

# Auslegung mit KISSsoft und Fertigung einer Holzuhr

Dokumentation von Iñigo Latasa, Tiruña, S.L., Orcoyen (ES)

## 1) Einführung:

Mein Arbeitsleben ist eng mit der Welt der Zahnräder verbunden, und zwar sowohl mit ihrer Berechnung und Entwicklung als auch mit ihrer Herstellung. Meine Affinität zu Holz stammt aus meiner Zeit als Student, als ich in einer Schreinerei arbeitete. Daher war für mich das Entwerfen und der Bau einer Uhr mit einem Räderwerk aus Holz ein Projekt, mit dem ich beide Interessen verbinden konnte.

In meinem letzten Projekt habe ich eine CNC-Fräsmaschine für die Holzbearbeitung entworfen und angefertigt. Als eine meiner ersten Arbeiten habe ich ein Zahnradpaar hergestellt. Ich habe einige Fotos an Daniela bei KISSsoft geschickt, der Firma, die das Berechnungsprogramm für Zahnräder entwickelt und vertreibt, mit dem ich in meiner Firma arbeite. Ich erklärte ihr, dass ich meine erste Uhr mit einem Räderwerk entwerfen und bauen wolle und sie bat mich, dies mit Text und Bildern für eine Veröffentlichung zu dokumentieren. Fazit: Die Welt steht auf dem Kopf. Ein Spanier erklärt den Schweizern, wie man eine Uhr baut. Nun also, in aller Bescheidenheit, wollen wir beginnen.

## 2) Räderwerke:

Ein Räderwerk ist ein Mechanismus, der über ein Zahnradpaar ein Moment von einer Achse auf eine andere Achse überträgt.

Eine Uhr ist eine Vorrichtung für die Messung der Zeit. Als erstes haben wir ein Pendel, das mit seiner regelmässigen Bewegung als Ausgangspunkt für die Zeitmessung dient. Über ein erstes Räderwerk müssen wir nun diesen regelmässigen Pendeltakt auf einen Zeiger übertragen, der in einer Stunde eine vollständige Umdrehung ausführt. Dann muss ein zweites Räderwerk diese Umdrehung auf einen zweiten Zeiger übertragen, der eine Umdrehung alle zwölf Stunden ausführt.

Der Pendeltakt wird mit der folgenden Gleichung bestimmt:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \Rightarrow \quad l = g \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

Je nach dem ausgewählten Takt muss das erste Räderwerk eine bestimmte Untersetzung gewährleisten. In meinem Fall wähle ich ein Pendel mit einem Takt von 2 Sekunden. So vergeht genau eine Sekunde zwischen dem charakteristischen Tick und Tack, die vom Anker beim Anstossen an die Zähne der Hemmung verursacht werden. Für diesen Takt muss der Pendelarm etwa 994 mm lang sein. Das Gewicht muss am Arm in einer Weise befestigt sein, die es ermöglicht, es höher oder tiefer einzustellen, wenn das Pendel zu schnell oder zu langsam schwingt.

Aufgabe des Paares aus Hemmung und Anker ist es, den Takt der Zahnräder nach dem Takt des Pendels zu regeln. Die Hemmung kann mit der gewünschten Zähnezahl ausgeführt werden. Ich werde sie mit 30 Zähnen

bauen. Die Achse der Hemmung dreht sich damit einmal pro Minute. Diese eine Umdrehung pro Minute muss über das erste Räderwerk in eine Umdrehung pro Stunde umgewandelt werden. Das heisst, es wird eine Untersetzung von 1/60 benötigt. Bei der Konstruktion der Zahnräder hatte ich mir zwei Bedingungen gestellt: Erstens sollten alle Zahnräder mit einem Evolventenprofil hergestellt werden. Zweitens sollte kein Zahnrad weniger als 17 Zähne besitzen.

Für das erste Räderwerk beschloss ich, die Untersetzung in 3 Schritten wie folgt auszuführen:

Schritt eins: 20/75

Schritt zwei: 20/80

Schritt drei: 20/80

Um zu überprüfen, ob die gestellten Anforderungen erfüllt wurden, muss das Produkt der Antriebsräder geteilt durch das Produkt der angetriebenen Räder 1/60 sein:

$$\frac{20 \times 20 \times 20}{75 \times 80 \times 80} = \frac{1}{60}$$

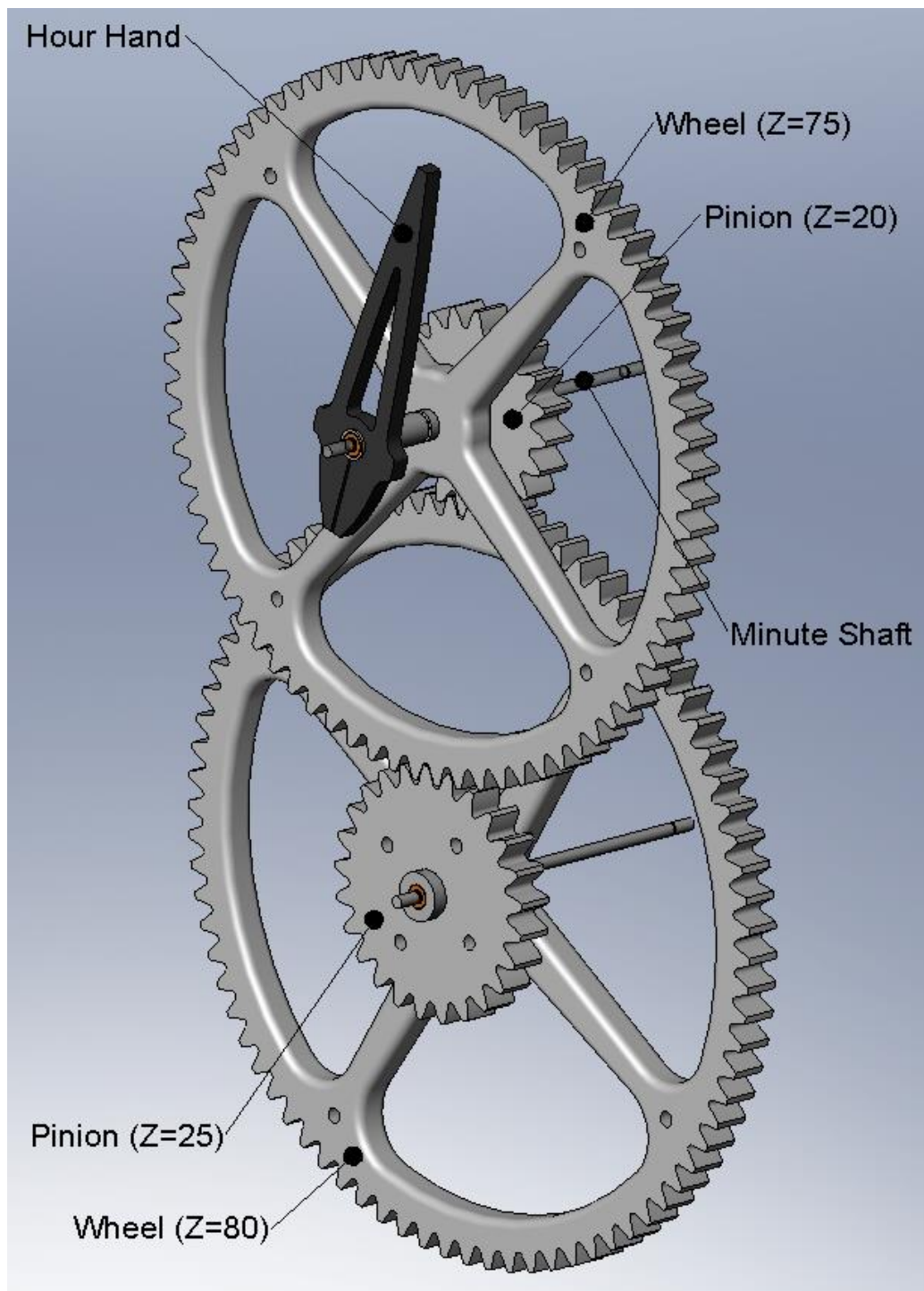
Das zweite Räderwerk muss eine Umdrehung pro Stunde in eine Umdrehung alle zwölf Stunden umwandeln. Das bedeutet eine Untersetzung von 1/12. Ich habe diese Untersetzung in zwei Schritten mit gleichem Achsabstand hergestellt. Dies war erforderlich, weil die Minutenachse und die Stundenachse konzentrisch sein mussten. Also:

Schritt eins: 20/80

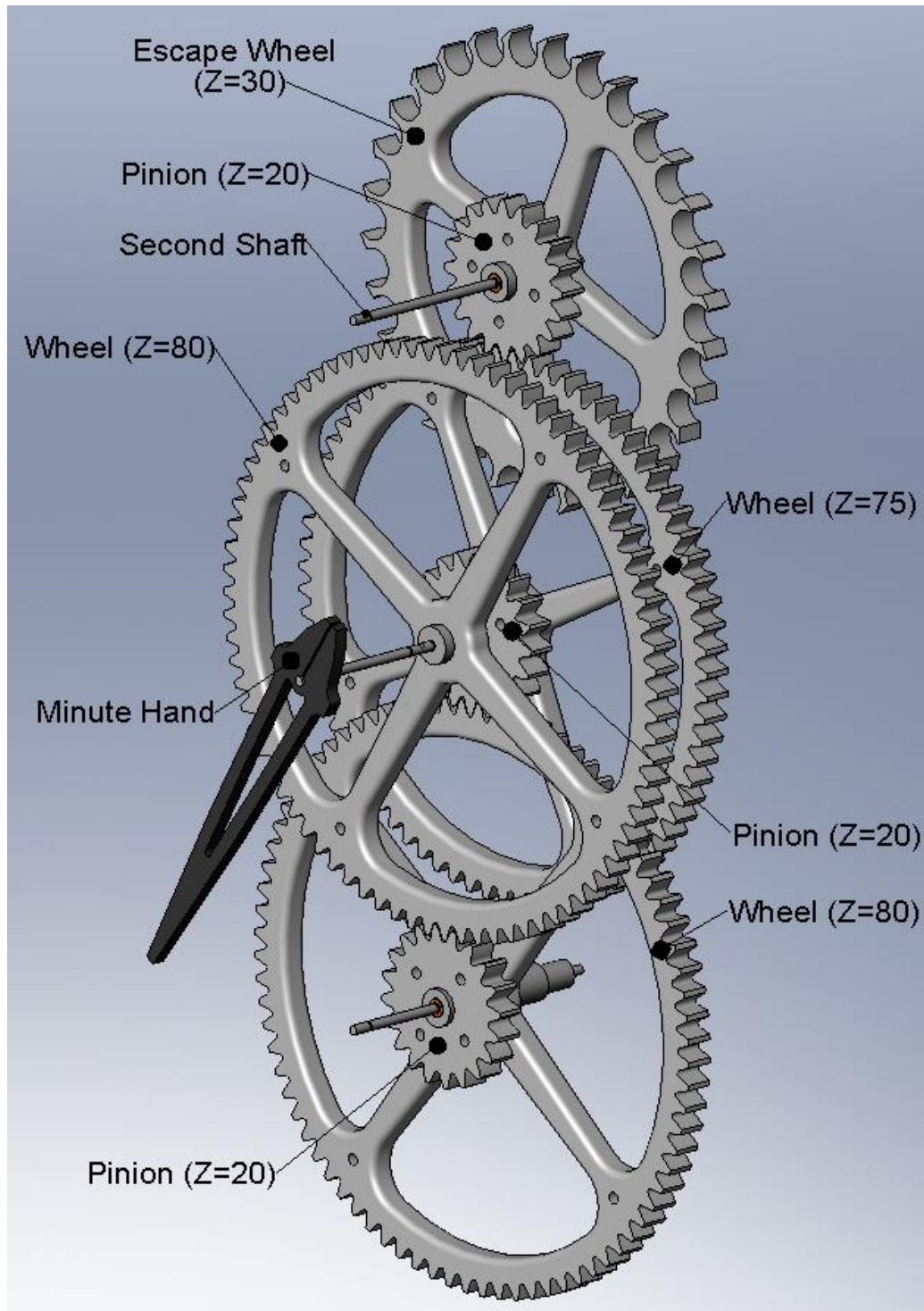
Schritt zwei: 25/75

Testen wir, ob die verlangte Untersetzung erreicht wurde:  $\frac{20 \times 25}{80 \times 75} = \frac{1}{12}$

## Schema der ersten Stufe



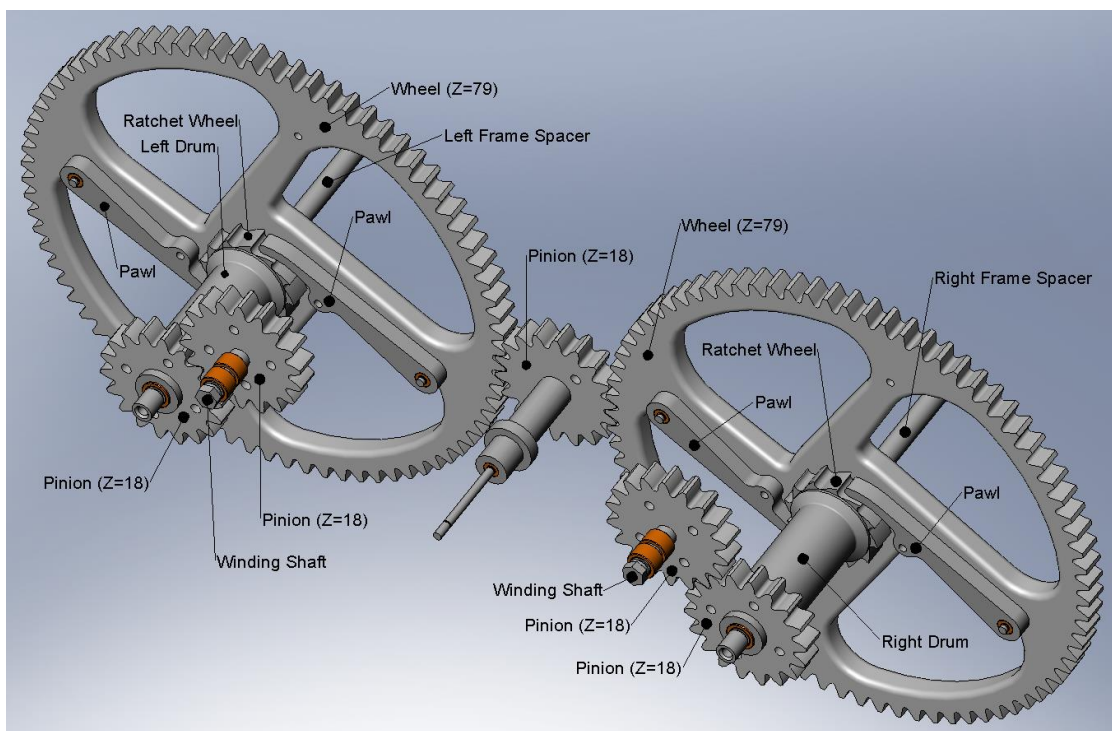
Schema der zweiten Stufe



### 3) Unaufhörliche Bewegung:

Das Pendel verliert durch Reibung Energie, daher muss ihm von aussen Energie zugeführt werden, damit es nicht stehen bleibt. Um diese Energie zuzuführen, wird ein Gewicht an einem auf einer Achse aufgerollten Seil angebracht und diese Achse mit dem ersten Räderwerk in Eingriff gebracht. Das Gewicht überträgt ein Moment auf das erste Räderwerk, das über Hemmung und Anker einen kleinen Impuls bei jeder Schwingung des Pendels

abgibt. In meinem Entwurf habe ich zwei Gewichte, je eines auf jeder Seite der Uhr, angebracht, die mit der Minutenachse im Eingriff sind. Die Seile, an denen die Gewichte hängen, werden auf Trommeln aufgerollt, die nicht direkt mit dem ersten Räderwerk in Verbindung stehen. Dazwischen muss sich eine Rastvorrichtung befinden, die in normaler Laufrichtung das Moment überträgt, sich in der Gegenrichtung jedoch ausklinkt. Dies ist notwendig, weil die Gewichte bei Erreichen ihres unteren Wegpunkts wieder angehoben werden müssen, wobei sich die Trommel in Gegenrichtung dreht und das Seil sich auf der Trommel aufrollt. Meine Rastvorrichtung besteht aus zwei Klinken, deren Enden an ein Rad mit asymmetrischen Zähnen stossen. In einer Richtung gleiten die Klinken über das Rad und die Trommel dreht sich unabhängig vom Rest des ersten Räderwerks. In Gegenrichtung greifen die Klinken zwischen den asymmetrischen Zähnen ein und die Trommel dreht sich mit dem Rest des Räderwerks, so dass das Moment übertragen wird.



#### **4) Theorie und Entwurf von Zahnrädern:**

Wir haben bereits die benötigten Zahnräder und ihre Zähnezahl ermittelt. Jetzt geht es darum, ihre Grösse festzulegen. Hierfür muss der Modul der Zahnräder bestimmt werden. Der Modul ist ein Wert, den wir auswählen und der für die Grösse der gesamten Uhr ausschlaggebend ist. Wird ein hoher Modul gewählt, so wird die Uhr sehr gross, wird ein sehr kleiner Modul gewählt, so ist die Uhr schwer anzufertigen. In meinem Fall habe ich einen Modul von 3 mm gewählt.

Der Mittenkreisdurchmesser ist der Bezugsdurchmesser eines Zahnradpaares und entspricht der Zähnezahl multipliziert mit dem Modul. Bei einem Zahnradpaar sind die Mittenkreisdurchmesser in einem Punkt übereinstimmend und ihr Verhältnis entspricht dem Übersetzungsverhältnis.



Der Achsabstand zwischen zwei Zahnrädern ist die Summe ihrer Mittenkreisdurchmesser geteilt durch zwei. Nimmt man meine Uhr als Beispiel, so wäre der Achsabstand der Zahnradpaare mit 80 und 20 Zähnen also 150 mm.

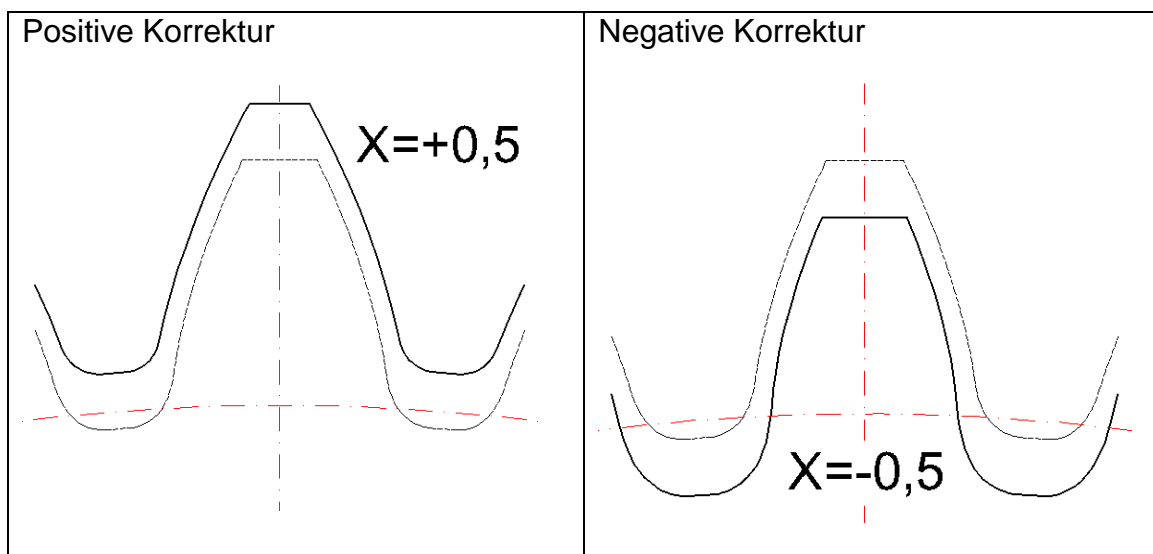
Der Aussendurchmesser eines Zahnradpaars ist gleich dem Mittenkreisdurchmesser und dem zweifachen Modul. Mein Zahnrad mit 80 Zähnen müsste also einen Aussendurchmesser von 246 mm und das Ritzel mit 20 Zähnen einen Aussendurchmesser von 66 mm haben. Ich sage "müsste", weil ich mit einigen Faktoren gespielt habe, um den Eingriff zu verbessern.

Bei dieser Art von Uhren kommt es darauf an, die Reibung möglichst zu verringern. Ein Punkt, an dem dies möglich ist, ist der Drehpunkt des Pendels. Das Pendel schwingt mit minimaler Reibung, wenn der Drehpunkt aus einem Keil besteht, der auf eine V-förmige Vertiefung gestützt schwingt. Auch bei den Zahnrädern gibt es Möglichkeiten, die Reibung zu verringern. Hierfür verwenden wir ein Evolventenprofil und die Ritzel müssen mindestens 17 Zähne haben, sonst hätten wir Flankenbereiche, die keine Evolventen sind.

Man kann auch mit zwei weiteren Faktoren experimentieren, die zueinander in Bezug stehen, nämlich der Profilverschiebung oder Zahnform-Korrektur ( $X$ ) und den spezifischen Gleitbewegungen. Ich will zunächst den zweiten Faktor erklären.

Nur wenn der Eingriff an den Mittenkreisdurchmessern erfolgt, ist der Kontakt zwischen Flanken eine reine Abwälzbewegung. In dem Mass wie sich der Eingriffspunkt vom Punkt der Mittenkreisdurchmesser entfernt, wird das Abwälzen geringer und das Gleiten entsprechend höher. Das Gleiten ist am Anfang und am Ende des Eingriffs zwischen zwei Zähnen – einem Zahn des Zahnrad und einem Zahn des Ritzels – am höchsten. Das bedeutet, am Fuß und am Kopf der Zähne ist das Gleiten am stärksten.

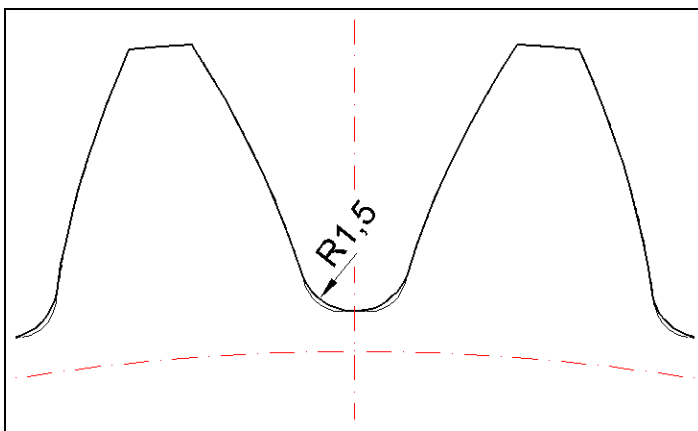
Der andere Faktor, von dem ich gesprochen habe, die Zahnform-Korrektur oder  $X$ , bewirkt, wenn er als positiver Wert für Zahnräder angewandt wird, dass der verwendete Evolventenbereich weiter von der Mitte der Verzahnung entfernt ist als wenn kein Faktor  $X$  angewandt wird. Andererseits bewirkt ein negativer Wert von  $X$ , dass der verwendete Evolventenbereich näher zur Mitte der Zahnräder liegt.



Die Anwendung eines geeigneten Faktors X für Zahnrad und Ritzel trägt dazu bei, das Gleiten an Zahnkopf und Zahnfuss zu verringern.

Die Gleichungen zeigen, dass sich der Achsabstand zwischen den Zahnradpaaren bei Anwendung einer positiven Korrektur am Ritzel und des gleichen Werts mit negativem Vorzeichen nicht verändert, das spezifische Gleiten jedoch verbessert wird. Das heisst, so verringern wir die Reibung beim Zahneingriff. Ferner zeigen die Gleichungen, dass eine Vergrösserung des Achsabstands ohne Veränderung der Zähnezahzahl oder des Moduls und die Anwendung geeigneter Korrekturwerte für Zahnrad und Ritzel das spezifische Gleiten noch weiter verringert. Diese Methode habe ich für alle Zahnradpaare in meiner Uhr angewandt. Für das Zahnradpaar aus dem obigen Beispiel mit 80 und 20 Zähnen ergibt sich somit ein Achsabstand von 153 mm. Mit einem Faktor X von +0,6 am Zahnkranz und +0,47 am Ritzel.

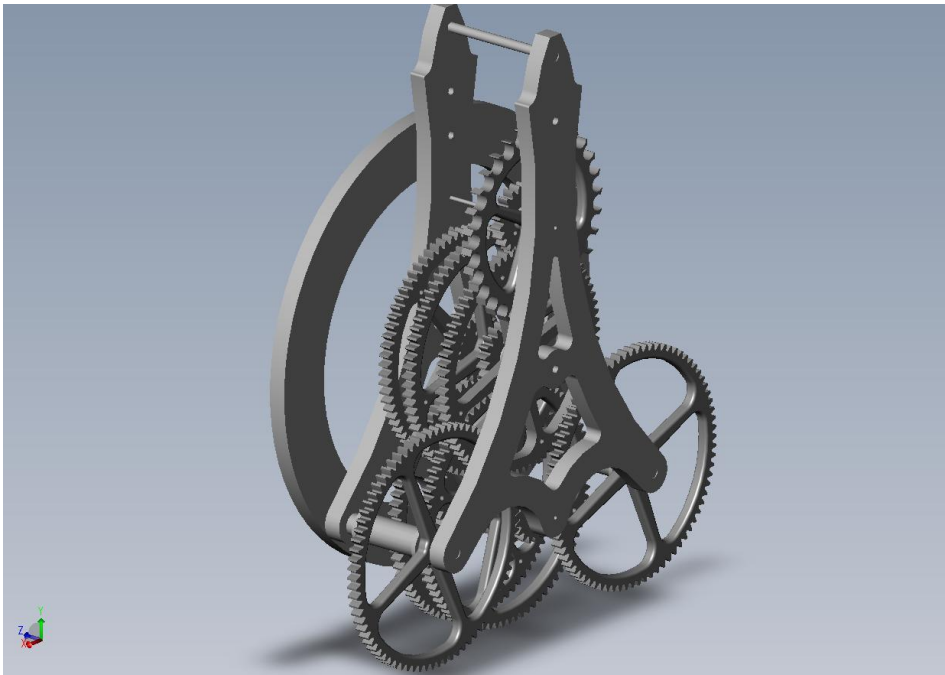
Um meine Zahnräder mit einer Fräsmaschine mit drehendem Werkzeug fräsen zu können, muss ich vor dem Zeichnen eine letzte Anpassung vornehmen. Der Anschluss zwischen Zahnflanke und Fussradius erfolgt mit einem beidseits tangential verlaufenden Radius. Normalerweise verwendet man einen Radius vom 0,3- oder 0,38-fachen Modul, ich will aber den grösstmöglichen Radius haben, daher wähle ich eine so genannte Full-Fillet-Geometrie für den Zahnfuss. Ich will eine Flanke mit der Gegenflanke mit einem einheitlichen Fussradius verbinden. Dieser entspricht etwa dem 0,5-fachen Modul. Da ich für meine Zahnräder einen Modul von 3 mm gewählt habe, ergibt sich somit ein Fussradius von 1,5 mm.



Das heisst, ich muss meine Zahnräder mit einem Werkzeug mit Durchmesser 3 mm fräsen. Ferner muss ein gewisses Spiel berücksichtigt werden, damit die Drehung der Zahnräder nicht durch geometrische Fehler behindert wird. Ich werde dafür ein Spiel von 0,5 mm berücksichtigen. Diesen Wert verteile ich gleichmässig zwischen Zahnrädern und Ritzeln.

Nachdem ich diese Parameter in das Berechnungsprogramm für Zahnräder von KISSsoft eingegeben habe, erstellt das Programm eine Zeichnung des Zahnradpaars, die ich im DXF-Format exportieren kann. Mit einem CAD-Programm zeichne ich in den Rädern Leerräume ein, um Gewicht zu sparen und sie leichter zu machen. Die Ritzel und die Räder erhalten 4 Löcher für die Befestigung der Sperrholzteile an der Fräsmaschine, so dass ich alle Fräsarbeiten in einem Durchgang ausführen kann. Mit diesen CAD-

Zeichnungen sind die Zahnräder nun bereits fertig für das Fräsen auf der CNC-Fräsmaschine.



## 5) Konstruktion der Uhr:

Nachdem die Zahl der erforderlichen Achsen und der Achsabstand feststehen, können wir diese nach Belieben im Raum unterbringen, je nachdem, welche Geometrie und Optik wir für unsere Uhr haben wollen. In meinem Fall hat der Rahmen eine im Wesentlichen dreieckige Geometrie mit einer zentralen Spitze oben und zwei seitlichen Spitzen im unteren Teil. In jeder Spitze ist eine Stange mit einem Durchmesser von 10 mm angebracht, die als Trennelement zwischen dem hinteren und dem vorderen Rahmen dient. Die Trennelemente verlängere ich im hinteren Teil, um sie an der Wand befestigen zu können. Das Auflager des Pendels habe ich möglichst hoch in der Uhr auf dem oberen Trennelement angebracht. Das Räderwerk bringe ich auf der mittleren Achse des Dreiecks in vertikaler Richtung an. Die nächste Achse weiter unten ist die Achse des Ankers. Diese dreht sich formschlüssig mit dem Anker und muss im hinteren Teil vorstehen, damit über einen Arm der Impuls auf den Pendelarm übertragen wird. Die nächste Achse ist die Achse der Hemmung oder Sekundenachse, auf der formschlüssig ein Ritzel mit 20 Zähnen sitzt. Die nächste Achse ist die Minutenachse, auf der ein Rad mit 75 Zähnen sitzt, welches mit dem Ritzel mit 20 Zähnen der Sekundenachse im Eingriff ist und formschlüssig mit einem Ritzel mit 20 Zähnen verbunden ist. Diese Kombination eines Rades mit 75 Zähnen und eines Ritzels mit 20 Zähnen ist auf einer Buchse montiert, die sich frei auf der Minutenachse dreht. Das Ritzel mit 20 Zähnen der Minutenachse ist im Eingriff mit einem weiteren Ritzel mit 80 Zähnen, das sich frei zusammen mit einem anderen Ritzel mit 20 Zähnen auf der unteren Achse dreht. Für die endgültige Untersetzung von der Hemmung oder Sekundenachse zur Minutenachse ist das Ritzel mit 20 Zähnen der unteren Achse im Eingriff mit einem Rad mit 80 Zähnen, das mit ein wenig



Reibung auf der Minutenachse gleitet, damit die Zeit in der Uhr eingestellt werden kann.

Für die Drehung der Stundenachse ist ein Ritzel mit 25 Zähnen formschlüssig mit der Minutenachse verbunden, das mit einem Rad mit 75 Zähnen im Eingriff ist, welches sich frei zusammen mit einem Ritzel mit 20 Zähnen auf der unteren Achse dreht. Dieses Ritzel mit 20 Zähnen ist im Eingriff mit einem weiteren Ritzel mit 80 Zähnen, das formschlüssig mit der Stundenachse verbunden ist. Die Stundenachse ist eigentlich keine Achse, sondern ein Rohr, das sich auf der Minutenachse dreht. Die Minutenachse verläuft durch dieses Rohr und ragt etwas darüber hinaus, so dass der Minutenzeiger vor dem Stundenzeiger steht, wenn man die Uhr von vorne betrachtet. Wenn man für die Einstellung der Uhr den Minutenzeiger dreht, wird durch dieses zweite Räderwerk der Stundenzeiger gedreht, das erste Räderwerk (zwischen Hemmung und Minutenachse) dreht sich jedoch nicht, weil das Rad mit 80 Zähnen über die Minutenachse gleitet.

Die Gewichte, die das Pendel in Bewegung halten, bringe ich auf den Trennelementen der Rahmen an, die auf jeder Seite im unteren Rahmenteil vorhanden sind. Jedes Gewicht hängt an einem Seil, das sich auf einer Rolle oder Trommel aufrollt. Diese Rolle ist über eine Klinke mit einem Rad mit 79 Zähnen verbunden, das die Energie des Gewichts auf das erste Räderwerk überträgt. Formschlüssig mit der Rolle verbunden ist ein Ritzel mit 18 Zähnen, das in ein zweites Ritzel, ebenfalls mit 18 Zähnen eingreift, dessen Achse an der Vorderseite der Uhr vorsteht; über das Sechskantstück an ihrem Ende können wir die Uhr dann mit einem einfachen Sechskantschlüssel aufziehen.

Alle Ritzel-Zahnrad-Paare werden auf Hartholzbuchsen montiert, in die ich selbstschmierende Bronzebuchsen mit einem Innendurchmesser von 4 mm einsetze. Diese Holzbuchsen tragen an einem Ende ein Ritzel und am anderen Ende ein Zahnrad. Dazwischen gewährleistet ein Mittelstück in der Buchse einen Abstand von 6 mm zwischen Ritzel und Rad. Die Zahnräder sind aus 12 mm starkem Sperrholz aus finnischer Birke hergestellt.

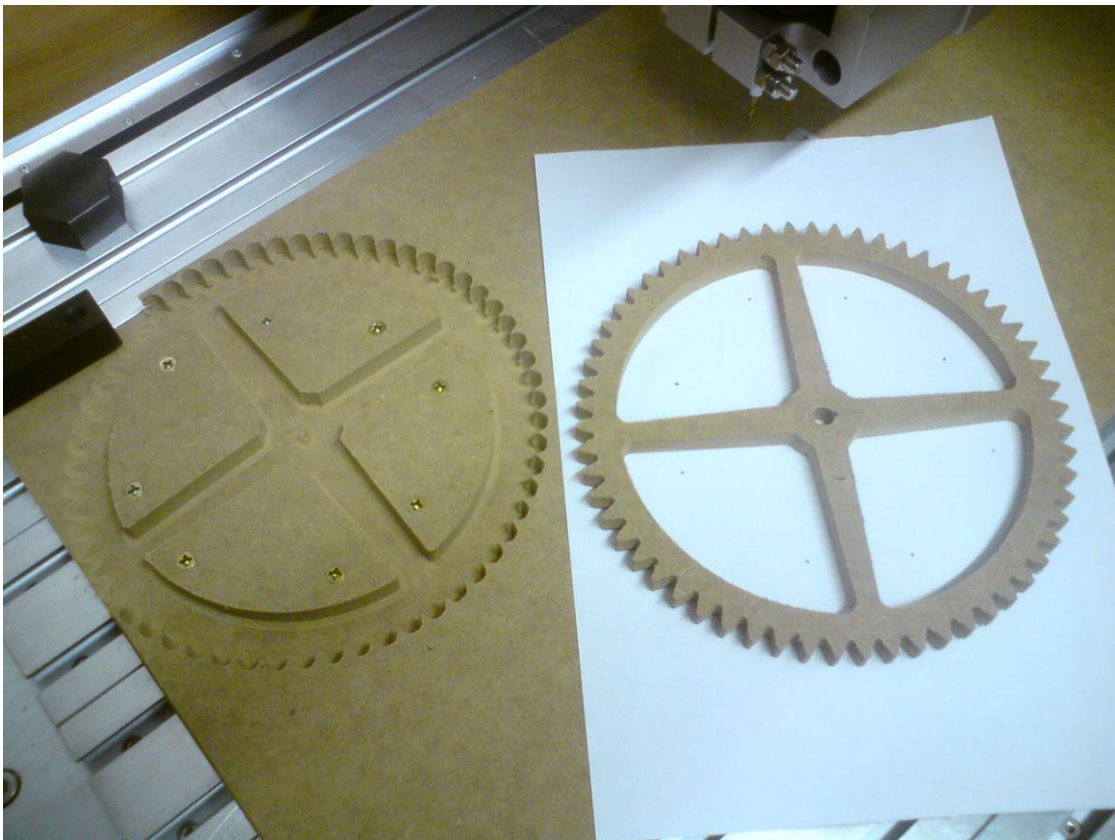
Für die Achsen der Räderwerke verwende ich einen kalibrierten Edelstahlstab mit 4 mm Durchmesser. Die Trennelemente stelle ich aus kalibrierten Edelstahlstäben mit 10 mm Durchmesser her. Um die axiale Position jedes Zahnradpaares zu sichern, setze ich Sicherungsringe nach DIN 6799 in Rillen ein, die ich in den Achsen angebracht habe.

Das Pendel schwingt auf einer Nut, in der das obere Trennelement sitzt, und auf einem V-förmigen Keil, in dessen unterem Teil das Pendel sitzt. Für den Pendelarm kann man Aluminiumrohr verwenden, dies hat aber den Nachteil eines hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Das bedeutet, dass sich seine Länge schon bei geringen Temperaturschwankungen verändert und die Uhr dadurch häufig vor- oder nachgeht. Man kann aber auch einen Rundstab aus Holz verwenden. Holz hat fast keinen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Im unteren Teil des Pendels bringe ich ein massives Holzstück als Gewicht an, das dem Thema der Uhr angepasst ist. Das Pendelgewicht benötigt eine Vorrichtung, mit der es zum Pendelarm verschoben und in der gewünschten Stellung festgestellt werden kann. Ich erinnere daran, dass die Länge des Pendels seinen Takt bestimmt, daher muss es möglich sein, seine Länge zu verändern, wenn die Uhr vor- oder nachgeht. Geht die Uhr vor, so muss die Länge des Pendels vergrößert werden, geht sie nach, muss sie verkürzt werden.

Diese Uhr soll für die Firma KISSsoft sein, die das Berechnungsprogramm für Zahnräder entwickelt, und es ist daher nahe liegend, dass die Uhr dem Thema Räderwerk gewidmet ist. Im obersten Teil des Rahmens ist ein Zahn eines Zahnrads angebracht. Auch am Pendelgewicht habe ich zwei Zähne symmetrisch zueinander angeordnet. Die Zeiger sind etwas verlängerte Zähne. Ich möchte auch, dass man das Räderwerk sieht, daher habe ich den Rahmen abgerundet und Sichtfenster vorgesehen, durch die man das Innere sieht. Zum Schluss habe ich ein Zifferblatt angebracht, auf dem die Stunden in römischen Ziffern markiert sind. Das Zifferblatt habe ich in Form von 4 Segmenten à 90° aus verschiedenfarbigem Holz hergestellt, so dass die Zeigerstellung bei 12 Uhr, 3 Uhr, 6 Uhr und 9 Uhr leicht erkennbar ist.

## **6) Herstellung der Uhr:**

Nachdem die Konstruktion der Uhr jetzt feststeht, ist es an der Zeit, das notwendige Material zu beschaffen und mit den Werkzeugen, die jeder besitzt, die einzelnen Teile der Uhr herzustellen. Hier möchte ich darauf hinweisen, dass es nicht nur eine Art und Weise gibt, eine Arbeit auszuführen. Normalerweise verwendet man zum Beispiel eine Bandsäge zum Schneiden der Zahnräder und Rahmen. Ich benutze eine CNC-Fräse, weil ich sie zur Verfügung habe.



Die Zahnräder sind aus Sperrholzplatten aus 12 mm starker finnischer Birke. Nach zahlreichen Versuchen, bei denen das Hauptproblem das leichte Brechen von Kanten und Ecken war, fand ich schliesslich die gewünschte

Qualität. Wichtig ist, dass je ein Trägerstück über und unter die Sperrholzplatte gelegt wird. Ich verschraube das gesamte Teil an der Maschine, so dass die Sperrholzplatte zwischen zwei MDF-Trägerplatten liegt. Dann bohre ich ein Loch mit einem Durchmesser von 3 mm in einem Abstand von 0,1 mm vom späteren Zahnfuss. Ohne dieses Loch beginnt das Werkzeug mit einem Durchmesser von 3 mm und extragrosser Ausführung (Schnittlänge 20 mm) zu vibrieren, wenn es sich dem Grund nähert. Durch das Vibrieren des Werkzeugs entsteht keine sichtbare Lücke zwischen den absolut symmetrischen Zähnen. Den Schnitt führe ich in mehreren Schritten aus: Zuerst 4 Durchgänge mit je 4,5 mm bei einer Schnittgeschwindigkeit von 300 m/Min. und einer Drehzahl des Werkzeugs von 7000-8000 U/Min. Beim ersten Schnitt berücksichtige ich eine Zugabe von 0,1 mm pro Fläche. Der Schnitt erfolgt im Uhrzeigersinn auf der Aussenseite und gegen den Uhrzeigersinn auf der Innenseite (z. B. bei den Fenstern). Im zweiten Schritt führe ich einen einzelnen Schnitt über die gesamte Tiefe durch und entferne die Zugabe von 0,1 mm, dabei arbeite ich mit einer Schnittgeschwindigkeit von 200 mm/min. Dann führe ich einen Leerdurchgang mit geänderter Arbeitsrichtung aus, das heisst gegen den Uhrzeigersinn auf den Aussenseiten und im Uhrzeigersinn auf den Innenseiten. Dies ergibt ein besseres Bearbeitungsbild. Wenn man so schneidet, muss man später kaum noch schleifen. Die Gesamtzeit für das Schneiden eines Rads beträgt ca. 45 Minuten, für ein Ritzel etwa 15 Minuten. Das ist nicht sehr schnell, aber dafür erhält man eine sehr gute Verarbeitungsqualität der Zahnräder. Zum Schluss müssen die Zahnräder geschliffen und lackiert werden. Dabei dürfen die Zahnflanken nicht lackiert werden, damit sie möglichst gut mit ihrem Gegenstück laufen. Ich habe die Zahnflanken und den Zahnfuss mit Klebeband abgedeckt und die restlichen Zahnteile sprühlackiert. Die Flanken sollten leicht von Hand oder mit Schleifscheiben mit einer kleinen Handfräse (z. B. Dremel) poliert werden.



Anschliessend habe ich mit der CNC-Fräsmaschine den vorderen und den hinteren Rahmen hergestellt. Hierfür habe ich 20 mm starkes Eichenholz verwendet, das ich auf eine Stärke von 16 mm bearbeitet habe. Dafür kam ein

drehendes Werkzeug mit Durchmesser 6 mm zum Einsatz. Zuerst habe ich in mehreren Durchgängen die Konturen mit Zugaben von je 0,2 mm gefräst und dann mit einem einzigen Durchgang die Zugaben von 0,2 mm entfernt. Da mein Rahmen recht gross ist (550 x 380 mm), war das verwendete Holz 200 mm breit und ich habe zwei Stücke zu einer Breite von 400 mm zusammengefügt, die ich für den Rahmen benötigte. Wenn man die Stärke einer Holzplatte verringern will, muss dies schrittweise erfolgen und es darf immer nur wenig auf jeder Seite abgenommen werden, bis man die gewünschte Stärke erreicht hat. Nachdem die Rahmen mit Schnitzzugaben, Löchern und Endstärke hergestellt sind, müssen sie geschliffen und lackiert werden. Löcher mit grossem Durchmesser müssen mit Baumwolle oder Papier geschützt werden, damit kein Lack eindringt. Nach dem Lackieren empfehle ich, die Löcher, deren Durchmesser sehr präzise sein muss, mit einem Handbohrer nachzuarbeiten, um mögliche Lackreste zu beseitigen.

Die Buchsen, auf denen ich die Zahnräder montiere, stelle ich aus Buchsbaumholz her. Diese Teile fertige ich mit einer kleinen Drehmaschine. Es ist keine spezielle Holzdrehmaschine. Es ist eine Drehmaschine für Metall. Die Durchmesser und die Konzentrität müssen präzise hergestellt werden. Die Drehmaschine hat einen Abstand zwischen Platte und Spitze von 300 mm und einen maximalen Drehdurchmesser von 140 mm. Der Einfachheit halber habe ich in der Z-Achse ein digitales Messgerät angeschlossen, um die Stellung des Werkzeugs direkt auf einem digitalen Display ablesen zu können. Das kann ich nur empfehlen. Grundsätzlich gibt es keinen besonderen Trick beim Drehen der Teile. Ich finde, gerade hier hatte ich die wenigsten Probleme oder, anders ausgedrückt, hier musste ich die wenigsten Teile neu fertigen. Die einzige Besonderheit, die ich auf der Drehmaschine hergestellt habe, war eine Schraubenlinie für die Rollen, auf denen das Seil der Gewichte aufgerollt werden soll. Ich will das kurz erklären: Ich wollte eine Nut mit Halbrundprofil und einem Durchmesser von 30 mm als Schraube mit einer Steigung von 2 mm herstellen. Für die einwandfreie Herstellung dieser Schraubenform benötigt man ein Werkzeug mit Motorantrieb. Ich habe dafür auf den Werkzeughalter der Drehmaschine eine Halterung für die Dremel-Maschine montiert. Auf der Dremel-Maschine habe ich ein drehendes Werkzeug mit einem Durchmesser von 2 mm und halbrunder Spitze montiert. Auf dem Antrieb für den Schlitten in der Z-Achse habe ich den Antrieb für die Steigung von 2 mm montiert. Das heisst, der Schlitten bewegt sich bei einer Umdrehung des Werkstücks um 2 mm in der Z-Achse. Ich schalte die Dremel-Maschine ein, stelle sie auf den Punkt, an dem das Gewinde beginnen soll und drehe die Platte der Drehmaschine von Hand. Beim Drehen der Platte der Drehmaschine fährt der Z-Schlitten vor und das Werkzeug der Dremel-Maschine führt die Nut mit Halbrundprofil als Schraube mit einer Steigung von 2 mm aus.

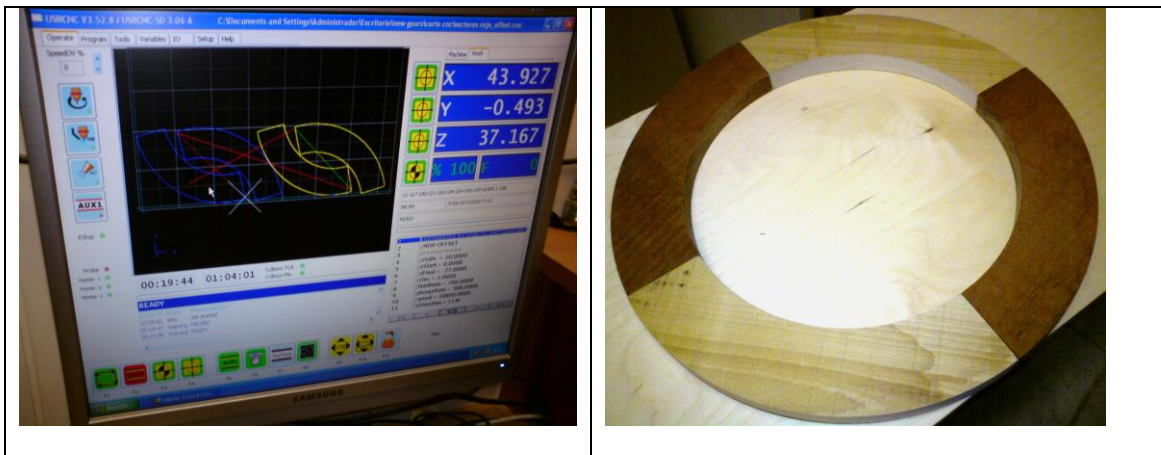
Fast alle Holzbuchsen haben an beiden Enden eine selbstschmierende Bronzebuchse. Für den Einbau dieser sorgfältig ausgerichteten Buchsen empfehle ich die Verwendung einer etwas grösseren kalibrierten Stange als Montagehilfe und den schrittweisen Einsatz beider Buchsen auf den beiden Seiten. Als Test sollte die Holzbuchse in Bewegung versetzt und kontrolliert werden, ob sie einige Umdrehungen vollzieht, bevor sie anhält.

Die Edelstahlachsen stelle ich auch auf der Drehmaschine her. Ich schneide sie mit der Säge mit einer gewissen Zugabe und bearbeite sie auf der



Drehmaschine auf ihre endgültige Länge. Nach der Planbearbeitung stelle ich die Rillen für den Einsatz der Halteelemente her, die die Lage der Buchsen, auf denen später die Zahnräder sitzen, sichern. Für die Rillen verwende ich einige einfache Werkzeuge, die ich mit einem Vierkant von 10 x 10 mm aus Schnellstahl (HSS) herstelle. Einige der Achsen haben durchgängige Gewinde mit einem Durchmesser von 2 mm. Diese Gewinde dienen zum Anbauen eines Teils auf der Achse mit Hilfe eines Stifts oder Stabs mit einem Durchmesser von 2 mm. Das Kleben von Holz auf Metall wäre nicht sehr effektiv und die Verbindung würde sich möglicherweise lösen. Für diese Gewinde habe ich in eine Metallnabe ein Loch von 4,1 mm und senkrecht dazu in der Mitte ein weiteres Loch mit einem Durchmesser von 2,1 mm gebohrt. Diese Nabe dient mir als Werkzeug, um in den Achsen mit einem Durchmesser von 4 mm ein zentriertes Loch mit einem Durchmesser von 2 mm zu bohren. Zum Abschluss empfehle ich, die Achsen auf der Drehmaschine zu schleifen, um die Oberfläche zu polieren. So kann sich die Bronzebuchse leichter drehen. Ich habe dafür eine Schleifscheibe mit einer Körnung von 1000 verwendet. Es ist wichtig, alle Grate sorgfältig zu runden, damit die Bronzebuchse sich leicht einführen lässt.

Für das Zifferblatt verwendete ich zwei verschiedenfarbige Hölzer: Ein weisses und ein rotes Holz, in abwechselnden Segmenten zu je 90°. Ich füge die vier Holzteile zusammen und schleife sie von einer Stärke von 27 mm auf 23 mm. Dann fräse ich den Aussen- und den Innendurchmesser. Zum Schluss werden die Teile geschliffen und lackiert.



Die Zahlen für die Stunden habe ich aus 1 mm starkem Edelstahlblech mit Laser geschnitten. Sie sind mit einem Zweikomponenten-Epoxidharzkleber aufgeklebt. Zu den Zahlen muss ich eine Besonderheit anmerken. Ich habe römische Ziffern verwendet. Die 4 ist mit vier Strichen dargestellt, richtig wäre jedoch IV. Diese Darstellung mit vier Strichen findet sich auf vielen Uhren mit römischen Ziffern und ich wollte wissen, warum dies so ist. Dazu gibt es mehrere Theorien. Eine besagt, dass ein Herrscher im Mittelalter einen Uhrmacher köpfen liess, weil er vier Striche für die 4 verwendet hatte. Dies machte unter den Uhrmachern schnell die Runde und als Zeichen ihres Protestes beschlossen sie, von nun an die 4 immer mit vier Strichen darzustellen. Ob dies stimmt oder nicht, mir hat diese Geschichte gefallen und ich habe daher beschlossen, mich dieser Uhrmachertradition anzuschliessen und die 4 mit vier Strichen anzuzeigen.



Ein anderes wichtiges Teil der Uhr ist das Pendel. Im oberen Teil des Pendels habe ich ein Holzteil, an dem ich einen V-förmigen Keil anbringe. Das obere Trennelement der Uhr ist ein Edelstahlstab mit einem Durchmesser von 10 mm, in den im Auflagebereich des Pendels ein V-förmiges Hohlprofil mit einem Winkel von 90° zwischen den Seitenflächen gefräst ist. Auf diesem V-Profil mit 90° ruht das V-Element des Pendels. Dieses Holzteil, auf dem das Pendel sitzt, ist der Ausgangspunkt des Arms, der bis zum Gewicht des Pendels reicht. Im Inneren des Pendelgewichts ist eine Keilnut gefräst. Der Pendelarm endet in einem quadratischen Holzteil, das auf der Keilnut des Gewichts gleiten kann. Indem ich eine Schraube vom Arm bis zum Gewicht einfüge, die sich in beiden Richtungen dreht, erreiche ich, dass das Gewicht sich zum Arm hebt oder absenkt. Durch die Veränderung der Länge des Pendels kann ich also seinen Takt einstellen.

Die beiden Gewichte, die die Uhr antreiben, damit sie nicht stehen bleibt, habe ich aus Blei hergestellt, damit sie nicht zu gross werden. Die Bleistange mit einem Durchmesser von 50 mm sitzt in einem Aluminiumrohr und hat zwei Holzabschlüsse an beiden Enden. Das Gewicht ist nicht direkt am Seil der Rolle angehängt. Mit seinem anderen Ende ist das Seil am Rahmen der Uhr befestigt. Das Gewicht ist am Seil über eine Riemenscheibe aufgehängt, damit verdoppele ich den Weg des Seils und damit letztlich die Laufzeit der Uhr, bis die Gewichte wieder hochgezogen werden müssen.

Das genaue Gewicht, das benötigt wird, um alle Reibungen und Energieverluste auszugleichen und das Pendel stetig in Bewegung zu halten, ist schwer im Voraus zu berechnen. Ich habe an jedes Seil ein Gefäss gehängt und diesem Gefäss stetig Gewicht hinzugefügt, bis sichergestellt war, dass das Pendel nicht nach einigen Minuten stehen blieb. Als Ausgangspunkt kann man etwa 3 kg in jedem Gefäss nehmen. Ist die stetige Bewegung des Pendels erreicht, müssen beide Gefässe gewogen und Gewichte mit der erforderlichen Länge hergestellt werden, damit in ihrem Inneren ein Bleigewicht entsprechend dem Gewicht des Gefässes untergebracht werden kann.

Wie zuvor erklärt, muss die Trommel, an der das Gewicht hängt, mit einer Rastvorrichtung versehen sein, die das Moment in einer Umdrehungsrichtung überträgt, sich in der Gegenrichtung aber ausklinkt, damit sich die Trommel frei dreht. Die Trommel muss sich frei drehen, wenn das Gewicht angehoben werden soll, ohne dass sich die Uhr verstellt. Meine Konstruktion beruht auf zwei Klinken, die ein Rad mit asymmetrischen Zähnen anhalten, welche die Drehung in einer Richtung freigeben, während die Klinken in der anderen Richtung einrasten, so dass das Rad sich nicht dreht. Damit diese Vorrichtung wirksam ist, müssen die Enden der Klinken ständig auf den Zähnen des Rads mit asymmetrischen Zähnen aufliegen. Hierfür habe ich an jeder Klinke eine kleine Feder angebracht, die für den Kontakt zwischen Klinke und Zahnrad sorgt.

Damit das Gewicht bis in die höchste Stellung angehoben werden kann, ist an einem Ende der Trommel ein Ritzel mit 18 Zähnen angebracht. Dieses Ritzel greift in ein anderes Ritzel mit ebenfalls 18 Zähnen ein. Dieses andere Ritzel ist formschlüssig mit einer Welle verbunden, an deren Ende ich eine Sechskantschraube M6 nach DIN 933 anbringe. Das Gewicht kann einfach mit einem Schlüssel von Hand oder am bequemsten mit einem kleinen elektrischen

Schraubendreher mit angesetztem Schlüssel angehoben werden. In künftigen Uhrenkonstruktionen will ich die Möglichkeit einer automatischen Vorrichtung für das Anheben des Gewichts prüfen, wenn dieses jeweils seine untere Stellung erreicht hat. Diese Uhr kann etwa 32 Stunden zwischen zwei Aufzügen laufen.