

FH Aachen

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

Studiengang Informatik

Bachelorarbeit

Integration eines eingebetteten Systems in eine Cloud-Infrastruktur am Beispiel eines autonomen Schachspiels

vorgelegt von

Marcel Werner Heinrich Friedrich Ochsendorf

Matrikel-Nr. **3120232**

Referent:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Dey

Korreferent:

Prof. Dr. Andreas Claßen

Datum:

11.06.2021

1 Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Aachen, den 11.06.2021 _____

2 Abstract

Die Kurzfassung gibt auf ein bis zwei Seiten die wesentlichen Inhalte und Ergebnisse der Abschlussarbeit wieder.

Sie gliedert sich inhaltlich in

- das behandelte Gebiet,
- das Zieler Arbeit,
- die Untersuchungsmethode,
- die Ergebnisse und
- die Schlussfolgerungen.

Die Kurzfassung enthält keine Schlussfolgerungen oder Bewertungen, die über die Inhalte der Kapitel der Arbeit hinausgehen.

Alle Aussagen der Kurzfassung finden sich in ausführlicher Form in der Arbeit wieder.
Die Kurzfassung erhält keine Kapitelnummer.

Inhalt

| | | |
|--------|---|----|
| 1 | Erklärung | i |
| 2 | Abstract | ii |
| 0.3 | Einleitung | 1 |
| 0.3.1 | Motivation | 1 |
| 0.3.2 | Zielsetzung | 1 |
| 0.3.3 | Methodik | 1 |
| 0.4 | Analyse bestehender Systeme und Machbarkeitsanalyse | 2 |
| 0.4.1 | Existierende Systeme im Vergleich | 2 |
| 0.4.2 | User Experience | 5 |
| 0.4.3 | Anforderungsanalyse | 6 |
| 0.4.4 | Machbarkeitsanalyse | 7 |
| 0.5 | Grundlegende Verifikation der ausgewählten Technologien | 8 |
| 0.5.1 | Erprobung Buildroot-Framework | 8 |
| 0.5.2 | Verifikation NFC Technologie | 8 |
| 0.5.3 | Schrittmotor / Schrittmotorsteuerung | 8 |
| 0.5.4 | 3D Druck für den mechanischen Aufbau | 10 |
| 0.6 | Erstellung erster Prototyp | 11 |
| 0.6.1 | Mechanik | 11 |
| 0.6.2 | Parametrisierung Schachfiguren | 12 |
| 0.6.3 | Schaltungsentwurf | 14 |
| 0.6.4 | Fazit zum ersten Prototypen | 16 |
| 0.7 | Erstellung zweiter Prototyp | 17 |
| 0.8 | Modifikation der Mechanik | 17 |
| 0.9 | Optimierungen der Spielfiguren | 17 |
| 0.10 | Änderungen der Elektronik | 18 |
| 0.10.1 | IMPLEMENTIERUNG GCODE-Sender | 18 |
| 0.10.2 | Fazit zum finalen Prototypen | 20 |
| 0.11 | Entwicklung der Cloud Infrastruktur | 20 |
| 0.11.1 | API Design | 20 |
| 0.11.2 | Service Architektur | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 0.11.3 Entwicklung WebClient | 25 |
| 0.11.4 Authentifizierung | 29 |
| 0.12 Embedded System Software | 29 |
| 0.12.1 Ablaufdiagramm | 29 |
| 0.12.2 Figur Bewegungspfadberechnung | 29 |
| 0.12.3 Schachfeld Scan Algorithmus zur Erkennung von Schachzügen | 29 |
| 0.12.4 Userinterface | 32 |
| 0.13 Fazit | 32 |
| 0.13.1 Ausblick | 32 |
| Literaturverzeichnis | 33 |
| Abbildungsverzeichnis | 37 |
| Tabellenverzeichnis | 38 |
| .1 Anhang | 39 |

0.3 Einleitung

0.3.1 Motivation

- Beginn: Er zieht die Aufmerksamkeit des Lesers durch die Schilderung des Ereignisses auf sich, das zu dem Problem geführt hat.
- Hintergrundinformationen (Herstellung des Kontexts): Gehe tiefer auf das Ereignis ein, indem du mehr Informationen über es vermittelst und dabei auch den Rahmen deiner Forschung skizzierst.
- Brücke zur Problemstellung: Erläutere, inwiefern es sich hierbei um ein Problem handelt, und schlage somit die Brücke zur Problemstellung, die deiner Untersuchung zu Grunde liegt.

0.3.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen autonomen Schachtisch zu entwickeln, welcher in der Lage ist Schachfiguren autonom zu bewegen und auf Benutzerinteraktion zu reagieren. Der Schwerpunkt liegt dabei insbesondere auf der Programmierung des eingebetteten Systems und dem Zusammenspiel von diesem mit einem aus dem Internet erreichbaren Servers, welcher als Vermittlungsstelle zwischen verschiedenen Schachtischen und anderen Endgeräten dient. Dieses besteht zum einem aus der Positionserkennung und Steuerung der Hardwarekomponenten (Schachfiguren) und zum anderen aus der Kommunikation zwischen dem Tisch selbst und einem in einer Cloud befindlichem Server. Mittels der Programmierung werden diverse Technologien von verschiedenen Einzelsystemen zu einem Gesamtprodukt zusammengesetzt.

0.3.3 Methodik

Im ersten Abschnitt werden die zum Zeitpunkt existierenden Ansätze und deren Umsetzung beleuchtet. Anschliessend werden die zuvor verwendeten Technologien betrachtet, welche bei den beiden darauffolgenden Prototypen verwendet wurden.

Das sechste Kapitel widmet sich der realisierung des erste Prototypen des autonomen Schachtischs. Dabei werden alle im anschliessenden Kapitel, wird auf der Basis des

ersten Prototyps und seiner auftretenden Probleme, der finale Prototyp entwickelt. Hier werden die Probleme durch ein re-design und Vereinfachung der Elektronik gelöst und so ein zufriedenstellendes Produkt entwickelt.

Im darauffolgenden Abschnitt wird die Cloud-Infrastruktur thematisiert, welche für eine Kommunikation zwischen den Prototypen entscheidend ist.

- controller software
- fazit

0.4 Analyse bestehender Systeme und Machbarkeitsanalyse

0.4.1 Existierende Systeme im Vergleich

- Nischenprodukt, jedoch einige Projekte im OpenSource Bereich verfügbar
- Ein kommerzieller Hersteller

Kommerzielle Produkte

Tabelle 0.1: Auflistung kommerzieller autonomer Schachttische

| | Square Off - Kingdom [5] | Square Off - Grand Kingdom [4] | DGT Smart Board [2] | DGT Bluetooth Wenge [1] |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Erkennung | nein (Manuell per Ausgangsposition) | nein (Manuell per Ausgangsposition) | ja | ja |
| Figurstellung | | | | |
| Abmessungen (LxBxH) | 486mm x 486mm x 75mm | 671mm x 486mm x 75mm | 540mm x 540mm x 20mm | 540mm x 540mm x 20mm |
| Konnektivität | Bluetooth | Bluetooth | Seriell | Bluetooth |

| | Square Off - Kingdom [5] | Square Off - Grand Kingdom [4] | DGT Smart Board [2] | DGT |
|---|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| Automatisches Bewegen der Figuren | ja | ja | nein | Bluetooth Wenge [1] |
| Spiel Livestream | ja | ja | ja | ja |
| Cloud anbindung (online Spiele) | ja (Mobiltelefon + App) | ja (Mobiltelefon + App) | ja (PC + App) | ja (PC + App) |
| Parkposition für ausgeschiedene Figuren | nein | ja | nein | nein |
| Stand-Alone Funktionalität | nein (Mobiltelefon erforderlich) | nein (Mobiltelefon erforderlich) | nein (PC erforderlich) | nein (PC erforderlich) |
| Besonderheiten | Akku für 30 Spiele | Akku für 15 Spiele | - | - |

Bei den DGT-Schachbrettern ist zu beachten, dass diese die Schachfiguren nicht autonom bewegen können. Sie wurden jedoch in die Liste aufgenommen, da diese einen Teil der Funktionalitäten der Square Off Schachbrettern abdecken und lediglich die automatische Bewegung der Schachfiguren fehlt. Die DGT-Bretter können die Position der Figuren erkennen und ermöglichen so auch Spiele über das Internet; diese können sie auch als Livestream anbieten. Bei Schachturnieren werden diese für die Übertragung der Partien sowie die Aufzeichnung der Spielzüge verwendet und bieten Support für den Anschluss von weiterer Peripherie wie z.B. Schachuhren.

Somit gibt es zum Zeitpunkt der Recherche nur einen Hersteller von autonomen Schachbrettern, welcher auch die Figuren bewegen kann.

Open-Source Projekte

Bei allen Open-Source Projekten wurden die Features anhand der Beschreibung und der aktuellen Software extrahiert. Besonders bei work-in-progress Projekten können sich

die Features noch verändern und so weitere Funktionalitäten hinzugefügt werden.

Zusätzlich zu den genannten Projekten sind weitere derartige Projekte verfügbar; in der Tabelle wurde nur jene aufgelistet, welche sich von anderen Projekten in mindestens einem Feature unterscheiden.

Auch existieren weitere Abwandlungen von autonomen Schachbrettern, bei welchem die Figuren von oberhalb des Spielbretts gegriffen bzw. bewegt werden. In einigen Projekten wird dies mittels eines Industrie-Roboters [15] oder eines modifizierten 3D-Druckers[7] realisiert. Diese wurden hier aufgrund der Mechanik, welche über dem Spielbrett montiert werden muss, nicht berücksichtigt.

Tabelle 0.2: Auflistung von Open-Source Schachtisch Projekten

| | Automated Chess Board (Michael Guerero) [3] | Automated Chess Board (Akash Ravichandran) [9] | DIY Super Smart Chessboard [6] |
|---|---|--|--------------------------------|
| Erkennung | nein (Manuell per Ausgangsposition) | ja (Kamera / OpenCV) | nein |
| Figurstellung | | | |
| Abmessungen (LxBxH) | keine Angabe | keine Angabe | 450mm x 300mm x 50mm |
| Konnektivität | Universal Serial Bus (USB) | Wireless Local Area Network (WLAN) | WLAN |
| Automatisches Bewegen der Figuren | ja | ja | nein |
| Spiel Livestream | nein | nein | nein |
| Cloud anbindung (online Spiele) | nein | nein | ja |
| Parkposition für ausgeschiedene Figuren | nein | nein | nein |
| Stand-Alone | nein (PC erforderlich) | ja | ja |
| Funktionalität | | | |
| Besonderheiten | - | Sprachsteuerung (Amazon Alexa) | Zuganzeige über LED Matrix |
| Lizenz | General Public License (GPL) 3+ | GPL | - |

In den bestehenden Projekten ist zu erkennen, dass ein autonomer Schachtisch sehr einfach und mit simplen Mittel konstruiert werden kann. Hierbei fehlen in der Regel einige Features, wie das automatische Erkennen von Figuren oder das Spielen über das Internet.

Einige Projekte setzen dabei auf eingebettete Systeme, welche direkt im Schachtisch montiert sind, andere hingegen nutzen einen externen PC, welcher die Steuerbefehle an die Elektronik sendet.

Bei der Konstruktion der Mechanik und der Methode mit welcher die Figuren über das Feld bewegt werden ähneln sich jedoch die meisten dieser Projekte. Hier wird in der Regel eine einfache X- und Y-Achse verwendet, welche von zwei Schrittmotoren bewegt werden. Die Schachfiguren werden dabei mittels eines Elektromagneten über die Oberseite gezogen. Hierbei ist ein Magnet oder eine kleine Metallplatte in den Fuß der Figuren eingelassen worden.

Die Erkennung der Schachfiguren ist augenscheinlich die schwierigste Aufgabe. Hier wurde in der Mehrzahl der Projekte eine Kamera im Zusammenspiel mit einer auf OpenCV basierenden Figur-Erkennung verwendet. Diese Variante ist je nach Implementierung des Vision-Algorithmus fehleranfälliger bei sich ändernden Lichtverhältnissen, auch muss die Kamera oberhalb der Schachfiguren platziert werden, wenn kein transparentes Schachfeld verwendet werden soll.

Eine weitere Alternative ist die Verwendung einer Matrix aus Reed-Schaltern oder Halleffekt-Sensoren. Diese werden in einer 8x8 Matrix Konfiguration unterhalb der Platte montiert und reagieren auf die Magnete in den Figuren. So ist es möglich zu erkennen, welches der Schachfelder belegt ist, jedoch nicht konkret von welchem Figurtypen. Dieses Problem wird durch eine definierte Ausgangsstellung beim Spielstart gelöst. Nach jedem Zug durch den Spieler und der dadurch resultierenden Änderungen in der Figurpositionen in der Matrix können die neuen Figurstellungen berechnet werden.

0.4.2 User Experience

Ein wichtiger Aspekt bei diesem Projekt stellt die User-Experience dar. Diese beschreibt die Ergonomie der Mensch-Maschine-Interaktion und wird durch die DIN 9241[14] beschrieben. Hierbei geht es primär um das Erlebnis, welches der Benutzer bei dem Verwenden eines Produktes erlebt und welche Erwartungen der Benutzer an die Verwendung des Produktes hat.

Bei dem autonomen Schachtisch, soll der Benutzer eine ähnlich authentische Erfahrung erleben wie bei einer Schachpartie mit einem menschlichen Gegenspieler. Der Benutzer soll direkt nach dem Einschalten des Tisches und dem Aufstellen der Figuren in der Lage sein, mit dem Spiel beginnen zu können. Dies soll wie ein reguläres Schachspiel ablaufen; der Spieler vor dem Tisch soll die Figuren mit der Hand bewegen können und der Tisch soll den Gegenspieler darstellen. Dieser bewegt die Figuren der Gegenseite.

Nach Beendigung einer Partie, soll das Spielbrett wieder in die Ausgangssituation gebracht werden; dies kann zum einem vom Tisch selbst oder vom Benutzer manuell geschehen. Danach ist der Tisch für die nächste Partie bereit, welche einfach per Knopfdruck gestartet werden können sollte.

Dies soll auf für abgebrochene Spiele gelten, welche von Benutzer oder durch das System abgebrochen werden. Hierbei soll das Schachbrett sich ebenfalls selbstständig zurücksetzen können.

Ein weiter Punkt welcher bei der User-Experience beachtet werden soll, ist die zeitliche Konstante. Ein Spiel auf einem normalen Schachspiel hat je nach Spielart kein Zeitlimit, dies kann für das gesamte Spiel gelten oder auch für die Zeit zwischen einzelnen Zügen. Der autonome Schachtisch soll es dem Spieler z.B. ermöglichen ein Spiel am Morgen zu beginnen und dieses erst am nächsten Tag fortzusetzen.

Auch muss sich hier die Frage gestellt werden, was mit den ausgeschiedenen Figuren geschieht. Bei den autonomen Schachbrettern von Square Off[4], werden die Figuren an die Seite auf vordefinierte Felder bewegt und können so wieder bei der nächsten Partie vom System aufgestellt werden. Viele andere Projekte schieben die Figuren auf dem Feld heraus, können diese aber im Anschluss nicht mehr gezielt in das Feld zurückholen. So muss diese Aufgabe vom Benutzer geschehen. Auch wir diese Funktionalität von einigen Projekten nicht abgedeckt und der Benutzer muss die Figuren selbstständig vom Feld entfernen.

0.4.3 Anforderungsanalyse

- komplettes vollwertiges Produkt

Tabelle 0.3: Auflistung der Anforderungen an den autonomen Schachtisch

| | autonomer Schachtisch Atomic Chess Table (ATC) |
|---|--|
| Erkennung Schachfigurstellung | ja |
| Konnektivität | WLAN, USB |
| Automatisches Bewegen der Figuren | ja |
| Spiel Livestream | ja |
| Cloud anbindung (online Spiele) | ja |
| Parkposition für ausgeschiedene Figuren | ja |
| Stand-Alone Funktionalität | ja (Bedienung direkt am Tisch) |
| Besonderheiten | visuelle Hinweise per Beleuchtung |

Die Abmessungen und das Gewicht des autonomen Schachtisches, ergeben sich aus mechanischen Umsetzung und werden hier aufgrund der zur Verfügung stehenden Materialen und fertigungstechniken nicht festgelegt. Dennoch wird Wert darauf gelegt, dass das Verhältnis zwischen den Spielfeldabmessungen und den Abmessungen des Tisches so gering wie möglich ausfällt. Auch müssen die Figuren für den Benutzer eine gut handhabbare Grösse aufweisen um ein angenehmes haptisches Spielerlebnis zu gewährleisten.

- abmessungen und gewicht ergeben sich aus der Umsetzung der Anforderungen

Technologien im Makerspace

stehen diese im makerspace zur verfüfung

0.4.4 Machbarkeitsanalyse

welche technologien werden benötigt * software architektur anfoderungen * hardware anforderungen * grosse * wiederholgenauigkeit * lautstärke * vorerfahrung in cad ed druck und schaltungsdesign

0.5 Grundlegende Verifikation der ausgewählten Technologien

0.5.1 Erprobung Buildroot-Framework

- erstellen eines einfachen images für das embedded System
- inkl ssh Server und SFTP
- qt 5 libraries
- eigenes package atctp
- test der toolchain

0.5.2 Verifikation NFC Technologie

- warum gewählter nfc reader => ndef lesen
- reichweiten test mit 22mm
- test mit benachbarten figuren
- warum kein RFID => keine speicherung von id auf der controller seite
- selbherstellung von eigenen figuren ohne modifikation der controllerseite

- test mit figuren nebeneinander

0.5.3 Schrittmotor / Schrittmotorsteuerung

- warum => einfache ansteuerung
- keine STEP DIR somit muss embedded nicht echtzeitfähig sein und kann ggf auch andere task abarbeiten
- TMC schrittmotortreiber spi configuration
- und goto move => wait for move finished irw testen
- dafür einfacher python testreiber geschribene
- schrittverlust nicht zu erwarten

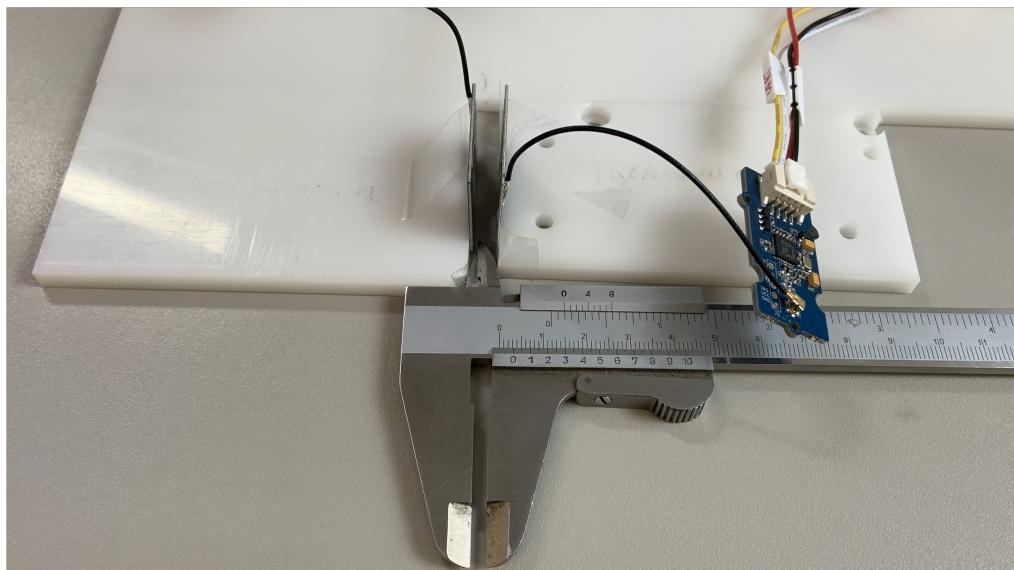


Bild 0-1: Grove PN532 NFC Reader mit Kabelgebundener Antenne

0.5.4 3D Druck für den mechanischen Aufbau

- PLA als FDM Filament => einfach verarbeitung und handhabung, keine Mechanische Belastbarkeit gefordert

Da es sich hier nur um einen Prototypen handelt, wurde hier auf ein einfach zu handhabendes Filament vom Typ PLA verwendet. Dies ist besonders gut für die Prototypenentwicklung geeignet und kann mit nahezu jeden handelsüblichen Fused Deposition Modeling (FDM) 3D-Drucker verarbeitet werden.

- keine hohe Genauigkeit, Teile nicht sichtbar

Zuvor wurden einige Testdrucke durchgeführt um die Qualität der zuvor gewählten Druckparameter zu überprüfen und diese gegebenenfalls anzupassen. Auch wurden verschiedene Calibrierobjekte gedruckt, an welchen die Toleranzen für die späteren Computer-Aided Design (CAD) Zeichnungen abgeschätzt werden können.

Dies betrifft vor allem die Genauigkeit der Bohrungen in den gefertigten Objekten, da hier später Bolzen und Schrauben ein nahezu spielfrei eingeführt werden müssen. Ein Test, welcher die Machbarkeit von Gewinden zeigt wurde nicht durchgeführt, da alle Schrauben später mit der passenden Mutter gesichert werden sollen. So soll eine Abnutzung durch häufige Montage der gedruckten Bauteile verhindert werden.

Bei dem Design der zu druckenden Bauteile wurde darauf geachtet, dass diese den Bauraum von 200x200x200mm nicht überschreiten und somit auch von einfachen FDM 3D-Druckern verarbeitet werden können.

Als Software wurde der Open-Source Slicer Ultimaker Cura [8] verwendet, da dieser zum einen bereits fertige Konfigurationen für den verwendeten 3D-Drucker enthält und zum anderen experimentelle Features bereitstellt.

Hier wurde für die Bauteile, welche eine Stützstruktur benötigen, die von Cura bereitgestellte Tree Support Structure aktiviert. **0-2** Diese bietet den Vorteil gegenüber anderen Stützstrukturen, dass sich diese leichter entfernen lässt und weniger Rückstände an den Bauteilen hinterlässt. Diese Vorteile wurden mit verschiedenen Testdrucken verifiziert und kommen insbesondere bei komplexen Bauteilen mit innenliegenden Elementen zum Tragen bei denen eine Stützstruktur erforderlich sind.

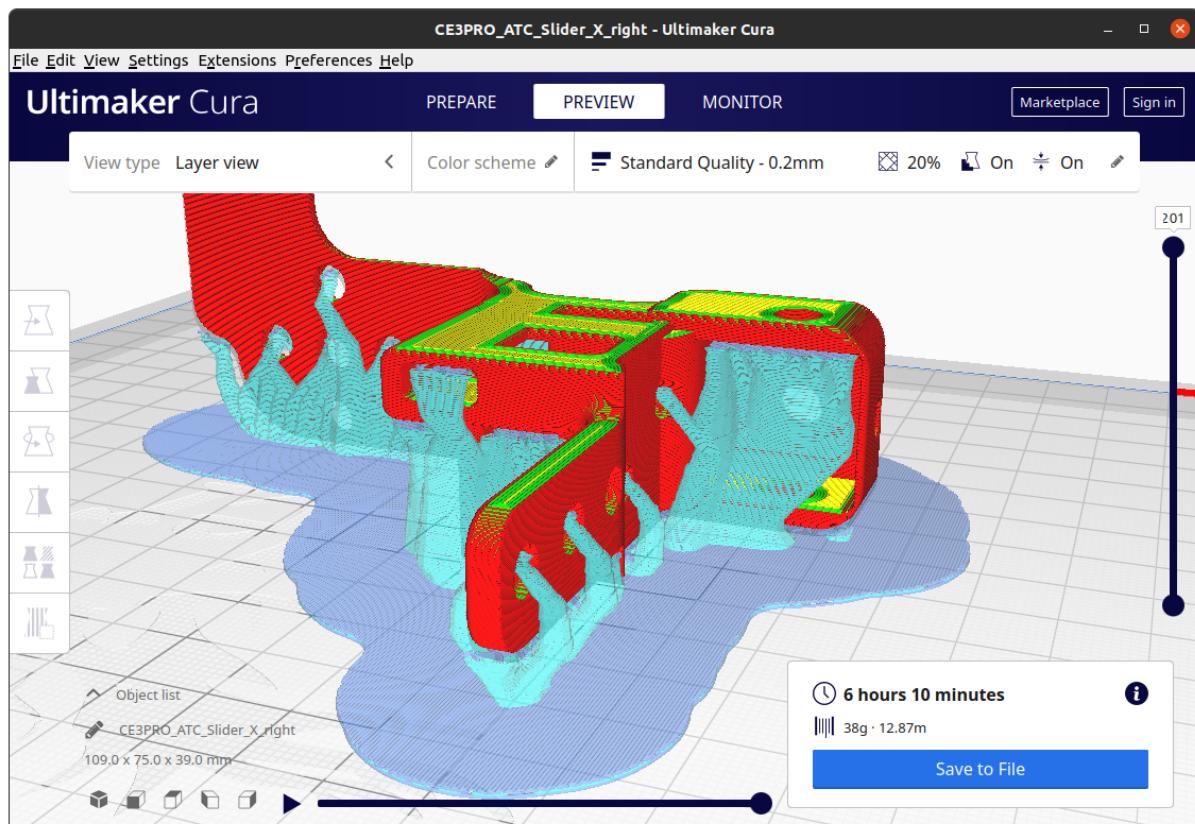


Bild 0-2: 3D Druck: Objekt (rot,gelb,grün),Tree Structure (cyan)

Tabelle 0.4: Verwendete 3D Druck Parameter. Temperatur nach Herstellerangaben des verwendeten PLA Filaments.

| Ender 3 Pro 0.4mm Nozzle | PLA Settings |
|--------------------------|--------------|
| Layer Height | 0.2mm |
| Infill | 50.00% |
| Wall Thickness | 2.0mm |
| Support Structure | Tree |
| Top Layers | 4 |
| Bottom Layers | 4 |

- Zeit für den 3D Druck Prozess spielt hier keine Rolle, da selbstbau projekt
- Parameter lassen sich weiter anpassen z.B. Layerheight auf 0.4
- finaler prototyp bietet sich abs oder pteg an

0.6 Erstellung erster Prototyp

- proof of concept



Bild 0-3: Prototyp Hardware: Erster Prototyp des autonomen Schachtisch

- standartxy
- erweituerng des spielraums durch zwei Magnete

0.6.2 Parametrisierung Schachfiguren

Da das System die auf dem Feld befindlichen Schachfiguren anhand von Near Field Communication (NFC) Tags erkennt, müssen diese zuerst mit Daten beschrieben werden. Die verwendeten NXP NTAG 21 Chips, besitzen einen vom Benutzer verwendbaren Speicher von 180 Byte. Dieser kann über ein NFC-Lese/Schreibgeräte mit Daten verschiednster Art beschrieben und wieder ausgelesen werden. Moderne Mobiltelefone besitzen in der Regel auch die Fähigkeit mit passenden NFC Tags kommunizieren zu können; somit sind keine Stand-Alone Lesegeräte mehr notwendig.

Der Schachtisch verwendet dabei das NFC Data Exchange Format (NDEF) Dateiformat welches Festlegt, wie die Daten auf dem NFC Tag gespeichert werden. Da diesen ein Standardisiertes Format ist, können alle gängigen Lesegeräte und Chipsätze diese Datensätze lesen. Der im autonomen Schachtisch verwendete Chipsatz PN532 von NXP ist dazu ebenfalls in der Lage.

Um das NDEF Format verwenden zu können, müssen die NFC Tags zuerst auf diese Formatiert werden. Die meisten käuflichen Tags sind bereits derart formatiert. Alternativ kann dies mittels Mobiltelefon und passender App geschehen. Da NDEF Informationen über die Formatierung und der gepeicherten Einträge speichert, stehen nach der

SETTINGS

FIGURE TYPE

KING QUEEN ROOK BISHOP KNIGHT PAWN

FIGURE COLOR

BLACK WHITE

RESULT

| No | DATA | NDEF_RECORD_CONTENT |
|----|------------------------|---------------------|
| 0 | 1,1,0,1,0,0,0,0 =[208] | =D= |
| 1 | 1,1,0,1,0,0,0,1 =[209] | =Ñ= |
| 2 | 1,1,0,1,0,0,1,0 =[210] | =Ò= |
| 3 | 1,1,0,1,0,0,1,1 =[211] | =Ó= |
| 4 | 1,1,0,1,0,1,0,0 =[212] | =Ô= |
| 5 | 1,1,0,1,0,1,0,1 =[213] | =Õ= |
| 6 | 1,1,0,1,0,1,1,0 =[214] | =Ö= |
| 7 | 1,1,0,1,0,1,1,1 =[215] | =×= |

Bild 0-4: Prototyp Hardware: Tool zur Erstellung des NDEF Payloads: ChessFigureID-Generator.html

Formatierung nur noch 137 Bytes des NXP NTAG 21 zur Verfügung.

Per Lesegerät können anschliessend mehrere NDEF Records auf den Tag geschrieben werden. Diese sind mit Dateien auf einer Festplatte vergleichbar und können verschiedenen Dateiformate und Dateigrößen annehmen. Ein typischer Anwendungsfall ist der NDEF Record Type Definition (NDEF-RTD) URL Datensatz. Dieser kann dazu genutzt werden eine spezifizierte URL auf dem Endgerät aufzurufen, nachdem der NFC Tag gescannt wurde.[11]

Der autonome Schachtisch verwendet den einfachsten NDEF-RTD Typ, welcher der Text-Record ist, und zum speichern von Zeichenketten genutzt werden kann, ohne das eine Aktion auf dem Endgerät ausgeführt wird. Jeder Tag einer Schafigur, welche für den autonomen Schachtisch verwendet werden kann, besitzt diesen NDEF Record an der ersten Position. Alle weiteren eventuell vorhandenen Records werden vom Tisch ignoriert.[10]

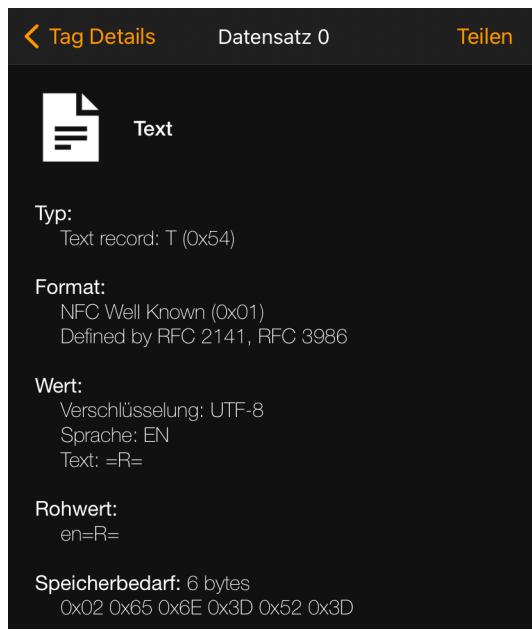


Bild 0-5: Prototyp Hardware: NDEF Text Record Payload für einen weissen Turm

Um die Payload für den NFC Record zu erstellen wurde ein kleine Web-Applikation erstellt, welche den Inhalt der Text-Records erstellt. Dieser ist für jede Figur individuell und enthält den Figur-Typ und die Figur-Farbe. Das Tool unterstützt auch das Speichern weiterer Attribute wie einem Figur-Index, welcher aber in der finalen Software-Version nicht genutzt wird. **0-4**

Nach dem Beschreiben eines NFC Tags ist es möglich diesen gegen auslesen oder erneuten Schreiben mittels einer Read/Write-Protection zu schützen. Diese Funktionalität wird nicht verwendet um das Kopieren von Figuren durch den Benutzer zu ermöglichen. Somit kann dieser leicht seine eigenen Figuren erschaffen, ohne auf das Tool angewiesen zu sein. Auch ist es möglich verschiedene Figur-Sets zu mischen, so kann jeder Spieler sein eigenes Set an Figuren mit dem autonomen Schachttisch verwenden.

0.6.3 Schaltungsentwurf

- auswahl der Motortreiber (leise, bus ansteuerung)
- ansteuerung pn532 und umsetzung auf uart
- platinendesign
- ansteuerung elektromagnetet

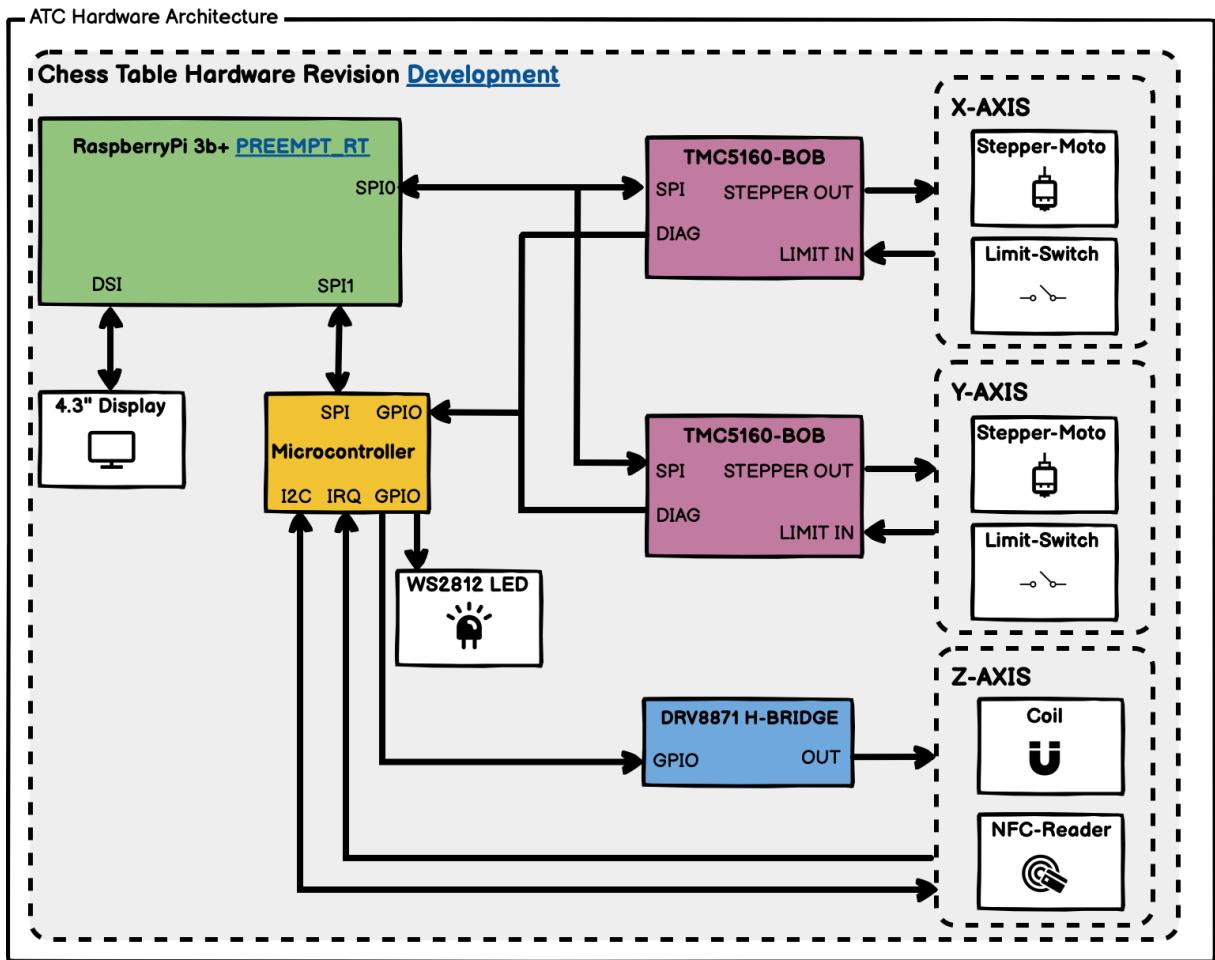


Bild 0-6: Prototyp Hardware: Blockdiagramm



Bild 0-7: Production Hardware: Finaler autonomer Schachtisch

Implementierung HAL

- ansteuerung des TMC5160
- ansterung des Microncontollers (PN532, LED)
- integration in controller software

0.6.4 Fazit zum ersten Prototypen

- nicht für production geeignet
- aufbau und calibrierung langwierig
- trotzdem robustes design auf kleinem formfaktor
- verwendeten elektromagnete nicht stark genug, somit über aquusserhalb der specs betrieben was zu temeraturproblemen führte
- gewicht der Figuren zu klein bzw magnete zu start
- workarounds in der software nötig durch die beiden magnete
- nicht die beste entscheidung direkt auf grösse zu optimieren

0.7 Erstellung zweiter Prototyp

0.8 Modifikation der Mechanik

- dauerstest hat gezeigt dass mechanik zu viel spiel aufweisst
- Motorenhalterung der y achse schränkt des bewegungsspielraum um mehr als 10cm ein, welches zu einem unwesentlichen grösseren verhältnis von Spielfeldgrösse und Abmessungen des Schachtischs
- CoreXY bietet Vorteil:
- Motoren fest am rahmen => weniger kabel + gewicht an der Y Achse
- jedoch komplexerer Aufwand der riemenverlegung so komplexere 3d bauteile
- Tischabmessungen 620x620mm dabei Bewegungsspielraum vom 580x580 zuvor nur 480x480

0.9 Optimierungen der Spielfiguren

Die bisherigen genutzen vorgefertigten Figuren funktionierten mit dem ersten Prototyp problemlos. Sie wiesen aber trotzdem eine zu hohe Fehleranfälligkeit, im Bezug auf das gegenseitige Beeinflussen (abstoßen,anziehen) durch die verwendeten Magnete.

Die grösse der Figuren kann durch die fest definierte Feldgrösse von 55mm und der verwendeten NFC Tags nicht verändert werden. Nach vielen Testdurchläufen mit dem ersten Prototyp war zu erkennen, dass sich die Figuren je nach aktueller Situation auf dem Spielfeld immernoch magnetisch anziehen. Dies führt je nach Spielverlauf zu Komplikationen, sodass die Figuren manuell wieder mittig auf den Felder platziert werden müssen.

Um dies zu verhindern, wurde einige Figuren zusätzlich mit einer 20mm Unterlegscheibe am Boden versehen, welche diese Problem behob, jedoch das NFC Tag nicht mehr als lesbar erwies. Dies resultierte in der Idee die Schachfiguren ebenfalls selbst mit dem 3D-Drucker herzustellen und die Magnete direkt in den Boden der Figur einlassen zu können.

Die aktuell verwendeten Figuren des ersten Protoyp wiegen 8 Gramm für die Bauern und 10 Gramm für die restlichen Figuren. Der Test mit der Unterlegscheibe ergab, dass

diese mit 4 Gramm genug Gewicht hinzufügte um die magnetische Beeinflussung zu unterbinden.

Testweise wurden eingie Figuren mittels 3D Drucker erstellt um so das Gewicht zu erhöhen. Nach einem erfolgreichen Test wurde das CAD Modell wurde so angepasst, dass sich der Magnet direkt in den Boden der Figure einkleben lässt. Desweiteren wurden bei den Bauern (den leichtesten) Figuren die Magnete ausgetauscht. Die zuerst verwendeten 10x3mm Neodym-Magnete wurden bei diesen Figuren gegen 6x3mm Magnete getauscht. Somit sind im Design zwei verschiedenen Arten von Magneten notwendig, jedoch traten in den anschliessend durchgeführten Testläufen keine Beeinflussungen mehr statt.

- komplett 3d gedruckte Figuren mit integrierten Magnet
- nfc + filzgleiter
- durch SLA druck höheres Gewicht somit kein Abstoßen von den anderen Figuren mehr
- verschiedene Magnetgrässse/Stärke für Bauern/andere Figuren
- jedoch alte figuren weiter verwendbar und austausch / vermischbar

0.10 Änderungen der Elektronik

- verwenung von standarhardware, welche gut zu beschaffen ist
- implementierung von standart gcode protokol, somit mit universell verwendbaren steuerung verwendbar
- bietet eine hohe flexibilität da nur ein minimales set von Gcode-kommandos vorrausgesetzt wird

0.10.1 IMPLEMENTIERUNG GCODE-Sender

- was ist GCODE

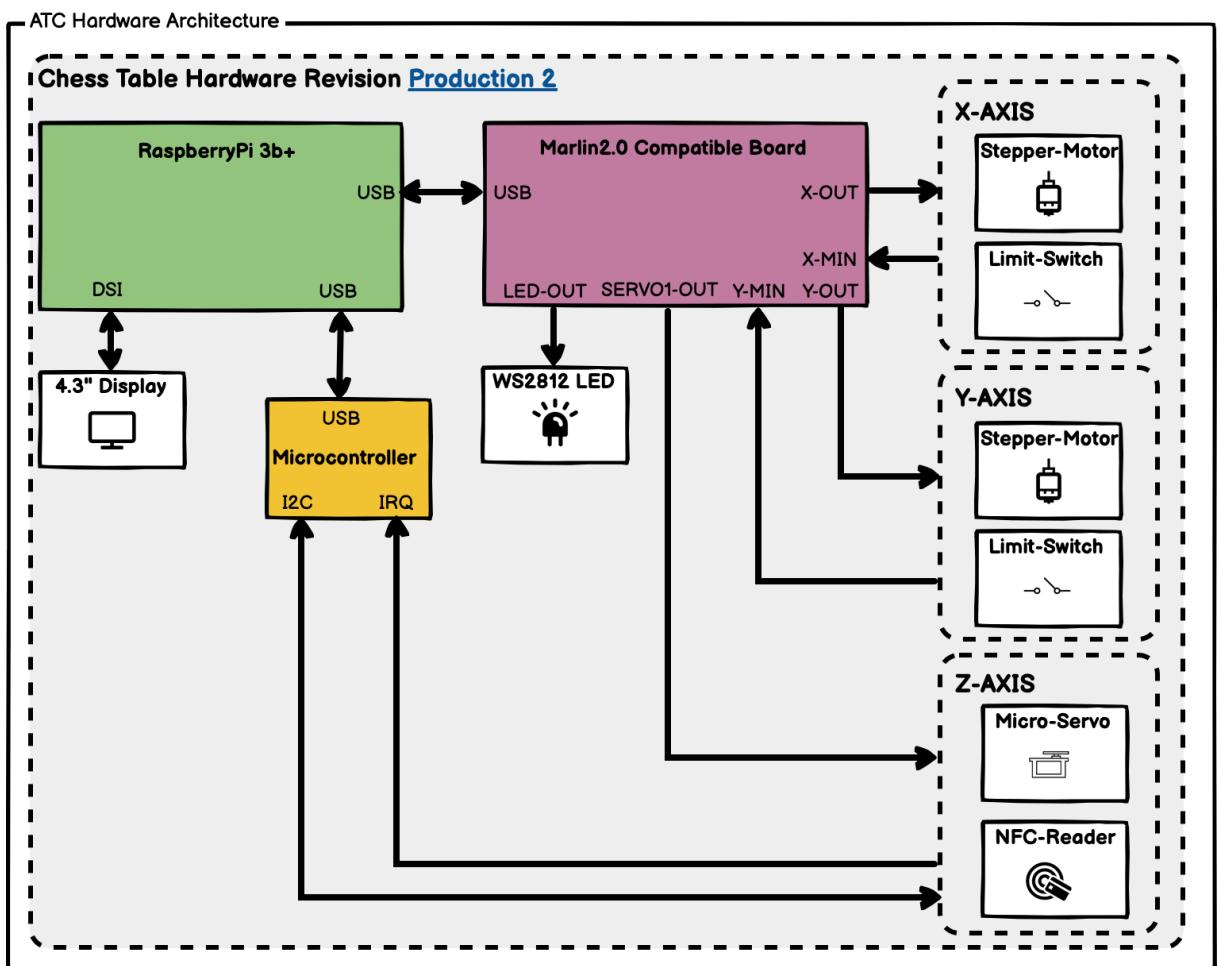


Bild 0-8: Production Hardware: Blockdiagramm

- grundlegend verwendete Kommandos G0 G28 G21 G90 M280
- erweiterte optionale Kommandos M150 M502 M500 M92
- anhand der hwid und existenz der serial interfaces wird entschieden gcode hardware zu laden
-

0.10.2 Fazit zum finalen Prototypen

- modularer hardware aufbau
- einfach/gut verfügbare materialien verwendet
- geänderte Mechanik resultiert in nahezu Spielfreier Mechanik (+- 1mm), welches für diesen Zweck mehr als ausreicht
- 6h dauerstest bestanden

0.11 Entwicklung der Cloud Infrastruktur

Die erste Phase der Entwicklung des Systems bestand in der Entwicklung der Cloud-Infrastruktur und der darauf laufenden Services. Hierbei stellt die “Cloud”, einen Server dar, welcher aus dem Internet über eine feste IPv4 und eine IPv6 verfügt und frei konfiguriert werden kann.

0.11.1 API Design

Das System soll so ausgelegt werden, dass es im späteren Zeitpunkt mit verschiedenen Client-Devices mit diesem kommunizieren können. Dazu zählen zum einen der autonome Schachttisch, aber z.B. auch einen Web-Client, welcher die Funktionalität eines Schachttisch im Browser abbilden kann. Hierzu muss das System eine einheitliche Representational State Transfer (REST)-Schnittstelle bereitstellen.

Inhalt

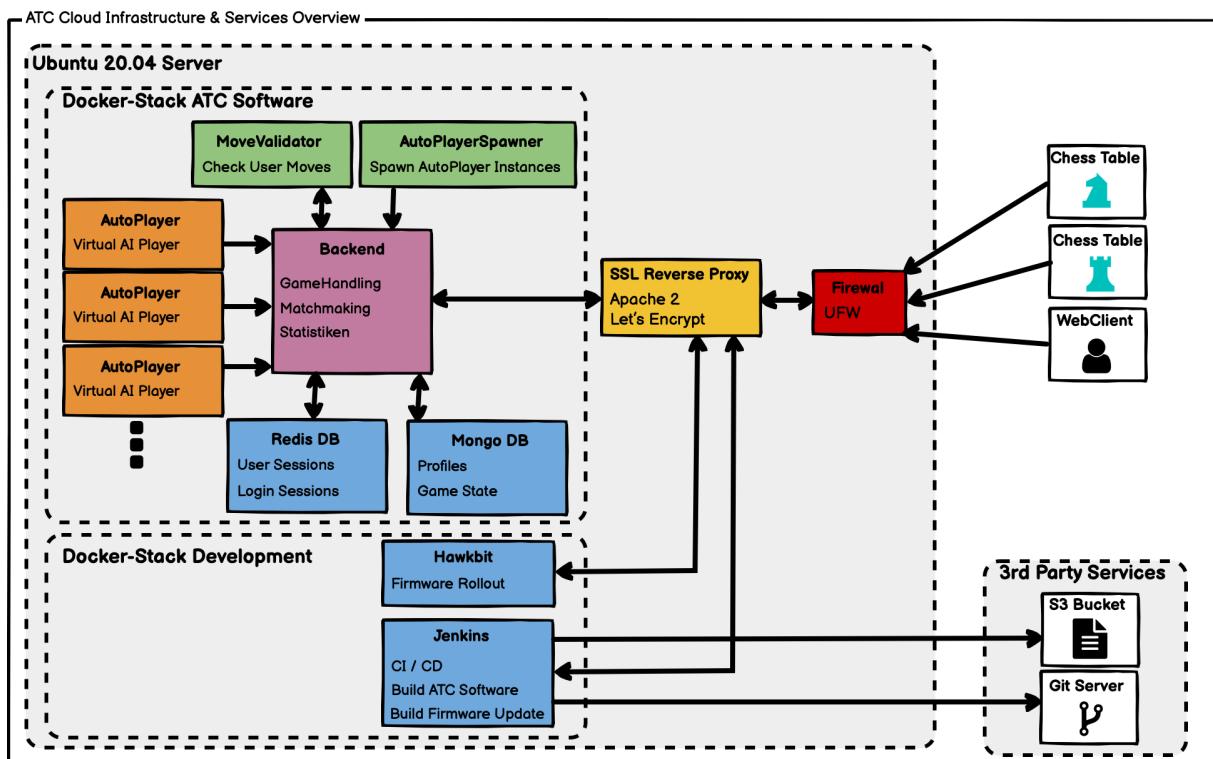


Bild 0-9: Cloud-Infrastruktur: Gesamtübersicht der verwendeten Cloud-Infrastruktur

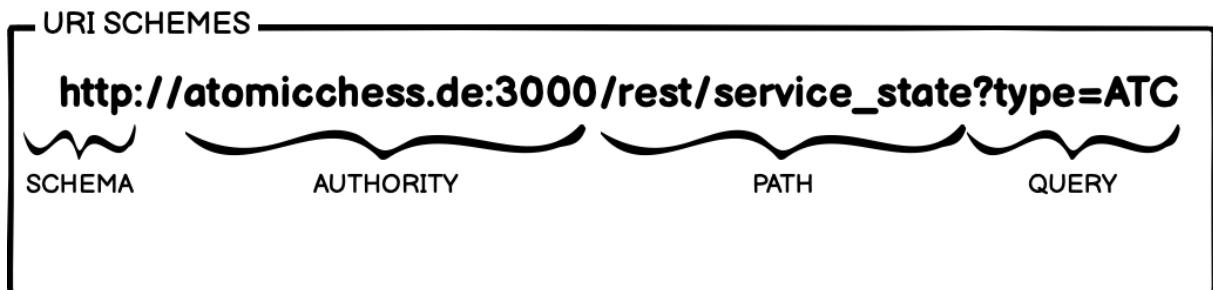


Bild 0-10: Cloud-Infrastruktur: Aufbau einer URI

Eine RESTful API bezeichnet eine API welche HTTP-Requests verwendet um auf Daten zugreifen zu können.

- grafik
- 5 requirements

Die RESTful API stellt verschiedene Ressourcen bereit, welche durch eine URI **0-10** eindeutig identifizierbar sind. Auf diese können mittels verschiedenster HTTP Anfragemethoden (GET, POST, PUT, DELETE) zugegriffen werden. Jeder dieser Methoden stellt einen anderen Zugriff auf die Ressource dar und beeinflusst somit das Verhalten und die Rückantwort dieser.

Eine URI besteht dabei aus mehreren Teilen. Das Schema gibt an wie die nachfolgenden Teile interpretiert werden sollen. Dabei wird bei einer RESTful Schnittstelle typischerweise das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) Protokoll, sowie Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) verwendet. Dabei steht HTTPS für eine verschlüsselte Verbindung. Des Weiteren gibt es viele andere Schema, wie z.B File Transfer Protocol (FTP) welches

Somit stellt die RESTful API eine Interoperabilität zwischen verschiedenen Anwendungen und Systemen bereit, welche durch ein Netzwerk miteinander verbunden sind. Dieser Ansatz ist somit geeignet um die verschiedenen Client Systeme (Schachtisch, Webclient) eine Kommunikation mit dem Server zu erlauben.

0.11.2 Service Architektur

- was ist ein Service
- microservice ansatz
- Kapselung der Schachspiel spezifischen funktionalitäten
- verwendung von NoSQL Datenbanken somit müssen tabellen nicht speziell auf Schach spezifische felder ausgelegt sein
- statelss Diese stellen alle wichtigen Funktionen zum Betrieb des autonomen Schachtisches zur Verfügung.

Vorüberlegungen

- welche funktionalitäten müssen abgedeckt werden
- client aktivitendiagramm

Backend

- matchmaking schachlogik
- zentraler zugriffspunkt auf das System und stellt diese abi bereit
- stellt spielerprofile aus datenbanken bereit bereit
- authentifizierung der clients und deren sessions
- weiterleitung der von spielerinteraktionen an move validator

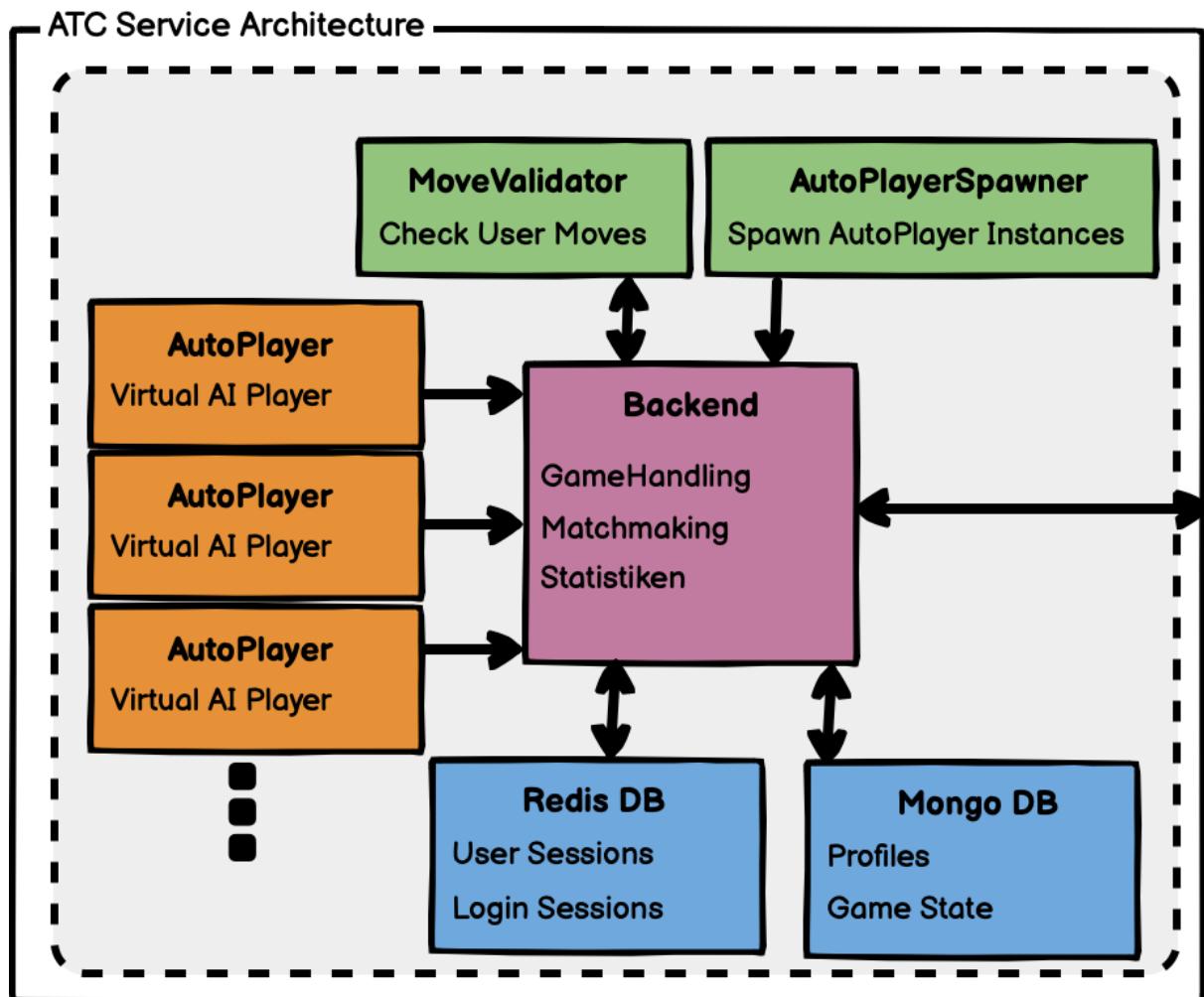


Bild 0-11: Cloud-Infrastruktur: Aufbau der Service Architecture

A screenshot of a Postman API client interface. The request URL is `http://atomicchess.de:3000/rest/login?hwid=f1ow389djiw&playertype=1`. The response status is 200 OK, with a response body showing a JSON object:

```

1  {
2   "err": null,
3   "status": "ok",
4   "sid": "daada700-a38a-11eb-9c30-7907ebbd50ac",
5   "profile": {
6     "profile_config": {
7       "SETTINGS": null,
8       "USER_DATA": null
9     },
10    "logs": [],
11    "hwid": "f1ow389djiw"
}

```

Bild 0-12: Cloud-Infrastruktur: Backend Login-Request und Response

- spielfelder werden als string übermittelt = hier fen representation; einfach zu parsen; standart

MoveValidator

Der MoveValidator-Service bildet im System die eigentliche Schachlogik ab. Die Aufgabe ist es, die vom Benutzer eingegebenen Züge auf Richtigkeit zu überprüfen und auf daraufhin neuen Spiel-Status zurückzugeben. Dazu zählen unter anderem das neue Schachbrett und ob ein Spieler gewonnen oder verloren hat.

Bevor ein Spiel begonnen wird, generiert der MoveValidator das initiale Spielfeld und bestimmt den Spieler, welcher als erstes am Zug ist.

- Beispiel request/repsonse

Der Backend-Service fragt einen neuen Spiel an oder übergibt einen Schachzug inkl. des Spielbretts an den Service. Der Response wird dann vom Backend in der Datenbank gespeichert und weiter an die Client-Devices verteilt.

Mit diesem Design ist es möglich, auch andere Spielarten im System zu implementieren, nur hier die initialen Spielfelder generiert werden und Züge der Spieler validiert werden müssen.

Allgemein geschieht die Kommunikation über drei API Calls.

- Auflistung der routen
- generiter neues brett
- python chess packge welche pesudo legal moves generiert
- beispiel Requests



Bild 0-13: WebClient: Spielansicht

0.11.3 Entwicklung WebClient

Der WebClient wurde primär dazu entwickelt um das System während der Entwicklung zu testen. Dieser simuliert einen autonomen Schachtisch und verwendet dabei die gleichen HTTP Requests. Dieser wurde dabei komplett in JavaScript (JS) umgesetzt im Zusammenspiel mit Hypertext Markup Language (HTML) und Cascading Style Sheets (CSS) und ist somit komplett im Browser lauffähig.

Ausgeliefert werden die statischen Dateien zur Einfachheit durch den Backend-Service.
* express router * public folder * techstack js * backend zu testen * menschliche spieler zu simulieren * während der entwicklungsphase des tisches gezielt spiele simulieren zu können * liefert auch statistiken * wird zur einfachheit direkt aus dem abckend heraus ausgeliefert da nur statisches html/js/class

Während der Implementierung wurde der WebClient weiter ausgebaut und es wurde weitere Features ergänzt. Dazu zählt zum einen eine Übersicht über vergangene und aktuell laufende Spiele. In dieser können Spiele Zug um Zug nachvollzogen werden und weitere Information über den Spielstatus angezeigt werden.?? Auch ist es möglich

The screenshot shows the 'LAST GAMES - HISTORY' section of the AtomicChess statistics page. It lists a single game entry:

| # | CREATED | PLAYER WHITE | PLAYER BLACK | MOVE COUNT | GAME STATE | VIEW |
|---|---------------------|--------------|-------------------------|------------|------------|-------------------------------|
| 1 | 2021-04-20_19:18:40 | AI_1e2ab | VIRT_legawa_efreron_193 | 39 | RUNNING | <button>SHOW DETAILS</button> |

Below this is the 'GAME INFORMATION' section for the game ID 25a34660-a1fc-11eb-9cfc-ff3c5889598c. It displays the current board position, player turn, and game status.

CURRENT BOARD:

Bild 0-14: WebClient: Statistiken

aktuell laufende Spiele in Echtzeit anzeigen zu lassen, somit wurde eine Livestream-Funktionalität implementiert.

AutoPlayer

Der AutoPlayer-Service stellt den Computerspieler bereit. Jede Service-Instanz stellt einen virtuellen Spieler bereit, welcher die gleiche Schnittstellen wie der WebClient oder der autonome Schachtisch verwendet. Die einzige Änderung an den verwendeten REST-Calls ist der Login-Request. Hier wird das `playertype` Flag gesetzt welches den Spieler als Computerspieler gegenüber des Systems authentifiziert. Somit wird dieser während des Matchmaking-Prozesses erst für ein Match ausgewählt, wenn kein anderer Spieler mehr zur Verfügung steht, welcher vom Typ WebClient oder autonomer Schachtisch ist. Somit ist gewährleistet, dass immer zuerst die Menschlichen-Spieler ein Spiel beginnen.

Eine weitere Modifikation ist die Verwendung einer Schach-AI, da dieser Service als Computerspieler agieren soll. Hierzu kam die Open-Source Chess Engine Stockfish[13]

in der Version 11 zum Einsatz. Die Stockfish-Engine bietet noch weitere Features, als nur die nächst besten Züge zu einem gegebenen Schachbrett zu ermitteln. Sie kann auch genutzt werden um Züge zu klassifizieren und bietet Analysemöglichkeiten für Spielstellungen.

Die AutoPlayer-Instanz kommuniziert über das Universal Chess Interface (UCI) Protokoll[12] mit der Executable der Stockfish-Engine. Dieses Protokoll wird in der Regel von SchachEngines um mit einer Graphical User Interface (GUI) zu Kommunizieren und die Kommunikation erfolgt über Klartextbefehle. Um das aktuelle Spielbrett in der Engine zu setzen wird dieses in der Forsyth-Edwards-Notation (FEN) Notation mit dem Prefix `position fen` als Klartext an die Engine übergeben.

Im Kontext des AutoPlayer-Service wird der Engine nur das aktuelle Spielbrett übermittelt und der nächst beste Zug ausgelen. Dies wird Ausgeführt, wenn der AutoPlayer am Zug ist. Nachdem die Engine einen passenden Zug gefunden hat, wird das Ergebnis über den `make_move` REST-API Call übermittelt.

Wenn das Match beendet wird, beendet sich auch die Service-Instanz. Diese wird jedoch wieder gestartet wenn die Anzahl der zur Verfügung stehenden Computerspieler unter einen definierten Wert fallen. Somit ist dafür gesorgt, dass das System nicht mit ungenutzen AutoPlayer-Instanzen gebremst wird. Diese Anzahl **0-15** ist in der Backend-Configuration frei wählbar und kann je nach zu erwarteten Aufkommen angepasst werden.

Allgemein skaliert das System durch diese Art der Ressourcenverwaltung auch auf kleinen Systemen sehr flexibel. Durch die Art der Implementierung, dass sich der AutoPlayer-Service wie ein normaler Spieler verhält, sind auch andere Arten des Computerspieler möglich. So ist es zum Beispiel möglich, die Spielstärke je Spieler anzupassen oder einen Computerspieler zu erstellen, welcher nur zufällige Züge zieht.

Ein weiterer Anwendungsfall für den AutoPlayer-Service, ist das Testen des weiteren Systems insbesondere des Backend-Service. Durch das Matching von zwei AutoPlayer-Instanzen, können automatisierte test Schachpartien ausgeführt werden um die Funktionsfähigkeit des restlichen Systems zu testen. Diese Feature wurde insbesondere bei der Entwicklung des Webclienten und der Steuerungssoftware für den autonomen Schachtisch verwendet.

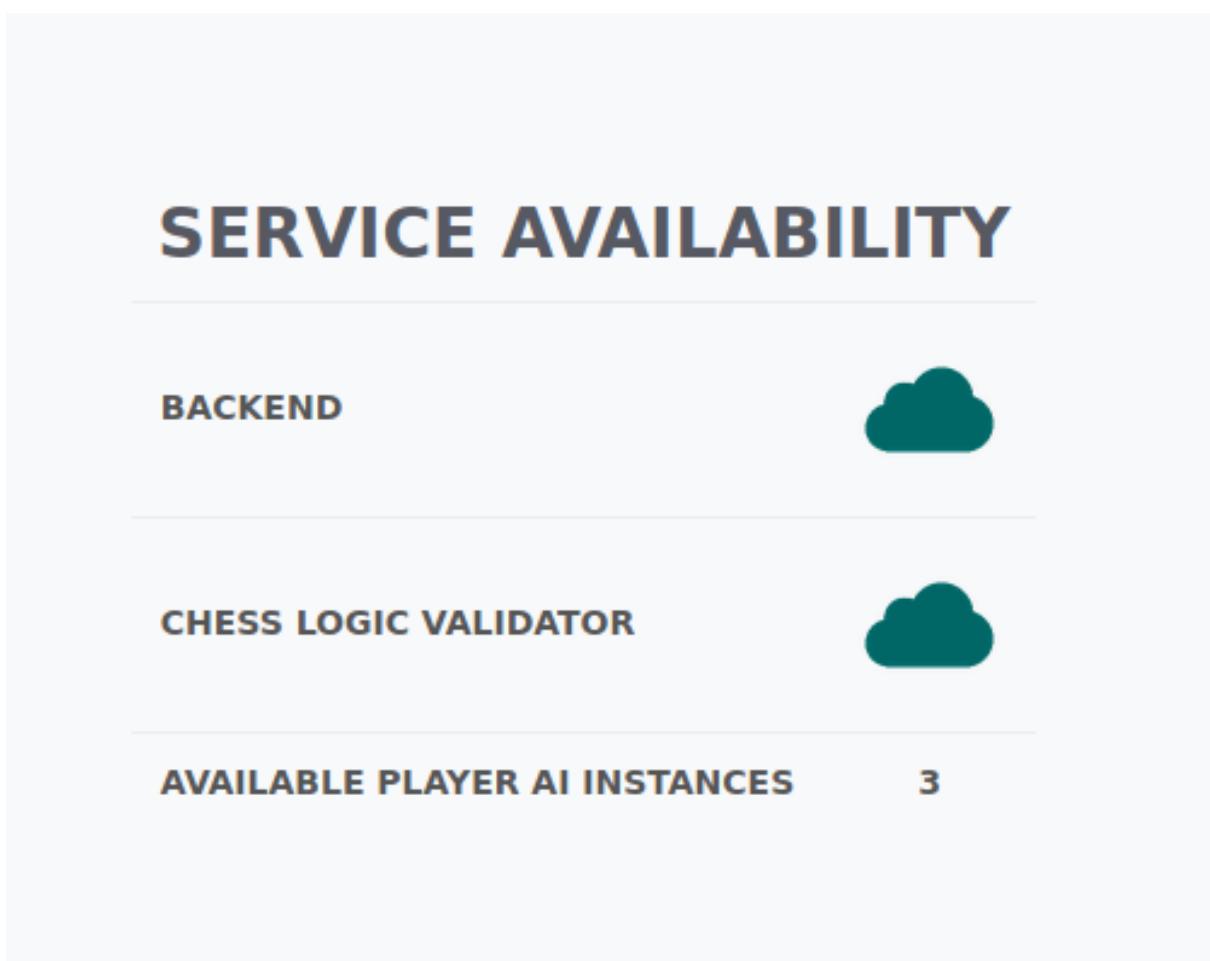


Bild 0-15: WebClient: Anzahl der aktiven, sich nicht im Spiel befindenden AutoPlayer-Service-Instanzen

0.11.4 Authetifizierung

- authetifizierung
- https only
- Zertifikate auf Clientseite generiert jedoch nicht Abgefragt

0.12 Embedded System Software

- Hauptsoftware zur Steuerung der Elektrik/Mechanik
- Kommunikation mit dem Cloud-Server

0.12.1 Ablaufdiagramm

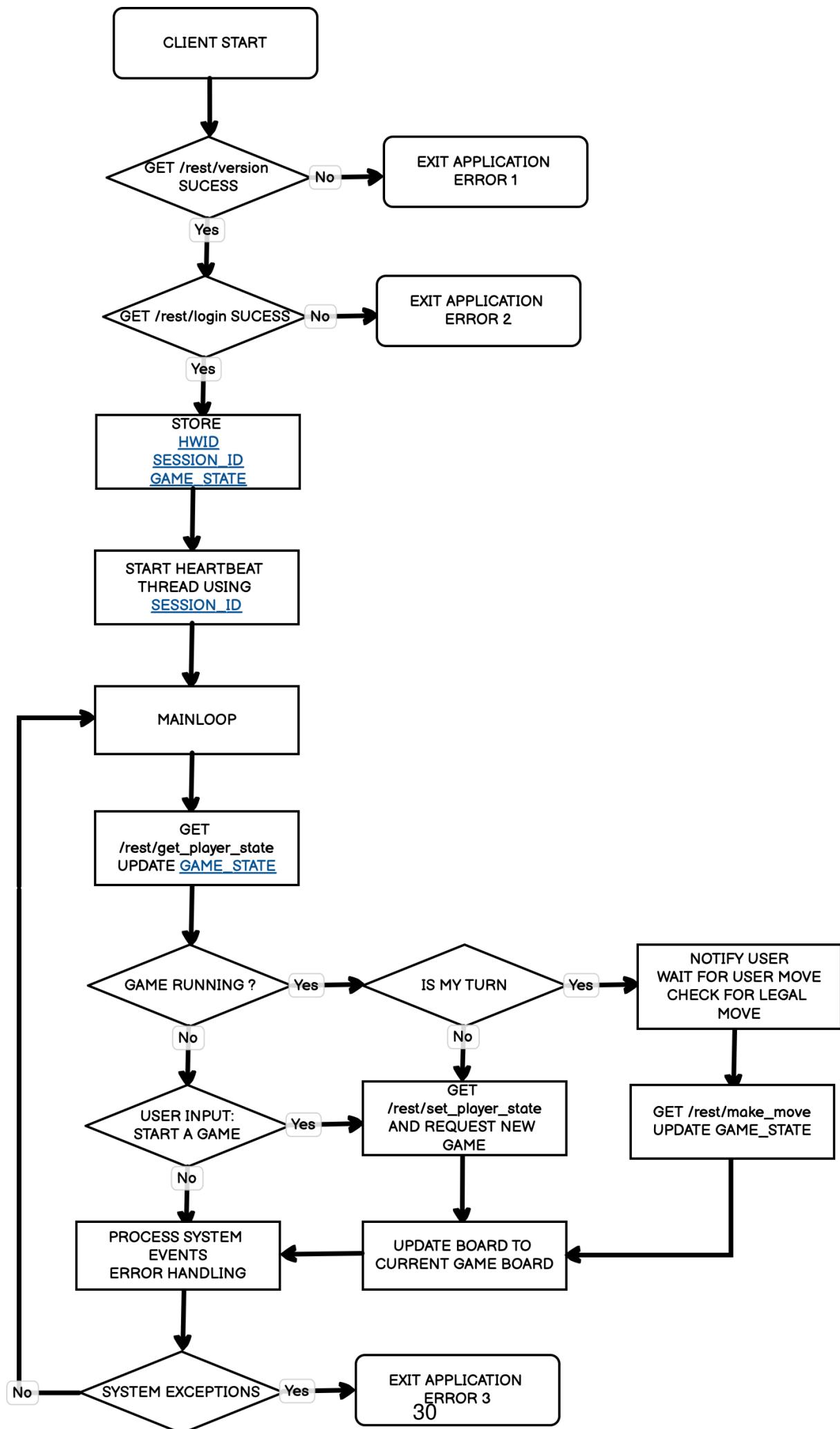
- dummer Client
- Synchronisierung von gegeben Schachfeld mit dem lokalen Schachfeld
- vier Schritte (entfernen, bewegen, hinzufügen, bewegen)

0.12.2 Figur Bewegungspfadberechnung

- Algorithmus zur Umsetzung eines Schachzugs
- Aufteilung in current und target Board

0.12.3 Schachfeld Scan Algorithmus zur Erkennung von Schachzügen

- Benutzer bestätigt dass er Schachzug gemacht hat
- Ermittlung des getätigten Schachzugs
- Scan der Schachfeld-Veränderungen, durch Vergleich des vorherigen Schachfelds und der möglichen Züge



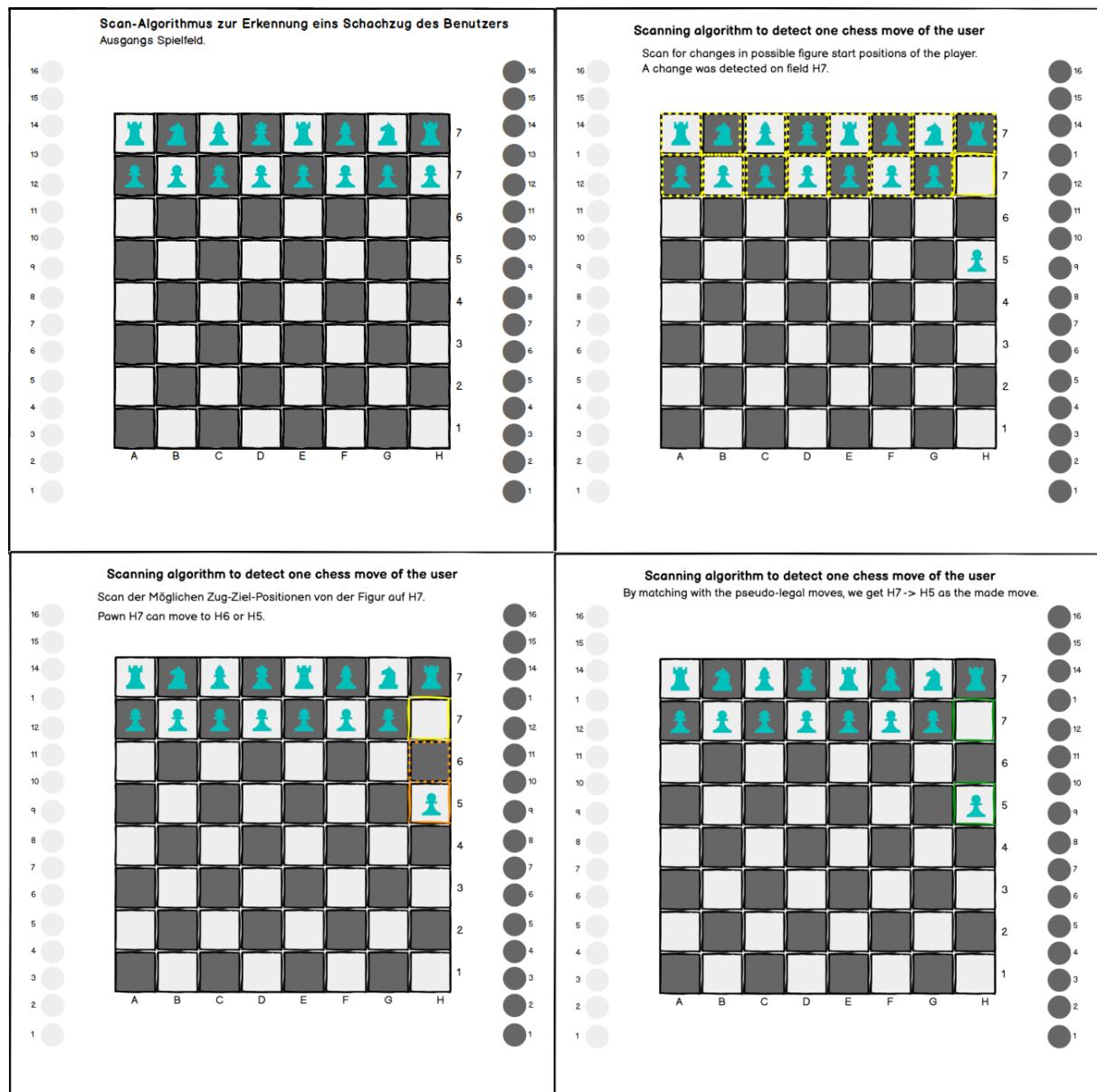


Bild 0-17: Embedded System Software: Schachfeld Scan Algorithmus Ablauf

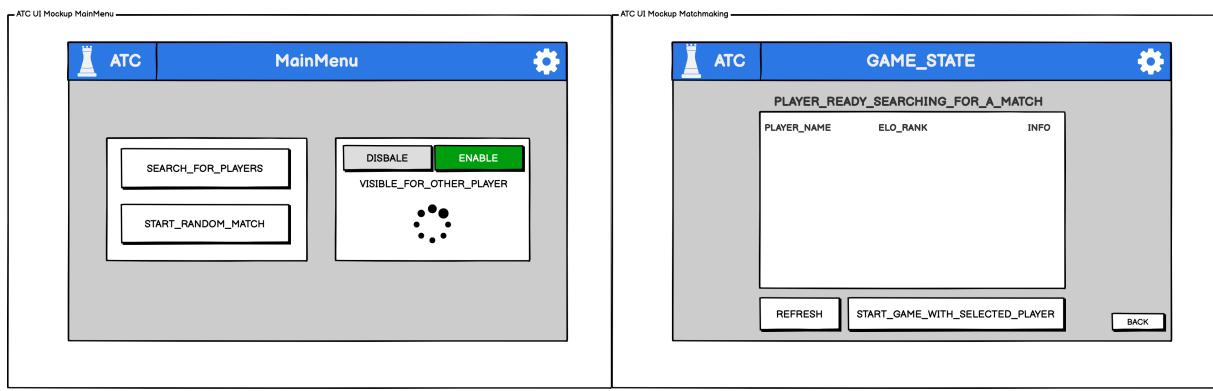


Bild 0-18: Embedded System Software: User-Interface Mockup

0.12.4 Userinterface

- QT Quick UI, als Package in Buildroot integriert
- IPC Bibliothek zur Kommunikation mit der controller-Software Instanz
- JSON basiert => einfaches Debugging
- Steuerung über andere Endgeräte möglich z.B Handy-App welche im selben Netzwerk befindet.

0.13 Fazit

- mit am weitesten forgeschrittenem open-source autonomes Schachtisch Projekt

0.13.1 Ausblick

- Einbindung in existierende Schach-Clouds z.B. <https://lichess.org/>
- user-port für Erweiterungen (z.B. DGT Schachur)

Literaturverzeichnis

- [1] DGT: *DGT Bluetooth Wenge.* <https://www.topschach.de/bluetooth-wenge-eboard-figuren-p-3842.html>. Version: 28.03.2021
- [2] DGT: *DTG Smart Board.* <https://www.topschach.de/smart-board-p-3835.html>. Version: 28.03.2021
- [3] GUERERO, Michael: *Automated Chess Board.* <https://create.arduino.cc/projecthub/maguerero/automated-chess-board-50ca0f>. Version: 28.03.2021
- [4] INC., SquareOff: *Grand Kingdom Set.* <https://squareoffnow.com/product/gks>. Version: 28.03.2021
- [5] INC., SquareOff: *Kingdom Set.* <https://squareoffnow.com/product/kds>. Version: 28.03.2021
- [6] MACHINES, DIY: *DIY Super Smart Chessboard.* <https://www.instructables.com/DIY-Super-Smart-Chessboard-Play-Online-or-Against-/>. Version: 28.03.2021
- [7] McEVOY, Brian: *PRINT CHESS PIECES, THEN DEFEAT THE CHESS-PLAYING PRINTER.* <https://hackaday.com/2021/03/06/print-chess-pieces-then-defeat-the-chess-playing-printer/>. Version: 28.03.2021
- [8] McEVOY, Brian: *Ultimaker Cura Slicer.* <https://github.com/Ultimaker/Cura>. Version: 28.03.2021
- [9] RAVICHANDRAN, Akash: *Automated Chess Board.* <https://create.arduino.cc/projecthub/automaters/automated-chess-5dbd7a>. Version: 28.03.2021

- [10] SEMICONDUCTOR, Nordic: *NFC library and modules: Generating messages and records.* https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fcom.nordic.infocenter.sdk5.v12.0.0%2Fnfc_ndef_format_dox.html. Version: 28.03.2021
- [11] SEMICONDUCTOR, Nordic: *NFC library and modules: NDEF message and record format.* https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fcom.nordic.infocenter.sdk5.v12.0.0%2Fnfc_ndef_format_dox.html. Version: 28.03.2021
- [12] STEFAN-MEYER KAHLEN, ShredderChess: *UCI protocol.* <http://wbec-ridderkerk.nl/html/UCIProtocol.html>, <https://www.shredderchess.com/download/div/uci.zip>. Version: 28.03.2021
- [13] TORD ROMSTAD, Joona K. Marco Costalba C. Marco Costalba: *Stockfish - Strong Open Source Chess Engine.* <https://stockfishchess.org/>. Version: 28.03.2021
- [14] V., Deutsche I. e.: *DIN EN ISO 9241-220 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 220: Prozesse zur Ermöglichung, Durchführung und Bewertung menschzentrierter Gestaltung für interaktive Systeme in Hersteller- und Betreiberorganisationen.* <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naerg/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:289443385>. Version: 04.04.2021
- [15] YOUSIFNIMAT: *Chess Robot.* <https://www.instructables.com/Chess-Robot/>. Version: 28.03.2021

Akronyme

ATC Atomic Chess Table. 7

CAD Computer-Aided Design. 10, 18

CSS Cascading Style Sheets. 25

FDM Fused Deposition Modeling. 10

FEN Forsyth-Edwards-Notation. 27

FTP File Transfer Protocol. 22

GPL General Public License. 4

GUI Graphical User Interface. 27

HTML Hypertext Markup Language. 25

HTTP Hypertext Transfer Protocol. 22, 25

HTTPS Hypertext Transfer Protocol Secure. 22

JS JavaScript. 25

NDEF NFC Data Exchange Format. 12, 13

NDEF-RTD NDEF Record Type Defintion. 13

Akronyme

NFC Near Field Communication. 12–14, 17

REST Representational State Transfer. 20, 26, 27

UCI Universal Chess Interface. 27

USB Universal Serial Bus. 4, 7

WLAN Wireless Local Area Network. 4, 7

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-------------|--|----|
| 0-1 | Grove PN532 NFC Reader mit Kabelgebundener Antenne | 9 |
| 0-2 | 3D Druck: Objekt (rot,gelb,grün),Tree Structure (cyan) | 11 |
| 0-3 | Prototyp Hardware: Erster Prototyp des autonomen Schachtisch | 12 |
| 0-4 | Prototyp Hardware: Tool zur Erstellung des NDEF Payloads: ChessFigureIDGenerator.html | 13 |
| 0-5 | Prototyp Hardware: NDEF Text Record Payload für einen weissen Turm | 14 |
| 0-6 | Prototyp Hardware: Blockdiagramm | 15 |
| 0-7 | Production Hardware: Finaler autonomer Schachtisch | 16 |
| 0-8 | Production Hardware: Blockdiagramm | 19 |
| 0-9 | Cloud-Infrastruktur: Gesamtübersicht der verwendeten Cloud-Infrastruktur | 21 |
| 0-10 | Cloud-Infrastruktur: Aufbau einer URI | 21 |
| 0-11 | Cloud-Infrastruktur: Aufbau der Service Architecture | 23 |
| 0-12 | Cloud-Infrastruktur: Backend Login-Request und Response | 23 |
| 0-13 | Webclient: Spielansicht | 25 |
| 0-14 | Webclient: Statistiken | 26 |
| 0-15 | Webclient: Anzahl der aktiven, sich nicht im Spiel befindenen AutoPlayer-Service-Instanzen | 28 |
| 0-16 | Embedded System Software: Ablaufdiagramm | 30 |
| 0-17 | Embedded System Software: Schachfeld Scan Algorithmus Ablauf | 31 |
| 0-18 | Embedded System Software: User-Interface Mockup | 32 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| 0.1 Auflistung kommerzieller autonomer Schachtische | 2 |
| 0.2 Auflistung von Open-Source Schachtisch Projekten | 4 |
| 0.3 Auflistung der Anforderungen an den autonomen Schachtisch | 7 |
| 0.4 Verwendete 3D Druck Parameter. Temperatur nach Herstellerangaben des verwendeten PLA Filaments. | 11 |

.1 Anhang