dieser Tag-Nacht-Scheibe sind zwei Hände zu sehen. Der Zeigefinger der einen Hand zeigt auf die durch die Öffnung sichtbare Zahl, die angibt wie viele Stunden es hell ist. Die Dauer des hellen Tages liegt zwischen 17 und 7 Stunden. Der Zeigefinger der anderen Hand zeigt auf die durch die andere Öffnung sichtbare Zahl, die angibt wie viele Stunden es dunkel ist. Die Dauer der dunklen Nacht liegt zwischen 7 und 17 Stunden.

7. Ring

Der siebte Ring zeigt die „Goldene Zahl“ mit den Ziffern von 1 bis 19 an und besagt, dass nach jeweils 19 Jahren dieselben Mondphasen mit dem gleichen Datum zusammenfallen.



Abb. 11: Die Tag-Nacht-Scheibe ([AstroUhr2])

8. Ring

Auf dem achten Ring stehen die Jahreszahlen nach Christi Geburt von 1885 bis 2017. Es ist wichtig zu wissen, dass der aus der Scheibenmitte herausragende Zeigerstab nur auf die Sonnenaufgangszeit zeigt (siehe 6. Ring) und nichts mit der Jahreszahl zu tun hat.

9. Ring

Auf dem neunten Ring stehen die Sonntagsbuchstaben. Der Sonntagsbuchstabe zeigt für das betreffende Jahr (siehe 8. Ring) an, welcher Buchstabe einen Sonntag bezeichnet. Hiermit ist es nun möglich, für jedes Datum von 1885 bis 2017 den Wochentag zu bestimmen. Zum Beispiel war der zum Jahre 1950 gehörige Sonntagsbuchstabe ein A. Somit waren im Jahre 1950 alle Kalendertage mit dem Tagesbuchstaben (siehe 4. Ring) B ein Montag, mit dem Tagesbuchstaben C ein Dienstag und so weiter. Für die Schaltjahre sind zwei Sonntagsbuchstaben angegeben. In diesem Fall gilt der erste Buchstabe (links) für alle Tage vom 1. Januar bis zum 28. Februar und der zweite Buchstabe (rechts) für alle Tage vom 1. März bis zum 31. Dezember.

10. Ring

Im zehnten Ring wird der Sonnenzirkel, d.h. eine Zahlenfolge von 1 bis 28, angezeigt. Sie gibt den Wiederholungszyklus des Kalenders an, denn nach 28 Jahren trifft das gleiche Datum wieder auf den gleichen Wochentag.

11. Ring

Im elften Ring wird die Römer-Zinszahl, d.h. eine Zahlenfolgen von 1 bis 15, angezeigt. Sie gibt den Steuerzyklus an, den der römische Kaiser Konstantin der Große (ca. 275 bis 337) im Jahre 313 nach Christi eingeführt hat. In den Jahren mit gleicher Römer-Zinszahl wurden gleiche Steuerzahlungen fällig.

12. Ring

Auf dem zwölften Ring kann man ablesen, wie viele Wochen und Tage in jedem Jahr zwischen dem datumsfesten Weihnachtsfest und dem datumsvariablen Beginn der Fastenzeit liegen.

13. Ring

Auf dem 13. Ring kann man das Datum des Osterfestes eines jeden Jahres ablesen.

2.4 Die Uhrwerke

Als Uhrwerke bezeichnet man die sich im Uhrenkasten befindenden mechanischen Bauteile. Bei der Astronomischen Uhr dient der Raum zwischen den beiden Kirchenpfeilern, der Uhrenfrontfläche und der Hauptaltarrückwand als Uhrenkasten. Das Gesamtuhrwerk der Astronomischen Uhr besteht aus folgenden sechs einzelnen Werken:

- Hauptwerk
- Zeigerwerk
- Kalenderwerk
- Stundenschlagwerk
- Musikwerk
- Apostelwerk

Die sechs Uhrwerke sind auf den drei Etagen der Astronomischen Uhr verteilt und stehen in mechanischer Verbindung zueinander (siehe Abb. 12). Alle Werke funktionieren rein mechanisch, aber nur das Haupt-, das Kalender-, das Stundenschlag-, das Musik- und Apostelwerk haben einen eigenen Gewichtsantrieb. Das Zeigerwerk besitzt keinen eigenen Antrieb. Das Haupt-, das Stundenschlag-, das Musik- und Apostelwerk werden täglich und das Kalenderwerk einmal wöchentlich per Hand aufgezogen.

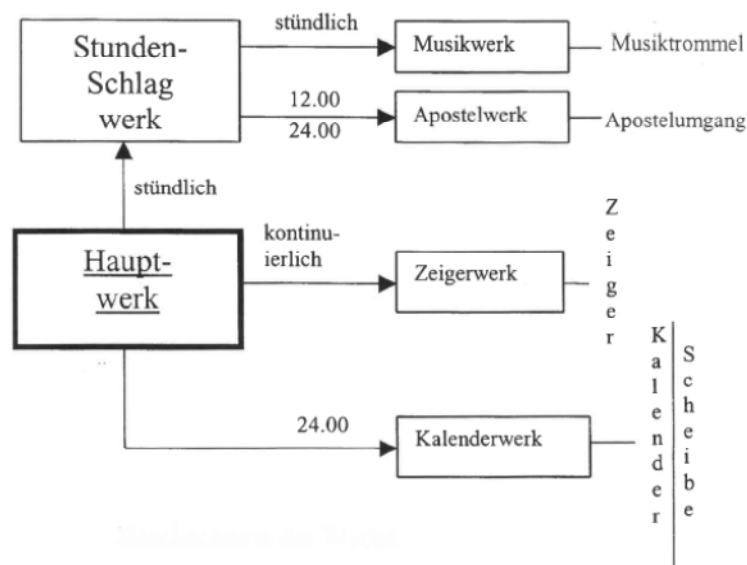


Abb. 12: Blockschema der sechs Uhrwerke ([Sch11], S. 2)

2.4.1 Das Hauptwerk

Das Herzstück der Astronomischen Uhr ist das Hauptwerk (siehe Abb. 13), da sowohl das Stundenschlagwerk als auch das Zeiger- und Kalenderwerk von ihm direkt ausgelöst werden. Der Hauptwerk-Aufbau ist im linken Teil der Abb. 14 schematisch dargestellt.



Abb. 13: Das Hauptwerk ([AstroUhr3])

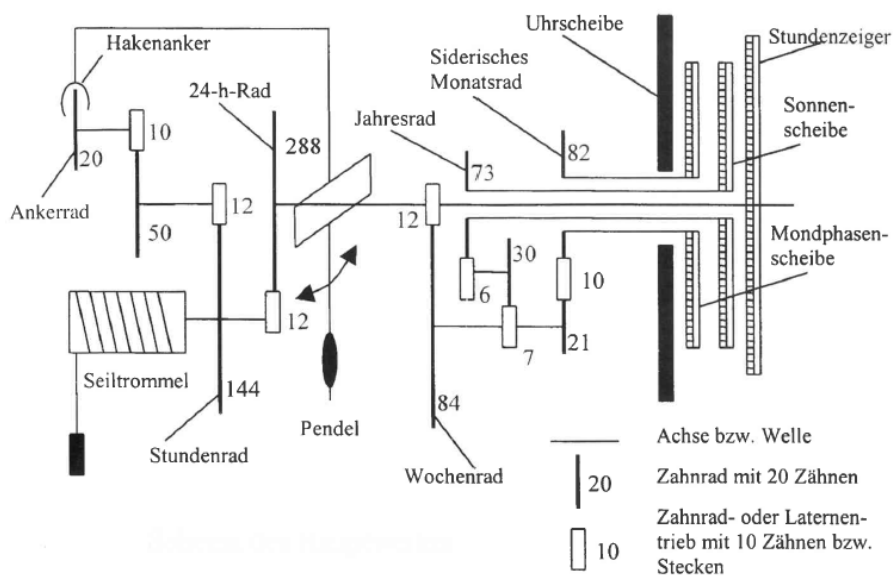


Abb. 14: Schematischer Aufbau des Haupt- und Zeigerwerkes ([Sch11], S. 2)

Durch das Aufziehen des Hauptwerkes wird im Hauptwerk potentielle Energie gespeichert, die über das Pendel-Hakenanker-System an das 20-zählige Ankerrad (siehe Abb. 15) nach und nach abgegeben wird. Das Ankerzahnrad dreht sich einmal in der Minute ganz herum.

Nach Zwischenschaltung eines Getriebes gelangen wir zum 144-zähligen Stundenrad, welches sich einmal in der Stunde ganz herum dreht. Am Stundenzahnrad befindet sich ein Zapfen, der stündlich das Stundenschlagwerk über einen Hebelmechanismus und ein Seilzug auslöst. Es wird dann eine kleine Stundenglocke angeschlagen.

Nach einem weiteren Zwischenschalten eines Getriebes kommen wir zum 288-zähligen 24-h-Rad (Tagesrad), welches sich einmal am Tag ganz herum dreht und über eine Welle mit dem Zeigerwerk und dem Stundenzeiger der Uhrscheibe direkt verbunden ist. Auch das Tageszahnrad besitzt ein Zapfen, der täglich um 24.00 Uhr das Kalenderwerk über einen Hebelmechanismus und ein Seilzug auslöst. Die Kalenderscheibe wird dann um $360^\circ/365$ gedreht.

2.4.2 Das Zeigerwerk

Das Zeigerwerk (siehe Abb. 16) ist ein Getriebe hinter der Uhrscheibe, welches direkt mit dem Tageszahnrad (24-h-Rad) des Hauptwerkes über eine Welle (Tageswelle) verbunden ist und über das die Sonnen- und Mondphasenscheibe gedreht wird. Es hat als einziges Uhrwerk keinen eigenen Antrieb. Der Zeigerwerk-Aufbau ist im rechten Teil der Abb. 14 schematisch dargestellt.

In Abb. 17 ist das Zeigerwerk zusammen mit dem Hauptwerk zu sehen.



Abb. 15: Hakenanker mit Ankerzahnrad ([AstroUhr3])

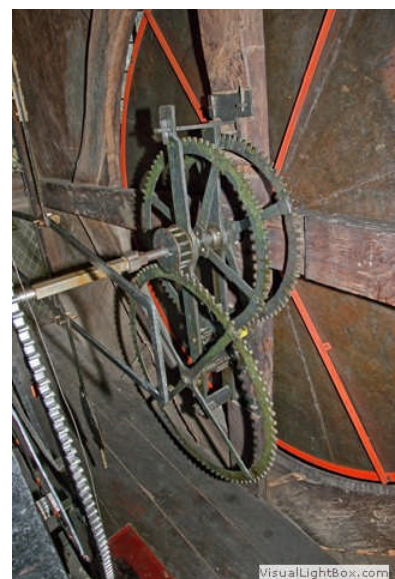


Abb. 16: Das Zeigerwerk ([AstroUhr3])



Abb. 17: Haupt- und Zeigerwerk ([AstroUhr3])

2.4.3 Das Kalenderwerk

Das Kalenderwerk befindet sich eine Etage unter dem Hauptwerk. Der obere Teil des Kalenderwerkes ist in Abb. 18 dargestellt. Die Aufgabe des Kalenderwerkes besteht darin, über ein Ritzel-Andrucklagerungssystem (siehe Abb. 19) den 365-zähligen Kranz auf der Rückseite der Kalenderscheibe bei Hauptwerkauslösung täglich um 24.00 Uhr um $360^\circ/365$ zu drehen.



Abb. 18: Oberer Teil des Kalenderwerkes ([AstroUhr3])



Abb. 19: Unterer Teil des Kalenderwerkes ([AstroUhr3])

2.4.4 Das Stundenschlagwerk

Das Stundenschlagwerk (siehe Abb. 20) befindet sich eine Etage über dem Hauptwerk zusammen mit dem Musikwerk in einem gemeinsamen Eisenrahmen. Es wird stündlich vom Hauptwerk ausgelöst, womit eine kleine Stundenglocke (siehe Abb. 21) täglich 156-mal angeschlagen wird. Das Stundenschlagwerk löst seinerseits stündlich das Musikwerk aus.

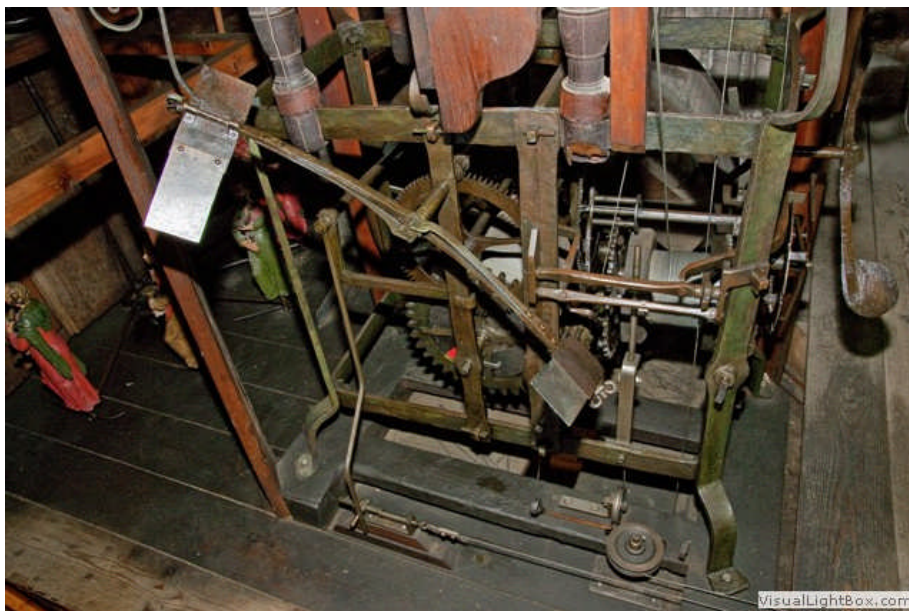


Abb. 20: Das Musikwerk (links) und das Stundenschlagwerk (rechts) ([AstroUhr3])



Abb. 21: Die kleine Stundenglocke ([AstroUhr3])

2.4.5 Das Musikwerk

Das Musikwerk (siehe Abb. 20) befindet sich eine Etage über dem Hauptwerk zusammen mit dem Stundenschlagwerk in einem gemeinsamen Eisenrahmen. Es wird stündlich vom Stundenwerk nach dem Stundenschlag ausgelöst, womit Glockenmusik erzeugt wird. Hierzu besitzt das Musikwerk eine Musiktrommel (siehe Abb. 22), auf deren Oberfläche Vierkantlöcher oder Stifte sind. Je nach Anordnung der Stifte auf der Musiktrommel können unterschiedliche Melodien programmiert werden. Die Trommel wird für ungefähr eine Minute in Bewegung gesetzt. Bei ihrer Umdrehung heben die Stifte die Winkelhebel, die über ein System aus Draht und Holz mit Schlaghämmer verbunden sind. Schließlich können bis zu 24 kleine Glockenschalen (siehe Abb. 23) angeschlagen und zum Klingen gebracht werden.



Abb. 22: Die Musiktrommel ([AstroUhr3])



Abb. 23: Die Glockenschalen ([AstroUhr3])

2.4.6 Das Apostelwerk

Das Apostelwerk (siehe Abb. 24) befindet sich eine Etage über dem Hauptwerk direkt unterhalb der Kleinen Laterne. Es wird mittags um 12.00 Uhr und mitternachts um 24.00 Uhr vom Stundenwerk ausgelöst, womit der Figurenrundgang der sechs Apostel, die auf einem Speichenkranz (siehe Abb. 25) befestigt sind, beginnt.



Abb. 24: Das Apostelwerk ([AstroUhr3])



Abb. 25: Der Speichenkranz mit sechs Apostel ([AstroUhr3])

3 Terrestrisches Laserscanning

3.1 Prinzip des terrestrischen Laserscannings

Bei der Erfassung eines Objektes mithilfe eines terrestrischen (erdgebundenen) Laserscanners wird die Oberfläche des Messobjektes mit einem Laserlichtstrahl dreidimensional in einem regelmäßigen Punktraster abgetastet (gescannt) (siehe Abb. 26) und man erhält eine 3D-Punktwolke, d.h. Millionen von Messwerttripel bestehend aus Entfernungswert (zwischen Nullpunkt und Objektpunkt) und zugehörigen Horizontal- und Vertikalwinkelwert. Einige Terrestrische Laserscanner liefern anstatt der 3D-Polarkoordinatenwerte direkt kartesische 3D-Koordinatenwerte und wiederum andere noch zusätzlich einen Intensitätswert des am Objektpunkt reflektierten Laserlichtstrahls.

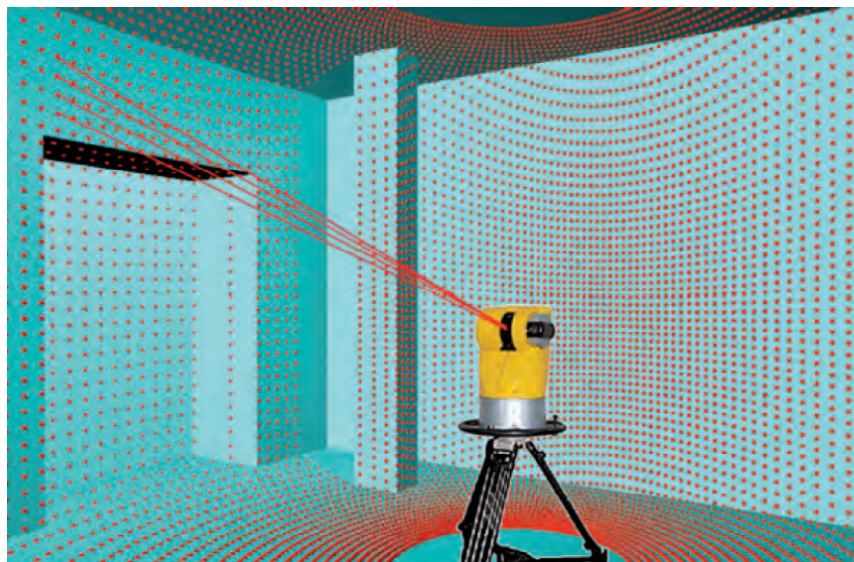


Abb. 26: Punktrasterabtastung eines terrestrischen Laserscanners ([Kah06], S. 206)

3.2 Bauarten von terrestrischen Laserscannern

Terrestrische Laserscanner können nach ihrem Sichtfeld in drei verschiedene Bauarten eingeteilt werden (siehe Abb. 27):

- Kamera-Scanner
- Panorama-Scanner
- Hybrid-Scanner

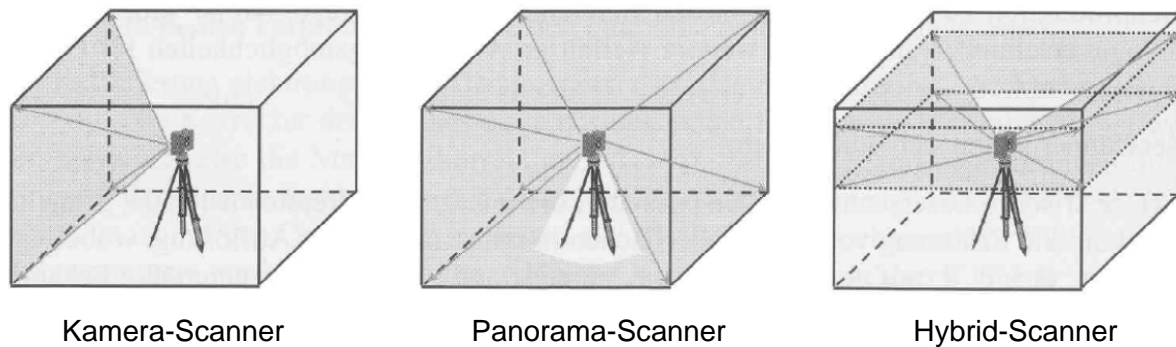


Abb. 27: Bauarten von terrestrischen Laserscannern ([Res09], S. 74)

Bei einem Kamera-Scanner erfolgt die Abtastung in einem eingeschränkten Bereich, der dem Sichtfeld einer Fotokamera ähnelt. Derartige Scanner eignen sich besonders gut für Außenaufnahmen.

Der Panorama-Scanner verfügt dagegen über ein Sichtfeld, welches die gesamte 360°-Umgebung (Rundblick) umfasst. Das Panorama-Sichtfeld ist nur durch die eigene Instrumentenbasis beschränkt. Solche Scanner eignen sich besonders gut für Innenaufnahmen.

Bei einem Hybrid-Scanner kann nicht die gesamte 360°-Umgebung erfasst werden, sondern nur ein vertikales Segment. Diese Scannerbauart stellt eine Mischform aus Kamera- und Panorama-Scanner dar.

3.3 Entfernungsmessung von terrestrischen Laserscannern

Bei den aktuellen terrestrischen Laserscannern kann man zwischen zwei Verfahren zur Entfernungsmessung unterscheiden:

- Phasendifferenzverfahren
- Impulsverfahren

3.3.1 Phasendifferenzverfahren

Beim Phasendifferenzverfahren werden vom Laserscanner kontinuierlich Lichtwellen ausgesendet, die sinusförmig moduliert sind und als modulierte Trägerwellen bezeichnet werden (siehe Abb. 28). Als Trägerwelle für die niederfrequente

Modulationswelle mit der Wellenlänge λ_M dient hierbei die hochfrequente Lichtwelle mit der Wellenlänge λ_T . Trifft einer dieser modulierten Trägerwellen auf das Messobjekt, wird diese gestreut und zum Teil reflektiert. Anschließend wird die Welle vom Laserscanner empfangen. Der Phasemesser misst anschließend die Phasendifferenz zwischen der ausgesendeten und der zurückgekommenen modulierten Trägerwelle (siehe Abb. 29).

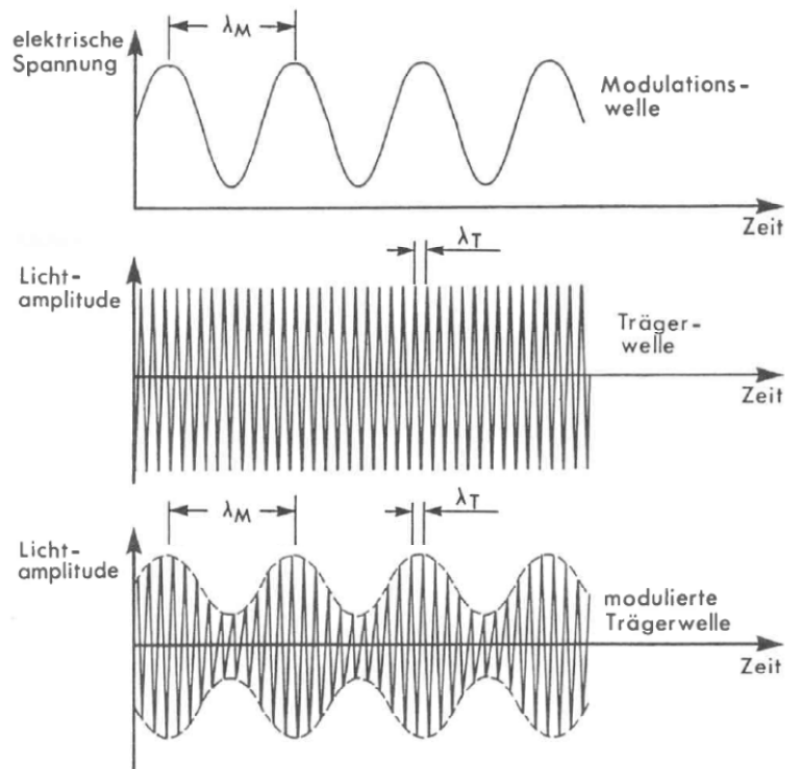


Abb. 28: Amplitudenmodulation einer Trägerwelle (nach [Wit11], S. 301)

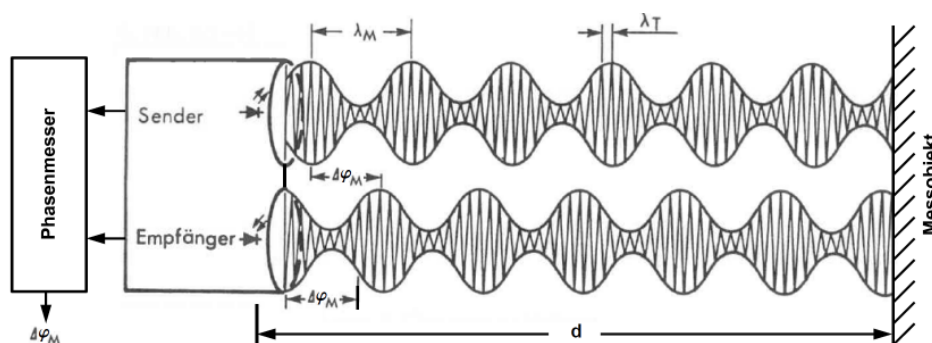


Abb. 29: Entfernungsmessung mit dem Phasendifferenzverfahren (i.A.a. [Wit11], S. 302)

Die Entfernung des Objektes lässt sich mit Hilfe der nachfolgenden Beziehung bestimmen:

$$d = \frac{\lambda_M}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{\Delta\varphi_M}{2\pi} + N \right) \quad (\text{Gl. 3.1})$$

mit: d ... Entfernung zum Messobjekt

λ_M ... Wellenlänge der modulierten Trägerwelle

n ... Brechungsindex der Luftatmosphäre

$\Delta\varphi_M$... Phasendifferenz zwischen ausgesendeter und zurückgekommener modulierter Trägerwelle

N ... ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge der modifizierten Trägerwelle

Das zunächst unbekannte ganzzahlige Vielfache N kann durch Verwendung verschiedener Modulationswellen berechnet werden.

3.3.2 Impulsverfahren

Beim Impulsverfahren werden vom Laserscanner kurzzeitig Lichtimpulse ausgesendet. Trifft einer dieser Impulse auf das Messobjekt, wird dieser gestreut und zum Teil reflektiert. Anschließend wird der Impuls vom Laserscanner empfangen. Der Laufzeitmesser misst anschließend die Laufzeit des Impulses (siehe Abb. 30).

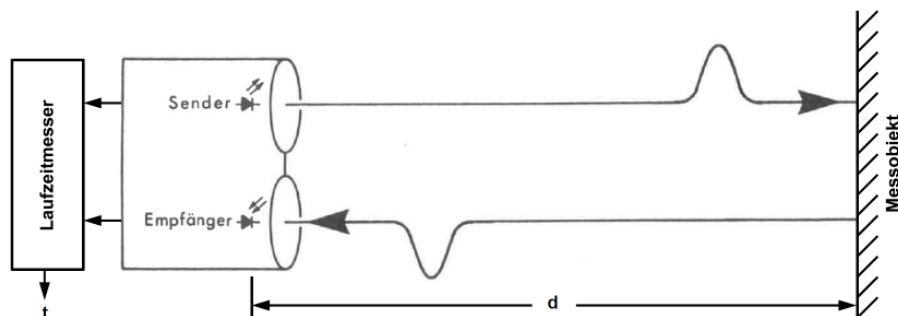


Abb. 30: Entfernungsmessung mit dem Impulsverfahren (i.A.a. [Wit11], S. 299)

Die Entfernung des Objektes lässt sich mit Hilfe der nachfolgenden Beziehung bestimmen:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

mit: d ... Entfernung zum Messobjekt

c ... Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtimpulses in der Luftatmosphäre

t ... Laufzeit des Impulses

4 Angewandte Hard- und Software

Zur Erfüllung aller Aufgaben wurde folgende Hardware eingesetzt:

- Z+F IMAGER 5010
- Z+F M-Cam
- Nikon D40 mit Zubehör
- Sokkia NET2A

Außerdem wurde noch nachfolgende Software verwendet:

- Z+F Laser-Control
- PTGui
- Geomagic Studio 2012
- Pro-Engineer Wildfire 5.0

4.1 Z+F IMAGER 5010

Der Z+F IMAGER 5010 (siehe Abb. 31) der Firma „Zoller + Fröhlich“ ist ein terrestrischer Laserscanner modernster Technologie. Seiner Bauart nach ist er ein Panorama-Scanner, der seine Entfernungsmessung nach dem sehr schnellen Phasendifferenzverfahren durchführt. Das Messgerät verfügt über eine minimale und maximale Reichweite zum Messobjekt von 0,3 m bzw. 187,3 m. Mit einer maximalen Messrate von 1.016.027 Pixeln pro Sekunde gehört das Gerät zu den aktuell schnellsten Laserscannern. Der Benutzer kann zwischen sieben unterschiedlichen Winkelauflösungsstufen und vier unterschiedlichen Qualitätsstufen wählen (siehe Tab. 1), womit selbst noch bei sehr großen Reichweiten geringe Objektpunktabstände möglich sind. Der Sichtbereich des Panorama-Scanners liegt bei 360° x 320° (horizontal x vertikal). Der Scanner ist mit einer Größe von 170 x 286 x 395



Abb. 31: Z+F IMAGER 5010
([ZFLaser])

mm (Breite x Tiefe x Höhe) zwar relativ klein aber mit einem Gewicht von 9,8 kg doch recht schwer. Der Laserlichtstrahl verlässt das Gerät durch ein Schutzglas, nachdem es über einen rotierenden Spiegel, abgelenkt wurde. In dem Gerät sind ein PC mit dem Betriebssystem Linux und ein Touchscreen-Farbdisplay integriert. Zur Speicherung der Messwerte verfügt das Messgerät sowohl über eine interne 64 GB Festplatte als auch über zwei abnehmbare 32 GB USB-Sticks. Die Scannerdaten können per USB-Stick, WLAN-Verbindung oder Netzwerkkabel übertragen werden. Die Stromversorgung erfolgt entweder über ein Stromkabel oder über ein Akku.

Winkelauflösung	Pixel/360° horizontal & vertikal	Scandauer:			
		less quality	normal quality	high quality	premium quality
„preview“	1.250	- - -	0:26 min	- - -	- - -
„low“	2.500	0:26 min	0:52 min	1:44 min	- - -
„middle“	5.000	0:52 min	1:44 min	3:22 min	6:44 min
„high“	10.000	1:44 min	3:22 min	6:44 min	13:28 min
„super high“	20.000	3:28 min	6:44 min	13:28 min	26:56 min
„ultra high“	40.000	- - -	13:28 min	26:56 min	53:20 min
„extremely high“	100.000	- - -	81:00 min	162:00 min	- - -

Tab. 1: Winkelauflösungs- und Qualitätsstufen des Z+F IMAGER 2010 ([ZFLaser])

4.2 Z+F M-Cam

Die Z+F M-Cam (siehe Abb. 32) der Firma „Zoller + Fröhlich“ ist eine digitale Fotofarbkamera i.V.m. einem Servomotor. Die Kamera hat eine Auflösung von 5 Megapixeln und nimmt Farbfotos zum Bildtexturieren der 3D-Punktwolke auf. Die Motor-Cam wird auf den Scanner montiert und angeschlossen. Sowohl die Steuerung als auch die Stromversorgung erfolgen über den Scanner. Die Fotos werden automatisch dem entsprechenden Scan zugeordnet und im Speicher des Scanners abgelegt.



Abb. 32: Z+F M-Cam
([ZFLaser])

4.3 Nikon D40 mit Zubehör

Die Nikon D40 ist eine digitale Spiegelreflexkamera mit Anschluss für Wechselobjektive. Ihre Auflösung liegt bei 6,1 Megapixeln. Die Fotokamera verfügt über einen Monitor mit einer Bilddiagonalen von 2,5 Zoll und besitzt eine USB-Datenschnittstelle. Die Stromversorgung erfolgt über einen Akku.

Das vom Hersteller mitgelieferte Standardobjektiv der Nikon D40 wurde von uns nicht verwendet. Stattdessen benutzten wir das Weitwinkelobjektiv Sigma EX 14 mm mit einer Lichtstärke von 1 : 2,8 und einer Brennweite von 14 mm. Es verfügt über einen manuellen und automatischen Fokus.

Weiterhin benutzten wir den Nodalpunktadapter (auch Panoramakopf genannt) Manfrotto MA 303SPH. Er verfügt sowohl über drei Einstellschienen zur Breiten-, Tiefen- und Höheneinstellung der Fotokamera als auch über einen Panoramadreheller mit 360°-Einteilung.

Ein Bild von der Nikon D40 mit allem Zubehör ist in Abb. 33 dargestellt.



Abb. 33: Nikon D40 mit Zubehör

4.4 Sokkia NET2A

Der Sokkia NET2A (siehe Abb. 34) ist ein elektronischer Tachymeter (auch Totalstation genannt) mit Servomotor und Recheneinheit. Er wird zur elektronischen Winkel- und Entfernungsmessung eingesetzt. Das Anvisieren des Messobjektes erfolgt entweder über das schwenkbare Fernrohr oder über den Laser-Pointer, der gleichzeitig auch Messstrahl ist. Die Steuerung des Gerätes erfolgt entweder direkt an der Station oder indirekt über einem kleinen tragbaren Computer mit Hilfe von kabelloser Blue-Tooth-Technologie. Die gemessenen Daten werden



Abb. 34: Sokkia NET2A
([GLMLaser])

automatisch gespeichert und in einem LCD an der Station bzw. auf dem Handheld-Computer-Display angezeigt. Die Stromversorgung wird durch einen Akkueinsatz sichergestellt.

4.5 Z+F Laser-Control

Z+F LaserControl der Firma „Zoller + Fröhlich“ ist eine Software zur Visualisierung und Bearbeitung von Scandaten. Mit ihr kann nach Abschluss eines Abtastvorgangs (Scans) die Qualität der Scanneraufnahmen in der 2D- oder 3D-Ansicht geprüft werden. In der 2D-Ansicht können die Scanneraufnahmen als Grauwertbild, Entfernungsbild, Falschfarbenbild oder Realbild (BubbleView) dargestellt werden. In der 3D-Ansicht können die Scanneraufnahmen als Punktwolke abgebildet werden. Neben Filterfunktionen für unerwünschte Punkte, der Registrierung der Scanneraufnahmen, der Berechnung und Anzeige von Schnitten aus der 3D-Punktwolke, der Verwendungsmöglichkeit von zahlreichen Import- und Exportformaten für einzelne Scanneraufnahmen, der Herstellungsmöglichkeit von Videos über Flüge durch die Punktwolke, verfügt die Software über verschiedene Messfunktionen zur Entfernungsmessung in 2D und 3D. Eine weitere wichtige Funktion ist die Colorierungsmöglichkeit der 2D-Bilder und der 3D-Punktwolke mit Hilfe von Farbbildern. Neben diesen zahlreichen Funktionen beinhaltet die Software auch die komplette Benutzeroberfläche zur Bedienung des Laserscanners Z+F IMAGER 5010.

4.6 PTGui

PTGui ist eine Software, welche Panoramafotos aus Einzelbildern zusammensetzen kann. PTGui ist eine Abkürzung für „PanoramaTools Graphics user interface“. Die Stitching-Software kann durch automatisches Setzen von natürlichen Passpunkten vertikale und horizontale Bildfolgen miteinander verknüpfen. Sich überlappende Einzelbilder werden dabei nahtlos miteinander verbunden. Unterschiedliche Bildparameter, wie Helligkeit oder Farbe, werden von der Software automatisch ausgeglichen. Ein manuelles Stitching ist mit der Anwendungssoftware auch möglich. Außerdem verfügt das Programm über eine Maskierungsfunktion zum Ausblenden von unerwünschten Bildobjekten.

4.7 Geomagic Studio 2012

Geomagic Studio 2012 ist eine Software zur Scandatenverarbeitung. Mit ihr können aus Punktoobjekten mittels Dreiecksvermaschung Polygonobjekte hergestellt werden. Die Software verfügt neben verschiedenen Messfunktionen zur Entfernungsmessung auch über eine automatische und manuelle Flächenrückführungsfunktion, d.h. eine Funktion zur Umwandlung von Polygonflächen in NURBS-Flächen (Non-Uniform Rational B-Spline-Flächen). Außerdem besitzt das Programm eine Skizzenfunktion, die zur Erstellung von Querschnitten aus Polygonobjekten genutzt werden kann.

4.8 Pro-Engineer Wildfire 5.0

Pro-Engineer Wildfire 5.0 der Firma „Parametric Technology Corporation (PTC)“ ist eine parametrische und assoziative 3D-CAD-Software, die auf Konstruktionselemente basiert. Sie verfügt über folgende Funktionen:

- 3D-Volumenkörpermodellierung
- Bauteile- und Baugruppenmodellierung
- Simulation von Mechanismen
- Dokumentation von 2D- und 3D-Zeichnungen
- Messfunktionen

5 Datenerfassung

Folgende geplante Aktionen wurden an zwei Messtagen durchgeführt:

- Objektvermessung mit Laserscanner
- Objektvermessung mit Tachymeter
- Herstellung von Fotos mit Z+F M-Cam
- Herstellung von Fotos mit Nikon D40

5.1 Objektvermessung mit Laserscanner

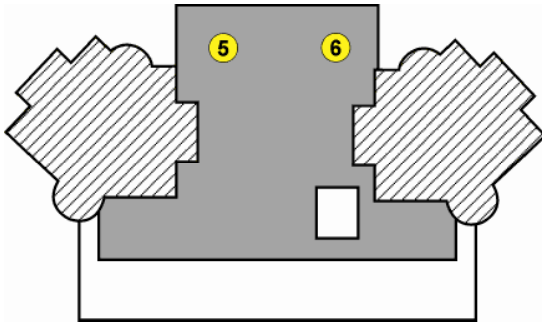
Zum Scannen der Astronomischen Uhr wurde der Laserscanner Z+F IMAGER 5010 verwendet. Dieser wurde auf ein Stativ in ca. 2 m Höhe befestigt (siehe Abb. 35).



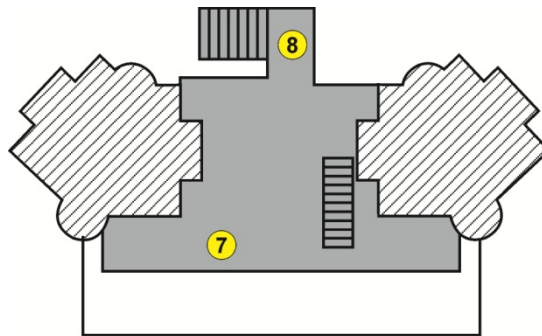
Abb. 35: Z+F IMAGER 5010 vor der Astrouhr (Scanner-Position 3)

Die Uhr wurde von insgesamt elf verschiedenen Positionen aus gescannt (siehe Abb. 36). Vier Scanner-Positionen befanden sich vor der Uhr, zwei Standorte auf der Uhr und fünf Standorte in der Uhr selbst. Eine Scannung (Scanner-Position 4) wurde in ca. 6 m Höhe auf einem Baugerüst durchgeführt.

Zur Verknüpfung der Einzelscans dienten Zielmarken (auch Targets genannt), die vor Ort so verteilt wurden, dass bei jedem Scan mindestens drei von ihnen einzusehen waren. Zwei Targetarten kamen hierbei zur Anwendung (siehe Abb. 37).

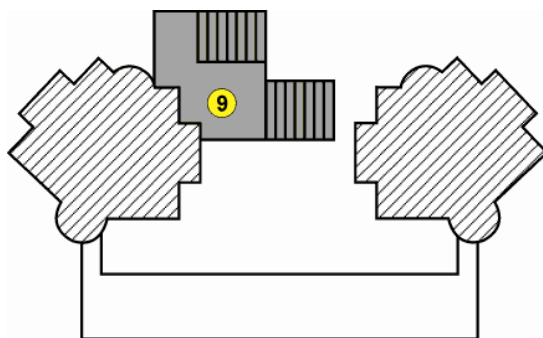


3. Etage

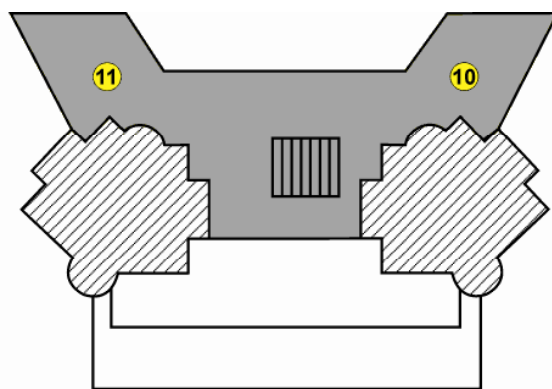


2. Etage

4



1. Etage



0. Etage

3

1

2

Abb. 36: Die 11 Scanner-Positionen an der Astrouhr



Abb. 37: Auto-Target (links) und Profi-Target mit Magnetfuss (rechts)

An allen 11 Scanner-Standorten wurde ein 360°-Scan mit unterschiedlichen Winkelauflösungs- und Qualitätsstufen durchgeführt (siehe Tab. 2).

Scanner-Position	Winkelauflösungsstufe	Qualitätsstufe
1	„high“	„high“
2	„high“	„high“
3	„high“	„high“
4	„high“	„high“
5	"middle"	"high"
6	"middle"	"high"
7	"middle"	"high"
8	"middle"	"high"
9	"middle"	"high"
10	"middle"	"high"
11	"middle"	"high"

Tab. 2: Winkelauflösungs- und Qualitätsstufen der 11 Scanner-Positionen

An den Scanner-Positionen 1, 2 und 4 wurden noch zusätzlich Detail-Scans von der Uhrenfront mit der Winkelauflösungsstufe „superhigh“ und der Qualitätsstufe „high“ gemacht.

5.2 Objektvermessung mit Tachymeter

Die Astronomische Uhr wurde auch mit dem Tachymeter Sokkia NET2A vermessen. Dazu wurden sowohl repräsentative Objektpunkte als auch kleine klebende und reflektierende Zielmarken ausgewählt. Die Tachymetermessung wurde von einer dritten qualifizierten Person durchgeführt. Die Lageabweichungen der Tachymetermessung lagen zwischen 3,4 und 3,6 mm.

5.3 Herstellung von Fotos mit Z+F M-Cam

Zur Colorierung der gesamten 3D-Punktwolke benötigt man 360°-Panoramafarbfotos von allen Scanner-Standorten. Da wir aber nicht die gesamte 3D-Punktwolke, sondern nur den Teil der Wolke, der sich außerhalb des sehr dunklen Uhreninnenraumes befand, einfärben wollten, beschränkten wir uns auf die Scanner-Positionen 1 bis 6. Zur Fotoaufnahme wurde zunächst die Z+F M-Cam verwendet.

Damit der Laserscanner überhaupt die M-Cam steuern kann, muss sie vorher über das Display des Scanners aktiviert werden. Bei der Einstellung der Belichtung gibt es vier Möglichkeiten: Dunkel, Normal, Hell und Sonne. In unserem Fall wurde die Einstellung „Dunkel“ gewählt, da die St. Marienkirche ein sehr schlecht beleuchtetes Gebäude ist. Außerdem verwendeten wir vor jedem M-Cam-Einsatz eine Grauwertkarte (siehe Abb. 38), mit deren Hilfe die korrekte Belichtung ermittelt werden kann.



Abb. 38: Grauwertkarte der M-Cam

Nach Beendigung des Scanprozesses fährt der Laserscanner in die Ausgangsposition zurück und startet anschließend den Aufnahmeprozess mit der M-Cam. Die Fotokamera macht von einem Scanner-Standort insgesamt 28 Farbbilder, deren horizontale und vertikale Bildfolge ein 360°-Panoramabild ergibt. Alle Fotos werden auf der Festplatte des Laserscanners gespeichert und erhalten denselben Namen wie der zugehörige Scan.

5.4 Herstellung von Fotos mit Nikon D40

Neben den M-Cam-Fotos wurden noch Farbfotos mit der Nikon D40 i.V.m. dem Weitwinkelobjektiv Sigma EX 14mm gemacht. Dazu wurde die Kamera an der Höheneinstellschiene des Nodalpunktadapters Manfrotto MA 303SPH befestigt.

Folgende Einstellungen wurden an den drei Schienen vorgenommen:

Breiteneinstellung: 92 mm

Tiefeneinstellung: 33 mm

Höheneinstellung: 11 mm



Abb. 39: Nikon D40 mit Nodalpunktadapter auf einem Stativ

Zunächst wurden mit der Kamera in 0°-Neigung (siehe Abb. 39) 12 Bilder mit einer 30°-Einrastung am Drehteller gemacht. Danach wurden weitere 12 Bilder mit einer +45°-Neigung und weitere 12 mit einer Neigung von -45° gemacht. Zum Abschluss wurden noch 2 Fotos mit einer Neigung von +90° und -90° geschossen. Insgesamt wurden also 38 Farbfotos pro Scanner-Standort gemacht.

6 Datenaufbereitung

6.1 Registrierung mit Z+F Laser-Control

Nachdem alle erfassten Scandaten von der Festplatte des Laserscanners auf einen PC übertragen und einem neuen Projekt innerhalb von Laser-Control zugeordnet wurden, mussten als erstes bei allen 3D-Punktwolken die unterschiedlichen lokalen Koordinatensysteme auf Basis geeigneter Verknüpfungspunkte in ein übergeordnetes globales Koordinatensystem transformiert werden. Dieses Verknüpfen der Einzelscans wird auch als Registrierung bezeichnet.

Zunächst müssen Verknüpfungspunkte in den Einzelscans identifiziert und benannt werden. Solche Punkte können üblicherweise Zielmarken (auch Targets genannt) oder natürliche Passpunkte (wie z.B. Ecken oder Kanten) sein. Laser-Control verfügt zur Identifikation von Verknüpfungspunkten über die beiden Buttons „Target erkennen (Fit)“ und „Punkt als Target verwenden“, mit denen man das Zentrum eines Targets bzw. irgendeinen gut zu identifizierenden Punkt als Verknüpfungspunkt markieren kann.

Nach einem Mausklick auf das Button „Target erkennen (Fit)“ muss man den Mauszeiger auf den Target-Mittelpunkt richten und drauf klicken. Danach öffnet sich ein Dialogfenster „Target zum Scan hinzufügen“ (siehe Abb. 40), wo man noch einmal das Zentrum korrigieren und den Target-Namen eingeben kann.

Nachdem in allen Einzelscans mindestens drei Verknüpfungspunkte identifiziert sind, können diese nun in ein übergeordnetes globales Koordinatensystem transformiert werden.

Nach einem Klick auf das Button „Registrieren aller Scans“ öffnet sich ein weiteres Dialogfenster (siehe Abb. 41). Hier können Dateien von Scan-Positionen oder Targets, die mit einem Tachymeter gemessen wurden, hinzugefügt werden. An dieser Stelle übergaben wir unsere Datei mit den aktuellen Scan-Positionen, die mit dem Tachymeter Sokkia NET2A gemessen wurden.

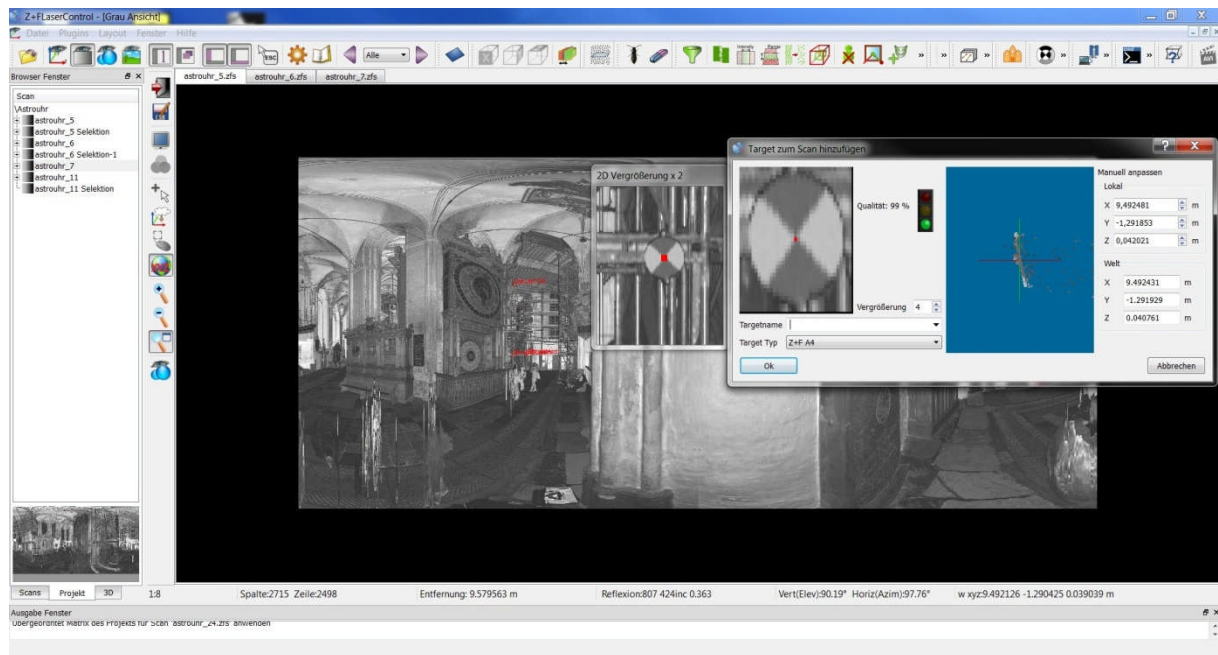


Abb. 40: Dialogfenster „Target zum Scan hinzufügen“ in Laser-Control

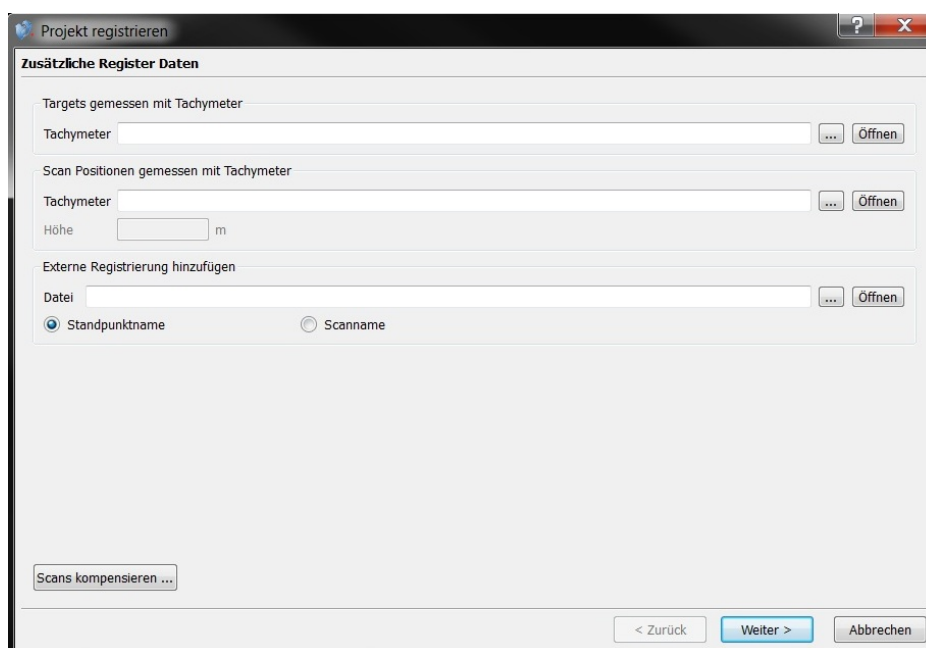


Abb. 41: Dialogfenster zur Tachymeterdatenübergabe

Im nachfolgenden Schritt wählt man diejenigen Einzelscans aus, die man für die Registrierung benutzen möchte. Weiterhin muss man sich zwischen den einzelnen Scans für einen Master-Scan entscheiden, dessen Ursprung das übergeordnete globale Koordinatensystem bilden soll. In unserem Fall stellt der Scan Nr. 6 (siehe Kap. 5.1, S. 30) den Master-Scan dar. Hiernach kann die Registrierung endlich gestartet werden.

Nach Beendigung der Registrierung erscheint das Report-Fenster, mit dessen Informationsgehalt die durchgeführte Registrierung nochmal überprüft werden kann. In Abb. 42 sind alle registrierten Punktwolken zu sehen. Im Zentrum der Gesamtpunktwolke befindet sich die Astronomische Uhr mit dem Chorumgang davor.

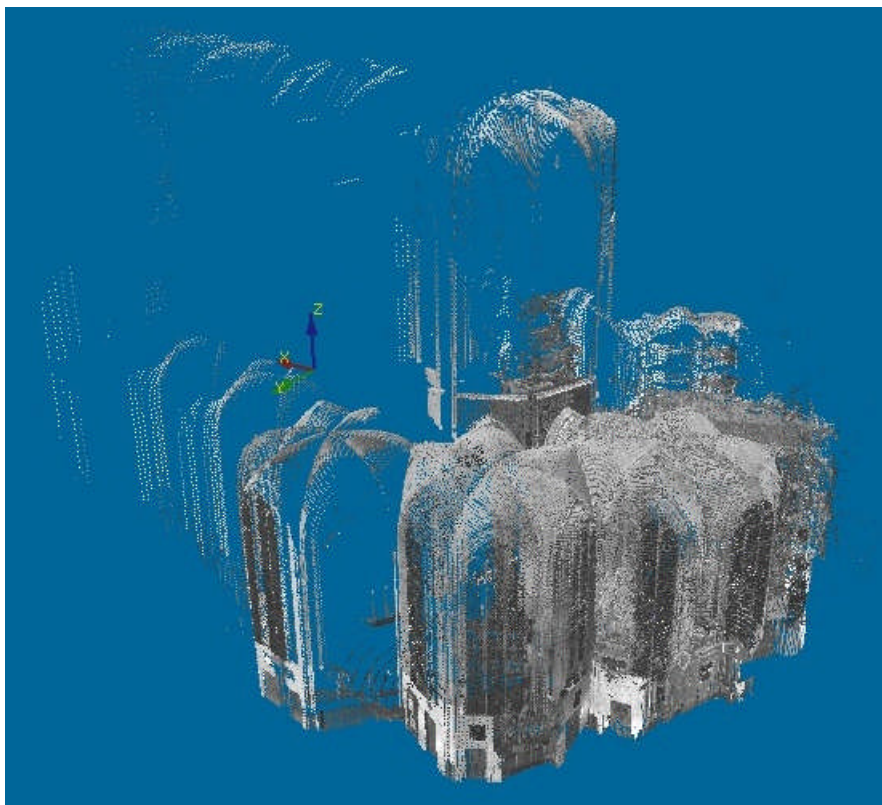


Abb. 42: 3D-Ansicht aller registrierten Punktwolken

6.2 Filterung mit Z+F Laser-Control

Als nächstes mussten bei allen 3D-Punktwolken unerwünschte Punkte entfernt werden. Dieser Vorgang wird auch als Filterung bezeichnet. Bei der Filterung kommt es nicht zu einem Löschen der einzelnen Punkte (Pixel), sondern Laser-Control erzeugt für jede Filterart eine Maske, die die gefilterten Punkte ausblendet.

Folgende fünf Filterarten stehen im Menü „Plugins - Filter“ zur Verfügung:

- **Range-Filter**, der Punkte ausblendet, die sich außerhalb der maximalen Entfernung zum Scanner befinden. Die maximale Messdistanz des Z+F Imagers 5010 liegt bei 187,3 m.

- **Invalid-Filter**, der Punkte maskiert, die sich unterhalb der minimalen Entfernung zum Scanner befinden. Die minimale Messdistanz des Z+F Imagers 5010 liegt bei 0,3 m.
- **Intensity-Filter**, der Punkte ausmaskiert, die unterhalb der minimalen Intensität und oberhalb der maximalen Intensität liegen.
- **Single-Pixel-Filter**, der einzelne Pixel bereinigt, die keine Punkte in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft haben, wie z.B. Staubkörner in der Luft. Dieser Filter wurde von uns nicht verwendet.
- **Mixed-Pixel-Filter**, der gemischte Pixel filtert, die entstehen können, wenn sich der Laserlichtstrahl an einer Kante in zwei Teile aufspaltet (siehe Abb. 43).

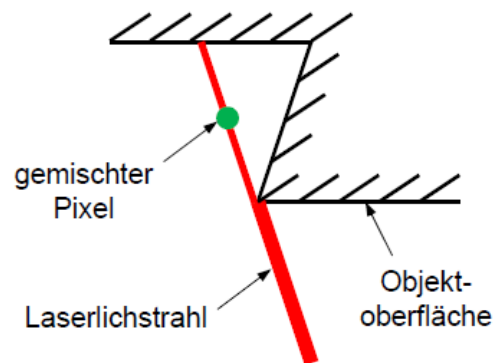


Abb. 43: Entstehung eines gemischten Pixels an einer Objektkante

In Abb. 44 ist ein gefiltertes 2D-Grauwertbild zu sehen, wo die gefilterten Pixel farbig hervorgehoben sind.

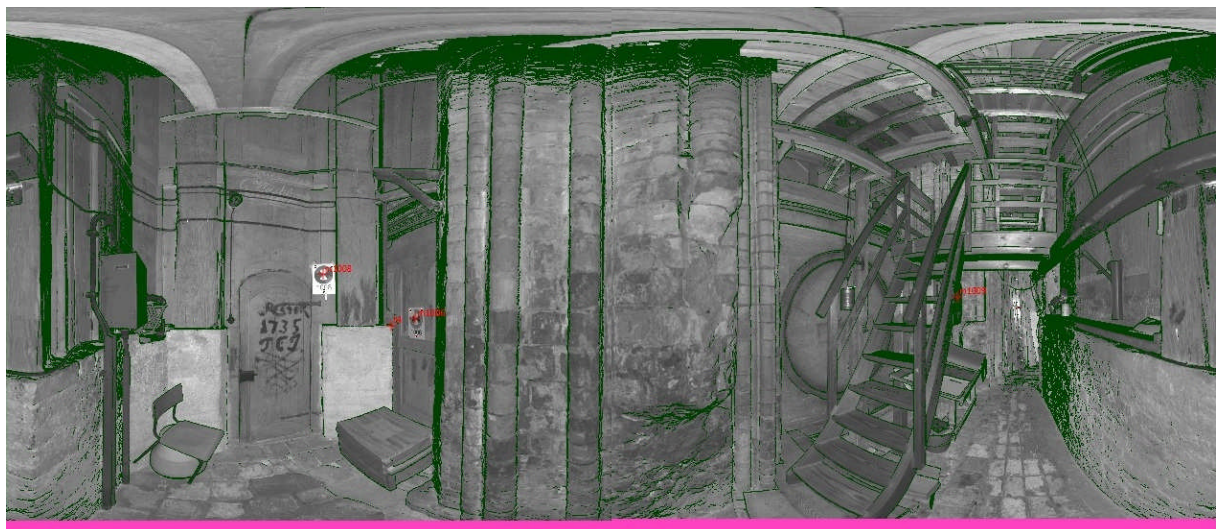


Abb. 44: Gefiltertes 2D-Grauwertbild (Scanner-Position 10)

6.3 Stitching und Colorierung mittels Fotos der Z+F M-Cam

Als nächstes führten wir ein Zusammenheften (Stitching) der einzelnen Farbfotos eines jeden Standortes zu einem Panoramafoto und eine Einfärbung (Colorierung) der einzelnen 3D-Punktwolken durch. Zunächst wurden die Farbfotos verwendet, die mit der M-Cam gemacht wurden. Sowohl für das Stitching als auch für die Colorierung benutzten wir Laser-Control.

Beim Herunterladen einer Scandatei auf einen PC werden auch die zugehörigen M-Cam-Fotos im gleichen Ordner abgespeichert.

Zuerst muss die von „Zoller + Fröhlich“ auf einem USB-Stick mitgelieferte M-Cam-Kalibrierdatei importiert werden. Hierzu gibt es in Laser-Control den Button „Camera Calibration Files“.

Nach Benutzung des Buttons „Color Mapping Properties“ aktiviert man denjenigen Scan, der eingefärbt werden soll, und die zugehörigen M-Cam-Fotos. Zudem weist man die Kalibrierung und das Exportformat zu. Als Exportformat wählten wir JPEG. Anschließend wird ein Panoramabild erzeugt, dass die gleiche Auflösung hat wie der Scan.

Als nächstes muss eine „externe Orientierung“ der M-Cam mittels identischer Punkte berechnet werden. Nach dem Öffnen des Scans und dem Benutzen des Buttons „Segment Featurepoints“ werden im Scan und im zugehörigen Panoramafoto automatisch natürliche Passpunkte identifiziert. Nachdem ausreichend Passpunkte gefunden wurden und der Berechnungsmodus „Auto-Register Camera vs. Scanner“ gewählt wurde, wird mit der Berechnung der „externen Parameter“ gestartet. Am Ende des Rechenprozesses erscheint in einem sich öffnenden Fenster der Restfehler (in Pixel). Nach dem Akzeptieren des Restfehlers, müssen die Parameter noch abgespeichert werden.

Mit dem Button „Generate Color Scans“ wird schließlich die Farbe des Panoramafotos auf den Scan gemappt.

Der oben beschriebene Arbeitsprozess wurde für die Scanner-Standorte 1 bis 6 (siehe Kap. 5.1, S. 30) mit den jeweiligen Scan- und Fotodaten separat durchgeführt.

Nach einer anschließenden Qualitätsuntersuchung entschieden wir uns nur die M-Cam-Fotos von Standort 5 und 6 für die Colorierung zur verwenden, da die anderen M-Cam-Fotos eine zu große Abweichung aufwiesen.

In Abb. 45 ist ein colorierter Scan in der Grau-Ansicht zu sehen, dass mit Hilfe von M-Cam-Fotos und der Software Laser-Control entstanden ist.

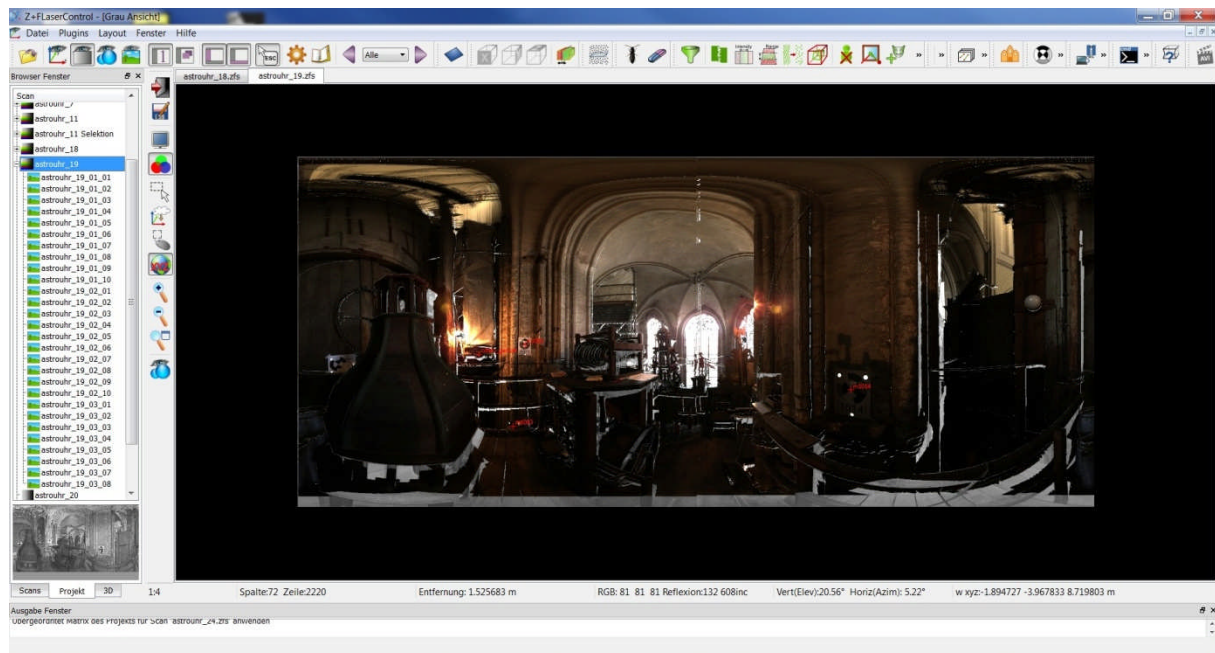


Abb. 45: Colorierter Scan (Scanner-Position 5)

6.4 Stitching und Colorierung mittels Fotos der Nikon D40

Als nächstes wurden alle digitalen Farbbilder, die mit der Nikon D40 gemacht wurden, von der Festplatte der Kamera auf einen PC übertragen. Anschließend wurden unter Zuhilfenahme der Software PTGui die einzelnen Fotos einiger Standorte zu Panoramafotos zusammengesetzt. Erst danach wurden die Farbwerte der Panoramafotos mit der Software Z+F Laser-Control auf die einzelnen Scans gemappt.

6.4.1 Stitching mit PTGui

Durch Klicken des Buttons „1. Load images...“ im Menü „Project Assistant“ und Auswahl derjenigen Fotos, die zu einem Panoramafoto zusammengestitcht werden sollen, werden die Fotos in PTGui hochgeladen (siehe Abb. 46).

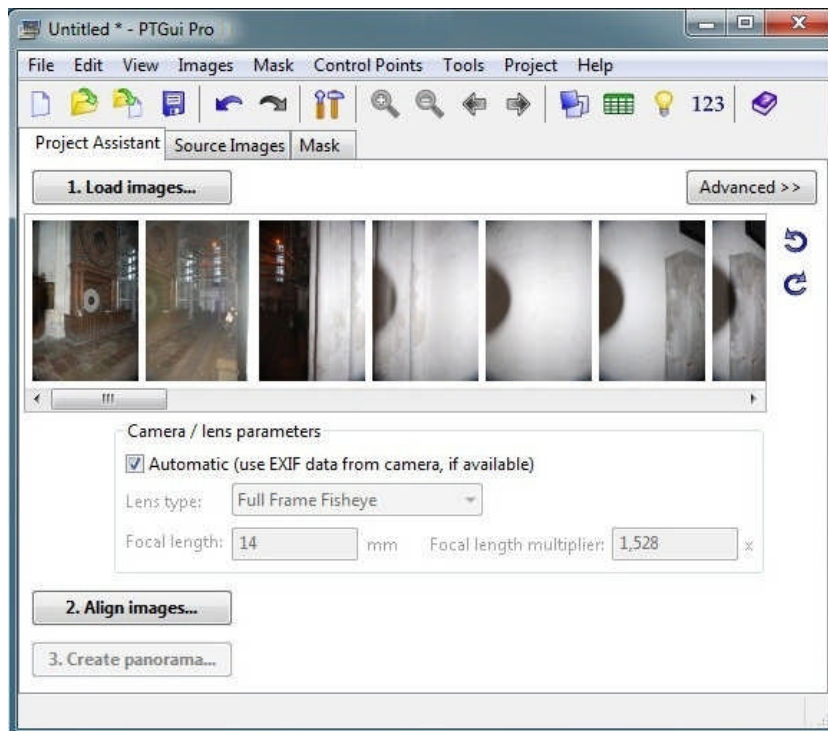


Abb. 46: Hochladen von Bildern in PTGui (Scanner-Position 1)

Nach dem Betätigen des Buttons „2. Align images...“ im Menü „Project Assistant“ markiert das Programm automatisch natürliche Passpunkte in den einzelnen Fotos und sticht die Fotos zu einem Panoramabild zusammen. Das generierte Panoramafoto erscheint anschließend in einem sich öffnenden Bearbeitungsprogramm, wo u.a. zwischen den Projektionsarten „Rectilinear“ (Panoramabild mit geraden Linien), „Cylindrical“ (Abbildung eines Zylinderpanoramas auf einer Ebene) und „Equirectangular“ (Abbildung eines Kugelpanoramas auf einer Ebene) gewählt werden kann. In unserem Fall wurde die Projektionsart „Equirectangular“ verwendet. Falls die Software Probleme beim automatischen Stitching hat, kann man auf das manuelle Stitching zurückgreifen. Hierzu verfügt PTGui über das Menü „Control Points“, wo der Nutzer manuell natürliche Passpunkte in den einzelnen Fotos setzen kann.

Nach dem Benutzen des Buttons „3. Create panorama...“ im Menü „Project Assistant“ und Einstellung der Bildgröße, des Bildformates und des Bildnamens, wird durch Klicken des Buttons „Create panorama“ im Menü „Create Panorama“ das Panoramafoto endlich erzeugt. Bei der Bildgröße stellten wir „Maximum size“ ein und als Bildformat wählten wir JPEG.

Der oben beschriebene Arbeitsprozess wurde für die Scanner-Standorte 1 bis 4 (siehe Kap. 5.1, S. 30) mit den jeweiligen Fotodaten separat durchgeführt.

In Abb. 47 ist ein zusammengestitchtes Panoramafoto zu sehen, dass mit Hilfe von Fotos der Nikon D40 und der Software PTGui entstanden ist.



Abb. 47: Zusammengestitchtes Panoramafoto (Scanner-Position 1)

6.4.2 Colorierung mit Z+F Laser-Control

Die mit PTGui hergestellten Panoramafotos (.jpg-Dateien) werden im selben Ordner abgelegt, wo sich bereits die Scans (.zfs-Dateien) befinden.

Nach dem Öffnen der LaserControl-Projektdatei wird jedem Scan im Browser-Fenster von LaserControl das zugehörige Panoramafoto zugeordnet. Dies geschieht durch Rechtsklick mit der Maus auf den jeweiligen Scan und anschließender Panoramabildauswahl.

Als nächstes muss eine neue Kamera-Kalibrierdatei definiert werden. Hierzu gibt es in Laser-Control den Button „Camera Calibration Files“. Nach dem Benutzen dieses Buttons erscheint eine Liste von vordefinierten Kalibrierdateien, von denen die Datei mit dem Namen „Spheron“ kopiert werden muss. Nach dem Öffnen eines neuen Dialogfensters gibt man dort den neuen Kalibrierdateinamen ein. Als „Model“ muss hier „Panoramacamera (Spherical)“ gewählt werden. Außerdem sind noch die Breite „w“ (in Pixeln) und die Höhe „h“ (in Pixeln) des jeweiligen Panoramabildes einzugeben.

Nach einem weiteren Betätigen des Buttons „Color Mapping Properties“ aktiviert man im neuen Dialogfenster den jeweiligen Scan und das zugehörige Panoramabild. Außerdem wählt man hier die zuvor definierte Kamera-Kalibrierdatei aus.

Als nächstes wird zusätzlich zum Scan das zugehörige Panoramabild durch einen Doppelklick geöffnet. Nach dem Benutzen des Buttons „Passpair definition“ müssen mindestens 3 identische natürliche Passpunkte zwischen Scan und zugehörigen Panoramabild manuell markiert werden.

Nach dem Benutzen des Buttons „Calculate Camera Calibration“ und dem Drücken des „Run“-Knopfes wird der Rechenprozeß gestartet. Als Ergebnis erscheint ein Informationsfenster mit einem absoluten Fehler.

Mit dem Button „Generate Color Scans“ wird schließlich der Colorierungsprozess gestartet. Nach Beendigung des Prozesses wird der colorierte Scan dann geöffnet.

Der oben beschriebene Arbeitsprozess wurde für die Scanner-Standorte 1 bis 4 (siehe Kap. 5.1, S. 30) mit den jeweiligen Scan- und Panoramafotodaten separat durchgeführt.

In Abb. 48 ist ein colorierter Scan in der Grau-Ansicht zu sehen, der mit Hilfe eines mit PTGui hergestellten Panoramas und der Software Laser-Control entstanden ist.

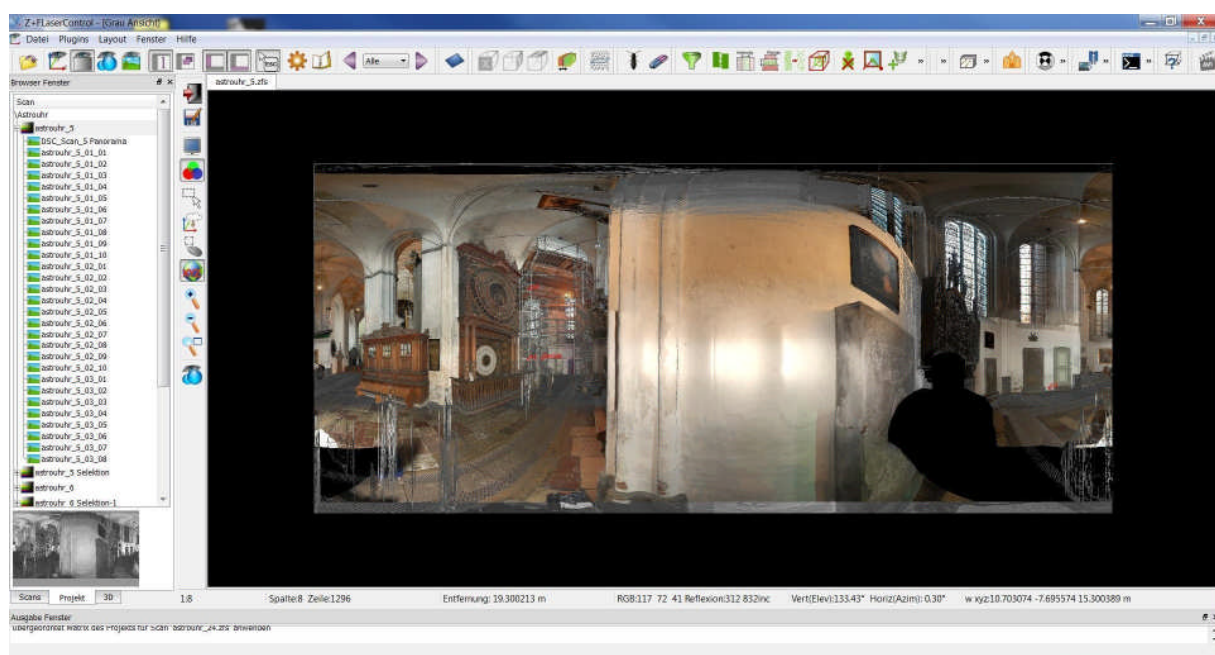


Abb. 48: Colorierter Scan (Scanner-Position 1)

In Abb. 49 sind alle colorierten Punktwolken dargestellt. Im Zentrum der eingefärbten Gesamtpunktwolke befindet sich die Astronomische Uhr mit dem Chorumgang davor.

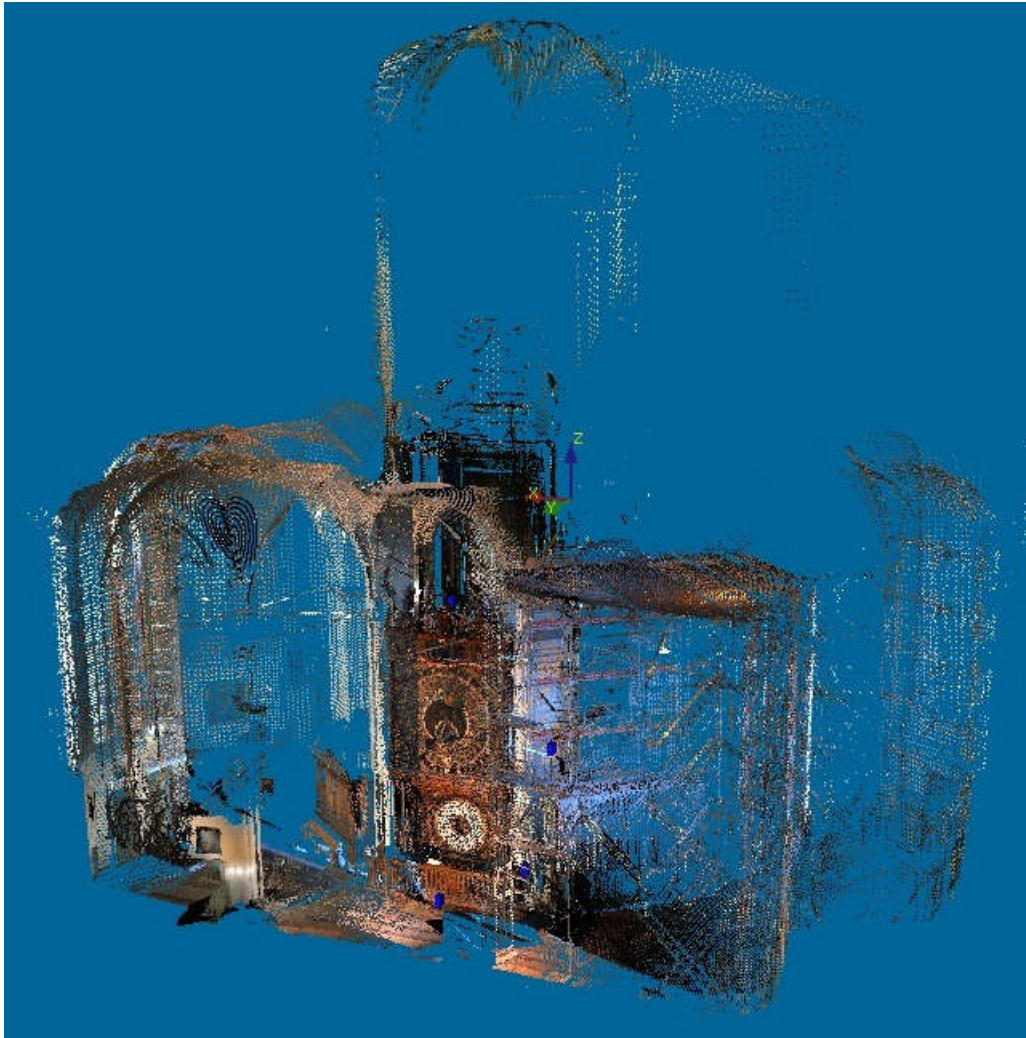


Abb. 49: 3D-Ansicht aller colorierten Punktwolken

6.5 Beschneidung mit Geomagic Studio

Ein sehr wichtiges Tool ist das Schneidwerkzeug von Geomagic Studio mit der 3D-Punktwolken bearbeitet werden können.

Durch Klicken des runden Applikationsbuttons von Geomagic Studio und anschließendem Drücken des Buttons „Import“, werden nach Auswahl der Scandateien (Datenübertragung im Verhältnis 100%; volle Daten bei Reduktion behalten) die Scans im Programm geöffnet. Dateien mit der Endung „.zfs“ kann

Geomagic nicht importieren, deshalb müssen die Scandaten zuvor als XYZ/ASCII-Dateien mit dem Format „.asc“ abgespeichert werden.

Anschließend folgt der eigentliche „Schneidprozess“. Dazu werden die Scans im „Modell-Verwaltungsfenster“ ausgewählt und mit Hilfe eines Schneidwerkzeuges (z.B. Linienzug-Schnittform) im Menü „Auswählen - Auswahlwerkzeuge“ bearbeitet. Hierbei wird der Teil der Punktwolke, der entfernt werden soll, eingerahmt und anschließend auf das Button „Entfernen“ im Menü „Punkte“ gedrückt.

Zum Schluss muss die beschnittene 3D-Punktwolke noch benannt und gespeichert werden. Als Dateityp wurde die Wrap-Datei mit der Endung „.wrp“ gewählt.

In Abb. 50 ist eine beschnittene 3D-Punktwolke zu sehen. Hier sind die Astronomische Uhr und die beiden Kirchenpfeiler mit Bogenelement abgebildet.

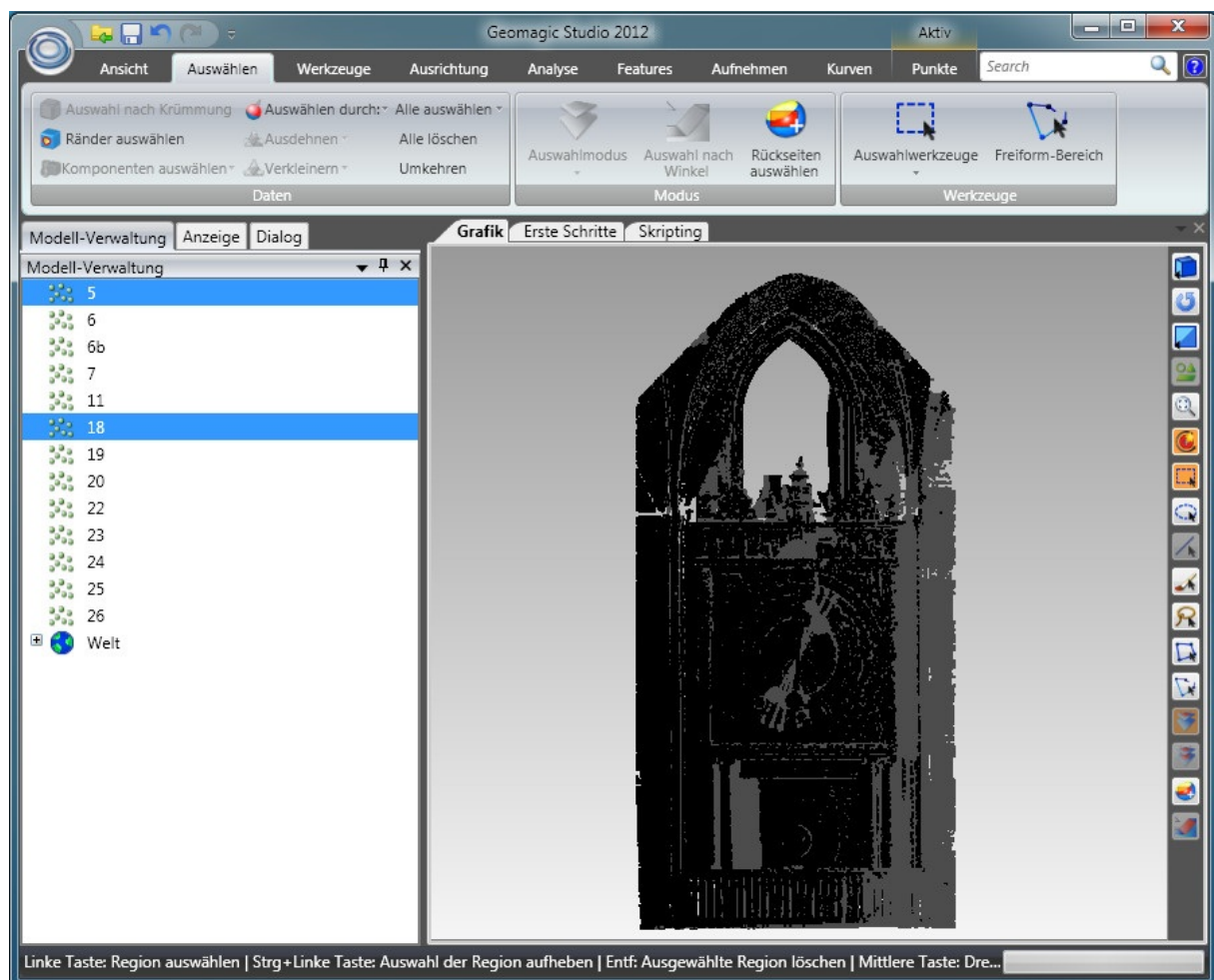


Abb. 50: Beschnittene 3D-Punktwolke in Geomagic Studio

6.6 Herstellung eines Polygonobjektes mit Geomagic Studio

Eine wichtige Funktion von Geomagic Studio ist die Möglichkeit zur Herstellung von Polygonobjekten mittels Dreiecksvermaschung.

Zur Herstellung eines Polygonobjektes verfügt Geomagic Studio im Menü „Punkte“ über die beiden Buttons „Vereinigen“ und „Wrap“, die abhängig sind von der Anzahl der gegebenen 3D-Punktewolken. Die „Vereinigen“-Funktion vereinigt zwei oder mehrere Punktobjekte, wodurch ein neues Polygonobjekt entsteht. Die „Wrap“-Funktion dagegen wandelt nur ein Punktobjekt in ein Polygonobjekt um, indem die Punktewolke trianguliert wird.

Sollen mehrere Punktewolken in ein Polygonflächenmodell umgewandelt werden, müssen zunächst diejenigen Punktewolken im „Modell-Verwaltungsfenster“ ausgewählt werden, die vereinigt werden sollen. Nach dem anschließenden Drücken des Buttons „Vereinigen“ erscheint ein neues Dialogfenster, wo man den Punkteabstand, die maximale Anzahl der zu verwendenden Dreiecke zur Dreiecksvermaschung und die Qualitätsstufe auswählen kann. Wir verwendeten einen Punkteabstand von 0,00583 mm, eine maximale Anzahl von 99.900.000 Dreiecken und die höchste Qualitätsstufe. Nach dem Betätigen des Buttons „OK“ beginnt die Herstellung des Polygonobjektes.

In Abb. 51 ist sowohl das Punkt- als auch das zugehörige Polygonobjekt eines Ausschnittes des Kirchenpfeilers der St. Marienkirche zu sehen.

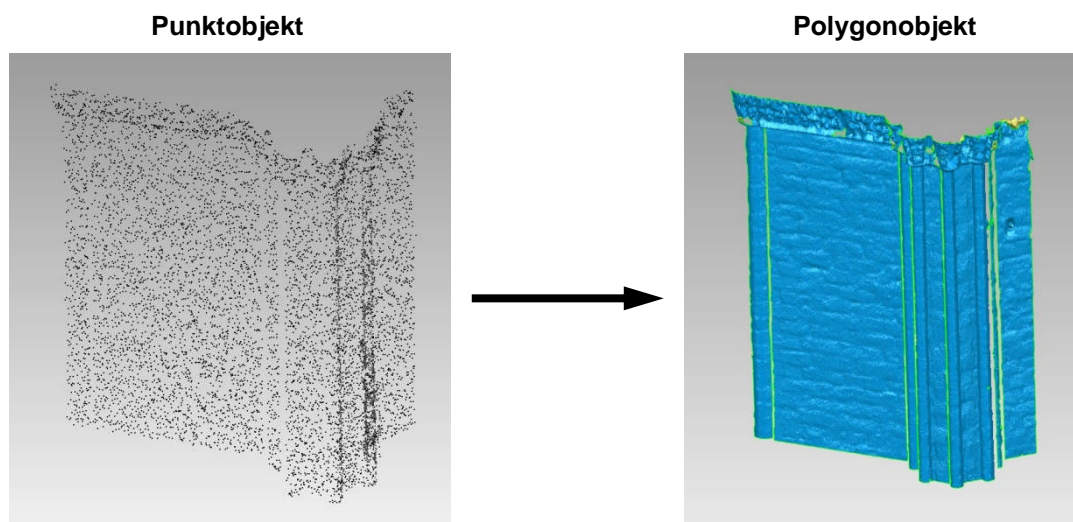


Abb. 51: Umwandlung eines Objektes mit Geomagic Studio

6.7 Herstellung von Schnittkurven mit Geomagic Studio

Eine weitere wichtige Funktion von Geomagic Studio ist die Möglichkeit zur Herstellung von Polygonobjekt-Schnittkurven.

Zur Herstellung einer Schnittkurve verfügt Geomagic Studio im Menü „Kurven“ über das Button „Durch Schnitt erstellen“, nach deren Betätigung ein Dialog-Fenster geöffnet wird, wo man die Schnittebene ausrichten und den Namen der Schnittkurve eingeben kann.

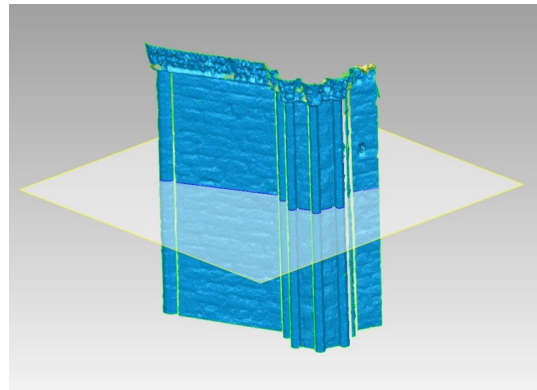


Abb. 52: Schnittebene und -kurve an einem Kirchenpfeilerausschnitt

Nach dem Drücken des Buttons „Anwenden“ wird die Schnittkurve blau eingefärbt (siehe Abb. 52) und mit dem anschließenden Betätigen des Buttons „OK“ wird sie schließlich erstellt. Im „Modell-Verwaltungsfenster“ erscheint nun der Wortlaut „SKIZZE:“ und dahinter der oben gewählte Schnittkurvenname.

Nach einem Maus-Rechtsklick auf diesen Skizzen-Namen kann der Schnittkurvenverlauf nach Eingabe eines neuen Namens und der Wahl des Dateiformats (.iges) abgespeichert werden. Der Vorteil dieses Dateityps liegt darin, dass Dateien mit diesem Format einfach in die CAD-Software Pro-Engineer importiert werden können.

6.8 Distanzmessung in Geomagic Studio

In Geomagic Studio können Distanzen auf den erzeugten Schnittkurven oder auf der Oberfläche des Polygonobjektes selbst gemessen werden. Zur 3D-Entfernungsmessung verfügt das Programm im Menü „Analyse“ über das Button „Abstand“, mit dem der Gesamtabstand und die drei Projektionsabstände in x-, y- und z-Richtung zwischen zwei Punkten auf der Kurve bzw. dem Objekt angezeigt werden können.

7 Datenmodellierung

Bevor mit der Objektmodellierung gestartet werden konnte, mussten Informationen (z.B. Querschnittsformen, Maße) über die einzelnen Bauteile gesammelt werden. Dieser Arbeitsschritt wurde mit Hilfe der Arbeitsmethoden der Kap. 6.7 und 6.8 ausgeführt.

Die einzelnen Bauteile der Astronomischen Uhr wurden mit der CAD-Software Pro-Engineer erzeugt. Dabei wurden einige Bauteile zu Unterbaugruppen zusammengesetzt. Schließlich gehören aber alle Bauteile und Unterbaugruppen zur Oberbaugruppe „Astrouhr“. Nachfolgend wird auf die einzelnen Bauteile und deren Modellierung näher eingegangen. Den Abschluss bildet das fertige CAD-Modell.

7.1 Doppelpfeiler mit Bogenelement

Die Unterbaugruppe „Doppelpfeiler mit Bogenelement“ (siehe Abb. 53) besteht aus den beiden Bauteilen „Doppelpfeiler“ und „Bogenelement“. Hierbei sind der linke und rechte Kirchenpfeiler Teil der Uhrenbewandung.

Im Skizziermodus von Pro Engineer wurde zunächst eine 2D-Skizze vom Querschnitt eines Pfeilers erstellt, der dann mit Hilfe einer Skizzierfunktion gespiegelt wurde. Mit dem Extrusions-Tool wurde die Querschnittsgeometrie dann senkrecht zur Skizzierebene extrudiert und anschließend mit dem Rundungs-Tool die Kanten abgerundet.

Bei der Modellierung des Bogenelementes kam auch das Ziehen-Tool zur Anwendung, mit der man entlang einer Leitkurve eine 2D-Skizze (Querschnitt) ziehen kann und daraus ein 3D-Körper entsteht.

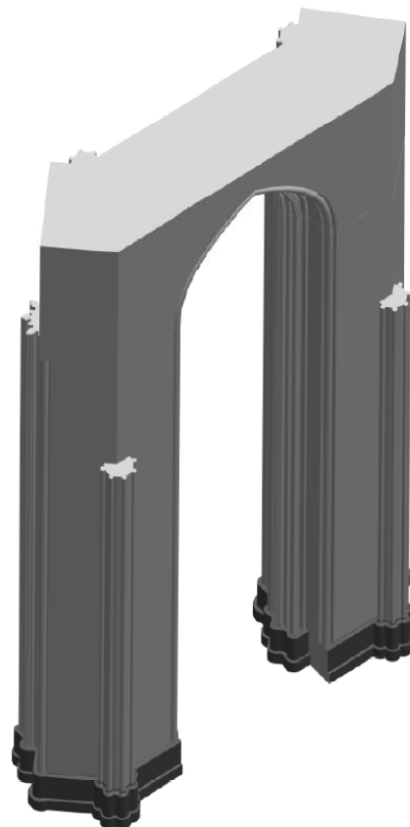


Abb. 53: *Doppelpfeiler mit Bogenelement*

Zur Rekonstruktion einiger Querschnittsformen wurde auch auf historische Zeichnungen zurückgegriffen (siehe Abb. 54).

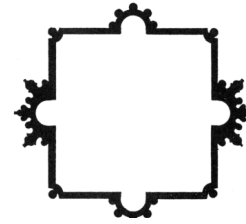


Abb. 54: Pfeilerquerschnitt der St. Marienkirche (nach [Wikimedia])

7.2 Grundplatte und Altarwand

Das Bauteil „Grundplatte“ bildet das Fundament für die beiden Kirchenpfeiler, die Altarwand und den Rest der Astrouhr.

Das Bauteil „Altarwand“ grenzt den sich hinter der Astrouhr befindenden Hauptaltarbereich ab. Es besteht im Wesentlichen aus zwei senkrechten Holzbohlen mit Querverstrebungen und einer Ziegelmauer, die auf der Grundplatte steht.

Bei der Objekt-Modellierung kam neben dem wichtigen Extrusions-Tool auch das Materialentfernungs-Tool, mit dem man Material aus vorhandenen Körpern mittels Schnitte entfernen kann, zur Anwendung.

In Abb. 55 sind die beiden Bauteile zusammen in einem Bild zu sehen.

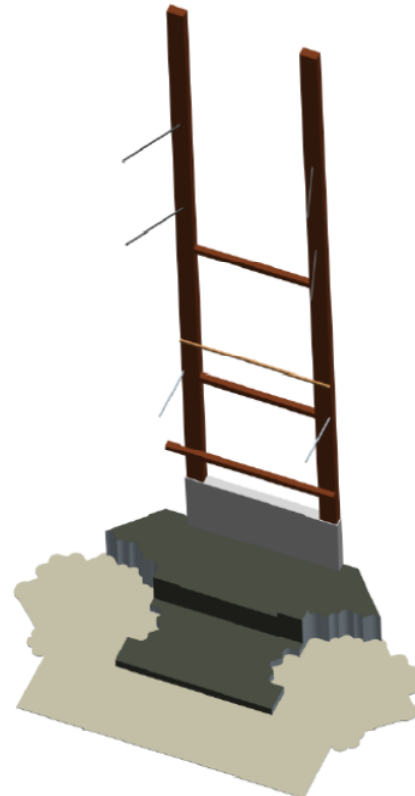


Abb. 55: Grundplatte und Altarwand

7.3 Weitere Bauteile

Das Untergeschoss und die erste Etage bestehen aus folgenden sieben Bauteilen (siehe Abb. 56):

- das Balkentragwerk für das Kalenderwerk inklusive eines senkrechten Stützpfeilers an dem das Ritzel-Andrucklagerungssystem befestigt ist
- die kleine Treppe des Erdgeschosses

- die kleine Bodenplatte des Erdgeschosses
- die Treppe zwischen Erdgeschoss und erster Etage inklusive Gelände
- die Bodenplatte der ersten Etage inklusive zweier senkrechter Stützpfeiler
- das Gelände für die Bodenplatte der ersten Etage
- die Treppe zwischen erster Etage und zweiter Etage inklusive Gelände



Abb. 56: Bauteile des Erdgeschosses und der ersten Etage

Die zweite Etage besteht aus folgenden drei Bauteilen (siehe Abb. 57):

- die Bodenplatte der zweiten Etage mit Balkenfundament für das Hauptwerk
- das Gelände für die Bodenplatte der zweiten Etage
- die Treppe zwischen zweiter und dritter Etage inklusive Gelände

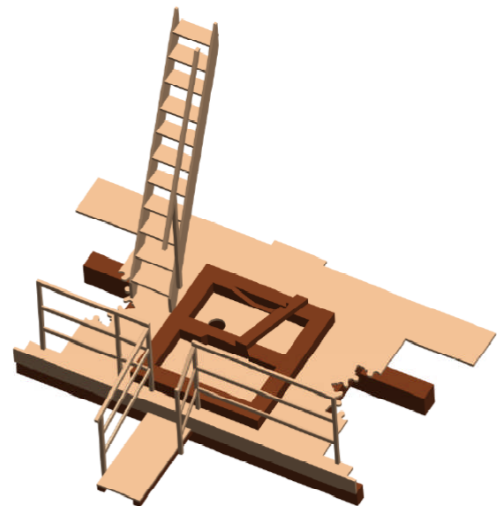


Abb. 57: Bauteile der zweiten Etage

Die dritte Etage besteht aus folgenden zwei Bauteilen (siehe Abb. 58):

- die Bodenplatte der dritten Etage mit Balkenfundament für Stundenschlag- und Musikwerk
- das Gelände für die Bodenplatte der dritten Etage

Bei der Objekt-Modellierung kamen hauptsächlich das Extrusions- und das Materialentfernungs-Tool zur Anwendung.

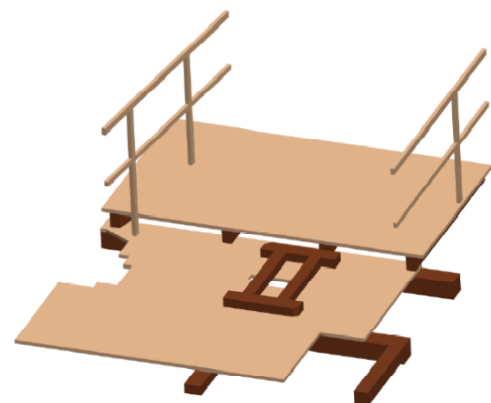


Abb. 58: Bauteile der dritten Etage

7.4 Ergebnis der Datenmodellierung

In Abb. 59 ist das fertige CAD-Modell mit allen Bauteilen der Oberbaugruppe „Astrouhr“ zu sehen.

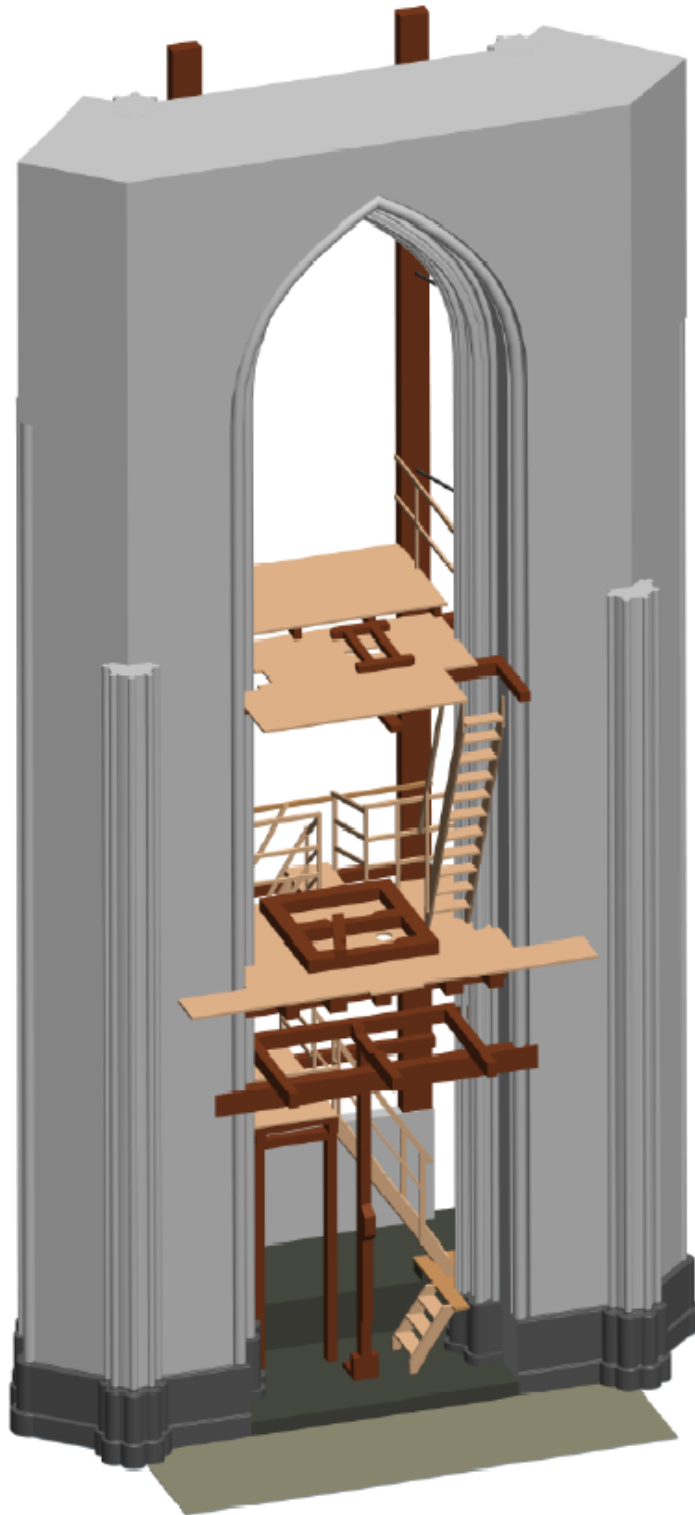


Abb. 59: Fertiges CAD-Modell vom Innenraum der Astronomischen Uhr

8 Fazit

Diese Projektarbeit beinhaltet die Datenerfassung, Datenaufbereitung und Datenmodellierung der St. Marienkirche in Rostock.

Die gesamte Datenerfassung erfolgte an nur zwei Tagen. Hierbei verliefen das Scannen, das Fotografieren und die Tachymetermessung an sich weitgehend unkompliziert. Problematisch war allerdings der Umstand, dass die nähere Umgebung der Astronomischen Uhr nicht für Besucher gesperrt werden konnte. Dies führte nicht nur zu erheblichen Verzögerungen im Arbeitsablauf, sondern auch dazu, dass mehrere Menschen auf den Scans und den Fotos drauf sind. Ebenfalls problematisch waren die engen Raumverhältnisse und die schlechten Lichtverhältnisse innerhalb der Astrouhr.

Erheblich mehr Zeit in Anspruch nahm dagegen die Datenaufbereitung. Hierbei liefen die Registrierung und die Filterung recht zügig und ohne Probleme ab. Problematisch war aber die Colorierung, da keinerlei Erfahrungswerte mit dem Colorierungs-Tool innerhalb von Z+F Laser-Control vorlagen. Als überraschend positiv stellte sich die Software von Geomagic Studio 2012 heraus, da sie im Gegensatz zu anderen Programmen, sehr einfach und benutzerfreundlich ist, und über ausgezeichnete Schneid-, Schnittkurven- und Mess-Tools verfügt, mit deren Hilfe man Dateninformationen über das Polygonobjekt sammeln kann.

Die abschließende Datenmodellierung in Pro-Engineer war dagegen eher unkompliziert, aber dafür sehr zeitaufwendig.

Abkürzungsverzeichnis

2D ... zweidimensional

3D ... dreidimensional

ASCII ... American Standard Code for Information Interchange

AVI ... Audio Video Interleaved

CAD ... Computer Aided Design

GB ... Giga-Byte

i.A.a. ... in Anlehnung an

i.V.m. ... in Verbindung mit

JPEG ... Joint Photographics Experts Group

LCD ... Liquid Crystal Display

USB ... Universal Serial Bus

WLAN ... Wireless Local Area Network

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Die Astronomische Uhr der Rostocker St. Marienkirche	1
Abb. 2	Der Aufsatz der Astronomischen Uhr	2
Abb. 3	Der Figurenrundgang der sechs Apostel	3
Abb. 4	Die Uhrscheibe der Astronomischen Uhr	4
Abb. 5	Der Sonnen- und Mondzeiger	6
Abb. 6	Die Sebes-Scheibe	6
Abb. 7	Die Planeten-Scheibe	7
Abb. 8	Das Kalendarium der Astronomischen Uhr	8
Abb. 9	Der Kalenderraum	8
Abb. 10	Die 13 Ringe	9
Abb. 11	Die Tag-Nacht-Scheibe	11
Abb. 12	Blockschema der sechs Uhrwerke	13
Abb. 13	Das Hauptwerk	14
Abb. 14	Schematischer Aufbau des Haupt- und Zeigerwerkes	14
Abb. 15	Hakenanker mit Ankerzahnrad	15
Abb. 16	Das Zeigerwerk	15
Abb. 17	Haupt- und Zeigerwerk	16
Abb. 18	Oberer Teil des Kalenderwerkes	16
Abb. 19	Unterer Teil des Kalenderwerkes	17
Abb. 20	Das Musikwerk (links) und das Stundenschlagwerk (rechts)	17
Abb. 21	Die kleine Stundenglocke	18
Abb. 22	Die Musiktrommel	18
Abb. 23	Die Glockenschalen	18
Abb. 24	Das Apostelwerk	19
Abb. 25	Der Speichenkranz mit sechs Apostel	19
Abb. 26	Punktrasterabtastung eines terrestrischen Laserscanners	20
Abb. 27	Bauarten von terrestrischen Laserscannern	21
Abb. 28	Amplitudenmodulation einer Trägerwelle	22

Abb. 29	Entfernungsmessung mit dem Phasendifferenzverfahren	22
Abb. 30	Entfernungsmessung mit dem Impulsverfahren	23
Abb. 31	Z+F IMAGER 5010	24
Abb. 32	Z+F M-Cam	25
Abb. 33	Nikon D40 mit Zubehör	26
Abb. 34	Sokkia NET2A	26
Abb. 35	Z+F IMAGER 5010 vor der Astrouhr (Scanner-Position 3)	29
Abb. 36	Die 11 Scanner-Positionen an der Astrouhr	30
Abb. 37	Auto-Target (links) und Profi-Target mit Magnetfuss (rechts)	31
Abb. 38	Grauwertkarte der M-Cam	32
Abb. 39	Nikon D40 mit Nodalpunktadapter auf einem Stativ	33
Abb. 40	Dialogfenster „Target zum Scan hinzufügen“ in Laser-Control	35
Abb. 41	Dialogfenster zur Tachymeterdatenübergabe	35
Abb. 42	3D-Ansicht aller registrierten Punktwolken	36
Abb. 43	Entstehung eines gemischten Pixels an einer Objektkante	37
Abb. 44	Gefiltertes 2D-Grauwertbild (Scanner-Position 10)	37
Abb. 45	Colorierter Scan (Scanner-Position 5)	39
Abb. 46	Hochladen von Bildern in PTGui (Scanner-Position 1)	40
Abb. 47	Zusammengestichtes Panoramafoto (Scanner-Position 1)	41
Abb. 48	Colorierter Scan (Scanner-Position 1)	42
Abb. 49	3D-Ansicht aller colorierten Punktwolken	43
Abb. 50	Beschnittene 3D-Punktwolke in Geomagic Studio	44
Abb. 51	Umwandlung eines Objektes mit Geomagic Studio	45
Abb. 52	Schnittebene und -kurve an einem Kirchenpfeilerausschnitt	46
Abb. 53	Doppelpfeiler mit Bogenelement	47
Abb. 54	Pfeilerquerschnitt der St. Marienkirche	48
Abb. 55	Grundplatte und Altarwand	48
Abb. 56	Bauteile des Erdgeschosses und der ersten Etage	49
Abb. 57	Bauteile der zweiten Etage	49
Abb. 58	Bauteile der dritten Etage	49
Abb. 59	Fertiges CAD-Modell vom Innenraum der Astronomischen Uhr	50

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Winkelauflösungs- und Qualitätsstufen des Z+F IMAGER 2010	25
Tab. 2	Winkelauflösungs- und Qualitätsstufen der 11 Scanner-Positionen	31

Literaturverzeichnis

Bücher:

- [Kah06] Kahmen, H. (2006): Angewandte Geodäsie. Vermessungskunde, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 20. Auflage 2006
- [Res09] Resnik, B. / Bill, R. (2009): Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich, Wichmann-Verlag, Heidelberg, 3. Auflage 2009
- [Sch10] Schukowski, M. (2010): Die Astronomische Uhr in St. Marien zu Rostock, Die Blauen Bücher, Königstein im Taunus, 2. Auflage 2010
- [Sch11] Schukowski, M. (2011): Die astronomische Uhr der St.-Marien-Kirche zu Rostock, Informationsbroschüre, Herausgegeben von der Stiftung St.-Marien-Kirche zu Rostock e.V., 2011
- [Wit11] Witte, B. / Sparla, P. (2011): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen, Wichmann-Verlag, Berlin, 7. Auflage 2011

Internet:

- [AstroUhr1] astronomischeuhr.de
Online Link: <http://www.astronomischeuhr.de/files/aufbau.htm>
(Datum des Zugriffs: 17.07.2012)
- [AstroUhr2] astronomischeuhr.de
Online Link: <http://www.astronomischeuhr.de/files/aufbau2.htm>
(Datum des Zugriffs: 17.07.2012)
- [AstroUhr3] astronomischeuhr.de
Online Link: <http://www.astronomischeuhr.de/files/aufbau4.htm>
(Datum des Zugriffs: 21.08.2012)

[GLMLaser] glm-laser.com

Online Link: <http://www.glm-laser.com/glm/files/net2.jpg>

(Datum des Zugriffs: 21.08.2012)

[Wikimedia] wikimedia.org

Online Link: upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Dehio_596_Rostock.png

(Datum des Zugriffs: 21.08.2012)

[ZFLaser] zf-laser.com

Online Link: http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Broschueren/Broschuere_IMAGER_5010_03_12.pdf

(Datum des Zugriffs: 03.08.2012)

Anhang

Inhalt der beiliegenden CD:

- Projektarbeit als PDF-Dokument
- Pro-Engineer-Arbeitsverzeichnis mit CAD-Modell
- Video im AVI-Format mit Rundflug um das CAD-Modell

