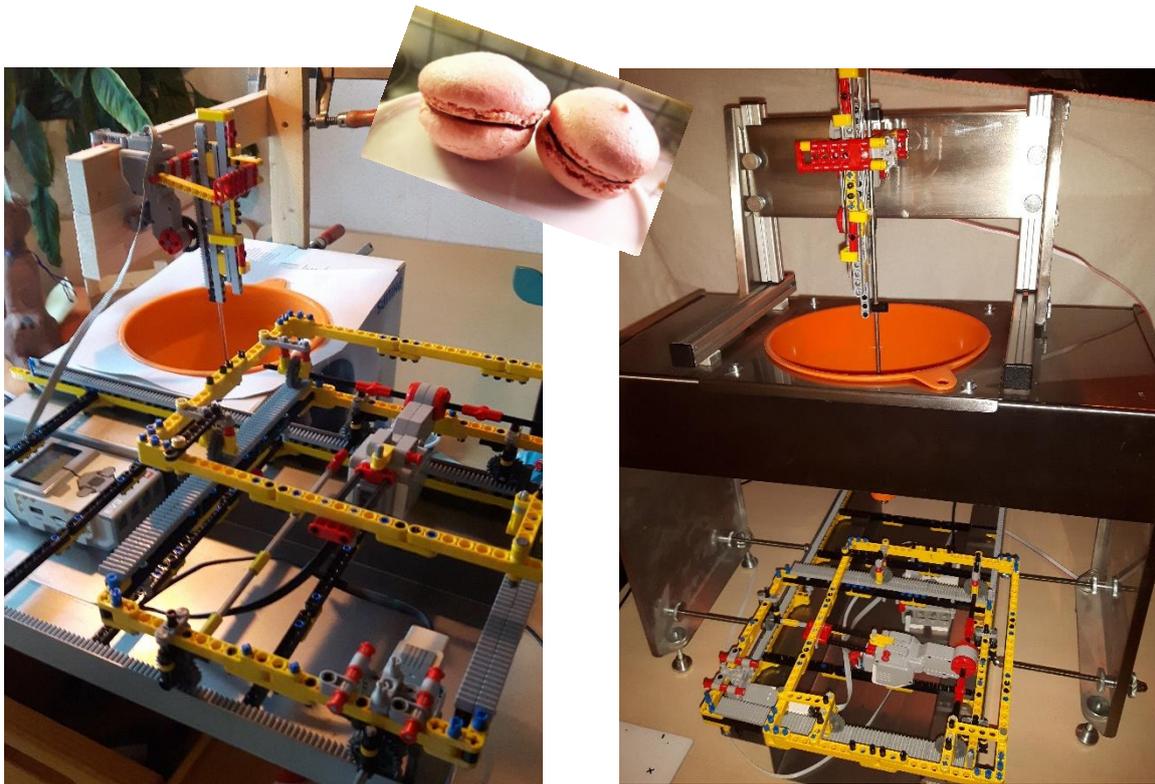


Schüler experimentieren-Projekt

„Perfekte Macarons – Handwerk oder Technik?“

Robin Luca Wolff (13 Jahre)

8d, Erzbischöfliches St. Angela-Gymnasium, Wipperfürth



Zusammenfassung

In meinem Projekt "Perfekte Macarons – Handwerk oder Technik?" geht es darum, ob ein selbstgebauter Speiser Teig genauer dosieren kann, als ein Mensch in Handarbeit. Aus Erfahrung weiß ich, dass es schwierig ist, gleichmäßige Macaronschalen zu spritzen. Sind sie ungleichmäßig, sehen sie nicht ansprechend aus, und man sagt ja: "das Auge isst mit". Mein Ziel ist, einen XY-Tisch und einen Dosierer zu konstruieren, die den Teig perfekt-gleichmäßig auf ein Blech bringen. Ich bewerte das Ergebnis im Vergleich zu handwerklicher Herstellung und messe dazu die Unterschiede in der Dosiermasse und der Rundheit aller Kekse pro Blech. Ich kümmere mich auch um die Genauigkeit, indem ich jeweils ein volles Blech und auch mehrere Bleche spritze. Dabei muß ich darauf achten, daß der Teig immer gleich flüssig ist. Die Daten werte ich mit einer statistischen Methode aus und stelle sie als Diagramme dar. Ich hoffe, ich kann mit meiner Entwicklung schönere Macarons backen, als mit der Hand.

Inhalt

Einführung	3
Bekanntes über Macarons, XY-Tische und Speiser	3
Macarons.....	4
XY-Tische	4
Speiser	4
Projektplanung	5
Welche Arbeiten beantworten meine Frage?.....	5
Mögliche Fehlerquellen und ihre Bedeutung	6
Grundkonstruktion der Bauteile & Justage	6
XY-Tisch	6
Speiser	8
Justage der Bauteile	9
Programmentwicklung & Synchronisation.....	10
Versuchsdurchführung & Geräteoptimierung	11
Ergebnisse & Diskussion	14
Optimierung Speisergestell	16
Quellenangaben	18

Einführung

Letztes Jahr habe ich für meine Mutter als Geburtstagsüberraschung Macarons gebacken. Das sind zwei Keks-Halbschalen, zwischen denen sich eine leckere Füllung befindet. Außerdem sollten sie hübsch aussehen. Das war gar nicht so leicht!

Die Halbschalen für die Macarons mussten mit einem Spritzbeutel auf eine Backmatte gespritzt werden. Dabei sollten sie flach, rund und genau gleichgroß werden, damit nach dem Backen auch immer zwei genau aufeinander passen (s. Titelbild).

Da ich die Arbeit mit dem Spritzbeutel nicht gewöhnt war, waren meine allerdings weder rund, noch gleichgroß.

Auch wenn meine Mutter sich trotzdem über die Überraschung gefreut hat und die Macarons lecker waren, habe ich mir danach überlegt, ob ich mir nicht ein Gerät aus meinem Lego-Technik & EV3 konstruieren kann, mit dem ich perfekte Macarons backen kann.

Bekanntes über Macarons, XY-Tische und Speiser

Um zu schauen, was es zu diesem Thema schon gibt, habe ich eine Internetrecherche durchgeführt, in Bücher geschaut und bei der „Nacht der Unternehmen“ [1] in unserer Stadt bei den Industriemaschinen abguckelt.

Dabei ist mir aufgefallen, dass Maschinen, die irgendetwas genau und exakt platzieren, immer aus zwei Komponenten bestehen. Da gibt es die Unterlage, auf der Werkstücke festgehalten oder auf die Dinge positioniert werden. Diese Unterlage steht fast immer fest. Und es gibt einen Arm, der sich über der ganzen Unterlage bewegt und dabei verschiedene Arbeiten verrichtet. So können zum Beispiel mit einem Laserschneidpunkt Figuren oder technische Elemente aus einer Edelstahlplatte ausgeschnitten werden [2]. Es gibt auch ein Gerät, das Pfannkuchen mit Muster backen kann [3], den PancakeBOT. Das ist schon ganz nahe an meiner Idee.

Aber bei allen habe ich mich darüber gewundert, dass immer das Teil bewegt wird, das komplizierter und deshalb sensibler und störungsanfälliger ist. Die Techniker erklären das so, dass es allein aus Platzgründen besser ist, den kleineren Arm, statt den großen Tisch zu bewegen.

Das Problem habe ich aber nicht, da meine Maschine ja komplett nicht so groß werden wird. Außerdem werde ich eine Flüssigkeit (den Teig) über den Arm dosieren müssen. Und das zu bewegen, würde bestimmt schwierig werden, weil der flüssige Teig auch sehr schwer ist. Besonders im Vergleich zu einem leichten Lego-Technik-Gestell, das ich zur Konstruktion benutzen möchte. Wenn man den PancakeBOT anschaut, sieht man schon, wie kompliziert das ist [4] und er arbeitet mit Unterdruck und Pressluft. Das kann ganz schön gefährlich sein.

Deshalb habe ich beschlossen, den Tisch zu bewegen und nicht den Arm, der den Teig dosiert. Solche beweglichen Tische nennt man XY-Tisch und Dosieranlagen werden Speiser genannt.

Macarons

Ich habe mich, mit einem speziellen Macaron-Buch und einer Internetseite über Macarons, noch einmal genauer über die Macaron-Bäckerei informiert [5,6]. Es sind Mandelmakronenteig-halbschalen, die in jeder Farbe, die einem gefällt, mit Lebensmittelfarbe gefärbt werden können. Man soll die Farbe so auswählen, dass sie vom Gefühl her zu dem Geschmack passen, den man haben möchte. Den Geschmack kann man durch frisches, püriertes Obst, Säfte, Aromen, Kräuter, Gewürze, Honig und andere Geschmacksstoffe in den Teig bringen. Die Füllung zwischen den Halbschalen kann entweder eine Crème aus Quark, Crème Fraîche oder Sahne sein, oder aus einer Gelée-Scheibe, Marmelade oder frischen Obststückchen bestehen. Auch die Füllung soll vom Geschmack zu dem Geschmack und der Farbe der Halbschalen passen, es müssen aber nicht genau die gleichen sein. Man kann z.B. Erdbeerschalen haben, mit Schokocrème-Füllung. Ich habe mir Himbeermacarons mit Marmeladenfüllung ausgesucht, das Rezept steht in meinem Buch auf den Seiten 82-84 [6].

XY-Tische

XY-Tische kenne ich von elektrischen Werkzeugen für Heimwerker. Dort werden solche Tische benutzt, um das Werkstück kontrolliert an/unter das Werkzeug, z.B. eine Fräse, zu bringen. Da es sich jedoch um Heimwerkerbedarf handelt, der nicht so teuer sein darf, sind an dem Tisch keine Motoren, sondern Handkurbeln angebracht (z.B. Fräse MF70 von Proxxon) [7]. In der Industrie gibt es bestimmt auch Geräte, bei denen der Tisch elektrisch bewegt und mit Computer gesteuert wird, aber solche habe ich bei meiner Recherche eben nicht gesehen. Trotzdem möchte ich so einen kontrolliert, selbstverfahrenden Tisch konstruieren, weil mein Gerät sicher genauer arbeitet, wenn man nicht zwischen jedem einzelnen Schritt eine Einstellung mit der Hand machen muss.

Speiser

Es gibt verschiedene Speisersysteme. Hauptsächlich gibt es Druck-, Zugspeiser und Nadel-speiser.

Druckspeiser funktionieren wie Plastikketchup- [8] oder Flüssighonigflaschen [9], also mit Druck, der von außen nach innen übertragen wird. Dabei öffnet sich der Verschluss meist recht schwer und dann plötzlich und unkontrolliert. Daher nehme ich dieses System nicht.

Bei **Zugspeisern** wird die Öffnung von außen oder auch von innen durch eine flache Plättchen verschlossen, das zur Seite weggezogen wird, um zu öffnen und das danach entweder von selbst

(Feder) oder mit einer zweiten Bewegung wieder an seinen Platz geschoben wird, um zu verschließen. Dieses findet man z.B. beim Teigportionierer von Westmark [10]. Dies ist genauer, als mit einem Druckspeiser. Aber da die Bewegung senkrecht zum Verschluss geführt wird, geht es zwar besser als beim Druckspeiser, aber noch immer recht schwer. Wahrscheinlich werden meine EV3-Motoren diese Kraft nicht aufwenden können, daher nehme ich dieses System auch nicht.

Bei einem **Nadelspeiser** wird die Öffnung innen, unten in einem trichterförmigen Gefäß durch einen Stopfen verschlossen, der mit einer Stange kontrolliert und grade nach oben (zum Öffnen) und unten (zum Schließen) geführt wird. Das geht bei einem guten Speiser sehr genau und braucht kaum Kraft, da die Bewegung parallel zum Verschluss läuft. Geräte zum Teigportionieren gibt es auch als Nadelspeiser [11], aber bei denen wird die Kraft noch einmal umgelenkt, damit das Gefäß mit einer Hand gehalten und bedient werden kann. Das braucht wieder mehr Kraft und ist wegen der Kreisbewegung beim Umlenken kompliziert zu bauen, also baue ich einen Nadelspeiser ohne Umlenkung.

Projektplanung

Welche Arbeiten beantworten meine Frage?

Mit meinem Projekt wollte ich die Frage: “Kann ich eine Maschine konstruieren, die automatisch ein Blech Macaronschalen sauberer dosieren/speisen kann, als ich mit dem Spritzbeutel?“ beantworten. Dazu muss ich dies tun:

Maschinenbau:

- einen XY-Tisch konstruieren, der die Fläche meiner Macaron-Backmatte (18) abfahren kann
- einen Speiser konstruieren, der mindestens 18mal eine genaue Menge Teig, rund und flach speisen kann
- beide Bauteile zusammenbringen und so justieren (räumlich abstimmen), dass sie miteinander laufen können
- eine Steuerung aus Lego-EV3 bauen und programmieren, die jedes einzelne Bauteil genau steuert und beide miteinander synchronisiert (zeitlich abstimmt).

Qualitätsuntersuchung der Maschine

- eine Probierteigkonsistenz entwickeln, die dem echten Macaronteig sehr nahe kommt
- die Maschinenparameter mit dem Probierteig erarbeiten
- vielleicht die Maschinenkonstruktion optimieren
- die Versuchsreihe durchführen, im Vergleich zu meinem Spritzbeutelversuch
- Auswertung der Ergebnisse

Mögliche Fehlerquellen und ihre Bedeutung

Bei meinem allerersten Versuch mit dem Spritzbeutel zeigte sich ja, dass die Schalen alle sehr unterschiedlich waren. Also muss ich, um zuverlässige Ergebnisse zu bekommen, immer mehrere Speiseversuche machen, damit ich sie hinterher statistisch auswerten kann. Daher speise ich bei jedem Versuch 18 Halbschalen in drei Sechserreihen.

Da ich hoffe, dass die Unterschiede mit der neuen Maschine kleiner werden, muss ich für die Mengemessung eine Feinwaage nehmen, damit ich auch die kleinen Unterschiede bemerken kann. Um aus diesen Messungen mit ihren kleinen Unterschieden und Fehlern etwas sicher erkennen zu können, das man vergleichen kann, verwende ich die statistischen Methoden „Quartilauswertung“ und „Mittelwert“.

Auch mit einem festen Rezept kann es durch Einwiegefehler und nicht gleichmäßiges Verühren passieren, dass der Probierteig nicht immer genau die gleiche Konsistenz hat und sich deshalb verschieden verhält. Deshalb muss man hier besonders sorgfältig arbeiten, da es eine Verschwendung von Lebensmitteln wäre, wenn man jede 18er-Messreihe nur aus diesem Grund auch noch mehrmals machen würde.

Die Beschreibung der Rundheit ist ein besonderes Problem, da ich dafür keine Methode kenne. Ich beschreibe also die Rundheit nur durch das Hinsehen und Photos und habe hier sicher den größten Fehler in meinem Projekt, wenn die Unterschiede kleiner werden.

Grundkonstruktion der Bauteile & Justage

XY-Tisch

Mein XY-Tisch [\[Abb.1\]](#) besteht hauptsächlich aus drei Ebenen stabiler Lego-Technik-Rahmen, die übereinander angeordnet sind. Der Unterste steht auf 16 Füßen fest auf der Grundfläche. Er besteht aus zwei Schienen, die mit vier Querstreben verbunden sind. Auf den Schienen sind Zahnstangen als Fahrweg für den mittleren Rahmen angebracht. Diese entsprechen dem langen Weg entlang der langen Seite des Backblechs (6 Macaronhalbschalen mit 5 Mittelpunktabständen von je 52,5mm) und sind deshalb 255mm lang.

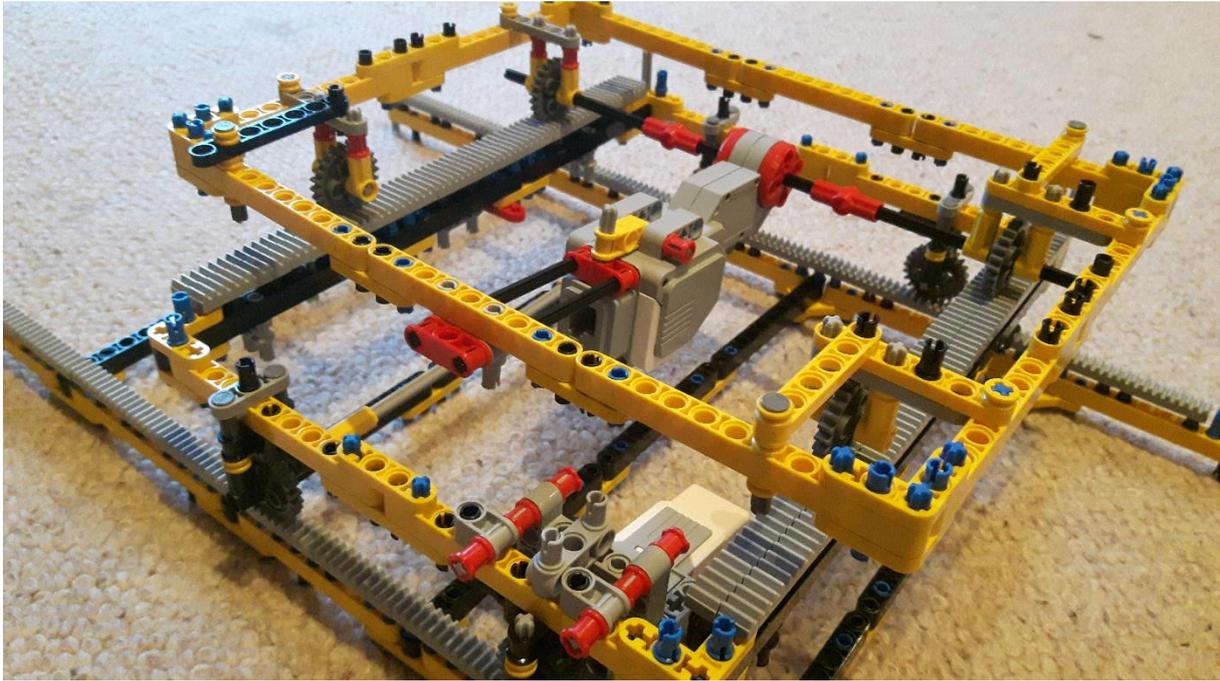


Abbildung 1: XY-Tisch

Der mittlere Rahmen besteht aus einem Rechteck und wird quer nur durch die Verbindung der beiden freilaufenden Räder zusätzlich gehalten. Er hat unten vier Räder, eben die zwei freilaufenden Vorderräder (in Startbewegungsrichtung geschaut) und die zwei Hinterräder, von denen eines mit einem mittleren EV3-Motor angetrieben wird. Mit diesen Rädern steht/fährt er auf den Zahnstangen des ersten, unteren Rahmens.

Er hat selber Zahnstangen auf den Seiten des Rechtecks, die jeweils die beiden Vorderräder miteinander und die Hinterräder miteinander verbinden. Die bilden den Verfahrweg für den oberen, dritten Rahmen, entlang der kurzen Seite der Backmatte (3 Halbschalen mit 2 Mittelpunktsabständen von 52,5mm) und sind 105mm lang. Also stehen sie senkrecht zu den Zahnstangen des untersten Rahmens.

Auf diesen rollte nun der dritte, oberste Rahmen, der auch nur ein Rechteck ist. Er hat auch vier Räder (2 hintere, angetriebene und 2 vordere, frei laufende) und fährt mit dem großen EV3-Motor, der die beiden angetriebenen Räder verbinden kann, senkrecht zur zweiten Ebene. Dieser trägt das Blech, auf das gespeist werden soll. Ich nehme hierfür im Moment noch ein Nählineal (Omnigrid, 31x31cm), weil wir das zu Hause haben und es durchsichtig ist (Plexiglas). So kann ich die Bewegungen des Tisches durch die Platte hindurch beobachten.

Speiser

Der Speiser besteht aus zwei Teilen: einem Trichter mit Nadelverschluss, in dem sich später der Teig befindet, und einer Nadelhebevorrichtung [Abb.2,3].

Der Trichter besteht aus lebensmittelechtem Plastik (900ml), der Nadelverschluß ist ein Tischtennisball, der den Trichter am oberen Ende des Auslaufrohrs verschließt und an einer Metallstange festgeklebt ist [Abb.3].

Diese Metallstange ist an ihrem oberen Ende zweifach an der Hebevorrichtung fixiert. So schwankt sie beim Anheben nicht, sondern bewegt sich grade rauf und runter.

Die Hebevorrichtung für die Nadel [Abb.2] besteht aus dem an einem festen Arm befestigten Teil und einem beweglichen Teil, an dem dann die Nadel angebracht ist. Der feste Teil besteht aus einem großen EV3-Motor und einer Kralle mit Laufweg, die den beweglichen Teil grade herauf- und herunterführt, wenn dieser mit dem Motor durch eine Zahnrad-Zahnstangen-Verbindung angetrieben wird. Der bewegliche Teil führt die Nadel.



Abbildung 2: Heber der Speisernadel

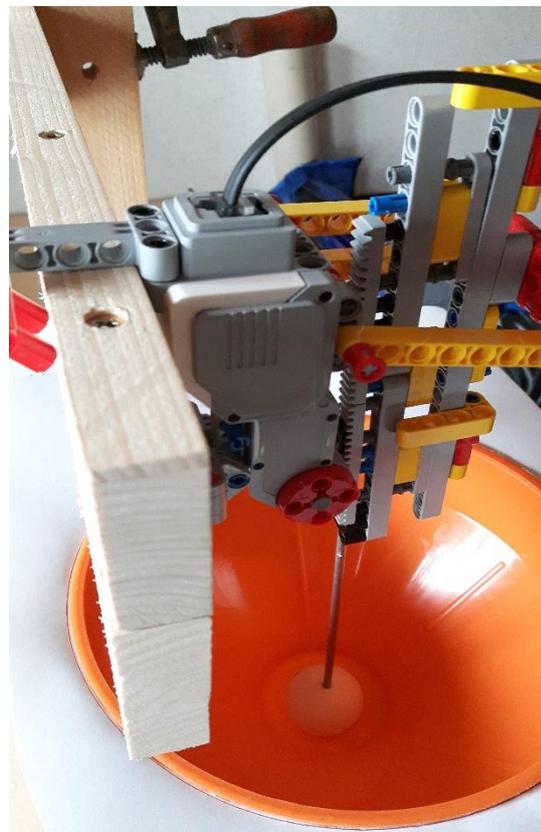


Abbildung 3: Gesamtspeiser provisor. Halterung

Da ich mir dachte, dass die genaue Verbindung beider Bauteile bestimmt nicht ganz einfach würde, habe ich den Speiser zuerst in und an eine provisorische Kartonhalterung gebaut. So konnte ich später beim Justieren noch ganz einfach an der Form arbeiten (wegschneiden, festkleben, umleimen, knicken, etc.), was bei einer festeren Halterung nicht möglich gewesen wäre. Im Kapitel „Optimierung Speisergestell“ ist der Bau des endgültigen Gestells erklärt.

Justage der Bauteile

Die Justage ist das genaue Zusammenfügen der beiden Bauteile. Ich habe beschlossen, sie nicht fest aneinander zu bauen, weil die Maschine sich dann schlecht transportieren lassen würde. Ich habe die Anschlagtechnik ausgesucht, um trotzdem nicht bei jedem Aufbau lange neu justieren zu müssen. Das bedeutet, ich habe mir feste Punkte an den Bauteilen gesucht, wo sie sich fast berühren, und Lego-Teile als Anschlag oder Abstandshalter festgelegt [Abb.4].

Bei den drei Tischebenen habe ich einen Koordinatennullpunkt ausgewählt, der liegt in Blickrichtung von Abbildung 5 vorne rechts. In dieser Position habe ich die Anschläge für die Räder direkt in die Rahmen miteingebaut.

Abbildung 5 zeigt den fertigen Aufbau meines XY-Tisches, mit dem Speiser. Nun fehlt nur noch die Steuerung.



Abbildung 4: Abstandhalter vorne



Abbildung 5: Gesamtaufbau Tisch&Speiser; prov.

Programmentwicklung & Synchronisation

Die Steuerung der eingebauten Motoren (2 große, 1 mittlerer EV3-Motor) habe ich über die EV3-Software programmiert [Abb. 6]. Diese Abbildung zeigt ein Bild des Programms stark verkleinert, nur um den Aufbau als Schema darzustellen. Durch die mechanischen Anschläge der Tischebenen, braucht am Anfang keine Startposition angefahren werden. Dann startet das Programm mit der ersten Schleife, in der immer zuerst ein Macaron aufgespeist wird, eine Abtropfzeit eingehalten wird und dann der Tisch in Richtung der langen Seite eine Position nach hinten verfährt (es wird also von hinten nach vorne gespeist!). Dabei heißt „Speisen“ immer ein Heben, ein Halten und ein Senken der Nadel. Diese Schleife läuft 5 Mal, dann wird noch einmal nur gespeist. Jetzt wird in Richtung der kurzen Seite eine Position, also eine Reihe, weiter verfahren. Dann startet die zweite Schleife, die sich nur in der Richtung unterscheidet und den Tisch jedesmal von hinten nach vorne verfährt (es wird von vorne nach hinten gespeist!). Auch diese Schleife läuft 5 Mal, plus ein letztes Speisen, bevor die dritte Reihe angesteuert wird. Diese wird genauso wie die Erste, wieder von vorne nach hinten verfahren, also von hinten nach vorne gespeist. Nach dem letzten Aufspeisen und der letzten Haltezeit fährt der Tisch wieder auf die Ausgangsposition.

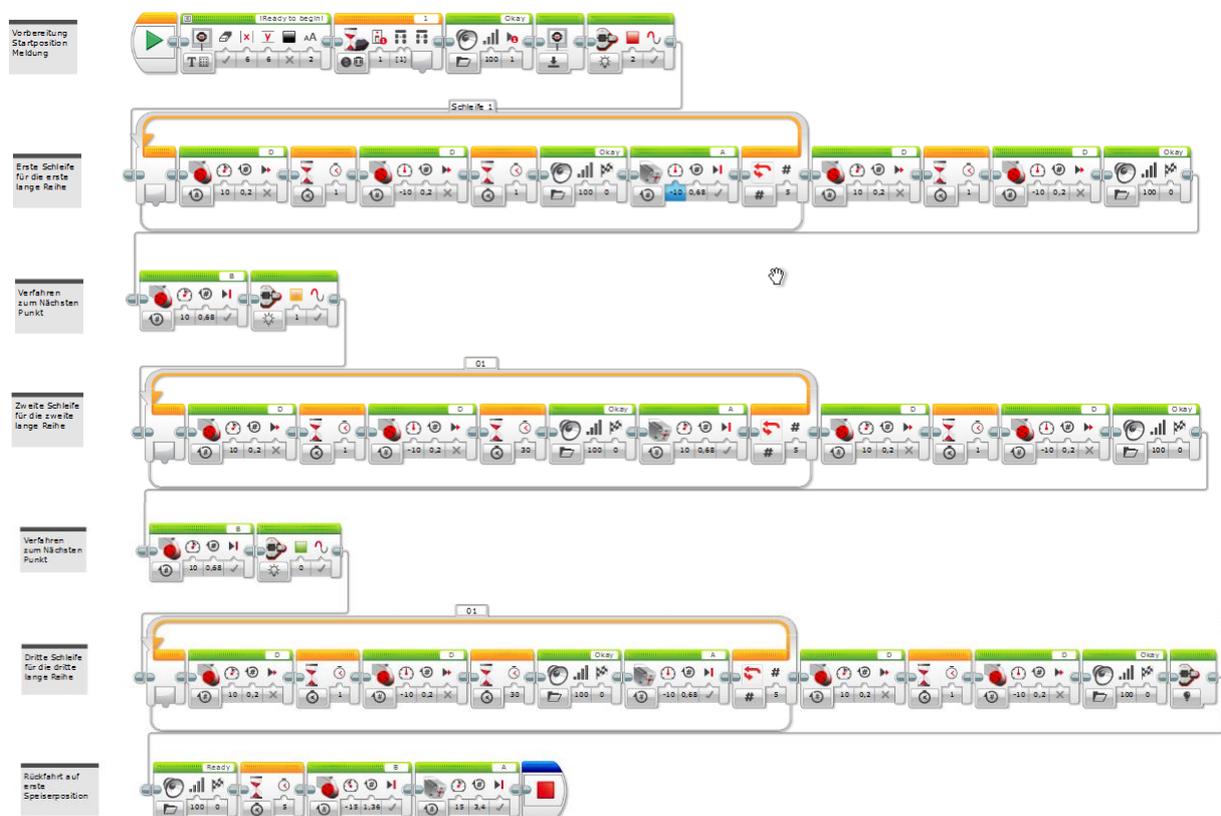


Abbildung 6 Schema d. Steuerung d. Macaron-Speise-Maschine

Während des Ablaufs helfen verschiedenen Töne zu erkennen, bei welchem Schritt sich die Maschine grade befindet.

Die Werte für die Motorsteuerungen waren für den XY-Tisch ganz einfach aus Radumfang und Verfahrweg zu berechnen (=Umdrehungszahl), aber für den Speiser wurden erst einmal Dummywerte eingesetzt und dann in Versuchen mit dem Probierteig gute Werte für Umdrehungszahl, Geschwindigkeit und Haltezeiten festgelegt, da diese von der Konsistenz des Teigs und der Speiseröffnung abhängen.

Weil beide Bauteile von demselben EV3-Stein gesteuert werden, ist die Synchronisation, die zeitliche Abstimmung, im Gegensatz zu der Justage, der räumlichen Abstimmung, kein Problem.

Versuchsdurchführung & Geräteoptimierung

Für die Durchführung der Speiseversuche habe ich in mehreren Versuchen ein einfaches Rezept für einen Probierteig herausgefunden, der eine ähnliche Konsistenz wie der „echte“ Macaron-teig hat. Ich habe den echten nicht verwendet, da ich erwartet habe, nicht gleich alles backen zu können und nicht die hochwertigen Lebensmittel verschwenden wollte. Ich habe 300g Weizenmehl (550er) mit 400ml Wasser angerührt und nach mindestens 20min ausquellen lassen einen Teig bekommen, der auch nach längerer Zeit, über den ganzen Tag hinweg, noch gut und mit gleichen Eigenschaften zu benutzen war.

Nun begann ich mit den Experimenten und habe direkt beim ersten Trockenlauf der beiden Bauteile ein Probleme festgestellt, das ich nicht erwartet hatte: das **Stabilitätsproblem**.

Der Tisch war nicht so stabil, wie ich dachte. Die Räder liefen nicht grade auf den Zahnstangen und deshalb fielen die oberen Rahmen herunter. Auch gab es keinen guten Platz für den Steuerstein, so daß die unflexiblen NXT-Kabel auf Spannung waren und die Rahmen erst recht auseinanderfielen. Ich habe das Problem mit einem Metallbauermeister besprochen und von ihm einen Metallunterlagsrahmen erbeten, der meinen unteren Rahmen hält, die unteren Räder da drauf außen begrenzt und den Stein unter der Maschine lagert [\[Abb.7\]](#):



Die oberen Räder habe ich durch eine doppelte Wegbreite aufgehalten. Nun läuft der XY-Tisch sehr stabil und gleichmäßig.

Nun kam das nächste Problem: das **Kabelproblem**. Der Aufbau war jetzt so hoch geworden, dass ich mit meinen Kabeln nicht mehr alle drei Motore ohne große Spannungen mit dem Stein verbinden konnte. Die Kabel sind zum einen nicht lang genug, aber auch viel zu unflexibel. Längere NXT-Kabel sind bei Lego zu bekommen, aber die sind genauso unflexibel, wie die kurzen. Es gibt Internetforen zu Lego-NXT und –EV3, wo erklärt wird, wie man sich flexible Kabel aus alten, in 6 Adern geteilten Telefon-Flachbandkabeln selber bauen kann [12]. Dazu braucht man aber die speziellen Stecker der Legoreihe, die zwar vom Stecker her Standard-RJ12 sind, aber die Fixierlasche ist auf der falschen Seite, man braucht also RJ12*. Die sind in Europa extrem schwer zu bekommen [14], obwohl sie in den USA Standard sind. Ich habe dann bei einem Elektriker gelernt, aus den Steckern und Telefonkabeln selber NXT-Kabel zu bauen. Mit den neuen, flexiblen Kabeln klappt nun alles prima und ich konnte die letzten Justage-Messungen zwischen Tisch und provisorischem Speiser machen.

Diese brauchte ich für den Bau des **endgültigen Speisergestells** (Kapitel „Optimierung Speisergestell“), den mein Metallbau-Berater für mich durchführen wird, da ich diesen Bereich seiner Firma aus Sicherheitsgründen nicht betreten darf. Wegen der Schließung über die Weihnachtsferien geht das leider erst in den kommende Tagen. Aber da der provisorische Speiserhalter gut funktioniert, kann ich meine Versuche auch ohne das endgültige Gestell, das ich dann ab dem Regional-Wettbewerbstag zeigen kann, durchführen.

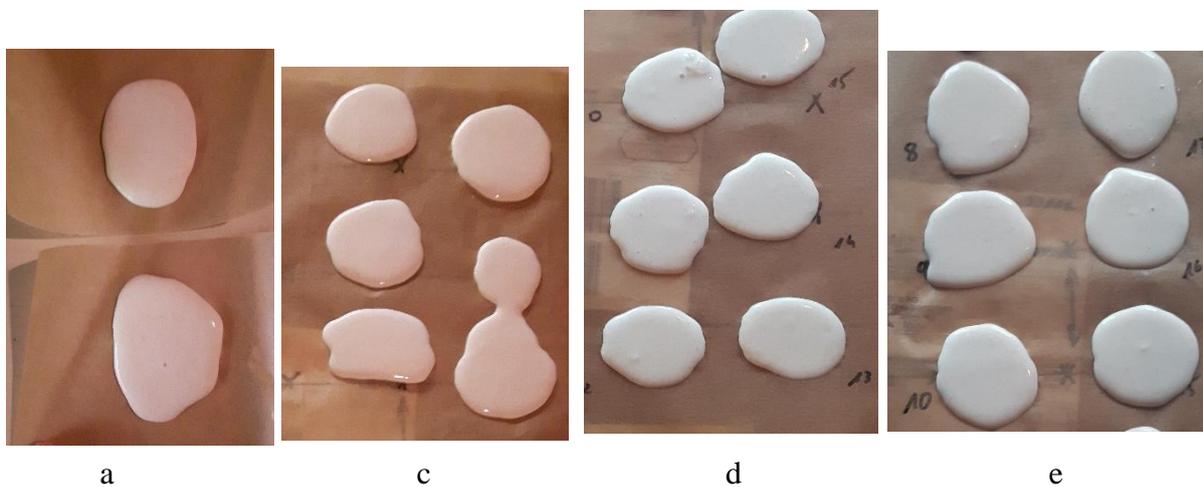
Nun habe ich die Werte für die Motorensteuerung des Speisers ausprobiert, bis einzelne, nicht zu große Teigflecken dosiert wurden. An dieser Stelle habe ich beschlossen, den Speiser viel voller zu füllen, als für ein Blech Macarons nötig gewesen wäre. Hätte ich das nicht getan, hätte ich durch den immer kleiner werdenden Teigdruck Probleme bekommen, die Speiseröffnungszeiten so einzustellen, daß immer noch die gleiche Menge Teig ausfließt.

Die erste Messreihe ergab trotzdem sehr ungleichmäßige Teigflecken. Sie waren unterschiedlich groß und sehr unregelmäßig. Man konnte am unteren Ende des Trichterrohres sehen, dass der Teig nicht glatt in einem Strahl herauskam, sondern an den Innenwänden ungleichmäßig herabtropfte. Er lief und tropfte auch noch sehr lange nach [Reihe 8b].

Ich habe dann eine Patisserie-Tülle von dem Spritzbeutel in das Trichterrohr gesetzt, damit die Öffnung kleiner wird. Diese Messreihe war schon viel besser [Reihe & Abb.8c]. Die Flecken waren etwas gleichmäßiger. Aber die Tülle wurde öfters hochgezogen, wahrscheinlich von einem Unterdruck durch das Auslaufen des Teigs unter dem Tischtennisball.

Der Tischtennisball schließt also zu weit oben im Trichter und ich brauchte eine kleinere Kugel zum Verschließen tiefer im Trichterrohr. Dazu habe ich eine Kugel aus einer Computermaus genommen und mit Bohrer und Gewindeschneider den Nadelmetallstab eingebaut [Abb.9b].

Außerdem habe ich die Tülle in dem Trichterrohr festgeklebt. Diese Messreihe [Reihe & Abb.8d] war schon sehr gut. Die Teigflecken waren sehr gleichmäßig und rund. Aber ich wollte es ganz genau haben und habe deshalb statt der Kugel einen kleinen Plastikkegel aus einem alten Baukasten an die Nadel geschraubt. Der passt so genau in die Spitze der Tülle, das kein Platz mehr dazwischen bleibt und der Teig fast herausgeschoben wird, statt einfach von selbst auszulaufen. Auch diese Messreihe [Reihe & Abb.8e] war sehr gut, so dass ich ohne Statistik noch keinen Unterschied zu der letzten Reihe mit der kleinen Kugel sehen konnte. Leider verliefen die Flecken auf dem feucht werdenden Backpapier schnell, so daß die Photos etwas weniger gut aussehen, als die frischen Flecken. Ein Teilversuch auf einer festen, nicht abgedeckten Platte zeigt die echte Rundheit der nach Ansicht besten Versuchsreihe [Abb.9a]. Die letzte Messreihe war dann mein Handversuch mit dem Spritzbeutel [Reihe & Abb. 8a]. Wie leider erwartet, war der nicht ganz so gut, wie meine Speiserversuche.



Teigflecken mit den verschiedenen Verschlüssen



Abbildung 9: a) Teigflecken mit Kegel auf fester Platte b) Speiserverschlüsse

Ergebnisse & Diskussion

Am Ende meiner Speiseversuche hatte ich 90 Messpunkte aus 5 Messreihen, vier von meiner Maschine (B-E) und eine Vergleichsreihe mit der Hand dosiert (A).

Daten	B	C	D	E	A
	Tischtennisball ohne Tülle	Tischtennisball mit loser Tülle	Mausball mit fester Tülle	Kegel mit fester Tülle	Hand mit Dressierbeutel
1	11,2	5	4,7	6	7,1
2	9,9	4	6,1	6,2	6,5
3	8,9	8,8	6	6,9	8,3
4	5,5	5,3	4,6	7,5/6,5*	7,8
5	9,3	6,1	5	5,9	6,0
6	6,8	4,3	6	5,2	5,2
7	6,8	4	5,1	6,2	6,4
8	5,7	8,5	6	5,7	6,2
9	6	4,2	6,2	5,8	6,7
10	5,3	9,2	5,6	5,5	5,9
11	8,8	3,7	5,4	6,8	7,2
12	9,4	8,3	5,8	6,3	7,6
13	6,7	6,3	5,2	6,8	7,7
14	9,7	6,8	5,9	6,8	7,5
15	8,3	7	5,7	6,2	7,0
16	10,7	3,7	5,5	6,6	7,1
17	7,7	6,3	5,3	6,2	6,8
18	7,9	9,5	5,3	5,9	6,4

Tabelle 1: Messdaten Gewicht [g]

*unsicherer Messwert: 2 Personen haben unterschiedlich abgelesen: ausgelassen

Damit war der Bau der Maschine schon einmal erfolgreich, da sie funktioniert und auch den Einbau verschiedener Ausrüstung erlaubt, auch wenn die Programmwerte für die Motorensteuerung immer angepaßt werden mussten.

An den Messwerten erkennt man, dass aber nicht mit jedem Speiser, bzw. jedem Speiserverschluß ein Ergebnis erreicht wurde, das besser war, als das Handwerk. Nur die Verschlüsse, die den Trichter sehr weit unten im Auslaufrohr und möglichst mit kleinem Volumen unter dem Verschluss verschlossen, brachten das gewünschte Ergebnis, dass die Maschine bessere Macarons aufspeist, als ich mit der Hand. Dies erkennt man an den statistischen Werten [Tab2], also den Unterschieden (Spannweiten) der größten und kleinsten Werte rund um den Mittelwert jeder Reihe und an der sichtbaren Rundheit der Teigflecken [Abb 8].

Daten	B	C	D	E	A
	Tischtennisball ohne Tülle	Tischtennisball mit loser Tülle	Mausball mit fester Tülle	Kegel mit fester Tülle	Hand mit Dressierbeutel
%ale					
Spannweit	73	94	29	28	45
Spannweite abs	5,9	5,8	1,6	1,7	3,1
größter abs	11,2	9,5	6,2	6,9	8,3
kleinster abs	5,3	3,7	4,6	5,2	5,2
Mittelwert	8,0	6,2	5,5	6,2	6,9
Q1	6,7	4,2	5,2	5,9	6,4
Median	8,1	6,2	5,6	6,2	6,9
Q3	9,4	8,0	6,0	6,6	7,4
Q1-Minimum	1,4	0,5	0,6	0,7	1,2
Q1	6,7	4,2	5,2	5,9	6,4
Median-Q1	1,4	2,0	0,3	0,3	0,5
Q3-Median	1,3	1,8	0,4	0,4	0,5
Maximum-Q3	1,8	1,5	0,2	0,3	0,9

Tabelle 2: Statistische Daten der Messreihen

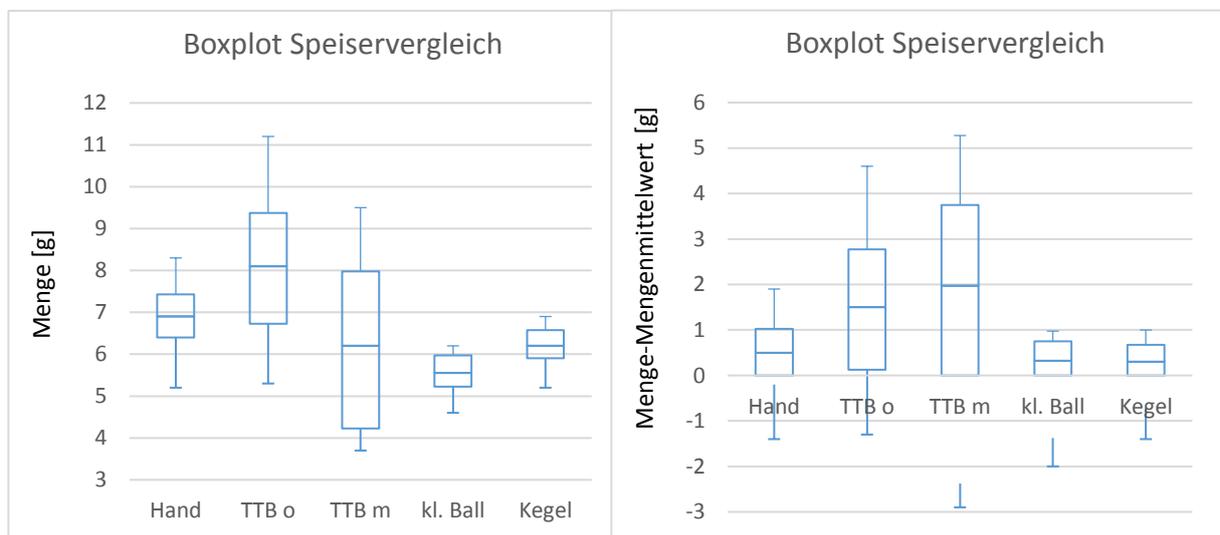


Abbildung 9: Boxplots Speiservergleich

a) Standard b) auf Mittelwert bezogen

Eine weitere statistische Auswertung zeigt die Box Plots [\[Abb.9\] \[13\]](#), um das Ergebnis noch deutlicher darzustellen und den kleinen Unterschied zwischen den beiden letzten, sehr guten Messreihen auch noch zu zeigen. Auch den Unterdruckeffekt bei dem Tischtennisballver-

schluss mit Tülle sieht man gut. Die Flecken sind zwar runder und gleichmäßiger von der Form her, aber ihre Größe ist sehr unterschiedlich durch das Verrutschen der Tülle.

Damit steht es also eher unentschieden zwischen Handwerk und Technik, wobei ich inzwischen glaube, dass es bei beiden Methoden bei mir noch Optimierungsmöglichkeiten gibt.

Optimierung Speisergestell

In der Zeit, nach der Einreichung der Arbeit für den Regionalwettbewerb, habe ich, wie angekündigt, mein Speisergestell verbessert.

Der Bau des endgültigen Speisergestells, den mein Metallbau-Berater für mich durchgeführt hat, da ich diesen Bereich seiner Firma aus Sicherheitsgründen nicht betreten darf, wurde hauptsächlich auf einer Kantbank gemacht. Das ergab das Grundgestell mit der Trichterhalterung. Darauf wurden Metallseitenteile mit kurzen Schienenstücken aus dem item-Konstruktionssystem [15] geschraubt, damit die Stellung des Speiserantriebs und der Speisernadel zum Trichter genau justiert werden kann [Abb.10]:



Das ganze Gestell steht auf vier höhenverstellbaren Schraubfüßen, um den Abstand zwischen Trichteröffnung und Dosierplatte einstellen zu können. Außerdem habe ich, um die Metallschale mit dem XY-Tisch genau unter die Trichteröffnung zu bringen, vier Justierschrauben an den Seiten angebracht.

Mit dem fertigen Aufbau habe ich dann die Macarons mit dem original Mandel-Baiserteig aufgespeist. Das ging gut, man muß nur sehr darauf achten, dass man den Macaronteig lange genug schlägt, damit er flüssig genug für den Speiser ist und beim Backen nicht wie normale Kekse, sondern eben mit der speziellen Macaron-Kante aufgeht. Das ist mir leider auch passiert [\[Abb.11\]](#):



Quellenangaben

Die Internetseiten wurden alle im März 2017 noch einmal aufgerufen, um sicher zu sein, dass sie noch aktuell sind.

- [1] http://www.hueckeswagen.de/start/news-einzelansicht/?no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=636&cHash=d13284a1c7b04bd50ffdbdf9df362e6b
- [2] <https://www.pflitsch.de/de/>
- [3] <http://www.pancakebot.com/>
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=qvIMLmdyqI4>
- [5] <https://feine-macarons.de>
- [6] José Maréchal, „Macarons“, AT-Verlag Baden & München, ISBN 978-3-03800-593-3, 5. Auflage, 2013
- [7] <http://www.proxxon.com/de/micromot/27110.php>
- [8] <http://www.heinzketchup.ch/de-de/products/limitededition/tomato-ketchup>
- [9] <http://www.langnese-honig.de/unsere-produkte/187.html>
- [10] <https://www.yumpu.com/de/document/fullscreen/55146659/westmark-katalog-2016>
(S.154)
- [11] http://www.roesle.de/epages/Store.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/Roesle/Products/xcs_5398/SubProducts/16229
- [12] <http://www.philohome.com/nxtplug/nxtplug.htm>
- [13] <http://www.sixsigmablackbelt.de>
- [14] <https://www.generationrobots.com/de/>
- [15] <http://www.item24.de/>

Unterstützerleistungen:

- Dr. Silke Wolff: Betreuerin der JuFo-AG am Erzbischöfliche St. Angela-Gymnasium
dokumentierende & beobachtende Unterstützung der Teigexperimente
„2. Paar Hände“ bei der Legokonstruktion
Hilfe und Erklärung bei der EDV (Excel/Word) & Internetnutzung
- Hubert Wolff: Berater und Anleiter bei der Kabelherstellung flexibler EV3-Kabel und der Speisenadeln
- Frank Bröker: Berater bei den Metallbauthemen und Unterstützer beim Bau der Metallteile