

Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Fertigungstechnik



UNIVERSITÄT ROSTOCK

Projektarbeit

**Erstellung eines 3D-Modells der
Astronomischen Kirchenuhr (Außenfassade)
zu Rostock, basierend auf Daten von
terrestrischem Laserscanning**

Eingereicht von:	Ronny Rohs
Matrikel-Nr.:	99200564
Diplomstudiengang:	Maschinenbau
Referent:	Prof. Dr.-Ing. M.C. Wanner
Betreuer:	Dipl.-Ing. O. Grewe
Abgabedatum:	31. August 2012



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 Martin Rohs ein 3D-Modell der Astronomischen Uhr der St. Marienkirche in Rostock zu erstellen. Hierfür ist die historische Kirchenuhr 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 Oberflächen-gestaltung 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

Sperrvermerk

Die vorgelegte Projektarbeit mit dem Titel „Erstellung eines 3D-Modells der Astronomischen Kirchenglocke (Außenfassade) zu Rostock, basierend auf Daten von terrestrischem Laserscanning“ beinhaltet interne und vertrauliche Informationen des Fraunhofer Anwendungszentrums Großstrukturen in der Produktionstechnik AGP Rostock. Alle im Zusammenhang mit dieser Projektarbeit dokumentierten Kenntnisse und Angaben sind streng vertraulich und dürfen nicht ohne formelle Genehmigung des Fraunhofer Anwendungszentrums Großstrukturen in der Produktionstechnik AGP Rostock, an Dritte weitergegeben werden.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der dreidimensionalen Erfassung und Modellierung der Außenfassade der Astronomischen Uhr der St.-Marien-Kirche in Rostock durch terrestrisches Laserscanning. Im ersten Teil dieser Arbeit werden die einzelnen Anzeigen der Astronomischen Uhr beschrieben. Nach einer theoretischen Einführung in das Thema wird dann das eingesetzte Instrumentarium und die angewandte Software kurz vorgestellt. Der darauffolgende Teil gibt Aufschluss über den Ablauf der Laserscanmessung sowie deren anschließende Auswertung, hauptsächlich mit der Software Z+F LaserControl und Geomagic Studio. Im letzten Teil dieser Arbeit wird dann die 3D-Objektmodellierung und Texturierung mit der Software Pro/ENGINEER Wildfire erörtert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufbau und Anzeigen der Astronomischen Uhr	2
2.1	Das Uhrenäußere	2
2.1.1	Uhrenscheibe	2
2.1.2	Kalenderraum	5
2.1.3	Aufsatz	7
2.2	Das Uhreninnere	8
3	Terrestrisches Laserscanning	11
3.1	Prinzip des terrestrisches Laserscanning	11
3.2	Bauarten von Laserscannern	11
3.3	Distanzmessungsverfahren	12
4	Eingesetztes Instrumentarium und angewendete Software	14
4.1	Instrumentarium	14
4.1.1	Laserscanner Z+F Imager 5010	14
4.1.2	Z+F MotorCam (M-Cam)	15
4.1.3	Digitale Kamera Nikon D40	15
4.1.4	Tachymeter Sokkia NET2A	16
4.2	Software	17
4.2.1	Z+F LaserControl	17
4.2.2	Geomagic Studio 2012	17
4.2.3	Pro/ENGINEER Wildfire 5.0	18
4.2.4	PTGui Pro	18
4.2.5	Corel Photo-Paint X5	18
5	Datenerfassung	19
5.1	Aufnahmeplanung und -vorbereitung	19
5.2	Aufnahmedurchführung	19
5.2.1	Laserscannermessung	19
5.2.2	Panoramafotografie mit der Z+F MotorCam	21
5.2.3	Panoramafotografie mit der Nikon D40	22
5.2.4	Tachymetermessung	22

6 Datenauswertung	23
6.1 Filterung der Punktwolke mit Z+F LaserControl	24
6.2 Verknüpfung der Punktwolke mit Z+F LaserControl	25
6.3 Punktwolkencolorierung	27
6.3.1 Einfärbung der Punktwolke unter Nutzung der Z+F MotorCam-Bilder mit Z+F LaserControl	27
6.3.2 Panoramabilderzeugung mit PTGui	28
6.3.3 Einfärbung der Punktwolke unter Nutzung der Panoramabilder mit Z+F LaserControl	29
6.4 Geomagic Studio	31
6.4.1 Bereinigen der registrierten Punktwolke	31
6.4.2 Erstellen von Polygonobjekten	33
6.4.3 Löcher füllen von Polygonobjekten	34
6.4.4 Erstellen und Exportieren von Schnittskizzen	35
6.4.5 Vermessung des Polygonobjektes	37
6.4.6 Überführung eines Polygonobjektes in ein NURBS-Objekt	37
7 Objektmodellierung	39
7.1 Modellierung der Astronomischen Uhr mit Pro/ENGINEER Wildfire	39
7.1.1 Uhrengehäuse	40
7.1.2 Kalendergehäuse	42
7.1.3 Aufsatzgehäuse	44
7.1.4 Stundenzeiger, Sonnenscheibe und Mondphasenscheibe	45
7.1.5 Kalendermann-Figur	47
7.1.6 Gesamtmodell ohne Textur	48
7.2 Texturierung	50
7.3 Das fertige Modell	51
8 Fazit	52
Danksagung	53
Literatur u. Quellenverzeichnis	54
Abbildungs- u. Tabellenverzeichnis	56
Anhang	58
Selbstständigkeitserklärung	64

1. Einleitung

Zwischen dem östlichen Pfeilerpaar des Binnen-Chores der Rostocker Marienkirche steht hinter dem Hochaltar die elf Meter hohe astronomische Uhr (Abb. 1.1) aus dem Jahre 1472. Das Besondere dieser Uhr liegt darin, dass sie die einzige astronomische Uhr der Welt ist, die noch ihr historisches Uhrwerk besitzt. Auch in ihrem Äußeren ist sie ursprünglich erhalten und alle Teile und Anzeigen sind voll in Funktion.

Um dieses technische und künstlerische Denkmal zu schützen und es für künftige Generationen zu bewahren, setzt sich der Förderverein "Stiftung St.-Marien-Kirche zu Rostock" e.V. dafür ein, dass die Astronomische Uhr der Marienkirche in die Weltkulturerbe-Liste der UNESCO aufgenommen wird. Im Zusammenhang mit diesen Bestrebungen trat dieser Förderverein an das Fraunhofer AGP in Rostock heran, mit dem Wunsch die innere und äußere Struktur der Astronomischen Uhr als dreidimensionales Modell für Informations- sowie für Präsentationszwecke zu erfassen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein 3D-Modell der äußeren Struktur der Astronomischen Uhr anzufertigen und den dabei beschrittenen Weg vom terrestrischen Laserscanning bis hin zur Modellierung im CAD aufzuzeigen.



Abb. 1.1: Die Astronomische Uhr der Rostocker Marienkirche [ASTRO UHR 2012]

2. Aufbau und Anzeigen der Astronomischen Uhr

Die nachfolgenden Abschnitte über den Aufbau und die Anzeigen dieser Uhr basieren hauptsächlich auf der Literatur von Manfred Schukowski [vgl. SCHUKOWSKI 2004, SCHUKOWSKI 2006, SCHUKOWSKI 2010].

2.1. Das Uhrenäußere

Die dreiteilig gegliederte Uhr besteht aus dem Aufsatz mit Apostelumgang (oberer Teil), der quadratischen Uhrenscheibe (mittlerer Teil) und dem zurückgesetzten Kalenderraum (unterer Teil).

2.1.1 Uhrenscheibe

In die quadratische Uhrenscheibe (Abb. 2.1) sind zwei Ziffernringe und zwei Figurenringe eingepasst.



Abb. 2.1: Die Uhrenscheibe [in Anlehnung an SCHUKOWSKI 2010, S.29]

Der größte Ziffernring, ganz außen, enthält gotische Ziffern für die 24 Tagesstunden (zweimal I bis XII). Dieser Stundenring wird vom stabförmigen Stundenzeiger, der auf

jeder Hälfte zwei weitere, drehbar gelagerte Scheiben trägt, täglich einmal umrundet. Die am Tage in der oberen Hälfte der Uhrenscheibe befindliche Zeigerhälfte endet in einer Hand mit ausgestrecktem Zeigefinger. Die andere Zeigerhälfte, tagsüber in der unteren, nachts in der oberen Hälfte der Uhrenscheibe zu finden, zeigt an ihrem Ende einen Stern. Die eine Scheibe auf dem Stundenzeiger ist über ein Massestück schwerkraftbetrieben und zeigt ein Bildnis des Rostocker Senators Zacharias Sebes, welcher sich 1641/43 um die Berechnung der damals neu gebauten Musik- und Stundenschlagwerke verdient gemacht hat. Am Rand der Sebes-Scheibe gibt es einen Ziffernring mit den Ziffern von 1 bis 24. Bei der Drehung des Stundenzeigers im Laufe des Tages wandert der 24-Ziffernring der Sebes-Scheibe an einer Marke (Hand mit ausgestrecktem Zeigefinger), die auf der Stundenzeigerstange montiert ist, vorbei. Diese "Schwerkraftuhr" ist damit eine Miniaturuhr. Die zweite etwa gleichgroße Scheibe auf dem Stundenzeiger stellt eine astrologische Planetenuhr dar, auf der über einen roten Zeiger abzulesen ist, welche Planeten die jeweiligen Tage und Stunden regieren. Anders als die Sebes-Scheibe ist die astrologische Planetenuhr rückseitig außer mit einem Massestück mit einem Getriebe versehen. Die Sektoren der Scheibe sind in bestimmter Reihenfolge mit dem Namen und Zeichen der Planeten (Sonne, Venus, Merkur, Mond, Saturn, Jupiter und Mars) versehen. Der Regent der ersten Stunde (0...1 Uhr) ist gleichzeitig Tagesregent und gibt dem beginnenden Tag den Namen:

Sonntag - Sonne
Montag - Mond
Dienstag - Mars
Mittwoch - Merkur
Donnerstag - Jupiter
Freitag - Venus
Sonnabend - Saturn.

An den Stundenring schließt innen ein schmaler Ziffernring an. Dessen insgesamt 360° teilt den innen anschließenden Tierkreisring in 12 Tierkreiszeichen bzw. Bogensegmente von je 30°, wobei jedes Bogensegment wiederum in je sechs Abschnitte unterteilt wird. Diese Abschnitte sind dem Uhrzeigersinn entgegenlaufend, mit den Zahlen 5, 10, 15, 20, 25 und 30 markiert. Der Tierkreisring mit seinen zwölf

geschnitzten Tierkreiszeichen beginnt rechts außen mit dem Widder und läuft gegen den Uhrzeigersinn weiter mit Stier, Zwillinge, Krebs, Löwe, Jungfrau, Waage, Skorpion, Schütze, Steinbock, Wassermann und Fische.

Der innerste Figurenring ist der Ring der Monatsbilder. In zwölf geschnitzten Flachreliefs werden charakteristische Tätigkeiten der jeweiligen Monate dargestellt, unten rechts mit dem Januar beginnend und entgegen dem Uhrzeigersinn verlaufend:

Januar:	tafelnder Herr
Februar:	frierender Mann am Feuer
März:	ein Mann pflanzt zwei Bäume
April:	eine Frau beim Umgraben
Mai:	ein Bauer sät
Juni:	ein Schnitter mäht das Gras mit einer Sense
Juli:	eine Bäuerin sichelt das Getreide
August:	ein Bauer drischt Korn mit einem Flegel
September:	ein Winzer bei der Weinlese
Oktober:	ein Bauer bei der Apfelernte
November:	ein Mann hackt Holz
Dezember:	ein Mann schlachtet ein Schwein.

Im Zentrum der Uhrscheibe liegen unter dem Stundenzeiger zwei Scheiben übereinander: Die sichtbare vordere Sonnenscheibe ist mit Sternen und dem Bild eines Drachens bemalt und besitzt einen kreisförmigen Ausschnitt. An ihrem Rand ist ein Zeiger befestigt, der ein Sonnenbildnis trägt. Der Rand der Sonnenscheibe ist in 30 Teile geteilt. Davon sind 29 mit den Ziffern 1 bis 29 versehen, während das Feld mit dem Sonnenzeiger ohne Zahl blieb. Am Rand der Sonnenscheibe, welche sich einmal jährlich im Gegenzeigersinn dreht, ist ein Zeiger befestigt, der ein Sonnenbildnis trägt. Die Stellung des Sonnenzeigers gegenüber den Figurenringen gibt den Stand der Sonne in den Tierkreiszeichen und den aktuellen Monat an. Die Mondphasenscheibe mit demselben Durchmesser liegt unter der Sonnenscheibe. Ein Teil von ihr ist im Ausschnitt der Sonnenscheibe sichtbar. Dort wird die aktuelle Mondphase angezeigt: Bei Vollmond sieht man das strahlend helle und bei Neumond ein dunkles Mondgesicht und zu anderen Zeiten ein mehr oder weniger großes Stück

des goldgelben Mondes, der jeweiligen Mondphase entsprechend. Am Rand der Mondphasenscheibe, welche sich einmal in 27,32 Tagen um 360° dreht, ist ein Zeiger befestigt, der ein Mondbildnis trägt. Dieser Mondzeiger zeigt den Ort des Mondes in den Tierkreiszeichen.

In den vier Ecken der Uhrscheibe befinden sich die Symbole der vier Evangelisten: Matthäus als Engel (oben links), Johannes als Adler (oben rechts), Markus als geflügelter Löwe (unten links), und Lukas als geflügelter Stier (unten rechts). Ursprünglich waren nur die beiden oberen Zwickel besetzt, wie die unter dem Engel und unter dem Adler vorhandenen Türen erkennen lassen. Die seitliche Begrenzung der quadratischen Uhrscheibe (Pilaster), sind mit geschnitzten Figuren und Ornamenten (oben links Sinnbild der Mathematik, oben rechts Sinnbild der Astronomie) reichlich geschmückt. An den Seiten des Uhrengehäuses befinden sich zwölf Fenster aus flämischem Glas, die wie die seitliche Begrenzung ebenfalls aus der Erweiterung von 1641/43 stammen.

2.1.2 Kalenderraum

Der Raum mit der Kalenderscheibe (Abb. 2.2) ist gegenüber der Uhrscheibe um etwa einen Meter zurückversetzt.



Abb. 2.2: Das Kalendarium [SCHUKOWSKI 2010, S.40]

Die drehbare Kalenderscheibe hat einen Durchmesser von zwei Metern und dreht sich jährlich einmal im Uhrzeigersinn um 360°. Über dem Zentrum der Kalenderscheibe ist eine geschnitzte und bemalte Scheibe mit zwei Ausschnitten, die unbeweglich ist, montiert. Auf dieser Zentralscheibe sind ein geschnitzter Flammenkreis und die Inschriften "Allhier sieht man zu aller frist, Wie lang der tag von stunde ist" und "Allhier wird dir auch fürgebracht Wie lang von stunde ist die nacht" zu finden. Zwei Hände zeigen mit ihren ausgestreckten Zeigefingern auf zwei Ziffernringe, die in den einander gegenüberliegenden Fenstern sichtbar werden. In dem linken Ausschnitt wird auf die Dauer des lichten Tages (Zeitraum Sonnenaufgang - Sonnenuntergang), im rechten auf die Länge der Nacht (Zeitraum Sonnenuntergang - Sonnenaufgang) hingewiesen.

Die äußeren beiden, feststehenden Ringe werden von einem Tierkreisring mit ihm umfassenden 30°-Bogensegmenten gebildet, die wiederum in sechs Abschnitte zu je 5° unterteilt sind (I|5, 1|0, II|5, 2|0, 2|5, 3|0). Der Tierkreisring mit seinen zwölf geschnitzten Tierkreiszeichen, die denen der Uhrscheibe gleichen, beginnt links außen mit dem Widder und läuft im Uhrzeigersinn weiter. Die Anzeigen der drehbaren Kalenderscheibe befinden sich auf 15 verschiedenen, konzentrischen Ringen. Die ersten äußeren sechs Ringe der Kalenderscheibe liefern Daten, die den 365 Tagen des Gemeinjahres zugeordnet sind:

1. Monatsring mit dem Monatsname und der Angabe, wie viele Tage der betreffende Monat hat (DECEMBER, HABET DIES 31).
2. Ring mit 366 abwechselnd weißen und roten Feldern für einen jeden Tag dieses Monats.
3. Ring mit Tagesdatum für die zwölf Monate.
4. Ring mit den Tagesbuchstaben A bis G für jeden Tag des Jahres.
5. Ring mit dem Name des Tages-Heiligen oder Name des Festtages.
6. Ring mit Ortszeit des Sonnenaufganges für Rostock für jeweils zwei Tage. Ein von der zentralen Deckscheibe kommender Zeiger reicht bis zum Ring 6 und weist auf die aktuelle Sonnenaufgangszeit. An der linken Seitenwand des Kalenderraums steht ein Kalendermann, der mit einem Stab das gegenwärtige Datum im Ring 3 anzeigt.

Die nächsten sieben Ringe liefern Daten, die 133 Jahren fest zugeordnet sind:

7. Ring mit der Ziffernfolge 1 bis 19 der Goldenen Zahl.
8. Jahresring von 1885 bis 2017.
9. Ring mit der Folge der Sonntagsbuchstaben A bis G.
10. Ring mit der Ziffernfolge 1 bis 28, Jahr im Sonnenzirkel.
11. Ring mit der Ziffernfolge 1 bis 15, die Römer-Zinszahl.
12. Ring mit der Anzahl der Tage und Wochen zwischen Weihnachten und Fastnachtsdienstag.
13. Ring mit den Osterterminen für die Jahre 1885 bis 2017.
14. Ring zeigt - wie schon beschrieben - die Dauer des lichten Tages an.
15. Ring zeigt - wie schon beschrieben - die Dauer des dunklen Tages an.

Am Außenrand der Kalenderscheibe befindet sich beim Datum des 25. Februar ein Sonnenzeiger, welcher den Ort der Sonne unter den Tierkreiszeichen angibt.

Die Ecken der Kalenderscheibe sind mit geschnitzten Figuren von vier sitzenden Weltweisen, die Schriftbänder halten, ausgefüllt. Der Kalenderraum wird seitlich von je zwei Säulen flankiert. Die Nische des Kalenderraumes ist seitlich durch je vier Rechtecke eingefasst. Die Flächen hinter und unter den Säulen sind reich kassettiert. Zwischen Kalendernische und Uhrscheibe wird auf fünf Tafeln auf die große Instandsetzung von 1641/43 hingewiesen. Ein hölzernes Gitter schützt die Uhr.

2.1.3 Aufsatz

Das Aufsatz-Geschoss (Abb. 2.3) oberhalb der Uhrscheibe wurde 1641/43 neu gestaltet. Auf dem obersten Sims stehen ein dreigeschossiger Turm, vier Engelsfiguren sowie zwei dreieckige Zierstücke mit weiteren Engeln und Adam und Eva im Zentrum. Die Etage unter diesem oberen Abschluss der Uhr ist auf die Christusfigur zentriert. Das Gesims links und rechts davon ist mit Säulen und Bögen gestaltet. In den Bögen stehen sechs der zwölf Apostel (vier an der Stirnseite, zwei an den Seitenflächen). Aus der Tür rechts der Christusfigur treten mittags um 12 Uhr und um Mitternacht die anderen sechs Apostel, umrunden die Christusfigur, wenden sich ihm zu, werden von ihm gesegnet und gehen durch die linke Tür ab. Ausgenommen davon ist die Figur des Judas, der sich Christus nicht zuwendet, nicht

gesegnet wird, und vor dem die linke Tür zuschlägt. Dort muss er bis zum nächsten Umgang bleiben.



Abb. 2.3: Der obere Abschluss des Gehäuses [SCHUKOWSKI 2004, S.6]

2.2 Das Uhreninnere

Das Gesamtwerk besteht aus sechs Werken (Abb. 2.4), die im Uhrgehäuse in drei Etagen angeordnet sind und mechanisch miteinander in Verbindung stehen. Es sind dies das Hauptwerk, das Zeigerwerk, das Stundenschlagwerk, das Musikwerk, das Laufwerk für den Figurenumgang und das Werk für die Kalenderscheibe.

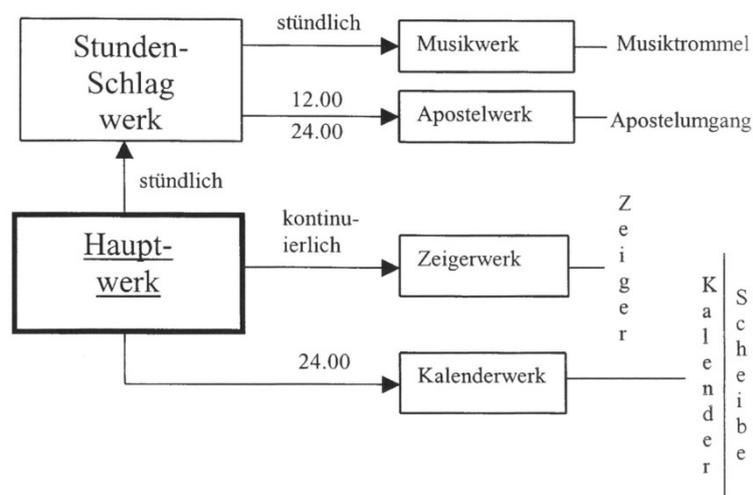


Abb. 2.4: Blockschema der Werke [SCHUKOWSKI 2004, S.2]

Alle Werke sind original und stammen aus der Entstehungszeit dieser Uhr um 1472 bzw. ihrer Erweiterung und Restaurierung 1641/43. Alle Werke funktionieren noch rein mechanisch. Vier Werke werden täglich von Hand aufgezogen. Lediglich das Kalenderwerk wird einmal wöchentlich von Hand aufgezogen.

Das Hauptwerk (Abb. 2.5 und Abb. 2.6) ist nicht nur das größte und umfangreichste der Werke, sondern von ihm werden auch die anderen Werke ausgelöst. Das Hauptwerk ist das Herz dieser Uhr. Von ihm wird das Zeigerwerk angetrieben, und es löst das Stundenschlagwerk und das Kalenderwerk (24-stündlich) aus. Vom Stundenschlagwerk werden das Musikwerk und das Apostelwerk (12-stündlich) in Gang gesetzt. Der Rahmen des Hauptwerkes besteht aus geschmiedeten Teilen, die durch Keile miteinander verbunden sind. Das Hauptwerk besitzt neun Zahnräder mit 20 bis 288 Zähnen und sieben Triebe (sechs bis zwölf Zähne bzw. Triebstecken), davon drei Laternentriebe. Das 24-Stunden-Rad als größtes Zahnrad hat einen Durchmesser von 1,12 m. Für eine volle Schwingung (Hin- und Hergang) braucht das Pendel drei Sekunden. Je ein Zapfen am Stundenrad und am 24-Stunden-Rad bewirken über Hebel und Seilzüge die Auslösung des in der darüber- bzw. darunterliegenden Etage befindlichen Stundenschlag- bzw. Kalenderwerkes.

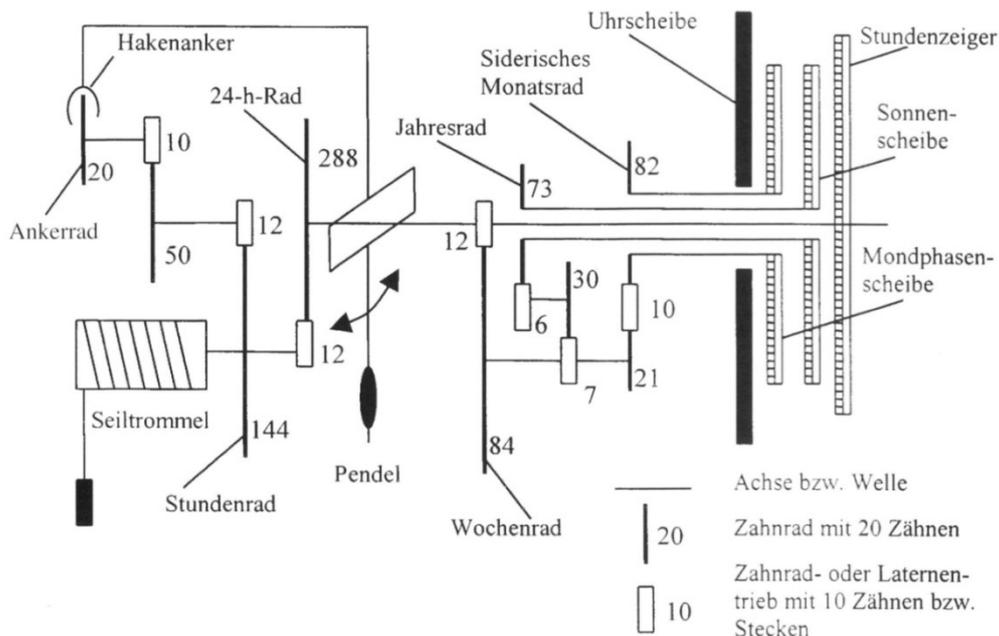


Abb. 2.5: Schema des Hauptwerks [SCHUKOWSKI 2004, S.2]

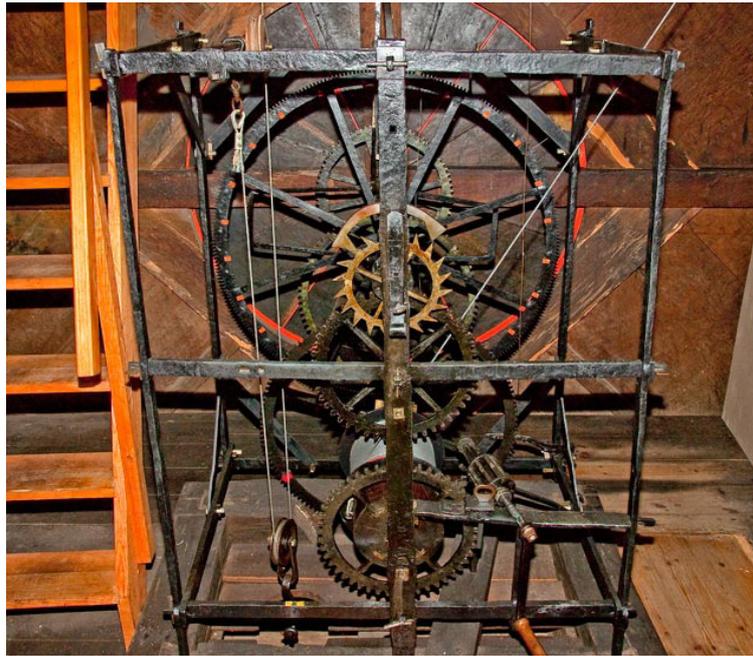


Abb. 2.6: Hauptwerk [ASTRO UHR 2012]

3. Terrestrisches Laserscanning

3.1 Prinzip des terrestrisches Laserscanning

Im Gegensatz zu den klassischen Verfahren der geometrischen Objekterfassung, bei welchen wenige, für das Messobjekt repräsentative Punkte aufgenommen werden, umfasst das terrestrische Laserscanning Verfahren, bei denen ein Laserstrahl die Oberfläche des Messobjektes flächenhaft in einem regelmäßigen Raster abtastet bzw. scant (Abb. 3.1). Als Messergebnis erhält der Anwender eine Punktwolke, die aus mehreren Millionen Punkten in Form von dreidimensionalen Koordinaten (X, Y, Z) besteht.

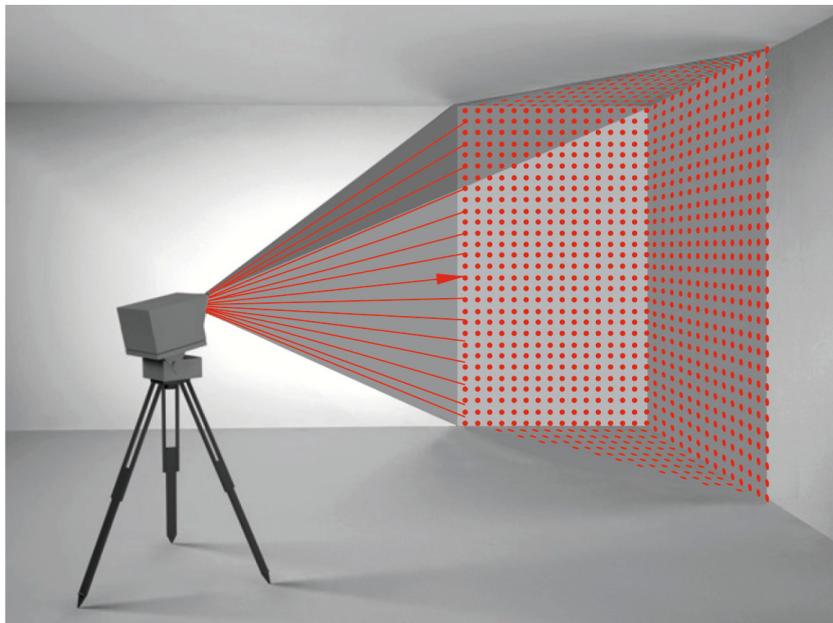


Abb. 3.1: Das Prinzip des terrestrischen Laserscanning [nach DONATH 2008, S.106]

Beim Laserscanning wird je nach Aufnahmeart zwischen "airborne" und "terrestrischen" Laserscanning unterschieden. Beim flugzeuggetragenen ("airborne") Laserscanning, wird die Erdoberfläche während einer Befliegung gemessen. Erfolgt die Vermessung hingegen bodengestützt auf der Erde spricht man vom terrestrischen Laserscanning.

3.2 Bauarten von Laserscannern

Laserscanner lassen sich bezüglich ihres Sichtfeldes in Panorama-Scanner und Kamera-Scanner einteilen (Abb. 3.2). Panorama-Scanner sind aufgrund ihrer

drehbaren Stehachse in der Lage einen Rundumscan durchzuführen. Bei Panorama-Scannern beträgt das Sichtfeld in horizontaler Richtung 360° und in vertikaler Richtung 270° bis 310° . Panorama-Scanner eignen sich besonders für die Bestimmung der Geometrie von Innenräumen. Kamera-Scanner verfügen über ein Kamera ähnliches Sichtfeld von ca. 60° in horizontaler und vertikaler Richtung. Aufgrund des eingeschränkten Sichtfeldes liegt die Anwendung von Kamera-Scannern insbesondere in der Erfassung von flächigen Objekte (z.B. Fassaden) [DONATH 2008, S.113; LUHMANN 2002, S.17].



Abb. 3.2: Sichtfeld von Panorama-Scanner (links) und Kamera-Scanner (rechts) [nach DONATH 2008, S.113]

3.3 Distanzmessungsverfahren

Weiterhin wird zwischen polar messenden Laserscannern, die durch Verfahren der elektrooptischen Distanzmessung die Entfernung zum Messobjekt ermitteln und Laserscannern, die die Entfernung zum Messobjekt durch das Triangulationsverfahren ermitteln, unterschieden. Polar messende Laserscanner benutzen zur elektrooptischen Distanzmessung entweder das Impulslaufzeitverfahren oder das Phasenvergleichsverfahren (nach [RESNIK et al. 2009, S.54ff.]).

Beim Impulslaufzeitverfahren (Abb. 3.3) werden vom Laserscanner viele kurze durch Modulationsverfahren erzeugte Laserlichtimpulse ausgesendet, welche die zu messende Strecke durchlaufen, am Zielobjekt (Reflektor) reflektieren und wieder vom Laserscanner empfangen werden. Die Distanz wird aus dem Zeitunterschied zwischen Aussendung und Empfang des Impulses (Impulslaufzeit), die ein Laufzeitmesser im Scanner misst, berechnet (nach [WITTE et al. 2011, S.299]).

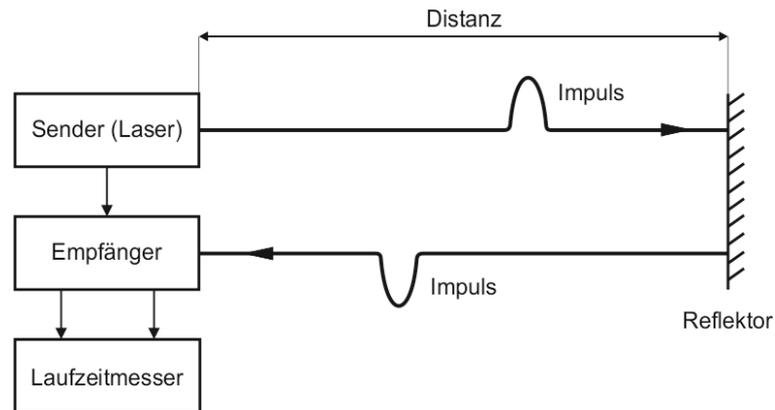


Abb. 3.3: Prinzip der Distanzmessung mittels Impulslaufzeitverfahren (nach [KAHMEN 2006, S.152])

Beim Phasenvergleichsverfahren (Abb. 3.4) wird kontinuierlich ein amplitudenmoduliertes Laserlicht vom Laserscanner ausgesendet und auf das Zielobjekt (Reflektor) geschickt und von dort zum Empfänger des Laserscanners reflektiert. Ein Phasenmesser im Laserscanner misst die Phasendifferenz $\Delta\lambda$ zwischen gesandter und empfangener Laserlichtwelle. Aus der gemessenen Phasendifferenz $\Delta\lambda$ und der Messwellenlänge λ kann die Entfernung grob berechnet werden. Damit die Distanzmessung genauer wird, werden je nach gewünschter Genauigkeit weitere Phasendifferenzmessungen mit kürzeren Wellenlängen durchgeführt. Ein Laserscanner mit einer Distanzmesseinheit, die auf dem Phasenvergleichsverfahren beruht, ist z.B. der IMAGER 5010 der Firma Zoller + Fröhlich GmbH (Z+F) [BANTEL 2004, S.119].

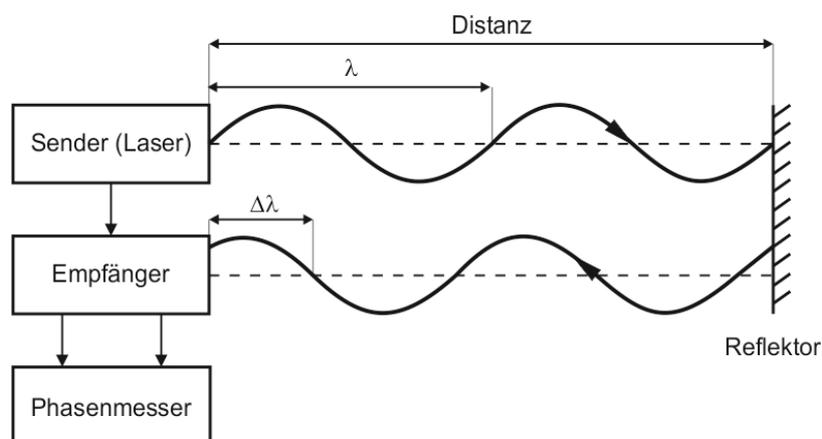


Abb. 3.4: Prinzip der Distanzmessung mittels Phasenvergleichsverfahren (nach [BANTEL2004, S.118; KAHMEN 2006, S.152])

4 Eingesetztes Instrumentarium und angewendete Software

Im folgenden Kapitel soll zunächst eine Übersicht über die verwendete Hardware gegeben werden. Anschließend wird die angewendete Software mit ihren Funktionen im Allgemeinen vorgestellt. Die detaillierte Beschreibung der Funktionen und Werkzeuge erfolgt dann in den nachfolgenden Kapiteln. Die hierbei verwendeten Informationen basieren hauptsächlich auf den Benutzerhandbüchern der einzelnen Geräte und Programme.

4.1 Instrumentarium

4.1.1 Laserscanner Z+F IMAGER 5010

Der in der Abbildung 4.1 dargestellte Laserscanner Z+F IMAGER 5010 der Firma Zoller + Fröhlich GmbH ist ein Panoramascanner mit einem horizontalen Sichtfeld von 360° und einem vertikalen Sichtfeld von 320°. Der IMAGER 5010 kann ohne zusätzliches Notebook oder anderes Steuergerät manuell über das Bedienfeld mit Display / Touchscreen (Abb. 4.2) gesteuert werden. Die Entfernungsmessung beruht auf dem Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens und die Auflösung der Entfernung erfolgt im 0,1 mm Bereich. Die Reichweite liegt bei maximal 187,3 m, die kleinste Messentfernung zum Messobjekt bei 0,3 m. Durch die hohe Messrate von 1.016.000 Pixel pro Sekunde wird das Messobjekt sehr schnell erfasst. Einen Überblick über die Auflösungsstufen des IMAGER 5010 gibt die Tabelle 4.1.



Abb. 4.1: Z+F IMAGER 5010 [Z+F]

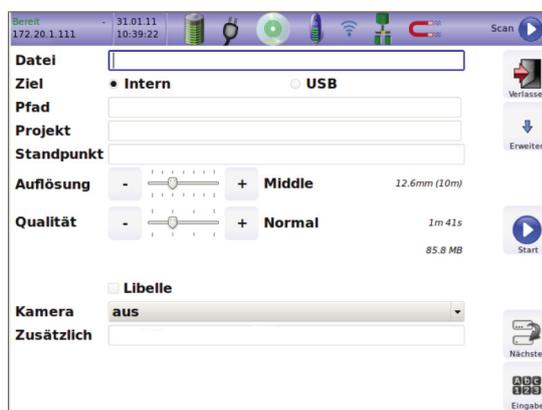


Abb. 4.2: Bedienfeld des Z+F IMAGER 5010.
Zu sehen ist das Scan-Menü [Z+F]

Auflösungsstufe	Pixel/360°	Scandauer (Qualität High)
Extreme High	100.000	ca. 162 Min.
Ultra High	40.000	ca. 26 Min. 56 Sek.
Super High	20.000	ca. 13 Min. 28 Sek.
High	10.000	ca. 6 Min. 44 Sek.
Middle	5.000	ca. 3 Min. 22 Sek.
Low	2.500	ca. 1 Min. 44 Sek.
Preview	1.250	---

Tab. 4.1: Auflösungsstufen des Z+F IMAGER 5010 [Z+F]

Die Scandaten des Laserscanners werden direkt auf die interne Festplatte oder einen angeschlossenen USB-Stick gespeichert und können über ein Netzkabel oder WLAN-Verbindung auf einen Notebook/PC übertragen werden. Die Stromversorgung des Scanners kann über ein Stromversorgungskabel oder über ein Wechselakku, welcher im Gehäuse des Scanners integriert ist, erfolgen.

4.1.2 Z+F MotorCam (M-Cam)

Die Z+F MotorCam der Firma Zoller + Fröhlich GmbH (siehe Abb. 4.3) ist eine digitale Industriekamera mit Schwenkmotor, die Panorama-Farbbilder zur Einfärbung der Punktwolke aufnimmt. Bei einer Gesamtpixelanzahl von 5 Millionen Pixeln besitzt die M-Cam eine Auflösung von 1920 x 2560 Pixeln. Die M-Cam wird fest auf dem Z+F IMAGER 5010 befestigt und über zwei USB-Kabel und ein LEMO-Kabel angeschlossen. Sowohl die Steuerung der Kamera als auch die Stromversorgung erfolgen über den Laserscanner. Es sind keinerlei Einstellungen an der Kamera selbst erforderlich.



Abb. 4.3: Z+F MotorCam [Z+F]

4.1.3 Digitale Kamera Nikon D40

Die digitale Spiegelreflexkamera NIKON D40 (Abb. 4.4) besitzt bei einer Gesamtpixelanzahl von 6,1 Millionen Pixeln eine Auflösung von 3008 x 2000 Pixeln.

Die Kamera verwendet ein Weitwinkelobjektiv des Typs Sigma EX F2.8D HSM Aspherical mit einer Brennweite von 14 mm und verfügt darüberhinaus über ein Display, welches für die Bildbetrachtung nach der Aufnahme benutzt werden kann. Damit die Kamera Panoramabilder für die Punktwolkencolorierung aufnehmen kann, wird sie auf einem Multirow Panoramakopf Manfrotto SPH 303 (Abb. 4.5) montiert.



Abb. 4.4: Nikon D40 mit Objektiv Sigma
EX 14mm F2.8D HSM Aspherical



Abb. 4.5: Panoramakopf Manfrotto
SPH 303 [MANFROTTO]

4.1.4 Tachymeter Sokkia NET2A

Das elektronische Tachymeter NET2A von Sokkia (Abb. 4.6) misst durch Anvisieren des zu messenden Punktes mit Fernrohr oder mit sichtbarem Laserpunkt, ausgehend von einem Instrumentenstandort, den Horizontalwinkel, den Vertikalwinkel und die Entfernung zum anvisierten Punkt [DONATH 2008, S.61-62]. Elektronische Tachymeter bestehen aus einem elektrischen Theodolit, zur Messung des Horizontal- und Vertikalwinkels, und einem elektrooptischen Distanzmesser. Die Übertragung der aufgenommenen Messdaten erfolgt mittels serieller Schnittstelle, als USB-Anschluss oder kabellose Datenübertragung mit Bluetooth. Tachymeter mit integrierter Recheneinheit zu Berechnung und Speicherung von Messwerten werden auch als Totalstation bezeichnet.



Abb. 4.6: Tachymeter Sokkia
NET2A

4.2 Software

4.2.1 Z+F LaserControl

Die Software Z+F LaserControl der Firma Zoller + Fröhlich GmbH bietet vielfältige Funktionen:

- Benutzeroberfläche zur Steuerung des Laserscanners Z+F IMAGER 5010
- 2D- und 3D-Visualisierung und Kontrolle der Scandaten
- Messfunktionen zur direkten Auswertung
- Registrierung der Scandaten
- Filterfunktionen zur Bereinigung der Scandaten
- Erstellen von definierten Schnitten aus der Punktwolke
- Erstellen von verzerrungsfreien Ansichten der Punktwolke (Orthophotos)
- Überlagerung der Punktwolke mit Bildinformationen (Punktwolken-colorierung)
- Erstellen von AVI-Videoformaten von Punktwolken

4.2.2 Geomagic Studio 2012

Studio 2012 ist eine Software von Geomagic zur Umwandlung von 3D-Scan- und Messdaten in Polygon-, Oberflächen- und CAD-Daten. Die Software umfasst folgende Funktionen:

- Scan- und Messdatenverarbeitung
- Visualisierung und Verarbeitung von Punktwolkendaten in 3D-Modellen
- Erstellung von kompatiblen Modellen, welche als Solid- oder parametrische Daten in den CAD-Programmen verwendet werden können
- Erstellung von Querschnitten aus Punktwolken und Polygonmodellen
- automatische Reparatur von Messdaten bei der Modellerstellung
- Integrierter CAD-Import für Pro/ENGINEER Wildfire 5.0

4.2.3 Pro/ENGINEER Wildfire 5.0

Die 3D-CAD-Software Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 (auch bekannt unter der Abkürzung Pro/E) von der Firma Parametric Technology Corporation (PTC) beinhaltet unter anderem folgende Funktionen:

- 3D-Volumenkörpermodellierung
- Erstellung von 2D- und 3D-Zeichnungen
- Dokumentation und Modellierung von Blech-, Schweiß- und Baugruppen
- Erstellung mechanischer Baugruppen und Durchführung von Bewegungsstudien

4.2.4 PTGui Pro

PTGui ist eine Software, die Einzelbilder, welche mit einem Panoramakopf aufgenommen wurden und aus mehreren übereinanderliegenden Reihen bestehen können, automatisch zu einem Panoramabild zusammenfügt. Bildverzerrungen, Bildfehler oder Unterschiede zwischen den Einzelbildern (z.B. Helligkeit, Farbe etc.) werden von der Software erkannt und automatisch behoben bzw. angeglichen. Die Software arbeitet nicht nur automatisch, sondern erlaubt die volle manuelle Kontrolle über jeden einzelnen Parameter.

4.2.5 Corel Photo-Paint X5

Corel Photo-Paint ist ein Programm, mit dem man digitale Bilder bearbeiten, retuschieren oder mit Effekten ausstatten kann. Das Programm ist Bestandteil des Grafikprogrammpaketes "CorelDRAW Graphics Suite X5".

5 Datenerfassung

5.1 Aufnahmeplanung und -vorbereitung

Den Messungen vor Ort geht eine umfangreiche Vorbereitung voraus. Dazu gehört neben dem Erlernen des Umgangs mit dem Laserscanner eine Vorbesichtigung des Objekts, um mögliche Laserscannerstandpunkte für eine vollständige Objektaufnahme zu erkunden.

5.2 Aufnahmedurchführung

5.2.1 Laserscannermessung

Die Aufnahme der Astronomischen Uhr erfolgte mit dem 3D-Laserscanner Z+F IMAGER 5010 an zwei Messtagen (Abb. 5.1). Der Scanner wurde auf einem Stativ aufgebaut, so dass die Scannerachse ca. 2m über Boden lag. Für die vollständige Erfassung der Uhr wurden Messungen von elf Laserscannerstandpunkten aus durchgeführt. Die Abb. 5.3 zeigt die Verteilung der Standpunkte über den Aussen- und Innenbereich der Uhr. Als Verknüpfungspunkte der einzelnen Scans bzw. Standpunkte dienten Targets, die am Objekt gleichmäßig verteilt angebracht worden sind. Im Hinblick auf die spätere Registrierung wurde hierbei darauf geachtet, dass immer mindestens drei Targets vom Laserscannerstandpunkt eingesehen werden konnten. Verwendet wurden zwei verschiedene Targetvarianten (Abb. 5.2).



Abb. 5.1: Z+F IMAGER 5010 mit Stativ im Einsatz



Abb. 5.2: Z+F ProfiTarget mit Magnettfuß (oben) und Z+F AutoTarget (unten)

Zum einen Z+F AutoTargets, die mit Hilfe von doppelseitigem Klebeband am Objekt befestigt werden können und zum anderen Z+F ProfiTargets, die sich zwei axial um das Targetzentrum drehen können und auf einem Magnetfuss stehen.

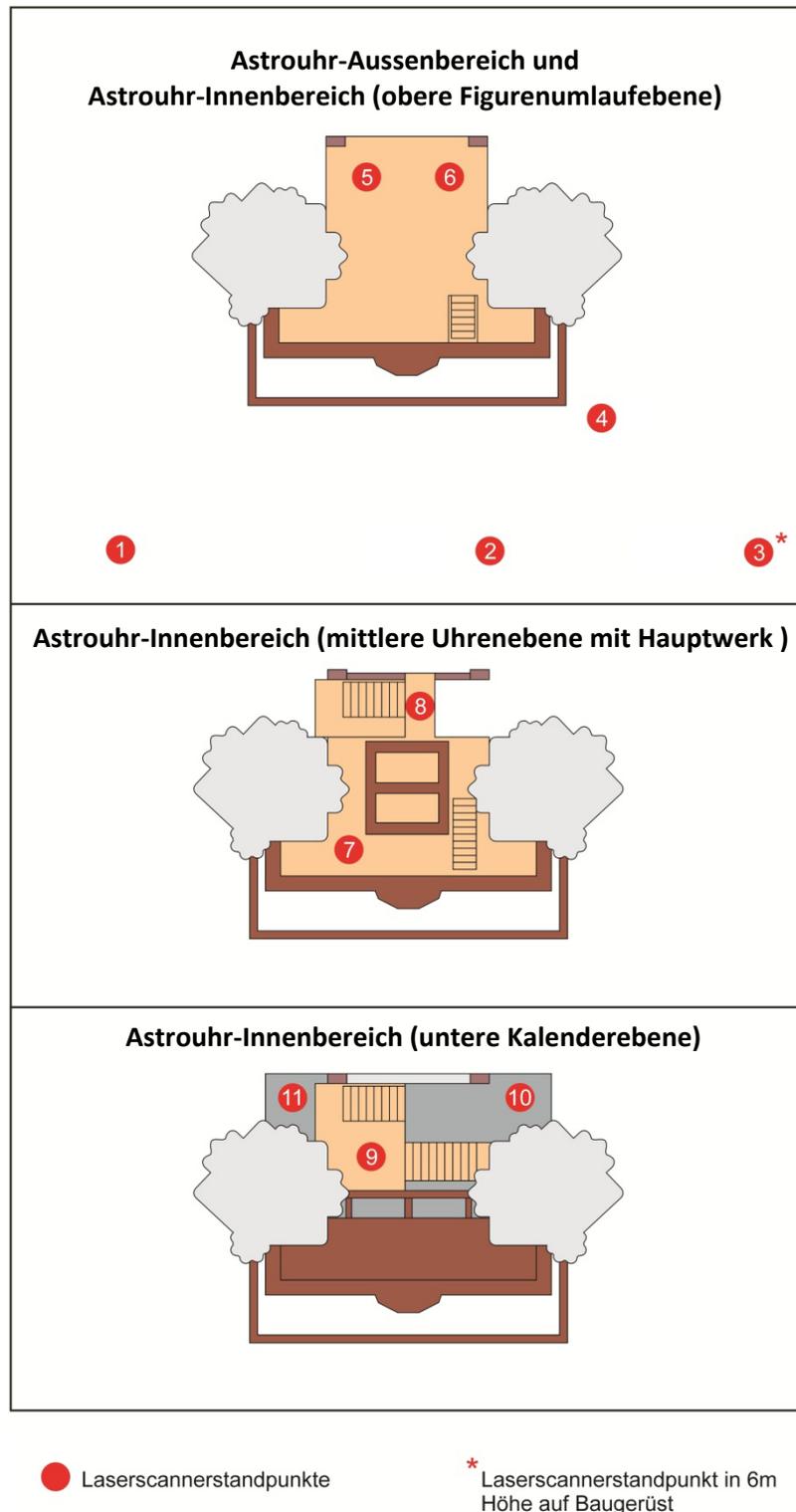


Abb. 5.3: Laserscannerstandpunkte der Astronomischen Uhr. Zu sehen sind verschiedene Draufsichten auf Querschnitte der Uhr

Die Objektaufnahme an jedem Laserscannerstandpunkt, mit Ausnahme der Standpunkte 4 bis 11, läuft in zwei Schritten ab. In einem ersten Schritt führt der IMAGER 5010 ein 360° Rundumscann in der Auflösungsstufe "High" (Scanqualitätsstufe "High") durch, wodurch die gesamte Standpunktumgebung zusammen mit allen sichtbaren Targets erfasst wird. Im zweiten Schritt wird nur der Bereich, in dem sich das Aufnahmeobjekt befindet, gescannt (Auflösungsstufe "Super High", Scanqualitätsstufe "High"). Für den Laserscannerstandpunkt 4 wurde nur der erste Schritt durchgeführt. Für die Laserscannerstandpunkte 5 bis 11 wurde auch nur der erste Schritt durchgeführt, allerdings in der Auflösungsstufe "Middle" (Scanqualitätsstufe "High"). Die Steuerung des Scanners erfolgte ohne zusätzliches Notebook manuell über das Bedienfeld mit Display, wodurch sich die Einsatzbereitschaft wesentlich beschleunigte. An beiden Tagen wurde die Laserscannermessung von einer dritten Person begleitet, die beim Scannen und Transport der Ausrüstung half.

5.2.2 Panoramafotografie mit der Z+F MotorCam

Vor Inbetriebnahme muss die Kamera über das Laserscanner-Bedienfeld zunächst aktiviert werden, damit der Laserscanner die Kamera ansteuern kann. Danach werden über das Bedienfeld die Belichtungsparameter der Kamera eingestellt. Es sind vier verschiedene Belichtungsoptionen möglich: "Dunkel", "Normal", "Hell" und "Sonne". In der schlecht beleuchteten Kirche wurde die Belichtungsoption "Dunkel" gewählt, um optimale Fotoaufnahmen zu erhalten. Die Kamera beginnt mit der Bilddatenerzeugung nachdem der Laserscanner den 360° Rundumscan beendet hat und in die Ausgangsposition zurückgefahren ist. Dann fährt der Laserscanner die horizontalen Bildpositionen an, während die Kamera die vertikalen Bildpositionen anfährt. Um den ganzen Vollraum abzudecken, macht die Kamera insgesamt 28 Farbbilder, die sich auf drei Bildreihen in vertikaler Richtung aufteilen und den gleichen Namen wie der Scan erhalten. Die Farbbilder werden auf der internen Festplatte des Laserscanners gespeichert. Die M-Cam wurde nur für die Laserscannerstandpunkte 1 bis 6 eingesetzt, da die Farbinformationen von diesen Standpunkten für der Einfärbung der Punktwolke von Bedeutung sind.

5.2.3 Panoramafotografie mit der Nikon D40

Aufgrund der Dunkelheit in der Kirche wurde sicherheitshalber zusätzlich die Nikon D40 für Panoramafotos verwendet. Die auf dem Panoramakopf montierte Nikon D40 (Abb. 5.4) kam wie die M-Cam nur bei den Laserscannerstandpunkten 1 bis 6 zum Einsatz. Nachdem der Standpunkt abgescannt und mit der M-Cam abfotografiert wurde, wurde der Laserscanner zusammen mit der M-Cam vom Stativ abgebaut und stattdessen der Panoramakopf mit der Nikon D40 montiert. Über drei rastbare Schlitten mit Skalen wurde der Nodalpunkt am Panoramakopf eingestellt. Die Verstellmöglichkeit um die horizontale und vertikale Achse wird beim Panoramakopf durch eine Winkelskala und einen Klickstop-Mechanismus vereinfacht. Zunächst wurden drei Bildreihen mit maximaler Auflösung in vertikaler Richtung bei $+45^\circ$, 0° und -45° nacheinander aufgenommen. Pro Bildreihe ergab das 12 Fotoaufnahmen bei einer kompletten horizontalen 360° Drehung mit einer 30° Schrittweite. Abschließend wurde jeweils noch ein Bild in vertikaler Richtung bei $+90^\circ$ (Decke) und -90° (Boden) gemacht. Insgesamt wurden also 38 Farbfotos pro Standpunkt gemacht.



Abb. 5.4: Nikon D40 montiert auf Panoramakopf

5.2.4 Tachymetermessung

Parallel zur Laserscannermessung wurden die Laserscannerstandpunkte mit dem elektrischen Tachymeter Sokkia NET2A von der bereits oben erwähnten dritten Person über reflektierende Klebezielmarken, welche verteilt am Objekt angebracht wurden, vermessen. Alternativ zu den Marken wurden auch andere gut identifizierbare Punkte (z. B. Eckpunkte) verwendet. Die Lageabweichungen der Messungen lagen im Bereich zwischen 3,4 bis 3,6 mm.

6 Datenauswertung

Während das vorherige Kapitel einen Überblick über die Aufnahme der Messdaten gibt, soll in diesem Kapitel die Auswertung der Messdaten mit verschiedenen Softwarepaketen erläutert werden. In der nachfolgenden Abbildung wird die Aufbereitung der Messungsdaten schematisch dargestellt.

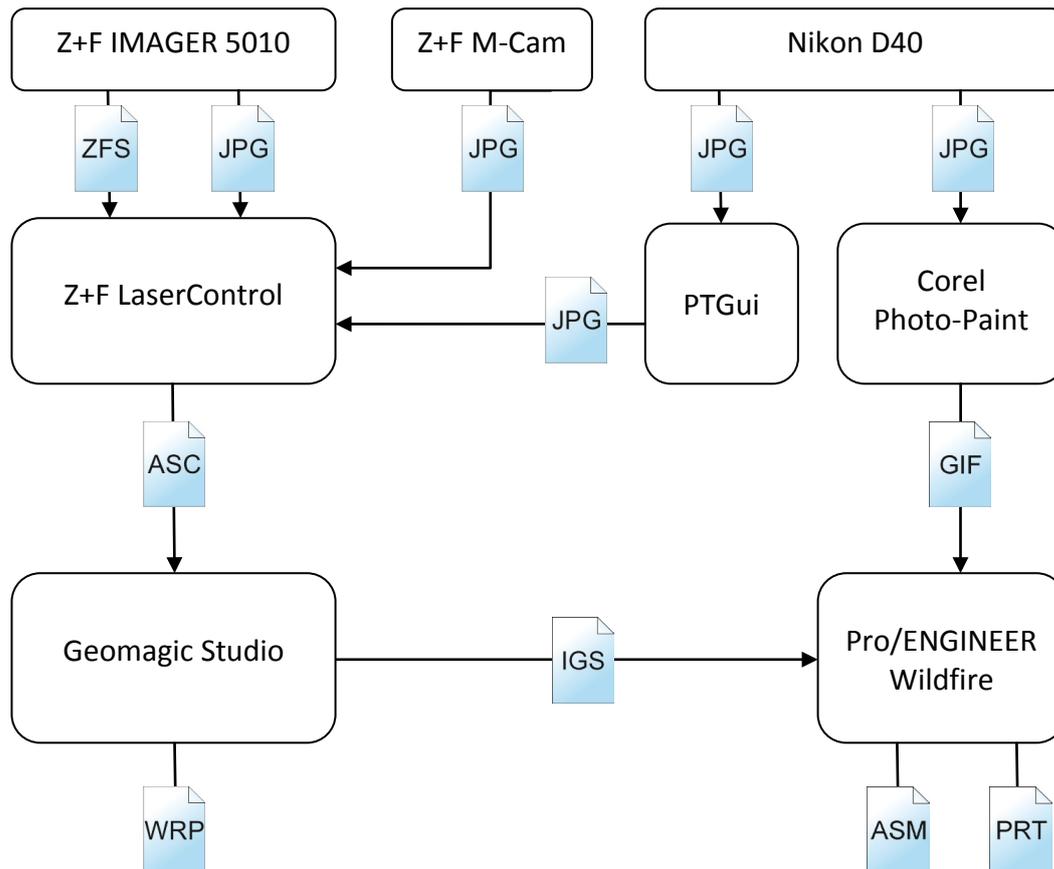


Abb. 6.1: Arbeitsablauf

Die erfassten Scandaten werden mittels USB-Stick von der internen Festplatte des Scanners auf den PC übertragen. Anschließend wird in Z+F LaserControl ein neues Projekt angelegt und die Scandaten, die paarweise vorkommen und die Dateierung ".zfs" und ".jpg" besitzen, importiert. Die ZFS-Datei enthält die Messdaten und die JPG-Datei eine Voransicht des jeweiligen Scans. Jede Laserscanner-Aufnahme liefert als Ergebnis mehrere Millionen 3D-Punkte, die das Aufnahmeobjekt repräsentieren und in Z+F LaserControl als 2D-Grauwertbild oder als 3D-Punktswolke dargestellt werden können.

6.1 Filterung der Punktwolke mit Z+F LaserControl

Z+F LaserControl bietet die Möglichkeit nicht benötigte Punkte aus der Punktwolke durch Filterung zu entfernen. Durch die Filterung werden die Punkte jedoch nicht gelöscht, sondern es wird nur eine Maske erzeugt, die die Punkte ausblendet. Die gefilterten Stellen werden in den 2D-Grau-Ansichten dann je nach Filterungsart mit einer entsprechenden Farbe dargestellt (Abb. 6.2).

Folgende Filter stehen zur Verfügung:

- Der *Intensity-Filter* entfernt alle Punkte, deren Intensität unterhalb eines Mindestwertes bzw. oberhalb eines Maximalwertes liegen.
- Der *Invalid-Filter* entfernt alle Punkte, die unterhalb der minimalen Messentfernung des Scanners liegen.
- Der *Range-Filter* entfernt alle Punkte, die außerhalb der maximalen Messentfernung des Scanners liegen.
- Der *MixedPixel-Filter* entfernt alle Punkte, die an Kanten entstehen, wenn der Laserstrahl auf Grund seines Durchmessers in zwei Teilstrahle aufgeteilt wird.
- Der *SinglePixel-Filter* entfernt alle Punkte, die ohne einen direkten Nachbarpunkt vorkommen, z.B. Staubpartikel in der Luft (nicht angewendet).

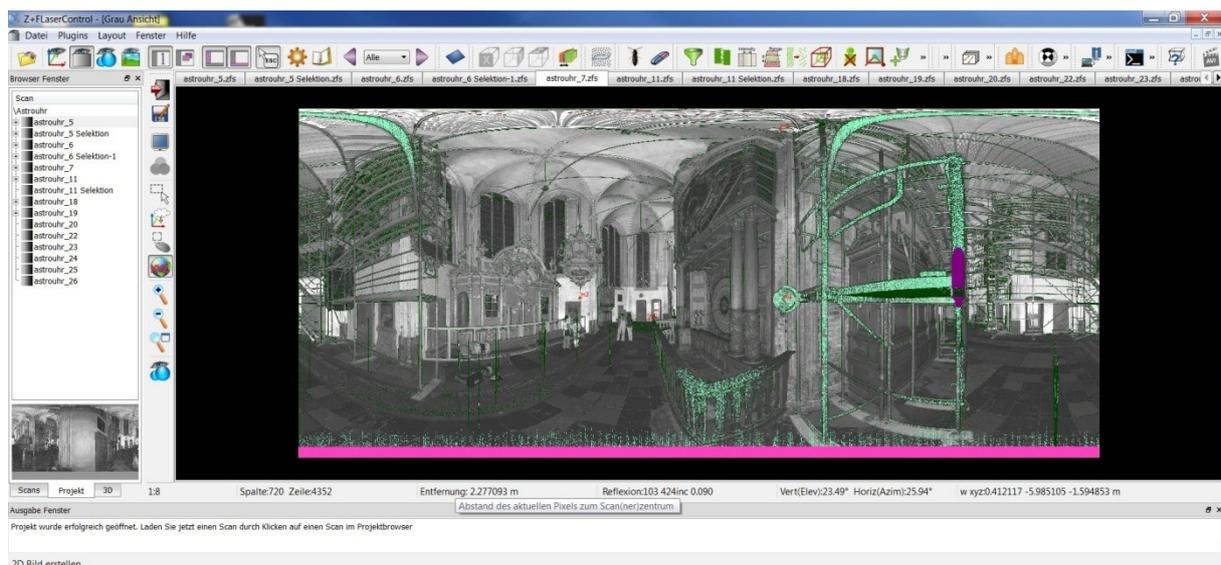


Abb. 6.2: 2D-Grau-Ansicht eines gefilterten Scans in Z+F LaserControl

6.2 Verknüpfung der Punktwolken mit Z+F LaserControl

Die Punktwolke eines Einzelscans befindet sich zunächst in einem lokalen Koordinatensystem. Um die Punktwolken mehrerer Einzelscans miteinander zu verknüpfen, ist es notwendig, diese in ein gemeinsames übergeordnetes Koordinatensystem zu überführen. Für diese Registrierung der Einzelscans müssen identische Passpunkte in den verschiedenen Scans gemessen werden. Als Passpunkte werden die Targets verwendet, aber auch andere gut identifizierbare Punkte (z B. Eckpunkte) können alternativ benutzt werden.

Die halbautomatische Target-Messung erfolgt über die Funktion "Erkenne (Fit) Target". In dem sich nun öffnenden Fenster "Target zum Scan hinzufügen" (Abb. 6.3) wird zunächst die Mitte des Targets grob markiert und über ein Lupenfenster der Target-Mittelpunkt genauer bestimmt. Die Software versucht daraufhin automatisch die Mitte des Targets exakt zu bestimmen.

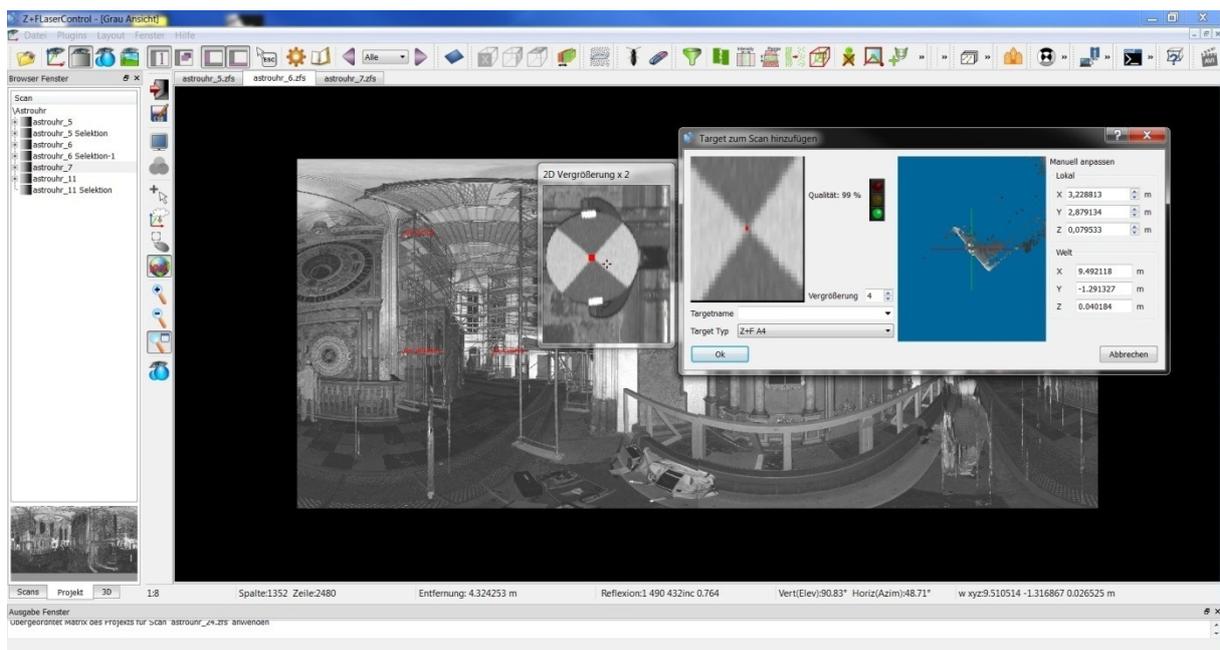


Abb. 6.3: Targetmessung

Sind in jedem Einzelscan genügend Targets identifiziert worden, kann nun über die Funktion "Registrieren aller Scans" mit der Verknüpfung aller Einzelscans begonnen werden. Daraufhin öffnet sich das Fenster "Projekt registrieren", in welches man weitere Registrierungsparameter eingibt. Hier wird zuerst die Punktdaten mit den Koordinaten der tachymetrisch angemessenen Scannerstandpunkte eingelesen.

Anschließend werden die für die Registrierung genutzten Scannerstandpunkte und ein Masterscan, welcher als Orientierung für die anderen Scannerstandpunkte dient, ausgewählt. Als Masterscan wurde der Scan mit der Nummer 6 ausgewählt, in dem die meisten Verknüpfungspunkte enthalten waren. Nach Abschluss der Registrierung erscheint ein Fenster mit dem Ergebnis der Registrierung. Aus diesem Fenster war zu entnehmen, dass für die Gesamtpunktwolke insgesamt 15 Scans registriert worden sind. Zur visuellen Überprüfung kann sich der Benutzer in einer 3D-Graphik die registrierte Gesamtpunktwolke (Abb. 6.4) anzeigen lassen.

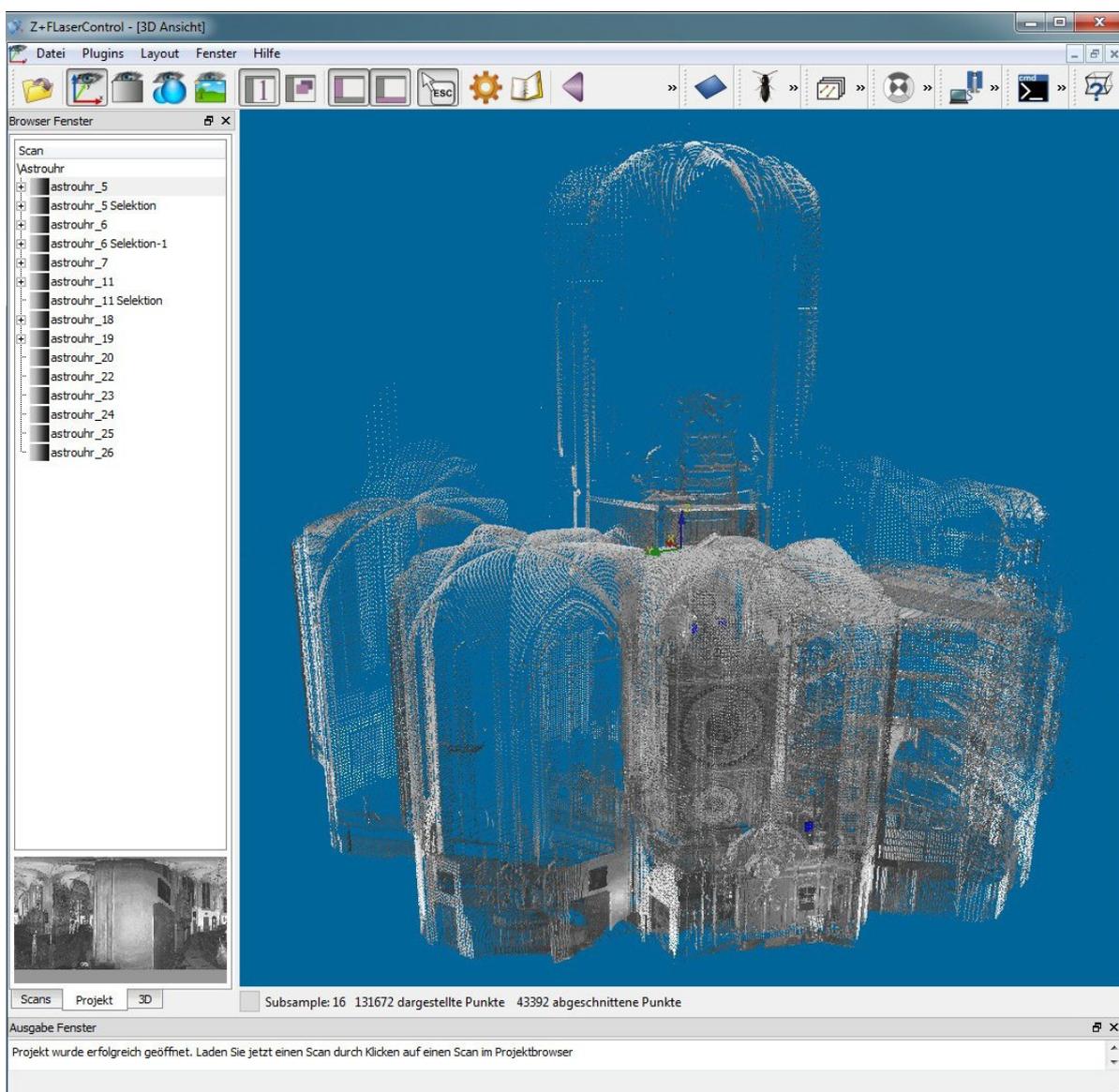


Abb. 6.4: Seitenansicht der registrierten 3D-Gesamtpunktwolke

6.3 Punktwolkencolorierung

Eine Colorierung der Punktwolke hat den Vorteil, dass das Messobjekt anhand seiner farblichen Darstellung besser erkannt und analysiert werden kann, als aufgrund rein geometrischer Merkmale. Die Einfärbung der Punktwolke erfolgt durch eine Überlagerung der Punktwolke mit Farbinformationen, welche aus digitalen Bildern gewonnenen werden. Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, wurden vom Messobjekt digitale Farbfotos geschossen, einmal mit der Z+F MotorCam und einmal mit der digitalen Spiegelreflexkamera Nikon D40. Diese Bilder werden nun separat für die Punktwolkencolorierung verwendet.

6.3.1 Einfärbung der Punktwolke unter Nutzung der Z+F MotorCam-Bilder mit Z+F LaserControl

Beim Übertragen der erfassten Scandaten von der internen Festplatte des Scanners auf den PC werden auch die jeweiligen von der Z+F MotorCam aufgenommenen Farbbilder im gleichen Ordner im JPG-Format abgelegt. Die Bilder sind im Z+F LaserControl-Browserfenster direkt unter dem jeweiligen Scan zusammengestellt. Für die Erstellung einer farbigen Punktwolke muss zunächst die von Z+F mitgelieferte Kalibrierdatei mit der Funktion "Camera Calibration file" importiert werden. Mit der Funktion "Color Mapping Properties" werden anschließend die zur Einfärbung gewünschten Scans, die zugehörigen Bilder, das Bildexportformat (jpg) und die Kalibrierdatei ausgewählt. Um die exakte Position der Z+F MotorCam zu erhalten, ist eine externe Orientierung mittels identischer Punkte erforderlich, denn sowohl die Lage des Kameramotors zum Scannerzentrum, als auch die Lage der Kamera zum Kameramotor sind nicht bekannt. Über die Funktion "Segment Featurpoints" werden dann identische Punkte in einem Scan und den zugehörigen Bildern ermittelt. Sind genügend Punkte identifiziert, wird nach Auswahl der Option "Auto Register Camera vs. Scanner" mit der externen Orientierung begonnen. Nach Abschluss der externen Orientierung erscheint ein Fenster mit dem Ergebnis. Mit "Generate Color Scans" wird die Farbe der Kamerabilder auf den Scan gemappt. Dieser Colorierungsprozess, wurde für jeden Scan (Laserscannerstandpunkt 1 bis 6) einzeln durchgeführt. Nach Überprüfung der Ergebnisse wurden schließlich nur die

Scannerstandpunkte 5 und 6 mit den M-Cam-Bildern coloriert. Das Ergebnis eines eingefärbten Scans ist in der nachfolgenden Abb. 6.5 dargestellt.

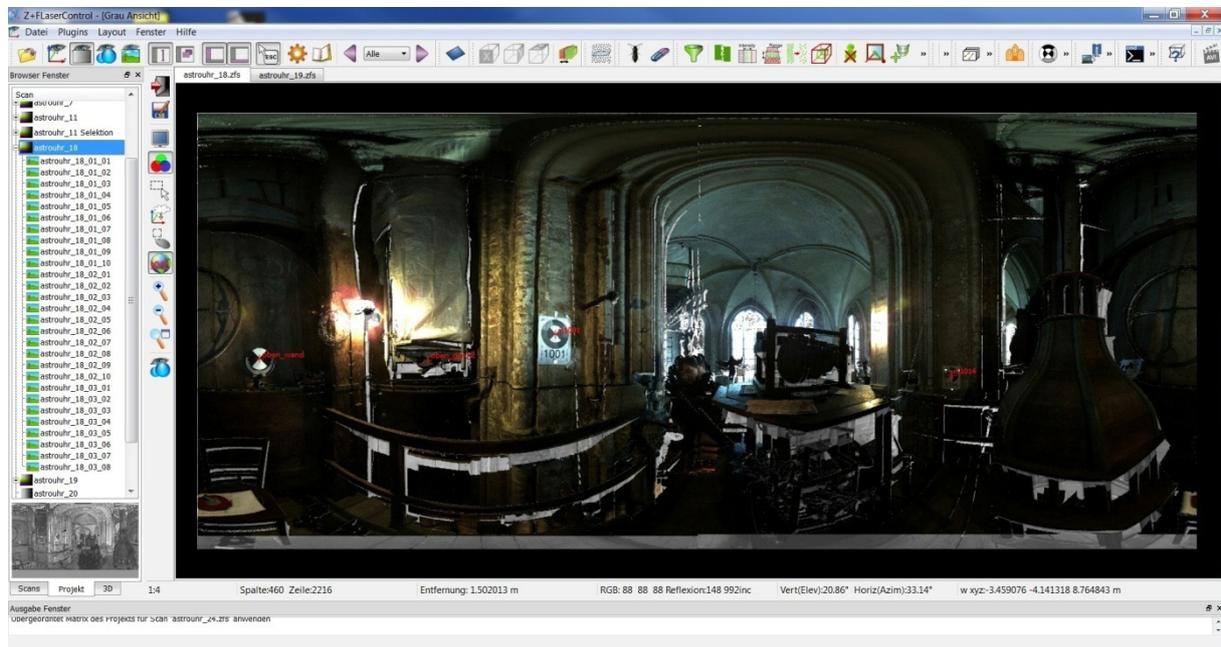


Abb. 6.5: Eingefärbter Scan unter Nutzung der Z+F MotorCam (Laserscannerstandpunkt 6)

6.3.2 Panoramabilderzeugung mit PTGui

Das Zusammenfügen der 38 digitalen Bilder, die pro Scannerstandpunkt mit der Nikon D40 erzeugt wurden und im JPG-Format vorliegen, erfolgt mit dem Programm PTGui (Abb. 6.6). Der Prozess, aus verschiedenen kleinen Einzelbildern ein großes Panoramabild herzustellen, nennt sich auch "Stitching", abgeleitet vom englischen Begriff "stitch" (=nähen). Die verschiedenen Einzelbilder werden zunächst im "Project Assistant" über die Schaltfläche "Load images" in die Software eingefügt. Über einen Rotate-Button können die einzelnen Bilder gegebenenfalls gedreht werden. Über die Schaltfläche "Align images" sucht die Software dann mehrere identische Punkte auf angrenzenden Einzelbildern und positioniert mit diesen Punkte-Paaren die Einzelbilder zueinander. Dabei wird anhand der EXIF-Daten der Bilder die Brennweiteinstellung der Kamera ermittelt. Nach einem erfolgreichen Ausrichten öffnet sich automatisch das Fenster "Panorama Editor", in dem eine Voransicht des Panoramabildes gezeigt wird. In diesem Fenster ist es außerdem möglich den Mittelpunkt sowie den Horizont des Panoramabildes zu verschieben und Einstellungen für Blickwinkel ("Field of view") und Projektionstypen ("Projection") zu

tätigen. Verwendet wurde der Projektionstyp "Equirectangular" (sphärische Projektion) bei dem das Panorama auf die Innenseite einer Kugel projiziert und die gesamte Umgebung (360x180°) abgebildet werden kann. Bei Fotos, die große gleichfarbende Flächen enthalten, kann es vorkommen, dass die Software fehlerhafte Bildpunkte setzt. Hier müssen im Reiter "Control Points" die fehlerhaften Bildpunkte gelöscht und manuell neu gesetzt werden. Das Panoramabild wird abschließend über die Schaltfläche "Create panorama" im "Project Assistant", unter Auswahl der Bildausgabegröße (optimum size), des Bildformates (jpg) und des Dateinamen, komplett erstellt.

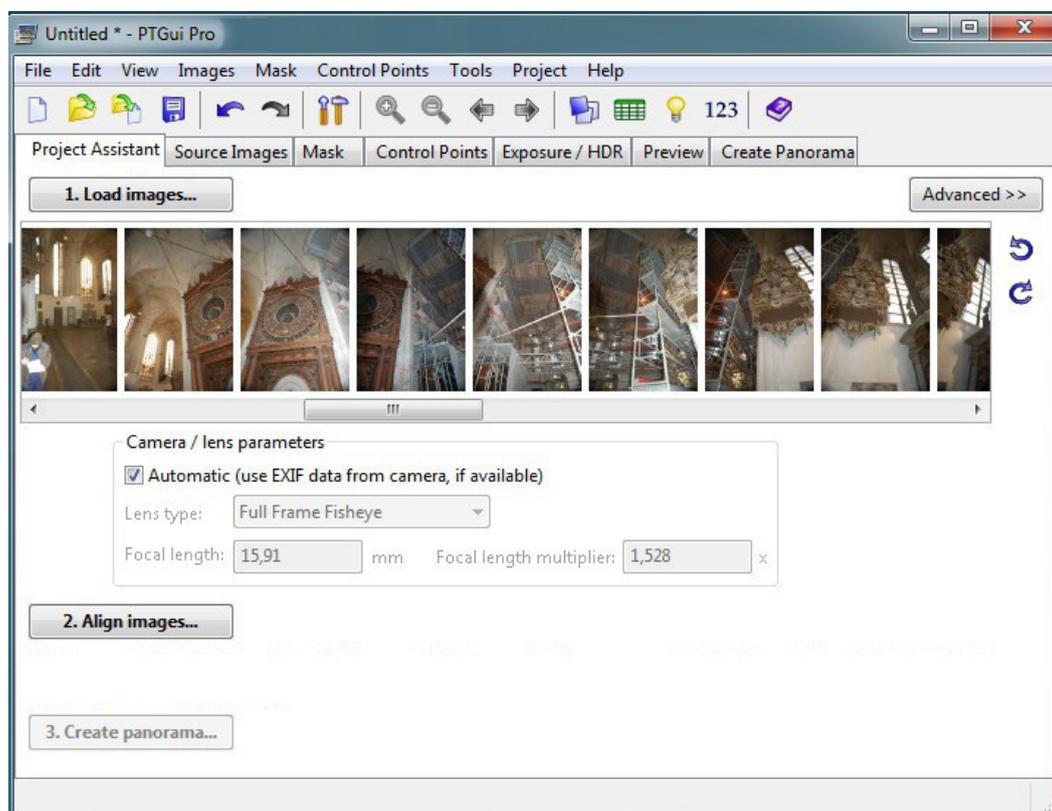


Abb. 6.6: Benutzeroberfläche von PTGui

6.3.3 Einfärbung der Punktwolke unter Nutzung der Panoramabilder mit Z+F LaserControl

Die mit PTGui erstellten Panoramabilder werden im Projektordner zusammen mit den ZFS-Scandateien gespeichert und im Z+F LaserControl-Browserfenster dem jeweiligen Scan über die Option "Bild hinzufügen" zugeordnet. Für die Erstellung einer colorierten Punktwolke muss weiterhin eine Kalibrierdatei mit der Funktion

"Camera Calibration file" und einer vordefinierten Spheron-Kalibrierdatei definiert werden. In den Parametereinstellungen der Kalibrierdatei wird als Model die Option "Panoramacamera (Spherical)" ausgewählt und die Breite und Höhe des Panoramabildes in Pixel eingegeben. Mit der Funktion "Color Mapping Properties" wird dann der zur Colorierung gewünschte Scan, das zugehörige Panoramabild und die erstellte Kalibrierdatei ausgewählt. Über die Funktion "Passpair definition" müssen dann identische Passpunkte im Scan und im zugehörigen Panoramabild markiert werden. Sind genügend Passpunkte identifiziert, wird über die Funktion "Calculate Camera Calibration" und über die Schaltfläche "Run" mit der externen Kalibrierung begonnen. Nach Abschluss der externen Kalibrierung erscheint ein Fenster mit dem Ergebnis. Mit der Funktion "Generate Color Scans" werden die Farbinformationen des Panoramabildes schließlich auf den Scan übertragen.

Jeder Scan (Laserscannerstandpunkt 1 bis 4) wurde nach dem oben erläuterten Colorierungsprozess einzeln eingefärbt. Das Ergebnis eines eingefärbten Scans ist in Abb. 6.7 dargestellt.

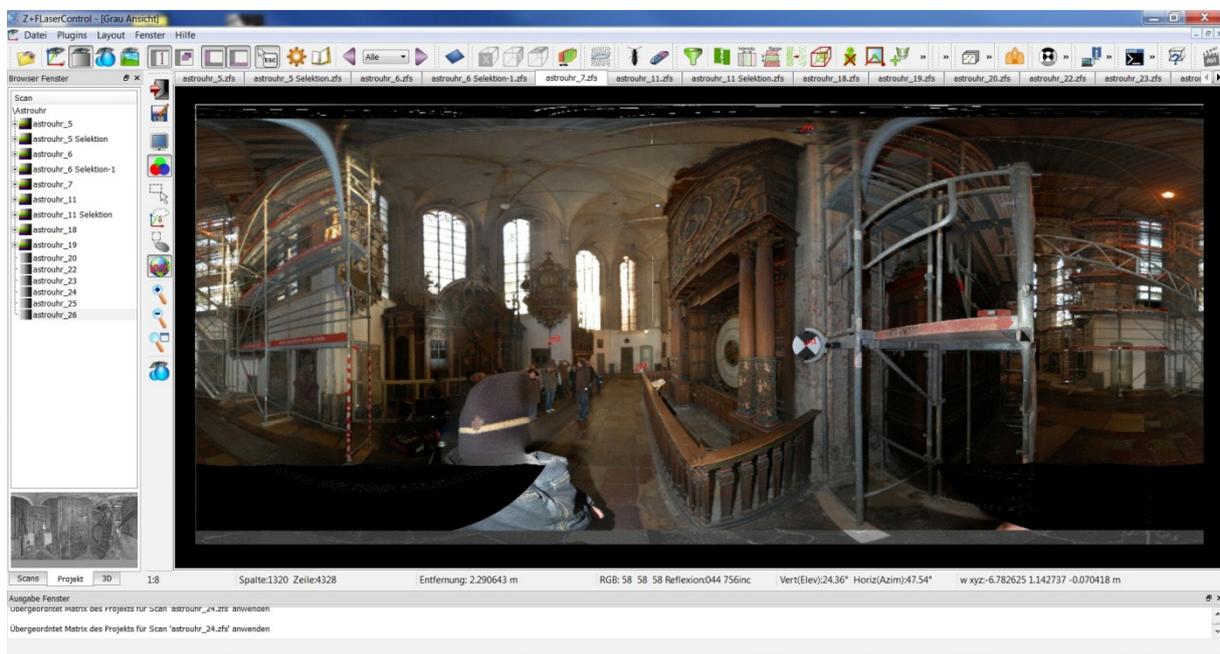


Abb. 6.7: Eingefärbter Scan unter Nutzung der Digitalkamera Nikon D40 (Laserscannerstandpunkt 4)

Die colorierte Gesamtpunktwolke ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

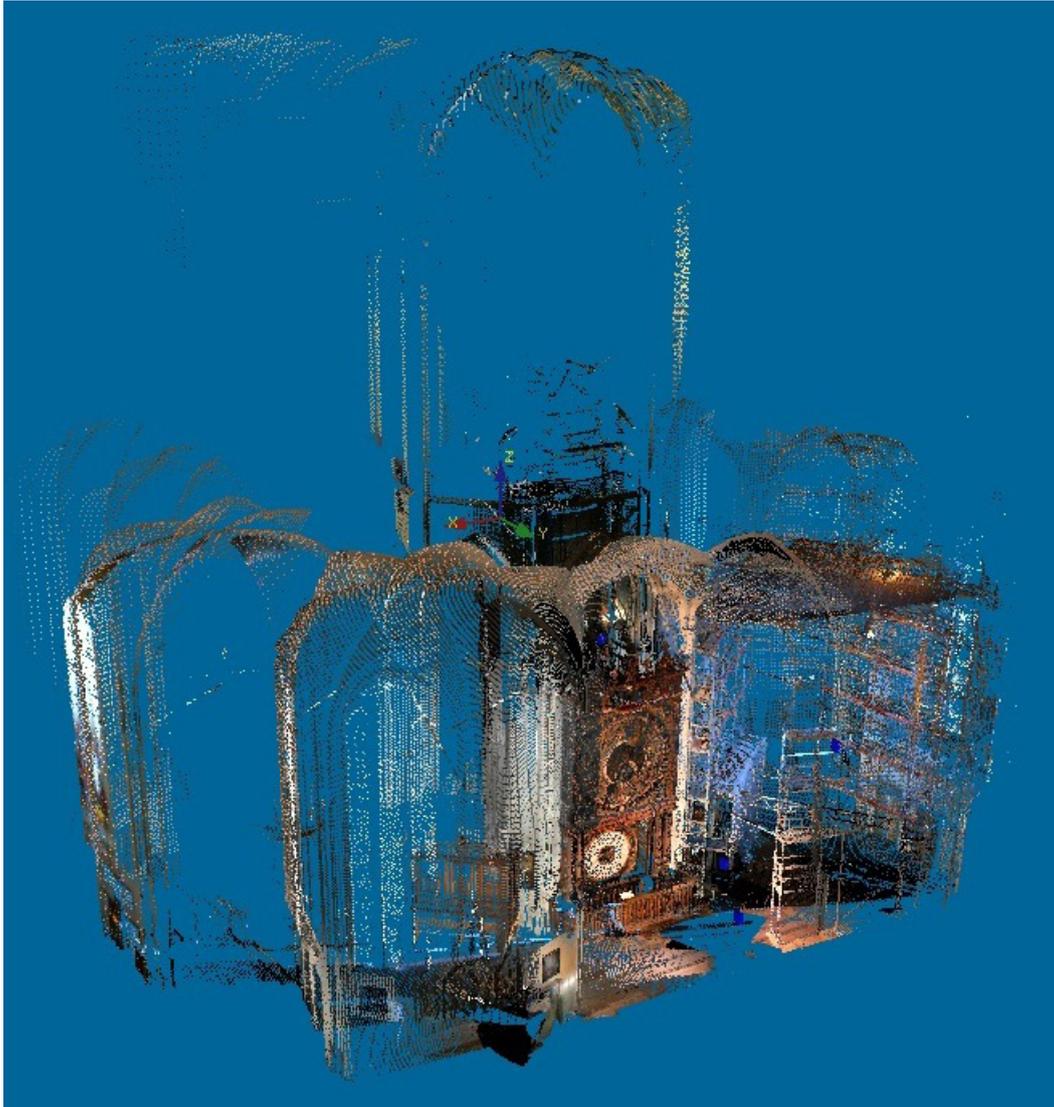


Abb. 6.8: Colorierte 3D-Gesamtpunktwolke

6.4 Geomagic Studio

6.4.1 Bereinigen der registrierten Punktwolke

Für die weitere Verarbeitung der registrierten Punktwolke ist es sinnvoll die Menge der Punkte zu reduzieren und Punkte, die für die Modellobjektbildung irrelevant sind, aus der Punktwolke zu eliminieren. Für das Bereinigen der registrierten Punktwolke wird Geomagic Studio verwendet. Da der Import des ZFS-Dateiformates der Firma Zoller & Fröhlich in Geomagic Studio jedoch nicht möglich ist, müssen die einzelnen registrierten Punktwolkedaten in Z+F LaserControl als XYZ/ASCII-Datei abgespeichert werden, um sie in Geomagic Studio importieren zu können. In Geomagic Studio lassen sich dann die einzelnen Punktwolkedaten über den Applikationsbutton / Import importieren. Bevor die Punktwolkedaten jedoch geöffnet

werden, kann der Anwender die zu importierende Punkteanzahl auf einen geringeren Prozentsatz reduzieren. Beim Import der Punktwolken wurde die Punkteanzahl jedoch beibehalten und nicht reduziert. Nachdem die Punktwolke importiert sind, muss der Anwender nur noch die Einheit in der Registerkarte "Werkzeuge" mit der Schaltfläche "Einheiten" festlegen.

Über die Registerkarte "Auswählen" und dem Befehl "Auswahlwerkzeug" stehen zur Auswahl der Punkte verschiedene Werkzeuge (Rechteck-, Linienzugwerkzeug etc.) zur Verfügung. Die ausgewählten Punkte werden dann rot markiert und können mit der Entfernen-Taste der Tastatur oder mit dem Befehl "Entfernen" (in der Registerkarte "Punkte") gelöscht werden.

Die Daten der erstellten Gesamtpunktwolke (Abb. 6.9) werden dann im Geomagic-Standardformat WRP abgespeichert.

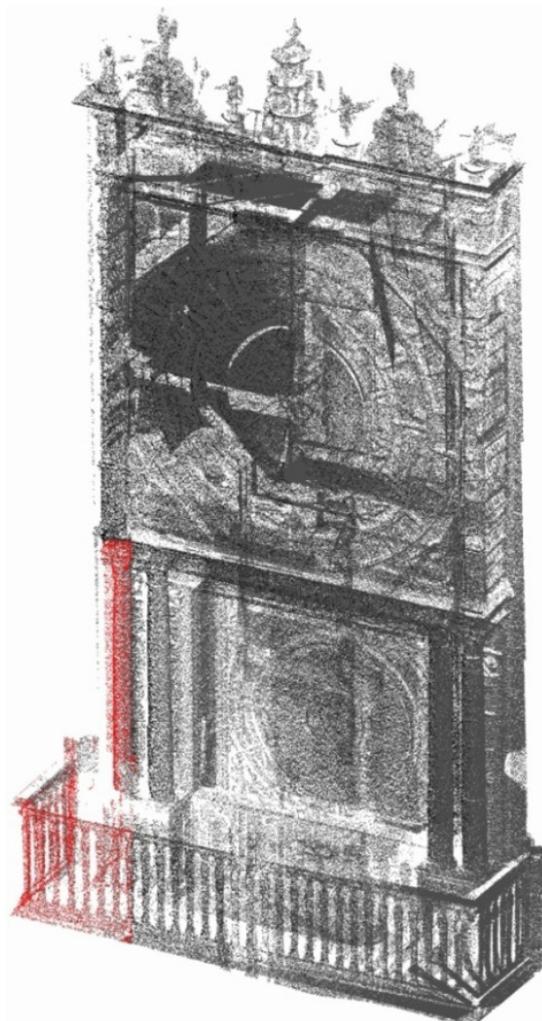


Abb. 6.9: Bereinigte Gesamtpunktwolke mit Auswahl von Punkten

6.4.2 Erstellen von Polygonobjekten

Nach Bereinigung der Punktwolke, kann die Punktwolke nun in ein Polygonobjekt umgewandelt werden. Die geschlossene Fläche des Polygonobjektes wird hierbei durch Dreiecksvermaschungen zwischen den einzelnen Punkten gebildet. Für die Umwandlung eines Punktobjektes in ein Polygonobjekt gibt es in Geomagic Studio verschiedene Werkzeuge, welche in Abhängigkeit von der Anzahl der geladenen Punktwolken eingesetzt werden können. Ist nur eine einzelne Punktwolke in Geomagic geladen, kann der Benutzer mit dem Befehl "Wrap" (in der Registerkarte "Punkte") das Dialogfenster zur Punktvermaschung öffnen.

Sind dagegen mehrere Punktwolken in Geomagic geladen, hat der Benutzer die Möglichkeit, entweder die Punktwolken einzeln über den Wrap-Befehl zu vermaschen oder alle Punktwolken mit dem Befehl "Vereinigen" (in der Registerkarte "Punkte") zu einem Polygonobjekt zu verknüpfen. Im aufgerufenen Dialogfenster "Punkte vereinigen" kann der Benutzer dann einerseits Rauschverringereinstellungen vornehmen und andererseits den Punktabstand und die Anzahl der Dreiecke des zu erzeugenden Polygonnetzes wählen. Alle für die Modellierung erzeugten Polygonobjekte wurden über die Vereinigen-Funktion erzeugt. Bei den Parametereinstellungen wurde eine Reduktion der Dreiecke entsprechend der Abb. 6.10 gewählt. Nach betätigen der OK-Schaltfläche wird mit der Berechnung und Erzeugung des Polygonobjektes begonnen. Das fertige Polygonobjekt wird dann anstelle der Punktwolke eingeblendet (Abb. 6.11). Geomagic Studio stellt die Polygonvorderseite blau und die Polygonrückseite gelb dar. Zudem werden im Polygonmodell vorhandene Löcher, welche auf fehlende Punkte zurückzuführen sind, mit einem roten Rand markiert.



Abb. 6.10: Funktion "Vereinigen"

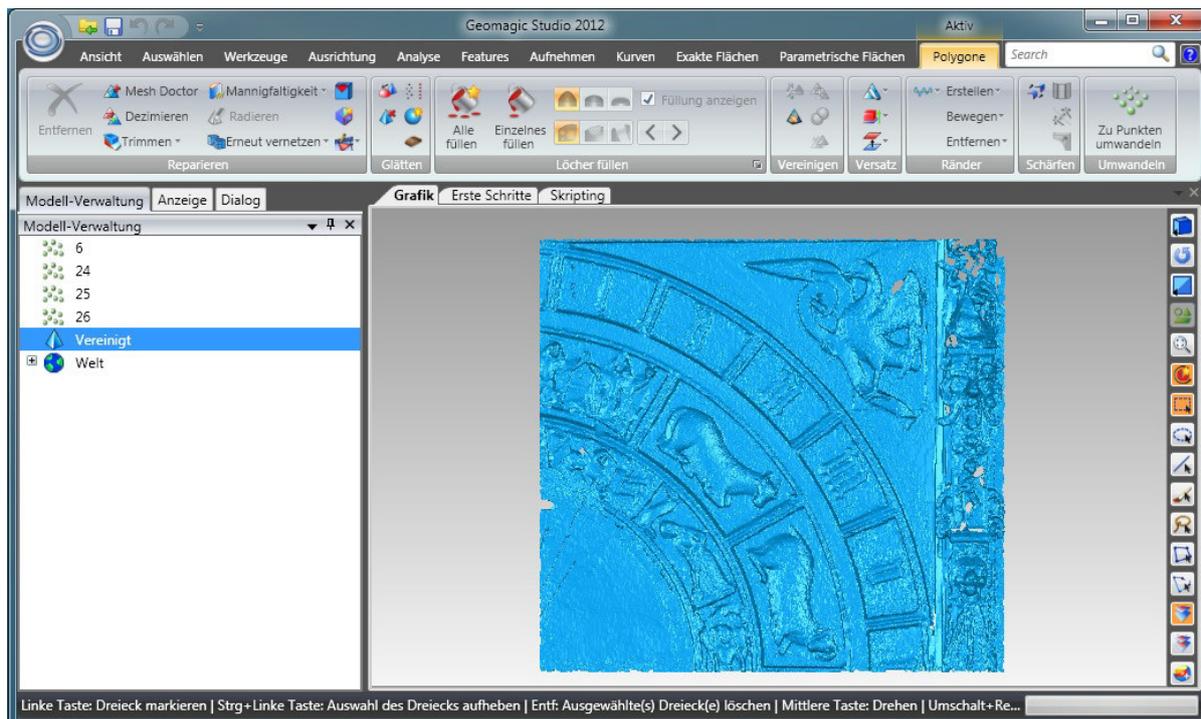


Abb. 6.11: Polygonmodell von Uhrenscheibenausschnitt in Geomagic Studio

6.4.3 Löcher füllen von Polygonobjekten

Die bei der Dreiecksvermaschung entstandenen Löcher können anschließend geschlossen werden. Zuvor müssen jedoch alle vermaschten Dreiecke der Polygonoberfläche mannigfaltig sein. Ein mannigfaltiges Dreieck ist ein Dreieck, das an allen drei Seiten oder, wenn es sich an einer Kante befindet, an zwei Seiten mit anderen Dreiecken verbunden ist. Die Herstellung der Mannigfaltigkeit kann in Geomagic Studio mit dem Befehl "Mannigfaltigkeit" oder alternativ über den Befehl "Mesh Doctor" (beide in der Registerkarte "Polygone") erfolgen. Mit dem "Mesh Doctor"-Befehl können Fehler im Polygonnetz (wie z.B. nicht-mannigfaltige Kanten, Selbstüberschneidungen, kleine Löcher etc.) automatisch repariert werden. Ist die Mannigfaltigkeit der Dreiecke hergestellt worden, können mit dem Befehl "Löcher füllen" einzelne ausgewählte Löcher oder alle Löcher automatisch geschlossen werden (Abb. 6.12).

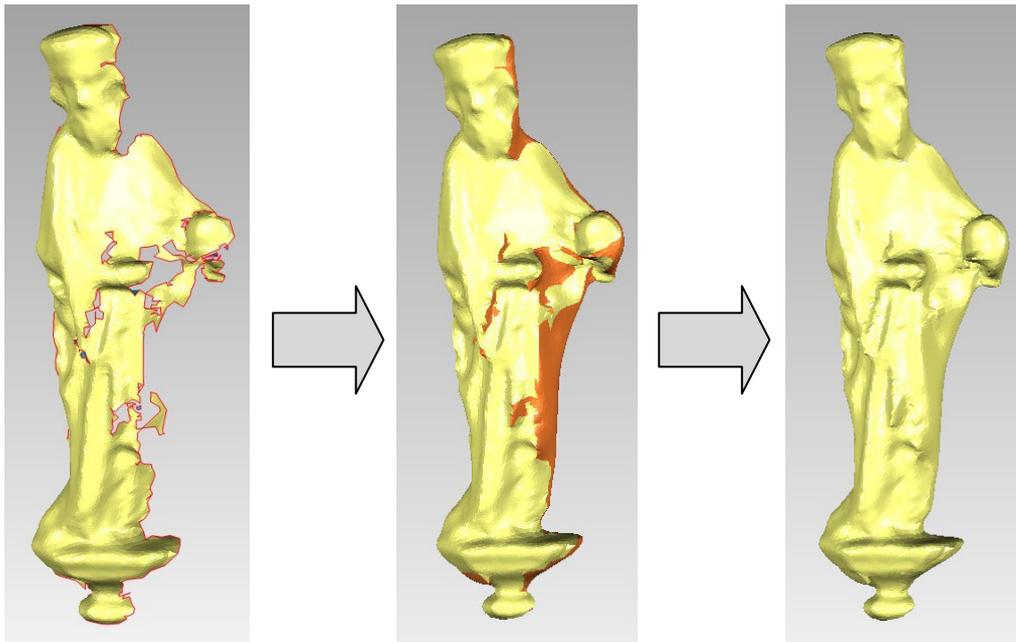


Abb. 6.12: Automatisches Füllen aller Löcher des Kalendermann-Polygonobjektes

6.4.4 Erstellen und Exportieren von Schnittskizzen

Aus den Oberflächen der erstellten Polygonobjekte können nun in weiteren Arbeitsschritten regelgeometrische Objekte (wie z.B. ebene Flächen, Zylinder, Quader) und Freiformflächen abgeleitet und zugehörigen Maße wie Länge, Breite, Höhe und Winkel bestimmt werden. Anhand dieser Objektdaten kann dann eine 3D-Modellierung in einem CAD-System durchgeführt werden.

Für die Erzeugung einer Schnittkurve durch einen Schnitt eines Polygonobjektes muss in Geomagic Studio zunächst eine Schnittebene erstellt werden (Abb. 6.13). Mit dem Befehl "Durch Schnitt erstellen" (in der Registerkarte "Kurven") kann im aufgerufenen Dialogfenster die Schnittebene positioniert werden. Hierbei hat der Benutzer die Möglichkeit die Schnittebene parallel zu den Modellachsebenen (XY-, XZ- und YZ-Achse) auszurichten und die Schnittebene um die X- und Y-Modellachse zu drehen.

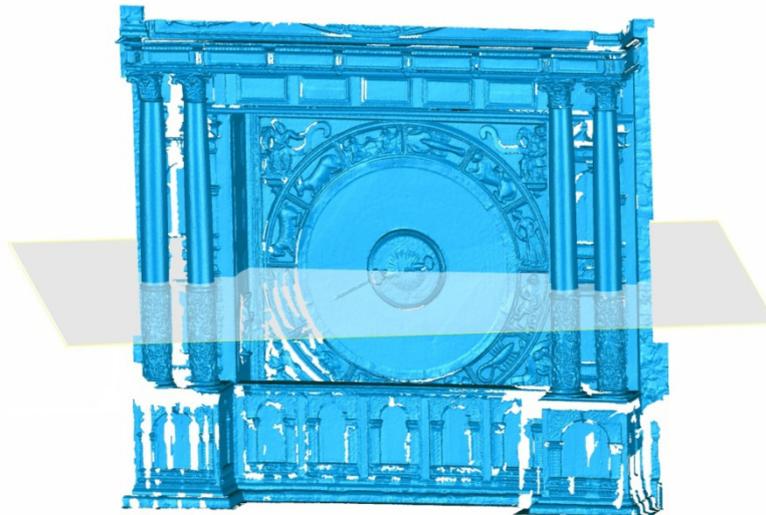


Abb. 6.13: Schnittebene durch Kalendarium-Polygonmodell

Durch Drücken der Schaltfläche "Anwenden" wird das Polygonobjekt mit der Ebene geschnitten und der Schnittkurvenverlauf wird durch eine blaue Linie kenntlich gemacht. Nach Überprüfung des Schnittkurvenverlaufs kann der Benutzer dann mit Betätigung der Schaltfläche "OK" den Schnitt bestätigen. Die Schnittkurve ist nun erstellt und erscheint als eigenes Objekt im Modell-Verwaltungsfenster. Der Kurvenverlauf wird nun durch eine schwarze Linie markiert (Abb. 6.14).

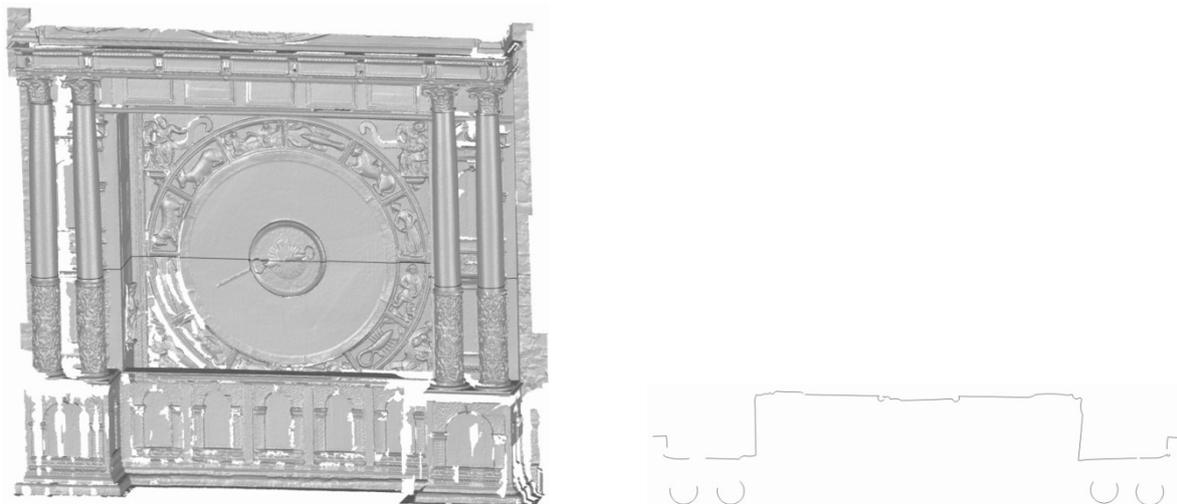


Abb. 6.14: Schnittkurve auf Kalendarium-Polygonoberfläche mit zugehöriger Draufsicht

Die erstellte Schnittkurvenskizze kann zur Weiterverarbeitung in einem CAD-System über das Modell-Verwaltungsfenster separat abgespeichert werden, indem der

Benutzer über einen Rechtsklick mit der Maus auf die Kurve ein Menü aufruft und den Befehl "Speichern" ausführt. Als Format für das Speichern der Schnittkurvenskizze wird das IGES-Format gewählt. Mit diesem Format besteht die Möglichkeit die Schnittlinienkurven in andere CAD-Anwendungen, wie beispielsweise Pro/ENGINEER Wildfire 5.0, zu exportieren. Ein Austausch von Schnittlinienkurven bzw. Geometrien zwischen Geomagic Studio und Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 kann auch direkt in Geomagic Studio mit dem Befehl "Parameteraustausch" (in der Registerkarte "Kurven") erfolgen (Abb. 6.15). Hierfür muss lediglich die CAD-Anwendung parallel laufen (inklusive Portnummernkonfiguration) und der Button "Senden" betätigt werden.

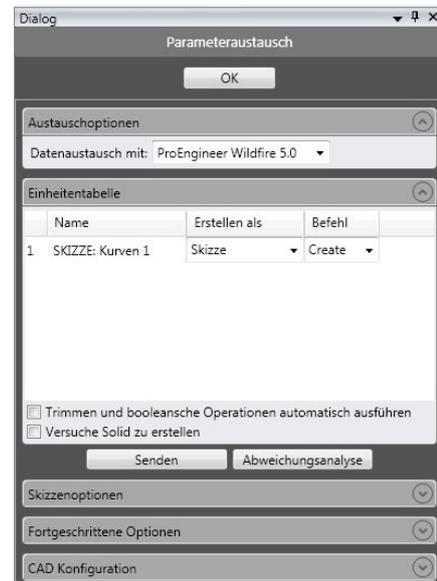


Abb. 6.15: Funktion "Parameteraustausch"

6.4.5 Vermessung des Polygonobjektes

In Geomagic Studio wird das Polygonobjekt mit dem Befehl "Abstand" (in der Registerkarte "Analyse") vermessen. Nachdem sich das Dialogfenster "Abstand messen" geöffnet hat, muss der Benutzer zwei beliebige Punkte auf der Oberfläche des Polygons oder auf der Schnittkurve platzieren. Im aufgerufenen Dialogfenster wird dann der direkte Abstand zwischen den beiden Punkten, sowie der projizierte Punkteabstand auf die X-, Y- und Z-Achse angezeigt.

6.4.6 Überführung eines Polygonobjekts in ein NURBS-Objekt

NURBS-Flächen verfügen gegenüber Polygonflächen über eine optisch ansprechende Glattheit. Die Abkürzung NURBS steht hierbei für Nonuniform Rational B-Splines. Geomagic Studio ist in der Lage ein Polygonobjekt in ein solches NURBS-Objekt zu überführen.

Mit dem Befehl "Exakte Flächenrückführung" (Registerkarte "Exakte Flächen") wird zunächst das geschlossene Polygonobjekt auf die exakte Flächenrückführung vorbereitet und in ein Objekt für die genaue Flächenrückführung umgewandelt, sowie der Rest der Registerkarte "Exakte Flächen" freigeschaltet. Mit dem nun verfügbaren Befehl "Automatische Fläche" kann dann das NURBS-Objekt erstellt werden, indem der Benutzer im geöffneten Dialogfenster zunächst diverse Einstellungen zur Geometrie und Fläche vornimmt (Abb. 6.16) und anschließend den Anwenden- und OK-Button betätigt. Das fertiggestellte NURBS-Objekt (Abb. 6.17), dessen Oberfläche in Geomagic Studio türkis dargestellt wird, kann dann zur Weiterverarbeitung in einem CAD-System über das Modell-Verwaltungsfenster im IGES-Format (analog zu Abschnitt 6.4.4) abgespeichert werden.

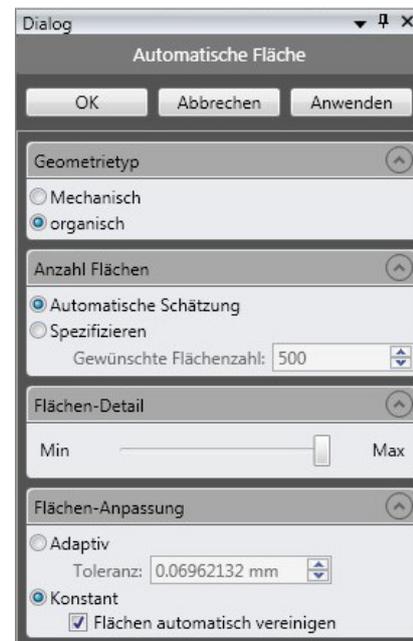


Abb. 6.16: Funktion "Automatische Fläche"

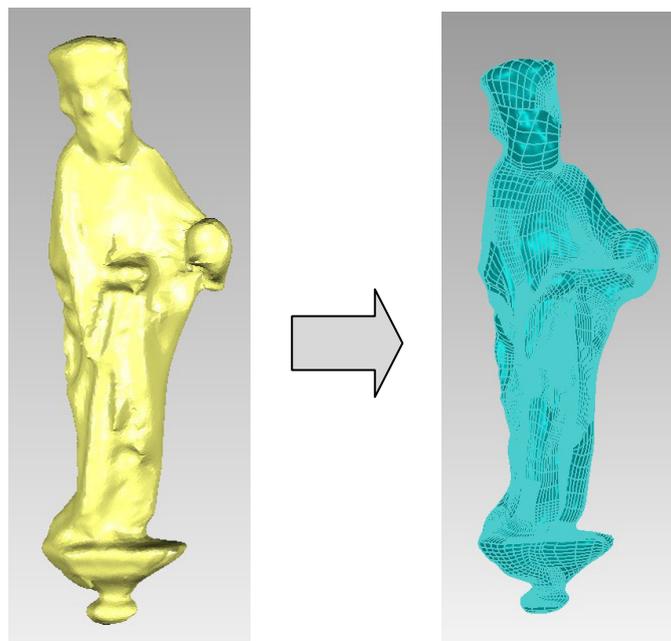


Abb. 6.17: Überführung des Kalendermann-Polygonobjektes in ein NURBS-Objekt

7 Objektmodellierung

7.1 Modellierung der Astronomischen Uhr mit Pro/ENGINEER Wildfire

In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise bei der 3D-Modellierung und Visualisierung der Astronomischen Uhr verdeutlicht.

Für die Erstellung des 3D-Modells der Astronomischen Uhr wurde das CAD-Programm Pro/ENGINEER Wildfire (Pro/E) verwendet. Bevor mit der 3D-Modellierung jedoch begonnen werden kann, sind zuvor noch weitere Vorarbeiten notwendig. Zunächst wird das zu modellierende Objekt in viele Teilobjekte unterteilt. Nachdem diese Teilobjekte in der Punktwolke identifiziert worden sind, werden von den einzelnen Teilobjekten Polygonmodelle erstellt (siehe Abschnitt 6.4.1 bis 6.4.3). Anschließend werden die Polygonmodelle entweder vermessen und in Schnittskizzen überführt oder in ein NURBS-Objekt umgewandelt (siehe Abschnitt 6.4.4 bis 6.4.6). Mit Hilfe der Schnittskizzen, Maße und NURBS-Objekte können dann die Teilobjekte einzeln in Pro/E modelliert werden. Als Ergebnis erhält man einzelne Rohmodelle ohne Farbe. Im letzten Schritt werden die Flächen der einzelnen Rohmodelle eingefärbt bzw. texturiert (siehe Abschnitt 7.2) und abschließend zum fertigen CAD-Modell zusammengefügt.

Wie in Abb. 7.1 zu sehen, besteht die Benutzeroberfläche von Pro/E aus verschiedenen Bereichen. Im oberen Bereich befinden sich Menü- und Systemleisten. Zentrum der Benutzeroberfläche ist das Grafikfenster. Auf der rechten Seite befinden sich die Konstruktionselemente-Toolleiste, die u.a. das Skizzen-, Extrusions-, Rotations-, Schrägungs- und Rundungs-Tool beinhaltet. Auf der linken Seite ist der Modellbaumbereich, welcher die Historie eines Modells zeigt.

Die beiden wichtigsten Dateitypen bei Pro/E sind das Einzelteil (mit der Dateieindung ".prt") und die Baugruppe (mit der Dateieindung ".asm"). Eine Baugruppe entsteht durch den Zusammenbau bestehender Bauteile und Unterbaugruppen. Mit Pro/E können außerdem Skizzen (mit Dateieindung ".sec") erzeugt sowie Skizzendateien im IGES-Format importiert werden.

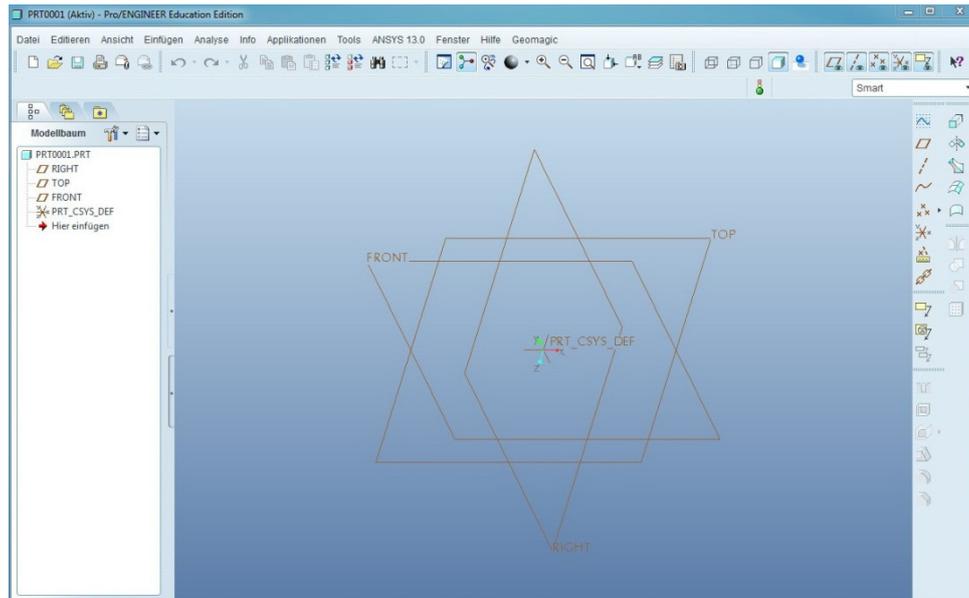


Abb. 7.1: Benutzeroberfläche Pro/ENGINEER Wildfire

7.1.1 Uhrengehäuse

Zuerst wurde das Uhrengehäuse modelliert, welches aus folgenden Komponenten besteht:

- eine viereckige Ziffernblattplatte mit rundem Ausschnitt
- ein Ziffernblattrahmen mit Verzierungen
- Begrenzungsrahmen der Ziffern- u. Figurenringe
- ein schwarzes Ziffernblatt mit römischen Zahlen
- ein rückseitiges Balkengerüst
- zwei seitliche Fensterrahmen mit je sechs Bleiglasfenstern
- kassettierter Unterbau mit Verzierungen

Zur Modellierung wurde hauptsächlich das Extrusions-Tool verwendet. Mit dem Extrusions-Tool kann man aus einer 2D-Skizze und einer Tiefenangabe ein Körper kreieren. Mithilfe des Ziehen-Tool wurde der kassettierte Unterbau modelliert. Das Ziehen-Tool ist ein Werkzeug, mit dem man aus einer 2D-Skizze und einer Leitkurve ein Körper formen kann. Für die Verzierungen des Ziffernblattrahmens wurde das Rotations-Tool benutzt, welches ein Werkzeug ist, mit dem man aus einer 2D-Skizze, die um eine Rotationsachse um einen angegebenen Winkel rotiert, ein Körper erzeugt. Für das Abrunden bzw. Abschrägen von Kanten wurde das Rundungs- bzw. Schrägungs-Tool eingesetzt. Abschließend wurden sämtliche Flächen, mit

Ausnahme der Flächen, die texturiert werden sollen (graue Farbe), eingefärbt. Das Ergebnis der Modellierung und Einfärbung ist in Abb. 7.2 und 7.3 dargestellt.



Abb. 7.2: 3D-Modell des Uhrengehäuses (Vorderansicht)

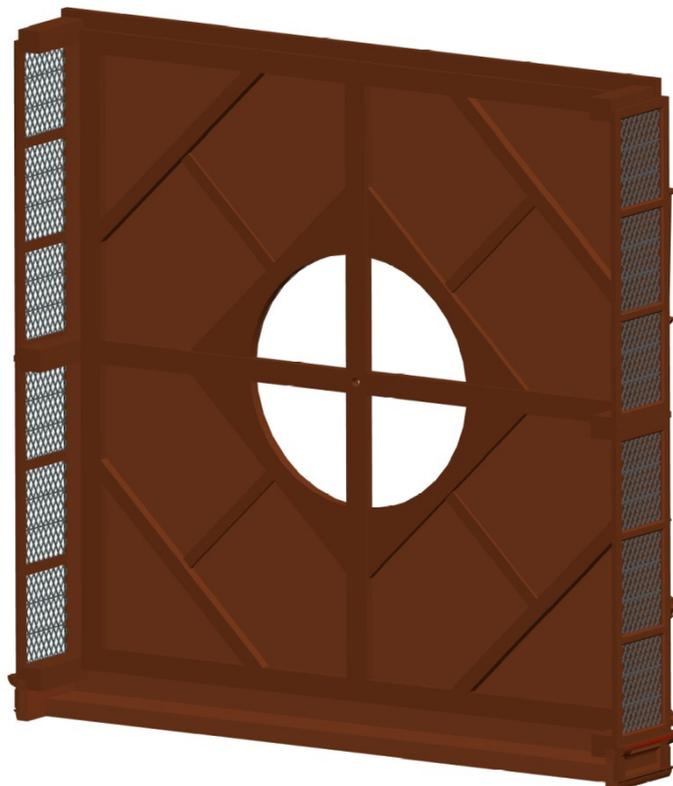


Abb. 7.3: 3D-Modell des Uhrengehäuses (Rückansicht)

7.1.2 Kalendergehäuse

Anschließend wurde das Kalendergehäuse modelliert. Dieses besteht aus folgenden Komponenten:

- eine viereckige Kalenderscheibenplatte
- ein rückseitiges Balkengerüst
- Begrenzungsrahmen des Figurenrings
- eine zentrale Deckscheibe mit Zeiger
- ein Kalendersonnenzeiger
- ein kassettiertes Portal
- zwei Säulenpodeste mit Verbindungswand und Zierelementen
- vier Säulen mit Kapital
- ein hölzernes Schutzgitter

Zur Modellierung wurde überwiegend das Extrusions-, Ziehen- und Rotations-Tool eingesetzt. Mithilfe des Ziehen-Tools wurden die Säulenpodeste mit Verbindungswand (und dazugehörige Zierelemente), das hölzerne Schutzgitter und die einzelnen Kassetten modelliert. Das Rotations-Tool wurde für die Modellierung des Säulenschaftes und der zentralen Deckscheibe verwendet. Zur Modellierung des Säulenkapitals und einzelner Zierelemente war auch der Einsatz des Rundungs- und Schrägungs-Tool erforderlich. Das Ergebnis des modellierten und eingefärbten Kalendergehäuses ist in den nachfolgenden Abbildungen 7.4, 7.5 und 7.6 dargestellt.



Abb. 7.4: 3D-Modell des Schutzgitters

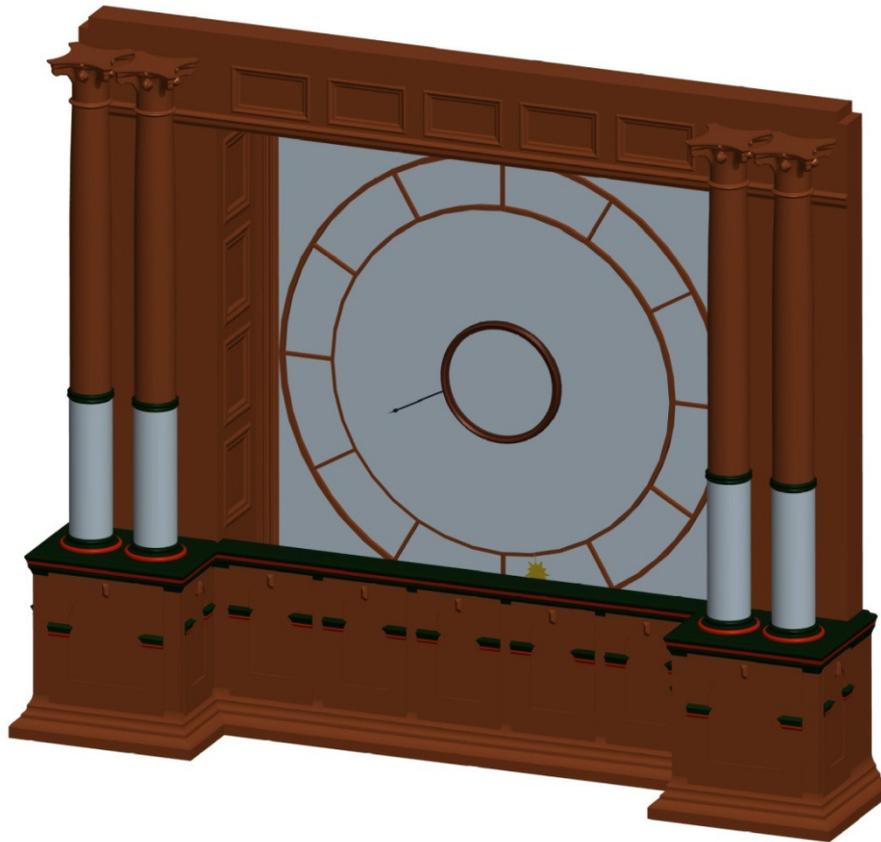


Abb. 7.5: 3D-Modell des Kalendergehäuses (Vorderansicht ohne Schutzgitter)

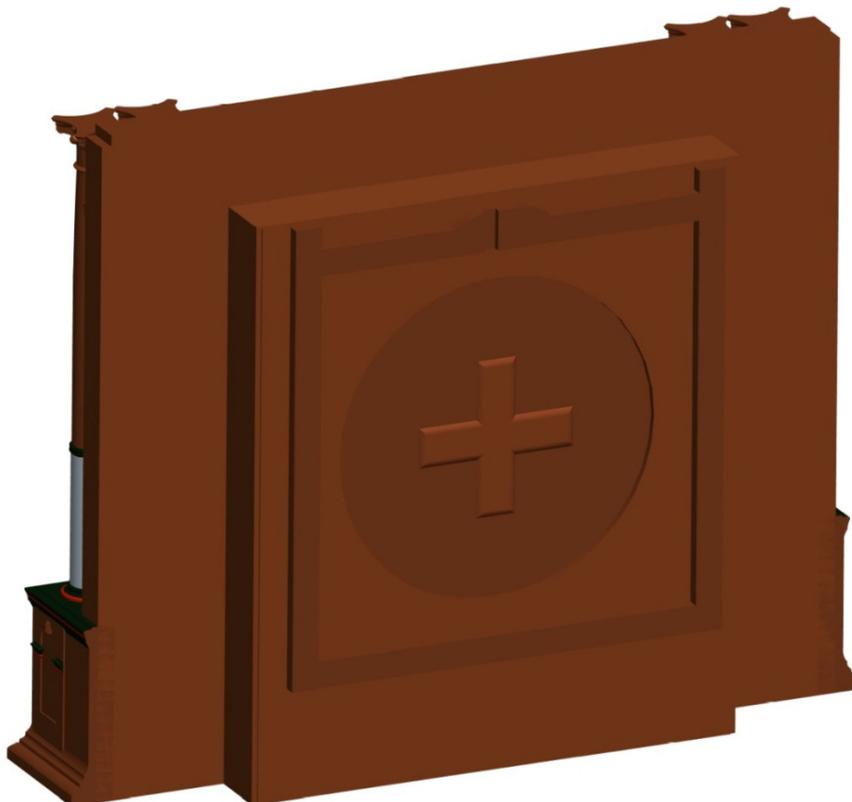


Abb. 7.6: 3D-Modell des Kalendergehäuses (Rückansicht ohne Schutzgitter)

7.1.3 Aufsatzgehäuse

Nach der Fertigstellung des Kalendergehäuse wurde mit der Modellierung des Aufsatzgehäuses begonnen. Dieses Gehäuse besteht aus folgenden Komponenten:

- Wand mit Säulenbögen- und Zierelementen
- zwei kleine Türen und ein Handlauf
- einen Figurenumlaufbalkon mit Zierelementen
- ein dreigeschossiger Turm
- zwei dreieckförmige Zierstücke und vier Figurenpodeste

Für die Modellierung des Aufsatzes wurde wieder vorwiegend das Extrusions-, Ziehen- und Rotations-Tool genutzt. Mit dem Ziehen-Tool wurde der Figurenumlaufbalkon, die Säulenbogenwand und dazugehörige Zierelemente, die einzelnen Turmgeschosse und die Figurenpodeste modelliert. Für die Modellierung der Turmkuppel sowie einzelner Zierelemente des Figurenumlaufbalkons war der Einsatz des Rotations-Tool erforderlich. Die nachfolgenden Abbildungen 7.7 und 7.8 zeigen das Ergebnis des modellierten und eingefärbten Aufsatzes.



Abb. 7.7: 3D-Modell des Aufsatzes (Vorderansicht)

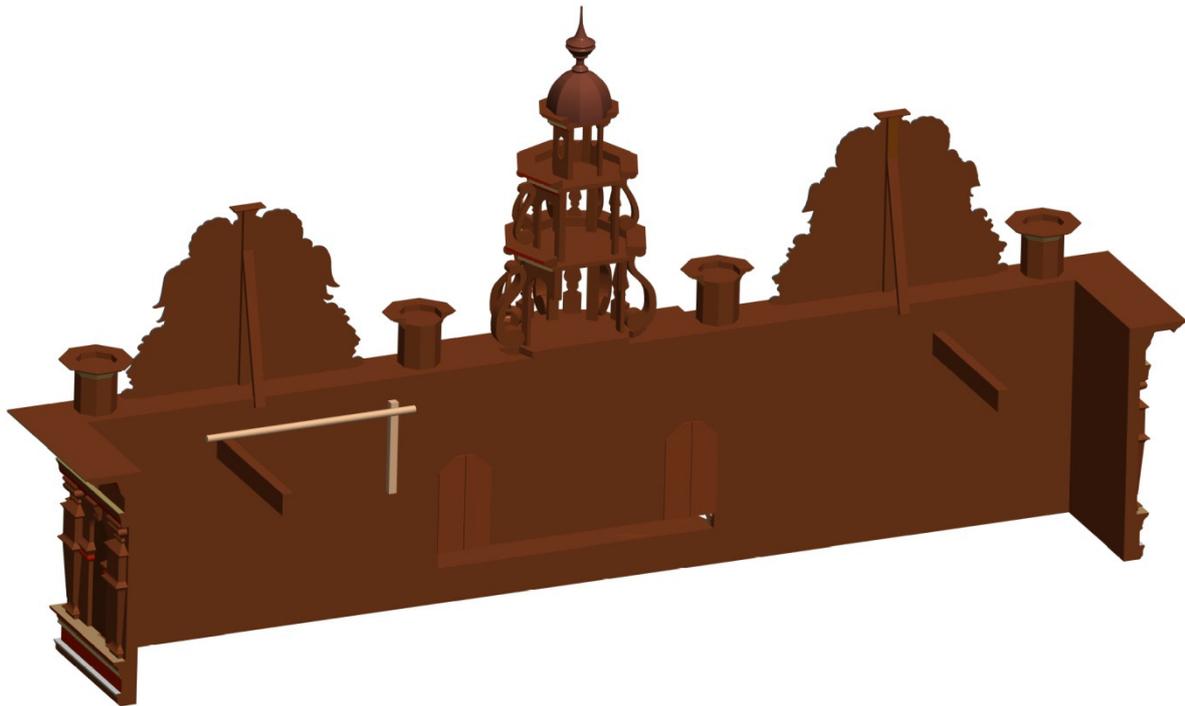


Abb. 7.8: 3D-Modell des Aufsatzes (Rückansicht)

7.1.4 Stundenzeiger, Sonnenscheibe und Mondphasenscheibe

Die 3D-Modellierung des Stundenzeigers, der Sonnen- und Mondphasenscheibe wurde mit dem Extrusions- und Ziehen-Tool durchgeführt. Der Stundenzeiger besteht aus folgenden Komponenten:

- ein Stab mit T-förmigen Querschnitt
- zwei runde Scheiben
- ein Zeiger und eine kleine Hand mit ausgestrecktem Zeigefinger
- eine große Hand mit ausgestrecktem Zeigefinger
- ein Stern

Die Sonnenscheibe besteht aus einer runden Platte mit runden Ausschnitt, einem rückseitigen Metallgestell und einem Sonnenzeiger. Die Mondphasenscheibe besteht aus einer runden Platte, einem rückseitigen Metallgestell und einem Mondzeiger.

Die Ergebnisse der Modellierung und Einfärbung sind in den nachfolgenden Abbildungen 7.9, 7.10 und 7.11 zu sehen.

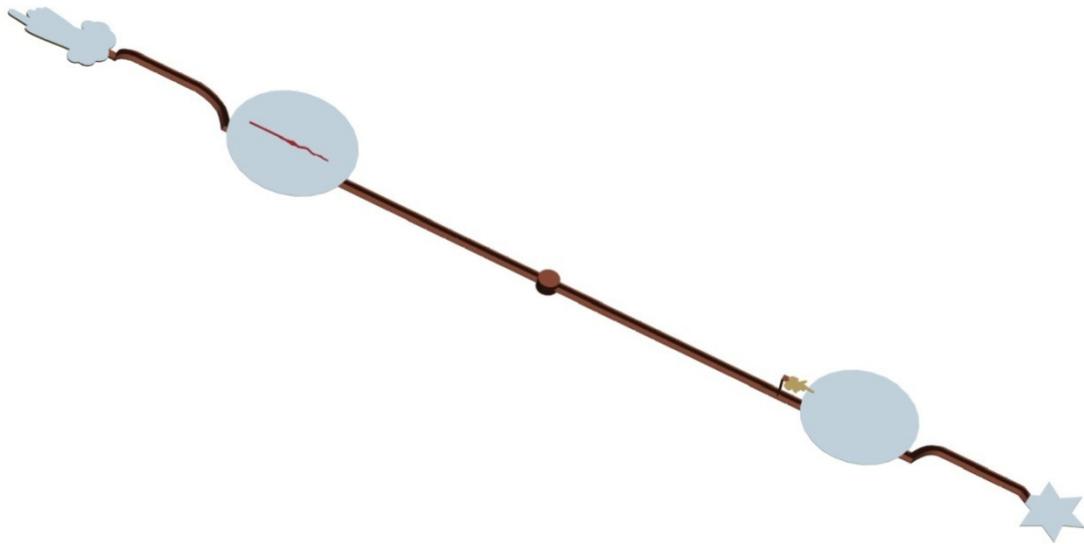


Abb. 7.9: 3D-Modell des Stundenzeigers

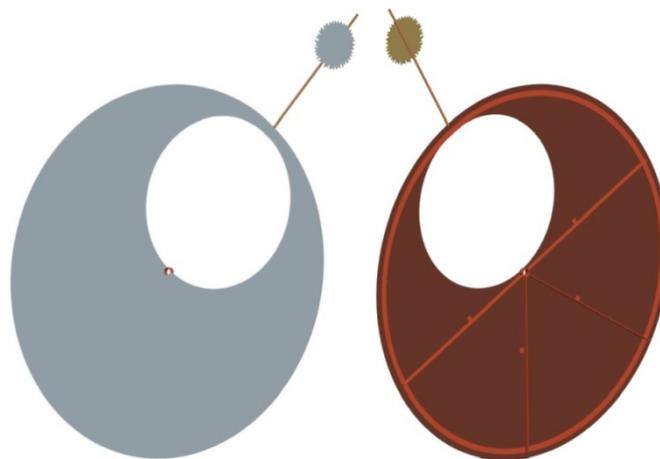


Abb. 7.10: 3D-Modell der Sonnenscheibe mit Vorder- (links) und Rückansicht (rechts)

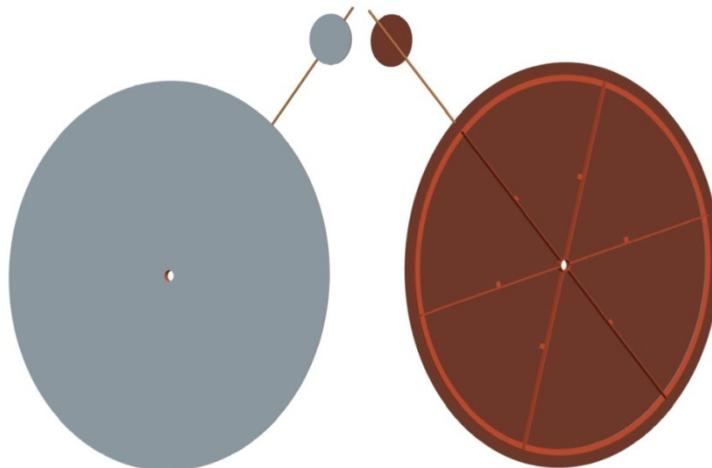


Abb. 7.11: 3D-Modell der Mondphasenscheibe mit Vorder- (links) und Rückansicht (rechts)

7.1.5 Kalendermann-Figur

Für die CAD-Modellierung der Kalendermann-Figur wird zunächst ein Polygonobjekt der Figur erzeugt (siehe Abschnitt 6.4.1 bis 6.4.3). Das erstellte Polygonobjekt der Figur wird dann in ein NURBS-Objekt überführt und als IGES-Datei gesichert (siehe Abschnitt 6.4.6). Die erstellte Sicherungsdatei wird dann in Pro/E als Bauteil importiert. Danach müssen für die Figur Bezugsreferenzen in Form von Bezugsebenen erzeugt werden (siehe Abb. 7.12). Abschließend wird die Figur mit dem Materialentfernungs-Tool beschnitten und mit Hilfe des Extrusions-Tools mit einem Stab und einem neuen Standfuß ausgestattet. Das Ergebnis der Modellierung und Einfärbung zeigt Abb. 7.13.

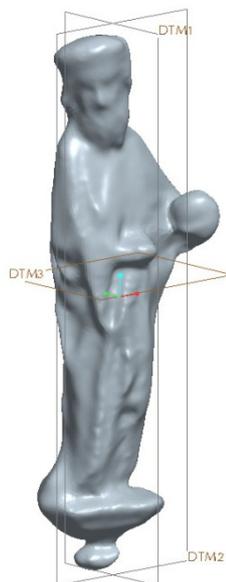


Abb. 7.12: 3D-Modell der Kalendermann-Figur mit Bezugsebenen



Abb. 7.13: Fertiges 3D-Modell der Kalendermann-Figur

7.1.6 Gesamtmodell ohne Textur

Die modellierten Teilbereiche werden nun zusammengefügt. Die nachfolgende Abb. 5.14 und 5.15 zeigt das fertige Gesamtmodell, jedoch noch ohne Texturen.

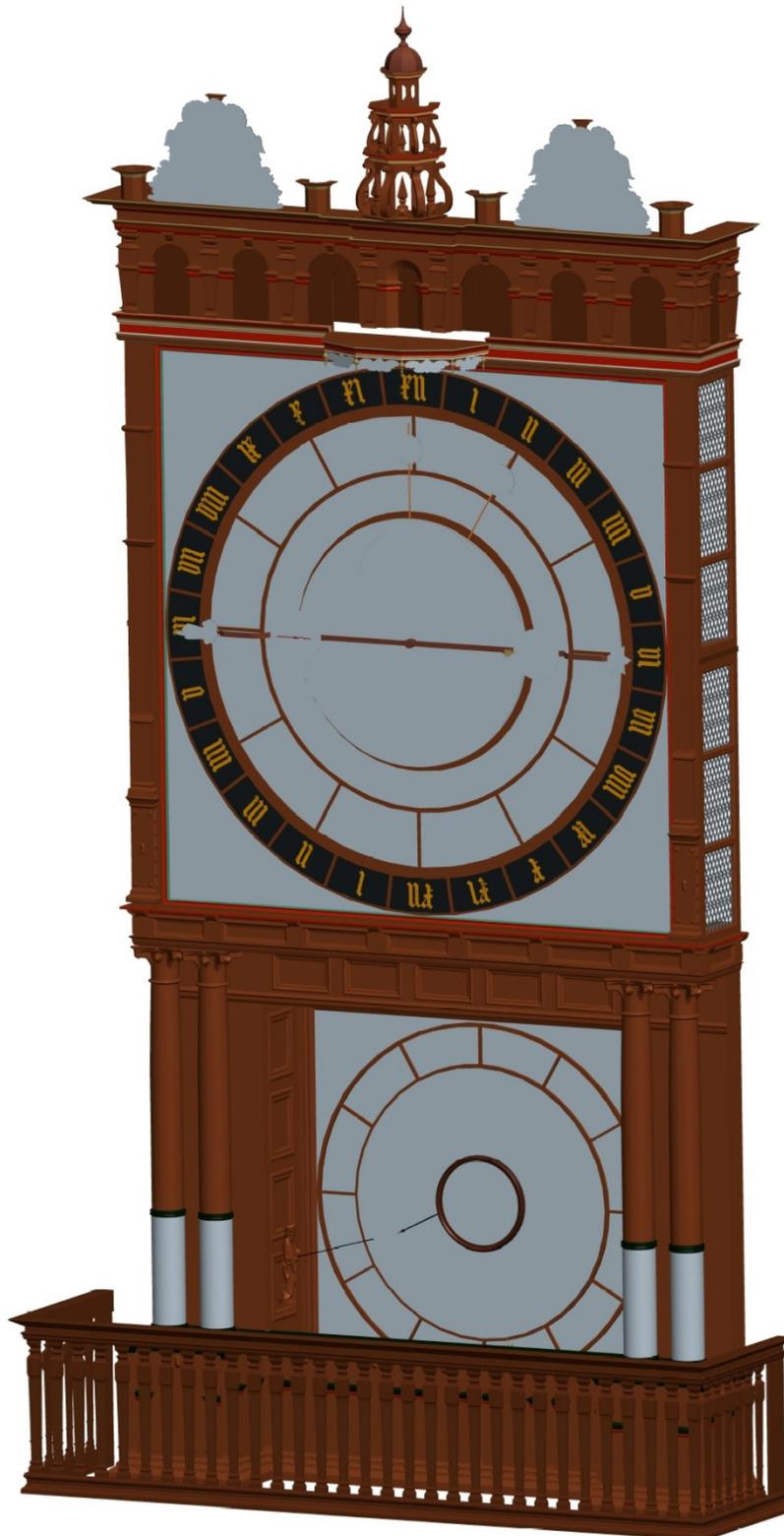


Abb. 7.14: 3D-Modell des Gesamtmodells ohne Textur (Vorderansicht)



Abb. 7.15: 3D-Modell des Gesamtmodells ohne Textur (Rückansicht)

7.2 Texturierung

Im Modell finden sowohl eingefärbte Flächen als auch Texturen Verwendung. Als Textur oder Texture-Map wird ein zweidimensionales Bild bezeichnet, das auf der Oberfläche eines virtuellen Körpers abgebildet ist. Der Vorteil bei der Verwendung von Texturen liegt darin, dass die erzeugte Modelloberfläche noch realistischer erscheint und auch nicht modellierte Details dargestellt werden können.

Für die Herstellung von Texturen müssen zunächst digitale Fotos von der entsprechenden Oberfläche gemacht werden. Anschließend müssen die Bilder in der Regel mit einer Bildbearbeitungssoftware entzerrt, beschnitten und notfalls retuschiert werden. Die für das Modell verwendeten Bilder stammen größtenteils von der Internetseite der Astronomische Uhr [ASTRO UHR 2012]. Die restlichen Bilder stammen entweder aus den Büchern von Schukowski [vgl. SCHUKOWSKI 2004, SCHUKOWSKI 2006, SCHUKOWSKI 2004] oder wurden mit der Digitalkamera Nikon D40 selbst aufgenommen. Bearbeitet wurden die Bilder mit der Software Corel Photo Paint.

Im "Farbeffekte-Manager" von Pro/E (Abb. 7.16) können die fertiggestellten Bilder anschließend über die Registerkarte "Mapping" und den Button "Farbtextur" geladen und auf eine ausgewählte Fläche des Modells gemappt werden. Damit die erstellte Textur mit dem Modell abgespeichert werden kann, muss jedoch in der "config.pro"-Datei von Pro/E bei der Option "save_texture_with_model" der Wert "yes" gewählt werden. Die Abbildung 7.17 zeigt ein texturiertes Bauteil der Astrouhr.

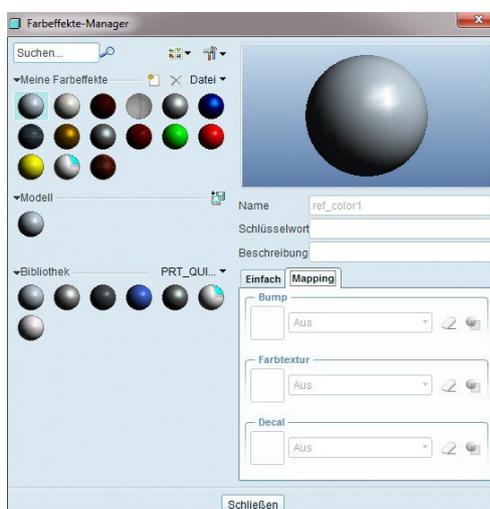


Abb. 7.16: Farbeffekte-Manager

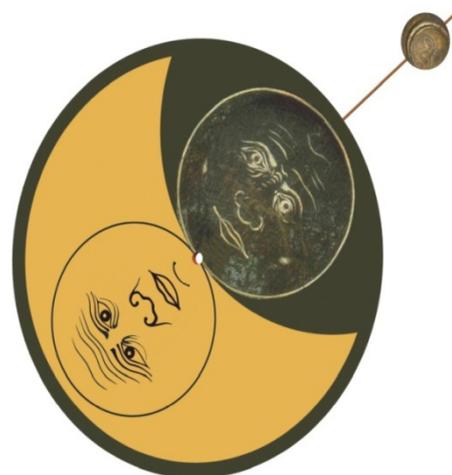


Abb. 7.17: Texturiertes 3D-Modell der Mondphasenscheibe

7.3 Das fertige Modell

In der nachfolgenden Abbildung ist das fertige Modell mit aufgemappten Fotos dargestellt. Weitere Ansichten sind im Anhang dieser Arbeit zu finden.



Abb. 7.18: Fertiges 3D-Modell mit Textur

8 Fazit

Aufgabe dieser Projektarbeit war es, ein 3D-Modell der Astronomischen Uhr (Außenfassade) aus terrestrischen Laserscandaten zu erstellen.

Die Messung mit dem terrestrischen Laserscanner von Z+F konnte problemlos innerhalb von zwei Arbeitstagen durchgeführt werden, da der Scanner einfach zu bedienen ist und über automatische Messabläufe verfügt. Die Auswertung der Messdaten erwies sich im Gegensatz zur Messdurchführung als wesentlich zeit- und arbeitsintensiver. Die Registrierung der 3D-Punktwolke erfolgte zügig und problemlos. Da jedoch keine Vorkenntnisse mit der Colorierung von 3D-Punktwolken vorhanden war, erwies sich dieser Teil als sehr arbeitsaufwendig, aber gleichzeitig auch als unkompliziert. Insbesondere die Erstellung der Polygonmodelle sowie deren Vermessung nahm viel Zeit in Anspruch. Die Arbeit mit Geomagic Studio stellte sich hierbei jedoch als sehr angenehm heraus. Nicht weniger zeitaufwendig war der Teil der Modellierung. Hier mussten alle Objekte mit einem hohen Detailierungsgrad modelliert werden. Auch die Bearbeitung der Fotos für die Texturierung, die hauptsächlich aus Retuschierungs- und Entzerrungsarbeiten bestand, hat viel Zeit in Anspruch genommen.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass sich der hohe Modellierungs- und Texturierungsaufwand gelohnt hat, denn es ist daraus ein ansehnliches Modell entstanden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei meiner Projektarbeit unterstützt haben.

Ich danke Herrn Dipl.-Ing. Olaf Grewe für das Ermöglichen dieser Projektarbeit sowie für die gute Betreuung und Unterstützung.

Für die Unterstützung beim Laserscanning und für die Hilfe bei Fragen der Messdatenauswertung möchte ich Herrn Dipl. -Ing. (FH) Michael Geist danken. Weiterer Dank geht an Herrn Holger Maaß für die Unterstützung bei der Messung.

Außerdem bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Erik Büttner und Dipl.-Ing. (FH) Marco Lindemann von der Firma Zoller + Fröhlich für die Ausleihe des Kamera-Equipments (M-Cam, Nikon D40 und Panoramakopf) und für die Hilfe bei der Punktwolkencolorierung

Literatur- u. Quellenverzeichnis

Literatur:

- BANTEL, Martin : *Messgeräte-Praxis: Funktion und Einsatz moderner Messgeräte*. 1. Auflage, München : Carl Hanser Verlag, 2004
- DONATH, Dirk : *Baufaufnahme und Planung im Bestand: Grundlagen-Verfahren-Darstellung-Beispiele*. 1. Auflage, Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2008
- KAHMEN, Heribert : *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. 20. Auflage, Berlin: Walter de Gruyter & Co., 2006
- LUHMANN, Thomas : *Photogrammetrie und Laserscanning*. Augsburg : Herbert Wichmann Verlag, 2002
- RESNIK, Boris; BILL, Ralf : *Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich*. 3. Auflage, Heidelberg : Wichmann Verlag, 2009
- SCHUKOWSKI, Manfred : *Die Astronomische Uhr der St. -Marien-Kirche zu Rostock*. aktualisierter Nachdruck 2011, Stiftung St.-Marien-Kirche zu Rostock e.V., 2004
- SCHUKOWSKI, Manfred : *Die Astronomische Uhr in St. Marien zu Rostock*. 2., erweiterte und aktualisierte Auflage, Königstein im Taunus : Hans Köster Verlagsbuchhandlung KG, 2010
- SCHUKOWSKI, Manfred : *Wunderuhren: astronomische Uhren in Kirchen der Hansezeit*. Schwerin : Thomas Helms Verlag, 2006
- WITTE, Bertold; SPARLA, Peter : *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. 7. Auflage, Berlin : Wichmann Verlag, 2011

Internetquellen:

ASTRO UHR:

URL : <http://www.astronomischeuhr.de/>
(Zugriff August 2012)

Z+F:

URL : http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Broschueren/Broschuere_IMAGER_5010_03_12.pdf
(Zugriff August 2012)

MANFROTTO:

URL : http://www.rosaurophotography.com/html/panoramas/vr_review/303sph_oem/303SPH_fr_Lg.jpg
(Zugriff August 2012)

Abbildungs- u. Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1.1: Die Astronomische Uhr der Rostocker Marienkirche	1
Abb. 2.1: Die Uhrenscheibe	2
Abb. 2.2: Das Kalendarium	5
Abb. 2.3: Der obere Abschluss des Gehäuses	8
Abb. 2.4: Blockschema der Werke	8
Abb. 2.5: Schema des Hauptwerks	9
Abb. 2.6: Hauptwerk	10
Abb. 3.1: Das Prinzip des terrestrischen Laserscanning	11
Abb. 3.2: Sichtfeld von Panorama-Scanner und Kamera-Scanner	12
Abb. 3.3: Prinzip der Distanzmessung mittels Impulslaufzeitverfahren	13
Abb. 3.4: Prinzip der Distanzmessung mittels Phasenvergleichsverfahren	13
Abb. 4.1: Z+F IMAGER 5010	14
Abb. 4.2: Bedienfeld des Z+F IMAGER 5010	14
Abb. 4.3: Z+F MotorCam	15
Abb. 4.4: Nikon D40 mit Objektiv Sigma EX 14mm F2.8D HSM Aspherical	16
Abb. 4.5: Panoramakopf Manfrotto SPH 303	16
Abb. 4.6: Tachymeter Sokkia NET2A	16
Abb. 5.1: Z+F IMAGER 5010 mit Stativ im Einsatz	19
Abb. 5.2: Z+F ProfiTarget mit Magnetfuss und Z+F AutoTarget	19
Abb. 5.3: Laserscannerstandpunkte der Astronomischen Uhr	20
Abb. 5.4: Nikon D40 montiert auf Panoramakopf	22
Abb. 6.1: Arbeitsablauf	23
Abb. 6.2: 2D-Grau-Ansicht eines gefilterten Scans in Z+F LaserControl	24
Abb. 6.3: Targetmessung	25
Abb. 6.4: Seitenansicht der registrierten 3D-Gesamtpunktwolke	26
Abb. 6.5: Eingefärbter Scan unter Nutzung der Z+F MotorCam	28
Abb. 6.6: Benutzeroberfläche von PTGui	29
Abb. 6.7: Eingefärbter Scan unter Nutzung der Digitalkamera Nikon D40	30
Abb. 6.8: Colorierte 3D-Gesamtpunktwolke	31
Abb. 6.9: Bereinigte Gesamtpunktwolke mit Auswahl von Punkten	32
Abb. 6.10: Funktion "Vereinigen"	33
Abb. 6.11: Polygonmodell von Uhrenscheibenausschnitt in Geomagic Studio	34
Abb. 6.12: Automatisches Füllen aller Löcher des Kalendermann- Polygonobjektes	35
Abb. 6.13: Schnittebene durch Kalendarium-Polygonmodell	36
Abb. 6.14: Schnittkurve auf Kalendarium-Polygonoberfläche mit zugehöriger Draufsicht	36
Abb. 6.15: Funktion "Parameteraustausch"	37
Abb. 6.16: Funktion "Automatische Fläche"	38
Abb. 6.17: Überführung des Kalendermann-Polygonobjektes in ein NURBS-Objekt	38
Abb. 7.1: Benutzeroberfläche Pro/ENGINEER Wildfire	40
Abb. 7.2: 3D-Modell des Uhrengehäuses (Vorderansicht)	41

Abb. 7.3: 3D-Modell des Uhrengehäuses (Rückansicht)	41
Abb. 7.4: 3D-Modell des Schutzgitters	42
Abb. 7.5: 3D-Modell des Kalendergehäuses (Vorderansicht ohne Schutzgitter)	43
Abb. 7.6: 3D-Modell des Kalendergehäuses (Rückansicht ohne Schutzgitter)	43
Abb. 7.7: 3D-Modell des Aufsatzes (Vorderansicht)	44
Abb. 7.8: 3D-Modell des Aufsatzes (Rückansicht)	45
Abb. 7.9: 3D-Modell des Stundenzeigers	46
Abb. 7.10: 3D-Modell der Sonnenscheibe mit Vorder- und Rückansicht	46
Abb. 7.11: 3D-Modell der Mondscheibe mit Vorder- und Rückansicht	46
Abb. 7.12: 3D-Modell der Kalendermann-Figur mit Bezugsebenen	47
Abb. 7.13: Fertiges 3D-Modell der Kalendermann-Figur	47
Abb. 7.14: 3D-Modell des Gesamtmodells ohne Textur (Vorderansicht)	48
Abb. 7.15: 3D-Modell des Gesamtmodells ohne Textur (Rückansicht)	49
Abb. 7.16: Farbeffekte-Manager	50
Abb. 7.17: Texturiertes 3D-Modell der Mondphasenscheibe	50
Abb. 7.18: Fertiges 3D-Modell mit Textur	51
Abb. A.1: Texturierte Uhrenscheibe	59
Abb. A.2: Texturierte Kalenderscheibe	60
Abb. A.3: Texturierter Säulenschaft und Kalendermann	61
Abb. A.4: Texturierter Figurenumlaufbalkon	61
Abb. A.5: Texturiertes Zierstück des Aufsatzes (Adam)	62
Abb. A.6: Texturiertes Zierstück des Aufsatzes (Eva)	62

Tabellenverzeichnis:

Tab. 4.1: Auflösungsstufen des Z+F IMAGER 5010	15
--	----

Anhang

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
Abb.	Abbildung
AGP	Anwendungszentrum Großstrukturen in der Produktionstechnik
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AVI	Audio Video Interleaved
CAD	Computer Aided Design
GIF	Graphics Interchange Format
IGS / IGES	Initial Graphics Exchange Specification
JPG / JPEG	Joint Photographic Experts Group (Bildformat)
Min.	Minute
NURBS	Non Uniform Rational B-Splines
Pro/E	Pro/ENGINEER Wildfire 5.0
Sek.	Sekunde
USB	Universal Serial Bus
WLAN	Wireless Local Area Network
WRP	Geomagic wrap
ZFS	Dateiendung / Speicherformat eines Zoller + Fröhlich Laserscan

Weitere Ansichten der Astronomischen Uhr in Pro/E



Abb. A.1: Texturierte Uhrenscheibe



Abb. A.2: Texturierte Kalenderscheibe



Abb. A.3: *Texturierter Säulenschaft und Kalendermann*



Abb. A.4: *Texturierter Figurenumlaufbalkon*



Abb. A.5: *Texturiertes Zierstück des Aufsatzes (Adam)*



Abb. A.6: *Texturiertes Zierstück des Aufsatzes (Eva)*

Inhalt der beiliegenden DVD

Verzeichnis:	Inhalt:
\ Fototexturen	(enthält Fotos im GIF-Format, die für die Texturierung verwendet wurden)
\ Panoramabilder	(mit der Software PTGui erstellte Panoramabilder im JPG-Format)
\ ProE_Arbeitsverzeichnis	(Dateien, d.h. Einzelteile, Baugruppen u. Fototexturen, für die Darstellung des CAD-Modells der Astronomischen Uhr in der Software Pro/ENGINEER Wildfire)
\ Projektarbeit	(Projektarbeit als pdf-Dokument)
\ Video	(Video im AVI-Format mit Rundflug um das fertige CAD-Modell)

Selbstständigkeitserklärung

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

Rostock, 31.08.2012

(Ronny Rohs)

