

Melody, der Musikbot

Maximilian Weitzel, Elektro- und Informationstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Zusammenfassung—Das Projektseminar Elektro- und Informationstechnik wird jedes Jahr an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg durchgeführt. Im Rahmen des diesjährigen Projektseminars wurde ein Roboter erstellt. Dieser kann codierte Musik abspielen. Die Entwicklung und Konstruktion dieses Roboters erfolgten auf Basis von LEGO-Mindstorms-Sets sowie des LEGO-NXT-Steuercomputers. Die softwareseitige Implementierung wurde über MATLAB realisiert. In diesem Paper werden der Aufbau und die Funktionsweise des Roboters vorgestellt. Es wird weiterhin auf einige Herausforderungen während des Konstruktionsprozesses, sowie auf deren Lösungsansätze eingegangen. Außerdem werden einige theoretische Hintergründe betrachtet, welche im Entwicklungsprozess von Bedeutung waren.

Schlagwörter—LEGO-Mindstorms, MATLAB, Musik, NXT, Roboter, Töne

I. EINLEITUNG

TÖNE umgeben den Menschen in seinem alltäglichen Leben immer und überall. Nüchtern betrachtet ist Musik nicht viel mehr als eine Aneinanderreihung von Tönen. Dennoch ist Musik wahrscheinlich eines der schönsten Dinge, die ein Mensch mit seinem Ohr erleben kann. Aus diesem Grund beschäftigt sich die Menschheit bereits seit der Antike mit der Struktur von Tönen. Seitdem entstanden unzählige Systeme. Zum einen um Töne zu sortieren und zum anderen, um es leichter zu machen, die Töne zu gewünschter Musik zu kombinieren. In der Vergangenheit konnten bereits viele Fortschritte und Veränderungen in der Musiktheorie verzeichnet werden. Auf die theoretischen Zusammenhänge soll jedoch innerhalb dieses Papers nur am Rand eingegangen werden. Wesentlich entscheidender ist die Frage, wie man diese theoretischen Zusammenhänge nutzbar machen kann, um Musik zu erzeugen. Für den im nachfolgenden vorgestellten Roboter werden einige einzelne Aspekte der Musik- beziehungsweise Klangtheorie benötigt, zum einen die Art und Weise, wie ein Ton erzeugt wird, zum anderen, wie Töne überhaupt zu einer kohärenten Melodie kombiniert werden können. Damit verbunden ist die Fähigkeit, Musik auf einen Tonträger zu speichern und durch eine Vorrichtung wieder abspielbar zu machen.

Dies war das Kernziel bei der Entwicklung von Melody. Es existieren verschiedenste Methoden, um musikalische Klangerzeugnisse abzuspeichern und wieder abspielbar zu machen. Mittels des zur Verfügung gestellten NXT-Steins lassen sich Töne abspielen und über externe Sensoren Daten einlesen. Die Zielstellung lautete deshalb, die Möglichkeiten des NXT zur Klangerzeugung und zur Auswertung von Sensordaten nutzbar zu machen, um mittels eines Auswertungsalgorithmus eine im Voraus codierte Melodie abspielbar zu machen.



Abbildung 1. Compact Disc (CD) als bekanntestes Beispiel eines optischen Datenspeichers [1]

II. VORBETRACHTUNGEN

Es werden zuerst einige Grundzüge aus der Musiktheorie vorgestellt, welche für die Entwicklung von Melody benötigt wurden. Anschließend wird kurz auf optische Datenträger, insbesondere am Beispiel einer Compact Disc (CD) eingegangen. Da diese für den Entwurf des Datenträgers wichtig waren. Danach wird mit dem eigenen Ansatz auf den eigentlichen Entwicklungsprozess übergeleitet.

A. Musiktheorie

Historisch haben sich im europäischen Raum bestimmte Tonintervalle entwickelt, bei denen die entsprechenden Frequenzen zu den Tönen in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen. Beispielhaft zu nennen sind hier die Oktave mit einem Verhältnis von 2:1, also einer Verdopplung der Frequenz pro Oktave. Nach dem gleichen Prinzip können zum Beispiel die Quinte (3:2) und die Quarte (4:3) festgelegt werden.

Um zu einem Grundton nun zum Beispiel eine Quinte zu bestimmen, muss der entsprechende Grundton mit $\frac{3}{2}$ multipliziert werden. Würde man einen Grundton mit $\frac{1}{2}$ multiplizieren, dann würde das einen Sprung um eine Oktave nach unten bedeuten. Die Zielstellung ist jetzt ein Verhältnis zwischen Quintensprüngen nach oben und Oktavensprüngen nach unten zu finden, um wieder zu einem Grundton zu gelangen. Dadurch soll bestimmt werden, in wie viele Teile ein Tonintervall aufgeteilt werden muss. Das bedeutet, wie viele Quinten- und Oktavensprünge zu einer Tonleiter zusammengefügt werden können.

Die mathematische Bestimmung erfolgt über Kettenbruchentwicklung, wird jedoch an dieser Stelle ausgelassen. Es sei auf die Quelle [2] verwiesen, wo detaillierte und umfangreiche Ergänzungen zu diesem Thema zu finden sind. Letztendlich ergibt sich eine Einteilung in 12 Oktavenschritte. Da in einer Tonleiter ein gleiches Frequenzverhältnis zwischen aufeinander folgenden Tönen gelten soll, ergibt sich ein konstantes

Verhältnis k zwischen zwei Tönen $\frac{T_1}{T_2} = 2^{\frac{1}{12}} = k$. Dieses Verhältnis wurde im Auswertungsalgorithmus verwendet [3].

B. Optische Datenspeicher/Compact Disc

Anfang der 1970er Jahre wurden erstmals Speicher verwendet, welche das Prinzip der optischen Abtastung nutzten, um große Mengen an Informationen auf einem Speichermedium abzurufen und zu speichern. Die optische Abtastung wird häufig durch einen Laser realisiert. Daher stammt auch der Name optischer Datenspeicher, da das Auslesen oder Schreiben der Daten nicht wie bei anderen Speichermedien beispielsweise durch einen magnetischen Schreib- beziehungsweise Lesekopf erfolgt [4].

Eines der wohl bekanntesten Beispiele für einen optischen Datenspeicher ist die 1982 eingeführte Compact Disc oder kurz CD. Die CD ist eine Kunststoffscheibe, auf welcher eine dünne Metallschicht sowie ein Schutzlack aufgebracht sind. In Abbildung 1 ist eine CD dargestellt. Gut zu erkennen sind hier die charakteristischen Reflexionserscheinungen, verursacht durch die Struktur einer CD. Sie besitzt einen Durchmesser von 8 cm bis 12 cm. Die gespeicherten Informationen auf einer CD befinden sich auf einer spiralförmig auf nahezu dem Großteil der Fläche einer CD angeordneten Struktur. Diese Struktur reflektiert aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit das Licht an verschiedenen Stellen unterschiedlich. Diese Schwankungen in der Helligkeit werden von einer Lesevorrichtung registriert und die dadurch codierten Informationen werden durch geeignete Protokolle decodiert [5].

C. Eigener Ansatz

Im zur Verfügung gestellten LEGO-Mindstorm-Set waren verschiedene Arten von Sensoren enthalten. Es standen folgende Sensoren zur Verfügung, Lichtsensoren zur Messung von Helligkeitsschwankungen, (RGB-)Farbsensoren zum Erkennen von Farbinformationen, Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung sowie Tastsensoren, welche auf ein physisches Tastsignal reagieren. Es standen mehrere Motoren zur Verfügung, von welchem aber lediglich einer genutzt wurde. Am NXT-Stein selbst können vier Sensoren sowie drei Motoren angeschlossen werden. Der NXT-Stein besitzt die Möglichkeit zur Wiedergabe von Tönen, welche vorher in einer codierten Form eingelesen werden. Die Decodierung beziehungsweise Steuerung der Funktionen des NXT-Steins erfolgte im Rahmen dieses Praktikums über MATLAB. Als Schnittstelle diente hier eine öffentliche Toolbox der RWTH Aachen [6].

Durch die in den vorherigen Punkten erwähnten Aspekte der Musiktheorie sowie des bekannten Konzepts eines optischen Datenspeichers wurde die Zielstellung abgeleitet. Diese lautete, mittels der enthaltenen Lichtsensoren eine Vorrichtung zu konstruieren, welche codierte Lieder über Helligkeitsdifferenzen ausliest, anschließend per MATLAB decodiert und einen Ton ausgibt.

III. UMSETZUNG

In diesem Abschnitt werden zuerst der Aufbau der Lesevorrichtung und des Roboters allgemein erklärt. Anschließend wird

der Datenträger, welcher das codierte Lied enthält, in Aufbau und Funktionsweise vorgestellt. Es wird weiterhin betrachtet, wie der Roboter den Lesevorgang ausführt und daraus Töne abspielt.

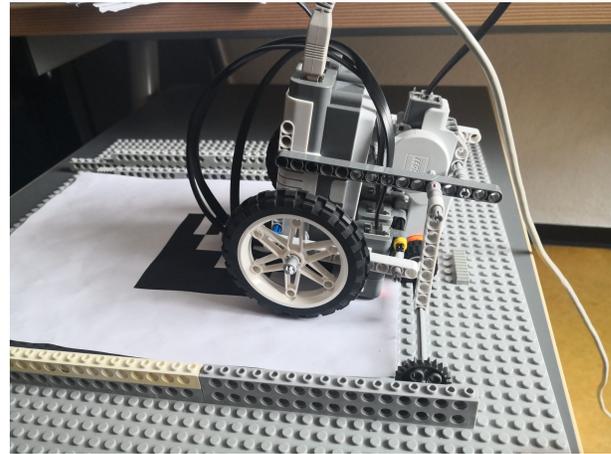


Abbildung 2. Roboter in Betriebsbereitschaft

A. Aufbau

Das zentrale Element bildet die Leseeinheit. Diese besteht aus dem NXT-Stein sowie vier Lichtsensoren. Es wurden vier Lichtsensoren verwendet, damit vier Spuren parallel eingelesen werden können. Das bedeutet, dass die Sensoren mit minimalem Abstand nebeneinander angeordnet sind. Jeder der Sensoren nimmt im jeweiligen Messbereich die Helligkeitsdifferenz auf. Bei der Konstruktion dieser Anordnung wurde abgewägt zwischen möglichen Interferenzen der einzelnen Sensoren untereinander und maximal möglicher Menge an aufzunehmenden Informationen. Der minimale Abstand der Sensoren, sowie die Verwendung der maximalen Anzahl an Sensoren sollte gewährleisten, dass eine größtmögliche Menge an Informationen auf dem Datenträger gespeichert und von der Leseeinheit ausgelesen werden können. Der Roboter in Betriebsbereitschaft ist unter Abbildung 2 dargestellt.

Die Leseeinheit ist senkrecht über dem Datenträger angeordnet. Die Sensoren sind auf den Datenträger gerichtet, um die einzelnen Spuren separat einlesen zu können. Während des Lesevorgangs wird die Leseeinheit langsam über den Datenträger bewegt. Die Geschwindigkeit der Leseeinheit muss mit der Anzahl an Werten koordiniert werden, die durch die Lichtsensoren aufgenommen werden. Für mögliche Anpassungen stellt das einen Nachteil dar, denn beide Werte müssen aufeinander mittels Versuch-und-Irrtum abgestimmt werden. In seiner aktuellen Konfiguration ist die Wahl dieser Werte ein Kompromiss aus maximal möglichen Messwerten und notwendiger Geschwindigkeit. Es ist allerdings auch möglich, andere Kombinationen zu wählen.

Die Bewegung der Leseeinheit wird über einen einzelnen Motor realisiert, der direkt an der Leseeinheit angebracht ist. Der Motor ist über eine Antriebsachse mit beidseitig am Rand platzierten Zahnschienen verbunden. Diese Zahnschienen ermöglichen eine Vorwärtsbewegung. Eine Herausforderung

bei der Realisierung der Bewegung stellte die Fahrstabilität der Leseinheit dar. Die Zahnräder der Leseinheit neigten dazu, die Spur der Zahnschienen zu verlassen oder sich schräg darüber zu bewegen, was im Extremfall zu einer Art von „Entgleisungseffekt“ beziehungsweise zu unsauber eingelesenen Sensorwerten führte. Eine Lösung hierfür bot die Konstruktion einer Führungsschiene. Auch hier wurde sich bewusst für eine simple Konstruktion entschieden, um mögliche neu entstehende Fehlerquellen ausschließen zu können. Die Führungsschiene besteht aus zu beiden Seiten angebrachten Wänden, welche geringfügig höher als die Zahnschienen selbst sind. Durch die geringe Höhe auf der Seite der Antriebsachse wird gewährleistet, dass sich die Leseinheit ungestört bewegen kann.

B. Datenträger



Abbildung 3. Beispiel des Layouts eines Datenträgers

Der Datenträger entspricht in seiner Größe einem Blatt nach DIN A4. Das ermöglicht maximal vier Spuren auf dem Datenträger einzuzeichnen. Eine Abbildung des Datenträgers findet sich in Abbildung 3. Diesen Spuren ist jeweils ein Bitwert vom niederwertigsten zum höchstwertigen Bit zugeordnet. Diese Zuordnung ist direkt über den MATLAB-Code implementiert, indem je einer Spur ein Array an Messwerten zugewiesen wird. Diese entsprechenden Arrays werden dann mit der jeweiligen Bit-Wertigkeit multipliziert, um eine Bit-Codierung zu ermöglichen. In Abbildung 4 ist der entsprechende Code zu diesem Verfahren abgebildet.

Um ein Lied zu codieren, werden zuerst alle Töne des gewünschten Lieds in binäre Form umgewandelt. Nach diesem Schritt wird ein entsprechender Datenträger in einem Zeichenprogramm erstellt und anschließend ausgedruckt. Dieses Vorgehen besitzt einige signifikante Vorteile gegenüber anderen

```
for i = 1:size
messwerte(1, i) = GetLight(SENSOR_1);
messwerte(2, i) = GetLight(SENSOR_2);
messwerte(3, i) = GetLight(SENSOR_3);
messwerte(4, i) = GetLight(SENSOR_4);
messwerte(:, i) = 1 - (messwerte(:, i) > scan);
noten(i) = messwerte(1, i) + messwerte(2, i)*2 + messwerte(3, i)*4 + messwerte(4, i)*8;
```

Abbildung 4. Code-Ausschnitt in welchem die Bit-Codierung umgesetzt wurde

Verfahren, wie zum Beispiel dem Einzeichnen per Hand. Zum einen kann dadurch schneller gearbeitet werden. Zum anderen sind bei sachgemäßer Verwendung Kanten schärfer und die gesamte Qualität des Datenträgers höher, was zu einer verbesserten Lesegenauigkeit und verringerten Störgeräuschen führt. Außerdem können mögliche Fehler beim Codieren und Erstellen schneller korrigiert werden.

Durch die Lichtsensoren werden Helligkeitsdifferenzen aufgenommen. Für den Datenträger wurde deshalb eine Schwarz-Weiß-Codierung gewählt. Diese ermöglicht, ein Lied in Bit-Codierung auf dem Datenträger darzustellen. Die beiden Zustände können dadurch simuliert werden. Nehmen die Sensoren während der Laufzeit einen Wert auf, gibt der NXT entsprechend einen Ton aus. Um eine Melodie zu erzeugen, werden jedoch neben durchgängigen Tönen auch Pausen benötigt. Diese Pausen sind durch weiße Striche direkt auf dem Datenträger markiert und werden von den Lichtsensoren entsprechend erkannt. Mögliche Softwarelösungen wurden aus Zeit- und Komplexitätsgründen nicht weiter verfolgt.

Auf dem Datenträger können, in seiner aktuellen Form, bis zu 15 Töne codiert und gelesen werden. Das resultiert aus der Größe eines DIN-A4 Blatts und der minimalen Strichbreite, welche gewählt werden musste, um ein korrektes Lesen der codierten Töne zu gewährleisten. Die Eigenschaften Blattgröße und Strichbreite, im Zusammenhang mit der Lesegenauigkeit der Sensoren, können in diesem Fall als limitierende Faktoren betrachtet werden.

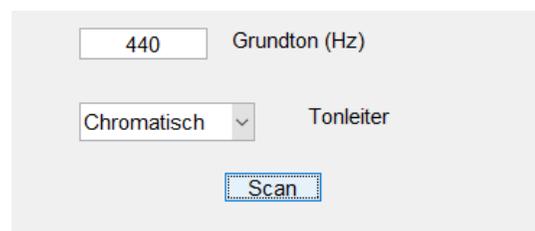


Abbildung 5. GUI zur Auswahl der Grundeinstellungen

C. Lesevorgang/Abspielen eines Tons

Bevor der Lesevorgang gestartet wird, müssen über ein Graphical User Interface (GUI) ein Grundton und eine Tonart eingestellt werden. Das Layout der GUI ist unter Abbildung 5 dargestellt. Für den Grundton kann eine beliebige Frequenz eingegeben werden. Die Tonarten Dur, Moll und Chromatisch werden durch ein Auswahlfenster gewählt. Nachdem diese Grundeinstellungen bestätigt wurden, wird der Lesevorgang gestartet.

Während des Lesevorgangs bewegt sich die Leseinheit langsam

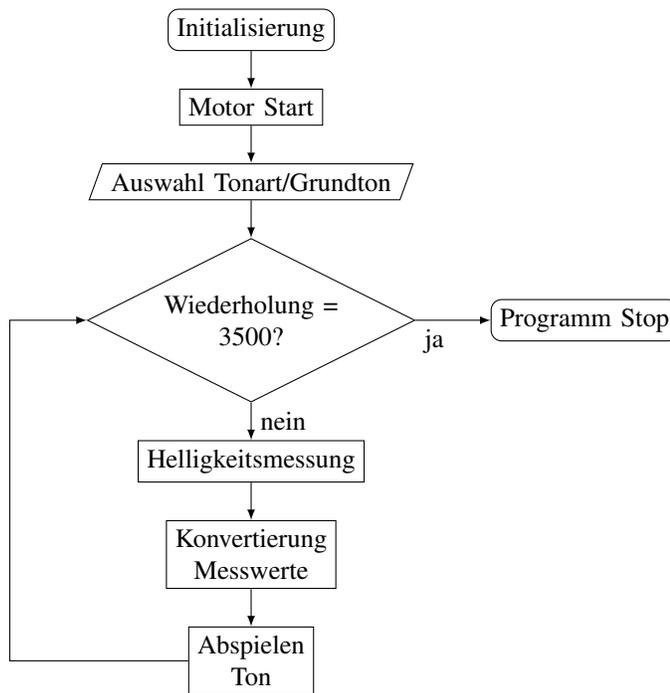


Abbildung 6. Programmablaufplan

über den Datenträger. Die vier nebeneinander angeordneten Sensoren nehmen jeweils in ihrer Spur die Helligkeitsdifferenz auf. Während der Laufzeit werden die gemessenen Werte in MATLAB in abspielbare Töne konvertiert und der Befehl zum Abspielen des entsprechenden Tons an den NXT geschickt. Die Messung wird so lange fortgeführt, bis die festgelegte Anzahl an Messwerten erreicht ist. Während der Erprobung wurde für die Anzahl der Messwerte pro Durchgang auf 3500 festgelegt. Der Programmablaufplan für den Lesevorgang befindet sich in Abbildung 6.

IV. ERGEBNISDISKUSSION

Die grundlegende Zielstellung lautete, einen Roboter zu konstruieren, welcher auf einem Datenträger codierte Töne auslesen kann und so eine Melodie abspielt. Diese Zielstellung konnte erfüllt werden. Es konnten verschiedene Lieder beziehungsweise Tonleitern codiert werden. Beispielhaft zu nennen sind hier „Tinkle twinkle little star“ oder „Korobeiniki“, besser bekannt als Titelmelodie zum Spiel „Tetris“. Es konnte eine vergleichsweise schnelle Methode zum Codieren und Auslesen von Musik entwickelt werden, mit der es möglich ist, einfache Melodien auf einem Datenträger zu speichern und wieder abzuspielen. Die Methode zum Einlesen der Musik konnte im Laufe der Projektarbeit verbessert werden. Durch den Einbau eines Filters und die Verbesserung des Erstellungsprozesses eines Datenträgers war es möglich, Störgeräusche zu minimieren und ein weitgehend fehlerfreies Lesen zu ermöglichen. Nach verschiedenen Versuchen konnte auch eine möglichst optimale Abstimmung zwischen Laufgeschwindigkeit des Motors und Menge an Sensordaten gefunden werden.

Es existieren Bereiche mit Optimierungspotenzial. Die Führung in ihrer aktuellen Form verhindert zwar, dass der Roboter völlig

die Spur verlässt. Jedoch kann es noch immer zu Abweichungen innerhalb der Führung kommen, was kleinere Lesefehler verursacht. Außerdem konnten der Platz, den die Führung einnimmt und der Platz, welcher für den Datenträger benötigt wird, nicht ideal aufeinander abgestimmt werden. Ebenso konnte der Erstellungsprozess eines Datenträgers signifikant verbessert werden. Dennoch gibt es auch hier Verbesserungspotenzial, denn der manuelle Erstellungsprozess per Zeichenprogramm stellt zwar eine Verbesserung dar, trotzdem sind mögliche Fehler durch unsachgemäße Handhabung nicht auszuschließen. Bedingt durch das Ende des Projektseminars wurden verschiedene Lösungsansätze nicht oder nur ansatzweise verfolgt werden. Verschiedene Bereiche mit Verbesserungspotenzial sind zum Beispiel, eine Schienenführung der Leseinheit, ein Filter für mögliche Störgeräusche oder eine Erhöhung der limitierten Speicherkapazität des Datenträgers.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die gruppeninterne Zielstellung eines Roboters, welcher codierte Melodien abspielbar machen kann, zufriedenstellend erreicht wurde. Es wurde ein Roboter konstruiert, welcher sich über einen Datenträger bewegen kann und welchem es möglich ist während der Laufzeit codierte Töne auszulesen und abzuspielen. Es konnten verschiedene Probleme bezüglich Hard- und Software gelöst werden. Insgesamt war es möglich, beliebig viele einfache Melodien zu codieren und abzuspielen.

Mögliche Verbesserungsansätze bezogen auf die im vorherigen Abschnitt genannten Bereiche stellen sich wie folgt dar. Durch die Verbesserung der Führung könnte der Roboter noch stabiler während desfahrens werden, was eine verbesserte Tonqualität ermöglichen würde. Ebenfalls zur Verbesserung der Tonqualität beitragen könnte eine softwareseitige Verbesserung des Filters, welcher aktuell nur teilweise implementiert werden konnte. Auch die vergleichsweise geringe Größe der gesamten Vorrichtung und die damit verbundene Begrenzung der Abmessungen des Datenträgers stellen limitierende Faktoren dar. Man könnte hier zum Beispiel durch Vergrößerung des gesamten Aufbaus oder Implementierung von Farbsensoren verbesserte Ergebnisse erzielen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA: *Bild einer CD*. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ca/CD-ROM.png>. Version: Februar 2022. – abgerufen am : 21.02.2022
- [2] HARTFELDT, Christian ; EID, Wolfram ; HENNING, Herbert: *Mathematik in der Welt der Töne*. <http://www.math.uni-magdeburg.de/reports/2002/musik.pdf>. Version: Februar 2022. – abgerufen am : 20.02.2022
- [3] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA: *Tonstruktur (mathematische Beschreibung)*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Tonstruktur_\(mathematische_Beschreibung\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Tonstruktur_(mathematische_Beschreibung)). Version: Februar 2022. – abgerufen am : 21.02.2022
- [4] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA: *Optische Datenspeicher*. https://de.wikipedia.org/wiki/Optischer_Datenspeicher. Version: Februar 2022. – abgerufen am : 20.02.2022
- [5] PLANET WISSEN: *Die Compact Disc (CD)*. https://www.planet-wissen.de/kultur/musik/geschichte_der_tontraeger/pwiecompactdisc100.html. Version: Februar 2022. – abgerufen am : 21.02.2022
- [6] BEHRENS, Alexander: *RWTH-Mindstorms NXT Toolbox*. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/18646-rwth-mindstorms-nxt-toolbox>. Version: Februar 2022. – abgerufen am : 25.02.2022