

Wintersemester 2022/23

Autonome Systeme

Dokumentation

Selbstbau-Hand

Teilnehmer:	Arik Kiefer
	Leonhard Kirchberger
	Bernhard Wagnitz
Betreuer:	Prof. Dr. habil. Alfred Schöttl
Abgabedatum:	17.01.2023

Inhalt

1. Konstruktive Überlegungen.....	2
Passive kontinuierliche Übersetzung	4
2. Fertigung.....	4
3D-Druck.....	4
Genauigkeit und Oberflächenqualität.....	4
Gewinde	5
Material	6
Fertigungsparameter.....	6
Nachbearbeitung.....	7
Findung der richtigen Federhärte	7
Einbau der Drucksensoren	8
Montage der Gelenke.....	8
3. Programmierung	9
Kommunikation mit der Roboter Hand.....	9
Beispiele	10
4. Elektronik.....	10
Schaltplan	11
5. Anhang.....	12
Konstruktion.....	12
Programmierung	13
Benötigte Elektronik/Komponenten	21
Teileliste Mechanik.....	21

1. Konstruktive Überlegungen

Die 3D-gedruckte Roboterhand soll möglichst einer menschlichen Hand ähneln. Deshalb wurde bei der Konstruktion darauf geachtet, die grundlegende Form und Funktion einer Hand zu garantieren.

Als Ersatz für die Sehnen in der Hand wurde eine Maurerschnur verwendet, diese sollte möglichst nicht zu sehen sein. Aus dieser Überlegung ergab sich das Finger Design in **Abbildung 1**. Dabei klappen die einzelnen Gelenkrippen nahtlos ineinander und verstecken die Maurerschnur.

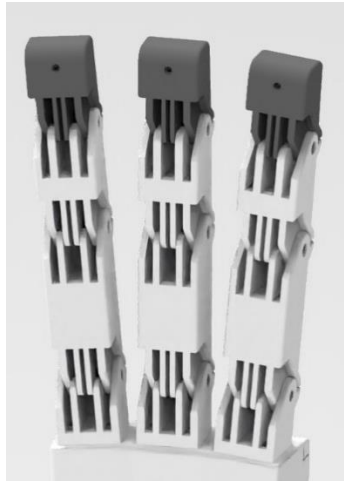


Abbildung 1: Fingerdesign

Der menschliche Daumen besitzt ein Sattelgelenk, welches jedoch nicht in diesem Projekt mechanisch nachgeahmt werden konnte. Aus diesem Grund besteht auch der Daumen aus Scharniergelenken. Allerdings mit der Besonderheit, dass sich der Daumen Richtung Handmitte eindreht (Abbildung 2).

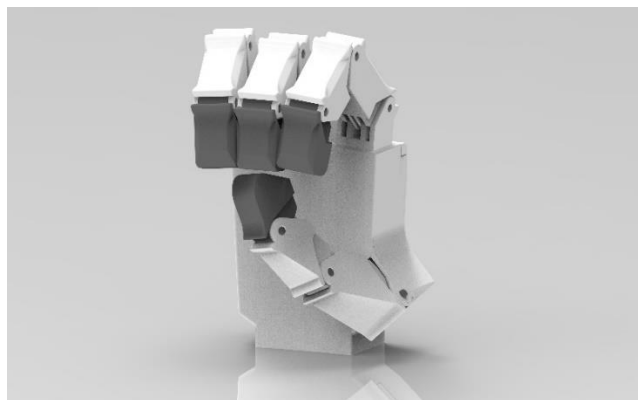


Abbildung 2: Daumendrehung in die Mitte der Handfläche

Die Scharniergelenke an Daumen und Hand werden mittels einer Feder in ihre Ursprungsposition bewegt. Diese ist bei den Passstiften zu finden.

Als eine weitere Überlegung die Seilführung möglichst zu verstecken, wurde innerhalb der Handfläche eine Konstruktion eingebaut, mit welcher die Seile problemlos zur Anbindung an den Roboterarm

geführt werden können (Abbildung 3). Außerdem dient die Konstruktion als Ablagefläche für die Zwischenebene, auf der sich die Elektronik der Hand befindet (Abbildung 4). Damit die Motordriver nicht in der Hand lose herumfliegen, wurde sich ein Clipskonzept überlegt. Der Microcontroller wurde lediglich fixiert und anschließend durch den Deckel in seiner Position festgeklemt.



Abbildung 3: Handinnenfläche

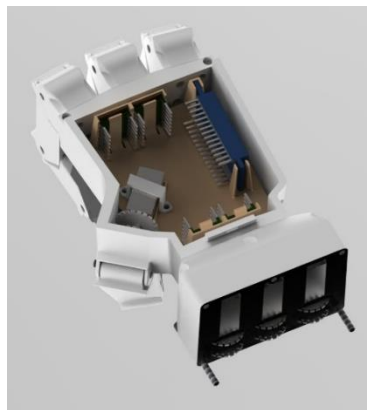


Abbildung 4: Zwischendecke in Handfläche

Ein weiteres Ziel des Projekts war es, eine Anbindung zum bereits vorhandenen Roboterarm zu ermöglichen. Dabei wurde auch eine Unterbringung und Fixierung der Motoren für die Finger entworfen (Abbildung 5).



Abbildung 5: Anbindung an Roboterarm

Passive kontinuierliche Übersetzung

Die Maurerschnur wird von den Motoren auf eine Rolle mit flexiblem Radius gewickelt. Dieser besteht aus Gummibändern, welche parallel zur Rotationsachse verlaufen. Wenn die Finger auf einen Widerstand stoßen, werden die Gummibänder eingezogen und der Radius wird kleiner. Damit ist es möglich eine schnelle Bewegung zu fahren, wenn eine große Kraft benötigt wird. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass keine Belastung an den Fingern anliegt.



Abbildung 6: Rolle mit flexiblem Radius

2. Fertigung

3D-Druck

Wichtiger Teil der Aufgabenstellung ist, die Bauteile mit einem FDM-Drucker herzustellen, sodass sie leicht reproduzierbar sind. Dieses Verfahren bringt im Hinblick auf die Konstruktion einige Vorteile mit sich, aber auch ebenso Einschränkungen, die dabei bedacht werden müssen.

Vorteilhaft ist zunächst, dass der Konstrukteur in der Gestaltung der Bauteile mit gewissen Einschränkungen eine deutlich größere Freiheit im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren besitzt. Des Weiteren lassen sich sehr gut Leichtbauteile herstellen, indem mechanisch weniger belastete Teile, nicht in vollem Material, sondern nur einem Mindestmaß an Infill gedruckt werden.

Genauigkeit und Oberflächenqualität

Haupteinschränkung ist die nur mittelmäßige Genauigkeit und Oberflächenqualität von FDM-Teilen im Vergleich zu z.B. Frästeilen. Die Fingergelenke sollten möglichst Reibungsarm zu bewegen sein. Reibt man allerdings unter Last FDM-Teile gegeneinander, ist dieses Ziel nur schwer zu erreichen. Daher wurde zunächst als Drehachse des Gelenks jeweils ein Zylinderstift verwendet, der in dem einen Gelenkteil (dem das andere Umschließende, „female“) eingepresst und in dem anderen frei drehbar ist. Die Radialkraft wirkt nun nicht mehr zwischen zwei Kunststoffteilen, sondern stets nur zwischen einem Kunststoff- und einem Metallteil. Hierbei ist eine Bewegung mit deutlich geringerer Reibung möglich. Um evtl. auftretende Axialkräfte ebenfalls über eine Kunststoff-Metall-Kopplung zu übertragen, wurde auf den Zylinderstift jeweils zwischen die beiden Gelenkteile eine Unterlegscheibe

in den dafür vorgesehen Ausschnitt eingesetzt (siehe Abbildung 7). Bei einer Bewegung des Gelenks sind nun alle Kunststoff-Kunststoff-Kopplungen durch Kunststoff-Metall Kopplungen ersetzt. Zusätzlich wurden nach beendeter Montage die Gelenke mit Silikonspray geschmiert.

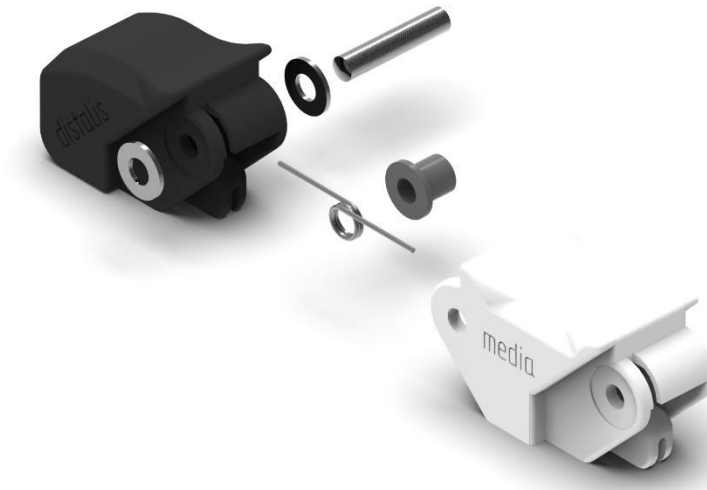


Abbildung 7: Explosion eines Fingergelenks

Wie bereits beschrieben, wird der Gelenk-Zylinderstift (4 mm Durchmesser) mittels Presspassung in Position gehalten. Die dafür benötigte Genauigkeit der Lochdurchmesser ist mit einem gewöhnlichen FDM-Drucker selbstverständlich nicht erreichbar. Daher wurden die Löcher zunächst mit einem nominellen Durchmesser von 4,0 mm gedruckt. Im FDM-Verfahren ergibt dies meist etwas zu kleine Löcher. Die feste Passung wurde dann mit einem 4,0 mm Bohrer aufgebohrt, während die lose Passung mit einem 4,1 mm Bohrer aufgebohrt wurde. Dieses Vorgehen hat sich in der Montage als am besten erwiesen.

Um weitere Probleme mit der Maßgenauigkeit der FDM-Teile zu vermeiden, wurde zwischen allen beweglichen Teilen, die sich nicht berühren sollen, ein Abstand von mindestens 0,2 mm eingehalten.

Gewinde

Im Vergleich zu anderen Materialien ist es meist eher schwierig, metrische Gewinde in das FDM-Material zu schneiden, insbesondere, wenn sie nicht allzu lang sind und relativ großen Belastungen standhalten sollen. Daher war dieses Vorgehen hier keine Option. Dennoch gab es viele Situationen, in denen eine Schraubmontage nötig war. An einigen Stellen, an denen beide Enden der Schraubverbindung gut zugänglich waren (z.B. an der Anbindung für den Roboterarm) wurden einfach Schrauben mit Muttern verwendet. Bei der überwiegenden Anzahl der Schraubverbindungen wurden allerdings stattdessen Gewindeeinsätze verwendet. Dazu musste nur an der entsprechenden Stelle im 3D-Modell ein ausreichend großes Loch gelassen werden (z.B. 4,5 mm für einen M3-Gewindeeinsatz)

und auf eine ausreichende Restwandstärke geachtet werden. Der Gewindeeinsatz kann dann einfach auf das etwas zu klein bemessene Loch gesetzt, mit einem LötKolben erhitzt und mit geringer Kraft langsam eingedrückt werden. Diese Verbindung hält sehr gut und erleichtert die Montage im Vergleich zu Muttern enorm, während trotzdem im Vergleich zum Schneiden der Gewinde ins FDM-Material ein häufiges Montieren und Demontieren, was insbesondere beim Aufbau solcher Prototypen notwendig ist, ohne Probleme möglich macht.

Material

Da keine besonderen Anforderungen bezüglich Belastbarkeit, Temperaturbeständigkeit etc. vorgegeben waren, wurde die Hand zunächst der Einfachheit des Ausdrucks halber PLA verwendet. Da mit diesem Material in Kombination mit der Konstruktion keine Probleme aufgetreten sind, ist es empfehlenswert, diese Materialwahl in Zukunft beizubehalten, solange kein dringender Änderungsgrund besteht.

Fertigungsparameter

Die Fingerglieder wurden mit einer standardmäßigen 0,4 mm Düse und einer Schichtdicke von 0,2 mm gedruckt. Die Drucktemperatur betrug 190 °C, da hier geringes Stringing auftritt, wodurch die Qualität des Drucks steigt und die Nachbearbeitung vereinfacht wird. Allerdings erhöht sich so das Risiko von Brüchen entlang der Schichtlinien. Sollte dieses Problem öfter auftreten, wäre die Temperatur geringfügig zu erhöhen. Ansonsten wurde mit einer Wandstärke von 1,2 mm, also 3 Linien, gedruckt, und mit einem minimalen Infill („Blitz“ in Cura). Durch das geringe Infill wird die mechanische Belastbarkeit der Bauteile nicht beeinträchtigt, da die kritischen Bruchstellen eher an so dünnen Stellen liegen, dass hier gar kein Raum für irgendeine Füllung wäre. Es wird lediglich Gewicht eingespart.

Für die Handfläche wurde eine 0,6 mm Düse verwendet, da hier nicht so große Genauigkeiten nötig waren und so die Druckzeit deutlich verringert werden konnte. Die weiteren Parameter wurden beibehalten.

Die Armanbindung, in denen auch die Motoren für die Finger (mit Ausnahme des Daumens) sitzen, hatte noch geringere Genauigkeitsanforderungen, und wurde daher mit einer 0,8 mm Düse gedruckt.

Die Handfläche sowie der Arm können selbstverständlich auch mit einer 0,4 mm Düse gedruckt werden, es bietet sich bloß aus Zeitgründen eine größere Düse an.

Die Spulen, auf denen die Fingersehen aufgewickelt werden, besitzen beim Ausdrucken einen enorm großen Überhang und sind daher sehr herausfordernd zu Drucken. Der große Überhang konnte allerdings bewältigt werden, indem eine 0,6 mm Düse und eine Schichtdicke von nur 0,1 mm verwendet wurde. Diese Kombination hat zum Vorteil, dass auch bei großem Überhangwinkel noch jede gedruckte Linie mit einer anderen Linie der darunter liegenden Schicht

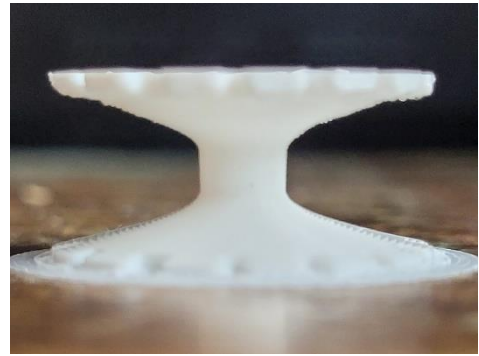


Abbildung 8: Ausgedruckte Spule

überlappt. Hier hatte die Verwendung der größeren Düse also einen über die Zeitersparnis hinausgehenden Vorteil. Auch dieses Teil wäre mit einer 0,4 mm Düse Druckbar, die Unterseite des Überhangs hätte allerdings eine sehr niedrige Qualität und müsste wahrscheinlich mit einem Messer und/oder einer Schlüsselfeile nachbearbeitet werden.

Nachbearbeitung

Bei allen Teilen, aber insbesondere den Fingergliedern und ihren Gelenken, ist eine Sorgfältige Nachbearbeitung der Druckteile notwendig, um die Funktionsfähigkeit nicht zu behindern. Das bedeutet, dass alle Fäden und sonstige Unebenheiten mithilfe eines Messers entfernt werden müssen. Die Löcher für die Sehnen sollten, wo möglich, aufgebohrt werden. Die Durchführungen für die Sensorkabel sollten auf freien Durchgang kontrolliert werden. Wo Stützstrukturen verwendet wurden, sollte besonders auf die Sauberkeit der Fläche geachtet werden.



Abbildung 9: Mit einer Säge eingebrachter Federschlitz

Die Federn sind in dem Gelenk „überdacht“, sodass sie auch im eingeklappten Zustand nicht offenliegen. Durch einen seitlichen Schlitz kann sich der eine Federschenkel bewegen. Dieser Schlitz sollte nicht mitgedruckt, sondern nachträglich von Hand mit einer Säge eingebracht werden, da sonst das Drucken dieses Dachs unverhältnismäßig schwieriger wird.

Findung der richtigen Federhärte

Das Zugreifen der Finger wird, wie bei der menschlichen Hand auch, über an ihrer Unterseite verlaufende Sehnen bewerkstelligt. Die Rückstellung der Finger wird über vorgespannte Drehfedern bewirkt. Die Federhärte sollte nicht bei allen Gelenken an einem Finger gleich stark sein, sondern von dem äußersten Gelenk zum inneren Abnehmen. Dadurch klappen die Fingergelenke in der richtigen Reihenfolge ein. Dabei muss jede Feder stark genug sein, dass der Finger immer zurückgestellt werden

kann und bei Bewegungen der Hand nicht zu leicht das Wackeln beginnt, aber gleichzeitig minimal sein, da eine Erhöhung der Federhärte bedeutet, dass mehr Motorkraft nur in die Stauchung der Federn geht und nicht zum Greifen verwendet werden kann.

Die verwendeten Federn wurden aus Stahldraht selbst hergestellt. Die Federhärte kann hauptsächlich variiert werden über die Windungszahl und den Drahtdurchmesser (größere Windungszahl bewirkt geringere Härte, größerer Drahtdurchmesser bewirkt größere Härte). Die Federhärte kann genau verdoppelt werden, indem zwei identische Federn parallel verbaut werden.

Vorhanden war hier Draht mit einem Durchmesser von 0,5 und 1,0 mm. Wie sich bei einigen Test herausstellte, war keiner dieser beiden Durchmesser wirklich gut geeignet, es würde wahrscheinlich mit einem Durchmesser von ca. 0,7 mm am besten funktionieren. Stattdessen wurden hier jeweils mehrere Federn des 0,5 mm Drahtes parallel verbaut.

Einbau der Drucksensoren

An den Fingerspitzen befinden sich Drucksensoren (bzw. Kraftsensoren). Diese elektrischen Bauteile verändern ihren elektrischen Widerstand, je nach der Kraft, die auf sie wirkt. D.h. um sie zu verwenden, müssen zwei Kabeladern durch den Finger an



Abbildung 10: Drucksensor mit Schaumstoff

die Spitze gelegt werden. dafür wurden in den Fingern Kanäle vorgesehen, die dies ermöglichen, ohne die Kabel offenzulegen und ohne beim Einklappen der Finger ein großes Kabelspiel zu benötigen.

Die Drucksensoren sind mit Heißkleber und doppelseitigem Klebeband an den Fingerspitzen befestigt. Zwischen Sensor und Finger ist auch noch eine dünne Schaumstoffschicht eingebracht, die eine gleichmäßigere Auflage der Sensoren auf Objekten ermöglicht.

Montage der Gelenke

Die Montage der Gelenke ist etwas knifflig, aber mit ein bisschen Übung und den richtigen Tricks gut zu bewältigen. Dazu sind zunächst die Feder und der Federhalter in innere Gelenkteil einzusetzen und mit einem Holzspieß in Position zu halten. Anschließend ist der lose Federschenkel in das andere Fingerglied einzufädeln, der Holzspieß vorsichtig zu entfernen und die Fingerglieder ineinander einzusetzen. Sobald möglich, sollte der Holzspieß wieder eingesetzt werden, um Feder und Federhalter wieder in Position zu halten. Der Holzspieß kann jetzt durch einen Zylinderstift ersetzt werden. Ist der Zylinderstift eingesetzt, können die Unterlegscheiben eingebaut werden, indem der Stift jeweils auf einer Seite so weit herausgezogen wird, dass auf der anderen Seite die Scheibe eingebaut werden kann.

Nun ist das Gelenk fertig. Ist ein ganzer Finger fertig, können das Sensorkabel und die Sehne durch die entsprechenden Löcher gefädelt werden.

3. Programmierung

Für die Programmierung wurde die STM32CubeIDE verwendet, da diese automatische Code Generierung für den Controller bereitstellt. Das Programm, welches für die 3-D gedruckte Hand geschrieben wurde, ist in der Sprache C geschrieben. Es beinhaltet einfache Funktionen, um die Motoren und Sensoren anzusteuern. Zudem können, mittels serieller Kommunikation über die USB-Schnittstelle, Befehle an die Hand gesendet werden.

Das Beispielprogramm verwendet dabei einen Befehl, welcher 10 Zeichen lang ist, um verschiedene Finger entweder mit einer P-Regelung auf eine Kraft zu regeln oder wieder zu öffnen. Dabei wird auch immer eine Laufzeit mit übertragen, damit keine versehentliche Überlastung der Motoren entsteht und beim Öffnen die Motoren nicht weiter als notwendig drehen.

Mit dem „Timer 6“ des Mikrocontrollers wird die Aufruffrequenz der Regelung gesetzt. Aktuell ist diese auf 50 ms eingestellt, kann allerdings ohne Probleme angepasst werden. Diese entspricht auch einer Zykluszeit. Bei jedem Zyklus werden das PWM-Signal und die Kraft über die serielle Schnittstelle ausgegeben.

Kommunikation mit der Roboter Hand

Der Controller benötigt immer 10 Zeichen für die Ansteuerung. Erst wenn alle 10 Zeichen übermittelt wurden, wird der Befehl ausgeführt. Werden mehr oder weniger Zeichen übermittelt, kann es zu Komplikationen führen und das Programm führt den Befehl nicht ordnungsmäßig aus. Sollten zu viele oder zu wenig Zeichen übermittelt werden, muss der nachfolgende Befehl die Differenz an Zeichen beinhalten, um wieder auf 10 Zeichen zu kommen. Beispielsweise werden zuerst 11 Zeichen übermittelt, müssen im Anschluss 9 Zeichen übermittelt werden. Während ein Befehl abläuft, kann dieser überschrieben werden, dabei werden aber nur die gewählten Finger (ersten Zeichen) geändert, sonst bleiben die Befehle bestehen.

Die Finger können in der „hand_functions.h“ Datei kalibriert werden.

Zeichen 1 (Zahl sonst Fehler)	Beschreibung
1	Finger 1
2	Finger 2
3	Finger 3
4	Finger 4
5	Alle Finger

6	Finger 1 + 4
7	Finger 2 + 4
8	Finger 3 + 4
9	Finger 1 + 2 + 3
0	Ausgangsposition unabhängig von anderen Zeichen.

Zeichen 2 (jedes Zeichen möglich)	
-	Öffnen der gewählten Finger mit gewähltem PWM
Alles außer „-“	P-Regelung auf gewählte Kraft

Zeichen 3 bis 6 (nur Zahlen)	
PWM wenn Zeichen 2 = „-“	PWM = $\text{xxxx}/10$ (70% = 0700)
P-Regelung bei anderen Zeichen	Kraft = xxxx mN

Zeichen 7	Nicht belegt
-----------	--------------

Zeichen 8 bis 10 (nur Zahlen)	Dauer in Zyklen
-------------------------------	-----------------

Beispiele

- 1f5000t050 -> Finger 1 wird für 50 Zyklen auf eine Kraft von 5000 mN geregelt.
- 5x3500t200 -> Alle Finger werden für 200 Zyklen auf eine Kraft von 3500 mN geregelt.
- 0x9999x000 -> Alle Finger werden auf die Ausgangsposition gefahren. Dabei wird die Hand erst geschlossen und wieder geöffnet.
- 6-0500t010 -> Finger 1 und 4 werden für 10 Zyklen geöffnet mit einem 50 % PWM-Signal.

4. Elektronik

Die Roboterhand soll eine sehr kompakte Bauweise besitzen. Um dies zu erreichen ist eine gute Planung der Elektronik und Verkabelung notwendig. Die Platinen der Drucksensoren wurden entfernt und durch einen Widerstand mit Kondensator ersetzt, um Platz einzusparen.

Elektronik Bauteile	Anzahl
NUCLEO-L432KC - STM32 Nucleo Board 256kB 64kB	1
DRV8876 (QFN) Single Brushed DC Motor Driver Carrier	4
Step-Up/Step-Down Voltage Regulator S13V10F5	1
210:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 12V	4
Keyestudio Thin-film Pressure Sensor	4
Tischnetzteil, 78 W, 12 V, 6,5 A	1
Einbaubuchse, Ø außen: 5,7 mm, Ø innen: 2,1 mm	1
USB zu microUSB Kabel	1

Schaltplan

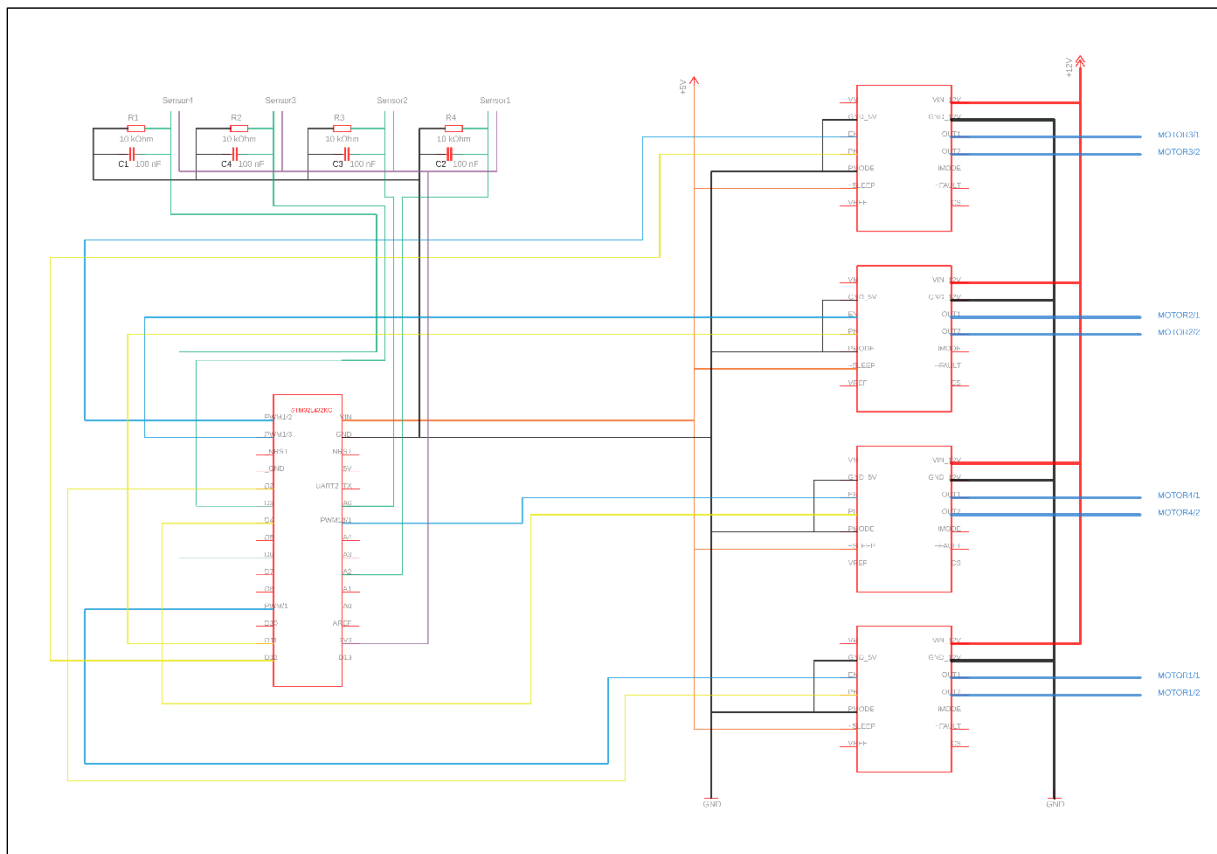


Abbildung 11 Schaltplan (Hochauflösend in externer Datei)

5. Anhang

Konstruktion

Fingerteil Anfang	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Fingerteil Mitte	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Fingerteil Spitze	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Finger Anbindung-Handfläche	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Daumen Anfang	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Daumen Mitte	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Daumen Spitze	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Handfläche Grundkörper	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Handfläche Zwischendecke	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Handfläche Deckel	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Anbindung Hand-Arm: Richtung Hand	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Anbindung Motorhalterung: Richtung Hand	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Anbindung Motorhalterung: Richtung Arm	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Anbindung Hand-Arm: Richtung Arm	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Motorschelle	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Motorspule 1	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Motorspule 2	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Motor	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Microcontroller	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
Motordriver	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub
	Link zur CAD-Datei in Lasim/GitHub

Programmierung configuration of the peripherals

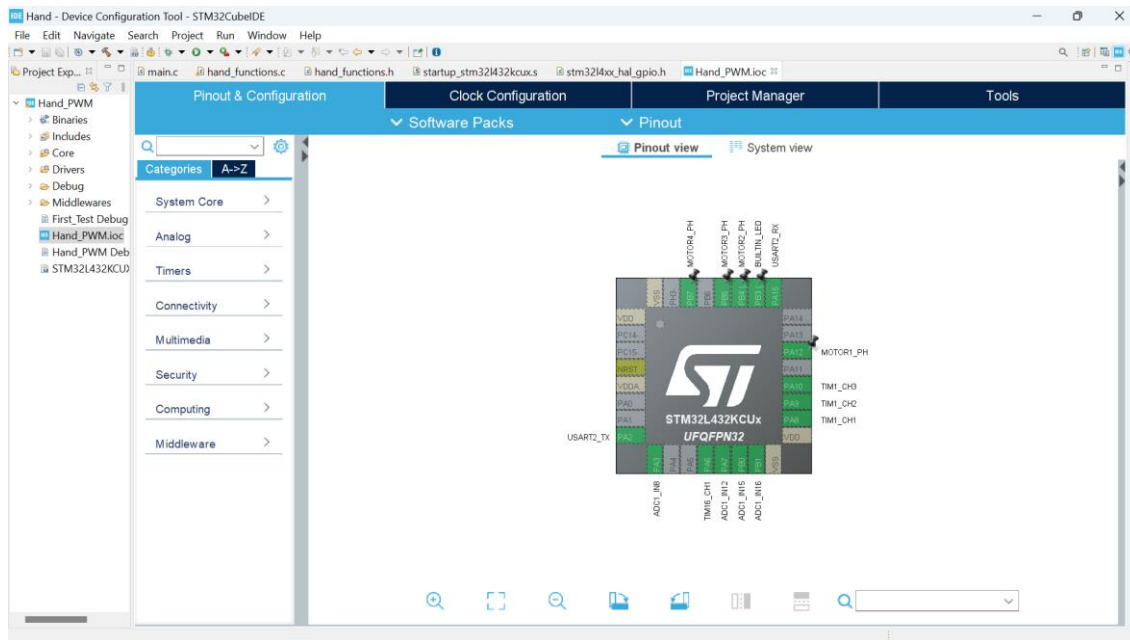


Abbildung 12 Pinout view

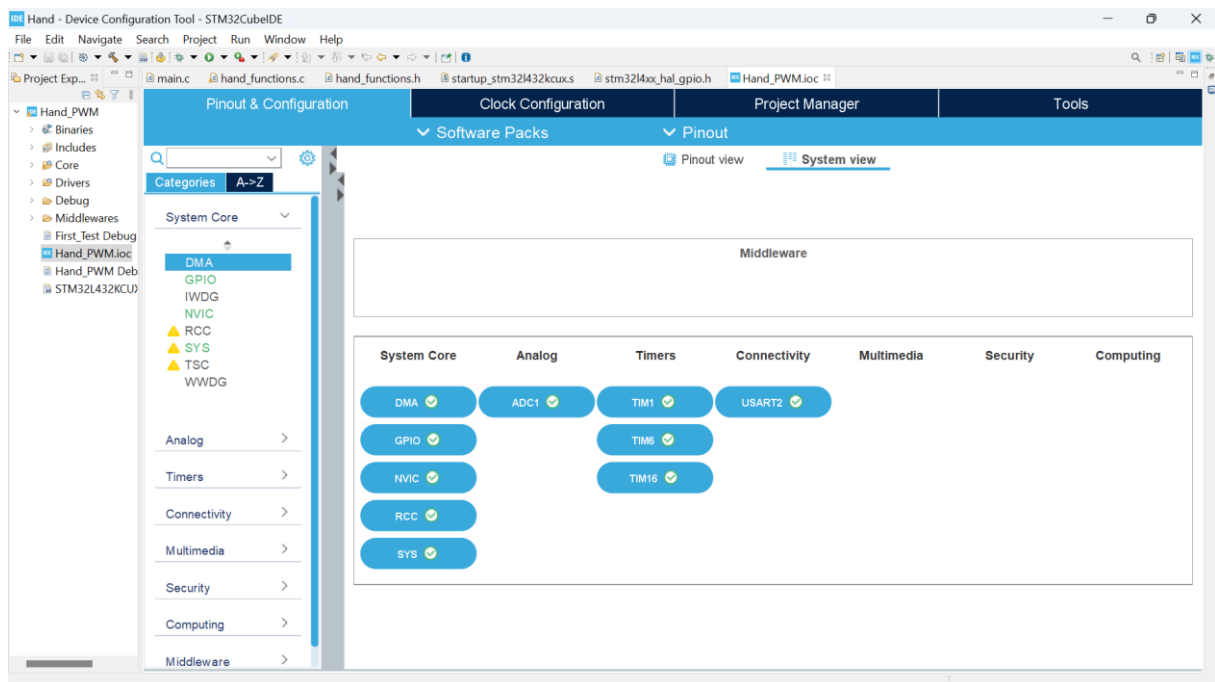


Abbildung 13 System view

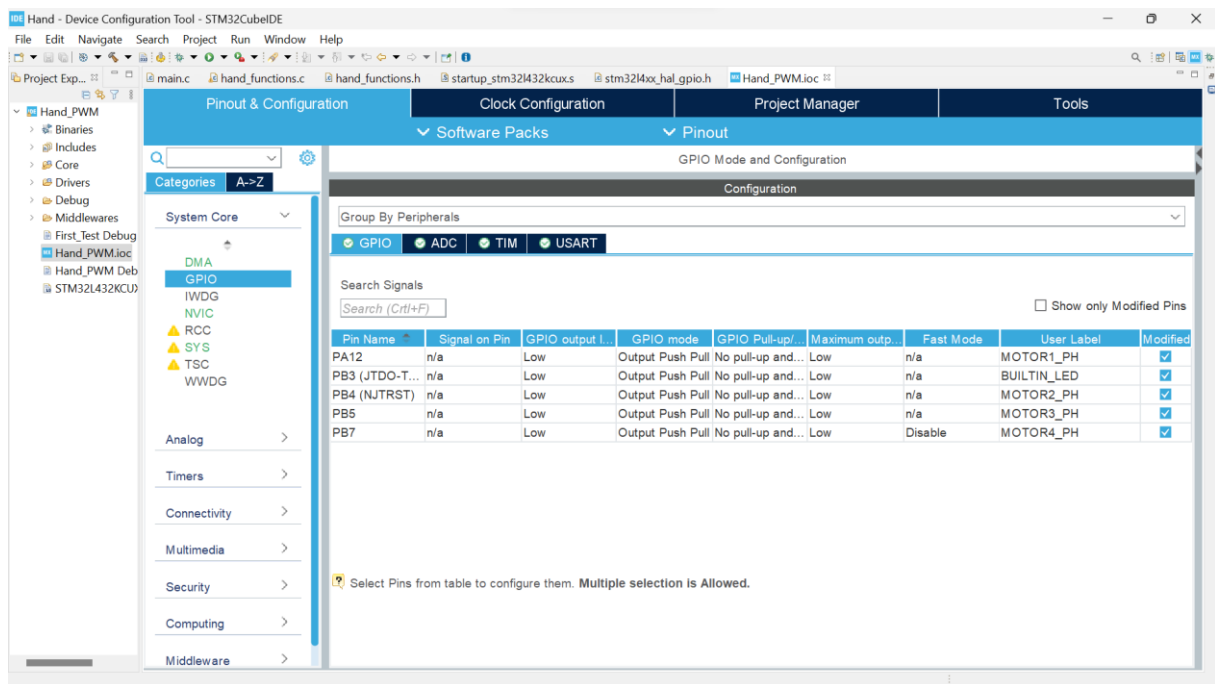


Abbildung 14 GPIO

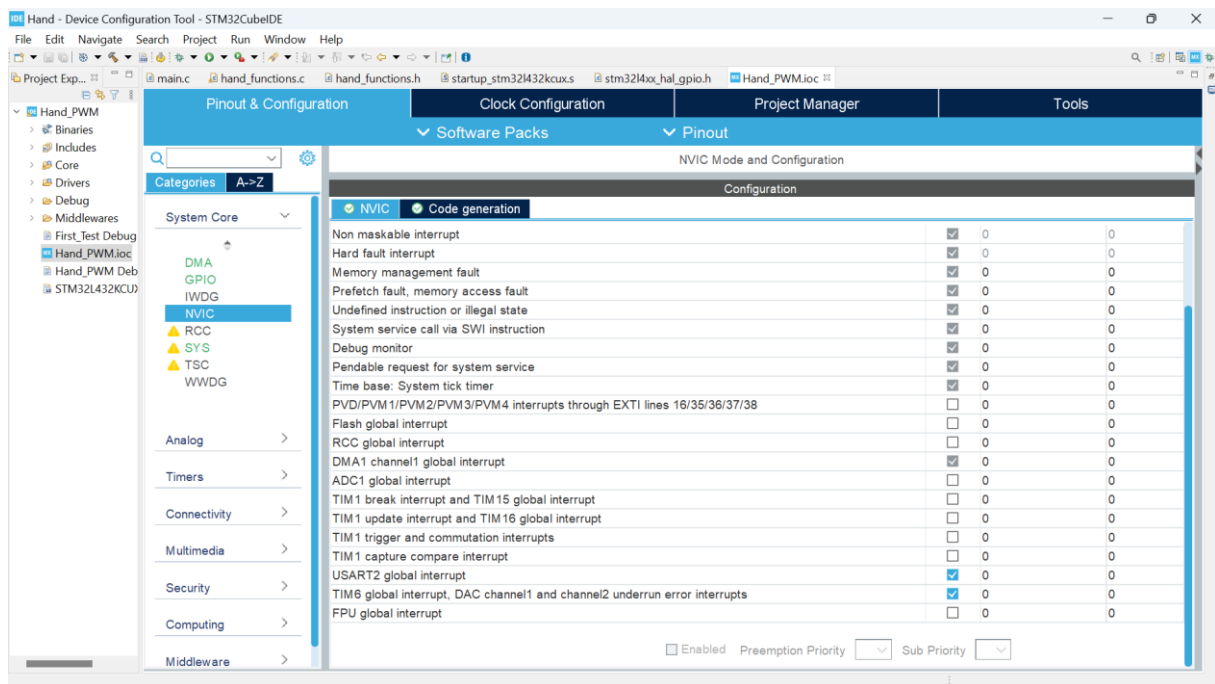


Abbildung 15 NVIC

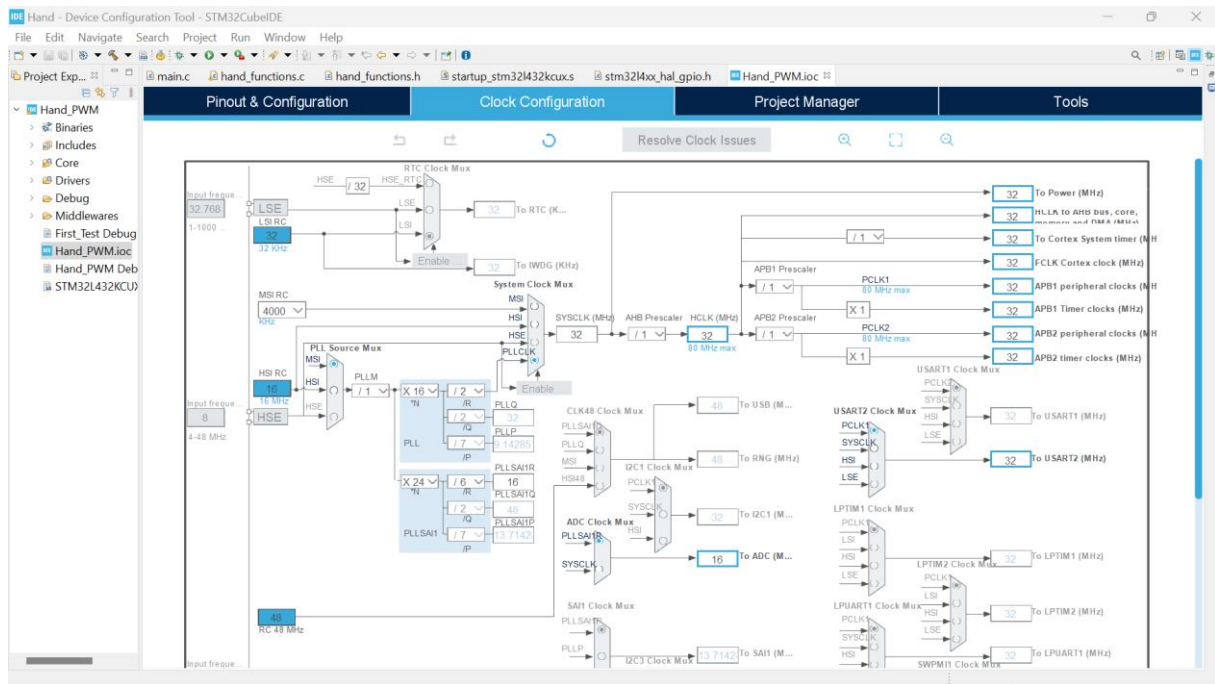


Abbildung 16 Clock Configuration

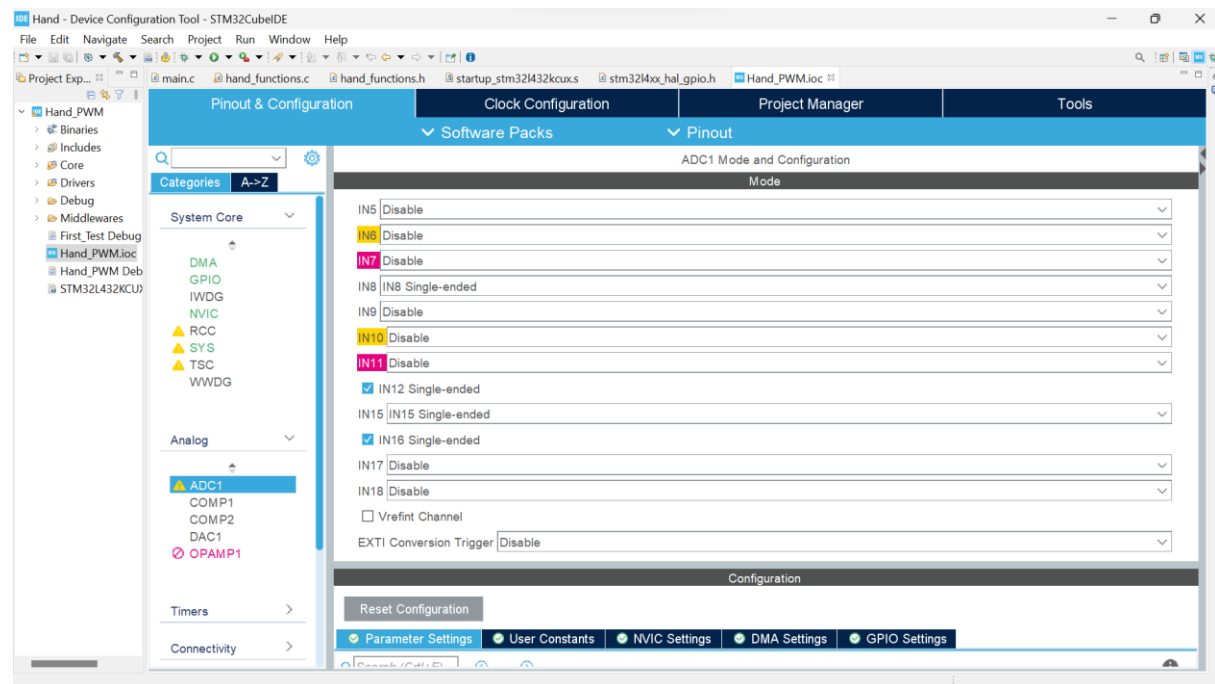


Abbildung 17 ADC

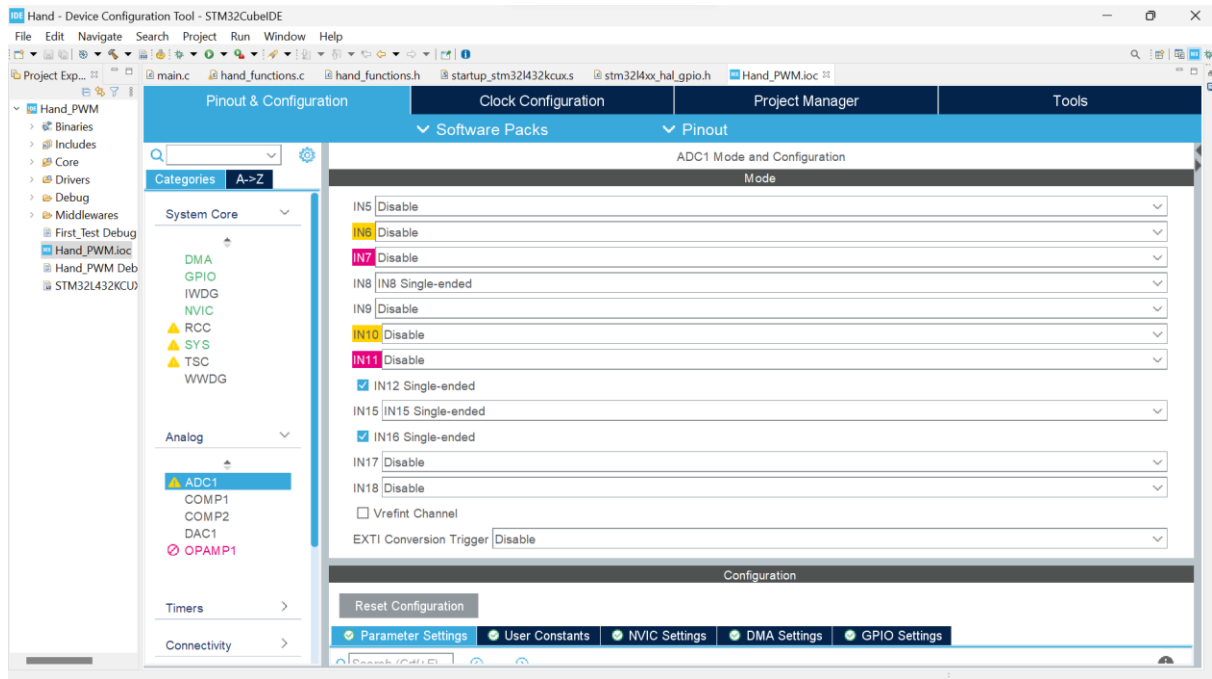


Abbildung 18 ADC

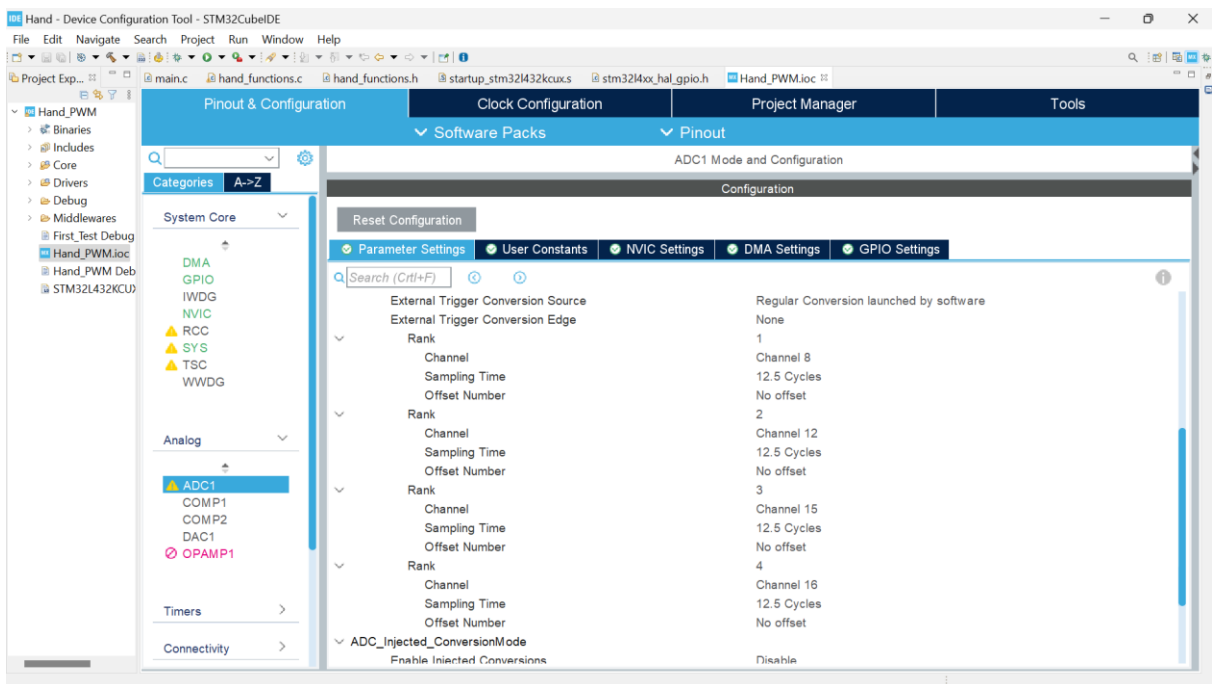


Abbildung 19 ADC

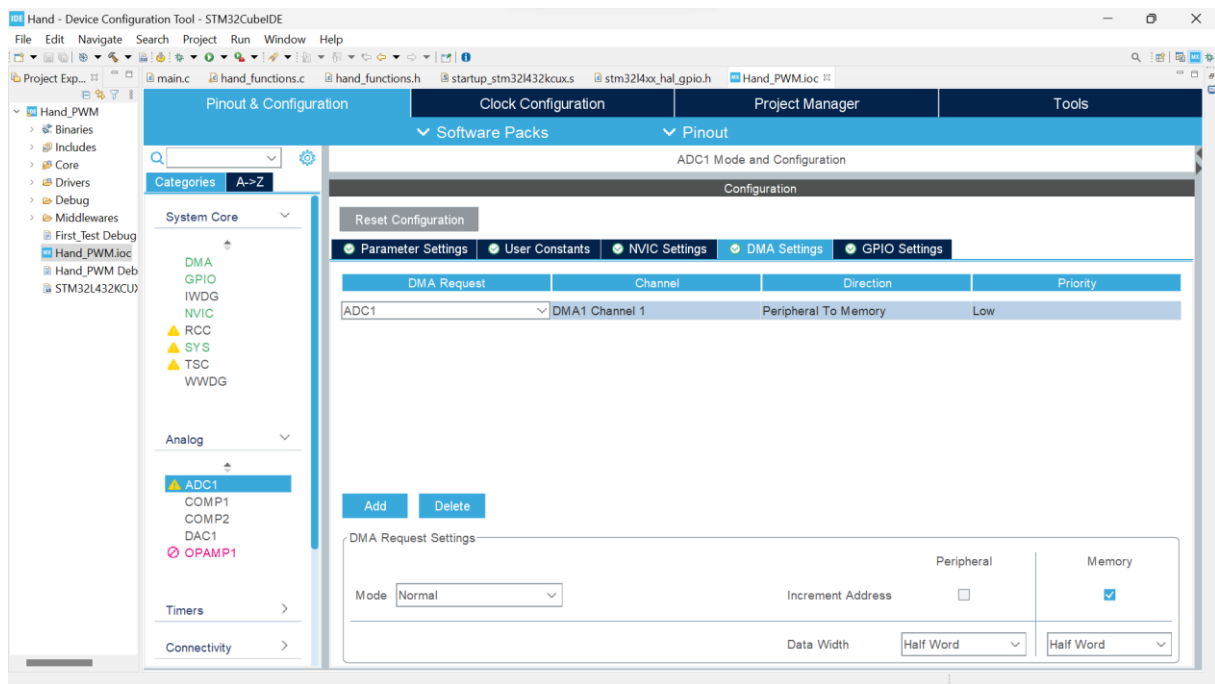


Abbildung 20 DMA

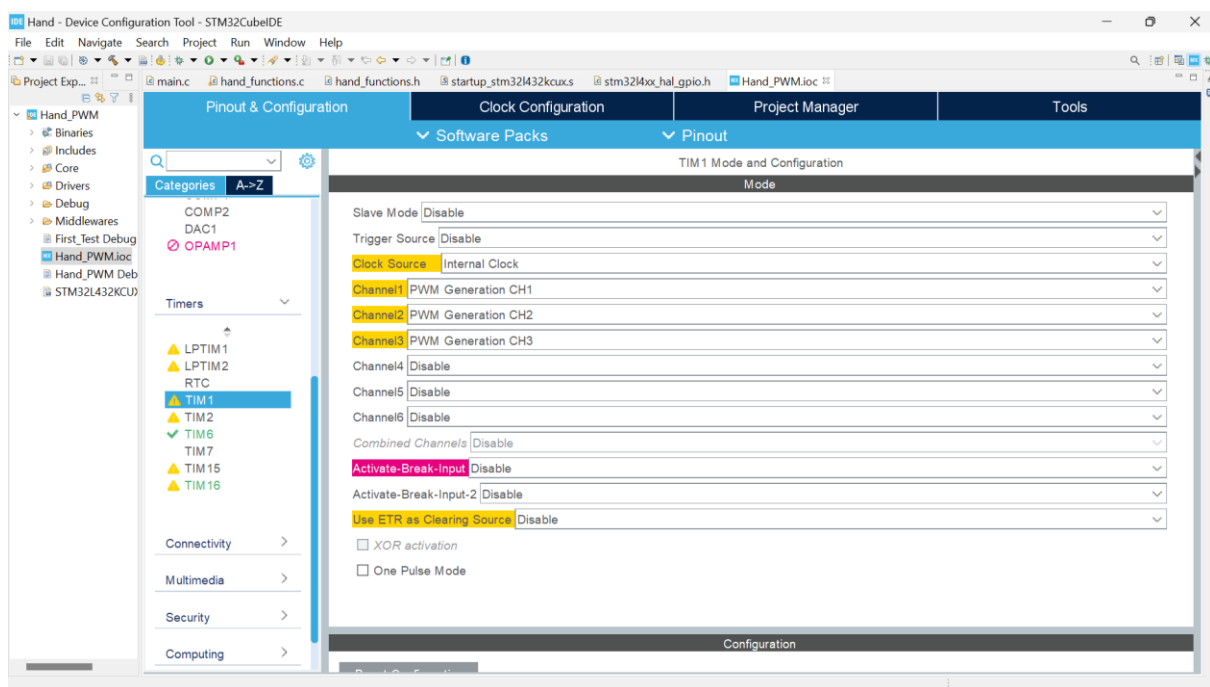


Abbildung 21 Timer 1

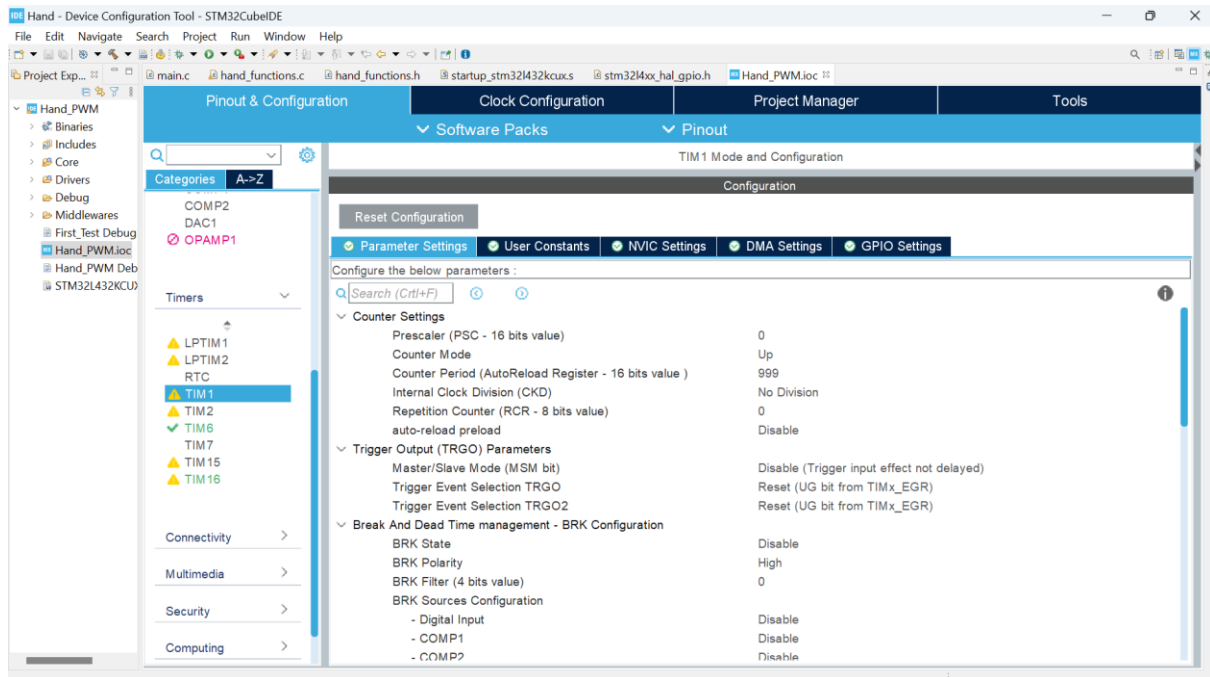


Abbildung 22 Timer 1

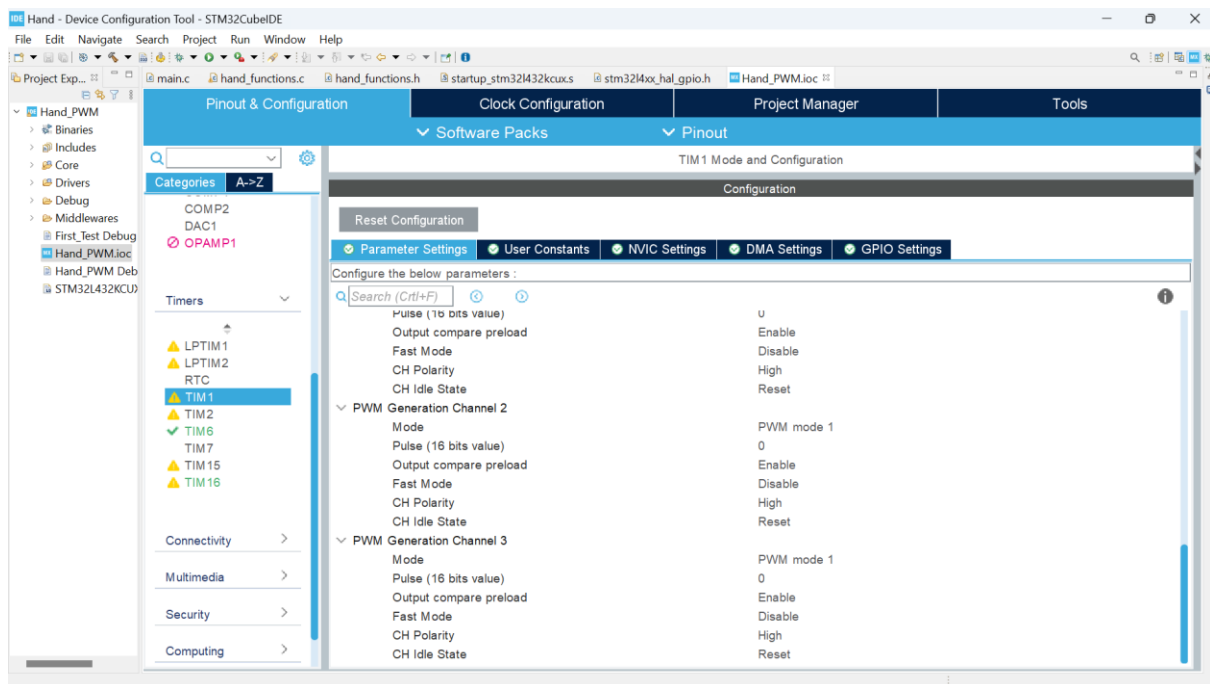


Abbildung 23 Timer 1

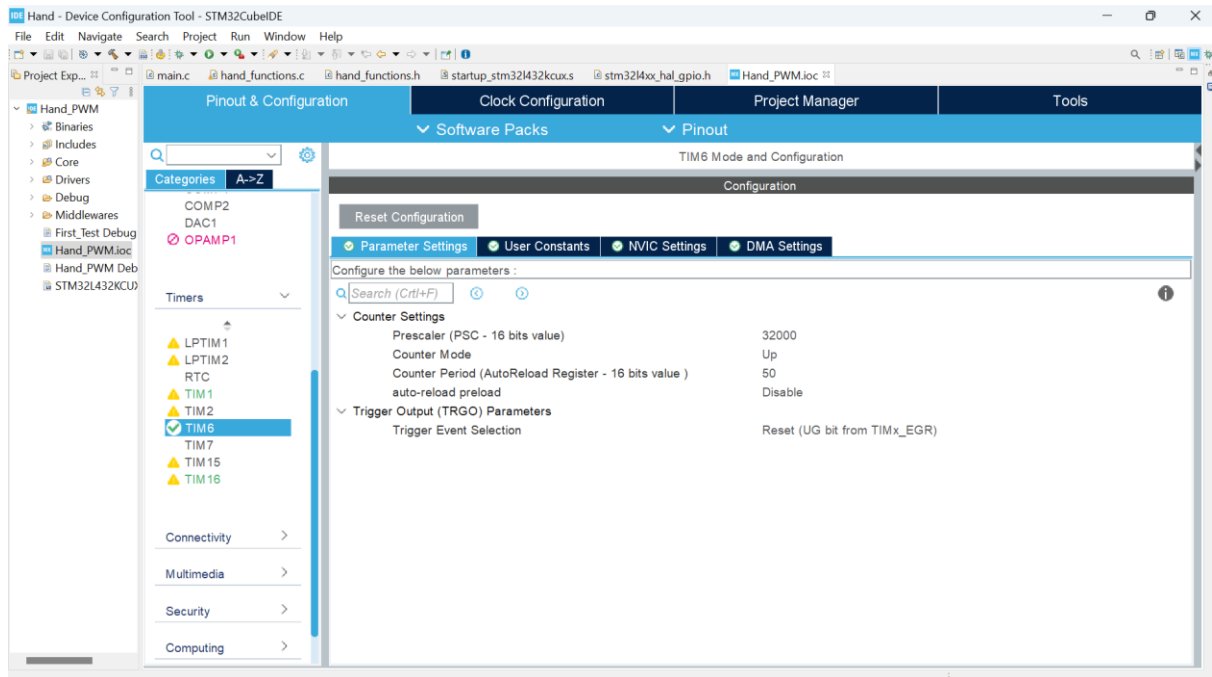


Abbildung 24 Timer 6

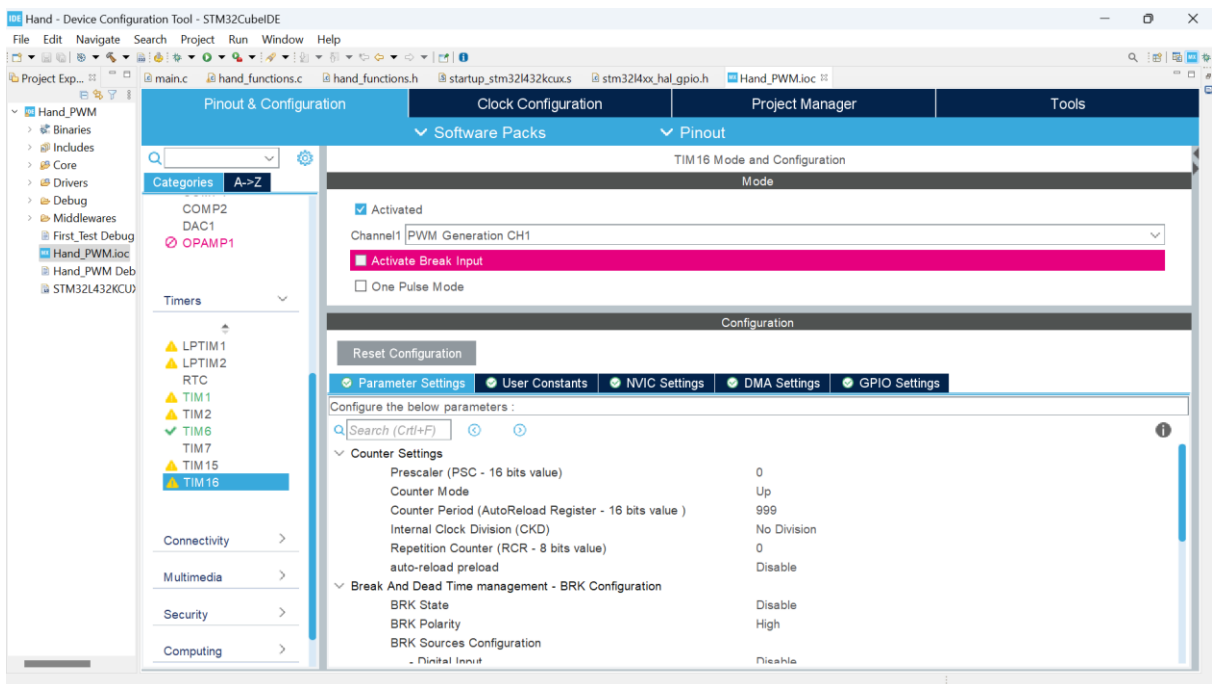


Abbildung 25 Timer 16

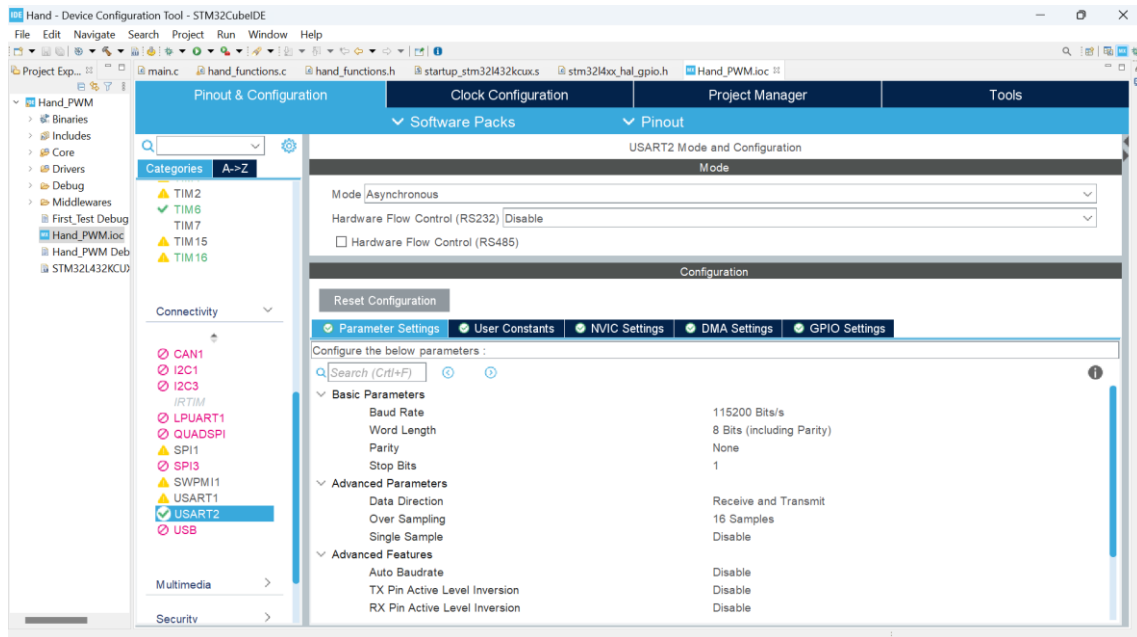


Abbildung 26 USART

Benötigte Elektronik/Komponenten

VT-3240 Tischnetzteil, 78 W, 12 V, 6,5 A	https://www.reichelt.de/tischnetzteil-78-w-12-v-6-5-a-vt-3240-p215629.html?&trstct=pol_0&nb=1
Steckbuchse	https://www.reichelt.de/einbaubuchse-aussen-5-7-mm-innen-2-1-mm-dc-ebu-072881-p202903.html?&trstct=pol_23&nb=1
Filament	https://www.reichelt.de/pla-filament-2-85-mm-tiefschwarz-2-kg-m4p-21100212121-p277661.html?&trstct=pos_3&nb=1
Gummibänder	https://www.hornbach.de/shop/Gummiringe-50-g-zufaellige-Farbauswahl/6337382/artikel.html
Pololu 210:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 12V High Power Carbon Brush	https://www.exp-tech.de/motoren/dc-getriebemotoren/7534/210-1-micro-metal-gearmotor-hpcb-12v?c=1198
Pololu DRV8876 (QFN) Single Brushed DC Motor Driver Carrier	https://www.exp-tech.de/en/modules/motor-controllers/dc-motors/10699/drv8876-qfn-single-brushed-dc-motor-driver-carrier
Dünnschicht Drucksensor	https://www.reichelt.de/arduino-drucksensor-0-bis-2-kg-ard-senpressure2-p316198.html
Mini DC-DC Step- down Spannungsregler MP1584EN Buck Power Module Outout 0,8--20V 3A	https://www.exp-tech.de/en/modules/voltage-regulators/10598/step-up/step-down-voltage-regulator-s13v10f5?c=1429
Nucleo 32	https://www.distrelec.de/de/stm32-nucleo-board-256kb-64kb-st-nucleo-l432kc/p/30176568?srsId=AR5OiO27e4XjpfCsRKV-XL3_fpNIPXf5Z1d2XfVgrqd7X2NsuTnHfxofg
Mauererschnur	https://www.hornbach.de/shop/Mauererschnur-rot-50-m/910338/artikel.html?sourceArt=3826101&url=910338&trackArticleCrossType=vv

Teileliste Mechanik

Teil	Anzahl
Zylinderstift 4x20 mm	11
Zylinderstift 4x25 mm	1
Gewindeinsatz M3x3	22
Zylinderkopfschraube M3x10	14
Zylinderkopfschraube M3x5	4
Zylinderkopfschraube M3x35	4
Zylinderkopfschraube M3x25	1
Mutter M3	4
Stahldraht 0,5 mm	2 m
Heißkleber	Wenige g
Schaumstoff	Wenige cm ²